

文章编号: 0258-7025(2008)05-0776-06

铁基合金激光熔覆层的摩擦学特性

宋 杰¹ 张庆茂¹ 林晓聪² 廖健宏¹

(¹ 华南师范大学激光加工技术实验室, 广东 广州 510631; ² 广州瑞通千里激光设备有限公司, 广东 广州 510631)

摘要 为评估激光熔覆技术修复塑料模具的磨损性能, 采用铁基合金粉末在 40Cr 钢基体表面进行激光熔覆。激光熔覆层为上试样, GCr15 钢球为下试样, 利用 HT-500 磨损试验机进行摩擦磨损试验, 研究在干摩擦、润滑条件下, 激光熔覆层及其配副的摩擦学特性。利用表面形貌仪测量磨痕的深度和宽度, 理论计算磨损率。研究结果表明, 在干摩擦条件下, 随载荷的增加, 激光熔覆层及其配副的摩擦系数先降低后增加, 当载荷为 300 g 时摩擦系数最小; 随载荷的继续增加, 摩擦系数逐渐增大。在相同载荷与润滑条件下, 激光熔覆层及其配副的摩擦系数、磨损率、磨痕宽度均小于干摩擦条件下的值; 随着磨损时间的增加, 摩擦系数在磨损后期略有上升, 磨损深度、磨损体积、磨损率逐渐增大。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 摩擦系数; 磨损率

中图分类号 TG 159.99 **文献标识码** A

Tribological Behavior of Fe-Based Alloy Coating Formed by Laser Cladding

Song Jie¹ Zhang Qingmao¹ Lin Xiacong² Liao Jianhong

(¹ *Laboratory of Laser Processing Technology, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China*)
(² *Guangzhou Riton Laser Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510631, China*)

Abstract In order to investigate the tribological performance of laser clad coating on die steel, laser cladding techniques were adopted with Fe-based alloy powders. The tests were carried out by using laser clad layers as upper samples and GCr15 steel as low samples with HT-500 wear tester. The morphologies of wear scars were observed with optical microscopy, and the width and the depth of the wear samples were measured. In the meantime, the wear rate was calculated theoretically. Under dry sliding condition, As the tests shown, friction coefficient decreases with the load increase gradually, and then increases. And the wear performance of 300 g load is better than that of 500 g load under dry sliding condition. Under lubricant condition, with the increase of load, the friction coefficient decreases gradually. And the friction coefficient, wear rate and wear width under lubricant are smaller than those under dry friction with the same load.

Key words laser technique; laser cladding; friction coefficient; wear rate

1 引 言

以塑代木、以塑代钢是我国塑料行业的发展趋势。模具是塑料成型的重要装备, 直接影响塑料成型的质量及其使用性能。塑料模具在使用过程中, 由于磨损、腐蚀、疲劳等原因而产生失效。模具制造周期长、成本高, 且模具失效往往发生在表面, 因此采用先进的表面工程技术对失效的模具进行修复, 具有巨大的经济效益。激光熔覆技术作为先进的涂

层制备与成形技术已广泛应用于金属零部件的表面强化与修复中^[1~5]。激光器及其关键部件的发展, 先进涂层设计理论的完善, 工艺的优化, 使激光熔覆技术将逐步应用于模具制造业和修复业中^[6~9]。目前, 激光熔覆的设备主要有 CO₂ 激光器和脉冲 Nd:YAG 激光器。CO₂ 激光器主要应用于大型部件的表面强化与修复, 而对于中小型的塑料模具, 由于结构和尺寸的限制, 采用 CO₂ 激光器修复易产生变形

收稿日期: 2007-08-07; 收到修改稿日期: 2008-01-10

基金项目: 广东省科技攻关项目(2006A10405002, 2007B010400067)资助课题。

作者简介: 宋 杰(1979—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光先进技术方面的研究。E-mail: jiesong68@sina.com

导师简介: 张庆茂(1966—), 男, 教授, 工学博士, 主要从事激光先进制造技术方面的研究。

E-mail: zhangqm@scnu.edu.cn (通信作者)

和裂纹。脉冲 Nd:YAG 激光熔覆具有较小的热积累,不易产生变形、裂纹等冶金缺陷,且易于光纤传输,逐渐被业界采用^[10~12]。以往的研究采用 Ni 基和 Co 基合金^[13,14],而针对钢铁材料基体设计的具有较好相容性的铁基合金材料研究较少。本文采用自行研制的铁基合金材料,以模具常用的 40Cr 合金钢为基体,进行激光熔覆试验;探讨在干摩擦和润滑摩擦条件下,激光熔覆层的摩擦磨损性能,为今后采用激光熔覆技术修复中小型塑料模具提供基础数据。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

基体材料为 40Cr,正火态,试样加工成直径 50 mm,高 10 mm 的圆盘,对磨材料为 GCr15 球,直径为 3 mm。激光熔覆材料采用自行研制的铁基合金粉末,为 Fe-C-Si-B-RE 系合金粉末^[12],其主要的化学元素为 Fe,C,Si,B,Co,Ni 以及少量的稀土氧化物。粉末尺寸在 74~100 μm 之间,润滑采用机油。

2.2 试验方法

采用脉冲 Nd:YAG 激光器,激光熔覆工艺参数如表 1 所示。40Cr 基材表面用砂纸打磨平整,并用乙醇、丙酮清洗。采用预置激光熔覆法,通过多道搭接的方法获得大面积熔覆层。对激光熔覆层表面进行精磨、抛光、处理,供磨损试验用。

表 1 激光熔覆工艺参数

Table 1 Laser cladding processing parameters

Processes	Laser cladding
Power /kW	0.3~0.5
Scanning speed /(mm/s)	2~5
Beam diameter /mm	3
Preplaced thickness /mm	0.7~1.5
Pulse width /ms	2.5
Frequency /Hz	20

表 2 磨损试验参数

Table 2 Experimental parameters of wear

Normal load /g	100~500
Rotation speed /(r/min)	448
Rotation radius /mm	2
Temperature	Room
Run in time /min	10
Steady state time /min	50
GCr15-ball radius /mm	3

磨损试验采用 HT-500 型高温摩擦磨损试验机,磨损试验规范如表 2 所示。摩擦方式采用球盘式。将测试温度设定到室温,通过加载机构加上试

验所需载荷,同时驱动样品盘上的摩擦试块转动,使其与对偶球进行摩擦。HT-500 型高温摩擦磨损试验机可以自动检测试验即时温度、摩擦系数等数据并进行即时图形显示和数据存储。

采用 WYKO NT1100 型光学表面轮廓仪测量磨痕的深度和宽度,每点间隔 3 μm,测量数据点数根据磨痕宽度随机生成。在计算机上使用 OriginPro 软件完成磨痕断面曲线的精确还原,与初始表面拟合,利用 OriginPro 编程计算出径向磨痕宽度和深度,并以磨痕宽度和深度作为磨损量的评定标准,以摩擦系数的大小作为摩擦力大小的标志。体积磨损量可表示为^[15]

$$\Delta V = L_0 \left[r^2 \arcsin \frac{d}{2r} - \frac{d}{2} \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2} \right], \quad (1)$$

式中 L_0 为下试样运行一周的周长, r 为 GCr15 钢珠半径, d 为磨痕宽度。由(1)式结果再计算出各种载荷下的磨损率 $Q = \Delta V / 2\pi Rnt$,式中 R 为下试样旋转半径, n 为下试样转速, t 为试验时间。试验时间均为 1 h,并根据试验数据列出平均摩擦系数、摩擦力、磨损量及磨损率。

3 试验结果

3.1 大面积激光熔覆层的制备

采用预置激光熔覆法进行大面积涂层制备的关键是激光参数的选择、工艺参数、预涂层的厚度以及搭接率的控制。通过系列试验,确定单道熔覆的扫描速度 V_s 为 2~5 mm/s,搭接率控制在 30% 左右。为避免多道搭接过程中的热积累,逐道提高搭接熔覆时的扫描速度。经过反复大量试验,获得激光熔覆的各项工艺参数如表 1 所示。激光熔覆层表面形貌如图 1 所示。工艺参数选择不当,例如粉末预涂太厚、扫描速度太快、搭接率选择不合适,则极易产生裂纹、孔洞等缺陷,如图 2(a)所示。图 2(b)是经

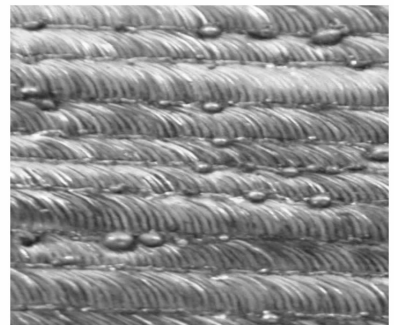


图 1 良好熔覆层示意图

Fig. 1 Schematic of perfect laser cladding layer

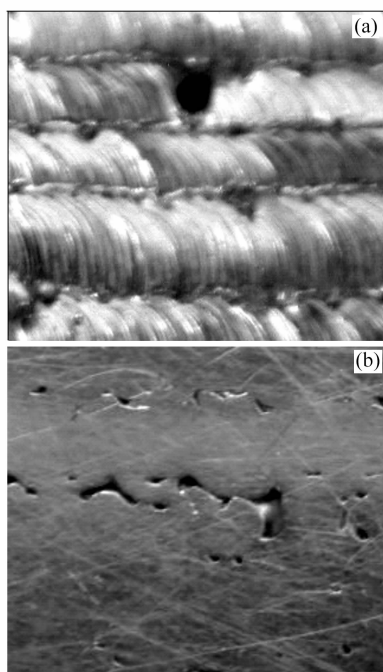


图2 缺陷熔覆层示意图

打磨、抛光后的熔覆层表面,可以观察到在搭接区产生的孔隙。这是由于搭接率、扫面速度选择不当,熔覆材料不能很好地熔化、补缩形成的不连续孔隙带,直接影响熔覆层的成形性及其使用性能。因此,利用激光熔覆技术制备大面积涂层需经反复的试验,确定出最佳的制备表面无宏观缺陷、内部无微观冶金缺陷的高质量熔覆层的工艺参数。

3.2 摩擦磨损特性

以 GCr15 钢球和 40Cr 钢表面激光熔覆层为配副,在干摩擦、润滑条件下摩擦磨损的试验结果分别如表 3,表 4 所示。

摩擦系数随载荷、时间变化的趋势如图 3 所示。图 3 表明,在 100~300 g 载荷范围内,随着载荷的增加,摩擦系数逐渐降低。磨损后期摩擦系数平均值由 1.574 降低到 0.444,降低了 71.8%;摩擦力平均值由 1.754 N 降低到 1.332 N,降低了 24%。图 3(a) 表明,除载荷 100 g 之外,随着磨损时间的增加,摩擦系数均呈现下降的趋势。而当载荷为 300 g 时,摩擦系数下降的幅度最大,摩擦系数最小,磨损过程非常平稳。当继续增加载荷,摩擦系数随时间的增加而发生显著的变化,如图 3(b) 所示。当载荷为 400 g,磨损时间超过 35 min 后,摩擦系数随磨损时间的增加而逐渐增大,呈现上升的趋势。当载荷增加到 500 g 时,摩擦系数变化的幅度较大,比 300 g 载荷时的摩擦系数增加了 75%,而平均摩擦力增加了 2.9 倍,且磨损过程不平稳,经 40 min 后才进入稳定磨损状态。磨损时间接近 60 min 时,摩擦系数急剧变化,呈现逐渐上升的趋势。磨损量和磨损率与 300 g, 400 g 载荷时相比已不在同一个数量级,表明磨损过程已进入严重磨损阶段。对 300~500 g 载荷条件下的磨损试样的磨损深度、宽度检测结果表明,500 g 载荷时的磨痕深度、磨痕宽度、磨损量和磨损率分别为 300 g 载荷时的 47 倍,48 倍和 19.3 倍,平

表 3 干摩擦条件下的磨损试验结果

Table 3 Results of wear under dry friction

Loading /g	Friction coefficient		Friction force /N	Wear width /mm	Wear depth / μm	Wear volume / mm^3	Wear rate / $\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$
	Variation range	Mean values					
100	1.5~1.648	1.574	1.574	—	—	—	—
150	0.79~1.146	0.968	1.452	—	—	—	—
200	0.842~0.972	0.907	1.814	—	—	—	—
250	0.791~1.013	0.902	2.255	—	—	—	—
300	0.431~0.457	0.444	1.332	0.650	1.096	0.0962	2.85×10^{-7}
400	0.439~0.483	0.461	1.844	0.898	1.630	0.2548	7.53×10^{-7}
500	0.639~0.914	0.777	3.885	0.945	52.706	1.8578	5.50×10^{-6}

表 4 润滑摩擦条件下的磨损试验结果

Table 4 Results of wear under lubrication condition

Loading /g	Mean friction coefficient	Friction force /N	Wear width /mm	Wear depth / μm	Wear volume / mm^3	Wear rate / $\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$
300	0.173	0.519	0.1545	2.43	1.287×10^{-3}	3.81×10^{-9}
400	0.119	0.476	0.2005	2.81	2.814×10^{-3}	8.33×10^{-9}
500	0.016	0.080	0.2103	2.89	3.246×10^{-3}	9.61×10^{-9}

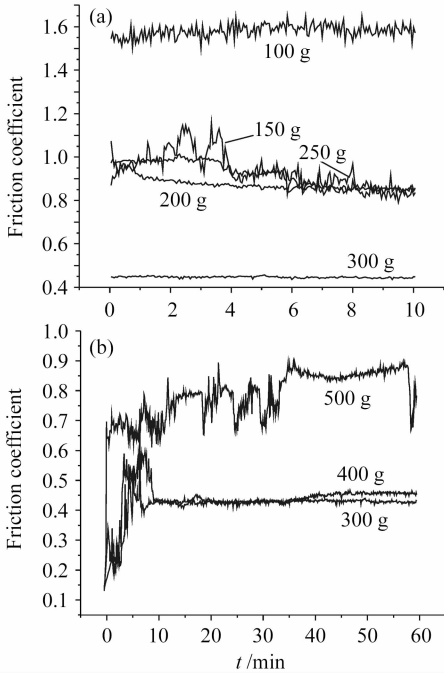


图 3 摩擦系数随载荷和时间的变化趋势
 Fig. 3 Variable trend of friction coefficient under different loads and wear times

500 g 载荷下磨痕形貌比较规则, 呈现类似抛物线的形状。

从表 4 看出, 在润滑条件下, 随着载荷的增加, 摩擦系数呈现逐渐降低的趋势。500 g 载荷时的磨痕宽度、磨损量和磨损率分别是 300 g 载荷时的 1.4 倍和 2.5 倍。但 500 g 载荷时的平均摩擦系数和摩擦力分别比 300 g 载荷时下降了 90.8% 和 84.6%。对比表 3, 4, 润滑条件下的磨损性能优于干摩擦条件下的磨损性能, 而且允许加载更大的载荷, 有利于熔覆层在高应力条件下的应用。

图 5 是润滑条件下熔覆层及其配副不同载荷条件下摩擦系数随时间的变化规律。在相同的磨损时间内, 随着载荷增加, 平均摩擦系数由 0.173 下降到 0.016, 降低了 90.8%, 平均摩擦力下降了 84.6%。经光学表面轮廓仪测量, 300 g 时的磨痕宽度和深度分别为 0.1545 mm 和 2.43 μm。而 500 g 时的磨痕宽度和深度比 300 g 分别增加了 36.1% 和 18.9%, 磨痕形状大致成抛物线形, 其磨痕形貌如图 6 所示。从图 5 可以看出在整个磨损过程中, 三种不同载荷下摩擦系数值的变化范围很小。在磨损后期摩擦系数略

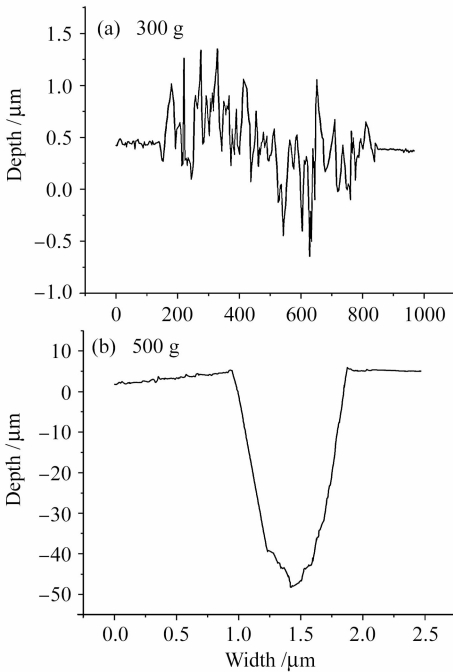


图 4 干摩擦条件下不同载荷熔覆层的磨痕形貌曲线
 Fig. 4 Surface profile of wear scar under by friction condition

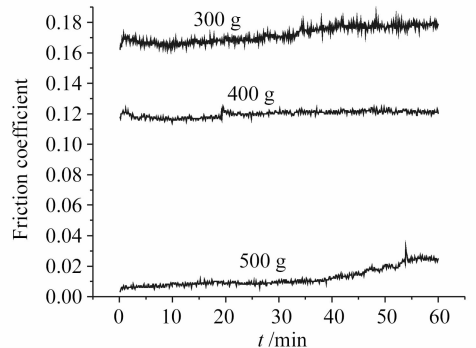


图 5 润滑条件下摩擦系数随载荷的变化趋势
 Fig. 5 Trend of friction coefficient with load and wear time

均摩擦系数和摩擦力分别是 300 g 时的 1.75 倍和 2.92 倍。300 g 和 500 g 载荷下的磨痕形貌经过表面轮廓仪测量分别如图 4(a), (b) 所示。300 g 载荷时由于摩擦系数小, 磨损较轻, 其磨痕形貌不规则。而

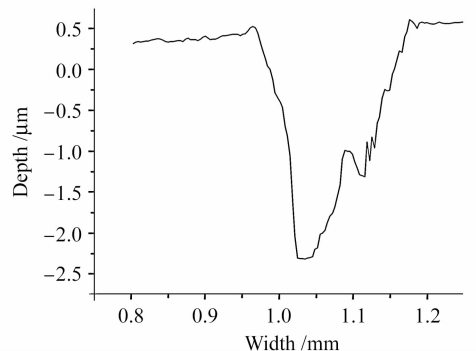


图 6 润滑条件下的磨痕形貌
 Fig. 6 Surface profile of wear scar under lubrication condition

有上升的趋势,磨损过程比较稳定。

4 讨论与分析

激光熔覆是一种快速熔化、快速凝固的冶金过程。以铁基合金粉末为熔覆材料的激光强化层显微组织特征是以细小的共晶莱氏体为基底,上面分布着先共晶渗碳体,是典型的快速凝固组织,其强化层中不仅含有大量的合金渗碳体,而且还有马氏体、残余奥氏体和原位析出的颗粒^[16,17]。在磨损过程中,合金渗碳体、马氏体以及原位析出的高硬度颗粒起到支撑的作用;在应力作用下,残余奥氏体向马氏体转化,不仅可以吸收一部分能量,避免应力集中,而且残余奥氏体因能转变为马氏体引起显著加工硬化,提高熔覆层的显微硬度,进一步地改善熔覆层及其配副的耐磨性。因此,在干摩擦条件下,激光熔覆层及其配副在载荷(100~300 g)逐渐增加的情况下,摩擦系数呈现降低的趋势,而耐磨性呈现增加的趋势。当载荷继续增加,超过300 g时,应力超过了熔覆层材料的强度极限,熔覆层产生疲劳,微裂纹产生、集中、扩散引起材料断裂,摩擦系数变大,磨损增加。

在干摩擦条件下,摩擦副之间的真实接触面积小,应力大,金属之间容易发生粘着。随着载荷增加,平均摩擦系数增大,滑动摩擦力增大,金属之间结合紧密。当超过材料的屈服极限时,材料容易发生塑性变形。在润滑条件下,摩擦副接触表层间形成一层薄油膜,这层薄油膜隔断了摩擦副金属之间的直接接触,且在磨损过程中,润滑区域里的油膜由于总体弹性流体效应的作用会向沟槽内流动,降低了摩擦副之间金属原子直接结合的可能性,减小了摩擦副之间的磨损。油膜的作用隔离了空气,减少了氧化磨损,对磨损表面起着保护作用。随着磨损

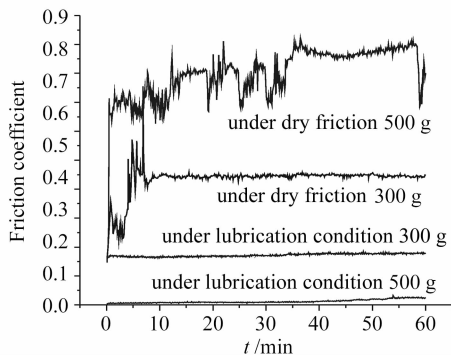


图7 摩擦系数随载荷和时间的变化趋势

Fig. 7 Variable trend of friction coefficient with load and wear time

时间的增加,摩擦产生的热会改变油膜的粘度和厚度。在磨损后期,摩擦系数有稍微上升的趋势,但变化范围很小。但在润滑条件下,激光熔覆层及其配副的磨损性能比干摩擦条件下有较大幅度的提高,可以承载更高的载荷,如图7所示。因此,在润滑条件下,激光熔覆层及其配副可以在较大的载荷下工作,而不容易发生失效。

5 结 论

在干摩擦条件下,当载荷低于300 g时,随载荷的增加,摩擦系数逐渐降低,耐磨性增大。超过300 g载荷时,摩擦系数逐渐增大,耐磨性降低。

在润滑条件下,在300~500 g载荷范围内,随载荷的增加,摩擦系数降低;随着磨损时间的延长,摩擦系数在磨损后期略有上升,磨损性能略有下降。

润滑条件下的磨损性能优于干摩擦条件下的磨损性能。

参 考 文 献

- 1 R. C. Gassmann. Laser cladding with (WC+W₂C)/Co-Cr-C and (WC+W₂C)/Ni-B-Si composites for enhanced abrasive wear resistance [J]. *Material Science and Technology*, 1996, **12**(8):691~696
- 2 Song Jianli, Deng Qilin, Hu Dejin *et al.*. Microstructure characterization and properties of laser cladding forming 316L stainless steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1441~1444
宋建丽,邓琦林,胡德金等.激光熔覆成形316L不锈钢组织的特征与性能[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1441~1444
- 3 Luo Genxiang, Wu Guoqing, Huang Zheng *et al.*. Microstructures of Ni-Cr-Ti-Al laser claddings on K418 superalloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):283~287
罗根香,吴国清,黄正等. K418合金激光熔覆Ni-Cr-Ti-Al涂层的组织研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):283~287
- 4 C. Navas, A. Conde, B. J. Fernandez *et al.*. Laser coatings to improve wear resistance of mould steel [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, **194**(1):136~142
- 5 Zhang Qingmao, Liu Wenjin. Investigation on microstructures and tribological characteristic of laser remelting layers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(3):389~392
张庆茂,刘文今.激光熔凝层组织与摩擦学特性的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(3):389~392
- 6 Cha Ying, Zhou Changchi, Tang Xinan *et al.*. Study of improvement of properties of laser cladding Ni superalloy and WC composite layers [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(10):947~950
查莹,周昌炽,唐西南等.改善激光熔覆镍基合金和陶瓷硬质相复合涂层性能的研究[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(10):947~950
- 7 Zhang Qingmao, Liao Jianhong, Liu Wenjin. Investigation on the tribological characteristic of laser clad layer [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(7):887~890
张庆茂,廖健宏,刘文今.激光熔覆层摩擦学特性的研究[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(7):887~890
- 8 Chengyun Cui, Zuoxing Guo, Yuhua Liu *et al.*. Characteristics

- of cobalt-based alloy coating on tool steel prepared by powder feeding laser cladding [J]. *Optics and Laser Technology*, 2007, **39**(8):1544~1550
- 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 Y. P. Kathuria. Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, **132**(2-3):262~269
- 11 S. Sun, Y. Durandet, M. Brandt. Parametric investigation of pulsed Nd:YAG laser cladding of satellite 6 on stainless steel [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, **194**(2-3):225~231
- 12 C. P. Paul, H. Alemohammad, E. Toyserkani *et al.*. Cladding of WC-12 Co on low carbon steel using a pulsed Nd:YAG laser [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2007, **464**(1):170~176
- 13 Xiuying Yang, Xiao Peng, Jiang Chen *et al.*. Effect of a small increase in the Ni content on the properties of a laser surface clad Fe-based alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**(9):4420~4426
- 14 Muthukannan Duraiselvam, Rolf Galun, Stephan Siegmann *et al.*. Liquid impact erosion characteristics of martensitic stainless steel laser clad with Ni-based intermetallic composites and matrix composites [J]. *Wear*, 2006, **261**(10):1140~1149
- 15 Y. H. Liu, Z. X. Guo, Y. Yang *et al.*. Laser (a pulsed Nd:YAG) cladding of AZ91D magnesium alloy with Al and Al₂O₃ powders [J]. *Applied Surface Science*, 2006, **253**(4):1722~1728
- 16 Qingmao Zhang, Jinjiang He, Wenjin Liu *et al.*. Microstructure characteristics of ZrC-reinforced composite coatings produced by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, **162**(2-3):140~146
- 17 Zhang Qingmao, Liu Wenjin. Wear performance of cast iron piston rings strengthened by laser [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, **16**(3):447~452
张庆茂, 刘文今. 激光强化铸铁活塞环的磨损性能[J]. *中国有色金属学报*, 2006, **16**(3):447~452