

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20171009001

激光重熔轨迹对 Fe 基 Ni/WC 喷涂层摩擦学性能的影响

杜辉辉, 赵运才, 黄丽容, 上官绪超
(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 为探究激光重熔轨迹对喷涂 Fe 基 Ni/WC 金属陶瓷涂层摩擦学性能的影响, 利用火焰喷涂设备在 45 钢基体表面制备 Fe 基 Ni/WC 金属陶瓷涂层, 分别采用矩形、平行、圆形 3 种扫描轨迹对涂层表面进行激光重熔。利用 SEM、EDS、XRD 等分别测定涂层显微组织、微区组织成分、物相结构和残余应力。利用 MMG-10 型摩擦磨损试验机进行常温干摩擦磨损实验。结果表明: 圆形扫描轨迹下的重熔层组织结构为晶粒更为细小的等轴晶, 增大了裂纹源形成和扩展的阻力。重熔层主要为 $\alpha(\text{Fe}, \text{Ni})$ 、 M_{23}C_6 和 WC、 W_2C 等硬质相颗粒, 起到弥散强化和固溶强化的作用, 进而提高重熔层硬度。圆形轨迹重熔层较其他两种轨迹表现出更好的摩擦性能, 硬质相颗粒镶嵌在软质基体中, 起到强韧结合的作用。圆形轨迹下的磨损量较矩形轨迹降低了 58.3%, 残余应力降低了 14.5%; 硬质相和氧化膜的协同作用使得重熔表面变得光滑, 从而降低摩擦因数。

关键词: 激光重熔; 扫描轨迹; 火焰喷涂; 耐磨; 残余应力

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)03-0152-09

Influences of Laser Remelting Paths on Tribological Property of Fe-based Ni/WC Spraying Coatings

DU Hui-hui, ZHAO Yun-cai, HUANG Li-rong, SHANGGUAN Xu-chao

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

Abstract: In order to investigate the influence of different laser remelting paths on the tribological properties of Fe based Ni/WC cermet coatings, Fe-based Ni/WC cermet coatings were prepared on the surface of 45 steel by flame spraying equipment followed three laser remelting treatment with paths including rectangular, parallel and circular. The microstructure, micro-tissue components, phase structure and residual stress were studied by SEM, EDS and XRD, respectively. The normal temperature dry wear test was conducted by MMG-10 friction wear test machine. Results show that the structure of the remelting layer under the circular scanning trajectory is small equiaxial crystal, which increases the resistance of the crack source formation and expansion. The particles of $\alpha(\text{Fe}, \text{Ni})$, M_{23}C_6 and WC, W_2C and other ceramic particles are distributed among the remelting layer, which plays the roles of dispersion and solid solution strengthening to improve the hardness of the remelting layer. The circular path shows better tribological property than the other two kinds of paths and the hard phase particles embed in the soft substrate, which can effectively improve combination; The wear rate and residual stress the coating treated with circular path is 58.3% and 14.5%, respectively, lower than that of the rectangular. The combination of hard phase and oxide film makes the surface of the remelted coating smooth and remarkably reduces the friction coefficient.

Keywords: laser remelting; scanning trajectory; flame spraying; wear resistance; residual stress

收稿日期: 2017-10-09; 修回日期: 2018-05-07

网络出版日期: 2018-05-09 09:10; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180509.0910.018.html>

通讯作者: 赵运才 (1964—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 表面工程、摩擦磨损; E-mail: zhaoyuncaicai@126.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51565017); 江西省自然科学基金 (2012BAB206026, 20171BAB206030)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51565017), Natural Science Foundation of Jiangxi Province (2012BAB206026, 20171BAB206030)

引文格式: 杜辉辉, 赵运才, 黄丽容, 等. 激光重熔轨迹对 Fe 基 Ni/WC 喷涂层摩擦学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(3): 152-160.

DU H H, ZHAO Y C, HUANG L R, et al. Influences of laser remelting paths on tribological property of Fe-based Ni/WC spraying coatings[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(3): 152-160.

0 引言

火焰喷涂技术解决了硬质相与金属基体之间难以相容的问题,因具有沉积效率高、生产效率高、喷涂材料范围广等优点,在改善金属表面性能方面得到广泛应用。但经火焰喷涂后所形成的涂层仍存在很多缺陷,如涂层呈现典型的层状结构;涂层与金属基体之间的结合方式为机械结合,结合强度较低,喷涂涂层组织结构粗大;涂层内部分布着较多孔隙和微裂纹,导致涂层致密性与耐磨性较差。

而激光重熔技术为表面改性提供了一种新思路,激光具有很强的单色性、相干性和单一方向性,激光重熔技术具有绿色无污染且重熔层与基体呈现更为牢固的冶金结合的特性,受到国内外学者的广泛关注,学者们在探索中发现激光重熔技术能够显著改善涂层组织和提高涂层性能。

如 Kong D 等^[1]研究发现:重熔层磨损率随载荷增加而降低,在高温摩擦磨损试验中, Ni、Fe、Si 等元素在 600 °C 时,氧化物提高了重熔层的耐磨性;文献^[2]指出,涂层经过激光重熔处理后,由于有硬质合金化合物 Fe₃Si、SiO₂ 生成,导致重熔层平均显微硬度由 600 HV_{0.1} 提高到 900 HV_{0.1};黄标^[3]在探究元素 Cr 对激光重熔 FeCoCr_xNiB 高熵合金涂层组织影响中,研究发现:随着 Cr 元素的增加,先共晶硼化物组织呈现由颗粒状到树枝晶再到十字块状的演变趋势。Gargarella P 等人^[4]指出,激光重熔处理快速冷却的工艺特点,使 NiAlCrTi 合金获得形状趋于球形的准晶相,同时降低了合金密度;张德强等人^[5]报道了激光重熔参数对镍基 WC 涂层性能影响,研究发现当激光功率 1 300 W,重熔功率 1 200 W,扫描速度 2 mm/s,送粉电压 8 V 时,可显著提高涂层硬度,降低涂层孔隙率;此外,激光重熔提高了涂层与基体之间的冶金结合强度,改善涂层的耐磨性和耐腐蚀性。

虽然国内外学者在激光重熔领域进行了大量研究^[5-7],但在不同激光重熔轨迹对喷涂涂层的摩擦学性能影响方面却很少涉及,文中以 45 钢为基体,火焰喷涂 Fe 基 Ni/WC 金属陶瓷涂层,以圆形、矩形、平行 3 种不同扫描轨迹对涂层进行激光重熔处理,研究不同激光扫描轨迹对重熔层摩擦学性能的影响。

1 试验

1.1 试验材料与设备

选用基体材料为 45 钢,将其加工成圆环状,外径 26 mm,内径 20 mm,高 10 mm。试验前用金相砂纸打磨去掉表层氧化皮,为保证涂层与基体有较好的相容性,减小硬质相脱落,提高摩擦学性能,获得与基体结合良好且表面均匀致密的涂层,热喷涂材料选用铁基合金粉末 (Fe40) 和镍基碳化钨合金粉末 (Ni60+35WC) 两种金属粉末,两种粉末粒度及粒径均为 53 μm (280~300 目),将两种粉末按 9:1 比例混合为金属陶瓷粉末,其化学成分见表 1。

表 1 铁基合金粉末 Fe40 和镍基碳化钨合金粉末 Ni60+35WC 的化学成分

Element	Cr	B	Si	C	Fe	Ni	WC
Fe40	15-20	1.5-3	1.5-3	<0.5	Bal.	8-12	0
Ni60+35WC	15-20	3.0-4.5	3.5-5.5	0.5-1.1	≤10	Bal.	35

火焰喷涂采用北京福锐可森热喷涂科技有限公司自行研制的喷涂设备系统,参数为:亚音速火焰喷涂,空气压力>0.4 MPa,氧气压力 0.7 MPa,流量 1.0 m³/h,乙炔压力 0.1 MPa,流量 1.0 m³/h,喷涂枪距 200 mm,喷涂速度 24 m/min。

在喷涂前对 45 钢表面进行除油、打磨、喷砂粗化等预处理增加表面活性,然后在基体表面喷涂 0.4 mm 的 90%Fe40+10% (Ni60+35WC) 金属陶瓷涂层,并选用东莞市奥信激光有限公司的 AXL-600AW 激光器对涂层进行激光重熔。

通过激光电源对氙灯的脉冲放电,形成的光波经聚光腔辐射到 Nd3+YAG 晶体上,再经谐振后发出激光。以纳米 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,光斑直径为 1.5 mm,扫描速度为 200 mm/min,搭接率为 0.5,能量密度为 63 W/mm·s,激光脉冲宽度为 10 ms,激光波长为 1 064 nm。

由于激光光斑直径较小,因此采用多道搭接工艺保证涂层的全面重熔。为降低前一道次轨迹对下一道次轨迹温度场的影响,激光在完成第一道次后关闭并返回起点,停留 30 s 后移动一个搭接宽度,开始第二道重熔,直至完成整个涂层的

重熔。重熔轨迹分别为矩形、圆形和平行，其中圆形轨迹从外向内逐圈扫描。摩擦磨损实验参数如表2所示。

表2 摩擦磨损试验参数

Table 2 Experimental parameters of wear test

Parameter	Value
Normal load / N	350
Rotating speed / (r·min ⁻¹)	200
Wear time / s	1 200
Test temperature / °C	25

1.2 试验方法

用线切割机沿垂直于扫描方向将样品切割成15 mm×10 mm×6 mm的试样。目数分别为400、600、800、1 000、1 200和1 500的砂纸和抛光机打磨试样横截面直至达到镜面效果为止。用质量

分数为4%的硝酸酒精腐蚀试样横截面约10 s，清洗风干后装袋准备观察。

采用MLA650F型场发射扫描电子显微镜(FESEM)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变化形貌，利用EDS测定涂层中的元素分布，X射线衍射仪分析重熔层物相结构。测定重熔层表面残余应力时，在每种轨迹试样表面随机取6个点，取平均值为最终结果。利用MMG-10型摩擦磨损试验机对试样表面进行常温干摩擦磨损试验，测定重熔层磨损失重和摩擦因数，摩擦副选用尺寸为 $\Phi 4$ mm×12 mm，硬度为50~55 HRC的GH21高温合金钢。用精度为10⁻⁴ g的FA2104型分析电子天平测磨损质量，每个200 s称重一次，每种重熔轨迹作3次试验，取平均值为最终测量结果。不同激光扫描轨迹重熔层表面形貌如图1所示。



图1 不同激光扫描轨迹重熔层表面形貌

Fig.1 Surface morphologies of remelting layer with different scanning paths

2 结果和分析

2.1 重熔层显微形貌和组织成分

图2为不同激光重熔轨迹重熔层-基体界面和重熔层表面SEM形貌。如图2(a)所示，在矩形扫描轨迹中，重熔层-基体结合界面之间呈现典型的冶金结合，界面有少量气孔存在。图2(a)可以看出，重熔层均匀致密，消除了火焰喷涂时形成的层状结构(如图2(g)(f))，重熔层组织较为粗大。

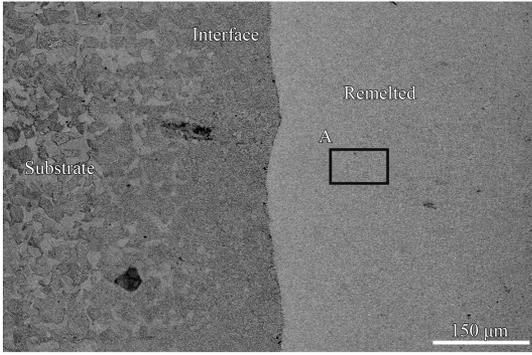
分析原因为：激光能量在矩形扫描轨迹下持续输入，融化了涂层与部分基体，分子在浓度差作用下随机运动，形成冶金结合。但试验中发现矩形扫描轨迹重熔层存在较多缺陷，如重熔层表面平整度较差、受基体稀释过多等，原因为：①根据熔高法计算重熔层稀释率(如式(1)所示)，

轨迹的叠加使基体融化过多，重熔层稀释率增大。稀释率过大意味着过多的基体材料在熔池搅动的过程中进入重熔层，增大合金成分变化程度，损害涂层固有性能，增加重熔层开裂、剥落的倾向。②虽通过控制激光能量可以减小重熔层稀释率，但激光重熔时，激光光斑直径较小，需进行多道搭接处理。矩形轨迹呈现“十”字形，两道次之间出现重叠部分。重叠部分搭接率为100%，即矩形扫描轨迹重熔层表面出现凸起斜坡，不利于重熔层平整度的提高。

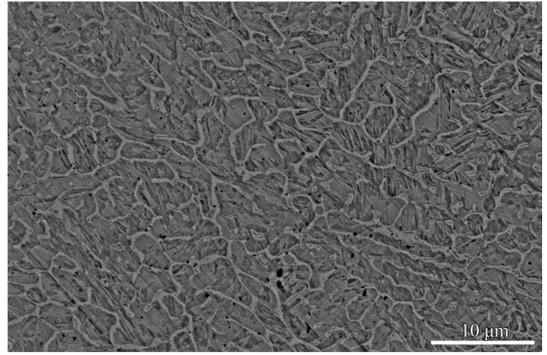
在平行扫描轨迹中(图2(c))，重熔层—涂层界面之间有过渡层，结合方式为更可靠的冶金结合，重熔层表面无明显的空隙和裂纹。重熔层组织结构为网状析晶，晶间有颗粒状WC分布(图2(d))。这是因为平行扫描轨迹受热均匀，基体

对重熔层的稀释程度不高, 涂层与基体元素在熔融状态下发生转移, 在结合界面处形成过渡带。

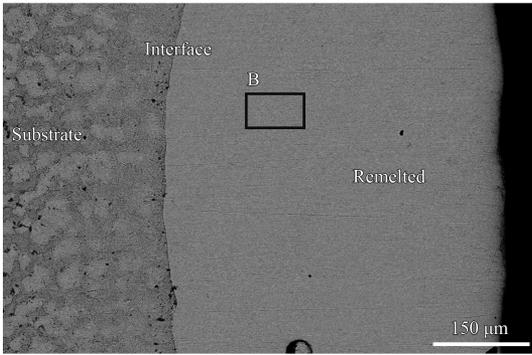
在冷却过程中, 由于固液界面温度梯度最大, 结晶速度最小, 因此熔池金属会以平面晶的方式生



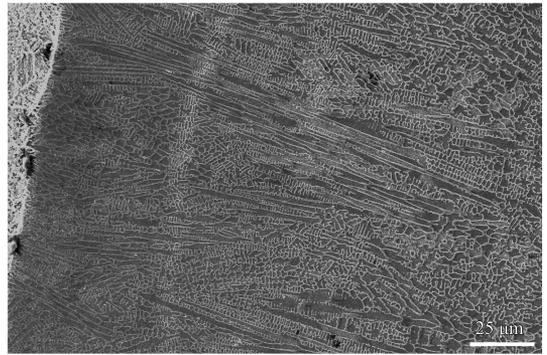
(a) Interface of rectangular path



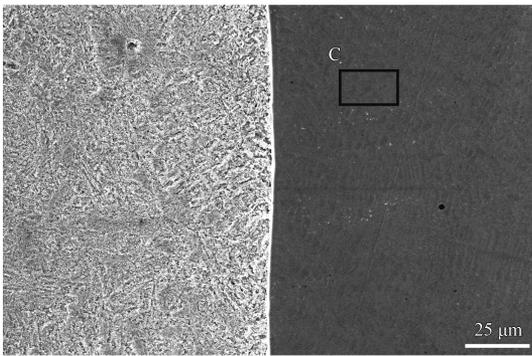
(b) Section morphology of rectangular path



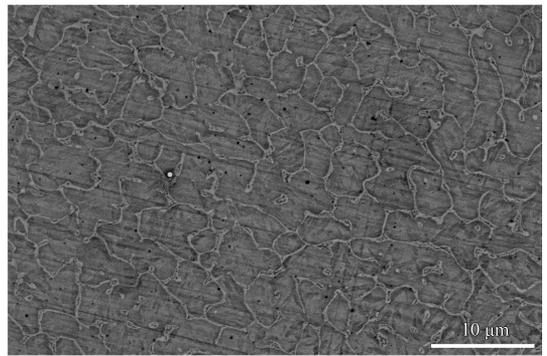
(c) Interface of parallel path



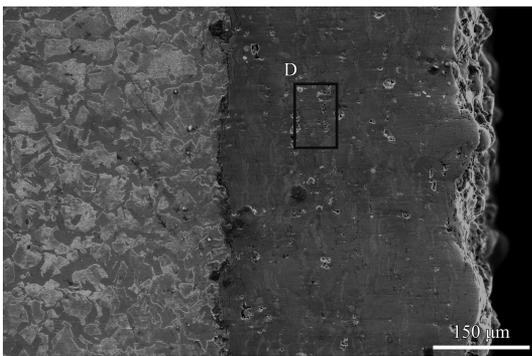
(d) Section morphology of parallel path



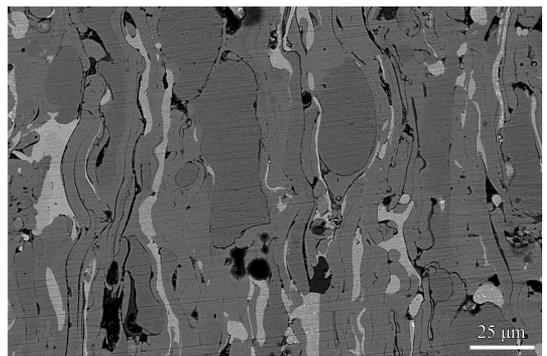
(e) Interface of circular path



(f) Section morphology of circular path



(g) Interface of flame sprayed



(h) Section morphology of flame sprayed

图2 火焰喷涂和不同激光重熔轨迹下重熔层界面及截面 SEM 形貌

Fig.2 Interface and section SEM images of remelting layer under flame sprayed and different remelting paths

长。此外, WC 陶瓷颗粒在冷却初期为非均匀形核提供形核点, 并且溶质的富集导致树枝晶的形成, 而树枝晶的生长方向与热流方向一致, 所以平行重熔轨迹下的枝晶结构为生长方向与扫描方向互相垂直的树枝晶。

图 2(e)(f) 分为圆形扫描轨迹下界面形貌与重熔层显微形貌。圆形扫描轨迹下, 重熔层更加均匀致密, 基本消除了火焰喷涂时形成的裂纹和孔隙, 界面白亮带为过渡层, 重熔层晶粒显微组织更加细小。这是因为圆形没有方向性, 涂层重熔时受热均匀, 且重熔层快速凝固作用, 晶粒来不及生长就已凝固, 因枝晶前端过冷度过大打碎了原有树枝晶组织, 形成更细小的等轴晶, 细化了晶粒尺寸, 增加了晶界数量。等轴晶不存在择优取向, 没有脆弱分界面, 因此增大了裂纹萌生可扩展阻力, 抑制了裂纹生成和发展。采用熔高法计算重熔层稀释率, 如公式 (1):

$$\lambda = \frac{h}{H+h} \quad (1)$$

式中 h , H 分别表示熔深和重熔层堆积高度。

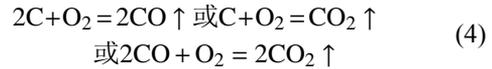
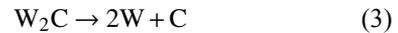
利用 image-proplus 测定不同激光扫描轨迹下重熔层尺寸, 代入式 (1) 计算孔隙率, 结果如表 3 所示。由表 3 可知: 矩形、平行和圆形 3 种扫描轨迹稀释率分别为 44.5%、25.5% 和 26.9%。在矩形扫描轨迹下重熔层稀释率高达 44.5%。这是由于激光轨迹行走过程中出现二次重熔, 融化了原涂层, 且在基体部分产生过烧现象, 过多的基体材料在熔池搅动的过程中进入重熔层, 增大合金成分变化程度。过大的稀释率将损害涂层固有性能, 增加重熔层开裂、剥落的倾向。平行和圆形扫描轨迹稀释率适中, 在保证重熔层与基体形成冶金结合的同时, 保证基体不会过度融化稀释重熔层, 提高了结合界面和重熔层内部的结合强度, 有利于重熔层耐磨和耐蚀性能提高。

表 3 不同激光扫描轨迹下重熔层尺寸和稀释率

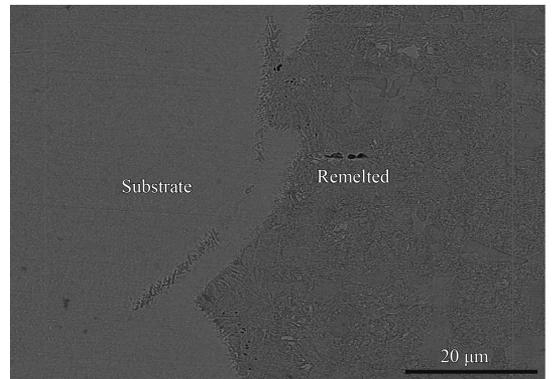
Table 3 Size and dilution rate of remelting layer under different laser scanning paths

Path	Highness, $H/\mu\text{m}$	Deepness, $h/\mu\text{m}$	Dilution rat/%
Rectangular	252	137.2	44.5
Parallel	212	72.6	25.5
Circular	223	82.3	26.9

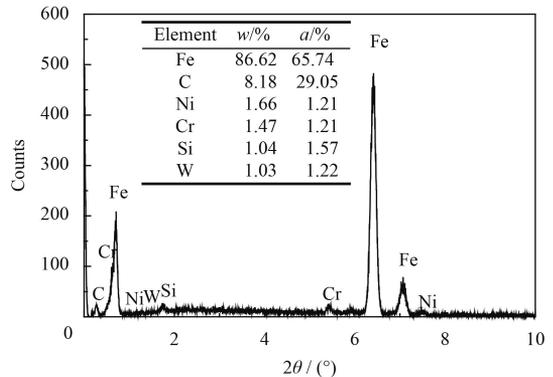
图 3 为圆形扫描轨迹下的能谱分析, 重熔层表面没有明显孔隙和微裂纹, 组织均匀致密。重熔层中主要含有 Fe、C、Ni、Si、Cr 和 W 等 6 种元素。熔融状态在浓度差的推动下, 涂层中 Ni、Cr 元素向基体发生扩散转移, 且 $\rho_{\text{Ni}} > \rho_{\text{Fe}} > \rho_{\text{Cr}}$, 元素在重熔层中分布位置不同, 加之基体中的 Fe 元素对涂层的稀释作用, 导致重熔前后 Ni、Cr 含量相差较大。虽然硬质相 WC 具有优良的性能, 但在高温下易发生脱碳反应, 即:



由式 (2)~(4) 可知: 重熔过程中 CO 或 CO₂ 气体溢出涂层, 可以有效地减少重熔层内部孔隙的数量。加之涂层中的 Si、B 元素能够很好的吸附氧元素, 生成熔点、密度较低的 SiO 和 B₂O₃, 熔渣与气体一起上浮排出重熔层, 这也导致重熔层



(a) Cross section morphology



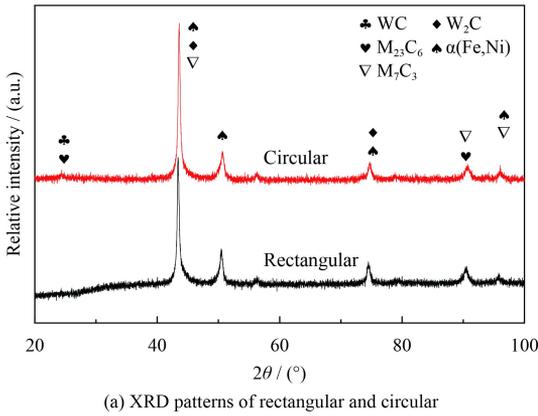
(b) EDS result

图 3 圆形轨迹重熔层的能谱分析

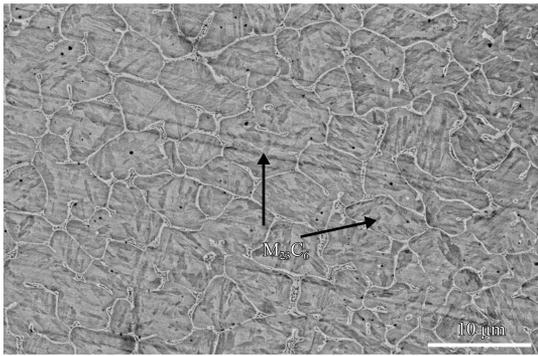
Fig.3 EDS analysis of circular trajectory remelted layer

中未检测出 B 元素。

图 4(a) 为矩形轨迹与圆形轨迹的 X 射线物相衍射图谱。重熔层中主要由 WC、W₂C、α(Fe,Ni)、M₂₃C₆ 和 M₇C₃ 相组成。其中 WC, W₂C 等硬质相弥散分布在重熔层中, 起到了弥散强化的作用。由于重熔层表面主要由 Fe、Ni 和 Cr 组成, 因 Ni 和 Cr 与 Fe 晶格常数较为接近, 易形成置换 Fe 的固溶体, 在高温环境下与 C 元素发生化学反应形成 M₂₃C₆ 和 M₇C₃^[8-10]。其中 M₂₃C₆(M=Fe, Cr) 为面心立方结构, 具有稳定的化学性能, 弥散分布在重熔层中, 能够起到弥散强化的作用 (如图 4(b) 所示)。



(a) XRD patterns of rectangular and circular



(b) M₂₃C₆ distribution of circular paths

图 4 矩形与圆形轨迹重熔层的 XRD 衍射图谱

Fig.4 XRD patterns of rectangular and circular remelted layer

残余应力形成原因多样复杂, 在整个喷涂及重熔过程中, 主要分为热应力和相变应力。其中热应力为重熔层与基体材料热膨胀系数不一致引起的, 相变应力是液态颗粒在凝固过程中产生的。由于激光重熔本身为快速加热/冷却的过程, 因此热应力引起的残余应力起到主导作用, 相变应力在整个过程中可以忽略不计。

热应力计算如式 (5)^[11]所示:

$$\sigma_{th} = \frac{E_{ec}(\alpha_s - \alpha_c)\Delta T}{1 + 4(E_{ec}/E_{es})(h/H)} \quad (5)$$

式中: $E_{ec}=E_c/(1-\mu_c)$, $E_{es}=E_s/(1-\mu_s)$; E_s 、 α_s 、 μ_s 、 E_c 、 α_c 和 μ_c 分别是涂层和基体的弹性模量、热膨胀系数和泊松比, h 、 H 分别为涂层和基体的厚度, mm; ΔT 为温差。

45 钢的泊松比为 0.28, 热膨胀系数为 $1.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 弹性模量为 205 GPa, 而 Ni/WC 根据混合定理计算出热物性参数。

从图 5 中可以看出激光重熔轨迹对重熔层残余应力有较大影响, 主要表现为压应力, 矩形、平行和圆形 3 种扫描轨迹表面残余应力分别为 -249、-217 和 -213 MPa。其中矩形扫描轨迹下的残余应力值最大, 而圆形扫描轨迹残余应力均值相较于矩形扫描轨迹降低了约 14.5%。同时, 圆形扫描轨迹下的残余应力波动较小, 也说明该扫描轨迹下的重熔层更加均匀致密, 因此应力较为均匀。分析结果与图 3 得出的结论一致。

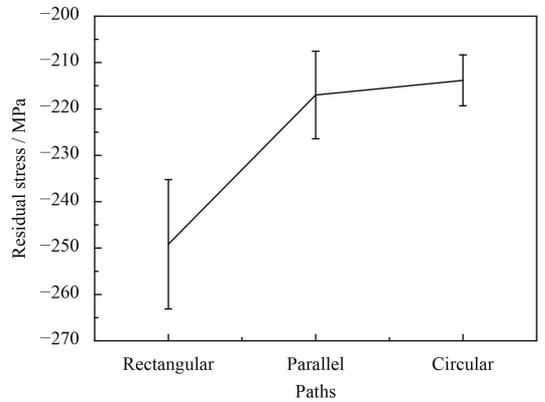


图 5 不同轨迹下的重熔层残余应力分布

Fig.5 Residual stress distribution of remelting layers under different remelting paths

2.2 重熔层摩擦学性能分析

图 6 为不同激光重熔轨迹磨损量随时间的变化曲线, 可以看出, 3 种轨迹磨损失重均随时间推移呈上升趋势。其中, 矩形轨迹磨损失重最为严重, 在整个测试范围内, 圆形轨迹磨损失重小于其他两种轨迹, 矩形扫描轨迹扫描磨损失重是圆形扫描轨迹的 2.4 倍。

分析其原因为, 矩形重熔轨迹下发生二次重熔^[9], 使得基体过多融化, 基体气孔中的气体释放

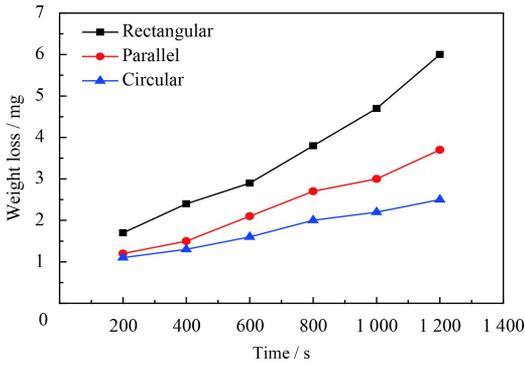


图6 不同扫描轨迹下重熔层磨损量

Fig.6 Wear loss of remelting layers under different scanning track

到重熔层中,降低了重熔层的内聚强度,在法向载荷作用下萌生裂纹源,导致重熔层失效。平行扫描轨迹重熔层组织结构较圆形轨迹粗大,形成与热流方向平行的树枝晶结构,而圆形扫描轨迹组织结构为更为细小的等轴晶,有利于增加裂纹扩展阻力,促进摩擦磨损过程中的应力松弛。

图7为3种扫描轨迹摩擦因数曲线。不难发现,矩形、平行和圆形3种扫描轨迹平均摩擦因数依次为0.7、0.58和0.52,且在平均摩擦因数附近上下波动,其中矩形扫描轨迹波动最为剧烈,圆形扫描轨迹的摩擦因数在测试过程中更加平稳且整体低于其他两种轨迹。分析其原因为:在摩擦初期试件表面为许多凹凸不平的微凸体,试件在与对磨件摩擦的过程中,实际接触面积较理论接触面积小的多。宏观应力场分解为以微凸体为主体的微应力场,微凸体在微观应力作用下发生塑性变形,摩擦阻力增大,导致摩擦因数波动且不稳定^[12]。在矩形扫描轨迹中,二次重熔导致涂

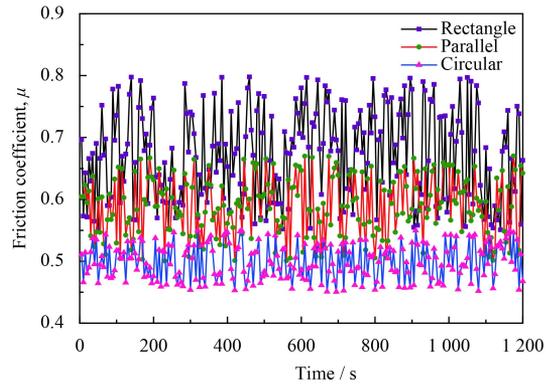
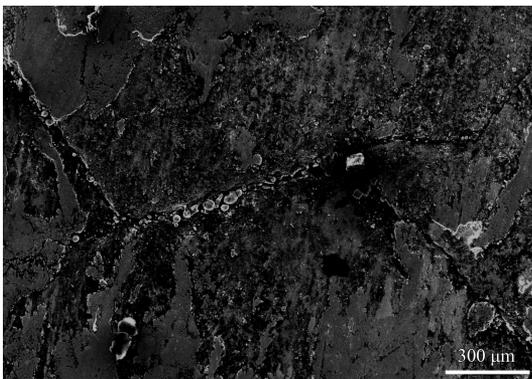


图7 不同扫描轨迹下重熔层的摩擦因数

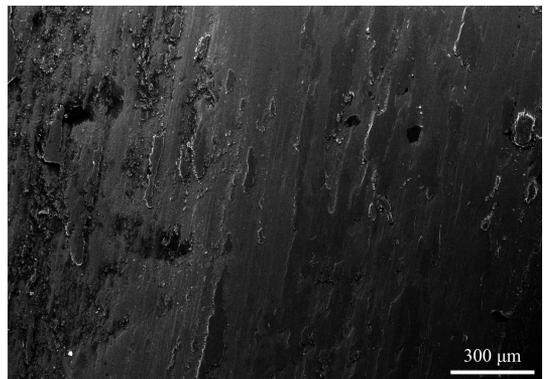
Fig.7 Friction coefficient of remelting layers under different scanning paths

层表面出现凸起的斜坡,表面平整度受到影响,因此摩擦因数与波动较大。相对于矩形扫描轨迹,圆形扫描轨迹由于受热较均匀,陶瓷WC颗粒受热分解,并与其它金属发生化学反应,生成 W_2C , $M_{23}C_6$, M_7C_3 等硬质相,均匀分布于重熔层中。加之 $\alpha(Fe,Ni)$ 固溶体具有增韧性能,在外力作用下发生塑性变形缓解应力,防止硬质颗粒脱落,赋予重熔层强韧结合的特性。因此圆形扫描轨迹摩擦因数低且平稳。

图8分别为矩形和圆形扫描轨迹干滑动摩擦后表面SEM形貌。从图8(a)中可以看出矩形扫描轨迹磨损表面呈现片状剥落,犁沟深而宽有明显的连贯裂纹,且在裂纹中分布着大量的细小颗粒。而圆形轨迹(图8(b))表面虽然仍有犁沟,但犁沟浅而细小,未出现明显的裂纹和剥落。这是因为在矩形扫描轨迹重熔层表面在摩擦磨损过程中,摩擦产生的升温加剧,使得表面发生软化和



(a) Rectangular scanning path



(b) Circular scanning path

图8 矩形扫描轨迹与圆形扫描轨迹干滑动摩擦后涂层表面SEM形貌

Fig.8 SEM images of layers with rectangular and circular scanning trajectory after dry sliding friction

氧化,氧化膜在反复摩擦剪切作用下易脱落,磨屑位于摩擦副之间形成三体磨损,粘着磨损加剧^[13-14]。同时,由于重熔层界面和内部中存在许多气孔,使得重熔层结合强度较差和内聚强度较低,在法向载荷作用下形成裂纹源,并沿晶界扩展,最终扩展到重熔层表面,导致表面强化失效,因此矩形轨迹下磨损机制为氧化磨损和粘着磨损。圆形轨迹中,陶瓷 WC 颗粒受热分解,形成 W₂C 等硬质相弥散分布于重熔层中,起到弥散强化的作用;由于 Ni 和 Cr 与 Fe 的晶格常数较为接近,易形成 α -Fe 的置换固溶体,加之 α -Fe 在冷却过程中发生马氏体相变和元素 W 在浓度差的推动下向基体扩散,都一定程度上提高了涂层固溶强化能力,起到固溶强化的作用。重熔层中的硬质相在摩擦过程中起到了“骨架”的作用,重熔层中的金属具有一定的塑性变形能力,当施加外部载荷时,内嵌 WC、W₂C 等硬质相在 Ni、Fe 中发生塑性变形,吸收部分能量,防止硬质相剥离脱落,起到了强韧结合的作用^[15-17],改善了重熔层的摩擦学性能。

3 结 论

(1) 激光重熔轨迹对涂层组织和性能有显著影响。矩形轨迹中基体气孔中气体释放到重熔层中,导致重熔层界面间存在较多气孔,重熔层结合强度降低;平行轨迹中组织为延热流方向生长的树枝晶,晶体较大,在法向载荷作用下易产生裂纹源,并沿晶界扩展;圆形重熔轨迹形成了组织更为细小的等轴晶,有利于缓解外部应力,增大裂纹扩展阻力,提高了重熔层摩擦学性能。3 种扫描轨迹的残余应力均表现为压应力,其中圆形扫描轨迹的残余应力相较于矩形轨迹降低了 14.5%。

(2) 矩形、平行、圆形 3 种扫描轨迹平均摩擦因数依次为 0.7、0.58 和 0.52,矩形轨迹扫描磨损量是圆形扫描轨迹的 2.4 倍。

(3) 重熔层中的硬质相在摩擦磨损中起到“骨架”的作用,内嵌在重熔层中具有塑性变形的金属中,形成强韧结合的机制。3 种扫描轨迹中,圆形激光扫描轨迹重熔层中含有的 WC, W₂C 等硬质相弥散分布在重熔层中,起到固溶强化和弥散强化的作用,摩擦学性能改善效果最为显著。

参考文献

- [1] KONG D, ZHAO B. Effects of loads on friction-wear properties of HVOF sprayed NiCrBSi alloy coatings by laser remelting[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2017, 705: 700-707.
- [2] CHONG C. Laser surface remelting of Fe-based alloy coatings deposited by HOVF[J]. *China Surface Engineering*, 2012, 206(8/9): 2388-2395.
- [3] 黄标, 张冲, 程虎, 等. 激光熔覆 FeCoCr_xNiB 高熵合金涂层的组织结构与耐磨性[J]. *中国表面工程*, 2014, 27(6): 82-88.
HUANG B, ZHANG C, CHENG H, et al. Microstructure and wear resistance of FeCoCr_xNiB high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J]. *China Surface Engineering*, 2014, 27(6): 82-88 (in Chinese).
- [4] GARGARELLA P, VILAR R, ALMEIDA A, et al. Laser remelting of Al₉₁Fe₄Cr₃Ti₂ quasicrystalline phase former alloy[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2010, 495(2): 646-649.
- [5] 张德强, 张吉庆, 李金华, 等. 激光重熔对镍基碳化钨涂层性能的影响[J]. *机械设计与制造*, 2016(5): 122-124.
ZHANG D Q, ZHANG Q J, LI J H, et al. Effects of laser remelting on properties of Ni-based WC coating[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2016(5): 122-124 (in Chinese).
- [6] ZHANG Z, LIN P, REN L. Wear resistance of AZ91D magnesium alloy processed by improved laser surface remelting[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2014, 55(7): 237-242.
- [7] LIMA M S F, FOLIO F, MISCHLER S. Microstructure and surface properties of laser-remelted titanium nitride coatings on titanium[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, 199(1): 83-91.
- [8] 王玲, 陈志刚, 朱小蓉, 等. 激光重熔对火焰喷涂法制备 Ni-WC 复合涂层耐磨性能的影响[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 281-286.
WANG L CHEN Z G, ZHU X R. Effects of laser remelting on wear resistance of Ni-WC composite coatings by flame-spraying[J]. *China Surface Engineering*, 2008, 35(2): 281-286 (in Chinese).
- [9] 王璐, 胡树兵, 单炜涛, 等. 激光熔覆 NiCrMn-WC 复合涂层的组织与耐磨性[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(1): 145-151.
WANG L, HU S B, SHAN W T, Et al. Microstructure and wear resistance of laser cladding NiCrMn-WC composite coating[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(1): 145-151 (in Chinese).
- [10] LKASZ ROGAL, KALITA D, TARASEK A, et al. Effect of

- SiC nano-particles on microstructure and mechanical properties of the CoCrFeMnNi high entropy alloy[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2017, 708.
- [11] 郭华锋, 李菊丽, 孙涛, 等. WC 颗粒增强 Ni 基涂层的残余应力及耐磨性能[J]. *金属热处理*, 2014, 39(2): 72-76.
GUO H F, LI J L, SUN T. Residual stress and wear resistance of WC particle reinforced Ni-based coating[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2014, 39(2): 72-76 (in Chinese).
- [12] 崔泽琴, 王文先, 吴宏亮, 等. 镁合金表面激光熔覆 Al-Si/Al₂O₃-TiO₂ 复合涂层界面特征及耐磨性[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 192-197.
CUI Z Q, WANG W X, WU H L, et al. Microstructure and wear resistance of AZ31B magnesium alloy by laser cladding with Al-Si/Al₂O₃-TiO₂ powder[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 192-197 (in Chinese).
- [13] 何祥明, 刘秀波, 杨茂盛, 等. 奥氏体不锈钢激光熔覆镍基复合涂层高温磨损行为[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 79-84.
HE X M, LIU X B, YANG M S, et al. Elevated temperature tribological behaviors of laser cladding nickel-based composite coating on austenitic stainless steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 79-84 (in Chinese).
- [14] 刘元富, 王华明. 激光熔敷 Ti₅Si₃ 增强金属间化合物耐磨复合材料涂层组织及耐磨性研究[J]. *摩擦学学报*, 2003, 23(1): 10-13.
LIU Y F, WANG H M. Microstructure and wear resistance of laser clad Ti₅Si₃ reinforced wear resistant intermetallic composite coating[J]. *Tribology*, 2003, 23(1): 10-13 (in Chinese).
- [15] 刘建弟, 张述泉, 王华明. 激光熔覆 WC 颗粒增强复合涂层的组织及耐磨性[J]. *中国有色金属学报*, 2012(9): 2600-2607.
LIU J D, ZHANG S Q, WANG H M. Microstructure and wear resistance of laser cladding WC particles reinforced composite coatings[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012(9): 2600-2607 (in Chinese).
- [16] 冯淑容, 张述泉, 王华明. 钛合金激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层耐磨性[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 60-65.
FENG S R, ZHANG S Q, WANG H M. Wear resistance of laser clad hard particles reinforced intermetallic composite coating on TA15 alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 60-65 (in Chinese).
- [17] 陈川辉, 张林进, 李庆棠, 等. Ni 基 WC 涂层组成及分布对耐磨性能的影响[J]. *南京工业大学学报 (自科版)*, 2012, 34(6): 42-47.
CHEN C H, ZHANG L J, LI Q T, et al. Effect of composition and distribution of nickel based-WC coating on wear resistance[J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 34(6): 42-47 (in Chinese).

(责任编辑: 陈茜)