

多道搭接激光熔覆层开裂的机理和试验分析

陈 列 陶 然* 娄德元 吴 颖 杨奇彪

湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068

摘要 利用数值分析和试验相结合的办法,对多道搭接激光熔覆层的开裂机理和规律进行了研究。数值分析结果表明,激光熔覆后,熔覆层内部呈明显的拉应力状态,且主要集中在熔覆层底部与基体的交界处,因此单道熔覆时熔覆层的开裂倾向主要是垂直于扫描方向。在两道搭接熔覆时,前一次熔覆输入试样的激光能量在试样内部传递和扩散已有一定的时间,试样的整体温度升高后,第二次熔覆时激光能量输入产生的热量在试样内部形成的温度梯度就会有所减小,从而降低了工件内部的应力水平。两道熔覆完成后,由于熔覆层在扫描所受的拉应力降低的幅度最大,而垂直于扫描方向所受的拉应力变化不大,此时若熔覆层开裂,则开裂的方向将不再是垂直于扫描方向,而是会与扫描方向成一定的夹角。实际熔覆中,对单道、多道熔覆时熔覆层的开裂现象进行了观察,试验结果与分析结果较好地吻合。

关键词 激光技术;激光熔覆;熔覆层开裂;多道搭接

中图分类号 TG156.99 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP51.101401

Analysis of the Mechanism Cracking During the Multipass Laps Cladding Experiment

Chen Lie Tao Ran Lou Deyuan Wu Ying Yang Qibiao

School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

Abstract The mechanism and conditions giving rise to cracking during multipass laps laser cladding are investigated by finite element analysis software. Numerical analysis, combined with experimental observations, is also utilized. Calculations reveal that tensile stress is brought inside the cladding layer, and is mostly concentrated at the boundary of the substrate and the bottom of the layer. Thus, a tendency to crack takes place perpendicular to the laser scanning direction. In addition, preheating improves the process by reducing the thermal stresses in the first cladding. After cladding the parts twice, the stress of the cladding layer is decreased more rapidly than the stress of the scanning direction. Cracking is formed at a certain angle to the scanning direction. The reliability and the accuracy of the model are experimentally verified.

Key words laser technology; laser cladding; cracking layer; multipass laps cladding

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 140.3470

1 引言

激光熔覆^[1-2]是一种可以在低成本基体表层制成高性能表面的表面工程技术,由于其热影响区小、熔覆层与基体可形成冶金结合等特点,使其越来越多地在工业、军事等领域得到广泛应用^[3-4]。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,因此许多研究者一直在熔覆层的开裂机理、抑制熔覆层开裂等方面进行积极的研究和探索^[5-8]。

对熔覆层裂纹问题的研究,目前研究最多的是单道激光处理工艺中垂直于激光扫描方向的裂纹,这主要是因为这类裂纹在熔覆过程中较易被发现和检测出来,也是最常见的裂纹形态。裂纹的产生一般存在由萌生到扩展这一过程:从显微裂纹的萌生,到稳态扩展成为宏观裂纹,再到失稳扩展造成工件失效,在后面两个阶段,熔覆层内的应力分布状态起着决定性的作用。而在激光熔覆过程中,高能密度的激光束对熔覆

收稿日期: 2014-02-15; 收到修改稿日期: 2014-03-15; 网络出版日期: 2014-08-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51405141)、国家自然科学基金青年基金(11204071)、湖北工业大学博士科研启动基金(BSQD13025)

作者简介: 陈 列(1983—),男,博士,讲师,主要从事表面工程和激光熔覆等方面的研究。

E-mail: cangn1983@163.com

* 通信联系人。E-mail: taoran888@sina.cn

材料的快速加热熔化,将使熔覆层与基体材料之间产生极大的温度梯度。随着激光束的移开,熔化了了的熔覆材料和基体表层材料迅速混合、冷却、凝固,由于基体与熔覆层之间存在物理特性的差异,形成的温度梯度将会造成两者体积胀缩的不一致,它们之间互相牵制,从而在熔覆层内以及熔覆界面以下一定深度的基体材料内形成内应力。熔覆层内的应力一般来说是拉应力,而当局部的应力值超过材料的强度极限时,就会导致熔覆层的撕裂,并出现裂纹。

相较而言,对于多道搭接熔覆过程,由于每道熔覆层之间的相互影响,以及基体温度的变化等因素,熔覆层以及集体内部的应力状态和变化都将更加复杂,因此熔覆层的开裂倾向、裂纹的生长趋势等较单道熔覆时都有较大的区别,而在此方面的研究也相对较少。本文正是针对多道搭接时熔覆层的开裂问题,通过数值计算的方法,讨论其应力场变化的特殊规律,并通过实际熔覆试验,分析其开裂的具体规律,作为进一步研究控制其开裂倾向的依据。

2 试验材料及工艺

结合计算成本和试验验证的需要,在激光熔覆温度场的计算中选取的试样尺寸为 20 mm×20 mm×10 mm,基体和熔覆粉末材料分别为 45#钢和 Ni60 合金粉末,且它们的力学性能参数如表 1、表 2 所示。所使用的设备为 HJ-3 型激光加工机,配备 2 kW 横流 CO₂激光器、JKJ-6 型激光头、JKF-6 型激光熔覆自动送粉器、西门子 802C 数控系统和四轴三联动数控机床。采用的熔覆工艺参数分别是激光功率为 1000 W,送粉率为 3 g/min,离焦量为 180 mm,光斑为圆形光斑,直径为 4 mm,扫描速率为 2.5 mm/s,搭接率约为 50%。

表 1 镍基合金粉末的力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of Ni-based alloy powder in calculation

Temperature $T/^\circ\text{C}$	Poisson ratio μ	Expansion coefficient $\alpha/(10^{-6}/^\circ\text{C})$	Elasticity modulus $E/(10^5 \text{ MPa})$	Yield stress σ_s/MPa
20	0.28	12.3	1.91	789
250	0.29	12.9	1.69	645
500	0.30	14.1	1.47	457
750	0.32	15.4	1.21	287
1000	0.38	16.2	1.09	152

表 2 45#钢的力学性能参数

Table 2 Mechanical properties of 45 steel in calculation

Temperature $T/^\circ\text{C}$	Poisson ratio μ	Expansion coefficient $\alpha/(10^{-6}/^\circ\text{C})$	Elasticity modulus $E/(10^5 \text{ MPa})$	Yield stress σ_s/MPa
20	0.28	11	2.05	220
250	0.29	12.2	1.87	175
500	0.31	13.9	1.5	130
750	0.35	14.8	0.7	40
1000	0.4	13.4	0.2	25
1500	0.45	13.3	0.19	2
1700	0.48	13.2	0.18	1
2500	0.5	13.1	0.12	0.1

3 试验结果分析

已有研究表明^[9],激光熔覆后试样内部的温度场、应力场分布状态,对熔覆层的开裂行为起到主要作用。在分析多道熔覆中熔覆层的开裂规律时,也是主要由此出发,借助有限元分析软件 ANSYS,对多道搭接熔覆过程中,试样内部的温度场和应力场进行数值分析,借此分析多道搭接激光熔覆层开裂行为的特殊规律。当前对激光熔覆应力场的计算方法一般分为直接耦合法和间接法,这里采取的是间接法,即先计算出激光熔覆的温度场结果,再将其作为载荷,计算工件的应力场分布情况。根据试验的经验,假设熔覆层截面形状为宽 4 mm、高 1 mm 的圆弧面,考虑两道熔覆层搭接的熔覆情况,其几何模型和网格划分情况分别如图

1、图2所示。

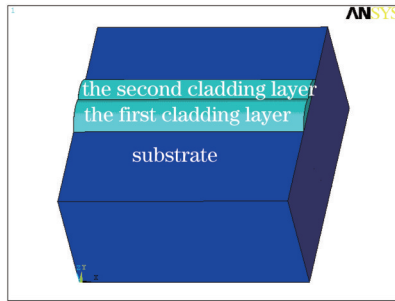


图1 样块计算的几何模型

Fig.1 Geometrical model of sample

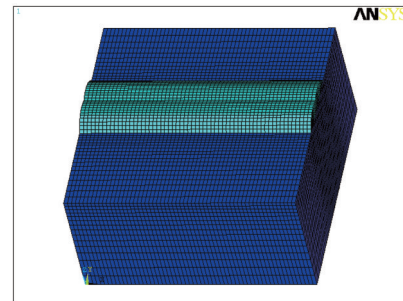


图2 有限元网格划分情况

Fig.2 Finite element meshing of sample

3.1 多道激光熔覆过程温度场数值分析

模拟计算中采取的激光熔覆具体参数为激光功率 $P = 1000 \text{ W}$, 激光能量呈高斯分布, 光斑直径 $D = 4 \text{ mm}$, 试件移动速率(即扫描速率) $V_s = 2.5 \text{ mm/s}$, 假设基体对激光能量的吸收率 $\alpha_m = 0.5$ 。第一道熔覆时样块在各时刻的温度场分布情况如图3所示。

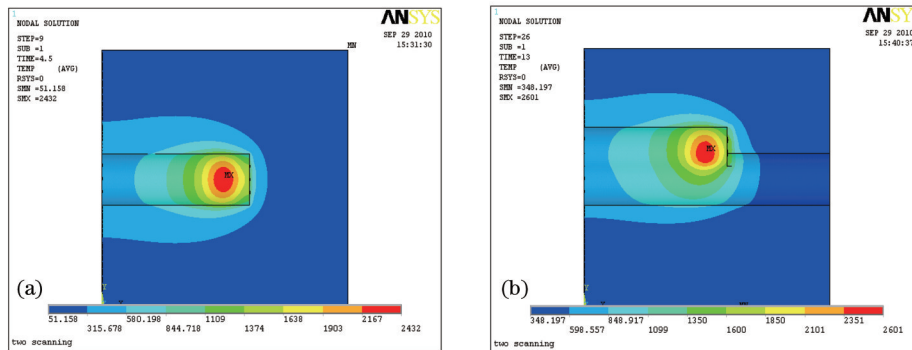


图3 两道搭接激光熔覆的温度场计算结果。(a) $t = 4.5 \text{ s}$; (b) $t = 13 \text{ s}$

Fig.3 Temperature field results of two-pass laser cladding. (a) $t = 4.5 \text{ s}$; (b) $t = 13 \text{ s}$

为了更好地观察扫描过程中熔池内的温度分布情况,可提取 t 为 4.5 s 和 13 s 时刻,光斑中心垂直于 X 轴和 Y 轴剖面处的温度分布状态,如图4所示。

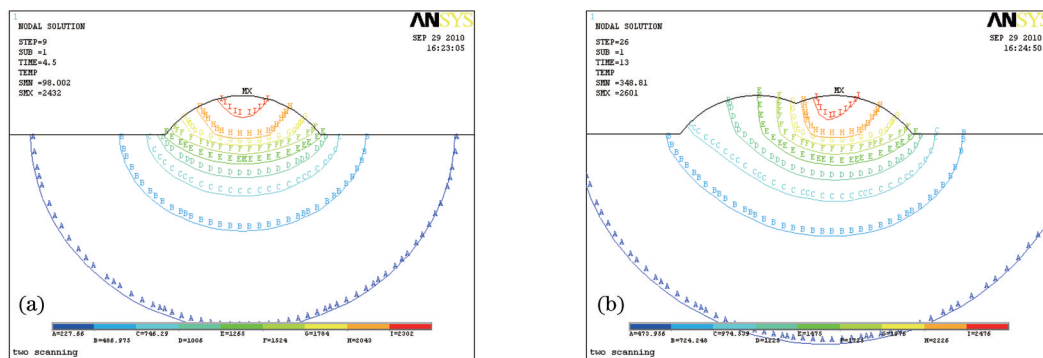


图4 光斑中心剖面的温度分布(垂直于 X 轴)。(a) $t = 4.5 \text{ s}$; (b) $t = 13 \text{ s}$

Fig.4 Temperature distribution at the center of laser facula (vertical to X axis). (a) $t = 4.5 \text{ s}$; (b) $t = 13 \text{ s}$

从图4中看到, $t = 4.5 \text{ s}$ 时在熔覆层两侧与基体交界处的温度已经超过 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$, 高于熔覆层和基体材料的熔点, 说明在计算所采取的熔覆参数条件下, 熔覆粉末和基体表层已完全熔化, 满足了形成冶金结合的基本条件, 此外激光输入产生的热量大量集中在熔覆层内部, 将导致在熔覆层内出现较大的温度梯度。在第二道熔覆时, 由于激光能量的不断输入, 而试样向外部环境释放热量的速度远小于激光能量输入的速度, 熔池最高温度以及基体的温度较前一次都有了一定的增加, 试样的整体温度已经上升至 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 这在一定程度上起到了对基体预热的效果。

3.2 多道激光熔覆过程应力场数值分析

将3.1节计算得到的温度场数值结果转换为载荷,施加在各节点上,从而求解得到各个时刻的应力场分布。由于实际激光熔覆中,试样的底部是固定在工作台上的,结合这一情况,对样块模型实施热应力计算时,对于模型边界的约束条件作以下假设:1)只在基体底面上施加沿Z方向的位移约束条件,约束条件为 $Z=0$;2)模型的其他表面为自由约束。

图5为第一道熔覆完成后的试样在X轴、Y轴和Z轴方向上的应力分布情况。从结果来看,在激光熔覆完成后,试样内部的应力水平在各个方向的分量中,X轴方向的应力水平最大,总体呈拉应力水平,最大值达到了280 MPa,并主要分布在熔覆层的两侧,虽然该拉应力值还未达到45#钢的拉伸极限,但若在该区域出现气孔、夹杂等敏感源,则极易成为裂纹的起源。

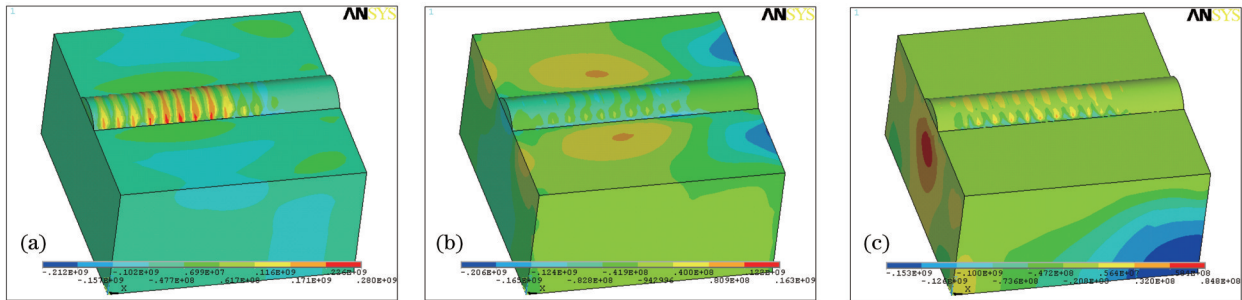


图5 第一道熔覆完成后的应力场分布。(a) X轴方向;(b) Y轴方向;(c) Z轴方向

Fig.5 Stress distribution after first scanning of laser cladding. (a) X axis; (b) Y axis; (c) Z axis

一般来说,沿扫描方向(X轴正向)的应力分布状态是研究者最为关心的,因为这一部分的应力状态往往对熔覆层的开裂状况产生决定性的影响,结合工程实际以及试验分析中的需要,分析过程中,也着重考虑该方面的应力状况。为了观察在整个熔覆过程中,试样内部应力场的变化规律,可单独提取 $x=1$ mm处试样横截面在各个时刻的应力场情况,如图6所示。

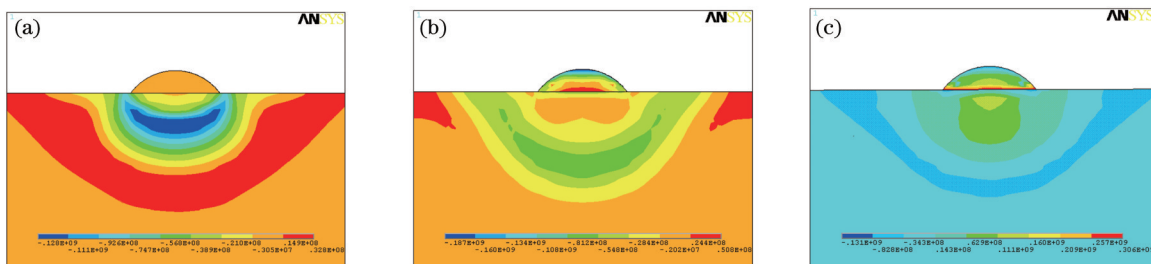


图6 $x=1$ mm横截面处的X轴方向应力分布。(a) $t=1$ s;(b) $t=2.5$ s;(c) $t=5$ s

Fig.6 Distribution of X direction stress on cross-section plane where $x=1$ mm. (a) $t=1$ s; (b) $t=2.5$ s; (c) $t=5$ s

到了 $t=1$ s时刻,该截面基本处于激光光源的中心,其表面的温度将上升至最高。熔池内的液态金属只呈现极低的流动应力,因此其内部的总体应力水平较低。而此时基体表面的温度梯度较大,表层的金属受到加热需要膨胀,但又受到周围基体的限制和挤压,因此在熔池底部的热影响区内会出现明显的压应力。同样,热影响区以外,由于受到表层的膨胀拉伸作用而产生了明显的拉应力作用。在远离基体后,由于温度分布的相对均匀,在基体内部的应力水平又明显降低。

$t=2.5$ s时刻,激光光斑已经离开该截面,熔化的熔覆层和基体表层开始冷却、凝固,此时该处的应力分布规律也发生了改变。熔覆层和基体虽然同时降温收缩,但由于熔池内液态金属是由底部至表面逐步冷却和凝固的。熔覆层与基体结合部位的金属最先开始凝固,但是由于两者的热膨胀系数有差异,熔覆层底部的收缩速率要大于基体表层的收缩速率,基体表层将阻碍熔覆层的收缩,因此,在两者的结合部位会出现两种相反的应力状态,在熔覆层一侧呈明显的拉应力,而基体一侧则出现压应力状态。此外,由于此时激光熔覆的过程仍在继续,后续的熔覆层由于受热膨胀,将给之前所形成的熔覆层一个压应力。而熔覆层的表面为自由表面,最容易受到这种压应力的影响,因此此时在熔覆层的表层会出现明显的压应力状态。

$t=5$ s时刻,激光光斑已完全移出,该处的熔覆层已完全凝固,熔覆层受到后续熔覆膨胀的影响也逐渐减

弱,但由于熔覆层和基体的降温 and 收缩速率的差异,熔覆层内的拉应力分布区域将极大地聚集在熔覆层底部,且拉应力值也进一步增加。此外,由于熔覆层的两端受到的约束较小,其内部的应力可以以塑性变形的形式最先得到释放,因此待熔覆层全部凝固后,熔覆层内最大拉应力不会发生在熔覆层的两端,而是会向中段靠拢,这一点从图5(a)中可以得到验证。

再来观察第二道熔覆完成后,试样在各方向上的应力分布状态,如图7所示。从整体上看,第二道熔覆完成后,熔覆层整体仍是处于拉应力状态,在各方向的应力水平中, X 轴方向的应力仍是最大。所不同的是,第二道熔覆完成后,熔覆层内 X 方向的最大拉应力由第一次熔覆后的280 MPa降至174 MPa, Y 方向的拉应力由163 MPa降至124 MPa,而 Z 方向拉应力的变化程度则并不明显。

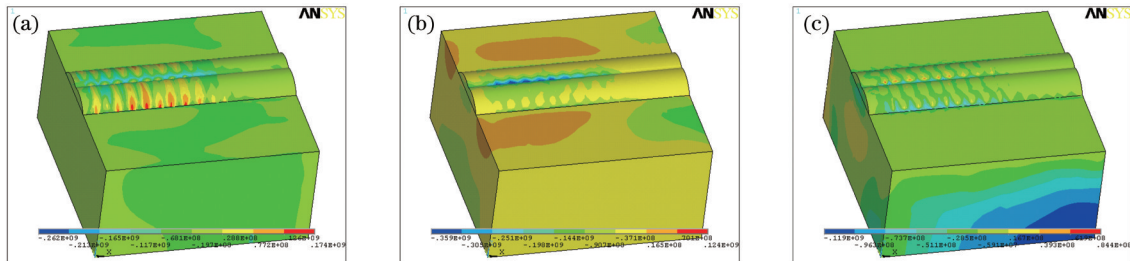


图7 第二道熔覆完成后的应力场分布。(a) X 轴方向;(b) Y 轴方向;(c) Z 轴方向

Fig.7 Stress distribution after second scanning of laser cladding. (a) X axis; (b) Y axis; (c) Z axis

这主要是由于在第二次熔覆时,前一次熔覆输入试样的激光能量在试样内部传递和扩散已有一定的时间。试样的整体温度升高后,激光能量输入后产生的热量在试样内部形成的温度梯度就会有所减小,从而降低了工件内部的应力水平。这一现象也解释了预热作用对于改善试样内部应力分布状态的效果。

第二道熔覆完成后,由于熔覆层在其长度方向(X 方向)所受的拉应力降低的幅度最大,而宽度方向(Y 方向)所受的拉应力仍然较大,因此熔覆层在 XOY 平面内的所受的合力方向将偏向 Y 轴一侧,此时若熔覆层开裂,则开裂的方向将不再是垂直于扫描方向,而是会与扫描方向成一定的夹角。

3.3 多道激光熔覆中熔覆层开裂的试验分析

在试验过程中一共选用了6组试样进行研究,通过改变激光功率、送粉速率、单道或多道熔覆等工艺参数的组合,分别观察和比较各组试样上出现的裂纹情况,具体实验结果如表3所示。

表3 激光熔覆工艺参数及对比试验结果

Table 3 Laser-cladding process parameters and experimental results

Sample NO.	Power /W	Feeding rate /(g/min)	Cladding method	Cracking NO.
1	1500	3	single	3
2	1500	4.5	single	3
3	1500	6	single	4
4	1650	6	single	4
5	1800	6	single	5
6	1500	6	6 times multipass	5

由表3可看出1~5号试样表面都出现了裂纹。送粉率越大,熔覆层越厚,功率越高,裂纹条数也就越多。这些裂纹大部分起始于熔覆层与基体的交界面并向上发展而穿过整个熔覆层,少量裂纹仅出现在熔覆层上部,没有贯穿到底部(如图8所示),所有裂纹均终止于界面,没有向基体穿透。大部分裂纹产生于熔覆过程中,少量裂纹出现在光斑离开熔覆层之后一定时间并发出清脆的开裂声,个别裂纹发生在扫描完成后的冷却过程中,裂纹断口具有脆性断裂特征。

在多道搭接熔覆层中,在第一道的裂纹走向几乎还是垂直激光扫描方向,但是随后的几道中,裂纹走向渐渐向激光扫描方向偏转,整个裂纹沿与激光扫描方向成一小于 90° 的锐角方向扩展,裂纹偏转一定的程度后不再偏转,同一熔覆层中的裂纹最终走向几乎平行。而且在多道搭接激光熔覆中,裂纹一旦形成,极易扩展成贯穿裂纹,比如在图9中,几乎每一道裂纹都贯穿了所有六道熔覆层。



图8 单向送粉单向扫描产生的裂纹形状

Fig.8 Cracking morphology when single lap cladding by single-pass scanning

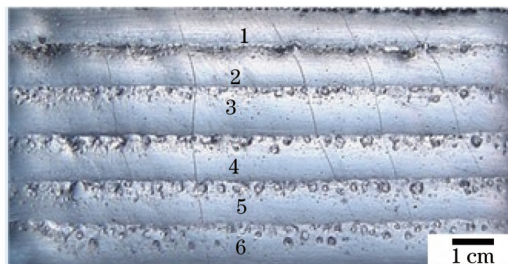


图9 单向扫描多道搭接整面熔覆时裂纹的传递

Fig.9 Cracking propagation when multipass laps cladding by single-pass scanning

4 结 论

1) 单道搭接激光熔覆时,试样内部的应力水平在各个方向的分量中,沿扫描方向的应力水平是最大的,且总体呈拉应力水平,尤其是在熔覆层的两侧,拉应力值明显较大。因此单道熔覆层裂纹的产生一般起源于与基体的结合部位,并沿着垂直于扫描方向延伸。

2) 两道搭接熔覆时,由于前一次的熔覆事实上起到了对基体预热的作用,第二次熔覆时,激光输入产生的温度梯度下降,因此熔覆层内的整体拉应力水平有所下降,沿扫描方向的拉应力下降最大,因此裂纹的生长方向将向垂直于扫描方向偏转。

3) 多道激光熔覆中熔覆层开裂的试验结果与理论分析的结果较好地吻合,且发现随着送粉率和激光功率的提高,熔覆层的开裂倾向也呈上升趋势。

参 考 文 献

- Xu Binshi. Remanufacturing engineering and the automation technology of the surface engineering[J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(1): 9-14.
徐滨士. 再制造工程与自动化表面工程技术[J]. 金属热处理, 2008, 33(1): 9-14.
- Yao Ningjuan, Hou Liqun, Lu Wei, *et al.*. Study on laser cladding process on large Area[J]. China Surface Engineer, 2002, (2): 1-3.
姚宁鹃, 侯立群, 陆 伟, 等. 大面积激光熔覆的工艺研究[J]. 中国表面工程, 2002, (2): 1-3.
- Xu Binshi, Tan Jun, Chen Jianmin. Science and technology development of surface engineering[J]. China Surface Engineer, 2011, 24(2): 1-11.
徐滨士, 谭 俊, 陈建敏. 表面工程领域科学技术发展[J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 1-11.
- Chen Lie, Gu Chengzhong, Xie Peilin. Numerical analysis of temperature field in laser cladding on tooth surface of helical gear shaft[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0303006.
陈 列, 古成中, 谢沛霖. 斜齿轮轴齿面激光熔覆过程中温度场的数值分析[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0303006.
- Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Wang Jingwen, *et al.*. A method of crack control in laser cladding process with changing power density distribution of laser beam[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0103004.
王东生, 田宗军, 王泾文, 等. 一种通过改变激光功率密度分布控制熔覆层裂纹的方法[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0103004.
- Zhang Xiaodong, Dong Shiyun, Xu Binshi, *et al.*. Microstructure and performance of D577 Fe-based alloy laser cladding coating[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(s1): s100122.
张晓东, 董世运, 徐滨士, 等. D577铁基合金激光熔覆层组织及性能研究[J]. 光学学报, 2011, 31(s1): s100122.
- Qiu Xingwu, Liu Chung. Microstructure and properties of multicrack over lapped laser cladding NiCrBsi alloy coating [J]. Material Protection, 2011, 44(6): 62-64.
邱星武, 刘春阁. 多道搭接激光熔覆 NiCrBSi 合金层组织及性能[J]. 材料保护, 2011, 44(6): 62-64.
- Li Yangliang, Xu Minghan, Peng Xifeng. Microstructure and wear resistance of multicrack laser clad on Titanium alloys [J]. Applied Laser, 2007, 27(4): 305-309.
李养良, 徐明晗, 彭西峰. 多道搭接钛合金激光熔覆层组织与耐磨性研究[J]. 应用激光, 2007, 27(4): 305-309.
- Shi Xiumei, Yuan Shuqiang, Yi Yinghui, *et al.*. Study on factors influencing the crack in laser cladding[J]. Precision Forming Engineering, 2012, 4(6): 114-117.
史秀梅, 袁书强, 依颖辉, 等. 激光熔覆层开裂影响因素的探讨研究[J]. 精密成形工程, 2012, 4(6): 114-117.