

团体标准

编号:

钢结构焊接构件激光-电弧 复合焊接技术规程

×× —××—××发布

×× —××—××实施

发布

前 言

本文件参照 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。

本文件起草单位：武汉予成激光智造有限公司、北京六建集团有限责任公司、武汉锐科光纤激光技术股份有限公司、中建科工智能科技（深圳）有限公司、武汉一冶钢结构有限责任公司、中建三局钢构科技有限公司、东方诚建设集团有限公司、湖北精工钢结构有限公司、海波重型工程科技股份有限公司、长葛市鑫宽发展科技有限公司、创宇恒（武汉）建设有限公司、上海昕德承船舶贸易有限公司、海德盟数控技术（深圳）有限公司、武汉城市职业学院机电工程学院、武汉船舶职业技术学院、中冶南方武汉建筑设计有限公司、湖北省焊接协会、湖北省钢结构学会、上海钢管行业协会、湖北省钢结构协会。

本文件起草人：邹郁京、于红、闫大鹏、姜来合格、刘浩、赵金刚、莫芝林、姚建忠、多跃刚、张发荣、宋雄文、王小锋、熊鹏、龙鸣、陈锦铭、陈淑花、孙淑侠、张四海、蔡文婷、李涛、彭吉、刘正浩。

本文件为首次发布。

钢结构焊接构件激光-电弧 复合焊接技术规程

1 范围

本文件规定了钢结构焊接构件激光-电弧复合焊接的术语定义、一般要求、工艺要求和焊接质量要求等内容。

本文件适用于建筑钢结构、桥梁钢结构、船舶及海洋工程钢结构、设备钢结构等构件的焊接，构件类型包括 H 型构件、箱型构件等。

评定其他材料激光电弧复合焊接工艺及质量要求时也可参照本文件的有关要求。

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/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法

GB/T 712 船舶及海洋工程用结构钢

GB/T 714 桥梁用结构钢

GB/T 985.1 气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口

GB/T 2650 金属材料焊缝破坏性试验 冲击试验

GB/T 2651 金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验

GB/T 2653 焊接接头弯曲试验方法

GB/T 2654 焊接接头硬度试验方法

GB/T 3075 金属材料 疲劳试验 轴向应力控制方法

GB/T 3323.1 焊缝无损检测 射线检测 第 1 部分：X 和伽玛射线的胶片技术

GB/T 3375 焊接术语

GB/T 4171 耐候结构钢

GB/T 5185 焊接及相关工艺方法代号

GB/T 5313 厚度方向性能钢板

GB 7247.1 激光产品的安全 第1部分：设备分类、要求
GB/T 8110 熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝
GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证
GB 9448 焊接与切割安全
GB/T 10045 非合金钢及细晶粒钢药芯焊丝
GB/T 11345 焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定
GB/T 15313 激光术语
GB/T 15579.1 弧焊设备 第1部分：焊接电源
GB/T 15822.1 无损检测 磁粉检测 第1部分：总则
GB/T 18851.1 无损检测 渗透检测 第1部分：总则
GB/T 19879 建筑结构用钢板
GB/T 29713 不锈钢焊丝和焊带
GB 30863 个体防护装备 眼面部防护 激光防护镜
GB/T 32259 焊缝无损检测 熔焊接头目视检测
GB/T 32563 无损检测 超声检测 相控阵超声检测方法
GB/T 37893 激光-电弧复合焊接推荐工艺方法
GB/T 39281 气体保护电弧焊用高强钢实心焊丝
GB/T 42899 海洋工程结构钢可焊性试验方法
GB/T 45001 职业健康安全管理体系 要求及使用指南
GB50661 钢结构焊接规范

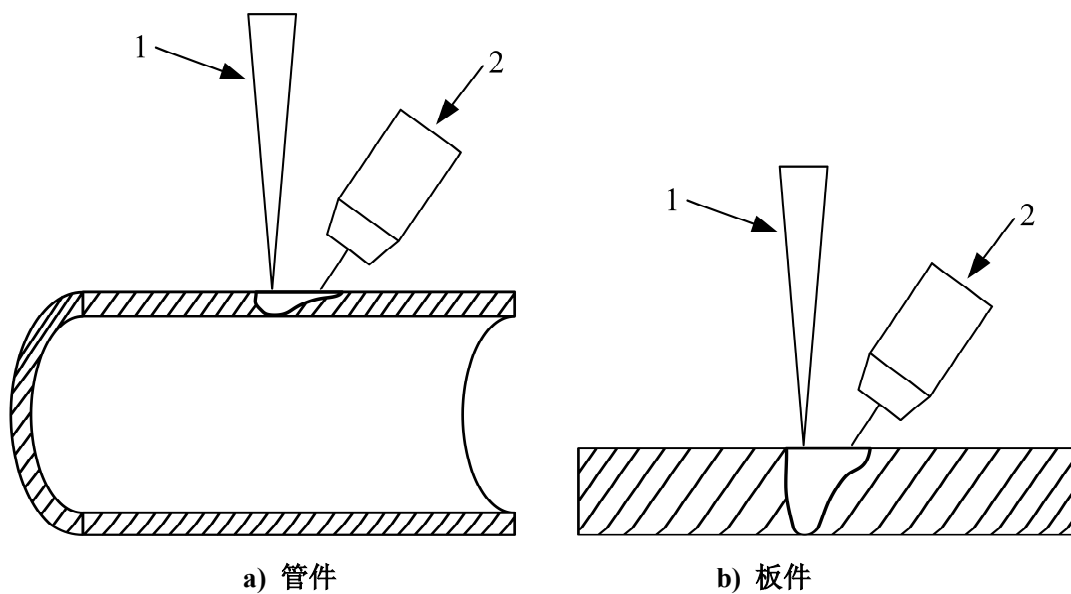
3 术语与定义

GB/T 3375、GB/T 5185、GB/T 15313、GB/T 19866、GB/T 19867.6、GB/T 37893 确立的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

激光-电弧复合焊接 laser-arc hybrid welding

采用激光束和电弧两种热源形成同一个熔池进行焊接的工艺方法，参见图 1。



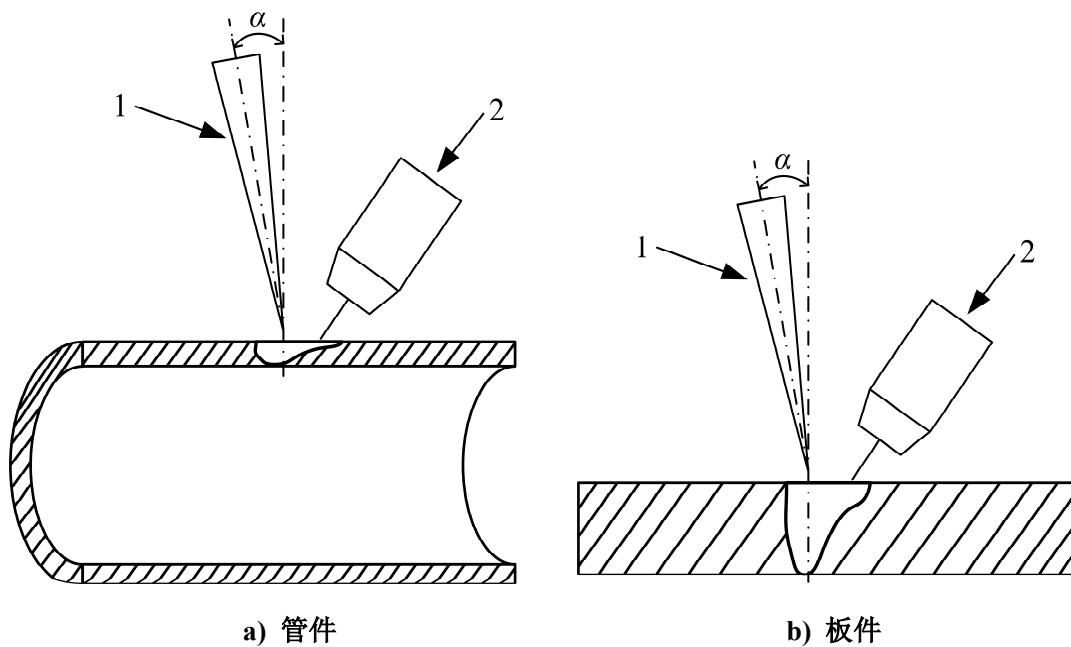
说明：1—激光束；2—电弧焊枪

图 1 激光-电弧复合焊接示意图

3.2

激光束倾角 inclination angle of the laser beam

激光束沿垂直轴线的倾斜角度 α ，参见图 2。



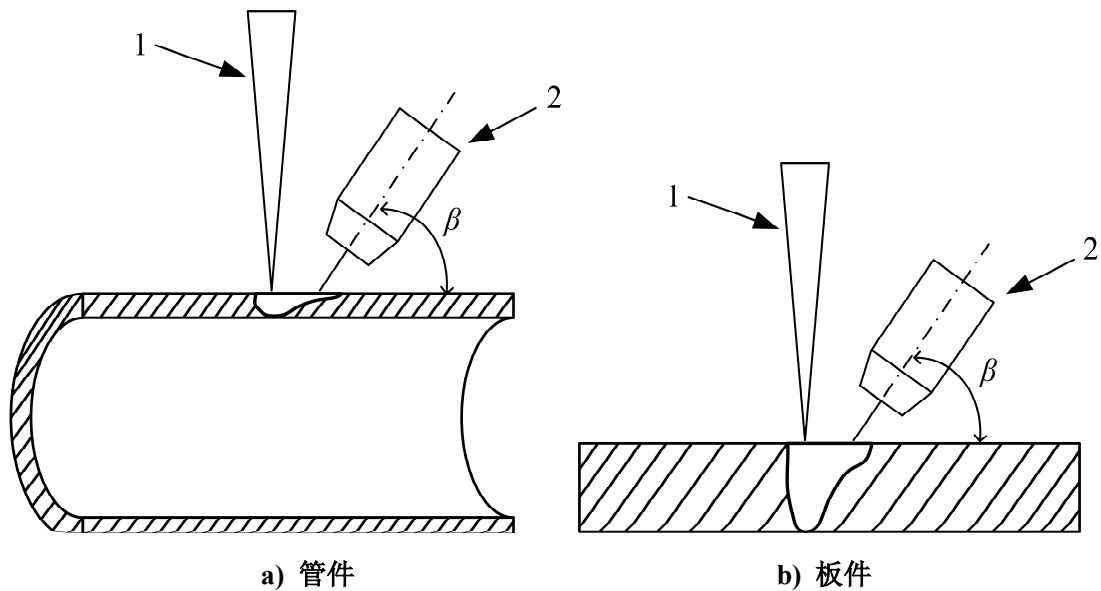
说明：1—激光束；2—电弧焊枪； α —激光束倾角

图 2 激光束倾角示意图

3.3

电弧倾角 inclination angle of the arc torch

电弧焊枪与待焊工件之间的夹角 β ，参见图 3。



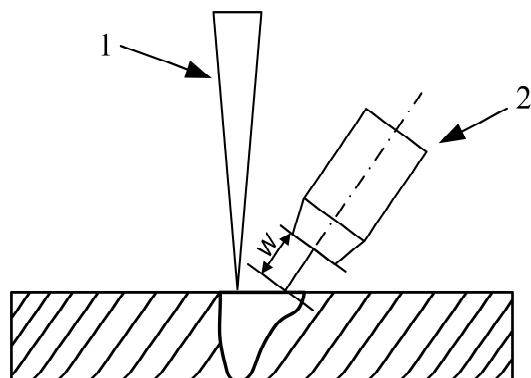
说明：1—激光束；2—电弧焊枪； β —电弧倾角

图 3 电弧倾角示意图

3.4

焊丝干伸长 wire extension

焊丝从导电嘴尖端到待焊工件表面的直线距离 w ，参见图 4。



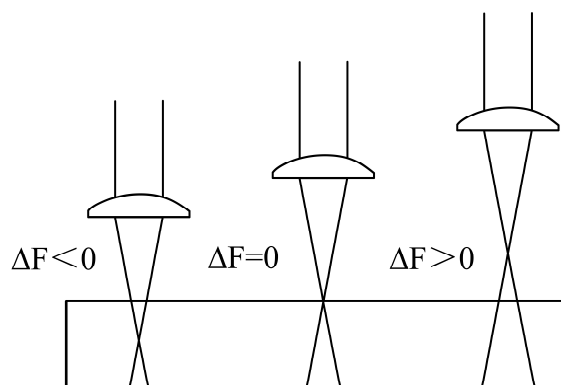
说明：1—激光束；2—电弧焊枪； w —焊丝干伸长

图 4 焊丝干伸长示意图

3.5

离焦量 defocus distance

激光束焦点与待焊接工件表面之间的距离 ΔF ，参见图 5。当焦点位于待焊工件表面以下时，离焦量为负，用“-”加距离表示；当焦点位于待焊工件表面以上时，离焦量为正，用“+”加距离表示；当焦点位于待焊工件表面时，离焦量为 0。



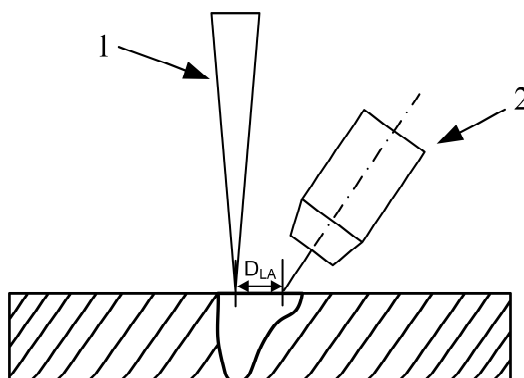
说明： ΔF —离焦量

图 5 离焦量示意图

3.6

光丝间距 **laser-wire distance**

激光在待焊工件表面的光斑中心到焊丝端头与待焊工件表面接触点的距离 D_{LA} ，参见图 6。



说明：1—激光束；2—电弧焊枪； D_{LA} —光丝间距

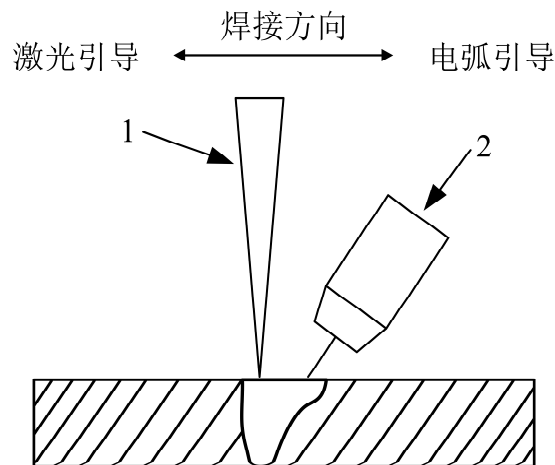
图 6 光丝间距示意图

3.7

引导方式 **guiding mode**

激光-电弧复合焊接过程中不同焊接方向对应的热源空间位置，参见图 7。当

以激光束在前、电弧焊枪在后的方式进行激光-电弧复合焊接时，为激光引导；当以电弧焊枪在前、激光束在后的方式进行激光-电弧复合焊接时，为电弧引导。



说明：1—激光束；2—电弧焊枪；

图 7 引导方式示意图

4 一般要求

4.1 设备

4.1.1 总则

4.1.1.1 激光-电弧复合焊接设备应包含以下主要部分：激光发生器、水冷机、弧焊电源、激光-电弧复合焊接头、焊缝自动对中系统、稳压电源、工装夹具等。

4.1.2 焊接设备性能要求

4.1.2.1 激光发生器

根据钢结构构件的壁厚选择激光发生器的类型和额定输出功率。激光发生器应符合 GB 7247.1 相关要求。

4.1.2.2 水冷机

水冷机制冷量应与激光发生器需求相匹配。

4.1.2.3 弧焊电源

根据钢结构构件壁厚选择弧焊电源的额定输出电流/电压。焊接电源应符合 GB/T 15579.1 的相关规定。

4.1.2.4 激光-电弧复合焊接头

激光-电弧复合焊接头应包含激光焊接头、电弧焊枪、连接调节机构等器件，

应符合 GB/T 19867.6 和 GB/T 37893 的相关规定。

4.1.2.5 焊缝自动对中系统

焊缝自动对中系统应包含焊缝跟踪系统、运动机构、控制系统等设备，定位精度应不低于 $\pm 0.1\text{ mm}$ 。

4.1.2.6 稳压电源

稳压电源的电压调整速度应不低于 25 V/s ，稳定精度应不低于 $\pm 2\%$ ，确保焊接过程中的相关设备连入的电源网路电压波动范围低于额定值的 $\pm 15\%$ 。

4.1.2.7 工装夹具

工装夹具不允许与激光-电弧复合焊接头、焊缝自动对中系统等可移动设备部件发生干涉。

4.1.3 焊接设备校验要求

4.1.3.1 激光-电弧复合焊接设备应经校验后使用，并按照相关设备要求定期进行检修和校验。

4.1.3.2 相关设备在安装、改造、搬迁、主要部件维修或停止使用 2 年以上时，应进行校验和工艺参数确认，合格后方可使用。

4.2 焊接操作及检验人员要求

4.2.1 焊接操作人员必须经过系统的理论学习和实际操作培训，具备足够的焊接专业知识和技能，通过考核并取得相应的资格证书，且证书应在有效期内。

4.2.2 焊接检验人员应经过相关检验知识理论学习和培训。其中，无损检测人员应取得 GB/T 9445 中规定的相应的资格证书。

4.3 安全防护

4.3.1 焊接操作的环境条件应符合 GB 7247.1、GB 7247.4 等标准的相关要求。

4.3.2 焊接操作要求及防护措施应符合 GB 9448、GB 30863 等标准的相关要求。

4.3.3 焊接作业的职业健康安全防护应符合 GB/T 45001 关于危险源控制和人员防护的原则要求，保障操作人员人身安全。

4.4 焊接作业环境

4.4.1 焊接作业环境应保持良好通风，环境清洁。

4.4.2 焊接作业环境风速应小于 2 m/s 。

5 材料

5.1 一般规定

钢结构焊接构件所用钢材的牌号与性能指标,应符合国家现行相关标准的规定。为确保钢结构焊接构件的焊接质量与长期服役安全,针对不同应用领域的结构钢材,其焊接性能需依据特定的工况条件与失效模式提出针对性要求。

5.2 通用技术要求

所有钢结构构件所用钢材,应在设计文件中明确其使用条件,并应保证钢材的碳当量和焊接裂纹敏感性指数(P_{cm})等在规定范围内,拉伸性能、弯曲性能与冲击性能等性能方面均具有合格保证。钢材尚应根据构件的使用条件与连接方式满足下列专项要求:

- 1.对有抗层状撕裂要求的构件,其钢材的厚度方向性能级别及断面收缩率应符合 GB/T 5313 的规定。
- 2.对处于腐蚀环境下的钢结构构件,其钢材应满足设计要求的耐腐蚀性能。
- 3.对需进行疲劳验算的钢结构构件,其钢材应满足设计要求的的疲劳性能。

5.3 建筑钢结构构件焊接

建筑钢结构构件所用钢材的技术条件、质量等级及检验项目应符合 GB/T 19879 的规定,其焊接应符合 GB 50661 的要求,除满足通用技术要求,并应满足下列规定:

- 1.对要求抗震性能或承受动力荷载的建筑钢结构构件,其钢材及焊接接头应满足设计要求的的疲劳性能。

5.4 船舶与海洋工程钢结构构件焊接

船舶与海洋工程钢结构构件所用钢材,其技术条件、质量等级及检验项目应符合 GB/T 712、GB/T 42899 的规定,并应满足下列要求:

- 1.钢材及焊接接头的冲击韧性应符合设计文件要求,冲击试验温度应根据结构的设计使用温度或船级社规范确定。
- 2.当设计对钢结构构件的耐腐蚀性能有专门要求时,焊缝金属的耐腐蚀性能应与母材相匹配。

5.5 桥梁钢结构构件焊接

桥梁钢结构构件所用钢材的技术条件、质量等级及检验项目应符合 GB/T 714、GB/T 4171 的规定，并应满足下列要求：

1.对于采用耐候钢的桥梁钢结构构件，钢材及焊接接头应具有耐大气腐蚀性能的合格保证。

5.6 焊丝选择

焊丝的类型、化学成分及力学性能应与母材的设计要求相匹配。焊丝的质量应符合现行国家标准的要求，主要包括 GB/T 8110、GB/T 10045、GB/T 29713、GB/T 39281 等，根据供需双方协商可以采用符合要求的其他类型的焊丝。

6 坡口设计原则

激光-电弧复合焊接的坡口形式与尺寸可按 GB/T 985.1 规定进行设计选择，原则上应以弧焊接头设计为主，设计时须兼顾激光能量密度高、穿透能力强的工艺特点。表 1 分别列出了针对不同板厚的对接、T 型及箱型构件接头的推荐坡口形式。

坡口可采用机械加工制备，采用激光或等离子切割加工时，应考虑切口可能会产生硬化问题。制备过程中必须严格控制坡口尺寸精度，坡口钝边尺寸的公差应控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。

表 1 钢结构构件激光-电弧复合焊接坡口制备

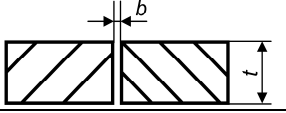

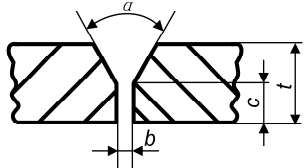
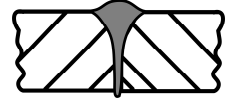
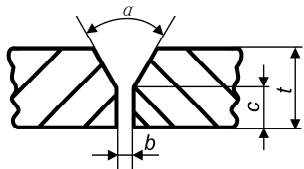
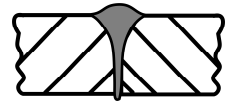
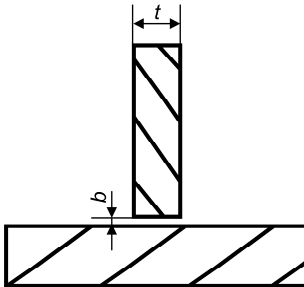
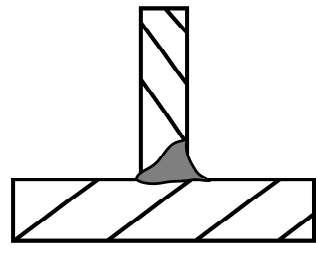
接头类型	母材厚度 t	坡口种类	横截面示意图	尺寸			焊缝示意图
				坡口角度 α 或坡口面角 β	间隙 b	钝边 c	
对接	$t \leq 16$	I 形坡口		—	$0 \leq b \leq 1$	—	
	$16 < t \leq 30$	Y 形坡口		40	$0 \leq b \leq 1$	16	
	$t > 30$	Y 形坡口		70	$0 \leq b \leq 1$	16	
T 型接头	$t \leq 16$	I 形坡口		—	$0 \leq b \leq 1$	—	

表 1 (续)

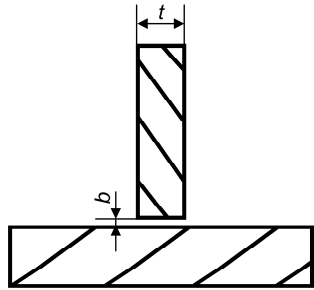
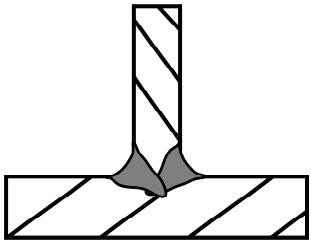
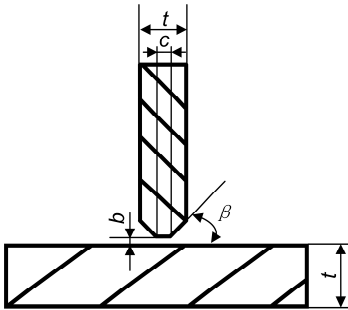
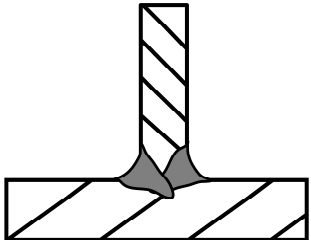
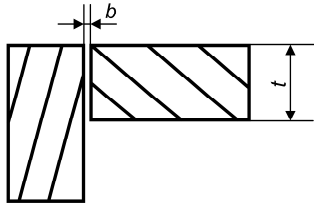
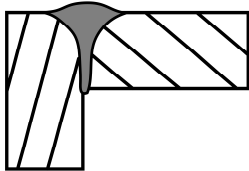
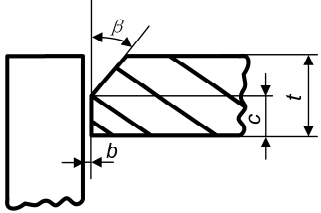
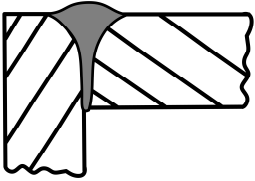
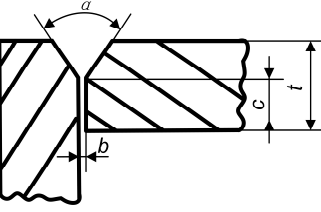
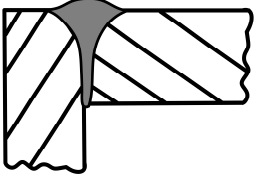
	$16 < t \leq 30$	I 形坡口		—	$0 \leq b \leq 1$	—	
	$t > 30$	K 形坡口		45	$0 \leq b \leq 1$	30	
箱型构件	$t \leq 16$	I 形坡口		—	$0 \leq b \leq 1$	—	

表 1 (续)

	$16 < t \leq 30$	单边 Y 形坡口		45	$0 \leq b \leq 1$	16	
	$t > 30$	Y 形坡口		70	$0 \leq b \leq 1$	16	

7. 焊前准备

7.1 工件状态检查

组对前，应对工件及焊接设备进行下列检查：工件的坡口形状、尺寸及加工质量应符合设计要求，不得存在未清理的毛刺、切割熔渣等缺陷；工件表面不应存在可能影响焊接质量的尖锐划伤、磕碰等损伤。

7.2 工装夹具

7.2.1 将工件放置在焊接工装夹具上，完成工件装夹。检查工件的装夹状态，测量工件装夹后的间隙、错边量，保证组对及装夹条件满足焊接要求。

7.3 设备状态检查

7.3.1 焊接作业前，应对激光-电弧复合焊接系统进行全面检查，具体包括：检查激光发生器、弧焊电源及焊缝跟踪系统，确认其无报警或错误提示；检查激光焊接头及保护镜片，确认其清洁、完好且状态正常；检查焊丝余量和保护气体供应是否正常；并核对预设焊接程序与工艺参数。以上各项确认无误后，方可施焊。

7.3.2 为了确保气路的通畅、洁净，应在焊接之前先提前送气，排净气路内的空气、水分。

8 焊接工艺

钢结构构件激光-电弧复合焊接工艺参数可按 GB/T 37893 确定，焊接工艺可按 GB/T 33645 规定进行评定。

焊接高反射率材料时（如铝合金、铜合金等），激光焊接头应适当倾斜一定角度，一般情况下，采用 10° 倾角（沿焊接方向激光束与工件垂直方向夹角）。

激光-电弧复合焊接的焊接工艺参数主要包括激光功率、焊接电流、焊接速度、离焦量、光丝间距、干伸长、引导方式、保护气种类及流量大小等。

激光-电弧复合焊接的工艺参数应根据激光设备性能与待焊母材特性合理选取。主要工艺参数如激光功率、焊接电流、焊接速度等，应根据不同材料对焊接热输入的控制要求进行适当调整。

表 2、表 3 和表 4 分别为不同板厚的拼板对接焊、T 型接头焊、箱型构件激光-电弧复合焊接推荐工艺参数。

表 2 激光-电弧复合焊接推荐工艺参数（对接接头）

母材厚度/mm	焊接形式	坡口/接头种类	坡口角度/(°)	钝边/mm	激光功率/kw	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度(m/min)
$t \leq 16$	单面焊	—	—	—	1~16	180~200	19~21	1.5~2.5
$16 < t \leq 30$	单面焊	Y 形坡口	40	16	15~17	200~230	21~24	1.5~2
$t > 30$	单面焊	Y 形坡口	70	16	16~17	210~250	22~26	1.5~2

表 3 激光-电弧复合焊接推荐工艺参数（T 型接头）

母材厚度/mm	焊接形式	坡口/接头种类	坡口角度/(°)	钝边/mm	激光功率/kw	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度(m/min)
$t \leq 16$	单面焊	—	—	—	1~16	230~250	24~27	1.5~2.5
$16 < t \leq 30$	双面焊正面	—	—	—	14~16	260~280	27~29	1.5~2
	双面焊背面	—	—	—	12~14	210~250	22~26	1.5~2
$t > 30$	双面焊正面	K 形坡口	45	30	12~14	260~280	27~29	1.2~1.6
	双面焊背面	K 形坡口	45	30	16~17	260~280	27~29	1.2~1.6

表 4 激光-电弧复合焊接推荐工艺参数（箱型构件）

母材厚度/mm	焊接形式	坡口/接头种类	坡口角度/(°)	钝边/mm	激光功率/kw	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度(m/min)
$t \leq 16$	单面焊	—	—	—	1~16	180~200	19~21	1.5~2.5
$16 < t \leq 30$	单面焊	单边 Y 形坡口	45	16	15~18	230~250	22~26	1.5~2
$t > 30$	单面焊	Y 形坡口	70	16	16~19	260~280	27~29	1.5~2

9 焊接质量要求

焊后应对焊接接头外观、内部缺陷等进行检验，主要检验项目及检验标准见表 5。检验项目按照相关标准由供需双方协商确定。如焊接质量不达标，按照产品的相关规定进行局部返修，返修后按照产品标准再次检验。

焊缝性能根据供需双方协商，如：GB/T 229、GB/T 2650、GB/T 2651、GB/T 2653、GB/T 2654、GB/T 3075

表 5 检验项目及相关标准

检验项目	检验范围	检验标准
外观检测	100%	GB/T 32259 目视检测
表面缺陷检测	根据相关标准、设计要求，供需双方协商	GB/T 15822.1 磁粉检测、 GB/T 18851.1 渗透检测
内部检测	根据相关标准、设计要求，供需双方协商	GB/T 11345 超声检测、 GB/T 3323.1 X 射线检测、 GB/T 32563 相控阵超声检测

附录 A

(参考性)

钢结构焊接构件激光-电弧复合焊接工艺规程示例

激光系统参数		激光器型号		激光最大功率（W）		
		激光波长（nm）		光纤芯径（mm）		
		焦点光斑尺寸（mm）		光束模式		
电弧系统参数		弧焊机型号		电弧工艺类型		
		焊接电源极性		电源输出特性		
焊接材料		母材型号		母材尺寸（mm）		
		焊丝型号		焊丝直径		
接头制备		接头类型		坡口形式		
		坡口角度（°）		钝边高度（mm）		
		对接间隙（mm）		错边量（mm）		
焊接工艺参数		激光功率（kW）		焊接速度（m/min）		
		电弧方式/极性		送丝速度（m/min）		
		焊接电压（V）		焊接电流（A）		
		激光束与焊枪的夹角（°）		引导方式		
		光丝间距（mm）		离焦量（mm）		
		保护气流量（L/min）		保护气种类及配比		
		打底/填充/盖面参数		干伸长（mm）		
焊接过程监控		焊缝成形		飞溅量		
		道间温度范围		设备状态		
焊接操作工 签字	日期		技术负责 人批准签 字		日期	