文章编号：2096–3092（2026）08–0017–03

水轮机转轮叶片裂纹堆焊再制造工艺数值模拟研究 *

何冀淼，张雪丽

张家界航空工业职业技术学院，湖南 张家界 427000

摘要：水轮机转轮叶片是水轮发电机组的关键部件，其质量决定了水轮发电机组的发电效率和运行稳定性。某水电站多台水轮机转轮叶片出水边出现了与水流冲刷方向一致的局部贯穿性裂纹，为了修复缺陷，采用增材再制造的方法。通过堆焊再制造有限元数值模拟，分析了不同堆焊再制造方案下的温度、应力和变形情况。结果表明，从裂纹终止点堆焊至裂纹起始点可以有效减小堆焊残余应力和变形，降低叶片出水边的开裂风险，从而提高水轮机转轮叶片的抗疲劳性能。

关键词：水轮机；转轮叶片；堆焊再制造；数值模拟

中图分类号：TK730；TG21^{+}3

我国水能资源丰富，水力发电早已成为国家能源的核心支柱。2025 年 7 月 19 日，雅鲁藏布江下游水电工程在我国西藏自治区开工，该项目建成后相当于 3 个三峡水电站，标志着我国将再一次撼动世界能源格局，水电行业迈上一个崭新的台阶。然而，受气候多变和水土流失等各方面影响，我国大多数河流泥沙含量较大，加之水电站往往建在水头高、落差大的河段，水轮机在运行过程中极易产生磨损。

目前，针对水轮机转轮叶片的磨损问题，需要先对转轮叶片进行前期评估，判断其是否具备修复价值；在确认具备修复价值的前提下，采用堆焊再制造工艺进行修复。堆焊再制造所用材料比基材的耐磨性更好，理论上修复后水轮机转轮叶片的耐磨性和抗裂性更优，能延长水轮机的使用寿命，实现经济增收。然而，堆焊再制造过程本质上是快速加热和冷却的过程，会导致叶片产生应力和变形。堆焊应力会削弱转轮叶片的强度，导致裂纹萌生和扩展；堆焊变形会影响水轮机的出力和稳定运行。因此，优化水轮机转轮叶片堆焊再制造修复工艺，有效调控应力和变形，对于延长水轮机的使用寿命具有重要意义。

1 国内外水轮机磨损问题研究现状

国内外学者针对水轮机过流部件的磨损问题进行了大量的研究。张代云 [1] 对水轮机过流部件进行了堆焊修复，有效降低了水轮机的耗水率。费征等 [2] 针对水轮机转轮与止漏环扫膛故障，采用金属堆焊与打磨修复相结合的方式，提高了水轮机转轮运行的可靠性。Ciocoiu 等 [3] 采用铣削凹槽法在失效水轮机转轮叶片试样上模拟侵蚀损伤，对多种堆焊修复工艺进行了对比分析。

综上所述，国内外学者主要采用试验方法开展水轮机磨损问题研究，虽取得了不错的成果，但所耗人力、物力和财力巨大。为此，文章拟通过数值模拟方法开展研究，既能有效避免试验研究的弊端，又能提高研究效率，且大量的研究报告表明，采用数值模拟方法进行堆焊再制造工艺研究是可行的。

2 数值模拟

某水电站多台水轮机在运行不到三年的时间里，转轮叶片出水边产生了与水流冲刷方向一致的局部贯穿性裂纹。若不及时进行修复，将严重影响水轮机的出力及安全稳定运行。

水轮机转轮模型复杂，网格数量多，影响计算效率，因此需要对其进行简化。通过观察失效水轮机转轮叶片的裂纹，可将该裂纹视为薄板上的贯穿性裂纹。测量发现，该贯穿性裂纹距离下环约 50 mm，裂纹长度约为 21 mm，开裂处叶片厚度约为 3.25 mm。因此，将水轮机转轮叶片简化为厚度为 3.25 mm 的薄板，薄板上贯穿性裂纹的长度和位置与实际保持一致。

2.1 有限元建模及网格划分

采用 UG 软件对简化模型进行有限元建模，并保存为 STEP 格式文件导入 Hypermesh 软件中，进行面网格和实体网格划分。

*基金项目：2025 年度湖南省教育厅科学研究资助项目（25C1618）

作者简介：何冀淼，男，硕士，助教，研究方向为堆焊再制造；张雪丽，女，硕士，助教，研究方向为有限元分析。

2.2 热源模型及热力分析

采用准确性高且更加接近实际熔池的双椭球热源模型，水轮机转轮叶片前后热流密度分布的数学表达式如下：

$$q_f(x,y,z,t)=\frac{6\sqrt{3}f_fQ}{a_fbc\pi\sqrt{\pi}}\exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2}-\frac{3y^2}{b^2}-\frac{3\left[z+v(\tau-t)\right]^2}{c^2}\right) \tag{1}$$

$$q_r(x,y,z,t)=\frac{6\sqrt{3}f_rQ}{a_rbc\pi\sqrt{\pi}}\exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2}-\frac{3y^2}{b^2}-\frac{3\left[z+v(\tau-t)\right]^2}{c^2}\right) \tag{2}$$

式中：q_f、q_r 分别为前后椭球内热输入的份额；Q 为热输入率；f_f、f_r 分别为前后椭球的能量分配系数；τ 为参考时间；t 为时间；v 为焊接速度；x、y、z 为工件的全局坐标；a_f、a_r 分别为双椭球热源模型的前后半椭球长度；b 为模型宽度的一半；c 为模型的深度。

基于傅里叶传热定律和能量守恒定律，堆焊再制造过程瞬态温度场的非线性热传导控制方程如下：

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial X}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial Y}\right)+\frac{\partial}{\partial Z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial Z}\right)+Q(X,Y,Z,t) \tag{3}$$

式中：c 为比热容；ρ 为材料的密度；λ 为导热系数；T 为温度场分布函数；$Q(X, Y, Z, t)$ 为单位时间内产生或消耗的热量；t 为传热时间。

热对流数学表达式如下：

$$Q_C=(T_S-T_B)h \tag{4}$$

式中：Q_C 为热对流的热流密度；T_S 为物体表面温度；T_B 为周围流体温度；h 为对流换热系数。

热辐射数学表达式如下：

$$q=24.1\times10^{-4}\varepsilon T^{1.61} \tag{5}$$

式中：q 为热辐射的热流密度；ε 为辐射换热系数，取 0.82；T 为热力学温度。

材料总应变 ε_{total} 的数学表达式如下：

$$\varepsilon_{total}=\varepsilon_e+\varepsilon_p+\varepsilon_t+\varepsilon_{Tr} \tag{6}$$

式中：ε_e 为弹性应变；ε_p 为塑性应变；ε_t 为热应变；ε_{Tr} 为相变诱发的塑性应变。

2.3 焊接材料与工艺参数确定

焊接母材为 0Cr13Ni5Mo，与实际水轮机转轮叶片的材料保持一致，填充材料选用比母材抗裂性更好的 ER308 不锈钢焊丝，化学成分如表 1 所示。

2.4 堆焊再制造方案确定

在保证不产生较大变形的前提下，控制应力峰值和应力分布，提出两种堆焊再制造方案。方案 A，从裂纹终止点堆焊至裂纹起始点；方案 B，从裂纹起始点堆焊至裂纹终止点。此外，由于裂纹较短，因此开 I 型坡口，采用一次单面焊双面成形进行堆焊再制造，以保证再制造质量。

表 1　母材和填充材料的化学成分（质量分数）　　单位：%

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0Cr13Ni5Mo	0.020	0.46	0.61	0.035	0.007	13.40	5.03	0.770
ER308	0.052	0.69	0.90	0.020	0.008	19.25	9.73	0.057

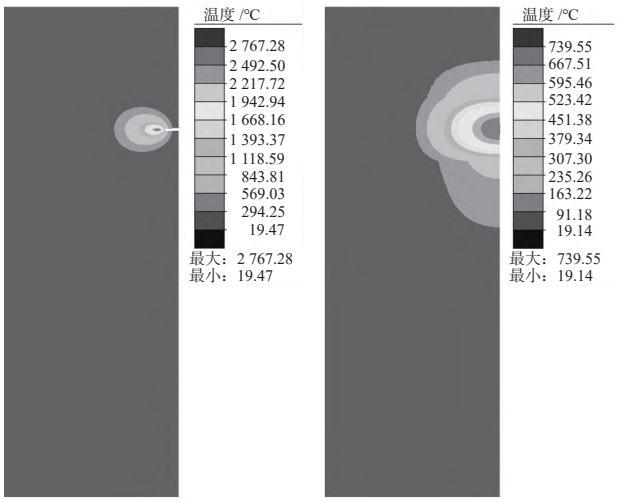
3 结果与讨论

3.1 堆焊再制造温度场分析

堆焊再制造温度场的准确性决定堆焊再制造应力应变控制效果。以方案 A 为例，堆焊时的温度场分布如图 1 所示。当堆焊至 1 秒 575 毫秒时，焊缝中心处的温度最高，达到 2 767.28 ℃，超过材料的熔点，且热量向四周传递。图 1（a）中，除热源中心及其附近之外，其他区域代表工件的初始温度（环境温度），说明在这一瞬间，焊接热能仅作用于焊枪附近，没有对整个工件产生显著的热影响，这符合典型的堆焊瞬态特征，反映了堆焊再制造过程热输入的集中性。图 1（b）反映了冷却至 17 秒 255 毫秒时的温度场分布，最高温度位置出现在焊枪的收弧处，这是因为收弧处的余热效应，反映了堆焊再制造后余热缓慢向周围传递和释放的过程。

3.2 堆焊再制造应力场分析

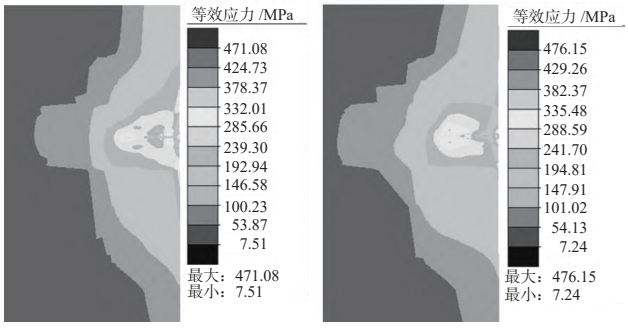
对水轮机转轮叶片进行堆焊再制造修复以后，必然会在叶片内部产生残余应力。两种方案下堆焊后冷却至室温的等效应力如图 2 所示。从整体上看，低等效应力的分布在两种方案下基本一致；方案 A 的高等效应力分布具有更好的对称性；从等效应力峰值上进行比较，方案 A 的等效应力峰值要比方案 B 小；从高应力区分布



（a）堆焊至 1 秒 575 毫秒　　（b）堆焊至 17 秒 255 毫秒

图 1　方案 A 堆焊时的温度场分布

范围来看，方案 A 比方案 B 的高应力区分布更集中。为了防止在叶片出水边同样的位置开裂，提取了易开裂位置的等效应力随时间变化的曲线，如图 3 所示。与方案 B 相比，方案 A 可以有效降低易开裂位置处的应力，进而降低水轮机在运行过程中开裂的风险。



（a）方案 A　　（b）方案 B

图 2　两种方案下堆焊后冷却至室温的等效应力

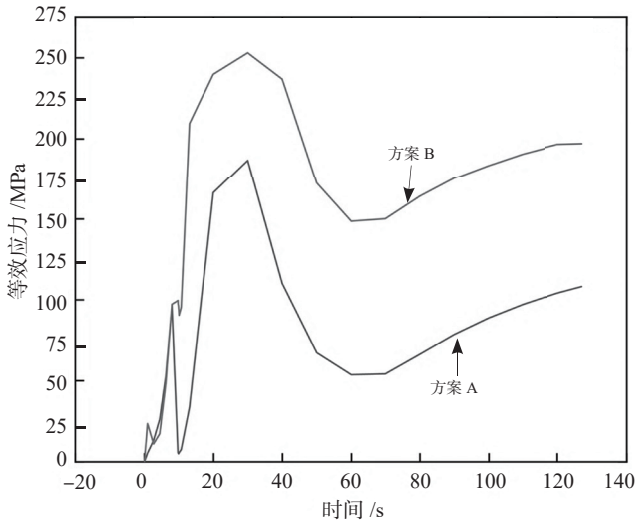
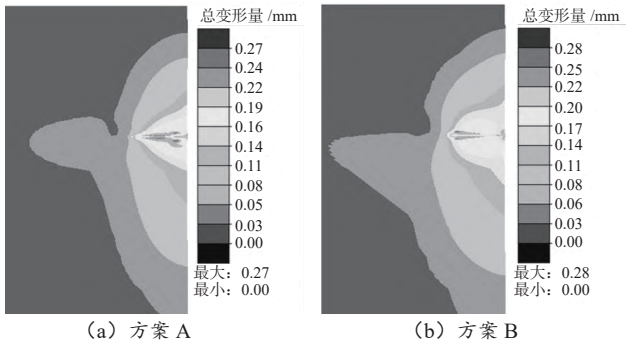


图 3　两种方案下易开裂位置的等效应力 – 时间曲线

3.3　堆焊再制造变形分析

水轮机转轮叶片很薄，且其翼型曲线经过精确设计，在堆焊再制造过程中产生的任何变形都会破坏原始线型，从而影响水流状态，降低工作效率。因此，要严格控制堆焊再制造后产生的变形。两种方案下堆焊后冷却至室温时的总变形分布如图 4 所示。在总变形方面，方案 A 的总变形量峰值达到 0.27 mm，各变形区域呈对称分布；方案 B 的总变形量峰值达到 0.28 mm，比方案 A 高 0.01 mm。此外，方案 B 的高变形区（＞ 0.16 mm）范围比方案 A 要大，并向两侧延展，其牵连变形更为显著，对结构整体平整度的影响也更明显。



（a）方案 A　　（b）方案 B

图 4　两种方案下堆焊后冷却至室温时的总变形分布

4　结论

文章针对水轮机转轮叶片出水边开裂问题，基于有限元理论和热力耦合理论进行了裂纹堆焊再制造分析，研究了不同堆焊再制造方案下瞬态温度、堆焊应力和变形的分布。结果表明：越靠近焊缝中心，区域温度越高；从裂纹终止点堆焊至裂纹起始点（方案 A），可以有效调控堆焊再制造的残余应力和变形，降低易开裂位置的等效应力，提升再制造后的抗裂性，相比从裂纹起始点堆焊至裂纹终止点，该方式可以降低裂纹扩展风险。

参考文献

[1] 张代云. 混流式水轮机过流部件修复方法研究[J]. 四川水力发电，2025，44(2)：135-139，144.

[2] 费征，武许杰，王华，等. 水轮机转轮与止漏环扫膛故障的分析与修复[J]. 水电与新能源，2025，39(10)：68-71.

[3] Ciocoiu R，Coman R，Trante O，et al. Corrosion behavior of welded repaires for water turbine blades[J]. Revista de chimie，2019，70(7)：2497-2501.