原位热轧和热循环对电弧增材制造低合金钢微观组织和力学性能的影响

王锐[1]，任杰[2, 3]，王义朋[1]，祝弘滨[2]，李红[1]，ERIKA Hodúlová[4]

1.北京工业大学材料科学与工程学院　北京　100124
2.中车工业研究院有限公司　北京　100070
3.中车科技创新（北京）有限公司　北京　100096
4.斯洛伐克科学院　斯洛伐克　84513

摘要：通过应用原位热轧辅助电弧增材制造技术，采用ER55-B2低合金钢焊丝对电动机轴进行增材再制造。这一技术路径旨在通过精确控制的电弧沉积与即时热轧处理，实现电动机轴性能的恢复与提升。通过单层和双层试样的对比研究，揭示原位热轧和热循环对低合金钢增材组织和力学性能的影响。结果表明：没有轧制时的组织主要为板条马氏体结构，轧制后的板条马氏体变得破碎和细化，在热循环的作用下可进一步转变为回火马氏体。双层轧制试样的奥氏体晶粒以等轴晶为主，并且有不连续动态再结晶的特征，相比单层轧制样品，原奥氏体平均晶粒尺寸从95.1μm显著降低至32.8μm。此外，在双层轧制样品沉积层的稀释区，显微硬度明显下降。经过轧制后的试样与未轧制的试样相比，抗拉强度从734MPa增加到856MPa，伸长率略微降低。

关键词：电弧增材制造；原位热轧；低合金钢；微观组织；力学性能

Effect of in situ hot rolling and hot cycling on microstructure and mechanical properties of low alloy steel manufactured by arc additive

WANG Rui[1], REN Jie[2, 3], WANG Yipeng[1], ZHU Hongbin[2], LI Hong[1], ERIKA Hodúlová[4]

1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China
2. CRRC Industrial Academy Co., Ltd., Beijing 100070, China
3. CRRC Technology Innovation (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100096, China
4. Slovak Academy of Sciences, 84513, Slovakia

Abstract: Utilizing in-situ hot rolling-assisted arc additive manufacturing technology, this study conducted additive remanufacturing of motor shafts with low-alloy steel wire. Through comparative analysis of single-layer and double-layer samples, the study aimed to elucidate the effects of in-situ hot rolling and thermal cycling on the microstructure

基金项目：中车集团重点科研项目（CIJS23-KJ011）；航空科学基金（2024M049075001）。

第一作者：王锐，硕士研究生，从事电弧-轧制复合增材修复，E-mail：m15933756387@163.com。

通信作者：任杰，博士，主要从事电弧-轧制复合增材修复以及铝合金增材制造研究，E-mail：jieren921110@gmail.com。

and mechanical properties of low-alloy steel. The results demonstrated that the microstructure without rolling was predominantly lath martensite. After undergoing rolling, the lath martensite became fragmented and refined, and could further transform into tempered martensite under the influence of thermal cycling. The austenitic grains in the double-layer rolled samples were primarily equiaxed and exhibited characteristics of discontinuous dynamic recrystallization. Compared to the single-layer rolled samples, the average grain size of the original austenite in the double-layer rolled samples was significantly reduced from 95.1μm to 32.8μm. Furthermore, in the dilution zone of the cladding layer of the double-layer rolled samples, a notable decrease in microhardness was observed. When comparing the rolled samples to the unrolled samples, the tensile strength increased from 734MPa to 856MPa, with a slight reduction in elongation.

Keywords: wire-arc additive manufacturing; in-situ rolling; high-strength low-alloy steel; microstructure; mechanical property

1 序言

轴向组件广泛应用于需要旋转运动、动力传输或结构支撑的众多行业和机械系统。在工作过程中，通常需要承受极端温度、巨大压力、扭矩、振动、热机械应力和局部冲击，并且容易出现表面损伤、疲劳磨损和点蚀，严重影响长期服役可靠性和耐用性[1, 2]。因此，轴向部件的表面增强和再制造是保持和增强材料性能以延长使用寿命的一种经济有效的方法[3, 4]。

电弧增材是再制造最常用的方法之一，其材料利用率以及成形效率高，成本较低。但是这种方法会导致沉积层中存在一定的冶金缺陷，如裂纹、未熔合等，这些缺陷在轴类件使用过程中会产生裂纹源，最终导致断裂，减少其使用寿命[5, 6]。另外，电弧增材再制造后的修复组织一般都是以柱状晶为主的焊接组织，会导致其各项力学性能低于锻造成形的车轴。

研究表明，将一些辅助机械场引入到电弧增材中可以克服传统电弧增材制造的局限性[7, 8]。这种方法为操控微观结构和改变残余应力状态提供了一种有效策略，从而提升了整体的力学性能。铝合金[9]、钛合金[10]、镍基高温合金和不锈钢在内的多种金属材料使用这种方法展现了其有效性。低合金钢在工业领域应用广泛，通过变形诱导晶粒细化和相变，以及与通过控制加热和冷却周期实现的微观结构均匀化相结合，复合增材制造在提高增材构件的力学性能方面具有巨大潜力。

本文将电弧增材与轧制相结合，研究电弧增材低合金钢的显微组织和力学性能，讨论引入轧制和热循环作用对试样组织结构和力学性能的影响。

2 试验过程

2.1 试验材料及方法

本文采用ϕ1.2mm的ER55-B2低合金钢焊丝，修复尺寸为ϕ140mm×1000mm的高强度低合金钢42CrMo电动机轴。其化学成分见表1。

表1 基体和焊丝化学成分（质量分数） (%)

元素	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
42CrMo	0.38	0.5	0.17	1.2	0.3	0.25	余量
ER55-B2	0.08	0.54	0.54	1.44	0.021	0.52	余量

复合增材再制造平台由焊接系统和轧制系统组成，如图1所示。由图1可知，轧制系统由3个轧辊组成，轧辊沿轴的表面环向分布，顶部的轧辊起到轧制作用，底部的2个轧辊起到支撑作用。沉积电源为林肯直流脉冲TIG焊机INVERTEC CC400-TP。沉积前，电动机轴表面用丙酮抛光清洁。沉积工艺参数为：焊接电流220A，电弧电压14.3V，送丝速度175cm/min，沉积速度360mm/min，搭接率0.15。采用工业纯氩保护气，流量为15L/min，见表2。轧制力为25kN。力传感器被集成到轧制系统中以实时监测力的变化，通过控制焊枪与轧辊之间的距离来调节轧制温度，并使用Filer红外摄像机监控整个沉积过程的轧制温度，试验过程中平均轧制温度为900℃。分别制备了单层、双层和多层沉积层样品。

图1　复合电弧增材再制造平台

表2　沉积工艺参数

焊接电流/A	电弧电压/V	送丝速度/(cm/min)	沉积速度/(mm/min)	搭接率	保护气流量/（L/min）
220	14.3	175	360	0.15	15

2.2　沉积试样微观组织观察

沿轴向切取沉积试样，对微观结构表征试样依次使用240#、400#、800#、1200#和2000#的SiC砂纸研磨，并且使用1.5μm金刚石膏抛光，使用10%HNO_3酒精溶液进行浸蚀，浸蚀时间为10s，使用Leica金相显微镜对沉积层金相组织进行观察。EBSD样品随后使用20nm胶体二氧化硅悬浮液进行振动抛光。在JSM-F100显微镜下进行扫描电镜成像。在配备EDAX Velocity EBSD相机的JSM-F100 SEM中，以10kV的加速电压进行EBSD。在1000倍放大条件下采集EBSD图，步长为0.2μm，使用MATLAB R2023b中的MTEX工具箱和AZtec软件对数据进行分析。

2.3　沉积层力学性能测试

通过电火花加工，在距离母材8mm的区域提取尺寸为30mm（长）×10mm（宽）×2mm（厚）的犬骨形拉伸试样，如图2所示。在MTS E45.105万能试验机上以0.5mm/min的拉伸速率进行准静态单轴拉伸试验。弹性应变用引伸计测量。每种类型的样品重复拉伸试验5次，以确保再现性。显微硬度测试使

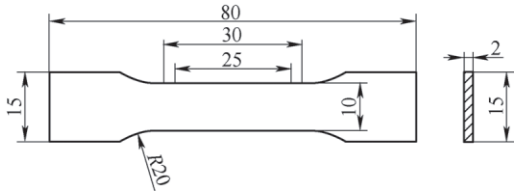


图2　拉伸试样尺寸

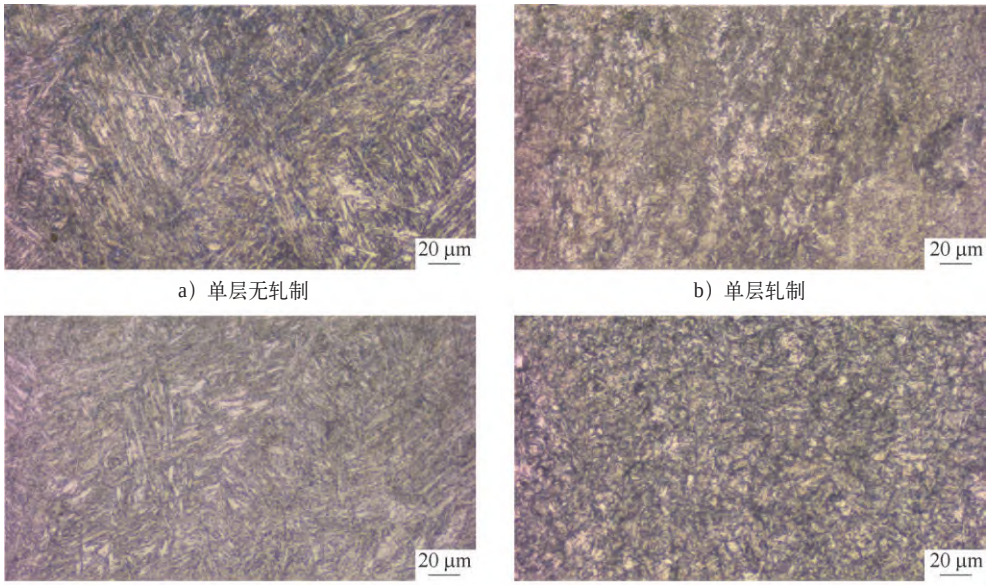
用INNOVATEST FALCON 500维氏硬度计在500g载荷下进行，停留时间为10s。从样品顶部沿覆层、界面和母材径向测量。

3　试验结果与分析

3.1　沉积层微观组织

图3所示为不同沉积层的金相显微组织。图3a所示为单层无轧制样品的微观结构，该样品在焊接过程中，经历了快速升温和冷却，奥氏体在短时间内未能充分转变，因此当冷却至马氏体转变温度以下时，奥氏体直接转变为板条马氏体，马氏体板条排列规则有序。图3b所示为单层轧制过后的试样，由于轧制引起了显著的塑性变形，这使得原本有序的板条马氏体组织受到破坏，板条变得破碎和细化。图3c所示为双层状态下无轧制样品显微组织，由于层与层之间存在温度梯度，由此导致原奥氏体晶界在散热方向上发生外延生长。图3d所示样品显微组织发生了显著变化，由板条马氏体转变为回火马氏体，并且出现了团簇状的分布。这是由于热循环和轧制的双重作用导致样品经历了复杂的热循环和轧制热变形过程，使部分马氏体发生回火，形成回火马氏体。

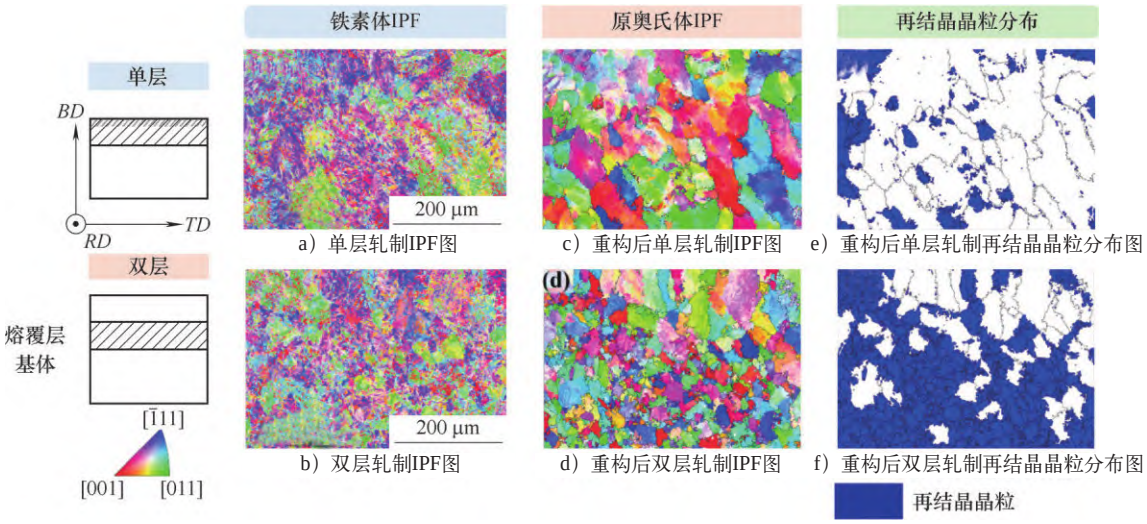
为了观察轧制及热循环，对热轧过后的沉积层进行了EBSD表征。如图4a、b所示，EBSD识别出马氏体块，考虑到马氏体和奥氏体在相变过程中始终保持特定的取向关系，所以利用*K-S*取向关系，重建了原奥氏体晶粒。单层轧制后的原奥氏体晶粒以柱状晶为主，其中夹杂着一些小的等轴晶粒，其平均晶粒尺寸为95.1μm，如图4c所示。双层轧制过后的原奥氏体晶粒以等轴晶为主，并且有着项链状结构特征，这是不连续动态再结晶的典型标志。相比于单层轧制，双层轧制的平均奥氏体晶粒尺寸为32.8μm，晶粒细化了约65%。图4e、f所示为单层和双层的再结晶晶粒分布，由于样品内部存在着大量的位错，所以传统的GOS识别再结晶晶粒的方法在此处并不适用，因此采用了帝国理工大学LIU等[11]研究的一种方法。从图4中可看出，单层样品的再结晶晶粒分布较少，主要出现在相邻大晶粒的晶界之间，其再结晶占比约为13%。双层样品的再结晶晶粒明显增多，占比约为58%。这是因为轧制引起的塑性变形导致沉积层内部位错增加，在下一层热循



a）单层无轧制　b）单层轧制

c）双层无轧制　d）双层轧制

图3　不同沉积层的金相显微组织



a）单层轧制IPF图　c）重构后单层轧制IPF图　e）重构后单层轧制再结晶晶粒分布图

b）双层轧制IPF图　d）重构后双层轧制IPF图　f）重构后双层轧制再结晶晶粒分布图

图4　热轧过后的沉积层EBSD表征结果

环的促进下激发了动态再结晶。

3.2　力学性能

图5所示为轧制前后单层和双层样品的显微硬度分布曲线。由图5可知，单层轧制样品沉积层的显微硬度明显提高，比单层无轧制样品高约30HV。在靠近母材的稀释区观察到显微硬度大幅上升，这可以归因于淬火马氏体的形成和碳浓度的增加，这是由于碳从母材扩散到沉积层造成的。值得注意的是，与其他样品相比，双层轧制样品的显微硬度显著降低，特别是在稀释区。这可能是因为样品经历了高温和塑性变形，导致其板条马氏体变为回火马氏体（见图3）。此外，热轧引起的动态再结晶也会导致

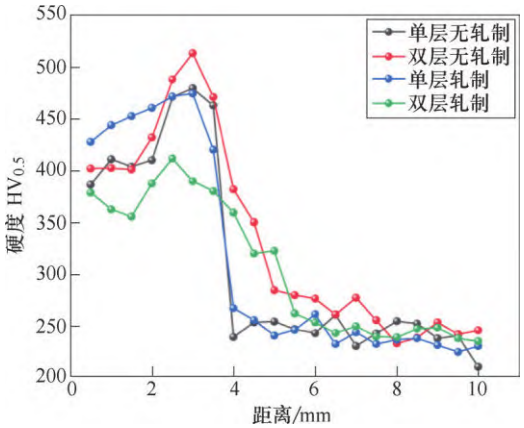


图5　不同样品的显微硬度分布曲线

材料内部位错密度降低，从而导致硬度降低。

图6所示为无轧制与轧制样品的拉伸性能。为了避免碳扩散对沉积层的影响，制备了多层样品，在远离母材的位置切取拉伸试样。没有轧制时样品的屈服强度和抗拉强度分别达到了604MPa、734MPa，而轧制过后样品的屈服强度和抗拉强度分别为629MPa、856MPa。由此可以看出，轧制前后样品的屈服强度相当，而抗拉强度在轧制后明显增加。

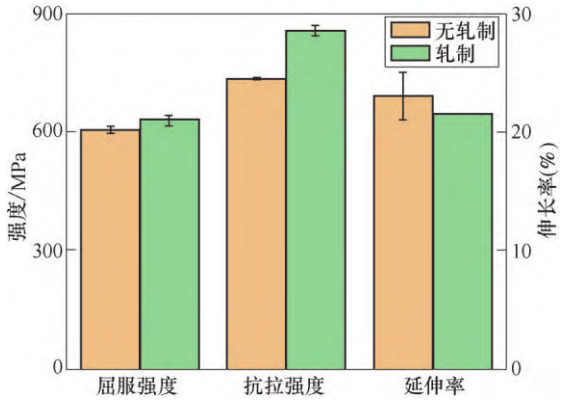


图6　无轧制与轧制样品的拉伸性能

4　结束语

本文使用电弧-轧制复合增材技术制备了低合金钢样品，对比分析了不同工艺下增材组织形貌及力学性能，获得主要结论如下。

1）电弧增材获得的组织主要为板条马氏体结构，在经历热循环及轧制后，板条马氏体变为回火马氏体。

2）轧制的样品经过一次热循环后，样品的奥氏体晶粒尺寸减小到32.8μm，相比于单层轧制的样品细化了65%，其再结晶晶粒占比从13%增加到58%

3）双层轧制后的样品稀释区的显微硬度明显降低，多层轧制样品的抗拉强度与无轧制的样品相比从734MPa增加到856MPa，伸长率略微降低

参考文献：

[1] XU H，ZHANG Q，TIAN T，et al. In-situ hot rolling directed energy deposition-arc repair of shafts[J]. Additive Manufacturing，2023，61：103362.

[2] LV H，LIU Y，CHEN H，et al. Temperature field simulation and microstructure evolution of Fe-based coating processed by extreme high-speed laser cladding for re-manufacturing locomotive axle[J]. Surface & Coatings Technology，2023，464：129540.

[3] COLEGROVE A P，DONOGHUE J，MARTINA F，et al. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components[J]. Scripta Materialia，2017，135：111-118.

[4] WAHAB D，BLANCO-D E，ARIFFIN A，et al. A review on the applicability of remanufacturing in extending the life cycle of marine or offshore components and structures[J]. Ocean Engineering，2018，169：125-133.

[5] 李子淇，常子金，姜自昊，等. TIG电弧增材制造AZ31镁合金成形尺寸控制研究[J]. 金属加工（热加工），2024（7）：6-12.

[6] 唐作富，陈国瑞，吴广辉. CMT电弧增材制造5087铝合金组织与拉伸性能研究[J]. 金属加工（热加工），2024（1）：105-109.

[7] HU Y B. Recent progress in field-assisted additive manufacturing：materials，methodologies，and applications[J]. Materials Horizons，2021，8（3）：885-911.

[8] DONOHUE J，ANTONYSAMY A，MARTINA F，et al. The effectiveness of combining rolling deformation with wire–arc additive manufacture on β-grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V[J]. Materials Characterization，2016，114：103-114.

[9] HE C，WEI J X，LI Y，et al. Improvement of microstructure and fatigue performance of wire-arc additive manufactured 4043 aluminum alloy assisted by interlayer friction stir processing[J]. Journal of Materials Science & Technology，2023，133：183-194.

[10] SABOORI A，AVERSA A，MARCHESE G，et al. Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair[J]. Applied Sciences，2019，9（16）：3316

[11] LIU Y H，WANG Y P，XU X，et al. The study of hot deformation on laser cladding remanufactured 316L stainless steel[J]. Materials & Design，2021，212：110271.

（收稿日期：20250209）