

ICS 27.100
F 20
备案号: 56223-2016

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL / T 905 — 2016
代替 DL / T 905 — 2004

汽轮机叶片、水轮机转轮焊接 修复技术规程

Code of repair welding for blade of steam turbine and runner of hydroturbine

2016-08-16 发布

2016-12-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 一般规定	1
3.1 焊接工作人员	1
3.2 焊接工艺试验	2
3.3 焊接材料及管理	2
3.4 焊接修复用设备	2
3.5 安全要求和环境条件	2
4 修复前的准备	3
4.1 材质确认与缺陷位置的确定	3
4.2 缺陷清除	3
4.3 坡口与组对	3
5 焊接修复工艺	3
5.1 汽轮机叶片修复工艺	3
5.2 水轮机转轮修复工艺	5
6 质量检验	7
6.1 检验内容	7
6.2 外观检查	7
6.3 无损检测	7
6.4 硬度和金相检验	7
6.5 其他	7
7 焊缝返修	7
8 技术文件	7

前 言

本标准是根据《国家能源局关于下达 2013 年第二批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2013〕526 号）的要求安排，对 DL/T 905—2004《汽轮机叶片焊接修复技术导则》进行修订的。

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准代替 DL/T 905—2004《汽轮机叶片焊接修复技术导则》。本标准与 DL/T 905—2004 相比，除编辑性修改外，主要技术变化如下：

- 扩大了标准的适用范围，增加了水轮机转轮焊接修复的内容；
- 增加了焊条烘焙的要求；
- 增加了焊接环境风速和湿度的要求；
- 增加了汽轮机叶片焊接修复预热温度监测的要求；
- 增加了脉冲无极氩弧焊基值电流和峰值电流的要求；
- 增加了水轮机转轮修复工艺的要求；
- 增加了水轮机转轮修复后超声波检测的要求；
- 修改了氩气纯度的要求；
- 修改了焊接组对前母材打磨的要求，明确了母材打磨范围；
- 修改了汽轮机叶片修复推荐的焊接材料、预热及层间温度、焊后热处理的要求；
- 修改了汽轮机叶片焊接修复焊接工艺的要求。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电站焊接标准化技术委员会归口。

本标准主要起草单位：北京国网富达科技发展有限公司、中国电力科学研究院、华电郑州机械设计研究院有限公司、国网山东省电力公司电力科学研究院、国网河北省电力公司电力科学研究院、国网宁夏电力公司电力科学研究院、东方电气集团东方电机有限公司、哈尔滨电机厂有限责任公司。

本标准主要起草人：徐德录、常建伟、郭军、王慧、雷清华、姜运健、马彦喜、张忠文、田井成、冯涛。

本标准首次发布日期为 2004 年，本次为第一次修订。

本标准自实施之日起替代 DL/T 905—2004《汽轮机叶片焊接修复技术导则》。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，邮编：100761）。

汽轮机叶片、水轮机转轮焊接修复技术规程

1 范围

本标准规定了汽轮机叶片、水轮机转轮缺陷焊接修复的技术条件及检验要求。

本标准适用于火力发电厂汽轮机叶片、叶片围带及拉筋的焊接修复，以及水力发电厂水轮机转轮的焊接修复。

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 3323 金属熔化焊焊接接头射线照相

GB/T 11345 焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定

GB/T 29712 焊缝无损检测 超声检测 验收等级

DL / T 438 火力发电厂金属技术监督规程

DL / T 675 电力工业无损检测人员资格考核规则

DL / T 679 焊工技术考核规程

DL / T 819 火力发电厂焊接热处理技术规程

DL / T 868 焊接工艺评定规程

DL / T 869 火力发电厂焊接技术规程

DL / T 1318 水电厂金属技术监督规程

JB / T 3223 焊接材料质量管理规程

NB / T 47013.4 承压设备无损检测 第4部分：磁粉检测

NB / T 47013.5 承压设备无损检测 第5部分：渗透检测

SJ / T 10743 惰性气体保护电弧焊和等离子焊接、切割用钨钍电极

3 一般规定

3.1 焊接工作人员

3.1.1 一般要求

焊接工作人员包括焊接技术人员、焊工、焊接热处理人员和焊接检验人员。各类人员除应满足DL / T 869的相关要求外，还应符合本标准的规定。

3.1.2 焊接技术人员

3.1.2.1 焊接技术人员应由工程师及以上职称的焊接或相近专业的人员担任，并主持焊接工艺试验和汽轮机叶片、水轮机转轮的焊接修复工作。

3.1.2.2 焊接技术人员应了解修复件的运行工况和缺陷产生的原因，掌握修复件材料的焊接性能，熟悉并认真执行本标准。

3.1.2.3 焊接技术人员负责确定检验部位，记录、检查、整理焊接资料，编制技术总结。

3.1.3 焊工

3.1.3.1 焊工应具备 DL/T 679 规定的 I 类焊工资格，或具备业主认可的资质。

3.1.3.2 焊工焊接前根据作业指导书按修复件的材质、类型模拟现场实际情况进行训练；施焊时严格按照焊接工艺方案或作业指导书焊接，出现问题及时向焊接技术人员汇报，不得擅自处理。

3.1.4 焊接热处理人员

3.1.4.1 焊接热处理人员应按照 DL/T 819 的相关规定履行职责。

3.1.4.2 焊接热处理人员应严格执行焊接工艺方案或作业指导书中有关焊接热处理的要求，及时整理和汇总焊接热处理资料。

3.1.5 焊接检验人员

3.1.5.1 焊接检验人员包括无损检测人员和理化检验人员。

3.1.5.2 无损检测人员应具备 DL/T 675 规定的或其他机构颁发的 II 级及以上检验资格，应记录待修复件焊接前的原始缺陷，对修复后的焊件进行检验，及时出具检验报告。

3.1.5.3 理化检验人员应按照本标准和焊接工艺方案的要求进行检验，及时出具检验报告。

3.2 焊接工艺试验

3.2.1 施焊前应结合修复件的性能要求、拟采用的焊接工艺进行相应的焊接工艺试验并合格。

3.2.2 必要时，可进行焊接模拟试验、破坏性试验或 DL/T 868 规定的其他试验。

3.2.3 依据工艺试验结果和实际情况编制焊接工艺方案或作业指导书。

3.3 焊接材料及管理

3.3.1 使用的焊接材料应有制造厂的质量合格证书。焊接材料的存放、使用管理应符合 JB/T 3223 的规定，必要时进行复验，符合质量要求时方可使用。

3.3.2 使用的焊接材料应满足相应标准的要求。钨极氩弧焊宜使用钨钍电极或钨钨电极，钨钍电极应符合 SJ/T 10743 的规定，使用的氩气纯度应达到 99.99%及以上。

3.3.3 焊条在使用前应按说明书的要求进行烘焙，重复烘焙不应超过 2 次，使用时应装入温度为 80℃~110℃的专用保温桶内，随用随取。

3.4 焊接修复用设备

3.4.1 焊接设备、碳弧气刨设备、焊接热处理设备、焊条烘干设备、理化检验设备和无损检测仪器应参数稳定、调整灵活、安全可靠，并满足相应的技术要求。

3.4.2 应选用直流焊接电源，并具有自动引弧和衰减熄弧功能。手工钨极氩弧焊及气体保护焊宜选用带脉冲功能的直流电源。

3.4.3 有计量检定要求时，应在检定有效期内。

3.5 安全要求和环境条件

3.5.1 焊接工作应遵守安全工作的有关规定。

3.5.2 焊接工作环境温度不得低于 5℃；气体保护焊环境风速应不大于 2m/s，其他焊接方法环境风速应不大于 8m/s；环境相对湿度应不大于 80%。

4 修复前的准备

4.1 材质确认与缺陷位置的确定

4.1.1 修复前应以厂家提供的制造图纸或其他技术文件为依据，确认修复件母材的化学成分和性能。必要时，取样进行化学成分分析。

4.1.2 修复前应检查缺陷的分布情况和尺寸，确定缺陷的类型并做好记录。宜采用超声波检测、磁粉检测或渗透检测方法检查。

4.1.3 焊接工艺试验结果显示修复后性能不满足要求时，不应进行汽轮机叶片或水轮机转轮的焊接修复；当裂纹缺陷处于汽轮机叶根至叶片顶端长度 $2/3$ 范围内时，不宜进行汽轮机叶片的焊接修复。

4.2 缺陷清除

4.2.1 当缺陷为浅表性缺陷时，应采用机械方式清除缺陷。

4.2.2 当水轮机转轮缺陷为裂纹时，可采用机械方式或碳弧气刨方式清除缺陷。使用碳弧气刨方法清除裂纹时，需先将待清除缺陷区域预热至修复件材质的焊接预热温度，宜在距离裂纹尖端 10mm 位置标记并开设止裂孔，然后从裂纹尖端起进行刨除。气刨后应打磨去除渗碳层，直至露出金属光泽。

4.2.3 对可修复的汽轮机叶片，应采用机械方式清除缺陷。如叶片背面有司太立合金片或其他防水蚀的合金层，清除前应先将裂纹处的合金片或合金层清除干净。

4.2.4 缺陷清除后，应进行检查，确认缺陷已消除干净。

4.3 坡口与组对

4.3.1 已经断裂的叶片组对时，应采用专用的夹具，不应出现错口和弯折现象。

4.3.2 存在贯穿性裂纹缺陷时，宜采用双面坡口，应根据叶片的厚度确定坡口角度和组对间隙，原则是易操作、保证焊透、填充量少。

4.3.3 新配置的材料宜与原材质相当，并经理化检验合格；叶片的线型应预先加工成与原叶片基本一致后再进行组对，且留有一定的加工余量。

4.3.4 组对前，应将坡口及其周围 20mm 范围内的母材打磨干净，直至露出金属光泽。

4.3.5 焊接电源地线要与被焊部件直接相连，且夹持牢固、接触良好，不得将地线连接在转子的支架上。

5 焊接修复工艺

5.1 汽轮机叶片修复工艺

5.1.1 焊接方法

优先选用钨极氩弧焊，也可采用焊条电弧焊。

5.1.2 焊接材料

5.1.2.1 焊接材料应与叶片材质相当，特殊情况下，也可采用铁基或镍基的奥氏体异质焊接材料。

5.1.2.2 汽轮机叶片修复推荐的焊接材料及焊接热处理工艺见表 1。使用专用焊接材料时，应进行焊接工艺试验，试验结果满足设计要求。

表 1 汽轮机叶片修复推荐的焊接材料及焊接热处理工艺

叶片材质	焊丝型号	焊条型号	预热及层间温度 ℃	焊后热处理	
				温度 ℃	保温时间 h
12Cr13、20Cr13	H12Cr13	E410-15	200~250	680~720	0.5
	H08Cr19Ni10Ti H08Cr20Ni10Nb	E347-15	100~150		
12Cr12Mo	H08Cr19Ni10Ti H08Cr20Ni10Nb	E410-15	100~150	680~720	0.5
05Cr17Ni4Cu4Nb	H00Cr17Ni4Cu4Nb	—	100~150	600~650	0.5

5.1.3 预热及层间温度

5.1.3.1 宜采用电阻加热方法预热，加热宽度、保温和测温要求按 DL/T 819 相关规定执行。

5.1.3.2 采用氧-乙炔中性焰预热时，预热范围为坡口两侧各 50mm，预热时火焰焰心距离工件 10mm 以上，加热要均匀，宜采用远红外测温仪或其他非接触式测温方法在距离坡口边缘 50mm 处监测预热温度。

5.1.3.3 采用热电偶方式测温时，禁止采用焊接方法（包括使用储能焊机焊接）固定热电偶。

5.1.3.4 推荐的预热及层间温度见表 1。

5.1.4 焊接位置与焊接顺序

5.1.4.1 焊接位置应尽量处于水平位置。

5.1.4.2 已全部断裂的叶片宜由厚侧向薄侧施焊；未断裂叶片从叶片内向边缘施焊；叶片的薄边处可采用单面焊双面成型工艺。

5.1.5 焊接工艺

5.1.5.1 钨极氩弧焊推荐工艺如下：

- 宜选用直径小于或等于 2.0mm 的焊丝，推荐的焊接电流为 50A~70A；脉冲钨极氩弧焊基值电流 30A~50A，峰值电流 90A~110A。
- 焊接过程中，焊缝应延迟保护，焊缝背面进行充氩保护。
- 宜采用多层多道焊。
- 焊后焊缝余高控制在 1mm 以内。

5.1.5.2 焊条电弧焊推荐工艺如下：

- 宜选用直径小于或等于 2.5mm 的焊条，推荐的焊接电流为 60A~90A。
- 宜采用多层多道焊，焊道宽度不超过焊条直径的 3 倍，厚度不超过 3mm。
- 双面焊时，背部应清根。
- 焊后焊缝余高控制在 1mm 左右。

5.1.6 焊后热处理

5.1.6.1 焊接后应及时将叶片包敷缓冷，待焊缝中心温度降至 100℃左右时立即进行焊后热处理。

5.1.6.2 焊后热处理宜使用电阻加热，热处理时叶片应尽量处于垂直位置。

5.1.6.3 热电偶的热端要紧贴焊缝中心，但不得以焊接方法（包括使用储能焊机焊接）固定热电偶。

5.1.6.4 加热宽度为焊缝每侧 30mm~60mm。

5.1.6.5 热处理到达保温时间后拆除加热器和保温装置，让叶片空冷。

5.2 水轮机转轮修复工艺

5.2.1 焊接方法

- 5.2.1.1 根据现场修复条件，可采用钨极氩弧焊、焊条电弧焊、熔化极气体保护焊或其组合焊方法。
- 5.2.1.2 点状缺陷或面积较小的表面缺陷宜采用钨极氩弧焊进行修复，焊接工作量较大的缺陷宜选择手工焊条电弧焊或熔化极气体保护焊进行修复。

5.2.2 焊接材料

- 5.2.2.1 优先选用抗裂性好、性能与母材相当的焊接材料。
- 5.2.2.2 对水流含沙量较大的转轮修复时，若现场不具备热处理条件，宜先使用奥氏体焊接材料焊接，再使用马氏体焊接材料等焊接材料焊接盖面层，盖面层厚度不小于 8mm。
- 5.2.2.3 点状表面缺陷修复时若采用奥氏体不锈钢焊接材料，应进行预热、后热；无须进行焊后热处理。
- 5.2.2.4 水轮机转轮修复推荐的焊接材料及焊接热处理工艺见表 2。使用专用焊接材料时，焊接材料熔敷金属化学成分、力学性能应满足表 3 和表 4 的规定。

表 2 水轮机转轮修复推荐的焊接材料及焊接热处理工艺

转轮材质	焊接方法	焊接材料	预热及层间温度 ℃	后热		焊后热处理	
				温度 ℃	保温时间 h	温度 ℃	保温时间 h
ZG04Cr13Ni5Mo ZG0Cr13Ni4Mo	熔化极气体保护焊	ER410NiMo	110~170	250~300	≥1	560~590	见 5.2.5.4
	焊条电弧焊	E410NiMo	110~170			560~590	
	钨极氩弧焊	ER410NiMo	110~170			560~590	

表 3 推荐的焊接材料熔敷金属化学成分（质量分数） 单位：%

焊材	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
焊丝	≤0.04	≤1.0	1.0~3.5	≤0.015	≤0.025	16.0~18.0	5.0~7.0	1.0~1.5
焊条	≤0.05	≤0.6	≤3.5	≤0.015	≤0.025	16.0~18.0	5.0~7.0	1.0~1.5

表 4 推荐的焊接材料熔敷金属力学性能

焊材	状态	力 学 性 能		
		抗拉强度 MPa	断后伸长率 %	冲击吸收能量（室温） A_{kv} J
焊丝	焊态	≥750	≥16	≥50
焊条	焊态	≥750	≥16	≥50

5.2.3 预热及层间温度

- 5.2.3.1 宜采用电阻加热方法预热，加热宽度、保温和测温要求参照 DL/T 819 相关规定执行。
- 5.2.3.2 采用氧-乙炔中性焰预热时，预热范围为坡口两侧各 50mm，预热时火焰焰心距离工件 10mm 以上，加热要均匀，宜采用远红外测温仪或其他非接触式测温方法在距离坡口边缘 50mm 处监测预热

温度。

5.2.3.3 水轮机转轮补焊修复时推荐的预热及层间温度见表 2。

5.2.4 焊接工艺

5.2.4.1 钨极氩弧焊推荐工艺如下：

- a) 宜选用直径大于或等于 1.8mm 的焊丝，推荐的焊接电流为 80A~120A；脉冲钨极氩弧焊基值电流 50A~60A，峰值电流 110A~140A。
- b) 宜采用多层多道焊。
- c) 焊后焊缝进行随形打磨处理。

5.2.4.2 焊条电弧焊推荐工艺如下：

- a) 宜选用直径大于或等于 3.2mm 的焊条，焊接电流按焊接工艺试验确定的参数执行。
- b) 宜采用多层多道焊，焊道宽度不超过焊条直径的 3 倍，厚度不超过 4mm。
- c) 双面焊时，背部应清根，背部清根后应进行表面渗透检测，检测合格后方可进行背面焊接。
- d) 焊后焊缝进行随形打磨处理。

5.2.4.3 熔化极气体保护焊推荐工艺如下：

- a) 宜选用 $\phi 1.2\text{mm}$ 规格焊丝，焊接电流按焊接工艺试验确定的参数执行。
- b) 宜采用多层多道焊接，焊道宽度不宜超过 15mm。
- c) 双面焊时，背部应清根，背部清根后应进行表面渗透检测，检测合格后方可进行背面焊接。
- d) 焊后焊缝进行随形打磨处理。

5.2.5 后热与焊后热处理

5.2.5.1 水轮机转轮出现大面积缺陷时，宜返厂修复，并进行整体热处理。

5.2.5.2 少量修复或不便于返厂处理时，焊接后应将修复区域包覆缓冷。

5.2.5.3 后热相关要求如下：

- a) 补焊深度小于或等于 38mm 或补焊面积小于或等于 4000mm^2 时，进行后热后，可不进行焊后热处理。
- b) 后热宜采用电加热或中性火焰加热方式，加热范围为焊缝每侧不少于 50mm~100mm。
- c) 后热加热与测温要求参照 DL/T 819 规定执行。
- d) 推荐的后热参数见表 2。

5.2.5.4 焊后热处理相关要求如下：

- a) 对于补焊深度超过 38mm 或者补焊面积超过 4000mm^2 的焊缝，应进行焊后热处理。
- b) 焊后热处理宜采用电加热方式，加热及冷却速度不超过 $150^\circ\text{C}/\text{h}$ 。
- c) 当焊缝厚度不超过 50mm 时，焊后热处理保温时间按照每 25mm 厚度 1h 计算，最少保温时间 30min。
- d) 当焊缝厚度超过 50mm 时，保温时间按照以下公式计算：

$$t = 2 + \frac{\delta - 50}{100}$$

式中：

t ——保温时间，h；

δ ——焊缝厚度，mm。

- e) 热处理到达保温时间后，停止加热，让焊件缓冷。

5.2.5.5 不具备进行焊后热处理的条件时，应采取锤击、超声冲击等措施降低焊接残余应力。

6 质量检验

6.1 检验内容

6.1.1 补焊工作完成后，应先进行修磨，再进行质量检验。

6.1.2 检验项目包括外观检查 and 无损检测。图纸或技术文件有硬度和金相检验要求时，需进行硬度和金相检验。

6.2 外观检查

6.2.1 焊缝不应有咬边、错口、凹陷、裂纹、未熔合、气孔和夹渣等表面缺陷。

6.2.2 水轮机转轮修复后，过流表面质量应满足图纸或技术文件的要求。

6.2.3 修复后变形量应满足汽轮机、水轮机安全运行的要求。

6.3 无损检测

6.3.1 表面无损检测

6.3.1.1 修复后，应对修复焊件进行渗透检测或磁粉检测。渗透检测、磁粉检测方法应分别按照 NB/T 47013.5、NB/T 47013.4 规定要求进行。

6.3.1.2 渗透或磁粉检测时，焊缝及热影响区不得有缺陷显示。

6.3.2 内部无损检测

6.3.2.1 汽轮机叶片修复后，应采用射线检测方法对焊缝进行内部质量检验。根据叶片修复处的位置和厚度变化，射线检测时可在叶片两侧分段进行，也可采用厚度补偿块或双胶片技术进行检验。

6.3.2.2 汽轮机叶片修复焊缝在进汽和出汽边 15mm 范围内不得有任何缺陷，其他部位应达到 GB/T 3323 规定的 I 级质量要求。

6.3.2.3 水轮机转轮修复后，应采用超声波检测方法对焊缝进行内部质量检验。检验按 GB/T 11345 规定的灵敏度为技术 1 级，检测等级按 B 级进行，焊缝质量应满足 GB/T 29712 规定的 2 级验收要求。

6.4 硬度和金相检验

6.4.1 有要求时，应对焊缝、热影响区进行硬度、金相检验，并做好记录，存档备查。

6.4.2 焊缝和热影响区的金相组织检验应采用复型检验或其他非破坏性检验方法，不允许存在显微裂纹、过热组织。

6.5 其他

焊接修复后经质量检验合格的汽轮机叶片、水轮机转轮应移交专业人员进行其他项目的检测。

7 焊缝返修

7.1 经检验不合格的焊缝允许返修，但汽轮机叶片返修次数不超过一次。

7.2 返修技术要求、返修工艺和检验要求按本标准的有关条款执行。

8 技术文件

8.1 焊接技术文件应及时编制和存档，属金属技术监督规程管理的焊接技术文件应分别符合 DL/T 438、DL/T 1318 的相关规定。

8.2 焊接技术文件的内容包括：

- a) 焊接材料质量证明书。
 - b) 焊接工作人员资格证书。
 - c) 原始缺陷记录和坡口图。
 - d) 焊接工艺试验记录、焊接工艺方案或作业指导书。
 - e) 焊接记录、焊接热处理记录、焊接质量检验报告。
-