

DOI:10.7495/j.issn.1009-3486.2025.02.005

## 水轮机马氏体不锈钢叶片电弧堆焊 修复组织抗空蚀性能研究

胡 栋, 兰 箭

(武汉理工大学, 武汉 430070)

**摘要:** 针对水轮机 0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢叶片的空蚀失效问题, 研究了 RMD650 合金焊丝电弧堆焊工艺修复空蚀坑的修复效果。采用工作电压 18.8 V、工作电流 240 A、焊枪移动速度 10 mm/s、送丝速度 4.5 m/min 等堆焊工艺参数, 在 0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢板上制备单层和 15 层堆焊层, 研究了堆焊组织的力学性能及抗空蚀性能。实验结果表明: 单层堆焊层原始奥氏体晶粒为柱状, 15 层堆焊层原始奥氏体晶粒为等轴状, 而 15 层堆焊过程中, 冷却速度只会影响原始奥氏体晶粒形貌, 几乎不会影响最终的马氏体形成及其尺寸。显微硬度测试及核平均取向差 (kernel average misorientation, KAM) 分析结果表明: 15 层堆焊层硬度变化的主要原因是位错密度的变化。空蚀实验结果表明: 具有更高硬度的第 15 层堆焊层的抗空蚀性能更优。

**关键词:** RMD650 焊丝; 电弧堆焊; 硬度; 空蚀

中图分类号: TG441.8

文献标志码: A

文章编号: 1009-3486(2025)02-0034-06

## Research on cavitation erosion resistance of microstructure in Martensitic stainless steel hydraulic turbine blades repaired by arc cladding

HU Dong, LAN Jian

(Wuhan Univ. of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** To address the cavitation failure of 0Cr13Ni5Mo martensitic stainless steel blades in water turbines, the repair effectiveness of RMD650 alloy wire arc welding for cavitation pit restoration was investigated. The welding parameters of the study included a working voltage of 18.8 V, a working current of 240 A, a welding torch travel speed of 10 mm/s, and a wire feed speed of 4.5 m/min. Single-layer and 15-layer weld cladding were prepared on 0Cr13Ni5Mo martensitic stainless steel plates to study the mechanical properties and cavitation resistance. The results show that the 15-layer cladding process transforms the columnar original austenite grains formed in the single-layer cladding into equiaxed grains, and during the 15-layer cladding process, the cooling rate only affects the morphology of the original austenite grains, with minimal impact on the final martensite formation and its size. Micro hardness testing and KAM analysis results indicate that the hardness variation during the 15-layer cladding process is primarily due to changes in dislocation density. The Cavitation tests revealed that the 15th layer, with higher hardness, demonstrates superior cavitation resistance.

**Key words:** RMD650 welding wire; arc cladding; hardness; cavitation erosion

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-11-18。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975439)。

作者简介: 胡 栋 (1998-), 男, 硕士生。

通信作者: 兰 箭 (1972-), 男, 教授, 博士生导师。

水力发电是可再生清洁能源,能有效降低碳排放,水电站的数量及年发电量逐年增长,2017年全球水力发电量占比达 52.95%<sup>[1]</sup>。水轮机叶片是水电站能量转换的关键构件,由于长期承受水流压力和冲刷,极易出现空蚀破坏现象<sup>[2]</sup>。

有关叶片表面覆层提升水轮机服役性能的表面熔覆工艺已有广泛研究,常见的表面覆层工艺有热喷涂<sup>[3]</sup>、激光熔覆<sup>[4]</sup>等。除了表面覆层工艺的多样性,覆层材料的选择也是多样化的,叶片表面覆层材料包括陶瓷材料和钴基、镍基材料、高铬合金。Feller 等<sup>[5]</sup>的研究表明,含 d 带金属钴、铬和钨的单相合金具有高共价键、低层错能和高耐腐蚀性能,具有迄今为止已知的最高抗空蚀性能。其中,Co 和 Cr 在空蚀发生前有较长的孕育期和更低的空蚀速率。

叶片空蚀坑的修复往往采取电弧堆焊工艺来实现<sup>[6]</sup>,或是通过多层多道次的补焊工艺<sup>[7]</sup>。不同于传统的焊接过程,电弧堆焊工艺是要经历若干层不断堆叠的过程,先前已堆焊的每一层会部分或者整体承受后继堆焊的热作用<sup>[8]</sup>。随着计算机技术的不断发展,结合机器人硬件的不断升级,电弧堆焊已经能够完成复杂叶片曲面结构凹坑的修复<sup>[9]</sup>。

针对多数小型水电站检修中叶片修复周期短和修复费用低的特殊要求,根据多种元素抗空蚀性能的对比和各自成本的比较,本文尝试使用 RMD650 合金焊丝,研究电弧堆焊修复不锈钢叶片空蚀坑的修复效果。

## 1 实验材料与方法

实验材料为锻态 0Cr13Ni5Mo 不锈钢(基板)和商用 RMD650 焊丝,具体成分如表 1 所示。

表 1 基板及 RMD650 焊丝的化学成分(质量分数)  
Tab. 1 Chemical composition of substrate and RMD650 welding wire(mass fraction)

材料	C	Si	Mn	Cr
0Cr13Ni5Mo	<0.03	0.32	0.43	12.96
RMD650	0.12	0.36	1.09	9.05
材料	Ni	Mo	Co	
0Cr13Ni5Mo	5.13	0.76	—	
RMD650	1.33	2.23	0.50	

基板尺寸为 300 mm×200 mm×20 mm,硬度为 343.3 HV。堆焊前打磨去除氧化皮及污渍以便于起弧。电弧堆焊设备为 miler Delta weld865,堆

焊过程在 95% Ar 和 5% CO<sub>2</sub> 混合保护气体下进行,流量为 15 L/min。单层及 15 层堆焊层实物如图 1 所示。15 层堆焊层每一层的堆焊轨迹如图 1(b)中箭头所示,每层堆焊结束后等待 40 s。堆焊工艺参数为:电流 200 A,电压 18.8 V,焊枪速度 10 mm/s,焊层厚度 3 mm,送丝速度 4.5 m/min,输入热量 764.7 J/mm,焊道宽度 6.8 mm。

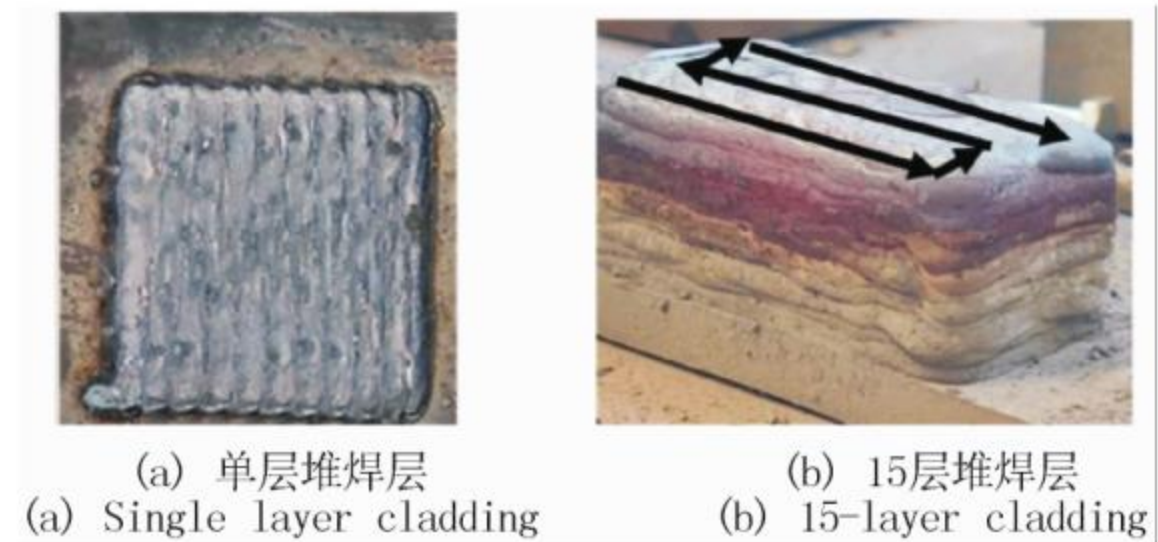


图 1 电弧堆焊  
Fig. 1 Arc cladding

采用 10% 硝酸酒精腐蚀试样,用光学显微镜来观察奥氏体晶界。硬度及电子背散放射衍射(electron backscatter diffraction, EBSD)试样选取如图 2(a)所示,分别从基板、单层及 15 层试样上选取空蚀试样(见图 2(b))。

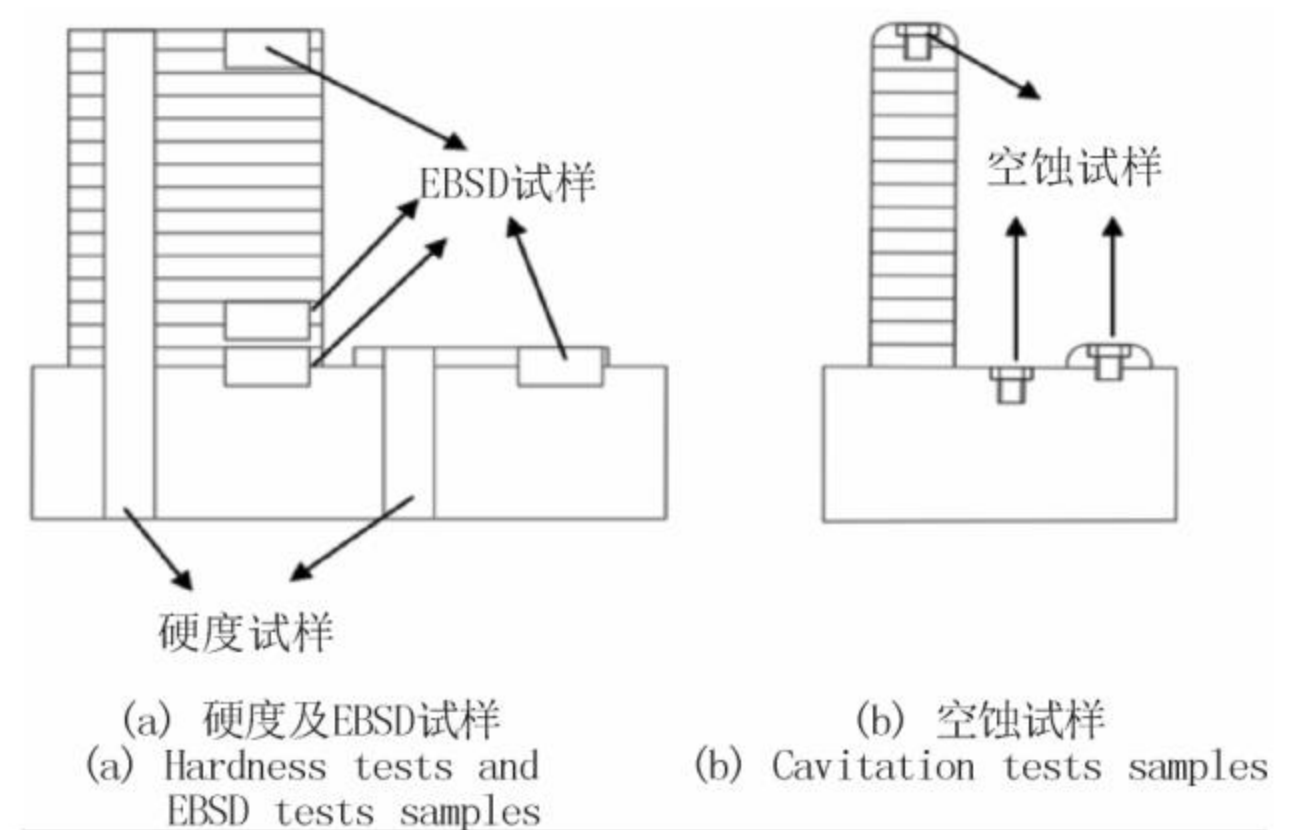


图 2 试样选取方法  
Fig. 2 Samples selection method

利用 HXD-1000TM 维氏显微硬度计,测试单层堆焊层及 15 层堆焊层每一层的硬度,每一层测试均布 5 个点。在第 1、第 3、第 15 层分别选取 10 mm×5 mm×5 mm 的试样,打磨抛光后于 10% 高氯酸水溶液中电解 20 s,最终在 JSM-IT800 上进行 EBSD 测试。空蚀试样尺寸按照 GB/T 6383—2009 进行机械加工。在空蚀实验之前,将试样的表面使用 320~2 000 目的砂纸打磨,再用 5 μm、2.5 μm 金刚石抛光剂进行抛光。在空蚀实验过程中,仪器的频率保持在 20 kHz,振幅为 50 μm。样品没入水中,被测表面放置在水面下 12±4 mm,为了消除高频振动过程中产生的热量,循环冷却维持水温在室温。每经过 2 h

将样品干燥和洁净后,用精度为 0.000 1 g 的电子天平称重 5 次,取平均值记录为该次质量,计算质量损失。用扫描电子显微镜 JSM-IT800 观测单层及第 15 层堆焊层样品表面 2 h 空蚀实验后的表面形貌。

## 2 15 层电弧堆焊的有限元模型

在商业软件 Simufact. Welding 软件中建立 15 层堆焊的有限元模型,分析 15 层堆焊过程中的温度变化(见图 3)。

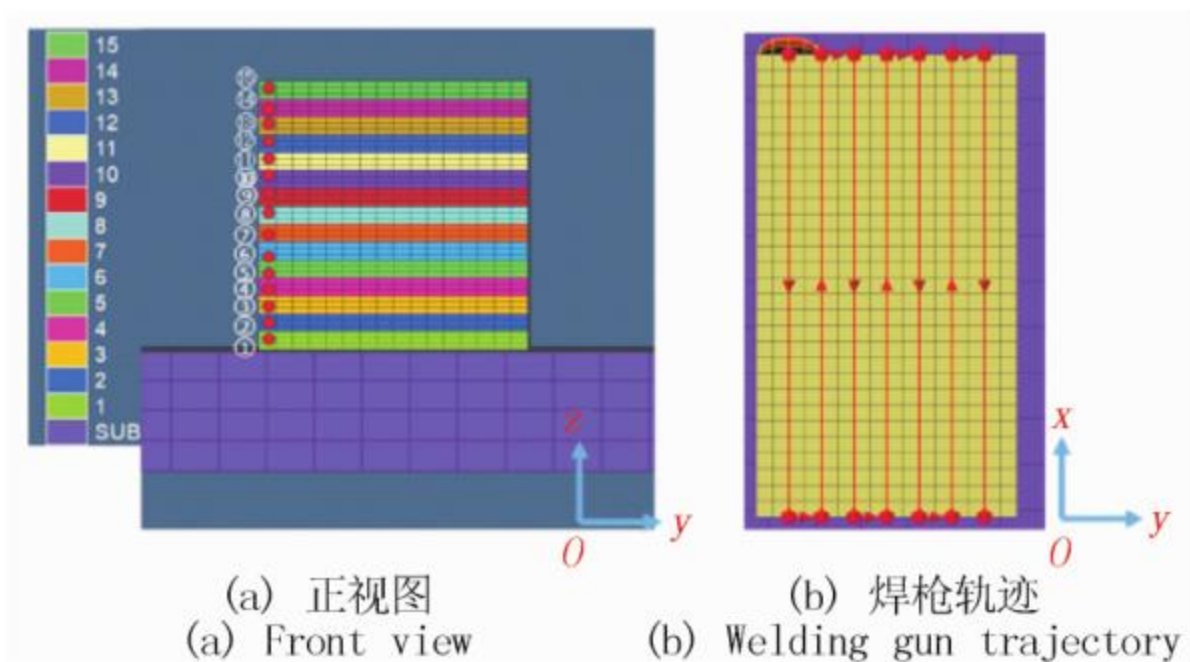


图 3 15 层堆焊层有限元模型  
Fig. 3 Finite element model of 15-layer cladding

采用矩形截面近似代替焊道截面,每一层选

取一个点为参考点,取点及其标号如图 3(a)所示。模拟采用双椭球热源模型,具体参数为:前轴长 1.2 mm,后轴长 3 mm,宽度为 5 mm,深度为 3 mm,电弧效率为 0.75。每一层的焊枪移动轨迹如图 3(b)所示。

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 15 层堆焊层温度变化情况

从 800 °C 冷却至 500 °C 的速度将会影响奥氏体的尺寸以及形态,下面分析该温度区间的冷却速度。从第 1 层和第 15 层的整个热历程可知:第 1 层经历两次从 800 °C 冷却至 500 °C 的过程,第一次冷却速度为 85.39 °C/s,第 2 层以后第二次冷却速度为 49.45 °C/s;14 层以后的冷却速度进一步下降,第 15 层冷却速度仅为 2.43 °C/s,约为第 1 层冷却速度的 4.87% (见图 4(b))。由图 4(c) 分析可知,从第 1 层至第 15 层,最后一次从 800 °C 到 500 °C 的冷却速度降低;前 3 层的冷却速度大于 30 °C/s,第 4—6 层的冷却速度在 5~10 °C/s,第 7—15 层的冷却速度在 2~5 °C/s。

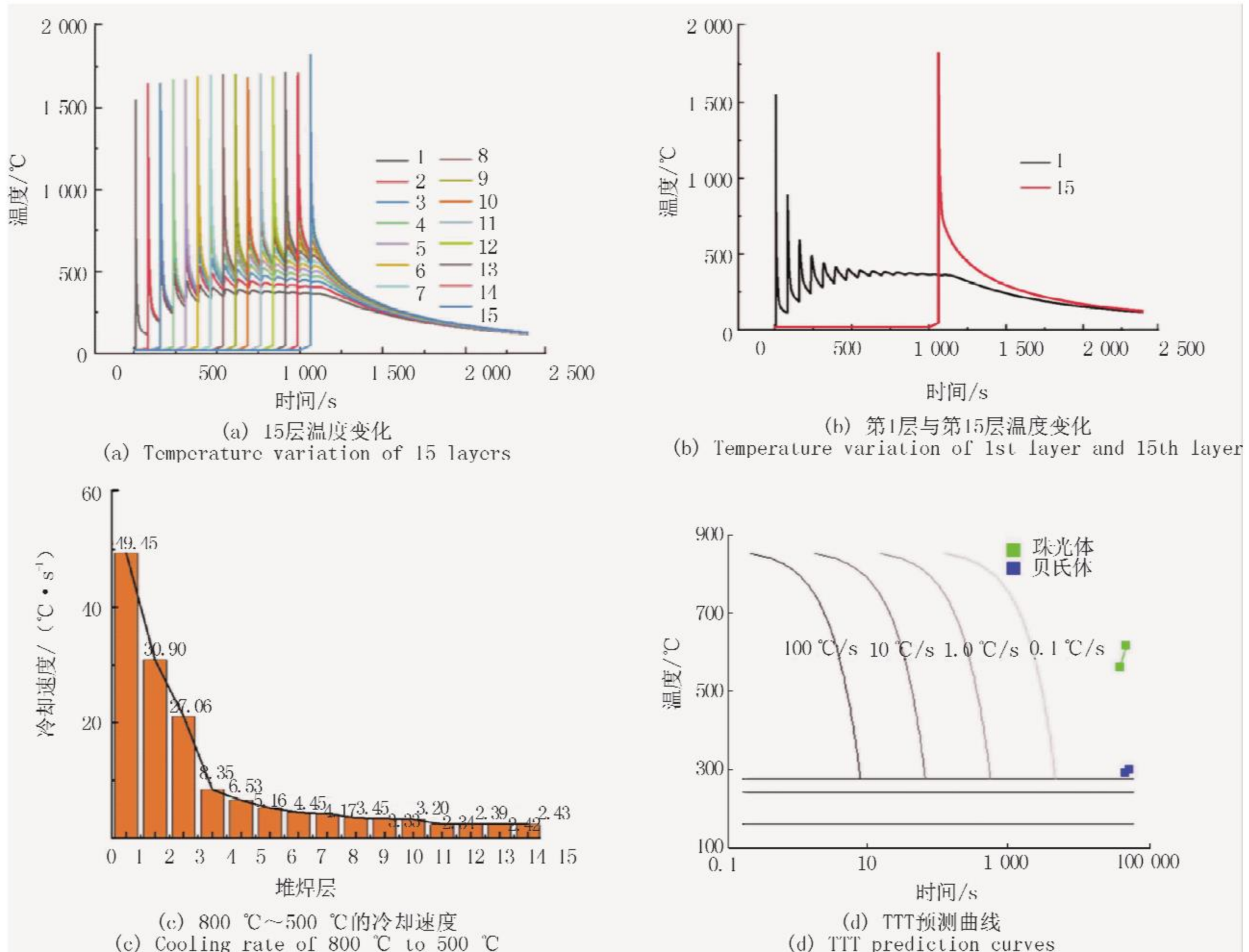


图 4 堆焊层的温度变化  
Fig. 4 Temperature variation of arc cladding

利用 Jmatpro 软件预测 RMD650 合金不同冷却速度下的 TTT 曲线(见图 4(d)),结合图 4(c)分析可知,15 层堆焊层在设定的堆焊参数下,每一层的冷却速度大于 0.1 °C/s,RMD650 堆焊组织最终均为马氏体。

### 3.2 电弧堆焊层微观组织分析

将实验的第 1 层焊道形状与堆焊过程模拟中的第 1 层焊道形状进行对比(见图 5),具体结果如下:实验焊道宽度约为 10.56 mm,模拟焊道宽度约为 10 mm;实验焊道深度约为 3.5 mm,模拟焊道深度约为 3 mm。可见,模拟结果与实际情况吻合,堆焊模拟能够反映实际堆焊过程。

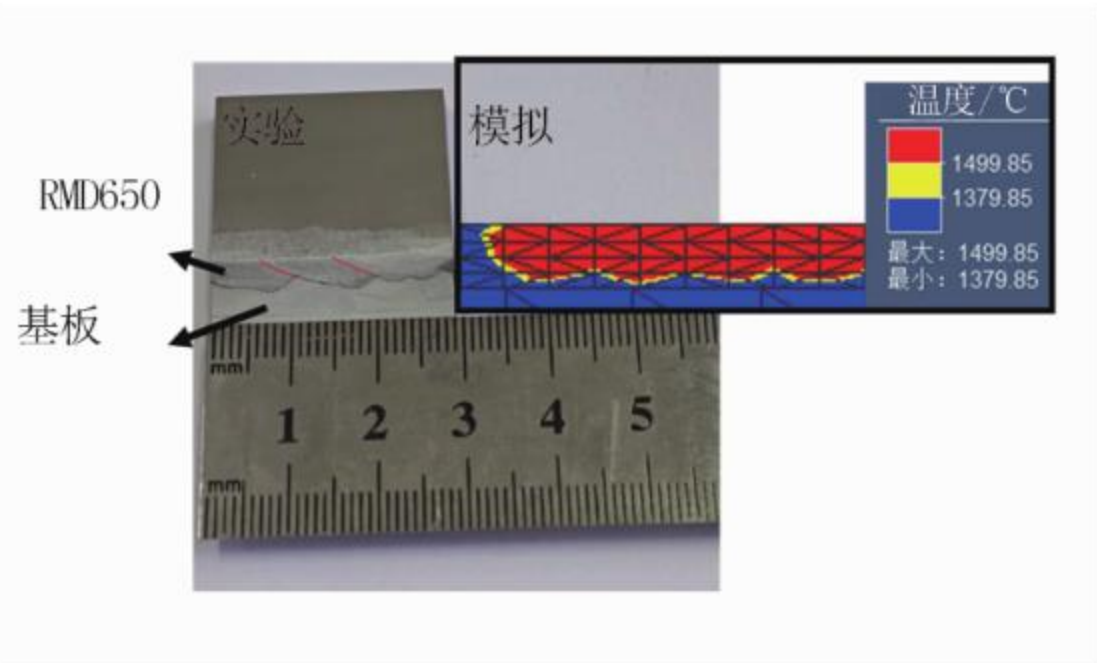


图 5 实验与模拟的焊道形状对比  
Fig. 5 Comparison of experimental and simulated weld bead shapes

RMD650 堆焊组织的金相图片如图 6 所示。

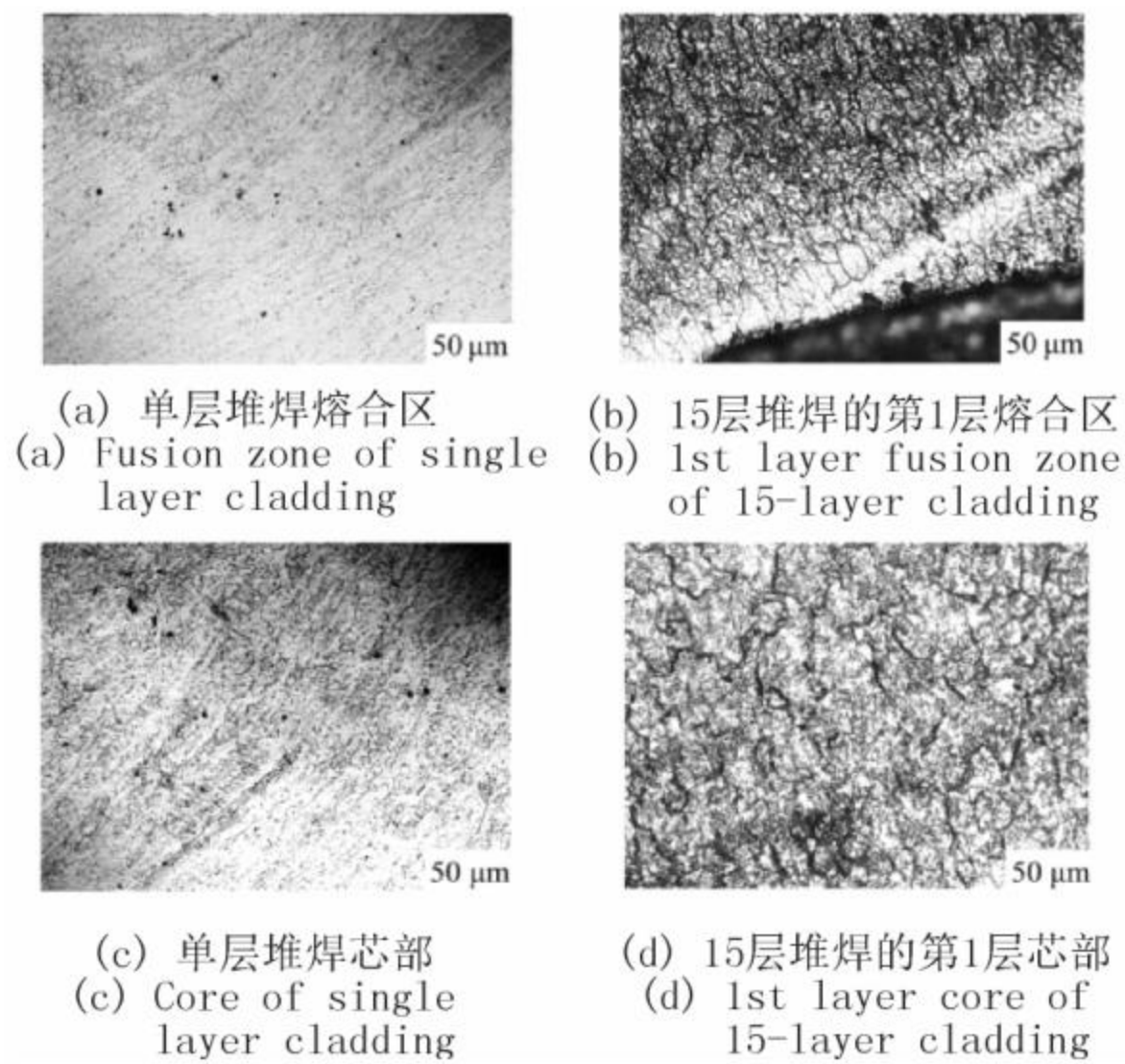


图 6 RMD650 堆焊组织的金相图片  
Fig. 6 Metallographs of RMD650 cladding

单层堆焊熔合区的金相组织如图 6(a)所示,其原始奥氏体晶粒为柱状。在堆焊过程中大部分柱状晶粒首先在基体表面形核,结晶前沿温梯度高且结构过冷度低,最终垂直于熔合线表面生长形成柱状晶(见图 6(c))。

15 层堆焊层试样的第 1 层原始奥氏体晶粒

是等轴晶粒(见图 6(b))。第 1 层原始奥氏体晶粒形状与单层不同的原因在于:第 1 层经历了从 117.1 °C 升温至 885.6 °C 的过程,这一过程中可能使晶粒形状由柱状晶变为等轴晶。由图 4(c)可见,前 3 层的冷却速度变化大,故第 1、第 2 和第 3 层的原始奥氏体晶粒形貌变化显著(见图 6(b)、7(a)、7(b))。第 4 层以后,冷却速度缓慢降低,第 6 层和第 7 层的原始奥氏体晶粒形貌变化较小(见图 7(c)、7(d))。故 15 层堆焊过程中的奥氏体晶粒将从柱状晶变为等轴晶,冷却速度会影响原始奥氏体晶粒形貌。

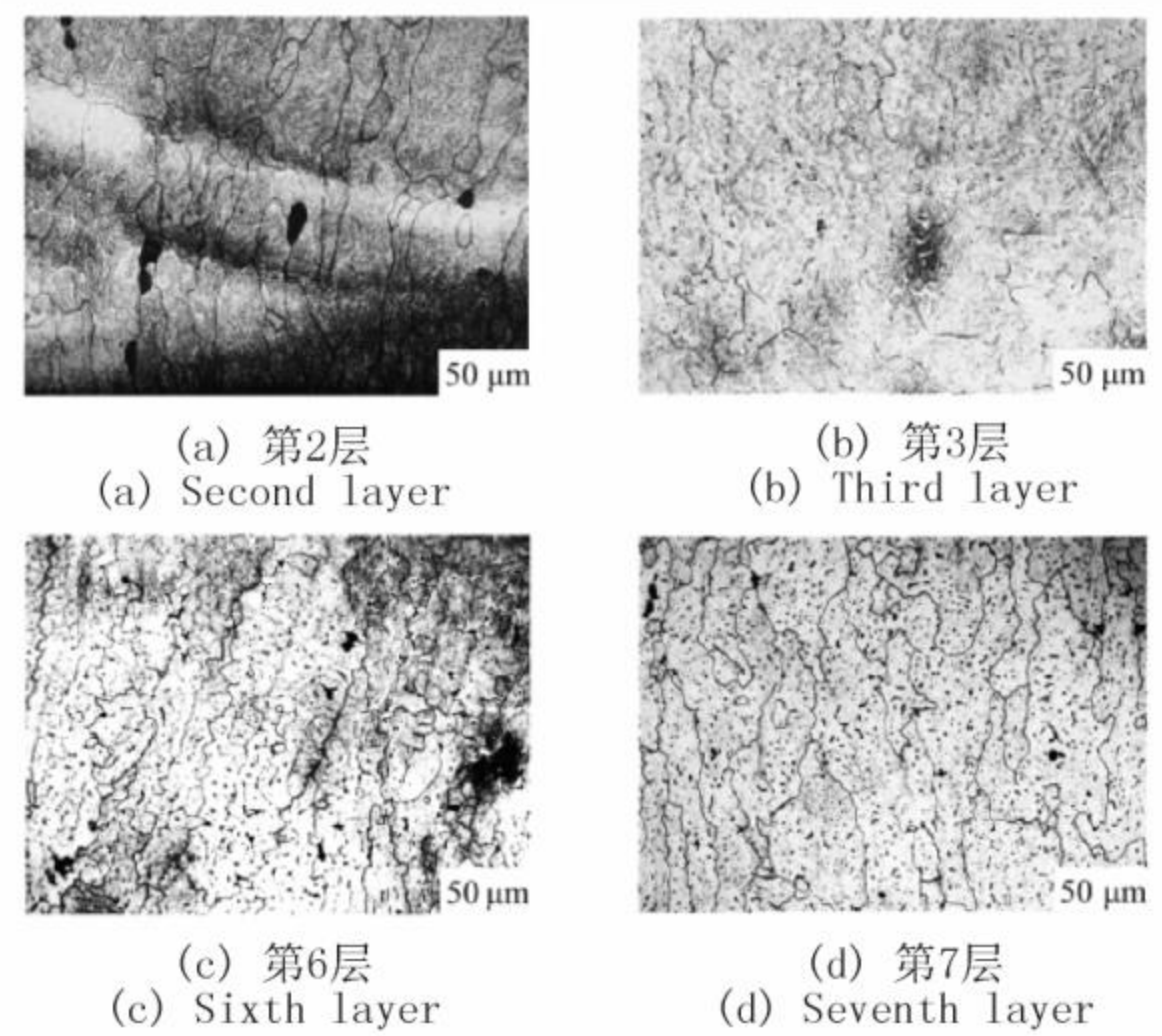


图 7 不同堆焊层的金相图片  
Fig. 7 Metallographs of different cladding layers

利用 EBSD 技术获取了单层及 15 层堆焊层中第 1 层、第 3 层、第 15 层的马氏体尺寸(见图 8)。

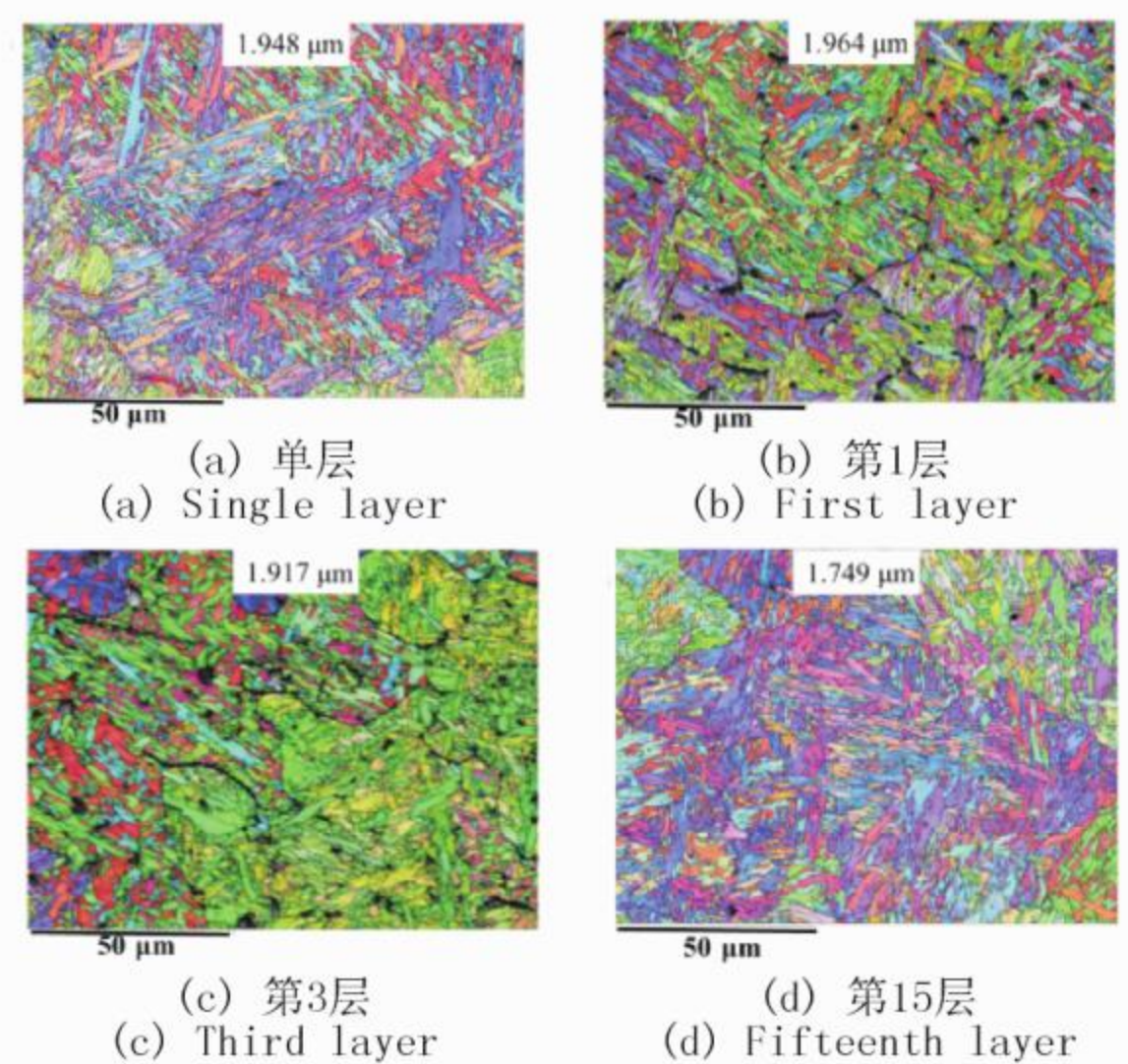


图 8 不同堆焊层的马氏体尺寸分析  
Fig. 8 Analysis of Martensite size of different cladding layers

由图 8 可见:无论是单层还是第 15 层组织,通过电弧堆焊工艺形成得到的均为细小的马氏体

组织;单层及 15 层堆焊层中第 1 层、第 3 层、第 15 层的马氏体尺寸分别为 1.948、1.964、1.917、1.749  $\mu\text{m}$ ,单层与 15 层的马氏体尺寸相比变化不大,因此可以粗略地认为马氏体尺寸对于单层及 15 层的性能贡献是一致的。

除了马氏体尺寸,位错密度大小也会影响堆焊层最终的表面硬度,可以利用核平均取向差(kernel average misorientation, KAM)进行分析统计。单层及 15 层堆焊层中第 1 层、第 3 层、第 15 层的 KAM 分析如图 9 所示。其中,15 层堆焊层的第 1 层 KAM 值最高,第 3 层的 KAM 值最低。可能的原因是:第 1 层的冷却速度最快,之后虽然经历了 500 s 左右的保温过程,但保温温度为 300~350  $^{\circ}\text{C}$ (见图 4(b)),温度较低,不能有效地释放内应力;虽然第 3 层的冷却速度较快,但后续的保温温度超过 450  $^{\circ}\text{C}$ (见图 4(a)),在保温过程中内应力降低。

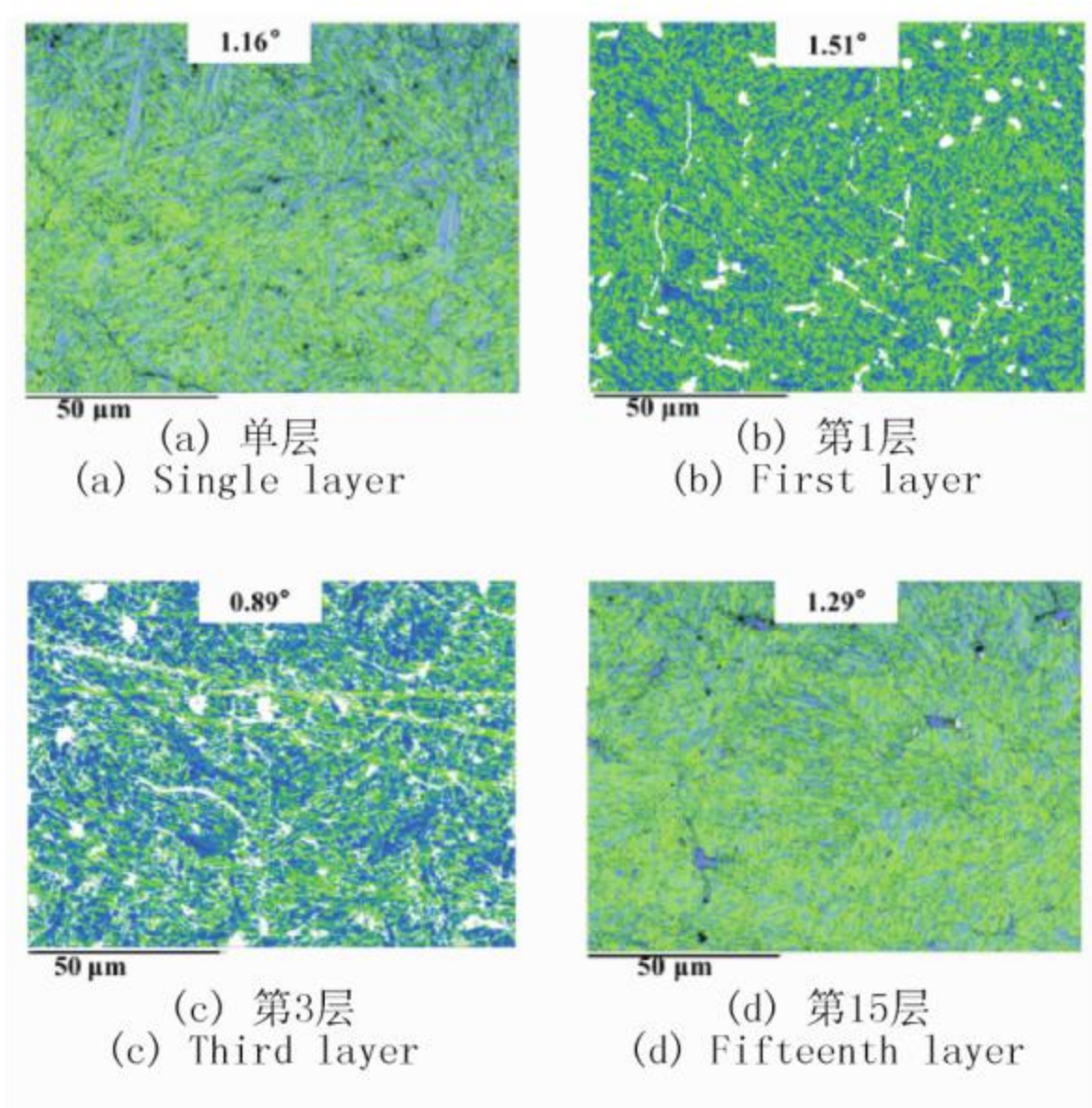


图 9 不同堆焊层的 KAM 分析  
Fig. 9 KAM analysis of different cladding layers

可以根据 KAM 值(缩写为  $K$ )计算位错密度<sup>[10]</sup>,即

$$\rho_d = \alpha \frac{K}{bS} \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为位错密度常数,此处选为 3<sup>[11]</sup>;  $b$ 为伯氏矢量,取 0.249 nm;  $S$ 为 EBSD 扫描步长,实验中为 0.25  $\mu\text{m}$ 。

计算可得不同堆焊层的位错密度如下:单层为  $9.80 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ,第 1 层为  $1.27 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ ,第 3 层为  $7.48 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ,第 15 层为  $1.09 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ 。第 1 层、第 3 层、第 15 层的位错密度分别约为单层的 1.29、0.76、1.11 倍。

### 3.3 电弧堆焊层硬度及抗空蚀性能评估

电弧堆焊层单层和第 15 层表面硬度测试结果如图 10(a)所示。单层的硬度为 512.50 HV,15 层堆焊层中第 1 层、第 3 层、第 15 层的硬度分别为 558.41、486.42、537.8 HV。

根据文献[10-11]可计算出 15 层堆焊层中第 1 层、第 3 层和第 15 层相较于单层堆焊层因位错密度引起的硬度变化,即

$$H_v = 0.4 \times (\sigma + 110) \quad (2)$$

式中: $\sigma$ 为拉抗强度, $\sigma = \rho_d M G b \rho_d^{1/2}$ ,其中  $\rho_d$ 为常数取 0.25,  $M$ 为泰勒因子取 3,  $G$ 为材料的剪切弹性模量取 80 GPa<sup>[10]</sup>。15 层堆焊层中第 1 层、第 3 层、第 15 层与单层的硬度差值分别为 29.6、-27.48、11.72 HV,硬度测试中的实验差值分别为 45.91、-26.08、25.3 HV。可见,硬度的变化与位错密度有关。

基板 0Cr13Ni5Mo 合金和 RMD650 焊丝单层及 15 层堆焊层空蚀 10 h 后的质量损失如图 10(b)所示。

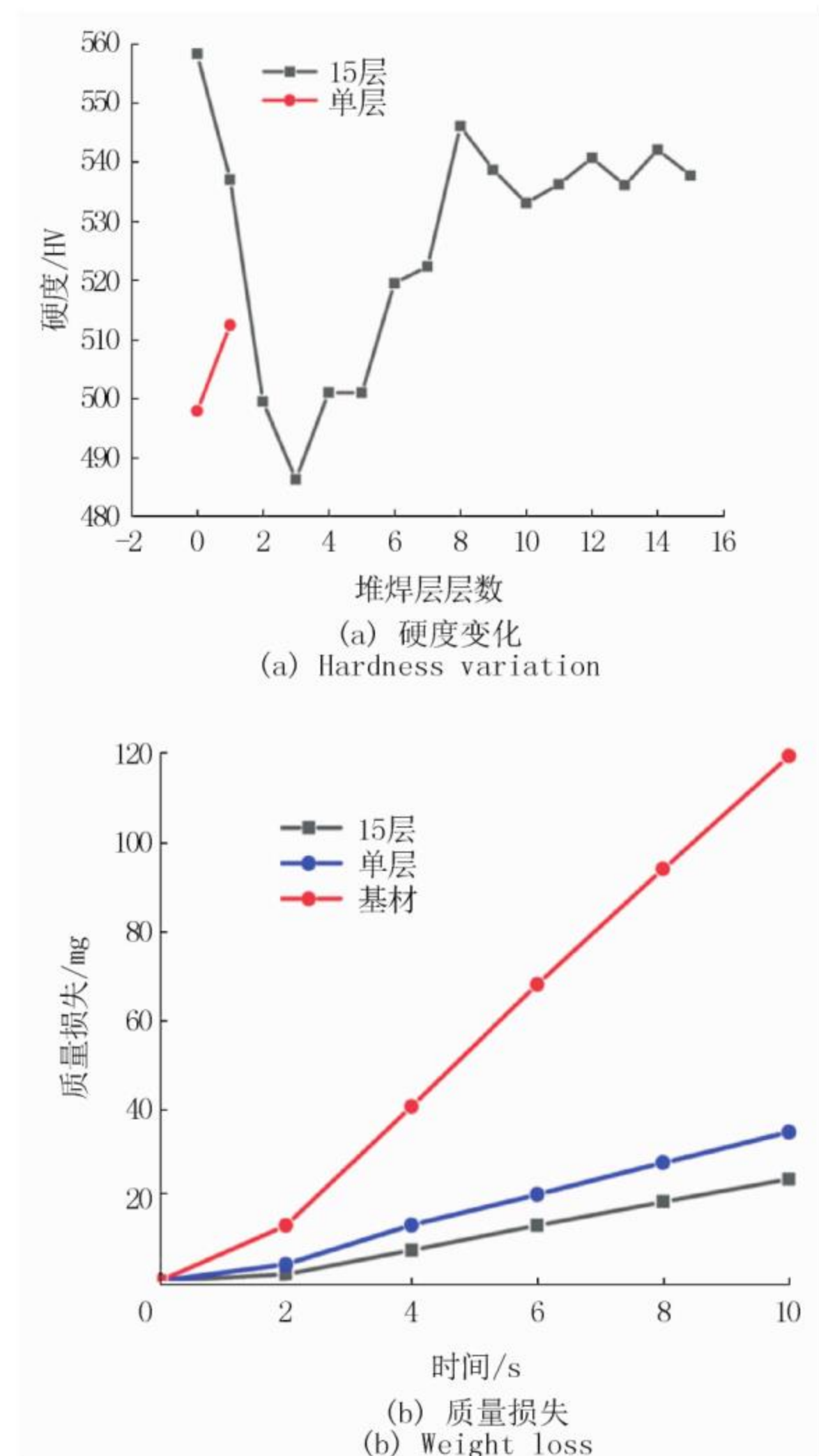


图 10 空蚀 10 h 的测试结果  
Fig. 10 Test results of 10 h cavitation erosion

由图 10(b)可见,15 层堆焊层表现出优异的抗空蚀性能,尤其是第 15 层堆焊层展现了最佳的抗空蚀性能,空蚀 10 h 后的材料总质量损失进一步降低到 22.92 mg,仅为基材损失的 19.37%。

空蚀 2 h 后的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图更直观地展示了单层与第 15 层堆焊层抗空蚀性能的差异 (见图 11)。单层表面被高压微射流冲击呈现更细小的颗粒状,形成了更多的孔洞 (见图 11(a)); 第 15 层表面保留了更多的原始材料,形成的孔洞也更少 (见图 11(b)), 这进一步证实表面硬度更高的第 15 层具有更好的抗空蚀性能。

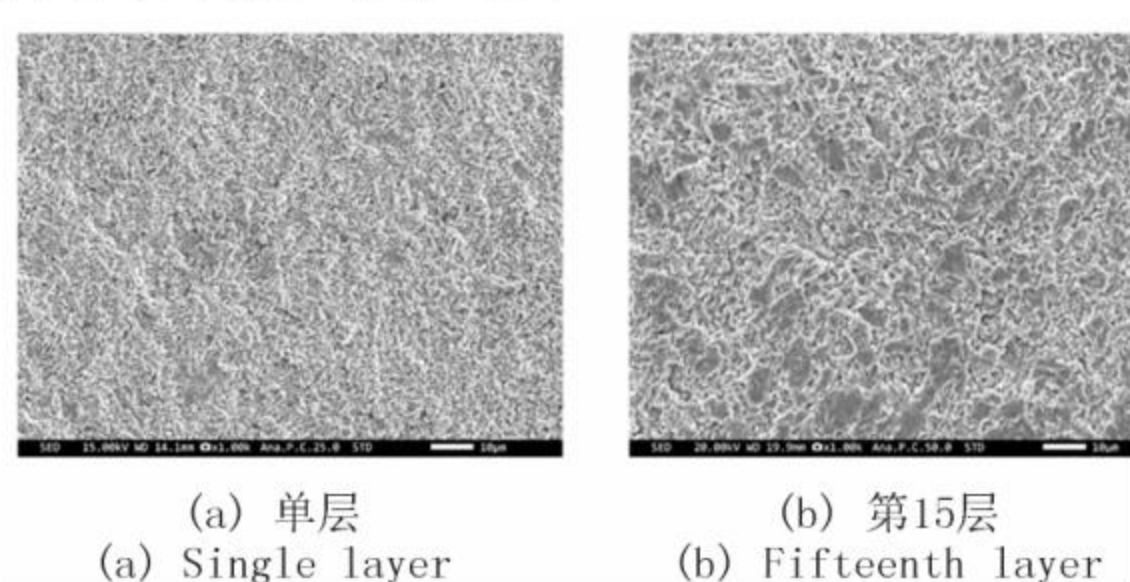


图 11 空蚀 2 h 后 SEM 形貌

Fig. 11 SEM morphology after 2 h cavitation erosion

## 4 结 论

综上,本文主要研究结论如下。

1) 通过使用 RMD650 合金材料对水轮机叶片进行多层堆焊修复,有效提升了其抗空蚀性能,15 层堆焊层空蚀 10 h 后,材料的总质量损失与基材相比极大降低,仅 22.92 mg,为水力发电站关键部件的维修提供了一种有效新方法。

2) 15 层堆焊工艺能将 RMD650 堆焊层中单层的柱状原始奥氏体晶粒改变为等轴状。结合金相及 EBSD 马氏体尺寸分析可知,冷却速度的快慢只会影响原始奥氏体晶粒的形貌,对最终的马氏体尺寸几乎不产生影响;由 KAM 及硬度测试分析发现,单层及 15 层的第 1 层、第 3 层、第 15 层的硬度变化主要与位错密度的改变有关。

3) 单层及 15 层空蚀后的 SEM 形貌差异进一步证明,表面硬度提高能有效减少材料的质量损失,提升材料的抗空蚀性能。

### 参考文献 (References):

[1] LIAN Jijian, ZHANG Yusheng, MA Chao, et al. A review on recent sizing methodologies of hybrid

renewable energy systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019,199:112027.

[2] BAI Lixin, YAN Jiuchun, ZENG Zhijie, et al. Cavitation in thin liquid layer: A review [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020,66:105092.

[3] LIU Xiaobin, KANG Jiajie, YUE Wen, et al. Cavitation erosion behavior of HVOF sprayed WC-10Co4Cr cermet coatings in simulated sea water [J]. *Ocean Engineering*, 2019,190:106449.

[4] DING Hongqin, TANG Qing, ZHU Yi, et al. Cavitation erosion resistance of 316L stainless steel fabricated using selective laser melting [J]. *Friction*, 2021,9(6):1580-1598.

[5] FELLER H G, KHARRAZI Y. Cavitation erosion of metals and alloys [J]. *Wear*, 1984,9(3):249-260.

[6] SILVA F G D, BRAGA E M, FERRARESI V A, et al. Coating weld cavitation erosion resistance using austenitic stainless steel and cobalt alloys deposited by GMAW and CW-GMAW [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022,44:569.

[7] 胡德江,李伟,沈华哲,等.某抽水蓄能电站转轮叶片汽蚀分析及修复 [J]. *水电站机电技术*,2020,43(7):8-10.

HU Dejiang, LI Wei, SHEN Huazhe, et al. Analysis and repair of cavitation of runner blades in a pumped storage power station [J]. *Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station*, 2020, 43(7):8-10. (in Chinese)

[8] HÖGSTRÖM M, FADAEI A, RAHIMI A, et al. Proposal and assessment of a multiple cycle-continuous cooling transformation (MC-CCT) diagram for wire arc additive manufacturing of thin walls [J]. *Metals*, 2023, 13(9): 1533.

[9] MARQUES D A, OLIVEIRA J P, BAPTISTA A C. A short review on the corrosion behaviour of wire and arc additive manufactured materials [J]. *Metals*, 2023,13(4):641.

[10] 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*, 2022,29(6):1796-1814.

[11] GALINDO-NAVA E, RIVERA-DÍAZ-DEL-CASTULLO P. Understanding the factors controlling the hardness in martensitic steels [J]. *Scripta Materialia*, 2016,110: 96-100.