



团 体 标 准

T/CWAN 0137—2025

水电机组过流部件激光-电弧复合焊接技术要求 及应用规范

Technical requirements and application specifications for laser-arc hybrid welding of
hydropower unit overflow components

2025-05-08 发布

2025-06-01 实施

中国焊接协会 发布

目 次

1 范 围3

2 规范性引用文件3

3 术语与定义3

4 焊接环境要求4

5 坡口制备4

6 焊接工艺要求5

7 焊接检验6

8 焊接技术安全8

附录 A（资料性）水电机组过流部件激光-电弧复合焊接工艺规程9

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。

本文件由中国焊接协会提出并归口。

本文件起草单位：华北水利水电大学、中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司、北部湾大学、中国长江电力股份有限公司、哈尔滨电机厂有限责任公司、中国机械总院集团宁波智能机床研究院有限公司、中信重工机械股份有限公司、东北大学、中国科学院金属研究所、河南省科学院碳基复合材料研究院、太原钢铁（集团）有限公司、中煤科工西安研究院（集团）有限公司、福建青拓特钢技术研究院有限公司、水利部杭州机械设计研究所、北京金威焊材有限公司、黄河水利委员会黄河水利科学研究院、东方电气集团东方电机有限公司、哈尔滨工程大学、黄河水利水电开发集团有限公司、南京理工大学、哈尔滨威尔焊接有限责任公司、西安科技大学、河海大学、中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司、西安理工大学、河南农业大学、龙门实验室、洛阳轴承研究所有限公司、陕西太合智能钻探有限公司、山西风雷钻具有限公司、洛阳中重铸锻有限责任公司、郑州航空工业管理学院、河南力锋科技有限公司、聚力新材料科技（日照）有限公司。

本文件主要起草人：王星星、张雷、邓军林、李花兵、温暖、施建军、李景、凌自成、彭进、张冠星、耿在明、陈小明、彭岩、霍岩、孙华为、张雷、潘昆明、江来珠、王沛、程战、温国栋、李晓鹏、王青川、康聪芳、王帅、武鹏博、陈金虎、田宏杰、郭鹏程、石如星、秦建、李伟、杨杰、原志鹏、土比木乃、陈波、彭腊梅、李桂变、王威、葛新峰、金宝、果春焕、孔令辉、常云峰、冯浩、刘怀亮、郭丽萍、张凯、杨鲁强、信国松、于晓凯、王国佛、王文德、方乃文、王振、赵世辉。

水电机组过流部件激光-电弧复合焊接技术要求及应用规范

1 范围

本文件规定了水电机组过流部件激光-GMAW 电弧复合焊接的工艺要求、检验规则和技术安全等。

本文件适用于板厚 $\leq 14\text{ mm}$ 的对高氮钢的应用有所要求的水利水电、航空航海、建筑、船舶、低温工程和压力容器、化工设备的激光-GMAW 电弧复合焊接领域。

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 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 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 4340.1 金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法
- GB/T 5185 焊接及相关工艺方法代号
- GB 9448 焊接与切割安全
- 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 16672 焊缝工作位置 倾角和转角的定义
- GB/T 18851.1 无损检测 渗透检测 第1部分：总则
- GB/T 19866 焊接工艺规程及评定的一般原则
- GB/T 19867.4 激光焊接工艺规程
- GB/T 19867.6 激光-电弧复合焊接工艺规程
- GB/T 26955 金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验
- GB/T 29713 不锈钢焊丝和焊带
- GB/T 32259 焊缝无损检测 熔焊接头目视检测
- GB/T 33645 钢、镍及镍合金的激光-电弧复合焊接工艺评定试验
- GB/T 37893 激光-电弧复合焊接推荐工艺方法

3 术语与定义

GB/T 3375、GB/T 15313 和 GB/T 19866 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

高氮钢 high nitrogen steel

奥氏体基体中氮含量（质量百分比）大于 0.4%或铁素体基体中氮含量大于 0.08%的钢。

3.2

高氮钢激光-GMAW 电弧复合焊接 laser-GMAW arc hybrid welding of high nitrogen steel

高氮钢激光-GMAW 电弧复合焊接技术将激光焊接的高能量密度和电弧焊接的稳定性有效结合，解决了传统焊接技术中高氮钢焊接的氮元素损失问题，提高了焊接效率和接头质量。

3.3

光丝间距 laser-wire spacing

焊丝延长线与高氮钢焊件上表面交点为 A，激光束与高氮钢焊件上表面交点为 B，A 与 B 两点之间的距离 D_{LA} 为光丝间距。

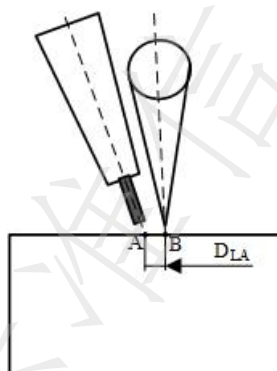


图 1 高氮钢激光-GMAW 电弧复合焊接光丝间距示意图

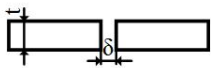
4 焊接环境要求

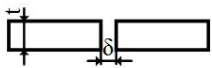
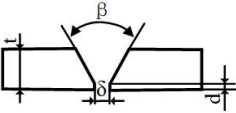
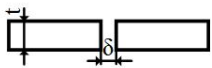
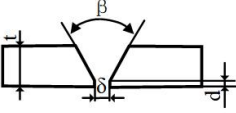
焊接环境的温度应保持在 20°C ~ 25°C 之间，焊接环境的湿度应保持在40%~60%之间。

5 坡口制备

高氮钢板对接推荐采用的坡口形式见表1，其他形式接头由供需双方协商确定。

表1 高氮钢激光-GMAW电弧复合焊推荐采用坡口形式

序号	母材厚度	坡口形式	坡口种类	规格尺寸		
				坡口间隙	钝边	坡口角度
1	$0.5\text{mm} < t \leq 3\text{mm}$		I型坡口	$0\text{mm} \leq \delta \leq 0.5\text{mm}$	—	—

2	$3\text{mm} < t \leq 5\text{mm}$		I型坡口	$0\text{mm} \leq \delta \leq 1\text{mm}$	—	—
			Y型坡口	$0\text{mm} \leq \delta \leq 1\text{mm}$	$2\text{mm} \leq d \leq 3\text{mm}$	$30^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$
3	$5\text{mm} < t \leq 14\text{mm}$		I型坡口	$0\text{mm} \leq \delta \leq 1\text{mm}$	—	—
			Y型坡口	$0\text{mm} \leq \delta \leq 1\text{mm}$	$2\text{mm} \leq d \leq 5\text{mm}$	$30^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$

6 焊接工艺要求

6.1 焊接母材加工

保证待焊高氮钢坡口应平整、光洁、无毛刺、裂纹等。焊接前清除高氮钢表面及侧面的氧化膜，并用丙酮或酒精进行表面油污清理，待工件干燥后进行装夹定位。

6.2 焊丝表面加工

防止高氮钢焊丝表面被凝结露，或被锈、油脂及其他碳氢化合物所污染，保持焊丝表面整洁、干燥；对高氮钢焊丝进行表面脱氮处理，使高氮钢焊丝表面脱氮层深度为 $100\mu\text{m} \sim 600\mu\text{m}$ ，脱氮层 N 元素含量 $\leq 0.4\%$ ，具体情况由供需双方协商确定。

6.3 工装夹具

禁止焊接工装夹具在焊接过程中与激光-GMAW 电弧复合焊枪、保护气罩等可移动部位发生干涉。将工装夹具夹持待焊母材，完成待焊母材装夹。检查待焊母材的装夹状态，测量工件装夹后的间隙、错边量等情况，保证装夹条件满足焊接要求。

6.4 设备状态检查

检查激光设备、激光头保护镜片、激光光路、电弧焊电源、控制器焊接程序等是否满足焊接工艺要求，检查无误后可准备施焊。

6.5 激光-GMAW 电弧复合焊接工艺

高氮钢激光-GMAW 电弧复合焊接工艺参数选择，应按 GB/T 19866 和 GB/T 19867.6 确定，具体焊接工艺可按 GB/T 33645 评定。

高氮钢焊接接头设计：根据高氮钢工件厚度，设定坡口形式（I 型坡口、Y 型坡口等），设定接头

不开坡口或开一定角度坡口。焊接方式设计：根据高氮钢工件厚度，采用单面焊双面成形工艺或双面焊双面成形工艺。设定复合方式和热源间距：复合方式采用激光束在前，电弧在后同步进行。

确定复合焊保护气种类及配比，建议使用纯度为 99.999 % 氩气或氩气与（9%~11%）二氧化碳的混合气或者氩气与（0.5%~4%）氧气以及（1%~10%）氮气的混合气进行保护，混合气体比例由供需双方协商确定。

选择复合焊接工艺参数，激光-GMAW 电弧复合焊接的焊接工艺参数主要包括离焦量、焊接速度、激光功率、焊接电流、电弧电压、保护气流量等。焊接时应根据激光设备情况及待焊母材特点选取合适激光离焦量。高氮钢激光-GMAW 电弧复合焊工艺参数，可参考表 2。

表 2 高氮钢激光-GMAW 电弧复合焊推荐焊接工艺参数

母材厚度 (t)	激光功率 (kW)	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (m/min)	离焦量 (mm)	光丝间 距(mm)	保护气流 量(L/min)
0.5mm<t≤3mm	1~3	110~220	20~28	1~4	-3~-1	2~4	17~20
3mm<t≤5mm	2~7	180~240	20~28	0.8~3	-3~-1	2~4	17~20
5mm<t≤14mm	2~10	180~280	20~28	0.4~1.5	-3~-1	1~4	18~30

6.5 预热及焊后热处理

待焊母材需要预热或者需要焊后热处理，应在焊接工艺规程中对预热和焊后热处理进行规定。相关的记录要求参见附录 A。

7 焊接检验

焊接接头的检验项目见表3，试样截取位置示意图2。若有特殊的使用条件所需的试验，由供需双方协商确定补充检验项目。

表3 焊接接头的检验与试验

试件状态	检验项目	检验数量或范围
焊后检验	目视检验	100%
	无损检验	100%
	宏观金相检验	1

	微观金相检验	1
	硬度检验	1
	冲击试样	5
	拉伸试样	3
	焊接变形	100%

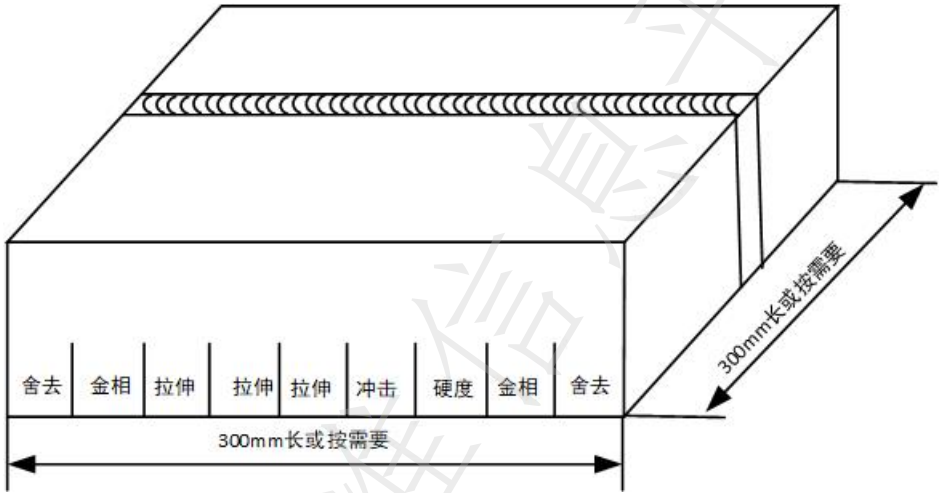


图 2 试样截取位置示意图

7.1 目视检验

对焊缝宏观形貌尺寸及表面质量可直接目视检测，或者采用镜子、内窥镜、光纤电缆或相机进行间接目视检测，检测方法应按照 GB/T 32259 的规定进行。

7.2 金相检验

试样截取一般垂直于焊缝轴线（横截面），并覆盖焊缝熔敷金属和焊缝两侧的热影响区，如有需要，也可以沿其他方向取样，金属材料焊缝的宏观和微观检验应按照 GB/T 26955 规定进行。

7.3 无损检验

焊接接头射线、超声波和渗透检测方法可按相应 GB/T 3323.1、GB/T11345 和 GB/T 18851.1 规定进行。

7.4 硬度检验

焊接接头硬度试验按照 GB/T 4340 规定进行。硬度试样制备完成后进行适当腐蚀，以便于确定焊接接头不同区域的硬度测量位置。硬度试验应覆盖焊接接头横截面表层、中层、底层和纵向焊缝中心区硬度。横向测量时每隔 0.5 mm~2 mm 的距离测试一个点，纵向测量时每隔 1 mm~3 mm 测试一个点。

7.5 冲击性能检验

焊接接头冲击试验取样、缺口方向和试验报告要求，应按照 GB/T 2650 规定进行。

7.6 拉伸性能检验

焊接接头拉伸试样的焊缝余高应以机械方法去除，使之与母材齐平。焊接接头试样制备、试验步骤应按照 GB/T 2651 规定进行。

8 焊接技术安全

激光-GMAW 电弧复合焊接涉及的技术安全，按 GB 9448 有关规定执行。

附录 A
(资料性)

水电机组过流部件激光-电弧复合焊接工艺规程

A.1 范围

适用于表 A.1 所列高氮钢激光-GMAW 电弧复合焊接工艺。

A.2 试验材料

A.2.1 母材

材料型号、牌号及标准编号。

A.2.2 焊丝

焊丝应按母材匹配选择，并符合相关的焊丝标准，如：GB/T10858，GB/T8110，GB/T29713 的要求。

表 A.1 高氮钢激光-GMAW 电弧复合焊接工艺规程

焊接设备	激光器型号		激光器最大功率 (W)				
	激光波长 (nm)		激光头焦距 (mm)				
	激光焦点光斑尺寸 (mm)		焊机型号				
	焊接电源名称		焊接电源执行标准				
	焊接电源极性		其他				
焊接材料	母材型号		母材规格 (mm)				
	母材执行标准		焊丝型号				
	焊丝规格 (mm)		焊丝执行标准				
	保护气体种类		焊丝直径 (mm)				
	热处理制度		预热温度 (℃)				
接头设计/制备	坡口形式		钝边高度 (mm)				
	对接间隙 (mm)		单边坡口角度 (°)				
焊接工艺参数	激光功率(kW)		焊接速度(m/min)				
	激光束及焊枪的角度 (°)		焊道温度 (℃)				
	焊接电流 (A)		离焦量 (mm)				
	焊接电压 (V)		光丝间距 (mm)				
	焊枪喷嘴气流量 (L/min)		保护气种类及配比				
	电弧方式/极性		填充或盖面参数				
焊接操作人员签字		日期		审核人员签字		日期	