

文章编号: 0258-7025(2008)08-1271-06

瓦楞辊高耐磨激光熔覆颗粒增强铁基复合涂层

钱兆勇 钟敏霖 刘文今 马明星 张红军

(清华大学机械系激光加工研究中心, 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要 瓦楞辊现有强化方式如中频淬火、氮化、镀铬、激光相变硬化和喷涂碳化钨在寿命、成本、工艺稳定性及可再修复性方面存在一定的局限性, 而采用激光熔覆的方法对瓦楞辊进行强化及修复可以在一定程度上弥补传统方法的劣势。针对瓦楞辊工况下强烈的低应力干摩擦磨粒磨损, 采用专门研制的抗磨粒磨损粉末材料 THW-64, 通过工艺优化, 在瓦楞辊齿表面激光熔覆制备厚度大于 0.4 mm 的耐磨涂层, 研究瓦楞辊激光熔覆强化涂层的组织及性能。熔覆层无裂纹、与基体呈牢固的冶金结合, 涂层组织为亚共晶基体上弥散分布着大量原位生成的复合碳化物颗粒, 平均显微硬度 915HV_{0.2}。摩擦学对比实验证明复合涂层耐磨粒磨损的性能明显改善, 工业应用表明激光熔覆强化的瓦楞辊使用寿命较激光相变硬化有显著提高。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 瓦楞辊; 颗粒增强复合涂层; 耐磨性

中图分类号 TN 249; TB 486 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083508.1271

High Wear-Resistant Particulate Reinforced Composite Coatings for Corrugated Rollers by Laser Cladding

Qian Zhaoyong Zhong Minlin Liu Wenjin Ma Mingxing Zhang Hongjun

(Key Laboratory for Advanced Materials Processing, Ministry of Education, Laser Processing Research Centre, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The present hardening technologies for corrugated rollers, such as intermediate frequency quenching, nitrogen hardening, chromeplate, laser transformation hardening and tungsten carbide spraying, have some limitation on cost, lifetime, technique stability and rejuvenation capability. Laser cladding offers an approach to improve the above comprehensive properties when hardfacing and repairing the corrugated rollers. This paper reported a laser clad particulate reinforced composite coating by using a unique cladding powder material THW-64 to tackle the severe dry friction abrasive wear on corrugated roller surface. After laser cladding with optimized parameters, the crack-free coatings with thickness over 0.4 mm, have strong metallurgic bond with the substrate. The main microstructure of the coating consists of hypoeutectic matrix and many homogeneously distributed complex carbide particles with average hardness of 915HV_{0.2}. Wear test and real production applications demonstrate that the abrasive wear resistance and working lifetime of corrugated rollers hardfaced by these particulate-reinforced composite coatings have been dramatically improved.

Key words laser technique; laser cladding; corrugated rollers; particulate reinforced composite coating; abrasive wear resistance

1 引言

瓦楞辊是瓦楞纸板生产线上最昂贵的心脏部件, 它的楞型合理性、制造精度、耐磨耐压性能、使用寿命和运行速度是衡量其品质和经济性的主要技术

指标, 直接关系到纸箱企业的产品质量和经济效益。瓦楞原纸在高速、连续节进的熨烫弯曲成形过程中, 滑过楞齿的齿顶部, 发生相对运动并产生磨擦挤轧, 使齿顶部产生剧烈磨损。瓦楞辊的磨损严重影响生

收稿日期: 2007-10-17; 收到修改稿日期: 2008-01-03

作者简介: 钱兆勇(1982—), 男, 山东人, 硕士研究生, 主要从事激光材料加工方面的研究。

E-mail: qzy05@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 钟敏霖(1961—), 男, 浙江人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光材料加工和激光快速直接制造方面的研究。

E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn

产速度、瓦楞纸板质量和使用寿命。在材质选择及齿型设计逐渐成熟的前提下,研究瓦楞辊强化技术以提高瓦楞辊的耐磨性并实现失效辊的循环利用,是降低瓦楞纸板生产成本,提高瓦楞生产线总体技术水平的关键。因此,瓦楞辊强化和修复技术的发展对瓦楞行业以及包装工业的改革与发展具有重要的意义。

瓦楞辊现有的强化技术包括:中频淬火、氮化、镀铬、激光相变硬化、碳化钨涂层等^[1~4]。这些强化方式在寿命、成本、工艺稳定性和可再修复性等方面存在一定的局限性:中频淬火易开裂、报废率高、使用过程中裂纹扩展会造成楞齿崩裂而过早失效,难以修复和再利用;氮化工艺生产周期长,效率低、成本高,虽硬却不坚。经瓦楞纸中杂质硬粒挤轧撞击,易出现凹陷麻坑,使用寿命短,随着瓦线生产速度的提高,已经呈现被淘汰的趋势;激光相变硬化技术是近年来开发的技术,正在推广应用。瓦楞辊表面经过激光相变硬化处理,得到一定厚度的硬度在 54~60 HRC 的硬化层。但是激光相变硬化技术对瓦楞辊的硬度和耐磨性的提高有限,很大程度上依赖于瓦楞辊的材质和热处理状态,寿命一般在 $8 \times 10^6 \sim 1.2 \times 10^7$ m 之间。喷涂碳化钨是一种新型的强化技术,寿命得到大幅提高,但是制造及修复成本很高,对原始工艺及瓦线精度要求严格,经不起砂砾碾压,在纸质较差的条件下使用比较容易容易出现剥落,且修复困难,质量控制难度较大,在国外也不是普遍应用。

基于传统强化技术存在的某些局限性,本文采用激光熔覆技术进行瓦楞辊的强化。采用瓦楞辊专用激光熔覆材料 THW-64 及优化工艺参数,在瓦楞辊基体上制备耐磨涂层,并进行显微组织分析和耐磨性能测试,证实激光熔覆复合涂层能明显提高瓦楞辊表面的硬度及耐磨性。

2 材料及方法

2.1 实验材料

实验的基体材料采用瓦楞辊最常用材料 42CrMo。为了便于工业应用,控制稀释率,实验中将 42CrMo 基体材料加工成如图 1 所示的瓦楞辊试样块。用 60 号砂纸打磨,并用丙酮清洗,烘干 1 h。粉末材料为清华大学激光加工中心研制的 THW-64,该粉末材料以 FeCrSiBC 铁系合金为基(成分如表 1 所示),添加一定量的 Ti, W, Mo(质量分数比为 1:4:1)等强碳化物形成元素,粉末粒度 $70 \sim 140 \mu\text{m}$ 。

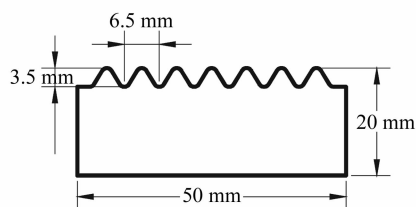


图 1 瓦楞辊试样尺寸

Fig. 1 Dimension of the specimens for corrugated rollers

表 1 铁基合金的主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Key chemical composition of iron-based alloy (mass fraction, %)

Cr	Si	B	C	Fe
13.6	1.10	1.60	0.15	Bal.

2.2 激光熔覆工艺

实验采用 PRC3000 型 3 kW 快轴流 CO₂ 激光器进行激光熔覆,系统还包括一个自动正压送粉器和有保护气帘的同轴送粉喷嘴。主要工艺参数范围为:激光光束直径 2~3 mm,激光器输出功率 800~1500 W,扫描速度 3~5 mm/s,送粉量 2~6 g/min,氮气保护,保护气流量 300~500 L/h。

2.3 摩擦学实验

瓦楞辊工作过程中由于原纸夹杂物和矿物硬粒的摩擦与撞击,承受剧烈的低应力干摩擦磨粒磨损,使楞顶部剧烈磨损失效。为了尽量模拟工况条件,采用自动研磨抛光机改造的磨粒磨损试验机进行磨损实验,如图 2(a)所示。三个摩擦学试样对称布置,卡盘自转与砂纸盘转动相结合,熔覆层在一定压力和速度下与砂纸对磨。该设备可以自动控制压力、转速和时间,可以实现模拟不同载荷和磨粒的磨损工况。选择最优参数在瓦楞辊试样上激光熔覆制备耐磨涂层后,按照标准尺寸要求加工成摩擦学试样,尺寸要求如图 2(b)所示。按照表 2 所示规范进行磨损试验,整个实验过程分为六个部分,为了保证砂纸磨粒有足够的数量和切削能力,每隔 6 min 换一道砂纸。砂纸的粒度为 400 目,接近实际生产中瓦

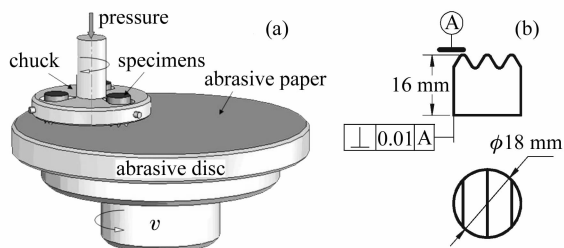


图 2 (a) 磨粒磨损试验机示意图;(b) 试样尺寸

Fig. 2 (a) Schematic diagram of abrasive abrasion test machine; (b) dimension of specimens for abrasion test

楞芯纸砂粒尺寸。每个阶段分预磨与磨损两个过程,磨损阶段载荷90 N,接触压力大于0.5 MPa。由于瓦楞辊工作温度为170~200 ℃,实验过程产生的热量不会对结果产生太大的影响。在此磨削工艺

下,各熔覆层均有比较稳定的失重,便于进行相对比较。磨损前后用丙酮超声清洗15 min,吹干称量质量,计算失重,比较相对耐磨性。

表2 摩擦学试验规范

Table 2 Parameters for abrasion test

Parameters	1		2		3~6	
	Pre-grinding	Abrasion	Pre-grinding	Abrasion	Pre-grinding	Abrasion
Load /N	10	30	30	60	30	90
Time /min	1	5	1	5	1	5

3 结果与讨论

3.1 瓦楞辊激光熔覆复合涂层的制备

瓦楞辊工作过程中因承受剧烈的干摩擦磨粒磨损而早期失效。研究证明,瓦楞辊相变硬化得到的硬度为HRC54~60的马氏体组织在抵抗高硬度磨粒磨损方面的寿命有限,难以进一步提高。清华大学激光加工中心基于瓦楞辊磨损机制,研制了专门针对瓦楞辊磨粒磨损的激光熔覆材料 THW-64,经过工艺优化,制备了成形良好,无气孔、夹杂、裂纹等缺陷的激光熔覆层,其宏观形貌如图3(a)所示。上层为激光熔覆层,最大厚度为1.23 mm,最大宽度为1.95 mm,熔覆层与瓦楞辊基材界面呈冶金结合,如图3(b)所示。熔覆层下部是相变硬化层,平均厚度为0.83 mm。通过控制工艺得到的熔覆层仅有很小的加工量,降低实际应用后续加工的难度。

量逐渐减小,以及熔池底部温度的降低,导热快,熔池停留时间短。

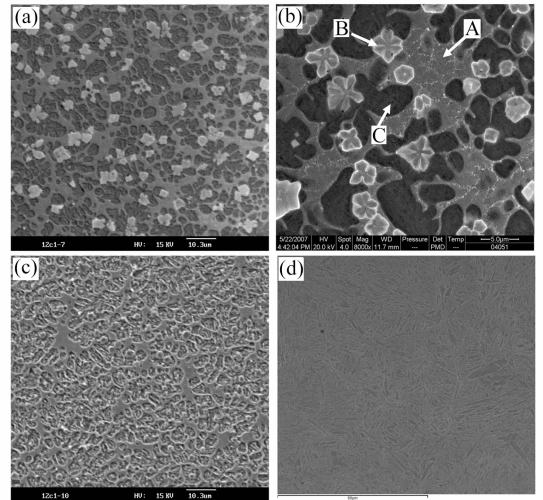


图4 熔覆层的显微组织。(a) 熔覆层上部组织;(b) 颗粒形貌;(c) 熔覆层下部组织;(d) 相变硬化层组织
Fig. 4 Microstructure of cladding layer. (a) microstructure at upside in cladding layer; (b) microstructure of particles; (c) microstructure at bottom; (d) microstructure of laser hardening layer

研究证实,在激光熔覆熔池内,通过元素或其碳化物形式加入的强碳化物形成元素 Ti, W, Mo 等与熔池中的碳结合可以析出复合碳化物^[5~10]。对图5(a)所示 A 颗粒进行电子探针分析,发现颗粒中主要含有 Ti, W, Mo, C 等元素,如图5(b)所示。对组织中三种典型相进行成分分析,如图4(b)所示,各元素相对含量如表3所示。其中 Ti 元素在奥氏体中固溶度很小,它与碳结合能力最强, Ti 元素主要分布于颗粒中,如图5(e)所示,对碳化物的形核和长大贡献最大。而 W, Mo 在形成碳化物的同时,会在基体中大量固溶,如图5(c), (d)所示。Cr 元素主要存在于奥氏体及莱氏体基体中。伴随着快速冷却,先共晶奥氏体在随后的快速冷却过程中发生了

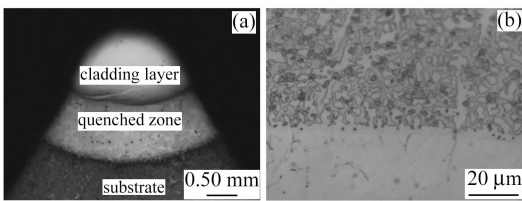


图3 (a) 熔覆层宏观形貌;(b) 熔覆层界面
Fig. 3 (a) Macrograph of cladding layer;
(b) interface of cladding layer

3.2 熔覆层的微观组织

熔覆层的微观组织具有典型的亚共晶组织特征,由先共晶奥氏体枝晶及急冷转变相和共晶莱氏体组成。熔覆层在冷却凝固过程中原位析出了大量复合碳化物颗粒,均匀弥散分布于基体中,如图4(a)~(c)所示。颗粒呈不规则多边形或花瓣状,尺寸在1~5 μm之间。由于凝固界面前沿对颗粒的特殊捕获作用,原位析出的颗粒主要分布在奥氏体枝晶和枝晶间^[5]。熔覆层顶部到底部颗粒尺寸减小,主要是由于基体的稀释作用使得碳化物形成元素含

马氏体转变,且由于合金元素的大量固溶,使得亚共晶基体得到了强化,于是就形成了以马氏体为基,内含大量均匀弥散复合碳化物的独特复合强化组织,如图4(a)所示。熔覆层下部的热影响区在激光熔

覆过程高温高过热度下短时间内奥氏体化,随后的冷却过程中,依靠金属基体的高热导率迅速冷却,发生马氏体转变,得到晶粒极度细化的马氏体和残余奥氏体组织,如图4(d)所示。

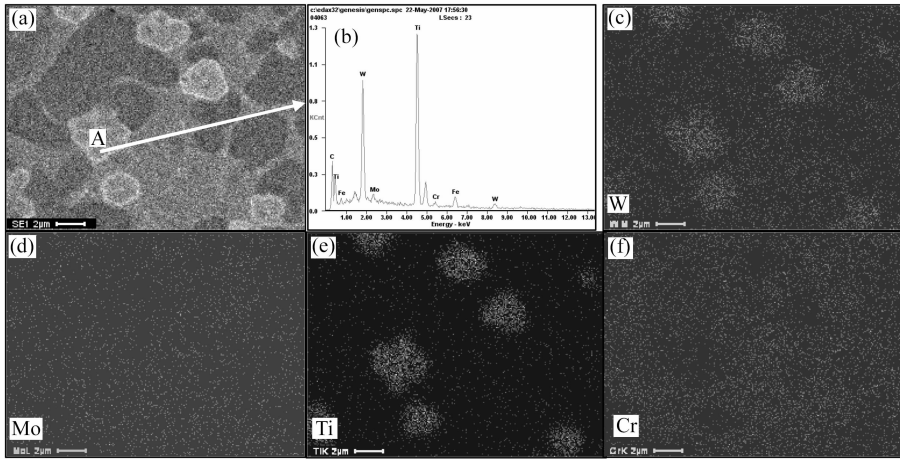


图5 合金元素面分布及颗粒能谱分析

Fig. 5 Area distribution of alloy elements and EDX analysis of particles

表3 能谱分析结果(质量分数,%)

Table 3 EDX results (mass fraction, %)

	Ti	W	Cr	Mo	Fe
A	—	7.9661	10.8738	2.1615	78.9985
B	47.5712	43.8286	—	4.1336	4.4667
C	—	4.2402	5.5874	0.4443	89.7281

3.3 熔覆层的显微硬度

熔覆层硬度分布如图6所示,显微硬度变化主要分三个区域:熔覆层、相变硬化层和基体。熔覆层具有较高的显微硬度,其中最高硬度为947HV_{0.2},平均显微硬度为915HV_{0.2},这是由于颗粒的承载作用、合金元素的固溶强化以及马氏体相变强化共同作用的结果。熔覆层厚度为1.25 mm,硬度分布均匀,底部硬度无明显降低,熔覆层的下面是厚度为0.83 mm的热影响区,基体发生了马氏体相变,得到了晶体缺陷和晶格畸变大幅增加的细针状马氏体,

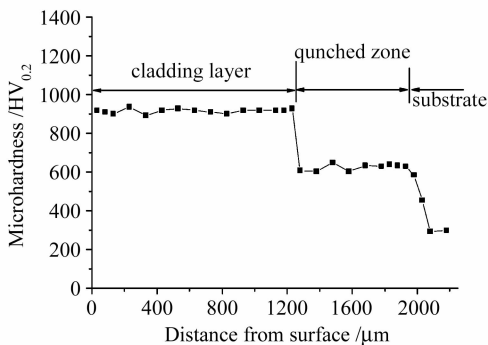


图6 熔覆层显微硬度分布

Fig. 6 Micro hardness of cladding layer

平均硬度为625HV_{0.2}。熔覆层与相变硬化层呈良好的冶金结合,界面牢固,不易脱落。这种硬度分布接近理想状态,熔覆层具有很高的硬度,抵抗剧烈的磨损;相变硬化层强韧性好,可以缓冲熔覆层受到的冲击,对熔覆层起到了良好的支撑作用,防止应力造成的压溃;而基体金属在激光处理过程中基本不受影响,韧性好。各层硬度递变,形成了强韧结合的激光熔覆强化层,有效抵抗冲击力,减少了表层损坏的概率,充分发挥熔覆层优势。

3.4 摩擦学对比实验

将激光相变硬化和激光熔覆的试样进行干摩擦对比实验,计算总失重。激光相变硬化的试样经过第一道砂纸磨损之后,相变硬化层已经被磨掉,随即停止。为了使熔覆的试样有足够失重,减小称量误差,按照表2所示规范进行试验。磨损过的试样在丙酮中超声清洗15 min,称量失重如表4所示。相变硬化失重为1.3407 g,熔覆试样失重为0.0980 g。经过激光熔覆的试样耐磨粒磨损性能得到大幅度提高。

磨粒磨损过程中,表面材料的去除主要有三种机制^[11]:微观切削、犁沟导致的塑性变形以及硬质相的脱落。为了分析两种强化层耐磨性差异的机制,将激光熔覆的试样浅腐蚀之后在200目SiO₂磨粒上进行特定磨粒磨损,观察磨痕形貌,如图7(a)~(c)所示,分析组成相对提高耐磨性的贡献。

表4 磨损实验结果
Table 4 Results of wear test

	Time /min	Parameters before abrasion		Parameters after abrasion		Weight loss /g	Total loss /g
		Weight /g	Height /mm	Weight /g	Height /mm		
Laser hardened coatings	6	29.1960	16.13	28.7839	15.33	0.4121	1.3407
		29.2684	16.13	28.8130	15.32	0.4554	
		29.3214	16.14	28.8482	15.31	0.4732	
THW-64 coatings	36	28.3536	16.01	28.3181	15.86	0.0355	0.0980
		28.1638	15.82	28.1282	15.72	0.0356	
		28.7250	16.10	28.6981	16.03	0.0269	

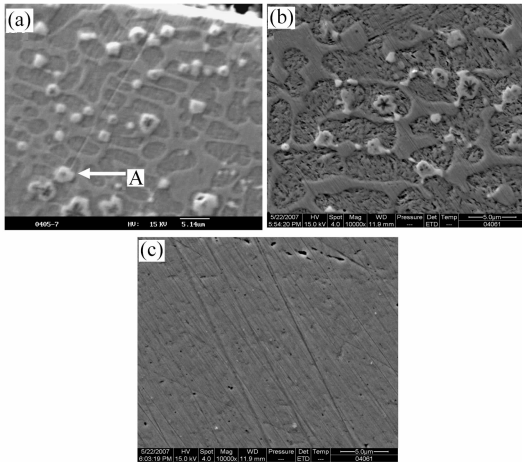


图7 (a),(b) 熔覆层磨痕形貌;
(c) 相变硬化层磨痕形貌

Fig.7 (a),(b) Worn scars of cladding layer;
(c) worn scars of laser hardening layer

瓦楞辊热处理得到的马氏体组织在承受磨粒磨损时,由于其硬度低于磨粒硬度,在一定的压力下,磨粒很容易侵入基体,产生微观切削或犁沟变形,如图7(c)所示,材料被逐步去除。而熔覆层中原位自生的颗粒缺陷少,具有很高的硬度,尺寸较大,与基体结合牢固,不易脱落,在抵抗磨粒磨损中起着决定性作用。侵入的颗粒与硬质相碰撞,磨粒被磨损或者破碎,降低切削作用,使得微观切削得到很大程度的限制^[12]。熔覆层在抵抗磨粒磨损方面主要的优势为:1)如图7(a)中A处所示,磨粒对基体的微观切削被碳化物颗粒阻止;2)硬质颗粒的承载,减小了磨粒作用于基体的载荷,减小其切入深度;3)合金元素的固溶强化,使得基体硬度大幅提高,抵抗磨粒侵入,并能够为颗粒提供有力的支持,防止颗粒脱落带来更严重的磨损。基于这样的原因,熔覆层具有较强的抵抗磨粒磨损能力,熔覆层金属基体的磨痕深度宽度较相变硬化层均有大幅降低,如图7(b),(c)所示。碳化物颗粒无明显擦伤,在基体的牢固支持作用下对于抵抗微观切削起重要的作用。同

时,W,Mo元素的存在,可以提高其高温硬度和抗回火软化的能力,使得熔覆层在一定温度下仍然可以保持良好的耐磨性。

该成果已经应用于生产中,如图8所示,运行良好,可以明显提高使用寿命。由于激光熔覆强化瓦楞辊具有良好的抗磨损能力,瓦楞辊使用过程中保持良好的楞型,对纸纤维破坏小,生产的纸板质量好。



图8 激光熔覆强化的瓦楞辊在运行中

Fig.8 Working corrugated rollers strengthened by laser cladding

4 结论

采用瓦楞辊专用材料 THW-64 在瓦楞辊表面激光熔覆制备了颗粒增强耐磨涂层。涂层组织为亚共晶基体上弥散分布着大量原位自生的复合碳化物颗粒。熔覆层平均显微硬度为 915HV_{0.2},马氏体和弥散分布的大量高硬复合碳化物颗粒明显增强了涂层耐磨粒磨损的性能。激光熔覆瓦楞辊的使用寿命较激光相变硬化有明显提高。

参 考 文 献

- 1 Sun Zhenjun, Chen Wenqi, Zheng Hongyan. Exploration of corrugated roller technology [J]. *Packing Technology*, 2005, **26**(3):83~85
孙振军,陈文奇,郑红艳. 瓦楞辊技术探析[J]. *包装工程*, 2005, **26**(3):83~85
- 2 Wang Haijun, Wang Jian, Jiang Jiheng *et al.*. A new technology for enhancing wear resistance of corrugated rollers

- [J]. *New Technology & New Process*, 2005, (12):53~55
王海军,王 建,姜继恒等. 提高瓦楞辊齿面耐磨性新技术[J]. 新技术新工艺, 2005, (12):53~55
- 3 Guo Jiping. Manufacturing and repairing of corrugated rollers by thermal spraying [C]. Proceedings in 6th Thermal Spraying Conference, Chongqing, 2003
郭吉平. 瓦楞辊的热喷涂制造与修复[C]. 第六届热喷涂研讨会,重庆, 2003
- 4 Sun Zhenjun, Li Xiuwen, Hou Hongjuan *et al.*. Analysis on heat treatment technology of corrugated roller [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, **31**(9):43~45
孙振军,黎秀文,侯红娟等. 瓦楞辊的热处理技术分析[J]. 金属热处理, 2006, **31**(9):43~45
- 5 Zhang Qingmao, He Jinjiang, Liu Wenjin *et al.*. The investigation on the microstructure and properties of in situ particulate reinforced metal matrix composites layer produced by laser cladding [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2):109~113
张庆茂,何金江,刘文今等. 激光熔覆制备原位颗粒增强金属基复合表层组织性能的研究[J]. 应用激光, 2002, **22**(2):109~113
- 6 Zhang Jinying, Ma Mingxing, Liu Wenjin *et al.*. Influence of V and Ti on the microstructure of in-situ particles reinforced Fe-based composite coating by laser cladding [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2003, **28**(8):1~4
张锦英,马明星,刘文今等. 钒、钛对激光熔覆铁基原位生成颗粒增强复合涂层组织的影响[J]. 金属热处理, 2003, **28**(8):1~4
- 7 Ma Mingxing, Liu Wenjin, Zhong Minlin *et al.*. Influence of Nb on the microstructure of laser clad composite coating reinforced by in-situ particles [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(3):145~148
马明星,刘文今,钟敏霖等. 铌对激光熔覆铁基原位合成颗粒增强复合涂层组织的影响[J]. 应用激光, 2006, **26**(3):145~148
- 8 Zhang Qingmao, He Jinjiang, Liu Wenjin *et al.*. Microstructure and properties of Zr/FeCSiB layers produced by laser cladding [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(2):81~84
张庆茂,何金江,刘文今等. 激光熔覆 Zr/FeCSiB 涂层的组织和性能[J]. 激光技术, 2003, **27**(2):81~84
- 9 Wang Wenli, Chao Mingju, Wang Dongsheng *et al.*. Investigation on in-situ synthesis of TaC particulate reinforced Ni-based composite coatings by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):277~282
王文丽,晁明举,王东升等. 原位生成 TaC 颗粒增强镍基激光熔覆层[J]. 中国激光, 2007, **34**(2):277~282
- 10 Niu Xin, Chao Mingju, Wang Wenli *et al.*. In situ synthesized NbC particulate reinforced Ni-based composite coatings by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):987~992
牛 薪,晁明举,王文丽等. 原位生成 NbC 颗粒增强镍基激光熔覆层[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):987~992
- 11 Hui Wang, Weiming Xia, Yuansheng Jin. A study on abrasive resistance of Ni-based coating with a WC hard phase[J]. *Wear*, 1996, **195**:47~52
- 12 S. W. Huang, M. Samandi, M. Brandt. Abrasive wear performance and microstructure of laser clad WC/Ni layers [J]. *Wear*, 2004, **256**:1095~1105