



中华人民共和国国家标准

GB/T 31489.1—2015

额定电压 500 kV 及以下直流输电用挤包 绝缘电力电缆系统 第 1 部分：试验方法和要求

D.C. extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to and
including 500 kV—Part 1: Test methods and requirements

2015-05-15 发布

2015-12-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 试验电压、电缆设计热参数和试验条件	4
5 开发试验	6
6 型式试验	6
7 预鉴定试验	19
8 例行试验	21
9 抽样试验	22
10 安装后试验	25
附录 A (规范性附录) 电缆绝缘电导率试验方法	26
附录 B (规范性附录) 电缆绝缘空间电荷试验方法	28

前 言

GB/T 31489《额定电压 500 kV 及以下直流输电用挤包绝缘电力电缆系统》分为以下四个部分：

- 第 1 部分：试验方法和要求；
- 第 2 部分：直流陆地电缆；
- 第 3 部分：直流海底电缆；
- 第 4 部分：直流电缆附件。

本部分为 GB/T 31489 的第 1 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国电线电缆标准化技术委员会(SAC/TC 213)归口。

本部分起草单位：上海电缆研究所、青岛汉缆股份有限公司、广东电网公司电力科学研究院、中天科技海缆有限公司、宁波东方电缆股份有限公司、宁波球冠电缆股份有限公司、江苏亨通高压电缆有限公司、上海三原电缆附件有限公司、上海华普电缆有限公司、远东电缆有限公司、无锡江南电缆有限公司、特变电工山东鲁能泰山电缆有限公司、重庆泰山电缆有限公司、浙江晨光电缆股份有限公司、惠州金龙羽超高压电缆有限公司、山东华凌电缆有限公司、安徽华菱电缆集团有限公司、四川明星电缆股份有限公司、安徽华宇电缆集团有限公司、冀东普天线缆有限公司、广东吉熙安电缆附件有限公司、长园电力技术有限公司、博禄/北欧化工公司、上海凯波特种电缆料厂有限公司、浙江万马高分子材料有限公司、上海交通大学、上海市电力公司、南方电网科学研究院有限公司、浙江省电力公司电力科学研究院、国家电线电缆质量监督检验中心。

本部分主要起草人：朱永华、吴长顺、徐晓刚、陈沛云、胡明、叶信红、温尚海、潘文林、徐操、周雁、汪传斌、吴丽芳、胥玉珉、杨甫军、岳振国、陆技才、潘茂龙、李万松、吴清振、邓九旺、李斌、龙莉英、王锦明、孙默君、项健、陈文卿、尹毅、张宇、赵林杰、刘黎、杨娟娟、贺伟、袁常俊、范玉军、李骥、杨立志、贾欣。

额定电压 500 kV 及以下直流输电用挤包 绝缘电力电缆系统 第 1 部分：试验方法和要求

1 范围

GB/T 31489 的本部分规定了额定电压 500 kV 及以下直流输电用挤包绝缘电力电缆系统(包括直流陆地电缆、直流海底电缆及其附件)的试验方法和要求。

本部分适用于安装在陆地和海底的 500 kV 及以下交联聚乙烯绝缘直流电力电缆,也适用于陆地电缆的接头和终端等陆地电缆附件,以及海底电缆的工厂接头(软接头)、修理接头、海底直流电缆与陆地直流电缆间过渡接头和终端等海底电缆附件。

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 2951.11—2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 11 部分:通用试验方法——厚度和外形尺寸测量——机械性能试验

GB/T 2951.12—2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 12 部分:通用试验方法——热老化试验方法

GB/T 2951.13—2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 13 部分:通用试验方法——密度测定方法——吸水试验——收缩试验

GB/T 2951.14—2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 14 部分:通用试验方法——低温试验

GB/T 2951.21—2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 21 部分:弹性体混合料专用试验方法——耐臭氧试验——热延伸试验——浸矿物油试验

GB/T 2951.31—2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 31 部分:聚氯乙烯混合料专用试验方法——高温压力试验——抗开裂试验

GB/T 2951.32—2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 32 部分:聚氯乙烯混合料专用试验方法——失重试验——热稳定性试验

GB/T 2951.41—2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 41 部分:聚乙烯和聚丙烯混合料专用试验方法——耐环境应力开裂试验——熔体指数测量方法——直接燃烧法测量聚乙烯中碳黑和(或)矿物质填料含量——热重分析法(TGA)测量碳黑含量——显微镜评估聚乙烯中碳黑分散度

GB/T 2952.1—2008 电缆外护层 第 1 部分:总则

GB/T 3048.4—2007 电线电缆电性能试验方法 第 4 部分:导体直流电阻试验

GB/T 3048.12—2007 电线电缆电性能试验方法 第 12 部分:局部放电试验

GB/T 3048.13—2007 电线电缆电性能试验方法 第 13 部分:冲击电压试验

GB/T 3956—2008 电缆的导体

GB/T 4909.3—2009 裸电线试验方法 第 3 部分:拉力试验

GB/T 11017.1—2014 额定电压 110 kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件 第 1 部分:试验方法和要求

GB/T 18380.12—2008 电缆和光缆在火焰条件下的燃烧试验 第 12 部分:单根绝缘电线电缆火焰垂直蔓延试验 1 kW 预混合型火焰试验

JB/T 10696.5—2007 电线电缆机械和理化性能试验方法 第 5 部分:腐蚀扩展试验

JB/T 10696.6—2007 电线电缆机械和理化性能试验方法 第 6 部分:挤出外套刮磨试验

IEC 60287-1-1:2006 电缆 额定电流的计算 第 1-1 部分:额定电流方程(100%负载系数)和电损耗计算 [Electric cables—Calculation of the current rating—Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses—General]

IEC 60840:2011 额定电压 30 kV($U_m=36$ kV)到 150 kV($U_m=170$ kV)挤包绝缘电力电缆及附件 试验方法和要求 [Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m=36$ kV) up to 150 kV ($U_m=170$ kV)—Test methods and requirements]

IEC 62067:2006 额定电压 150 kV($U_m=170$ kV)到 500 kV($U_m=550$ kV)挤包绝缘电力电缆及附件 试验方法和要求 [Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m=170$ kV) up to 500 kV ($U_m=550$ kV)—Test methods and requirements]

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电网换相换流器 line commutated converters (LCC)

用于高压直流输电系统,功率流反向传输时电缆系统的电压极性发生变化。

3.2

电压源换流器 voltage source converters (VSC)

用于高压直流输电系统,功率流反向传输时电缆系统的电压极性不会改变。

3.3

传输电缆 transmission cable

单极或双极高压直流输电系统中的高压直流电缆。

3.4

回流电缆 return cable

单极高压直流输电系统中回流用低压/中压直流电缆,能用于换流站之间的全线连接,也可用于换流站和电极站的局部连接。

3.5

挤出长度 extrusion length

连续挤出绝缘线芯(包括绝缘和半导体层)长度,不包括挤出开始段和结尾段切除的报废部分。

3.6

制造长度 manufacturing length

包括半导体层外所有组件的完整电缆的挤出长度(或切除报废部分后的电缆长度)。

3.7

交货长度 delivery length

一个或多个制造长度用工厂接头连接后的电缆长度。

注:交货长度对于海底电缆通常是指船运长度,对于陆地电缆是指电缆盘上的完整电缆长度。

3.8

工厂接头 factory joint

在可控工厂条件下的挤出长度/制造长度之间的接头。

3.9

修理接头 repair joint

两根完整电缆之间的接头。

3.10

现场接头 field joint

现场安装在现行电缆系统的两根完整电缆之间的接头。

3.11

过渡接头 transition joint

连接两根均为挤包绝缘但有设计差异的电缆(例如导体的截面或结构不同)间的接头。

3.12

开发试验 development tests

电缆系统开发时进行的试验。

3.13

型式试验 type tests

按一般商业原则对一种型号电缆系统在供货前进行的试验,以证明该电缆系统具有符合预期使用要求的满意性能。

注:除非电缆或附件的材料、制造工艺、电应力设计水平的改变可能改变其性能特性,试验一旦成功通过,不需要重复进行。

3.14

预鉴定试验 prequalification test

按一般商业原则对一种型号电缆系统在供货前进行的试验,以证明该电缆系统具有满意的长期运行性能。

注1:除非该电缆系统的材料、制造工艺、电应力设计水平有实质性的改变,预鉴定试验只需进行一次。

注2:实质性改变定义为对电缆系统产生不利影响的改变。如果制造商申明某些改变并未构成实质性改变,则需提供包括试验验证的详细例证。

3.15

例行试验 routine tests

由制造商在成品电缆的所有制造长度或附件上进行的试验,以检验其是否符合标准的要求。

3.16

抽样试验 sample tests

由制造商按规定的频度在成品电缆试样、附件试样以及部件上进行的试验,以检验其是否符合标准的要求。

3.17

安装后试验 tests after installation

安装后进行的试验,以确定电缆系统的完好性。

3.18

电缆系统 cable system

由电缆和安装的附件及相关部件(如测量装置或固定装置)组成,电缆附件通常包括不同类型的接头和终端。

3.19

试验对象 test object

经受试验的一定长度的电缆或附件。

3.20

试验回路 test loop

各试验对象同时试验组成的串联回路。

3.21

试验组 test set-up

明显独立的试验回路的组合,多个试验回路可使用同一试验装置同时试验。

4 试验电压、电缆设计热参数和试验条件

4.1 试验电压

试验电压见表 1。

表 1 试验电压

试验电压	说 明
U_0	电缆系统设计的导体与屏蔽之间的额定直流电压
U_T	型式试验和例行试验中的直流试验电压,推荐 $U_T = 1.85U_0$ 。
U_{TP1}	预鉴定试验(负荷循环电压试验)、型式试验(极性反转试验)和安装后试验中的直流试验电压,推荐 $U_{TP1} = 1.45U_0$ 。
U_{TP2}	预鉴定试验中极性反转试验的直流试验电压,推荐 $U_{TP2} = 1.25U_0$ 。
U_{P1}	当雷电冲击电压与实际直流电压极性相反时,电缆系统可能经受的雷电冲击电压最大绝对峰值的 1.15 倍(见图 1)
$U_{P2,S}^a$	当操作冲击电压与实际直流电压极性相同时,电缆系统可能经受的操作冲击电压最大绝对峰值的 1.15 倍(见图 1)
$U_{P2,O}^a$	当操作冲击电压与实际直流电压极性相反时,电缆系统可能经受的操作冲击电压最大绝对峰值的 1.15 倍(见图 1)
$U_{RC,AC}$	回流电缆能够承受的瞬态阻尼交流过电压的最大值。这个电压通常是由于换相失败引起,电压值取决于高压直流电网的供应商的计算值。过电压的性质取决于高压直流电网的配置,需根据个案分别计算
$U_{RC,DC}$	回流电缆正常运行时的最大直流电压
直流试验电压的纹波系数不应超过 3%	
^a 由于直流系统的设计决定了同极性冲击受避雷器保护以及反极性冲击受换流器保护,因此 $U_{P2,S}$ 不一定等于 $U_{P2,O}$ 。	

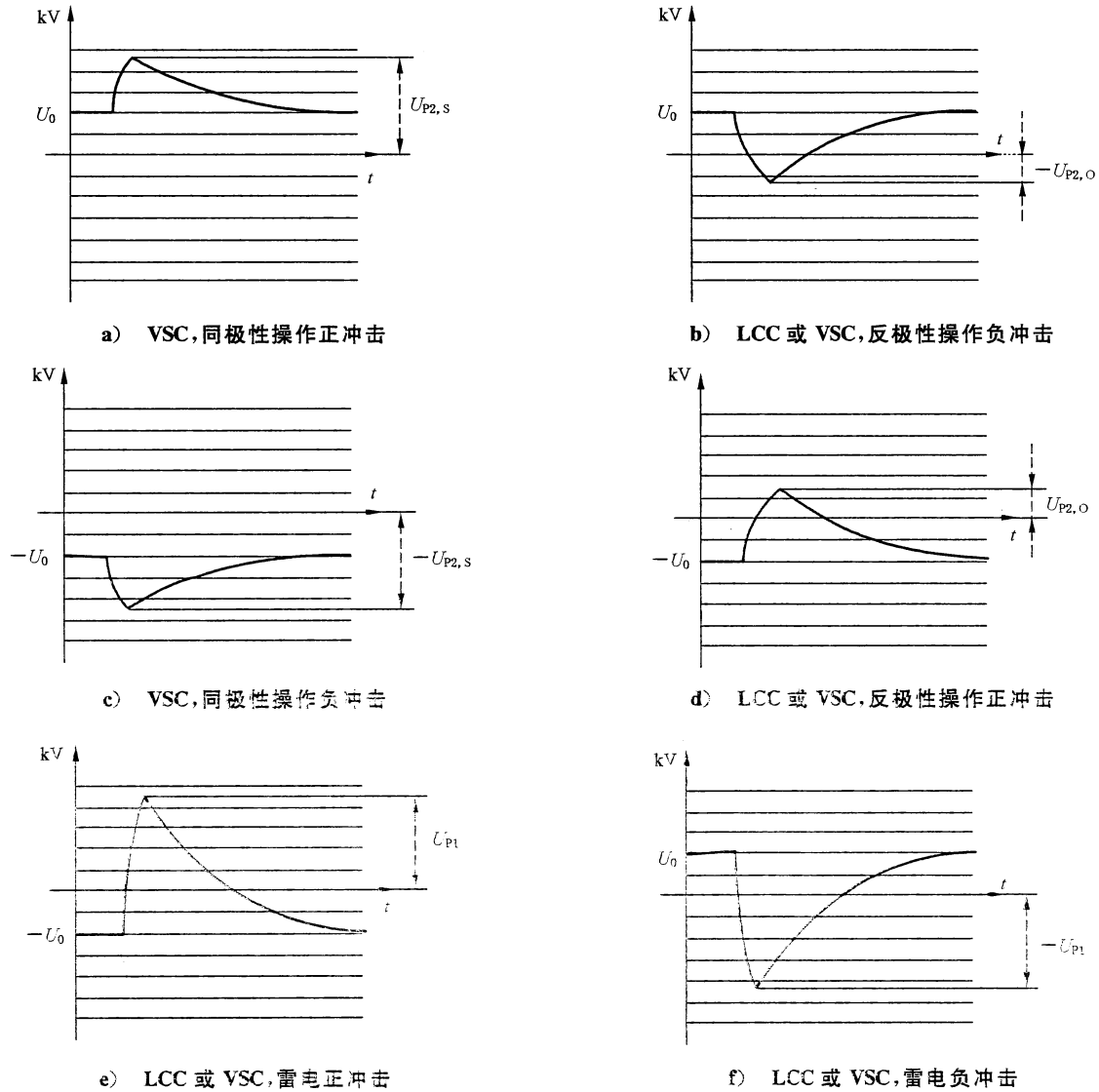


图 1 操作冲击和雷电冲击试验电压示意图

4.2 电缆设计热参数

$T_{c,max}$ ——电缆导体最高运行温度,该值由制造商申明。

ΔT_{max} ——运行电缆绝缘(不包括半导体层)内最大温差。该值由制造商计算和申明,制造商应提供设计值和试验测量值的相关证据。

4.3 试验条件

4.3.1 加热方法

采用直流或交流电流对导体加热,辅助外部绝热或冷却手段,并在试验中验证绝缘内实际的温差 ΔT 和导体温度 T_c 。

4.3.2 负荷循环(LC)

负荷循环包括加热阶段和冷却阶段。

24 h 负荷循环(预鉴定试验和型式试验)包括至少 8 h 加热和至少 16 h 自然冷却。在加热阶段的

至少最后 2 h,导体温度应不低于 $T_{c,max}$ 且绝缘内温差应不低于 ΔT_{max} 。

48 h 负荷循环(型式试验)包括至少 24 h 加热和至少 24 h 自然冷却。在加热阶段的至少最后 18 h,导体温度应不低于 $T_{c,max}$ 且绝缘内温差应不低于 ΔT_{max} 。

注: 48 h 负荷循环仅作为型式试验的一部分,用来确保电应力反转在负荷循环内很好地进行。

4.3.3 高负荷(HL)

高负荷包括一个连续加热阶段。加热阶段的前 8 h 内,导体温度应不低于 $T_{c,max}$ 且绝缘内温差应不低于 ΔT_{max} ,并一直维持到高负荷试验结束。

注: 如由于实际原因不能在加热阶段的 8 h 内达到规定的温度,需增加初始加热时间,增加的加热时间不计入高负荷的周期。

4.3.4 零负荷(ZL)

不加热。

4.3.5 环境温度

除非在试验中另有规定,试验应在环境温度 $(20 \pm 15)^\circ\text{C}$ 下进行。

4.3.6 极性反转试验(PR)

极性反转试验首先从正极性电压开始,电压极性每 24 h 负荷循环反转 3 次(平均分配),其中一次反转应与 24 h 负荷循环中负载电流的停止时间一致。推荐极性反转的时间不超过 2 min。

注: 如极性反转不能在 2 min 内实现,极性反转的时间可由供需双方商定。

4.3.7 叠加冲击电压试验(S/IMP)

试验对象在施加首个冲击电压前,应首先加热到导体温度不低于 $T_{c,max}$ 且绝缘内温差不低于 ΔT_{max} 至少 10 h,且已承受 U_0 (相应极性)至少 10 h,保持直流电压,在试验对象上叠加冲击电压,连续 10 次;随后在同样的温度条件下对试验对象施加相反极性的直流电压 U_0 至少 10 h,保持直流电压,在试验对象上叠加冲击电压,连续 10 次,每次冲击的间隔应不小于 2 min,冲击电压波形应符合 GB/T 3048.13—2007 的规定。

5 开发试验

在预鉴定试验前制造商应完成所有分析和开发试验,开发试验应至少包括以下方面:

- 所用材料和工艺的评估,通常包括电阻率评估、击穿水平和空间电荷测量;
- 典型安装和负荷条件下电缆系统绝缘内电应力的分布;
- 长期稳定性评定,包括工厂实验以评估各种参数对长期性能的影响,如:电应力、温度、环境条件等;
- 电缆尺寸、材料成分和工艺条件(挤出、挤出后处理)方面的预期变化对电应力分布的敏感性。

6 型式试验

6.1 型式试验认可的范围

如果满足以下条件,型式试验对本标准范围内的其他电缆系统也认可有效:

- 电缆系统的设计、材料、制造工艺和运行条件基本相同;

- b) 运行电压 U_0 、 U_{P1} 、 $U_{P2,S}$ 与 $U_{P2,0}$ (如果是回流电缆,则为 $U_{RC,AC}$ 和 $U_{RC,DC}$) 不高于已试电缆系统;
- c) 机械预处理施加的机械应力不高于已试电缆系统;
- d) 导体最高运行温度 $T_{c,max}$ 不高于已试电缆系统;
- e) 绝缘层最大温差 ΔT_{max} 不高于已试电缆系统;
- f) 导体截面积不大于已试电缆系统;
- g) 绝缘平均场强计算值(额定电压除以绝缘平均厚度)不大于已试电缆系统;
- h) 用标称尺寸计算得到的电缆导体屏蔽和绝缘屏蔽处的拉普拉斯电场强度不大于已试电缆系统;
- i) 进行 LCC 型式试验合格的电缆系统,只要按 6.4.5.3 的规定通过了 $\pm U_{P2,S}$ 叠加操作冲击电压,认可范围可以覆盖到 VSC 系统,反之则不适用。

除非采用了不同的材料和不同的制造工艺,否则不需要对所有导体截面和所有电压等级的电缆进行非电气型式试验(见 6.3)。但当屏蔽线芯外的材料与已试电缆系统不同时,应增加成品电缆段的相容性老化试验以验证材料的相容性。

6.2 试验对象

电缆系统的所有组件(电缆及附件)均应进行型式试验,各组件可在不同的试验回路中试验,这些试验回路应包含电缆系统的所有相关组件。

电气型式试验的典型试验回路包含的试验对象见图 2。附件试验对象应包括每侧 0.5 m 的电缆,从没有因安装附件而发生拆卸或拆装的电缆位置处开始测量,试验回路中各附件之间的连续电缆长度应不小于 5 m,试验回路中包括的连续电缆长度应不小于 10 m。

电缆试验对象中应包括引起电缆非连续连接的特征,如金属层之间的金属连接。

陆地电缆或海底电缆试样在试验前应进行机械预处理。

除非是非电气型式试验要求,电气和非电气型式试验的试验对象不必是同一样段。

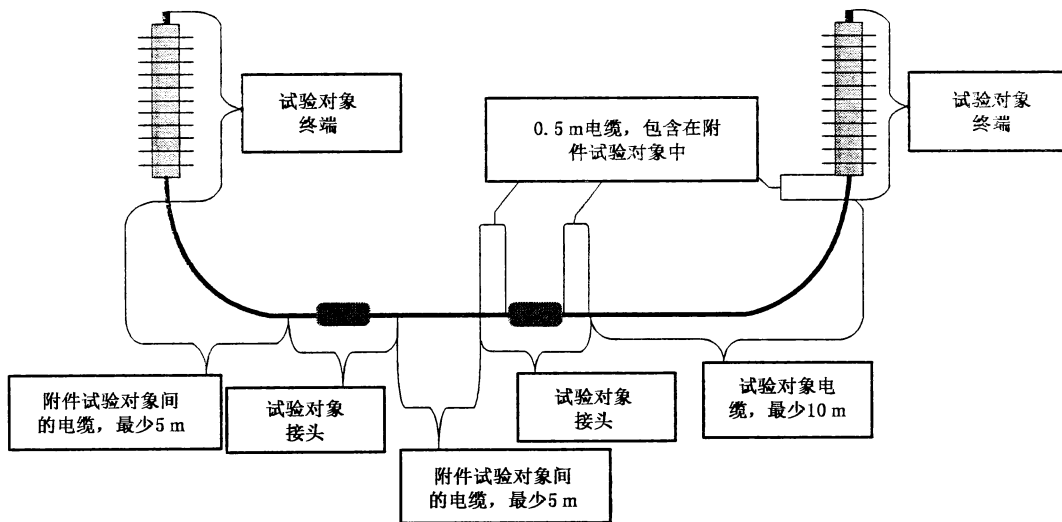


图 2 试验回路内试验对象布置

6.3 非电气型式试验

6.3.1 电缆结构检查

电缆的导体检查、绝缘和非金属护套厚度、金属套厚度和外径测量应分别按 9.1.4、9.1.7、9.1.8 和

9.1.9 的规定进行,并应符合相关产品标准的规定。

6.3.2 电缆绝缘机械物理性能

电缆绝缘机械物理性能应符合表 2 的要求。

表 2 绝缘机械物理性能

序号	项目	单位	XLPE 绝缘要求	试验方法
1	老化前性能			GB/T 2951.11—2008
	抗张强度,最小	N/mm ²	12.5	
	断裂伸长率,最小	%	200	
2	空气烘箱老化后的性能			GB/T 2951.12—2008
	老化条件			
	——试验温度	℃	135±3	
	——处理时间	h	168	
	老化前后抗张强度变化率,不超出	%	±25	
	老化前后断裂伸长率变化率,不超出	%	±25	
3	相容性老化后的性能			GB/T 2951.12—2008
	老化条件			
	——试验温度	℃	100±2	
	——处理时间	h	168	
	老化前后抗张强度变化率,不超出	%	±25	
	老化前后断裂伸长率变化率,不超出	%	±25	
4	热延伸试验			GB/T 2951.21—2008
	试验条件			
	——试验温度	℃	200±3	
	——处理时间	min	15	
	——机械应力	N/mm ²	0.2	
	载荷下伸长率,最大	%	175	
	冷却后永久伸长率,最大	%	15	
5	吸水试验			GB/T 2951.13—2008
	试验条件			
	——试验温度	℃	85±2	
	——试验时间	h	336	
	重量增量,最大	mg/cm ²	1	
6	绝缘热收缩试验			GB/T 2951.13—2008
	试验条件			
	——试验温度	℃	130±3	
	——试验时间	h	6	
	收缩率,最大	%	4.5	

6.3.3 电缆非金属护套机械物理性能

电缆非金属护套机械物理性能应符合表 3 的要求。

表 3 非金属护套机械物理性能

序号	项目	单位	要求		试验方法
			聚氯乙烯 ST ₂	聚乙烯 ST ₇	
1	老化前性能				GB/T 2951.11—2008
	抗张强度,最小	N/mm ²	12.5	12.5	
	断裂伸长率,最小	%	150	300	
2	空气烘箱老化后的性能				GB/T 2951.12—2008
	老化条件				
	——试验温度	℃	100±2	110±2	
	——处理时间	h	168	240	
	抗张强度,最小	N/mm ²	12.5	—	
	断裂伸长率,最小	%	150	300	
	老化前后抗张强度变化率,不超出	%	±25	—	
老化前后断裂伸长率变化率,不超出	%	±25	—		
3	相容性老化后的性能				GB/T 2951.12—2008
	老化条件				
	——试验温度	℃	100±2	100±2	
	——处理时间	h	168	168	
	抗张强度,最小	N/mm ²	12.5	—	
	断裂伸长率,最小	%	150	300	
	老化前后抗张强度变化率,不超出	%	±25	—	
老化前后断裂伸长率变化率,不超出	%	±25	—		
4	失重试验				GB/T 2951.32—2008
	试验条件				
	——试验温度	℃	100±2	—	
	——处理时间	h	168	—	
允许失重量,最大	mg/cm ²	1.5	—		
5	低温试验				GB/T 2951.14—2008
	5.1 低温拉伸试验				
	试验温度	℃	-15±2	—	
	断裂伸长率,最小	%	20	—	
	5.2 低温冲击试验				
试验温度	℃	-15±2	—		
试验结果		无裂纹	—		
6	热冲击试验				GB/T 2951.31—2008
	试验条件				
	——试验温度	℃	150±3	—	
	——持续时间	h	1	—	
试验结果		无裂纹	—		
7	高温压力试验				GB/T 2951.31—2008
	试验条件				
	——试验温度	℃	90±2	110±2	
——压痕中间值/护套平均厚度,最大	%	50	50		

表 3 (续)

序号	项目	单位	要求		试验方法
			聚氯乙烯 ST ₂	聚乙烯 ST ₇	
8	护套热收缩试验				GB/T 2951.13—2008
	试验条件				
	——试验温度	℃	—	80±2	
	——加热持续时间	h	—	5	
	——加热周期	次	—	5	
	收缩率,最大	%	—	3	
9	碳黑含量(仅对陆地电缆)	%	—	2.5±0.5	GB/T 2951.41—2008

6.3.4 电缆绝缘和工厂接头绝缘微孔杂质及半导体层与绝缘层界面微孔和突起试验

电缆和工厂接头应按 GB/T 11017.1—2014 中附录 H 的要求进行绝缘微孔、杂质及半导体层与绝缘层界面微孔和突起试验,试验结果应符合以下要求:

- 绝缘中应无大于 0.05 mm 的微孔;大于 0.025 mm、小于或等于 0.05 mm 的微孔在每 16.4 cm³ 体积中应不超过 30 个;
- 绝缘中应无大于 0.125 mm 的不透明杂质;大于 0.05 mm、小于或等于 0.125 mm 的不透明杂质在每 16.4 cm³ 体积中应不超过 10 个;
- 绝缘中应无大于 0.25 mm 的半透明棕色物质;
- 半导体屏蔽层与绝缘层界面应无大于 0.05 mm 的微孔;
- 导体半导体屏蔽层与绝缘层界面应无大于 0.125 mm 进入绝缘层的突起和大于 0.125 mm 进入半导体屏蔽层的突起;
- 绝缘半导体屏蔽层与绝缘层界面应无大于 0.125 mm 进入绝缘层的突起和大于 0.125 mm 进入半导体屏蔽层的突起。

6.3.5 燃烧试验

陆地电缆如采用 ST₂ 护套,且制造商声明电缆的设计符合燃烧试验要求,则应在成品电缆试样上按 GB/T 18380.12—2008 的规定进行燃烧试验并应符合要求。

6.3.6 非金属外护套刮磨试验

经 6.4.3.1 弯曲试验后的陆地电缆试样,非金属外护套应按 JB/T 10696.6—2007 和 GB/T 2952.1—2008 规定进行刮磨试验并应符合相应的要求。

6.3.7 腐蚀扩展试验(只适用于铝套)

经 6.4.3.1 弯曲试验后的陆地电缆试样,铝套应按 JB/T 10696.5—2007 和 GB/T 2952.1—2008 规定进行腐蚀扩展试验并应符合要求。

6.3.8 透水试验

6.3.8.1 陆地电缆的透水试验

当陆地电缆具有阻水结构时,应进行透水试验,该试验适用于下列电缆结构:

- a) 具有阻止沿绝缘屏蔽外表面和不透水阻挡层之间的空隙纵向透水的阻隔；
- b) 具有阻止沿导体纵向透水的阻隔。

试验装置、取样、试验方法和要求应符合 GB/T 11017.1—2014 中附录 I 的规定。

6.3.8.2 海底电缆的透水试验

6.3.8.2.1 概述

当海底电缆具有阻水结构时,应进行透水试验,海底电缆应分别进行导体透水、金属套透水试验和工厂接头径向透水试验。

导体透水试验为模拟海底电缆在最大水深区域发生故障而造成水从导体侵入并沿长度方向透水情况。电缆试样应尽量经受接近真实安装条件下的预处理,即试样在浸入水中前应经受张力弯曲试验和热循环试验。浸入水中试验时不需进行热循环试验,因为电缆在发生如此故障的情况下,电缆线路会退出运行。制造商应申明该海底电缆经 10 天透水试验后允许的电缆导体最大透水距离(d_1)。

金属套下透水试验为模拟海底电缆在近岸区域损坏而造成金属套下透水情况,此时外部水压对电缆的作用并不增加金属套下阻水能力。电缆试样的预处理应尽量接近真实的电缆安装情况,即电缆不需进行张力弯曲试验但应经受热循环以使试样在透水试验前受到径向膨胀。此热循环造成电缆的径向膨胀比电缆在浅海中受到外部水压的影响严重得多。由于这种情况下电缆损伤不会使电缆退出运行,试验时应进行热循环。外部压力不会压缩金属套,因此对目前设计采用的铅套,试验压力设定为 0.3 MPa 是适合的。如果采用其他试验压力,制造商需提供理由。制造商应申明该海底电缆金属套允许的电缆金属套下最大透水距离(d_2)。

工厂接头和修理接头的外部水压试验为检验接头在最大水深时阻止径向透水的性能。海底电缆试样应尽量接近安装状况,即试验前试样应经受张力试验或张力弯曲试验(取决于其结构)以及热循环试验以使试样受到适当的张力和径向膨胀。

除非用户另有特定要求,透水试验用水宜采用自来水或海底电缆应用海域海水盐度的盐水。有争议时推荐采用我国近海平均盐度为质量比(31±2)% [(31±2)g/kg]的盐水。

6.3.8.2.2 导体透水试验

6.3.8.2.2.1 试样准备和预处理

试样应从经受 6.4.3.2 机械试验的电缆上截取,试样长度应至少为 $d_1(1+33\%)$ m,试验可以在成品电缆或绝缘线芯上进行。

试样应经受至少 3 次 24 h 负荷循环以确保电缆经适度的热膨胀。该负荷循环中导体温度应超过电缆导体最高工作温度 5 °C~10 °C,并在加热阶段的至少最后 2 h 保持恒定。

预处理后,在试样的一端切除大约 50 mm 的圆环,直至电缆的导体,试样的另一端密封。

6.3.8.2.2.2 试验

将试样浸入最大敷设水深的压力容器中,水压应尽可能快地上升至规定的压力,以模拟电缆在最深区域的电缆故障,试验连续 10 天,水温控制在 5 °C~35 °C 之间。导体透水试验的典型装置见图 3。

试验结束后,取出试样,在距离圆环 d_1 位置切断电缆,可将该电缆末端浸到 100 °C 以上的硅油中观察是否有沸腾水产生的连续爆裂声,或者用吸墨纸检查电缆末端是否有水的存在。

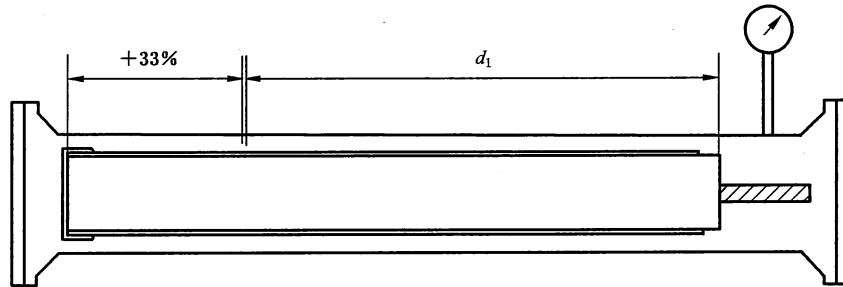


图3 导体透水试验的典型装置

6.3.8.2.3 金属套透水试验

6.3.8.2.3.1 试样准备和预处理

试样长度应至少为 $(d_2 + 1)$ m, 试验可以在成品电缆上或在剥除铠装后的电缆上进行。

试样应经受至少3次24 h 负荷循环以确保电缆经适度的热膨胀。该负荷循环中导体温度应超过电缆导体最高工作温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并在加热阶段的至少最后2 h 保持恒定。

预处理后, 在试样的中部或距试样末端1 m 位置切除大约50 mm 的圆环, 直至电缆的绝缘屏蔽。

6.3.8.2.3.2 试验

将试样置于压力容器中, 水温为 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 施加压力至0.3 MPa。金属套透水试验的典型装置见图4。

试样应经受10次24 h 负荷循环, 该负荷循环中导体温度应超过电缆导体最高工作温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并在加热阶段的至少最后2 h 保持恒定。

试验结束后, 取出试样, 在距离圆环 d_2 位置处检查绝缘屏蔽表面是否有水的存在。

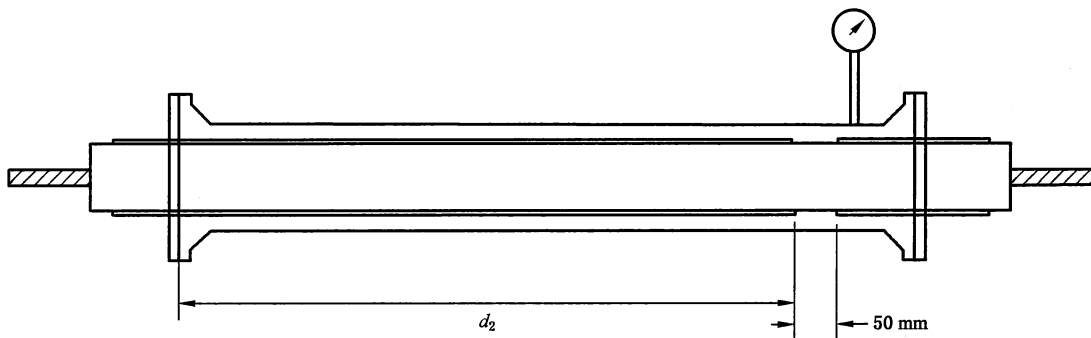


图4 金属套透水试验的典型装置

6.3.8.2.4 接头的径向透水试验

6.3.8.2.4.1 试样准备和预处理

接头试样应是经受过6.4.3.2 规定的机械试验, 并进行至少10次24 h 负荷循环, 该负荷循环中导

体温度应超过电缆导体最高工作温度 5 °C~10 °C,并在加热阶段的至少最后 2 h 保持恒定。

应对接头的承受压力部件进行水压试验,试样两端应密封。

6.3.8.2.4.2 试验

将试样浸入在对应敷设水深压力的水中,持续 48 h,水温为 5 °C~35 °C。

试验结束后,从水中取出试样,接头的阻水隔离结构应无水渗入迹象,且金属护套应无可见的变形。

6.3.9 纵包金属箔/带粘结护套电缆的组件试验

对具有纵包金属箔/带粘结护套的电缆,应在成品电缆段上取 1 m 长的试样进行以下试验:

- a) 目力检查;
- b) 金属箔/带的粘附强度;
- c) 金属箔/带搭接部分的剥离强度。

试验装置、步骤和要求应符合 IEC 60840:2011 中附录 F 的规定。

6.3.10 埋地接头的外保护层试验

陆地电缆接头外保护层的试验步骤和要求应符合 IEC 60840:2011 中附录 G 或 IEC 62067:2006 中附录 D 的规定。

6.4 电缆系统电气型式试验

6.4.1 电气型式试验用电缆绝缘厚度检查

电气试验前,应根据 GB/T 2951.11—2008 规定的方法对用于该试验的电缆段进行绝缘厚度检查,以检查绝缘厚度是否过多超过制造方申明值。

如果绝缘平均厚度不超过制造商申明值的 5%,试验电压应按电缆额定电压确定的试验电压进行。

如果绝缘平均厚度超过制造商申明值的 5%但不超过 15%,则应调整试验电压,以维持相同的平均电场,如绝缘平均厚度增加 10%,试验电压应增加 10%。

用作电气试验的电缆段的绝缘平均厚度应不超过制造商申明值的 15%。

6.4.2 电气型式试验概要

电缆系统电气型式试验程序见图 5。除 6.4.7、6.4.8、6.4.9 和 6.4.10 外,其余试验应在同一试验对象上进行。

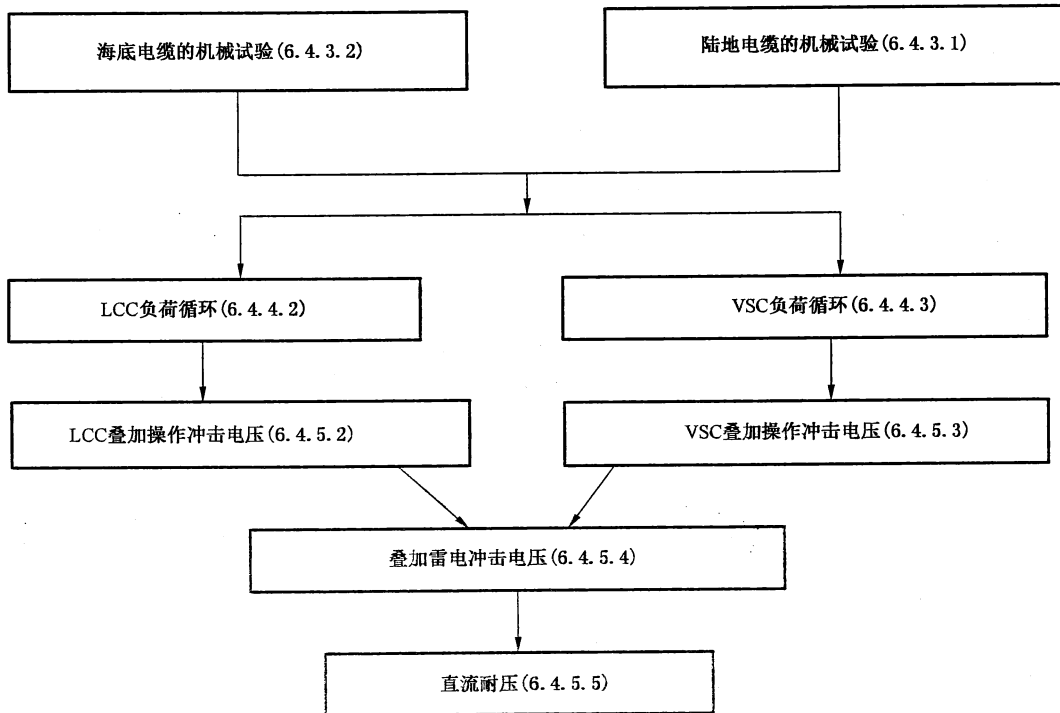


图5 电缆系统电气型式试验程序示意图

6.4.3 电气型式试验前的机械预处理

6.4.3.1 陆地电缆机械预处理试验

陆地电缆的机械预处理为弯曲试验,试验在室温下进行,电缆试样应围绕一个试验圆柱体(如电缆盘的筒体)弯曲至少一整圈,然后展直,再用同样方法做反方向弯曲。如此作为一个循环,共进行3次。

试验圆柱体的直径应不大于:

- $25(d+D)(1+5\%)$,金属套或纵包金属箔(搭盖或焊接)粘结护套电缆;
- $20(d+D)(1+5\%)$,其他电缆。

其中: d ——导体标称直径,单位为毫米(mm);

D ——电缆标称外径,单位为毫米(mm)。

6.4.3.2 海底电缆机械预处理试验

6.4.3.2.1 卷绕试验

本试验仅适用于海底电缆在制造或敷设时需要卷绕的情况,不适用于海底电缆仅仅绕在电缆盘上或盘绕在转盘内的情况。海底电缆在卷绕操作时会经受扭转,因此卷绕试验后应检验海底电缆结构是否受损。

卷绕试验应在至少可形成8整圈的适当长度的海底电缆上进行。在海底电缆试验段的中间应至少安装2个工厂接头,2个工厂接头末端间最小距离应为2整圈海底电缆。

绕圈的形状应与海底电缆制造或运输时相同,制造商应规定绕圈的最小半径和绕圈方向,并应在最小的圆形绕圈半径上进行试验。

开始卷绕前,应在海底电缆上标示平行于海底电缆轴向的标志线以检验卷绕操作过程中海底电缆是否均匀扭转。

放线架高度距离绕圈的最上层海底电缆应不超过海底电缆实际卷绕操作高度,例如在制造、收绕和敷设过程中放线架的高度。

海底电缆应根据制造商规定的最小弯曲半径进行卷绕试验,试验时应夹住海底电缆的两端以防止电缆旋转。

卷绕后,应将海底电缆再次绕到电缆盘上。这样的卷绕循环操作次数应与预期电缆在制造、收绕和敷设时卷绕次数相同。

卷绕操作过程中,海底电缆扭转应基本均匀,以预先加上的标志线评估。从海底电缆试验段中部截取样品,应包括1个工厂接头,进行目测检验。

卷绕试验结束后应不产生以下损伤:

- a) 电缆绝缘、金属套和外护套损坏;
- b) 导体或铠装永久变形。

如随后进行张力弯曲试验,则可在张力弯曲试验后进行目测检验。

6.4.3.2.2 张力弯曲试验

6.4.3.2.2.1 试验要求

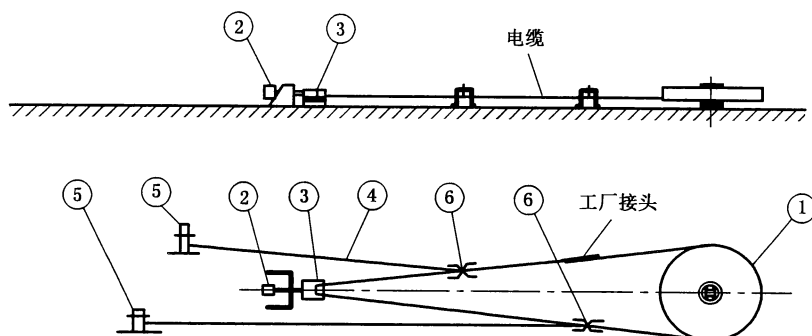
本试验用以考虑海底电缆在敷设和常规修复操作时施加于海底电缆上的力。常规修复是指修复暴露在海床上的电缆或海底电缆上覆盖物不超过电缆自身直径范围。如海底电缆埋深超过自身直径,并且电缆修复后还要继续使用,则应采用适当的方法。在修复电缆前,除去电缆上的覆盖物,也可直接从电缆沟里拉出电缆进行修复,但在此情况下张力弯曲试验的张力应加上所需的额外张力。典型情况下,此额外张力可考虑在5 000 N~20 000 N范围内。

如果试样已经进行了6.4.3.2.1的卷绕试验,可从已试电缆上截取至少含1个工厂接头的电缆进行试验。当敷设时采用特殊设备如采用浮筒以减少机械应力时,按供需双方协议可减小试验张力。

应安装电缆牵引头使远离电缆端头电缆各组件上所产生的力相当于敷设操作时分配的力。

试样长度应至少为30 m。海底电缆端部至工厂接头的距离应至少为10 m或者是铠装节距的5倍,取两者中较大的值。试样卷绕的转轮直径应不大于敷设船配备的放缆滑轮直径。与此试验转轮相接触的海底电缆长度应至少为2倍的铠装节距且不小于转轮周长的一半。如试样含有若干个工厂接头,则工厂接头间的距离应至少等于试验转轮的周长。

采用合适的设备,试样应在转轮上连续卷绕和退绕三次,不改变弯曲方向,试验设备示意图见图6。



说明:

- | | |
|------------|-----------|
| 1——转轮; | 4——钢丝绳; |
| 2——液压拉力柱体; | 5——绞车; |
| 3——牵引滑轮; | 6——电缆牵引头。 |

图6 张力弯曲试验示意图

6.4.3.2.2.2 试验张力的计算

试验张力的计算分为以下两种情况：

a) 水深为 0 m~500 m

用式(1)计算试验电缆段受到的试验张力。

$$T = 1.3Wd + H \dots\dots\dots(1)$$

式中：

- T —— 试验张力,单位为牛顿(N)；
- W —— 1 m 海底电缆在水中的重量,单位为牛顿每米(N/m)；
- d —— 最大敷设水深,单位为米(m)；
- H —— 水底接触点对电缆的最大允许张力,见式(2),单位为牛顿(N)。

$$H = 0.2Wd \dots\dots\dots(2)$$

式(2)中 d 的最小值规定为 200 m。

注 1: 系数 1.3 是考虑由于敷设和修复引起的额外张力以及敷设和修复情况下的动态应力。

注 2: 考虑水底接触点对电缆的张力 H 的目的是为给予敷设角一个安全裕度,以免在敷设过程中发生电缆扭结。

将计算的试验张力以 100 N 为修约间隔向上修约至最接近的数值。施加的试验张力应至少等于计算试验张力。

b) 水深大于 500 m

如敷设设备和敷设条件为已知,此计算方法也可用于水深小于 500 m 的特定工程。

注: 在深水中敷设重型电缆时,式(1)中的系数 1.3 可能导致安全裕度太大或太小,这取决于实际敷设情况。

用式(3)计算试验张力。

$$T = Wd + H + 1.2 | D | \dots\dots\dots(3)$$

式中：

- T —— 试验张力,单位为牛顿(N)；
- W —— 1 m 海底电缆在水中的重量,单位为牛顿每米(N/m)；
- d —— 最大敷设水深,单位为米(m)；
- H —— 水底接触点对电缆的最大允许张力,见式(2),单位为牛顿(N)；
- 1.2 —— 动态力的安全系数；
- D —— 动态张力,单位为牛顿(N),见式(4),按简化模式,忽略纵向弹性和实际的电缆在水中悬垂线形状。

$$D = \pm (1/2)b_n m d \omega^2 \dots\dots\dots(4)$$

式中：

- b_n —— 敷设滑轮峰对峰垂直运动量,单位为米(m)；
- m —— 海底电缆质量,单位为千克每米(kg/m)；
- d —— 最大敷设水深,单位为米(m)；
- ω —— $2\pi/t$, 敷设滑轮运动角频率,单位为秒分之一(1/s)；
- t —— 运动时间,单位为秒(s)。

本方法尚不能给出对特定气候状况的 b_n 和 ω 的计算通则。如无敷设船详细的运动状况,则应采用实际的波幅和周期计算动态张力 D,后者计算偏于安全。

应按特定工程,特别是所用敷设船和敷设作业时允许的最恶劣天气条件估计这些参数。

试验张力应以 100 N 为修约间隔向上修约至最接近的数值。施加试验张力应至少等于计算张力。

6.4.4 负荷循环试验

6.4.4.1 概述

在经过机械预处理的试验对象上安装不涉及机械预处理的附件构成试验回路进行负荷循环试验。

各循环阶段的热条件见 4.3 规定。

如果试验回路由不同设计的电缆通过一个过渡接头连接组成,那么每一种设计电缆按相应热条件($T_{c,max}$ 和 ΔT_{max})认可,过渡接头按较高温度等级认可。然而,过渡接头的某一侧电缆可能并不能按其设计的最高热条件认可。

6.4.4.2 负荷循环试验(LCC 运行的电缆系统)

试验对象应经受:

- 负极性 U_T 下,8 个 24 h 负荷循环;
- 正极性 U_T 下,8 个 24 h 负荷循环;
- 8 个 24 h 负荷循环,同时 U_{TP1} 下极性反转;
- 正极性 U_T 下,3 个 48 h 负荷循环。

除极性反转试验外,不同极性的负荷循环试验之间电压停顿时间推荐不小于 24 h,负荷循环不停止。

注:48 h 负荷循环采用正极性电压。对于附件,该条件被认为是最为严酷的条件。

6.4.4.3 负荷循环试验(VSC 运行的电缆系统)

试验对象应经受:

- 负极性 U_T 下,12 个 24 h 负荷循环;
- 正极性 U_T 下,12 个 24 h 负荷循环;
- 正极性 U_T 下,3 个 48 h 负荷循环。

不同极性的负荷循环试验之间电压停顿时间推荐不小于 24 h,负荷循环不停止。

注:48 h 负荷循环采用正极性电压。对于附件,该条件被认为是最为严酷的条件。

6.4.5 叠加冲击电压试验

6.4.5.1 概述

直流叠加冲击电压试验应按 4.3.7 的要求在已通过负荷循环的试验对象上进行。

6.4.5.2 叠加操作冲击电压试验(LCC 运行的电缆系统)

试验对象应经受:

- 正极性 U_0 下,叠加负极性操作冲击电压 $U_{P2,0}$ 连续 10 次;
- 负极性 U_0 下,叠加正极性操作冲击电压 $U_{P2,0}$ 连续 10 次。

6.4.5.3 叠加操作冲击电压试验(VSC 运行的电缆系统)

试验对象应经受:

- 正极性 U_0 下,叠加正极性操作冲击电压 $U_{P2,S}$ 连续 10 次;
- 正极性 U_0 下,叠加负极性操作冲击电压 $U_{P2,0}$ 连续 10 次;
- 负极性 U_0 下,叠加负极性操作冲击电压 $U_{P2,S}$ 连续 10 次;
- 负极性 U_0 下,叠加正极性操作冲击电压 $U_{P2,0}$ 连续 10 次。

6.4.5.4 叠加雷电冲击电压试验

试验对象应经受:

- 正极性 U_0 下,叠加负极性雷电冲击电压 U_{P1} 连续 10 次;
- 负极性 U_0 下,叠加正极性操作冲击电压 U_{P1} 连续 10 次。

若安装的电缆系统不直接或间接暴露在雷击下,则试验对象可不进行本项试验。

6.4.5.5 随后的直流电压试验

叠加冲击电压试验后,试验对象应在不加热的前提下经受负极性直流电压试验,试验电压为 U_T ,持续时间为 2 h。该试验开始前允许有一段停顿时间。

6.4.6 检查

用正常或矫正视力检查解剖的电缆和拆卸的附件,应无影响电缆系统正常运行的劣化迹象(如电气劣化、泄漏、腐蚀或有害的收缩)。

对于金属带或金属箔纵向粘结护套的电缆,从经过 6.4.1~6.4.5 试验的电缆上截取 1 m 试样按 6.3.9 进行纵包金属箔/带粘结护套电缆的组件试验。

6.4.7 导体直流电阻试验

电缆的导体直流电阻应按 GB/T 3048.4—2007 进行试验,试验结果应符合 GB/T 3956—2008 的规定。

6.4.8 半导体层电阻率试验

应从制造后未经处理的电缆试样的绝缘线芯和从已经过表 2 规定的相容性老化试验处理后的电缆试样的绝缘线芯上分别制取试件,进行导体半导体屏蔽和绝缘半导体屏蔽电阻率的测量。试验应按 GB/T 11017.1—2014 中附录 G 的规定进行。

测量应在 $(90 \pm 2)^\circ\text{C}$ 下进行,老化前和相容性老化后的屏蔽电阻率应不超过:

——导体屏蔽: $1\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$;

——绝缘屏蔽: $500\ \Omega \cdot \text{m}$ 。

6.4.9 电缆绝缘电导率试验

电缆绝缘电导率试验应按附录 A 的方法进行,测量分别在 $30\ ^\circ\text{C}$ 和 $70\ ^\circ\text{C}$ 下进行,测试场强为 $20\ \text{kV}/\text{mm}$,2 个温度下电缆绝缘电导率的比值 $\gamma_{20,70}/\gamma_{20,30}$ 应不大于 100。

6.4.10 电缆绝缘空间电荷试验

电缆绝缘空间电荷试验应按附录 B 的方法进行,测量在室温下进行,测试场强为 $20\ \text{kV}/\text{mm}$,电场畸变率 δ_{20} 应不大于 20%。

6.5 合格判据、重新试验与试验中断

型式试验结果合格的判据是试验对象通过 6.4 中所有电气型式试验,且非电气试验满足 6.3 的要求。

由于外部因素引起电气型式试验中断,试验可以继续。在负荷循环试验过程中,如果中断时间大于 30 min 且不大于 24 h,当次负荷循环应重新进行;如果中断时间大于 24 h,该项循环(24 h 负荷循环试验,24 h 负荷循环的极性反转试验,48 h 负荷循环试验)应重新进行。

负荷循环试验或叠加冲击电压试验中如果试验参数发生偏离,该试验应重新进行。

当几个试验对象同时试验时,部分试验对象发生绝缘击穿的情况下,应移去故障对象,其余试验对象按中断处理,故障对象则不满足试验要求。任何故障发生在某一试验对象范围(0.5 m)内,则认为仅与该试验对象有关。

6.6 回流电缆的型式试验

6.6.1 机械预处理

如适用,回流电缆应按 6.4.3 进行机械预处理。

6.6.2 热机械处理

机械预处理后,回流电缆试样应进行连续 24 个 24 h 负荷循环试验,负荷循环试验时无需考虑绝缘层温差要求和电压要求。

6.6.3 交流耐压试验

经 6.6.1 和 6.6.2 试验后的试样应进行工频交流耐压试验。试验在室温下进行,试验电压为 1.15 倍的 $U_{RC,AC}$,持续时间为 30 min,应不击穿。

6.6.4 雷电冲击电压试验

若适用,回流电缆试样应根据 6.4.5.4 的原则进行雷电冲击电压试验。

6.6.5 带有集成回流导体的电缆设计

如果输电电缆包含集成回流回路,应对该输电电缆中回流回路进行试验,试验程序由供需双方商定。

7 预鉴定试验

7.1 认可范围

正常情况下,预鉴定试验应在开发试验完成后进行,也可由供需双方共同商定。预鉴定试验仅需进行一次,除非电缆系统的材料、制造工艺、结构或设计参数有实质性改变。

注:实质性改变是指可能对电缆系统性能产生不良影响的改变。如果进行了某些修改并声明这些修改不构成实质性改变,制造商需提供包括试验证据在内的详细情况。

电缆系统通过预鉴定试验的制造商可作为其他电缆系统的合格供应商,应满足以下条件:

- 额定电压 U_0 不大于已试电缆系统的 10%;
- 绝缘平均场强计算值不大于已试电缆系统;
- U_0 下电缆绝缘屏蔽处的拉普拉斯电场强度计算值(用标称尺寸计算)不大于已试电缆系统;
- 导体最高温度 $T_{c,max}$ 不大于已试电缆系统;
- 绝缘层最大温差 ΔT_{max} 不大于已试电缆系统;
- LCC 预鉴定试验合格的电缆系统,认可范围可以覆盖 VSC 系统,反之则不适用;
- 预鉴定试验合格的非铠装电缆同样适用于铠装电缆,反之亦然。

注:上述认可范围的条件未考虑直流电场。直流电缆系统设计中,直流电场的设计至关重要。制造商需具备电缆系统(电缆和附件)在所有运行条件下的直流电场的知识,并能够根据客户的要求提出详细方案。

推荐使用较大导体截面的电缆进行预鉴定试验以覆盖热机械因素。

预鉴定试验后应进行冲击电压试验以确认电缆系统经过长期试验后不发生根本的热机械变化。

7.2 预鉴定试验概述

额定电压 80 kV 及以上电缆系统应进行预鉴定试验。

预鉴定试验应包括约 100 m 的电缆和完整附件(每种类型至少一件),其绝缘设计应适用于实际应用。预鉴定试验前,适当时应考虑机械预处理。

基本试验程序如下:

- a) 长期电压试验(见 7.4);
- b) 叠加冲击电压试验(见 7.5);
- c) 检查(见 7.6)。

7.3 试验安排

应根据制造商提供的安装手册安装电缆和附件,包括一定数量和等级的辅助材料,如润滑油等。

注:安装中一些因素是公认的重要因素,例如由于敷设条件导致的热机械效应。回路布置时需充分考虑安装条件的代表性。

在进行预鉴定试验前,应按 6.4.1 进行绝缘厚度检查。

7.4 长期电压试验

预鉴定试验持续的最短试验时间为 360 天,电缆系统的导体温度和绝缘内温差均应控制在设计水平,附件和相邻电缆的设计水平可不同。

LCC 和 VSC 的预鉴定试验顺序见表 4 和表 5。

表 4 电网换相换流器 LCC

试验项目	LC	LC	LC+PR	HL	HL	ZL	LC	LC	LC+PR	S/IMP
循环次数	30	30	20	40	40	120	30	30	20	不适用
电压	+	-		+	-	-	+	-		$U_{P2.0} = 1.2 U_0$
	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP2}	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP2}	$U_{P1} = 2.1 U_0$ (若适用)
注: LC=负荷循环,HL=高负荷,PR=极性反转,ZL=零负荷,S/IMP=叠加冲击试验。										

表 5 电压源换流器 VSC

试验项目	LC	LC	HL	HL	ZL	LC	LC	S/IMP
循环次数	40	40	40	40	120	40	40	不适用
电压	+	-	+	-	-	+	-	$U_{P2.0} = 1.2 U_0$
	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP1}	$U_{P1} = 2.1 U_0$ (若适用)
注: LC=负荷循环,HL=高负荷,ZL=零负荷,S/IMP=叠加冲击试验。								

试验条件见 4.3。

注:试验过程中,环境温度将会发生变化,可调节导体电流以使导体温度和绝缘温差保持在限定的范围内。

除极性反转试验外,不同极性的负荷循环试验之间电压停顿时间推荐不小于 24 h,负荷循环不停止。

7.5 叠加冲击电压试验

长期电压试验后的叠加冲击电压试验随工程的不同而不同,推荐的冲击电压为 $U_{P2.0} = 1.2 U_0$, $U_{P1} = 2.1 U_0$ (若适用)。试验可在一段或多段电缆上按 4.3.7 规定的温度和程序进行,每段试样的有效长度应不小于 30 m。

所有试样应能经受：

——正极性 U_0 下，叠加负极性操作冲击电压 $U_{P2,0}$ 连续 10 次；

——负极性 U_0 下，叠加正极性操作冲击电压 $U_{P2,0}$ 连续 10 次。

如供需双方商定需进行直流叠加雷电冲击电压试验时，所有试样应能经受：

——正极性 U_0 下，叠加负极性雷电冲击电压 U_{P1} 连续 10 次；

——负极性 U_0 下，叠加正极性操作冲击电压 U_{P1} 连续 10 次。

7.6 检查

用正常或矫正视力检查解剖的电缆和拆卸的附件，应无影响电缆系统正常运行的劣化迹象（如电气劣化、泄漏、腐蚀或有害的收缩）。

7.7 合格判据、重新试验与试验中断

预鉴定试验合格的标准是试验对象经过所有试验不发生击穿，试验系统按 7.6 进行检查。

如果某一试验对象击穿，则该试验对象应重新进行完整的预鉴定试验。

如果某一试验对象击穿，导致与其连接的其他试验对象试验中断，在移去该击穿试验对象后，试验可继续进行。如果击穿发生在某次负荷循环或某次冲击电压试验过程中，剩余试验对象应重新进行该试验。如果击穿发生在某一恒定负荷周期，剩余试验对象应将未施加电压的时间补充到剩下试验周期里。

如因外部原因引起试验中断，试验可以继续。如果中断时间大于 30 min，由于中断缺失的负荷循环应重新进行。如果中断发生在恒定负荷周期且中断时间大于 30 min，中断发生的当日试验应重新进行。

8 例行试验

8.1 输电电缆

每个交货长度的电缆在导体和屏蔽之间应经受负极性直流电压 U_T ，持续时间 60 min，绝缘应不击穿。

除直流电压试验外，若绝缘系统和电缆设计允许采用交流电压试验，可考虑采用交流电压试验，施加的电压、频率（工频或其他频率）和施加时间应由供需双方商定，推荐的交流试验电压为 $0.8 U_0$ ，持续 30 min，绝缘应不击穿。

如果在特定合同或订单中有要求，外护套应经受 1 min 的直流电压试验。在金属层和外导电电极间施加 8 kV/mm 的直流电压，电压应不大于 25 kV，金属层接负极性，外护套应不击穿。

电缆应按 GB/T 3048.4—2007 进行导体直流电阻试验，结果应符合 GB/T 3956—2008 的规定。

8.2 电缆附件

8.2.1 预制接头和终端

预制接头通常用于直流陆地电缆之间的连接，终端则用于直流陆地电缆、直流海底电缆的连接。对预制附件的主绝缘应进行 8.1 规定的直流电压试验。

需要时，也可进行交流电压试验和局部放电试验作为附加试验。交流电压试验应在环境温度下进行，推荐的试验电压为 $0.8 U_0$ ，保持 30 min，试样应不击穿。局部放电试验应按 GB/T 3048.12—2007 的规定进行，测试灵敏度为 5pC 或更优，推荐在 $0.6 U_0$ 下无超过申明灵敏度的可检出的放电。

8.2.2 海底电缆的工厂接头

工厂接头通常用于大长度的海底电缆,至少有以下4种方式检查工厂接头绝缘的质量:

- 直流电压试验:带工厂接头的海底电缆应经受负极性电压 U_T ,持续60 min,绝缘应不击穿;
- 交流电压试验:推荐的交流试验电压为 $0.8 U_0$,保持30 min,绝缘应不击穿;也可根据制造商的质保程序进行;
- 局部放电试验:按GB/T 3048.12—2007的规定进行,测试灵敏度为5pC或更优,推荐在 $0.6 U_0$ 下无超过申明灵敏度的可检出的放电;也可根据制造商的质保程序进行;
- X射线检查:应无有害杂质和气孔。

8.2.3 海底电缆的修理接头

对于预制型海底电缆修理接头,按8.2.1进行例行试验;对于模塑型海底电缆修理接头,不能进行例行试验,应按9.4进行抽样试验以控制修理接头的质量水平。

8.3 回流电缆

每个发送长度的回流电缆应在导体和护套之间进行交流电压试验,试验电压和时间由供需双方共同商定;对于大长度和较高额定电压的回流电缆,进行交流电压试验可能不容易实现,在这种情况下,供需双方商定可以采取直流电压试验,推荐的直流电压试验值为2.5倍 $U_{RC,AC}$ 或25 kV,取两者中的大值,持续时间为60 min,回流电缆绝缘应不击穿。

9 抽样试验

9.1 输电电缆

9.1.1 试验项目

输电电缆的抽样试验项目如下:

- a) 导体检查;
- b) 导体和金属屏蔽直流电阻测量;
- c) 电容;
- d) 绝缘和非金属护套厚度测量;
- e) 金属套厚度测量;
- f) 外径;
- g) 交联聚乙烯绝缘热延伸试验;
- h) 冲击电压试验;
- i) 透水试验,如适用;
- j) 纵包金属箔/带粘结护套电缆的组件试验。

9.1.2 试验频度

9.1.1中列项a)~g)的抽样试验应在相同型号规格电缆的生产批中抽取的一根试样上进行,但不应超过任何合同中电缆总盘数的10%,向上修约至整数。

9.1.1中列项h)~j)的抽样试验应根据质量控制程序规定的频度进行,或大于20 km的合同进行一次试验。

9.1.3 复试

如果取自任一根电缆上的试样未能通过 9.1.1 规定的任何一项试验,则应从同一批中另外两根电缆上各取一个试样,对未通过的试验项目进行试验。如果这两个加试的试样都通过了试验,则应认为该批中的其他电缆符合要求;如果在加试的试样中一个试样仍未通过试验,则应认为该批电缆不符合要求。

9.1.4 导体检查

导体结构应符合 GB/T 3956—2008 的要求。

9.1.5 导体和金属屏蔽(套)直流电阻测量

试验应在整盘电缆或电缆试样上进行,试验前应将试样放置在温度比较稳定的试验室内至少 12 h,如果怀疑导体温度与室温不一致,可将电缆放置在试验室内至少 24 h 后再测量电阻。另一种方法是在导体或金属屏蔽(套)短段试样上测量电阻,应将试样放置在可控温的室内或液体槽内至少 1 h 后再测量电阻。

应按 GB/T 3956—2008 给出的公式和系数计算 20 °C 每公里的导体直流电阻值,结果应符合 GB/T 3956—2008 的规定。金属屏蔽(套)应按 IEC 60287-1-1 :2006 中表 1 所示的电阻温度系数确定相应的电阻值。

9.1.6 电容测量

应测量导体与金属屏蔽(套)间的电容,测量值应不超过制造商声明的标称值的 8%。

9.1.7 绝缘和非金属护套厚度测量

绝缘和非金属护套厚度应按 GB/T 2951.11—2008 规定的方法测量,测量结果应符合相应产品标准或制造商声明的厚度要求。

9.1.8 金属套厚度测量

应采用球面千分尺进行测量,球面半径约为 3 mm,其精度应为 ± 0.01 mm。

从成品电缆上仔细切取约 50 mm 宽的金属套圆环,沿圆环周围在足够多的点测量金属套厚度,以确保测到最薄处厚度。测量结果应符合相应产品标准或制造商声明的厚度要求。

9.1.9 外径测量

如采购方对外径有要求,应按 GB/T 2951.11—2008 规定的方法测量绝缘线芯直径和(或)电缆外径。

9.1.10 交联聚乙烯绝缘热延伸试验

绝缘热延伸试验应按 GB/T 2951.21—2008 规定的方法进行,试验条件和试验结果应符合表 2 的要求。

9.1.11 冲击电压试验

应按 6.4.5.4 的要求进行冲击电压试验。若电缆系统不会直接或间接经受雷击,则按 6.4.5.2 和 6.4.5.3 的要求进行冲击电压试验。

9.1.12 透水试验(若适用)

透水试验的试验步骤和试验结果应符合 6.3.8 的规定。

9.1.13 纵包金属箔/带粘结护套电缆的组件试验

纵包金属箔/带粘结护套电缆的组件试验的试验步骤和试验结果应符合 6.3.9 的规定。

9.2 海底电缆工厂接头

9.2.1 概述

工厂接头的抽样试验可在接头制作前的一个工厂线芯接头上进行,试验需要至少 10 m 的电缆和一个工厂接头。如果工厂接头按合同进行型式试验,本试验可不进行。

9.2.2 试验频度

接头试验应在同一电缆合同的工厂接头制作至 5、15、30、50、75 个接头后取 1 个进行试验。9.2.3~9.2.5 所述各项试验应在同一个接头试样上进行。

9.2.3 局部放电试验和交流电压试验

试验应在工厂接头的外半导体层、金属接地和外护套恢复后进行。局部放电试验应按 GB/T 3048.12—2007 的规定进行,测试灵敏度为 5pC 或更优,推荐在 $0.6 U_0$ 下无超过申明灵敏度的可检出的放电;交流电压试验推荐的试验电压为 $0.8 U_0$,保持 30 min,不击穿。局部放电试验和交流电压试验也可根据制造商的质保程序进行。

9.2.4 冲击电压试验

应按 6.4.5.4 的要求进行冲击电压试验。若电缆系统不会直接或间接经受雷击,则按 6.4.5.2 和 6.4.5.3 的要求进行冲击电压试验。

9.2.5 绝缘热延伸试验

工厂接头绝缘的取样和试验程序应按 GB/T 2951.21—2008 的规定进行,试验条件和试验结果应符合表 2 中序号 4 的规定。

9.2.6 拉伸试验

导体接头的拉伸试验应按 GB/T 4909.3—2009 的规定进行,800 mm² 及以下导体之间的连接抗拉强度应不小于 180 MPa,800 mm² 以上导体之间的连接抗拉强度应不小于 170 MPa。本试验可在导体试样上进行。

9.2.7 合格判定

如工厂接头 9.2.3~9.2.6 中任何一个试验失败,则应另取两个工厂接头试验并应通过所有试验。

9.3 修理接头和终端

按 8.2.1 进行例行试验的预制型修理接头和终端,抽样试验不再适用;模塑型海底电缆修理接头应按 9.4 的规定进行抽样试验。

9.4 现场模塑接头

现场模塑接头不能进行例行试验。模塑接头抽样试验频度应在同一电缆合同接头数量每超过50个取1个进行试验,推荐的试验项目如下:

- 直流电压试验:带接头的电缆应经受负极性电压 U_T ,持续时间 60 min,绝缘应不击穿;
- 交流电压试验:推荐的交流试验电压为 $0.8 U_0$,持续时间 30 min,绝缘应不击穿,也可根据制造商的质保程序进行;
- 局部放电试验:按 GB/T 3048.12—2007 的规定进行,测试灵敏度为 5pC 或更优,推荐在 $0.6 U_0$ 下无超过申明灵敏度的可检出的放电,也可根据制造商的质保程序进行。

10 安装后试验

10.1 高压试验

安装后的直流高压电缆系统应经受负极性直流电压 U_{TPI} ,试验时间为 1 h,绝缘应不击穿。

回流电缆系统应经受负极性直流电压试验,试验电压由供需双方商定,试验时间为 1 h,绝缘应不击穿。

10.2 聚合物护套试验

对于陆地直流电缆,需要时,对电缆外护套施加 4 kV/mm 的负极性直流电压,最大不超过 10 kV,试验时间为 15 min,电缆外护套应不击穿。

10.3 TDR 测试

可对安装后的电缆系统进行 TDR(时域反射)测试,测试结果作为工程用途。

附 录 A
(规范性附录)
电缆绝缘电导率试验方法

A.1 适用范围

本试验方法适用于测量电缆绝缘电导率随温度和电场变化的敏感程度,也可用于电缆和附件绝缘材料电导率随温度和电场变化的特性研究。

A.2 试验设备

A.2.1 电导率测试系统

电导率的测试系统包括:

- a) 高压直流电源:能够提供 0 kV~10 kV 直流高压,纹波系数小于 1%;
- b) 电流表:电流的准确度达到 10^{-14} A;
- c) 三电极结构的电极系统;
- d) 加热和温度控制系统。

A.2.2 切片机

切片机或具有类似功能的其他设备。

A.3 试样的制备

从成品电缆上截取 300 mm 长的电缆试样,剥除绝缘屏蔽外所有部分,沿电缆轴向切取 6 个条状试片,试片的厚度约 0.3 mm~0.5 mm。切片机用的刀片应锋利,以使试片具有均匀的厚度和光滑的表面,应保持试片表面清洁,并防止擦伤。

A.4 测试步骤

在某一温度下,将试片安装在三电极系统上,对试片施加直流电压(根据测试场强和试片厚度计算),记录 10 min 时的电流值;保持温度恒定,升高施加在试样上的直流电压,记录 10 min 后的电流值。每个温度点共测量 2 个试片。

A.5 结果计算

试样在某一测试场强和温度下的电导率 $\gamma_{E,T}$ 按式(A.1)计算。

$$\gamma_{E,T} = Id/US \quad \dots\dots\dots(A.1)$$

式中:

- $\gamma_{E,T}$ ——某一测试场强和温度下的电导率,单位为西门子每厘米(S/cm);
- E ——测试场强,单位为千伏每毫米(kV/mm);

- T ——测试温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);
 I ——实测电流值,单位为安培(A);
 d ——试片厚度,单位为厘米(cm);
 U ——施加的直流电压,单位为伏特(V);
 S ——电极面积,单位为平方厘米(cm^2)。

各温度下电缆绝缘电导率试验结果取 2 个试片结果的平均值。

附 录 B
(规范性附录)
电缆绝缘空间电荷试验方法

B.1 适用范围

本试验方法适用于电缆绝缘在设计直流场强范围内的空间电荷测量,也可用于电缆屏蔽材料和绝缘材料、附件屏蔽材料和绝缘材料在不同场强下的空间电荷特性研究。

B.2 试验设备

B.2.1 空间电荷测试设备

空间电荷测试设备基于电声脉冲法原理,空间分辨率高于 20 μm ,空间电荷密度的灵敏度大于 0.2 $\mu\text{C}/\text{cm}^3$ 。

B.2.2 切片机

切片机或具有类似功能的其他设备。

B.3 试样的制备

从成品电缆上截取 300 mm 长的电缆试样,剥除绝缘屏蔽外所有部分,沿电缆轴向切取 4 个条状试片,试片的厚度约 0.3 mm~0.5 mm。切片机用的刀片应锋利,以使试片具有均匀的厚度和光滑的表面,应保持试片表面清洁,并防止擦伤。

B.4 半导体材料电极的制备

将该电缆的半导体屏蔽料颗粒置于制片的模框中,用 115 $^{\circ}\text{C}$ ~120 $^{\circ}\text{C}$ 的平板硫化机不加压预热 6 min,然后经 4 min 加热加压成形。试样的交联条件为(170 $^{\circ}\text{C}$ ~180 $^{\circ}\text{C}$) \times 15 min,平板硫化机的压强应大于 15 MPa,然后加压冷却至室温。试片应平整光洁、厚度均匀、无气泡。半导体电极厚度为 1 mm~2 mm,制作电极直径与空间电荷测试设备的高压电极基本一致。

B.5 测量步骤

测量步骤如下:

- a) 将绝缘试片与相应的半导体电极安装在空间电荷测试系统中;
- b) 在室温下,在绝缘试片两电极间施加直流电压(根据测试场强和试片厚度计算),施加时间为 60 min,测量并记录 60 min 时绝缘试片中的空间电荷分布;
- c) 应测试两个绝缘试片;
- d) 若需要观察绝缘试片在特定直流电场加压后短路过程中的空间电荷分布,应按照测试系统的要求先进行短路,同时记录不同短路时间的空间电荷分布,该条款可作为开发试验用途。

B.6 空间电荷分布的标定与数据处理方法

空间电荷信号的标定方法与数据处理方法应按照测试系统的规定进行。

B.7 试验结果

根据空间电荷测量结果计算电缆绝缘在测试场强下的电场畸变程度,电场畸变率 δ_E 按式(B.1)计算。

$$\delta_E = | E_{\max} - E | / | E | \times 100\% \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

δ_E ——某一测试场强下,绝缘中的电场畸变率, %;

E ——测试场强,单位为千伏每毫米(kV/mm);

E_{\max} ——根据空间电荷测试结果计算得出的绝缘中的场强最大值,单位为千伏每毫米(kV/mm)。



中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
额定电压 500 kV 及以下直流输电用挤包
绝缘电力电缆系统
第 1 部分：试验方法和要求
GB/T 31489.1—2015

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)
网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238
读者服务部:(010)68523946
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 2.25 字数 58 千字
2015 年 5 月第一版 2015 年 5 月第一次印刷

*

书号：155066·1-51458 定价 33.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



GB/T 31489.1-2015