

斜齿轮轴齿面激光熔覆过程中温度场的数值分析

陈 列 古成中 谢沛霖

(海军工程大学机械工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要 对某汽轮机滑油泵转子的斜齿轮轴齿面的激光熔覆过程进行了研究,利用有限元软件 ANSYS 对其温度场进行了数值分析。结果表明,在齿面激光熔覆过程中,激光能量输入产生的热量大量集中在轮齿内部,且在熔覆层与齿根结合部位等温线分布比较密集,导致在轮齿内部出现较大的温度梯度,且激光输入产生的热量可对相邻轮齿产生预热的效果;计算结果还表明,越靠近齿顶,等温线越深入基体,若将轮齿的侧面和顶部同时熔覆,极易造成齿顶的过度熔化而塌陷。根据计算结果,提出了齿侧与齿顶分步熔覆的工艺,通过实际熔覆实验,在轮齿表面获得了连续、完整的熔覆层。

关键词 激光技术;激光熔覆;数值分析;斜齿轮轴;温度场

中图分类号 TN249;TG156.99;TG157

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.0303006

Numerical Analysis of Temperature Field in Laser Cladding on Tooth Surface of Helical Gear Shaft

Chen Lie Gu Chengzhong Xie Peilin

(Department of Mechanical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract The laser cladding process on tooth surface of a helical gear shaft which is the rotor in lubricant pump of steam turbine is investigated. Temperature field is numerically simulated with finite element analysis software-ANSYS. Calculation results show that the heat caused by laser energy is concentrated inside the tooth mostly, and the distribution of isothermal lines is very dense at the binding site of clad coating and tooth root. Large temperature gradient would be generated inside the tooth. In addition, an effect of preheating in the adjacent tooth would also be brought up by laser energy. It is also indicated that the isothermal lines are penetrated into the tooth tip, and the problems of excessive melted down and collapsing of tooth tip would be easily brought about if the tooth side and tooth tip are cladded at the same time. So the tooth side and tooth tip should be cladded step by step. Continuous and complete clad coating on tooth surface is produced in experiment by this technology.

Key words laser technique; laser cladding; numerical analysis; helical gear shaft; temperature field

OCIS codes 140.3390; 140.6810; 350.3390

1 引 言

齿轮在工作过程中,往往发生齿面的过度磨损,从而导致噪声、振动过大等问题,严重时甚至造成整机报废,因此齿轮表面磨损后的修复一直是许多研究者所关注的问题^[1,2]。由于齿轮表面的形貌相对复杂,对表面性能的要求又较高,常规的修复手段,

如喷涂、堆焊等技术往往无能为力,因此找到这类高精度零部件的修复手段,是实际工程中需要迫切解决的问题之一。

激光熔覆是一种可以在低成本基体上制成高性能表面的表面工程技术^[3],由于热影响区小、熔覆层与基体可形成冶金结合等特点,特别适合于“高、精、

收稿日期: 2010-07-19; **收到修改稿日期:** 2010-11-09

基金项目: 国防科技重点实验室基金(51489040104JB1101)和湖北省自然科学基金(2005ABA065)资助课题。

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

E-mail: cangn1983@163.com

导师简介: 谢沛霖(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事表面工程和摩擦学等方面的研究。

E-mail: cangn1983@tom.com

尖”零部件表面失效后的修复,使其在工业、军事等领域得到广泛应用^[4~8]。本文利用有限元计算软件 ANSYS,对在斜齿轮轴齿面进行激光熔覆时的温度场进行了数值分析,并借此给实际齿面的激光熔覆工作提供一定的指导。

2 研究对象

选取的研究对象为某汽轮机滑油泵转子,为斜齿圆柱齿轮轴,与传动轴锻造为一体,齿轮精度为 5 级,整体造价在 15 万元以上。该转子时常因轴上的齿轮齿面过度磨损而报废,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。

表 1 齿轮轴的几何参数

Table 1 Geometric parameter of gear shaft

| Parameters | Value |
|--------------------------|------------------------|
| Number of teeth | 29 |
| Normal Module /mm | 2 |
| Helical angle | 16°9'7.76" (left-hand) |
| Pressure angle / (°) | 20 |
| Modification coefficient | 0.2 |
| Tooth width /mm | 93.5 |
| Pitch diameter /mm | 60.38 |
| Tip diameter /mm | 65.16 |
| Shaft diameter /mm | 54 |
| Length of gear shaft /mm | 493.5 |

根据表 1 中齿轮轴的各参数,建立了齿轮轴的几何模型,如图 1 所示。

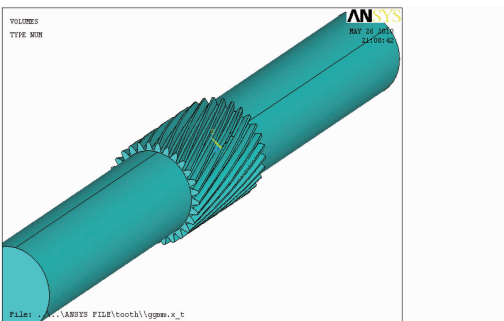


图 1 齿轮轴几何模型

Fig. 1 Geometrical model of helical gear shaft

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。由于在实际工作中,齿轮最容易磨损的部位在齿的侧面,因此这里首先考虑在齿侧进行的激光熔覆,其工艺实施的基本过程如图 2 所示。

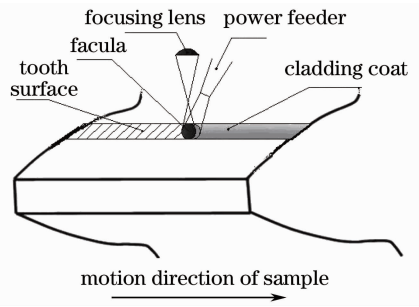


图 2 齿面激光熔覆工艺示意图

Fig. 2 Schematic of laser cladding on tooth surface

3 斜齿轮齿面激光熔覆温度场的计算模型

3.1 几何模型的建立及网格划分

为了建立齿轮轴激光熔覆的几何模型,必须首先考虑激光熔覆层的引入方式以及具体形态。根据实际熔覆情况,对送粉方式下的激光熔覆温度场进行了计算。在建模时首先假设熔覆层的基本形态与齿轮的渐开线螺旋齿面一致,为一均匀薄层,厚度约 0.8 mm。在计算时,为了模拟实际粉末的送入过程,使用了 ANSYS 软件中的“生死单元”功能,即首先要“杀死”所有熔覆层单元,然后随着扫描过程中激光热源的移动,将其所照射区域内的熔覆层单元依次激活,直至熔覆过程结束。由此建立的齿轮轴齿面激光熔覆的几何模型如图 3 所示。

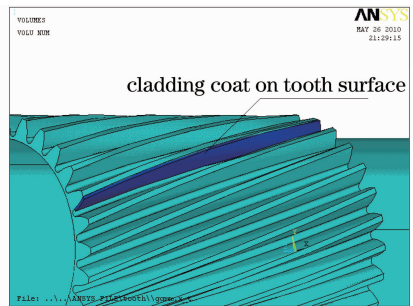


图 3 齿面激光熔覆层形貌

Fig. 3 Model of cladding coat on tooth surface

激光熔覆过程中,由于激光能量输入产生的热量高度集中,其热影响区较小。从提高计算效率的角度考虑,在划分网格时,对于轮齿、熔覆层等部位的网格需要进行适当的加密处理,而对轴的网格划分则可相对稀疏。采取六面体单元 Solid70 对齿轮轴以及熔覆层进行了网格划分,如图 4 所示。

3.2 材料参数及边界条件

激光熔覆本身是一个复杂过程,涉及到物理、化

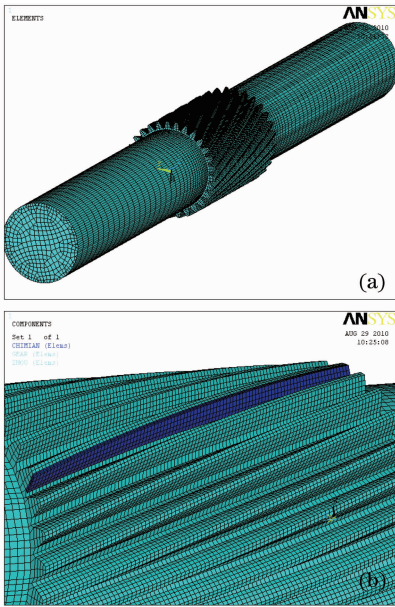


图4 斜齿轮轮轴及熔覆层的网格划分。(a)整体划分情况,(b)齿面及熔覆层网格划分情况

Fig. 4 Finite element meshing of helical gear shaft and clad coating. (a) finite element meshing of the whole model, (b) meshing of the tooth and clad coating

学和流体力学等众多领域,尤其是与齿轮轴这一相对复杂的零部件结合起来后,其复杂程度更是不言而喻,因此在计算中必须对边界条件进行一定的简化和假设。

结合计算分析的需要,采取的主要方法是:忽略熔覆层与基体齿面之间的传热热阻;不考虑基体与实验台之间的热传导;基体与熔覆层的所有外边界仅与空气发生对流换热,将辐射换热的影响耦合到对流换热中而不作单独考虑;移动的热源加载作为边界条件引入,热流边界随光斑的移动而变化,是活动边界。移动热流的注入可离散为脉冲热源,其热流密度呈高斯分布^[9],在笛卡尔坐标系上的表达式为

$$q = \frac{k}{\pi} q_0 \exp(-kr^2), \quad (1)$$

式中 q_0 为热源的有效热功率, k 为表明热源集中程度的系数(高斯分布曲线的宽度), r 为热源内某点与热源中心的距离。

对熔覆过程中熔化和凝固的相变问题进行分析时,需要考虑用随温度变化的焓值来代替潜热的吸收和释放^[10],焓值的变化 ΔH 可以描述为密度 ρ , 比热容 c 和温度 T 的函数,具体表示为

$$\Delta H = \int \rho c(T) dT. \quad (2)$$

基体及熔覆层材料的热物性参数均为温度的函数,试样的初始温度为室温(20 ℃)。计算中,采取的材料热物性参数随温度的变化情况如图5所示。

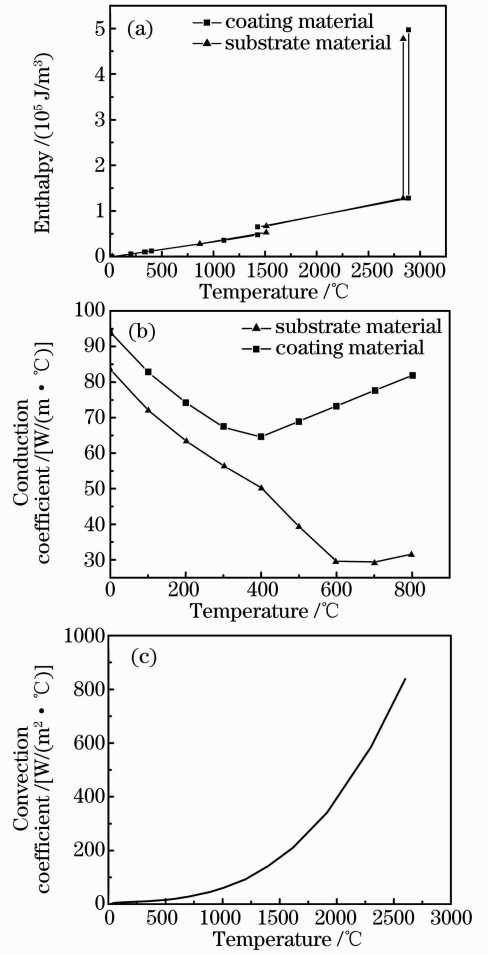


图5 材料的热物性参数。(a)材料的焓值,(b)材料的导热系数,(c)材料的对流换热系数

Fig. 5 Thermal properties of materials. (a) enthalpy of materials, (b) conduction coefficient of materials, (c) convection coefficient of materials

4 计算结果及分析

小模数齿轮齿侧的高度不到4 mm,结合实际熔覆情况,计算时选取的激光参数为:激光功率 $P = 1000$ W;光斑直径 $D = 4$ mm;扫描速度 $V_s = 4$ mm/s。材料对激光能量的吸收率设为0.5,单个轮齿的侧面采取一次扫描完成熔覆,单次扫描时间24.5 s。由此计算得到各时刻的齿轮轴温度场分布情况如图6所示。

观察齿轮轴齿面激光熔覆过程中各时刻的温度场分布状态可以发现,在0.5 s时刻激光照射在轮齿边缘时,受到边缘效应等因素的影响,光斑中心的温度迅速上升到2500 ℃以上,这已经远高于熔覆层

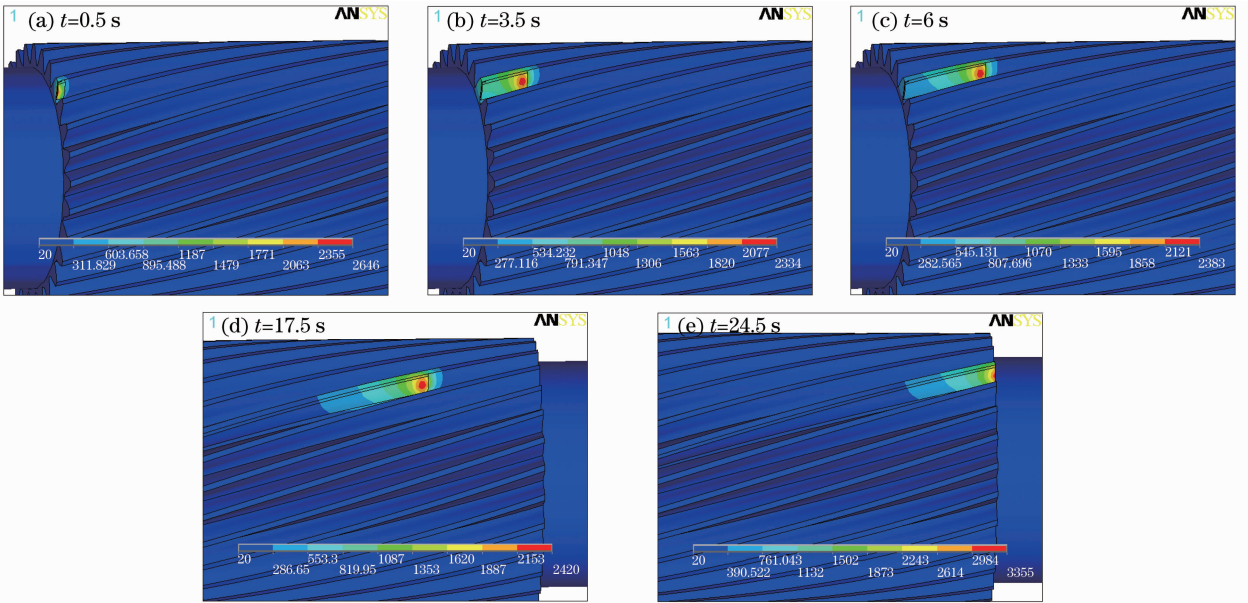


图6 齿轮轴激光熔覆各时刻温度场分布

Fig. 6 Temperature field of laser cladding on tooth surface of gear shaft

和基体的熔点温度,意味着在光斑照射区域内已经形成了熔池。随着扫描过程的进行,光斑中心的温度有所下降,并逐步稳定在 2400 ℃ 左右,光斑照射区域附近的温度场分布云图呈“彗星状”,且形状也比较稳定,说明在稳定的激光熔覆过程中,熔池的形状、温度分布状态等都将达到稳定。当激光光束移动至轮齿尾端时,光斑中心的温度又急剧升高至 3300 ℃ 以上。

为更好地观察稳定熔覆时齿轮内部的温度分布,可以提取 $t=6\text{ s}$ 时刻光斑中心剖面处的温度场分布情况,如图 7 所示,图 7(a)和(b)分别是该剖面的温度分布云图和等温线分布情况。

观察温度云图和等温线的分布情况可以发现:

- 1) 在 $t=6\text{ s}$ 时刻,对应于 $T=1200\text{ }^\circ\text{C}$ 的等温线已经涵盖了整个熔覆层,且深入到轮齿基体内部,说明此时熔覆层和轮齿表面已经一起熔化,熔池的底部到达齿面以下,满足了形成冶金结合的前提条件;
- 2) 在齿面进行激光熔覆时,输入的激光能量产生的热量大部分都集中在轮齿内部,对于齿轮内部以及轴的影响不大,这样的温度分布情况将导致在轮齿内部出现较大的温度梯度;

3) 在对单个齿面进行熔覆时,可观察相邻轮齿的表面温度变化情况。如图 7(a)所示,在进行熔覆的 1 号轮齿两侧分别定为 2~5 号轮齿,可通过 ANSYS 软件取出在该时刻其表面的温度,如表 2 所示。从表 2 可以看到,在 $t=6\text{ s}$ 时刻,与熔覆轮齿相邻的 2 号轮齿表面的温度已经上升到 100 ℃ 以

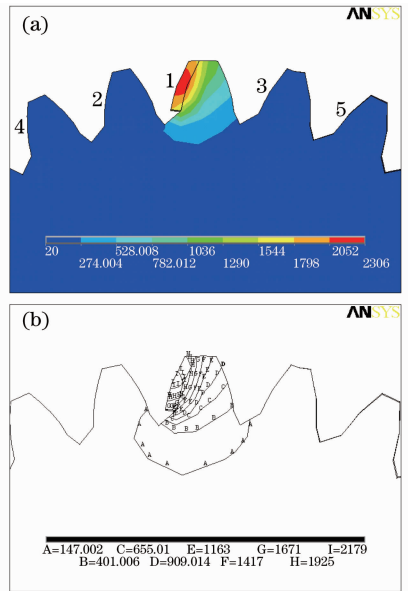


图7 $t=6\text{ s}$ 时刻光斑中心齿轮轴剖面的温度场

(a)温度分布云图,(b)等温线分布

Fig. 7 Temperature distribution of longitudinal section at the center of faculae when $t=6\text{ s}$. (a) distribution of temperature field inside tooth, (b) distribution of isothermal lines

表2 相邻轮齿的温度

Table 2 Temperature of adjacent tooth

| Number of tooth | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------------|-----|----|----|----|
| Temperature of tooth / ℃ | 106 | 93 | 41 | 33 |

上,在一定程度上形成了对后续熔覆轮齿进行预热的效果,且随着后续熔覆中激光能量的继续输入,这一效果将表现得更加明显。而已有研究表明,该效

果对于抑制熔覆层开裂具有一定的作用^[11,12];

4) 从等温线的分布状态来看,越靠近齿顶部位,等温线就越深入基体内部,这也就意味着,若将齿侧与齿顶同时熔覆,在保证熔覆层与基体结合状态的前提下,齿顶部位将有更多的基体被熔化,由于在实际熔覆时,一般很难对齿顶进行保护,因此极易出现齿顶的过度熔化而导致的齿顶变尖等问题,这里称之为齿顶的“塌陷”现象。这一现象在实际熔覆中也得到了验证^[13]。

图 8 是实际齿轮在激光熔覆中出现的齿顶塌陷现象,可以看到,齿顶的基本形貌已经完全破坏,若不采取其他保护措施,则会丧失其修复的意义,激光熔覆的技术优势也将无法体现。如果只是为了齿顶部位不出现塌陷,而降低激光的能量输入,则又无法保证熔覆层与基体之间的冶金结合。



图 8 实际熔覆中的齿顶塌陷现象

Fig. 8 Collapsing of tooth tip in actual laser cladding

根据温度场的计算结果,要避免齿顶的过度熔化导致的塌陷,在齿面激光熔覆过程中,应当至少实施两次扫描的工艺:第一次扫描时,应该适当缩小光斑的尺寸并调整工件的位置,避免光斑直射在齿顶部位,熔覆层并不完全覆盖齿顶,其工艺方法仍如图 1 所示。若设需要熔覆的齿面顶点为 O , OA 线通过该点与齿侧的熔覆层表面相切,而 OB 则为齿顶线。第一次熔覆后,将齿轮转过一定角度,使 OA 与 OB 线与水平面的夹角大致相等,其后再对齿顶部位进行第二次熔覆,其工艺实施过程如图 9 所示。

为了考察工艺方案的可靠性,通过实际熔覆对其进行了检验。所使用的设备为 HJ-3 型激光加工机,配备 2 kW 横流 CO_2 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。熔覆采用的粉末材料为 Ni60 合金粉末,粒度 $45 \sim 105 \mu\text{m}$ ($140 \sim 325$ 目)。采用的熔覆工艺参数为:激光功率 1000 W,送粉率 3 g/min,离焦量 180 mm,扫描速度 4 mm/s。首先得到的齿侧激光熔覆层如图 10 所示。

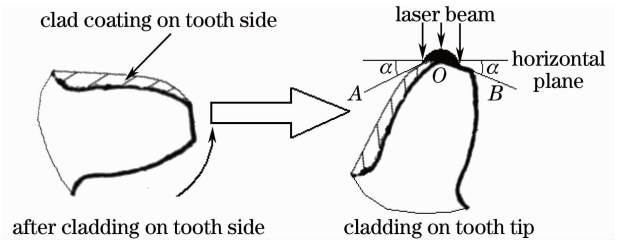


图 9 齿顶熔覆工艺示意图

Fig. 9 Craft of laser cladding on tooth tip

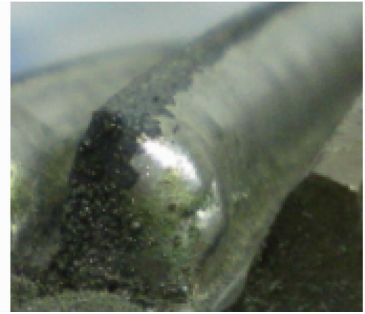


图 10 齿侧的激光熔覆层

Fig. 10 Clad coating on tooth side

可以看到,在调整了光斑直径和照射位置后,齿顶已没有过度熔化的问题,而在齿侧获得了连续完整的熔覆层。在调整轮齿位置后,可以继续对齿顶进行熔覆,熔覆完成后齿面的熔覆层形貌如图 11 所示。从图 11 可以看到,通过第二次对齿顶实施单独熔覆后,可以在整个齿面实现连续的熔覆层,证明了本文的分析结果以及提出的熔覆方案是合理、可行的。

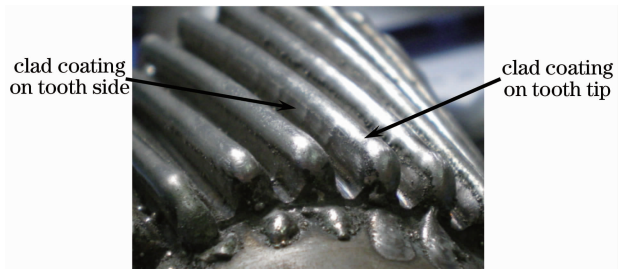


图 11 齿面熔覆层完整形貌

Fig. 11 Complete clad coating on tooth surface

5 结 论

1) 以某汽轮机滑油泵转子的斜齿轮轴为研究对象,采用有限元计算分析软件 ANSYS,对在其齿面进行激光熔覆过程的温度场进行了数值计算;

2) 计算结果表明,齿面激光熔覆过程中,输入的激光能量产生的热量大量集中在轮齿内部,对于轴的影响较小,这样的温度分布状态将导致在轮齿内部,尤其在熔覆层与齿根的结合部位会出现较大的

温度梯度;越靠近齿顶,等温线越深入基体,若将齿侧与齿顶同时熔覆必然导致齿顶部位的过度熔化而塌陷;

3)根据计算结果,认为对于齿侧和齿顶的熔覆应当分步进行:熔覆齿侧时,适当缩小光斑的尺寸并调整工件的位置,避免光斑直射在齿顶部位,熔覆层并不完全覆盖齿顶;随后将齿轮转过一定角度,使齿顶线两侧面与水平面的夹角相等,再对齿顶部位进行单独熔覆;在实际熔覆中应用该方案,在齿面获得了连续、致密的熔覆层,证明该方案是合理且有效的。

参 考 文 献

- Zhao Lijuan, Shi Hui. Overview on gear transmission wear and its repair[J]. *Chinese J. Construction Machinery*, 2007, **5**(2): 243~246
赵丽娟,史 辉. 齿轮传动中磨损问题的研究及修复方法综述[J]. 中国工程机械学报, 2007, **5**(2): 243~246
- Zou Jiasheng, Xu Feng, Lu Long. The status quo of gear surface modification technology[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, **23**(2): 113~116
邹家生,许 峰,卢 龙. 齿轮表面改性技术研究现状[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2009, **23**(2): 113~116
- Liu Xiubo, Yu Yongmin. Recent developments in laser surface treatments and rapid manufacturing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(4): 48~52
刘秀波,于永民. 激光表面处理和快速制造技术的新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(4): 48~52
- Shen Bin, Yan Guangchao, Wu Gang. Laser cladding on complex disc cam[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 244~248
沈 斌,闫广超,吴 钢. 复杂盘形凸轮表面激光熔覆工艺[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 244~248
- Guo Yongli, Liang Gongying, Li Lu. Laser cladding reparation of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 303~306
郭永利,梁工英,李 路. 铝合金的激光熔覆修复[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 303~306
- Cai Zhixiang, Zeng Xiaoyan. Experimental study of SnO₂ gas-sensing film fabricated by laser micro-cladding and its corresponding characteristics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2149~2153
蔡志祥,曾晓雁. 激光微熔覆制备 SnO₂ 气敏膜及其性能研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 2149~2153
- Gao Xuesong, Huang Yinhui, Tian Zongjun *et al.*. Erosive wear resistance behavior of laser cladding Al₂O₃ + 13% TiO₂ coating prepared by plasma spraying on titanium alloy surface[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 858~862
高雪松,黄因慧,田宗军等. 钛合金表面激光熔覆等离子体喷涂 Al₂O₃ + 13% TiO₂ 涂层冲蚀磨损性能[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 858~862
- Yang Wenchao, Chao Mingju, Sun Yanmin *et al.*. In-situ synthesis of WB-CrB reinforced Ni-based coating by laser cladding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(8): 081403
杨文超,晁明举,孙艳敏等. 原位生成 WB-CrB 增强镍基激光熔覆层[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(8): 081403
- Zhang Ping, Ma Lin, Zhao Junjun *et al.*. The heat source model of the numerical simulation in the laser cladding [J]. *China Surface Engineering*, 2006, **19**(z1): 161~164
张 平,马 琳,赵军军等. 激光熔覆数值模拟过程中的热源模型[J]. 中国表面工程, 2006, **19**(z1): 161~164
- Liu Zhenxia, Huang Weidong, Wan Baitao. Investigation of basic problems of numerical model for powder-feed laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6): 567~570
刘振侠,黄卫东,万柏涛. 送粉式激光熔覆数值模型基本问题研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(6): 567~570
- Hao Nanhai, Lu Wei, Zuo Tiechuan. Thermal-mechanical coupling finite element analysis of stress field in laser cladding process[J]. *Chinese Surface Engineering*, 2005, **18**(1): 20~23
郝南海,陆 伟,左铁钊. 激光熔覆过程热力耦合有限元应力场分析[J]. 中国表面工程, 2005, **18**(1): 20~23
- Chen Zhikun, Liu Min, Zeng Dechang *et al.*. Research on formation causes and elimination methods of the laser cladding cracks[J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(1): 55~57
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 Lie, Xie Peilin. Research of preventing the edges of tooth surface from collapsing in laser cladding process [J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(5): 518~521
陈 列,谢沛霖. 齿面激光熔覆中的防边缘塌陷工艺研究[J]. 激光技术, 2007, **31**(5): 518~521