

ICS
CCS

T/SCAS

四川省标准化协会团体标准

T/SCAS XXX—2026

水轮机转轮激光熔覆工艺流程及操作规范

Process Flow and Operation Specification for Laser Cladding of
Hydraulic Turbine Runner

(征求意见稿)

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

四川省标准化协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 总体要求	3
5 材料要求	4
6 工艺流程及操作规范	5
7 技术文件	9
8 包装运输	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。

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。

本文件由四川凉山水洛河电力开发有限公司提出。

本文件由四川省标准化协会归口。

本文件起草企业：四川凉山水洛河电力开发有限公司、四川华电木里河水电开发有限公司、中国华电集团有限公司四川分公司、西华大学、沈阳格泰水电设备有限公司、西南交通大学、哈尔滨能创数字科技有限公司、德阳丰实材料技术研究有限公司。

本文件主要起草人：华超、王燕龙、刘磊、张博文、张俊杰、张举东、黄琪、李兴文、徐诗敬、浦同静、周意谨、钱朝礼、黄立敏、罗双超、余波、卢加兴、沈位刚、贺怀志、高冬、王平。

水轮机转轮激光熔覆工艺流程及操作规范

1 范围

本文件规定了水轮机转轮激光熔覆的总体要求、材料要求、工艺流程及操作规范、技术文件、包装运输。

本文件适用于水轮机转轮激光熔覆工艺流程及操作规范。

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 2626 呼吸防护 自吸过滤式防颗粒物呼吸器
- GB/T 10320 激光设备和设施的电气安全
- GB 15577 粉尘防爆安全规程
- GB 17914 易燃易爆性商品储存养护技术条件
- GB/T 18490.1 机械安全 激光加工机 第1部分：通用安全要求
- GB/T 29795 激光修复技术 术语和定义
- GB 30863 个体防护装备 眼面部防护 激光防护镜
- GB/T 41643 高功率激光制造设备安全和使用指南
- DL/T 2793 汽轮机叶片表面激光熔覆强化技术导则

3 术语和定义

GB/T 29795界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

激光熔覆 laser cladding

利用高能量密度激光束快速加热熔化熔覆材料，在基材表面形成熔池，冷却凝固后在基材表面形成冶金结合层的一种激光加工技术。

[来源：DL/T 2793-2024，3.1]

4 总体要求

4.1 基本要求

4.1.1 激光熔覆前应确认水轮机转轮的下列信息：

- a) 水轮机转轮材质；
- b) 水轮机转轮抗水蚀防护历史措施；
- c) 水轮机转轮历史修复记录，包括修复材料、工艺等；

d) 水轮机转轮无损探伤检测记录。

4.1.2 激光熔覆作业前应提供工艺试验报告，编制作业指导书，工艺试验内容。

4.2 人员要求

4.2.1 熔覆技术人员应具备下列条件：

- a) 熔覆操作人员应经过专业技术培训，掌握激光熔覆设备的控制软件、设备结构和材料性能等有关知识和技能，且有不少于1年的技术实践；
- b) 激光熔覆工程中担任管理或技术负责人应取得相应专业中级或以上技术资格。

4.2.2 热喷涂操作人和技术人员应取得相应的技术资格证书或经专门培训考核并取得证书。

4.3 设备要求

4.3.1 激光熔覆设备应稳定可靠，激光器额定功率宜大于4kW，功率稳定性偏差应 $\leq \pm 2\%$ 。

4.3.2 用于熔覆的设备激光波长宜为 $1070 \pm 10\text{nm}$ 。

4.3.3 激光熔覆头应可达水轮机转轮待强化的全部区域。

4.3.4 送粉量应满足 $1\text{g}/\text{min} \sim 400\text{g}/\text{min}$ 。

4.3.5 运动重复精度误差应小于 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

4.3.6 工作台最大承载量应为4000kg。

4.3.7 喷涂设备火焰喷射速度应 $\geq 2000\text{m}/\text{s}$ ，粒子速度应 $\geq 700\text{m}/\text{s}$ 。

4.3.8 喷涂设备火焰温度应满足 $2600^\circ\text{C} \sim 3000^\circ\text{C}$ 。

4.4 环境的要求

4.4.1 熔覆工作环境温度宜为 $5^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 。

4.4.2 熔覆工作不宜在有严重粉尘，相对湿度大于80%的环境下进行。

4.4.3 激光设备不应在有强烈振动的场所进行工作。

4.4.4 熔覆施工场所环境风速不宜大于 $2\text{m}/\text{s}$ 。

4.5 安全生产要求

4.5.1 实施激光熔覆工作应遵守GB/T 41643关于激光器使用安全的有关规定。

4.5.2 激光熔覆设备的机械安全应符合GB/T 18490.1的规定，电气安全应符合GB/T 10320的规定。易燃、易爆金属粉末其储存和管理按照GB 15577和GB 17914执行。

4.5.3 在激光作业区设置醒目的激光辐射标志、危险警示，布置安全作业指令。

4.5.4 激光熔覆作业区域应设置观察屏，观察屏的中心应与熔覆区域等高，观察屏的宽度大于 300mm ，长度大于 500mm ，观察屏应采用有色滤光玻璃。

4.5.5 在观察激光熔覆状时，应佩戴激光专用护目镜，护目镜应符合GB 30863规定。

4.5.6 作业人员佩戴的防尘口罩应符合GB/T 2626的规定。

4.5.7 激光熔覆时，作业人员距激光熔覆作业面一般不小于 0.7m 。

5 材料要求

5.1 熔覆材料

激光熔覆材料宜采用Fe-02粉末材料，粉末硬度为25-28HRC，抗拉强度应 $\geq 900\text{Mpa}$ ；强化材料宜采用Fe-04粉末材料，粉末硬度为48-55HRC，抗拉强度应 $\geq 900\text{Mpa}$ 。化学成分见表1。

表 1 熔覆材料化学成分

Fe-02 粉末化学成分表(粉末粒度规格: 100-270 目)									
元素	Fe	Cr	Ni	C	Mo	Si	S	P	O
含量 (%)	Bal	17.51	9.07	0.11	0.68	0.008	0.008	0.009	0.025
Fe-04 粉末化学成分表(粉末粒度规格: 100-270 目)									
元素	Fe	Cr	Ni	C	Mo	Si	S	P	O
含量 (%)	Bal	18~25	3~7	0.1~0.3	0.2~1.0	0.008	0.008	0.009	0.025

5.2 喷涂材料

采用全球行业认可的瑞典赫格纳斯 (Höganäs) 生产的水轮机专用抗磨蚀粉料 Amperit 558.074, 粉末的名义成分为: 86%WC, 10%Co 和 4%Cr, 碳化钨粉末的尺寸在 $15\mu\text{m}\sim 45\mu\text{m}$ 之间, 碳化钨粉末具备完整的质量证明书。

6 工艺流程及操作规范

6.1 一般要求

在激光熔覆打底后, 再采用超音速火焰喷涂方式喷涂金属碳化钨形成复合涂层, 金属碳化钨喷涂厚度不应小于 0.3mm。

6.2 激光熔覆

6.2.1 技术路线

激光熔覆技术路线见图1。

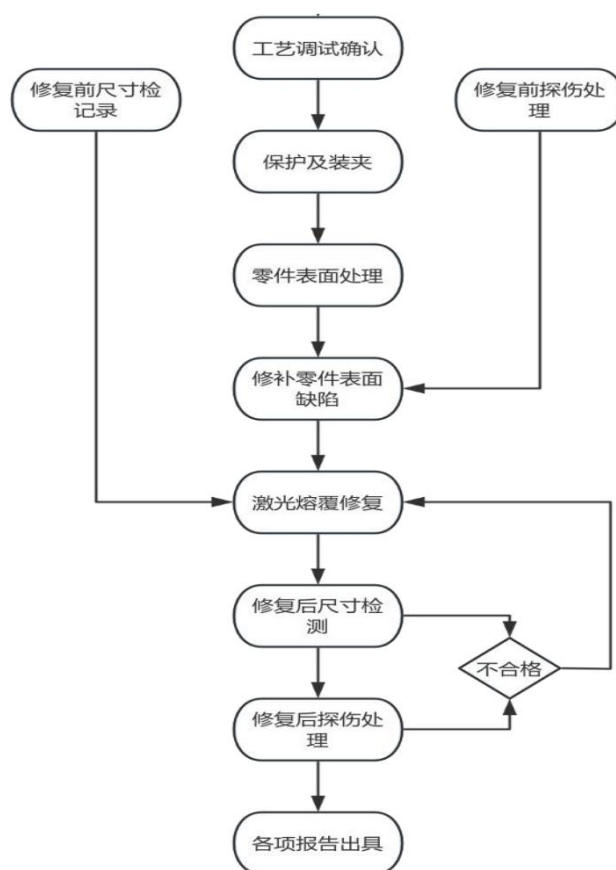


图1 激光熔覆技术路线

6.2.2 工艺调试

6.2.2.1 由客户提供同材质试块（40mm×120mm×120mm）进行工艺调试验证。

6.2.2.2 激光熔覆工艺应满足表面呈金属银白色光泽，无粘粉、无氧化发蓝、无气孔、无裂纹、无未熔合等缺陷。

6.2.2.3 工艺内部应进行金相检测，内部无大量气孔密集、无大尺寸气孔、无未熔合、无裂纹等缺陷。

6.2.3 保护及装夹

零件为过流部件，应使用铜片或专用橡胶垫对零件进行保护，不碰伤，不划伤零件，避免在装夹、搬运过程中损伤到零件，必要时设计工装进行装夹。

6.2.4 零件表面处理

激光熔覆前应进行预处理工作，包括清理油污、去除渣质、消除缺陷。零件表面预处理的方式主要为：

- a) 擦拭：使用棉布擦拭干净零件表面的油污；
- b) 打磨：使用角磨机去除零件表面的锈迹等缺陷；
- c) 清洗：使用无水乙醇对零件表面残余油污、锈质及表面渣质进行清洗。

6.2.5 熔覆前尺寸记录

应对加工前零件尺寸进行记录，作为后续加工量参考尺寸。

6.2.6 熔覆前探伤处理

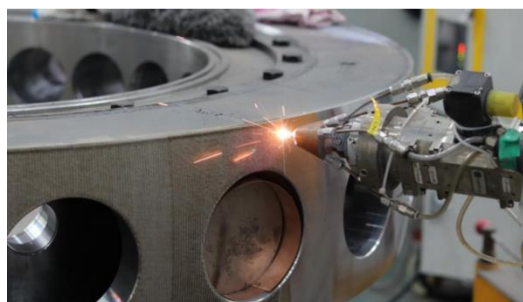
应对加工前零件进行表面渗透探伤，查看表面是否存在气孔、裂纹等缺陷，如有缺陷，先对缺陷进行修补后进行激光熔覆加工。

6.2.7 修补零件表面缺陷

对零件表面有气孔、裂纹等缺陷位置进行打磨去除后，使用激光熔覆的方式先修补缺陷，修补后的缺陷位置使用角磨机进行修平处理。（若存在缺陷进行此工序，无缺陷则无需进行此工序）

6.2.8 激光熔覆

对处理过后的零件进行激光熔覆加工，座环、顶盖端面加工方式宜采用正常平面熔覆搭接的方式进行（如图2-a）；转轮加工方式宜采用竖直熔覆搭接的方式进行（如图2-b），零件熔覆途中允许间歇熔覆加工。



a) 平面熔覆搭接



b) 竖直熔覆搭接

图 2 激光熔覆示意图

6.2.9 熔覆后尺寸检测

熔覆后的零件待冷却后，应进行尺寸检测，检测尺寸需满足客户提供最终激光熔覆加工后的尺寸。可大于最终尺寸，若小于最终修复尺寸的则进行再次熔覆，直至尺寸满足要求。

6.2.10 熔覆后探伤处理及报告出具

尺寸合格后的零件，对表面进行渗透探伤，探伤结果无缺陷即为熔覆合格，若探伤表面出现裂纹、未熔合等缺陷，则进行局部表面缺陷处理；零件尺寸检测合格、表面探伤合格后，再根据客户需要进行硬度等其余项检测，并出具检测报告。

6.2.11 熔覆后的机械加工

对熔覆后的机组零件按照设计图纸进行机械加工到最终图纸尺寸。

6.3 火焰喷涂

6.3.1 来件检验

6.3.1.1 外观检验：待喷涂的零件应干燥，无锈蚀、无机械碰划伤、无油污、无汗渍、无荧光液和其它表面污染物。待喷涂部位尺寸和状态，应符合图纸或工艺规程要求。

6.3.1.2 渗透探伤检查裂纹、未熔合等缺陷。

6.3.1.3 尺寸检验：是否与图纸一致。

6.3.2 清洗

在表面粗化前应用清洗剂清洗或擦拭零件，并用压缩空气吹净。清洗后的零件表面应洁净干燥，无流痕。如需要先去除涂层，则直接使用喷砂的形式对零件表面进行清理，在喷砂前应确保零件表面无油无水。

6.3.3 防护

6.3.3.1 喷砂和喷涂前，应对零件的非喷涂区域做有效防护。配合面等区域应采取双层防护遮蔽的方式：

- 第一层由喷涂专用耐高温遮蔽胶带进行防护，防止粉尘及颗粒物进入轴径区域；
- 第二层应在遮蔽胶带之上，采用薄金属板防护，抵抗喷砂颗粒的冲击。

6.3.3.2 保护材料的结构不应污染或改变涂层和零件基体。在保护操作过程中不允许对零件基体造成任何表面损伤。

6.3.4 装夹固定

工件应固定到喷涂转台上。

6.3.5 喷砂

6.3.5.1 对喷涂部位进行喷砂粗化吹砂后，表面应呈现均匀的无金属光泽的粗糙状态，不应出现漏吹和过吹。吹砂后的表面粗糙度应大于 $Ra\ 3.0\mu m$ 。

6.3.5.2 吹砂后的表面不允许赤手接触，不允许相互碰撞划磨，避免因工位器具和手套不洁净而造成二次污染。若被污染（如有手印）应重新清洗、粗化。若无特殊要求，吹砂合格的零件应在 4 h 内进行喷涂。

6.3.6 喷砂后的清理

零件经吹砂后，用清洁干燥的压缩空气吹净残余砂粒粉尘，检查吹砂表面应呈现均匀的无光泽的粗糙表面。遮蔽区域如有破损应重新保护。

6.3.7 喷涂

6.3.7.1 喷涂环境应干净，无其他粉尘材料。

6.3.7.2 转轮喷涂位置应在转轮止漏环工作面，上冠、下环进口外圆面、流道面及叶片出水边（从出水边至边缘往进水边 10cm 的区域）。喷涂位置示意图见图 3。

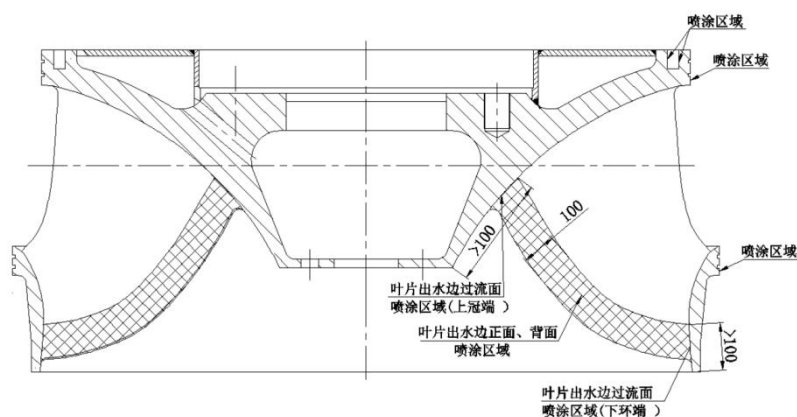


图 3 转轮喷涂位置示意图

6.3.7.3 导水机构应对顶盖、底环、活动导叶过流位置进行喷涂，具体如下：

- a) 顶盖喷涂：抗磨板、止漏环工作面；
- b) 底环喷涂：抗磨板、止漏环工作面；
- c) 活动导叶喷涂：导叶过流面、导叶上、下端面。

6.3.7.4 喷涂完成后，应对涂层表面进行封孔。

6.3.8 喷涂后检测

喷涂后检测应对外观状态、涂层厚度、粗糙度进行检测。

6.3.9 喷涂后清理

6.3.9.1 所有喷涂操作完成后，应去除清理保护材料，包括胶带残余物、过喷涂层及粉尘。

6.3.9.2 在去除保护、残留物或过喷涂层时，不应在零件基体造成表面损伤（磨痕或划痕）。在拆除遮蔽物或夹具，应注意避免粘掉零件上的涂层。

7 技术文件

激光熔覆技术文件应及时编制、整理和保存，技术文件内容包括但不限于：

- 熔覆材质证明书；
- 激光熔覆工艺试验报告；
- 激光熔覆作业指导书或技术方案；
- 激光熔覆质量记录；
- 激光熔覆后热处理记录。

8 包装运输

8.1 零件喷涂修复后应使用橡胶板等材料对喷涂表面进行防护，确保在吊装、包装、运输过程中保护涂层的物理性能和使用性能不受影响和损坏。

8.2 零件喷涂修复后运输时，包装运输应符合商业规则，包装上应清楚标明产品的信息、注意事项。