

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170718002

7075 铝合金表面激光熔覆 Ti/TiBCN 复合涂层的组织及性能

张鹏飞, 李玉新, 李亮, 苏科强, 张宏建, 尉利强, 赵占勇

(中北大学材料科学与工程学院, 太原 030051)

摘要: 采用激光熔覆技术在 7075 铝合金表面制备了 Ti/TiBCN 复合涂层, 研究了工艺参数对复合涂层的微观组织及性能的影响。利用 X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM) 研究了 Ti/TiBCN 复合涂层的相组成和微观组织; 利用显微维氏硬度计和往复摩擦磨损试验机研究了 Ti/TiBCN 涂层的性能。结果表明: 当激光功率 1 000 W, 扫描速度 3 mm/s, 送粉率 300 mg/min 时, Ti/TiBCN 复合涂层质量最好。涂层上部由树枝晶和部分胞状晶组成, 涂层中部为等轴晶, 涂层下部呈现球形的 TiBCN 颗粒。与铝合金基体相比, 涂层的平均硬度为 519.4 HV_{0.2}, 是基体 (~120 HV_{0.2}) 的 4.3 倍; 涂层的平均摩擦因数为 0.208, 约是基体 (0.442) 的 1/2; 涂层磨损失量为 2.7 mg, 约是基体 (8.2 mg) 的 1/3。

关键词: 铝合金; 激光熔覆; 微观组织; 显微硬度; 磨损

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)02-0159-06

Microstructure and Properties of Ti/TiBCN Coating on 7075 Aluminum Alloy Surface by Laser Cladding

ZHANG Peng-fei, LI Yu-xin, LI Liang, SU Ke-qiang, ZHANG Hong-jian, YU Li-qiang, ZHAO Zhan-yong

(College of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051)

Abstract: Ti/TiBCN composite coating was fabricated on the 7075 aluminum alloy surface by laser cladding technology. The influence of process parameters on the microstructure and properties of the composite coating was studied. The phase composition, microstructure, micro-hardness and wear resistance of the composite coatings were studied by a X-ray diffractometer (XRD), a scanning electron microscope (SEM), a Vickers micro-hardness tester and straight-line-reciprocating dry sliding wear tester, respectively. Results show that the Optimal process parameters are as laser power 1 000 W, scanning speed 3 mm/s and the powder feeding rate 300 mg/min. The top, middle and bottom of the coating are consists of dendrites and cellualrn crystals, equiaxed crystal and spherical TiBCN particles, respectively. The average hardness of the coating is 519.4 HV_{0.2}, which is about 4.3 times higher than that of the substrate (~120 HV). The average friction coefficient of the coating is 0.208, which is about half of the substrate (0.442). The mass loss of coating is 2.7 mg, which is about one third of the substrate (8.2 mg).

Keywords: aluminum alloy; laser cladding; microstructure; microhardness; wear

收稿日期: 2017-07-18; 修回日期: 2018-03-05

网络出版日期: 2018-03-07 12:52; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180307.1252.010.html>

通讯作者: 李玉新 (1979—), 男 (汉), 副教授, 博士; 研究方向: 激光熔覆技术; E-mail: liyuxin326@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51604246); 山西省科技攻关项目 (2015031011-2, 201603D121002-2); 山西省高等学校科技创新项目 (2015104)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51604246), Science and Technology Project of Shanxi Province (2015031011-2, 201603D121002-2) and Science and Technology Innovation Project of Colleges and Universities of Shanxi Province (2015104)

引文格式: 张鹏飞, 李玉新, 李亮, 等. 7075 铝合金表面激光熔覆 Ti/TiBCN 复合涂层的组织及性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 159-164.

ZHANG P F, LI Y X, LI L, et al. Microstructure and properties of Ti/TiBCN coating on 7075 aluminum alloy surface by laser cladding[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(2): 159-164.

0 引言

铝及铝合金是轻量化的首选材料，是有色金属之首。铝合金具有密度小、比强度大、易加工、耐腐蚀性好等优良的综合性能，广泛应用于汽车、航空航天、船舶等领域^[1-2]。但是在实际应用中，铝合金表面硬度低、耐磨性差，在一定程度上限制了其应用范围。

为提高铝合金的使用性能，国内外许多学者选用各种表面改性技术来提高铝合金表面性能。与阳极氧化法、微弧氧化法^[3]、热喷涂^[4]、物理气象沉积、化学气象沉积^[5-6]等技术相比，激光熔覆技术具有对基体的热影响小，能量利用率高，熔覆层表面较为光滑平整，与基体界面结合较好等优点^[7-8]。魏广玲^[9]等利用激光熔覆技术在 6061 铝合金表面熔覆铜基复合涂层，结果表明大量硬质颗粒增强相分布在 Cu-Ni 固溶体合金基体组织中，大大增强了基体的耐磨性能，比基体硬度提高了 4.5 倍。Wang^[10]等人在 6063 铝合金表面熔覆了 Ni60 合金涂层，并添加了稀土 La₂O₃、Y₂O₃、CeO₂ 化合物，研究表明稀土化合物可以消除涂层的裂纹和气孔，显微硬度提高到 350 HV。沈育伟^[11]采用高功率半导体激光器在 5052 铝合金表面熔覆 Al-Si 合金涂层，熔覆层与基体形成良好的冶金结合，表面硬度高 900 HV_{0.1}。

然而，尽管国内外学者对铝合金激光表面改性的制备工艺和性能做了广泛的研究，目前还没有在铝合金表面制备 Ti/TiBCN 涂层的研究报道。TiBCN 是对 TiCN 进行硼化处理获得的新型的陶瓷材料，具有 NaCl 型面心立方 (FCC) 晶体结构，B 的固溶使 TiBCN 陶瓷材料在硬度、耐磨性和化学稳定性方面有更加突出的表现。文中通过选择合适的 Ti/TiBCN 粉末配比和工艺参数，用激光熔覆技术在 7075 铝合金表面制备出 Ti/TiBCN 涂层，提高了铝合金表面的硬度和耐磨性。

1 试验

1.1 样品制备

基体材料选用 7075 铝合金 (化学成分见表 1)，规格大小为 30 mm×20 mm×10 mm。试样表面用 180 号砂纸打磨，并用无水乙醇清洗，晾干，用黑色墨水将待熔覆表面涂黑。熔覆材料为 Ti 粉 (纯度 99.5%，粒度 100~150 μm) 和 TiBCN 粉末

(纯度 98.5%，粒度 80~100 μm)，其粉末特性如表 2 所示。粉末按质量分数 85%Ti 和 15%TiBCN 粉末进行配比，用 QM-3SP4 行星式球磨机进行机械混合，球磨速度 500 r/min，球磨时间 2 h。

表 1 7075 铝合金的成分

Table 1 Chemical composition of 7075 aluminum alloy (w%)					
Element	Si	Fe	Cu	Mn	Cr
Content	0.40	0.5	1.2~2.0	0.30	0.18~0.28
Element	Zn	Ti	Al	Others	
Content	5.1~6.1	0.2	Bal.	<0.05	

表 2 Ti 和 TiBCN 粉末的物理特性

Table 2 Physical properties of Ti and TiBCN powder		
Physical property	Ti powder	TiBCN powder
Melting point/℃	1 660±4	≥2 900
Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	22.08	11
Density/(g·cm ⁻³)	4.507	5.1~5.4
Coefficient thermal expansivity/(10 ⁻⁶ K)	8.35	8.258
Electrical resistivity/(10 ⁻⁷ Ω·m)	0.42	15
Micro-hardness/ HV	90~225	18~24
Tensile strength/ MPa	250	240~300

使用 DMS-3D 型同轴送粉器和光纤耦合半导体激光器 (LDF 4 000-100)，波长 980~1020 nm，最大输出功率 4 000 W，焦距 150 mm，光斑直径 1.5 mm。其工艺参数范围：功率 800~1 200 W，扫描速度 2~5 mm/s，送粉率 200~300 mg/min，搭接率 30%，使用氩气为保护气体。

1.2 结构表征及力学性能测试

用 Rigaku D/max-rB 型 X 射线衍射仪 (XRD) 进行物相分析，然后使用 INSPECTF-50 型电子扫描显微镜 (SEM) 观察截面形貌和微观组织。用 HVS-1000 型显微维氏硬度计测试熔覆层横截面的硬度分布，使用载荷 200 g，加载时间 10 s。

采用 MFT-R4000 往复摩擦磨损试验机，在室温下往复干摩擦，摩擦副为直径 5 mm 的 GCr15 钢球 (硬度为 HRC65)，载荷为 5 N，摩擦长度 5 mm，摩擦频率 2 Hz，磨损时间 20 min；对磨损试样利用电子天平称量前后质量 (精度为 0.1 mg)，并计算磨损损失量。使用 ZEISS-Imager 型金相显微镜 (OM) 对磨损后的形貌进行分析。

2 结果与讨论

2.1 工艺参数对熔覆层质量的影响

表 3 是 3 因素 3 水平的正交实验表及试样的宏观形貌。不同工艺参数下, 7075 铝合金表面激光熔覆 Ti/TiBCN 的宏观形貌差异较为明显。在激光功率和送粉率一定的情况下, 扫描速度 2 mm/s 时, 激光比能大, 基体出现塌陷现象。当扫描速

度为 5 mm/s 时, 激光比能小, 熔覆粉末未完全熔化, 不能与基体形成良好冶金结合。当激光功率 800 W, 扫描速度 3 mm/s, 送粉率 250 mg/min 时, 熔覆层连续且完整, 但熔覆层不均匀, 且熔覆层表面出现明显的气孔, 是因为液相中的气体未能完全逸出^[12]。

从表 3 还可以看出: 在试样 5 表面能够形成一条连续、光滑的熔覆层, 与基体形成良好的冶

表 3 正交实验方案表及对应试样的宏观形貌					
Table 3 Orthogonal experimental program and macro photographs corresponding to the samples					
No.	Laser power, <i>P</i> / W	Scanning spend, <i>S</i> / (mm·s ⁻¹)	Powder feeding rate, <i>F</i> / (mg·min ⁻¹)	Sample	Remark
1	800	2	200		Bad combination
2	800	3	250		Good combination
3	800	5	300		Bad combination
4	1 000	2	250		Bad combination
5	1 000	3	300		Good combination
6	1 000	5	200		Bad combination
7	1 200	2	300		Bad combination
8	1 200	3	200		Bad combination
9	1 200	5	250		Bad combination

金结合。则最佳工艺参数为: 激光功率 1 000 W, 扫描速度 3 mm/s, 送粉率 300 mg/min, 用此优化工艺参数继续做多道熔覆, 并进行性能分析。

2.2 相组成与微观组织分析

图 1 是 7075 铝合金表面激光熔覆 Ti/TiBCN 涂层顶部和底部区域的 XRD 图谱。顶部主要由 Ti、Al、TiBCN、Al₃Ti 和 TiN 相组成, 由于熔覆粉末中 Ti 粉含量较高, 在高温作用下, Ti 和铝基体反应生成 Al₃Ti 金属间化合物, 而 TiBCN 熔点(≥2 900℃)很高, 在激光功率 1 000 W 下, TiBCN 粉末表现为边缘熔化。涂层底部主要由 Ti、Al、TiBCN 和 Al₃Ti 相组成, 由于 TiBCN 粉末边缘熔化较少, Al 含量较多, 未生成 TiN 相。

图 2 是 7075 铝合金表面激光熔覆 Ti/TiBCN

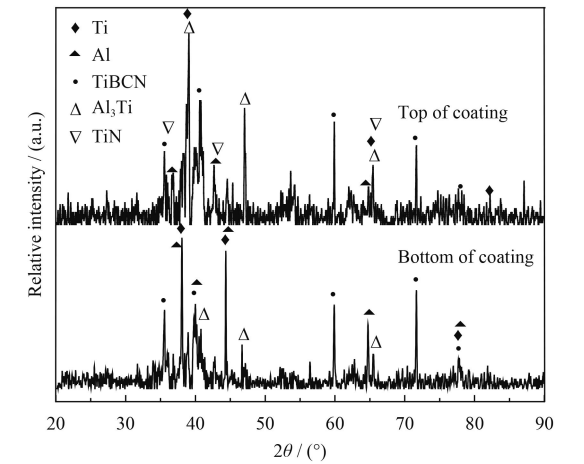


图 1 7075 铝合金表面激光熔覆 Ti/TiBCN 涂层顶部和底部的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of the laser cladding Ti/TiBCN on 7075 aluminum alloy for top and bottom of the coating

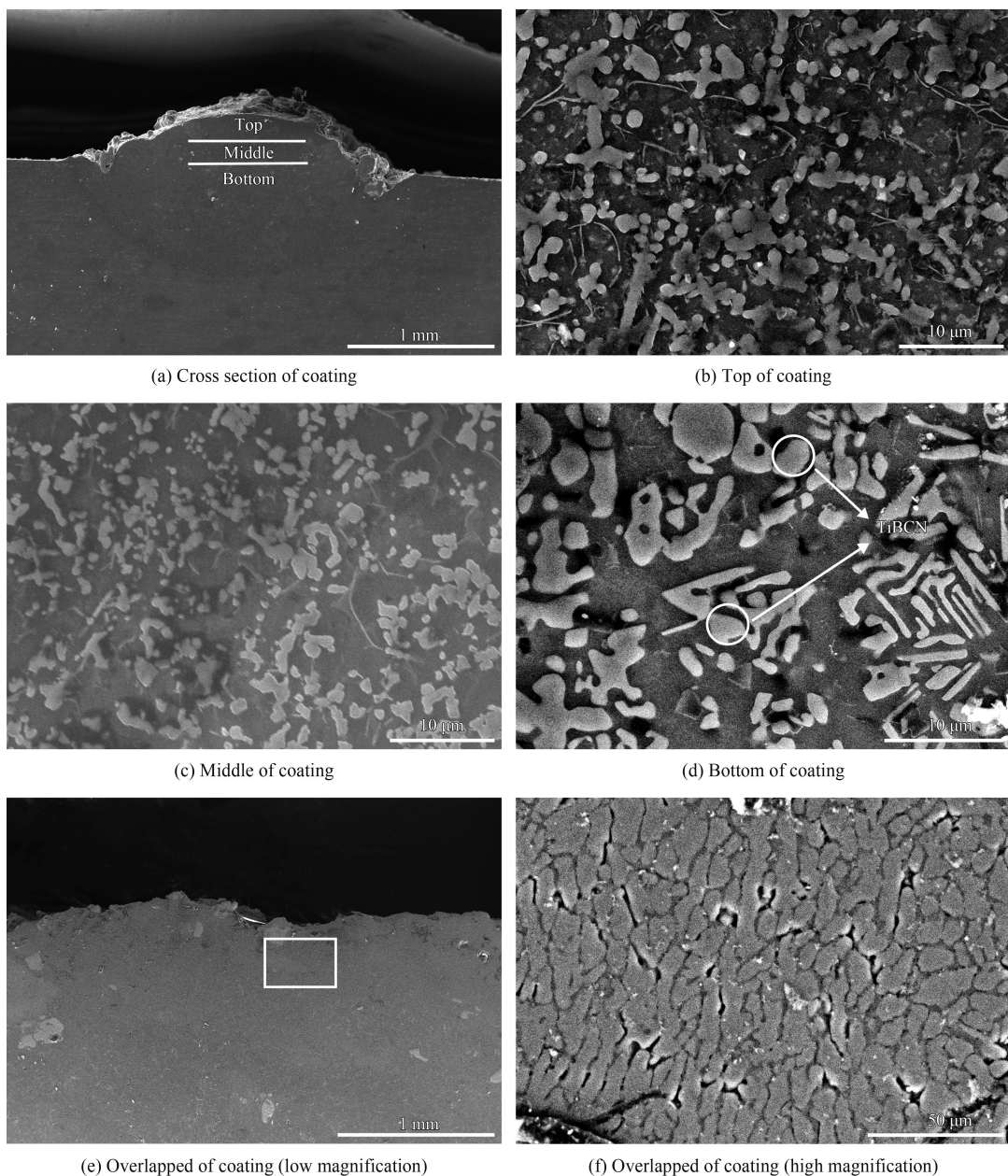


图 2 7075 铝合金表面激光熔覆 Ti/TiBCN 涂层的微观形貌

Fig.2 Micrographies of Ti/TiBCN coating on 7075 aluminum alloy by laser cladding

涂层的微观形貌。从图 2(a) 中熔覆层与基体形成良好的冶金结合, 且未发现气孔、裂纹等缺陷。因熔池的位置不同, 凝固条件不同, 最终形成的组织不同。在涂层上部, 凝固速度大, 成分过冷倾向也大, 使得晶核向成分过冷深处生长, 最终形成树枝晶和部分胞状晶(如图 2(b) 所示)。在涂层中部, 凝固速度小, 温度梯度大, 成分过冷倾向小, Ti 粉末和 TiBCN 颗粒以等轴晶形式生长, 从而使 TiBCN 以球形颗粒形态弥散分布(如图 2(c) 所示)。在涂层下部, 接近 7075 铝合金基体, 温

度梯度大, 有部分 TiBCN 胞状陶瓷颗粒(如图 2(d) 所示)。图 2(e) 为搭接处的微观形貌, 其组织放大如图 2(f) 所示, 呈现出均匀致密的组织。

2.3 熔覆层性能分析

图 3 是 Ti/TiBCN 涂层横截面的微观硬度。由图 3 可知, 从熔覆层表面至基体的硬度虽然有所波动, 但总体上呈下降趋势。Ti/TiBCN 涂层的最高硬度可达 766.3 HV_{0.2}, 平均硬度为 519.4 HV_{0.2}, 是铝合金基体(~120 HV_{0.2}) 的 4.3 倍。一是熔覆层存在大量未熔化的硬质 TiBCN 颗粒; 二是激光熔

覆是一个快速加热快速冷却的过程, 激光快速冷却使得涂层晶粒来不及长大而得到细化^[13]; 三是金属间化合物 Al_3Ti 起到第二相强化的作用。

图 4 为 7075 铝合金基体和 Ti/TiBCN 涂层的摩擦因数, 图 5 是涂层和基体磨损损失量的对比

图。涂层的平均摩擦因数为 0.208, 约是基体 (0.442) 的 1/2; 涂层磨损损失量为 2.7 mg, 约是基体 (8.2 mg) 的 1/3。无论从摩擦因数还是磨损损失量都可以看出熔覆层的耐磨性能优于基体。

图 6 给出了 7075 铝合金基体与涂层磨损后的

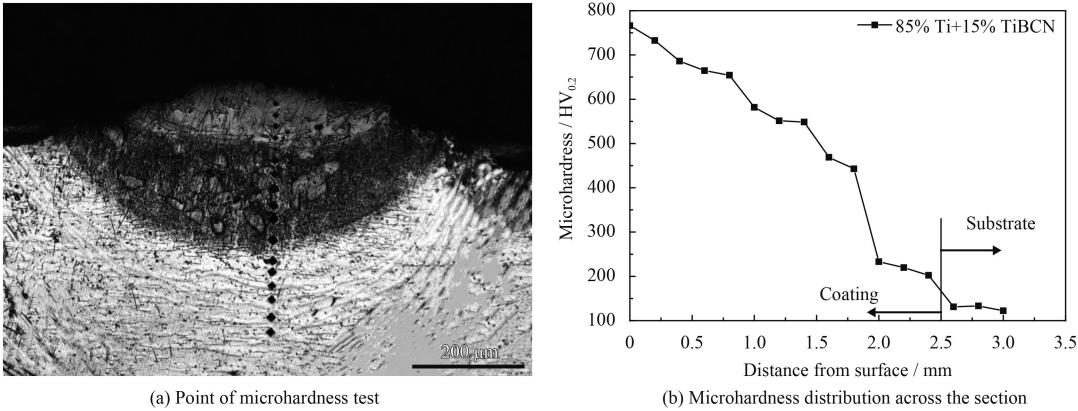


图 3 Ti/TiBCN 涂层横截面的微观硬度

Fig.3 Microhardness distribution across the section of the Ti/TiBCN coating

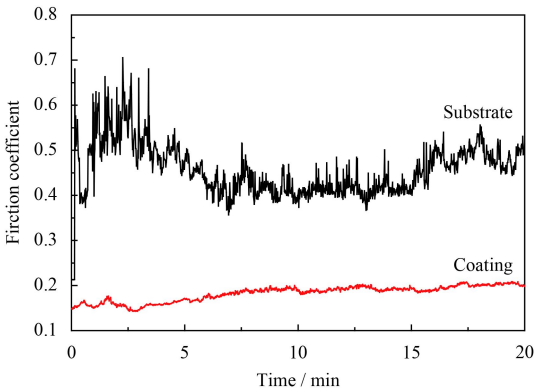


图 4 7075 铝合金基体和 Ti/TiBCN 涂层的摩擦因数

Fig.4 Friction coefficient of the Ti/TiBCN coating and 7075 aluminum substrate

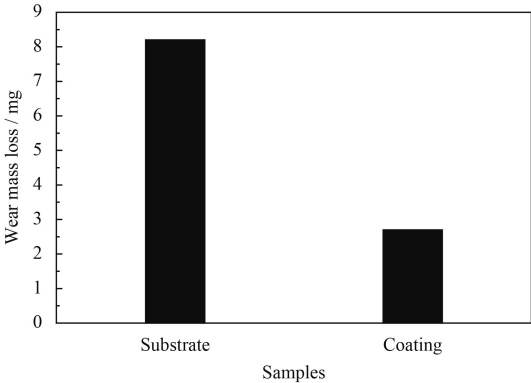


图 5 7075 铝合金基体和 Ti/TiBCN 涂层磨损损失量

Fig.5 Wear mass loss of Ti/TiBCN coating and 7075 aluminum

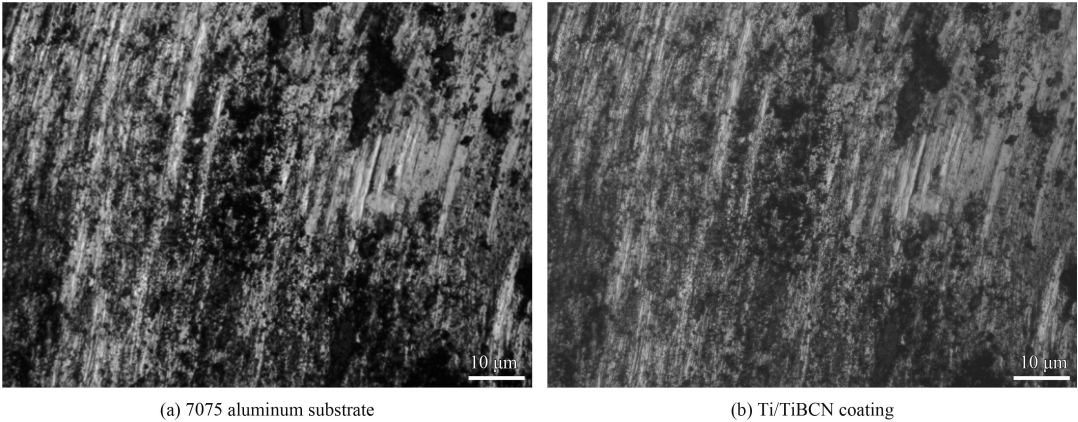


图 6 7075 铝合金基体与 Ti/TiBCN 涂层磨损后的金相显微形貌

Fig.6 Worn surface morphologies of 7075 aluminum substrate and the Ti/TiBCN coating

金相显微形貌。从图 6(a)(b) 可以看出, 7075 铝合金基体磨损表面粗糙不平, 存在大面积的塑性变形和宽且深的犁沟, 属于犁削式磨损, 这是由于铝合金硬度较低, 在对偶材料的摩擦作用下, 容易产生犁削式磨损和塑性变形。而涂层表面出现了不连续、细且浅的轻微犁沟, 属于磨粒磨损, 这主要是因为熔覆层中存在大量硬质 TiBCN、Al₃Ti 金属间化合物, 因而涂层表现出了良好的抗磨损能力。

3 结 论

(1) 通过正交实验对激光熔覆过程的工艺参数进行优化分析, 当激光功率为 1 000 W, 扫描速度为 3 mm/s, 送粉率为 300 mg/min 时, 工艺参数最佳。

(2) 在 7075 铝合金表面制备了 Ti/TiBCN 涂层。XRD 分析表明: 涂层主要由 Ti、Al、TiBCN、Al₃Ti、TiN 相组成。涂层上部由树枝晶和部分胞状晶组成, 涂层中部为等轴晶, 涂层下部呈现球形的 TiBCN 颗粒。

(3) Ti/TiBCN 涂层从表面至基体的硬度虽然有所波动, 总体上呈降低趋势, 涂层的最高硬度可达 766.3 HV_{0.2}, 平均硬度为 519.4 HV_{0.2}, 是铝合金基体 (~120 HV_{0.2}) 的 4.3 倍。

(4) Ti/TiBCN 涂层的耐磨性显著提高, 涂层平均摩擦因数为 0.208, 约是基体 (0.442) 的 1/2; 涂层磨损量为 2.7 mg, 约是基体 (8.2 mg) 的 1/3。

参考文献

- [1] ZHUANG W, LIU Q, DJUGUM R, et al. Deep surface rolling for fatigue life enhancement of laser clad aircraft aluminium alloy[J]. Applied Surface Science, 2014, 320: 558-562.
- [2] 芦庆, 李玉新, 孟君晟. ZL104 合金氩弧熔覆 Cu 基复合涂层[J]. 材料热处理报, 2014, 35(3): 167-171.
LU Q, LI Y X, MENG J S. Cu-based composite coating by argon arc cladding on ZL104 alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(3): 167-171 (in Chinese).
- [3] 刘盛耀. 镁合金表面激光熔覆 Al+WC+La₂O₃ 复合涂层的组织与性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2017: 3-13.
LIU S Y. Microstructure and properties of laser cladding Al+WC+La₂O₃ composite coating on magnesium alloy surface[D]. Taiyuan: North University of China, 2017: 3-13 (in Chinese).
- [4] 陈建敏, 王凌倩, 周健松, 等. 激光熔覆 Ni 基涂层研究进展[J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 13-21.
CHEN J M, WANG L Q, ZHOU J S, et al. Research progress of laser clad Ni-based coatings[J]. China surface Engineering, 2011, 24(2): 13-21 (in Chinese).
- [5] SHU F Y, TIAN Z, ZHAO H Y, et al. Synthesis of amorphous coating by laser cladding multi-layer Co-based self-fluxed alloy powder[J]. Materials Letters, 2016, 176: 306-309.
- [6] 崔岗, 韩彬, 崔娜, 等. 扫描速度对激光熔覆 Ni 基 WC 合金涂层组织与性能的影响[J]. 中国表面工程, 2014, 27(4): 82-88.
CUI G, HAN B, CUI N, et al. Effects of scanning speed on microstructure and properties of laser cladding Ni-based WC alloy coating[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(4): 82-88 (in Chinese).
- [7] LIN Y H, YAO J H, LEI Y P, et al. Microstructure and properties of TiB₂-TiB reinforced titanium matrix composite coating by laser cladding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 86: 216-227.
- [8] LUO K Y, JING X, SHENG J, et al. Characterization and analyses on micro-hardness, residual stress and microstructure in laser cladding coating of 316L stainless steel subjected to massive LSP treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 673: 158-169.
- [9] 魏广玲, 潘学民. 6061 铝合金激光熔覆铜基复合涂层组织及磨损性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(4): 372-375.
WEI G L, PAN X M. Microstructure and wear resistance of Cu-based composite coating on 6061 aluminum alloy by laser cladding[J]. Special Casting and Nonferrous alloys, 2010, 30(4): 372-375 (in Chinese).
- [10] WANG C L, GAO Y, ZENG Z C, FU Y K. Effect of rare-earth on friction and wear properties of laser cladding Ni-based coatings on 6063Al[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 727: 278-285.
- [11] 沈育伟. 5052 铝合金激光熔覆 Al-Si 合金涂层研究[J]. 热处理, 2016, 31(1): 28-30.
SHEN Y W. Research on cladding Al-Si alloy coating on 5052 aluminum alloy by laser[J]. Heat Treatment, 2016, 31(1): 28-30 (in Chinese).
- [12] LU X L, LIU X B, YU P C, et al. Synthesis and characterization of Ni60-hBN high temperature self-lubricating anti-wear composite coatings on Ti6Al4V alloy by laser cladding[J]. Optics Laser Technology, 2016(78): 87-94.
- [13] AINHAO R, PILAR R, RAMS J, et al. Analysis and optimization of process parameters in Al-SiCp laser cladding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 78: 165-173.

(责任编辑: 陈茜)