doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.06.016

激光熔覆工艺参数对 CBN 膜层裂纹率的影响

赵树国,李成龙

(沈阳航空航天大学 机电工程学院, 沈阳 110136)

摘要:在TC11表面激光熔覆制备CBN 膜层,通过研究激光工艺参数与裂纹率关系,控制熔覆层裂纹的产生。采用 正交试验,并利用ANSYS软件平台对温度梯度进行研究,利用SEM、EDS 对熔覆层截面形貌和成分进行分析。结果表 明:对于熔覆层宏观裂纹,随着激光能量密度的增大,裂纹率明显下降,熔覆层质量变好,在激光能量密度为 6×10⁴ J/cm² 送粉率为1 r/s 时涂层质量较好;随着扫描速度增大时,裂纹率呈上升趋势,在扫描速度为 3 mm/s、送粉率为1 r/s 时裂 纹率较小;随着送粉率增加,裂纹率先增加后减小,在送粉率为 2.25 r/s、激光能量密度为 3.4×10⁴ J/cm² 达到最大。对 于熔覆层微观裂纹,随着激光功率增加,裂纹率先减小后增加,激光功率为 1 800 W 时,裂纹率达到最低;随着扫描速度 增加,裂纹率也是先减小再增加,扫描速度为 4 mm/s 时,裂纹率达到最低。经过 SEM 与 EDS 分析,通过调整激光熔覆 工艺参数,控制熔覆过程中温度场的温度梯度,进而控制熔覆层的裂纹率,可以获得形貌与组织成分良好的涂层。

关键词:激光熔覆;数值模拟;裂纹率;宏观裂纹;微观裂纹

中图分类号: TG174.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2015)06-0119-08

Relationship Between Crack Rate of CBN Coating and Parameters of Laser Cladding

ZHAO Shu-guo, LI Cheng-long

(School of Mechatronics Engineering, Shengyang Aerospace University, Shengyang 110136)

Abstract: Laser cladding technique was used to prepare CBN film on the surface of TC11, the relationship between laser parameters and crack rate was studied to control cracks of the cladding layers. ANSYS software was used to study the temperature gradient by orthogonal experiments, and the morphology and component of cladding layer section were analyzed by SEM and EDS observation. Results show that the macro crack rate significantly decreases with the increase of laser energy density, resulting in a better cladding layer, and the optimized parameters are the laser energy density of 6×10^4 J/cm² and the powder feed rate of 1 r/s. Crack rate increases with the increase of the powder feed rate, reaching a peak value under a powder feed rate of 2. 25 r/s and laser energy density of $3. 4 \times 10^4$ J/cm². As to the micro crack of the cladding layer, the crack rate decreases first and then increases with the increase of the laser power and scanning velocity, reaching a minimum value at laser power of 1800 W and scanning velocity of 4 mm/s. SEM and EDS analysis showes that the crack rate can be restrained and the layer with good morphology and component can be obtained by adjusting of the laser cladding parameters and controlling the temperature gradient.

Keywords: laser cladding; numerical simulation; crack rate; macro-cracks; micro-cracks

通讯作者:赵树国(1963-),男(汉),教授,博士;研究方向:机械表面效应与表面技术;Tel:(024)89724208;E-mail:zhaoshuguo_63@
 163.com

网络出版日期: 2015-12-09 08:35; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20151209.0835.012.html

引文格式:赵树国,李成龙.激光熔覆工艺参数对 CBN 膜层裂纹率的影响 [J].中国表面工程,2015,28(6):119-126. Zhao SG, Li C

L. Relationship between crack rate of CBN coating and parameters of laser cladding [J]. China Surface Engineering, 2015, 28 (6), 119-126.

收稿日期: 2015-04-27; 修回日期: 2015-10-12; 基金项目: * 辽宁省自然科学基金(201202172)

0 引 言

钛合金具有比强度高、屈强比高、耐蚀性优 异以及良好的生物相容性等一系列优点,在航空 航天、汽车及医疗器械等领域中得到了广泛的应 用^[1]。且近几年对于钛合金的表面修复技术、抗 点燃性能等一系列研究也取得了较大进展^[23]。 但钛合金耐磨性差、硬度相对较低等缺陷仍然限 制了其更为广泛的应用。随着激光熔覆的不断 发展,利用该技术逐渐成为解决钛合金性能缺陷 问题的重要手段。

由于激光熔覆技术自身就具有高脆性低韧性的特点,使得材料不能承受较大拉应力,所以裂纹产生的倾向性就会增大^[4],因此钛合金表面熔覆层的裂纹情况也是钛合金激光熔覆改性技术的一个研究重点。P. Bendeich、I. Manna等^[5-6]研制了熔覆中专用的粉末材料,很好地解决了一些裂纹问题。姚成武等^[7]通过对铁基合金熔覆过程中裂纹的研究及组织设计,获得了无裂纹、硬度良好的熔覆涂层。王东生等^[8]通过研究实现了通过改变激光功率密度的分布来实现对熔覆层裂纹的控制。

立方氮化硼(以下简称 CBN)是一种超硬的 合成材料,在硬度和热导率方面具有极好的性 能,拟用其在 TC11 钛合金表面形成激光熔涂层, 来改善钛合金缺陷性能。但由于基底和熔覆材 料在热物性方面存在较大差异,熔覆层产生裂纹 几率也会增加。为保证两种材料的冶金结合,就 必须适当增加熔深方向的温度梯度,这样才能保 证熔化 CBN 粉末且避免基底材料温升过高,但 为减小熔覆过程中的拉应力,也要减小温度梯 度。文中从工艺参数与裂纹率的关系入手,应用 ANSYS 软件,研究温度梯度值合理范围,减小熔 覆拉应力,获得无裂纹的优质膜层。

1 材料及方法

基底材料为 TC11,熔覆层材料为 20% Ti 粉+ 80% CBN 微粉(均为质量分数)。CBN 微粉粒度 500 \ddagger (约 0.031 μ m),硬度 8 000~9 000 HV_{0.1},拟 用其在基材表面形成熔覆以增强钛合金硬度、耐 磨性等使用性能。采用正交实验法,表 1 为在 TC11 表面制备 CBN 涂层时的试验工艺参数与 水平数、表 2 为相应的试验的方案设计。

为减少正交试验组数,激光能量密度在试验

中不作为单独的试验参数,它是在对宏观功率研 究时通过其它参数的合理搭配而得到的一个间 接参数,其中,选取的激光能量密度数值为:3.0、 3.5、4.0、4.5、5.0、5.5 和 6.0 J/cm²。

表 1 TC11 表面激光熔覆 CBN 试验工艺参数

Table 1Parameters of CBN laser cladding on surface ofTC11

D	Level					
Parameters	1	2	3	4	5	
A: laser power/kW	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	
B: scanning velocity/ (mm • s ⁻¹)	2	3	4	5	6	
C: powder feed rate/(r • s^{-1})	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	

表 2 TC11 表面激光熔覆 CBN 试验的方案设计

Table 2Experiment scheme of CBN laser cladding onthe surface of TC11

No	Parameters			No	Parameters			
No. A B	С	10.	А	В	С			
1	1	1	1	14	3	4	5	
2	1	2	3	15	3	5	2	
3	1	3	5	16	4	1	3	
4	1	4	2	17	4	2	5	
5	1	5	4	18	4	3	2	
6	2	1	5	19	4	4	4	
7	2	2	2	20	4	5	1	
8	2	3	4	21	5	1	2	
9	2	4	1	22	5	2	4	
10	2	5	3	23	5	3	1	
11	3	1	4	24	5	4	3	
12	3	2	1	25	5	5	5	
13	3	3	3					

用线切割方法制备尺寸 30 mm×10 mm× 5 mm的 TC11 长方体小块,熔覆试验开始之前, 基底材料用砂纸打磨氧化层,并把基底上表面稍 磨光以减少基底对过大功率激光的吸收,用酒 精/丙酮去除油污,烘干后。

激光熔覆设备为 5 kW 的 CO₂ 激光器,保护 气体为氩气,激光光斑直径为 3 mm。

121

应用 ANSYS 软件对试验过程中的温度场进行模拟,优化试验参数配置,指导实际实验过程。

将熔覆后试件沿横截面切开,经打磨抛光后 用金相显微镜与型号为 KYKY-2008B 的扫描电 子显微镜(SEM)对涂层截面形貌和成分进行观 察分析。

2 裂纹形成过程

熔覆层裂纹缺陷形成的根本原因是激光熔 覆过程中凝固时产生了较大拉应力。激光熔覆 是一个速热速冷的过程,温度场的不均匀性与熔 池内部液体的流动而形成的较大温度梯度是凝 固时产生拉应力的主要原因之一^[9]。而且文中 试验基体材料与熔覆层材料的热膨胀系数等热 物性差异较大,也是形成较大温度梯度而产生拉 应力的一个重要原因。

TC11的熔点为 1 700 ℃左右,CBN 的熔点 为 3 000 ℃左右,要得到质量良好的涂层,就必须 加大激光能量密度充分熔化 CBN 粉体;但由于 材料热物性差异较大,熔化熔覆层材料的同时, 又要保证基底材料不能温升过大。则熔深方向 要适当提高温度梯度;又由于需要减小拉应力, 则要减小温度梯度。因此,温度梯度是文中研究 的一个重要考量参数,必须保证其在一个合适的 数值范围内。

通过 ANSYS 软件平台简易分析一下熔覆过 程中温度梯度的变化情况。热源为高斯热源,应 用生死单元技术进行温度场模拟。图 1 为 TC11 表面制备 CBN 涂层的有限元模型有限元模型。

基底尺寸为 30 mm×10 mm×5 mm,熔覆层 尺寸为 25 mm×3 mm×1 mm。表 3 为模拟及试 验中所使用材料的各种物理性能参数。



图 1 TC11 表面制备 CBN 涂层的有限元模型 Fig. 1 Finite element model of laser cladding CBN on the surface of TC11

表	₹3	CBN	和T	C11 自	勺物	理性	能	
Table 3	Ph	vsical	prope	erties	of (CBN	and	TC11

Physical properties	CBN	TC11
Density/(g • cm ⁻³)	3.48	4.54
Microhardness/GPa	69-98 (7 500 HV _{0.1})	2.69 (340 HV _{0.1})
Resistivity/($\Omega \cdot cm$)	1010	1.6×10^{-4}
Coefficient of heat expansion/ $(10^{-6} \cdot C^{-1})$	4.7(800 °C)	8.8
Thermal stability/°C	1 300-1 400	300-500
Melting point/°C	3 000	1 668(Boiling point:3 260 °C)
Thermal Conductivity/ ($\mathbf{W} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{k}^{-1}$)	1 300	7.955
Young's modulus/GPa	About 850	About 118

激光熔覆过程中材料表面的温度梯度较大, 为更为准确的模拟实际过程的温度场,有限元模型处理是一个关键环节,靠近熔池处的单元采用 SOLID70 六面体单元,且网格划分细密,单元尺 寸为 0.3 mm。而在基体下面远离熔池的部分采 用较粗大的网格,利于减少运算时间;中间采用 SOLID90 二十节点热实体单元,应用自由网格进 行过渡。

数值模拟中激光功率为1800 W,扫描速度 为4mm/s,光斑半径为1.5mm,图2为扫描时 间为3s时得到的温度场横截面的等值线图。由 图可知,基体与熔覆层材料均达到了熔点温度, 可实现熔化,基底也无过高温升。首先建立沿ab、



图 2 扫描时间为 3 s 时温度场横截面等值线图 Fig. 2 Temperature distribution contour line of cross section with scanning time of 3 s

cd 两条路径, ab 在 z 轴方向, a 为熔覆层的最顶端, b 为 TC11 基体的最底端, e 为熔覆层与基体中心交界处上的交界点。cd 在 y 轴方向上, 两种材料接触面上的一条直线。

图 3(a)(b)是沿 ab 方向的温度梯度和云图, 在距离熔覆层顶端约 0.6 mm 至 2.0 mm 处,温 度梯度发生较大变化,因为这个区间正是熔覆层



(c) Curve of temperature field in the direction of cd

图 3 扫面时间为 3 s 时不同方向的温度梯度曲线和云图

Fig. 3 Temperature gradient curve and cloud chart of temperature field in different directions with scanning time of 3 s

由分析可知,温度梯度骤变的位置在基体与 熔覆层相接的临界位置,熔池凝固结晶时,产生 的热应力较大,组织继续向下生长,致使临近熔 合线的熔覆层内部处易产生裂纹。图 4 为激光 熔覆立方氮化硼涂层时在涂层内部和邻近基体 处所产生的裂纹显微金相组织。

3 工艺参数对熔覆层裂纹的影响

3.1 工艺参数对熔覆层表面宏观裂纹的影响

由于试验材料性能的差异,造成熔覆层宏观 裂纹产生的几率增大,所以有必要对宏观裂纹做 以单独分析,图 5 为扫描速度 5 mm/s、激光功率 与基体的交界处。由于 CBN 的导热系数和比热 容与 TC11 合金的导热系数和比热容相差很大, 所以引起了温度梯度的骤变;图 3(c)(d)是沿 cd 方向的温度梯度和云图。在离 c 点 3~3.6 mm 处 猛然增大,到 3.6 mm 处达到最大值 1.173× 10⁶℃/s,而此位置正是 e 点,即熔覆层边界与基 体上表面的交界点。



(b) Cloud chart of temperature field in the direction of ab



(d) Cloud chart of temperature field in the direction of cd

为 2 700 W,单道熔覆中的宏观裂纹。熔覆层的 宏观裂纹一般都是在激光熔覆过程中产生,由于 熔池液态转变为固态时,体积的缩小致使产生裂 纹。在体视显微镜的观察下,熔覆层裂纹方向大

部分与激光扫描方向垂直。

评价熔覆层开裂敏感性的评价方法一般采 用单位长度裂纹数量的多少或裂纹长度来表示, 即裂纹率,文中所用单位长度选用 100 mm。根 据正交试验得到激光能量密度、扫描速度和送粉 率分别对裂纹率的影响结果。

图 6 为激光能量密度(E=P/DV)对裂纹率 影响。激光能量密度即激光束单位面积上激光 所具有的能量,由激光功率P、激光束光斑直径D





(a) v=5 mm/s, P=2 400 W



图 4 TC11 表面 CBN 熔覆层中的微观裂纹

Fig. 4 Micro cracks in the CBN cladding layer on the surface of TC11



图 5 TC11 表面 CBN 熔覆层中的宏观裂纹(v=5 mm/s、 P=2 700 W)

Fig. 5 Macro-cracks in the CBN cladding layer on the surface (v=5 mm/s, P=2 700 W)

以及扫描速度V共同决定。由图可知,在相同的 送粉率条件下,随着激光能量密度的增大,熔覆 层的裂纹率明显下降,熔覆层质量越来越好。

图 7 为扫描速度对裂纹率的影响曲线。在 其它因素不变的情况下,当扫描速度增大时,裂 纹率呈上升趋势。这是因为激光束扫描速度增 加,致使凝固速率增大,熔覆层与基体温度梯度 增大,残余应力增加,致使熔覆层裂纹增多。 图 8 为送粉率对熔覆层裂纹影响的曲线。 两条线分别为激光能量密度 $E_1 = 3.5 \times 10^4$ J/cm²、 $E_2 = 4.5 \times 10^4$ J/cm²。在同一条曲线上,即激光



Fig. 6 Macro-cracking rate as a function of laser energy density



图 7 扫描速度对宏观裂纹率的影响

Fig. 7 Macro-cracking rate as a function of scanning velocity



图 8 送粉率对宏观裂纹率的影响

Fig. 8 Macro-cracking rate as a function of powder feed rate

能量不变,随着送粉率的增加,熔覆层裂纹率首 先呈明显的增加趋势,但增加到一定值时,裂纹 率又随送粉率的增加而减少。

综上所述,增大激光能量密度可以减少裂纹的产生,增大扫描速度裂纹率增大,裂纹率随送 粉率的增加先增大后减小。增大激光功率和减 小扫描速度,都增大了激光能量密度,因此熔池 吸收能量增多,使得熔覆粉末部分熔化,熔池中 液体可以充分混合,减少了熔池凝固时出现的孔 洞及夹杂等缺陷。同时,基体吸收能量的增加, 相当于对基体进行预热,从而降低了熔池与基体 的温度梯度,减少了形成熔覆层时的内应力,致 使裂纹率降低。

3.2 工艺参数对熔覆层微观裂纹的影响

基于以上分析,熔覆层与基体界面结合部 分,温度梯度最大,因此熔池中组织的生长是沿 着与熔池与基体结合面垂直的方向形核长大。 熔池凝固结晶时,其体积快速缩小,产生较大的 热拉伸应力,其大小可表示为:

$$\sigma = \alpha_{\rm c} \times \frac{\partial T}{\partial n} \times dn \times E_{\rm c} \tag{1}$$

式中, α 。为线膨胀系数; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为熔池中温度梯度;dn为温度梯度方向上长度,mm;E。为晶粒的 弹性模量。

通过高倍显微镜下观察,熔覆层内部存在着 微观裂纹,有的裂纹贯穿整个熔覆层,有的裂纹 只在结合界面处,裂纹的方向主要是垂直于界面 结合处,也有平行于界面,如图4所示。同样采 用裂纹率来表征熔覆层内部裂纹的大小。

使其它工艺参数不变:扫描速度 4 mm/s、送 粉率 1.5 r/s。激光功率变化范围为 1 500~ 2 700 W。激光功率与裂纹率的关系如图 9 所示。

由图 9 可知,当激光功率为1 800 W 时,裂纹 率最小,随着激光功率的增加,裂纹率先减小后 增加,在1 800 W 时为转折点。当激光功率为 1 500 W时,由于能量密度较小,组织由于体积的 收缩会产生拉应力,这种拉应力与残余热应力的 总和大于某一强度极限时,就会使熔覆层产生微 观裂纹,并且这种裂纹在外力作用下会不断的扩 大。当激光功率为1 800 W 时,熔池的冷却速度相 对减慢,从而使裂纹减少。当功率大于 2 100 W 时,激光能量增加显著,致使熔覆层的横向及纵 向拉伸应力明显增加,所以裂纹也会增多。

激光功率选定1800 W,研究不同激光扫描速 度对微观裂纹的影响。扫描速度范围2~6 mm/s, 图10为扫描速度与裂纹率的关系图。



图 9 激光功率对微观裂纹率的影响

Fig. 9 Micro-cracking rate as a function of laser power



图 10 扫描速度对微观裂纹率的影响

Fig. 10 Micro-cracking rate as a function of scanning velocity

由图 10 可知,随着扫描速度的增加,裂纹率 先减小再增加,在扫描速度为4 mm/s 时,裂纹率 达到最低。当扫描速度为3 mm/s 时,因为激光 扫描速度较慢时,激光束在熔池中与材料的作用 时间长,熔池温度升高,致使纵向残余应力增加, 因此熔覆层裂纹较多。当扫描速度为4 mm/s, 某些组织变得粗短,因此熔覆层形成裂纹敏感性 减弱,裂纹率减小。当扫描速度为5 mm/s 时,激 光能量密度降低,熔池的冷却速度增大,温度梯 度增大,因此熔覆层更容易产生裂纹,此时熔覆 层中夹杂也较多,这就容易使夹杂处应力集中, 使得熔覆层裂纹率增加。 图 9、图 10 微观裂纹与图 6、图 7 宏观裂纹所 反映出的规律并不相同,原因在于:CBN 热物性 较强,为使其与基底材料熔合充分,实验过程中 各参数值相对较大,激光直接作用于样件表层, 所以宏观裂纹大都产生于样件表面且较为严重, 故随着参数值增加表层裂纹产生的几率会逐渐 增大。而微观裂纹产生于临近熔合线的熔覆层 内部,属于内部裂纹,激光能量是通过热传递的 方式到达熔覆层内,在一定范围内,随着各激光 参数值的增加,两种材料的熔合效果会越来越 好,但当达到一定值后,熔池内部液体作用剧烈, 温度梯度增加,加剧了微观裂纹的生成,所以曲 线才会呈现先下降后上升的趋势。

4 激光熔覆裂纹率控制

目前,对于激光熔覆裂纹控制的研究中提出 了多种方法,例如添加合金元素与超声波振动的 方法^[10-13]。文中基于激光熔覆工艺参数与裂纹 率的角度,扩展到对激光熔覆温度场温度梯度的 控制,进而来控制较大拉应力的产生是一种相对 简单的处理方式。

图 11 是在扫描速度为 4 mm/s、激光功率为

1 800 W 时所得到的微观形貌,图中我们可以看 出涂层的表面质量良好,与图 4、图 5 试验条件下 得到的涂层质量相比,熔覆层没有裂纹产生,这 与之前的数值模拟也是吻合的,在此组试验条件 之下,熔覆过程中温度梯度变化合理,能够使熔 覆层材料熔化又不会使基材温升过高,进而获得 无裂纹的熔覆层。

图 12(b)(c)(d)分别(a)中点 1、2 和 3 的 EDS 能谱,由图知,点1处的元素分布大量的 B、



图 11 TC11 表面 CBN 熔覆层形貌(v=4 mm/s、P=1 800 W)

Fig. 11 Morphology of the CBN cladding layer on the surface of TC11(v=4 mm/s, P=1 800 W)



图 12 TC11 表面激光熔覆 CBN 熔覆层 EDS 能谱分析 Fig. 12 EDS spectra analysis of CBN laser cladding on the surface of TC11 N、Ti 元素,此处为 CBN 与 Ti 相互粘结包裹而 形成的弥散强化^[14]的单元体;点 2 处为大量的 Ti 元素,有部分 B、N 元素,这是由于镀钛 CBN 颗粒 表面包覆一层钛元素,激光熔覆过程中熔化或部 分熔化,在冷却凝固时,颗粒与钛合金界面处达 到互相渗透的效果,良好的结合在一起;点 3 处 只有 Ti 元素,说明此处钛合金组织中没有其他 杂质溶入,所获得熔覆层达到试验预期效果。

5 结 论

(1) 工艺参数对熔覆层宏观裂纹的裂纹率的 影响规律为:随着激光能量密度增大,裂纹率明显 下降,熔覆层质量变好,在激光能量密度为 6× 10⁴ J/cm²、送粉率为 1 r/s 时涂层质量较好;随着 扫描速度增大,裂纹率呈上升趋势,在扫描速度为 3 mm/s、送粉率为 1 r/s 时裂纹率较小;随着送粉 率增加,裂纹率先增加后减小,送粉率为2.25 r/s、 激光能量密度为 3.4×10⁴ J/cm² 达到最大。

(2)随着激光功率增加,裂纹率先减小后增加,激光功率为1800W时,裂纹率达到最低;随着扫描速度增加,裂纹率也是先减小再增加,扫描速度为4mm/s时,裂纹率达到最低。

(3)通过对激光熔覆工艺参数的调整,控制 熔覆过程中温度场的温度梯度,进而可以控制激 光熔覆层的裂纹率。

参考文献

- [1] 屠振密,朱永明,李宁,等. 钛及钛合金表面处理技术的应用及发展[J].表面技术,2009,38(6):76-78. Tu Z, Zhu Y M, Li N, et al. Applications and advances on surface treatment for titanium and titanium alloy [J]. Surface Technology, 2009, 38(6):76-78 (in Chinese).
- [2] 崔爱永,胡芳友,张忠文,等. 钛合金表面激光熔覆修复 技术 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 61-64.
 Cui A Y, Hu F Y, Zhang Z W, et al. Titanium alloy laser cladding repair technique [J]. China Surface Engineering, 2011, 24(2): 61-64 (in Chinese).
- [3] 弭光宝,黄旭,曹京霞,等. Ti-V-Cr 系阻燃钛合金的抗点燃性能及其理论分析 [J]. 金属学报,2014,50(5):575-586.

Mi G B, Huang X, Cao J X, et al. Ignition resistance performance and its theoretical analysis of Ti-V-Cr type fireproof titanium alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(5): 575-586 (in Chinese).

[4] 钟敏霖,刘文金. Stelite 和 NiCrSiB 合金激光送粉熔覆裂纹 倾向的比较研究[J]. 中国激光, 2002, 29(11): 1031-1036. Zhong M L, Liu W J. Comparative research on cracking tendency in powder feeding laser cladding stellite and NiCrSiB alloys [J]. China Journal of Lasers, 2002, 29 (11): 1031-1036 (in Chinese).

- [5] Bendeich P, Alam N, Brandt M, et al. Residual stress measurements in laser clad repaired low pressure turbine blades for the power industry [J]. Materials Science and Engineering, 2006, 437(1): 70-74.
- [6] Manna I, Majumdar Dutta J, Ramesh Chandra B, et al. Laser surface cladding of Fe-B-C, Fe-B-Si and Fe-BC-Si -Al-C on plain carbon steel [J]. Surface & Coating Technology, 2006, 201(1/2): 434-440.
- [7] 姚成武,徐滨士,黄坚,等. 铁基合金激光熔覆层裂纹控制的组织设计[J]. 中国表面工程,2010,23(3):74-79.
 Yao C W, Xu B S, Huang J, et al. Microstructure design of controlling crack of Fe-based laser cladding layer [J]. China Surface Engineering, 2010, 23(3):74-79 (in Chinese).
- [8] 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):82-86.
 Wang D S, Tian Z J, Wang J W, et al. A method of crack control in laser cladding process with changing power density distribution of laser beam [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(1):82-86 (in Chinese).
- [9] 毛怀东. 激光熔覆层裂纹控制方法与实践 [D]. 天津: 天 津大学, 2007.

Mao H D. The study of controlling cracks in laser clad layer [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007 (in Chinese).

- [10] 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.
 Chen Z K, Liu M, Zeng D C, et al. Research on formation causes and elimination methods of the laser cladding cracks
 [J]. Laser Journal, 2009, 30(1):55-57 (in Chinese).
- [11] 高永健, 张世堂, 邓智昌, 等. 激光熔覆高温自润滑熔覆层的裂纹成因与控制 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 13-18.

Gao Y J, Zhang S T, Deng Z C, et al. Cause and control of the crack of laser clad high temperature self-lubricating coatings [J]. China Surface Engineering, 2011, 24(4): 13–18 (in Chinese).

- [12] 于承雪,景财年,李怀学.激光熔覆裂纹的形成机理及控制方法[J]. 航空制造技术,2012(4):75-79.
 Yu C X, Jing C N, Li H X. Forming mechanism and controlling method of laser cladding crack [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(4):75-79 (in Chinese).
- [13] 王晓荣.激光熔覆陶瓷相颗粒增强 Fe 基熔覆层的研究
 [D].济南:山东大学,2010.
 Wang X R. Research on laser cladding Fe-based coating reinforced by ceramic phase particles [D]. Jinan: Shandong University, 2010 (in Chinese).