

一种通过改变激光功率密度分布控制 熔覆层裂纹的方法

王东生^{1,2} 田宗军² 王泾文¹ 段宗银¹ 沈理达² 黄因慧²

(¹ 铜陵学院机械工程系, 安徽 铜陵 244000
² 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 为了降低激光熔覆过程中熔覆层热应力从而减少裂纹的生成,提出了一种通过改变激光功率密度分布来控制熔覆层裂纹的方法,并用数值模拟的方法对均布及凸字形光斑熔覆过程进行了热力耦合有限元分析。结果表明,用均布光斑熔覆呈现出激光加工典型的快速加热、快速冷却特征,而采用凸字形光斑可在一定程度上起到预热、缓冷的效果,从而降低了熔覆区与非熔覆区的温度梯度,另外,在熔覆效果相当的前提下,其熔覆层热应力也较小,因而可以有效地减小熔覆层的开裂趋势。

关键词 激光技术;激光熔覆;熔覆层裂纹;控制方法;热应力

中图分类号 TN249;TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0103004

A Method of Crack Control in Laser Cladding Process with Changing Power Density Distribution of Laser Beam

Wang Dongsheng^{1,2} Tian Zongjun² Wang Jingwen¹ Duan Zongyin¹
Shen Lida² Huang Yinhui²

¹ Department of Mechanical Engineering, Tongling College, Tongling, Anhui 244000, China

² College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract In order to reduce thermal stress and crack of clad layer in laser cladding process, a method through changing power density distribution of laser beam was presented. A thermal-mechanical coupling finite element model of laser cladding by using uniform shape and convex shape laser spot was established. The results show that laser cladding with uniform shape spot has a typical character of quick heating and cooling rate as the conventional laser manufacturing. However, laser cladding with convex shape beam could preheat and slow cooling rate of sample to some extent, and reduce the temperature gradient between the clad area and non-clad zone. In addition, the thermal stress of clad layer with convex shape laser beam is lower than the uniform shape laser spot dose, so it can effectively reduce crack of the clad layer.

Key words laser technique; laser cladding; crack of clad layer; controlling method; thermal stress

OCIS codes 140.3390; 000.4430; 350.3390; 310.1620

1 引 言

激光熔覆是利用高能激光束在基材表面辐照,通过迅速熔化、扩展和迅速凝固,在基材表面熔覆一

层具有特殊物理、化学或力学性能的材料。与其他表面加工技术相比,具有应用面广、实用性强、应用灵活等特点,因此激光熔覆技术已引起了广泛的关

收稿日期:2010-05-27; **收到修改稿日期**:2010-07-06

基金项目:国家自然科学基金(59975046,50305010)、江苏省自然科学基金(BK2004005,BK2009375)和铜陵学院引进人才科研启动基金资助课题。

作者简介:王东生(1978—),男,博士,讲师,主要从事激光加工技术、等离子喷涂技术、纳米材料加工技术、表面涂层技术以及加工过程的数值模拟等方面的研究。E-mail:wangdongsheng@tlu.edu.cn

注和重视,并得到了广泛的应用^[1~4]。目前,激光熔覆最大的问题是涂层的脆性高,裂纹倾向大,大大限制了其在关键零部件的应用范围^[5,6],因此抑制激光熔覆的开裂对开拓激光熔覆技术的生产应用具有非常重要的实用意义。

目前所采用的抑制熔覆开裂的方法主要有:调整应力状态,尽可能降低拉应力;优化工艺方法和参数;合理设计熔覆层^[7,8]以及改变激光作用模式^[9]等。激光熔覆纳米涂层是从熔覆材料的角度出发,依靠纳米材料的强韧化作用从而有效解决熔覆层易开裂的问题^[10]。而调整熔覆层应力状态常用的措施是对试样进行预热和/或缓冷处理,如文献^[11]通过保温箱对熔覆后的试样进行缓冷处理,有效地避免了熔覆裂纹的产生;文献^[12]对激光熔覆预热基板进行了结构和控制设计,并进行了不同预热温度下的激光熔覆试验,结果表明,在基板预热条件下进行激光熔覆可以显著改善试样的质量,并有效降低熔覆过程的热应力,减少了熔覆层裂纹的产生;文献^[13]采用激光感应复合激光熔覆的方法,即感应预热基材的同时进行激光熔覆,该方法不仅可使熔覆效率大大提高,而且获得了无裂纹的熔覆层。

预热和/或缓冷处理的实质是降低了激光熔覆过程中温度梯度,事实上激光熔覆后,熔覆层的凝固是一个极快的过程,应力从产生到集中以至导致材料形成裂纹的过程也非常快。因此,如果要充分发挥预热、缓冷处理对改善熔覆层质量和防治或消除裂纹产生的作用,就需要把预热和/或缓冷处理贯穿整个激光熔覆过程。采用激光熔覆专用保温箱可以较好地解决这个问题,但是,一方面这种保温箱要和激光熔覆同步工作,另外针对不同的试样要设计不同的保温箱,因此给激光加工操作和保温箱的设计带来一定的困难,特别是对大试样要整体加热、保温有诸多困难。文献^[13]中采用外加热源的方法对试样局部预热达到了较好的效果,但外加热源增加了整个系统的复杂性。受此启发,如果对激光器进行适当改造,使激光束分成两束功率、光斑尺寸分别可调的光束,通过调节两光束可获得沿激光扫描方向功率密度分布为中间高边缘低的类似于凸字形的光斑,当然也可以直接通过积分镜将光束变换成凸字形光斑。对于这种凸字形光斑,在激光熔覆过程中,光斑前端可对试样进行预热,中心高功率密度区域用来进行熔覆处理,而光斑后端可减缓熔覆层冷却速度,这样既不需要增加额外的装置,同时又可达到类似于预热、缓冷的效果,从而降低激光熔覆区与非

熔覆区的温度梯度,减小熔覆层开裂的趋势。本文通过对均布及凸字形功率密度分布的光斑的激光熔覆过程进行热力耦合有限元数值模拟,研究了凸字形光斑对激光熔覆试样的预热缓冷效果及应力的影响,从而分析了其对控制熔覆层裂纹的有效性。

2 热力耦合有限元模型的建立

基体材料为钢铁研究总院高温材料研究所熔炼的 γ -TiAl 基合金(TAC-2),涂层材料为北京矿冶研究总院金属材料研究所生产的KF-113A 超合金粉末,通过等离子体喷涂工艺预置。试样基体尺寸为 $30\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,涂层厚 0.15 mm ,取试样关于激光扫描中心线对称的一半进行建模,如图1所示。

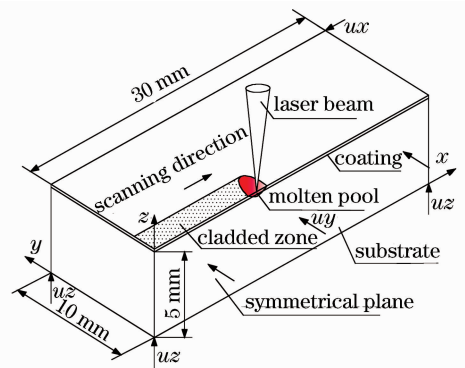


图1 激光熔覆过程示意图

Fig. 1 Schematic of the laser cladding process

目前描述激光热源的模型主要有 Rosenthal 解析模型、高斯(Gauss)分布热源模型、均布热源模型、半球状热源模型、椭球以及双椭球热源模型等^[14]。对于激光熔覆,通常采用经过积分镜变换的功率密度分布比较均匀的类矩形光斑,因此在数值模拟时常用均布热源模型。

本数值模拟所用的激光热源模型有两种,一种是均布矩形光斑,具体参数为:激光功率 950 W ,光斑尺寸 $5\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,激光扫描方向沿光斑 3 mm 侧,扫描速度 600 mm/min (简称为工艺参数 Set1);另一种是凸字形光斑(可认为是两个中心相同、但不同尺寸的均布矩形光斑叠加而成),具体参数为:一个是激光功率 675 W ,尺寸 $5\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的均布小矩形光斑,另一个是激光功率 675 W ,尺寸 $5\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的均布大矩形光斑,扫描方向沿光斑 $3/15\text{ mm}$ 侧,扫描速度 600 mm/min (简称为工艺参数 Set2);两种光斑的功率密度分布如图2所示。

通过间接热力耦合的方法建立相应的有限元数

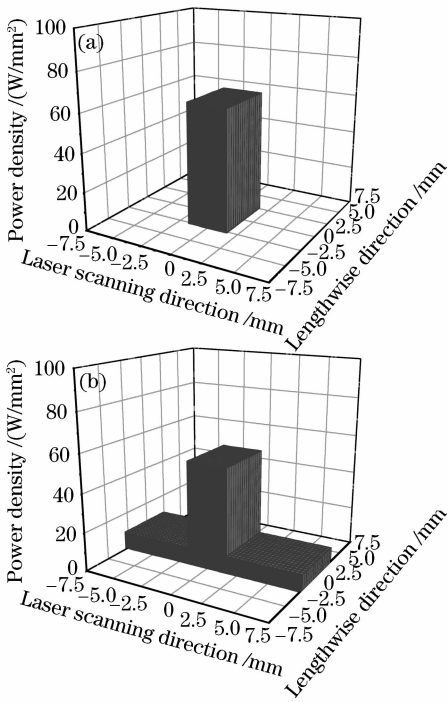


图2 激光光斑功率密度分布

(a) 均布形(Set1), (b) 凸字形(Set2)

Fig. 2 Power density distribution of laser beam

(a) uniform shape (Set1), (b) convex shape (Set2)

值模拟模型,模型的具体建立详见文献[15,16]。

3 模型计算结果及讨论

图3分别为两种工艺参数下激光扫描1.5 s时的温度场云图,在图中温度高于1460 °C (TiAl合金熔点)的区域为熔池区。从图中可以看出,相对于均布光斑,采用凸字形光斑进行熔覆的等温线区域较

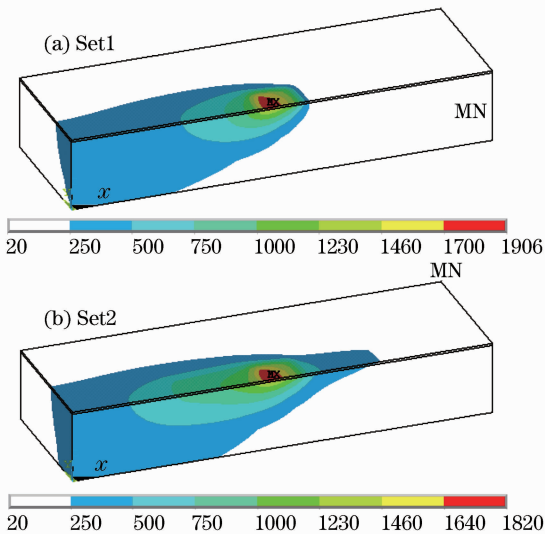


图3 1.5 s时温度场云图

Fig. 3 Temperature field distribution at 1.5 s

大,也就是说其熔覆区与非熔覆区的温度梯度较小。

图4是相应于1.5 s时最高温度点横截面温度场云图,其等温线呈月牙形。根据1460 °C等温线可判断基体熔化的深度及界面冶金结合宽度,在Set1工艺参数下,界面冶金结合宽度和基体熔化深度分别为3.04 mm和134 μm,而在Set2工艺条件下,相应的界面冶金结合宽度和基体熔化深度分别为3.03 mm和145 μm,总体上两者熔覆效果相当。另外比较两图可以看出采用均布及凸字形光斑熔覆的最高温度分别为1906 °C和1820 °C,凸字形光斑熔覆最高温度略低,但由于其光斑较大,因此激光辐照时间较长,熔池存在时间也较长,可以向深度方向传递更多的热量,在深度方向的温度梯度较小,从而使两种工艺参数的实际熔覆效果相当,只不过用凸字形光斑熔覆时基体熔化深度/界面冶金结合宽度的比值相对较大。

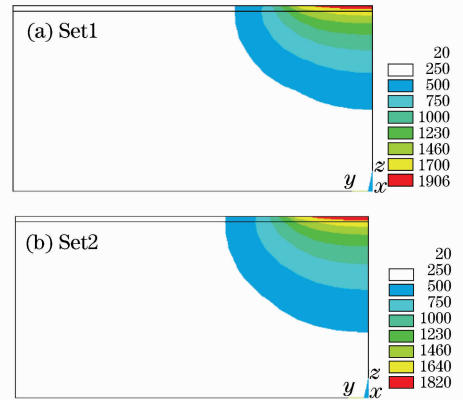


图4 1.5 s时最高温度点横截面温度场云图

Fig. 4 Cross section temperature field distribution of the highest temperature point at 1.5 s

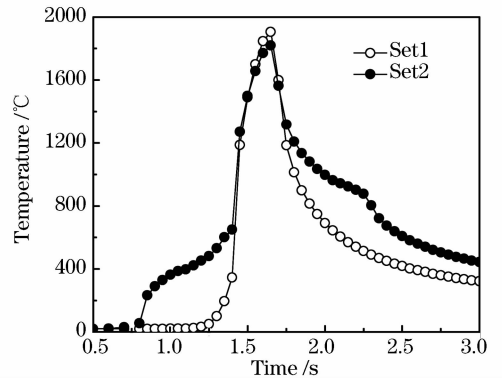


图5 上表面激光扫描中心线中点热循环曲线

Fig. 5 Thermal circulation curves of middle point of laser scanning centerline on the top surface

试样上表面中心线中点的温度循环曲线如图5所示。可见采用均布矩形光斑进行熔覆时,当激光

束扫描到该点之前,该点温度缓慢升高;当激光束扫描到该点时,该点的温度迅速升至高温,随后又随着激光的移动而迅速冷却,呈激光加工典型的快速加热、快速冷却的特点。而在 Set2 工艺条件下,该点的温度循环曲线与其激光光斑形状类似,呈凸字形,前端相当于对试样局部进行了 400 °C 左右的预热,而受到激光热作用的影响,在冷却阶段的温度相对较高,呈不完全对称分布。总的来说,不管是激光熔覆前端还是后端,其温度梯度都较小,有明显的预热、缓冷特征,可以在一定程度上改善激光熔覆急热急冷对涂层带来的不利影响。

前期的研究表明,对于激光熔覆试样,以沿激光扫描方向(横向)的拉应力最大^[16],而较大的拉应力与熔覆层的裂纹形成密切相关,因此在文中只讨论这两种光斑对熔覆过程中横向应力的影响。图 6 为试样上表面激光扫描中心线中点横向应力循环曲线,可见虽然在形成熔池前后,两种工艺条件下压应力相当,但就对熔覆层裂纹形成起重要作用的拉应力而言,在随后的冷却过程中,Set2 工艺条件的拉应力要明显小于 Set1 工艺条件。计算结果表明,冷却至 300 s 时,Set1 工艺条件的拉压力(可认为是残余应力)为 397.66 MPa,而相应的 Set2 工艺条件的拉压力为 355.83 MPa,相对前者降低了 10.5%。

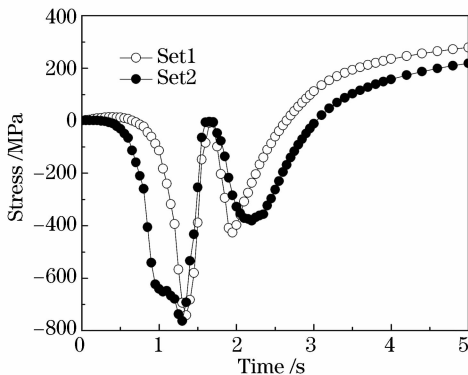


图 6 上表面激光扫描中心线中点应力循环曲线

Fig. 6 Stress circulation curves of middle point of

laser scanning centerline on the top surface

图 7 为相应的试样上表面激光扫描中心线在 300 s 时的横向应力分布,可以清晰地看到两种工艺条件下残余应力分布相似:整个工件上表面中心线上的横向应力都是拉应力,在激光扫描起始端应力迅速升高,在中间区域都保持这样很高的应力水平,直至激光扫描终点应力才有所下降,但在总体上,Set2 工艺条件的残余应力较 Set1 工艺条件小,在中间区域平均低 40 MPa 左右。

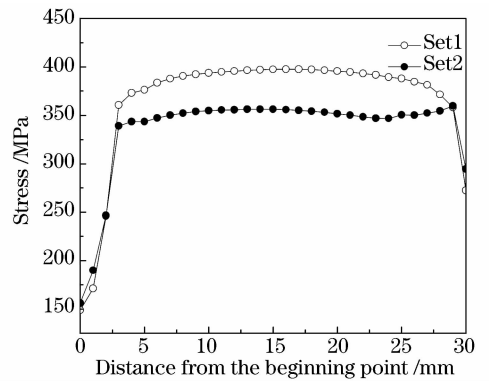


图 7 上表面激光扫描中心线残余应力分布

Fig. 7 Residual stress distribution of the laser scanning centerline on the top surface

通过前面的数值模拟,从理论上证明了凸字形光斑对激光熔覆裂纹控制的有效性。事实上,通过分别调节凸字形光斑中两个均布矩形光斑的功率和光斑大小,可方便地对凸字形光斑的预热、缓冷效果进行控制。该方法的优点在于与激光熔覆是同步进行的;另外是局部加热处理,需求能量较少;特别是不需要额外的装置就可以实现类似于预热和缓冷的效果,实现及控制的方法较简单,因此是一种方便易行的熔覆层裂纹控制措施。

4 结 论

1) 提出了基于改变激光功率密度分布控制熔覆层裂纹的方法,并用数值模拟的方法证明了采用凸字形功率密度分布的激光光斑进行熔覆对减少熔覆层热应力及裂纹生成的有效性。

2) 数值模拟的结果表明,与均布激光光斑相比,采用凸字形光斑进行熔覆在一定程度上起到了预热、缓冷的作用,从而降低了激光熔覆区与非熔覆区之间的温度梯度,在给定的参数下,热应力可减少 10% 以上。

参 考 文 献

- 1 R. S. Sun, Y. W. Lei, W. Niu. Laser clad TiC reinforced NiCrBSi composite coatings on Ti-6Al-4V alloy using a CW CO₂ laser [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2009, **203**(10-11): 1395~1399
- 2 S. H. Zhang, M. X. Li, T. Y. Cho *et al.*. Laser clad Ni-base alloy added nano- and micron-size CeO₂ composites [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2008, **40**(5): 716~722
- 3 Liu Xiubo, Shi Shihong, Fu Geyan *et al.*. Ni-Cr-C-CaF₂ composite laser cladding on γ -TiAl intermetallic alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1591~1594
刘秀波,石世宏,傅戈雁等. γ -TiAl 合金 Ni-Cr-C-CaF₂ 复合材料激光熔覆[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1591~1594
- 4 Zhai Yufeng, Wang Xinhong, Huang Jian. Microstructure and properties of TiC-Mo₂C particles reinforced Fe-based composite coatings produced by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*,

- 2009, **36**(12):3287~3292
- 翟玉峰,王新洪,黄 坚. 激光熔覆 TiC-Mo₂C 颗粒增强 Fe 基涂层的组织与性能[J]. 中国激光, 2009, **36**(12):3287~3292
- 5 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Research development of nanostructured coatings prepared by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1698~1709
- 王东生,田宗军,沈理达等. 激光表面熔覆制备纳米结构涂层的研究进展[J]. 中国激光, 2008, **35**(11):1698~1709
- 6 F. J. Wang, H. D. Mao, D. W. Zhang *et al.*. The crack control during laser cladding by adding the stainless steel net in the coating [J]. *Applied Surface Science*, 2009, **255** (21): 6646~6654
- 7 Wang Huiping. Discussion on crack in laser-clad case [J]. *Heat Treatment*, 2008, **23**(6):24~27
- 王慧萍. 关于激光熔覆层开裂问题的探讨[J]. 热处理, 2008, **23** (6):24~27
- 8 Chen Zhikun, Liu Min, Zeng Dechang *et al.*. Research on formation causes and elimination methods of the cladding cracks [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(1):55~57
- 陈志坤,刘 敏,曾德长等. 激光熔覆裂纹的产生原因及消除方法探究[J]. 激光杂志, 2009, **30**(1):55~57
- 9 Zhong Rutao, Xiong Zheng. Research on continuous/ pulse laser cladding superalloy K403 [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 852~857
- 钟如涛,熊 征. 连续/脉冲 CO₂ 激光熔覆高温合金 K403[J]. 中国激光, 2010, **37**(3):852~857
- 10 Xu Dapeng, Zhou Jianzhong, Guo Huafeng *et al.*. Investigation of generation mechanism and controlling method of cladding layer ranking by laser cladding [J]. *Tool Engineering*, 2007, **41**(4): 24~28
- 徐大鹏,周建忠,郭华锋等. 激光熔覆裂纹产生机理及控制方法分析[J]. 工具技术, 2007, **41**(4):24~28
- 11 Wang Hongyu, Zuo Dunwen, Lu Yingyan *et al.*. Originate mechanism and prevent process of substrate cracks in laser cladding MCrAlY coatings on nickel-based superalloy [J]. *Journal of 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
- 12 Liang Zhihong, Ma Enbo. Structural design of substrate preheating for laser cladding [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009, **37**(7):54~56
- 梁志宏,马恩波. 激光熔覆成形预热基板设计及试验研究[J]. 机械设计与制造, 2009, **37**(7):54~56
- 13 Zhou Shengfeng, Zeng Xiaoyan, Hu Qianwu. Realization of laser cladding and crack-free ceramic-metal composite coatings [J]. *Journal of 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
- 14 Long Risheng, Liu Weijun. Numerical of thermal stress on laser metal deposition shaping [J]. *High Technology Letters*, 2007, **17**(2):142~147
- 龙日升,刘伟军. 激光金属沉积成形过程热应力的数值模拟[J]. 高技术通讯, 2007, **17**(2):142~147
- 15 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Numerical simulation of temperature field of laser remelting MCrAlY coating prepared by plasma spraying on titanium alloy [J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(6):444~449
- 王东生,田宗军,沈理达等. 钛合金表面激光重熔等离子喷涂 MCrAlY 涂层温度场数值模拟[J]. 应用激光, 2007, **27**(6): 444~449
- 16 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Thermal-mechanical coupling finite element analysis of laser remelting MCrAlY coating prepared by plasma spraying on TiAl alloy surface [J]. *Applied Laser*, 2008, **28**(2):92~98
- 王东生,田宗军,沈理达等. TiAl 合金表面重熔等离子喷涂 MCrAlY 涂层热耦合有限元分析[J]. 应用激光, 2008, **28** (2):92~98