

7050 铝合金表面 Al/Ti 激光熔覆工艺实验及温度场模拟分析

李建忠 黎向锋 左敦稳 许瑞华 陈竹

南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

摘要 在 7050 铝合金表面激光熔覆 Al/Ti 复合粉体, 通过 3 因素 3 水平正交试验得知当激光功率为 1.5 kW, 扫描速度为 150 mm/min, 离焦量为 50 mm 时熔覆层质量最优。模拟计算得到正交试验工艺参数下的光斑中心最高温度值, 并利用极差分析得到: 正交试验因素对中心点最高温度值影响程度从大到小的顺序是扫描速度 V , 激光功率 P 和离焦量 S 。通过对 9 组试样熔池尺寸及不同位置点温度随时间变化趋势分析可以得到, 试样前端结合较差是由于熔覆过程中基体熔池深度较小, 不足以使基体与熔覆材料很好地结合; 而后端都出现不同程度的变形和烧蚀, 是末端温度急剧积累引起的。通过分析 Al/Ti 熔覆层的金相组织可知, 熔覆层组织以胞状树枝晶为主, 且分布均匀细密。

关键字 激光熔覆; 7050 铝合金; Al/Ti 熔覆涂层; 温度场; 显微组织

中图分类号 TB34 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.121403

Process Test and Temperature Field Simulation of the Al/Ti Laser Cladding Coating Above 7050 Aluminum Alloy

Li Jianzhong Li Xiangfeng Zuo Dunwen Xu Ruihua Chen Zhu

College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract Based on the process of laser cladding Al/Ti composite powder above 7050 aluminum alloy, and by using an orthogonal experiment, an optimized cladding coating parameters are achieved with the laser power of 1.5 kW, the scanning speed of 150 mm/min and the defocusing amount of 50 mm. The highest temperature in the laser spot center is obtained from the simulation under the parameters in the orthogonal experiment. Using the range analysis, the relative significances of the three respective parameters, laser scanning speed V , laser power P and defocusing amount S are achieved in the order, from big to small. By analyzing sizes of the molten pool and several typical curves of sample temperature changing with the scanning direction in the condition of the orthogonal experiment, it has been discerned that the bonding strength of the sample front is poor because its molten pool depth in the substrate is too small to obtain a good combination between the cladding material and the substrate; moreover, the deformation and ablation occur at the sample end due to the substantial temperature accumulation originating from its poor heat dissipation. The grain morphology of Al/Ti cladding coating is mainly cellular dendrites with equal and dense distributions.

Key word laser cladding; 7050 aluminum alloy; Al/Ti cladding coating; temperature field; microstructure

OCIS codes 140.3470; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2014-05-12; 收到修改稿日期: 2014-07-08; 网络出版日期: 2014-11-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金、航空科学基金(2010ZE52056)、江苏省精密与微细制造技术重点实验室基金、江苏省研究生培养创新工程(SJLX_0120)、南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj201467)

作者简介: 李建忠(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事涂层及功能表面等方面的研究。E-mail: 1060410520@qq.com

导师简介: 黎向锋(1971—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事激光加工、抗疲劳制造等方面的研究。

E-mail: fxli@nuaa.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引言

7050 铝合金作为超硬铝合金,具有高强度、高断裂韧性及良好的抗腐蚀性能,在汽车以及航空航天工业材料中的应用日趋广泛^[1-3]。然而,其不足之处在于硬度较低且耐磨性能较差,这就限制了铝合金在对硬度及耐磨性能要求较高领域的应用。Al/Ti 金属间化合物是一种具有合理性价比与良好工艺性能的轻型结构,具有低密度、高弹性模量、高硬度、良好耐磨性、高抗氧化性以及较好的力学性能等特性^[4-5]。将 Al/Ti 复合粉体作为熔覆层材料,通过激光熔覆技术使其与基体表面熔化,形成低稀释率、无气孔、无裂纹,与基体结合良好的 Al/Ti 金属间化合物熔覆层,从而提高基体表面硬度和耐磨性能。

近年来对于 Al/Ti 熔覆层的研究主要是在钛基材料上进行的,如 Guo 等^[6]使用 10 kW 横流 CO₂ 激光器,在纯钛基材上制备了 Al/Ti 熔覆层,通过对熔覆层硬度及耐磨性能的分析,确立了 Al/Ti 最佳成分比; Garcia 等^[7]使用横流 CO₂ 激光器,在纯钛表面熔覆纯 Al 粉体,通过形成 Al/Ti 金属间化合物,改善了纯钛表面性能。

本文通过机械球磨将微米钛粉和铝粉进行球磨混合制备 Al/Ti 粉,使用压片预置法,探索铝合金表面 Al/Ti 激光熔覆层的制备工艺。通过建立有限元模型,利用温度场分析熔覆正交试验中工艺参数对熔覆效果的影响程度,以及实验过程中试样前端出现的结合较差和后端易变形的原因。通过温度场仿真分析,筛选出适合熔覆要求的试样,以减少后期试样分析的数量。

2 实验

实验中基体材料为 7050-T74 铝合金,其尺寸为 30 mm×6 mm×3 mm。为了改善基体的表面性能,利用 6050E 型喷砂机,喷砂磨料为 120 目(120 μm)的 SiC 对其表面进行喷砂预处理。用 NanoMap-500LS 三维接触式表面轮廓仪测量无喷砂预处理的基体试样,得粗糙度 $R_{a1}=0.6345$; 而经过喷砂预处理的基体试样,粗糙度 $R_{a2}=1.3646$ 。这是因为磨料在压缩空气动力下对基体表面进行了高速撞击和磨削,使得基体表面获得了一定的清洁度、粗糙度以及增大了微观表面积^[8]。熔覆材料为市购 200 目(75 μm)的铝粉和 200 目的钛粉,将微米铝粉和钛粉以原子比 1:1 通过 QM-3SP2 行星式球磨机进行机械混合,球磨速度为 500 r/min,球磨时间为 2 h,球料比为 5:1。图 1 为铝粉和钛粉球磨混合后的 X 射线衍射(XRD)图谱,由该 XRD 图谱可确认的相组成为 Al 和 Ti。采用 FW-4A 型压片机将球磨好的 Al/Ti 微米复合粉体压制在基体表面上,形成的粉末片尺寸为 30 mm×6 mm×0.3 mm。采用工具显微镜可获得粉末片上表面图像,然后基于 Matlab 图像识别获得粉末片上表面致密度为 63%。

采用的 NEL-2400 连续型 CO₂ 型激光器,功率可调范围为 20~2200 W,焦距为 250 mm 时的光斑直径为 1.5 mm。将制备好的试样放置在基台上,使用氦气为保护气体,调整激光工艺参数(激光功率、扫描速度和离焦量)对待熔覆试样进行激光扫描制备熔覆层。

将获得的熔覆试样进行线切割,沿长度方向均分 4 段;然后利用 XQ-1 金相试样镶嵌机进行镶嵌制样;经手工研磨、清洗、GPV-1 金相变频调速抛光机抛光、清洗、Keller 试剂(1 mlHF+1.5 mlHNO₃+2.5 mlHCl+95 mlH₂O)腐蚀 10 s 后,最后利用 MITUTOYO 三丰工具显微镜和 JSM-6360LV 型扫描电镜观察试样横截面的微观形貌。

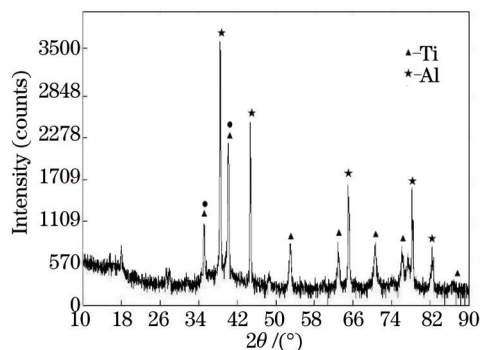


图 1 Al/Ti 复合粉体的 XRD 图谱

Fig.1 X-ray diffraction diagrams of Al/Ti composite powder

3 工艺参数的优化分析

3.1 激光工艺参数对涂层质量的影响

熔覆层质量可以用熔覆层宏观质量和横截面微观形貌来进行表征。宏观质量可以用熔覆层宽度、高度、深度以及稀释率等参数来评价。横截面微观形貌可以通过熔覆层的金相组织、界面结合强度、化学成分等来评价。影响熔覆层质量的因素很多,其中激光加工工艺参数(激光功率 P 、扫描速度 V 、光斑直径 D 和离焦量 S 等)是直接影响熔覆层能否熔化、与基体能否形成冶金结合的重要参数^[9]。激光工艺参数可以通过激光比能 E 的大小进行表征。激光比能是指熔覆层单位面积吸收的能量,其公式通常为 $E=P/(VD)$ 。当激光比能较高时,导致熔覆层稀释率较大,容易引起材料过烧,熔覆层的表面平整度增加;当激光比能较低时,熔覆层的稀释率较小,但熔覆层和基体的结合力较弱,容易剥落。

试验过程中考虑到光斑直径对熔覆质量的影响和实验过程中防止铝合金的强烈飞溅对激光头的损害,在熔覆过程中引入了离焦量。离焦量是指焦点距作用面的距离。激光熔覆过程中,离焦量的变化会影响光斑尺寸及能量分布,从而影响到熔池的形成。在离焦量为负值的情况下,铝合金的强烈飞溅不仅影响熔覆效果,而且对于激光器会产生一定损害,所以在激光熔覆过程中对于离焦量为负值的情况不予考虑。表1为不同离焦量对应的光斑直径。

表1 不同离焦量光斑直径





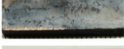


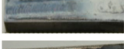

Table 1 Spot diameters of different defocusing amounts

Defocusing amount S /mm	30	40	50
Spot diameter D /mm	1.8	1.9	2.0

试验过程中采用连续 CO_2 激光器,氦气为保护气体进行铝合金表面Al/Ti激光熔覆层的制备。根据前期试验摸索,确定采用如表2所示的激光工艺参数制备Al/Ti熔覆试样。考虑到正交试验设计不仅能够较为全面地阐述影响因来对试验的影响,而且避免冗长的实验过程,实验中采用3因素3水平的正交试验,通过9个试验样品,分析激光熔覆工艺参数对激光熔覆涂层质量的影响。

表2 工艺参数影响因素水平值

Table 2 Values of process parameters

No.	Power P /kW	Speed V / (mm/min)	Defocusing amount S /mm	Energy density E / (J/mm ²)	Sample	Remark
1	1.5	150	50	300		good combination
2	1.5	250	50	200		bad combination
3	1.5	350	40	135		bad combination
4	1.6	250	30	356		bad combination
5	1.6	250	40	202		bad combination
6	1.6	350	50	137		bad combination
7	1.7	150	40	358		good combination
8	1.7	250	50	204		bad combination
9	1.7	350	30	162		bad combination

从表2试样宏观形貌图可以看出:不同的工艺参数条件下,7050铝合金激光熔覆制备Al/Ti层的宏观质量差异较为明显。选取激光功率为1.5 kW的三组试样进行分析,从试样1的宏观形貌图可以看出熔覆层前段较为平整,后段熔覆层在热量累积的作用下呈现凸起,尾端变形严重。该试样尾端的变形弯曲主要是由于实验过程中基体放置时尾端空置,在高温下出现了变形,所以对后续的试样放置进行了改善,2号~9号试样均未出现尾端弯曲变形现象。试样2与试样3的扫描速度变化幅度较大,使得其激光比能大幅度减小,熔覆结合强度明显降低,出现脱落等现象。

当扫描速度为150 mm/min时,试样1、4及7的激光功率逐渐增大,尽管其离焦量有变化,但其离焦量的

变化幅度较小,所以对于激光比能的影响相对较小,这三组试样的激光比能呈现了递增趋势。对于试样4,熔覆层形成明显的波浪流动状并伴随着严重的凹陷现象。此时离焦距为30 mm,激光比能较高。激光熔覆过程中,光斑中心的温度最高,沿光斑中心深度方向上的温度逐渐降低,导致短时间内熔融的液体金属往侧向流动,加之熔覆过程中较高的冷却速度,已熔融的液体在其回流之前冷却凝固,从而形成凹陷的熔覆层。对于试样7,其激光比能最大,熔覆过程中能量积累较大,所以试样末端积累了大量热量,导致其变形。

当离焦距为50 mm时,试样1、6及8的激光功率逐渐增大,试样1扫描速度最小,试样6最大;综合激光功率与扫描速度两者的变化幅度,试样1的激光比能最大,而试样6的激光比能最小。由试样6的宏观形貌图可以看出,熔覆层连续且完整,但结合不好,且熔覆层表面出现明显的气孔,说明在熔覆过程中激光能量不足以使熔覆材料与基体良好结合,且液相中的气体未能完全逸出。对于试样8,其前端虽有部分结合,但总体结合不好,而末端也因为热积累出现变形及烧蚀现象。

对于试样5,由于其激光比能相对较小,不足以形成表面结合良好的熔覆涂层,结合较差,容易出现脱落等问题。试样9熔覆层连续且完整,但结合不好,且熔覆层表面出现明显气孔,其出现的问题基本与试样6的一致。

综合以上分析可知,在当前激光工艺参数条件下,当激光功率为1.5 kW,扫描速度为150 mm/min,离焦距为50 mm时可获得较优的激光熔覆涂层。

3.2 激光熔覆温度场分布

3.2.1 激光熔覆模型建立

采用压片预置式激光熔覆物理模型,熔覆材料在形成熔覆层前后的材料属性以熔覆材料熔点为分界线进行转换。未达到熔点前为复合粉体的物性参数,达到熔点后为涂层材料的物性参数。

利用有限元分析过程中,采用SOLID70三维8节点热分析单元,考虑到分析单元为规则的六面体单元,采用映射法进行网格划分^[10]。考虑整个熔覆过程中,材料变化的激烈程度,在网格划分时,为了保证计算精度,同时也避免冗长的计算时间,沿激光扫描方向,涂层材料模型网格划分整体较密,而基体网格划分采用上密下疏,垂直于扫描方向,激光束光斑扫描区域整体模型网格较密,其他部分随激光扫描中心距离的增加逐渐变疏。

激光熔覆过程属于典型的准稳态热过程,熔覆模拟过程中激光束热流成高斯分布,其特点是:距激光中心越远,其能量分布越低。熔覆过程中试样边界与周围介质热交换主要包括对流换热和辐射换热。激光束光斑区域内的熔覆材料主要处于吸收光能状态,与周围介质的热交换极少,而未进入光斑区域内的熔覆材料与周围介质存在着热交换,因此,激光扫描过程中,热交换属于动态变化过程^[11]。通过“杀死”进入光斑区域的等效单元,离开光斑区域后将其“激活”,以实现边界条件的动态变化。

3.2.2 激光熔覆模拟计算分析

以7050铝合金表面激光熔覆Al/Ti层为研究对象。图2为激光功率为1.5 kW,扫描速度为150 mm/min,离焦距为50 mm时获得的激光熔覆温度场分布云图,其中图2(a)为光斑到达试样中心位置时的温度场分布云图(时间为6 s),图2(b)为光斑到达试样末端位置时的温度场分布云图(时间为12 s)。由图可以发现,被激光束照射部分温度很高,温度值最高点出现在激光扫描中心。激光源离开后,通过工件与周围介质的对流换热和工件内部的热传导,材料温度迅速降低,表现出典型的急热急冷特征^[12]。这一特征使得熔覆层组织的凝固速度很快,可形成微观组织细小致密的熔覆层。由于激光束一直处于移动过程,激光光斑移出的区域温度没来得及下降,光斑进入的区域迅速升温,导致光斑移出的等温区域比将要进入的区域大。熔池前方温度变化较为剧烈,熔池后方的温度变化则较为缓慢,激光束前端的温度场密度与温度梯度要明显大于激光束后端。

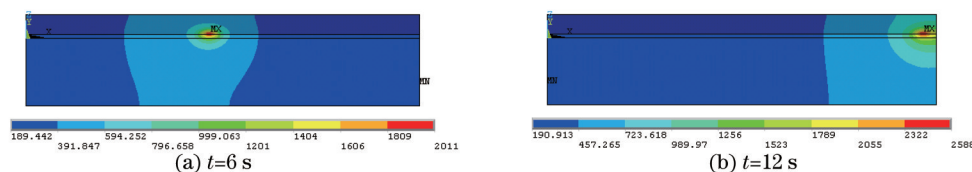


图2 瞬态温度场云图

Fig.2 Cloud chart of the transient temperature field

激光功率为 1.5 kW, 扫描速度为 150 mm/min, 离焦量为 50 mm 时, 激光熔覆层表面沿激光扫描方向各点温度变化情况如图 3 所示, 以铝合金基体上表面扫描起点为坐标系原点。其中 $P1(0, 0, 0.3)$ 、 $P2(7.5, 0, 0.3)$ 、 $P3(15, 0, 0.3)$ 、 $P4(22.5, 0, 0.3)$ 以及 $P5(30, 0, 0.3)$ 为基体上 Al/Ti 压片表面上沿其长度方向均匀分布的点。各点有着基本相同的热循环曲线, 只是到达最高温度的时间不同。从整体视图发现, 随着位置点的变化, 激光束对于熔覆试样的热影响区越来越大; 但随着距起点距离的增加, 热影响区域的生长速度越来越缓慢, 最后基本处于稳定状态, 整个熔覆过程形成温度准稳态分布。考虑到激光束移动过程中试样存在热传递, 热量由试样前端逐渐向后端扩散, 试样后端在激光束未扫描前, 温度逐步递增。所以在整个激光扫描过程中, 沿激光扫描方向, 激光束扫描中心点的最高温度值一直处于递增状态。而当激光束到达试样末端, 其温度值相比准稳态区域的温度极值变化出现了较大的增加, 这是由于在激光熔覆过程中, 材料内部热量主要散失方式是热传导, 而末端能量只能进行单向热传导, 造成末端的热量大量积累, 从而导致末端温度显著增大^[3], 其最高温度高达 2700 °C, 而扫描起点最高温度才为 1734 °C, 所以试样末端出现了变形。

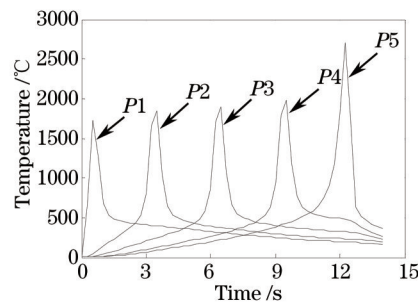


图 3 沿扫描方向节点温度变化曲线

Fig.3 Node temperature change curve along the scanning direction

不同激光工艺参数下沿激光扫描方向各点温度变化趋势与图 3 基本一致, 这也说明了表 2 中熔覆宏观试样在末端出现不同程度的变形及烧蚀是由于末端温度急剧积累所引起的。其中试样 7 的激光比能最大, 其起点最高温度值为 2141 °C, 而末端最高温度可达 3252 °C, 所以试样 7 的变形程度最为严重。

通过上述试验过程中设计的以激光功率、激光扫描速度以及离焦量为三个主要因素的正交试验, 利用仿真计算得到表 2 给出的 9 组工艺参数, 激光光斑到达试样中心, 光斑中心最高温度数值如表 3 所示。对表 3 所得数据进行正交试验极差分析, 所得数据如表 4 所示。

表 3 试样中心位置最高温度值

Table 3 Highest temperature values of sample center

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperature value T / °C	2011	1987	1816	2391	2054	1892	2471	2139	2172

表 4 极差分析

Table 4 Range analysis

Factor	Temperature value / °C			Range
	Level 1	Level 2	Level 3	
A: Power P / kW	1938	2112	2261	323
B: Speed V / (mm/min)	2291	2060	1960	331
C: Defocusing amount S / mm	2183	2114	2014	169

从表 4 可以看出, 本组正交试验因素对光斑中心点最高温度值影响程度从大到小的顺序是: 扫描速度 V , 激光功率 P , 离焦量 S 。由表 4 可知, 随着激光功率的增大, 光斑中心点最高温度值一直处于增大状态, 而激光扫描速度与离焦量与光斑中心点最高温度值的变化趋势正好相反, 这也完全符合三个工艺参数与激光比能的大小关系。

考虑到试验过程中, 试样存在结合较差的现象, 所以在对熔池尺寸进行分析时, 将熔覆材料本身的高度考虑在内(待熔覆层厚度为 0.3 mm)。利用温度场仿真数值得到 9 组正交工艺参数下的熔池尺寸, 如表 5 所示。

表5 熔池尺寸

Table 5 Sizes of molten pool

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pool depth/mm	0.45	0.33	0.28	0.53	0.37	0.32	0.58	0.40	0.38
Pool width/mm	1.50	1.28	1.08	1.54	1.36	1.16	1.64	1.56	1.28

由于激光熔覆过程中激光扫描速度对试样温度影响最为显著,所以选择同一扫描速度下的激光熔覆试样,通过温度场模拟数据对宏观试样的熔覆质量进行分析。

通过表2可以发现,在扫描速度为250 mm/min时,三组试样的激光比能最为接近。观察试样2、5和8的宏观形貌可以看出,试样前端结合都较差;而后端都出现了不同程度的变形及烧蚀,且都随着光斑中心点最高温度的增加而增加。在激光束到达试样1/2处时,三个试样光斑中心点最高温度值依次为1987℃、2054℃和2139℃,三个试样激光熔覆过程中试样1/2处熔池深度值分别为0.33、0.37、0.40 mm,熔池深度较小,不足以使得基体与熔覆材料很好地结合,所以出现了试样前端结合相对较差的现象;而当激光束到达试样尾端时,三个试样中心点最高温度值依次2753℃、2850℃和2892℃,沿光斑中心各点温度值相对较大,从而引起了试样的变形和烧蚀。

在扫描速度为150 mm/min时,三组试样1、4与7的激光比能逐渐增加,通过表5可以发现,熔池的尺寸也呈现递增趋势。但考虑到激光比能越大,末端的热积累就会越大,从而引起试样末端发生的变形量就会越大,不利于形成高质量的熔覆层。

扫描速度为350 mm/min时,对于试样3、6与9,试样3的熔池深度为0.28 mm,基体上未形成熔池,熔覆材料与基体未能形成结合涂层,试样6与9基体上虽然有熔池出现,但熔池深度较小,不足以使得基体与熔覆材料很好地结合,所以出现了试样前端结合相对较差的现象。

3.3 熔覆涂层的形貌

图4为试样1的横截面形貌图,其中CL为熔覆层,BZ为结合区,HAZ为热影响区。从图中可以看出当激光功率为1.5 kW,扫描速度为150 mm/min,离焦量为50 mm时获得较好的熔覆层。此时熔覆层熔池明显,熔覆层与基体形成良好的冶金结合,无裂纹和气孔。

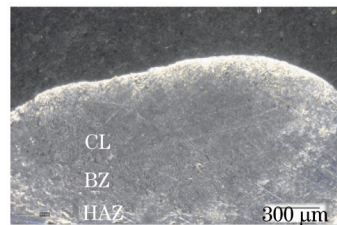


图4 试样横截面形貌

Fig.4 Morphology of cross section

3.4 熔覆层的显微组织

图5为激光功率为1.5 kW,扫描速度为150 mm/min,离焦量为50 mm时中Al/Ti熔覆层的显微组织,其中图5(a)为Al/Ti为熔覆层的低倍显微组织。从图5(a)中可以看出,熔池不同区域的组织各不相同,这是由于在激光扫描过程中熔池的温度梯度和凝固速率不一致,导致晶粒的生长方向发生改变。靠近熔池底部的温度梯度较大,结晶速度较小,此时晶粒在固液分界线处沿着温度梯度的垂直方向进行增长^[4];靠近基体的液相温度梯度较大,晶粒来不及长大就凝固,因此熔池底部的晶粒以柱状晶为主,如图5(c)所示。图5(b)为熔覆层的扫描电子显微镜(SEM)图,从图中可以看出,从熔池底部到熔池顶部时,温度梯度逐渐减小,晶粒结晶速度逐渐升高,熔覆层中以胞状树枝晶为主。此时由于成分的过冷度较大,晶粒深入液相中进行生长,并向周围横向排出溶质,横向过冷导致二次横枝的形成^[3]。

4 结 论

通过正交试验对激光熔覆过程中的工艺参数进行优化分析,获得当激光功率为1.5 kW,扫描速度为150 mm/min,离焦量为50 mm时熔覆涂层质量较优。利用以上激光参数激光熔覆Al/Ti混合粉体,分析得到

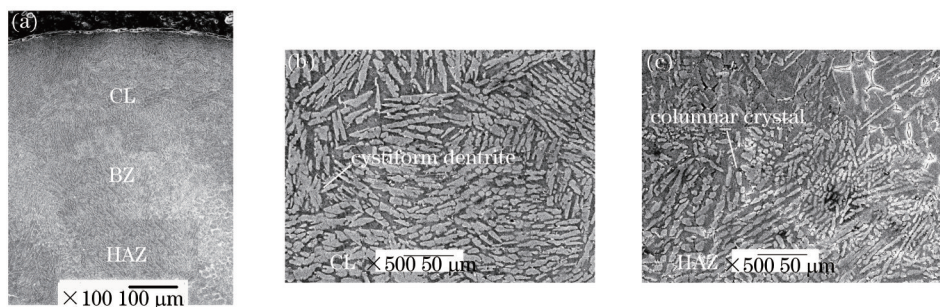


图5 Al/Ti熔覆层的显微组织。(a)熔覆层的低倍形貌;(b)熔覆层SEM图片;(c)界面结合处SEM图片(激光功率 $P=1.5$ kW,扫描速度 $V=150$ mm/min,离焦量 $S=50$ mm)

Fig.5 Microstructure of Al/Ti cladding layer. (a) Macro morphology of cladding layer; (b) SEM of cladding layer; (c) SEM of bond zone (laser power $P=1.5$ kW, scanning speed $V=150$ mm/min, defocusing amount $S=50$ mm)

熔覆层的金相组织可知熔覆层组织以胞状树枝晶为主,且分布均匀细密。

通过模拟计算7050铝合金上激光熔覆Al/Ti复合涂层,利用极差分析正交工艺下光斑中心最高温度数值得到:正交试验因素对中心点最高温度值影响程度从大到小的顺序是扫描速度 V ,激光功率 P ,离焦量 S 。分析9组试样的熔池尺寸及不同位置点温度随时间的变化趋势可以得到,试样前端结合强度较差是由于熔覆过程中基体熔池深度较小,不足以使得基体与熔覆材料很好地结合,而后端都出现了不同程度的变形和烧蚀,是由于末端温度急剧积累引起的。

参考文献

- Johansen H D, Brett C M A, Motheo A J. Corrosion protection of aluminium alloy by cerium conversion and conducting polymer duplex coatings[J]. Corrosion Science, 2012, 63: 342-350.
- Wu B, Li M Q, Ma D W. The flow behavior and constitutive equations in isothermal compression of 7050 aluminum alloy [J]. Mater Sci Eng A, 2012, 542: 79-87.
- Wang Xiaoyan, Chen Jing, Lin Xin, *et al.*. Microstructure of laser forming repair 7050 aluminum alloy with AlSi12 powder[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1585-1590.
王小艳, 陈静, 林鑫, 等. AlSi12粉激光成形修复7050铝合金组织[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1585-1590.
- S PalDey, S C Deevi, T L Alford. Cathodic arc deposited thin film coatings based on TiAl intermetallics[J]. Intermetallics, 2004, 12 (7-9): 985-991.
- Uenishi K, Kobayashi K F. Formation of surface layer based on Al3Ti on aluminum by laser cladding and its compatibility with ceramics[J]. Intermetallics, 1999, 7(5): 553-559.
- Guo B G, Zhou J S, Zhang S T, *et al.*. Phase composition and tribological properties of Ti-Al coatings produced on pure Ti by laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(24): 9301-9310.
- Garcia I, Fuente J dela, Damborenea J J de. (Ti,Al)/(Ti,Al)N coatings produced by laser surface alloying[J]. Materials Letters, 2002, 53 (1-2): 44-51.
- Hao Jianjun, Li Huiping, Ma Yuejin, *et al.*. Experimental investigation on repairing iron cast parts with grit-blasting pretreatment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 120-126.
郝建军, 李会平, 马跃进, 等. 喷砂预处理在铸铁零件修复中的应用研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 120-126.
- Emamian A, Corbin S F, Khajepour A. Effect of laser cladding process parameters on clad quality and in-situ formed microstructure of Fe-TiC composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(7): 2007-2015.
- Chen Gang, Li Xiangfeng, Zuo Dunwen, *et al.*. Simulation on substrate relative dilution ratio for GH4033[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(1): 011601.
陈刚, 黎向锋, 左敦稳, 等. GH4033基材相对稀释率的仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(1): 011601.
- Liu Hao, Yu Gang, He Xiuli, *et al.*. Three-dimensional numerical simulation of transient temperature field and coating geometry in power feeding laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1203007.
刘昊, 虞钢, 何秀丽, 等. 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的三维数值模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203007.
- Qi H, Mazumder J Ki H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser cladding process for direct

- metal deposition[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(2): 024903.
- 13 Jiang Shihao, Li Xiangfeng, Zuo Dunwen, *et al.*. Simulation on laser cladding temperature field of high-temperature alloy based on preset squash[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2011, 34(4): 23-27.
江世好, 黎向锋, 左敦稳, 等. 基于预置压片的高温合金激光熔覆温度场仿真[J]. *兵器材料科学与工程*, 2011, 34(4): 23-27.
- 14 Lu Qinglong, Wang Yanfang, Li Li, *et al.*. Effects of scanning speed on microstructures and properties of laser cladding Fe-based amorphous composite coatings[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0203007.
鲁青龙, 王彦芳, 栗荔. 扫描速度对激光熔覆铁基非晶复合涂层组织与性能的影响[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0203007.