

激光重熔轨迹对 Fe 基 Ni/WC 涂层组织和性能的影响

赵运才, 杜辉辉, 上官绪超, 何文

江西理工大学机电工程学院, 江西 赣州 341000

摘要 通过等离子喷涂方法在 45[#] 钢表面涂覆了 Fe 基 Ni/WC 金属陶瓷涂层, 采用 4 种激光重熔轨迹对涂层进行了重熔处理, 分析了激光重熔轨迹对涂层组织和性能的影响。结果表明, 圆形激光重熔轨迹对涂层性能改善效果最显著, 在对流传质作用下基体和重熔层之间发生元素转移, 基体与重熔层之间的结合方式由机械结合转变为冶金结合; WC、W₂C 等硬质相在熔覆层中起到弥散强化作用, 圆形激光重熔轨迹涂层的显微硬度和磨损失重分别是打点激光重熔轨迹涂层的 1.4 倍和 33.7%; 圆形激光重熔轨迹涂层中的孔隙率最小。

关键词 激光技术; 激光重熔; 等离子喷涂; Fe 基 Ni/WC 涂层; 扫描轨迹

中图分类号 TG135 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.041404

Influences of Laser Remelting Trajectories on Microstructures and Properties of Fe-Based Ni/WC Coatings

Zhao Yuncai, Du Huihui, Shanguan Xuchao, He Wen

School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology,
Ganzhou, Jiangxi 341000, China

Abstract The Fe-based Ni/WC cermet coatings are covered on the surface of 45[#] steels by the plasma spraying technique, the coatings are remelted under four laser remelting trajectories, and the influences of laser remelting trajectories on the microstructure and properties of the coatings are investigated. The results show that the circular laser remelting trajectory exerts the most obvious improvement on the coating properties. The element transfer occurs between the substrate and the remelted layers under the action of convective mass, and the combination mode between the substrate and the remelted layers changes from mechanical bonding to metallurgical bonding. WC, W₂C and other hard phases play the role of dispersion-strengthening in the cladding layer. The micro-hardness and wear loss of the coatings under the circular laser remelting trajectories are 1.4 times and 33.7% of those under dotted laser remelting trajectories, respectively. The porosity of the coating under the circular laser remelting trajectories is the lowest.

Key words laser technique; laser remelting; plasma spraying; Fe-based Ni/WC coating; scanning trajectory

OCIS codes 140.3460; 140.3390

1 引言

45[#] 钢具有良好的综合力学性能, 被广泛应用于螺栓、联轴器、活塞杆等具有高硬度和高耐磨性的

零部件中。采用调质处理的方法可以提高 45[#] 钢的硬度及耐磨性, 但在实际应用中, 经调制处理的零部件表面磨损严重。因此, 需要探索一种能够有效提高零件硬度及耐磨性的技术。

收稿日期: 2017-07-17; 收到修改稿日期: 2017-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(51565017)、江西省自然科学基金(2012BAB206026)、江西省教育厅资助项目(GJJ14424)、高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室开放基金(201713)

作者简介: 杜辉辉(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事表面工程、摩擦磨损与抗磨技术等方面的研究。

E-mail: 735813122@qq.com

导师简介: 赵运才(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事表面工程、摩擦磨损与抗磨技术等方面的研究。

E-mail: zhaoyuncai@126.com

等离子喷涂技术具有沉积效率高、生产效率高、可喷涂材料多等优点,在改善金属表面性能方面得到广泛应用。然而,经等离子喷涂后形成的涂层存在很多缺陷,如涂层呈现典型的层状结构,涂层与金属基体之间的结合强度较低,涂层内部分布着较多孔隙和微裂纹。为进一步提高等离子喷涂涂层的性能,国内外开展了利用激光重熔技术提高涂层组织性能的研究。Qian等^[1]研究发现,经激光重熔处理后,重熔层与金属基体之间的结合强度为熔覆前的3倍,重熔层的耐磨性得到改善。Feng等^[2]指出,TiB-TiC陶瓷与TiNi-Ti₂Ni相结合可以提高重熔层的耐磨性。张学秋等^[3]研究发现,激光重熔镍基合金复合涂层中弥散分布着多种硬质相,有效地提高了涂层的耐磨性和硬度。朱生霄等^[4]提出,在多道焊接过程中,后一道焊接轨迹比前一道生成的奥氏体深度有所增加。文献^[5]报道,W₂C颗粒在加热过程中分解产生的W、C与周围元素发生反应,增加了材料晶格畸变,起到固溶强化作用。

国内外学者在激光重熔领域进行了大量研究,但关于不同激光重熔轨迹对喷涂涂层组织和性能的影响研究却鲜有报道。本文以45#号钢为基体,等离子喷涂了Fe基Ni/WC金属陶瓷涂层,采用打点、圆形、矩形、平行4种激光重熔轨迹对涂层进行重熔处理,研究了不同激光重熔轨迹对涂层组织和性能的影响。

2 实 验

2.1 实验材料与设备

材料选用圆环状45#钢,其外径为26 mm,内

径为20 mm,高为10 mm。用金相砂纸打磨试样后进行热喷涂,热喷涂材料选用直径约为53 μm的Fe40铁基合金粉末和Ni60+35WC镍基碳化钨合金粉末,并按9:1的质量比例将两种粉末混合,其化学成分见表1和表2。

使用美国TAFE公司生产的JP-8000自动喷涂系统在基体表面进行等离子喷涂,喷涂前对45#钢表面进行除油、打磨、喷砂粗化等预处理以提高基体表面活性,然后在基体表面喷涂0.4 mm厚的金属陶瓷涂层。选用东莞市奥信激光有限公司生产的AXL-600AW激光器对涂层进行激光重熔,以SiC为填料,氩气为保护气体;激光重熔的工艺参数为:激光功率500 W,光斑直径1.5 mm,扫描速度200 mm·min⁻¹,搭接率0.1,打点间隔1 mm,激光脉冲宽度10 ms。不同激光重熔轨迹的工艺参数见表3,不同激光重熔轨迹加工后涂层的表面形貌如图1所示。

表1 Fe40铁基合金粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of Fe40 Fe-based alloy powder (mass fraction, %)

Element	Ni	Cr	B	Si	C	Fe
Content	8-12	15-20	1.5-3	1.5-3	<0.5	Bal.

表2 Ni60+35WC镍基碳化钨合金粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of Ni60+35WC nickel tungsten carbide powder (mass fraction, %)

Element	Ni	Cr	B	Si	C	Fe	WC
Content	Bal.	15-20	3.0-4.5	3.5-5.5	0.5-1.1	≤10	35

表3 不同激光重熔轨迹的工艺参数

Table 3 Process parameters under different laser remelting trajectories

Trajectory	Power /W	Scanning speed /(mm·min ⁻¹)	Spot diameter /mm	Energy density /(W·mm ⁻¹ ·s ⁻¹)
Dotted	500	200	1.5	48
Rectangular	500	200	1.5	144
Parallel	500	200	1.5	91
Circular	500	200	1.5	97

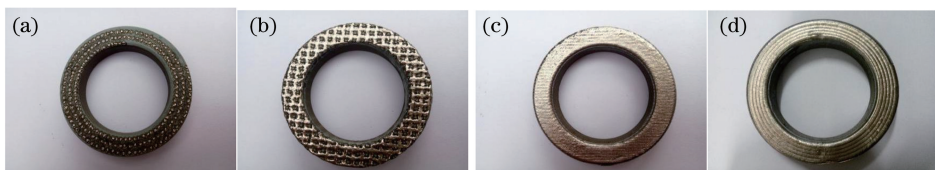


图1 不同激光重熔轨迹下涂层的表面形貌。(a)打点;(b)矩形;(c)平行;(d)圆形

Fig. 1 Surface morphologies of coatings under different laser remelting trajectories. (a) Dotted; (b) rectangular; (c) parallel; (d) circular

2.2 实验方法

用线切割方式将试样切割成尺寸为 $15\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的小试样。分别用砂纸及抛光机将试样横截面打磨至光亮镜面效果。用质量分数为 4% 的硝酸乙醇溶液腐蚀试样横截面约 10 s, 清洗风干后用日本奥林巴斯集团生产的型号为 STM7 的金相显微镜观察试样横截面的显微形貌。采用北京中科科仪股份有限公司生产的型号为 MLA650F 的场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察不同激光重熔轨迹下基体与涂层结合界面处显微组织的变化形貌, 分别利用能谱仪 (EDS) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 对涂层中的元素分布及物相变化进行分析, 然后用 Jade 软件对测试试样进行物相标定, 对晶粒大小进

表 4 摩擦磨损实验参数

Table 4 Experimental parameters of friction and wear

Parameter	Normal load /N	Rotating speed /($r \cdot \text{min}^{-1}$)	Wear time /s	Test temperature / $^{\circ}\text{C}$
Value	350	200	1800	20

3 结果和分析

3.1 重熔层显微组织及成分分析

不同激光重熔轨迹下重熔层的 SEM 形貌如图 2 所示。从图 2(a) 中可以看出, 打点激光重熔轨迹形成的涂层内有大量的孔隙和裂纹, 涂层呈典型的层状结构, 激光重熔的效果较差。在等离子喷涂过程中, 粒子是分批喷射到基体上, 粒子在加热过程中受热不均匀, 导致半熔或未熔状态粒子不能在基体表面完全展开; 同时, 粒子在飞行过程中会吸附周围的空气, 在涂层冷却凝固时气体无法释放, 产生较多气孔; 并且陶瓷材料难以发生塑性变形, 与基体相容性较差, 冷却时收缩应力难以释放, 导致裂纹产生^[6]。图 2(a) 中没有形成完全连续的激光重熔层, 激光作用时间短、提供的能量小, 故等离子喷涂涂层没有完全重熔, 涂层与基体之间无法形成冶金结合, 没有达到改善涂层组织结构的目的。

从图 2(b) 可以看出, 矩形激光重熔轨迹的熔覆层中有较多的小气孔。矩形轨迹重熔过程容易产生过烧现象, 使得基体受热过多, 基体中固有气孔中的气体释放到涂层中; 但激光熔覆为快速加热及凝固的过程, 释放到涂层中的气体来不及排出而重熔层就已凝固, 因此, 重熔层中残留气孔较多。此外, 枝晶主干在与热流平行的方向上迅速生长并抑制相邻方向上枝晶的生长, 导致熔覆层组织为呈长条形平行排列且具有明显晶界的柱状晶, 生长方向与热流方向平行不利于熔覆层表面

行定量分析。利用山东中仪仪器有限公司生产的型号为 MMG-10 的微机控制高温高速摩擦磨损试验机进行摩擦磨损实验, 选用 GH21 高温合金钢为摩擦副材料, 摩擦磨损实验参数见表 4。实验前将对磨件表面磨平, 实验前后试样均用丙酮清洗表面。利用临沂市盈嘉科学仪器有限公司生产的型号为 FA2014 的分析电子天平称量试样磨损的质量, 每种涂层作三次实验并取平均值。使用西安明克斯仪器生产的型号为 FM-700 的显微硬度测试仪测试不同激光重熔轨迹下涂层的硬度, 加载载荷为 1.96 N, 加载时间为 10 s, 测试间距为 0.05 mm, 每个点测试三次后取平均值。利用 Photoshop 软件计算不同激光重熔轨迹下重熔层的孔隙率。

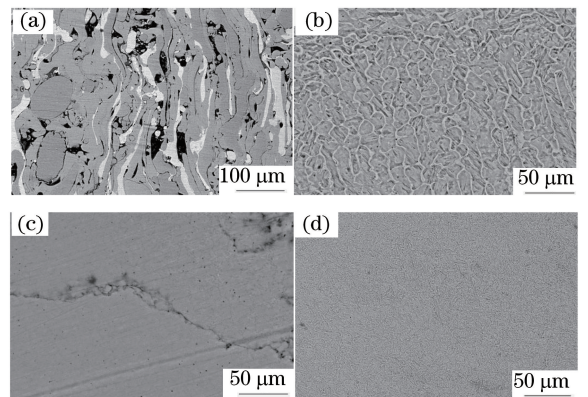


图 2 不同激光重熔轨迹重熔层显微形貌。

(a) 打点; (b) 矩形; (c) 平行; (d) 圆形

Fig. 2 Micro-morphologies of remelted layers under different laser remelting trajectories.

(a) Dotted; (b) rectangular; (c) parallel; (d) circular

质量的提高。从图 2(c) 可以看出, 平行激光重熔轨迹形成的熔覆层中有微裂纹生成。而图 2(d) 所示为圆形激光重熔轨迹形成的连续致密的重熔层, 表面无明显裂纹和气孔。可能原因为: 1) 平行轨迹方式未能将原涂层完全重熔, 导致涂层硬度增大; 塑性差的陶瓷相未能完全熔化、分解, 陶瓷相广泛分布于重熔层中, 冷却过程中不同材料的热膨胀系数、导热系数不一致导致涂层产生裂纹; 2) 重熔过程中采用圆形轨迹方式可以更好地释放重熔过程中产生的内应力。在凝固过程中, 圆形轨迹重熔形成的固液界面过冷度大, 树枝晶被打碎, 快速冷却时形成了晶粒更为细小的等轴晶。

过冷度的计算公式^[7]为

$$\Delta T = \Delta T_i + \Delta T_c + \Delta T_r + \Delta T_k, \quad (1)$$

$$\Delta T_r = \frac{2\Gamma}{r}, \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{e}{H}, \quad (3)$$

式中 ΔT_i 为热过冷度, ΔT_c 为成分过冷度, ΔT_r 为界面动力学过冷度, ΔT_k 为界面曲率过冷度, Γ 为 Gibbs-Thomson 函数, e 为界面能, H 为单位体积结晶潜热, r 为枝晶尖端半径。

根据 Brook 模型, 可得重熔过程中晶粒生长的计算方法^[8]为

$$D^n - D_0^n = \int_0^{t_1} A \exp\left[-\frac{Q}{RT(t)}\right] t dt + \int_{t_1}^{t_2} A \exp\left[-\frac{Q}{RT(t)}\right] t dt, \quad (4)$$

式中 D 为晶粒初始尺寸, D_0 为 t 时刻的晶粒尺寸, A 为原子跃迁比例常数, n 为晶粒生长常数, Q 为活化能, R 为气体常数, T 为绝对温度, $0 \sim t_1$ 为熔凝阶段, $t_1 \sim t_2$ 为材料缓慢温升阶段。

圆形轨迹方式下的激光重熔涂层截面线扫描结

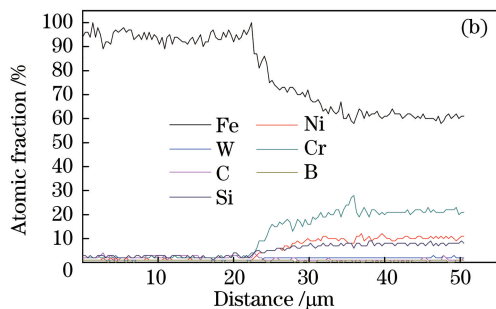
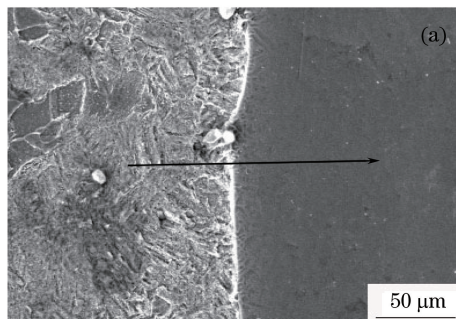


图3 圆形重熔轨迹涂层元素含量测试。(a)区域;(b)结果

Fig. 3 Element content test of coatings under circular laser remelting trajectories. (a) Area; (b) result

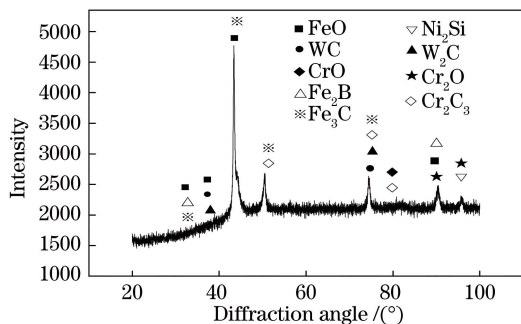


图4 圆形轨迹熔覆表面 XRD 图谱

Fig. 4 XRD pattern of cladding surface under circular laser remelting trajectories

果如图 3 所示。可以看出,涂层中 Fe 含量在距起点约 $23 \mu\text{m}$ 处急剧减小,而 W、Cr、Si 含量具有不同程度的增大,B、C 含量基本保持不变。这是因为 45[#] 钢中 Fe 含量较大,在涂层与基体的结合界面处,Fe 含量急剧减小,W、Cr、Si 含量迅速增大;同时,激光重熔时,W、Cr、Si 等在对流搅动的作用下^[9]发生了元素扩散,在界面两侧形成了过渡区,基体与金属间的结合方式由机械结合转变为冶金结合,有效增大了基体与重熔层之间的结合强度^[10]。圆形激光重熔轨迹的熔覆层表面 XRD 图如图 4 所示,结合图 3 可知,该重熔层表面成分主要包括 Fe 的固溶体、WC、CrO、Cr₂C₃ 和 Ni₂Si 等化合物,而铁基合金粉末 Fe40 中含有的 B、Si 可以很好地吸附涂层中的氧元素,生成熔点低、流动性好的 SiO₂、B₂O₃,并与其他夹杂物一起形成熔渣上浮,从而形成连续致密、孔隙率小的涂层^[11]。同时,新生成的 W₂C 等硬质相具有很高的硬度,分布在重熔层中起到弥散强化的作用,在快速加热及凝固的激光重熔过程中产生晶格畸变,组织结构更加细小,Fe、W、Si、C 等发生化学反应后溶于固溶体中,起到固溶强化的作用,达到表面改性的目的。

3.2 重熔涂层的界面金相组织

不同激光重熔轨迹下的基体与重熔层结合界面的金相显微形貌如图 5 所示。从图 5(a)可以看出,打点轨迹方式重熔后的重熔层中有较多气孔,基体与重熔层之间为机械结合,结合强度较小,重熔层部分为层状结构形貌,基体部分组织结构为珠光体与铁素体。这是因为打点的重熔轨迹未能将原涂层表面完全熔覆,没有形成致密连续的重熔层。试样表面涂层仍为等离子喷涂后的组织形貌,在等离子喷涂过程中,基体表层中部分颗粒未能完全熔化,颗粒不完全填充,导致大量孔隙的形成。由图 5(b)可以看出,矩形激光重熔轨迹得到的涂层与基体的结合界面处有

明显的裂纹,基体部分由片状珠光体与铁素体组成。因为陶瓷相不易发生塑性变形,其在冷却凝固的过程中延展性较差,内应力难以释放,导致裂纹的产生^[12]。从图 5(c)可以看出,平行轨迹方式重熔后涂层与基体之间有过渡层,表层组织均匀致密,气孔数量明显减少,呈现冶金结合的形式。高能量激光束通过裂纹传递的能量使得裂纹周围材料迅速熔化,液体状态的金属化合物对孔隙和裂纹部分进行补充,从而

减少裂纹以及气孔的数量。从图 5(d)可以看出,圆形轨迹方式重熔得到的涂层组织结构细小、均匀致密且无明显裂纹气孔。重熔层表层组织为等轴晶和细小枝晶组织,中部为树枝晶组织,下部为胞状晶组织。树枝晶的生长方向与温度的传递方向平行。基体表面温度较低,导致固液界面前沿过冷度较大,冷却速度较快使得枝晶组织来不及生长就已凝固,从而打断了枝晶组织,细化晶粒形成等轴晶。

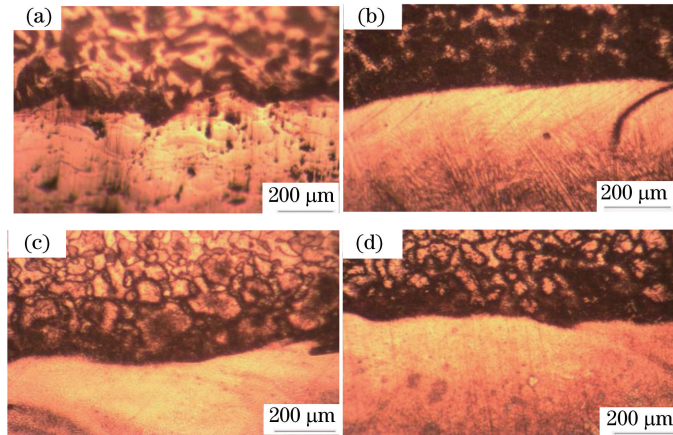


图 5 不同重熔轨迹涂层与基体结合界面的金相图。(a)打点;(b)矩形;(c)平行;(d)圆形

Fig. 5 Metallograph of bonding interface between coating and substrate under different remelting trajectories.

(a) Dotted; (b) rectangular; (c) parallel; (d) circular

3.3 涂层摩擦学性能

不同激光重熔轨迹涂层沿深度方向的显微硬度如图 6 所示。不同激光重熔轨迹涂层的显微硬度变化趋势相同,涂层硬度均高于基体的硬度,次表层硬度高于表层硬度^[13-14];所有涂层在热影响区的硬度急剧减小,最终在基体部分趋于一致。这是因为涂层强化机制由重熔前的形变强化过渡到细晶强化、固溶强化和第二相强化。激光重熔时 Fe、W、Si 与 Ni 发生反应,产生晶格畸变,起到固溶强化的作用。同时,WC、W₂C 等硬质相在涂层中起到了弥散强化的作用,经过时效处理,激光重熔后有弥散细小的第

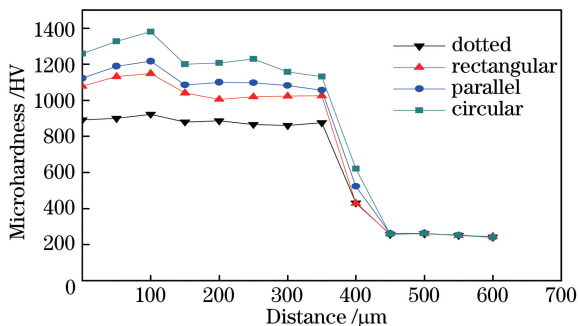


图 6 不同重熔轨迹涂层的显微硬度

Fig. 6 Microhardness of coatings under different remelting trajectories

二相析出,进一步提高了涂层的硬度^[15]。采用打点轨迹方式重熔时,激光输入能量小,作用时间短,不能使基体与涂层完全熔化,因此无法形成冶金结合,不能达到改善涂层硬度的目的;涂层的平均硬度只有 880 HV。激光在矩形轨迹运动过程中,容易产生过烧现象,导致基体过度熔化。基体受热熔化过多引起重熔层受基体稀释的程度增加,增加了重熔层开裂、变形的倾向。此外,重熔层受热保温时间变长使得重熔层无法快速凝固,导致重熔层内部组织结构变大,不利于显微硬度的改善。采用圆形轨迹方式重熔时,基体受热均匀,形成的重熔层中 W₂C、CrO、Cr₂O₃ 等硬质相比平行轨迹方式重熔时多,因此,圆形激光重熔轨迹涂层的显微硬度高于平行激光重熔轨迹的。

不同激光重熔轨迹下涂层的磨损失重如图 7 所示。可以看出,打点、矩形、平行和圆形四种扫描轨迹下的涂层磨损失重分别为 9.2, 5.3, 3.3, 3.1 mg。圆形轨迹方式的重熔涂层磨损失重是打点扫描轨迹的 33.7%。这是因为打点激光重熔轨迹下的激光输入能量小,未能消除等离子喷涂时产生的裂纹、孔隙等缺陷。圆形轨迹方式重熔时,激光能量输入较为均匀,等离子喷涂时未熔的 WC 颗粒在重熔时熔化

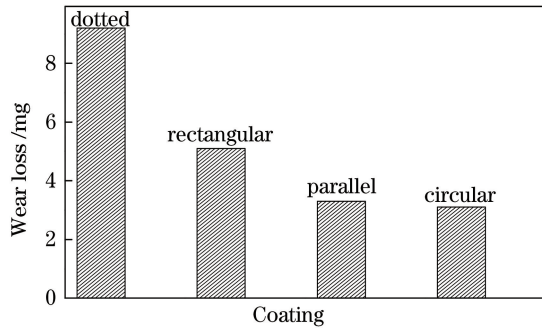


图7 不同重熔轨迹下的磨损失重

Fig. 7 Wear loss under different remelting trajectories

分解,并与周围金属发生化学反应,形成新的化合物弥散分布在重熔层中,起到弥散强化的作用。圆形

和打点轨迹方式重熔涂层的干滑动摩擦磨损 SEM图如图8所示。圆形扫描轨迹下重熔层的磨损表面呈现出浅而细小的犁沟,主要表现为磨粒磨损;打点扫描轨迹下重熔层磨损表面除了有犁痕外,还伴有明显的裂纹和黏着脱落痕迹,磨损机制为黏着磨损和磨粒磨损。这是因为打点激光重熔轨迹下未能消除等离子喷涂时产生的缺陷,在法向载荷作用下,重熔层内部的孔隙和裂纹沿晶界扩展,不同方向的裂纹相互连接并延伸到重熔层表面,导致重熔层失效。圆形轨迹下的重熔层形成了组织更为细小的等轴晶,增大了裂纹扩展的阻力,且重熔层中的硬质相与软质基体相结合,起到了强韧结合的作用^[16],有利于重熔层耐磨性能的提高。

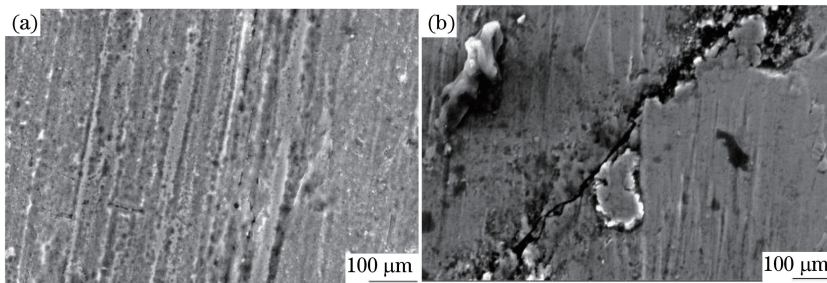


图8 不同重熔轨迹下涂层干滑动后的 SEM图。(a)圆形;(b)打点

Fig. 8 SEM images of coatings after dry sliding under different remelting trajectories. (a) Circular; (b) dotted

3.4 孔隙率测定

干滑动摩擦后平行扫描轨迹 SEM图如图9所示。

孔隙率的计算方式为

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% = (1 - \frac{\rho_0}{\rho}) \times 100\%, \quad (5)$$

式中 P 为元素孔隙率, V_0 为材料表观体积, V 为密实体积, ρ_0 为表观密度, ρ 为密度。

分别计算不同激光重熔轨迹涂层的孔隙率,每种涂层取5个样品计算平均值,计算结果见表5。

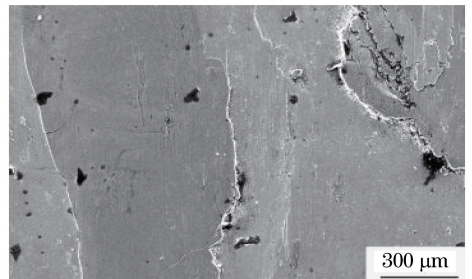


图9 干滑动摩擦后平行扫描轨迹 SEM图

Fig. 9 SEM image of parallel scanning trajectory after dry sliding friction

表5 不同重熔轨迹表面的孔隙率

Table 5 Surface porosity of coatings under different remelting trajectories

Trajectory	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Average
Dotted	4.3%	4.1%	4.5%	4.2%	4.7%	4.36%
Rectangular	3.4%	3.8%	3.1%	3.5%	3.6%	3.48%
Parallel	2.2%	2.5%	2.7%	2.5%	2.8%	2.54%
Circular	2.0%	2.1%	2.5%	2.6%	2.4%	2.32%

由表5可知,激光重熔时,打点轨迹方式得到的涂层孔隙率较大,圆形轨迹熔覆所形成的涂层最为致密,且平行轨迹重熔的涂层孔隙率小于矩形轨迹重熔的涂层。这是因为在激光熔覆过程中,圆形与

平行轨迹重熔时材料受热均匀,热量沿孔隙传递,将周围材料熔化,填补孔隙后形成连续致密的重熔层。打点轨迹重熔虽然会对基体产生较小的影响,但不连续的激光脉冲无法改变等离子喷涂的组织结构,

等离子喷涂时产生的较多气孔无法排除,使得涂层的孔隙率较大。矩形轨迹方式重熔时,在激光路径中容易产生基体过烧现象,导致基体固有气孔中的气体释放到重熔层中,加之重熔层冷却速度极快,气体无法及时排出而残留在重熔层中,使得矩形激光中轨迹涂层的孔隙率较大。

4 结 论

通过打点、平行、矩形、圆形 4 种激光重熔轨迹方式,对 45[#] 钢表面的涂覆层进行了激光重熔处理,分析了激光重熔处理后涂层的组织和性能,得到以下结论。

1) 打点轨迹方式不能改变等离子喷涂时形成的层状结构,重熔效果较差;矩形轨迹方式得到的重熔层组织结构粗大;平行轨迹方式的重熔层表层有许多微裂纹;圆形轨迹重熔对重熔层性能改善效果显著。

2) 在圆形重熔轨迹方式下,由于对流传质作用,基体与重熔层元素之间互相转移,形成牢固的冶金结合,涂层组织均匀致密,晶粒结构为细小的等轴晶。

3) 重熔轨迹对重熔层的硬度和孔隙率产生较大影响,其中圆形重熔轨迹对涂层显微硬度的改善效果最佳,且涂层孔隙率最小。

参 考 文 献

- [1] Qian J G, Zhang J X, Li S Q, *et al.* Study on laser cladding NiAl/Al₂O₃ coating on magnesium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(3): 466-469.
- [2] Feng S R, Tang H B, Zhang S Q, *et al.* Microstructure and wear resistance of laser clad TiB-TiC/TiNi-Ti₂ Ni intermetallic coating on titanium alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(7): 1667-1673.
- [3] Zhang X Q, Gong W B, Liu Y D. Microstructure and properties of laser remelting nickel-based alloy sprayed coating[J]. *Welding & Joining*, 2007(2): 46-48.
张学秋, 宫文彪, 刘耀东. 激光重熔镍基合金复合涂层组织和性能[J]. *焊接*, 2007(2): 46-48.
- [4] Zhu S X, Qin X P, Wang Z, *et al.* Numerical investigation of multi-pass spot continual induction hardening[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(3): 122-130.
朱生霄, 秦训鹏, 汪舟, 等. 多道次点式连续移动感

应淬火数值模拟[J]. *中国表面工程*, 2015, 28(3): 122-130.

- [5] Li J N. Technology and application of laser cladding [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
李嘉宁. 激光熔覆技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [6] Guo C, Chen J M, Zhou J S, *et al.* Microstructure and tribological properties of laser remelting Ti-6Al-4V[J]. *China Surface Engineering*, 2011, 24(3): 11-16.
郭纯, 陈建敏, 周健松, 等. Ti-6Al-4V 激光重熔结构及摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2011, 24(3): 11-16.
- [7] Li M X, He Y Z, Sun G X. Al₂O₃ nanocrystalline/Ni-based alloy composite coatings produced by laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(9): 1149-1152.
李明喜, 何宜柱, 孙国雄. 纳米 Al₂O₃/Ni 基合金复合材料激光熔覆层组织[J]. *中国激光*, 2004, 31(9): 1149-1152.
- [8] Zhang J H, Tian Z J, Zhao J F, *et al.* Analysis on micro-structure of nano-SiC laser coating[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2004, 15(6): 702-705.
张建华, 田宗军, 赵剑峰, 等. 纳米 SiC 激光熔覆陶瓷涂层组织结构分析[J]. *光电子 • 激光*, 2004, 15(6): 702-705.
- [9] Shi Y, Zhang H, Xu C Y. Research on the structure and wear resistance of colmonoy alloy coating cladded on austenitic stainless steel by laser [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(7): 927-932.
石岩, 张宏, 徐春鹰. 激光熔覆科尔莫落依合金涂层的奥氏体不锈钢表面组织和耐磨性研究[J]. *兵工学报*, 2010, 31(7): 927-932.
- [10] Hao X N, Xu X J, Xia D F, *et al.* Study on flame sprayed and laser remelted Al-Si coatings on magnesium alloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2010, 30(4): 43-47.
郝欣妮, 许晓静, 夏登福, 等. 镁合金表面火焰喷涂及激光重熔 Al-Si 合金涂层的研究[J]. *航空材料学报*, 2010, 30(4): 43-47.
- [11] Zhang X B, Zang C F, Liu C S. Ni-based laser cladding-remelting layers on 20[#] steel and its high temperature abrasive-wear behavior [J]. *Surface Technology*, 2010, 39(1): 1-4.
张小彬, 臧晨峰, 刘常升. 20[#] 钢激光熔覆-重熔 Ni 基涂层及其高温磨损行为[J]. *表面技术*, 2010, 39(1): 1-4.
- [12] He K S, Cheng X Y, Huang Y. Research trends of

- thermal spray coating by laser remelting[J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(4): 149-151.
- 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.
- [13] Shen Y F, Tang Z T, Feng X M. Mechanically alloyed and laser remelted NiCrAlY coatings on inner surface of carbon steel tubular components[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(6): 832-836.
- 沈以赴, 唐忠婷, 冯晓梅. 机械合金化法制备碳钢管内壁 NiCrAlY 涂层及激光重熔[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(6): 832-836.
- [14] Qiu X W, Liu C G, Zhang Y P. Microstructure and property of Al₂CrFeCoCuNi_xTi high entropy alloy coatings prepared by laser cladding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 051404.
- 邱星武, 刘春阁, 张云鹏. 激光熔覆 Al₂CoCrCuFeNi_xTi 高熵合金涂层的组织及性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 051404.
- [15] Lin H, Yang Y Q, Zhang G Q, *et al.* Tribological performance of medical CoCrMo alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1114003.
- 林辉, 杨永强, 张国庆, 等. 激光选区熔化医用钴铬钼合金的摩擦性能[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1114003.
- [16] Xu J T, Li A, Liu D, *et al.* Research on corrosion resistance and wear resistance of laser cladding Cr₃Si/ γ multi-phase coating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0303006.
- 徐金涛, 李安, 刘栋, 等. 激光熔覆 Cr₃Si/ γ 多相涂层耐蚀性和耐磨性研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0303006.