

激光重熔改性 WC/Fe 等离子喷涂涂层组织及其耐磨性能

赵运才, 上官绪超, 张继武, 何文

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: **目的** 改善等离子喷涂 WC/Fe 复合陶瓷涂层的组织, 增强其耐磨性能, 并研究激光重熔涂层在不同温度下的耐磨性能。**方法** 采用激光重熔技术处理等离子喷涂 WC/Fe 复合陶瓷涂层, 利用附带能谱仪(EDS)的扫描电镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)、显微硬度计测试和表征了等离子喷涂涂层在激光重熔前后的组织特征、物相组成及显微硬度, 利用摩擦磨损试验机对激光重熔涂层在 25、200、400 °C 下的耐磨性能进行了对比考察。**结果** 等离子喷涂 WC/Fe 复合陶瓷涂层呈层状结构, 经过激光重熔处理后, 其片层状结构和孔隙等缺陷基本消失, 且激光熔覆区的顶部组织为等轴晶和细小枝晶, 熔覆区的底部组织为胞状晶, 涂层与基体结合带区的组织为粗大的树枝晶, 涂层与基体形成了冶金结合。激光重熔涂层中的 WC、W₂C、M₂₃C₆ 及 Ni₆BSi₂ 等高硬度化合物的弥散强化作用, 使得激光重熔涂层的显微硬度约为原等离子喷涂涂层的 2 倍。激光重熔涂层在 25 °C 下的磨损亚表层最完好, 在 400 °C 时出现了微裂纹。**结论** 重熔能消除等离子喷涂涂层的各种缺陷, 得到组织致密的涂层。重熔涂层在不同温度下表现出不同的磨损机理, 在 25 °C 下表现出最好的耐磨性能。

关键词: 等离子喷涂; WC/Fe 陶瓷涂层; 激光重熔; 弥散强化; 耐磨性能; 磨损机理

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0020-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.004

Microstructure and Wear Resistance of WC/Fe Plasma Sprayed Coatings Modified by Laser Remelting

ZHAO Yun-cai, SHANGGUAN Xu-chao, ZHANG Ji-wu, HE Wen

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

ABSTRACT: The work aims to improve microstructure of plasma sprayed WC/Fe composite ceramic coating and improve corresponding wear resistance, and study wear resistance of laser remelted coating at different temperature. The plasma sprayed WC/Fe composite ceramic coating was treated by adopting laser remelting technique. Microstructure characteristic, phase composition and microhardness of the plasma sprayed coating before and after laser remelting was tested and characterized with

收稿日期: 2017-08-01; 修订日期: 2017-09-08

Received: 2017-08-01; Revised: 2017-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(51565017); 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项目(201713); 江西省自然科学基金(2012BAB206026); 江西省教育厅资助项目(GJJ14424)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51565017); High-end Bearing Friction Technology and Application of National Local Joint Engineering Laboratory Open-end Fund Project(201713); Jiangxi Province Natural Science Foundation(2012BAB206026); Jiangxi Provincial Department of Education Funded Projects(GJJ14424)

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

Biography: ZHAO Yun-cai (1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface engineering, remanufacturing engineering, friction and wear and anti-wear technology and other aspects of research.

scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD) and microhardness tester, respectively. Wear resistance of the laser remelted coating was compared and investigated at 25 °C, 200 °C and 400 °C with a friction and wear tester. Plasma sprayed WC/Fe composite ceramic coating exhibited layered structure. After laser remelting, defects such as lamellar structure and pores nearly disappeared, top structures in laser cladding zone were isometric crystals and fine dendrites. Bottom structures in the zone were afterbirth-like crystals, and structures in coating-substrate binding zone were coarse dendrites, and the coating had metallurgical bonding with the substrate. Dispersion strengthening effect of high hardness compounds such as WC, W₂C, M₂₃C₆ and Ni₆BSi₂ in the laser remelted coating made microhardness of the laser remelted coating increase by nearly 1 time than that of the original plasma sprayed coating. Worn sub-surface of the laser remelted coating was the most intact at 25 °C, and micro-cracks appeared at 400 °C. Remelting can eliminate various defects of plasma sprayed coating to form dense coating. The remelted coating exhibits different wear mechanisms at different temperature and the best wear resistance at 25 °C.

KEY WORDS: plasma spraying; WC/Fe ceramic coating; laser remelting; dispersion strengthening; wear resistance; wear mechanism

等离子喷涂金属基陶瓷涂层的工艺已在工业生产中得到了广泛应用，在等离子喷涂过程中加入硬质陶瓷粉末，可以将金属基合金的高强度、强韧性和优良的工艺加工性能同陶瓷材料的高熔点、高硬度、高耐磨性及耐氧化等优点有机地结合起来，能有效地提高涂层的性能，因而成为国内外科研工作者研究的重点和热点之一^[1-4]。研究表明，WC/Fe 复合陶瓷涂层是一种在冶金和机械行业应用很广泛的高温耐磨材料^[5]。等离子喷涂工艺和火焰喷涂工艺都能制备 WC/Fe 复合陶瓷涂层，且利用等离子喷涂工艺制备涂层是最常用的方法^[6-9]。然而，等离子喷涂涂层因具有涂层内聚强度低、孔洞较多及涂层与基体结合界面为机械结合等缺陷，使硬质陶瓷相的优异性能难以充分发挥。

激光重熔是利用高能量密度激光将基体表层材料进行快速熔化和凝固，形成与基体性质不同且呈冶金结合的涂层的一种激光表面改性技术。激光重熔工艺可以消除等离子喷涂涂层的各种缺陷，有效地提高涂层的耐磨、耐蚀及抗氧化性能，成为改善等离子喷涂涂层综合性能的有效方法之一，是目前表面工程技术研究的热点^[10-12]。

零部件的实际服役工况往往比较复杂，比如交变载荷、腐蚀等环境，而且要求其在不同温度下都能保持良好的耐磨性。所以，对零部件表面进行激光重熔处理及其重熔层在不同温度下的摩擦学行为是值得探讨的问题^[13]。本文采用超音速等离子喷涂+激光重熔复合工艺在 45[#]钢表面制备了 WC/Fe 复合陶瓷涂层，研究了激光重熔对等离子涂层微观组织的影响和不同温度下重熔层的磨损特性，为该表面改性技术在

工程实际中的应用提供理论和试验依据。

1 试验

1.1 涂层的制备

基体材料选用 45[#]钢，并加工成圆环状：外径 26 mm，内径 20 mm，高 10 mm。基体在喷涂前经过除油、打磨、喷砂粗化等预处理。

等离子喷涂粉末是牌号为 Z.X.Fe40 的铁基自熔性合金粉末，其化学成分见表 1。陶瓷相选用牌号为 Z.X.Ni60+35WC 型的 Ni 包 WC 粉末，其化学成分见表 2。两种粉末的粒径均为 53 μm。将铁基合金粉末和 Ni 包 WC 粉末按 9:1 的质量比混合，采用 JP-8000 型自动喷涂系统进行喷涂，空气自然冷却，涂层厚度为 0.4 mm 左右，喷涂工艺参数如表 3 所示。

表 1 铁基自熔性合金粉末的化学成分
Tab.1 Chemical composition of iron-based self-fluxing alloy powder

wt%					
Ni	Cr	B	Si	C	Fe
8 ~ 12	15 ~ 20	1.5 ~ 3	1.5 ~ 3	<0.5	Bal.

表 2 Ni 包 WC 陶瓷粉末的化学成分
Tab.2 Chemical composition of Ni package WC ceramic powder

wt%						
Cr	B	Si	C	Fe	WC	Ni
15 ~ 20	3.0 ~ 4.5	3.5 ~ 5.5	0.5 ~ 1.1	≤10	35	Bal.

表 3 等离子喷涂的工艺参数
Tab.3 Process parameters of plasma spraying

Barrel specifications/mm	Oxygen		Kerosene		Spray distance/mm	Powder delivery rate/(g·min ⁻¹)	Powder delivery pressure/Pa	Powder flow rate/(m ³ ·h ⁻¹)
	Pressure/Pa	Flow/(m ³ ·h ⁻¹)	Pressure/Pa	Flow/(m ³ ·h ⁻¹)				
101.6	14.5×10 ⁵	1.8	11.7×10 ⁵	86.6	350	100	34.5×10 ⁴	24.5×10 ⁻³

采用型号为 AXL-600AW 的光纤脉冲激光器进行激光重熔试验, 重熔工艺参数为: 激光功率 500 W, 扫描速度 186 mm/min, 光斑直径 1.5 mm, 扫描轨迹为圆形, 搭接量 10%, 保护气体为氩气。为了减少熔池凝固收缩的应力作用及强化涂层的耐磨性能, 在激光重熔时加入粒径为 40 nm 的纳米 SiC 陶瓷粉末作为填料, 加入量为 0.5% (质量分数)。

1.2 性能测试与组织观察

采用德国 ZEISS-SUPRA55 型高分辨率场发射扫描电镜 (SEM) 观察重熔前后涂层的表面和截面形貌, 并采用 Oxford-AztecX-Max80 型 X-射线能谱仪 (EDS) 进行微区元素分析。

采用德国 Bruker D8-Advance 型 X-射线多晶粉末衍射仪检测涂层物相, 使用 HRS-150 型显微硬度计测试涂层硬度, 加载载荷为 90 g, 保载时间为 15 s。每点测 3 次, 取其平均值。

利用 MMG-10 型微机控制高温高速摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验, 磨损方法为大销盘式磨损。对磨件材料为 $\phi 4$ mm \times 12 mm 的 GH21 高温合金钢, 硬度为 50~55HRC, 试验参数如表 4 所示。试验前后, 试样均用丙酮清洗。用 STM7 型超高倍显微镜观察磨损表面形貌。涂层的磨损率用公式(1)计算:

$$W = \frac{V}{F \cdot L} \quad (1)$$

式中: W 为磨损率; V 为磨损体积 (mm^3); F 为法向载荷 (N); L 为总的磨损滑动距离 (m)。磨损体积 $V=AL$, 其中 A 为磨痕横截面积, L 为磨痕直径。每种条件下的试验重复做 3 次, 最终的磨损率为 3 次试验数据的平均值。

表 4 摩擦磨损试验参数
Tab.4 Parameters of friction-wear test

Normal load/N	Rotating speed of pair grinding parts/(r·min ⁻¹)	Wear time/s	Test temperature/°C
400	200	300	25、200、400

2 结果与讨论

2.1 等离子喷涂涂层和重熔涂层的显微形貌及物相

2.1.1 显微形貌及元素分布

图 1 为等离子喷涂涂层的表面和截面 SEM 形貌。由图 1a 可以看到, 等离子喷涂 WC/Fe 涂层具有凹凸不平的表面, 且呈现出典型的片层状结构和微颗粒堆积结构。片层状结构是喷涂过程中高温熔融的粉末颗粒瞬间堆积凝固而形成的, 微颗粒堆积结构是未完全熔融的粉末颗粒撞击涂层时堆积形成的。图 1b 更清

楚地显示出了涂层的片层状堆积结构, 其中白色片状物为未熔的 WC 颗粒, 且在整个涂层中分布较均匀。由图 1b 还可以看到, 涂层中存在较多的孔隙, 且涂层与基体的结合面凹凸不平, 这是在喷涂过程中有些未完全熔化的粒子撞击基体所致。在结合界面处的黑色物质是喷涂过程中形成的氧化层^[14]。总体来讲, 涂层的致密度不高, 涂层与基体是机械结合, 涂层与基体间有明显的过渡区。

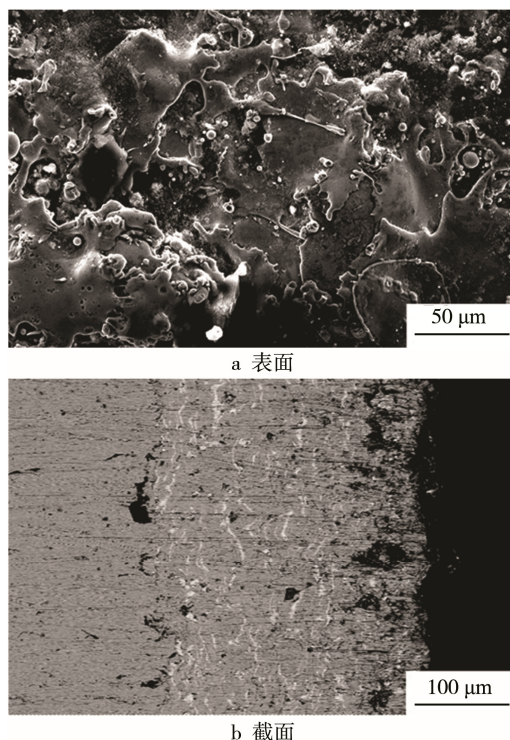


图 1 等离子喷涂涂层的 SEM 形貌

Fig.1 SEM morphology of plasma sprayed coating and white matter energy spectrum: a) surface, b) section

图 2 为等离子喷涂涂层经过激光重熔处理后的表面和截面 SEM 形貌。对比图 2a 和图 1a 可以看出, 经过激光重熔处理过的等离子喷涂涂层表面发生了重熔和再结晶, 典型的片层状结构和微颗粒堆积结构消失, 形成了致密且平整的表面。由图 2b 的截面微观形貌可以看出, 原等离子喷涂涂层的大部分孔隙、裂纹及片层状结构消失, 大部分未熔的 WC 颗粒被再次熔化, 少量未熔颗粒仅残留在涂层与基体结合带内。此外, 重熔时加入的填料纳米 SiC 快速冷却后游离分布在涂层孔隙中, 减少了熔池因凝固而产生的收缩应力, 抑制了裂纹的产生^[15-16]。总体来讲, 激光重熔处理使等离子喷涂涂层的致密性得到很大的提高。

图 3 是等离子喷涂涂层经过激光重熔处理后的截面及相关区域的 SEM 形貌。由图 3a 可以看到, 整个涂层可划分为熔覆区和结合带区两个明显的区域。由图 3b—d 可见: 熔覆区顶部组织是等轴晶和细小枝晶, 底部组织是胞状晶, 结合带区组织是粗大的树枝

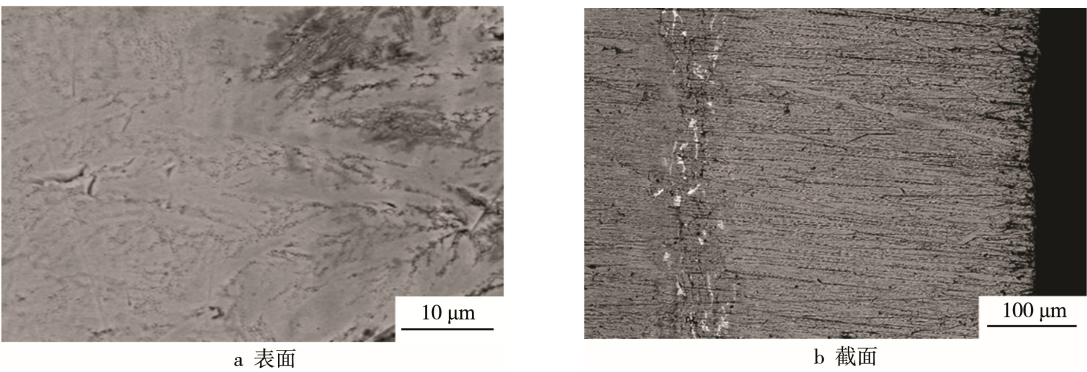


图 2 激光重熔涂层的 SEM 形貌
Fig.2 SEM morphology of laser remelted coating: a) surface, b) section

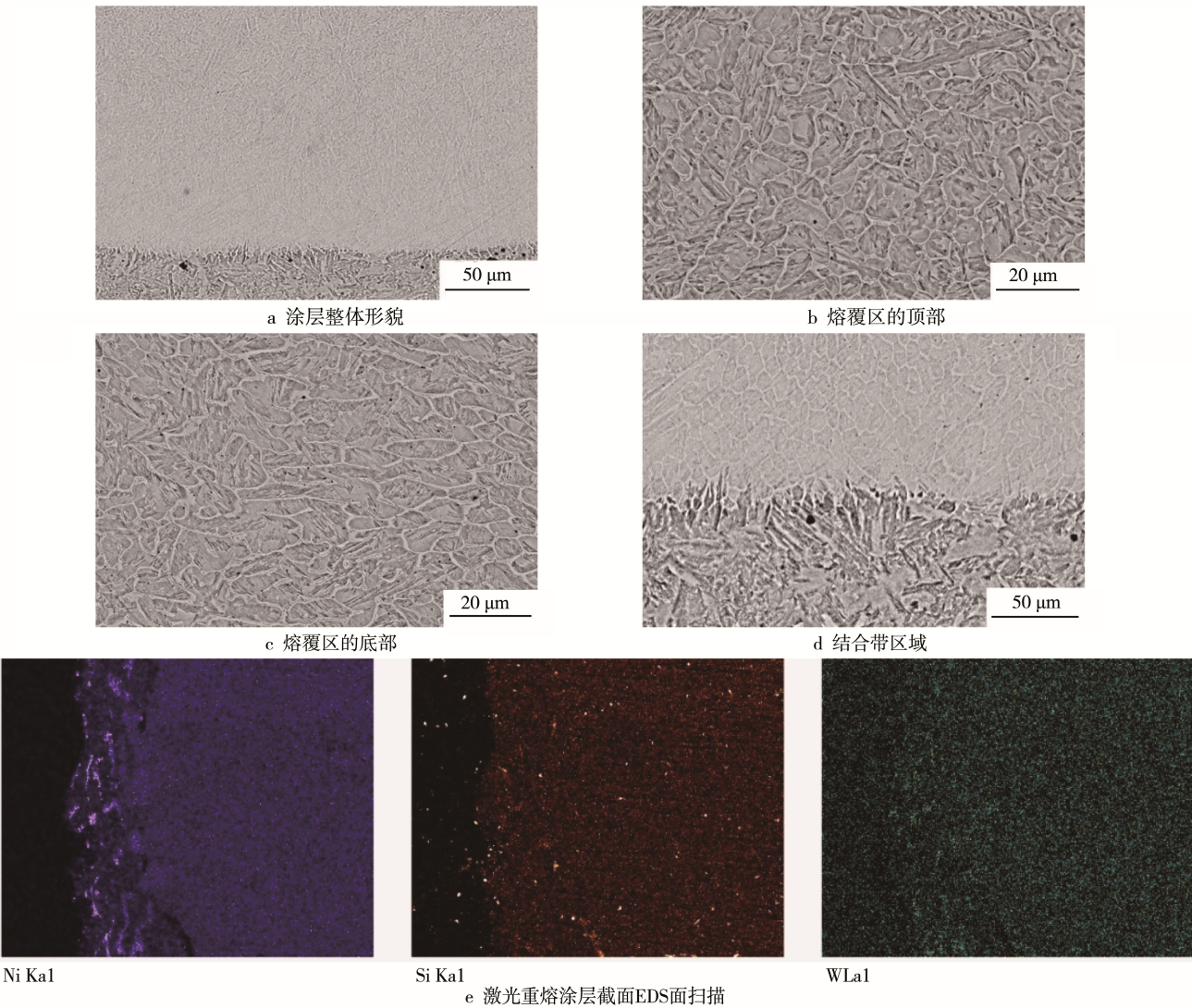


图 3 激光重熔涂层金相腐蚀后截面形貌及截面元素面扫描

Fig.3 Cross-sectional morphology and element line scanning of laser remelted coating after metallographic corrosion: a) overall coating morphology, b) top of cladding zone, c) bottom of cladding zone, d) bonding zone, e) cross-sectional EDS line scanning of laser remelted coating

晶。这是因为熔池底部与基体直接接触，与熔池顶部相比，熔池底部的冷却速度更快，过冷程度更高，结晶速度更快，形成了细小的等轴晶。粗大的等轴晶则

在上面的重熔区生成^[17]。由图 3e 的截面 EDS 面扫描结果可以看到，涂层与基体结合带内含有涂层粉末中的 Ni、Si 及 W 元素，说明涂层和基体在高能量密度

的激光束作用下发生了金属原子的相互扩散,其界面结合方式由简单的机械结合向原子间的金属键结合方式转化,形成了冶金结合^[18]。

2.1.2 物相

图4是等离子喷涂涂层和激光重熔涂层的XRD图谱。图4a显示,等离子喷涂涂层的成分简单,主要有 γ -(Fe,Ni)、WC、 Cr_2B 、 W_2C 等。其中,一部分WC颗粒会沉淀在涂层与基体结合处,大部分则发生分解($\text{WC} \rightarrow \text{W} + \text{C}$, $2\text{W} + \text{C} \rightarrow \text{W}_2\text{C}$)分解出来的C原子会跟其他元素生成新的化合物^[19-20]。图4b显示,激光重熔涂层的成分主要有 M_{23}C_6 型的 $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ 和 Cr_{23}C_6 ,以及 Ni_6BSi_2 、 $(\text{Cr,Ni})_3\text{Si}$ 等硬质化合物。激光重熔层衍射峰的位置跟等离子喷涂层大致相同,但出现了 M_{23}C_6 和 Ni_6BSi_2 等新峰。又因为激光重熔时加入了SiC陶瓷相,所以熔覆层中也会有 $(\text{Cr,Ni})_3\text{Si}$ 、 $(\text{Ni,Cr,Fe})_7\text{C}_3$ 等硬质相生成,同时衍射峰的强度较等离子喷涂涂层的大,这说明在激光重熔过程中析出了碳化物和硼化物。

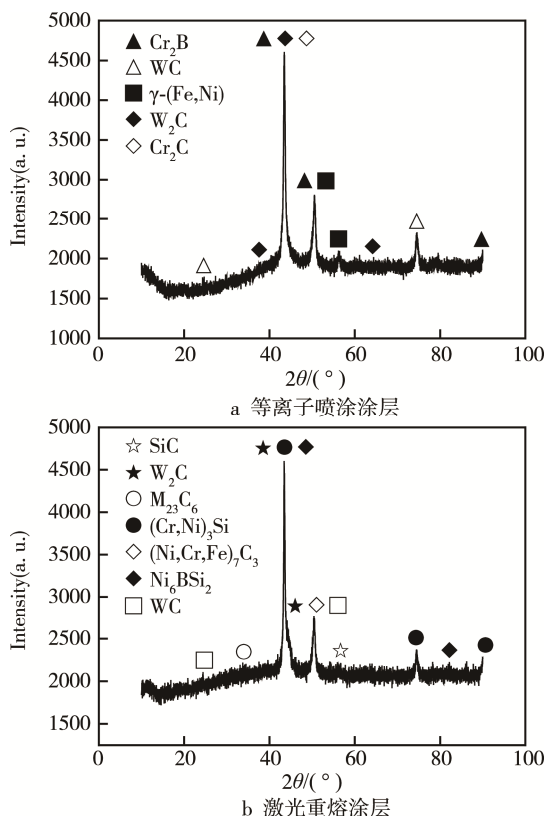


图4 涂层的XRD物相分析图谱

Fig.4 XRD phase analysis patterns of coatings: a) plasma sprayed coating, b) laser remelted coating

2.2 显微硬度

图5是激光重熔WC/Fe涂层沿深度方向上的硬度分布曲线。可以看到,熔覆区的硬度分布较均匀,平均达1500HV,约为等离子喷涂层硬度的2倍。熔

覆材料中的W、Fe、Si等原子熔入Ni固溶体中,因为W、Fe、Si的原子尺寸和Ni的相差较大,所以会产生晶格畸变和很强的固溶强化作用。同时,熔覆层中的WC、 W_2C 、 M_{23}C_6 及 Ni_6BSi_2 等具有较高的硬度,起到了弥散强化基体的作用。这些都能大幅提高熔覆层的显微硬度。由图5还可以看出,400~600 μm 过渡区内的激光熔覆层的硬度比等离子喷涂涂层的低,这是因为等离子喷涂涂层中均匀分布着大量的陶瓷颗粒WC(如图1b所示),而激光重熔涂层中只在结合带区内保留了一部分WC颗粒,大部分WC颗粒被激光的高温所熔化(如图2b所示)。

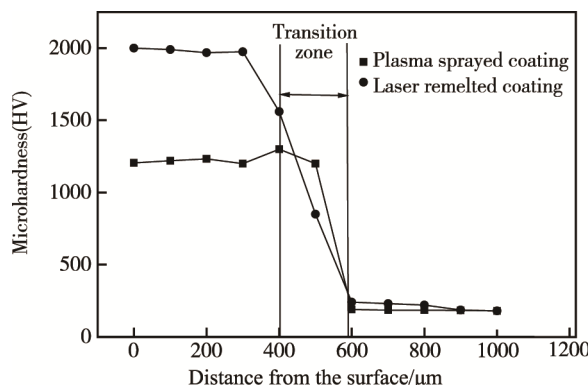


图5 重熔涂层沿截面硬度分布

Fig.5 Hardness distribution of remelted coating along cross section

2.3 耐磨性能

2.3.1 磨损表面形貌

图6是等离子喷涂涂层和不同温度下激光重熔涂层的磨损形貌。图6a的等离子喷涂涂层呈现出因大量条状涂层材料脱落而形成的粗糙亚表层,并伴随着锥刺和划痕,其磨损机理为剧烈的粘着磨损。等离子喷涂涂层是由颗粒层层堆积而形成的,其致密度低,内聚强度低,在摩擦过程中受负荷作用的微凸起发生弹性或弹塑性变形;同时,一些尺寸较大的粒子聚合物受剪切应力和压应力作用而脱离涂层。图6b是激光重熔涂层在室温下的磨损形貌,对比图6a可以发现,磨损表面没有大块的材料脱落,无剥落坑,磨损表面较光滑,仅仅产生了因微量塑性变形而导致的微划痕^[21]。这是因为激光重熔过程中生成的 M_{23}C_6 型化合物、 $(\text{Ni,Cr,Fe})_7\text{C}_3$ 及 $(\text{Cr,Ni})_3\text{Si}$ 等硬质相起到了弥散强化的作用,提高了涂层的硬度值,增强了涂层的耐磨性。由图6c可以看到,激光重熔涂层在200 $^{\circ}\text{C}$ 下的磨损表面有擦伤和沟纹,并伴随有少量的剥落坑,其磨损机理是磨料磨损+粘着磨损。由图6d可以看到,激光重熔涂层在400 $^{\circ}\text{C}$ 下的磨损表面有裂纹出现,其磨损机理是疲劳磨损。

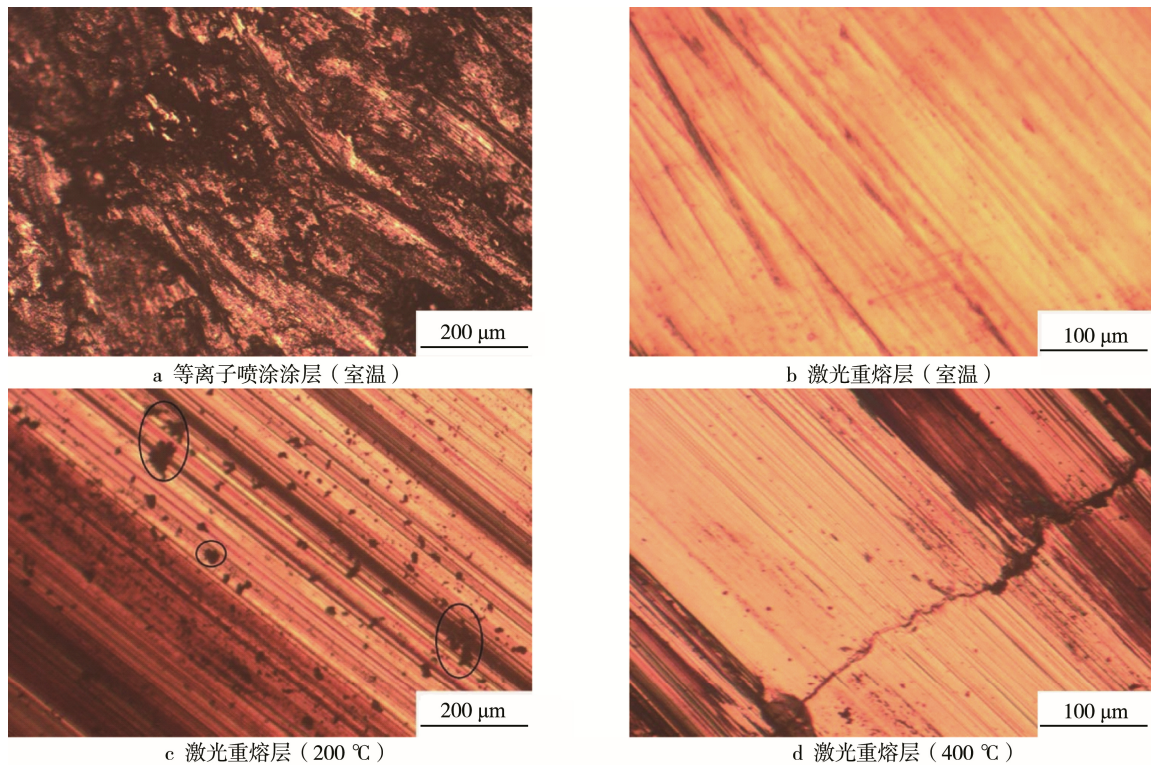


图 6 不同条件下涂层的磨损形貌

Fig.6 Worn morphology of coatings under different conditions: a) plasma sprayed coating (room temperature), b) laser remelted coating (room temperature), c) laser remelted coating (200 °C), d) laser remelted coating (400 °C)

磨损疲劳裂纹的产生是一个复杂的过程,一般认为是陶瓷材料脆性大而对循环应力敏感所致。微裂纹的出现主要与涂层内的热应力有关^[22],激光重熔涂层的热应力可以表示为:

$$\sigma_{th} = \frac{E \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T}{1 - \nu} \quad (2)$$

式中: E 为材料的杨氏模量; $\Delta\alpha$ 为涂层与基体间的热膨胀系数差值; ΔT 为涂层温度与室温的差值; ν 为泊松比。涂层磨损时, E 、 ν 不变, $\Delta\alpha$ 和 ΔT 的值都较大,由公式(2)知, σ_{th} 变大。同时,摩擦生热会使涂层单位面积在相同时间内吸收更多的热量, ΔT 不断增大,导致涂层在磨损时产生裂纹。此外, σ_{th} 的大小与 $\Delta\alpha$ 密切相关,涂层中的 $M_{23}C_6$ 型化合物、 $(Ni, Cr, Fe)_7C_3$ 、 $(Cr, Ni)_3Si$ 及残留的 WC 的热膨胀系数都较基体 45# 钢的小,则在激光束照射时导致 $\Delta\alpha$ 增大, σ_{th} 随之增大。

2.3.2 磨损率

图 7 是等离子喷涂涂层及不同温度下的激光重熔涂层的磨损率。可以看到,激光重熔涂层在几种不同温度下的磨损率均比等离子喷涂涂层的低,这说明激光重熔处理提高了等离子喷涂涂层的耐磨性能。不同温度下的激光重熔涂层的磨损率各不相同,其中 25 °C 时的激光重熔涂层的磨损率最低。值得注意的是,激光重熔涂层在 200 °C 时的磨损率比 400 °C 时的高。结合图 6c 和图 6d 的磨损形貌可知,因为激光重

熔涂层在 200 °C 时为磨料磨损+粘着磨损,磨损表面有大量的沟纹和脱落坑,造成涂层材料的损失较大;而激光重熔涂层在 400 °C 时为疲劳磨损,仅仅是表面产生了裂纹和少量沟纹,涂层材料损失较少。所以,激光重熔涂层在常温 25 °C 时的综合耐磨性能最好。

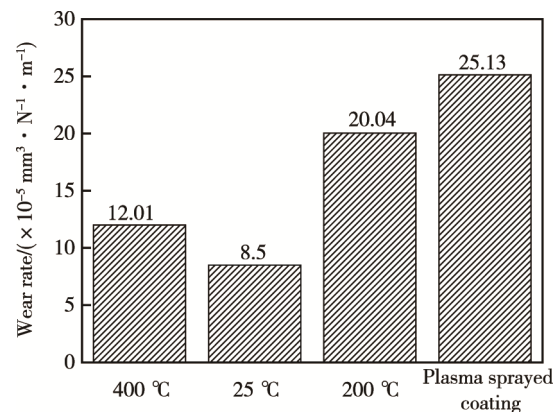


图 7 等离子喷涂层及激光重熔层的磨损率

Fig.7 Wear rate of plasma sprayed coating and laser remelted coating

3 结论

1) 激光重熔基本消除了 WC/Fe 陶瓷涂层内的孔隙和片层状结构等缺陷,使涂层组织变得致密,且涂层与基体结合带处发生了元素相互扩散,结合方式由机械结合转化为冶金结合。

2) 等离子喷涂 WC/Fe 陶瓷涂层经过激光重熔处理后生成了如 $M_{23}C_6$ 型的碳化物、 $(Cr, Ni)_3Si$ 及 Ni_6BSi_2 等硬质相, 这提高了重熔涂层的硬度, 显微硬度值约为原等离子喷涂层的 2 倍。

3) 等离子喷涂涂层经过激光处理后, 耐磨性能得到很大提高, 且重熔涂层在常温下的耐磨性能最好。

参考文献:

- [1] MARTÍN A, RODRÍGUEZ J, FERNANDEZ J E, et al. Sliding Wear Behaviour of Plasma Sprayed WC-NiCrBSi Coatings at Different Temperatures[J]. Wear, 2001, 251(1): 1017-1022.
- [2] 姚舜晖, 苏演良, 高文显, 等. 纳米碳化钨增强镍基合金热喷涂涂层的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(1): 33-38.
YAO Shun-hui, SU Yan-liang, GAO Wen-xian, et al. Tribological Performance of Nano-structured WC Reinforced Ni-based Alloy HVOF Coating[J]. Tribology, 2008, 28(1): 33-38.
- [3] 颜永根, 斯松华, 张晖, 等. 激光熔覆 Co+Ni/WC 复合涂层的组织和磨损性能[J]. 焊接学报, 2007, 28(7): 21-24.
YAN Yong-gen, SI Song-hua, ZHANG Hui, et al. Microstructure and Wear Resistance of Laser Cladding Co+Ni/WC Alloy Composite Coating[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2007, 28(7): 21-24.
- [4] 欧献, 邓畅光, 王日初, 等. 超音速等离子喷涂工艺参数对 Cr_2O_3 涂层硬度的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 81-85.
OU Xian, DENG Chang-guang, WANG Ri-chu, et al. Influences of the Supersonic Plasma Spraying Process on the Hardness Properties of Cr_2O_3 Coating[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 81-85.
- [5] 彭思源. WC 颗粒增强铁基复合堆焊层性能研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2015.
PENG Si-yuan. Research on Property of WC Particle Reinforced Iron-based Composite Surfacing Layer[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2015.
- [6] LI S, LI Q. Microstructure and Tribological Performances of 25NiCr- Cr_3C_2 Coatings Prepared by Laser-Hybrid Plasma Spraying Technology[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011(s4): 194-198.
- [7] 纪岗昌, 李长久, 王豫跃, 等. 喷涂工艺条件对超音速火焰喷涂 Cr_3C_2 -NiCr 涂层冲蚀磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2002, 22(6): 424-429.
JI Gang-chang, LI Chang-jiu, WANG Yu-yue, et al. Effect of Spray Conditions on Erosion Performance of High Velocity Oxygen Fuel Sprayed Cr_3C_2 -NiCr Coatings[J]. Tribology, 2002, 22(6): 424-429.
- [8] ZHANG Z Y, LU X C, LUO J B. Tribological Properties of Rare Earth Oxide Added Cr_3C_2 -NiCr Coating[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(9): 4377-4385.
- [9] 曹玉霞, 杜令忠, 张伟刚, 等. 等离子喷涂 NiCoCrAlY/ Al_2O_3 涂层的制备及摩擦性能研究[J]. 表面技术, 2015, 44(5): 62-66.
CAO Yu-xia, DU Ling-zhong, ZHANG Wei-gang, et al. Study on Preparation and Tribological Properties of Atmospheric Plasma Sprayed NiCoCrAlY/ Al_2O_3 Wear-resistant Coatings[J]. Surface Technology, 2015, 44(5): 62-66.
- [10] GAO Y, LIANG Y, SHI C X. Microstructure of Laser Remelted Ni-base Alloy Coating on Stainless Steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 1998, 14(1): 49-52.
- [11] MATEOS J, CUETOS J M, FERNÁNDEZ E, et al. Tribological Behaviour of Plasma-sprayed WC Coatings with and without Laser Remelting[J]. Wear, 2000, 239(2): 274-281.
- [12] 贾卫平, 姚井龙, 吴蒙华, 等. 激光重熔参数对镍基纳米 TiN 复合电沉积镀层性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(3): 78-83.
JIA Wei-ping, YAO Jing-long, WU Meng-hua, et al. Effect of Laser Remelting Parameters on Properties of Nickel-based Nano TiN Composite Deposition Coatings[J]. Surface Technology, 2016, 45(3): 78-83.
- [13] 花国然, 罗新华, 黄因慧, 等. 激光重熔改性等离子喷涂陶瓷涂层的组织及其耐腐蚀性能[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(6): 934-938.
HUA Guo-ran, LUO Xin-hua, HUANG Yin-hui, et al. Microstructure and Corrosion Characteristics of Plasma-sprayed Ceramic Coating by Laser Remelting of Nano- Al_2O_3 Modifying[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(6): 934-938.
- [14] 陈汉存, 刘正义. 等离子喷涂 ZrO_2 层经激光再熔后的组织变化[J]. 金属学报, 1993, 29(8): 72-76.
CHEN Han-cun, LIU Zheng-yi. Structural Change of Plasma Sprayed ZrO_2 Coating after Laser Remelting[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1993, 29(8): 72-76.
- [15] 汪新衡, 蒋冬青, 张蓉, 等. 激光熔覆纳米 SiC 增强 Ni 基合金涂层的组织与高温抗氧化性能[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 30-34.
WANG Xin-heng, JIANG Dong-qing, ZHANG Rong, et al. Reinforced Microstructure and High Temperature Oxidation Resistance of Ni-based Alloy Coating by Laser Cladding of SiC Nanometer Powder[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 30-34.
- [16] 赵凯华, 孙荣禄, 牛伟, 等. 激光熔覆 NiCrBSi 涂层

- 组织及摩擦磨损性能[J]. 光学技术, 2009, 35(2): 232-234.
- ZHAO Kai-hua, SUN Rong-lu, NIU Wei, et al. Microstructure and Friction and Wear Properties of NiCrBSi Laser Cladding[J]. Optical Technique, 2009, 35(2): 232-234.
- [17] GAO Y, LIANG Y, SHI C X. Microstructure of Laser Remelted Ni-base Alloy Coating on Stainless Steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 1998, 14(1): 49-52.
- [18] 王敏, 王海东. 等离子喷涂 Ni 基 WC 涂层的组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(12): 134-136.
- WANG Min, WANG Hai-dong. Study on Microstructure and Properties of Ni-based WC Coating Prepared by Plasma Spraying[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(12): 134-136.
- [19] 周思华, 晁明举, 刘奎立, 等. 原位生成 WC-B₄C 增强镍基激光熔覆层及其性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 25-30.
- ZHOU Si-hua, CHAO Ming-ju, LIU Kui-li, et al. Research on In-situ Synthesis of WC-B₄C Reinforced Ni-based Coatings by Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 25-30.
- [20] HOUDKOVÁ Šárka, SMAZALOVÁ E, VOSTŘÁK M, et al. Properties of NiCrBSi Coating, as Sprayed and Remelted by Different Technologies[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 253(9): 14-26.
- [21] 陈传忠, 雷廷权, 包全合, 等. 等离子喷涂-激光重熔陶瓷涂层存在问题及改进措施[J]. 材料科学与工程, 2002, 10(4): 431-435.
- CHEN Chuan-zhong, LEI Ting-quan, BAO Quan-he, et al. Problems and the Improving Measures in Laser Remelting of Plasma Sprayed Ceramic Coatings[J]. Materials Science & Technology, 2002, 10(4): 431-435.
- [22] 陈志刚, 孔德军, 王玲. 激光重熔对 Ni-WC 涂层组织与开裂的影响[J]. 材料热处理学报, 2008(6): 149-153.
- CHEN Zhi-gang, KONG De-jun, WANG Ling. Effect of Laser Re-melting on Structure and Cracking of Ni-WC Coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008(6): 149-153.