

斜齿面激光熔覆的开裂倾向分析及控制研究

陈 列 陶 然* 刘 顿 娄 德 元 杨 奇 彪

(湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要 针对斜齿轮轴齿面激光熔覆层的开裂问题,采用数值计算的方法对其开裂倾向进行了分析,分析结果表明:齿根部位产生了较大的温度梯度,而齿面熔覆层内呈明显的拉应力状态,且主要集中在齿根部位,齿根部位的熔覆层将成为开裂的薄弱部位;裂纹发展的趋势将由齿根部位萌生,然后向其表面扩展然后向齿顶方向延伸。在双向扫描工艺条件下,轮齿内部的温度分布更加均匀,而熔覆层内拉应力水平明显降低,并在一定程度上减轻了齿根部位的应力集中问题,有利于控制熔覆层的开裂倾向。采用两种扫描方法和熔覆参数进行组合,对斜齿轮齿面进行了熔覆试验,试验结果表明:双向扫描工艺对于齿面熔覆层开裂具有一定的抑制作用,并最终获得了适合齿面熔覆的工艺和参数。

关键词 激光技术;激光熔覆;双向扫描;熔覆层开裂

中图分类号 TN249; TG156.99 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1103005

Analysis and Control of the Cracking Tendency on Helical Tooth Surface During Laser Cladding

Chen Lie Tao Ran Liu Dun Lou Deyuan Yang Qibiao

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

Abstract Numerical method is adopted to analysis the tendency of cracking layer during the laser cladding on tooth surface of helical gear. The results show that a high temperature gradient generates in the cladding layer and mostly concentrates in the tooth root. It turns to be a tensile stress, so the cracks will be easily in tooth root. Cracks will generate in tooth root and extend to the outside surface along the direction of perpendicular to scanning direction. Double scanning technology is put forward to solve this problem. Calculation results show that the tensile stress in cladding layer is significantly decreased using this technology and the area that stress concentrated inside clad coating can also be reduced. Therefore, the distribution of stress field inside clad coating can be improved radically, and it is quite beneficial for cracking controlling. Teeth surfaces are clad by different scanning methods and laser parameters in experiment. The results show that double scanning technology is benefit for controlling the cracking of cladding layer on tooth surface, and reliable parameters fit for laser cladding on tooth surface of helical gear are verified according to the results.

Key words laser technology; laser cladding; double scanning; cracking layer

OCIS codes 140.3390; 140.6810; 350.3390

1 引 言

激光熔覆技术是一种利用高能激光和纳米材料对各类零件进行合金强化处理的新兴技术,处理后能够显著提高其表面硬度和耐磨性,延长零件使用寿命,提高作业率,达到增产降耗的目的,使其广泛

应用在机械、汽车行业等领域^[1-3]。然而,由于熔覆过程中,熔覆粉末和基体材料的熔化、凝固和冷却都是在极快的条件下进行的,在粉末材料与基体材料之间的热物性差异、熔覆后工件内部应力状态等的影响下,熔覆层中极易形成裂纹^[4-5],尤其在应用于

收稿日期: 2014-04-28; 收到修改稿日期: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51405141, 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

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

斜齿轮轴齿面的熔覆时,在齿轮渐开线形貌以及螺旋走向的条件下,其开裂的倾向更加复杂。

当前对于激光熔覆层的裂纹研究,一般认为裂纹的产生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^[6]。在整个熔覆过程中,熔覆材料和基体表层材料在极快速的条件下熔化、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。

有研究表明,采用双向扫描的激光熔覆工艺对平整表面进行熔覆时,可以改善熔覆层和基体内部的应力场分布状态,降低拉应力水平并减小应力集中的区域,从而控制熔覆层的开裂倾向^[7-9]。但是该工艺是否能应用于斜齿轮齿面的激光熔覆,还需进一步的研究。为此,本文将对齿面激光熔覆时的开裂倾向进行分析,讨论双向扫描工艺对于斜齿轮齿面激光熔覆的适用性,并通过实际熔覆的检验,最终获得成熟、可靠的工艺方案和参数。

2 斜齿轮轴齿面激光熔覆的开裂倾向分析

2.1 研究对象

本文以某汽轮机滑油泵转子为研究对象,该转子为斜齿圆柱齿轮轴,齿轮精度为5级,其造价在10万元以上,使用中发,其齿轮齿面经常发生过度磨损而导致其工作性能下降,若能利用激光熔覆技术对其进行修复,必能带来良好的经济效益。该齿轮轴的基本尺寸参数如表1所示。

首先建立了齿轮轴的几何模型,如图1所示。齿轮轴的材料为45钢,选择的激光熔覆粉末材料为

Ni60合金粉末。

表1 齿轮轴的几何参数

Table 1 Geometric parameters of gear shaft

Parameter	Value
Number of teeth	29
Normal module	2
Helical angle	16°9'7.76"
Pressure angle	20°
Modification coefficient	0.2
Tooth width	93.5 mm
Pitch diameter	60.38 mm
Tip diameter	65.16 mm
Shaft diameter	54 mm
Length of gear shaft	493.5 mm

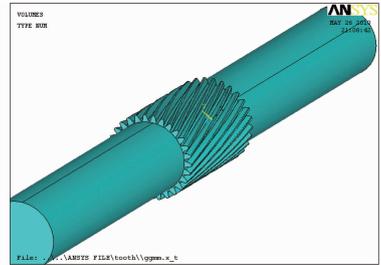


图1 斜齿轮轴几何模型

Fig. 1 Geometrical model of helical gear shaft

2.2 分析的方法及条件

已有研究表明^[10-12],激光熔覆过程中,在基体材料和熔覆粉末材料一定的情况下,熔覆层的开裂倾向主要由工件内部的应力场状态决定,为此,将首先采用数值计算的方法,对斜齿轮齿面激光熔覆过程中的应力场状态进行数值分析。

作者之前已对斜齿轮齿面激光熔覆过程的温度场进行了数值计算,得到了熔覆过程中各时刻的温度场分布状态^[13],本文将采取间接计算的方法,将之前所获得的温度场结果作为载荷,计算获得各时刻的应力场分布及变化情况。考虑到实际熔覆情况,在边界条件的设置方面,假设齿轮轴的两个端面相对固定,限制其在轴向(Z轴方向)的位移,即 $Z=0$,而对于其他部位则允许为自由变形。

计算所用基体及粉末材料的力学性能参数均随温度的变化而变化,具体参数如表2和表3所示。

表2 计算用熔覆合金粉末的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 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 3 计算用齿轮材料的力学性能

Table 3 Mechanical properties of gear 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

结合实际熔覆的经验,假设齿面熔覆层为均匀薄层,厚度约为 0.8 mm。由此建立的齿面激光熔覆几何模型及网格划分如图 2、图 3 所示。

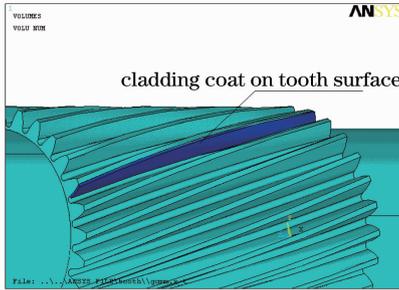


图 2 齿面激光熔覆层形貌

Fig. 2 Model of cladding coat on tooth surface

2.3 计算结果及分析

本文的实验设备为 HJ-3 型激光加工机,配备 2 kW 横流 CO_2 激光器,激光波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 。计算所用的熔覆参数为:激光功率 $P = 1000 \text{ W}$,光斑

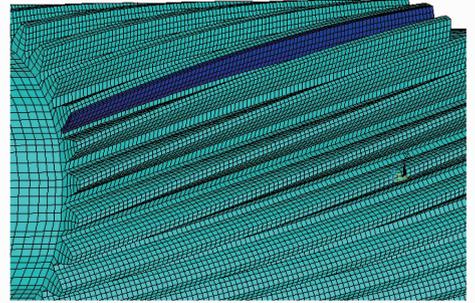
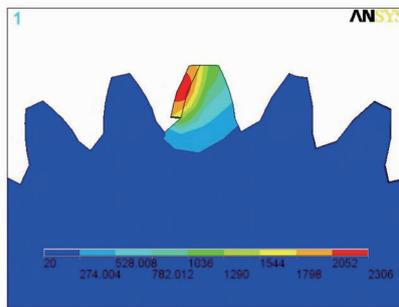


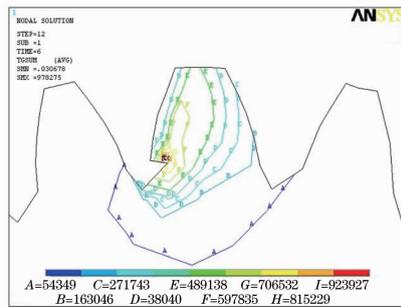
图 3 斜齿轮轴及熔覆层的网格划分

Fig. 3 Finite element meshing of helical gear shaft and cladding coat

直径 $D = 4 \text{ mm}$,扫描速度 $V_s = 2.5 \text{ mm/s}$ 。计算过程中采用“生死单元”的方法模拟熔覆层材料逐步加入的过程,加载激光能量载荷之前“杀死”所有熔覆层单元,熔覆过程中,逐步“激活”激光扫描路径上的熔覆层单元。计算时首先得到齿面激光熔覆时的温度场分布状态如图 4 所示。



(a) distribution of the temperature



(b) distribution of temperature gradient

图 4 齿面熔覆过程中的温度场状态

Fig. 4 Distributions of the temperature field during laser cladding

从温度场分布状态来看,在基体与熔覆层结合部位的温度已经超过了材料的熔点,满足形成冶金结合的条件,说明计算选取的参数可以满足实际熔覆的需要。从温度梯度的结果来看,轮齿内温度梯度的最大值就发生在熔覆层与齿根结合的部位,这

种温度分布状态将极易导致在该部位出现较大的热应力集中现象。结合前人基于普通样块所做的研究结果可以推断,如果采用过大的激光功率或者过慢的扫描速度,将造成输入轮齿的激光能量过大,在轮齿内部形成的温度梯度也越大,从而导致形成的热

应力水平和应力集中也将越大。因此在实际熔覆时,应当采用合理的工艺参数组合,在保证熔覆层与基体形成冶金结合的条件下,尽量降低所输入的激光能量整体水平。

为了进一步考察轮齿内部的应力场状态,将之前计算得到的温度作为载荷,再次计算其应力状态。计算得到单个齿面熔覆完成后的应力场状态如图 5 所示。

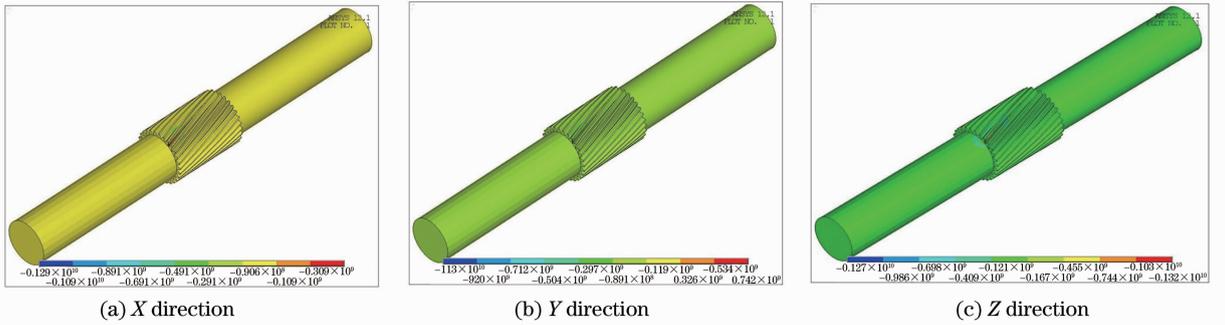


图 5 单个齿侧熔覆后齿轮轴的应力分布

Fig. 5 Stress distributions of gear shaft after laser cladding on one tooth side

从激光熔覆后整个齿轮轴的应力分布来看,齿面的激光熔覆完成后,对于整个齿轮轴来说,无论是其温度场还是应力场的变化都将主要集中在轮齿部位,而对两侧轴的影响并不大。而从数值上看,在三个方向的应力水平中,在 Z 轴方向,也就是该轴的轴向方向上的应力水平是最大的,而 X 轴和 Y 轴方

向的应力水平则明显较小,尤其是在被熔覆的轮齿附近,其应力分布十分集中,且表现出明显的拉应力状态。为了更好地观察齿面激光熔覆后齿轮轴的应力状态,应该重点分析其熔覆部位附近的应力分布情况,为此,提取轮齿径向截面处的应力分布情况,如图 6 所示。

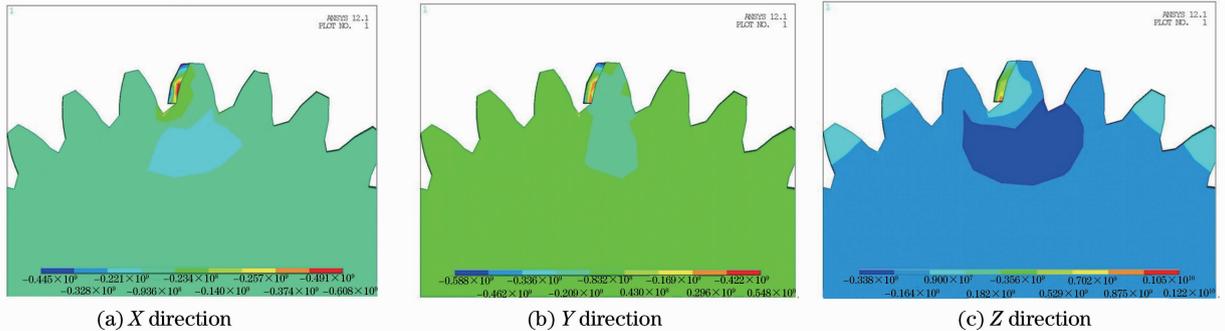


图 6 齿轮轴径向剖面的应力分布

Fig. 6 Stress distributions on diametral section of gear shaft

观察图 6 中轮齿径向截面应力分布情况可以发现,熔覆完成后,由于熔覆层与轮齿材料在力学性能方面的差异,以及热量分布的不均匀性,齿面熔覆层内部呈现明显的拉应力状态,这一点与在样块上进行熔覆时有一定的相似性。而由图 6(c)可知,在熔覆层受到拉应力的同时,熔覆层也必然会对轮齿产生一个由轴的两端向中间的拉力,而拉力会主要集中在轮齿的根部以下,由于该拉力距轴的中心还有一定距离,其产生的力矩必将会导致齿轮轴出现一定的“翘曲”变形。而温度场的计算结果也表明,在齿面进行熔覆时,在熔覆层与齿根交界部位会出现较大的温度梯度,也正是由于其温度分布的强烈不均匀性,导致热应力在该部位的集中产生,这一结果

与之前温度场的计算结果也较好的吻合。根据该结果可以预测,在齿侧进行激光熔覆时,熔覆层开裂的薄弱部位将出现在靠近齿根部位,而其发展的趋势也将是由其底部萌生,沿垂直于扫描方向,向其表面扩展,并向齿顶方向延伸。

3 斜齿轮齿面激光熔覆开裂倾向控制分析

传统的激光熔覆送粉扫描方法可称之为单向送粉单向扫描,即送粉与激光的扫描均在试样的一次单向运动中完成的。而有研究表明,采用双向扫描的激光熔覆工艺对平整表面进行熔覆时,可以改善

熔覆层和基体内部的应力场分布状态,降低拉应力水平并减小小应力集中的区域,从而控制熔覆层的开裂倾向。但是该工艺是否能应用于斜齿轮齿面的激光熔覆,还需进一步地进行研究。仍采用数值计算的方法,首先考查在该工艺条件下,齿轮和熔覆层内的应力场状态。

3.1 双向扫描条件下斜齿面激光熔覆应力场分析

将双向扫描工艺应用于齿面激光熔覆的大致过程如图 7 所示,在熔覆前将喷嘴的送粉区调整到比光斑尺寸大略大,激光束在齿面来回扫描 1 次,第 1 次扫描时试样向右运动,同时送粉,直至完成熔覆,第 2 次扫描时试样向左运动,并停止送粉,其余工艺参数不变。

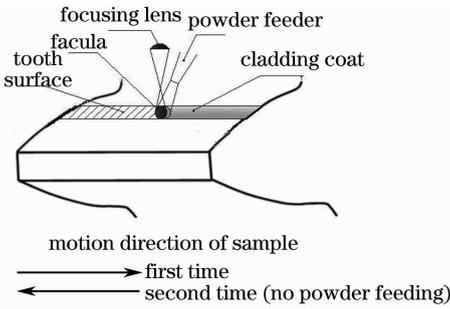


图 7 齿面激光熔覆双向扫描工艺示意图

Fig. 7 Schematic of laser cladding on tooth surface by double scanning

从之前的计算结果来看,影响齿面激光熔覆层开裂倾向的主要因素在于其轴向(Z轴)的拉应力,因此将主要考查双向扫描工艺条件下,齿轮及熔覆层内部在该方向的应力状态。由于第一次扫描后,熔覆层已经形成,因此反向扫描时将熔覆层与基体作为一个实体,其他边界条件与之前一致,计算获得的温度和应力状态如图 8 和图 9 所示。

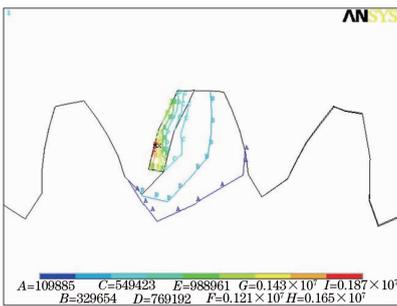


图 8 反向扫描时温度梯度分布状态图

Fig. 8 Temperature gradient distributions under reverse scanning

从计算的结果来看,反向扫描过程中由于激光的再次扫描,起到了对熔覆层进行重熔的效果,轮齿内部温度分布较之前更加均匀,也降低了熔覆层

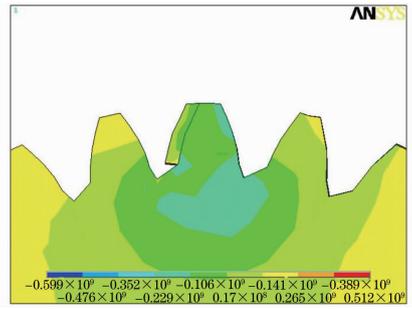


图 9 双向扫描后的应力场分布状态(Z轴方向)

Fig. 9 Stress field after double scanning (Z direction)

内部的整体温度梯度水平。应力场计算结果表明,采取双向扫描的工艺后,齿面熔覆层内仍呈现一定的拉应力状态,但拉应力的总体水平明显降低,而且在齿根部位的应力集中问题也有一定程度的好转。事实上,双向扫描过程中,第二次的扫描是在试样已具有较高初始温度的情况下所进行,试样预热的效果十分明显;反向扫描的过程则在一定程度上类似于热处理中的“正火”工艺,一方面延缓了试件的冷却速度,另一方面也有利于释放在前一次扫描中在试件内部形成的内应力。如此最终形成的应力场分布状态,对于抑制熔覆层的开裂倾向无疑是十分有利的。

3.2 基于双向扫描的斜齿轮齿面激光熔覆方法研究

小模数齿轮齿侧的面积并不大,对于齿侧的激光熔覆应尽量减少或避免熔覆层的搭接,因此在的试验中,针对齿侧的激光熔覆均采用一次熔覆成形。熔覆采用的粉末材料为 Ni60 合金粉末,分别采用单向扫描和双向扫描工艺,观察各个条件下,齿面熔覆层的裂纹条数等情况。试验中采取的各种参数组合情况以及对应的试验结果如表 4 所示。

从试验的结果来看,在选取的小模数齿轮以及斜齿轮齿面的特殊形貌条件下,齿面熔覆层的裂纹敏感性极高,各种参数的选取和组合稍有不恰当就极易产生裂纹,因此,在实际熔覆过程中必须十分注意各个参数的配置和组合。但总体来看,在其他工艺参数相同的条件下,采用双向扫描工艺时,熔覆层产生的裂纹无论是数量还是尺寸等,都要优于普通的单向扫描工艺,而且在 4 号和 5 号试样上,获得了表面光亮无裂纹、表面平整且在边缘地带饱满无塌陷的齿侧激光熔覆层,其试验结果如图 10 所示。试验结果说明,在同等参数条件下,双向扫描工艺对于控制齿面熔覆层的开裂确有一定的效果。

表 4 齿面激光熔覆参数组合及试验结果

Table 4 Parameters and results of laser cladding on tooth surface

Sample number	Power /W	Scanning speed /(mm/s)	Feeding rate /(g/min)	Defocusing rate /mm	Results (directional /double scanning)
1	1000	3	4	190	5 cracks/2 cracks
2	1050	3	4	180	5 cracks/3 cracks
3	1000	2.5	4	180	7 cracks/1 crack
4	1000	2.5	3	180	6 cracks/none
5	950	2.5	3	180	6 cracks/none
6	900	2.5	3	165	5 cracks/1 crack
7	900	2.5	3	165	5 cracks/2 cracks



(a) sample 4



(b) sample 5

图 10 齿侧激光熔覆层效果

Fig. 10 Clad coating on tooth side

为了检验齿侧熔覆工艺的实际效果,研究中将齿侧熔覆后的齿轮沿其径向剖开,结果如图 11 所示。

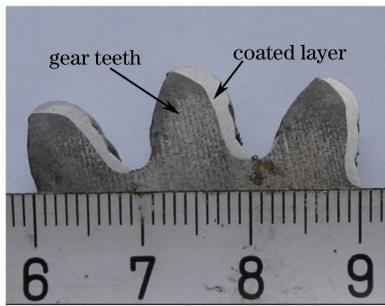


图 11 齿侧激光熔覆后的径向剖面

Fig. 11 Radial profile of gear shaft after laser cladding on teeth sides

图 11 中的白亮处为粉末与部分基体熔化混合后形成的熔覆层,从图中可清晰地看到,应用该齿侧熔覆工艺后,在齿侧获得的熔覆层厚度可达到近 1 mm,完全可以满足后续加工的需要。

4 结 论

1) 以斜齿轮轴为对象,通过计算齿面激光熔覆过程的应力场状态,分析了齿面熔覆层的开裂倾向。结果表明,齿面熔覆层内部呈现明显的拉应力状态,并且将主要集中在齿根部位,该拉应力状态的存在,

一方面将会造成齿轮轴出现一定的“翘曲”变形,另一方面将导致齿根部位的熔覆层成为开裂的薄弱部位,裂纹发展的趋势也将是由齿根部位萌生,沿垂直于扫描方向,向其表面扩展,并向齿顶方向延伸。

2) 对采用双向扫描工艺条件下,齿面激光熔覆的应力状态进行了计算,结果表明,熔覆层内拉应力的总体水平明显降低,而且在齿根部位的应力集中问题也有一定程度的改善,有利于控制熔覆层的开裂倾向。

3) 对实际齿面激光熔覆的工艺方案和参数进行了试验,通过对多组参数和扫描方法的比较,最终确立了适合齿面熔覆的工艺参数和方法。

参 考 文 献

- 1 Ma Chao, Wang Cunshan. Influence of graphite/Ni on microstructure and properties of laser clad Ni-based alloy coatings [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0803001.
马 超, 王存山. 镍包石墨对激光熔覆镍基合金涂层组织和性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0803001.
- 2 Xu Binshi, Tan Jun, Li Janmin. The development of the surface science technology[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.
- 3 Shi Shihong, Wang Chen, Xu Aiqin, et al.. Temperature field numerical simulation of laser cladding based on internal power feeding through a hollow laser beam[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0303002.
石世宏, 王 晨, 徐爱琴, 等. 基于环形光内送粉激光熔覆温

- 度场的数值模拟[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303002.
- 4 Pi Zhengqing. The Regulation Experimental Research of the Cracking Layer During Laser Cladding [D]. Hengyang: University of South China, 2011.
皮政清. 调控激光熔覆层开裂行为的实验研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2011.
- 5 Wang Huiping. The researching on the clacking problem in the laser cladding[J]. Heating, 2008, 23(6): 24-26.
王慧萍. 关于激光熔覆层开裂问题的探讨[J]. 热处理, 2008, 23(6): 24-26.
- 6 Chen Lie, Xie Peilin. Research into helical gear tooth surface fabrication using a double scanning laser cladding method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 65-68.
陈 列, 谢沛霖. 双向扫描激光熔覆止裂机理及实验分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 65-68.
- 7 Song Guangming, Wu Gang, Huang Wanjuan. Cracking control in laser cladding process with unidirectional powder feeding and double scanning[J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(6): 26-28.
宋光明, 吴 钢, 黄婉娟. 单向送粉双向扫描激光熔覆工艺防止裂纹的试验研究[J]. 金属热处理, 2005, 30(6): 26-28.
- 8 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.
- 9 Shen Yandi. The Fundamental Investigation on Laser Cladding Process[D] Shanghai: Shanghai Maritime University, 2006.
沈燕娣. 激光熔覆工艺基础研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2006.
- 10 Yang Ning, Li Likai. The clacking behavior and the prevent methods during the laser cladding[J]. Transactions of Material and Heat Treatment, 2011, 40(24): 150-152.
杨 宁, 李立凯. 激光熔覆层的开裂行为及其防止[J]. 材料热处理技术, 2011, 40(24): 150-152.
- 11 Shi Xiumei, Yuan shuqiang, Yi Yinghui, *et al.*. Research the factors of the layer cracking during the 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.
- 12 Fu Qiang, Jin Zhenjun, Tang Jun, *et al.*. Analysis and controlling of deformation of gear shaft in laser cladding on teeth surfaces[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(5): 27-31.
傅 强, 金振俊, 汤 军, 等. 齿轮轴激光熔覆轴变形的分析与控制[J]. 电焊机, 2012, 42(5): 27-31.
- 13 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. 斜齿齿轮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.

栏目编辑: 史 敏