

激光重熔对电弧喷涂含非晶相铁基 涂层性能的影响

纪秀林¹, 顾鹏¹, 王振松², 唐秋逸¹, 李泽¹

(1.河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022; 2.常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: **目的** 提高电弧喷涂含非晶相 Fe 基涂层的抗冲蚀及耐腐蚀性能。**方法** 采用 YAG 脉冲激光器对电弧喷涂含非晶相 Fe 基涂层进行激光重熔处理。通过 X-ray、SEM、冲蚀磨损和电化学等检测手段, 研究该涂层重熔后的组织结构、冲蚀磨损性能和耐腐蚀性能。**结果** 电弧喷涂含非晶相 Fe 基涂层经激光重熔后发生了晶化, 并随着功率的增加, 非晶含量降低, 硬度也降低。重熔后, 涂层与基体的结合方式由之前的机械咬合转变为冶金结合, 涂层的致密度明显提高, 组织缺陷减少。与喷涂层相比, 0.3 kW 激光重熔涂层的抗冲蚀性能在 30°攻角下可提高 3 倍, 在 90°攻角下可提高将近 6 倍。重熔层的冲蚀磨损机制在低冲角时以显微切削为主, 高冲角时则以挤压破碎为主。随着激光功率的增加, 重熔涂层的抗冲蚀性能降低。同时, 在 3.5%NaCl 溶液中, 重熔层的耐蚀性能随重熔激光功率的提高而提高, 并且重熔层的腐蚀电流密度比喷涂层明显降低。**结论** 激光重熔不但改善了电弧喷涂含非晶相 Fe 基涂层与基体间的结合状态, 同时也增强了涂层的耐蚀和耐磨性能, 是一种有效提升涂层性能的后处理工艺。

关键词: 激光重熔; 非晶涂层; 冲蚀; 磨损; 腐蚀

中图分类号: TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)04-0068-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.04.010

Effect of Laser Remelting on Slurry Erosion and Corrosion Properties of Arc-sprayed Fe-based Amorphous-containing Coatings

Ji Xiu-lin¹, Gu Peng¹, Wang Zhen-song², Tang Qiu-yi¹, Li Ze¹

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2.School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the slurry erosion wear resistance and corrosion resistance of arc-sprayed Fe-based amorphous-containing coatings. Arc-sprayed Fe-based amorphous-containing coatings were remelted by YAG lasers. The microstructures, slurry erosion wear resistance and corrosion resistance of the remelted coatings were investigated by X-ray, SEM, erosion tester and electrochemical workstation. The arc-sprayed amorphous-containing coating was crystallized after laser remelting. With the increase of laser power, the amorphous content and the hardness decreased. After laser remelting, the bonding form between the substrate and coating was converted from mechanically occlusion to metallurgical bonding, the density of the remelted coating increased obviously and the structure flaws decreased. Compared with the sprayed coating, the erosion resistance of the 0.3 kW laser remelted coating could be increased by 3 times at 30 degrees of impact angle, and increased by

收稿日期: 2018-08-31; 修订日期: 2018-10-24

Received: 2018-08-31; Revised: 2018-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51875169)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51875169)

作者简介: 纪秀林 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程与摩擦学。邮箱: xiulinji@gmail.com

Biography: Ji Xiu-lin (1975—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: surface engineering & tribology. E-mail: xiulinji@gmail.com

sistance of the 0.3 kW laser remelted coating could be increased by 3 times at 30 degrees of impact angle, and increased by nearly 6 times at 90 degrees of impact angle. The domain mechanism of erosion wear was micro-cutting at low impact angle, while extrusion fractures at high impact angle. However, the erosion resistance of remelted coating decreases with the increase of laser power. At the same time, the corrosion resistance of remelted coating in 3.5% NaCl solution increased as the laser power grew, but the corrosion current density was significantly reduced when compared with that of as-sprayed coating. Laser remelting can not only improve the bonding condition between the substrate and arc-sprayed amorphous amorphous-containing coatings, but also evidently enhance the erosive wear resistance and corrosion resistance at the same time. Therefore, laser remelting is an efficient post treatment process to improve the properties of coatings.

KEY WORDS: laser remelting; amorphous coating; erosion; wear; corrosion

Fe 基非晶合金具有高硬度、耐磨、耐蚀等优良性能,且主要元素铁廉价易得,所以材料成本相对低廉,从而在电子、机械、化工、军工、体育、医疗等领域有着广阔的应用前景^[1-2]。目前,制备铁基非晶合金的主要方法有:吸铸-喷铸法、定向凝固法、粉末挤压法、热喷涂法等等。其中,电弧喷涂制备非晶合金涂层是效率高、造价低的非晶涂层制备技术之一^[3-4],但存在孔隙率偏高、组织结构不均匀、涂层与基体的结合强度偏低等缺点^[5]。

激光重熔是一种将涂层快速熔化又凝固的工艺方法,重熔过程中熔池的形成有助于涂层与基体的相互扩散,形成冶金结合^[6],从而可大大降低涂层的孔隙率^[7],提高产生钝化膜的速度^[8],进而增强涂层性能^[9]。目前,非晶合金在激光重熔方面的研究还比较少。张培磊等人^[10]对大块非晶合金进行重熔,得到了非晶纳米晶复合重熔层,具有良好的摩擦磨损性能。Li 等人^[11]探讨了镍基非晶复合涂层的重熔强化机制,重熔层非晶含量增多有利于提高耐磨性。刘景涛等人^[12]对铝基非晶合金进行了重熔处理,提高其耐腐蚀性能。Fe 基非晶合金涂层由于成本低廉,同时又具有优异的耐磨和耐蚀性能,在表面涂层领域有着潜在的市场前景^[13],但激光重熔功率对非晶合金组织和性能的影响尚有待更多研究。因此,文中主要通过对电弧喷涂含非晶相 Fe 基合金涂层进行激光重熔处理,研究重熔后涂层的组织结构,并分析重熔涂层的抗冲蚀磨损性能以及耐腐蚀性能。

1 试验

1.1 材料

实验原料选取 Q345 钢作为基底材料,尺寸为 250 mm×40 mm×10 mm。采用市售直径为 2.0 mm 的 Fe 基非晶粉芯丝材 (SAM),丝材的具体成分(以质量分数计)为:Cr 15%~17%,B 3%~5%,Ni 和稀土 0.5%~1.0%,Fe 余量。

1.2 涂层制备及表征

使用 ZPG-400B 型电弧喷涂设备制备含非晶相的

合金涂层。喷涂前对基材进行喷砂、碱洗、酸洗,以达到粗化和清洁表面的作用。喷涂工艺参数:喷涂电压为 34.2 V,送丝速度为 30 mm/s,喷涂距离为 100 mm,雾化压力为 0.65 MPa,喷枪相对移动速度为 100 mm/s。采用光大激光公司生产的 YAG 能量反馈激光器,在不同的激光功率下对含非晶相合金涂层进行激光重熔,其中具体的激光重熔工艺参数见表 1。

表 1 激光重熔工艺参数
Tab.1 Laser remelting parameters

Experi- ment No.	Peak power /kW	Fre- quency /Hz	Moving speed /(mm·min ⁻¹)	Pulse width /ms	Track spacing /mm
1	4.5	12	180	3.0	0.5
2	3.0	12	180	3.0	0.5
3	1.5	12	180	3.0	0.5
4	0.3	15	300	2.5	0.5

采用飞利浦公司的 PW3710 型 X 射线衍射仪 (Cu Kα) 分析相组成,采用 JSM-6360 型的扫描电镜观察表面形貌及微观组织结构。采用 Vickers 显微硬度计 (载荷为 1.961 N、加载时间为 15 s) 检测涂层的硬度,取随机 8 个点的测量结果求平均值。喷涂层及重熔层的密度采用排水法测得,根据式 (1) 计算:

$$\rho = \frac{m_{\text{空}}}{m_{\text{水}}} \rho_{\text{水}}$$

(1)

式中: $m_{\text{空}}$ 为涂层在空气中的质量; $m_{\text{水}}$ 为涂层在水中的质量,测量时用细线拴住涂层浸没在烧杯内的蒸馏水中,涂层不与杯壁、底接触; $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度。

1.3 冲蚀磨损试验方法

将样品按 10 mm×10 mm×10 mm 的尺寸切割,采用自制冲蚀磨损试验机^[14]进行冲蚀磨损性能检测。将自来水与粒径为 350~780 μm 的石英砂 (取自长江口) 混合成冲蚀浆体,在 30°和 90°攻角下进行冲蚀磨损试验,并调节电机转速控制砂浆出口流速为 10 m/s,进沙量为 18 kg/h。在冲蚀试验前,对每一样品进行 5 min 预冲蚀试验,去除样品表面毛刺等易剥落物,从而确保实验结果的稳定性。采用电子分析天平 (精度为

0.1 mg) 计量冲蚀磨损失重。每一次称量前用丙酮溶液超声清洗, 并干燥。同一实验重复三次, 最后取磨损失重的平均值。

1.4 电化学试验方法

采用 CHI660E 型电化学工作站, 在 3.5% 的 NaCl 溶液中对样品进行电化学测试, 并由涂层 (工作电极)、甘汞电极 (参比电极)、铂电极 (辅助电极) 构成三电极体系。Tafel 极化测试的扫描速率为 0.5 mV/s。实验前, 为获得相同的表面状态, 需对试样表面打磨抛光。

2 结果及分析

2.1 非晶涂层的相组成及形貌

电弧喷涂层和不同激光功率下重熔层的 XRD 图谱如图 1 所示。可见, 喷涂层在 44° 附近有宽漫散射峰, 这表明涂层很可能含有一定量的非晶相。从各激光功率重熔层的 XRD 图谱分析发现, 重熔后非晶涂层明显发生了晶化现象, 重熔功率越高, 晶化峰越尖锐, 晶化程度越严重。经过物相标定可知, 晶化相主要是 Fe 和 Fe-Cr 相。XRD 图谱中 2θ 为 45° 、 65° 和 82° 附近的衍射峰分别对应于 Fe 和 Fe-Cr 相的 (110)、(200) 及 (211) 晶面。由于随着 Fe-Cr 相中 Cr 含量的增加, 2θ 峰位置偏向左移, 所以此处的 Fe-Cr 相可能为 $\text{Cr}_{1.07}\text{Fe}_{18.93}$ 或者 $\text{Cr}_{0.26}\text{Fe}_{1.74}$ 。此外, 随着激光重熔功率的增大, 重熔层中晶化相呈增多的趋势。这是因为在一定范围内, 激光重熔的热输入量随激光功率增加而增加, 热输入量的增加致使重熔过程中熔池存在的时间延长, 温度梯度减小, 冷却速率降低。当非晶相形成所需要的临界冷却速度高于实际熔池的冷却速度时, 熔融金属液将会冷却形成晶体。随着激光功率越大, 熔池温度越高, 熔池内部对流越强烈, 涂层与基体相互渗透越多, 导致非晶含量降低。

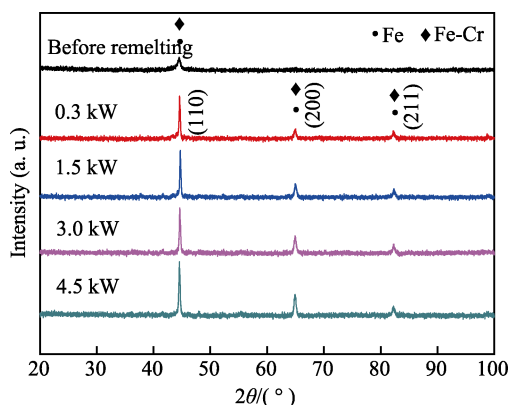


图1 喷涂层和不同功率下重熔层的 XRD 图谱
Fig.1 XRD patterns of the as-sprayed coating and the remelted coatings under different laser power

选取激光功率 0.3 kW 下的涂层作截面形貌分析, 喷涂层与激光重熔层的横截面如图 2 所示。喷涂层的截面形貌表明, 涂层为典型的层状结构, 表面粗糙度较高, 存在一定的孔隙。此外, 涂层和基体间存在缝隙, 这是由于涂层与基体是依靠粗糙不平的表面和扁平粒子之间咬合相结合的, 两者的结合主要为机械结合。经过激光重熔后 (图 2b), 涂层的层状结构消失, 组织更加均匀致密, 只有少量孔隙缺陷, 且涂层与基体之间由机械结合转变为冶金结合。采用排水法测得喷涂层的密度为 6.963 g/cm³, 重熔层的密度为 7.566 g/cm³, 这表明重熔显著提高了涂层的致密度。

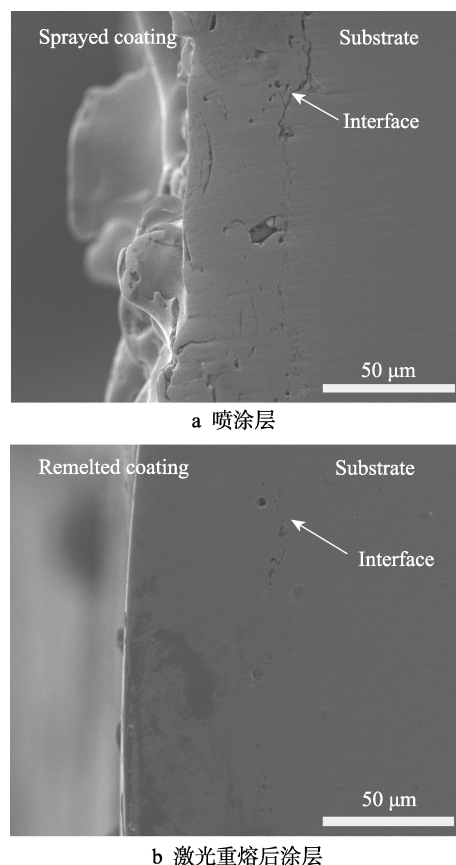
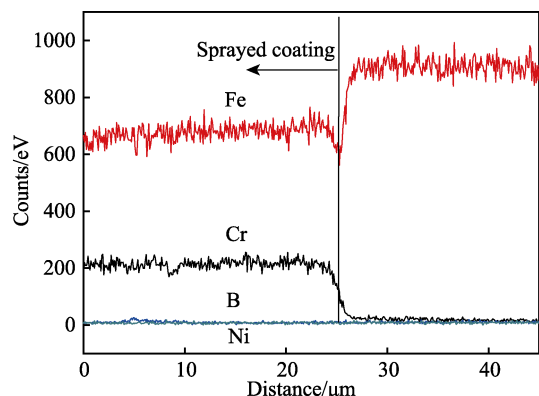


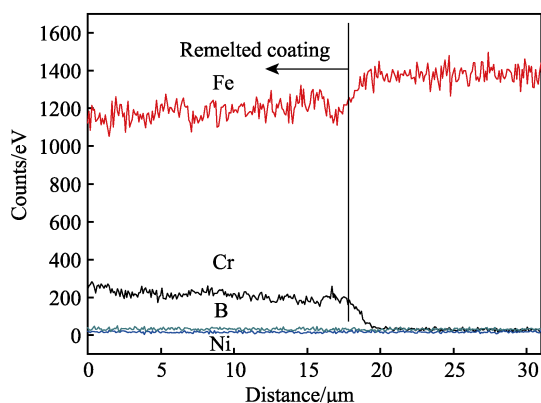
图2 喷涂层与激光重熔层的横截面形貌

Fig.2 Cross-section morphologies of as-sprayed coating and remelted coating: a) as-sprayed coating; b) remelted coating

图 3 为喷涂层和激光重熔涂层的截面能谱图。从图 3a 中可以看出, 喷涂层的 Fe 含量明显低于基体, 而 Cr 含量明显高于基体。在涂层与基体结合的地方, 可以观察到 Fe 元素和 Cr 元素的含量发生了跳跃式的改变, 说明涂层与基体之间几乎没有发生成分的相互扩散, 涂层和基体的结合方式为机械咬合。经过激光重熔后, 线扫描图谱 (图 3b) 中显示, 涂层与基体结合处, Fe 和 Cr 两种元素变化较为平缓。这说明激光重熔后, 涂层与基体在界面处发生熔合, 并且涂层中的元素和基体材料之间的元素相互扩散, 涂层与基体从机械结合转变为冶金结合, 结合强度大大提高了。



a 喷涂层

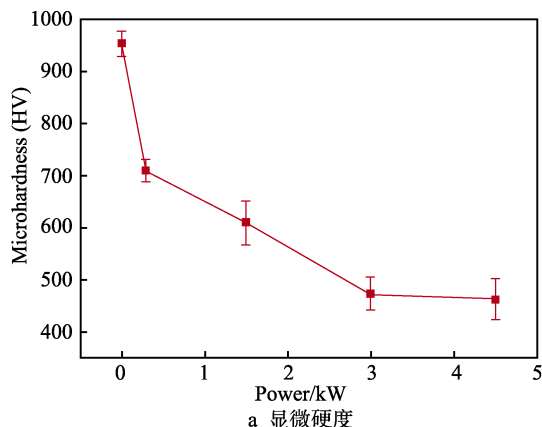


b 激光重熔后涂层

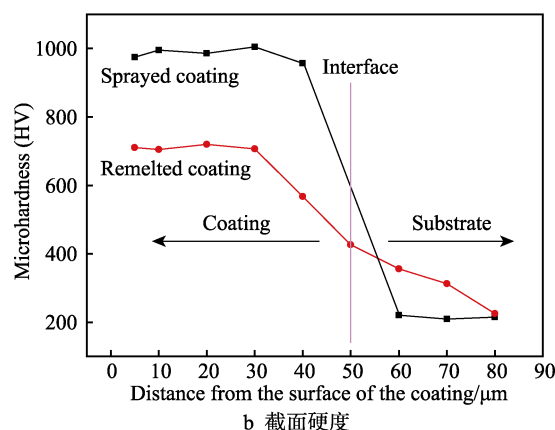
图 3 喷涂层和激光重熔后涂层的 EDS 能谱图
Fig.3 EDS analysis of as-sprayed coating and remelted coating: a) as-sprayed coating; b) remelted coating

喷涂层及重熔层的显微硬度如图 4 所示。从图 4a 中可以看出, 涂层在激光重熔前的显微硬度可以达到 953 HV, 而激光重熔后, 显微硬度明显下降, 并且随着激光重熔时激光功率的增加, 重熔层的显微硬度不断降低。这是因为电弧喷涂层的非晶含量较高, 而激光重熔过程中, 由于熔池冷却时达不到形成非晶相的临界冷却速度, 凝固时会产生晶化。这也在前文的 XRD 分析图谱中得到验证。同时, 随着激光功率的不断增大, 涂层中混入的基体含量越来越多, 涂层受基体的稀释作用明显, 重熔层中非晶相的减少和晶相的增多使得激光重熔层的显微硬度低于喷涂层。图 4b 选取了激光功率 0.3 kW 的重熔层与喷涂层作截面硬度对比, 可以看出, 喷涂的涂层与基体由于机械结合的作用, 在其界面处硬度值有陡降的过程, 而重熔层的硬度值呈梯度式缓慢降低。

图 5 为重熔层 (0.3 kW) 的微观组织。可以看出, 等轴晶与柱状晶共存。根据凝固理论得知, 凝固时固液界面的温度梯度 G 与凝固速率 V 比值的大小决定凝固后固体的组织。在激光重熔过程中, 涂层被瞬间加热, 形成熔池, 而基体温度远低于涂层的温度, 这样熔池和基体之间就形成了很大的温度差, 但发生的凝固较少, G/V 较大。此时熔池固液界面呈平面生长或者胞状生长, 即图 5 中的等轴晶^[9]。随着激光光斑



a 显微硬度



b 截面硬度

图 4 不同激光功率涂层的显微硬度和喷涂层与重熔层的截面硬度

Fig.4 Microhardness of the remelted coatings under different laser power and the hardness of cross-sections of as-sprayed and remelted layers: a) Microhardness; b) Hardness of cross-sections

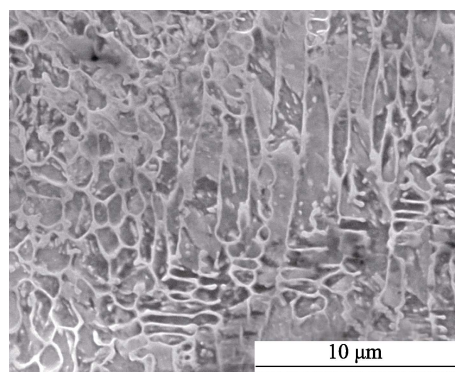


图 5 非晶合金涂层激光重熔后的微观组织
Fig.5 Microstructure morphology of the remelted amorphous alloy coatings

的离开, 熔池与基底的温度梯度 G 减小, 但 V 增大, G/V 减小, 所以熔池中的金属熔液以柱状晶的方式生长, 柱状晶的方向与熔池的散热方向一致。激光重熔过程中, 由于熔池之间间隔较小, 熔池之间交错散热, 使得柱状晶的方向也显得较为杂乱。

2.2 非晶涂层重熔后的冲蚀磨损性能

喷涂层、不同激光重熔功率的涂层以及 Q345 钢

的体积冲蚀磨损率如图6所示。对比发现,重熔层的体积磨损率显著低于喷涂层以及基体 Q345 钢,即重熔层耐冲蚀磨损性能显著提升,特别是在 90° 攻角下。激光功率为 0.3 kW 时,重熔涂层的质量损失率在 30° 攻角下仅为非重熔涂层的 1/3,在 90° 攻角下仅为非重熔涂层的 0.17%。激光重熔过程消除了喷涂层的组织结构缺陷,形成了均匀的致密涂层,在对抗 90° 冲击下表现出很好的抗冲击性能。重熔层中晶粒的边界会限制裂纹的扩展^[15],从而提高重熔层的耐冲蚀磨损性能。此外,涂层的体积冲蚀磨损率随着激光重熔功率增加而增加,即随激光重熔功率的增加,涂层的耐冲蚀性能降低。由 XRD 图谱可知,随着激光功率的增加,重熔层晶化越来越严重,非晶相含量减少,涂层硬度降低,导致重熔层的耐冲蚀性能降低。

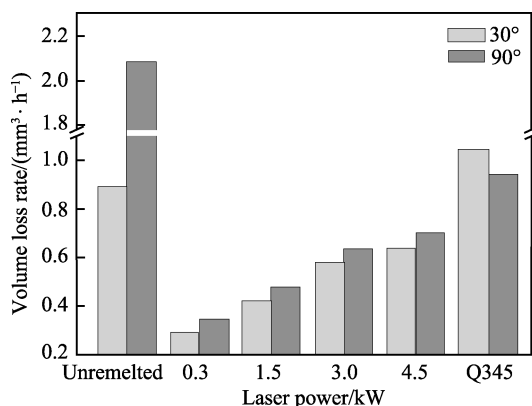


图6 激光重熔功率与涂层在 30° 与 90° 攻角下的体积冲蚀磨损率

Fig.6 Slurry erosion wear rates of Fe-based coatings before and after remelting at 30° and 90°

图7为激光重熔层在 30° 和 90° 冲击角下的冲蚀形貌,涂层表面存在凹坑、裂纹和犁沟。30° 冲击后的涂层表面,主要以显微切削和犁沟为主,如图7a所示。在切削的同时,涂层最表面很薄的一层会在颗粒的不断冲击下,形成高度变形的唇片。由于重熔层硬度高,砂粒在撞击到涂层后,难以在涂层表面形成凹坑状的冲蚀形貌,从而只能表现出以显微切削为主的作用^[16-17]。相比在 30° 冲角下的犁沟形貌,涂层在 90° 冲角下的微切削显得更加短促而无序,如图7b所示。根据锻造挤压理论^[18],涂层所受的砂粒冲击能将被分解为畸变能和绝热剪切形成的热能。当涂层表面形成的高度变形层再继续受到砂粒的冲击后,将加快表层的唇片形成。唇片可能因热能带来的退火作用被软化,但由于冷却介质的作用,更可能由于反复变形和加工硬化致脆而剥落。加工硬化区在唇片不断生成、长大及剥落的过程中,露出残余在涂层内的部分孔洞以及少量在剥落过程中生成的凹坑。此外,在冲蚀磨损过程中,涂层表面因受到足够大的砂粒冲击力而形成压痕,在压痕区域下会形成弹性变形区,并且形成中间裂纹,从而在随后的冲击力下形成径向裂纹^[15],进而加速冲蚀磨损。

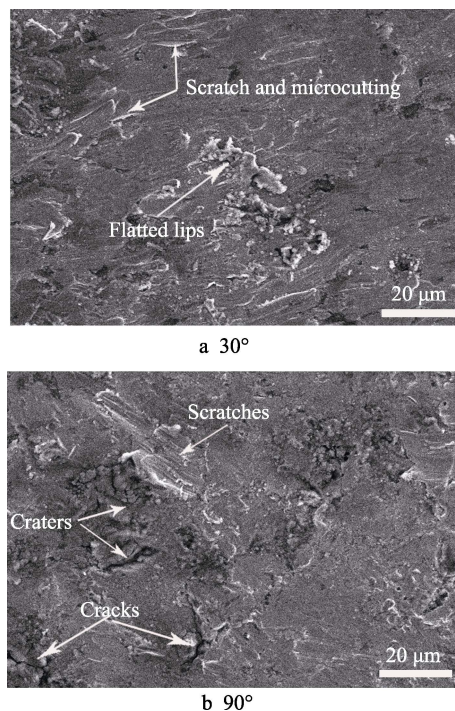


图7 0.3 kW 激光重熔非晶涂层在不同冲击角度下的冲蚀磨损形貌

Fig.7 Slurry erosion morphology of remelted amorphous alloy coatings by 0.3 kW laser at different impact angle

对比两种角度下的冲蚀形貌可见,重熔层在经过小角度冲蚀后,其表面主要为砂粒冲击留下的较浅的显微切削,重熔层仍保持着较为平整的表面状态。从 30° 和 90° 的冲蚀角度来看,在高角度的垂直冲击下,由于砂粒的能量更加集中,重熔层在冲击过程中,凹坑和裂纹更容易产生,从而导致材料的流失更加严重。可见,在这种冲蚀条件下,靶材的硬度高,而韧性较差,造成大攻角比小攻角下的冲蚀磨损量更大。因此,通过激光重熔虽然降低了涂层硬度,提高了韧性,但对本实验条件下的冲蚀磨损而言,还可以进一步降低硬度和提高韧性,以增强涂层的抗冲蚀性能。

2.3 非晶涂层重熔后的耐腐蚀性能

喷涂层和不同激光功率重熔层的极化曲线如图8

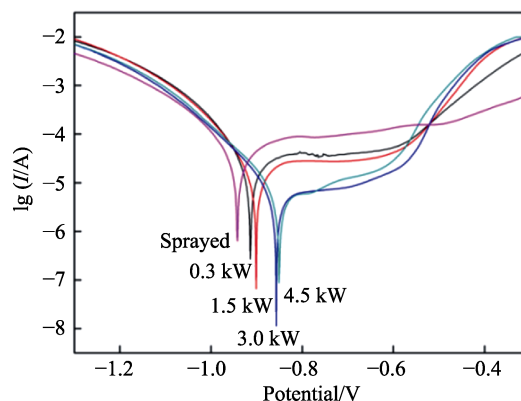


图8 喷涂层和不同激光重熔功率涂层的极化曲线
Fig.8 Potentiodynamic polarization curves of as-sprayed coating and remelted coating at different laser power

所示。相应的腐蚀电流密度和腐蚀电位采用 Tafel 直线外推法计算得到^[19]，见表 2。与喷涂层相比，激光重熔涂层的腐蚀电位上升，腐蚀电流密度下降。这表明激光重熔涂层的腐蚀倾向减弱，腐蚀速率减小，耐蚀性能提高。此外，相比喷涂层，重熔层的极化曲线有明显的钝化区。钝化形成的保护膜能够有效阻止腐蚀介质渗入涂层到达基体，有利于提高涂层的耐蚀

性。腐蚀形成的产物覆盖在涂层表面，从而在一定程度上隔绝了涂层与腐蚀介质接触，减缓腐蚀速率。激光重熔可以促进涂层的化学成分均匀化，特别是显著消除了喷涂层的层状结构及孔隙等缺陷，从而降低了非均匀腐蚀的速率。与 304 不锈钢相比^[20]，本课题中制备的含非晶相铁基喷涂层与重熔层表现出更优异的耐蚀性能。

表 2 喷涂层和不同激光重熔功率涂层的电化学参数
Tab.2 Potentiodynamic polarization parameters of as-sprayed coating and remelted coating at different laser power

Laser power/kW	0 (As-sprayed)	0.3	1.5	3.0	4.5
Corrosion potential/V	−0.944	−0.916	−0.903	−0.858	−0.853
Corrosion current density/($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	52.29	32.57	25.40	10.06	8.693

3 结论

本文的研究工作表明，激光重熔工艺可提高电弧喷涂含非晶相铁基合金涂层的腐蚀和冲蚀性能：
1）激光重熔消除了电弧喷涂涂层的层状结构及孔洞缺陷，但涂层表面硬度和非晶相含量降低。重熔后的涂层与基体的结合状态可由重熔前的机械结合转变为冶金结合。
2）冲蚀磨损试验表明，重熔层的抗冲蚀性能显著优于喷涂层及 Q345 钢。与喷涂层相比，0.3 kW 激光重熔涂层的耐磨性在 30° 攻角下可提高 3 倍，在 90° 攻角下可提高将近 6 倍。随着激光功率的增加，抗冲蚀性能逐渐下降。
3）激光重熔大幅消除喷涂层中的组织缺陷，从而显著降低了腐蚀电流密度，提高了涂层的耐蚀性。

参考文献：

[1] 林尽染, 王泽华, 林萍华, 等. FeNiCrBSiNbW 非晶涂层组织及空蚀性能[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(12): 132-136.
LIN Jin-ran, WANG Ze-hua, LIN Ping-hua, et al. Microstructure and cavitation erosion behavior of FeNiCrB-SiNbW amorphous coating[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2012, 33(12): 132-136.
[2] 傅斌友, 贺定勇, 赵力东, 等. 电弧喷涂铁基非晶涂层的结构与性能[J]. 焊接学报, 2009, 30(4): 53-56.
FU Bin-you, HE Ding-yong, ZHAO Li-dong, et al. Microstructure and properties of arc sprayed coatings containing Fe-based amorphous phase[J]. Transactions of the China welding institution, 2009, 30(4): 53-56.
[3] 张志彬, 梁秀兵, 徐滨士, 等. 高速电弧喷涂铝基非晶纳米晶复合涂层的组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(5): 872-876.
ZHANG Zhi-bin, LIANG Xiu-bing, XU Bin-shi, et al. Microstructure and performance of Al-based amorphous and nanocrystalline composite coatings prepared by high

velocity arc spraying[J]. Rare metal materials and engineering, 2012, 41(5): 872-876.
[4] 马晓琳, 周勇, 刘玉栋. 热喷涂铁基非晶合金材料的研究进展[J]. 热处理技术与装备, 2015(4): 22-26.
MA Xiao-lin, ZHOU Yong, LIU Yu-dong. Research progress of Fe-based amorphous alloy materials prepared by thermal spraying[J]. Heat treatment technology and equipment, 2015(4): 22-26.
[5] 何科杉, 程西云, 黄钰. 激光重熔热喷涂涂层研究进展[J]. 热加工工艺, 2013, 42(4): 149-151.
HE Ke-shan, CHEN Xi-yun, HUANG Yu. Research trend of thermal spray coating by laser remelting[J]. Hot working technology, 2013, 42(4): 149-151.
[6] WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, SHEN Li-da, et al. Influences of laser remelting on microstructure of nanostructured Al₂O₃-13wt.%TiO₂ coating fabricated by plasma spraying[J]. Applied surface science, 2009, 255: 4606-4610.
[7] LI Chong-gui, WANG You, WANG Shi, et al. Laser surface remelting of plasma-sprayed nanostructured Al₂O₃-13wt.%TiO₂ coatings on magnesium alloy[J]. Journals of alloys and compounds, 2010, 503: 127-132.
[8] 陈正涵, 孙晓峰, 李占明, 等. 冷喷涂 Cu402F 涂层激光重熔表面改性后摩擦学行为[J]. 表面技术, 2017, 46(10): 161-167.
CHEN Zheng-han, SUN Xiao-feng, LI Zhan-ming, et al. Tribological behavior of cold sprayed Cu402F coating after laser remelting[J]. Surface technology, 2017, 46(10): 161-167.
[9] 张娜, 周勇, 吴限. 喷涂涂层激光重熔技术的研究进展[J]. 热处理技术与装备, 2011, 32(1): 1-4.
ZHANG Na, ZHOU Yong, WU Xian. Research and development on the laser remelting technique of the spraying coating[J]. Heat treatment technology and equipment, 2011, 32(1): 1-4.
[10] 张培磊, 闫华, 徐培全, 等. 激光熔覆和重熔制备 Fe-Ni-B-Si-Nb 系非晶纳米晶复合涂层[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(11): 2846-2851.
ZHANG Pei-lei, YAN Hua, XU Pei-quan, et al. Fe-Ni-B-

- Si-Nb amorphous and nanocrystalline composite coating prepared by laser cladding and remelting[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2011, 21(11): 2846-2851.
- [11] LI Rui-feng, LI Zhou-guo, HUANG Jian, et al. Dilution effect on the formation of amorphous phase in the laser clad Ni-Fe-B-Si-Nb coatings after laser remelting process[J]. Applied surface science, 2012, 258(20): 7956-7961.
- [12] 刘景涛, 侯纪新, 张晓蓉. 重熔处理对铝基非晶合金腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(2): 296-300.
- LIU Jing-tao, HOU Ji-xin, ZHANG Xiao-rong. Influence of remelting treatment on corrosion behavior of amorphous alloys[J]. Rare metal materials and engineering, 2017, 46(2): 296-300.
- [13] 梁秀兵, 程江波, 刘燕, 等. 铁基非晶纳米晶涂层的耐磨性研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23(5): 77-81.
- LIANG Xiu-bing, CHEN Jiang-bo, LIU Yan, et al. Anti-wear properties of Fe-based amorphous and nanocrystalline coating[J]. Journal of armored force engineering institute, 2009, 23(5): 77-81.
- [14] 顾鹏, 纪秀林, 鲍亚运, 等. 放电等离子烧结铁基非晶涂层的滑动与冲蚀磨损性能[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 117-121.
- GU Peng, JI Xiu-lin, BAO Ya-yun, et al. Sliding and erosive wear resistance of spark plasma sintered Fe-based amorphous coating[J]. Surface technology, 2017, 46(7): 117-121.
- [15] 董刚, 张九渊. 固体粒子冲蚀磨损研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 32(2): 307-312.
- DONG Gang, ZHANG Jiu-yuan. Developments of research on the solid particle erosion of materials[J]. Journal of materials science and engineering, 2003, 32(2): 307-312.
- [16] FINNIE I. On the velocity dependence of the erosion of ductile metals by solid particles at low angles of incidence[J]. Wear, 1978(48): 181-190.
- [17] SUGIYAMA K, HARADA K, HATTORI S. Influence of impact angle of solid particles on erosion by slurry jet[J]. Wear, 2008, 265: 713-720.
- [18] 马颖, 任峻, 李元东, 等. 冲蚀磨损研究的进展[J]. 兰州理工大学学报, 2005, 21(1): 21-25.
- MA Ying, REN Jun, LI Yuan-dong, et al. Development of research on erosion of materials[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2005, 21(1): 21-25.
- [19] MCCAFFERTY E. Validation of corrosion rates measured by the Tafel extrapolation method[J]. Corrosion science, 2005, 47: 3202-3215.
- [20] 方冉, 肖平, 黄仲佳, 等. HVOF 制备 FeCrMoCB 非晶合金涂层的组织与性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(1): 12-16.
- FANG Ran, XIAO Ping, HUANG Zhong-jia, et al. Microstructure and properties of FeCrMoCB amorphous coating synthesized by HVOF[J]. Ordnance material science and engineering, 2016, 39(1): 12-16.