

AZ91D 镁合金表面激光熔覆 Al-Cu 合金的 温度场模拟与验证

朱润东, 李志勇, 李晓锡, 孙琪

(中北大学 焊接研究中心, 太原 030051)

摘要: 目的 确定 AZ91D 镁合金表面激光熔覆 Al-Cu 合金的最佳工艺参数。方法 利用有限元软件 ANSYS 建立移动高斯热源作用下的温度场三维模型, 对不同参数下激光熔覆过程中的温度场进行动态模拟, 确定工艺参数。结果 熔池中心的温度随着激光功率的增大而增大, 随着热源移动速度和光斑直径的增大而减小。温度过高时, 熔覆层下塌且内部出现裂纹; 温度过低时, 熔覆层上有大量的金属颗粒且内部含有夹杂物。结论 当功率为 240 W、扫描速度为 2.5 mm/s、光斑直径为 0.6 mm 时, 熔池中心的温度约为 1100 °C, 熔覆层与基体接触面的温度约为 700 °C。在此参数下得到了表面成形光滑且与基体结合紧密的致密熔覆层。

关键词: 激光熔覆; 工艺参数; 温度场

中图分类号: TG174.445

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)06-0084-06

Simulation and Experimental Verification of Laser Cladding Temperature Field for Al-Cu Alloy on AZ91D Magnesium Alloy Surface

ZHU Run-dong, LI Zhi-yong, LI Xiao-xi, SUN Qi

(Welding Research Center, North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: **Objective** To get the optimal technological parameters for Al-Cu alloy cladded coatings on AZ91D magnesium alloy prepared by laser cladding. **Methods** The three-dimensional temperature field model of laser cladding under the moving GUASS heat source was established with ANSYS software. Then, the dynamic simulation of temperature field for laser cladding was conducted under different technological parameters. And the technological parameters were optimized by contrasting the melting point of Al-Cu alloy and the welding pool temperature. Finally, the experimental verification was performed. **Results** The results showed that the temperature at the center of welding pool increased with the rise of power (P) while decreased with the rise of the speed (v) of heat source and the diameter(d) of facula. When the temperature was excessively high, the cladding layer was collapsed and with internal cracks. However, when the temperature was too low, the cladding layer was covered with large amount of metal particles, and there were internal inclusions. **Conclusion** Under the conditions of $P=240$ W, $v=2.5$ mm/s and $d=0.6$ mm, the temperature at the center of welding pool was about 1100 °C, and the temperature at the contact surface of cladding and substrate

收稿日期: 2014-07-08; 修订日期: 2014-10-18

Received: 2014-07-08; Revised: 2014-10-18

基金项目: 山西省回国留学人员科研基金资助项目(2012-69); 山西省留学人员科技活动项目择优资助(2013)

Fund: Supported by the Researchers Overseas Returnee Research Funds in Shanxi Province(2012-69) and the Science & Technology Project for the Researchers Overseas in Shanxi Province(2013)

作者简介: 朱润东(1988—), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要研究方向为先进焊接方法及工艺。

Biography: ZHU Run-dong(1988—), Male, from Henan, Postgraduate student, Research focus: advanced welding methods & technology.

was 700 ℃. The smooth and compact cladding layer cohesively combined with substrate was obtained by experiment with those technological parameters.

KEY WORDS: laser cladding; technological parameters; temperature field

激光熔覆是利用高能密度激光束将具有不同成分和性能的合金熔覆在基体表面,形成一层具有特殊使用性能的合金层^[1-4]。在熔覆过程中,温度场的准确计算是分析熔覆层相组成,判定与基体结合程度以及分析和控制熔覆层缺陷的前提,也是内传质和传热的基础^[5]。郑丽娟等^[6]模拟了多道激光熔覆的温度场,认为熔覆过程是一种准稳态温度场,并在熔覆层中制备出抗磨损的增强颗粒。毕晓琴等^[7]运用ANSYS对40Cr合金钢表面等离子熔覆Ni-Cr合金的温度场进行了数值模拟,温度梯度高达 $5.9\times10^6\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。熔覆的工艺参数对熔覆层微观形貌有着直接的影响^[8],可以通过数值模拟确定^[9]。本文运用ANSYS软件模拟了不同工艺参数下AZ91D镁合金表面激光熔覆Al-Cu合金的温度场,并通过实验对模拟的准确性进行验证。

1 模型

1.1 数学模型

激光熔覆过程可简化为一个非线性的瞬态传热过程,其三维温度场的控制方程^[10]如下:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \tag{1}$$

式中: Q 为求解区域中的热源强度, T 为温度场分布函数, λ, ρ, c 分别为材料导热系数、密度、比热容。

熔覆过程的边界条件^[11]如下。

1) 表面热流密度分布:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} n_z = q_s(x, y, z, t) \tag{2}$$

2) 物体表面与周围介质间的热交换:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} n_z = \beta(T_a - T_s) \tag{3}$$

式中: q_s 为单位面积上的外部输入热源, β 为换热系数, T_a 为周围介质温度, n_x, n_y, n_z 分别为外法线的 x, y, z 方向的余弦, T_s 为单位面积上介质的温度。

本文中选用高斯函数分布的热源,激光斑点中心内任意一点的热流密度^[12]可表示为:

$$q(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \tag{4}$$

$$q_m = \frac{3}{\rho R^2} Q \tag{5}$$

式中: q_m 为加热斑点中心最大的热流密度, R 为激光光斑半径, r 为离电弧加热斑点中心的距离。

1.2 物理模型

由于熔覆试样的对称性,可建立1/2模型,基体尺寸为50 mm×50 mm×10 mm,熔覆层尺寸为50 mm×50 mm×1 mm,如图1所示。实验时熔覆层温度高,选择较密的网格划分,网格尺寸为0.5 mm,基体则选用稀疏的自由网格。考虑到上表面需要施加热流密度,同时还存在与周围环境的换热,上表面需要创建一层表面效应单元,单元类型选择SURF152。为方便研究,在上表面沿着热源移动的方向选取A,B,C,D四点,距起始点距离分别为2,9,16,25 mm,在C,D之间的上表面和对称面上依次等距离的选点a,b,c,d,e和a,f,g,h,i。

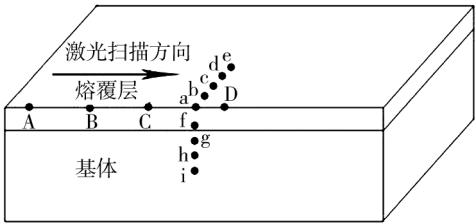


图1 有限元模型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the finite element model

1.3 模型假设

分析的过程中做如下假设^[13]:1) 熔覆材料与基体材料为各向同性;2) 忽略熔池流体的流动作用、材料的气化作用和小孔效应以及变形热;3) 激光的热流密度服从高斯分布;4) 忽略热辐射现象。

1.4 材料的热物性参数

计算时需要知道熔覆材料、基体的导热系数和比热容等热物性参数随时间的变化值,见表1和表2。

对于多组元粉末材料体系,其导热系数 λ 、比热容 c 和密度 ρ 等热物性参数均与粉末所占的比例有关,相关参数可通过方程^[14]估算得到。

$$l = g_1 l_1 + g_2 l_2, \quad c = f_1 c_1 + f_2 c_2, \quad r = g_1 r_1 + g_2 r_2 \tag{6}$$

式中: g_1 和 g_2 分别为两种粉末的体积分数, f_1 和 f_2 分别为两种粉末的质量分数。其中质量分数与体积分数的满足下列关系式^[14]。

$$f_1 = \frac{g_1 r_1}{r} \quad f_2 = \frac{g_2 r_2}{r} \quad f_1 + f_2 = 1 \quad g_1 + g_2 = 1 \quad (7)$$

表 1 AZ91D 镁合金的热物性参数

Tab.1 Thermophysical parameters of AZ91D magnesium alloy

| 温度/℃ | λ / (W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹) | c / (J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹) | ρ / (kg·m ³) |
|------|--|---|----------------------------------|
| 25 | 72.00 | 1029 | 1810 |
| 100 | 73.27 | 1130 | 1810 |
| 200 | 79.55 | 1200 | 1810 |
| 300 | 84.30 | 1290 | 1810 |
| 400 | 86.57 | 1375 | 1810 |

表 2 Al-Cu 合金的热物性参数

Tab.2 Thermophysical parameters of Al-Cu alloy

| 温度/℃ | λ / (W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹) | c / (J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹) | ρ / (kg·m ³) |
|------|--|---|----------------------------------|
| 25 | 280.5 | 590.25 | 5825 |
| 100 | 284.7 | 613.2 | 5825 |
| 200 | 288.9 | 657.1 | 5825 |
| 300 | 289.9 | 700.1 | 5825 |
| 400 | 293.1 | 723.9 | 5825 |

1.5 工艺参数设置

采用控制变量的方法,分别改变激光功率 P ,扫

描速度 v 和光斑直径 d ,具体见表 3。

表 3 模拟过程中参数表

Tab.3 List of parameters in the simulation process

| 方案 | P/W | $v/(mm \cdot s^{-1})$ | d/mm |
|------|-------|-----------------------|--------|
| 方案 1 | 200 | 2.5 | 0.6 |
| 方案 2 | 240 | 2.5 | 0.6 |
| 方案 3 | 260 | 2.5 | 0.6 |
| 方案 4 | 240 | 2.0 | 0.6 |
| 方案 5 | 240 | 3.5 | 0.6 |
| 方案 6 | 240 | 2.5 | 0.4 |
| 方案 7 | 240 | 2.5 | 0.8 |

2 模拟与分析

2.1 温度分析

沿热源移动方向上的 A,B,C,D 四点温度随时间变化曲线如图 2 所示,各点的温度都是由低到高,在达到最高点后又迅速降低,最后都趋近于相同的温度。

从图 2a—2c 可以看出,光斑直径为 0.6 mm,扫描速度在 2.5 mm/s 时,功率越大,A,B,C,D 四点的最高温度越高。图 2a 中 A,B,C,D 四点的最高温度均小于 1000℃,小于 Al-Cu 合金中 Cu 的熔点 1084℃,在熔覆过程中可能会导致熔覆层熔化不彻底,冷却后形成的熔覆层易脱落,达不到熔覆效果;图 2b 和图 2c 中各点最高温度都能达到 Al 和 Cu 的熔点温度;图 2c 中平均温度高达 1400℃,明显高于合金中 Cu 的熔点,

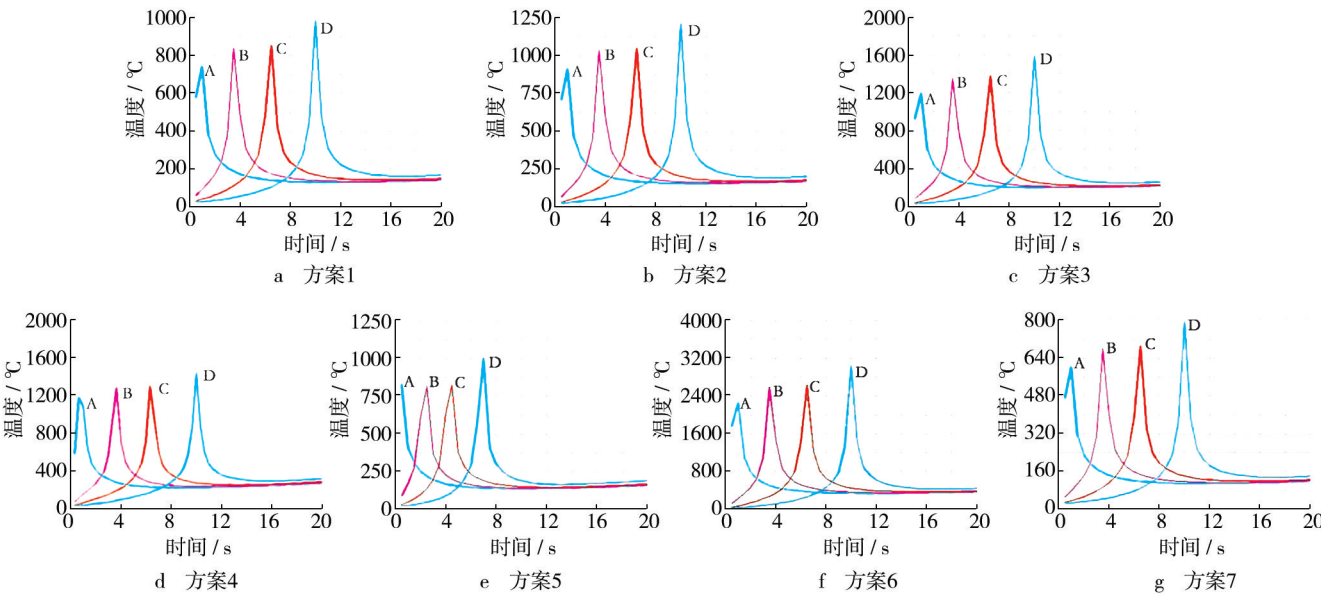


图 2 不同参数下 A,B,C,D 四点温度变化曲线

Fig.2 Changing curves of different parameters at points A, B, C, D

熔覆时高温通过热传导传递至基体时,会导致基体熔化较深,稀释程度大,形成的熔覆层中基体材料所占比例增加,降低熔覆层的使用性能。

图 2b、图 2d、图 2e 为扫描速度对熔池温度的影响。图 2d 中扫描速度为 2 mm/s 时 A、B、C、D 四点平均瞬时温度在 1300 ℃ 以上,明显大于图 2b 和图 2e 中速度为 2.5、3.5 mm/s 时各点温度,也高于 Al-Cu 合金中 Cu 的熔点温度。图 2e 中出现了两边温度都高于中间点温度的现象,这与李绍杰等^[15]进行高温合金激光熔覆得到的结果一致,主要是扫描速度快,起点和终点熔池的热量只能单向传导,来不及向熔池外散发,致使温度过高。

图 2b、图 2f、图 2g 为光斑直径对熔池温度的影响。对比发现,图 2f 中在 $d=0.4\text{ mm}$ 时,各点平均瞬时温度在 2500 ℃ 以上;图 2g 中,在 $d=0.8\text{ mm}$ 时,最高温度低于 800 ℃,两者都会对熔覆层的效果产生不利的影响。综上所述选择 $P=240\text{ W}$, $v=2.5\text{ mm/s}$, $d=0.6\text{ mm}$ 作为激光熔覆实验的最优工艺参数。

2.2 时间对模拟温度场的影响

图 3 为最优工艺下 2.5、5.5、7.5、9.0 s 时熔覆层的温度场分布云图,在图中激光辐射区域内高斯热源中心温度最高,随着热源前移,熔池也同时移动且温度场分布发生明显变化,热源移出的区域温度迅速降低,表现出激光熔覆快速加热和冷却的特点。另外,受加热历程的影响,熔池形状呈现椭圆状。沿热源扫描的方向在某一时刻以光斑中心位置为分界点观察,可以发现在光斑中心以前等温线较密,温度梯度较大;光斑中心以后的部分等温线较疏,温度梯度较小。

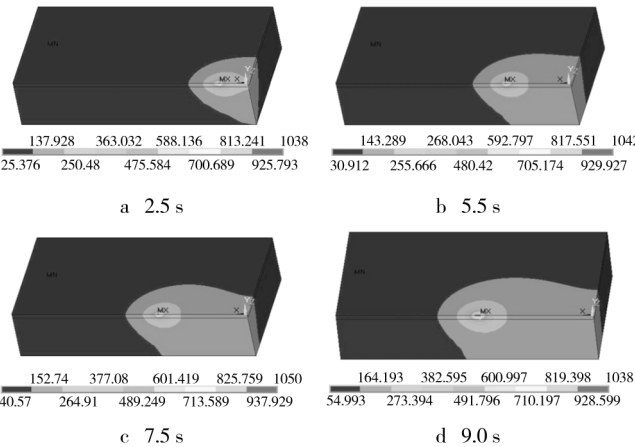


图 3 最优工艺下不同时刻的温度场云图

Fig. 3 Nephogram of temperature field at different time under the optimal technology

3 结果与分析

3.1 激光熔覆实验

实验所用基材为 AZ91D 镁合金,样品尺寸为 15 mm×15 mm×5 mm,经砂纸打磨后用酒精洗净,按模拟条件将 Al-Cu 合金按质量比 1 : 1 调配,球磨混合后放入酒精中,经过充分搅拌平铺在处理过的 AZ91D 镁合金表面,厚度为 1 mm,待合金粉末结紧后将试样置于 LWY400P 型激光器的工作台上,在氩气的保护下进行实验。

图 4 为不同工艺参数时所获得的熔覆层表面形貌,以及在距热源起始点 23 mm 处上表面和对称面上不同点的温度变化曲线。图 4a 中熔覆层上聚集着许多未熔化的金属颗粒,温度曲线显示该参数下的最高温度约为 900 ℃ (高于 Al 粉的熔点 660 ℃,低于铜的熔点 1084 ℃),粉末不能完全熔化,熔液与基材的湿润性降低,表面张力过高,致使熔液凝聚产生球状金属颗粒。对称面上距离表面 a 点 1 mm 处的 f 点温度约在 640 ℃,略小于基体 AZ91D 镁合金的熔点温度 650 ℃,这也会影响熔覆层与基体的结合^[16]。

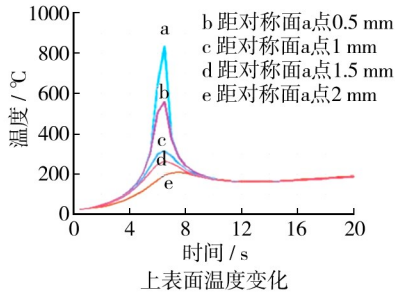
图 4b 中熔覆表面较平整且未出现表面下塌,温度变化曲线显示,熔覆层表面温度可达到 1100 ℃ (高于铜的熔点),对称面上距离上表面 a 点 1 mm 处的 f 点温度达到 700 ℃ (略高于基体的熔点),在上表面上距离 a 点 0.5 mm 处的 b 点温度约 625 ℃,说明熔池半径应在 0.5 mm 以内。图 4c 中熔覆层出现很深的沟源行走轨迹,表现出明显的下塌,温度变化曲线显示,表面最高温度在 2000 ℃ 以上,对称面上距离 a 点 3 mm 处的 h 点温度都达 750 ℃,高于基体的熔点,基体稀释率高同时高温下熔池中存在着蒸发,这都是造成表面下塌的主要原因^[17]。

3.2 试样横截面金相实验

沿垂直于激光扫描方向切割图 4 中的熔覆试样,横截面经由粗到细的晶相砂纸打磨后在抛光机上抛光,再经 3% (体积分数) 的硝酸酒精腐蚀后,置于 LE-ICADM-2500M 型显微镜下观察,结果如图 5 所示。从图 5a 中可以看出熔覆层较薄,内部含有粗大的黑色固体物质,熔覆层与基体的结合处未出现波浪状结合,在接触载荷的作用下易造成熔覆层的脱落,不利于提高基体的使用性能。从图 5b 中可以看出,熔覆

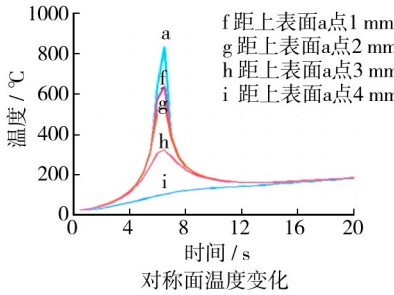


熔覆层表面形貌

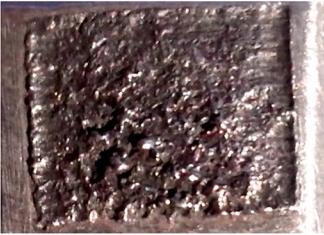


上表面温度变化

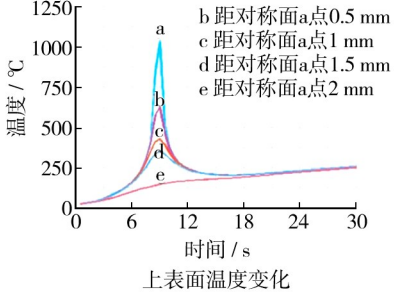
a 方案5



对称面温度变化

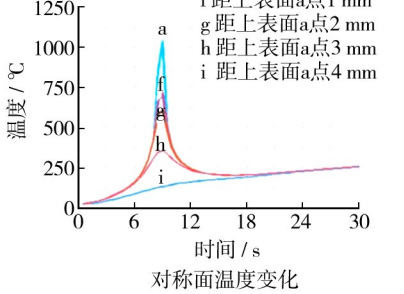


熔覆层表面形貌



上表面温度变化

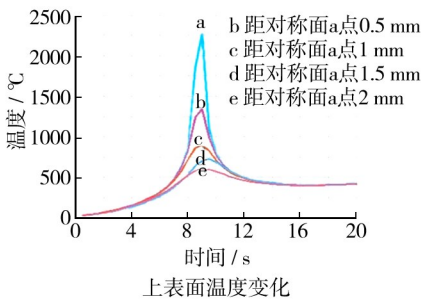
b 方案2



对称面温度变化

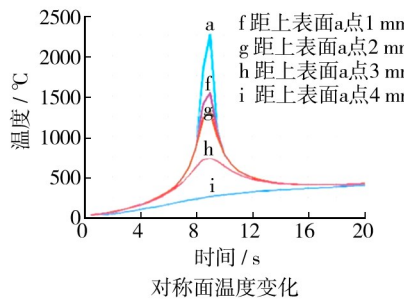


熔覆层表面形貌



上表面温度变化

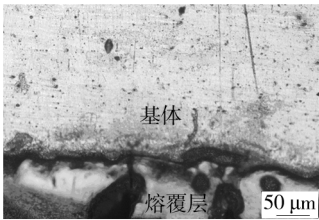
c 方案6



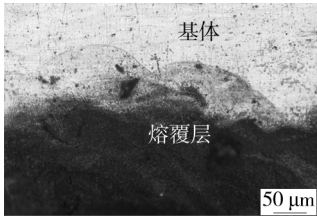
对称面温度变化

图 4 熔覆层形貌及两表面温度变化曲线

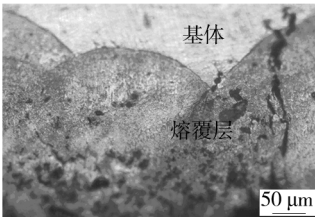
Fig. 4 Morphology of the cladded coating and the surface temperature curves



a 方案5



b 方案3



c 方案6

图 5 试样熔覆层横截面显微图像

Fig. 5 Microscopic images of cross section of the cladded coating

层致密且较厚,与基体呈现波浪状冶金结合,快速冷却条件下熔覆层的晶粒得到细化,增强了抑制位错运动的能力,同时涂层中生成的硬质相颗粒起到了沉淀强化的作用,表层显微硬度增加,致密度的增加也能够阻止腐蚀液向基体渗透,提高基体的耐腐蚀性^[18]。从图 5c 中可以看出,熔覆层存在着许多小的孔洞,降低了熔覆层的致密性,冷却过程中内应力的增加使得熔覆层中出现裂纹并延伸到基体内部,对基体性能的提高是不利的。实验证明,在模拟最优工艺条件下熔覆效果最好。

4 结论

1) 沿热源方向上熔覆层各点的温度时间曲线及熔池温度场云图表明,激光熔覆是一个快速加热、快

速冷却的过程,光斑中心前方的温度梯度大于光斑中心后方的温度梯度。

2) 通过不同工艺参数下模拟得到的温度场温度与合金熔点的对比,优化得到一组适合 AZ91D 镁合金表面激光熔覆 Al-Cu 合金的工艺参数为: $P=240\text{ W}$, $v=2.5\text{ mm/s}$, $d=0.6\text{ mm}$ 。在该参数下进行的熔覆实验,得到良好的熔覆层,熔覆表面无明显下塌和未熔化完全的金属小球。

3) 金相实验表明在最优工艺条件下所得熔覆层致密,且无裂纹,与基体结合紧密,锯齿状的结合形状与模拟的温度场形状一致,验证了模拟的可靠性。

参考文献

- [1] 肖红军,彭云,马成勇,等. 激光表面改性[J]. 表面技术, 2005,34(5):10—11.
XIAO Hong-jun, PENG Yun, MA Cheng-yong, et al. Surface Modification of Laser [J]. Surface Technology, 2005, 34(5):10—11.
- [2] 王彬,苏艳. 铝合金大气腐蚀行为及其防腐措施研究进展[J]. 装备环境工程, 2012,9(2):64—67.
WANG Bin, SU Yan. Research Progress in Atmospheric Corrosion Behavior and Anticorrosion Measures of Aluminum Alloy [J]. Equipmental Environmental Engineering, 2012,9(2):64—67.
- [3] 曹亚男,张艳梅,揭晓华,等. 镁合金表面激光熔覆的研究现状[J]. 材料导报, 2011(5):109—101.
CAO Ya-nan, ZHANG Yan-mei, JIE Xiao-hua, et al. The Research Status of Laser Cladding on Magnesium Alloy[J]. Materials Review, 2011(5):109—101.
- [4] 梁义,魏世丞,刘毅. Zn-Al 和 Al-RE 热喷涂涂层的耐腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2010,7(6):171—174.
LIANG Yi, WEI Shi-cheng, Liu Yi. Study of Corrosion Resistance of Zn-Al and Al-RE Thermal Spraying Coatings [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010,7(6):171—174.
- [5] 张松,张春华,张宁,等. 6061 铝合金表面激光熔覆温度场的模拟与验证[J]. 焊接学报, 2007,28(10):1—3.
ZHANG Song, ZHANG Chun-hua, ZHANG Ning, et al. Simulaton and Experimental Investigations of Laser Cladding Temperature Field on 6061 Alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007,28(10):1—3.
- [6] 郑丽娟,李燕,何大川,等. 激光多道熔覆温度场及熔覆层组织分析[J]. 红外与激光工程, 2013,42(1):52—56.
ZHENG Li-juan, LI Yan, HE Da-chuan, et al. Analysis on Temperature Field of Multi-path Laser Cladding and Micro-
- structure of Coatings Layer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(1):52—56.
- [7] 毕晓琴,杨仲磊. 40Cr 合金表面等离子熔覆温度场的数值模拟[J]. 中国表面工程, 2009,22(3):42—47.
BI Xiao-Qin, YANG Zhong-lei. Simulation of Temperature Field in the Cladding Coated on 40Cr Alloy by the Plasma Tranferred Arc [J]. China Surface Engineering, 2009, 22(3):42—47.
- [8] 姜伟,胡芳友,黄旭仁. 工艺参数对激光熔覆层微观形貌的影响[J]. 表面技术, 2007,36(4):57—59.
JIANG Wei, HU Fang-you, HUANG Xu-ren. The Influence of Craft Parameter on the Microstructure by CO₂ Laser Cladding [J]. Surface Technology, 2007,36(4):57—59.
- [9] 徐建林,于涛,杨波,等. 工艺参数对铝青铜表面激光熔覆镍基合金温度场的影响[J]. 机械工程材料, 2011,35(1):93—94.
XU Jian-lin, YU Tao, YANG Bo, et al. Effect of Process Parameters on Temperature Field of Laser Cladding Ni-base Alloy on Aluminum Bronze [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011,35(1):93—94.
- [10] 陈丙森. 计算机辅助焊接技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
CHEN Bing-sen. Computer Aided Welding [M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [11] 范雪燕,石娟,吴钢,等. 激光表面淬火瞬态温度场在 ANSYS 中的模拟[J]. 上海金属, 2005,27(3):31—35.
FAN Xue-yan, SHI Juan, WU Gang, et al. Simulation of the Temperature Field by ANSYS during Laser Surface Quenching [J]. Shanghai Metal, 2005,27(3):31—35.
- [12] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
FANG Hong-yuan. The Structure Theory of Welding [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [13] 马琳,原津萍,张平,等. 多道激光熔覆温度场的有限元数值模拟[J]. 焊接学报, 2007,28(7):109—111.
MA Lin, YUAN Jin-ping, ZHANG Ping, et al. Temperature Field Simulation of Multi-path Laser Cladding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007,28(7):109—111.
- [14] PHATAK K M. Modeling of Laser Cladding with Power Injection [J]. Metallurgical and Materials Transaction, 2004, 35(B):1139—1150.
- [15] 李绍杰,范兴娟,姚晓亮,等. 高温合金激光熔覆过程温度场的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2009,36(19):76—79.
LI Shao-jie, FAN Xing-juan, YAO Xiao-liang, et al. Numerical Simulation of Temperature Field during Superalloy Laser Cladding [J]. Hot Working Technology, 2009, 36(19):76—79.

- [37] 谢华,陈东,黄健萌. 双涂层界面接触应力分析[J]. 表面技术,2014,43(2):1—5.
XIE Hua, CHEN Dong, HUANG Jian-meng. Analysis of the Contact Stress at Interface of Double Coatings[J]. Surface Technol, 2014, 43(2):1—5.
- [38] DAI Q W, HUANG W, WANG X L. Surface Roughness and Orientation Effects on the Thermo-capillary Migration of a Droplet of Paraffin Oil[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 57:200—206.
- [39] GERDES S, CAZABAT A-M, STROM G, et al. Effect of Surface Structure on the Spreading of a Pdms Droplet[J]. Langmuir, 1998, 14:7052—7057.
- [40] GERDES S, CAZABAT A M, STROM G. The Spreading of Silicone Oil Droplets on a Surface with Parallel Shaped Grooves[J]. Langmuir, 1997, 13(26):7258—7264.
- [41] KALDONSKI T, WOJDYNA P P. Liquid Lubricants for Space Engineering and Methods for Their Testing[J]. Journal of Kones, 2011, 18(1):163—184.
- [42] TAKAHASHI O, KUME M. A Study on Non-oil Diffusive Greases[J]. Nlgi Spokesman, 1993, 57(3):25—30.
- [43] SANDERS J H, CUTLER J N, MILLER J A, et al. In Vacuo Tribological Investigations of Metal Ceramic and Hybrid Interfaces for High-speed Spacecraft Bearing Applications[J]. Tribology International, 1999, 32(11):649—659.
- [44] FUSARO R L, KHONSARI M M. Liquid Lubrication for Space Applications[J]. Tribological Materials and NDE, 1992, 4:59—92.
- [45] 李继红, 乔正阳, 乔奇光. 表面处理技术在机械加工中的应用[J]. 表面技术, 2013, 42(3):97—98.
LI Ji-hong, QIAO Zheng-yang, QIAO Qi-guang. Application of Surface Treatment Technology in the Mechanical Processing[J]. Surface Technology, 2013, 42(3):97—98.
- [46] 张培耘, 华希俊, 符永宏. 激光表面微织构工艺试验及应用研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5):55—58.
ZHANG Pei-yun, HUA Xi-jun, FU Yong-hong. Experimental Investigations on Laser Surface Micro-texturing Technology and Application[J]. Surface Technology, 2013, 42(5):55—58.
- [47] WANG X L, KATO K, ADACHI K, et al. Loads Carrying Capacity Map for the Surface Texture Design of Sic Thrust Bearing Sliding in Water[J]. Tribology International, 2003, 36(3):189—197.
- [48] YU H W, HUANG W, WANG X L. Dimple Patterns Design for Different Circumstances[J]. Lubrication Science, 2013, 25(2):67—78.
- [49] HUANG W, WANG X L. Biomimetic Design of Elastomer Surface Pattern for Friction Control under Wet Conditions[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2013, 8(4):46001—46006.
- [50] 华希俊, 刘凯, 周万. 45#钢表面激光织构淬火减摩抗磨复合处理技术研究[J]. 表面技术, 2014, 43(4):86—91.
HUA Xi-jun, LIU Kai, ZHOU Wan. Research of Antifriction and Wear Resistance Composite Technology by Laser-texturing and Quenching on 45# Steel Surface[J]. Surface Technology, 2014, 43(4):86—91.
- [51] 徐中, 王健, 李颖. 仿生涂层磨损及其与表面形貌的关联性研究[J]. 表面技术, 2013, 42(4):9—11.
XU Zhong, WANG Jian, LI Ying. Research of Abrasion of Bionic Coatings and Its Relevance with Surface Morphology[J]. Surface Technology, 2013, 42(4):9—11.
- [52] BRUZZONE A G, COSTA H L, LONARDO P M, et al. Advances in Engineered Surfaces for Functional Performance[J]. Annals Manufacturing Technology, 2008, 57(2):750—769.

~~~~~  
(上接第 89 页)

- [16] 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.
- [17] 曹艳, 李涌泉, 褚芳芳. 45 钢表面 Ni20 合金激光熔覆层的组织及抗高温氧化性能[J]. 表面技术, 2012, 41(3):54—56.  
CAO Yan, LI Yong-quan, CHU Fang-fang. Microstructure and High Temperature Oxidation Resistance of Laser Cladding Ni20 Alloy on 45 Steel[J]. Surface Technology, 2012, 41(3):54—56.
- [18] 高亚丽, 杨森, 张海波, 等. 激光功率对 Al-Cu 合金熔覆层组织和性能的影响[J]. 应用激光, 2011, 31(2):107—111.  
GAO Ya-li, YANG Sen, ZHANG Hai-bo, et al. Influence of the Laser Powers on Microstructure and Property of the Al-Cu Alloy Coating[J]. Applied Laser, 2011, 31(2):107—111.