



中华人民共和国国家标准

GB/T 20801.2—2020
代替 GB/T 20801.2—2006

压力管道规范 工业管道 第 2 部分：材料

Pressure piping code—Industrial piping—Part 2: Materials

2020-11-19 发布

2021-06-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	3
4 一般规定	4
5 材料选用的基本原则	5
6 材料的使用限制	5
7 高温条件下的材料使用限制	10
8 低温条件下的材料使用限制	11
9 材料标记和质量证明	16
附录 A (规范性附录) 材料牌号和许用应力	18
附录 B (资料性附录) 材料的物理性能	50
附录 C (资料性附录) 基于风险的材料设计和选用	56
附录 D (资料性附录) 我国与国外材料标准及牌号对照表	75
参考文献	86



前 言

GB/T 20801《压力管道规范 工业管道》分为以下 6 个部分：

- 第 1 部分：总则；
- 第 2 部分：材料；
- 第 3 部分：设计和计算；
- 第 4 部分：制作与安装；
- 第 5 部分：检验与试验；
- 第 6 部分：安全防护。

本部分为 GB/T 20801 的第 2 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分代替 GB/T 20801.2—2006《压力管道规范 工业管道 第 2 部分：材料》，与 GB/T 20801.2—2006 相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

- 修改了规范性引用文件(见第 2 章,2006 年版的第 2 章)；
- 增加了低温降应力工况(见 3.2、8.1.3.3)；
- 修改了剧烈循环工况的定义(见 3.7,2006 年版的 3.6)；
- 增加了普通碳素结构钢的定义(见 3.8)；
- 增加了管线钢及其材料选用规定(见 6.3)；
- 修改了管子和对焊管件的使用限制(见 6.4,2006 年版的 6.3)；
- 增加了板焊管的使用要求(见 6.7)；
- 增加了高温蠕变工况下材料的使用限制(见 7.2.2.1、7.2.3.1、7.2.4.3)；
- 修改了“许用应力表”(见附录 A,2006 年版的附录 A)；
- 增加了“基于风险的材料设计和选用”(见附录 C)；
- 增加了“我国与国外材料标准及牌号对照表”(见附录 D)。

本部分由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)提出并归口。

本部分起草单位：全国化工设备设计技术中心站、中石化上海工程有限公司、国家市场监督管理总局特种设备安全监察局、中石化洛阳工程有限公司、中国寰球工程有限公司北京分公司、江阴市南方管件制造有限公司、江苏武进不锈股份有限公司。

本部分主要起草人：应道宴、尤子涵、徐锋、黄正林、岳进才、姜万军、马学娅、郭顺显、宋建新。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 20801.2—2006。

压力管道规范 工业管道

第2部分:材料

1 范围

GB/T 20801的本部分规定了压力管道元件用材料的基本要求,包括材料的选用、基于材料性能的使用限制、标记和质量证明方面的规定。

本部分适用于GB/T 20801.1范围界定的压力管道元件用材料的选择和使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
- GB/T 1220 不锈钢棒
- GB/T 1348 球墨铸铁件
- GB/T 2882 镍及镍合金管
- GB/T 3077 合金结构钢
- GB/T 3087 低中压锅炉用无缝钢管
- GB/T 3091 低压流体输送用焊接钢管
- GB/T 3098.1 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱
- GB/T 3098.6 紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱
- GB/T 3624 钛及钛合金无缝管
- GB/T 4334 金属和合金的腐蚀 不锈钢晶间腐蚀试验方法
- GB/T 4437.1 铝及铝合金热挤压管 第1部分:无缝圆管
- GB/T 5310 高压锅炉用无缝钢管
- GB/T 6479 高压化肥设备用无缝钢管
- GB/T 6614 钛及钛合金铸件
- GB/T 6893 铝及铝合金拉(轧)制无缝管
- GB/T 8163 输送流体用无缝钢管
- GB/T 9439 灰铸铁件
- GB/T 9440 可锻铸铁件
- GB/T 9711 石油天然气工业 管线输送系统用钢管
- GB/T 9948 石油裂化用无缝钢管
- GB/T 12228 通用阀门 碳素钢锻件技术条件
- GB/T 12229 通用阀门 碳素钢铸件技术条件
- GB/T 12230 通用阀门 不锈钢铸件技术条件
- GB/T 12771 流体输送用不锈钢焊接钢管
- GB/T 12778 金属夏比冲击断口测定方法
- GB/T 13295 水及燃气用球墨铸铁管、管件和附件
- GB/T 13401 钢制对焊管件 技术规范

GB/T 20801.2—2020

- GB/T 14976 流体输送用不锈钢无缝钢管
- GB/T 16253 承压钢铸件
- GB/T 18984 低温管道用无缝钢管
- GB/T 20801.1—2020 压力管道规范 工业管道 第1部分:总则
- GB/T 20801.3—2020 压力管道规范 工业管道 第3部分:设计和计算
- GB/T 20801.4—2020 压力管道规范 工业管道 第4部分:制作与安装
- GB/T 20801.5—2020 压力管道规范 工业管道 第5部分:检验与试验
- GB/T 20801.6—2020 压力管道规范 工业管道 第6部分:安全防护
- GB/T 21832(所有部分) 奥氏体-铁素体型双相不锈钢焊接钢管
- GB/T 21833 奥氏体-铁素体型双相不锈钢无缝钢管
- GB/T 25137 钛及钛合金锻件
- GB/T 26027 铝及铝合金大规格拉制无缝管
- GB/T 26030 镍及镍合金锻件
- GB/T 26057 钛及钛合金焊接管
- GB/T 26058 钛及钛合金挤压管
- GB/T 27684 钛及钛合金无缝和焊接管件
- GB/T 29168.1 石油天然气工业 管道输送系统用感应加热弯管、管件和法兰 第1部分:感应加热弯管
- GB/T 29168.2 石油天然气工业 管道输送系统用感应加热弯管、管件和法兰 第2部分:管件
- GB/T 29168.3 石油天然气工业 管道输送系统用感应加热弯管、管件和法兰 第3部分:法兰
- GB/T 30059 热交换器用耐蚀合金无缝管
- GB/T 31032 钢质管道焊接及验收
- GB/T 32964 液化天然气用不锈钢焊接钢管
- HG/T 20537.3 化工装置用奥氏体不锈钢焊接钢管技术要求
- HG/T 20537.4 化工装置用奥氏体不锈钢大口径焊接钢管技术要求
- HG/T 20634 钢制管法兰用紧固件(Class 系列)
- JB/T 5263 电站阀门铸钢件技术条件
- JB/T 7248 阀门用低温钢铸件技术条件
- NB/T 47008 承压设备用碳素钢和合金钢锻件
- NB/T 47009 低温承压设备用合金钢锻件
- NB/T 47010 承压设备用不锈钢和耐热钢锻件
- NB/T 47013.2—2015 承压设备无损检测 第2部分:射线检测
- NB/T 47013.3—2015 承压设备无损检测 第3部分:超声检测
- NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定
- NB/T 47028 压力容器用镍及镍合金锻件
- NB/T 47029 压力容器用铝及铝合金锻件
- SY/T 5037 普通流体输送管道用埋弧焊钢管
- YB/T 4173 高温用锻造镗孔厚壁无缝钢管
- ASTM A333 低温用无缝及焊接钢管(Specification for Seamless and Welded Steel Pipe for Low—Temperature Service)
- ASTM A671 常温及低温用电熔焊钢管(Specification for Electric-Fusion—Welded Steel Pipe for Atmospheric and Lower Temperatures)
- ASTM A691 高温高压用碳钢及合金钢电熔焊钢管(Specification for Carbon and Alloy Steel Pipe, Electric Fusion Welded for High Pressure Service at High Temperatures)

ASTM B361 铝及铝合金焊接管件(Standard Specification for Factory Made Wrought Aluminum and Aluminum Alloy Welding Fittings)

ASTM B366 镍及镍合金管件(Standard Specification for Factory Made Wrought Nickel and Nickel Alloy Fittings)

ASTM B444 镍铬钼铌合金(UNS N06625 和 UNS N06852)和镍铬钼硅合金(UNS N06219)管 [Standard Specification for Nickel-Chromium-Molybdenum-Columbium Alloys (UNS N06625 and UNS N06852)and Nickel-Chromium-Molybdenum-Silicon Alloy(UNS N06219)Pipe and Tube]

ASTM B619 镍及镍钴合金焊接管(Standard Specification for Welded Nickel and Nickel Cobalt Alloy Pipe)

ASTM B622 镍及镍钴合金无缝管(Standard Specification for Seamless Seamless Nickel and Nickel Cobalt Alloy Pipe and Tube)

3 术语和定义

GB/T 20801.1—2020、GB/T 20801.3—2020、GB/T 20801.4—2020、GB/T 20801.5—2020 和 GB/T 20801.6—2020 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

低温低应力工况 low temperature and low stress service

需同时满足下列各项条件的工况：

- a) 低温下的最大工作压力不大于常温下最大允许工作压力的 30%；
- b) 管道由压力、重量及位移产生的轴向拉应力总和(计算位移应力时,不计入应力增大系数)不大于材料常温许用应力值的 30%，且不大于 50 MPa。

注：直管和对焊管件类元件的最大允许工作压力按 GB/T 20801.3—2020 公式计算或型式试验确定；法兰、阀门类元件的最大允许工作压力按相应标准规定的常温压力额定值选取。

3.2

低温降应力工况 lower temperature and lower stress service

需同时满足下列各项条件的工况：

- a) 低温下的最大工作压力不大于常温下最大允许工作压力的 80%；
- b) 管道由压力、重量及位移产生的轴向拉应力总和(计算位移应力时,不计入应力增大系数)不大于材料常温许用应力值的 80%。

3.3

电阻焊焊管 electric-resistance welded pipe; ERW

以管子(带卷)本身作为电流回路,利用电阻加热、在压力作用下连续对接焊接的管子。

3.4

电熔焊焊管 electric-fusion welded pipe; EFW

采用自动电弧焊或手工电弧焊,在预成型的坯料上纵向对接焊成的管子。

3.5

板焊管 plate welded pipe

以平板板材预成型为管状,带有一条或两条纵向直焊缝的电熔焊焊管。

3.6

质量证明文件 inspection certificate

材料质量证明(检验文件)的一种形式。由制造单位生产部门以外的独立授权部门或人员,按照标准及合同的规定,按批在交货产品上(或取样)进行检验和试验,并注明结果的检验文件。

注：制造单位质量证明书由独立于生产部门的制造厂检验部门签署并批准生效。法律法规有规定的或业主要求的,由法定检验检测机构或第三方检验检测机构出具监督检验证明。

3.7

剧烈循环工况 severe cyclic conditions

发生以下情况之一的工况：

- a) 管道系统中的管子、管道元件或接头中的位移应力范围 S_E [按 GB/T 20801.3—2020 式(39)计算] 超过许用应力范围 S_A [按 GB/T 20801.3—2020 式(34)或式(35)计算] 的 0.8 倍, 同时当量循环次数 N [按 GB/T 20801.3—2020 式(37)计算] 超过 7 000;
- b) 设计人员根据经验判定的其他具有相同效应 [位移应力范围 S_E 接近许用应力范围 S_A , 且许用应力范围折减系数 f [按 GB/T 20801.3—2020 式(36)计算或通过图 12 查得] 接近 1.0] 的工况。

3.8

普通碳素结构钢 general carbon structural steels

GB/T 700 中产品质量等级不高于 A 级的碳素钢。

3.9

管线钢 pipeline steels

长输管道用高屈强比碳锰钢。

注：包括 GB/T 9711、GB/T 29168.1、GB/T 29168.2、GB/T 29168.3 中钢级不低于 L290/X42 的电阻焊焊管、无缝钢管、板焊管、感应弯管、对焊管件、法兰锻件等。

3.10

产品质量等级 product specification level; PSL

表征 GB/T 9711 等管线钢产品质量的级别, 其缩略语后缀数字代表不同的质量等级。

4 一般规定



4.1 材料选用

业主或设计者应根据具体使用条件 (包括制造、制作安装、介质、操作情况、工作环境和试验等) 以及本部分规定的材料使用要求和限制, 考虑材料的损伤风险, 选用合适的管道组成件材料。本部分未包括焊接、非金属等的材料要求。

4.2 材料和技术要求

4.2.1 附录 A 的表 A.1 和表 A.2 规定了管道组成件材料的牌号、许用应力和使用范围等要求, 用于管道组成件的材料应符合表 A.1 和表 A.2 所列材料标准的要求。

材料的物理性能参数参见附录 B。常用管道材料的选用、损伤风险以及相应的材料设计要求和工程措施参见附录 C。

4.2.2 除表 A.1 和表 A.2 所列的材料外, 下列材料可用于管道组成件, 但应符合本部分对相应材料的要求和使用限制：

- a) 表 A.1 和表 A.2 列入的工业管道适用材料标准的其他牌号材料；
- b) 材料符合已公布的材料标准, 包括化学成分、物理性能、力学性能、制造方法和工艺、热处理和质量控制等, 并不低于表 A.1 和表 A.2 列入的相应材料标准要求；
- c) GB/T 20801.3—2020 表 13 列入的管道组成件标准适用材料；
- d) 附录 D 所列与表 A.1 和表 A.2 所列材料对应的国外标准材料。

4.2.3 牌号不明的材料不得应用于管道组成件。

4.2.4 回收的材料不得应用于管道组成件。

4.2.5 其他材料的选用应经过具有相应资质的机构技术鉴定及评审认可。

5 材料选用的基本原则

- 5.1 受压元件(螺栓除外)用材料应有足够的强度、塑性和韧性,在最低使用温度下应具备足够的抗脆断能力。当采用延伸率低于14%的脆性材料时,应采取必要的安全防护措施。
- 5.2 选用的材料应具有足够的稳定性,包括化学性能、物理性能、耐蚀和耐磨性能、抗疲劳性能和组织稳定性等。
- 5.3 选用材料时,应考虑材料在可能发生的明火、火灾和灭火条件下的适用性以及由此而带来材料性能变化和次生危害。
- 5.4 选用的材料应适合相应的制造、制作和安装,包括焊接、冷热加工及热处理等方面的要求。
- 5.5 当几种不同的材料组合使用时,应考虑可能产生的不利影响。
- 5.6 材料应具备可获得性和经济性。

6 材料的使用限制

6.1 球墨铸铁、灰铸铁和可锻铸铁

6.1.1 球墨铸铁

- 6.1.1.1 球墨铸铁用于管道组成件时,其延伸率应不低于15%,使用温度应不高于350℃,但应高于-20℃; GB/T 20801.3—2020 表13所列球墨铸铁管道元件的使用限制应符合 GB/T 13295的相应规定。
- 6.1.1.2 除用于GC3级管道外,球墨铸铁应符合 GB/T 1348的冲击性能要求,压力额定值应不大于5.0 MPa。
- 6.1.1.3 球墨铸铁不得用于剧烈循环工况。
- 6.1.1.4 除应符合6.1.1.1、6.1.1.2、6.1.1.3的要求外,球墨铸铁管、管件、附件、管法兰、阀门的适用压力-温度额定值还应符合 GB/T 20801.3—2020 表13相应标准的规定。
- 6.1.1.5 制造、制作、安装过程中不得焊接。

6.1.2 灰铸铁和可锻铸铁

- 6.1.2.1 表A.1所列的灰铸铁和可锻铸铁用于管道组成件时,应符合下列规定:
- 灰铸铁管道组成件的使用温度应不低于-10℃且不高于230℃,压力额定值应不大于2.0 MPa;
 - 可锻铸铁管道组成件的使用温度应不低于-20℃且不高于300℃,压力额定值应不大于2.0 MPa;
 - 灰铸铁和可锻铸铁管道组成件不得用于GC1级管道或剧烈循环工况;
 - 灰铸铁和可锻铸铁管道组成件用于GC2级管道时,其使用温度应不高于150℃,最高允许工作压力应不大于1.0 MPa;
 - 应采取防止过热、急冷急热、振动以及误操作等安全防护措施;
 - 制造、制作、安装过程中不得焊接。
- 6.1.2.2 除符合6.1.2.1的要求外,灰铸铁和可锻铸铁管、管件、管法兰、阀门的适用压力-温度额定值还应符合 GB/T 20801.3—2020 表13相应标准的规定。

6.2 碳素结构钢

碳素结构钢的使用限制应符合下列各项规定:

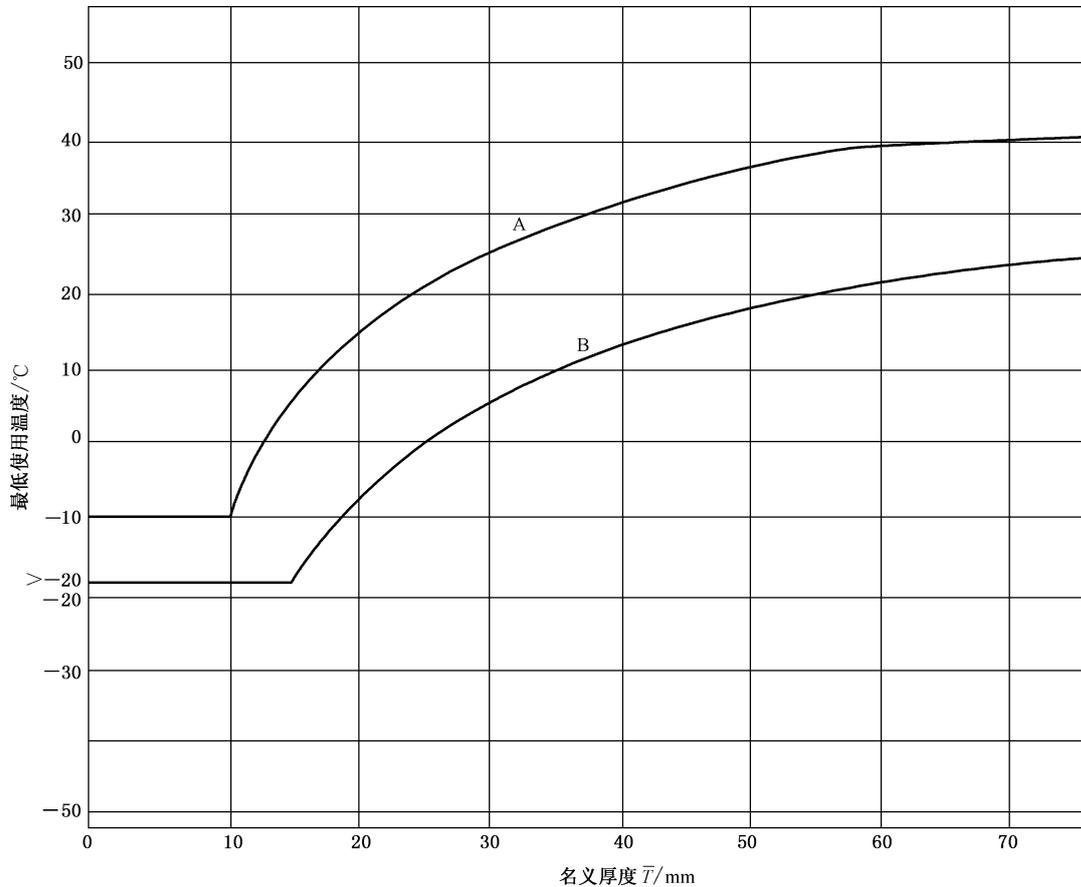
- 不得用于GC1级管道组成件;

- b) 选用 Q215A、Q235A 等 A 级镇静钢时,设计压力应不大于 1.6 MPa,设计温度应不高于 350 °C 且不低于图 1 曲线 A(或表 1)所示温度,介质限于非可燃及非有毒流体;
- c) 用于焊接的管道组成件,含碳量不得大于 0.30%。选用沸腾钢和半镇静钢时,厚度应不大于 12 mm;选用 A 级镇静钢时,厚度应不大于 16 mm。

表 1 碳钢(包括碳锰钢)免除冲击试验的最低使用温度

单位为摄氏度

名义厚度 mm	6	8	10	12	14	15	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
图 1 曲线 A	-10	-10	-10	-3.2	2.1	4.2	5.9	9.7	13.4	16.4	18.5	20.8	23.3	24.9	—	—	—	—	—
图 1 曲线 B	>-20	>-20	>-20	>-20	>-20	>-20	-16.4	-11.7	-7.7	-4.3	-1.4	1.2	3.3	5.4	6.8	8.3	9.2	10.5	11.9



最低使用温度/厚度组合位于相应曲线或以上者,可免除冲击试验,位于曲线以下者,应进行冲击试验(低温低应力工况、低温降应力工况及小截面除外)。

碳钢(包括碳锰钢)使用于 GC3 级管道时,可免除冲击试验。

注 1: A、B 类材料的分类见表 A.1。

注 2: 图示名义厚度系指焊接部位的厚度;对接焊接厚度较小侧;支管与主管的角接头按支管厚度;对法兰按锥颈小端厚度;非焊接部位按 1/4 计。

图 1 碳钢(包括碳锰钢)免除冲击试验的最低使用温度

6.3 管线钢

6.3.1 表 A.1 列入了包括 GB/T 9711 的长输管道用碳钢和管线钢钢管、对焊管件和法兰锻件,如表 2 所示。

表 2 长输管道用碳钢和管线钢钢管、对焊管件和法兰锻件

材 料		碳 钢	管 线 钢
GB/T 9711 钢管	电阻焊焊管	L210/A(PSL1),L245/B(PSL1)	L290/X42~L450/X65(PSL2)
	无缝钢管	L245/B(PSL1),L245/B(PSL2)	L290/X42~L555/X80(PSL2)
	板焊管	L245/B(PSL1),L245/B(PSL2)	L290/X42~L555/X80(PSL2)
GB/T 29168.2 对焊管件		—	L290/X42~L555/X80(PSL2)
GB/T 29168.3 法兰锻件		—	L290/F42~L555/F80(PSL2)

6.3.2 管线钢的产品质量等级(PSL)应满足如下要求:

- GB/T 9711 长输管线用钢管有 PSL1 及 PSL2 两个产品质量等级。
- PSL2 的产品质量等级较高,且有韧性要求。采用 PSL2 时,用户应根据最低使用温度提出冲击试验温度要求,通常冲击试验温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$;低于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,应供需双方协商,用户若未提出冲击试验温度要求,供方按 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 执行。
- GB/T 29168 长输管线用弯管、对焊管件、法兰(锻件)仅有 PSL2 产品质量等级,其冲击试验要求与上述 GB/T 9711 长输管线用管 PSL2 产品质量等级相同。
- 表 2 所列管线钢的最高使用温度应不高于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。许用应力按表 A.1 的规定。

6.3.3 表 2 所列 PSL1 碳钢的最低使用温度按图 1 曲线 B 的规定;PSL2 的碳钢和管线钢最低使用温度应不低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且应符合相应温度下材料标准规定的冲击试验要求。

6.3.4 L360/X52 及以下钢级的管线钢和碳钢的焊接工艺评定按 NB/T 47014 的规定;钢级高于 L360/X52 管线钢的焊接工艺评定按 NB/T 47014 或 GB/T 31032 的规定,但应按每个钢材生产厂的每个钢级分别评定。

6.3.5 GB/T 9711 产品和管线钢钢管及对焊管件的使用限制应符合表 2 的规定。

6.4 管子和对焊管件

6.4.1 碳钢、管线钢和奥氏体不锈钢钢管及其对焊管件的使用限制应符合表 3 的规定。

表 3 碳钢、管线钢和奥氏体不锈钢钢管及对焊管件

标 准	材料(牌号)	制 管 工 艺	使 用 限 制
GB/T 3091	碳素结构钢	电阻焊焊管	a)按 6.2 规定,且设计压力不高于 1.6 MPa; b)不得用于剧烈循环工况; c)不得用于 GC1 级管道
		电熔焊焊管	
SY/T 5037	碳素结构钢	电熔焊焊管	
GB/T 13401	CF370	无缝及焊接对焊管件	
GB/T 9711(PSL1)	L210	电阻焊焊管	a)不得用于 GC1 级管道;
	L245		b)不得用于剧烈循环工况; c)设计压力不高于 4.0 MPa

表 3 (续)

标准	材料(牌号)	制管工艺	使用限制
GB/T 9711(PSL2)	L290/X42~ L450/X65	电阻焊焊管	a)不得用于 GC1 级(毒性)管道或气体管道; b)不得用于剧烈循环工况
GB/T 8163 GB/T 3087 GB/T 9711(PSL1)	碳钢	无缝管	不得用于 GC1 级管道
GB/T 13401	CF415,CF485	无缝及焊接对焊管件	
GB/T 12771 HG/T 20537.3	奥氏体不锈钢	电熔焊焊管(不添加填充金属)及其对焊管件	a)不得用于 GC1 级管道; b)不得用于剧烈循环工况
HG/T 20537.4		纵缝未作射线检测的电熔焊焊管(添加填充金属)及其对焊管件	

6.4.2 剧烈循环工况下使用的钢管、有色金属管和对焊管件,应符合下列规定:

- a) 应采用表 A.1 所列无缝管或纵向焊接接头系数大于或等于 0.90 的电熔焊(EFW)焊管和板焊管,不得选用电阻焊(ERW)焊管以及未经射线照相检测的电熔焊焊管;
- b) 应采用无缝管件、纵向焊接接头系数不小于 0.90 的板制对焊管件和铸件质量系数不小于 0.90 的铸件。

6.5 碳钢和铬钼合金钢

6.5.1 用于焊接的碳钢、铬钼合金钢,含碳量应不大于 0.30%。

6.5.2 使用温度高于 455 °C 的 2¼Cr-1Mo 钢,焊缝金属的含碳量应不小于 0.05%。

6.5.3 铬钼合金钢焊管和管件的焊缝应进行 100%射线检测或超声检测,且符合 NB/T 47013.2—2015 规定的 II 级要求(RT)或 NB/T 47013.3—2015 规定的 I 级要求(UT)。铬钼合金钢焊管和管件焊缝的射线或超声检测应在焊后热处理后进行。

6.6 奥氏体不锈钢

6.6.1 低碳(含碳量≤0.08%)非稳定化不锈钢(如 06Cr19Ni10、06Cr17Ni12Mo2)在非固溶状态下(包括固溶后经热加工或焊接)不宜用于可能发生晶间腐蚀的环境,材料要求参见附录 C。

6.6.2 超低碳不锈钢在 425 °C 以上长期使用存在晶间腐蚀倾向,材料要求参见附录 C。

6.6.3 低碳/超低碳奥氏体不锈钢等双牌号钢,其常温机械性能应满足两个牌号中机械性能的较高值,化学成分应满足超低碳级的要求。使用温度不高于 538 °C 者,许用应力按低碳级选取,使用温度高于 538 °C 者,许用应力按超低碳级选取。

6.6.4 根据设计文件要求,奥氏体不锈钢可按 GB/T 4334 进行晶间腐蚀试验,也可按相关标准进行应力腐蚀试验或点腐蚀试验,试验方法、试样状态、抽样比例和合格指标应在设计文件中明确。

6.7 板焊管

6.7.1 板焊管应采用钢板纵卷成型,带有 1 条或 2 条纵向直焊缝。受钢板宽度限制,更大直径的板焊管可采用钢板横卷成型。除 GB/T 3091 及 SY/T 5037 外,板焊管的厚度负偏差应不大于 0.3 mm,板焊管的尺寸偏差按 GB/T 9711 等相关标准的规定。

6.7.2 钢管应采用电熔焊工艺制造,除 GB/T 3091 及 SY/T 5037 外,板焊管应为全焊透结构。碳钢、

管线钢、低温碳钢和镍钢、合金钢应采用双面埋弧焊或气体保护焊；不锈钢应采用包括加丝或不加丝的双面气体保护焊。

6.7.3 焊缝的化学成分应与母材接近或相当，其性能不低于母材的性能。GB/T 9711 PSL2 板焊管应进行不高于最低设计温度，且不低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冲击试验。对于要求进行冲击试验的钢管，应包括母材、焊缝及热影响区。

6.7.4 除 GB/T 9711 PSL2 板焊管外，要求进行低于或等于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击试验的低温碳钢板焊管应采用正火状态的钢板。厚度大于或等于 20 mm 的碳钢和低温碳钢板焊管，应进行焊后消除应力热处理；所有铬钼合金钢板焊管应进行焊后消除应力热处理；除业主或设计另有规定外，奥氏体不锈钢和双相不锈钢板焊管应进行焊后固溶处理。

6.7.5 除 GC3 级管道及 GB/T 3091、SY/T 5037 板焊管外，应对板焊管焊缝进行局部或 100% 射线或超声检测，且符合 GB/T 20801.5—2020 中 6.3.2 的相应规定。

6.7.6 剧烈循环工况下使用的焊管应采用添加填充金属的焊接工艺，并进行局部或 100% 射线或超声检测，且符合 GB/T 20801.5—2020 中 6.3.2 的相应规定。

6.8 铝及铝合金

6.8.1 铝及铝合金的力学性能与厚度、供货状态有关，表 A.1 所列性能及许用应力仅适用于相应标准的规定范围。

6.8.2 材料标准未规定抗拉及屈服强度者，本部分要求于采购合同中补充。

6.8.3 加工硬化状态材料的焊接结构，应采用相应牌号退火状态的许用应力；析出硬化状态材料的焊接结构，应采用相应牌号焊接状态的许用应力。

6.8.4 铝及铝合金管件的性能及许用应力与坯料、工艺及热处理状态有关，可参照相同牌号无缝管、焊管、板、棒、锻件的性能及许用应力。表 A.1 所列性能及许用应力为典型示例。

6.9 镍及镍合金

6.9.1 镍及镍合金的力学性能与加工、热处理状态有关，表 A.1 所列性能及许用应力仅适用于相应标准的规定范围。

6.9.2 镍及镍合金管件的性能及许用应力与坯料、工艺及热处理状态有关，可参照相同牌号无缝管、焊管、板、棒、锻件的性能及许用应力。表 A.1 所列性能及许用应力为典型示例。

6.9.3 625 镍基合金采用 ENiCrMo-3 或 ERNiCrMo-3 焊接的接头抗拉强度应不小于 758 MPa 。

6.9.4 625 镍基合金经 $538\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 760\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热履历可能致使常温韧性的降低和焊接区域的应力松弛裂纹，参见附录 C。

6.10 管道支承件材料

6.10.1 表 A.1 和表 A.2 所列标准、材料及许用应力也适用于管道支承件。

6.10.2 管道支承件材料的其他要求按 GB/T 20801.3—2020 第 8 章的规定。

6.11 低熔点金属

6.11.1 铅、锌等低熔点金属及其合金不得用于输送可燃介质的管道。

6.11.2 应防止铅、锌等低熔点金属在热处理、焊接或高温使用过程对奥氏体不锈钢及镍基合金的液体金属侵蚀，参见附录 C。

7 高温条件下的材料使用限制

7.1 材料使用温度上限

7.1.1 表 A.1 及表 A.2 规定了一般情况下材料的使用温度上限。

7.1.2 确定材料使用温度上限时应考虑使用介质和环境的影响。

7.2 高温材料的选用原则

7.2.1 一般要求

7.2.1.1 高温条件下长期使用的材料,应考虑组织或性能变化对材料使用可靠性的影响。

7.2.1.2 高温条件下长期使用的材料,应考虑因蠕变引起的过度变形、过大位移、材料组织和性能的劣化以及螺栓的应力松弛;典型金属材料的蠕变阈值温度见 GB/T 20801.3—2020 表 5,其他金属材料可参见附录 C。

7.2.1.3 高温条件下使用的材料,应考虑高温及化学腐蚀引起的材料损伤。

7.2.1.4 通过热处理强化的材料,如果长期在接近或高于回火温度下使用,应考虑材料强度降低的因素。

7.2.2 高温条件下碳钢及铬钼合金钢的使用

7.2.2.1 高温蠕变工况焊接接头高温强度降低系数 W 按 GB/T 20801.3—2020 中 4.2.7 的规定。

7.2.2.2 碳钢、碳锰钢、低温用镍钢的高温石墨化倾向以及铬钼合金钢的软化(珠光体球化)倾向参见附录 C。

7.2.2.3 铬钼合金钢的回火脆性敏感性参见附录 C。

7.2.3 高温条件下不锈钢的使用

7.2.3.1 高温蠕变工况(见 GB/T 20801.3—2020 的 3.2)不锈钢焊接接头高温强度降低系数 W 按 GB/T 20801.3—2020 中 4.2.7 的规定。

7.2.3.2 铁素体不锈钢、马氏体不锈钢和双相不锈钢的 475 °C 脆性敏感性参见附录 C。

7.2.3.3 铬镍奥氏体不锈钢的 σ 相脆化敏感性参见附录 C。

7.2.3.4 铝、铋、铌、镉、镓、铅、锰、锡、锌等低熔点金属及其化合物在高温下对奥氏体不锈钢的液体侵蚀(LME)参见附录 C。

7.2.3.5 表 A.1 低碳级(含碳量 $\leq 0.08\%$)奥氏体不锈钢高温使用时,应符合表 4 的附加要求。

表 4 低碳级奥氏体不锈钢高温使用的附加要求

低碳级奥氏体不锈钢代号	使用温度/°C	附加要求		
		母材含碳量	热处理状态	晶 粒 度
CF8	>425	≥ 0.04	>1 040 °C 快冷	—
CF8M,CF8C	>425	≥ 0.04	>1 095 °C 快冷	—
06Cr18Ni11Ti 06Cr18Ni11Nb	>538	≥ 0.04	>1 095 °C 快冷	平均晶粒度 7 级或更粗
06Cr19Ni10 06Cr17Ni12Mo2	>538	≥ 0.04	>1 040 °C 快冷	平均晶粒度 7 级或更粗
06Cr23Ni13 06Cr25Ni20	>538	≥ 0.04	>1 040 °C 快冷	平均晶粒度 6 级或更粗

7.2.4 高温条件下其他材料的使用

7.2.4.1 钛及钛合金不宜在 316 °C 以上的温度下使用。

7.2.4.2 镍及镍基合金的使用温度上限按表 5 的规定。

7.2.4.3 高温蠕变工况(见 GB/T 20801.3—2020 的 3.2)镍基合金焊接接头高温强度降低系数 W 按 GB/T 20801.3—2020 中 4.2.7 的规定。

表 5 镍及镍基合金的使用温度上限

单位为摄氏度

材 料	不含硫的环境			蒸汽	含硫环境	
	氧化	H ₂ 还原	CO还原		氧化	还原
镍 (N4、N6)	1 040	1 260	1 260	425	315	260
镍-铜 (NCu30)	540	1 100	815	370	315	260
镍-铬-铁 (NS312)	1 100	1 150	1 150	815	815	540
镍-铁-铬 (NS111、NS112)	1 100	1 260	1 150	980	815	540

8 低温条件下的材料使用限制

8.1 最低使用温度及冲击试验免除

8.1.1 一般规定(铸铁除外)

8.1.1.1 除 8.1.1.4、8.1.3、8.1.4、8.1.5 和 8.1.6 免除冲击试验的规定外,材料及其焊接接头应进行冲击试验。

8.1.1.2 材料及其焊接接头的冲击试验应按 8.2 的规定进行。

8.1.1.3 确定最低设计温度时,应考虑流体节流效应及环境温度的影响。

8.1.1.4 用于 GC3 级管道的碳钢材料可免除冲击试验。

8.1.2 铸铁

球墨铸铁、灰铸铁和可锻铸铁的最低使用温度应符合 6.1 的规定。

8.1.3 碳钢、低温钢、铬钼合金钢、铁素体不锈钢和双相不锈钢

8.1.3.1 碳钢、低温钢、铬钼合金钢、铁素体不锈钢和双相不锈钢的最低使用温度及冲击试验免除条件应符合表 6 和表 A.1 的规定。

8.1.3.2 材料的焊接工艺评定应符合表 8、表 11 和表 12 的规定。

8.1.3.3 当碳钢(包括碳锰钢)符合低温低应力或低温降应力工况时,其免于冲击试验的最低使用温度可以比 8.1.3.1 规定的更低,并应符合下列规定:

a) 符合低温降应力工况的碳钢(包括碳锰钢)免于冲击试验的材料最低使用温度降低量为 11 °C,且最低使用温度应不低於 -30 °C,但应符合下列规定:

1) 管道应经不低於 1.5 倍设计压力的水压试验;

2) 除公称壁厚小于或等於 13 mm 外,管道系统应对外加载荷(如维修载荷、冲击载荷、热冲

击载荷等)进行安全防护;

- 3) 低温降应力工况适用于 GC2 级管道以及环境气温不高于-20℃,但不低于-30℃地区的 GC3 级管道,且适用的碳钢材料中不包括碳素结构钢和螺栓材料,管道系统中不准许存在铁素体与奥氏体的异种金属焊接接头。

注:最低环境温度取历年来月平均最低气温的最低值。

- b) 符合低温低应力工况的 GC2 级管道,最低使用温度应不低于-104℃,且适用的碳钢材料中不包括碳素结构钢和螺栓材料,管道系统中不准许存在铁素体与奥氏体的异种金属焊接接头。

表 6 钢(奥氏体不锈钢除外)的最低使用温度和冲击试验

材料类别 (按低温性能区分)	最低使用温度/℃	免除冲击试验条件	冲击试验要求	
			材 料	制作、安装中的焊接
图 1 曲线 A ^a	-10	厚度小于或等于 10 mm。或厚度大于 10 mm,但设计温度高于或等于图 1 曲线 A 所示值	厚度大于 10 mm,且设计温度低于图 1 曲线 A 所示值时,应进行常温或设计温度(取较低者)下的冲击试验	a)焊缝及热影响区的冲击要求同“材料”栏要求。 b)冲击试验要求应包括在相应的焊接工艺评定中
图 1 曲线 B ^b	-104	低温低应力工况	免除	免除
	-46	小截面 ^c		
	-30	低温降应力工况: 厚度小于或等于 15 mm。或厚度大于 15 mm,且设计温度提高 11℃后高于或等于图 1 曲线 B 所示值。 非焊接件按厚度的 1/4 计	厚度大于 15 mm,且设计温度提高 11℃后仍低于图 1 曲线 B 所示值时,应进行常温或设计温度提高 11℃(取较低者)的冲击试验	a)焊缝及热影响区的冲击要求同“材料”栏要求。 b)冲击试验要求应包括在相应的焊接工艺评定中
	大于-20	厚度小于或等于 15 mm。或厚度大于 15 mm,且设计温度高于或等于图 1 曲线 B 所示值。非焊接件按厚度的 1/4 计	厚度大于 15 mm,且设计温度低于图 1 曲线 B 所示值时,应进行常温或设计温度(取较低者)的冲击试验	a)焊缝及热影响区的冲击要求同“材料”栏要求。 b)冲击试验要求应包括在相应的焊接工艺评定中
表 A.1 的 2.3 锻件和表 A.1 的 2.4 铸件	按表 A.1	全部免除	免除	如进行焊接,根据焊缝厚度,焊缝及热影响区按图 1 曲线 B“制作、安装中的焊接”栏要求
	-30	低温降应力工况	免除	如进行焊接,根据焊缝厚度,焊缝及热影响区按图 1 曲线 B“制作、安装中的焊接”栏要求
	-104	低温低应力工况	免除	免除

表 6 (续)

材料类别 (按低温性能区分)	最低使用 温度/℃	免除冲击试验条件	冲击试验要求	
			材 料	制作、安装中的焊接
低温钢 (表 A.1 中 3)	按表 A.1		a) 设计温度低于或等于 -20 ℃时应进行设计温度 下的冲击试验(材料、焊缝、 热影响区)。 b) 材料应符合相应低温钢 材料标准的全部要求	
	表 A.1 或 -46 ℃,取 较低值	小截面 ^c	免除	免除
	-104	低温低应力工况		
铬钼合金钢	-30	设计温度不低于左列最低使用温度时,可免除冲击试验要求; 低温低应力工况可使用至-104 ℃		
铁素体不锈钢	-30			
双相不锈钢	-50			
<p>^a 图 1 曲线 A 包括表 A.1 中下列碳钢: Q215A、Q235A 的板材以及板焊管、CF370 焊制管件; Q215A、Q235A 的 ERW 焊管; 用于 GC3 级管道时,见 8.1.1.4。</p> <p>^b 图 1 曲线 B 包括除脚注 a 外的其他表 A.1 所列碳钢(包括碳锰钢)。</p> <p>^c “小截面”系指材料由于厚度及截面形状限制,无法制备 2.5 mm×10 mm×55 mm 冲击试样的状况。</p>				

8.1.4 奥氏体不锈钢

8.1.4.1 奥氏体不锈钢的最低使用温度应符合表 A.1 的规定。

8.1.4.2 当使用温度低于或等于-20 ℃时,奥氏体不锈钢应进行低温冲击试验,但同时满足下列规定者,可免除低温冲击试验。

- 母材最低使用温度不低于-196 ℃、焊缝金属最低设计温度不低于-104 ℃和因材料截面尺寸限制无法制备 2.5 mm×10 mm×55 mm 冲击试样三个条件之一者;
- 材料含碳量不大于 0.10%且为固溶热处理状态;
- 焊缝填充金属含碳量不大于 0.10%。

8.1.5 镍、镍基合金、钛合金和铝合金

镍、钛、铝及其合金的最低使用温度应符合表 A.1 的规定,其免除冲击试验条件应符合表 7 的规定。

表 7 有色金属(镍和镍基合金、钛和钛合金、铝和铝合金)的最低使用温度

材料类别	最低使用温度/℃	冲击试验要求		更低使用温度
		材料	焊接接头	
镍及镍基合金	-200	全部免除	a)如焊缝金属成分符合母材规定,无额外要求。	设计应对材料、焊缝金属和热影响区在设计温度下进行相应的试验(包括延伸率、缺口拉伸/常规拉伸比较、冲击试验等)来确定其适用性
钛及钛合金	-60		b)如焊缝金属成分不符合母材规定,按右侧更低使用温度栏要求	
铝及铝合金	-270			

8.1.6 螺栓材料

8.1.6.1 螺栓材料的最低使用温度应符合表 A.2 的规定,符合下列条件者可免除冲击试验:

- a) 碳钢、合金结构钢标准紧固件;
- b) 奥氏体不锈钢标准紧固件;
- c) 0Cr18Ni9、0Cr17Ni12Mo2 及其应变硬化不锈钢紧固件(B8-2、B8M-2);
- d) 25Cr2MoV 钢紧固件;
- e) 配用螺母材料。

8.1.6.2 最低使用温度小于下列 a)和 b)所示温度,但不低于-104 ℃的 35CrMo 螺栓应进行低温冲击试验,但符合下列条件之一的 35CrMo 螺栓可免除低温冲击试验:

- a) 螺纹直径小于或等于 M64 且最低使用温度高于或等于-46 ℃者;
- b) 螺纹直径大于 M64 且最低使用温度高于或等于-40 ℃者。

8.2 冲击试验

8.2.1 母材的冲击试验

除符合 8.1 规定的免除冲击试验的材料外,母材均应按 8.2.3、8.2.4 和 8.2.5 的要求进行冲击试验。对于材料标准中有关冲击试验的规定符合上述要求者,应按材料标准进行冲击试验;对于材料标准未作冲击试验规定或规定不符合上述要求者,应提出冲击试验的附加要求。

8.2.2 焊接接头的冲击试验

焊接接头的冲击试验应符合下列规定:

- a) 焊接接头的冲击试验应在焊接工艺评定中进行;
- b) 焊接接头冲击试验的试件制备、试样位置及数量应符合表 8 的规定;
- c) 表 6 所列材料的焊接接头冲击试验应包括焊缝金属和热影响区,但奥氏体不锈钢的焊接接头冲击试验仅包括焊缝金属。

表 8 焊接接头冲击试验(制作、安装)

制备冲击试样的试件	试验的覆盖范围	试样位置及数量	冲击试验进行者
每一种焊接工艺、每种焊接材料型号、每种焊剂均要进行一套冲击试验。试样的热处理状态与完工管道相同(包括热处理温度、保温时间、冷却速度)	试件厚度为 T ,则可覆盖的厚度范围为 $T/2 \sim T+6 \text{ mm}$	焊缝金属(三个一组): a)试样横贯焊缝; b)缺口位于焊缝金属并垂直于接头表面; c)试样的一个表面尽可能接近接头表面。 热影响区(如需要,三个一组): a)缺口根部及其后的断口尽可能多地位于焊接接头的热影响区; b)其余同上	制作、安装

8.2.3 冲击试验方法

冲击试验方法应符合下列规定：

- 冲击试验方法应符合 GB/T 229 和 GB/T 12778 的规定。
- 标准冲击试样为 10 mm×10 mm×55 mm 夏比缺口冲击试样。
- 若因截面尺寸限制无法制备标准试样时,也可采用厚度为 7.5 mm、5.0 mm、2.5 mm 的小尺寸试样或尽可能宽的小尺寸试样。小尺寸试样的缺口宽度一般应不小于材料厚度的 80%。
- 试样缺口应沿厚度方向切取,三个试样为一组。

8.2.4 冲击试验温度

冲击试验温度应符合下列规定：

- 标准试样的冲击试验温度应不高于最低设计温度；
- 小尺寸试样的冲击试验温度的降低值应符合表 9 和表 10 的规定；
- 降低小尺寸试样的冲击试验温度仅适用于表 11 中以冲击吸收能量作为合格判据的状况,采用冲击断口侧向膨胀量作为合格判据的冲击试验温度应符合表 12 的规定。

表 9 冲击试验温度降低值

材料厚度 t /mm	冲击试样宽度/mm	冲击试验温度降低值 ΔT /°C
≥ 10	≥ 8	0
	< 8	ΔT_2^b
< 10	$\geq 0.8t$	0
	$< 0.8t$	$ \Delta T_1^a - \Delta T_2 $
^a ΔT_1 为材料厚度小于 10 mm 时的温度降低值(按表 10)。 ^b ΔT_2 为冲击试样宽度小于 10 mm 时的温度降低值(按表 10)。		

表 10 ΔT_1 和 ΔT_2

材料厚度或试样缺口宽度/mm	ΔT_1 、 ΔT_2 /°C
10(标准试样)	0
9	0
8	0
7.5(7.5 mm 试样)	3
7	4
6.67(2/3 宽试样)	5
6	8
5(5 mm 试样)	11
4	17
3.33(1/3 宽试样)	19
3	22
2.5(2.5 mm 试样)	28
注：可采用内插法。	

表 11 冲击试验的冲击吸收能量合格标准(母材、焊缝金属、热影响区)

材料类别	标准规定最小抗拉强度 R_m /MPa	标准试样冲击吸收能量/J	
		三个试样平均值	单个试样最低值
碳钢、合金钢($R_m < 655$ MPa)	≤ 450	18	14
	$> 450 \sim 515$	20	16
	$> 515 \sim < 655$	27	20
合金钢螺栓材料($\leq M52$)	≥ 655	27	20

^a 采用小尺寸试样时,冲击吸收能量合格标准按试样宽度的比例降低。

表 12 冲击试验的侧向膨胀量合格标准(母材、焊缝金属)

材料类别	最低使用温度/°C	冲击试验温度/°C	侧向膨胀量 ^a /mm
奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、双相不锈钢、 >M52且 $R_m \geq 655$ MPa 碳钢和合金钢螺栓材料	≥ -196	最低设计温度	0.38
	< -196	-196	0.46

^a 采用小尺寸试样时,侧向膨胀量合格标准与标准试样相同,且三个试样均应合格。

8.2.5 合格标准



冲击试验的合格标准应按照下列有关要求确定:

- a) 标准规定的材料最小抗拉强度小于 655 MPa 的碳钢、合金钢、低温钢以及螺纹直径小于或等于 M52 的螺栓材料,其冲击试验应符合表 11 的规定;
- b) 螺纹直径大于 M52 的螺栓材料和奥氏体不锈钢的冲击试样断口侧向膨胀量应符合表 12 的规定。

9 材料标记和质量证明

9.1 材料标记

9.1.1 材料标记应符合相应标准和合同的规定。

9.1.2 标记内容至少应包括制造厂标记以及材料(代号)名称,下列管道组成件的标记还应包括材料炉批号或代号:

- a) GC1 级管道用管道组成件;
- b) 按本部分要求进行冲击试验的管道组成件;
- c) 铬钼合金钢(螺栓材料除外)管道组成件;
- d) 用于高温条件下的奥氏体不锈钢(H 型)管道组成件;
- e) 镍及镍合金、钛及钛合金管道组成件。

9.1.3 材料应逐件标记,标记应清晰、牢固,公称直径小于或等于 DN40 的材料可采用标签或其他替代方法进行标记。

9.2 质量证明

材料的质量证明应符合下列规定：

- a) 材料应具有相应的质量证明文件；
- b) 质量证明文件应包括标准以及合同规定的检验和试验结果，且具有可追溯性；
- c) 未包括检验和试验结果的质量证明文件(合格证)仅限于 GC3 级管道组成件。



附 录 A
(规范性附录)
材料牌号和许用应力

A.1 许用应力

表 A.1 给出了符合本部分要求的材料牌号和许用应力。

A.2 螺栓许用应力

表 A.2 给出了符合本部分要求的螺栓材料牌号和许用应力。

A.3 纵向焊接接头系数

表 A.3 给出了表 A.1 所列管子与对焊管件的纵向焊接接头系数 Φ_w ，管子与对焊管件的纵向焊接接头系数应符合 GB/T 20801.3—2020 中的 4.2.5 和表 3 的规定。

A.4 铸件质量系数

表 A.4 给出了表 A.1 所列铸件的铸件质量系数 Φ_c ，铸件质量系数应符合 GB/T 20801.3—2020 中 4.2.6 和表 4 的规定。

A.5 表 A.1 许用应力使用说明

表 A.1 许用应力表的使用应符合下列要求：

- a) 表 A.1 中的许用应力未计入管子和对焊管件的纵向焊接接头系数、焊接接头高温强度降低系数以及铸件质量系数；焊接接头高温强度降低系数按 GB/T 20801.3—2020 中 4.2.7 的规定；
- b) 剪切、接触、压缩应力应符合 GB/T 20801.3—2020 中 4.2.4.5 和 4.2.4.4 的规定；
- c) 表 A.1 未列温度的许用应力可采用内插法计算；
- d) 低于 40 °C 的许用应力取 40 °C 的值；
- e) 表列斜体许用应力值取决于抗拉强度；黑体取决于长期(持久、蠕变)强度；正体取决于屈服强度；正体加下横线取决于 90% 中温屈服强度；正体加灰底色表示许用应力值高于 2/3 中温屈服强度；
- f) 表列正体加下横线以及正体灰底色许用应力值均适用于奥氏体不锈钢和镍基合金的设计计算，但用于非标法兰或按 GB/T 20801.3—2020 中 7.5.4 计算时应将该值乘以 75% (正体加下横线者) 或适当降低(正体灰底色)；
- g) 材料使用温度上限及对应的许用应力按表列所示(而不是表头所示温度)；
- h) 材料最低使用温度按表列温度或图 1 所示曲线，数字表示最低使用温度，英文字母 A 或 B 表示图 1 中的曲线，材料尚应满足第 8 章以及相应注解的要求。



表 A.1 (续)

标准	牌号等级	尺寸范围/mm,或状态	最低使用温度/℃或图1的曲线号	标准规定		最高使用温度/℃	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa																脚注				
				最小强度/MPa	R_{m} (或 $R_{p0.2}$)		40	65	100	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525		550	575	600	
							R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}		R_{m}	R_{m}	R_{m}	R_{m}
GB/T 6479	20	>40	B	410	225	593	137	137	134	130	126	121	115	111	108	105	95.1	79.5	62.6	45.0	31.7	21.4	14.2	9.40	6.89(593℃)	d,k	
GB/T 9948	20	全部	B	410	245	593	137	137	137	137	137	132	126	122	118	113	95.1	79.5	62.6	45.0	31.7	21.4	14.2	9.40	6.89(593℃)	d	
GB/T 8163	Q345A	≤16	B	470	345	427	157	157	157	157	157	157	151	144	139	135	122	101	83.8(427℃)							d	
GB/T 8163	Q345A	>16~30	B	470	325	427	157	157	157	157	157	157	151	144	139	135	122	101	83.8(427℃)							d	
GB/T 8163	Q345A	>30	B	470	295	427	157	157	157	157	157	157	151	144	139	135	122	101	83.8(427℃)							d	
GB/T 5310	25MnG	全部	B	485	275	427	162	162	162	162	158	158	151	144	139	135	122	101	83.8(427℃)							d	
YB/T 4173	25MnG	全部	B	485	275	427	162	162	162	162	158	151	144	139	135	122	101	83.8	82.7(427℃)							d	
GB/T 6479	Q345B	≤16	B	490	345	427	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	d
GB/T 6479	Q345B	>16~40	B	490	335	427	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	d
GB/T 6479	Q345B	>40	B	490	325	427	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	d
GB/T 6479	Q345D	≤16	-20	490	345	427	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	d
GB/T 6479	Q345D	>16~40	-20	490	335	427	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	d
GB/T 6479	Q345D	>40	-20	490	325	427	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	d
GB/T 9711	L290/X42(PSL2)	全部	-30	415	290	204	138	138	138	138	138																g,h,i,j
GB/T 9711	L360/X52(PSL2)	全部	-30	460	360	204	153	153	153	153	153																g,h,i,j
GB/T 9711	L415/X60(PSL2)	全部	-30	520	415	204	173	173	173	173	173																g,h,i,j
GB/T 9711	L450/X65(PSL2)	全部	-30	535	450	204	178	178	178	178	178																g,h,i,j

表 A.1 (续)

标准	牌号等级	尺寸范围/mm,或状态	最低使用温度/℃或图 1 的曲线号	标准规定最小强度/MPa R_m (或 $R_{p0.2}$)	最高使用温度/℃	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa																脚注				
						40	65	100	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525		550	575	600	
GB/T 9711	L245/B (PSL2)	全部	-30	415 245	593	138	138	138	138	138	132	126	122	118	113	95.1	79.5	62.6	45.0	31.7	21.4	14.2	9.40	6.89(593℃)	d,g,k	
GB/T 9711	L290/X42 (PSL2)	全部	-30	415 290	204	138	138	138	138	138															g,h,i,j	
GB/T 9711	L360/X52 (PSL2)	全部	-30	460 360	204	153	153	153	153	153															g,h,i,j	
GB/T 9711	L415/X60 (PSL2)	全部	-30	520 415	204	173	173	173	173	173															g,h,i,j	
GB/T 9711	L450/X65 (PSL2)	全部	-30	535 450	204	178	178	178	178	178															g,h,i,j	
GB/T 9711	L485/X70 (PSL2)	全部	-30	570 485	204	190	190	190	190	190															g,h,i,j	
GB/T 9711	L555/X80 (PSL2)	全部	-30	625 555	204	208	208	208	208	208															g,h,i,j	
ASTM A671	CC60	C122	B,-46	414 221	538	138	134	130	130	126	121	115	111	108	105	95.1	79.5	62.6	45.0	31.7	21.4	17.2(538℃)		d,k		
ASTM A671	CC70	C122	B,-46	485 260	538	161	159	154	154	150	144	136	132	128	122	101	83.8	66.8	50.3	33.2	21.4	17.2(538℃)		d,k		
2.5 锻件																										
GB/T 12228	25	全部	-20	450 275	427	150	150	150	150	150	144	139	135	122	122	101	83.8	82.7(427℃)								c,d
GB/T 12228	A105	全部	-30	480 250	593	160	156	151	146	142	136	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3	33.2	21.4	14.2	9.40	6.89(593℃)	c,d	
NB/T 47008	20	≤100	-20	410 235	593	137	130	126	122	118	113	108	105	101	98.3	95.1	79.5	62.6	45.0	31.7	21.4	14.2	9.40	6.89(593℃)	c,d	
NB/T 47008	16Mn	≤100	-20	480 305	593	160	156	151	146	142	136	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3	33.2	21.4	14.2	9.40	6.89(593℃)	c,d	
NB/T 47008	16Mn	>100~200	-20	470 295	593	157	156	151	146	142	136	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3	33.2	21.4	14.2	9.40	6.89(593℃)	c,d	

表 A.1 (续)

标准	牌号等级	尺寸范围/mm,或状态	最低使用温度/℃或图 1 的曲线号	标准规定		最高使用温度/℃	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa																脚注					
				最小强度/MPa	R _m (或 R _{p0.2})		40	65	100	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525		550	600	625	650	
							R _m	R _{p0.2}	40	65	100	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475		500	525	550	600	625
GB/T 13401	AF9G	全部	-30	520	310	649	173	173	172	168	167	166	165	163	161	157	153	147	141	134	83.2	60.2	42.9	29.9	20.6	14.4	10.3(649℃)	o,p
GB/T 13401	AF91	全部	-30	585	415	649	195	195	195	195	195	194	192	190	187	183	178	172	165	156	147	137	115	87.0	64.7	45.1	29.6(649℃)	o,p
4.3 合金钢板焊管(EFW/SAW)																												
ASTM A691	A387Gr.12-2	Cl 22	-30	450	275	649	149	149	146	144	144	144	141	139	138	136	134	132	129	126	92.1	61.1	40.4	26.4	17.4	11.6	7.58(649℃)	m,o,p
ASTM A691	A387Gr.11-2	Cl 22	-30	515	310	649	172	172	172	172	172	169	164	161	159	156	153	149	146	104	73.7	52.0	36.3	25.2	17.6	12.3	8.27(649℃)	m,o,p
ASTM A691	A387Gr.22-2	Cl 22	-30	515	310	649	172	172	171	167	167	167	167	167	167	167	167	167	167	119	88.4	64.0	44.6	30.0	19.7	12.8	8.27(649℃)	m,o,p,q
4.4 合金钢锻件																												
NB/T 47008	15CrMo	≤300	-30	480	280	649	160	160	160	160	150	145	141	139	138	136	134	132	129	126	92.1	61.1	40.4	26.4	17.4	11.6	7.58(649℃)	c,o
NB/T 47008	14Cr1Mo	≤300	-30	490	290	649	163	163	163	163	155	150	146	143	141	138	136	133	130	104	73.7	52.0	36.3	25.2	17.6	12.3	8.27(649℃)	c,o
NB/T 47008	12Cr1MoV	≤300	-20	470	280	580	157	157	157	157	157	156	151	147	143	139	135	131	128	124	118	83.5	65.0	49.0	46.0	(580℃)		c,o
NB/T 47008	12Cr2Mo1	≤300	-30	510	310	649	170	170	170	167	167	167	167	167	167	167	167	167	167	119	88.4	64.0	44.6	30.0	19.7	12.8	8.27(649℃)	c,o,q
NB/T 47008	12Cr5Mo	≤300	-30	590	390	649	197	197	195	190	189	188	186	184	181	178	173	167	161	80.6	61.7	46.4	34.7	25.5	17.8	11.4	6.89(649℃)	c,o
NB/T 47008	10Cr9Mo1VNbN	≤300	-30	585	415	649	195	195	195	195	195	194	192	190	187	183	178	172	165	156	147	137	115	87.0	64.7	45.1	29.6(649℃)	c,o
4.5 合金钢铸件																												
JB/T 5263	WC6	全部	-30	485	275	649	161	161	161	161	155	150	146	143	141	138	136	133	130	104	73.7	52.0	36.3	25.2	17.6	12.3	8.27(649℃)	c,o
JB/T 5263	WC9	全部	-30	485	275	649	161	161	160	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	119	88.4	64.0	44.6	30.0	19.7	12.3	8.27(649℃)	c,o
JB/T 5263	Cl2A	全部	-30	585	415	649	195	195	195	195	195	194	192	190	187	183	178	172	165	156	147	137	115	87.0	64.7	45.1	29.6(649℃)	c,o,q
GB/T 16253	ZG16Cr5MoG	全部	-30	630	420	649	210	210	205	200	199	198	196	194	191	187	182	176	169	80.6	61.7	46.4	34.7	25.5	17.8	11.4	6.89(649℃)	c,o

表 A.1 (续)

标准	牌号等级	尺寸范围/mm 或 状态	最低使用温度/℃ 或图1的 曲线号	标准规定		最高使用温度/℃	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa																脚注																	
				最小强度/MPa	R_m		40	65	100	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525		550	575	600	625	650	675	700	725	750	775	800	825					
							$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$	$R_{m,2}$		$R_{m,2}$																
5 不锈钢																																								
5.1 不锈钢无缝管																																								
GB/T 14976	06Cr18Ni11Ti (321)		-255	520	205	816	138	138	138	138	138	138	138	138	135	128	125	123	120	119	117	116	114	113	112	112	88.7	59.2	44.0	32.9	24.5	18.3	12.5	8.49	6.19	4.28	2.75	2.07	s, v, x	(816 ℃)
GB/T 14976	07Cr19Ni11Ti (321H)		-200	520	205	816	138	138	138	138	138	138	138	135	128	125	123	120	119	117	116	114	113	112	112	100	76.5	58.7	46.0	36.8	28.7	23.0	18.4	14.5	11.5	9.02	7.58	v	(816 ℃)	
GB/T 5310	07Cr19Ni11Ti (321H)		-200	520	205	816	138	138	138	138	138	138	138	135	128	125	123	120	119	117	116	114	113	112	112	100	76.5	58.7	46.0	36.8	28.7	23.0	18.4	14.5	11.5	9.02	7.58	v	(816 ℃)	
GB/T 9948	07Cr19Ni11Ti (321H)		-200	520	205	816	138	138	138	138	138	138	138	135	128	125	123	120	119	117	116	114	113	112	112	100	76.5	58.7	46.0	36.8	28.7	23.0	18.4	14.5	11.5	9.02	7.58	v	(816 ℃)	
GB/T 14976	06Cr18Ni11Nb (347)		-255	520	205	816	138	138	138	138	138	138	138	138	135	132	130	128	127	126	126	125	125	125	125	125	97.6	75.9	57.2	40.2	30.3	23.2	16.2	11.4	8.97	7.08	5.89	t, v, x	(816 ℃)	
GB/T 14976	07Cr18Ni11Nb (347H)		-200	520	205	816	138	138	138	138	138	138	138	138	135	132	130	129	127	126	126	125	125	125	125	112	90.6	69.6	53.8	41.4	31.8	24.0	18.8	14.6	10.9	8.96	v	(816 ℃)		
GB/T 5310	07Cr18Ni11Nb (347H)		-200	520	205	816	138	138	138	138	138	138	138	138	135	132	130	129	127	126	126	125	125	125	125	112	90.6	69.6	53.8	41.4	31.8	24.0	18.8	14.6	10.9	8.96	v	(816 ℃)		
GB/T 9948	07Cr18Ni11Nb (347H)		-200	520	205	816	138	138	138	138	138	138	138	138	135	132	130	129	127	126	126	125	125	125	125	112	90.6	69.6	53.8	41.4	31.8	24.0	18.8	14.6	10.9	8.96	v	(816 ℃)		
GB/T 14976	022Cr19Ni10 (304L)		-255	480	175	816	115	115	115	110	103	97.7	95.7	94.1	92.6	91.3	90.0	88.7	87.3	85.6	83.7	81.4	40.4	33.2	26.7	21.9	18.2	15.0	12.4	8.87	7.20	6.58	6.21	w	(816 ℃)					
GB/T 14976	06Cr19Ni10 (304)		-255	520	205	816	138	138	138	129	122	116	113	111	109	107	105	103	101	99.1	97.3	95.5	93.7	91.9	90.1	78.9	63.8	51.6	41.6	32.9	26.5	21.3	17.2	14.1	11.2	9.65	v, w, x	(816 ℃)		
GB/T 14976	07Cr19Ni10 (304H)		-200	520	205	816	138	138	138	129	122	116	113	111	109	107	105	103	101	99.1	97.3	95.5	93.7	91.9	90.1	78.9	63.8	51.6	41.6	32.9	26.5	21.3	17.2	14.1	11.2	9.65	v	(816 ℃)		

表 A.1 (续)

标准	牌号等级	尺寸范围/mm 或 状态	最低使用温度/℃ 或图1的 曲线号	标准规定		最高使用温度/℃	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa																	脚注											
				最小强度/MPa	R_m		5.2 不锈钢焊管(EFW,无填充金属)																												
							R_{eL} (或 $R_{p0.2}$)	40	65	100	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525		550	575	600	625	650	675	700	725	750	775	800
GB/T 12771 HG/T 20537.3	022Cr19Ni10 (304L)		-255	480	180	816	115	115	115	115	110	103	97.7	95.7	94.1	92.6	91.3	90.0	88.7	87.3	85.6	83.7	81.4	40.4	33.2	26.7	21.9	18.2	15.0	12.4	8.87	7.20	6.58	6.21	w,aa
GB/T 12771 HG/T 20537.3	06Cr19Ni10 (304)		-255	520	205	816	138	138	138	129	122	116	113	111	109	107	105	103	101	99.1	97.3	95.5	78.9	63.8	51.6	41.6	32.9	26.5	21.3	17.2	14.1	11.2	9.65	v,w, x,aa	
GB/T 12771 HG/T 20537.3	022Cr17Ni12Mo2 (316L)		-255	480	175	816	115	115	115	109	103	98.1	96.1	94.3	92.6	90.9	89.3	87.6	85.9	84.2	82.5	80.8	79.3	58.0	43.6	33.0	25.3	18.8	14.0	10.4	7.99	6.89	w,aa		
GB/T 12771 HG/T 20537.3	06Cr17Ni12Mo2 (316)		-255	520	205	816	138	138	138	134	125	119	116	114	112	111	110	109	108	107	106	105	97.8	80.8	65.0	50.4	38.6	29.6	23.0	17.4	13.3	10.4	8.96	v,w, x,aa	
GB/T 12771 HG/T 20537.3	06Cr18Ni11Ti (321)		-255	520	205	816	138	138	138	138	135	128	125	123	120	119	117	116	114	113	112	112	88.7	59.2	44.0	32.9	24.5	18.3	12.5	8.49	6.19	4.28	2.75	2.07	s,v, x,aa
GB/T 12771 HG/T 20537.3	06Cr18Ni11Nb (347)		-255	520	205	816	138	138	138	138	138	135	132	130	128	127	126	126	125	125	125	125	97.6	75.9	57.2	40.2	30.3	23.2	16.2	11.4	8.97	7.08	5.52	t,v, x,aa	
GB/T 12771 HG/T 20537.3	06Cr25Ni20 (310)		-200	520	205	816	138	138	138	138	134	129	127	125	123	122	120	119	117	116	108	83.7	64.0	48.5	36.3	27.3	21.0	15.9	12.5	9.87	7.65	5.97	5.17	v,w,x, y,z,aa	
GB/T 21832 (所有部分)	022Cr22Ni5M63N (31803)		-50	620	450	316	207	207	207	199	188	186	185 (316 ℃)																	u,bb					
GB/T 21832 (所有部分)	022Cr23Ni5M63N (2205)		-50	655	485	316	218	218	218	210	203	196	196 (316 ℃)																	u,bb					
GB/T 21832 (所有部分)	022Cr25Ni7Mo4N (2507)		-50	800	550	316	267	265	264	251	243	238	237	236 (316 ℃)																	u,bb				
5.3 不锈钢板焊管(EFW)																	5.3 不锈钢板焊管(EFW)																		
HG/T 20537.4	022Cr19Ni10 (304L)		-255	480	180	816	115	115	115	110	103	97.7	95.7	94.1	92.6	91.3	90.0	88.7	87.3	85.6	83.7	81.4	40.4	33.2	26.7	21.9	18.2	15.0	12.4	8.87	7.20	6.58	6.21	m,w	



表 A.1 (续)

标准	牌号等级	尺寸范围/mm, 或状态	最低使用温度/℃ 或图 1 的曲线号	标准规定		最高使用温度/℃	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa																				脚注							
				R_m	$R_{d,1}$ (或 $R_{p0.2}$)		40	65	100	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625		650	675	700	725	750	775	800
HG/T 20537.4	06Cr19Ni10 (304)		-255	520	205	816	138	138	138	129	122	116	113	111	109	107	105	103	101	99.1	97.3	95.5	78.9	63.8	51.6	41.6	32.9	26.5	21.3	17.2	14.1	11.2	9.65 (816 ℃)	m, v, w, x
HG/T 20537.4	022Cr17Ni12Mo2 (316L)		-255	480	175	816	115	115	115	109	103	98.1	96.1	94.3	92.6	90.9	89.3	87.6	85.9	84.2	82.5	80.8	79.3	77.9	58.0	43.6	33.0	25.3	18.8	14.0	10.4	7.99 (816 ℃)	m, w	
HG/T 20537.4	06Cr17Ni12Mo2 (316)		-255	520	205	816	138	138	138	134	125	119	116	114	112	111	110	109	108	107	106	105	97.8	80.8	65.0	50.4	38.6	29.6	23.0	17.4	13.3	10.4 (816 ℃)	m, v, w, x	
HG/T 20537.4	06Cr18Ni11Ti (321)		-255	520	205	816	138	138	138	138	135	128	125	123	120	119	117	116	114	113	112	112	88.7	59.2	44.0	32.9	24.5	18.3	12.5	8.49	6.19	4.28	2.75 (816 ℃)	m, s, v, x
HG/T 20537.4	06Cr18Ni11Nb (347)		-255	520	205	816	138	138	138	138	138	135	132	130	128	127	126	126	125	125	125	125	97.6	75.9	57.2	40.2	30.3	23.2	16.2	11.4	8.97	7.08	5.52 (816 ℃)	m, t, v, x
HG/T 20537.4	06Cr25Ni20 (310)		-200	520	205	816	138	138	138	138	134	129	127	125	123	122	120	119	117	116	108	83.7	64.0	48.5	36.3	27.3	21.0	15.9	12.5	9.87	7.65	5.97 (816 ℃)	m, v, w, x, y, z	
GB/T 32964	022Cr19Ni10 (304L)		-255	490	175	816	115	115	115	110	103	97.7	95.7	94.1	92.6	91.3	90.0	88.7	87.3	85.6	83.7	81.4	40.4	33.2	26.7	21.9	18.2	15.0	12.4	8.87	7.20	6.58 (816 ℃)	m, r, w	
GB/T 32964	06Cr19Ni10 (304)		-255	520	210	816	138	138	138	129	122	116	113	111	109	107	105	103	101	99.1	97.3	95.5	78.9	63.8	51.6	41.6	32.9	26.5	21.3	17.2	14.1	11.2 (816 ℃)	m, r, v, w, x	
GB/T 32964	022Cr17Ni12Mo2 (316L)		-255	490	175	816	115	115	115	109	103	98.1	96.1	94.3	92.6	90.9	89.3	87.6	85.9	84.2	82.5	80.8	79.3	77.9	58.0	43.6	33.0	25.3	18.8	14.0	10.4	7.99 (816 ℃)	m, r, w	
GB/T 32964	06Cr17Ni12Mo2 (316)		-255	520	210	816	138	138	138	134	125	119	116	114	112	111	110	109	108	107	106	105	97.8	80.8	65.0	50.4	38.6	29.6	23.0	17.4	13.3	10.4 (816 ℃)	m, r, v, w, x	
GB/T 32964	06Cr18Ni11Ti (321)		-255	520	210	816	138	138	138	138	135	128	125	123	120	119	117	116	114	113	112	112	88.7	59.2	44.0	32.9	24.5	18.3	12.5	8.49	6.19	4.28	2.75 (816 ℃)	m, r, s, v, x
GB/T 32964	06Cr18Ni11Nb (347)		-255	520	210	816	138	138	138	138	138	135	132	130	128	127	126	126	125	125	125	125	97.6	75.9	57.2	40.2	30.3	23.2	16.2	11.4	8.97	7.08	5.52 (816 ℃)	m, r, t, v, x

表 A.1 (续)

标准	牌号等级	尺寸范围/mm, 或状态	最低使用温度/℃ 或图1的 曲线号	标准规定 最小强度/MPa R_m ($R_{p0.2}$)	最高使用温度/℃	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa																	脚注													
						40	65	100	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550		575	600	625	650	675	700	725	750	775	800	825		
						5.4 不锈钢管件																														
GB/T 13401	SF304L		-255	480	170	816	115	115	115	115	110	103	97.7	95.7	94.1	92.6	91.3	90.0	88.7	87.3	85.6	83.7	81.4	40.4	33.2	26.7	21.9	18.2	15.0	12.4	8.87	7.20	6.58	6.21	w	
GB/T 13401	SF304		-255	515	205	816	138	138	138	129	122	116	113	111	109	107	105	103	101	99.1	97.3	95.5	78.9	63.8	51.6	41.6	32.9	26.5	21.3	17.2	14.1	11.2	9.65	9.65	v, w, x	
GB/T 13401	SF304H		-200	515	205	816	138	138	138	129	122	116	113	111	109	107	105	103	101	99.1	97.3	95.5	78.9	63.8	51.6	41.6	32.9	26.5	21.3	17.2	14.1	11.2	9.65	9.65	v	
GB/T 13401	SF316L		-255	480	170	816	115	115	115	109	103	98.1	96.1	94.3	92.6	90.9	89.3	87.6	85.9	84.2	82.5	80.8	79.3	77.9	58.0	43.6	33.0	25.3	18.8	14.0	10.4	7.99	6.89	6.89	w	
GB/T 13401	SF316		-255	515	205	816	138	138	138	134	125	119	116	114	112	111	110	109	108	107	106	105	97.8	80.8	65.0	50.4	38.6	29.6	23.0	17.4	13.3	10.4	8.96	8.96	v, w, x	
GB/T 13401	SF316H		-200	515	205	816	138	138	138	134	125	119	116	114	112	111	110	109	108	107	106	105	97.8	80.8	65.0	50.4	38.6	29.6	23.0	17.4	13.3	10.4	8.96	8.96	v	
GB/T 13401	SF321		-255	515	205	816	138	138	138	138	135	128	125	123	120	119	117	116	114	113	112	112	88.7	59.2	44.0	32.9	24.5	18.3	12.5	8.49	6.19	4.28	2.75	2.07	2.07	s, v, w, x
GB/T 13401	SF321H		-200	515	205	816	138	138	138	138	135	128	125	123	120	119	117	116	114	113	112	100	76.5	58.7	46.0	36.8	28.7	23.0	18.4	14.5	11.5	9.02	7.58	7.58	v	
GB/T 13401	SF347		-255	515	205	816	138	138	138	138	135	128	125	123	120	119	117	116	114	113	112	125	97.6	75.9	57.2	40.2	30.3	23.2	16.2	11.4	8.97	7.08	5.89	5.52	5.52	t, v, x
GB/T 13401	SF347H		-200	515	205	816	138	138	138	138	135	128	125	123	120	119	117	116	114	113	112	125	112	90.6	69.6	53.8	41.4	31.8	24.0	18.8	14.6	10.9	8.96	8.96	v	
GB/T 13401	SF310		-200	515	205	816	138	138	138	138	134	129	127	125	123	122	120	119	117	116	108	83.7	64.0	48.5	36.3	27.3	21.0	15.9	12.5	9.87	7.65	5.97	5.17	5.17	v, w, x, y, z	
GB/T 13401	SF225		-50	620	450	316	207	207	207	199	188	186	185 (316 ℃)																					u, bb		

表 A.1 (续)

标准	牌号等级	状态	最低使用温度/℃	标准规定最小强度/MPa		最高使用温度/℃	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa											脚注		
				R_m	R_{d1} (或 $R_{p0.2}$)		40	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275		300	325
7 钛及钛合金(无缝管无填充金属 EFW 焊管及挤压管)																				
7.1 钛及钛合金管																				
GB/T 3624	TA1	退火	-60	240	140	316	80.4	74.0	70.7	62.4	55.5	49.2	43.6	38.5	34.0	30.2	27.2	25.2	24.1 (316 ℃)	
GB/T 3624	TA2	退火	-60	400	275	316	133	125	123	113	105	96.3	89.8	83.3	81.3	71.3	63.4	57.8	53.8 (316 ℃)	
GB/T 3624	TA3	退火	-60	500	380	316	149	141	136	124	112	102	92.8	84.5	77.1	70.8	65.5	61.3	58.2 (316 ℃)	
GB/T 3624	TA9	退火	-60	400	275	316	133	125	123	113	105	96.3	89.8	83.3	81.3	71.3	63.4	57.8	53.8 (316 ℃)	
GB/T 3624	TA10	退火	-60	450	300	316	147	140	138	130	122	114	106	98.0	94.0	90.0	86.0	82.0		
GB/T 26057	TA1	退火	-60	240	140	316	80.4	74.0	70.7	62.4	55.5	49.2	43.6	38.5	34.0	30.2	27.2	25.2	24.1 (316 ℃)	
GB/T 26057	TA2	退火	-60	400	275	316	133	125	123	113	105	96.3	89.8	83.3	81.3	71.3	63.4	57.8	53.8 (316 ℃)	
GB/T 26057	TA3	退火	-60	500	380	316	149	141	136	124	112	102	92.8	84.5	77.1	70.8	65.5	61.3	58.2 (316 ℃)	
GB/T 26057	TA9	退火	-60	400	275	316	133	125	123	113	105	96.3	89.8	83.3	81.3	71.3	63.4	57.8	53.8 (316 ℃)	
GB/T 26057	TA10	退火	-60	485	345	316	162	154	151	144	135	126	117	108	106	104	102	100		
GB/T 26058	TA1	退火	-60	240	140	316	80.4	74.0	70.7	62.4	55.5	49.2	43.6	38.5	34.0	30.2	27.2	25.2	24.1 (316 ℃)	
GB/T 26058	TA2	退火	-60	400	275	316	133	125	123	113	105	96.3	89.8	83.3	81.3	71.3	63.4	57.8	53.8 (316 ℃)	
GB/T 26058	TA3	退火	-60	500	380	316	149	141	136	124	112	102	92.8	84.5	77.1	70.8	65.5	61.3	58.2 (316 ℃)	
GB/T 26058	TA9	退火	-60	400	275	316	133	125	123	113	105	96.3	89.8	83.3	81.3	71.3	63.4	57.8	53.8 (316 ℃)	
GB/T 26058	TA10	退火	-60	485	345	316	162	154	151	144	135	126	117	108	106	104	102	100		

表 A.1 (续)

标准	牌号等级	状态	最低使用温度/℃	标准规定最小强度/MPa		最高使用温度/℃	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa										脚注				
				R_m	R_{eL} (或 $R_{p0.2}$)		40	65	75	100	125	150	175	200	225	250		275	300	325	
							7.2 钛及钛合金管件														
7.2 钛及钛合金管件																					
GB/T 27684	TA1	退火	-60	240	140	316	80.4	74.0	70.7	62.4	55.5	49.2	43.6	38.5	34.0	30.2	27.2	25.2	24.1 (316 ℃)		
GB/T 27684	TA2	退火	-60	400	275	316	133	125	123	113	105	96.3	89.8	83.3	81.3	71.3	63.4	57.8	53.8 (316 ℃)		
GB/T 27684	TA3	退火	-60	500	380	316	149	141	136	124	112	102	92.8	84.5	77.1	70.8	65.5	61.3	58.2 (316 ℃)		
GB/T 27684	TA9	退火	-60	400	275	316	133	125	123	113	105	96.3	89.8	83.3	81.3	71.3	63.4	57.8	53.8 (316 ℃)		
GB/T 27684	TA10	退火	-60	450	300	316	147	140	138	130	122	114	106	98.0	94.0	90.0	86.0	82.0			
7.3 钛及钛合金锻件																					
7.3 钛及钛合金锻件																					
GB/T 25137	F1	退火	-60	240	140	316	80.4	74.0	70.7	62.4	55.5	49.2	43.6	38.5	34.0	30.2	27.2	25.2	24.1 (316 ℃)		
GB/T 25137	F2H	退火	-60	400	275	316	133	125	123	113	105	96.3	89.8	83.3	81.3	71.3	63.4	57.8	53.8 (316 ℃)		
GB/T 25137	F3	退火	-60	500	380	316	149	141	136	124	112	102	92.8	84.5	77.1	70.8	65.5	61.3	58.2 (316 ℃)		
GB/T 25137	F7H	退火	-60	400	275	316	133	125	123	113	105	96.3	89.8	83.3	81.3	71.3	63.4	57.8	53.8 (316 ℃)		
GB/T 25137	F12	退火	-60	450	300	316	162	154	151	144	135	126	117	108	106	104	102	100			
7.4 钛及钛合金铸件																					
7.4 钛及钛合金铸件																					
GB/T 6614	ZTA1	退火	-60	345	275	316	92.0		84.0	74.0	69.0	62.0	58.0	53.0	50.0	46.0					
GB/T 6614	ZTA2	退火	-60	440	370	316	118		106	97.0	89.0	80.0	74.0	66.0	62.0	56.0					



表 A.1 (续)

标准	牌号等级	状态	最低使用温度/℃	标准规定最小强度/MPa		最高使用温度/℃	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa							脚注	
				R_m	R_{eL} (或 $R_{p0.2}$)		40	65	100	125	150	175	200		225
8 铝及铝合金															
8.1 铝及铝合金管															
GB/T 6893	1060	0	-270	60		204	11.5	11.5	10.9	9.8	8.8	7.5	5.8	5.5(204℃)	gg,ii
GB/T 6893	1060	H14	-270	85	70	204	27.6	27.6	27.6	26.6	18.1	12.7	8.4	7.8(204℃)	gg,ii
GB/T 4437.1	1060	0	-270	65		204	11.5	11.5	10.9	9.8	8.8	7.5	5.8	5.5(204℃)	gg,ii
GB/T 4437.1	1060	H112	-270	60		204	11.5	11.5	10.9	9.8	8.8	7.5	5.8	5.5(204℃)	gg,ii
GB/T 6893	3003	0	-270	95	35	204	23.0	22.1	21.4	20.5	18.2	13.6	10.9	10.5(204℃)	gg,ii
GB/T 6893	3003	H14	-270	130	110	204	46.0	46.0	46.0	43.9	29.0	21.1	16.7	16.1(204℃)	gg,ii
GB/T 26027	3003	0	-270	95	35	204	23.0	22.1	21.4	20.5	18.2	13.6	10.9	10.5(204℃)	gg,ii
GB/T 26027	3003	H14	-270	130	110	204	46.0	46.0	46.0	43.9	29.0	21.1	16.7	16.1(204℃)	gg,ii
GB/T 4437.1	3003	0	-270	95		204	23.0	22.1	21.4	20.5	18.2	13.6	10.9	10.5(204℃)	gg,ii
GB/T 4437.1	3003	H112	-270	95		204	23.0	22.1	21.4	20.5	18.2	13.6	10.9	10.5(204℃)	gg,ii
GB/T 6893	5052	0	-270	170	65	204	46.0	46.0	46.0	45.9	41.6	28.8	17.6	16.1(204℃)	gg
GB/T 6893	5052	H14	-270	230	180	204	78.1	78.1	78.1	78.1	41.6	28.8	17.6	16.1(204℃)	gg,ii
GB/T 26027	5052	0	-270	170	65	204	46.0	46.0	46.0	45.9	41.6	28.8	17.6	16.1(204℃)	gg
GB/T 26027	5052	H14	-270	230	180	204	78.1	78.1	78.1	78.1	41.6	28.8	17.6	16.1(204℃)	gg,ii
GB/T 6893	5083	0	-270	270	110	65	73.5	73.5							ii
GB/T 26027	5083	0	-270	270	110	65	73.5	73.5							ii
GB/T 4437.1	5083	0, H112	-270	270	110	65	73.5	73.5							ii
GB/T 6893	6061	T4	-270	205	110	204	68.9	68.9	68.9	67.8	64.8	57.9	40.2	35.9(204℃)	ii
GB/T 6893	6061	T6	-270	290	240	204	96.5	96.5	96.5	92.5	79.9	63.1	40.2	35.9(204℃)	ii
GB/T 26027	6061	T4	-270	205	110	204	68.9	68.9	68.9	67.8	64.8	57.9	40.2	35.9(204℃)	ii
GB/T 26027	6061	T6	-270	290	240	204	96.5	96.5	96.5	92.5	79.9	63.1	40.2	35.9(204℃)	ii
GB/T 4437.1	6061	T4	-270	180	110	204	59.9	59.9	59.9	59.0	56.3	50.3	40.2	35.9(204℃)	ii

表 A.1 (续)

标准	牌号等级	状态	最低使用温度/℃	标准规定最小强度/MPa		最高使用温度/℃	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa								脚注
				R_m	R_{eL} (或 $R_{p0.2}$)		40	65	100	125	150	175	200	225	
GB/T 4437.1	6061	T6	-270	260	240	204	86.5	86.5	86.5	82.9	71.6	56.6	40.2	35.9(204℃)	ii
GB/T 4437.1	6061	T4 焊, T6 焊	-270	165	204	204	55.2	55.2	54.3	52.2	46.3	35.3	34.8(204℃)	ii	
GB/T 6893	6063	T6	-270	220	190	204	75.8	75.8	74.8	64.0	49.2	27.5	15.3	13.8(204℃)	ii
GB/T 26027	6063	T4	-270	150	75	204	46.0	45.8	45.5	45.5	41.5	27.7	12.0(204℃)	ii	
GB/T 26027	6063	T6	-270	220	190	204	75.8	75.8	74.8	64.0	49.2	27.5	15.3	13.8(204℃)	ii
GB/T 26027	6063	T4 焊, T6 焊	-270	117	204	204	39.1	39.1	37.9	35.9	32.1	25.7	17.6	13.8(204℃)	ii
8.2 铝及铝合金管件															
ASTM B361	1060		-270	60	204	204	11.5	11.5	10.9	9.8	8.8	7.5	5.8	5.5(204℃)	cc, gg, hh, ii
ASTM B361	1060	H14	-270	85	70	204	27.6	27.6	27.6	26.6	18.1	12.7	8.4	7.8(204℃)	cc, gg, hh, ii
ASTM B361	3003	0	-270	95	35	204	23.0	22.1	21.4	20.5	18.2	13.6	10.9	10.5(204℃)	cc, gg, hh, ii
ASTM B361	5052	0	-270	170	65	204	46.0	46.0	46.0	45.9	41.6	28.8	17.6	16.1(204℃)	cc, gg, hh, ii
ASTM B361	5052	H34	-270	230	180	204	78.1	78.1	78.1	78.1	41.6	28.8	17.6	16.1(204℃)	cc, gg, hh, ii
ASTM B361	5083	0	-270	270	110	65	73.5	73.5							cc, gg, hh, ii
ASTM B361	6061	T4	-270	180	110	204	59.8	59.8	59.8	59.8	56.3	50.2	38.3	35.9(204℃)	cc, gg, hh, ii
ASTM B361	6061	T6	-270	260	240	204	87.3	87.3	87.3	83.6	72.3	57.2	40.2	35.9(204℃)	cc, gg, hh, ii
ASTM B361	6061	T4 焊, T6 焊	-270	165	204	204	55.2	55.2	55.2	54.3	52.2	46.3	35.3	34.8(204℃)	cc, gg, hh, ii
ASTM B361	6063	T4	-270	125	62	204	41.4	41.3	41.3	41.0	41.0	33.9	22.6	9.8(204℃)	cc, gg, hh, ii
ASTM B361	6063	T6	-270	205	170	204	68.9	68.9	67.7	59.0	45.9	27.5	15.3	13.8(204℃)	cc, gg, hh, ii
ASTM B361	6063	T4 焊, T6 焊	-270	117	204	204	39.1	39.1	37.9	35.9	32.1	25.7	17.6	13.8(204℃)	cc, gg, hh, ii
8.3 铝及铝合金锻件															
NB/T 47029	1050A	0, H112	-270	65	20	204	13.0	13.0	12.0	11.0	10.0	8.0	6.0		ii, jj
NB/T 47029	3003	0, H112	-270	95	35	204	23.0	22.1	21.4	20.5	18.2	13.6	10.9	10.5(204℃)	ii, jj
NB/T 47029	5083	0, H112	-270	270	110	65	73.5	73.5							ii, jj
NB/T 47029	6061	T6	-270	255	230	204	87.3	87.3	87.3	83.6	72.3	57.2	40.2	35.9(204℃)	ii, jj

表 A.1 (续)

标准	牌号等级	状态	最低使用温度/℃	标准规定		最高使用温度/℃	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa ^a						脚注
				最小强度/MPa	R_{m}		R_{dL} (或 $R_{p0.2}$)	40	65	100	125	150	
<p>^a 应符合 6.1.1.2 的规定。表列灰铸铁的最高使用温度应不高于 230 ℃。</p> <p>^b 应符合 6.1.1 的规定。</p> <p>^c GB/T 20801.3—2020 表 13 所列管道元件标准的压力额定值按表列标准的规定,表 A.1 所列锻件和铸件的许用应力值用于表 13 以外所列管道元件的应力设计或表列管道元件标准的非标压力等级评估。</p> <p>^d 长期使用温度高于 427 ℃,有石墨化倾向,详见 7.2.2.2。</p> <p>^e 使用温度高于 482 ℃,应采用镇静钢。</p> <p>^f 普通碳素结构钢的使用应符合 6.2 的规定。</p> <p>^g GB/T 9711 长输管线用管有 PSL1 及 PSL2 两个质量等级。PSL2 的质量等级较高,且有韧性要求。采用 PSL2 者,用户应根据最低使用温度提出冲击试验温度要求,通常冲击试验温度不高于 -30 ℃;低于 -30 ℃,应供需双方协商,用户若未提出冲击试验温度要求,供方按 0 ℃ 执行。最低使用温度应不低于材料及焊接接头的冲击试验温度。采用 PSL1 质量等级者,通常不作冲击试验。GB/T 29168 长输管线用弯管、对焊管件、法兰(锻件)仅有 PSL2 质量等级,其冲击试验要求与上述 GB/T 9711 长输管线用管相同。</p> <p>^h 应对每个强度等级(L290/X42~L555/X80)的材料进行单独的焊接工艺评定。</p> <p>ⁱ L290/X42~L555/X80 管线钢不宜用于 200 ℃ 以上的高温。</p> <p>^j L290/X42~L555/X80 管线钢通常采用微合金化及控轧控冷工艺,使用时可在 GB/T 9711 的基础上附加更详尽的成分、碳当量、状态、低温韧性等要求。最低使用温度应不小于材料及焊接接头的冲击试验温度及其要求。</p> <p>^k 材料如附加 -20 ℃ (GB/T 6479) 低温冲击试验要求,其最低使用温度为 -20 ℃。</p> <p>^l 非焊接件的许用应力值可提高至 230 MPa。</p> <p>^m 板焊管应符合 6.7 的各项规定。</p> <p>ⁿ 除进行 -101 ℃ 冲击试验且符合本部分要求外,厚度大于 50 mm 的 3.5%Ni 钢最低使用温度应不低于 -87 ℃。</p> <p>^o 长期使用温度高于 440 ℃,有软化(珠光体球化)及回火脆性倾向,详见 7.2.2.2.7.2.2.3。</p> <p>^p 铬钼合金钢的焊缝(焊管、管件及其对接接头)应于焊后热处理后进行 100% 的 RT 或 UT,焊接接头高温强度降低系数 W 按 GB/T 20801.3—2020 中 4.2.7 的规定。</p> <p>^q 使用温度高于 455 ℃ 的 2.25Cr-1Mo 钢焊接材料的含碳量应不小于 0.05%。</p>													

表 A.3 管子与对焊管件的纵向焊接接头系数 Φ_w

标准	型式	简述	纵向焊接接头系数 Φ_w
碳钢(包括碳锰钢),管线钢			
GB/T 8163	无缝	无缝管	1.00
GB/T 6479			
GB/T 5310			
GB/T 3087			
GB/T 9948			
GB/T 9711			
YB/T 4173			
GB/T 3091 焊管	电阻焊	电阻焊焊管(直缝)ERW	0.85
	电熔焊(埋弧焊)	埋弧焊焊管(直缝)SAW	0.80
GB/T 9711 焊管	电阻焊	电阻焊焊管(直缝)ERW	0.85
SY/T 5037 焊管	埋弧焊	双面埋弧焊焊管(直缝或螺旋缝)SAW	0.85
GB/T 13401 管件	无缝或电熔焊	无缝或焊接管件	1.00
GB/T 29168.2 管件		双面电熔焊,100%射线检测	
GB/T 9711 板焊管	电熔焊(埋弧焊)	双面埋弧焊焊管(直缝)SAW	0.95
ASTM A671 板焊管	电熔焊	板制焊管,双面电熔焊,100%射线检测;	1.00
		板制焊管,双面电熔焊	0.85
低碳碳钢及低温镍钢			
GB/T 6479	无缝	无缝管	1.00
GB/T 18984			
ASTM A333			
GB/T 13401 管件	无缝或电熔焊	无缝或焊接管件,双面电熔焊,100%射线检测	1.00
ASTM A671 板焊管	电熔焊	板制焊管,双面电熔焊,100%射线检测	1.00
合金钢			
GB/T 6479	无缝	无缝管	1.00
GB/T 5310			
GB/T 9948			
YB/T 4173			
GB/T 13401 管件	无缝或电熔焊	无缝或焊接管件,双面电熔焊,100%射线检测板焊管,双面	1.00
ASTM A691 板焊管	电熔焊	电熔焊,100%射线检测	1.00
不锈钢			
GB/T 14976	无缝	无缝管	1.00
GB/T 5310			
GB/T 9948			
GB/T 21833			
GB/T 12771 焊管	电熔焊	电熔焊焊管(无填充金属)	0.85
HG/T 20537.3 焊管	电熔焊	电熔焊焊管(无填充金属)	0.85
GB/T 21832 (所有部分)焊管	电熔焊	电熔焊焊管(无填充金属)	0.85
HG/T 20537.4 板焊管	电熔焊	板焊管,电熔焊,100%射线检测	1.00
		板焊管,电熔焊,按标准局部射线检测	0.90
		板焊管,双面电熔焊	0.85

表 A.3 (续)

标准	型式	简述	纵向焊接接头系数 Φ_w
GB/T 32964 板焊管	电熔焊	板焊管, 双面电熔焊, 100% 射线检测	1.00
GB/T 13401 管件	无缝或电熔焊	无缝或焊接管件, 双面电熔焊, 100% 射线检测	1.00
镍及镍合金			
GB/T 2882	无缝	无缝管	1.00
GB/T 30059	无缝	无缝管	1.00
ASTM B444	无缝	无缝管	1.00
ASTM B622	无缝	无缝管	1.00
ASTM B619	电熔焊	电熔焊焊管(无填充金属)	0.85
ASTM B366	无缝或电熔焊	无缝或焊接管件, 双面电熔焊, 100% 射线检测	1.00
钛及钛合金			
GB/T 3624	无缝	无缝管	1.00
GB/T 26058			
GB/T 26057 焊管	电熔焊	电熔焊焊管(无填充金属)	0.85
GB/T 27684 管件	无缝或电熔焊	无缝或焊接管件, 双面电熔焊, 100% 射线检测	1.00
铝及铝合金			
GB/T 6893	无缝	无缝管	1.00
GB/T 4437.1	无缝	无缝管	1.00
GB/T 26027	无缝	无缝管	1.00
ASTM B361 管件	无缝	无缝管件	1.00
	电熔焊	焊接管件, 电熔焊, 100% 射线检测	1.00
	电熔焊	焊接管件, 双面电熔焊	0.85
	电熔焊	焊接管件, 单面电熔焊	0.80

表 A.4 铸件质量系数 Φ_c

材料类别	标准	名称	铸件质量系数 Φ_c
铸铁	GB/T 9439	灰铸铁	1.00
	GB/T 1348	球墨铸铁	1.00
	GB/T 9440	黑芯可锻铸铁	1.00
碳钢(包括碳锰钢)	GB/T 12229	碳素钢铸件	0.80
低温碳钢及低温镍钢	JB/T 7248	低温钢铸件	0.80
合金钢	JB/T 5263	合金钢铸件	0.80
	GB/T 16253		
不锈钢	GB/T 12230	不锈钢铸件	0.80
钛及钛合金	GB/T 6614	钛及钛合金铸件	0.80
注: 表列非铸铁材料如按 GB/T 20801.3—2020 表 4 进行无损检测, Φ_c 可适当提高。			

附 录 B
(资料性附录)
材料的物理性能

表 B.1 和表 B.2 中的物理性能参数按材料类型划分,设计者也可采用具体牌号材料的物理性能参数。其中,表 B.1 给出了金属热膨胀系数和金属总热膨胀量,表 B.2 给出了金属弹性模量。



表 B.1 金属热膨胀系数和金属总热膨胀量

材料名称	在下列温度(°C)下的材料热膨胀系数和总热膨胀量																																				
	-200	-100	-50	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650	675	700	725	750	775	800		
组别 1: 碳钢、 低合金钢	A	9.9	10.7	11.1	11.5	11.8	11.9	12.1	12.3	12.4	12.6	12.7	12.9	13.0	13.2	13.3	13.4	13.6	13.7	13.8	14.0	14.1	14.2	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	4.9	15.0	15.1	15.1	15.2	15.3	15.3	15.3	15.4
	B	-2.2	-1.3	-0.8	0.0	0.4	0.7	1.0	1.0	1.3	1.6	2.0	2.3	2.6	3.0	3.4	3.7	4.1	4.5	4.9	5.3	5.7	6.1	6.5	6.9	7.3	7.7	8.2	8.6	9.0	9.4	9.9	10.3	10.7	11.1	11.6	12.0
组别 2: 低合金钢	A	10.8	11.7	12.0	12.6	12.8	13.0	13.1	13.2	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.6	14.7	14.8	14.8	14.9	15.0	15.0	15.1	15.1	15.2	15.2	15.3	15.3	15.3	15.3
	B	-2.4	-1.4	-0.8	0.0	0.4	0.7	1.0	1.4	1.7	2.1	2.4	2.8	3.2	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.5	5.9	6.3	6.7	7.1	7.5	7.9	8.3	8.7	9.1	9.5	9.9	10.3	10.7	11.1	11.1	11.1	11.5
5Cr-1Mo	A	10.1	10.8	11.2	11.5	11.8	12.0	12.1	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.8	12.9	13.0	13.0	13.1	13.2	13.2	13.3	13.3	13.4	13.4	13.5	13.6	13.6	13.7	13.7	13.8	13.9	13.9	14.0	14.0	14.0	14.1
	B	-2.2	-1.3	-0.8	0.0	0.4	0.7	1.0	1.3	1.6	1.9	2.3	2.6	2.9	3.3	3.6	3.9	4.3	4.6	5.0	5.3	5.7	6.1	6.4	6.8	7.2	7.5	7.9	8.3	8.7	9.0	9.4	9.8	10.2	10.6	11.0	
9Cr-1Mo	A	9.0	9.8	10.1	10.5	10.6	10.7	10.9	11.0	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	11.9	12.0	12.1	12.2	12.3	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.7	12.8	12.9	13.0	13.1	13.3	13.4	13.6	
	B	-2.0	-1.2	-0.7	0.0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.6	4.9	5.2	5.6	5.9	6.3	6.6	7.0	7.3	7.7	8.1	8.5	8.9	9.3	9.7	10.1	10.6	
12Cr~13Cr	A	9.1	9.9	10.2	10.6	10.9	11.0	11.1	11.3	11.4	11.4	11.5	11.6	11.6	11.7	11.7	11.8	11.8	11.9	11.9	12.0	12.1	12.1	12.2	12.2	12.3	12.3	12.4	12.4	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.6	12.6
	B	-2.0	-1.2	-0.7	0.0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.9	5.2	5.5	5.8	6.2	6.5	6.8	7.2	7.5	7.8	8.2	8.5	8.8	9.2	9.5	9.8	
15Cr~17Cr	A	8.1	8.8	9.1	9.6	9.7	9.9	10.0	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.8	10.9	11.0	11.1	11.2	11.2	11.3	11.3	11.4	11.4	11.5	11.5	11.5	11.6	11.6	11.7	11.7	11.7	11.8	11.9	
	B	-1.8	-1.1	-0.6	0.0	0.3	0.5	0.8	1.1	1.3	1.6	1.9	2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6.0	6.3	6.6	7.0	7.3	7.6	7.9	8.2	8.6	8.9	9.3	
27Cr	A	7.7	8.5	8.7	9.0	9.2	9.2	9.3	9.4	9.4	9.5	9.5	9.6	9.6	9.7	9.7	9.8	9.9	9.9	10.0	10.1	10.2	10.3	10.4	10.4	10.5	10.5	10.6	10.6	10.7	10.7	10.8	10.8	10.9			
	B	-1.7	-1.0	-0.6	0.0	0.3	0.5	0.7	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.9	5.2	5.5	5.8	6.1	6.4	6.7	7.0	7.2	7.6	7.9	8.2	8.5	
奥氏体不锈钢 (304, 316, 321, 347 等)	A	13.5	14.3	14.7	15.3	15.6	15.9	16.2	16.4	16.6	16.8	17.0	17.2	17.4	17.5	17.7	17.8	17.9	18.0	18.1	18.2	18.3	18.4	18.4	18.5	18.6	18.7	18.8	18.9	19.0	19.1	19.2	19.3	19.4	19.4		
	B	-3.0	-1.7	-1.0	0.0	0.5	0.9	1.3	1.7	2.2	2.6	3.1	3.5	4.0	4.5	4.9	5.4	5.9	6.4	6.9	7.4	7.9	8.3	8.9	9.4	10.4	10.9	11.4	12.0	12.5	13.1	13.6	14.1	14.7	15.2		
其他 奥氏体不锈钢 (309, 310 等)	A	12.8	13.6	14.1	14.7	15.0	15.2	15.4	15.6	15.7	15.9	16.0	16.1	16.3	16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	18.0	18.1	18.2	18.3			
	B	-2.8	-1.6	-1.0	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.5	2.9	3.3	3.7	4.2	4.6	5.0	5.5	5.9	6.4	6.8	7.3	7.8	8.2	8.7	9.2	9.7	10.2	10.6	11.1	11.7	12.2	12.7	13.2	13.7	14.3	
灰铸铁	A				9.8	10.1	10.2	10.4	10.5	10.7	10.8	11.0	11.1	11.2	11.4	11.5	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.4	12.6	12.7	12.9	13.0											
	B				0.0	0.3	0.6	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	2.9	3.2	3.6	3.9	4.2	4.6	5.0	5.3	5.7	6.1	6.5	6.9											
球墨铸铁	A	8.8	9.5	10.3	10.5	10.7	10.9	11.1	11.3	11.6	11.8	12.0	12.2	12.4	12.5	12.6	12.8	12.9	13.0	13.1	13.2	13.2	13.3	13.4	13.5												
	B	-1.1	-0.7	0.0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.5	2.8	3.1	3.5	3.9	4.2	4.6	4.9	5.3	5.7	6.0	6.4	6.8	7.2												

表 B.1 (续)

材料名称	系数	在下列温度(℃)下的材料热膨胀系数和总热膨胀量																																			
		-200	-100	-50	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650	675	700	725	750	775	800	
蒙乃尔合金 (UNS N04400) 67Ni-30Cu	A	10.4	12.2	13.0	13.8	14.1	14.4	14.6	14.8	15.0	15.1	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0	16.0	16.1	16.1	16.2	16.2	16.3	16.3	16.4	16.4	16.5	16.5	16.5	16.6	16.6	16.7	16.7	16.8	
	B	-2.3	-1.5	-0.9	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6	1.9	2.3	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.7	6.1	6.5	6.9	7.4	7.8	8.2	8.6	9.1	9.5	10.0	10.4	10.8	11.3	11.7	12.2	12.6	13.1	
镍合金 (UNS N02200, N02201)	A	9.6	10.8	11.4	11.9	12.4	12.7	13.0	13.3	13.5	13.7	13.9	14.0	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0	16.1	16.2		
	B	-2.2	-1.4	-0.8	0.0	0.4	0.7	1.0	1.4	1.8	2.1	2.5	2.9	3.3	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6	6.0	6.5	6.9	7.3	7.7	8.2	8.6	9.0	9.5	9.9	10.3	10.8	11.2	11.7	12.2	12.6	
镍合金 (UNS N06625)	A	9.9	10.8	11.5	12.3	12.5	12.7	12.8	13.0	13.2	13.3	13.5	13.6	13.7	13.8	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.6	15.7	15.8	15.9	16.1	16.2	
	B	-2.2	-1.3	-0.8	0.0	0.4	0.7	1.0	1.4	1.7	2.1	2.4	2.8	3.2	3.5	3.9	4.3	4.7	5.1	5.5	5.9	6.3	6.7	7.1	7.5	7.9	8.4	8.8	9.3	9.7	10.2	10.7	11.1	11.6	12.1	12.6	
镍合金 (UNS N08800)	A	10.6	12.5	13.3	14.2	14.6	14.9	15.1	15.3	15.5	15.6	15.8	15.9	16.0	16.1	16.2	16.3	16.4	16.5	16.5	16.6	16.7	16.8	16.8	16.9	17.0	17.1	17.2	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	
	B	-2.3	-1.5	-0.9	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.3	3.7	4.1	4.5	5.0	5.4	5.8	6.3	6.7	7.2	7.6	8.1	8.5	9.0	9.5	9.9	10.4	10.9	11.4	11.9	12.4	12.9	13.4	14.0	
镍合金 (UNS N010276)	A				0.0	0.4	0.7	1.0	1.4	1.7	2.0	2.4	2.7	3.0	3.4	3.7	4.1	4.4	4.8	5.1	5.5	5.9	6.3	6.7	7.1	7.5	8.0	8.4	8.8	9.3	9.8	10.2	10.7	11.2	11.6	12.1	
	B				-0.9	0.0	0.4	0.8	1.1	1.5	1.8	2.2	2.6	3.0	3.3	3.7	4.1	4.5	4.9	5.3	5.7	6.1	6.5	7.0	7.4	7.8	8.3										
青铜	A	15.1	15.8	16.4	17.2	17.6	17.9	18.0	18.2	18.2	18.3	18.4	18.5	18.5	18.6	18.7	18.8	18.9	19.0	19.0	19.1	19.2	19.3	19.4	19.4	19.5	19.6	19.7	19.7	19.8							
	B	-3.3	-1.9	-1.1	0.0	0.5	1.0	1.4	1.9	2.4	2.8	3.3	3.8	4.3	4.7	5.2	5.7	6.2	6.7	7.2	7.7	8.3	8.8	9.3	9.8	10.3	10.9	11.4	11.9	12.5							
黄铜	A	14.7	15.4	16.0	16.7	17.1	17.4	17.6	17.8	18.0	18.2	18.4	18.6	18.8	19.0	19.2	19.3	19.5	19.6	19.8	20.1	20.3	20.5	20.7	20.8	21.0	21.2	21.4	21.6	21.8							
	B	-3.2	-1.9	-1.1	0.0	0.5	1.0	1.4	1.9	2.3	2.8	3.3	3.8	4.3	4.8	5.4	5.9	6.4	7.0	7.5	8.2	8.7	9.3	9.9	10.5	11.1	11.8	12.4	13.1	13.7							
白铜 70Cu-30Ni	A	11.9	13.4	14.0	14.5	14.9	15.2	15.3	15.5	15.7	15.8	16.0	16.1	16.3	16.4	16.5	16.5	16.6	16.6	16.7																	
	B	-2.6	-1.6	-1.0	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.5	2.9	3.3	3.7	4.2	4.6	5.0	5.5	5.9	6.3																	
铝合金	A	18.0	19.7	20.8	21.7	22.6	23.1	23.4	23.7	23.9	24.4	24.4	24.7	25.0	25.2	25.5	25.6																				
	B	-4.0	-2.4	-1.5	0.0	0.7	1.3	1.9	2.5	3.1	3.7	4.4	5.1	5.7	6.4	7.1	7.8																				
钛合金 (Grade1,2,3, 7,12)	A			8.2	8.3	8.4	8.5	8.5	8.6	8.6	8.7	8.7	8.8	8.8	8.8	8.8	8.9	8.9	9.0	9.2																	
	B			-0.6	0.0	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9	3.2	3.4	3.7																

表 B.2 金属弹性模量

材料名称	在下列温度(°C)下的弹性模量 E / (10 ³ N/mm ²)														材料名称								
	-254	-198	-150	-100	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500		550	600	650	700	750	800	816	
铁基金属																							铁基金属
灰铸铁					92	91	89	87	84	81	77	73											灰铸铁
碳钢,含碳量≤0.3%	220	217	214	210	203	198	195	191	188	185	178	172	162	150	137	123							碳钢,含碳量≤0.3%
碳钢,含碳量>0.3%	219	215	212	209	202	197	193	190	187	183	178	170	160	149	135	122	106						碳钢,含碳量>0.3%
C-Mo 钢	219	215	212	208	201	196	193	189	186	183	178	170	160	148	135	121	105						C-Mo 钢
Ni 钢, Ni2%~9%	208	204	202	198	192	186	184	180	178	175	172	164											Ni 钢, Ni2%~9%
Cr-Mo 钢, Cr½%~2%	221	218	215	212	205	199	196	192	190	186	183	178	174	169	164	158	150	142	132				Cr-Mo 钢, Cr½%~2%
Cr-Mo 钢, Cr2¼%~3%	228	225	222	219	211	205	203	199	196	192	188	184	179	175	169	163	155	146	136				Cr-Mo 钢, Cr2¼%~3%
Cr-Mo 钢, Cr5%~9%	230	227	224	221	213	207	205	200	198	194	190	184	176	166	153	139	126	108	91				Cr-Mo 钢, Cr5%~9%
Cr 钢, Cr12%, 17%, 27%	219	215	213	210	201	196	192	188	184	181	178	174	163	152	144	129	114						Cr 钢, Cr12%, 17%, 27%
奥氏体钢(304, 310, 316, 321, 347 等)	212	209	206	202	195	190	186	183	178	176	173	169	165	161	156	152	146	140	133	127	125		奥氏体钢(304, 310, 316, 321, 347 等)
铜及铜合金																							铜及铜合金
海军黄铜(C4640)	110	108	107	107	103	100	99	97	95	93	90												海军黄铜(C4640)
铜(C1100)	117	115	114	114	111	107	106	104	102	99	96												铜(C1100)
铜, 红铜, 铝青铜 (C1020, C1220, C2300, C6140)	125	123	122	122	118	114	113	111	108	105	102												铜, 红铜, 铝青铜 (C1020, C1220, C2300, C6140)
90Cu-10Ni(C7060)	131	129	128	125	121	120	117	115	112	108													90Cu-10Ni(C7060)
80Cu-20Ni(C7100)	146	144	143	138	134	132	129	127	124	120													80Cu-20Ni(C7100)
70Cu-30Ni(C7150)	161	159	157	152	148	145	143	140	136	131													70Cu-30Ni(C7150)

表 B.2 (续)

材料名称	在下列温度(°C)下的弹性模量 $E / (10^3 \text{ N/mm}^2)$																	材料名称					
	-254	-198	-150	-100	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650		700	750	800	816	
镍及镍合金																							镍及镍合金
镍 200,201,625	225	221	218	215	207	202	199	197	194	192	190	186	182	179	175	173	169						镍 200,201,625
蒙耐尔 400	195	191	189	186	179	175	173	171	168	167	165	161	158	155	152	149	146						蒙耐尔 400
Ni-Cr-Fe 合金 600	233	228	226	223	214	208	206	204	201	198	196	192	188	184	181	178	175						Ni-Cr-Fe 合金 600
Ni-Fe-Cr 合金 800,800H	214	210	208	204	196	191	189	187	184	182	179	177	174	170	167	164	160						Ni-Fe-Cr 合金 800,800H
合金 C276	224	218	217	214	206	200	197	195	193	191	188	184	181	178	174	172	168						合金 C276
钛及钛合金																							钛及钛合金
TA0~TA3、TA9					107	103	101	97	92	88	84	79											TA0~TA3、TA9
铝及铝合金																							铝及铝合金
1060,3003,3004,6061,6063	79	76	76	74	69	66	64	60															1060,3003,3004,6061, 6063
5052,5454	80	77	76	75	71	67	65	62															5052,5454
5083,5086	81	78	77	76	71	68	66	63															5083,5086



附 录 C
(资料性附录)
基于风险的材料设计和选用

C.1 材料设计和选用准则

C.1.1 通则

C.1.1.1 本部分规定的材料选用要求及限制系基于应对由压力载荷而导致的材料强度失效以及延性金属在低于韧脆转变温度下的低应力脆断。

C.1.1.2 本部分未涉及材料应对使用环境及介质的腐蚀和选材。业主或设计者可参考相关的腐蚀手册、图表和专著,尤其是类似装置的长期使用经验、现场试验和分析以及新工艺开发中的实验数据。

C.1.1.3 本附录所列各项为常用管道材料选用时应注意的,但除 C.1.1.1 和 C.1.1.2 以外的损伤风险以及相应的材料设计要求和工程措施。

C.1.2 通用规定

C.1.2.1 应考虑管道暴露明火下的可能性以及管道材料的熔点、软化温度、高温下强度的降低和材料的可燃性。

C.1.2.2 应考虑发生火灾或采取灭火措施时,热冲击导致管道材料脆性断裂或损坏的敏感性以及由此而产生的次生灾害。

C.1.2.3 应考虑火灾时,管道绝热材料对管道的损伤(如稳定性、耐火性能及在火中保持原有位置的能力)。

C.1.2.4 管道系统不可避免存在众多缝隙,如垫片密封面、螺纹或承插接头等,应考虑管道材料对缝隙腐蚀的敏感性。

C.1.2.5 电偶腐蚀是两种腐蚀电位相差较大的金属材料紧密接触,通过电解质构成腐蚀电流回路,致使腐蚀电位低侧的金属成为阳极加速腐蚀,反之腐蚀电位较高侧的金属成为阴极而得到保护。

电位差越大、阳极/阴极面积比越小(即小阳极/大阴极),则电偶腐蚀越严重。

材料表面状态,包括非金属或金属涂层及阴极保护(牺牲阳极)都对减轻电偶腐蚀产生重大影响,可采取如下防护措施:

- a) 对腐蚀电位较高侧的金属施以非金属涂层;
- b) 碳钢的热镀锌(水温不高于 66 °C);
- c) 埋地管道采用阴极保护(牺牲阳极)及绝缘法兰。

C.1.2.6 应考虑螺纹润滑剂或密封剂与流体工况的相容性。

C.1.2.7 应考虑衬垫、密封件和“O”形环与流体工况的相容性。

C.1.2.8 应考虑诸如胶黏剂、熔剂等材料与流体工况的相容性。

C.1.2.9 应考虑管道材料,包括密封剂、垫片、润滑剂和绝热材料与强氧化性流体(如氧气或氟气)的相容性。

C.2 低温脆性断裂

C.2.1 碳钢、碳锰钢和合金钢的低温脆性断裂

C.2.1.1 低温脆性断裂是金属材料在低温或韧脆转变温度以下,发生突然破裂的灾难性失效现象。发

生脆性断裂时,构件承受应力水平远低于材料屈服强度,因此构件断裂前无塑性变形,断口呈脆性。

C.2.1.2 基于金属材料的韧脆转变温度、使用经验及断裂力学分析,本部分列出了材料最低允许使用温度(MDMT)及相应冲击试验要求。

C.2.1.3 除本部分的要求外,下列因素应予考虑:

- a) 降低钢材韧脆转变温度的主要因素并非合金化($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上),而是纯净化、细晶化及热处理状态。
- b) 厚度是影响脆性断裂的重要因素,一方面材料的韧性水平随厚度增加而降低;另一方面厚壁构件更易产生三向应力,而诱发脆性断裂。
- c) 应力水平(包括缺陷处的应力集中和残余应力、组织应力)也有重大影响,50 MPa 以下的低载荷状态可大大缓解脆性断裂的风险。而焊接残余应力及焊接热影响区的晶粒粗化使焊缝成为压力元件脆性断裂的首发区域,为此,焊后热处理(PWHT)也成为降低脆性断裂风险的重要措施。
- d) 压力设备高于转变温度的超载“温压力试验”具有缺陷尖端钝化、降低焊接残余应力、过载保护等多重效能,已成为控制脆性断裂风险的重要措施。

C.2.1.4 应考虑下列情况对 8.1.3.3 所列的免除冲击试验的碳钢和碳锰钢管道系统的脆性断裂风险:

- a) 冲击载荷(管道内部或外部的冲击载荷、流体的撞击等冲击荷载、泄压或排放产生的反力等);
- b) 热加工而导致材料韧性损失;
- c) 奥氏体和铁素体材料之间的异种钢焊接,由于线膨胀系数的差异而产生的附加应力;
- d) 管道强行装配和冷紧导致的附加轴向应力,尤其是对低温低应力工况评定的影响;
- e) 评估上述作用力时,应考虑材料低温下的弹性模量的计算。

C.2.1.5 应考虑由于液态烃、液化气体之类高挥发性流体,由节流、闪蒸、骤冷而导致脆性断裂的风险。

C.2.1.6 应考虑低温(材料产生脆性)或高温(降低材料强度)导致管道支架损坏的可能性。

C.2.2 奥氏体不锈钢的低温脆性断裂

C.2.2.1 奥氏体不锈钢为面心立方晶格的奥氏体组织,其韧脆转变温度低于绝对零度($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$),因此 300 系列奥氏体不锈钢固溶状态下不存在低温脆性断裂的风险。

C.2.2.2 下列情况,有可能导致 300 系列奥氏体不锈钢的脆性转变温度提高:

- a) 剧烈冷变形,导致奥氏体组织的马氏体转变而脆性转变温度的提高,为此应重新固溶。
- b) 奥氏体不锈钢的焊缝可能含有高达 10% 以上的 δ 铁素体,由此会影响 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下的焊缝冲击韧性,为此应控制焊缝铁素体数 $\text{FN} \leq 8 \sim 10$ 。在控制焊缝 FN 的同时,也要防止 FN 过高而引起的热裂纹风险,应加强 PT 检查。
- c) 降低含碳量,尽量避免使用 321、347,提高含镍量都有利于提高奥氏体不锈钢的低温稳定性。
- d) 316L、316LN 是 $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氢管道的通用选材,AWS A5.4 E16-8-2(FN ≤ 5)焊条为其标配。

C.3 高温

C.3.1 蠕变断裂

蠕变断裂是金属材料在高温和低于屈服强度的应力的共同作用下,产生随时间延长而不断增加的变形,直至断裂。压力设备典型金属材料的蠕变阈值温度如表 C.1 所示。

虽然本部分已列入材料高于蠕变阈值温度的使用温度上限和相应的寿命为 10^5 h 的设计许用应力,但工程实践中还存在诸多涉及高温蠕变断裂的工况需作安全评估,常见有如下各项:

- a) 高温短时应力的安全评估;
- b) 两种以上高温短时应力的累积损伤安全评估;

- c) 剩余寿命安全评估；
- d) 大于 10^5 h 的材料设计许用应力。

上述 a)项可按压力元件在预期工况下的应力水平应不高于按 Larson-Miller 法获得的材料在 $25\text{ h} \sim 2.5 \times 10^5\text{ h}$, 温度高于蠕变阈值温度至极限使用温度区间的平均或最小持久断裂应力(应考虑相应安全系数)为准则进行评估。

上述 b)项可按压力元件在预期工况下应力水平根据 MPC- Ω 法求得材料在 $25\text{ h} \sim 2.5 \times 10^5\text{ h}$, 温度高于蠕变阈值温度至极限使用温度区间的蠕变速率 RC(1/h)。蠕变速率 RC 与该工况的使用时间 t (小时)的乘积即为该工况(温度、时间、应力)对材料造成的蠕变损伤 DC。根据 MPC- Ω 法及 API 579-1: 2007 第 10 部分的准则, $DC \leq 2.5$ 。压力元件服役期间如将经历多种蠕变温度区间内的工况(温度、时间、应力), 都可按上述方法逐个求得每一工况下的 DC, 其累积值按上述相同准则, 不得大于 2.5。

上述 c)项同样可按 a)或 b)所述方法进行剩余寿命安全评估。

上述 d)项可按 Larson-Miller 法或查阅 ASME 锅炉压力容器规范第 III 卷核动力装置 NH 卷取得。

表 C.1 典型金属材料的蠕变阈值温度

材 料	蠕变阈值温度
碳钢($R_m \leq 414\text{ MPa}$)	343 °C (650 °F)
碳钢($R_m > 414\text{ MPa}$)	371 °C (700 °F)
0.5Mo 钢	399 °C (750 °F)
铬钼合金钢 1¼Cr-1/2Mo(正火+回火)	427 °C (800 °F)
铬钼合金钢 1¼Cr-1/2Mo(退火)	427 °C (800 °F)
铬钼合金钢 2¼Cr-1Mo(正火+回火)	427 °C (800 °F)
铬钼合金钢 2¼Cr-1Mo(退火)	427 °C (800 °F)
铬钼合金钢 2¼Cr-1Mo(调质)	427 °C (800 °F)
铬钼合金钢 2¼Cr-1Mo-V	441 °C (825 °F)
铬钼合金钢 3Cr-1Mo-V	441 °C (825 °F)
铬钼合金钢 5Cr-1/2Mo 	427 °C (800 °F)

表 C.1 (续)

材 料	蠕变阈值温度
铬钼合金钢 7Cr-1/2Mo	427 °C (800 °F)
铬钼合金钢 9Cr-1Mo	427 °C (800 °F)
铬钼合金钢 9Cr-1Mo-V	454 °C (850 °F)
马氏体不锈钢 12Cr	482 °C (900 °F)
铬镍奥氏体不锈钢 304,304H	510 °C (950 °F)
铬镍奥氏体不锈钢 316,316H	538 °C (1 000 °F)
铬镍奥氏体不锈钢 321,321H	538 °C (1 000 °F)
铬镍奥氏体不锈钢 347,347H	538 °C (1 000 °F)
Ni-Cu-Fe 合金 800,800H,800HT	565 °C (1 050 °F)
铬镍奥氏体不锈钢 HK-40	649 °C (1 200 °F)

C.3.2 475 °C脆化

C.3.2.1 含铬量 $\geq 12\%$ 的400系列不锈钢(高铬不锈钢)、铁素体含量较高的锻造或铸造奥氏体不锈钢和双相不锈钢中的铁素体相在316 °C~540 °C温度范围内停留较长时间后,Cr-P金属中间相析出,材料硬度增加,塑性韧性下降而导致脆化,脆化的最大速率发生在475 °C,故常称为475 °C脆化。

C.3.2.2 含铬量越高以及不锈钢中的铁素体相比比例越高,475 °C脆化越严重。但这种脆化主要导致材料常温或较低温度下的塑性韧性下降,而对其高温下的塑性韧性影响甚微,因此在压力设备的开停车及压力试验期间容易产生风险。410型马氏体不锈钢对475 °C脆化免疫,而405型铁素体不锈钢却不能幸免。

C.3.2.3 工作温度在上述温度范围或敏感材料在热处理或冷却过程中在此温度范围停留时间过长,都可能产生475 °C脆化。

C.4 铸铁

铸铁、可锻铸铁、高硅铸铁以及延伸率小于15%的球墨铸铁均属脆性材料,对冲击载荷及热冲击较

敏感,应在有限条件下控制使用,并采取相应的防护措施。

C.5 碳钢、碳锰钢和合金钢

C.5.1 碱脆(Caustic Embrittlement)

C.5.1.1 输送中高浓度 NaOH 或其他强碱性流体的碳钢管道将产生应力腐蚀破裂(晶间裂纹),俗称“碱脆”,碱脆随碱液浓度和温度提高而加剧。

C.5.1.2 温度 $<46\text{ }^{\circ}\text{C}$,一般不会发生碱脆; $46\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 82\text{ }^{\circ}\text{C}$,随 NaOH 质量分数升高而加剧; $>82\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,仅当 NaOH 浓度 $\leq 5\%$ 时才不发生碱脆,但易发生碱液蒸发浓缩,故而仍存在碱脆的风险。

C.5.1.3 碱脆经常出现在未作消除应力热处理的焊缝附近,因此 $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的 PWHT 和防止过热可相应扩大碳钢在碱液中的适用范围。

C.5.2 碱性应力腐蚀破裂(Alkaline Stress Corrosion Cracking, ASCC)

C.5.2.1 碳钢除上述在苛性钠中发生的碱脆以及下列酸性介质中的氢致应力开裂外,还存在着在下列介质中发生多种碱性应力腐蚀破裂的风险:

- a) 常温或低温无水液氨;
- b) 醇胺液(常用于脱硫、脱 CO_2);
- c) 碱性碳酸盐-酸水溶液(气体净化系统)。

C.5.2.2 碳钢、低合金高强度钢的 ASCC,与残余应力、介质的组成和浓度(包括反应物杂质副反应污染)与特定的温度区间有关。通常裂纹位于焊接热影响区,许多硬度达标的焊接接头还是会发生 ASCC。

为此,与酸性介质中发生 SCC 归因于氢致开裂不同,对于 ASCC 的机理,目前倾向归因于过高的焊接或冷变形残余拉应力存在,致使材料在特定的弱碱性(含有 H_2S 、 CO_2 、 NH_4 、 O_2 、氯化物、氰化物)腐蚀环境中形成的钝化膜滑移破裂,而使失去钝化膜保护的裸露金属快速局部腐蚀所致。因此 PWHT 就成为控制 ASCC 的关键措施,而控制硬度反成多余。实践表明,对于常用的碳钢、碳锰钢,规范规定的 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ PWHT 温度还不足以把焊接热影响区的残余应力峰值降低到免除 ASCC 的阈值。应采用更高的 $620\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ PWHT。对于如碳酸盐溶液管道系统的局部热处理,还需把 PWHT 温度提高至 $650\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

C.5.2.3 对策主要为限制使用高强钢(但一般不必控制硬度)、冷变形和采用较高的温度进行 PWHT。对于液氨引起的 SCC,避免 O_2 (空气)污染或加入 0.2% 水也可有效地控制 SCC。

C.5.3 石墨化

C.5.3.1 碳钢和 0.5Mo 钢长期在 $427\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上工作,致使稳定性不高的碳化物分解成铁素体和石墨,导致材料常温强度和高温长期强度下降。下降程度对应于石墨化进程。

C.5.3.2 温度和时间是影响石墨化的最重要因素,温度高于 $538\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,热影响区发生严重石墨化仅需 5 年,而温度为 $454\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,产生轻微的石墨化也需要 30 年~40 年。

C.5.3.3 冷变形及焊接热影响区,相对更易发生石墨化。

C.5.3.4 曾有硅镇静优于铝镇静的论点,但无确切证明,现已忽略。

C.5.4 软化(珠光体球化)

C.5.4.1 铬钼合金钢,如 15CrMo 、 $1-1/4\text{CrMo}$ 、 $2-1/4\text{CrMo}$ 、 12Cr1MoV 、 5Cr0.5Mo 钢长期在 $440\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上工作,珠光体中的碳化物不稳定,由原先的片状或弥散分布聚集成球状或块状碳化物,导致材料常温强度和高温长期强度下降。

C.5.4.2 温度、时间和合金含量是影响珠光体球化的重要因素。退火状态相对优于 N+T 或 QT；硅镇静的粗晶粒钢相对优于铝镇静的细晶粒钢。

C.5.4.3 虽然珠光体球化致使材料高温强度下降，但伴随塑性的提高，即使在应力集中部位也允许有更大的应变。除高应力水平的应力集中区或伴随其他材料失效风险，仅由于珠光体球化而导致压力设备更换维修的案例甚为罕见。

C.5.5 高温氢侵蚀

C.5.5.1 碳钢及铬含量不大于 3% 的铬钼合金钢使用温度 177 °C 以上，且氢分压不低于 0.345 MPa 时，有可能发生高温高压氢侵蚀，又称为“热氢侵蚀”，以区别于常见的氢脆、氢白点、氢致裂纹等在常温或相对较低温度下产生的氢损伤。

C.5.5.2 随着温度及氢分压的提高，原子氢与钢中的碳反应而生成甲烷，从而在材料表面形成脱碳层；而在钢材内部反应生成的甲烷集聚在晶界或钢材内部的缺陷（如夹杂物）无法扩散逸出而形成很高压力，致使钢材内部脱碳、微裂直至破裂。晶界或夹杂处集聚的高压若接近材料表面则可产生氢鼓泡。

C.5.5.3 表面脱碳层较薄，对材料整体的强度和延性影响甚小，工程上可忽略；但内部脱碳及裂纹将导致临氢压力设备发生灾难性事故。较高温度但较低氢分压，高温氢侵蚀的损伤模式为表面脱碳（见 Nelson 曲线的虚线）；而较低温度但较高氢分压，高温氢侵蚀的损伤模式为内部脱碳及裂纹（见 Nelson 曲线的实线）；高温加高压，则两种损伤模式都可能存在，尤以后者为甚。由此可见影响高温氢侵蚀最重要的因素是温度，其次是氢分压。

C.5.5.4 铬、钼合金元素的加入是工程中应对高温氢侵蚀的常见有效措施，并由此根据长期经验绘制成 Nelson 曲线，制定了 API RP941 并不断根据案例剖析进行修订。

- a) 含铬量大于或等于 5% 的铬钼合金钢以及不锈钢，从目前工程实例而言，对高温氢侵蚀是免疫的。奥氏体不锈钢常用于内壁堆焊、复合或衬里用于抵御高温硫或其他介质的腐蚀。
- b) 奥氏体不锈钢的氢溶解度比铁素体钢大一个数量级，氢的扩散速度要低两个数量级，因此可降低复合材料中基层材料的氢分压。

C.5.5.5 根据 Nelson 曲线进行选材时应注意如下事项：

- a) 留有 20 °C 以上安全裕量，切不可超温，防止过热；采用内部隔热衬里可降低基层材料温度时，应防止隔热衬里的完整性破损而引起过热热点；
- b) Nelson 曲线是基于材料良好的热处理状态，以保证其金相组织及碳化物稳定性，而焊接热影响区及 5% 以上冷变形将改变金相组织及碳化物形态和稳定性，导致其抗氢性能的下降。近年来多次碳钢、0.5Mo 钢临氢设备在低于但接近 Nelson 曲线的安全区域发生高温氢侵蚀的重大事故，究其原因都归于焊后未作 PWHT 或冷变形。因此碳钢及铬钼合金钢临氢设备，如换热器管子与管板，焊后均应作 PWHT，否则还应将 Nelson 曲线留有 50 °C 以上安全裕量，如图 C.1 所示。

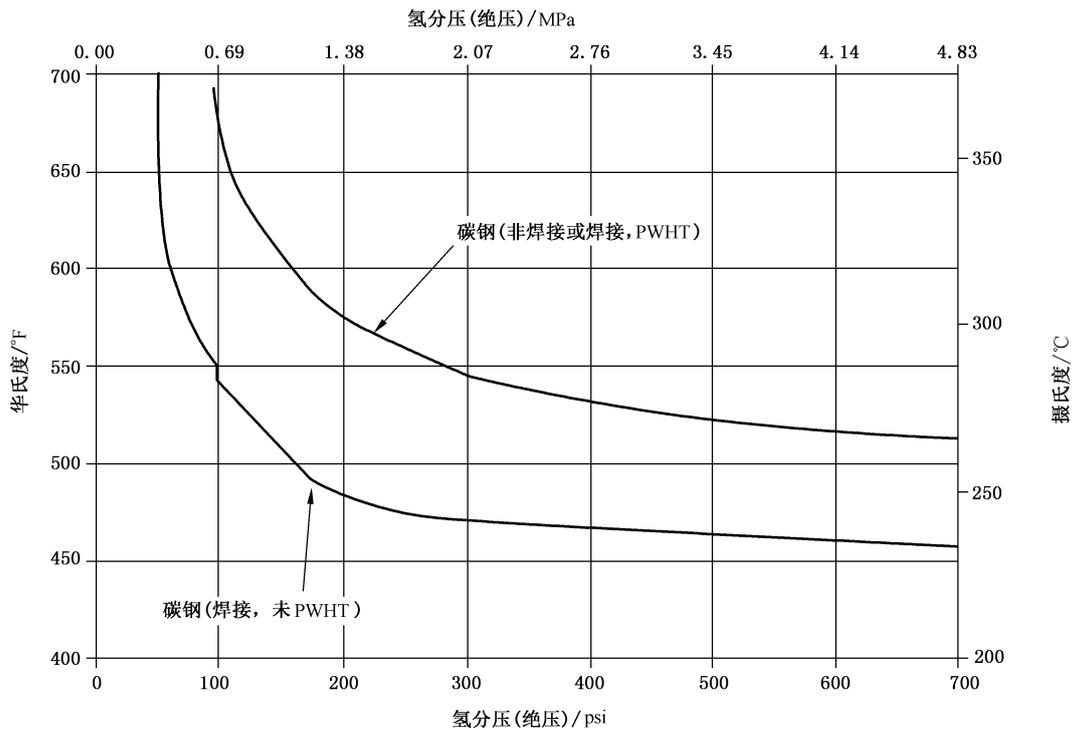


图 C.1 焊后未作 PWHT 的碳钢 Nelson 曲线 (API 941:2016)

C.5.6 湿硫化氢/硫化物应力腐蚀破裂 (Sulfate Stress Corrosion Cracking, SSC)

C.5.6.1 湿硫化氢/硫化物应力腐蚀破裂是金属在水(电解质)和硫化氢存在下由拉伸应力和腐蚀共同作用的开裂。硫化物应力破裂(SSC)有多种失效分类,如 SSC、SCC、HSC、HIC、SOHIC、SWC 等,从开裂的机理而言也可归因为氢致应力开裂,由于都是吸收硫化物在金属表面电化学腐蚀所产生的原子氢而造成的,为此本附录均将其归为 SSC。碳钢或低合金钢焊接压力设备是发生 SSC 的重灾区。为此,仅就此列出选材时应予关注的要点。

C.5.6.2 影响 SSC 的环境因素有 H₂S 浓度(H₂S 分压 0.035 MPa 绝压以上)、pH(酸性)及温度,氰化物的存在对 SSC 有催化作用且易诱发 HIC。氯化物、CO₂ 的存在也将产生多种腐蚀形态的共生与加剧。H₂S 浓度(分压)越高,pH 越低,SSC 越敏感,因此工程中常称为酸性介质的 SCC。温度提高导致氢的渗透速率提高,SSC 发生的概率反而下降,因此 SSC 通常发生在常温或工作温度 65 °C 以下。

C.5.6.3 防止碳钢或低合金钢焊接压力设备发生 SSC 的工程措施核心是控制硬度。控制硬度就是控制金相组织、控制组织应力及残余应力。因为这些部位正是氢致裂纹的根源。碳钢、低合金钢防止 SSC 的硬度上限为 RC22 或 HV₁₀ 237。由于焊接热影响区的高硬度区很窄,HV₁₀ 无法用于现场检测,HB 压痕较大,其读数代表的是平均硬度而非峰值,因此焊缝检测时的硬度上限为 HB200。

控制硬度要落实到工程设备的每一细节、内壁外壁、宏观微观,因此如冷变形、锤击、钢印、坡口外焊接打弧和飞溅都应禁止。低强度钢优于高强钢;原材料正火、正火加回火、退火、调质及 PWHT 都是有益于防止 SSC。

C.5.6.4 产生 HIC 的材料因素是板材单向轧制过程中形成的片状 MnS 夹杂,因此控制板材及板焊管母材的含硫量不大于 0.002% 或加 Ca 促使 MnS 夹杂球化成为抗 HIC 板材生产的附加要求。但该低硫要求没有必要套用到无缝钢管、锻件,更没有必要套用到焊缝,因为 MnS 夹杂在此类材料中不可能呈片状分布。

C.5.7 层状撕裂

C.5.7.1 碳钢或低合金钢厚板中的片状 MnS 夹杂也易发生焊接部位的层状撕裂。当夹杂邻近 T 型焊

接接头的板材表面时,在焊接热应力和/或 Z 向(厚度方向)载荷的作用下而发生撕裂,如安放式接管与主管、凸形封头与裙座、管板、平封头与壳体、管子的焊接;或当夹杂邻近焊接热影响区,由焊接过程的充氢扩散和焊接热应力的共同作用下发生类似硫化氢 SCC 中的氢致阶梯状开裂 HOHIC。

C.5.7.2 层状撕裂的对策:

- a) 待焊部位 UT 探伤,排除可能的夹杂;
- b) 改变 T 型角接为 L 型角接或对接,如安放式接管改为插入式接管;
- c) 降低钢材含硫量,片状 MnS 夹杂将导致钢板 Z 向(厚度方向)拉伸性能,尤其是断面收缩率大幅下降。Z 向断面收缩率与含硫量的关系大致为 Z15(含硫量 ≤ 0.010)、Z25(含硫量 ≤ 0.007)、Z35(含硫量 ≤ 0.005)。因此根据具体工况,选用相应 Z 向(厚度方向)性能厚板就成为海上平台之类厚板焊接钢结构的惯例。

C.5.8 高温硫化物腐蚀

C.5.8.1 碳钢、合金钢和不锈钢在超过 260 °C 环境下与硫化物发生反应造成腐蚀,氢的存在会加速腐蚀。硫化物腐蚀主要是由 H₂S 和其他活性硫化物引起的,所谓活性硫化物即在高温下容易分解生成 H₂S 的硫化物,而非总硫。因此,H₂S 和活性硫化物浓度和温度越高,尤其在 260 °C~425 °C,随着温度升高,腐蚀速率呈指数式升高,而在 425 °C 达到峰值。

C.5.8.2 碳钢、合金钢、不锈钢和镍基合金的耐蚀性取决于生成保护性硫化物膜的能力。对碳钢而言,含硅量 $\geq 0.1\%$ 将比含硅量 $\leq 0.1\%$ 者大大增加耐硫化的能力。对合金钢而言,含铬量可以明显增加耐硫化的能力,但含铬量低于 9%,耐蚀性能提高不多。而加氢与高温硫化物腐蚀共存时,含铬量低于 12%对耐蚀性能提高不多。因此应采用不锈钢和镍基合金,其耐蚀性同样取决于含铬量。

C.5.8.3 工程设计时通常按 McConomy 曲线(无 H₂、硫化物、温度、含铬量)或 Couper-Gorman 曲线(H₂+H₂S)进行初步选材。

C.5.9 铬钼合金钢的回火脆性与再热裂纹

C.5.9.1 碳钢和合金钢在 343 °C~577 °C 温度停留将导致材料韧性不同程度地下降,由于该温度范围与钢材的回火温度相近,故称为回火脆性。由于铬钼合金钢的使用温度范围又与其高度重合,因此对其格外关注。产生回火脆性的根源在于钢中磷(P)、砷(As)、锑(Sb)、锡(Sn)等有害元素的晶间析出集聚,而硅、锰对此亦有辅助作用。此外大截面构件的热履历也对其回火脆性的敏感性带来显著的影响。

C.5.9.2 回火脆性导致的韧性下降主要对压力元件开车阶段以及在转变温度下快速加载或承受冲击载荷构成威胁,尤其是厚壁(≥ 50 mm)及结构不连续构件。因此提高材料的纯净度和原始韧性水平就成为规避回火脆性风险的核心工程措施。

C.5.9.3 铬钼合金钢中对回火脆性最为敏感的是 440 °C 左右长期使用的 2.25~3Cr-1Mo 钢的 ≥ 38 mm 厚壁临氢压力设备。为此工程中采用控制措施如下:

$$\text{母材的 } J = (\text{Si} + \text{Mn})(\text{P} + \text{Sn}) \times 10\,000 \leq 150(\text{wt} \%);$$

$$\text{焊缝的 } X = (10\text{P} + 5\text{Sb} + 4\text{Sn} + \text{As})/100 \leq 15 \times 10^{-6};$$

通过控制材料经历 PWHT 和步冷处理后的转变温度增值来控制厚壁临氢压力设备的回火脆性风险。用户应根据自身情况及使用经验,不必盲目套用上述要求。

C.5.9.4 5%~9%CrMo 钢对回火脆性并不敏感。工程界曾担忧 1~1.25Cr0.5Mo 钢的回火脆性敏感性,研究表明,随着用户对铬钼合金钢韧性要求的提高,1~1.25Cr0.5Mo 钢的回火脆性敏感性低于 2.25~3Cr-1Mo 钢。

C.5.9.5 近年来铬钼合金钢的冶金技术已由粗晶钢转为铝脱氧的细晶钢,如钢中的含磷量 ≤ 0.010 ;含硫量 ≤ 0.005 ,0~-20 °C AKV 50J 就足以控制 1~1.25Cr0.5Mo 厚壁压力设备的回火脆性风险。因此,1~1.25Cr0.5Mo 厚壁(≥ 25 mm)压力设备通过下列工程措施以控制再热裂纹及回火脆性的风险:

- a) 母材及焊缝的 X 系数 $\leq 15 \times 10^{-6}$ 、含碳量 $\leq 0.15\%$ ；
- b) 采用低氢焊材(H8)、焊接区域 PWHT 后 $HV_{10} \leq 235$ 或 $HB \leq 225$ ；
- c) 水压试验温度不低于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

C.5.9.6 材料的回火脆性可通过 $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的回火热处理来恢复韧性,但并不能对再次发生回火脆性免疫。

C.5.10 氢脆和氢致开裂(Hydrogen Embrittlement, HE)

C.5.10.1 由于碳钢、低合金钢为体心立方晶格,氢在钢中的溶解度比面心立方晶格的奥氏体钢或镍合金要低得多,而且其在相变冷却过程中过饱和的氢大量析出,在晶格畸变、组织应力高或缺陷、空穴处的集聚致使碳钢、低合金钢成为氢脆和氢致开裂的敏感金属。

C.5.10.2 氢的来源有下列三大渠道:

- a) 材料冶炼、锻造、焊接过程中进入,而其后快速冷却到常温过程中来不及逸出,而导致脆裂或韧性大幅下降,如氢白点、焊接延迟裂纹(冷裂纹)。
- b) 材料电化学腐蚀过程中阴极产生的氢原子渗入金属,而导致的氢致裂纹 HSC。除上述 H_2S 导致的 SSC、HIC 外,高浓度的氢氟酸与碳钢、低合金钢腐蚀反应生成的原子氢渗入钢中也将产生与酸性 H_2S 溶液类同的 SCC 和 HIC。此外,钢材的过酸洗和阴极保护中过电位也可能导致阴极充氢而引发的氢脆。
- c) 氢对金属材料的渗透率随氢分压的提高而加大,除上述高温高压氢侵蚀外,在常温或较低温度下,随着氢分压的提高也将导致高强度钢或钢的淬硬组织处产生氢脆。如气体工业将常温氢分压 $\geq 1.0\text{ MPa}$ 的压力设备列入应考虑采取防范氢脆的工程措施;ASME 已制定 B31.12 氢管道和管线规范,专门应对高压下常温与低温的氢脆。

C.5.10.3 控制氢脆和氢致开裂的对策如下:

- a) 采用真空脱气或采用低氢焊材,降低钢中含氢量。由于氢在温度升高时,氢在钢中的渗透率大大提高,因此缓冷、脱氢处理也将大大缓解氢脆风险。总之从氢的供给侧采取釜底抽薪的方式控制氢脆风险。
- b) 控制材料强度、硬度、冷变形、PWHT、板材的含硫量(HIC)等从材料及应力(包括内应力、残余应力)侧控制氢脆风险。

C.6 奥氏体不锈钢和镍基合金

C.6.1 奥氏体不锈钢和镍基合金的冶金特征

奥氏体不锈钢是压力设备用材中仅次于碳钢、碳锰钢的第二大户,选择奥氏体不锈钢的理由大致有两个:首先是一钢多用,洁净美观、耐蚀、高温($800\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$)、超低温($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$),此外良好机械强度、塑性、韧性和加工焊接性能。正确使用奥氏体不锈钢,规避其常见的潜在风险,应了解下列各项基本冶金特征:

- a) 300 系列奥氏体不锈钢的耐蚀性主要来自其铬含量及其表面只有 2 nm 的氧化铬钝化膜完整性、自钝化和修复能力;而 Ni 的作用主要在于形成奥氏体组织及由此带来的塑性韧性和加工焊接性能。一切有损于钝化膜完整性的因素都将对其耐蚀性带来颠覆性的后果,因此保证钝化膜完整性是应对不锈钢一切腐蚀问题的基础。
- b) 不锈钢的不锈是相对碳钢而言,在氧化性介质中有良好的耐蚀性,而 300 系列奥氏体不锈钢对还原性介质、强氧化性介质、氧化还原性介质、卤式盐以及抗 SCC 的能力十分有限;高性能奥氏体不锈钢、双相不锈钢以及 Inco、哈氏等镍基耐蚀合金的选用正好填补这方面的空白。
- c) 奥氏体不锈钢的组织特征,如铬当量、镍当量、Schaeffler 图、Delong 图、FN 数、PRE 点蚀指数、A262 晶蚀试验 B 法、C 法、E 法、G48A 点蚀试验和点蚀临界温度,都对分析和应对不锈钢和镍基耐蚀合金各种失效风险至关重要。

C.6.2 晶间腐蚀 (Intergranular Corrosion, IGC)

C.6.2.1 晶间腐蚀是奥氏体不锈钢和镍基耐蚀合金在特定有限的几种无机及有机酸中(通常在高于常温的温度下)发生的沿晶界进行的选择性局部腐蚀(属电化学腐蚀)。

C.6.2.2 发生晶间腐蚀的机理一般均解释为与不良的热履历导致碳化铬在晶界连续析出而产生的敏化贫铬现象有关。此外,σ相、Chi相、焊接金属中的δ铁素体甚至“端晶”也有可能导致类似晶间腐蚀的选择性腐蚀。由于碳在高镍镍基耐蚀合金中的溶解度比低含镍量的奥氏体不锈钢更低,因此因敏化而产生晶间腐蚀的倾向更大。

C.6.2.3 防止晶间腐蚀的对策如下:

- 固溶(即将碳化物重新在高温下溶解到奥氏体晶内)后快冷,防止碳化物在敏化区再次析出。
- 超低碳(300系列奥氏体不锈钢含碳量 ≤ 0.030 ;镍基耐蚀合金及双相不锈钢、高性能奥氏体不锈钢含碳量 ≤ 0.020 ,甚至 0.015%);但超低碳奥氏体合金在敏化区长期停留仍不能防止碳化物析出,见图C.2所示。
- 加入铌、钛等强烈碳化物元素,优先形成铌、钛的碳化物而减少碳化铬在晶界连续析出,或再施以稳定化处理进一步强化稳定化效果。
- 晶间腐蚀试验是研究奥氏体合金及其制作工艺应对晶间腐蚀倾向的重要方法,但各种晶间腐蚀试验方法与不锈钢用户所面临的腐蚀环境缺乏对应性与可比性。因此,晶间腐蚀试验不应成为用户的选材依据。对于腐蚀环境下使用300系列奥氏体不锈钢而言,超低碳、双牌号或稳定化已成惯例,绝大多数潜在的晶间腐蚀风险已被控制,加上常用的硫酸-硫酸铜铜屑法的敏感性不高,因此除极少数的工况外(如尿素、硝酸用途的休氏试验),晶间腐蚀试验在实际工程中很少用作300系列奥氏体不锈钢质量控制要求。
- 而对镍基耐蚀合金及高镍的高性能不锈钢,由于产生晶间腐蚀的倾向更大,同时面临更为严苛的腐蚀环境,因此晶间腐蚀试验经常作为质量控制的保证,但应注意试验方法的对应性。双相不锈钢更应注意敏化处理的适用性。

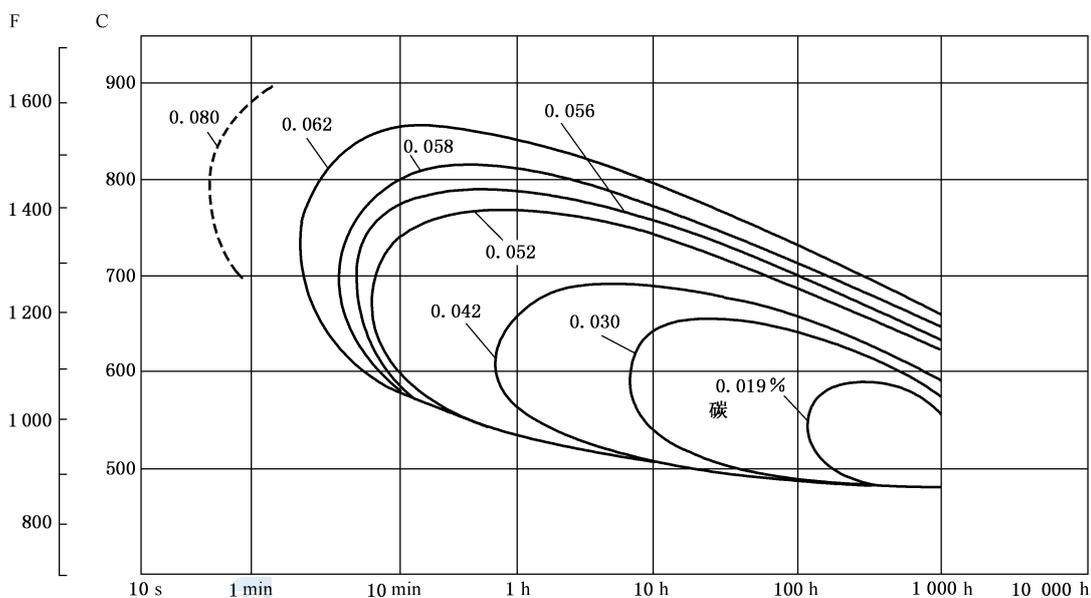


图 C.2 304 不锈钢的敏化 C 曲线

C.6.3 点蚀和缝隙腐蚀 (Pitting Corrosion and Crevice Corrosion)

C.6.3.1 点蚀是发生在金属表面的局部腐蚀，腐蚀局限于一个点或很小的区域，蚀坑优先沿重力方向向纵深发展直至穿孔，也有可能是在蚀坑的前端诱发腐蚀速度更快的应力腐蚀裂纹。通常认为点蚀机理是金属表面钝化膜首先被局部击穿，形成一个电解槽。小孔内小面积的阳极(相对于未被击穿的大面积金属钝化的阴极)迅速腐蚀，而且通过自身或催化过程不断向纵深发展。蚀坑的进展包括金属的溶解以及坑底部溶解的金属离子的水解而维持高酸度这两个过程。点蚀是奥氏体不锈钢和镍基合金在中性或偏酸性的氯化物溶液中最常见的局部腐蚀现象。图 C.3 所示为使不同含钼量奥氏体钢开始发生点蚀的氯离子浓度与 pH 的关系(65 °C~80 °C)。

至于缝隙腐蚀是点蚀发生在缝隙中的特殊形式。缝隙一般在 0.1 mm~0.01 mm(腐蚀介质可进入并滞留)。由于缝隙内缺氧，造成氢离子和氯离子的浓缩、pH 下降、腐蚀速度加快等“自催化过程”，缝隙外构成阴极保护、缝隙内成为牺牲阳极。

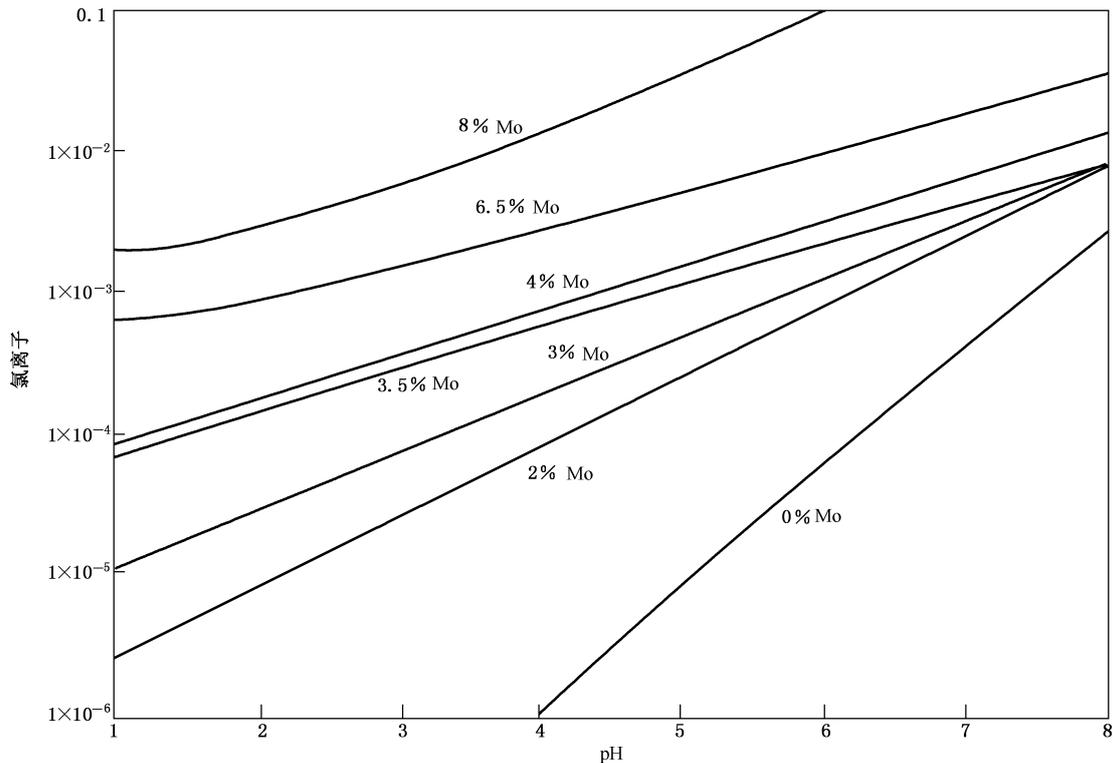


图 C.3 使不同含钼量奥氏体钢开始发生点蚀的氯离子质量浓度与 pH 的关系(65 °C~80 °C)

C.6.3.2 点蚀和缝隙腐蚀的影响因素如下：

- a) 依靠钝化膜来抵御电化学腐蚀的材料，其钝化膜的完整性及抵御卤素离子的能力就成为关键，因此，钝化膜的缺陷就是点蚀和缝隙腐蚀的高发区。
- b) 点蚀和缝隙腐蚀大多与氯化物、溴化物和次氯酸盐有关，尤其是氧化性金属盐，如铜、铁、汞的卤化物，因为这些金属盐本身具有氧化性，即使在缺氧的条件下也具有很强的侵蚀性。Na、Ca、Mg、Al 的卤化物在有氧条件下也会发生点蚀和缝隙腐蚀。
- c) 卤化物浓度增加(或蒸发、浓缩)、低 pH、温度升高、充氧，就每一因数而言，在一定范围内都可能对点蚀和缝隙腐蚀有促进作用。但任何因素都有一个度，物极必反，更何况多因素共同作用时的相互制约作用，因此从介质及工况预测点蚀是否发生，在实用中尚有困难。
- d) 统计表明，点蚀和缝隙腐蚀大多发生在 60 °C 以下。这可能与下列因素有关：

- 1) 温度升高,氧在介质中的溶解度反而下降,降低了 NaCl 的点蚀倾向;
- 2) 温度升高导致腐蚀速度以及氯离子浓缩概率大大提高,由点蚀诱发 CLSCC 的概率也随之提高。

e) 点蚀通常与介质滞留、蒸发、浓缩有关;反之,提高流速、避免缝隙、结垢、沉积、气液两相交替和滞液区,也可大大降低点蚀风险。

C.6.3.3 通常用点蚀指数 PRE 来衡量奥氏体不锈钢、双相不锈钢的相对耐点蚀、缝隙腐蚀和 SCC 的能力:

$$PRE = Cr + 3.3Mo + 1.65W + 16N$$

常用奥氏体不锈钢、双相不锈钢的点蚀指数 PRE 如表 C.2 所示。经验表明,耐海水点蚀用奥氏体不锈钢、双相不锈钢的点蚀指数 PRE 应不低于 32。

表 C.2 常用奥氏体不锈钢、双相不锈钢和镍基耐蚀合金点蚀指数 PRE 典型值

300 系列 ASS	PRE	高性能 ASS	PRE	双相钢 DSS	PRE	镍基耐蚀合金	PRE
304、304L	18	Alloy 20	30	2304	23	625	51
304LN	19.6	904L	34	3RE60	27	C22	70
316316L	22.6	254SMO	43	31803 (2205)	30.5	C276	75
316LN	24.2	AL-6XN	44	2205	34	Alloy 59	76
317L	27.9	654SMO	56	2507	43	Alloy 686	81

C.6.3.4 不锈钢和镍基耐蚀合金的点蚀试验与点蚀临界温度按下列方法确定:

- a) 工程中采用 6%FeCl₃ 溶液来测试各种奥氏体不锈钢、双相不锈钢和镍基耐蚀合金的点蚀临界温度(CPT)和缝隙腐蚀临界温度(CCT)。
- b) 常用的试验方法有 ASTM G48-A 法(CPT)、B 法(CCT)、C 法(CPT)、D 法(CCT)和 A923 C 法(DSS-CPT)。应注意,试验溶液大致相同,但试样处理、pH 调节、时间、判据等细节上有差异,对 CPT、CCT 有影响。图 C.4 所示为 ASTM G48 B 法缝隙腐蚀临界温度与点蚀指数 PRE 对应关系。
- c) 6% FeCl₃ 溶液的 pH 值约 1.3,具有很强点蚀倾向,所以由试验而确定的材料 CCT 和 CPT 并不代表材料在实际工况中的点蚀临界温度,但基本反映了各种奥氏体不锈钢、双相不锈钢和镍基耐蚀合金的相对耐点蚀和缝隙腐蚀能力和排序。
- d) ASTM A923 C 法及 G48 A 法常用于双相不锈钢产品(材料及焊缝)质量检验的依据如下:
A923 C 法 2205,母材 25 °C、焊缝 22 °C,无点蚀;2507,母材 45 °C~50 °C、焊缝 40 °C,无点蚀。

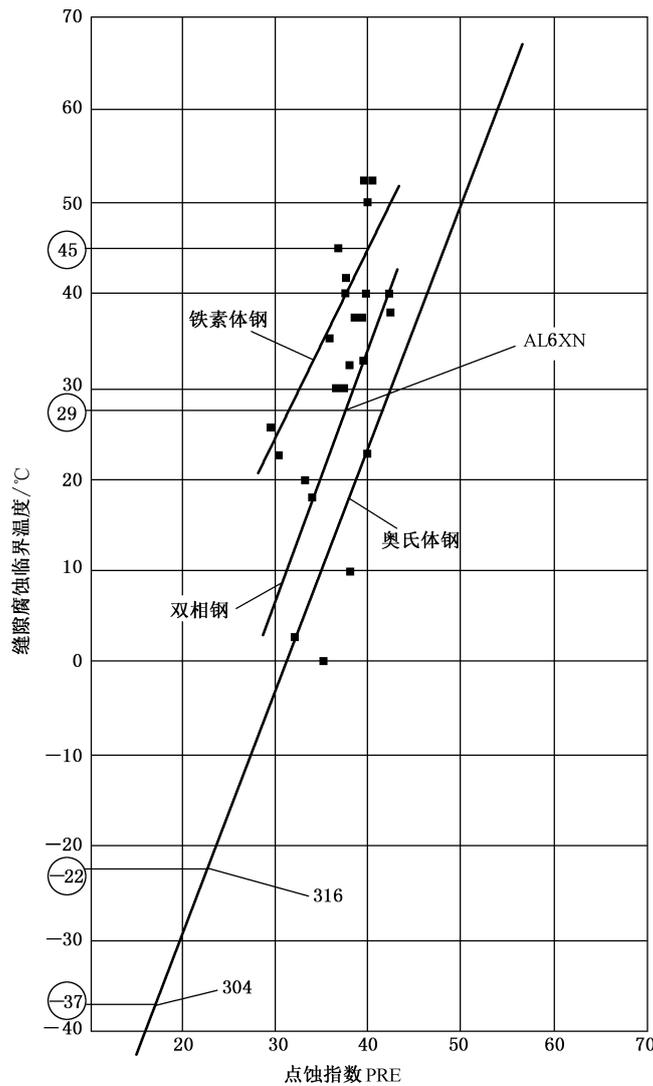


图 C.4 缝隙腐蚀临界温度与点蚀指数 PRE 对应关系 (ASTM G48 B 法)

C.6.4 氯化物应力腐蚀破裂 (Chloride Stress Corrosion Cracking, CLSCC)

C.6.4.1 氯化物应力腐蚀破裂机理和规律如下:

- a) 氯化物应力腐蚀破裂是奥氏体不锈钢,尤其是常用的 304、316 最常见的失效模式。发生氯化物应力腐蚀破裂的机理,尤其在其诱发孕育期大都与上述点蚀基本相同,都经历了钝化膜被击穿,随后经“自催化过程”形成蚀坑,其后在应力与温度的作用下,在缺陷(蚀坑或裂纹)尖端“自催化过程”更为加剧、金属快速溶解,形成穿晶带树枝状分枝的裂纹,裂纹间隙的电子探针可见高浓度的氯化物腐蚀产物。奥氏体不锈钢发生 CLSCC 的应力阈值较低,且一般由冷作应力或焊接残余应力引起,与载荷应力关系不大。

图 C.5 所示为氯化物应力腐蚀破裂概率与含镍量的关系,可见:

- 1) 300 系列奥氏体不锈钢对氯化物应力腐蚀破裂最为敏感。304 的 CLSCC 阈值温度 20 °C 左右,316 阈值温度 50 °C 左右。
- 2) 双相钢、铁素体不锈钢及含镍量 30% 以上的镍基合金对氯化物应力腐蚀破裂几乎是免疫的。

- 3) 提高含钼量可提高 CLSCC 阈值温度,含 6%Mo 的 AL-6XN 的 CLSCC 阈值温度达 240 °C 左右。
- b) 从腐蚀环境(介质)来看,氯离子浓度越高、pH 越低,CLSCC 发生的概率越高;但从含几百万分之一氯离子直至几百分之一、pH 从 1~10 都有发生 CLSCC 的事例。在断裂断口的腐蚀产物分析可见:氯离子可浓缩数百倍达数百分之一、pH \approx 0。可见除了自催化过程外,氯离子的沉积、蒸发、干湿交替是诱发点蚀及 CLSCC 的重要因素。导致发生 CLSCC 的氯离子质量分数往往取决于整个服役期间(包括水压、使用、维修)的最高质量分数。
- c) 60 °C 以上温度越高,CLSCC 发生的概率越高;导致发生 CLSCC 的温度往往取决于整个服役期间(包括水压、使用、维修)的最高温度。以 60 °C~80 °C 作为点蚀及 CLSCC 的分界点,主要归因于:
- 1) 温度越高,SCC 的腐蚀速率加快且超过点蚀的腐蚀速率,因此失效模式就表现为 CLSCC;
 - 2) 温度越高,氯离子的浓缩概率越大。60 °C 以下 CLSCC 发生的概率较低,而点蚀的概率较高,但在临界条件也有常温发生 CLSCC 的案例。

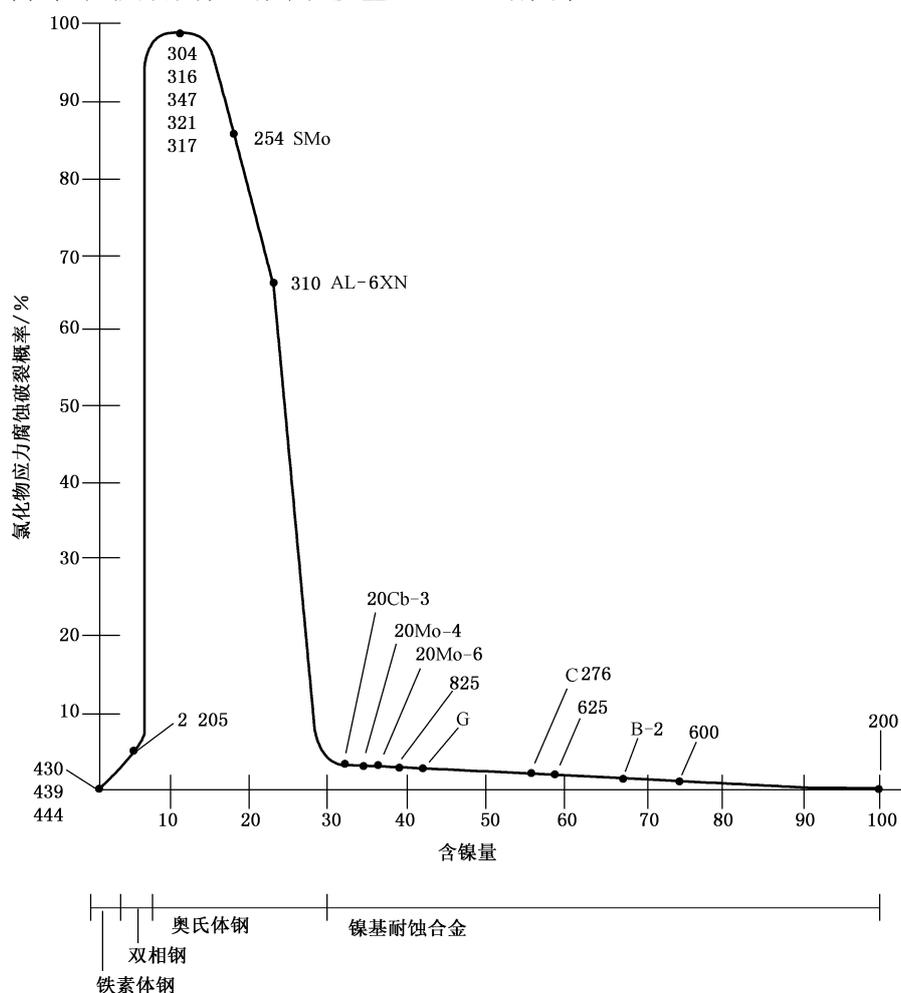


图 C.5 氯化物应力腐蚀破裂概率与含镍量的关系

C.6.4.2 氯化物应力腐蚀破裂的影响因素如下:

- a) 氯离子质量分数、温度的影响如表 C.3 所示。

表 C.3 氯离子质量分数、温度对 304L 的 CLSCC 的影响

温度/°C	氯离子质量分数 $\times 10^{-6}$ (pH ≤ 10)				存在浓缩、 沉积、蒸发
	1~10	11~100	101~1 000	>1 000	
10~38	低风险	低风险	低风险	中等风险	高风险
>38~66	低风险	中等风险	中等风险	高风险	高风险
>66~93	中等风险	中等风险	高风险	高风险	高风险
>93	中等风险	高风险	高风险	高风险	高风险

注：表列氯离子浓度、pH 和温度为整个服役期间(包括水压、使用、维修)可能存在的最高质量分数和温度。

b) 下列情况将提高表 C.3 的 CLSCC 风险等级：

- 1) 材料敏化；
- 2) 表面质量差(钝化膜完整性、酸洗钝化、污染、氧化色、机械损伤等)；
- 3) 铁离子污染；
- 4) 材料纯净度差；
- 5) 冷作变形或易切削级不锈钢；
- 6) 已存在点蚀或锈斑；
- 7) 存在缝隙、未焊透之类结构缺陷；
- 8) 频繁开停车或温度波动。

C.6.4.3 氯化物应力腐蚀破裂的对策如下：

- a) 规避 C.6.4.2 不利因素,降低 CLSCC 风险等级；
- b) 非金属涂层或热喷铝,包裹铝箔应对外壁 CUI；
- c) 采用点蚀指数(PRE)更高的材料或图 C.5 所示对 CLSCC 免疫的材料；
- d) 缓蚀剂或阴极保护；
- e) 在未彻底清除氯化物应力腐蚀破裂区域前,不能采取焊补措施。

C.6.5 连多硫酸应力腐蚀破裂(Polythionic Acid Stress Cracking, PTASCC)

C.6.5.1 连多硫酸应力腐蚀破裂是一种通常发生在停工、开工和有水及湿气存在的操作过程中的应力腐蚀开裂。开裂是由于材料在含有硫化物的高温腐蚀环境中使用后,在停工、维修期间由于气体的冷凝以及空气、氧和湿气侵入,与金属的硫化腐蚀层形成连多硫酸,然后当设备再次运行后很快就引起的开裂。

C.6.5.2 300 系列的奥氏体不锈钢、INCO 600 和 INCOLOY 800 系列的镍铬铁合金都会发生连多硫酸应力腐蚀破裂。裂纹集中在焊缝区域,呈类似晶间腐蚀状的沿晶开裂(区别于上述 CLSCC 大多为穿晶树枝状开裂)。

由于设备工作温度与不锈钢的敏化温度重合,因此常规的超低碳或稳定化不锈钢不能防止在敏化温度长时间停留后的碳化铬析出和贫铬现象。此外,奥氏体不锈钢一般不作 PWHT,而且现场管道要重作固溶处理十分困难,所以焊缝区域就成为晶间 PTASCC 的高风险区。

C.6.5.3 连多硫酸应力腐蚀破裂的对策如下：

- a) 材料和制造
 - 1) 稳定化不锈钢并在固溶后加作稳定化处理,以减少在敏化温度长时间停留后的碳化铬析出；

- 2) 采用改良型 347H;
 - 3) PWHT, 温度为稳定化温度, 空冷。
- b) 停车保护
- 1) 充氮(干燥, 无氧或加 5×10^{-3} 氨);
 - 2) 碱洗(1%~5% Na_2CO_3);
 - 3) 充干燥空气(空气的露点温度应低于金属内壁温度至少 22 °C 以上)。

C.6.6 焊接裂纹

C.6.6.1 焊接热裂纹具有如下特征:

- a) 奥氏体不锈钢和镍基合金的焊接裂纹与碳钢、合金钢的焊接冷裂纹(延迟裂纹或 C.5.10 的氢致裂纹)不同, 它是焊缝凝固结晶的后期, 即固液共存温度下产生的裂纹, 故称为焊接热裂纹, 又称为凝固裂纹;
- b) 焊接热裂纹的表现形式有两种: 一是位于焊缝中央纵向裂纹或收弧坑中的放射性裂纹; 另一种位于熔合线及临近的母材部位(包括多层焊时, 上层焊道与底层焊道的熔合区)的晶间开裂, 又称液化裂纹;
- c) 奥氏体不锈钢和镍基合金, 与焊接关系密切的、工程中常见的裂纹, 还有应力松弛裂纹(C.6.7)和液体金属侵蚀(C.6.8)。

C.6.6.2 焊接热裂纹机理如下:

- a) 单相的奥氏体熔池在结晶后期, 奥氏体柱状晶、树枝状晶之间富集着低熔点的液态共晶物或化合物在冷却收缩变形而形成的拉应力作用下导致的晶间开裂。奥氏体钢凝固裂纹倾向有如下原因:
 - 1) 导热系数小、线胀系数大、焊接变形和应力大;
 - 2) 铈、硅、硫、磷在首先凝固的 γ 奥氏体相中溶解度小, 而偏析在柱状晶、树枝状晶之间富集形成低熔点的液态共晶物或化合物。而锰、钼、钨、钒、钛有利于防止凝固裂纹。
- b) 液化裂纹多与过高焊接热量导致熔合线区域中金属重新液化(尤其是低熔点夹杂较多部位的偏析), 后又快速冷却产生应力而造成的开裂。

C.6.6.3 焊接热裂纹对策如下:

- a) 当前工程上最有效的措施是: 在单相的奥氏体焊接材料中人为地提高铁素体形成元素含量, 即铬当量, 调整铬镍比, 使焊缝金属含有一定量的 δ 铁素体数, 改变熔池的凝固过程, 以消除或降低焊接热裂纹风险; 通常 304、316、321 的 FN 数应不低于 3; 而 347 的 FN 数应不低于 5。特殊工况需要控制 FN 数更低时, 可采用 16-8-2 型低铁素体焊材。
- b) 焊接工艺的调整改善措施如下:
 - 1) 避免过高焊接输入热量, 多层焊时让底层焊缝充分冷却后再焊下一道;
 - 2) 控制焊道熔深与宽度之比, 避免形成既深又窄的熔池(易热裂);
 - 3) 弧坑要填满、焊缝要饱满或凸起, 不要形成凹形焊道;
 - 4) 采用碱性焊条, 抗裂性优于酸性焊条。
- c) 降低母材和焊接材料中 S、P 等杂质含量, 提高纯净度。

C.6.7 应力松弛裂纹(Stress Relaxation Cracking, SRC)

C.6.7.1 应力松弛裂纹又称为再热裂纹, 是含有稳定化元素(如铈、钛)的奥氏体不锈钢和镍基合金, 焊后在高温(550 °C~750 °C)使用或焊后在该温度区间停留后(如热处理或热加工的升温过程), 在焊缝残余应力峰值区域发生开裂的现象。裂纹大多位于焊接热影响区的粗晶区, 呈晶间开裂状。裂纹有少量也可能位于焊缝金属以及母材的冷变形区。

C.6.7.2 产生 SRC 的机理常归为下列三个因素共同作用的结果:

- a) 稳定化元素(如铌、钛)的碳化物在焊接热影响作用下,在晶界的大量析出导致该部位的蠕变塑性大大降低(可检 $HV_{10} \geq 200$;蠕变塑性 $< 2\%$,甚至 $< 0.1\%$);
- b) 焊接,尤其是厚壁(12 mm~25 mm 以上)、角接(如支管座)焊缝的应力集中区和缺陷区的过高残余应力;
- c) 在高温(550 °C~750 °C)区间,残余应力松弛的过程中,由于该部位的蠕变塑性过低而导致开裂。

C.6.7.3 应力松弛裂纹的敏感因素如下:

- a) 奥氏体不锈钢中:347H 最高;321H 中等;304H 较低;316H 免疫;
镍基合金中:617、601 敏感度高于 800HT、625。
- b) 粗晶粒敏感度高于细晶粒;固溶后的稳定化热处理可降低应力松弛裂纹的敏感性。

C.6.7.4 应力松弛裂纹的对策如下:

- a) 除非必要,少用 347H,改用 316H;617 焊材降级为 NiCrFe-3;亦有认为,对 347H:降低含碳量 $\leq 0.020\%$;提高铌碳质量比 ≥ 15 ;含氮量为 $0.05\% \sim 0.10\%$ 可改善 347H 的抗 SRC 能力,免除 PWHT。
- b) 晶粒度细于或等于 3.5 级;进行固溶+稳定化处理。
- c) 降低焊接线能量(≤ 2.15 kJ/mm)、窄焊道(≤ 15 mm)、控制层间温度 ≤ 135 °C;改善焊缝表面质量及应力集中(焊缝粗糙、咬边、未焊透、未熔合);控制支管座焊缝尺寸及成型;如采用焊补,采用 16-8-2 的 316 型焊材。
- d) 焊后 PWHT 是消除焊接残余应力的有效措施,免除了其后使用过程中发生 SRC 的隐患。但 PWHT 的过程,尤其是高于 460 °C 的升温过程,又是产生 SRC 的高风险区,应快速通过。PWHT 温度一般选择稳定化温度,PWHT 后空冷即可。
- e) PWHT 后应对焊接区域全面 PT 检查,清除可能产生的 SRC。

C.6.8 液体金属侵蚀(Liquid Metal Embrittlement, LME)

C.6.8.1 液体金属侵蚀是金属材料与熔点较低的液体金属接触时引起的晶间脆裂现象。

C.6.8.2 常见的 LME 现象有下列两种:

- a) 不锈钢的热加工或焊接热影响区表面,由于低熔点金属细末的污染,其残留的粉末在热加工或焊接热量下熔化而对不锈钢的晶间侵入所致。典型的低熔点金属有锌、铜、铅、锡、汞;来源于加工环境、机具、切割砂轮、回丝、钎焊料、表面擦痕或标记颜料、墨水等。少量的残留粉末,焊后 PT 检查热影响区就可检出微裂纹。破裂断口的光谱分析可见低熔点金属痕迹。表面浅层的 LME,打磨清除即可。
- b) 含铜量较高的不锈钢,如 316Cu、904L 的大截面锻件的锻造过程中,高温加热致使表面氧化后富集的铜在高温熔化后渗入晶界而产生裂纹,又称为铜脆。

C.6.9 σ 相脆化

C.6.9.1 σ 相脆化是含铬量超过 17% 的不锈钢,尤其如铬镍奥氏体不锈钢和双相不锈钢在 540 °C~900 °C 温度下停留或使用一段时间,形成一种硬而脆的铁-铬金属间化合物而引起的脆化。 σ 相脆化(即其数量及其形态)取决于不锈钢中 δ 铁素体相的比例及其铁素体形成元素铬当量(即铬、硅、钼、铝、钨、钒、钛、铌)的高低。反之,奥氏体形成元素镍当量(即碳、镍、氮、锰)可阻滞 σ 相脆化。

C.6.9.2 σ 相脆化将导致材料韧性的下降(冲击吸收能量及断口纤维率)。随着 σ 相数量的增加将大大提高不锈钢的脆性转变温度,1%~2% 的 σ 相不锈钢的脆性转变温度尚在 -46 °C 以下,而 5%~8% 的 σ 相,不锈钢的脆性转变温度在 0 °C 左右,对压力设备的开停车及压力试验就可能存在风险;如 σ 相达

到 10%或以上,脆性转变温度将提高至数百摄氏度,而且显著降低蠕变塑性,降低了压力元件抗热冲击和温度-载荷波动的能力,压力元件在高温下的脆性断裂风险大大增加。

C.6.9.3 奥氏体不锈钢过量的冷变形及其焊缝中的 δ 铁素体将促使 σ 相脆化。重新进行 1 065 °C 以上保温较长时间后快冷可溶解 σ 相,而去 σ 相脆化。因此控制焊缝中的 δ 铁素体数 $FN \leq 8$,过量的冷变形后应重新固溶处理就成为控制奥氏体不锈钢 σ 相脆化的主要工程措施。

C.7 铜合金的氨裂和脱锌(脱合金)

C.7.1 铜合金的氨裂

黄铜与氨接触会发生严重的应力腐蚀开裂,俗称氨裂。铜合金的氨裂有下列特征:

- 含锌量大于 15%的海军黄铜和铝黄铜为氨裂敏感材料。降低含锌量可降低氨裂敏感性但不足以免疫,而铜-镍合金和镍-铜合金对氨裂是免疫的。
- pH 大于 8.5 的液氨、氨水、含氨的溶液如胺液,在各种温度下都可产生氨裂;即使在气相时,空气中氧的污染也将促进氨裂;避免敏感材料在上述环境接触是规避风险的主要途径。
- 拉伸应力可加速氨裂,但材料的残余应力足以导致开裂。

C.7.2 铜合金的脱锌(脱合金)

铜合金的脱锌有如下特征:

- 表 C.4 所列的铜合金和环境组合易发生脱合金现象,所谓脱合金就是铜合金中某一合金元素在特定的介质中发生的选择性腐蚀现象,合金中某一合金元素(或组织)优先快速被腐蚀,而残留的合金呈多孔状而失效,其中以黄铜的脱锌最为多见,故又称为脱锌。
- 铜合金增加某种合金元素可以提高耐脱合金的性能,锡可以提高铜合金的耐脱合金性能;加入非常少量的磷、锑、砷可以提高海军黄铜的耐蚀性能;铝青铜的脱铝可以通过热处理产生 α 和 β 微观组织来防护。

表 C.4 发生脱合金的铜合金和环境组合

铜合金	环 境	被脱除的合金元素
黄铜(>15% Zn)	水,尤其是静止的凝结水	锌(脱锌)
铝青铜(通常 Al 质量分数大于 8%)	HF 酸,含氯化物的酸,海水	铝(脱铝)
硅青铜	高温蒸汽和酸性物质	硅(脱硅)
锡青铜	热盐或蒸汽	锡(脱锡)
铜镍合金(70-30)	高热通量和低流速的水	镍(脱镍)
Monel	HF 或其他酸	镍(脱镍)



C.8 微生物腐蚀(Microbiologically Induced Corrosion, MIC)

C.8.1 微生物腐蚀的机理

微生物腐蚀是由微生物代谢作用而导致在大多数金属材料(包括碳钢、不锈钢、镍基合金)表面产生的类似于点蚀的杯状腐蚀现象。各种未经消毒的水,如给水、冷却水、消防水、海水都含有大量的细菌、藻类和真菌,在滞留及流速缓慢的情况下,获得各种无机物(硫、氨、硫化氢等)、有机物(碳氢化合物和有机酸)

包括泄漏的介质、结垢或腐蚀产物的营养而大量繁殖代谢,在其附着的金属表面下产生严重的孔蚀。

C.8.2 微生物腐蚀的防护措施

应结合具体情况选择如下防护措施:

- a) 采用加氯、溴、臭氧、紫外线等消毒措施,杀灭微生物;
- b) 清除滞留的积水、提高流速、消除滞流死角;
- c) 表面涂层、包裹或阴极保护,如埋地管道及储罐底板;
- d) 定期冲刷、化学清洗、消毒等方法清除表面附着的各种污垢、结疤等,也可减轻 MIC,延长使用寿命。

C.9 绝热层下腐蚀(Corrision Under Insulation, CUI)

C.9.1 绝热层下腐蚀的机理

绝热层下腐蚀(CUI)是压力容器或管道在绝热层下,由于水或蒸气的渗入、结露以及在外表某些局部区域集聚、蒸发及浓缩而造成的局部电化学腐蚀。碳钢、合金钢以及奥氏体不锈钢、双相不锈钢都会发生 CUI,但两者的腐蚀机理及其形态不同。前者是相当充气水(饱和氧)对钢的氧化腐蚀,生成氧化铁的锈蚀层;而后者大多与氯离子的浓缩而引起的点蚀和应力腐蚀破裂有关。

C.9.2 影响因素

影响 CUI 的主要因素有两个:首先是水渗入绝热层及在管道外表面某些部位的集聚。对于不锈钢的点蚀和氯化物应力腐蚀开裂(CL-SCC)还包含着氯离子的溶入。水的来源有多种:雨水、结露、蒸气冷凝、跑冒滴漏、绝热层的吸潮都有可能成为腐蚀介质的来源;而特定部位如绝热层外壳的易渗水或破损处、设备外表面的积液处、热蒸气排放或疏水点、冷却塔或局部酸雨区域都是 CUI 的敏感区;统计表明,温暖、湿润的东南沿海区域发生 CUI 的概率要大于寒冷、干燥的内陆区域。

C.9.3 温度

影响绝热层下腐蚀的温度并非一定是正常工作温度或设计温度,还可能是实际影响腐蚀速率的金属温度及其温度波动或温差。因为,温度波动、温差或开停车将促使金属外表的冷凝、蒸发、干湿交替,从而提高腐蚀速率。常用金属材料的绝缘层下腐蚀呈现如下规律:

- a) 碳钢、合金钢发生 CUI 的温度范围为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$,由于为氧化性腐蚀,腐蚀速率随温度提高而加速,由于低温端通常不需设置绝热层,而高温端大多因渗入的水快速蒸发而干燥,丧失了电化学腐蚀环境,因此,碳钢、合金钢发生 CUI 的敏感区为 $75\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- b) 奥氏体不锈钢、双相不锈钢发生 CUI 的温度范围为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 205\text{ }^{\circ}\text{C}$,同样腐蚀速率随温度提高而加速,因为温度升高促使水的蒸发和氯离子浓缩,并使腐蚀形态由点蚀转变为腐蚀速率更快的 SCC 应力腐蚀开裂,高温端也因渗入的水快速蒸发,从而丧失了电化学腐蚀环境,因此,奥氏体不锈钢发生 CUI 的敏感区为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$;双相不锈钢相对 300 系列的奥氏体不锈钢有较高的 PRE 点蚀指数和双相抗 SCC 应力腐蚀开裂组织,所以发生 CUI 的概率相对要低一些,但在严酷环境下也未能免疫。

C.9.4 对策

解决 CUI 的途径主要有三个:

- a) 消除 C.9.2 所列入的水的来源及结构泄漏破损部位;
- b) 选择更换吸潮率低、氯离子含量低或有抑制腐蚀功能的绝热层材料;
- c) 表面涂料、热喷铝或采用铝箔包裹的保护措施。

附 录 D
(资料性附录)

我国与国外材料标准及牌号对照表

我国与国外材料标准及牌号对照表见表 D.1。

表 D.1 我国与国外材料标准及牌号对照表

我国标准	我国材料牌号	国外标准	国外材料牌号
铸铁			
GB/T 9439	HT200	ASTM A48	200
GB/T 9439	HT250	ASTM A48	250
GB/T 9439	HT300	ASTM A48	300
GB/T 9439	HT350	ASTM A48	350
GB/T 1348	QT400-18	ASTM A395	60-40-18
GB/T 1348	QT400-18L	ASTM A395	60-40-18
GB/T 9440	KTH300-06	ASTM A47	22010
GB/T 9440	KTH350-10	ASTM A47	22010
碳钢(包括碳锰钢)、管线钢无缝管			
GB/T 8163	10	ASTM A53	A ^a
GB/T 9948	10	ASTM A106	A
GB/T 6479	10	ASTM A106	A ^a
GB/T 3087	10	ASTM A53	A ^a
GB/T 9711	L245/B(PSL1)	API5L	B(PSL1)
GB/T 9711	L245/B(PSL2)	API5L	B(PSL2)
GB/T 8163	20	ASTM A53	B ^a
GB/T 3087	20	ASTM A53	B
GB/T 5310	20G	ASTM A106	B
GB/T 5310	20MnG	ASTM A106	B
GB/T 6479	20	ASTM A106	B ^a
GB/T 9948	20	ASTM A106	B
YB/T 4173	20G	ASTM A369	FPB
YB/T 4173	20MnG	ASTM A369	FPB
GB/T 8163	Q345A	ASTM A53	C
YB/T 4173	25MnG	ASTM A369	FPC
GB/T 6479	Q345B	ASTM A106	C
GB/T 6479	Q345D	ASTM A106	C

表 D.1 (续)

我国标准	我国材料牌号	国外标准	国外材料牌号
GB/T 9711	L290/X42~L555/X80 (PSL2)	API5L	X42~X80(PSL2)
碳钢(包括碳锰钢)、管线钢焊管(ERW)			
GB/T 3091	Q215A	ASTM A53	A-ERW
GB/T 9711	L210/A(PSL1)	API5L	A(PSL1)ERW
GB/T 3091	Q235A	ASTM A53	B-ERW ^a
GB/T 9711	L245/B(PSL1)	API5L	B(PSL1)ERW
GB/T 9711	L290/X42~L450/X65 (PSL2)	API5L	X42~X65(PSL2)ERW
碳钢(包括碳锰钢)、管线钢管件			
GB/T 13401	CF370	ASTM A234	(WPA) ^b
GB/T 13401	CF415	ASTM A234	WPB
GB/T 13401	CF415K	ASTM A234	WPB
GB/T 13401	CF485	ASTM A234	WPC
GB/T 13401	CF485K	ASTM A234	WPC
GB/T 29168.2	L290/X42~L450/X80	MSS SP75 ISO 15590-2	WPHY42~WPHY80
碳钢(包括碳锰钢)、管线钢板焊管(EFW/SAW)			
GB/T 3091 SY/T 5037	Q215A	ASTM A134	A283-C
GB/T 3091 SY/T 5037	Q235A	ASTM A134	A283-D
GB/T 9711	L245/B(PSL1)	API5L	B(PSL1)
GB/T 9711	L245/B(PSL2)	API5L	B(PSL2)
GB/T 9711	L290/X42~L555/X80 (PSL2)	API5L	X42~X80(PSL2)
—	—	ASTM A671	CC60
—	—	ASTM A671	CC70
碳钢(包括碳锰钢)、管线钢锻件			
GB/T 12228	25	ASTM A181	70
GB/T 12228	A105	ASTM A105	
NB/T 47008	20	ASTM A181	60
NB/T 47008	16Mn	ASTM A105	
GB/T 29168.3	F290(F42)~F555(F80)	ASTM A694 ISO 15590-3	F42~F80
碳钢(包括碳锰钢)铸件			
GB/T 12229	WCA	ASTM A216	WCA
GB/T 12229	WCB	ASTM A216	WCB
GB/T 12229	WCC	ASTM A216	WCC

表 D.1 (续)

我国标准	我国材料牌号	国外标准	国外材料牌号
低温碳钢及低温镍钢无缝管			
GB/T 6479	Q345E	ASTM A333	6 ^b
GB/T 18984	10MnDG	ASTM A333	6 ^b
GB/T 18984	16MnDG	ASTM A333	6 ^b
GB/T 18984	06Ni3MoDG	ASTM A333	3
—	—	ASTM A333	8
低温碳钢及低温镍钢板焊管(EFW/SAW)			
—	—	ASTM A671	CC60
—	—	ASTM A671	CC70
低温碳钢及低温镍钢管件			
GB/T 13401	LF415K1	ASTM A234	WPL6
GB/T 13401	LF415K2	ASTM A420	WPL6
GB/T 13401	LF485K2	ASTM A420	WPL6 ^b
GB/T 13401	LF450K3	ASTM A420	WPL3
GB/T 13401	LF680K4	ASTM A420	WPL8
低温碳钢及低温镍钢锻件			
NB/T 47009	16MnD	ASTM A350	LF2
NB/T 47009	08Ni3D	ASTM A350	LF3
NB/T 47009	06Ni9D	ASTM A522	Type1
低温碳钢及低温镍钢铸件			
JB/T 7248	LCB	ASTM A352	LCB
JB/T 7248	LCC	ASTM A352	LCC
JB/T 7248	LC3	ASTM A352	LC3
JB/T 7248	LC9	ASTM A352	LC9
合金钢无缝管			
GB/T 6479	15CrMo	ASTM A335	P12 ^c
GB/T 5310	15CrMoG	ASTM A335	P12 ^c
GB/T 9948	15CrMo	ASTM A335	P12 ^c
YB/T 4173	15CrMoG	ASTM A369	FP12 ^c
GB/T 9948	12Cr1Mo	ASTM A335	P11
YB/T 4173	12Cr2MoG	ASTM A369	FP22 ^c
GB/T 5310	12Cr2MoG	ASTM A335	P22 ^c
GB/T 9948	12Cr2Mo	ASTM A335	P22 ^c
GB/T 6479	12Cr2Mo	ASTM A335	P22 ^c

表 D.1 (续)

我国标准	我国材料牌号	国外标准	国外材料牌号
GB/T 5310	12Cr1MoVG	—	—
YB/T 4173	12Cr1MoVG	—	—
GB/T 9948	12Cr1MoV	—	—
GB/T 6479	10MoWVNb	—	—
GB/T 6479	10MoWVNb	—	—
GB/T 6479	10MoWVNb	—	—
GB/T 9948	12Cr5Mo I	ASTM A335	P5
GB/T 9948	12Cr5MoNT	ASTM A335	P5 ^c
GB/T 9948	12Cr9Mo I	ASTM A335	P9
GB/T 9948	12Cr9MoNT	ASTM A335	P9 ^c
GB/T 5310	10Cr9Mo1VNbN	ASTM A335	P91
YB/T 4173	10Cr9Mo1VNbN	ASTM A369	FP91
合金钢管件			
GB/T 13401	AF12	ASTM A234	WP12-1
GB/T 13401	AF12G	ASTM A234	WP12-2
GB/T 13401	AF11	ASTM A234	WP11-1
GB/T 13401	AF11G	ASTM A234	WP11-2
GB/T 13401	AF14	—	—
GB/T 13401	AF22	ASTM A234	WP22-2 ^c
GB/T 13401	AF22G	ASTM A234	WP22-3
GB/T 13401	AF5	ASTM A234	WP5
GB/T 13401	AF5G	ASTM A234	WP5 ^c
GB/T 13401	AF9	ASTM A234	WP9(C1,1)
GB/T 13401	AF9G	ASTM A234	WP9(C1,3)
GB/T 13401	AF91	ASTM A234	WP91
合金钢板焊管(EFW/SAW)			
—	—	ASTM A691 1CR-2	A387 12-2
—	—	ASTM A691 1-1/4CR-2	A387 11-2
—	—	ASTM A691 2-1/4CR-2	A387 22-2
合金钢锻件			
NB/T 47008	15CrMo	ASTM A182	F12-2
NB/T 47008	14Cr1Mo	ASTM A182	F11-2
NB/T 47008	12Cr1MoV	—	—
NB/T 47008	12Cr2Mo1	ASTM A182	F22-3

表 D.1 (续)

我国标准	我国材料牌号	国外标准	国外材料牌号
NB/T 47008	12Cr5Mo	ASTM A182	F5a ^d
NB/T 47008	10Cr9Mo1VNbN	ASTM A182	F91
合金钢铸件			
JB/T 5263	WC6	ASTM A217	WC6
JB/T 5263	WC9	ASTM A217	WC9
JB/T 5263	C12A	ASTM A217	C12A
GB/T 16253	ZG16Cr5MoG	ASTM A217	C5
不锈钢无缝管			
GB/T 14976	06Cr18Ni11Ti	ASTM A312	TP321
GB/T 14976 GB/T 9948 GB/T 5310	07Cr19Ni11Ti	ASTM A312	TP321H
GB/T 14976	06Cr18Ni11Nb	ASTM A312	TP347
GB/T 14976 GB/T 9948 GB/T 5310	07Cr18Ni11Nb	ASTM A312	TP347H
GB/T 14976	022Cr19Ni11	ASTM A312	TP304L
GB/T 14976	06Cr19Ni10	ASTM A312	TP304
GB/T 14976 GB/T 9948 GB/T 5310	07Cr19Ni10	ASTM A312	TP304H
GB/T 14976 GB/T 9948	022Cr17Ni12Mo2	ASTM A312	TP316L
GB/T 14976	06Cr17Ni12Mo2	ASTM A312	TP316
GB/T 14976	07Cr17Ni12Mo2	ASTM A312	TP316H
GB/T 14976	06Cr23Ni13	ASTM A312	TP309
GB/T 14976	06Cr25Ni20	ASTM A312	TP310
GB/T 5310	08Cr18Ni11NbFG	ASTM A213	347HFG
GB/T 21833	022Cr22Ni5Mo3N	ASTM A790	31803
GB/T 21833	022Cr23Ni5Mo3N	ASTM A790	32205
GB/T 21833	022Cr25Ni7Mo4N	ASTM A790	32750
不锈钢焊管(EFW,无填充金属)			
GB/T 12771 HG/T 20537.3	022Cr19Ni11	ASTM A312	TP304L-W
GB/T 12771 HG/T 20537.3	06Cr19Ni10	ASTM A312	TP304-W

表 D.1 (续)

我国标准	我国材料牌号	国外标准	国外材料牌号
GB/T 12771 HG/T 20537.3	022Cr17Ni12Mo2	ASTM A312	TP316L-W
GB/T 12771 HG/T 20537.3	06Cr17Ni12Mo2	ASTM A312	TP316-W
GB/T 12771 HG/T 20537.3	06Cr18Ni11Ti	ASTM A312	TP321-W
GB/T 12771 HG/T 20537.3	06Cr18Ni11Nb	ASTM A312	TP347-W
GB/T 12771 HG/T 20537.3	06Cr25Ni20	ASTM A312	TP310-W
GB/T 21832(所有部分)	022Cr22Ni5Mo3N	ASTM A790	31803-W
GB/T 21832(所有部分)	022Cr23Ni5Mo3N	ASTM A790	32205-W
GB/T 21832(所有部分)	022Cr25Ni7Mo4N	ASTM A790	32750-W
不锈钢板焊管(EFW)			
HG/T 20537.4 GB/T 32964	022Cr19Ni11	ASTM A358	304L
HG/T 20537.4 GB/T 32964	06Cr19Ni10	ASTM A358	304
HG/T 20537.4 GB/T 32964	022Cr17Ni12Mo2	ASTM A358	316L
HG/T 20537.4 GB/T 32964	06Cr17Ni12Mo2	ASTM A358	316
HG/T 20537.4 GB/T 32964	06Cr18Ni11Ti	ASTM A358	321
HG/T 20537.4 GB/T 32964	06Cr18Ni11Nb	ASTM A358	347
HG/T 20537.4	06Cr25Ni20	ASTM A358	310
不锈钢管件			
GB/T 13401	SF304L	ASTM A403	WP304L
GB/T 13401	SF304	ASTM A403	WP304
GB/T 13401	SF304H	ASTM A403	WP304H
GB/T 13401	SF316L	ASTM A403	WP316L
GB/T 13401	SF316	ASTM A403	WP316
GB/T 13401	SF316H	ASTM A403	WP316H

表 D.1 (续)

我国标准	我国材料牌号	国外标准	国外材料牌号
GB/T 13401	SF321	ASTM A403	WP321
GB/T 13401	SF321H	ASTM A403	WP321H
GB/T 13401	SF347	ASTM A403	WP347
GB/T 13401	SF347H	ASTM A403	WP347H
GB/T 13401	SF310	ASTM A403	WP310
GB/T 13401	SF2225	ASTM A815	WP31803
GB/T 13401	SF2205	ASTM A815	WP32205
GB/T 13401	SF2507	ASTM A815	WP32750
不锈钢锻件			
NB/T 47010	022Cr19Ni10	ASTM A182	F304L
NB/T 47010	06Cr19Ni10	ASTM A182	F304
NB/T 47010	07Cr19Ni10	ASTM A182	F304H
NB/T 47010	022Cr17Ni12Mo2	ASTM A182	F316L
NB/T 47010	06Cr17Ni12Mo2	ASTM A182	F316
NB/T 47010	07Cr17Ni12Mo2	ASTM A182	F316H
NB/T 47010	06Cr18Ni11Ti	ASTM A182	F321
NB/T 47010	07Cr18Ni11Ti	ASTM A182	F321H
NB/T 47010	06Cr18Ni11Nb	ASTM A182	F347
NB/T 47010	07Cr18Ni11Nb	ASTM A182	F347H
NB/T 47010	015Cr21Ni26Mo5Cu2	ASTM A182	F904L
NB/T 47010	015Cr20Ni18Mo6CuN	ASTM A182	F62
NB/T 47010	022Cr22Ni5Mo3N(S22253)	ASTM A182	F51
NB/T 47010	022Cr22Ni5Mo3N(S22053)	ASTM A182	F60
NB/T 47010	022Cr25Ni7Mo4N	ASTM A182	F53
不锈钢铸件			
GB/T 12230	CF3	ASTM A351	CF3
GB/T 12230	CF8	ASTM A351	CF8
GB/T 12230	CF3M	ASTM A351	CF3M
GB/T 12230	CF8M	ASTM A351	CF8M
GB/T 12230	CF8C	ASTM A351	CF8C
镍及镍合金管			
GB/T 2882	N7(200)	ASTM B161	UNS N02200
GB/T 2882	N5(201)	ASTM B161	UNS N02201
GB/T 2882	NCu30(400)	ASTM B165	UNS N04400

表 D.1 (续)

我国标准	我国材料牌号	国外标准	国外材料牌号
GB/T 2882	NCr15-8(600)	ASTM B167	UNS N06600
GB/T 30059	NS3102(600)	ASTM B167	UNS N06600
—	—	ASTM B444	UNS N06625
GB/T 30059	NS1101(800)	ASTM B407	UNS N08800
GB/T 30059	NS1101(800H)	ASTM B407	UNS N08810
GB/T 30059	NS1402(825)	ASTM B705	UNS N08825
—	—	ASTM B622	UNS N10276
镍及镍合金管件			
—	—	ASTM B366	WPN(200)
—	—	ASTM B366	WPNL(201)
—	—	ASTM B366	WPNC(400)
—	—	ASTM B366	WPNCI(600)
—	—	ASTM B366	WPNCMC(625)
—	—	ASTM B366	WPNIC(800)
—	—	ASTM B366	WPNIC10(800H)
—	—	ASTM B366	WPNIC11(800HT)
—	—	ASTM B366	WPNICMC(825)
—	—	ASTM B366	WPNC276(C276)
镍及镍合金锻件			
NB/T 47028	N7(200)	ASTM B564	UNS N02200
NB/T 47028	N5(201)	ASTM B564	UNS N02201
NB/T 47028	NCu30(400)	ASTM B564	UNS N04400
GB/T 26030	NW6600(600)	ASTM B564	UNS N06600
GB/T 26030	NW6625(625)	ASTM B564	UNS N06625
NB/T 47028	NS1101(800)	ASTM B564	UNS N08800
GB/T 26030	NW8810(800H)	ASTM B564	UNS N08810
GB/T 26030	NW8811(800HT)	ASTM B564	UNS N08811
GB/T 26030	NW8825(825)	ASTM B564	UNS N08825
NB/T 47028	NS3304(C276)	ASTM B564	UNS N10276
钛及钛合金管(无缝管及挤压管)			
GB/T 3624 GB/T 26058	TA1	ASTM B861	1
GB/T 3624 GB/T 26058	TA2	ASTM B861	2H

表 D.1 (续)

我国标准	我国材料牌号	国外标准	国外材料牌号
GB/T 3624 GB/T 26058	TA3	ASTM B861	3
GB/T 3624 GB/T 26058	TA9	ASTM B861	7H
GB/T 3624 GB/T 26058	TA10	ASTM B861	12
钛及钛合金管(无填充金属 EFW 焊管)			
GB/T 26057	TA1	ASTM B862	1
GB/T 26057	TA2	ASTM B862	2H
GB/T 26057	TA3	ASTM B862	3
GB/T 26057	TA9	ASTM B862	7H
GB/T 26057	TA10	ASTM B862	12
钛及钛合金管件			
GB/T 27684	TA1	ASTM B363	WPT1
GB/T 27684	TA2	ASTM B363	WPT2H
GB/T 27684	TA3	ASTM B363	WPT3
GB/T 27684	TA9	ASTM B363	WPT7H
GB/T 27684	TA10	ASTM B363	WPT12
钛及钛合金锻件			
GB/T 25137	F1	ASTM B381	F1
GB/T 25137	F2H	ASTM B381	F2H
GB/T 25137	F3	ASTM B381	F3
GB/T 25137	F7H	ASTM B381	F7H
GB/T 25137	F12	ASTM B381	F12
钛及钛合金铸件			
GB/T 6614	ZTA1	ASTM B367	C2
GB/T 6614	ZTA2	ASTM B367	C3
铝及铝合金管			
GB/T 6893 GB/T 4437.1	1060-O 1060-H14  1060-H112	ASTM B210	1060
GB/T 6893 GB/T 26027 GB/T 4437.1	3003-O 3003-H14 3003-H112	ASTM B210	3003
GB/T 6893 GB/T 26027	5052-O 5052-H14	ASTM B210	5052

表 D.1 (续)

我国标准	我国材料牌号	国外标准	国外材料牌号
GB/T 6893 GB/T 26027 GB/T 4437.1	5083-O 5083-H112	ASTM B210	5083
GB/T 6893 GB/T 26027 GB/T 4437.1	6061-T4 6061-T6	ASTM B210	6061
GB/T 6893 GB/T 26027	6063-T4 6063-T6	ASTM B210	6063
铝及铝合金管件			
—	—	ASTM A361	1060-O 1060-H14
—	—	ASTM A361	3003-O
—	—	ASTM A361	5052-O 5052-H34
—	—	ASTM A361	5083-O
—	—	ASTM A361	6061-T4 6061-T6
—	—	ASTM A361	6063-T4 6063-T6
铝及铝合金锻件			
NB/T 47029	1050A-O;H112		
NB/T 47029	3003-O;H112	ASTM B247	3003
NB/T 47029	5083-O;H112	ASTM B247	5083
NB/T 47029	6063-T6	ASTM B247	6063
标准紧固件			
GB/T 3098.1	5,6	ISO 898-1	5,6
GB/T 3098.1	8,8	ISO 898-1	8,8
GB/T 3098.6	A2-50	ISO 3506	A2-50
GB/T 3098.6	A4-50	ISO 3506	A4-50
GB/T 3098.6	A2-70	ISO 3506	A2-70
GB/T 3098.6	A4-70	ISO 3506	A4-70
专用紧固件			
GB/T 3077	35CrMo	ASTM A193	B7
HG/T 20634	42CrMo(B7)	ASTM A193	B7
HG/T 20634	A320 L7	ASTM A320	L7
GB/T 3077	25Cr2MoV	ASTM A193	B16
GB/T 1220	06Cr19Ni10(304)	ASTM A193	B8
GB/T 1220	06Cr17Ni12Mo2(316)	ASTM A193	B8M
HG/T 20634	A193 B8-2	ASTM A193	B8-2

表 D.1 (续)

我国标准	我国材料牌号	国外标准	国外材料牌号
HG/T 20634	A193 B8M-2	ASTM A193	B8M-2
HG/T 20634	A453-660	ASTM A453	660
<p>^a 均属碳钢,ASTM 材料机械性能(抗拉/屈服)相对略高。</p> <p>^b 均属碳钢,ASTM 材料机械性能(抗拉/屈服)相对较低。</p> <p>^c 化学成分相同,因热处理制度差异,ASTM 材料机械性能(抗拉/屈服)相对较低。</p> <p>^d 化学成分相同,因热处理制度差异,ASTM 材料机械性能(抗拉/屈服)相对略高。</p>			

参 考 文 献

- [1] GB/T 700 碳素结构钢
 - [2] ASME B31.3:2016 Process Piping
 - [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code II Materials Part D Properties
 - [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code III Rules for Construction of Nuclear Facility Components Division 1-Subsection NH
 - [5] API 579-1/ASME FFS-1:2007 Fitness For Service
 - [6] API RP 571:2011 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in The Refining Industry
 - [7] API RP583:2014 Corrosion under Insulation and Fireproofing
 - [8] API RP 941:2016.Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants
 - [9] API STD 530:2015 Calculation of Heater-tube Thickness in Petroleum Refineries
 - [10] API RP 945:2003.Avoiding Environmental Cracking in Amine Units
 - [11] API RP 939C:2009.Guidelines for Avoiding Sulfidation (Sulfidic) Corrosion Failures in Oil Refineries
 - [12] ISO 17945/NACE MR0103:2015 Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries—Metallic Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments
 - [13] API RP934A:2010 Materials and Fabrication of 2¼Cr-1Mo, 2¼Cr-1Mo-1/4V, 3Cr-1Mo, and 3Cr-1Mo-1/4V Steel Heavy Wall Pressure Vessels for High-temperature, High-pressure Hydrogen Service
 - [14] API RP934C:2008 Materials and Fabrication of 1¼Cr-1/2Mo Steel Heavy Wall Pressure Vessels for High-pressure Hydrogen Service Operating at or Below 825 °F (441 °C)
 - [15] API RP934E:2010 Recommended Practice for Materials and Fabrication of 1¼CR-1/2Mo Steel Pressure Vessels for Service Above 825 °F (441 °C)
 - [16] NACE RP0170:2004 Protection of Austenitic Stainless Steels and Other Austenitic Alloys from Polythionic Acid Stress Corrosion Cracking During Shutdown of Refinery Equipment
 - [17] NACE SP0403:2008 Avoiding Caustic Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel Refinery Equipment and Piping
 - [18] API RP582:2010 Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries
 - [19] HSE RR902:2011 Chloride Stress Corrosion Cracking In Austenitic Stainless Steel
-