

ICS 31.260
CCS L 51



中华人民共和国国家标准

GB/T 41643—2022

高功率激光制造设备安全和使用指南

Guidance and safety requirements for
high power laser manufacturing equipments

2022-10-12 发布

2022-10-12 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	3
5 需考虑的因素	3
5.1 设备文件留存	3
5.2 环境安全检查	3
5.3 设备基本信息记录	4
5.4 危害评估	4
5.5 标识标记	9
5.6 控制措施	9
6 激光安全员	10
6.1 概述	10
6.2 宜掌握的知识和技能	10
7 激光安全管理委员会	11
7.1 概述	11
7.2 激光安全委员会的成员	11
7.3 激光安全委员会的职责	11
8 激光安全培训	11
8.1 概述	11
8.2 初级培训	11
8.3 中级培训	12
8.4 高级培训	12
附录 A (资料性) 附表	13
附录 B (资料性) 计算方法举例	16
B.1 激光产品安全分类计算举例	16
B.2 MPE 计算举例	17
B.3 NOHD 计算举例	17
B.4 OD 计算举例	17
参考文献	18

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国光辐射安全和高功率激光制造设备标准化技术委员会(SAC/TC 284)归口。

本文件起草单位：北京工业大学、武汉华工激光工程有限责任公司、奔腾激光(温州)有限公司、深圳市鼎信科技有限公司、常州天正工业发展股份有限公司、浙江工业大学、大族激光智能装备集团有限公司、温州市质量技术监督科学研究院/浙江省激光与光电产品质量检验中心、浙江久恒光电科技有限公司、国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司、中车南京浦镇车辆有限公司、山东华光光子股份有限公司、杭州银湖激光科技有限公司、度亘激光技术(苏州)有限公司、深圳市计量质量检测研究院、湖北省标准化与质量研究院。

本文件主要起草人：陈虹、李婷、吴让大、谢晋雄、韩立成、姚建华、曾丽霞、黄山石、吴旭浩、王璞、何玉朝、火巧英、周小庄、肖成峰、卢飞星、张艳春、黄志凡、钱辉敏、李向召、谢秋琪、张翀昊、吴金津。

引 言

以激光作为工具用于制造业已经带来了一系列变革,对光的了解和控制是实现激光制造产业化的关键前提。高功率激光制造设备是激光制造领域的核心,其激光安全是不容忽视的重要环节。通过对国际电工委员会(IEC)、国际标准化组织(ISO)和美国国家标准学会(ANSI)等标准化组织制定的相关标准的调研,在激光危害评估、安全分类和控制措施方面,相关标准已达成国际一致。

本文件与 GB/T 18490.1—2017 和 GB/T 7247.5—2019 存在区别与联系,这两个标准规范了做什么,本文件为怎么做提供了指导和建议。

本文件中涉及激光产品安全分类的计算按照 GB 7247.1—2012 的相关条款执行;涉及最大允许照射量 MPE 值,及以 MPE 值为计算依据的相关参数的计算,按照 ANSI Z136.1—2014 的相关条款执行。

本文件预期将有助于高功率激光制造设备使用的规范管理和提质增效。遇到问题时,做到责任认定清晰,上能溯源、下能追底、免责有据。

高功率激光制造设备安全和使用指南

1 范围

本文件提供了高功率激光制造设备安全运行程序的指导和建议。给出了设备文件及记录,安装和使用环境检查评估,激光辐射危害评估,非光辐射危害评估,标识标记检查,控制措施检查,以及激光安全员、激光安全管理委员会和安全培训等环节中与需考虑要点有关的信息。

本文件适用于预期用于工业制造以及预期不用于工业制造,但可能会被用户在合理条件下用于制造的3B类或4类激光产品,包括嵌入3B类或4类激光光源的制造设备。本文件不适用于包括娱乐、演示、校准、测量、教育和医疗等用途的激光产品。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;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 7247.1—2012 激光产品的安全 第1部分:设备分类、要求

GB/T 7247.5—2017 激光产品的安全 第5部分:生产者关于GB 7247.1的检查清单

GB/T 7247.13—2018 激光产品的安全 第13部分:激光产品的分类测量

GB/T 15313—2008 激光术语

IEC 60825-1:2014 激光产品的安全 第1部分:设备分类、要求(Safety of laser products—Part 1: Equipment classification and requirements)

3 术语和定义

GB 7247.1—2012、GB/T 15313—2008、GB/T 7247.13—2018 和 IEC 60825-1:2014 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

可达发射 **accessible emission; AE**

在某个位置使用孔径光阑(AEL以瓦特或焦耳为单位)或限制孔径(AEL以 W/m^{-2} 或 J/m^{-2} 为单位)根据GB 7247.1—2012第9章确定的辐射量。

[来源:GB 7247.1—2012, 3.2, 有修改]

3.2

可达发射极限 **accessible emission limit; AEL**

所定类别内允许的最大可达发射。

[来源:GB 7247.1—2012, 3.3]

3.3

光束直径 **beam diameter**

光束宽度 **beam width**

d_w

在垂直于光轴的测量平面上,圆内激光功率(或能量)为该平面上总激光功率(或能量)的 $u\%$ 的最小圆直径。

注 1:本文件采用 d_{63} 。

注 2:光束束腰为光束直径最小的位置。

注 3:国际单位:m。

注 4:由于定义不同,这个光束直径的定义不适用于确定表观光源对向角 α 。然而,如果表观光源能量密度为高斯分布, d_{63} 可以用来确定表观光源对向角。对于非高斯分布表观光源的对向角,采用 IEC 60825-1:2014 中 4.3 d) 描述的方法确定。

注 5:对于高斯光束, d_{63} 等于光强降低到峰值 $1/e$ 的点对应的圆的环围能量。

注 6:二阶矩定义的光束直径(ISO 11146-1 定义)不适用于剖面具有中心高辐射峰值和低背景的激光束。例如,由非稳腔产生的远场激光束。使用二阶矩定义的光束直径和用高斯光束剖面假设计算功率时,通过孔径的功率会被显著低估。

[来源:IEC 60825-1:2014, 3.13]

3.4

光束发散角 beam divergence

φ

由光束直径 d_{63} 相对于光束传播方向上由最临近的束腰中心而形成的锥形远场平面全角。

注 1:如果间距为 r 的两点的光束直径是 d_{63} 和 d'_{63} , 则光束发散角以式(1)计算:

$$\varphi_{63} = 2\arctan\left(\frac{d'_{63} - d_{63}}{2r}\right) \dots\dots\dots(1)$$

注 2:国际单位:rad。

注 3:二阶矩定义的光束发散角(ISO 11146-1 定义)不适用于剖面具有中心高辐射峰值和低背景的激光束。例如,由非稳腔产生的远场激光束,该光束剖面表现为由限制孔径或孔径光阑引起的衍射图样。

[来源:IEC 60825-1:2014, 3.14]

3.5

高功率激光制造设备 high power laser manufacturing equipment

预期用于工业制造以及预期不用于工业制造,但可能会被用户在合理条件下用于制造的 3B 类或 4 类激光产品(含嵌入 3B 类或 4 类激光光源的制造设备)。

3.6

激光安全员 laser safety officer; LSO

具备评估激光辐射危害和控制措施知识,并负责监督所辖区域内光辐射安全的人员。

[来源:IEC 60825-1:2014, 3.50]

3.7

激光安全运行程序 laser safety operational procedures; LSOP

激光安全员在所辖区域内,负责高功率激光制造设备安全使用的全流程管理程序。

3.8

最大允许照射量 maximum permissible exposure; MPE

正常情况下人体受到激光照射不会产生不良后果的激光辐射水平。

[来源:GB 7247.1—2012, 3.56, 有修改]

3.9

标称眼危害距离 nominal ocular hazard distance; NOHD

光束辐照度或辐照量等于角膜相应最大允许照射量(MPE)的距离。

如果 NOHD 包括通过光学辅助器观看激光束的可能性,则定义为“扩展 NOHD(ENOH D)”。

[来源:GB 7247.1—2012, 3.62]

3.10

标称眼危害区域 **nominal ocular hazard area; NOHA**

光束辐照度或辐照量超过角膜相应最大允许照射量(MPE)的区域,其中包括可能出现的激光束意外指错方向的情况。

如果 NOHA 包括通过光学辅助器观看激光束的可能性,则定义为“扩展 NOHA”。

[来源:GB 7247.1—2012, 3.61]

3.11

透射(光)密度 **transmittance (optical) density; OD**

透射比的倒数取以 10 为底的对数,以式(2)计算:

$$OD = \log_{10} \tau(\lambda) \quad \dots\dots\dots (2)$$

3.12

高斯光束耦合参数 **gaussian beam coupling parameter**

η

在给定测量位置使用孔径光阑或限制孔径确定的辐射能量与总辐射能量的比值,以式(3)计算:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{D_i^2}{D_L^2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

D_i ——孔径光阑或限制孔径的直径,单位为厘米(cm);

D_L ——给定测量距离 L 处的光束直径,单位为厘米(cm)。

注 1: 不论光束的总能量多大,仅考虑通过给定测量距离处孔径光阑或限制孔径内的能量。

注 2: 公式中 D_L 值是给定测量距离 L 处可达激光辐射总能量中心能量的 63%(相当于 $1/e$)的光束直径。

[来源:GB/T 7247.13—2013, 7.8.8]

4 总则

良好、完整的高功率激光制造设备安全运行程序,完善的设备信息记录、正确的危害评估、有效的控制措施、全面的文件留存,以及合适的教育和培训,对于高功率激光制造设备的使用是至关重要的。

高功率激光制造设备安全运行程序宜覆盖设备全生命周期,且宜有专人负责执行和维护,确保程序得到妥善的执行,并根据实践得到反馈和改进。

5 需考虑的因素

5.1 设备文件留存

宜留存备案的设备文件包括但不限于:

- a) 高功率激光制造设备制造商的明细信息,包括但不限于制造商名称、地址、联系电话等;
- b) 激光加工机床制造商的明细信息;
- c) 使用说明书或用户手册;
- d) 购买文件;
- e) 年中检查、年度检查、随访检查记录;
- f) 培训记录;
- g) 医疗检查记录;
- h) 事故处理记录。

5.2 环境安全检查

高功率激光制造设备环境安全检查宜包括但不限于:

- a) 温度；
- b) 湿度；
- c) 环境整洁度,环境内的其他气化物、灰尘或其他气体；
- d) 环境内的电磁或其他无线电频率；
- e) 动力源；
- f) 高功率激光制造设备准入范围及授权人员；
- g) 人员站立或坐着操作时传输光路不与人眼水平；
- h) 工作场所窗户挂有窗帘或者窗户由滤光材料制成；
- i) 设备周围镜面或者镜面反射物体。

5.3 设备基本信息记录

高功率激光制造设备基本信息宜包括安全类别(3B类或4类)、泵浦源、工作方式、光束波长、最大输出能量(或功率)、光束模式、光束直径、光束发散角等信息。附录A中表A.1~表A.3给出了帮助记录基本信息的建议。

5.4 危害评估

5.4.1 激光辐射危害评估

5.4.1.1 激光辐射危害评估通则

在激光辐射危害评估时,考虑建立危害评估流程。附录A给出了帮助记录评估激光辐射危害评估及防护的建议。附录B给出了激光辐射危害评估适用参数的计算示例。一般情况下,在依据GB 7247.1—2012和GB/T 7247.5—2017相应条款对高功率激光制造设备进行正确分类、验证的基础上,选择适用的激光辐射危害参数进行进一步评估,帮助建立准入制度或采取合适的防护措施。激光辐射危害参数宜包括但不限于:

- a) 可达发射；
- b) 最大允许照射量；
- c) 眼标称危害距离或眼标称危害区域；
- d) 透射光密度。

5.4.1.2 可达发射的计算建议

可达发射(AE)的计算是为了通过与可达发射极限(AEL)对比,以确定激光产品的安全类别。建议通过给定的测量距离、计算在测量距离 L 处的光束直径 D_L 、计算 η 系数来确定可达发射。

D_L 以式(4)计算:

$$D_L = \sqrt{D_0^2 + L^2 \varphi^2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

- D_0 ——光束束腰直径,单位为厘米(cm);
- L ——给定的测量距离,单位为厘米(cm);
- φ ——光束发散角,单位为弧度(rad)。

在测量距离 L 处,AE以式(5)计算:

$$AE = \eta \times Q \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中:

- Q ——总辐射能量(或功率),单位为焦(J)或瓦(W)。

5.4.1.3 最大允许照射量的计算建议

MPE的计算是为了确定人眼受到激光照射的安全极限值。建议通过确定激光波长、根据表1选择

最大可预期照射持续时间,再根据表 2~表 5 确定 MPE。

表 1 计算最大允许照射量(MPE)时建议的最大可预期照射持续时间(连续和脉冲^a)

波长范围 nm	漫反射观察 s	束内观察 s
180~<400	30 000	100 ^b
400~<700	600	0.25 ^b
700~<1 400	600	10
1 400~10 ⁶	10	10

^a 单脉冲激光(PRF<1 Hz)使用实际脉冲持续时间。
^b 仅适用于意外照射情况。对于其他情况,采用有意照射的时间基准。

表 2 点光源激光辐射眼部最大允许照射量(MPE)(180 nm~700 nm)

光谱	波长(λ) nm	照射持续时间(t) s	最大允许照射量(MPE)(热效应)	
			J/cm ²	W/cm ²
紫外光	180~<302.5	10 ⁻⁹ ~<10	0.56t ^{0.25}	—
		10~3×10 ⁴	—	—
	302.5~<315	10 ⁻⁹ ~<10	0.56t ^{0.25}	—
		10~3×10 ⁴	—	—
	315~<400	10 ⁻⁹ ~<10	0.56t ^{0.25}	—
		10~3×10 ⁴	—	—
可见光	400~<450	10 ⁻¹³ ~<10 ⁻¹¹	1.0×10 ⁻⁷	—
		10 ⁻¹¹ ~<5×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁻⁷	—
		5×10 ⁻⁶ ~<10	1.8t ^{0.75} ×10 ⁻³	—
		10~<100	1.0×10 ⁻²	—
		100~3×10 ⁴	—	C _B ×10 ⁻⁴
	450~<500	10 ⁻¹³ ~<10 ⁻¹¹	1.0×10 ⁻⁷	—
		10 ⁻¹¹ ~<5×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁻⁷	—
		5×10 ⁻⁶ ~<10	1.8t ^{0.75} ×10 ⁻³	—
		10~<T ₁	—	1.0×10 ⁻³
		T ₁ ~<100	C _B ×10 ⁻²	—
		100~3×10 ⁴	—	C _B ×10 ⁻⁴
	500~<700	10 ⁻¹³ ~<10 ⁻¹¹	1.0×10 ⁻⁷	—
		10 ⁻¹¹ ~<5×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁻⁷	—
		5×10 ⁻⁶ ~<10	1.8t ^{0.75} ×10 ⁻³	—
		10~3×10 ⁴	—	1.0×10 ⁻³

表 3 点光源激光辐射眼部最大允许照射量(MPE)(700 nm~1 400 nm)

光谱	波长(λ) nm	照射持续时间(t) s	最大允许照射量(MPE)(热效应)			
			视网膜		角膜	
			J/cm ²	W/cm ²	J/cm ²	W/cm ²
近 红 外 光	700~<1 050	$10^{-13} \sim <10^{-11}$	1.0×10^{-7}	—	—	—
		$10^{-11} \sim <5 \times 10^{-6}$	$2.0C_A \times 10^{-7}$	—	—	—
		$5 \times 10^{-6} \sim <10$	$1.8C_A t^{0.75} \times 10^{-3}$	—	—	—
		$10 \sim 3 \times 10^4$	—	$C_A \times 10^{-3}$	—	—
	1 050~<1 200	$10^{-13} \sim <10^{-11}$	$1.0C_C \times 10^{-7}$	—	—	—
		$10^{-11} \sim <13 \times 10^{-6}$	$2.0C_C \times 10^{-6}$	—	—	—
		$13 \times 10^{-6} \sim <10$	$9.0C_C t^{0.75} \times 10^{-3}$	—	—	—
		$10 \sim 3 \times 10^4$	—	$5.0C_C \times 10^{-3}$	—	—
	1 200~<1 400	$10^{-13} \sim <10^{-11}$	$1.0C_C \times 10^{-7}$	—	—	—
		$10^{-11} \sim <13 \times 10^{-6}$	$2.0C_C \times 10^{-6}$	—	$0.3 \times K_A$	—
		$13 \times 10^{-6} \sim <10^{-3}$	—	—		—
		$10^{-3} \sim <4$	$9.0C_C t^{0.75} \times 10^{-3}$	—	$0.3 \times K_A + 0.56t^{0.25} - 0.1$	—
$4 \sim <10$		—		$0.3 \times K_A + 0.7$	—	
$10 \sim 3 \times 10^4$		—	$5.0C_C \times 10^{-3}$	—	$0.3 \times K_A + 0.07$	

表 4 点光源激光辐射眼部最大允许照射量(MPE)(1 400 nm~1 000 μ m)

光谱	波长(λ) nm	照射持续时间(t) s	最大允许照射量(MPE)(热效应)	
			J/cm ²	W/cm ²
远 红 外 光	1 400~<1 500	$10^{-9} \sim <10^{-3}$	0.3	—
		$10^{-3} \sim <4$	$0.56t^{0.25} + 0.2$	—
		$4 \sim <10$	1.0	—
		$10 \sim 3 \times 10^4$	—	0.1
	1 500~<1 800	$10^{-9} \sim <10$	1.0	—
		$10 \sim 3 \times 10^4$	—	0.1
	1 800~<2 600	$10^{-9} \sim <10^{-3}$	0.1	—
		$10^{-3} \sim <10$	$0.56t^{0.25}$	—
		$10 \sim 3 \times 10^4$	—	0.1
	2 600~ 10^6	$10^{-9} \sim <10^{-7}$	1.0×10^{-2}	—
		$10^{-7} \sim <10$	$0.56t^{0.25}$	—
		$10 \sim 3 \times 10^4$	—	0.1

表 5 修正系数(400 nm~1 400 nm)

修正系数		波长 λ nm
C _A	1.0	400~<700
	$10^{0.002(\lambda - 700)}$	700~<1 050
	5.0	1 050~<1 400
C _B	1.0	400~<450
	$10^{0.02(\lambda - 450)}$	450~<600
C _C	1.0	1 050~<1 150
	$10^{0.018(\lambda - 1 150)}$	1 150~<1 200
	$8 + 10^{0.04(\lambda - 1 250)}$	1 200~<1 400
T ₁	$10 \times 10^{0.02(\lambda - 450)}$	450~<500
K _λ	$10^{0.01(1 400 - \lambda)}$	1 200~1 400

注 1:计算时波长的单位为 nm。
注 2:波长为 450 nm 时, T₁ = 10 s, 波长为 500 nm 时, T₁ = 100 s。

5.4.1.4 标称眼危害距离的计算建议

NOHD 的计算是为了确定准入限值。主要考虑束内观察(图 1)、通过透镜观察(图 2)、通过透镜和镜面反射观察(图 3)以及漫反射观察(图 4)四种情况。

a) 束内观察

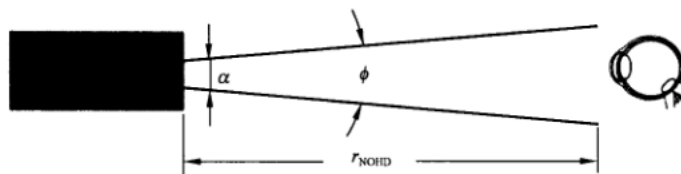


图 1 束内观察 NOHD 示意图

束内观察时的 NOHD 以式(6)计算:

$$r_{\text{NOHD}} = \frac{1}{\varphi} \left[\left(\frac{4\Phi}{\pi \text{MPE}} \right) - a^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(6)$$

式中:

- φ —— 光束发散角,单位为弧度(rad);
- Φ —— 辐射通量(辐射功率),单位为瓦(W);
- a —— 激光器出光口的光束直径,单位为厘米(cm)。

b) 通过透镜观察

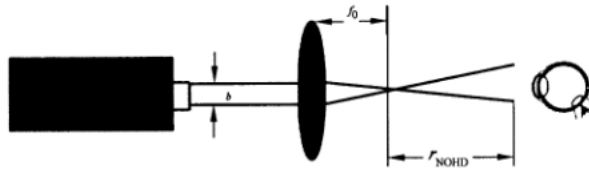


图2 通过透镜观察 NOHD 示意图

通过透镜聚焦观察时的 NOHD 以式(7)计算:

$$r_{NOHD} = \frac{f_0}{b_0} \left(\frac{4\Phi}{\pi MPE} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(7)$$

式中:

- f_0 ——聚焦镜的焦距,单位为厘米(cm);
- Φ ——辐射通量(辐射功率),单位为瓦(W);
- b_0 ——聚焦光束束腰直径,单位为厘米(cm)。

c) 通过透镜聚焦和镜面反射观察

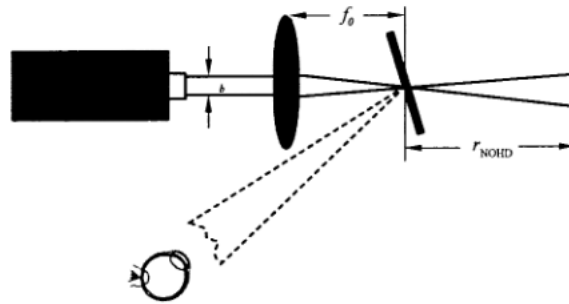


图3 通过透镜和镜面反射观察 NOHD 示意图

通过透镜和镜面反射观察时的 NOHD 以式(8)计算:

$$r_{NOHD} = \frac{f_0}{b_0} \left(\frac{4\Phi\rho}{\pi MPE} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(8)$$

式中:

- f_0 ——聚焦镜的焦距,单位为厘米(cm);
- Φ ——辐射通量(辐射功率),单位为瓦(W);
- b_0 ——聚焦光束束腰直径,单位为厘米(cm);
- ρ ——反射率。

d) 漫反射观察

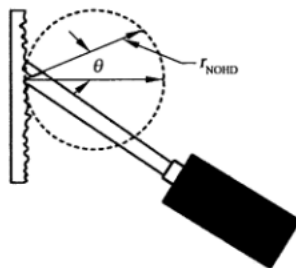


图4 漫反射观察 HOHA 示意图

因光束向各个方向散射,漫反射观察时的 NOHA 以式(9)计算:

$$r_{\text{NOHA}} = \left(\frac{\rho \Phi \cos \theta}{\pi \text{MPE}} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

- ρ —— 反射率；
- Φ —— 辐射通量(辐射功率)，单位为瓦(W)；
- θ —— 方位角，单位为弧度(rad)。

5.4.2 非光辐射危害评估

非光辐射危害指高功率激光制造设备运行而产生的不包括眼睛或皮肤直接暴露在激光束辐照下的其他危害，包括物理、化学、生物制剂、有毒或放射性材料；激光与物质相互作用发生着火或产生空气污染物等；用于产生激光的材料(例如，快速流动的气体、液体染料或溶剂)；或人员接触系统部件时发生触电等。

非光辐射危害评估宜包括但不限于：

- a) 火灾；
- b) 触电；
- c) 爆炸；
- d) 有毒有害化学品；
- e) 高功率激光制造设备运行时产生的空气悬浮物、强光、热辐射及光致等离子体；
- f) 高功率激光制造设备高压供电设备进行维护或维修时，考虑建立遵循标准的上锁和挂牌流程；
- g) 设备噪声低于 85 dB，如等于或高于 86 dB 宜考虑降噪防护措施；
- h) 冷却系统无泄漏、滴液或高压；
- i) 机械臂等光束传输系统快速移动时可能产生的机械伤害；
- j) 由于工作环境中障碍物、照明、温度、湿度等因素，造成的激光设备对人员的伤害。

表 A.5 给出了帮助记录非光辐射危害信息的建议。

5.5 标识标记

除 GB 7247.1—2012 规定的激光产品安全标记、警告标记和窗口标记，宜增加设备责任人的姓名和联系方式、可视警示灯和可闻警示、准入标记等信息。表 A.6 给出了帮助记录标识标记信息的建议。

5.6 控制措施

5.6.1 工程控制

除 GB/T 7247.5—2017 第 9 章规定的内容外，宜增加人员站立或坐着操作时光路不与人眼水平、光路上是否有反射材料、加工区域是否有防护罩、工作场所窗户挂有窗帘或者窗户由滤光材料制成等信息。表 A.7 给出了帮助记录工程控制信息的建议。

5.6.2 个人防护

个人防护控制措施主要考虑护目镜的选择。必要时，个人防护宜考虑防护服、防护手套等。护目镜尽可能选择透射(光)密度 OD 值大于适用波长激光衰减至 MPE 以下时需要的 OD 值。OD 值宜与人眼可接触的激光辐射波长相适应，其依据的 MPE 值的限制孔径宜参考表 6。

表6 计算透射光密度(OD)的限制孔径

波长(λ) nm	照射持续时间(t) s	限制孔径 mm	
		视网膜	角膜
180~<400	$10^{-9} \sim <0.3$	—	1.0
	$0.3 \sim <10$	—	$1.5t^{0.375}$
	$10 \sim 3 \times 10^4$	—	3.5
400~<1 200	$10^{-13} \sim 3 \times 10^4$	7.0	—
1 200~<1 400	$10^{-13} \sim <0.3$	7.0	1.0
	$0.3 \sim <10$	7.0	$1.5t^{0.375}$
	$10 \sim 3 \times 10^4$	7.0	3.5
1 400~< 10^5	$10^{-9} \sim <0.3$	—	1.0
	$0.3 \sim <10$	—	$1.5t^{0.375}$
	$10 \sim 3 \times 10^4$	—	3.5
$10^5 \sim 10^6$	$10^{-9} \sim 3 \times 10^4$	—	11.0

5.6.3 管理(行政)防护

管理(行政)防护宜同时建立自上而下和自下而上的流程,包括激光安全管理委员会制定高功率激光制造设备安全运行的战略、监管风险,规划培训和认证;还包括激光安全员对安全运行程序的积极建议和有效反馈。行政防护宜包括准入制度、安全教育和培训。

6 激光安全员

6.1 概述

激光安全员可以专职也可以兼职。激光安全员的职责是执行并维护激光安全运行程序,对所辖区域内高功率激光制造设备的危害进行评估和控制。检查控制措施,并有权在一定情况下采取强制性控制措施。监督受控区域内全体人员的光辐射安全,确保各项规程符合激光安全运行程序的要求。负责相关文件保存备案。激光安全员宜参加培训并考核合格。

6.2 宜掌握的知识和技能

激光安全员宜掌握的知识和技能包括但不限于:

- 激光产生的基本原理及光束特性;
- 激光辐射损伤机理;
- 激光辐射对眼睛和皮肤的损伤;
- 激光产品的安全分类;
- 激光辐射危害参数的计算(或确保获得有效数据);
- 激光产品的防护措施;
- 非光辐射危害;
- 激光安全事故应急处置;

- i) 国际国内标准化组织；
- j) 熟悉国际、国内相关的标准。

7 激光安全管理委员会

7.1 概述

组建激光安全委员会的目的是加强组织的激光安全管理,决策包括监管风险、法律风险、管理、涉及员工的工作计划、沟通、培训和认证,以及其他影响激光安全的事务。激光安全委员会宜根据组织发展战略,维护并提高激光安全运行程序水平,考虑通过定期召开会议等方式保障激光安全运行程序的维护和改善。

7.2 激光安全委员会的成员

激光安全委员会的成员宜由组织的决策成员、决策执行人员和监督执行人员组成,包括但不限于:

- a) 行政管理核心成员；
- b) 安全专员；
- c) 激光安全员；
- d) 设备维护工程师；
- e) 售后人员。

7.3 激光安全委员会的职责

激光安全委员会的基本职责是进行决策、监督和应急事件处理。职责内容宜包括但不限于:

- a) 建立制定激光安全策略和指导方针,宜将激光安全作为优先事项；
- b) 审查内部控制制度或程序,确保其符合适用法律法规；
- c) 审查激光安全事务,明确责任与权力；
- d) 检查激光安全运行程序的实施；
- e) 考虑建立纠错制度；
- f) 为激光安全员提供支持；
- g) 应急事件处理；
- h) 审查和维护激光安全相关文件；
- i) 制定教育和培训计划。

8 激光安全培训

8.1 概述

一般情况下,激光安全培训有初级培训、中级培训和高级培训三种类型。培训宜有考核。

8.2 初级培训

初级培训的目的是确保相关人员具备必要的激光安全意识和基础能力。初级培训内容宜包括但不限于:

- a) 激光原理基础知识；
- b) 激光辐射对眼睛和皮肤的损伤；
- c) 激光产品的安全分类、警告标记和说明标记；
- d) 非光辐射危害；
- e) 工程/行政/个人防护措施。

8.3 中级培训

中级培训的目的是确保相关人员在了解激光辐射与生物组织相互作用机理的基础上,熟悉激光辐射危害评估的基本参数,能够判断激光产品的辐射水平并对可能产生的危害尽到注意责任。中级培训内容在初级培训的基础上,宜包括但不限于:

- a) 激光辐射与生物组织相互作用的机理;
- b) 国际国内激光安全标准和规则;
- c) 了解激光辐射危害参数;
- d) 激光防护境;
- e) 激光安全事故教训。

8.4 高级培训

高级培训的目的是确保相关人员掌握激光辐射危害参数的计算,能够执行、监督和维护激光安全运行程序,处理激光安全事故。高级培训内容在初级培训和中级培训的基础上,宜包括但不限于:

- a) 计算激光辐射危害参数;
- b) 了解激光安全运行程序和要求;
- c) 监督、维护、改进激光安全运行程序;
- d) 应急事故处理;
- e) 实践操作。

附 录 A
(资料性)
附 表

表 A.1~表 A.7 列出了第 5 章激光安全运行程序需考虑的要素进行记录的建议。

表 A.1 高功率激光制造设备基本数据信息

高功率激光 制造设备类型 自动/手动	激光加工 机床 制造商	制造商 联系方式	高功率激光制造 设备安全类别 (3B类或4类)	连续或脉冲 高功率激光 制造设备	波 长	泵浦 源	最大输出 能量/功率	S/N	使用 目的

表 A.2 高功率激光制造设备基本数据记录表(连续)

波长	光束 模式	光束发 散角	光束 直径	孔径 光阑	光纤 直径	光纤数 值孔径	聚焦镜 焦距	光束达到聚焦镜 时的光束直径	备注

表 A.3 高功率激光制造设备基本数据记录表(脉冲)

波长	脉冲宽度	脉冲能量	峰值功率	平均功率	重复频率	备注

表 A.4 高功率激光制造设备危害评估参数

序号	内容	是	否	描述
1	标称眼危害距离(区域)NOHD(NOHA)_____			
2	最大允许照射量(MPE)_____			
3	光束直接照射距离_____ (m)			
4	聚焦镜 1 焦距____ (m) 聚焦镜 2 焦距____ (m) 聚焦镜 3 焦距____ (m)			
5	散射光照射距离_____ (m)			
6	透射光密度(OD)			

表 A.5 非光辐射危害检查清单

序号	内容	是	否	描述
1	光与物质相互作用产生的空气悬浮物、强光和热辐射			
2	火灾			

表 A.5 非光辐射危害检查清单(续)

序号	内容	是	否	描述
3	触电			
4	爆炸			
5	有毒有害化学品危害隐患			
6	工作环境噪声			
7	机械臂等光束传输系统快速移动时可能产生的机械伤害			
8	由于工作环境中障碍物、照明、温度、湿度等因素,造成的激光设备对人员的伤害			

表 A.6 高功率激光制造设备标识标记检查清单

序号	内容	是	否	描述
1	安装激光制造设备场所入口贴有设备责任人的姓名和联系方式			
2	安装激光制造设备场所入口贴有高功率激光制造设备安全等级标记			
3	“LASER IN USE”的可视警示灯和可闻警示已经与高功率激光制造设备正常连接			
4	防护罩上贴有危险标记以警告移除防护罩后会受到超过人眼最大允许照射量(MPE)的激光辐射的照射			
5	窗口贴有说明性标记			
6	挡板贴有说明性标记			
7	激光联锁装置正常			
8	实验室安全措施到位			
9	实验室准入钥匙仅给予已授权人员			

表 A.7 高功率激光制造设备工程控制措施检查清单

序号	内容	是	否	描述
1	贴有激光安全标志			
2	光学系统已经防护漂移辐射和漫散射光			
3	人员站立或坐着操作时光路都不与人眼水平			
4	光路闭合			
5	激光防护罩在正确位置			
6	限制孔径在正确位置			
7	光束阻挡器在正确位置			
8	可以远程观察光束			
9	光纤光学元件正常			

表 A.7 高功率激光制造设备工程控制措施检查清单(续)

序号	内容	是	否	描述
10	光路上没有镜面反射材料			
11	室内窗户挂有窗帘或者窗户由滤光材料制成			
12	高功率激光制造设备工作不产生 4 类伴随激光辐射			
13	机床安全措施到位			
14	观察窗口滤光材料制造商 _____ 材料 _____ 透射光密度(OD)			

附录 B
(资料性)
计算方法举例

B.1 激光产品安全分类计算举例

将一个输出功率为 50 mW, 光束直径为 3 mm, 光束发散角为 1 mrad 的 CW HeNe 激光器($\lambda = 633 \text{ nm}$)分类。

步骤一: 整理已知条件。

$\Phi = 50 \text{ mW}$, $D_0 = 3 \text{ mm}$, $\varphi = 1 \text{ mrad}$, $\lambda = 633 \text{ nm}$ 。

步骤二: 根据激光产品的参数确定类别。

可确定为 3R 类或 3B 类激光产品, 如不能判定, 可选择 1 类、2 类、3R 类和 3B 类分别进行计算比较。

步骤三: 按照表 B.1, 根据预选的类别和波长选定时间基准。

表 B.1 时间基准的确定

激光产品的类别	1 类	2 类	3R 类	3B 类
时间基准	100 s	0.25 s	0.25 s	100 s

步骤四: 根据波长和时间基准在 3 种测量条件下(按照 GB 7247.1—2012 表 11 确定的测量条件), 按照表 B.2 确定相应类别的可达发射极限(AEL)。

表 B.2 各类激光产品的可达发射极限(AEL)

激光产品的类别	1 类	2 类	3R 类	3B 类
可达发射极限值 AEL	$3.9 \times 10^{-4} \text{ W}$ 0.39 mW	$C_6 \times 10^{-3} \text{ W} = 10^{-3} \text{ W} = 1 \text{ mW}$ $C_6 = 1$	$5 \times 10^{-3} \text{ W}$ = 5 mW	0.5 W

步骤五: 计算可达发射水平。

条件 1: 孔径光阑 $D_i = 50 \text{ mm}$, 距离 $L = 2\ 000 \text{ mm}$

$$D_L = \sqrt{D_0^2 + L^2 \varphi^2} = \sqrt{3^2 + (2\ 000)^2 \times (10^{-3})^2} = 3.61 \text{ mm}$$

$$\eta = 1 - e^{-\frac{D_i^2}{D_L^2}} = 1 - e^{-\left(\frac{50}{3.61}\right)^2} \approx 1$$

所以条件 1 下可达发射 AE 为 $50 \text{ mW} \times 1 = 50 \text{ mW}$ 。

条件 2: 孔径光阑 $D_i = 7 \text{ mm}$, 距离 $L = 70 \text{ mm}$

$$D_L = \sqrt{D_0^2 + L^2 \varphi^2} = \sqrt{3^2 + (70)^2 \times (10^{-3})^2} = 3 \text{ mm}$$

$$\eta = 1 - e^{-\frac{D_i^2}{D_L^2}} = 1 - e^{-\left(\frac{7}{3}\right)^2} = 0.996$$

所以条件 2 下可达发射 AE 为 $50 \text{ mW} \times 0.996 = 49.8 \text{ mW}$ 。

条件 3: 孔径光阑 $D_i = 7 \text{ mm}$, 距离 $L = 100 \text{ mm}$

$$D_L = \sqrt{D_0^2 + L^2 \varphi^2} = \sqrt{3^2 + (100)^2 \times (10^{-3})^2} = 3 \text{ mm}$$

$$\eta = 1 - e^{-\frac{D_i^2}{D_L^2}} = 1 - e^{-\left(\frac{7}{3}\right)^2} = 0.996$$

所以条件 3 下可达发射 AE 为 $50 \text{ mW} \times 0.996 = 49.8 \text{ mW}$ 。

步骤六:确定激光产品的类别。

将可达发射与表 B.2 相应类别的可达发射极限进行比较,确定该激光产品为 3B 类激光产品。

B.2 MPE 计算举例

计算红光激光笔的眼部最大允许照射量(MPE)。

步骤一:确定波长:630 nm~670 nm。

步骤二:选择最大可预期照射持续时间(表 1):0.25 s。

步骤三:计算最大允许照射量(MPE)(表 2)。

$$\begin{aligned} \text{MPE} &= 1.8 t^{0.75} \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2 \\ \text{MPE(能量密度)} &= 0.636 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2 \\ \text{MPE(功率密度)} &= [0.636 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2] / [0.25 \text{ s}] = 2.55 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \end{aligned}$$

B.3 NOHD 计算举例

计算输出功率为 2 000 W,光束直径为 10 mm,光束发散角为 4 mrad 的连续波 CO₂激光器眼标称危害距离(激光器出光口光束直径为 10 mm)。

方式一:束内观察的标称眼危害距离(NOHD)

根据公式(6),得到:

$$r_{\text{NOHD}} = \frac{1}{0.004} \left[\left(\frac{4 \times 2\,000}{3.14 \times 0.1} \right) - 1.0^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 39\,900 \text{ cm} = 399 \text{ m}$$

方式二:通过透镜聚焦观察的标称眼危害距离(NOHD)(透镜焦距为 127 mm,光束到达透镜时的光束直径为 31 mm)

根据公式(7),得到:

$$r_{\text{NOHD}} = \frac{127}{31} \left(\frac{4 \times 2\,000}{3.14 \times 0.1} \right)^{\frac{1}{2}} = 654 \text{ cm} = 6.54 \text{ m}$$

方式三:通过透镜聚焦镜面反射观察的标称眼危害距离(NOHD)(反射率为 20%)

根据公式(8),得到:

$$r_{\text{NOHD}} = \frac{127}{31} \left(\frac{4 \times 2\,000 \times 0.2}{3.14 \times 0.1} \right)^{\frac{1}{2}} = 292 \text{ cm} = 2.92 \text{ m}$$

B.4 OD 计算举例

计算功率为 45 W 光束直径为 2 mm 连续 Nd:YAG 激光的眼部透射光密度(OD)值。

步骤一:计算透射比的倒数 τ

$$\begin{aligned} E_{\text{incident-avg}} &= \frac{\Phi_{\text{incident}}}{\text{Area}} = \frac{45}{0.385} = 117 \text{ W/cm}^2 \\ \tau &= \frac{E_{\text{incident-avg}}}{E_{\text{transmitted}}} = \frac{E_{\text{incident-avg}}}{\text{MPE}} = \frac{117}{0.005} = 23\,400 \end{aligned}$$

步骤二:计算透射光密度(OD)值

$$\text{OD} = \log_{10} \tau = \log_{10} (23\,400) = 4.37$$

参 考 文 献

- [1] GB/T 7247.5 激光产品的安全 第5部分:生产者关于 GB 7247.1 的检查清单 [IEC TR60825-5, MOD)
 - [2] GB/T 7247.14 激光产品的安全 第14部分:用户指南 [IEC TR 60825-14, IDT)
 - [3] GB/T 18490.1—2017 机械安全 激光加工机 第1部分:通用安全要求
 - [4] ISO 11146-1 Lasers and Laser-related Equipment—Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation Ratios—Part 1: Stigmatic and Simple Astigmatic Beams
 - [5] IEC TR 60825-13:2011 Safety of Laser Products—Part 13: Measurements for Classification of Laser Products
 - [6] ANSI Z136-1:2014 American National Standard for Safe Use of Lasers
 - [7] ANSI Z136-3:2018 American National Standard for Safe Use of Lasers in Health Care
 - [8] ANSI Z136-5:2020 American National Standard for Safe Use of Lasers in Educational Institutions
 - [9] ANSI Z136-6:2015 American National Standard for Safe Use of Lasers Outdoors
 - [10] ANSI Z136-7:2020 American National Standard for Testing and Labeling of Laser Protective Equipment
 - [11] ANSI Z136-9:2013 American National Standard for Safe Use of Lasers in Manufacturing Environments
-