大型水轮机转轮电弧增材再制造热力耦合数值模拟及残余应力分析

何 乐[1,4] 周 岩[2] 王 卓[1] 熊晓晨[1*] 黄崇灿[1] 周祥曼[1] 成传诗[3]
华 林[4] 胡泽启[4] 秦训鹏[4]

1.三峡大学石墨增材制造技术与装备湖北省工程研究中心,宜昌,443002
2.武汉商学院智能交通学院,武汉,430056
3.中国长江电力股份有限公司,宜昌,443002
4.武汉理工大学高温轻合金及应用技术全国重点实验室,武汉,430070

摘要:构建了大型水轮机转轮体电弧增材再制造热力耦合有限元模型,解析了温度场、应力场及最终残余应力的变化规律。结果表明:对于转轮体局部失效区电弧增材再制造,修复区及热影响区最终呈整体拉应力状态,纵横向越过修复区的基体区域呈低水平压应力状态。增材充型时,近熔池基体区域因受热膨胀作用呈压应力状态,伴随热源移出,熔池及近熔池基体区域发生冷缩,转变成拉应力状态,而远熔池基体区域因升温小,呈低水平压应力状态;冷却时,伴随发生整体冷缩,修复区呈拉应力状态,而越出修复区的基体区域因持续受热发生膨胀挤压,呈压应力状态。随着冷却进程的加深,修复区拉应力逐步增大,室温时达到峰值(650~800 MPa),基体区域压应力降至-50 MPa以下。修复区与基体结合边缘以及相邻焊道间搭接微区存在明显应力集中,成为裂纹萌生与扩展的危区。

关键词:水轮机转轮体;电弧增材再制造;热力耦合;残余应力
中图分类号:TG404
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.027 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Thermo-mechanical Coupled Numerical Simulation and Residual Stress Analysis of Wire Arc Additive Remanufacturing for Large Hydraulic Turbine Runners

HE Le[1,4] ZHOU Yan[2] WANG Zhuo[1] XIONG Xiaochen[1*] HUANG Chongcan[1] ZHOU Xiangman[1]
CHENG Chuanshi[3] HUA Lin[4] HU Zeqi[4] QIN Xunpeng[4]

1.Hubei Engineering Research Center for Graphite Additive Manufacturing Technology and Equipment, China Three Gorges University, Yichang, Hubei, 443002
2.School of Intelligent Transportation, Wuhan Business University, Wuhan, 430056
3.China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang, Hubei, 443002
4.State Key Laboratory of Light Superalloys and Application Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070

Abstract: A thermo-mechanical coupled finite element model for wire arc additive remanufacturing of large hydraulic turbine runner was established, and the variation laws of temperature field, stress field and final residual stress state were analyzed. The results show that for the wire arc additive remanufacturing of local failure zone on the runner, the repair zone and heat-affected zone finally present the overall tensile stress states, while the matrix zones crossing the repair zone in longitudinal and transverse directions present the low-level compressive stress states. During additive filling, the matrix zone near the molten pool presents a compressive stress state due to the thermal expansion. With the removal of heat source, the molten pool and adjacent matrix zone generate cooling shrinkages and transform into tensile stress states, whereas the matrix zone far from the molten pool maintains a low-level compressive stress state owing to the low temperature rise. In the cooling stage, overall cooling shrinkage occurs, and the repair zone presents the tensile stress state. Meanwhile, the matrix zone beyond the repair zone undergoes the expansion and extrusion under the continuous thermal effects, presenting the compressive stress state. As the cooling

收稿日期:2025-12-16
基金项目:湖北省自然科学基金(2024AFB266);水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室基金(2023KJX06);三峡大学科研启动基金(2024RCKJ004)

process develops, the tensile stress in the repair zone increases gradually and reaches the peak (650～800 MPa) at room temperature, while the compressive stress in the matrix zone decreases to lower than 50 MPa. Obvious stress concentrations exist at the bonding edges between the repair zone and the matrix zone as well as at the overlapping micro-zones between adjacent weld beads, which become the critical zones for crack initiation and propagation.

Key words: hydraulic turbine runner; wire arc additive remanufacturing; thermo-mechanical coupling; residual stress

0　引言

大型水轮机作为水力发电能量转化的核心部件，因长期在腐蚀、磨损、高压冲击等极端环境下服役，其关键过流部件转轮体表面极易发生气蚀、磨蚀等形式失效，须反复停机开展检修，造成巨大经济损失[1-3]。因此，开发高效率、高质量的水轮机转轮体修复再制造技术，缩短转轮体修复周期，同时提升转轮体服役性能并延长寿命，具有重大意义且需求迫切。

实际工程中水轮机转轮体通常采用人工电弧补焊的方式进行修复，存在周期长、强度大、稳定性差等问题，无法实现转轮体高效率、高质量修复再制造[4-5]。随着增材制造技术不断发展，机器人电弧增材再制造技术凭借其成形效率高、材料利用率高等优势，逐渐发展为水轮机转轮体等大型结构件修复再制造的重要途径[6-8]。然而，对于大型结构件局部区域电弧增材再制造，因具有快热熔化、急冷凝固短时剧烈的传热传质特性和强非平衡熔凝相变特征，修复层内极易积累高水平残余应力，严重损坏修复层力学性能，成为影响大型结构件服役性能和剩余寿命的关键因素[1,9-11]。因此，为真正意义上实现大型水轮机转轮体高效率、高质量修复再制造，必须对电弧增材再制造过程中不同时空坐标下转轮体局部修复区和热影响区应力状态进行全面剖析，阐明转轮体电弧增材再制造过程中修复区和热影响区内应力的动态演变规律以及最终残余应力的分布规律。

因水轮机转轮体结构体型庞大，同时受坑内原位修复在线施工限制[12]，采用实验方式对水轮机转轮体电弧增材再制造内应力变化规律进行研究存在着实施应力测试条件受限、开发专用测试设备成本高昂、难以在无损状态下获取内部动态数据，以及不易保障测试精度等问题，针对此类问题，目前业界普遍采用构建局部抽象理想化的数值分析模型来代替实验研究[13-14]。现有的模型多以局部标准增材试块（单层单道、单层多道及多层多道）和理想物理过程为对象进行建模，尚未见以水轮机转轮体类大型结构件电弧增材再制造实际过程为对象构建1∶1全尺寸形体结构和实际物理过程的数值分析模型。对比两者异同，前者为局部标准模型，几何结构相对简单、规则，模型构建过程也多基于大量理想假设，相对于工程实际，模型进行了高度简化和抽象化，分析计算量小，易收敛，而后者，一方面，水轮机转轮体为具有复杂型面结构的大型构件，另一方面，水轮机转轮体电弧增材再制造过程建模需构建相对真实的多场耦合物理过程和边界条件，因此建模过程相对复杂，分析计算难以收敛。综上，现有的数值分析模型无法直接迁移至大型水轮机转轮体电弧增材再制造数值分析建模体系中[13,15-16]。

针对上述问题，本文以大型水轮机转轮体为对象，采用直接热力耦合的方式，1∶1构建水轮机转轮体电弧增材再制造热力耦合有限元模型，通过有限元数值模拟，揭示转轮体电弧增材再制造过程中局部修复区和热影响区内应力动态演变规律和最终残余应力的分布规律。

1　热力耦合理论基础

1.1　边界条件

对流边界条件：根据转轮体周围冷却介质的对流传热系数h，设定如下边界热对流方程：

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}=h(T-T_{\infty}) \tag{1}$$

式中：T为温度；n为边界法线方向；k为热导率；T_{∞}为周围介质温度。

辐射边界条件：考虑热辐射影响，根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律，设定热辐射边界条件如下：

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}=\varepsilon\sigma(T^4-T_{\mathrm{S}}^4) \tag{2}$$

式中：ε为材料表面发射率；σ为斯蒂芬-玻尔兹曼常数；T_{S}为周围环境的辐射温度。

1.2　温度场控制方程

基于能量守恒定律，直接耦合的温度场方程需纳入应力应变产生的热弹内热源，体现应力场对温度场的实时影响，由此可给定如下方程：

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\nabla(k\nabla T)+Q_{\mathrm{arc}}+Q_{\sigma} \tag{3}$$

式中：t为时间；ρ为密度；c为质量热容；Q_{arc}为电弧热源强度（采用双椭球热源模型，由沉积电流、电压、速度确定[17]）；∇为应变率散度，反映变形速率对热源强度的实时影响；Q_{σ}为热弹内热源。

由力学应变率推导得到

$$Q_\sigma=\frac{\alpha T}{3(1-2\nu)}\nabla\cdot\dot{\varepsilon}_{\mathrm{mech}} \tag{4}$$

其中，α为热膨胀系数；$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{mech}}$为力学应变率张量，$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{mech}}=\partial\varepsilon_{\mathrm{mech}}/\partial t$；$\nu$为泊松比。

1.3 应力场控制方程

基于虚功原理，直接热力耦合应力场方程需纳入温度梯度产生的热体积力，如下式所示：

$$\int_V\boldsymbol{\sigma}_{ij}\delta\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}\mathrm{d}V=\int_V F_i\delta\boldsymbol{u}_i\mathrm{d}V+\int_S\boldsymbol{t}_i\delta\boldsymbol{u}_i\mathrm{d}S+\int_V\boldsymbol{Q}_i(\nabla T)\delta\boldsymbol{u}_i\mathrm{d}V \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{\sigma}_{ij}$为应力张量；$\delta\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$为虚应变张量；$\delta\boldsymbol{u}_i$为虚位移张量；$V$、$S$分别为物体的体积和表面积；$F_i$为体积力分量；$\boldsymbol{t}_i$为表面力分量；$\boldsymbol{Q}_i(\nabla T)$为温度梯度导致的热体积力，体现温度场对力学载荷的实时影响。

而总应变是力学应变与热应变的叠加，且热应变会随温度动态变化，其关系如下：

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}&=\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{mech},ij}+\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{th},ij}\\ \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}&=\alpha(T-T_0)\boldsymbol{\delta}_{ij}\\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{mech},ij}&=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\boldsymbol{u}_i}{\partial\boldsymbol{x}_j}+\frac{\partial\boldsymbol{u}_j}{\partial\boldsymbol{x}_i}\right)\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$为总应变；$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{mech},ij}$为力学应变；$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{th},ij}$为热应变；$\boldsymbol{\delta}_{ij}$为克罗内克符号；$T_0$为初始温度；$\boldsymbol{u}_i$、$\boldsymbol{u}_j$为位移分量；$\boldsymbol{x}_i$、$\boldsymbol{x}_j$为空间坐标分量。

在此基础上建立下式所示的本构方程来表达应力与应变之间的关系：

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij}=\boldsymbol{D}_{ijkl}(\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}-\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{th},ij}) \tag{7}$$

其中，$\boldsymbol{D}_{ijkl}$为弹性系数张量，可由弹性模量和泊松比求得，其矩阵形式如下：

$$D=\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{bmatrix}A & 0\\ 0 & B\end{bmatrix} \tag{8}$$

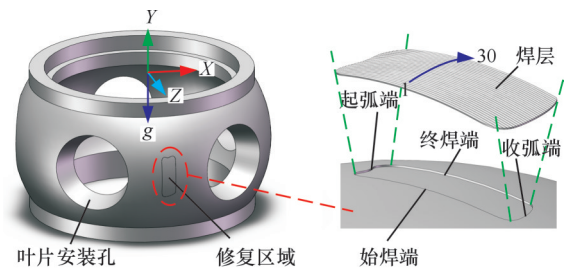
式中：E为弹性模量；A、B为与泊松比相关的常数矩阵。

通过上述公式求解得到应力张量后，可进一步推导等效应力与最大主应力。等效应力能够对转轮体塑性变形程度以及潜在焊接缺陷风险进行评估，最大主应力则可判定对应单元及残余应力的拉压属性。

2 转轮体再制造有限元建模

2.1 三维数模与沉积路径

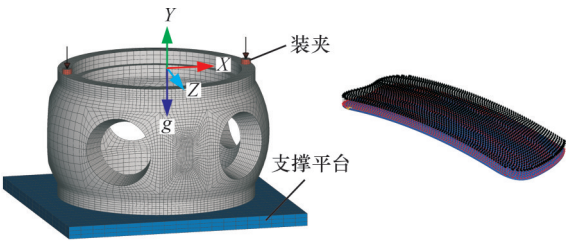
根据工程实际，1∶1还原大型水轮机转轮体实际外形以构建三维数模，其中，转轮体中段呈球壳形几何特征，圆周均布五个叶片安装孔，上下端为环状边缘，如图1a所示。工程中，大型水轮机转轮体失效缺陷大体可分为浅表性缺陷和深坑类缺陷，本文的研究工作主要围绕对转轮体浅表性缺陷的修复而展开。基于此，在两相邻叶片安装孔之间开设尺寸为300 mm×903 mm×5 mm（深度）的不规则修复区，并建立与之适配的焊层模型（划分为30条顶端呈弧面的纵向焊道），如图1b所示。此外，鉴于水轮机转轮体较规则的几何外形，选择采用六面体单元进行网格划分，同时考虑到修复区高温度梯度和应力集中等特点，对修复区及热影响区网格进行细化，以提高温度场、应力场模拟精度，而其他区域则采用粗化网格进行计算，以优化计算效率。图2a所示为基于Simufact建立的转轮体与修复区有限元网格模型，底部为施加全固定约束的支撑平台。图2b所示为布置的焊道沉积路径，为便于焊后磨削修形处理，焊道沉积路径以X方向为正方向。



(a)转轮体几何模型　(b)焊层、修复区几何模型

图1 转轮体、焊道实体模型

Fig.1 Runner body and weld bead solid model



(a)转轮体三维数模　(b)焊层及其沉积路径

图2 转轮体电弧增材有限元模型

Fig.2 Finite element model of wire arc additive manufacturing (WAAM) for runner

2.2 热源模型与增材工艺参数

研究表明[18]，采用双椭球体热源更符合电弧热源的物理特性，表1所示为双椭球体热源模型几何参数。结合工程实际，确定转轮体再制造数值模拟时所使用电弧增材工艺参数如表2所示。

表1 热源几何参数

Tab.1 Geometric parameters of heat sources

前轴长 a_f/mm	后轴长 a_r/mm	宽度 b/mm	深度 d/mm
5	10	6	8

2.3 材料属性

转轮体基体材料选用0Cr13Ni5Mo低碳马氏体不锈钢，0Cr13Ni5Mo为水轮机转轮体、叶片制造常用原材料[5]，而充型焊材选用与之相同牌号的0Cr13Ni5Mo马氏体不锈钢焊丝，化学组分见表3。基于JMatPro金属材料性能模拟软件，计算得到该组分下0Cr13Ni5Mo焊材对应的热物性参数如图3所示，并将相关材料数据赋予上述所建立的有限元模型。

表 2　工艺参数及热边界参数

Tab.2　Process parameters and thermal boundary parameters

沉积电流/A	沉积电压/V	沉积速度/(mm·s^{-1})	预热温度/℃	环境温度/℃	对流传热系数/(W·m^{-2}·K^{-1})	接触传热系数/(W·m^{-2}·K^{-1})	辐射散热系数
165	22	4	200	20	20	1500	0.8

表 3　0Cr13Ni5Mo 焊丝化学组分(质量分数)

Tab.3　Chemical composition of 0Cr13Ni5Mo welding wire (mass fraction)　%

w(Fe)	w(C)	w(Cr)	w(Ni)	w(Mn)	w(Si)	w(Mo)	w(Cu)	w(S)	w(P)
78.86	0.06	13.5	5.0	0.60	0.50	0.70	0.72	0.03	0.03

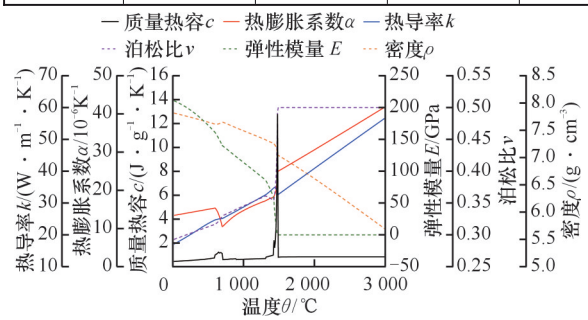


图 3　0Cr13Ni5Mo 热物性参数曲线

Fig.3　Thermal properties parameter curves for 0Cr13Ni5Mo

2.4　模型实验验证

因受水轮机转轮体坑内修复工程实际和在线测试技术限制，无法开展转轮体实际修复实验验证，本研究从侧面对所建的有限元模型进行验证。采用上述有限元建模所选工艺参数(表 2)，在 0Cr13Ni5Mo 矩形基板(300 mm×200 mm×10 mm)上开展单层单道沉积实验，焊材为有限元建模所用 0Cr13Ni5Mo 焊丝，如图 4a 所示。沉积过程中采用热成像仪对焊道温度场进行拍摄，获取熔池处于焊道首端、中部、尾端时的温度场分布结果，如图 4b 所示。同时以相同的工艺参数和材料属性构建单层单道沉积有限元模型，并得到相同时刻熔池温度场分布的仿真结果，如图 4c 所示。结果显示，熔池右侧边缘在焊道首端、中部、尾端对应的实测温度分别为 1431.7 ℃、1437.5 ℃、1423.3 ℃，而仿真对应的温度为 1438.89 ℃、1443.16 ℃、1420.29 ℃，相对误差小于 1%，表明单层单道沉积实验和仿真结果高度吻合，从侧面验证了基于上述工艺参数和材料属性构建的水轮机转轮体电弧增材再制造热力耦合有限元模型具有良好的准确性。

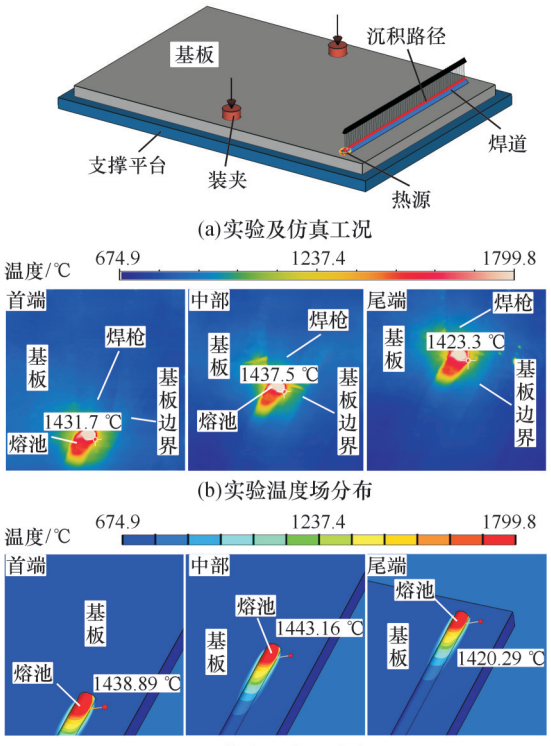


图 4　单道焊道沉积实验、仿真温度场对照

Fig.4　Single-pass deposition test and temperature field comparison

3　仿真结果分析

3.1　温度场与最大主应力场

转轮体增材再制造过程具有快热熔化、急冷凝固短时剧烈的传热传质特性。在修复层逐步堆积过程中，热量的瞬时输入与快速耗散导致温度场呈现显著的时空差异，这种热动态过程使得热应力成为影响残余应力分布的关键因素[19]。基于此，下文将围绕转轮体修复区的热历程，深入分析修复区内应力的动态演变规律和最终残余应力分布特性。

如图 5 所示，首条焊道沉积时，在高温热源作用下，焊丝迅速熔化形成熔池，其中心的高温液相金属呈无应力状态，近熔池的基体区域因受热膨胀，在外围低温金属的约束下呈压应力状态，其压应力极值位于熔池下方的基体内部，数值为−138.323 MPa。随着热源移出冷却，熔池及近熔池基体区域发生明显冷缩，转变为受拉应力状态，图 5c 展示了这一热力演变动态过程。又因局部区域存在结构突变，焊道与修复区边界接触侧的拉应力水平更高，而远离熔池的基体区域，因升温较小，无明显冷缩，其收缩所产生拉应力不足以平衡热胀形成的压应力，因此保持较低水平的压应力状态。

如图 6 所示，焊道沉积至修复区中部时，随着修复进程从修复区始端向中部推进，修复区逐渐生成多条前序焊道，并伴随热源逐渐远离，依次发

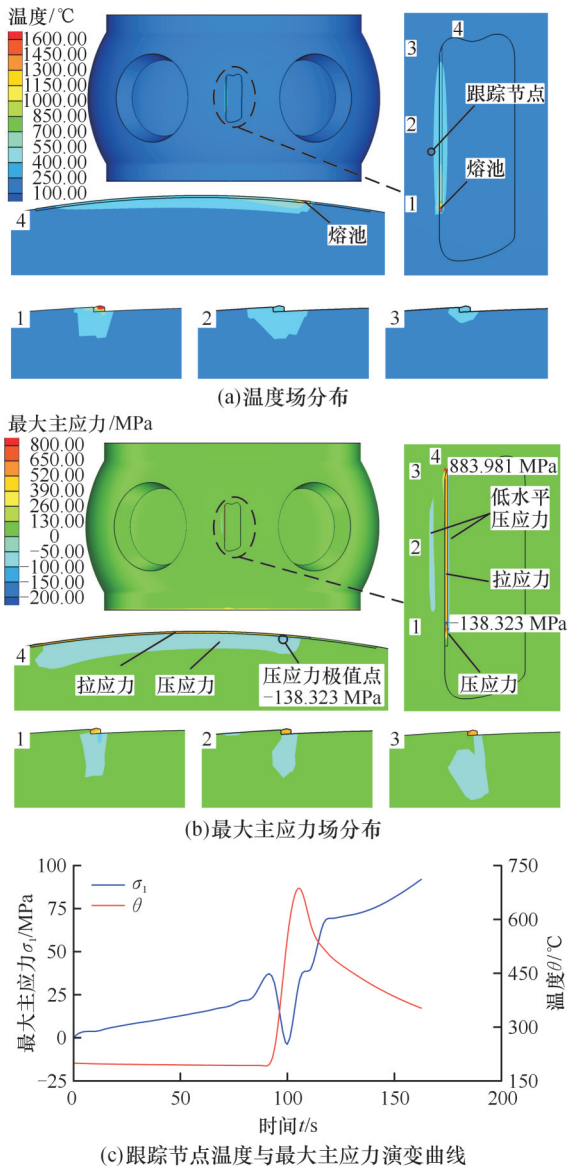


图5 首条焊道沉积时温度场和最大主应力场的分布与演变

Fig.5 Temperature field and maximum principal stress field distribution and evolution during first pass welding

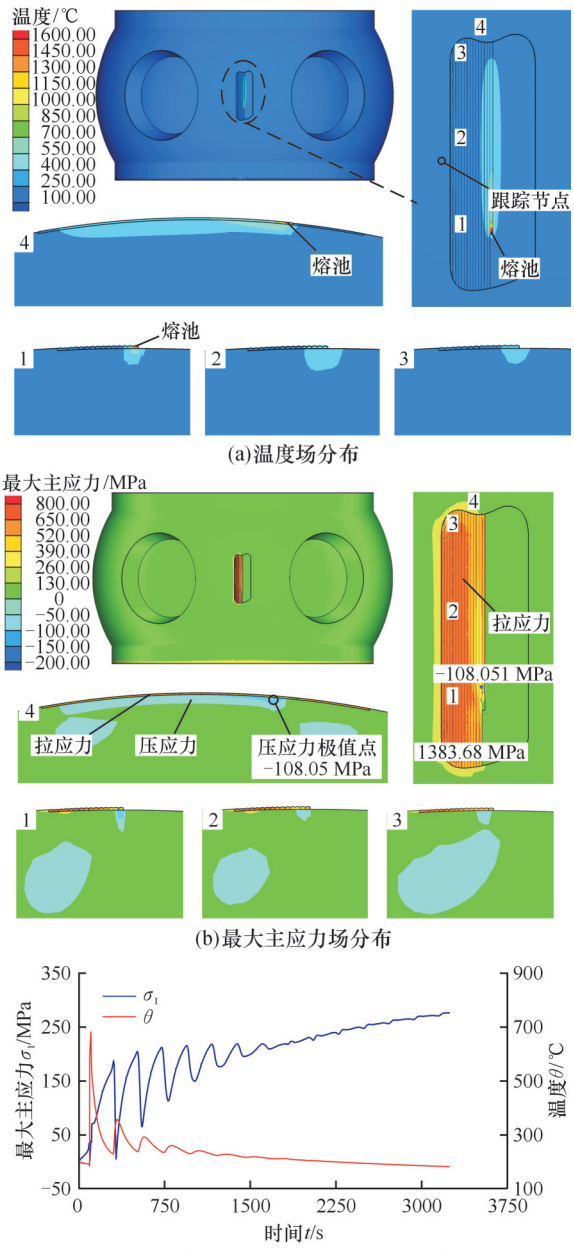
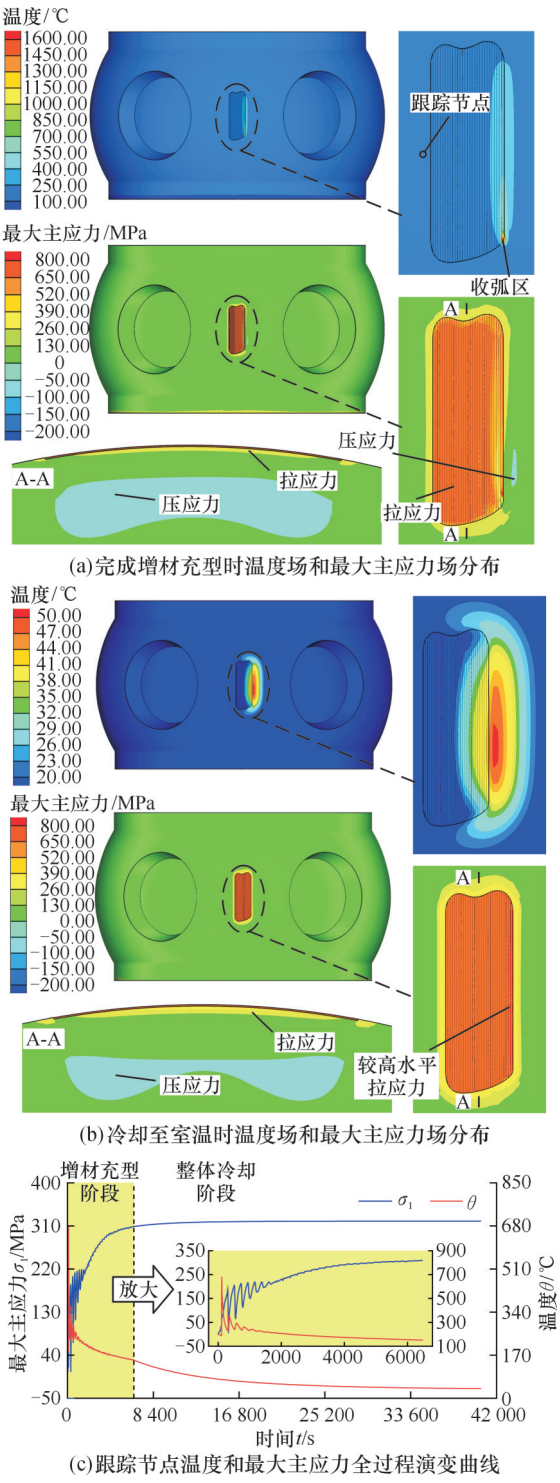


图6 沉积至中部时温度场和最大主应力场的分布与演变

Fig.6 Temperature field and maximum principal stress field distribution and evolution at the middle section

生冷却收缩，前序焊道对应区域整体呈现拉应力状态，且图6c中节点拉应力呈波动上升趋势，因此，离熔池越远的前序焊道，对应拉应力水平越高。又因前序焊道余热未散，且存在当前沉积焊道熔池的持续热量输入，使得当前及前序焊道冷却过程放缓，对应区域温度场分布逐渐趋于均匀，温度梯度下降，冷缩形成拉应力水平较首条焊道沉积时要低。此外，伴随热源沿Y向多次往复运动，待施焊侧基体区域持续吸热升温，这对待修复区焊道沉积起到一定的预热作用，使得焊道沉积时近熔池基体区域的压应力水平明显降低，但压应力极值点仍位于熔池下方的基体内部，数值降至－108.051 MPa。

如图7所示，增材修复刚结束时刻（图7a、图7c），修复区停止热输入，并开始进入冷却阶段，此时除当前沉积焊道收弧区及其周围高温区域仍承受低水平压应力外，由前序焊道所形成的已修复区和热影响区开始发生整体冷缩，所受拉应力呈增大趋势，而越出修复区的基体区域因在增材过程中受焊道沉积持续热影响，存在持续的膨胀挤压，呈现压应力状态，但随着已修复区持续冷却收缩，修复区整体拉应力水平不断上升，致使先前所受压应力水平逐渐降低。当修复区完全冷却至室温时，如图7b、图7c所示，修复区的热力行为趋于稳定，残余拉应力达到峰值，数值多为650～800



(a)完成增材充型时温度场和最大主应力场分布

(b)冷却至室温时温度场和最大主应力场分布

(c)跟踪节点温度和最大主应力全过程演变曲线

图7　增材充型完成以及冷却至室温时温度场和最大主应力场分布与演变

Fig.7　Temperature field and maximum principal stress field distribution and evolution upon completed of filling and cooling to room temperature

MPa。因从修复区始端到末端，各焊道经历的热循环次数逐渐减少，故末端焊道对应拉应力水平更高，而部分相邻焊道对应的搭接微区，因存在局部结构突变拉应力数值甚至超过800 MPa。

如图8所示，沿X轴法向截取修复区始端、中部和末端三截面观察残余应力分布，发现三者最大主应力分布特征高度相似：修复区及热影响区整体呈拉应力状态，纵横向越出修复区一定范围的基体区域呈低水平压应力状态，数值在−50 MPa以内。但三截面应力水平存在差异，即受压应力区域在增材过程中受连续热循环作用，应力水平从始端至末端呈减弱趋势。

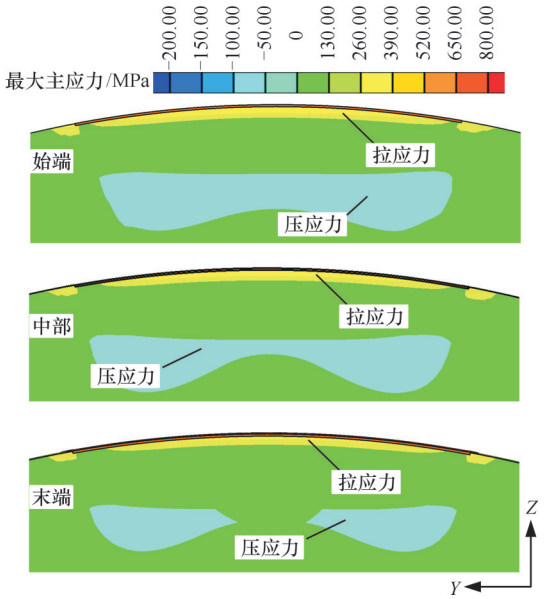


图8　三截面最大主应力场分布

Fig.8　Distribution of maximum principal stress fields in three cross-sections

3.2　等效残余应力

基于适用于塑性金属材料的第四强度理论，Mises等效应力能为焊接结构的整体强度评估提供一个统一的标准。图9所示为修复区冷却至室温时的等效应力分布。分析结果表明，等效应力主要集中于修复区。其中，修复区末端的等效应力水平相对较高。纵横向越出修复区及热影响区的基体内部区域，因最大主应力为低水平压应力，因此所受等效应力值相对较低。

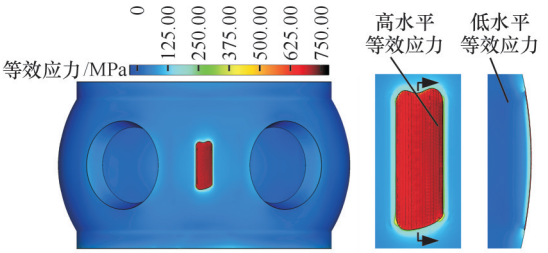
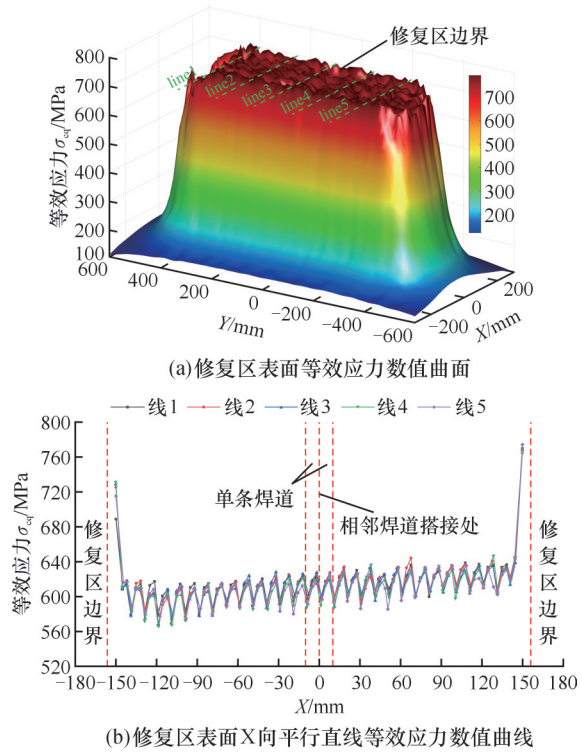


图9　冷却至室温的等效应力场分布

Fig.9　The equivalent stress field distribution when cool to room temperature

在修复区表面进行等效应力取样，得到等效应力数值曲面如图10a所示。因经历剧烈且复杂的热历程，修复区等效应力呈复杂波动特征，修复区外围热影响区存在明显的应力梯度。为解析上

述修复区表面应力波动的空间分布规律，以修复区表面 $Y=0$ 直线为基准，沿 Y 向两侧等间距(150 mm)选取线1～线5共5条 X 向平行直线，提取直线上各点等效应力数据，并绘制等效应力分布曲线，如图10b所示。在修复区与基体的结合边缘，由于局部结构突变，致使该区域的等效应力值明显高于其他区域[20]，数值基本高于700 MPa，除此区域外，等效应力整体数值分布于560～650 MPa范围内。在相邻焊道间的搭接微区，同样因存在局部结构突变，且在焊道沉积过程中经历残余应力叠加与较高的热循环峰值温度，其等效应力值更高[21]。而修复区边缘及各焊道搭接微区，由于界面熔合区通常存在组织粗大、成分偏析、微气孔、未熔合等冶金缺陷，外加宏观应力集中，致使修复区与基体结合边缘以及相邻焊道搭接微区在转轮体服役过程中存在较高风险。在转轮体运行时的动态载荷与极端环境作用下，该区域极易成为裂纹萌生与扩展的源头，长期处于高水平应力状态还会大幅缩减转轮体疲劳寿命，不仅增加设备维护成本与非计划停机频率，更对整个系统的安全稳定运行构成潜在威胁[22]。为有效调控上述应力集中区域，提高工程应用可靠性，建议在转轮体增材修复过程中或修复后进行对应的随焊或焊后处理，如随焊锤击、焊后锤击，释放残余应力或利用压力变形植入压应力抵消有害拉应力，现场条件允许也可进行局部热处理消减残余应力，以提高修复结构的整体疲劳寿命与安全裕度。



(a)修复区表面等效应力数值曲面

(b)修复区表面X向平行直线等效应力数值曲线

图10 修复区表面等效应力数值分析图

Fig. 10 Numerical analysis diagram of the equivalent stress on the surface of the repair zone

4 结论

针对大型结构件电弧增材再制造热力耦合有限元建模难题，构建了1∶1大型水轮机转轮体单层多道电弧增材修复有限元模型，阐明了转轮体电弧增材再制造过程中温度场、应力场及最终残余应力的演变规律，主要结论如下：

1)增材充型阶段，熔池中心的高温液相金属呈无应力状态，近熔池基体区域因受热膨胀，呈现压应力状态，且极值点位于熔池下方基体内部，为－138.323 MPa。伴随着热源移出，熔池及近熔池基体区域发生明显冷缩，转变为受拉应力状态，而远离熔池的基体区域，因先前升温较小，冷缩所形成拉应力不足以平衡热胀形成的压应力，保持低水平压应力状态。此外，伴随增材充型由修复区始端向末端持续推进，对于当前沉积焊道，因受前序焊道沉积预热作用，近熔池基体区域温度场分布逐渐趋于均匀，所受压应力水平明显降低，焊道沉积至中部时，压应力极值点降为－108.051 MPa；对于沉积所得前序焊道，伴随热源逐渐远离，各焊道依次发生冷却收缩，形成的修复区呈现整体拉应力状态，且离熔池越远，前序焊道对应的拉应力水平越高。

2)增材充型结束修复区整体冷却至室温阶段，伴随修复区增材充型结束，热源移出，修复区及热影响区发生整体冷缩，先前所受拉应力进一步积累，且应力值随冷却进程的加深呈逐渐升高趋势，而先前所受压应力的区域应力值则呈逐渐降低趋势，最终修复区及热影响区呈整体拉应力状态，且冷缩结束时刻，残余拉应力达到峰值(650～800 MPa)，部分相邻焊道搭接微区拉应力数值超过800 MPa。同时，因修复区沉积焊道存在时空坐标差异，从修复始端到末端，各沉积焊道经历的热循环次数逐渐减少，导致修复末端焊道拉应力水平更高。此外，纵横向越出修复区一定范围内的基体区域，因升温较小，冷缩受限，先前所受压应力未被完全平衡，最终呈低水平压应力状态(－50 MPa以内)，且压应力水平沿修复推进方向呈递减趋势。

3)增材修复结束时刻，修复区及热影响区存在明显的等效残余应力集中现象，工程中对转轮体进行增材修复时，建议增加随焊或焊后处理，如锤击或焊后热处理。修复区与基体结合边缘，以及相邻焊道间搭接微区，因存在局部结构突变，等

效残余应力值明显高于其他区(≥700 MPa),会成为再服役时裂纹萌生与扩展的危区,工程中须重点关注。

参考文献:

[1] XIONG Xiaochen, QIN Xunpeng, HUA Lin, et al. Grain Refinement and Strengthening Mechanisms of In-situ Follow-up Hammering-assisted Wire Arc Additive Manufacturing for Hydraulic Turbine Blade Repairing[J]. Metals and Materials International, 2023, 29(6): 1796-1814.

[2] HUANG Caisheng, HE Xiaolong, ZHANG Jianmin. Cavitation Pit Evolution Process of Epoxy and Polyurea Coatings on Mortar Substrates[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 104: 106813.

[3] BRIJKISHORE, KHARE R, PRASAD V. Prediction of Cavitation and Its Mitigation Techniques in Hydraulic Turbines—a Review[J]. Ocean Engineering, 2021, 221: 108512.

[4] 国家能源局. 汽轮机叶片、水轮机转轮焊接修复技术规程: DL/T 905—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 1-8.
National Energy Administration. Code of Repair Welding for Blade of Steam Turbine and Runner of Hydroturbine: DL/T 905—2016 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 1-8.

[5] VÁZ R F, TRISTANTE R, PUKASIEWICZ A G M, et al. Welding and Thermal Spray Processes for Maintenance of Hydraulic Turbine Runners: Case Studies[J]. Soldagem & Inspeção, 2021, 26: e2540.

[6] HU Zeqi, HUA Lin, QIN Xunpeng, et al. Molten Pool Behaviors and Forming Appearance of Robotic GMAW on Complex Surface with Various Welding Positions[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 1359-1376.

[7] 陈森昌, 张平, 张李超, 等. 机器人电弧增材系统修复破损零件研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 91-95.
CHEN Senchang, ZHANG Ping, ZHANG Lichao, et al. Research on Repairing Damaged Parts by Robotic Arc Additive System[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2023, 51(4): 91-95.

[8] 王华明. 金属增材制造技术及其对重大装备制造业的影响[J]. 中国工业和信息化, 2019(12): 54-56.
WANG Huaming. Metal Additive Manufacturing Technology and Its Influence on Major Equipment Manufacturing Industry[J]. China Industry & Information Technology, 2019(12): 54-56.

[9] XIONG Xiaochen, HU Zeqi, QIN Xunpeng, et al. In-situ Fabrication of Repairing Layers for Large Structures Using Follow-up Hot-hammering-assisted Wire Arc Additive Manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 94: 387-402.

[10] 熊晓晨, 周岩, 周祥曼, 等. 随动热锤辅助水轮机关键过流部件电弧增材再制造强塑协同调控[J]. 中国机械工程, 2025, 36(12): 3010-3016.
XIONG Xiaochen, ZHOU Yan, ZHOU Xiangman, et al. Strength-ductility Synergy Control of Key Overflow Components of Hydro-turbines by Follow-up Hot-hammering-assisted Wire Arc Additive Remanufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(12): 3010-3016.

[11] 刘倩, 卢秉恒. 金属增材制造质量控制及复合制造技术研究现状[J]. 材料导报, 2024, 38(9): 178-185.
LIU Qian, LU Bingheng. Review on Quality Control and Relevant Hybrid Technology in Additive Manufacturing of Metallic Materials[J]. Materials Reports, 2024, 38(9): 178-185.

[12] HAZEL B, BOUDREAULT E, COTE J, et al. Robotic Post-weld Heat Treatment for in Situ Repair of Stainless Steel Turbine Runners[C]//Proceedings of the 2014 3rd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. IEEE, 2014: 1-6.

[13] BAYAT M, DONG Wen, THORBORG J, et al. A Review of Multi-scale and Multi-physics Simulations of Metal Additive Manufacturing Processes with Focus on Modeling Strategies[J]. Additive Manufacturing, 2021, 47: 102278.

[14] SULI L, JIE X, ZHUANG G, et al. Temperature Field Simulation and Experiment of Sliding-pressure Additive Manufacturing Based on Joule Heat [J]. Rare Metal Materials Engineering, 2024, 53(2): 386-395.

[15] FRITSCHLE T, KAESS M, WEIHE S, et al. Investigation of the Thermo-mechanical Modeling of the Manufacturing of Large-scale Wire Arc Additive Manufacturing Components with an Outlook towards Industrial Applications [J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2025, 9(5): 166.

[16] SHUKLA P, DAGGUMATI S, KIRAN D V, et al. An Integrated Experimental and Computational Framework for Design and Analysis of WAAM Fabricated Structural Elements[J]. Structures, 2025, 79: 109437.

[17] FU Guangming, GU Jijun, LOURENCO M I, et al. Parameter Determination of Double-ellipsoidal Heat Source Model and Its Application in the Multi-pass Welding Process [J]. Ships and Offshore Structures, 2015, 10(2): 204-217.

[18] FANG Hongyuan, MENG Qingguo, XU Wenli, et al. New General Double Ellipsoid Heat Source Model[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(3): 361-368.

[19] GURMESA F D, LEMU H G. Literature Review on Thermomechanical Modelling and Analysis of Residual Stress Effects in Wire Arc Additive Manufacturing [J]. Metals, 2023, 13(3): 526.

[20] BRUGGEMAN K, KLINGBEIL N, PALAZOTTO A. Residual Stress Generation in Additive Manufacturing of Complex Lattice Geometries[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(8): 4088-4105.

[21] DANTIN M J, PRIDDY M W. A Rate- and Temperature-dependent Thermomechanical Internal State Variable Model of the Directed Energy Deposition Process [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(8): 4051-4064.

[22] NIU X, HE C, ZHU S P, et al. Defect Sensitivity and Fatigue Design: Deterministic and Probabilistic Aspects in Additively Manufactured Metallic Materials [J]. Progress in Materials Science, 2024, 144: 101290.

(编辑　王艳丽)

作者简介: 何　乐,男,2005年生,硕士研究生。研究方向为机械装备智能制造与再制造。E-mail: HeLe0419@outlook.com。
熊晓晨*(通信作者),男,1989年生,博士、讲师。研究方向为金属增材制造、水电机械设备增材修复与再制造。发表论文30余篇。E-mail: Xiaochen.Xiong@hotmail.com。

本文引用格式:

何乐,周岩,王卓,等. 大型水轮机转轮电弧增材再制造热力耦合数值模拟及残余应力分析[J]. 中国机械工程, 2026, 37(10): 2644-2651.

HE Le, ZHOU Yan, WANG Zhuo, et al. Thermo-mechanical Coupled Numerical Simulation and Residual Stress Analysis of Wire Arc Additive Remanufacturing for Large Hydraulic Turbine Runners[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(10): 2644-2651.