

文章编号: 0258-7025(2010)02-0581-05

单道激光熔覆层几何特征的三维表征方法

王志坚^{1,2} 董世运² 徐滨士² 夏 伟¹ 闫世兴²

(¹ 华南理工大学机械工程学院, 广东 广州 510640
² 装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘要 为了更好地控制激光熔覆再制造装备零件的结构形状精度, 需要对熔覆层几何特征进行表征, 尤其是熔覆层横截面的几何尺寸和熔覆层整体的三维特征。采用 Nd:YAG 固体激光器在 18Cr2Ni4WA 钢基体上进行单道熔覆实验。用光学显微镜(OM)获得熔覆层横截面图像, 用 AutoCAD 软件对熔覆层横截面图像进行图形模拟。提出了新的单道熔覆层几何模型, 该模型为两端半球面体与中间柱面体组合的三维结构。用电子秤对基体熔覆前后的重量进行了测量, 并与模型结构的理论重量值进行比较, 以检验模型精度。结果表明, 熔覆线截面上部轮廓线可以用一段圆弧模拟, 单道熔覆中部结构为部分柱面体; 建立的三维模型模拟重量计算值与实测值误差很小, 该模型能很好地表征单道熔覆层的几何特征。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 模型; 三维表征; 几何特征

中图分类号 TG156.99; TF124 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0581

Three-Dimensional Characterizing Technique for Geometrical Features of Single Laser Cladding

Wang Zhijian^{1,2} Dong Shiyun² Xu Binshi² Xia Wei¹ Yan Shixing²

(¹ School of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China
² National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Force Engineering Institute, Beijing 100072, China)

Abstract In order to control accurately clad shape of laser cladding for remanufacturing parts, it is necessary to build the three-dimensional (3D) model of single laser cladding. In this study, single track laser cladding experiment was executed on 18Cr2Ni4WA steel substrate by using Nd:YAG laser. The cross-section shape of cladding metal was modeled by AutoCAD and a 3D geometric model of single laser clad was built. The model consists of two partial sphere located in two terminals and partial cylinder located in the middle of the single track cladding. In order to characterize accuracy of the model, the weights of theoretical and experimental structure were compared. The result shows that top profile of cross-section was nearly a circular arc, and the weight of theoretical structure was almost equal to that of experimental structure. The model can characterize commendably the geometrical features of experimental laser cladding.

Key words laser technique; laser cladding; model; three-dimensional characterization; geometrical feature

1 引 言

在利用激光熔覆技术再制造局部损伤的装备零件的研究中, 激光熔覆层的几何模型研究是控制熔

覆层形状的基础。激光成形件几何性能(几何形状和尺寸精度)的提高逐渐成为一个新的研究热点^[1]。激光熔覆层的形状控制可以用一定形状的几何图形

收稿日期: 2009-03-06; 收到修改稿日期: 2009-04-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50735006), 国家科技支持项目(2006BAF02A19)和十一五预研项目(513270102)资助课题。

作者简介: 王志坚(1980—), 男, 工程师, 博士研究生, 主要从事激光制造与再制造方面的研究。

E-mail: wang034@163.com

导师简介: 董世运(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光制造与再制造、质量检测等方面的研究。

E-mail: syd422@vip.sohu.com(通信联系人)

表征熔覆层,并建立工艺参数和结构尺寸、重量的定量对应关系。这种对应函数关系确定后,可以在激光熔覆和快速成形不同结构之前模拟计算出选定工艺参数下的结构尺寸,从而为选择工艺参数和精确控制成形结构形状提供重要数据。

目前,国内外对熔覆层几何模型的研究一般比较少^[2],且基本都是二维状态的,即以熔覆层的截面为建模对象^[2,3]。这些研究往往取熔覆层中间形状较好的截面图像分析结构形状,对熔覆起始点和结束点的形状很少研究。受许多因素例如散热环境影响,熔覆层的截面形状随熔覆方向是有变化的,结构形状的二维表征方法精度欠佳。

半导体激光抽运 Nd:YAG 激光器相对目前在激光加工中常用的 CO₂ 激光器、灯抽运 Nd:YAG 激光器具有以下独特优势:转换效率高、性能可靠、体积小、使用寿命长、输出光束质量好等^[4,5]。本文进行了单道熔覆实验,对熔覆层形状进行了模拟。在研究熔覆层截面形状的基础上,提出了一种新的单道熔覆层三维表征方法。

2 实验参数与实验过程

为了解决装备零件的激光熔覆再制造结构形状精度问题,进行了单道熔覆工艺实验。基体材料为 18Cr2Ni4WA 钢,加工成圆饼状,直径 39.92 mm,厚 10.05 mm,重 98.54 g,密度 7.834 g/mm³。熔覆粉末材料为 Fe314 粉末,粒度 +140~ -350 目,密度约 7.85 g/mm³,其成分如表 1 所示。选用的激光器为半导体激光抽运的 PLA60100 型 Nd:YAG 激光器,激光通过光纤传导,光斑直径 2 mm。采用侧向送粉,送粉方向垂直于熔覆方向,且与激光束成 45°。主要工艺参数为:激光功率 1000 W,送粉量 4.224 g/min,激光扫描速度 5 mm/s,单道扫描路径长度 25 mm。

表 1 Fe314 粉末成分

Table 1 Chemical composition of Fe314 powder

Element	C	Cr	Ni	B	Si	Fe
Mass fraction /%	0.1	17.5	10.5	0.65	0.12	Bal.

熔覆后,利用超声波在丙酮溶液中对试样进行清洗去污处理,时间为 10 min,晾干后再用电子秤称重。然后对其中两道熔覆层进行线切割取样,并利用光学显微镜对试样的截面形貌进行分析。

3 实验结果

图 1 是单道熔覆层的外观形貌图。从图中可看

出每一道熔覆的起点与熔覆方向,以及结构形状分析的试样取样位置 a,b(如图中箭头所示)。

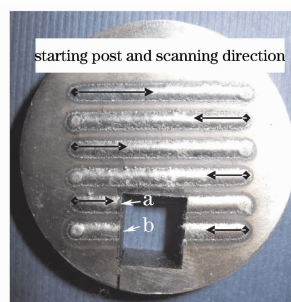


图 1 试样照片

Fig. 1 Test specimen

图 2 是图 1 中 a 试样光学显微完整截面形貌。可以清晰地看到熔覆层的轮廓线,上表面轮廓线呈光滑弧线状。但是基体表面以下的熔覆层不对称,这是由于侧向送粉的气粉混合流冲击造成的。为了对不同截面位置形状进行比较,图 1 中 b 试样的截面形貌如图 3 所示。通过比较发现在相同工艺参数下不同的熔覆层结构形状存在一定差别,但是上表面轮廓线形状差别很小。

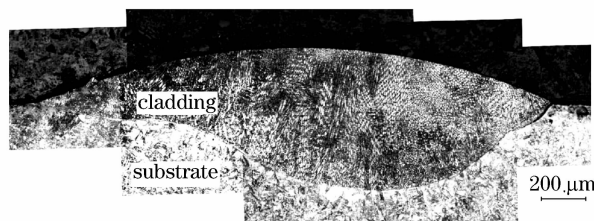


图 2 a 试样截面形貌

Fig. 2 Cross-section pattern of specimen a

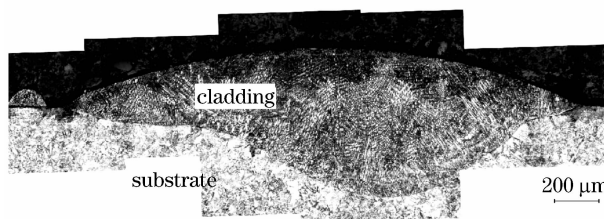


图 3 b 试样截面形貌

Fig. 3 Cross-section pattern of specimen b

4 模拟分析方法和表征模型

一般情况下,熔覆层的截面形状尺寸可以从金相照片上读出或标示。但是对熔覆层的端点判断是不一样的,上述方法测得的尺寸数据存在的误差较大。整个熔覆层只截取一个横截面表征其形状尺寸,不能全面反映结构的立体形状。为了很好地解决这一问题,下面提出一种新型的模拟表征方法。

4.1 熔覆层横截面形状表征

文献[2]中提出了一种考虑表面张力的熔覆层横截面形状表征方法,如图 4 所示。文献[3]也提出了一个熔覆层横截面主要几何特征参数表示法。图 4 中表征参数主要有熔覆高度 h , 熔覆宽度 w , 熔覆深度 d 。图 4 中标明了稀释区的大小,称其为合金化区域。但是在实验中没有发现这一区域和熔覆层具有明显界面。图中熔覆层是在基体表面以下,这一区域的基体材料应是以飞溅形式脱离基体的。在实验中没有观察到基体有明显的飞溅现象。所以,用文献[2]的表征方法不能很好地表征图 2 与图 3 中的熔覆层几何特征。

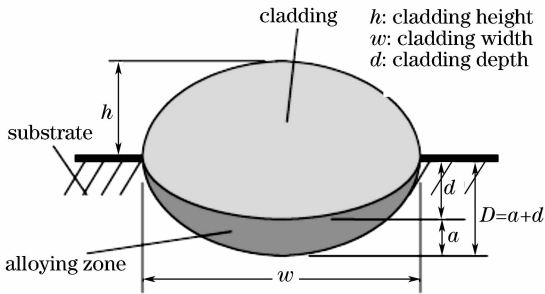


图 4 熔覆层截面形状表征

Fig. 4 Cross-section characteristic of cladding

由于在实验过程中没有观察到明显的材料飞溅现象,根据这一结果,首先假设熔覆时基体基本没有材料飞溅,同时熔覆截面上轮廓线为圆弧^[2,6]。基于上述假设,改进的熔覆层横截面形状表征如图 5 所示,主要参数有熔覆高度 H , 熔覆宽度 W , 圆柱半径 r , 熔覆深度 D 。熔覆层的横截面类似“飞碟状”,虚线以下的融合区域形状并不重要,而深度是表征参数。该模型与图 4 主要区别是用 r 来表征熔覆柱体半径,这是一个表征进入熔池的粉末材料质量以及吸收激光能量占激光输出总能量比例的参数。在小送粉量情况下,参数 r 越大,表明进入熔池的粉末越少,或者吸收的能量越少,熔覆高度 H 也会变小。

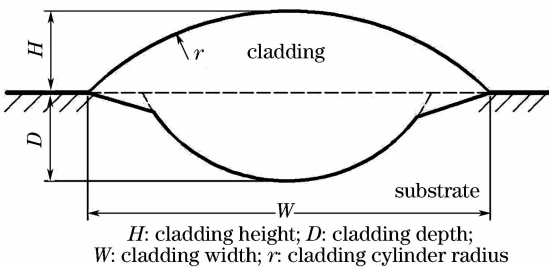


图 5 熔覆层的新表征方法

Fig. 5 New characterization of cladding cross-section

4.2 熔覆层横截面形状的模拟

形状模拟的主要目的是对结构形状的表征和尺寸的测量。文献[7]给出了一个侧向送粉的金属熔池几何特征图,但是没有用于模拟实际熔池结构和表征结构尺寸。本文采用 AutoCAD 软件用直线模拟基体表面,用圆弧模拟截面上部和底部轮廓线,可以直接标注结构的主要尺寸参数。首先将熔覆截面图片以光栅图像格式导入 AutoCAD 软件。然后将光栅图像置于底层,放大光栅图像在新建图层上标模拟点。在基体平面、上下轮廓线位置标出 8~10 个清晰的轮廓点。然后,用作图法模拟出基体平面直线和上下两段圆弧线。最后调整比例,直接在模拟轮廓图上标注出尺寸数据。图 6,图 7 分别为对应图 2 与图 3 的模拟轮廓图,圆弧粗实线表示上轮廓线,水平虚线表示基体平面,圆弧虚线表示熔池底部大致轮廓线。图中没有删除底层光栅图像。

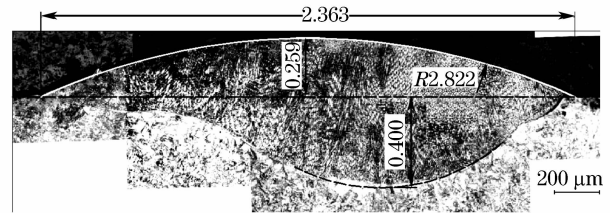


图 6 a 试样截面形貌轮廓模拟及尺寸标注

Fig. 6 Profile model and marked sizes of specimen a cross-section

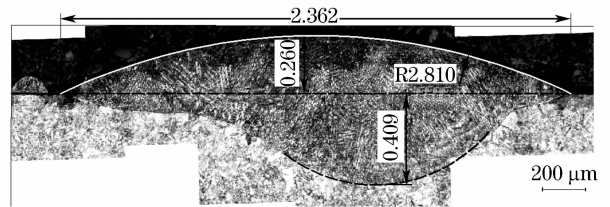


图 7 b 试样截面形貌轮廓模拟及尺寸标注

Fig. 7 Profile model and marked sizes of specimen b cross-section

从图 6 和图 7 可以看出,模拟轮廓线很好地拟合了实际轮廓。相同工艺参数下的熔覆层形状尺寸中高度、宽度、柱面半径基本相同,而熔覆深度及基体以下部分结构位置有一定差别。图 6 和图 7 中基体平面以上的图形面积差别很小,分别为 0.4124 mm^2 和 0.4138 mm^2 。受光斑大小、送粉量和激光功率参数的限制,熔覆宽度比光斑直径稍宽。两个试样的截面高度和宽度的差别可能是由于送粉和激光功率的波动引起的。基体以下熔覆层的形状和位置的差别是由基体吸收的激光能量和侧向送粉

的气粉混合流影响的不同造成的,但是对该处熔池吸收的粉末材料量没有多大影响。

4.3 熔覆层的三维模型

实验发现,单道熔覆层的起点和末端大致呈半球面体形状,起点稍小,末端稍大,如图 8 所示。图 9 给出了单道熔覆层的起点和末端的纵向截面形貌。图 9(a)显示,熔覆起点的厚度和半径都较小,原因是该处熔池吸收的热量少,熔池尺寸较小,吸纳并熔化的粉末量少。图 9(b)显示熔覆末端的厚度和半径较大,这与该处热量累积以及关闭光闸后熔池没有马上凝固且粉末依然送入熔池等因素有关。图 9 还显示单道熔覆层纵向截面上轮廓线近似为一弧形曲线。虽然两端结构稍有差别,但组合起来可以近似等效为底面等于光斑大小、高度等于熔覆层高度的球面体结构。整个熔覆层的长度约等于光束运动长度与一个光斑直径之和。

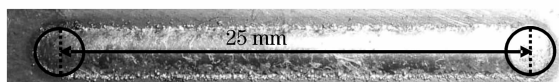


图 8 单道熔覆层(虚线隔开的两端半球区域,文中称为半球面体)

Fig. 8 Single trace cladding structure (the terminal area in circle divided by the dashed, which was called partial sphere structure in this article)

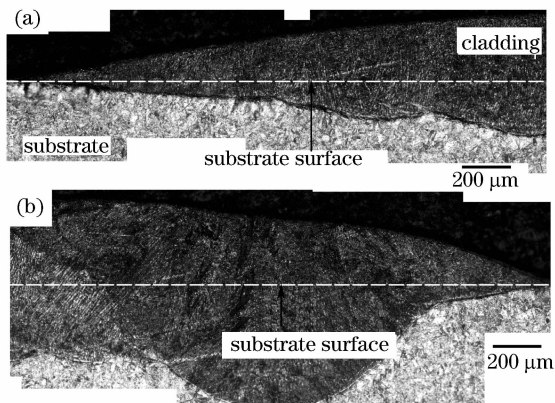


图 9 单道熔覆层始末端纵向截面形貌
(a) 熔覆起点;(b) 熔覆末端

Fig. 9 Longitudinal cross-section pattern of cladding
(a) starting cladding post; (b) cladding end

文献[8]给出了一个熔池几何学模型,但没有对整个熔覆层建立三维模型。假设熔覆时基体基本没有材料飞溅,则基体表面以上的熔覆层可以等效为熔覆的全部粉末材料的熔合。文献[3]也认为熔覆层横截面基体表面以上的区域称为熔覆区域,基体表面以下的区域称为熔铸区域。虽然可能在整个熔

覆横截面上基体材料和粉末材料都相互扩散,进而造成合金化区域材料的组织特性、密度等发生改变,但是这种扩散对熔覆层的整体形状和尺寸影响很小。根据质量守恒定理,基体表面以下的基体材料扩散进入上部,因此就会有相同的粉末材料进入基体。所以,文中对熔覆层的三维建模的一条重要假设是:在基体飞溅很少的情况下,整个激光熔覆层的形状可以等效为基体表面以上的熔覆层,即两端半球面体与中间柱面体组合的三维结构。结合图 6,图 8 与图 9 以及上述假设,在 AutoCAD 软件中建立了一条单道熔覆层的三维模型,如图 10 所示。

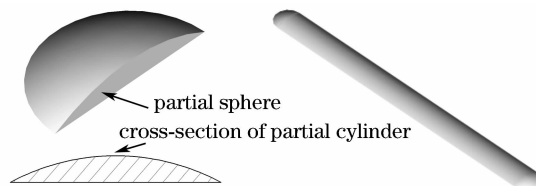


图 10 单道熔覆层的三维模型

Fig. 10 3D model of single trace cladding structure

4.4 结果分析

通过建立整个熔覆层的三维模型,在 CAD 软件中可以直接测出其总体积。根据粉末的密度,可以求出模型的理论熔覆层重量。如果理论计算的重量和实验中测量得到的熔覆层实际重量吻合,则可以认为模型的假设是成立的。

在 AutoCAD 软件中用实体体积查询功能测得单道模型总体积为 10.95 mm^3 。设粉末的密度为 7.85 g/mm^3 ,求得理论重量为 0.5157 g 。实验中测得熔覆层重量为 0.5250 g 。如果理论模型考虑与熔覆层边缘的粘粉颗粒(图 8)重量之和,理论模型的重重量几乎和实际测量值相等。根据重量比较的结果,可以认为这种精确模拟轮廓且结构等效的三维模拟方法是可行的,建立的模型能很好地反映熔覆层的几何特征。

5 结 论

在激光单道熔覆实验基础上,用 AutoCAD 软件对熔覆层横截面形状进行了模拟分析与表征,对熔覆层整体进行了三维建模。主要结论为:

- 1) 改进了熔覆层横截面形状表征方法,激光熔覆层横截面上部轮廓线可以用圆弧模拟。
- 2) 单道激光熔覆层可以近似等效为基体平面以上的两端半球面体加中间柱面体的三维结构。
- 3) 建立了单道熔覆层三维模型,其模拟结构重

量值和实验测量结果相差很小,该模型能很好地表征实际结构的几何特征。

参 考 文 献

- 1 Chen Jing, Tan Hua, Yang Haiou *et al.*. Evolution of molten pool shape in the process of laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):442~446
陈 静,谭 华,杨海欧等. 激光快速成形过程中熔池形态的演化[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):442~446
- 2 C. Lalas, K. Tsirbas, K. Salonitis *et al.*. An analytical model of the laser clad geometry [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007, **32**(1-2):34~41
- 3 U. de Oliveira, V. Ocelik, J. Th. M. De Hosson. Analysis of coaxial laser cladding processing conditions [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, **197**(2-3):127~136
- 4 Liu Xibin, Ding Weiping. Development and application of diode pumped solid state laser (DPSSL) [J]. *Transaction of Hunan Institute of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2005, **18**(3):50~58
刘喜斌,丁卫平. 激光二极管泵浦全固体激光器(DPSSL)的发展与应用[J]. *湖南理工学院学报(自然科学版)*, 2005, **18**(3):50~58
- 5 Wu Weihui, Yang Yongqiang. Application of a diode pumped laser to the selective laser melting processing [J]. *Electromechanical Engineering*, 2006, **35**(11):91~93
吴伟辉,杨永强. 半导体泵浦激光器在选区激光熔化工艺中的应用研究[J]. *机电工程技术*, 2006, **35**(11):91~93
- 6 R. Colaco, L. Costa, R. Guerra *et al.*. Laser processing: surface treatment and film deposition [J]. *NATO ASI Series E, Applied Sciences*, 1996, **307**:421
- 7 Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, Steve Corbin. 3D finite element modeling of laser cladding by powder injection; effects of laser pulse shaping on the process [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **41**(6):849~867
- 8 Charalabos Doumanidis, Yong-Min Kwak. Geometry modeling and control by infrared and laser sensing in thermal manufacturing with material deposition [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, **123**(1):45~52