

双激光束熔覆过程平顶辅助光束对陶瓷涂层温度场的影响

吴东江¹ 褚 洋¹ 牛方勇¹ 马广义¹ 庄 娟²

(¹ 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

² 大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要 在金属表面激光熔覆陶瓷材料过程中, 过大的温度梯度产生的热应力易使熔覆层开裂。降低激光熔覆陶瓷材料过程中的温度梯度, 一定程度上能够降低热应力, 抑制裂纹缺陷产生。通过模拟计算 Ti6Al4V 基板上双激光束熔覆 Al₂O₃ 涂层过程温度场的分布规律, 提出采用能量均匀的平顶辅助激光束为熔覆过程提供预热缓冷的方法, 通过改变平顶辅助光束光斑大小及功率密度, 研究平顶辅助光束预热缓冷对熔覆层温度分布及温度梯度大小的影响。计算结果表明, 平顶辅助激光束使熔覆过程出现明显的预热缓冷特征, 能够有效降低熔覆层温度梯度。熔覆过程中 Al₂O₃ 陶瓷塑性点(1533 K)温度梯度随预热缓冷温度的升高而降低, 但在预热缓冷温度升至塑性点附近温度时会引起塑性点温度梯度回升。实际加工中预热缓冷温度越高对加工过程越有利, 但应避免塑性点附近温度。

关键词 光学制造; 激光熔覆; 双激光束; 预热缓冷; 数值模拟

中图分类号 TG156.99

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201441.0703012

Influence of Temperature Distribution of Ceramic Coating Using Top-Hat Assistant Laser Beam in Dual-Beam Laser Cladding

Wu Dongjiang¹ Chu Yang¹ Niu Fangyong¹ Ma Guangyi¹ Zhuang Juan²

(¹ Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China
² School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract Thermal stress caused by oversized temperature gradient in the process of laser cladding ceramic coating on metal substrate usually makes the coating cracked. Reducing the temperature gradient of the laser cladding process can reduce the thermal stress to a certain degree to suppress the generation of cracks. Through numerical simulation of temperature distribution during laser cladding Al₂O₃ coating on Ti6Al4V substrate, a method of providing preheating and slow-cooling using top hat laser beam is proposed. Temperature distribution and temperature gradient of the coating with preheating and slow-cooling are discussed by changing the spot size and power density of the top hat assistant laser beam. The results show that there is a significant feature of preheating and slow-cooling during the cladding process, the top hat assistant laser beam can reduce the temperature gradient effectively. The temperature gradient of the plastic point (1533 K) of Al₂O₃ reduces while the preheating and slow-cooling temperature raises. But the temperature gradient of the plastic point will rebound when the preheating and slow-cooling temperature is near the plastic point. Higher preheating and slow-cooling temperature make the cladding process better, but temperature around the plastic point should be avoided.

Key words optical fabrication; laser cladding; dual laser beam; preheating and slow-cooling; numerical simulation

OCIS codes 000.4430; 140.3390; 350.3390

收稿日期: 2014-01-20; 收到修改稿日期: 2014-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(51175061)、辽宁省自然科学基金(201202037)

作者简介: 吴东江(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光精密制造以及先进制造技术等方面的研究。

E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

1 引 言

陶瓷材料具有耐高温、耐磨及耐腐蚀等优越性能,在金属零件表面制备陶瓷涂层,能够大幅度提高金属零件的性能。激光熔覆陶瓷涂层相比于其他方法能够形成全致密的冶金结合涂层,近年来备受关注^[1-4]。但激光熔覆陶瓷材料过程中熔覆区温度梯度很大,导致较大的热应力易使熔覆层开裂。预热缓冷能够有效抑制裂纹产生^[5-6],国内外学者利用数值模拟方法对此进行了较多研究。龙日升等^[7]利用 ANSYS 有限元模拟基板未预热和预热 400 °C 对沉积成形 Ni60A 过程中热应力的影响,证明预热能够有效降低成形过程的热应力;Jendrzejewski 等^[8]通过数值模拟的方法计算了在 X10Cr13 钢表面上熔覆 SF6 涂层,分析了基体预热 500 °C 和无预热情况下的温度场和应力场,结果表明预热能够有效降低涂层冷却过程中的应力;Alimardani 等^[9]建立制备 AISI 304L 薄壁件的三维有限元模型,通过分析模拟结果证明预热可以减小成形过程的热应力。但目前国内外学者所采用的传统预热缓冷方法难以将预热缓冷贯穿整个熔覆过程,并且结构复杂,应用难度较大。而双激光束熔覆技术,即在传统熔覆过程基础上,施加一束与主要加工光斑同心、面积较大且能量分布均匀的平顶辅助激光束对熔覆过程进行预热缓冷,能够实现较高的预热温度,且便于控制。因此分析平顶辅助光束对温度梯度的影响是揭示双激光束熔覆过程预热缓冷作用机制的关键。

本文通过有限元模拟方法,利用 ANSYS 软件建立激光熔覆 Al₂O₃ 陶瓷单道涂层的温度场有限元模型,分别模拟计算无预热缓冷及双激光束作用情况下的温度分布特征,通过改变平顶辅助光束光斑大小及功率密度,研究平顶辅助光束预热缓冷对熔覆层温度分布及温度梯度大小的影响,为双激光束熔覆 Al₂O₃ 陶瓷提供理论依据。

2 双激光束熔覆 Al₂O₃ 陶瓷涂层有限元模型

根据激光熔覆实际物理过程,为简化计算,作如下基本假设:1) 材料各向同性;2) 忽略熔池流动对温度场的影响;3) 激光束的能量均为均匀分布。根据实验所得单道涂层尺寸建立模型。实验采用 JK 1002 型 Nd:YAG 固体激光器,加工光束为多模连续激光,在高纯 Ar 环境中进行单道熔覆实验。工艺参数为:激光功率 250 W,扫描速度 300 mm/min,光斑直径 1 mm。以文献[10]中经过准确性验证的模型为基础模型,在基础模型上增加辅助热源得到双激光束熔覆 Al₂O₃ 陶瓷涂层有限元模型。由于相比基础模型,双激光束熔覆 Al₂O₃ 陶瓷涂层有限元模型仅增加了功率密度较加工热源降低得多的辅助热源,故认为双激光束熔覆 Al₂O₃ 陶瓷涂层有限元模型也具有较高准确性。

考虑到实际的单道熔覆过程沿激光扫描中心线对称,因此利用 ANSYS 软件沿激光扫描中心线对称的一半进行建模,模型采用 8 节点 SOLID 70 单元类型。基板为 Ti6Al4V 板,尺寸为 23 mm×10 mm×4 mm。单道熔覆层为弧形 Al₂O₃ 涂层,长 15 mm,宽 0.5 mm,弧顶高度 0.35 mm。平顶辅助光束光斑为能量分布均匀的正方形光斑,双激光束的扫描速度均为 300 mm/min。以此模型计算在双激光束熔覆过程中,使用不同功率密度及不同光斑大小的辅助光束时熔覆层温度场分布规律。由于平顶辅助光束的光斑和功率过小均不利于预热缓冷,故以 8 mm×8 mm 为基础光斑大小,计算功率分别为 500、600、700、800 W 情况下的功率密度(7.8×10⁶、9.4×10⁶、1.1×10⁷、1.3×10⁷ W/m²),以上述 4 种功率密度为基础,增大平顶辅助光斑大小计算温度场分布。计算过程中为使熔池最高温度保持稳定,适当调整了加工光束功率。具体计算参数如表 1 所示。

表 1 平顶辅助光束预热缓冷温度场计算参数

Table 1 Calculation parameters of temperature field with top hat assistant beam preheating and slow-cooling

Parameter	Value			
Power density of assistant beam /(W/m ²)	7.8×10 ⁶	9.4×10 ⁶	1.1×10 ⁷	1.3×10 ⁷
	8×8	8×8	8×8	8×8
Spot size of assistant beam /mm ²	10×10	10×10	10×10	10×10
	12×12	12×12	12×12	12×12
	14×14	14×14	14×14	14×14
Power of beam for cladding /W	240	230	230	220

3 温度场模拟结果及讨论

3.1 特征截面及节点的选择

为了深入分析熔覆过程中熔覆层的温度场信息,选取单道涂层中间位置垂直于激光束扫描方向的横截面作为特征平面(如图 1 所示),该截面在不同预热缓冷条件下均完整经历了预热、加工、缓冷过程,能够完整体现熔覆过程温度场变化。截面内共有 14 个节点, Y 轴下方为 Ti6Al4V 基体, Y 轴上方为 Al₂O₃ 涂层。其中 355、730、656、580 4 个节点为 Ti6Al4V 材料属性,其余节点为 Al₂O₃ 陶瓷材料属性。

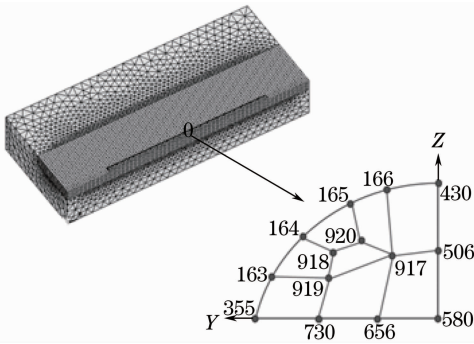


图 1 网格模型及特征平面

Fig.1 Meshing model and feature plane

1533 K 为 Al₂O₃ 陶瓷在冷却过程中的脆性-塑性转变点,即塑性点。Al₂O₃ 在温度高于 1533 K 时,能够发生一定塑性变形,不易产生裂纹;温度低于 1533 K 时,转变为脆性材料,较大应力会使熔覆层产生裂纹^[11],因此降低 Al₂O₃ 陶瓷塑性点温度梯

度对抑制熔覆层开裂意义重大。图 2 为冷却阶段截面内各节点温度梯度随温度变化曲线。

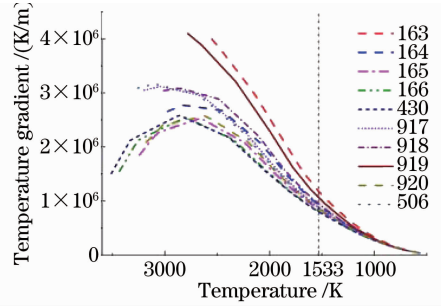


图 2 各节点温度梯度随温度变化

Fig.2 Temperature gradient varies with temperature of each node

由图 2 可见, Al₂O₃ 涂层冷却至塑性点时,涂层中 163 和 919 节点温度梯度较大,说明涂层边缘靠近基板的位置在冷却过程中温度梯度较大,更容易产生裂纹。因此以 163 和 919 节点作为特征节点进行讨论。

3.2 平顶辅助激光束预热缓冷对熔覆过程温度的影响

图 3 为无预热缓冷和平顶辅助激光束预热缓冷(光斑大小 8 mm × 8 mm, 功率密度 1.3 × 10⁷ W/m²) 两种情况下,熔覆到涂层一半长度 7.5 mm 时(1.44 s),模型的温度场分布特征,图 3 (b)中虚线框为平顶辅助光束的作用范围。由图 3 可明显看出,平顶辅助激光束作用后,高温区域面积增大,熔覆过程出现了明显的预热缓冷特征。

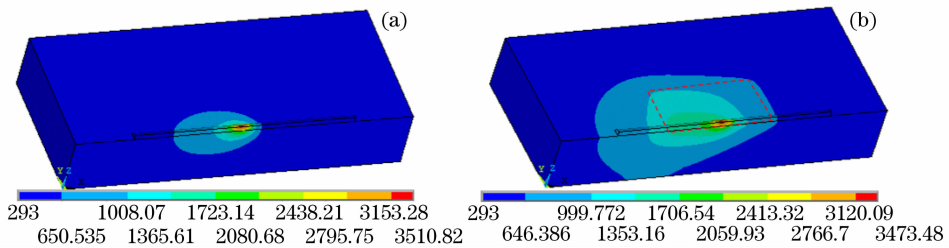


图 3 1.44 s 模型上表面温度场分布。(a) 无预热缓冷; (b) 平顶辅助光束预热缓冷

Fig.3 Temperature distributions of the model top surface at 1.44 s with (a) No preheating and slow-cooling; (b) preheating and slow-cooling with top hat assistant beam

定义预热缓冷过程结束(平顶辅助光束完全扫过节点)时刻,节点对应的温度为预热缓冷温度。不同的预热缓冷温度会影响熔覆过程的温度场。平顶辅助激光束预热缓冷过程中,预热缓冷温度受平顶辅助光束功率密度和光斑大小的影响。图 4 所示为 163 节点在无预热缓冷及不同预热缓冷条件下的温度变化曲线,其中 A、B、C、D 为不同预热缓冷光斑大小下 163 节点的预热缓冷温度。从图 4 可见,平

顶辅助光束预热缓冷能够达到较高的预热缓冷温度,增大平顶辅助光束的功率密度使预热缓冷温度不断升高;增大平顶辅助光束的光斑大小不仅使预热缓冷的温度升高,还能延长熔覆层保持较高温度的时间,具有一定保温作用。在预热缓冷过程结束时,节点温度出现突变,冷却速度在短时间内加快。可见预热缓冷光斑扫过后会引起温度场变化。

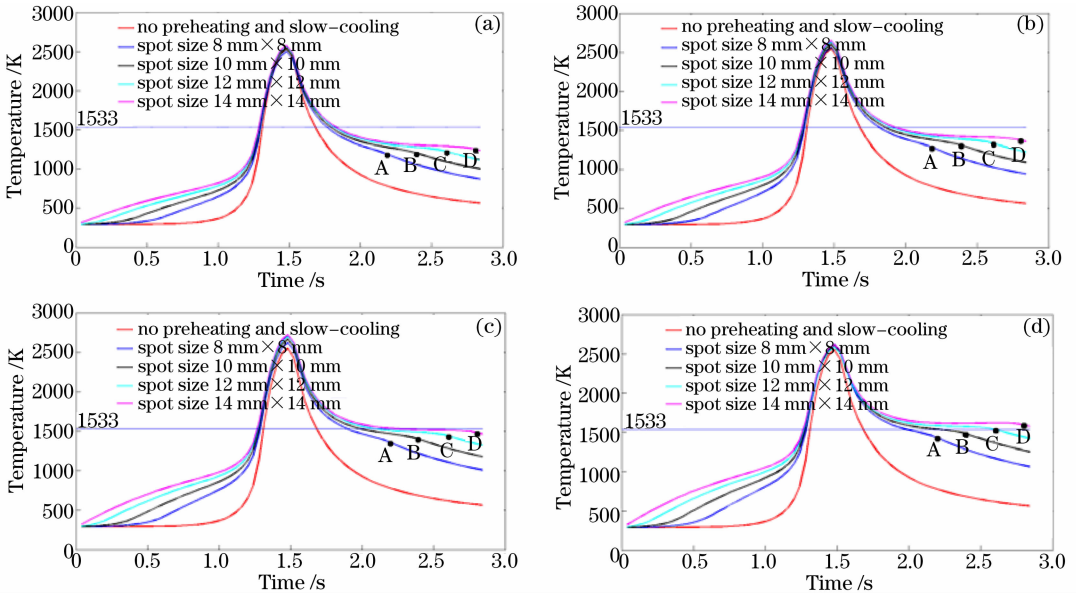


图4 功率密度分别为(a) $7.8 \times 10^6 \text{ W/m}^2$; (b) $9.4 \times 10^6 \text{ W/m}^2$; (c) $1.1 \times 10^7 \text{ W/m}^2$; (d) $1.3 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ 时,平顶辅助光束光斑大小对163节点温度的影响

Fig. 4 Effect of top hat assistant beam spot size on the temperature of node 163 with power density of (a) $7.8 \times 10^6 \text{ W/m}^2$; (b) $9.4 \times 10^6 \text{ W/m}^2$; (c) $1.1 \times 10^7 \text{ W/m}^2$; (d) $1.3 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, respectively

3.3 平顶辅助激光束预热缓冷对熔覆过程温度梯度的影响

平顶辅助激光束预热缓冷引起熔覆过程温度场变化会导致熔覆过程中温度梯度发生变化。温度梯度大小会影响熔覆层热应力大小。图5为163和919节点在无预热缓冷及不同功率密度的平顶辅助激光束预热缓冷(光斑大小 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$)情况下,冷却过

程中温度梯度随温度变化曲线。从图5可以看出,经过平顶辅助光束预热缓冷,节点同一温度对应的温度梯度有明显下降,可见利用平顶辅助光束预热缓冷,能够有效降低熔覆过程的温度梯度,并且随着平顶辅助光束的功率密度增大,预热缓冷温度升高,节点温度梯度不断降低。预热缓冷后节点温度梯度呈现先下降,再回升最后缓慢平稳下降的过程。

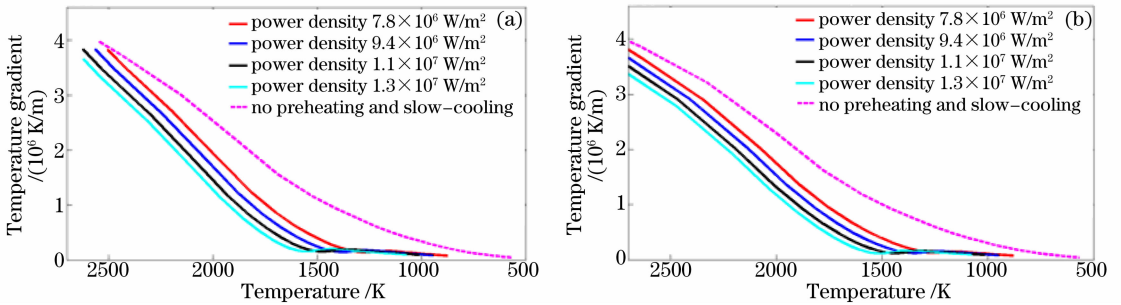


图5 163和919节点温度梯度随温度变化。(a) 163节点; (b) 919节点

Fig. 5 Node 163 and 919's temperature gradient varies with temperature. (a) Node 163; (b) node 919

平顶辅助光束预热缓冷是一种局部预热缓冷方法,如前分析,节点温度在预热缓冷过程结束时会出现突变,冷却速度在短时间内加快。这会造成在预热缓冷光斑照射内的节点与刚刚被预热缓冷光斑扫过的节点间的温差增大,使该位置的温度梯度增大。故会出现图5所示的温度梯度回升现象。由于冷却过程中存在温度梯度回升的现象,故节点塑性点的温度梯度并不随预热缓冷温度的升高单调下降。图6所示为不同的预热缓冷条件下,163和919节点塑

性点温度梯度的变化规律。对比图4、图6可知,当预热缓冷温度较低时,随着预热缓冷温度的升高,节点塑性点处的温度梯度不断下降,如图6(a)、(b)所示;当节点的预热缓冷温度升至塑性点附近且十分接近塑性点时,节点塑性点处的温度梯度出现回升,如图6(c)、(d)所示;随着预热缓冷温度的继续升高,节点塑性点处的温度梯度再次出现下降,如图6(d)所示。可见,利用平顶辅助光束预热缓冷熔覆 Al_2O_3 陶瓷涂层过程中,预热缓冷的温度越高,对加

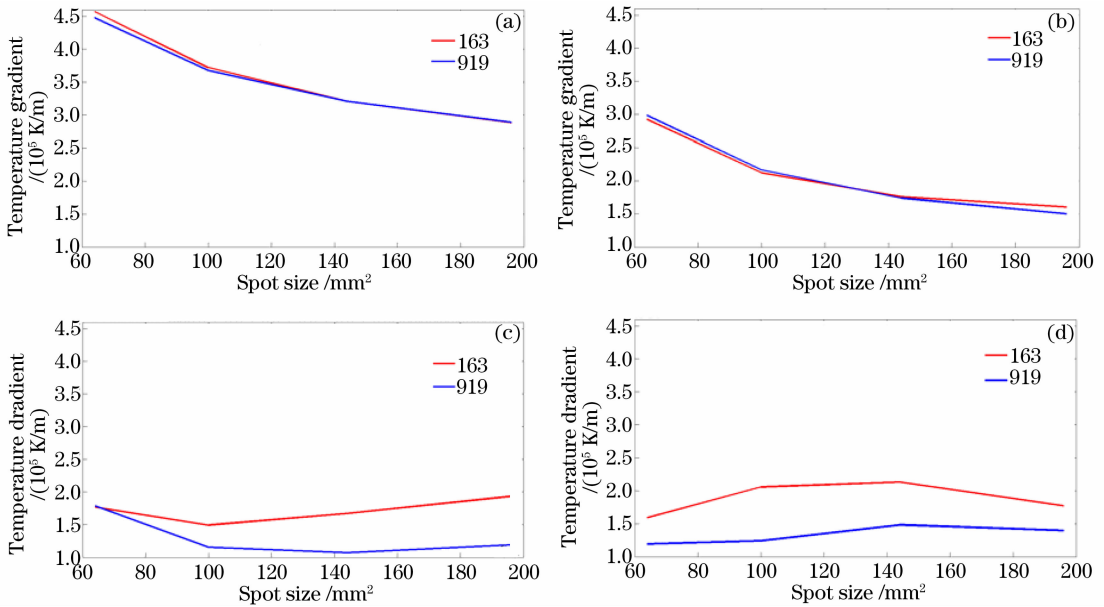


图 6 功率密度分别为(a) $7.8 \times 10^6 \text{ W/m}^2$; (b) $9.4 \times 10^6 \text{ W/m}^2$; (c) $1.1 \times 10^7 \text{ W/m}^2$; (d) $1.3 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ 时, 163、919 节点塑性点温度梯度随光斑大小变化

Fig. 6 Node 163 and 919's temperature gradient at plastic point varies with spot size with power density of (a) $7.8 \times 10^6 \text{ W/m}^2$; $9.4 \times 10^6 \text{ W/m}^2$; (c) $1.1 \times 10^7 \text{ W/m}^2$; (d) $1.3 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, respectively

工过程越有利,但应避免塑性点附近温度。

4 结 论

为了降低激光熔覆过程中涂层的温度梯度,提出双激光束熔覆技术。利用 ANSYS 软件建立了 Ti6Al4V 基板上激光熔覆 Al_2O_3 陶瓷单道涂层的模型,计算双激光束熔覆过程温度场分布规律,得到以下结论:

1) 陶瓷涂层冷却过程中,在垂直于激光扫描方向的截面内,熔覆层边缘靠近基板的位置温度梯度较大。双激光束熔覆技术能获得较高的预热缓冷温度,可以有效降低冷却过程中熔覆层温度梯度,但在预热缓冷过程结束后节点温度梯度会出现小幅回升;

2) 在双激光束熔覆过程中,平顶辅助光束功率密度的增大使预热缓冷的温度升高;平顶辅助光束光斑大小的增大使预热缓冷温度升高,保温作用加强。预热缓冷的温度越高,冷却过程中节点塑性点的温度梯度越小,但在预热缓冷温度升至塑性点附近时,会使节点塑性点的温度梯度回升。在实际加工过程中,预热缓冷温度越高,对加工过程越有利,但应避免塑性点温度。

参 考 文 献

1 I Shishkovsky, I Yadroitsev, Ph Bertrand, *et al.*. Alumina-zirconium ceramics synthesis by selective laser sintering/melting

[J]. Applied Surface Science, 2007, 254(4): 966-970.
 2 Liu Haiqing, Liu Xiubo, Meng Xiangjun, *et al.*. Crack formation mechanism and controlling methods of laser clad ceramic matrix composite coatings on metal substrate[J]. Materials Review, 2013, 27(11): 60-63.
 刘海青, 刘秀波, 孟祥军, 等. 金属基体激光熔覆陶瓷基复合涂层的裂纹成因及控制方法[J]. 材料导报, 2013, 27(11): 60-63.
 3 Lin Yinghua, Chen Zhiyong, Li Yuehua, *et al.*. Microstructure and hardness characteristic of in-situ synthesized TiB coating by laser cladding on TC4 titanium alloy[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2694-2698.
 林英华, 陈志勇, 李月华, 等. TC4 钛合金表面激光熔覆原位制备 TiB 陶瓷涂层的微观组织特征与硬度特性[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2694-2698.
 4 Gao Xuesong, Tian Zongjun, Shen Lida, *et al.*. Study on Al_2O_3 -13% TiO_2 coatings prepared by laser cladding and thermal shock resistance[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 203006.
 高雪松, 田宗军, 沈理达, 等. 激光熔覆 Al_2O_3 -13% TiO_2 陶瓷涂层制备及其抗热震性能[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 203006.
 5 Wang Hongyu, Zuo Dunwen, Lu Yingyan, *et al.*. Originate mechanism and prevent process of substrate cracks in laser cladding MCrAlY coatings on nickel-based super alloy[J]. J Aeronautical Materials, 2008, 28(6): 57-60.
 王宏宇, 左敦稳, 陆英艳, 等. 镍基合金激光熔覆 MCrAlY 涂层基体裂纹的成因与控制[J]. 航空材料学报, 2008, 28(6): 57-60.
 6 Zhou Shengfeng, Zeng Xiaoyan, Hu Qianwu. Realization of laser cladding and crack-free ceramic-metal composite coatings[J]. J Applied Optics, 2008, 29(1): 76-80.
 周圣丰, 曾晓雁, 胡乾午. 金属陶瓷复合涂层的激光熔覆与无裂纹的实现[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 76-80.
 7 Long Risheng, Liu Weijun, Xing Fei, *et al.*. Effects of substrate preheating on thermal stress during laser metal deposition shaping [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 241-247.

- 龙日升, 刘伟军, 邢 飞, 等. 基板预热对激光金属沉积成形过程热应力的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 241—247.
- 8 R Jendrzejewski, G Sliwinski, M Krawczuk, *et al.*. Temperature and stress fields induced during laser cladding[J]. Computers and Structures, 2004, 82(7): 653—658.
- 9 M Alimardani, E Toyserkani, J P Huissoon. A 3D dynamic numerical approach for temperature and thermal stress distributions in multilayer laser solid freeform fabrication process [J]. Optics and Laser in Engineering, 2007, 45(12): 1115—1130.
- 10 Wu Dongjiang, Wu Nan, Yang Ce, *et al.*. Numerical simulation of the preheating effect on temperature gradient in laser cladding Al₂O₃ ceramic[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(10): 2039—2042.
吴东江, 吴 楠, 杨 策, 等. 预热对 Al₂O₃ 陶瓷激光熔覆层温度梯度影响的模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10): 2039—2042.
- 11 Zhou Yu. Ceramic Materials[M]. Beijing: Science Press, 2004.
周 玉. 陶瓷材料学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

栏目编辑: 韩 峰