

文章编号: 1001-3806(2010)03-0331-04

铁基合金激光熔覆层磨损性能研究

宋杰, 黄逸, 庞振华

(广州市光机电技术研究院 广东省现代控制与光机电技术公共实验室, 广州 510663)

摘要: 为了研究模具钢熔覆层在不同润滑情况下的磨损性能, 采用铁基粉在 40Cr 钢表面进行激光熔覆。以激光熔覆层为上试样, GCr15 钢珠为下试样, 在 HT-500 磨损试验机进行摩擦磨损试验, 对比熔覆层在不同润滑条件下的磨损性能, 利用表面形貌仪测量磨痕深度和宽度, 并计算磨损率。得到了在载荷为 300g 和 500g 时, 添加润滑油后与干摩擦相比, 摩擦系数分别下降了 61% 和 97.9%, 磨损率分别下降了 98.7% 和 99.8% 的结果。结果表明, 在干摩擦条件下, 300g 载荷下的磨损性能优于 500g 载荷时的磨损性能, 且 500g 载荷时发生严重磨损; 在相同载荷下, 润滑条件下的摩擦系数、磨损率、磨痕宽度都远小于干摩擦条件下的值; 润滑条件下, 磨损过程比较平稳, 没有磨合期。

关键词: 激光技术; 激光熔覆; 磨损性能; 磨损率; 摩擦系数; 润滑

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.013

Study on wear properties of Fe-based alloy coating by laser cladding

SONG Jie, HUANG Yi, PANG Zhen-hua

(Guangdong Public Laboratory of Modern Control & Optical, Mechanical and Electronic Technology, Guangzhou Research Institute of Optics-Mechanics-Electricity Technology, Guangzhou 5100631, China)

Abstract: In order to investigate the tribological performance of laser clad coating on die steel, Fe-based alloy powders were coated on 40Cr steel. The tests were carried out with as laser clad layers as upper samples and GCr15 steel as lower samples by means of HT-500 wear tester. The morphologies of wear scars were observed with optical microscopy, and the wear width and the depth of the samples were measured. With lubricant, when the load was 300g, the friction coefficient and wear rate descended 61% and 98.7% respectively compared with that without lubricant, under the load of 500g, they declined 97.9% and 99.8% respectively. As the tests show, the wear performance with 300g load is better than that with 500g load under dry friction and the laser clad layer is worn out seriously with 500g load. The friction coefficient, wear rate and wear width with lubricant is rather less than that under dry friction with the same load. The wear processes are in steady state under the lubricant condition, without running-in period.

Key words: laser technique; laser cladding; wear property; wear rate; friction coefficient; lubricant

引言

在塑料模具使用过程中,经常发生模具的失效,给企业带来巨大的经济损失。由于模具制造周期长、成本高,且模具失效往往发生在表面,因此对失效的模具进行修复,具有巨大的经济效益。激光熔覆技术是近年来激光表面工程领域中的研究重点之一,且由于激光熔覆技术修复模具具有显著的优点,已逐步应用于模具制造业和修复业中^[1-5]。目前应用于激光熔覆技术的设备主要有连续 CO₂ 激光器和脉冲 Nd:YAG 激光器^[6]。由于脉冲 Nd:YAG 激光熔覆具有较小的热

积累,不易产生冶金缺陷而逐渐地被业界采用^[7-8]。以往对采用 Ni 基、Co 基合金的研究很多^[9-11],而针对铁基材料基体设计的具有较好相容性的铁基合金研究较少。本实验中采用自制的铁基合金材料,以模具常用的 40Cr 合金钢进行激光熔覆试验,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塑料模具提供基础数据。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

基体材料为 40Cr, 正火态, 试样制成直径 50mm、高 10mm 的圆盘, 对磨材料为 GCr15。由于铁基合金粉末与 40Cr 钢具有较好的相容性, 激光熔覆材料采用铁基合金粉末。润滑油采用机油。

1.2 试验方法

采用广州瑞通千里激光设备有限公司 LWS-300WC

作者简介: 宋杰(1979-), 男, 助理工程师, 主要从事激光先进技术方面的研究。

E-mail: jiesong68@sina.com

收稿日期: 2009-05-26; 收到修改稿日期: 2009-06-01

系列脉冲 Nd: YAG 激光器,激光熔覆工艺参量见表 1。基材表面用砂轮打磨平整,使之有一定的粗糙度,以利于与铁基合金粉末相结合。在基材表面预涂上一层铁

基粉末,激光熔覆后再采用搭接的方法获得大面积熔覆层,制备成大约宽 20mm、长 40mm 的熔覆层。对熔覆层表面进行精磨、抛光处理,供磨损试验用。

Table 1 Laser cladding processing parameters

processes	power/kW	scanning speed/(mm · s ⁻¹)	beam diameter/mm	preplaced thickness/mm	pulse width/ms	frequency/Hz
laser cladding	0.5	2~5	3	0.7~1.5	2.5	20

磨损试验采用 HT-500 型高温摩擦磨损试验机,设备示意图见图 1,磨损试验规范见表 2。摩擦方式采用球-盘式。该磨损机可实现室温到 500℃ 条件下的摩擦磨损性能的测试。将高温炉内的试样温度设定到室温,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。磨损机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。

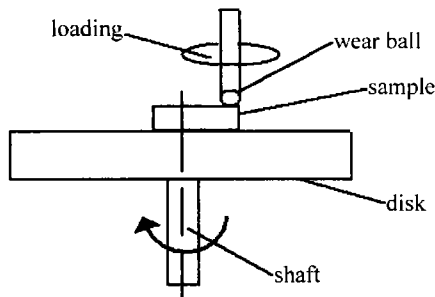


Fig. 1 Schematic diagram of the wear tester

Table 2 Experimental processes of wear

normal load	300g ~ 500g
rotation speed	448r/min
rotation radius	2mm
temperature	room temperature
time (steady state)	60min
steel-ball diameter	3mm

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 3μm,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,再与初始表面拟合,最终利用 OriginPro 编程计算出磨痕宽度和深度,并以磨痕

宽度和深度作为磨损量的评定标准,以摩擦系数的大小做为摩擦力大小的标志。体积磨损量可由下面的方程计算出^[12]:

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

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。由以上结果再计算出各种载荷下的磨损率 $Q = \Delta V / (2\pi Rnt)$, R 为下试样旋转半径, n 为下试样转速, t 为实验时间。本实验时间均为 1h, 并根据实验数据列出平均摩擦系数、摩擦力、磨损量及磨损率。

2 试验结果

2.1 激光熔覆工艺参量的优化

在铁基合金激光熔覆层磨损性能的研究中,熔覆层的制备是非常关键的一环,熔覆层的裂纹问题是影响激光熔覆质量的主要障碍,必须进行工艺参量的优化才能获得最佳熔覆质量。在进行激光熔覆时,激光束输出一定要稳定,光斑能量分布要均匀。本试验预涂粉末高度约 1mm、宽度约 2mm,经过反复试验获得激光熔覆的各项工艺参量见表 1,如果工艺参量选择不当,例如粉末高度太高或扫描速度太快,则极易在表面生裂纹、孔洞等缺陷。

2.2 摩擦磨损

以 GCr15 钢珠和 40Cr 钢表面熔覆层为配副的磨损试验结果,在干摩擦和润滑条件下摩擦磨损的实验结果分别见表 3、表 4。

Table 3 Results of wear under dry condition

loading/g	mean friction coefficient	friction force/N	wear width/mm	wear depth/μm	wear volume/mm ³	wear rate/(mm ³ · mm ⁻¹)
300	0.444	1.332	0.650	1.096	0.0962	2.85×10^{-7}
400	0.461	1.844	0.898	1.630	0.2548	7.53×10^{-7}
500	0.777	3.885	0.945	52.706	1.8578	5.5×10^{-6}

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/(mm ³ · mm ⁻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	0.08	0.2103	2.89	3.246×10^{-3}	9.61×10^{-9}

从表 3 看出,在相同的磨损时间内,摩擦磨损结果的摩擦系数、摩擦力、磨痕宽度和深度、磨损体积、磨损

率都是随着载荷的增加而增加。500g 时的磨痕宽度是 300g 时的 48 倍,磨损量和磨损率都是 300g 时的

19.3倍,平均摩擦系数和摩擦力分别是300g时的1.75倍和2.92倍。从表4看出,随着载荷的增加,500g时的磨痕宽度是300g时的1.4倍,磨损量和磨损率都是300g时的2.5倍,但500g时的平均摩擦系数和摩擦力分别比300g时下降了90.8%和84.6%,从两表的数据得出,在润滑条件下磨损性能提高了很多,而且加载的载荷更大,更有利于高应力载荷下的应用。

在不同的润滑条件下,摩擦系数随载荷、时间变化的曲线图见图2和图3。

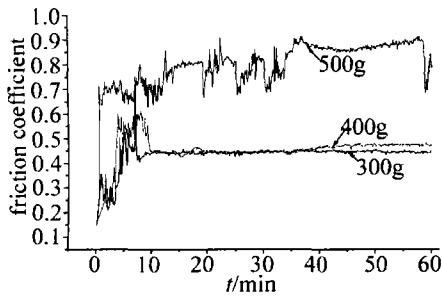


Fig. 2 The variable trend of friction coefficient with load and wear time under dry friction

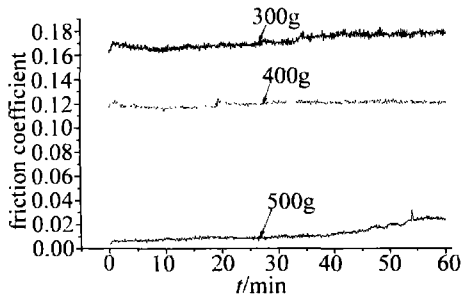


Fig. 3 The variable trend of friction coefficient with load and wear time under lubrication

图2是干摩擦条件下摩擦系数随时间的变化规律。在相同的磨损时间内,随着载荷的增加,平均摩擦系数由0.444升高到0.777,升高了75%,平均摩擦力的值由1.332N升高到3.885N,增大了1.92倍。当载荷为400g时,磨损时间超过35min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。载荷为500g时,当时间达到40min后才进入稳定磨合期,当接近60min时,摩擦系数急剧变化,表明磨损过程已进入严重磨损阶段,整个磨损过程不平稳。经过光学表面轮廓仪测量,干摩擦条件下激光熔覆层在300g载荷时的磨痕深度为1.096 μm ,其磨痕形貌不规则,500g时的磨痕深度已达52.706 μm ,增加了47倍,宽度增加了45.4%,其磨痕形貌比较规则,呈现类似抛物线形状,且3种载荷下,对磨钢珠磨损都比较明显。

图3是润滑条件下摩擦系数随时间的变化规律。在相同时间内,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%。经过光学表面轮廓仪测量,300g时的磨痕宽

度和深度分别为0.1545mm和2.43 μm ,而500g时的磨痕宽度和深度比300g分别增加了36.1%和18.9%,磨痕形状成不太规则的抛物线形式。从图3看出,3种载荷下摩擦系数值的变化范围都不是很大,随着磨损的进行,摩擦系数都有稍微的上升趋势,磨损比较稳定。相比干摩擦条件下,观测磨钢珠磨痕,在相同载荷下钢珠磨痕深度下降了57%。

3 讨论与分析

激光熔覆是一种快速熔化、凝固的过程。以铁基合金粉末为熔覆材料的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,是一种凝固组织,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^[13-14]。由于在高应力磨损下,应力诱发奥氏体向马氏体转化,残余奥氏体因能显著加工硬化而改善耐磨性。干摩擦条件下,载荷为300g时的磨损率比400g时下降了66.5%,比500g时的磨损率下降了94.8%,且过程平稳,表现了很好的耐磨性。当载荷达到500g时,磨痕宽度和深度都大幅上升,磨损性能急剧下降,在滑动摩擦过程中材料发生了撕裂,产生了很多碎屑,其产生的应力已超过材料的屈服极限。故干摩擦条件下,300g载荷是熔覆层承受应力的最佳值。

在300g和500g载荷下,干摩擦和润滑摩擦条件下摩擦系数随时间的变化规律见图4。

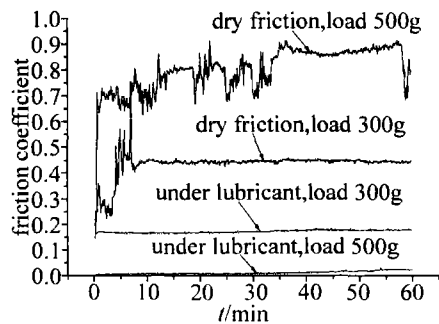


Fig. 4 The variable trend of friction coefficient with load and wear time

从图4看出,在300g载荷下,添加润滑油前后的摩擦系数平均值分别为0.444和0.173,添加润滑油后摩擦系数下降了61%,磨损率下降了98.7%,磨损没有磨合期,直接进入了比较平稳的阶段,表现了良好的耐磨性。当载荷500g时,添加润滑油条件下平均摩擦系数的值远远小于干摩擦条件下的值,磨损直接进入了比较平稳的过程,摩擦系数下降了97.9%,磨损率下降了99.8%,磨痕没有发生诸如撕裂、剥落等严重磨损现象。而根据磨痕形貌的曲线对比表明,润滑条件下的磨损明显优于干摩擦条件下的磨损。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,材料就容易发生塑性变形。在润滑条件下,在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,降低了摩擦副金属原子间的结合力,减小了摩擦副之间的磨损。另一方面由于和空气隔离而减少了氧化磨损,对表面起着保护作用。随着时间的进行,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,见图3。不同载荷和不同润滑条件下熔覆层和GCr15的磨损机制还有待于继续深入研究。

4 结论

(1)在干摩擦条件下,相同磨损时间内,300g 载荷下的磨损性能比较好;当载荷增加到400g 时,经过35min 磨损性能开始下降;当载荷增加到500g 时,摩擦系数变化范围很大,平均摩擦系数为0.777,比300g 时增加了75%,磨痕的深度和宽度也比300g 时大幅增加,整个磨损过程很不平稳,磨损性能下降。

(2)在润滑条件下,300g~500g 载荷在相同磨损时间内都没有发生严重磨损,且同一载荷下摩擦系数变化范围很微小,平均摩擦系数由300g 时的0.173 下降到500g 时的0.016,降低了90.8%,摩擦力降低了84.6%。随着磨损时间的延长,摩擦系数在磨损后期略有上升,磨损性能微有下降。润滑可显著的提高熔覆层的摩擦磨损性能,同时熔覆层承受载荷的能力也大大的提高。

参 考 文 献

- [1] NAVAS C, CONDE A, FERNANDEZ B J, *et al.* Laser coatings to improve wear resistance of mould steel[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, 194(1): 136-142.
- [2] RIABKINA-FISHMAN M, RABKIN E, LEVIN P, *et al.* Laser produced functionally graded tungsten carbide coatings on M₂ high-speed tool steel[J]. *Materials Science and Engineering*, 2001, A302(1): 106-114.
- [3] YANG S, ZHAO J L, YANG X. Research status of functionally graded coating produced by laser cladding[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 220-224 (in Chinese).
- [4] HAQSYED W U, PINKERTON A J, LIU Zh, *et al.* Coincident wire and powder deposition by laser to form compositionally graded material [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 201(16/17): 7083-7091.
- [5] ZHANG Q M, HE J J, LIU W J, *et al.* Microstructure characteristics of ZrC-reinforced composite coating produced by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 162(2/3): 140-146.
- [6] KATHURIA Y P. Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2000, 132(2/3): 262-269.
- [7] DURANDET S S, BRANDT M. Parametric investigation of pulsed Nd:YAG laser cladding of satellite 6 on stainless steel[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, 194(2/3): 225-231.
- [8] CHANG M, ZHANG Q M, LIAO J H, *et al.* Processing parameters optimization of pulsed Nd:YAG laser cladding repairing plastic moulds [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(9): 1443-1446 (in Chinese).
- [9] YANG X Y, PENG X, CHEN J, *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.
- [10] DURAISELVAM M, GALUN R, SIEGMANN S, *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.
- [11] PAUL C P, ALEMOHAMMAD H, TOYSERKANI E, *et al.* Cladding of WC-12 Co on low carbon steel using a pulsed Nd:YAG laser[J]. *Materials Science & Engineering*, 2007, A464(1): 170-176.
- [12] LIU Y H, GUO Z X, YANG Y, *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.
- [13] ZHANG Q M, HE J J, LIU W J, *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): 109-112 (in Chinese).
- [14] ZHANG Q M, LIAO J H, LIU W J. Investigation on the tribological characteristic of laser clad layer[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(7): 887-890 (in Chinese).
- [15] QI Y T, SHI H Ch. Influence of Ti(C,N) particle on microstructure and performance of laser cladding Ni-based coating[J]. *China Surface Engineering*, 2008, 21(2): 26-30 (in Chinese).
- [16] WANG C Sh, XIA J L, LI G. Microstructure and properties of Ni-WC gradient composite coating produced by broad-beam laser cladding[J]. *Applied Laser*, 2001, 21(3): 151-158 (in Chinese).

(上接第330页)

Publication, 1990: 97.

- [12] CHEN L, HUANG F X, LIU X M. Relationship between characteristic and property of cladding and laser processing parameters[J]. *Electric Welding Machine*, 2007, 37(3): 20-22 (in Chinese).
- [13] LI M W, ZHU J Ch, YIN D Zh. The equivalent estimates of thermal conductivity of particle dispersion composite material[J]. *Functional Materials*, 2001, 32(4): 793-794 (in Chinese).