

激光熔覆过程热力耦合有限元应力场分析*

郝南海, 陆 伟, 左铁钊

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022)

摘 要: 根据激光熔覆的特点, 建立了激光熔覆应力场分析模型, 对送粉激光熔覆过程应力场进行了有限元分析。分析结果表明, 熔覆结束后熔覆层处于拉应力状态, 但各个方向拉应力的不同。熔覆层材料沿熔覆方向发生的塑性拉伸变形, 是造成熔覆层开裂的主要原因。提高基体预热温度可有效避免熔覆层开裂。

关键词: 激光熔覆; 应力场; 有限元法

中图分类号: TG 156.99; TB115

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2005)01-0020-04

Thermal-mechanical Coupling Finite Element Analysis of Stress Field in Laser Cladding Process

HAO Nan-hai, LU Wei, ZUO Tie-chuan

(College of Laser Engineering Beijing University of Technology, Beijing 100022)

Abstract: According to the character of laser cladding, a finite element model for analyzing the stress field of laser cladding was built and laser cladding process with powder feeding was analyzed with the model. The analysis results show that, by the end of process the cladding layer is in tension stress state whereas the stress values are varied in different direction. Along the cladding direction, plastic tension strain appears which is the main cause of cladding layer cracking. The analysis results also show that enhancing preheating temperature is an effective way to avoid cladding layer cracking.

Key words: laser cladding; stress field; finite element method

0 引 言

激光熔覆技术是一项新兴的零件加工与表面改性技术, 具有稀释率低、热影响区小、与基体形成冶金结合、熔覆件扭曲变形小、过程易于实现自动化控制等优点。激光熔覆应用于废品件的修复, 可大量节约加工成本; 应用于快速制造金属零件, 可减少工件的制造工序, 缩短交货时间^[1]。

由于激光熔覆过程是个快速熔凝的过程, 各种参量的变化难以试验测定, 使得数值模拟方法在此领域有很大的应用空间。文中根据已有温度场分析结果^[2], 使用ANSYS有限元分析软件对激光熔覆过程的应力场进行分析。

1 分析方案

为简化分析过程, 作如下假设: ① 材料为各向同性; ② 不考虑熔池流体的流动, 将流体假设

成流动应力很低的固体; ③ 熔覆层及基材均采用弹塑性材料模型; ④ 忽略材料塑性变形的生热, 即采用热力弱耦合。

基材为 10 号普通碳素钢 (AISI1010)、熔覆层为 1Cr18Ni9 不锈钢(AISI302), 其力学性能参数见表 1~4^[3]。

表 1 10 号钢流动应力

Table 1 The flow stress of No.10 steel

参 数	1	2	3	4	5	6
温度/°C	20	800	900	1000	1100	1200
σ_s /MPa	155	70	48	41	24	14

表 2 1Cr18Ni9 不锈钢流动应力

Table 2 The flow stress of 1Cr18Ni9 stainless steel

参 数	1	2	3	4	5	6
温度/°C	20	800	900	1000	1100	1200
σ_s /MPa	205	158	110	59	36	22

应力分析网格与温度分析网格完全相同, 温度分析的结果作为载荷施加到应力分析模型中。为简

收稿日期: 2004-10-08; 修回日期: 2005-01-05

基金项目: *中国博士后科学基金资助项目(20040350259), 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(2004527)

作者简介: 郝南海(1963-), 男(汉), 山西沁县人, 副教授, 博士。

表 3 10 号钢力学性能

Table 3 The mechanical properties of No.10 steel							
泊松比	弹性模量/GPa				线膨胀系数/K ⁻¹		
	20℃	200℃	300℃	400℃	20℃	20~200℃	20~400℃
0.3	210	193	185	175	9.5×10^{-6}	11.8×10^{-6}	13.2×10^{-6}

表 4 1Cr18Ni9 不锈钢力学性能

Table 4 The mechanical properties of 1Cr18Ni9 stainless steel					
泊松比	弹性模量/GPa	线膨胀系数/K ⁻¹			
		20~100℃	20~200℃	20~300℃	20~400℃
0.3	206	16.0×10^{-6}	16.8×10^{-6}	17.5×10^{-6}	18.1×10^{-6}

化计算，取模型的 1/2 进行分析，将对称面上各节点垂直于对称面方向的位移约束为零，其中位于端部的节点则面上位移也设为零。图 1 为分析用有限元网格。

与温度场分析过程类似，应力场分析同样采用了单元“生”和“死”(Birth and Death)的功能来实现熔覆粉末的添加。

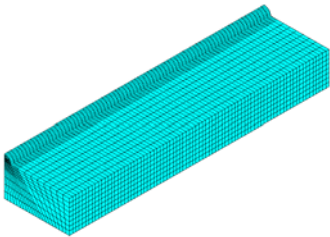


图1 有限元网格
Fig.1 Finite element mesh

2 分析结果与讨论

图 2 为激光功率 720 W,光束移动速度 1 mm/s,基体不预热条件下熔覆层中心点应力变化情况。该点位于熔覆层的中心位置，熔覆时，激光移入又移出，光斑中心在 40 s 时通过该点。该点所在单元在 38 s 时被激活，温度迅速上升，至 40 s 时到达最高值，随后又迅速下降。在 38~43.5 s 时间段内温度均高于 1 400 ℃，材料处于融化状态，流动应力很低。43.5 s 时温度降到 1 400 ℃，材料开始凝固，流动应力回升。降温过程中，材料冷却收缩，但收缩行为不是自由的，受到基材或自身温度不均匀的限制，处于拉应力状态。各个方向对收缩的约束程度不同，拉应力大小也不同。长度方向最大，宽度

方向次之，高度方向最小。

在塑性范围内，拉应力的数值取决于材料的流动应力，随温度的下降，流动应力上升，拉应力表现为上升趋势，当材料进入弹性状态后，拉应力数值不再随温度的下降而上升，反而开始下降。应力曲线呈现为先升后降的趋势。

实际上，主导熔覆层应力水平的因素有两个，一个是熔层与基材的温度差，另一个是两种材料的热膨胀系数。温度的差异导致了冷却程度的差异而造成收缩不同步，决定着冷却过程中熔层拉应力的水平。另一方面，当冷却过程趋于尾声时，温度差已很小，但同时凝固的熔层与基材会由于收缩程度不同而产生一定的内应力。文中所选用的熔层材料为 1Cr18Ni9 不锈钢，其热膨胀系数大于基材 10 号普通碳素钢的热膨胀系数，这一因素导致熔层的拉应力有所上升，应力曲线出现“翘尾”。

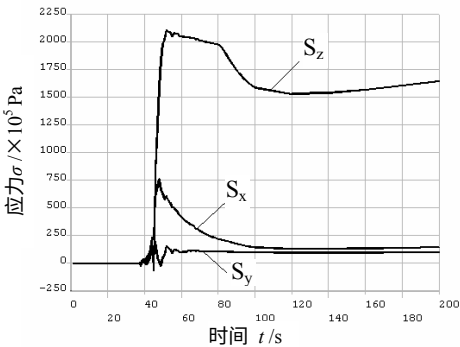


图 2 应力变化情况
Fig.2 Variation of stress

图 3 至图 5 分别为熔覆层中心点 x 向、y 向和 z 向的应变变化情况，包括热应变、弹性应变、塑性应变和总应变，而总应变等于热应变、弹性应变、

塑性应变三者之和。对于熔覆层而言,温度高于 1400 °C 时材料处于融化状态,从力学角度看,其变形情况对凝固后材料的变形并无影响。文中将 1 400 °C 时材料的各项应变均设定为零,所绘制的应变曲线将能够真实地反映熔覆层的变形情况。

对于激光熔覆过程,影响应变变化的主要因素有两个,一个是温度的变化情况,即变形驱动力的变化,另一个是变形所受到的约束情况,即变形的阻力。

由于热应变正比于温度变化,故图 3 至图 5 中的热应变曲线完全相同。总的说来,随温度的下降,材料将发生冷却收缩,总应变曲线呈下降趋势,且均为负值。但各个方向总应变的数值并不相同,也就是说各个方向实际的收缩程度不同。

导致各个方向收缩程度不同的原因是各个方向变形阻力的不同,变形阻力长度方向(Z)最大,宽度方向(X)次之,高度方向(Y)最小。计算结果恰好反映了这一点,即高度方向总应变最大,宽度方向次之,长度方向最小。

在所有应变分析结果中,塑性应变的变化情况是最值得关注的,其原因在于塑性应变的大小与熔覆层是否开裂直接相关。由计算结果可以看出,对于单道熔覆,长度方向塑性应变为正,材料产生塑性伸长变形。宽度方向的塑性应变则先正后负,即先延伸后收缩,最终表现为塑性压缩变形。高度方向塑性应变始终为负值,即发生压缩变形。

由于弹性应变很小,总应变与热应变的差异可被视为塑性应变。温度下降时,材料发生冷却收缩,但收缩并非任意的,而是受到周围材料的约束,材料处于拉应力状态,若拉应力足够大,材料将沿某一方向发生塑性伸长,抵消一部分冷却收缩。

受体积不变条件的限制,一个方向上的塑性伸长将由其它方向上的塑性压缩来补偿,即 3 个方向上的塑性应变不可能同号。长度方向材料受到的收缩阻力最大,即拉应力最大,使材料产生拉伸塑性变形。高度方向收缩阻力最小,受体积不变条件约束,产生压缩塑性变形。宽度方向收缩阻力大小处于其它两个方向收缩阻力之间,材料先伸后缩,具体变化趋势取决于该方向应力偏量的正负变化。

分析结果表明,激光熔覆过程中,熔覆层材料沿长度方向发生塑性拉伸变形,且数值最大。而激光熔覆实验显示,单道熔覆时的裂纹均为横向裂

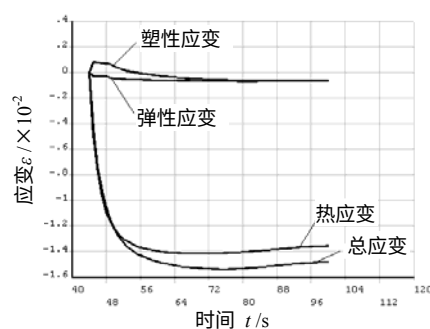


图 3 沿 x 轴方向应变变化情况

Fig.3 Variation of strain in X direction

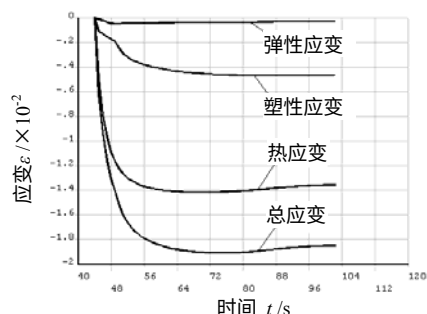


图 4 沿 y 轴方向应变变化情况

Fig.4 Variation of strain in Y direction

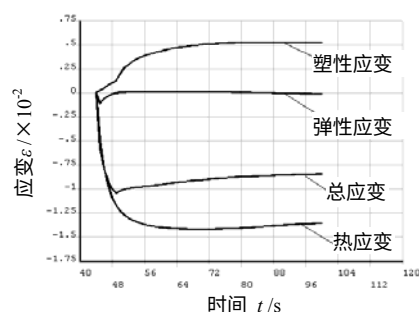


图 5 沿 z 轴方向应变变化情况

Fig.5 Variation of strain in Z direction

纹,即裂纹方向垂直于熔覆方向。结合理论分析与试验结果,可以认为长度方向的塑性拉伸变形是造成熔覆层开裂的主要原因。

在熔覆层的冷却过程中,若材料的塑性拉伸变形小于材料的最大允许变形,则不发生开裂。反之,若塑性拉伸变形大于材料的最大允许变形,则发生开裂。由于材料最大允许变形与温度相关,故必须结合温度变化情况判断熔覆层开裂行为。

文献[4]给出了热裂纹的一种判断方法,如图 6 所示。横坐标表示温度,数值从左到右减小;纵坐标为延伸率。图中带阴影曲线表示材料最大允许塑性变形量随温度的变化。对于实际熔覆过程,随温

度下降, 塑性应变增长, 增长幅度与材料本身的性质、工件形状和熔覆工艺有关。若应变增长为直线 1, 不会产生裂纹; 若为直线 3, 将产生裂纹; 直线 2 为临界应变增长率 (Critical Strain rate for temperature drop, CST), 取决于材料的成分, 反映了材料的裂纹敏感性。

结合有限元分析与 CST 曲线测定,可以建立一种判别熔覆层开裂行为的理论方法。即首先通过材料实验获得熔覆层材料的 CST 曲线,再利用有限元法得出熔覆过程中塑性应变随温度变化的关系曲线,将二者进行对比即可判断出熔覆过程中是否产生熔覆层开裂。这些工作将在今后开展。

图 7 为通过计算得到的不同预热温度下塑性应变随温度的变化情况。由图可见,随着预热温度的升高,应变相对于温度变化而发生的改变趋缓,降低了熔覆层开裂的倾向,表明基体预热是避免熔覆层开裂的有效手段。

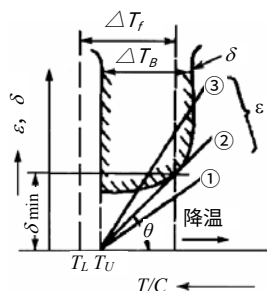


图 6 裂纹产生条件

Fig.6 Criterion of cracking

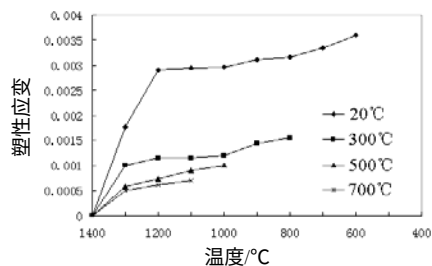


图 7 不同预热温度下塑性应变变化曲线

Fig.7 Variation of plastic strain with different preheated temperature

3 结 论

激光熔覆过程应力场有限元分析结果表明,熔覆结束后熔覆层处于拉应力状态。但各个方向拉应力的太小不同,长度方向最大,宽度方向次之,高

度方向最小。熔覆层材料沿熔覆方向发生塑性拉伸变形,是造成熔覆层开裂的主要原因。提高基体预热温度可有效避免熔覆层开裂。

参考文献:

- [1] 郭伟,徐庆鸿,田锡唐. 激光熔覆的研究发展状况[J]. 宇航材料工艺, 1998, 12(2):33-35.
- [2] 郝南海,陆伟,左铁钊. 激光熔覆过程热力耦合有限元温度场分析[J]. 中国表面工程, 2004,17(6):10-14.
- [3] 方昆凡. 工程材料手册·黑色金属材料卷 [M]. 北京:北京出版社, 2002.
- [4] 左铁钊,等. 高强铝合金的激光加工 [M]. 北京:国防工业出版社, 2002.

作者地址：北京市朝阳区平乐园 100 号 100022

北京工业大学激光工程研究院

Tel: (010) 67396558 E-mail: n_hao@bjut.edu.cn

(上接第 19 页)

- [6] 姚广涛, 姚春德, 刘爱诗. 减磨型机油添加剂在汽车发动机无水状态下运行作用效果的研究 [J]. 润滑与密封, 2004(4):53-54.
- [7] 张正业, 杨鹤, 李生华, 等. 金属磨损自修复剂在 DF 型铁路机车柴油机上的应用研究 [J]. 润滑与密封, 2004(4):75-76.
- [8] 金元生. 铁谱技术及在磨损研究中的应用 [M]. 机械工业出版社, 1991.
- [9] 张鄂. 铁谱技术及其工业应用 [M]. 西安交通大学出版社, 2001.
- [10] 杨其明. 磨粒分析—磨粒图谱与铁谱技术 [M]. 中国铁道出版社, 2002.

作者地址：北京海淀区学院路 29 号 100083

Tel: (010)81988101(小灵通); 13810781318

E-mail: gu_yanhong@163.com

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

•学术动态•

第 16 届世界腐蚀大会将在北京召开

由中国腐蚀与防护学会主办的第16届世界腐蚀大会定于2005年9月19~24日在北京举行。该会由中国科学院金属研究所和北京科技大学协办,已发第一轮通知。

