

工艺参数对钛合金激光熔覆 CBN 涂层几何形貌的影响

高霁, 宋德阳, 冯俊文

(沈阳航空航天大学, 沈阳 110136)

摘要: 目的 获得制备形貌较佳的 CBN 激光熔覆层的工艺参数。方法 以 CBN 粉末为熔覆材料, 在 TC11 钛合金表面制备 CBN 熔覆层。设计正交试验, 利用金相法检测熔覆层的几何形貌参数, 研究工艺参数(激光功率、扫描速度、离焦量、预置层厚度)对涂层几何形貌的影响规律。结果 随着激光功率、扫描速度、离焦量和预置层厚度的增大, 熔覆层宽度、高度以及熔池深度都发生相应的改变。其中扫描速度对熔覆层形貌的影响最大, 其次为激光功率和预置层厚度, 离焦量的影响最小。随着激光功率增大, 熔覆层宽度先增大后减小, 熔覆层高度逐渐降低, 熔池深度逐渐增大。扫描速度、离焦量和预置层厚度的增加都导致熔覆层宽高和熔池深度的减小。结论 最优的工艺参数为: 激光功率 1400 W, 扫描速度 4 mm/s, 离焦量 35 mm, 预置层厚度 0.4 mm。

关键词: 激光熔覆; CBN 涂层; 几何形貌; 工艺参数

中图分类号: TG174.453

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)01-0077-04

Influence of Processing Parameters on Geometrical Features of CBN Coatings by Laser Cladding on Titanium Alloy Surface

GAO Ji, SONG De-yang, FENG Jun-wen

(Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

ABSTRACT: **Objective** To obtain the process parameters for CBN laser cladding of better morphology. **Methods** The CBN coatings were prepared by laser cladding on TC11 titanium alloy surface with CBN powder. An orthogonal test was designed and metallographic method was used to detect the geometric parameters of the cladding layer. The influencing law of the processing parameters including laser power, scanning speed, defocusing distance and preset thickness on the laser cladding layer morphology was researched. **Results** The width, height and molten pool depth of the cladding layer were changed as the laser power, scanning speed, defocusing distance and preset thickness increased. It was concluded that the scanning speed had the most important effect, followed by the laser power and the preset thickness, and then the defocusing distance. It indicated that the width of the cladding layer first increased and then decreased, the height of the cladding layer increased and the depth of molten pool decreased with the increase of laser power. The width, height and the molten pool depth of the cladding layer decreased with the increase of scanning speed, defocusing distance and preset thickness. **Conclusion** The optimal processing parameters were obtained, the laser power was 1400 W, the scanning speed was 4 mm/s, the defocusing distance was 35 mm and the preset thickness was 0.4 mm.

收稿日期: 2014-08-03; 修订日期: 2014-09-18

Received: 2014-08-03; Revised: 2014-09-18

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(201202172)

Fund: Supported by the Liaoning Natural Science Foundation of China (201202172)

作者简介: 高霁(1955—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士, 教授, 主要研究方向: 机械表面处理。

Biography: GAO Ji(1955—), Male, from Liaoning, Master, Professor, Research focus: mechanical surface treatment.

KEY WORDS: laser cladding; CBN coating; geometrical features; processing parameter

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性能强、高温性能好等优点,被广泛应用于航空航天及民用产品等各个领域,但硬度低、耐磨性差等缺点限制了其在关键零部件上的使用^[1-3]。大多数钛合金零件的失效都出现在表面,通过合适的表面处理技术可以在不影响原有优异性能的前提下,大大提高钛合金的利用率^[4-7]。

激光熔覆技术是一种效率较高的表面涂层技术^[8-12],具有功率密度高、熔覆速度快、工件变形小及可熔覆粉末类型多等优点。立方氮化硼(CBN)是一种超硬材料,其硬度仅次于金刚石,而热稳定性和化学惰性却远远优于金刚石。将 CBN 优异的耐磨性能与 TC11 钛合金良好的金属性能有机地结合起来,能够显著提高零件的使用寿命。文中采用预置粉末法在钛合金表面激光熔覆 CBN 涂层,通过正交试验研究主要工艺参数对熔覆层形貌的影响规律,拟获得工艺参数的优化方案^[13-15]。

1 激光熔覆正交试验

熔覆材料为粒度 10~30 μm 的 CBN 粉末。基体材料为退火态 TC11 钛合金,试样尺寸为 50 mm×20 mm×8 mm,其主要化学成分(以质量分数计)如下:Al 6.2%,Mo 3.63%,Zr 1.58%,Si 0.27%,Fe 0.13%,O 0.09%,Ti 余量。

采用 5 kW CO₂ 激光器进行单道激光熔覆,自制数控三轴工作台。熔覆过程中通入氩气保护熔池,保证气氛的氧体积分数低于 0.01%。

垂直于扫描方向对熔覆试样进行线切割,用砂纸打磨并机械抛光熔覆层横截面,通过金相检测法测量试样横断面始末端上熔覆层的高度、宽度及熔池深度,讨论熔覆层质量与工艺参数之间的依赖关系。

激光熔覆的工艺参数多,影响因素复杂,且参数之间具有交互作用。如果把所有参数均作为自变量处理,则实验次数太多,不易实现,并且无法同时获得这些参数的试验数据。此外,激光熔覆机理非常复杂,要对在线工艺规律进行系统研究存在着现实的困难。因此文中正交试验的自变量选择激光功率(因素 A)、扫描速度(因素 B)、离焦量(因素 C)、预置层厚度(因素 D)四个主要工艺参数,以熔覆层宽度(*W*)、熔覆层高度(*H*)、熔池深度(*D*)作为评价熔覆层质量

的指标。正交试验采用四因素三水平的 L₉(3⁴) 方案,见表 1 和表 2。

表 1 正交试验因素水平表
Tab.1 Factors and levels of the orthogonal experiment

水平	因素			
	激光功率/W	扫描速度/ (mm·s ⁻¹)	离焦量/mm	预置层厚度/mm
1	1400	4	35	0.3
2	1600	5	45	0.4
3	1800	6	55	0.5

表 2 正交试验方案
Tab.2 The scheme of orthogonal experiment

编号	各因素水平			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

2 结果与分析

2.1 正交试验结果与分析

正交试验结果见表 3。各水平对熔覆层形貌影响的极差值见表 4,其中 *K* 为各因素对应水平试验值之和,*R* 为极差。由数据可知,因素 B(扫描速度)对三个指标的影响均为最大,当取水平 1 时,熔覆层宽度和熔覆层高度最好,熔池深度虽然较大,但不影响整体熔覆层质量;因素 A(激光功率)取水平 1 时,熔覆层高度与熔池深度最好,熔覆层宽度与另外两水平差别不大;因素 D(预置层厚度)取水平 3 时,熔池深度最浅,熔覆层的稀释率最小,可提高熔覆层质量。因素 C(离焦量)取水平 1 时,熔覆层总体形貌最好。分析认为,熔覆层形貌最好的方案为 A1B1C1D2,即:激光功率为 1400 W,扫描速度为 4 mm/s,离焦量为 35 mm,预置层厚度为 0.4 mm。

表 3 正交试验结果

Tab.3 The results of orthogonal experiment

试验编号	熔覆层宽度	熔覆层高度	mm	
			熔池深度	
1	2.598	0.327	0.376	
2	2.507	0.248	0.265	
3	2.362	0.163	0.155	
4	2.621	0.224	0.309	
5	2.609	0.230	0.257	
6	2.507	0.143	0.286	
7	2.528	0.198	0.426	
8	2.516	0.224	0.347	
9	2.469	0.178	0.341	

表 4 极差分析

Tab.4 Range analysis

		mm			
项目		因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
熔覆层 宽度	K_1	7.467	7.747	7.621	7.676
	K_2	7.737	7.632	7.597	7.542
	K_3	7.513	7.338	7.499	7.499
	R	0.270	0.409	0.122	0.177
熔覆层 高度	K_1	0.738	0.749	0.694	0.735
	K_2	0.597	0.702	0.650	0.589
	K_3	0.600	0.484	0.591	0.611
	R	0.141	0.265	0.103	0.146
熔池 深度	K_1	0.796	1.111	1.009	0.974
	K_2	0.852	0.869	0.915	0.977
	K_3	1.114	0.782	0.838	0.811
	R	0.318	0.329	0.171	0.166

2.2 各因素对形貌的影响

2.2.1 激光功率的因素

由表 4 中对应因素 A 的一系列数据可知,激光功率对熔覆层宽度、熔池深度的影响都比较显著,对熔覆层高度的影响相对较小。熔覆层宽度随激光功率增大而先增大,后减小。这是由于激光功率增大,熔覆材料吸收的能量逐渐增大,熔覆层宽度增大;当激光功率增大到一定的值时,其吸收能量与输出能量达到平衡,能量再增大就会形成等离子体,阻碍能量的吸收,所以熔覆层宽度会出现下降的趋势。熔覆层高度随激光功率增加而出现下降趋势,随后趋于平缓稳定状态。这主要是因为能量增大后,其熔覆层形成熔融状态,产生了一定的流动性,熔覆材料堆积的高度会出现下降趋势,直到流动液体的湿润性和表面张力等达到平衡后趋于稳定。熔池深度随着激光功率的增

大而逐渐加深,这主要是因为基体材料吸收的能量不断增多,不断的热积累使得熔池深度不断加深。根据激光熔覆机理可知^[12-13],能量过低,会导致涂层出现不均匀、裂纹等缺陷;能量过高,又会出现烧蚀现象,如图 1 所示。所以,选择激光功率必须与其他工艺参数合理搭配,使得熔覆层达到最佳。

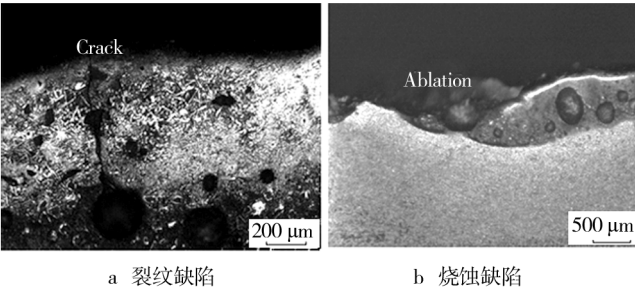


图 1 熔覆层缺陷

Fig.1 Cladding layer defects

2.2.2 扫描速度的影响

扫描速度的大小决定了激光束在熔覆材料表面停留时间的长短。由表 4 中对应因素 B 的一系列数据可知,扫描速度对熔池形貌的影响比较显著。扫描速度增大,熔覆层宽度、熔覆层高度和熔池深度都呈下降趋势,但降低过程不同。熔覆层宽度和熔覆层高度都是先平缓下降,之后陡然下降;而熔池深度则是先明显下降,之后趋于平缓。

扫描速度增大,激光能量在材料表面的停留时间缩短,激光能量减少,熔覆颗粒熔化较少,所以熔覆层高度和宽度、熔池深度都减小。当扫描速度过大时,激光能量无法使熔覆材料和基体达到熔融状态,熔覆材料没有完全熔化,与基体不能形成良好的冶金结合,而是形成包覆沉积,如图 2 所示。

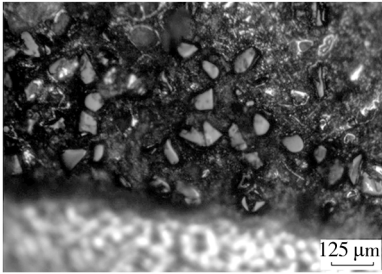


图 2 包覆结合熔覆层

Fig.2 Coating combined with cladding layer

2.2.3 离焦量的影响

离焦量变化相当于调节激光光斑直径的大小,使得能量密度发生改变,从而影响熔覆层质量的好坏。

由表 4 中对应因素 C 的一系列数据可知,离焦量增大,熔覆层宽度和高度、熔池深度均下降。离焦量有负离焦和正离焦,在焦点处,光斑直径是最小的,离焦量越大,则光斑直径越大,能量密度越小。随着离焦量的增大,熔覆材料吸收的能量不足,不能完全熔化并与基体结合,所以三个评价指标均减小。

2.2.4 预置层厚度的影响

预置涂层厚度对熔覆层形貌的影响比较复杂,由表 4 中对应因素 D 的一系列数据可知,随着预置涂层厚度的增加,熔池深度、熔覆层宽度和高度都下降,其中熔覆层宽度下降得最剧烈。由于 CBN 粉末与基体钛合金的物理特性相差比较大,采用预置粉末法时,预涂层厚度的大小会直接影响熔覆层的质量:太薄时,激光能量熔化熔覆材料的同时,也会大面积熔化基体,得到的是激光合金化的涂层;过厚时,能量只能熔化部分熔覆材料,而传递到基体的能量比较少,熔覆层与基体很难达到冶金结合。所以,合理选择预置涂层厚度对熔覆层质量至关重要。

3 结论

1) 根据极差分析的优化结果可知,激光功率 1400 W、扫描速度 4 mm/s、离焦量 35 mm、预置层厚度 0.4 mm 时的熔覆层形貌最好。其形貌主要从熔覆层宽度、熔覆层高度、熔池深度这三个方面来考虑,工艺参数对形貌影响由大到小依次为:扫描速度>激光功率>预置层厚度>离焦量。

2) 随着激光功率增大,熔覆层宽度先增大后减小,熔覆层高度降低,熔池深度加深,其形貌由好变坏。随着扫描速度增大,熔覆层宽度和高度、熔池深度都减小,扫描速度越大,涂层与基体的结合越差。相比而言,离焦量对形貌的影响较小,离焦量增大,熔覆层宽度和高度都下降,熔池深度降低。随着预置涂层厚度增大,熔覆层宽度和高度、熔池深度都下降,形貌逐渐变差。

参考文献

[1] 黄瑜,陈静,张凤英,等.热处理对激光立体成形 TC11 钛合金组织的影响[J].稀有金属材料与工程,2009,38(12):2146—2150.
HUANG Yu, CHEN Jing, ZHANG Feng-ying, et al. Influence of Heat Treatment on Microstructure of Laser Solid Forming Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.25Si Alloys[J]. Rare

Metal Materials and Engineering, 2009, 38(12): 2146—2150.

- [2] 张永忠,金具涛,黄灿,等.钛合金表面激光熔化沉积钛基复合材料涂层的组织及性能[J].稀有金属材料与工程,2010,39(8):1403—1406.
ZHANG Yong-zhong, JIN Ju-tao, HUANG Can, et al. Microstructure and Proper Ties of Laser Melting Deposited Titanium Matrix Composite Coating on Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(8): 1403—1406.
- [3] 张庆茂,王忠东,刘喜明,等.工艺参数对送粉激光熔覆层几何形貌的影响[J].焊接学报,2000,21(2):43—47.
ZHANG Qing-mao, WANG Zhong-dong, LIU Xi-ming, et al. Influence of Processing Parameters on Geometrical Features of Powder Feeding Laser Cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(2): 43—47.
- [4] 张维平,赵玉兰,李廷举.钛合金表面激光熔覆的研究进展[J].表面技术,2007,36(5):68—70.
ZHANG Wei-ping, ZHAO Yu-lan, LI Ting-ju. The Development of Laser Cladding on Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2007, 36(5): 68—70.
- [5] 项坤,王维,杨光,等.钛合金单道激光熔覆工艺的研究[J].表面技术,2013,42(1):91—93.
XIANG Kun, WANG Wei, YANG Guang, et al. Study on Titanium Alloy Single Track Laser Cladding Process[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 91—93.
- [6] 俞友军,周健松,陈建敏,等.激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-Ag-BaF₂/CaF₂ 金属基高温自润滑耐磨覆层的组织结构及摩擦学性能[J].中国表面工程,2010,23(3):64—69.
YU You-jun, ZHOU Jian-song, CHEN Jian-min, et al. Microstructure and Tribological Behavior of Laser Cladding NiCr/Cr₃C₂-Ag-BaF₂/CaF₂ Self-lubrication Wear-resistant Metal Matrix Composite Coating[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(3): 64—69.
- [7] 杨宁,杨帆.激光熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响[J].热处理技术与装备,2010,31(4):17—19.
YANG Ning, YANG Fan. Effect of Laser Cladding Parameters on the Quality of Cladding Layer[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2010, 31(4): 17—19.
- [8] LI Jun, YU Zhi-shui, WANG Hui-ping, et al. Microstructural Characterization of Titanium Matrix Composite Coatings Reinforced by in situ Synthesized TiB + TiC Fabricated on Ti6Al4V by Laser Cladding[J]. Rare Metals, 2010, 29(5): 465—472.
- [9] 张维平,刘中华,邹龙江.工艺参数对钛合金表面激光熔覆 NiCrTiC 涂层组织性能影响[J].大连理工大学学报,2009,49(3):369—373.

- 2010,52:273—281.
- [8] EUGEN A. Metallic Glasses from "Alchemy" to Pure Science: Present and Future of Design, Processing and Applications of Glassy Metals[J]. Materials and Design, 2012, 35:518—556.
- [9] 王爱萍,常新春,侯万良,等. 镍基非晶合金涂层的制备与腐蚀性能[J]. 金属学报, 2006, 42(5):537—539.
WANG Ai-ping, CHANG Xin-chun, HOU Wan-liang, et al. Preparation and Corrosion Properties of Ni-based Amorphous Alloy Coating[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(5):537—539.
- [10] 张志彬,梁秀兵,陈永雄. 热喷涂工艺制备铝基非晶态合金材料研究进展[J]. 材料工程, 2012(2):86—90.
ZHANG Zhi-bin, LIANG Xiu-bing, CHEN Yong-xiong. Research Progress of Al-based Amorphous Alloy Materials Prepared by Thermal Spraying Process[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(2):86—90.
- [11] JIANG Chao-ping, XING Ya-zhe, ZHANG Feng-ying, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of Fe/Mo Composite Amorphous Coatings Prepared by Air Plasma Spraying[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(7):657—662.
- [12] KOBAYASHI A. Mechanical Property of Fe-base Metallic Glass Coating Formed by Gas Tunnel Type Plasma Spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202:2513—2518.
- [13] CHERIGUI M. Structure of Amorphous Iron-based Coatings Processed by HVOF and APS Thermally Spraying[J]. Material Chemistry and Physics, 2004, 85:113—119.
- [14] CHENG Jiang-bo. Formation and Properties of Fe-based Amorphous/Nanocrystalline Alloy Coating Prepared by Wire Arc Spraying Process[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2009, 355:1673—1678.
- [15] 程江波,梁秀兵,徐滨士. 铁基非晶纳米晶涂层组织及耐冲蚀性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(12):2141—2145.
CHENG Jiang-bo, LIANG Xiu-bing, XU Bin-shi. Microstructure and Erosion Resistance of Fe-based Amorphous/Nanocrystalline Coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(12):2141—2145.
- [16] ZHOU Z, WANG L. Formation and Corrosion Behavior of Fe-based Amorphous Metallic Coating by HVOF Thermal Spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 204:563—570.
- [17] PENG Y. On the Bonding Strength in Thermally Sprayed Fe-based Amorphous Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 218:17—22.
- [18] 向兴华,穆晓冬,李建三. Fe基非晶合金涂层的磨损与电化学腐蚀特征[J]. 材料热处理学报, 2003, 24(4):59—62.
XIANG Xing-hua, MU Xiao-dong, LI Jian-san. Investigation of Wear and Electrochemistry Corrosion Characteristics of Fe-base Amorphous Alloy Coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2003, 24(4):59—62.
-
- (上接第80页)
- ZHANG Wei-ping, LIU Zhong-hua, ZOU Long-jiang, et al. Effect of Processing Parameters on Microstructure of NiCrTiC Coating by Laser Cladding on Titanium Alloy Surface[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(3):369—373.
- [10] 朱刚贤,张安峰,李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1):296—301.
ZHU Gang-xian, ZHANG An-feng, LI Di-chen. Effect of Process Parameters on Surface Smoothness in Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1):296—301.
- [11] 何星华,戈晓岚,许晓静,等. TC4钛合金表面氧化锆催化渗硼工艺的优化[J]. 中国表面工程, 2013, 26(6):52—56.
HE Xing-hua, GE Xiao-lan, XU Xiao-jing, et al. Optimization of Zirconium Oxide Infiltration Process on Surface of TC4 Titanium Alloy[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(6):52—56.
- [12] LI Jun, ZHANG Xuan-jun, WANG Hui-ping. Microstructure and Mechanical Properties of Ni-based Composite Coatings Reinforced by in situ Synthesized TiB₂+TiC by Laser Cladding[J]. International Journal of Minerals, 2013, 20(1):57—64.
- [13] STEEN W M, MAZUMDER J. Laser Surface Treatment[J]. Laser Material Processing, 2010, 31(6):295—347.
- [14] ZHANG Ke-min, ZOU Jian-xin, LI Jun. Synthesis of Y₂O₃ Particle Enhanced Ni/TiC Composite on TC4 Ti Alloy by Laser Cladding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22:1817—1823.
- [15] 王志坚,董世运,徐滨士. 激光熔覆工艺参数对金属成形效率和形状的影响[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2):315—319.
WANG Zhi-jian, DONG Shi-yun, XU Bin-shi, et al. Effect of Laser Cladding Processing Parameters on Metal Forming Efficiency and Geometry[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2):315—319.