

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.08.006

不同振幅超声能场对激光熔覆铁基粉末组织及性能的影响

刘晓丽*, 葛卫京, 左圆圆

(商丘工学院 机械工程学院, 河南 商丘 476000)

摘要: 通过在 304 不锈钢上熔覆 Fe-Cr-V 铁基粉末, 研究了不同振幅的超声能场对激光熔覆高钒铁基涂层微观组织及力学性能影响。结果表明, 由于超声的空化效应, 能够有效细化晶粒同时促进界面处的 CET 转变, 改善了微观组织不均匀性。在未施加超声、施加超声(振幅为 35 和 50 μm)的条件下, 柱状晶长度分别为 42.2、32.7 和 8.1 μm , 大大降低了柱状晶区域宽度, 促进了碳化钒(VC)的析出。未施加超声条件下显微硬度梯度较大, 显微硬度差异值可达 162.7 HV, 而 35 μm 振幅超声条件下显微硬度较为平稳, 硬度梯度较小, 熔覆层的组织在各方向的性能更为均匀。施加 35 和 50 μm 振幅超声能场时, 抗拉强度分别为 1 279.3 和 1 162.6 MPa, 较未施加超声能场条件提高了 28.6%及 17.0%。

关键词: 超声能场; 激光熔覆; 铁基粉末; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG142

文献标识码: A

Effects of ultrasonic fields with different amplitudes on microstructure and properties of laser cladding Fe-based powder

Liu Xiaoli*, Ge Weijing, Zuo Yuanyuan

(School of Mechanical Engineering, Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu 476000, China)

Abstract: The effect of ultrasonic energy field with different amplitudes on the microstructure and mechanical properties of Fe-based laser cladding on 304 stainless steel was investigated. The results show that due to the cavitation effect of ultrasound, the grain can be refined effectively and the CET transition at the interface can be promoted, and the microstructure inhomogeneity can be improved. The length of the columnar crystal is 42.2, 32.7 and 8.1 μm , respectively, under the condition of no ultrasonic application and with ultrasonic application (amplitude 35 and 50 μm), which greatly reduces the width of the columnar crystal region and promotes the precipitation of vanadium carbide (VC). When ultrasound is not applied, the microhardness gradient is large, and the difference in microhardness can reach 162.7 HV. However, under the condition of 35 μm amplitude ultrasound, the microhardness is relatively stable, the hardness gradient is small, and the microstructure of the cladding layer has more uniform properties in all directions. When ultrasonic amplitude is 35 and 50 μm , the tensile strength is 1 279.3 and 1 162.6 MPa respectively, which is 28.6% and 17.0% higher than that without ultrasonic energy field applied.

收稿日期: 2024-10-31 修回日期: 2024-12-17

通信作者: 刘晓丽(1983—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为机械设计与制造, email: 380876253@qq.com

基金项目: 河南省高等教育教学改革研究与实践项目(2024SJGLX0586)

引用信息: 刘晓丽, 葛卫京, 左圆圆. 不同振幅超声能场对激光熔覆铁基粉末组织及性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(8): 34-40, 138.

Liu Xiaoli, Ge Weijing, Zuo Yuanyuan. Effects of ultrasonic fields with different amplitudes on microstructure and properties of laser cladding Fe-based powder[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(8): 34-40, 138.

Keywords: ultrasonic field; laser cladding; Fe-based powder; microstructure; mechanical property

高钒铁基材料是一类以铁为基体, 含有较高比例钒的合金材料, 在摩擦材料、切削工具、航空航天、耐磨部件等高性能领域拥有广泛的应用前景^[1-3]。制备高钒铁基合金涂层的方式主要包括热喷涂和激光熔覆, 主要是利用高能束加热的方式将涂层材料与基材表面熔融结合, 形成一层高性能涂层, 进而提升材料的耐磨性、耐腐蚀性以及抗氧化性能^[4-5]。与热喷涂技术相比, 激光熔覆能够精确控制激光的加工精度, 制备出的涂层厚度均匀, 与基材的结合强度高、耐磨性好, 广泛应用于重型、大型以及复杂结构件的表面强化以及修复再制造^[6-8]。然而在激光熔覆过程中冷却速度较快, 能量密度较高, 扫描时产生的热应力、材料相变产生的组织应力与基材及周围区域金属的应力相作用, 容易使得熔覆区域产生气孔甚至开裂等问题^[9-11]。

近年来, 研究人员发现超声振动作为辅助能场, 能够通过影响熔池的流动及凝固行为, 改善熔池内的传质传热, 重构激光熔化形成的熔池温度场和速度场, 进而影响激光熔覆修复层的微观组织与力学性能^[12-14]。肖明颖等^[15]通过理论计算方式建立了辅助激光熔覆成形有限元模型, 并且通过改变超声功率将铁基非晶粉末熔覆在钢基体上, 经研究发现铁基非晶涂层底部存在一个梯度结构过渡区, 其依次经由平面晶层、柱状晶层、等轴晶层过渡到非晶层。张咪娜等^[16]研究了超声振动对激光熔覆高熵合金涂层的裂纹抑制机理及力学性能的影响, 经研究发现超声振动能够显著细化涂层的晶粒, 碎的柱状晶增加了凝固晶核的数量, 同时促进了FCC相在晶界处的析出。Wen等^[17]采用超声能场激光熔覆在316 L表面制备了高熵合金FeCrCoAlMn0.5 Mo0.1涂层, 并在晶粒中发现了大量位错, 提高了耐腐蚀性。Xu等^[18]采用超声能场激光熔覆在轴承钢表面制备铁基涂层Fe901, 结果表明, 外延生长的柱状晶破碎后向不同方向生长, 形成了大量细小的等轴晶。当前有较多关于超声能场辅助激光熔覆高熵合金材

料的研究, 而对不同振幅的超声能场调控激光熔覆高钒铁基涂层的组织和性能研究较少。

因此本文以304不锈钢为基材, 采用超声能场对Fe-Cr-V系高钒铁基粉末进行激光熔覆, 对比研究了不同振幅的超声能场对铁基粉末熔覆层微观组织及力学性能的影响, 旨在通过施加超声能场, 细化熔覆层晶粒组织, 减少组织的不均匀性, 降低气孔缺陷以及提高熔覆层的显微硬度。该研究对超声能场激光熔覆高钒铁基涂层的应用具有重要的应用价值。

1 材料与方法

基体材料采用304不锈钢(其尺寸为50 mm×30 mm×6 mm), 为研究超声能场对铁基粉末微观组织及性能的影响, 熔覆层选用冶金性能及力学性能较好的高钒铁基粉末, 熔覆粉末和基材的化学成分见表1。采用光斑直径3 mm, 送粉速率4.0 r/min, 扫描速度600 mm/min的激光工艺进行熔覆, 熔覆Fe-Cr-V系铁基粉末的激光功率为2 000 W。熔覆过程中对各组试样分别施加以不同条件超声能场, 分别为未施加超声能场、振幅35 μm 超声能场以及振幅50 μm 超声能场。超声波的超声频率为20 kHz, 最高振幅为70 μm , 变幅杆与平台下方连接, 从而实现对试件整体在整个激光熔覆过程中施加超声, 熔覆结束后停留15 s关闭超声设备, 超声能场激光熔覆修复示意图如图1所示。

将激光熔覆后试样采用线切割后制备尺寸为10 mm×10 mm×6 mm的金相试样, 用无水乙醇清洗试样后, 依次使用100#、400#、800#、1000#、1200#、1500#、2000#的金相砂纸对熔覆层截面进行打磨, 再用金刚石研磨膏在抛光机上对试件进行精抛光, 得到表面光整无磨痕的金相试样, 分别用相应的腐蚀剂腐蚀一定时间(腐蚀时间如表2所示), 腐蚀剂配方为100 mL HCl、20 mL C₂H₅OH和5g FeCl₃。对处理后的试样进行扫描电子显微镜(SEM, Scanning

表 1 熔覆粉末及 304 不锈钢的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of cladding powder and 304 stainless steel (304SS)

试验材料	含量/(wt.%)						
	C	Cr	Si	Ni	V	Mn	Fe
304 不锈钢	0.07	19.00	0.90	10.00	0	2.00	其余
熔覆粉末	4.20	9.00	1.00	0	15.00	0	其余

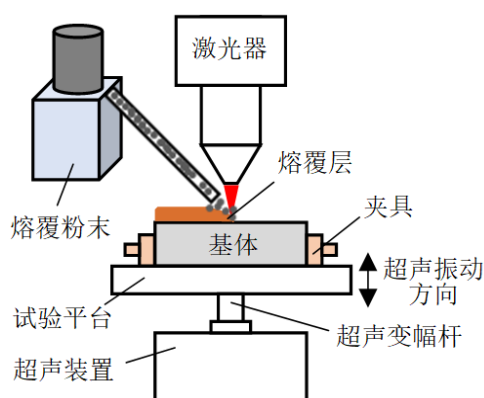


图1 超声能场激光熔覆修复示意图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic energy field laser cladding repair

Electron Microscope)测试、能谱(EDS, Energy Dispersive Spectrometer)成分分析及显微硬度表征。采用奥林巴斯的LEXT OLS4100型号的激光共聚焦显微镜观察微观组织, Gemini SEM 300扫描电子显微镜对界面处及熔覆层的微观组织进行观察。采用HVS-1000显微硬度仪进行显微硬度测试, 载荷为200 g, 保荷时间10 s。拉伸试验在26 °C下使用岛津

公司的电子万能拉伸试验机AG-X Plus 250KN(加载速度设置为0.1 mm/min)。

表2 各材料腐蚀时间

Tab.2 Etch time of materials

试验材料	腐蚀时间及方法
304 不锈钢	棉花来回擦拭 6~8 次
熔覆层	60 s

2 结果及分析

2.1 宏观形貌分析

对不同条件下熔覆试样进行宏观形貌观察, 结果如图2所示。由于铁基粉末与基体主要成分相似, 因此激光熔覆修复成形性较为良好, 容易形成良好的冶金结合, 熔覆层之间的界面也清晰可见。未施加超声能场条件下, 熔覆层顶部存在小型气孔等现象, 35 μm 振幅超声下形貌较好, 无气孔缺陷, 而50 μm 振幅超声条件下, 则在熔覆层底部存在气孔。气孔这一缺陷的出现会严重影响修复件的强度及塑性, 同时也会使冲击韧性等性能下降, 在实际应用中影响服役安全性及可靠性。

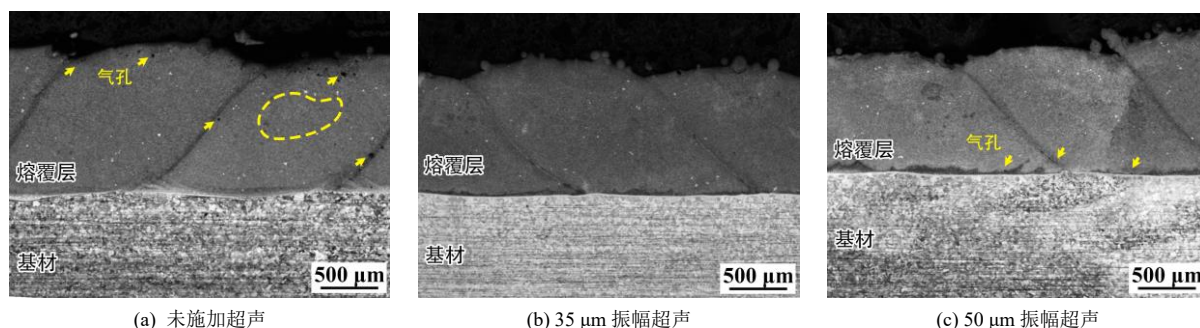


图2 不同条件下激光熔覆试样宏观形貌

Fig.2 Macroscopic morphology of laser cladding samples under different conditions

气孔的形成主要是由于激光熔覆过程中高能量激光所产生的热源密度高且冷却速度较快, 金属粉末以及基材表面吸附粘附水分或有机物在反应时产生的气泡来不及逸出熔池, 在熔池凝固时便存留在了熔覆层内。超声能场对于气孔的抑制作用主要从促进气泡长大及气泡上浮两个方面作用, 当辅助施加以超声能场后, 会产生超声空化作用, 空化泡富集于熔池内部。受到声压作用, 空化泡逐渐膨胀, 气泡内部存在的负压能够促使熔池内游离态的氢元素进入气泡, 从而形成氢气泡。当空化泡之间合并时会形成大的气泡, 而气泡越大, 逸出速度越快, 因此在一定程度的超声能场条件下, 气泡加速

逸出并破裂, 熔覆层内几乎不存在气孔^[19]。

未施加超声能场条件下, 熔覆层中的等轴晶区混杂有小面积柱状晶区, 如图2(a)的虚线所示。通过对不同条件下宏观形貌的观察可以发现, 这主要是由于Fe-Cr-V系铁基粉末在熔覆过程中未完全熔化导致。激光熔覆修复该道时, 由于粉末直径差异、送粉速率大及温度分布不均匀等原因, 个别粉末并未未来得及完全熔化, 而以粉末颗粒状态存留于熔覆层中。当激光熔覆修复进行到相邻道时, 存留于熔覆层的金属粉末颗粒受到激光热源的影响重新熔化, 此时温度梯度 G 较大, 但激光热源能量较高且受颗粒周围等轴晶的影响, 导致凝固速率 R 较小^[20],

G/R 较大,晶体生长速度远大于形核速度,晶粒主要生长成为柱状晶。当施加以超声能场后,改善了熔池中的热流分布,使得熔覆层中组织分布较为均匀,晶粒无夹杂柱状晶呈等轴晶分布。

2.2 微观组织分析

各条件下熔覆层界面处及熔覆层的微观组织形貌如图3和图4所示。未施加超声、超声35 μm 振幅以及超声50 μm 振幅时,柱状晶长度峰值分别为42.2、32.7和8.1 μm ,同时,柱状晶平均长度分别为31.8、20.1以及5.8 μm 。相较于未施加超声条件,超声35 μm 振幅与50 μm 振幅条件下,柱状晶平均长度分别下降了36.7%和81.8%。对比各条件下熔覆层的界面形貌,可以发现超声能场对熔覆层界面的鱼骨状枝晶有一定的抑制作用,35 μm 及50 μm 振幅超声条件下柱状晶长度明显小于未施加超声条件,甚至

在50 μm 振幅超声条件时,部分界面处甚至出现了无柱状晶,均为等轴晶的情况。同时,对于熔覆层微观组织,未施加超声条件下,平均晶粒尺寸为7.2 μm 。而超声35 μm 振幅以及50 μm 振幅时,平均晶粒尺寸分别为5.9和3.6 μm ,相较未施加超声条件降低了18.1%和50.0%。通过对熔覆层界面及熔覆层进行SEM观察可以发现,熔覆层与基材结合紧密,孔隙极少,主要是由于铁基粉末与不锈钢的结合性良好且金属粉末较为细小,铁基粉末与不锈钢基材之间更容易形成良好的冶金结合。熔覆层界面处的鱼骨状枝晶沿着垂直于熔覆层界面的方向生长,熔覆层组织则均为网状晶间组织,且晶间有颗粒状物质析出。为进一步研究析出成分,对35 μm 振幅条件下组织取点进行EDS分析。

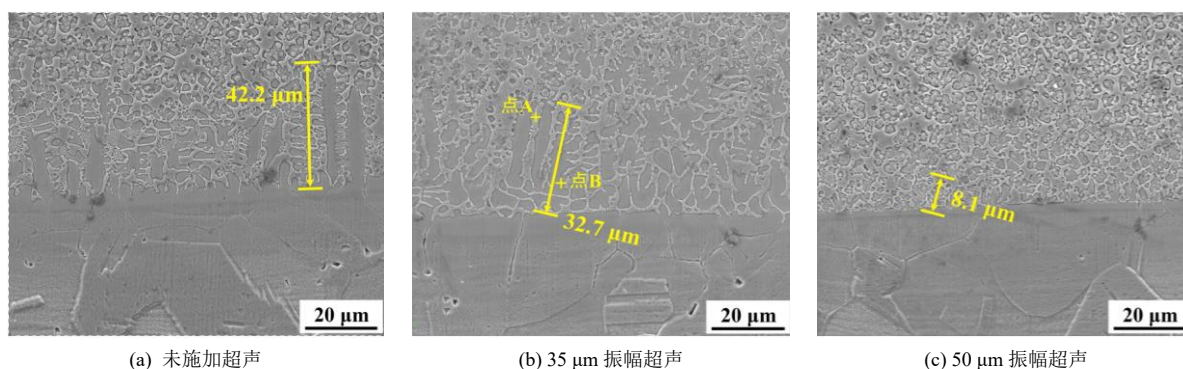


图 3 不同条件激光熔覆试样界面处微观组织

Fig.3 Microstructure at the interface of laser cladding samples under different conditions

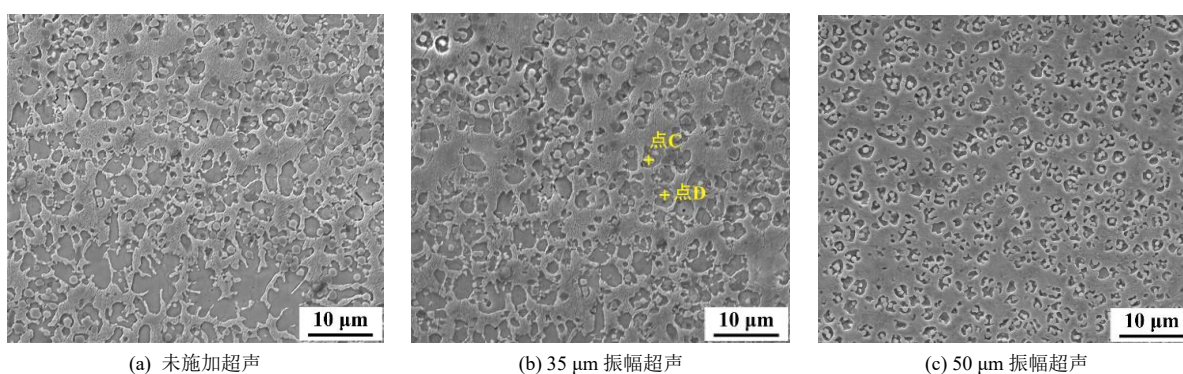


图 4 不同条件下激光熔覆试样熔覆层微观组织

Fig.4 Microstructure of cladding layer of laser cladding samples under different conditions

表3为各点EDS的分析结果,根据A、B两点的EDS结果可以看出,对于熔覆层界面的鱼骨状枝晶,晶界处有明显的Cr、V、C、Mo的偏析,枝晶处出现了铁基粉末中未出现的Ni元素且含量高于熔覆层。这是由于熔覆层界面靠近304不锈钢基材,且304不

锈钢基材中的Ni元素含量远高于熔覆粉末,根据菲克第一定律,元素扩散速率与界面浓度梯度成正比,而熔池底部激光能量输入较高,熔覆时加速了Ni元素由基材向熔覆层的扩散,导致在熔覆层界面检测到了Ni元素且含量较高。对于C、D两点的EDS

结果可以看出,析出的颗粒状析出物V、C的含量较高,而Fe、Cr的含量相对较少,因此颗粒状析出物推测为VC(碳化钒)等过渡金属碳化物。如图5所示,从SEM电子图像可以看出晶界处析出了颗粒状组织,对35 μm 振幅条件下该区域的熔覆层组织进行SEM面扫描观测元素含量偏析情况。在颗粒状析出物处,Fe及Cr颜色较暗,而V及C元素较亮,进一步验证了上述判断。证明了超声能场的引入能够促进VC等强化相的析出。

表3 各点 EDS 分析结果

Tab.3 EDS analyses of each point

测试点	含量/(wt.%)						
	Fe	Cr	V	Ni	C	Si	Mo
A	53.1	23.3	7.7	2.2	11.3	0.8	1.6
B	70.4	15.5	2.4	6.1	4.6	0.8	0.3
C	22.6	14.7	39.3	—	21.1	0.6	1.7
D	32.5	11.5	35.4	—	18.4	0.6	1.6

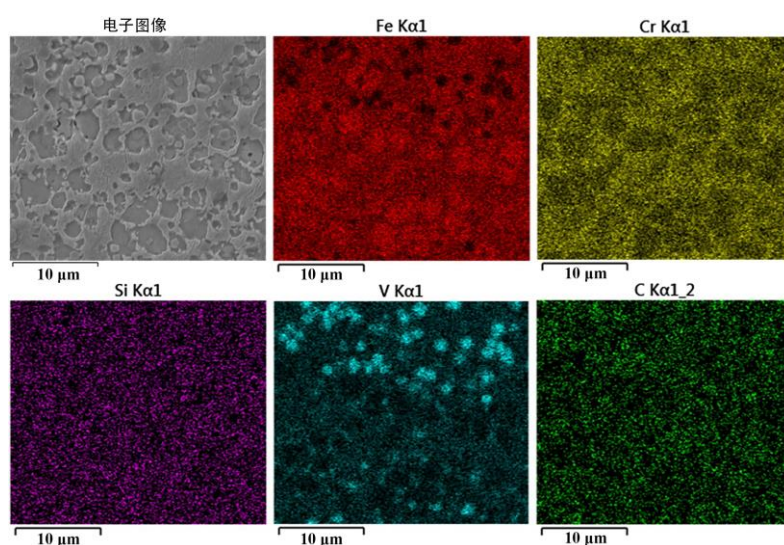


图5 熔覆层微观组织元素分布

Fig.5 Microstructure element distribution of cladding layer

对于柱状晶到等轴晶的转变以及柱状晶破碎,如机理图6所示,在超声能场作用下熔池内部会产生空化泡,空化泡在经历超声周期振荡后累积声压,空化气泡在熔池内部破裂,破裂瞬间产生的微射流能够破碎沉积层底部生长中的柱状晶,而破碎断裂的柱状晶会再次成为新的形核中心,增加了晶

核数量。而已成型的晶粒受到超声激振作用,固有饱满形状被破坏,呈细长化分布。因此超声能量越高,对沉积层界面组织的细化效果最好。因此引入超声能场能够促进熔覆层柱状晶转变为等轴晶,即柱状晶至等轴晶的转变(CET, Columnar to Equiaxed Transformation)。

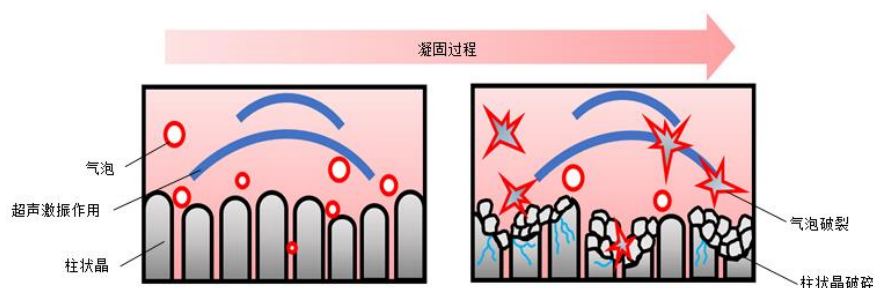


图6 超声能场促进 CET 转变机理图

Fig.6 Mechanism diagram of CET transformation promoted by ultrasonic energy field

2.3 显微硬度分析

不同条件下熔覆试样沿厚度方向的显微硬度分布如图7所示。未施加超声条件、35 μm 振幅及

50 μm 振幅超声条件下平均硬度分别为579.69、615.7及594.6 HV, 35 μm 和50 μm 振幅超声下较未施加超声分别提升了6.21%及2.57%。可以发现施加超

声能场并不能使得熔覆试样熔覆层的平均显微硬度得到明显提升。未施加超声条件下硬度梯度较大,显微硬度差异值可达162.7 HV。施加以超声能场后,35 μm 振幅超声条件下显微硬度较为平稳,硬度梯度较小,硬度数值整体高于50 μm 振幅超声条件,表明在35 μm 振幅超声条件下熔覆层的组织在各方向的性能更为均匀,优于未施加超声及50 μm 振幅超声条件。

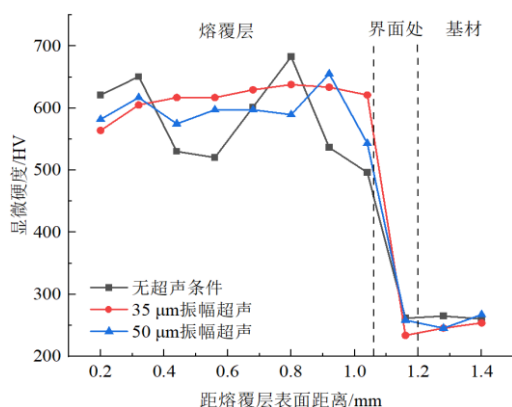


图 7 不同条件下熔覆层到基材的显微硬度分布

Fig.7 Microhardness distribution from cladding layer to substrate under different conditions

可以发现,高钒铁基粉末表现为未施加超声条件下硬度梯度较大,特别是熔覆层界面处,这是由于底部的微小气泡上浮速度慢,难以逸出熔池,在底部形成气孔区严重影响力学性能,而熔覆层由于熔化不均匀等轴晶夹杂着柱状晶,影响硬度分布的均匀性。施加以超声能场后,能够有效细化晶粒,等轴晶明显增多,晶界数量增加,使得显微硬度得以提升。但当超声能场振幅过大时,反而会降低熔覆层显微硬度,使得力学性能下降,这是由于过大的超声能场振幅会使得熔池内的空化效应及热效应更为复杂且剧烈,晶粒组织之间容易存在显微缺陷,从而降低熔覆层力学性能,因此超声能场激光增材应选用匹配最优的超声参数。

2.4 拉伸性能分析

通过激光熔覆试样的拉伸试验能够判断界面处的结合性以及激光熔覆修复的综合力学性能。图8为各参数下应力应变曲线,未施加超声能场时抗拉强度为994.1 MPa,施加35 μm 以及50 μm 振幅超声能场时,抗拉强度分别为1 279.3 MPa及1 162.6 MPa,较未施加超声能场条件提高了28.6%及17.0%。图9所示为拉伸断口形貌,基材的断口表面分布着韧窝,这是典型的韧性断裂特征,基材304不

锈钢为韧性断裂。而熔覆层的断口处存在明显的由多个解理面、解理台阶组成的脆性解理断口,明显为脆性断裂,因此,所有拉伸试样的断裂模式均为脆性断裂和韧性断裂的混合断裂。未施加超声条件下,沉积层及基材的界面处出现裂纹,影响界面成形及力学性能,施加超声后,改善了裂纹情况,抗拉强度得到有效提升。而50 μm 振幅时,抗拉强度比35 μm 振幅条件下还低116.7 MPa,这是由于在实际激光熔覆过程中,过高超声振幅的引入会导致熔池内部产生剧烈的马兰戈尼效应,重新生成气孔,气孔的存在会导致熔覆层内部应力集中区域增加,沉积层在拉伸过程中提前断裂。总体来说,超声能场的引入能够提升熔覆层的力学性能,并提升了力学性能均匀性。

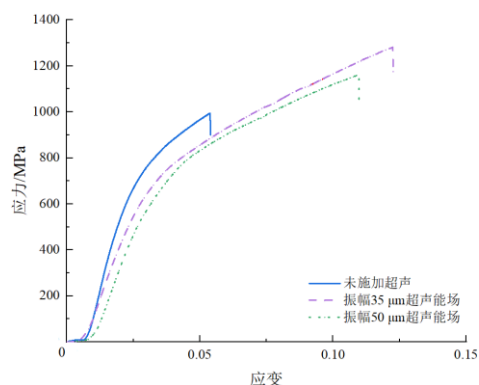
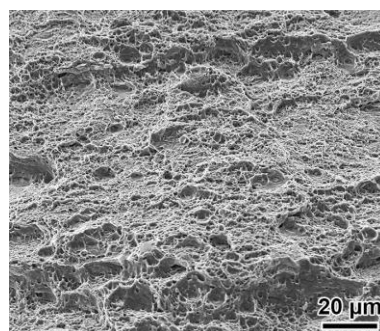
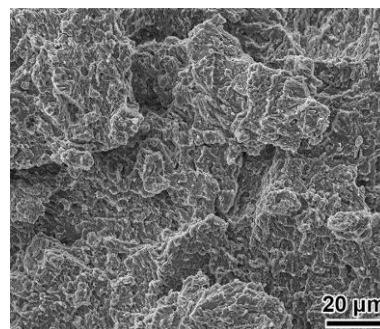


图 8 不同条件的应力应变曲线

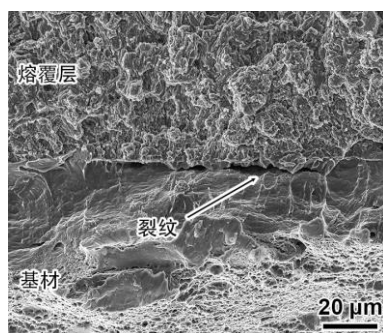
Fig.8 Stress-strain curves under different conditions



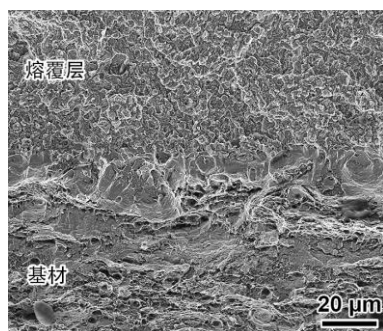
(a) 基材



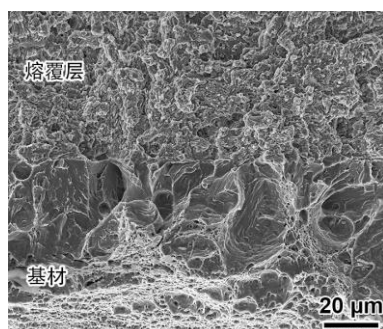
(b) 熔覆层



(c) 未施加超声



(d) 35 μm 超声能场



(e) 50 μm 超声能场

图9 各条件下断口形貌

Fig.9 Fracture morphology under different conditions

3 结论

(1) 未施加超声能场条件下, 熔覆层的顶部存在小型气孔等现象, 50 μm振幅超声条件下, 熔覆层底部存在气孔, 35 μm振幅超声下形貌较好金属粉末较为细小, 生成的组织也均较为细小, 未发现有裂纹等情况出现。

(2) 35 μm及50 μm振幅超声条件下柱状晶长度明显小于未施加超声条件。未施加超声、35 μm振幅以及50 μm振幅时, 柱状晶长度分别为42.2、32.7以及8.1 μm, 引入超声能场能够促进熔覆层的CET转变。

(3) 未施加超声条件下硬度梯度较大, 显微硬度差异值可达162.7 HV, 施加以超声能场后, 35 μm

振幅超声条件下显微硬度较为平稳, 硬度梯度较小, 整体高于50 μm振幅超声条件, 表明在35 μm振幅超声条件下熔覆层的组织在各方向的性能更为均匀, 优于未施加超声及50 μm振幅超声条件。

(4) 施加35 μm以及50 μm振幅超声能场时, 抗拉强度分别为1 279.3和1 162.6 MPa, 较未施加超声能场条件提高了28.6%及17.0%。超声能场的引入能够提升熔覆层的力学性能, 并提升了力学性能均匀性。

参考文献

- [1] Onuik B, Bandyopadhyay A. Additive manufacturing in repair: Influence of processing parameters on properties of inconel 718[J]. Materials Letters, 2019, 252: 256-259.
- [2] Wang H, Liu W W, Tang Z J, et al. Review on adaptive control of laser-directed energy deposition[J]. Optical Engineering, 2020, 59(7): 070901.
- [3] Oh H S, Kang J Y, Tazan C C. Enhancing damage-resistance in low carbon martensitic steels upon dual-pass laser treatment[J]. Scripta Materialia, 2021, 192: 13-18.
- [4] Liu G, Du D, Wang K M, et al. Hot cracking behavior and mechanism of the IC10 directionally solidified superalloy during laser re-melting[J]. Vacuum, 2020, 181: 109563.
- [5] Li X, Zhang C H, Zhang S, et al. Design, preparation, microstructure and properties of novel wear-resistant stainless steel-base composites using laser melting deposition[J]. Vacuum, 2019, 165: 139-147.
- [6] 王成, 王伟, 丁士杰, 等. 激光熔覆铁基耐磨涂层的制备及摩擦学性能研究[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 137-147.
- [7] 吴腾, 师文庆, 谢林圯, 等. 激光熔覆铁基 TiC 复合涂层成形质量的控制方法[J]. 激光技术, 2022, 46(3): 344-354.
- [8] 柴蓉霞, 田妍, 周新建, 等. 回字形扫描路径下高速激光熔覆数值模拟及实验研究[J]. 中国激光, 2023, 50(8): 120-130.
- [9] 李云峰, 石岩. 激光熔覆耐磨耐冲击复合涂层组织与性能研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 237-246.
- [10] 王廷宣, 章健, 刘敬, 等. 激光熔覆层裂纹控制的研究进展[J]. 机械工程材料, 2023, 47(8): 1-7, 58.
- [11] 侯锁霞, 任呈祥, 吴超, 等. 激光熔覆层裂纹的产生和抑制方法[J]. 材料导报, 2021, 35(S1): 352-356.

- 项目教学的质量提高[J]. 太原城市职业技术学院学报, 2024(5): 70-72.
- [13] 全月荣, 肖雄子彦, 张执南, 等. 产教深度融合背景下项目式教学模式探析[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(7): 185-189.
- [14] 齐卫, 王文青. 项目式教学过程与效果评价[J]. 河北师范大学学报(教育科学版), 2020, 22(6): 119-121.
- [15] 赵永生, 刘鑫, 赵春梅. 高阶思维能力与项目式教学[J]. 高等工程教育研究, 2019(6): 145-148, 179.
- [16] 张帮彦, 田礼熙, 师超, 等. 基于科教融合的专业技能训练实验教学改革探索—以电镀镍溶液化学成分分析实验为例[J]. 广东化工, 2023, 50(23): 189-191.
- [17] 高吉成, 魏艺涵, 冯思清, 等. 基于科教融合理念的材料专业实践教学探索: 以电镀 Ni-Co-GO 为例[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(11): 101-107.
- [18] 郑泽宇, 李美美, 李发闯, 等. 新工科背景下电镀实验教学改革与探索[J]. 化学工程与装备, 2023(9): 290-292.
- [19] 陈洋. 新质生产力背景下涉农高校高层次人才培养路径研究[J]. 今传媒, 2025, 33(2): 145-148.
- [20] 周晋, 周世欢, 刘有志, 等. 基于翻转课堂结合线上教育教学模式探讨—以药物分析课程为例[J]. 广东化工, 2024, 51(20): 213-215.

上接 40 页

- [12] 李占明, 王宏宇, 孙晓峰, 等. 超声振动在激光熔覆中的作用机制及研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(16): 218-225.
- [13] Pellizzari M, Zhao Z, Bosetti P, et al. Optimizing direct laser metal deposition of H13 cladding on CuBe alloy substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 432: 128084.
- [14] Cao X K, Duan C H, Luo X P. Efficient simulation methods for thermal-mechanical coupled analysis and rapid residual distortion prediction of laser melting deposition process[J]. Steel Research International, 2021, 92(8): 2000615.
- [15] 肖明颖. 超声辅助激光熔覆 $\text{Fe}_{41}\text{Co}_7\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ 非晶涂层及其组织和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [16] 张咪娜, 王以坤, 王大锋, 等. 超声振动对激光熔覆高熵合金涂层组织与耐磨性能的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(13): 22-32.
- [17] Wen X, Cui X F, Jin G, et al. Design and characterization of $\text{FeCrCoAlMn}_{0.5}\text{Mo}_{0.1}$ high-entropy alloy coating by ultrasonic assisted laser cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 835: 155449.
- [18] Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, et al. Ultrasonic vibration on wear property of laser cladding Fe-based coating[J]. Surface Engineering, 2020, 36(12): 1261-1269.
- [19] 吴静. 涂层缺陷对铁基非晶合金涂层腐蚀行为影响研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [20] Patil M A, Ghara T, Das B, et al. Influence of cooling rate on microstructure, dislocation density, and associated hardness of laser direct energy deposited Inconel 718[J]. Surface and Coatings Technology, 2025, 495: 131575.

上接 129 页

- [13] 汤智杰, 王路生, 杨景玉. 镍粉/碳纤维复合导电沥青胶浆的电热性能[J]. 材料科学与工程学报, 2024, 42(2): 290-298.
- [14] 张晨阳, 王嵘, 岳彤, 等. 基于分类处理-分质利用的电子电镀废水中金属离子资源化处理新技术研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(9): 14-24.
- [15] 胡志豪, 张皓景, 周叶, 等. 高效镍基有序多孔电极气泡行为可视化观测及性能影响[J]. 化工进展, 2024, 43(2): 680-687.
- [16] 王智禹, 沈苗, 杨春明. 泡沫镍原位制备 NH_4NiPO_4 纳米棒电极材料及其电化学性能研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2021, 44(5): 108-115.
- [17] 赵皓月, 吴欢欢, 姚宏, 等. 膜技术在回收电镀废水中金属离子的应用研究进展[J]. 水处理技术, 2022, 48(2): 6-12.
- [18] 于翔, 王碧侠, 李斌德, 等. 表面活性剂对水热-煅烧法制备的钴酸镍微观结构及电化学性能的影响[J]. 稀有金属, 2024, 48(9): 1263-1273.
- [19] 贺秀丽, 马千钧, 梁红玉, 等. 电刷镀镍对 30Cr13 钢耐蚀性和力学性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(3): 12-16.
- [20] 张小欢, 冯拉俊, 卢曼. 镁合金表面化学镀镍磷工艺优化与镀层性能研究[J]. 材料保护, 2022, 55(6): 86-91.
- [21] 杨晓, 王雪明, 何巍, 等. 蝴蝶结膜面的力学性能试验与仿真分析[J]. 计算机仿真, 2022, 39(8): 20-25.