

激光微造型凸轮副的摩擦磨损^{*}

符永宏 杨巍 张华伟 华希俊

(江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 采用 UMT-2 多功能摩擦磨损实验机, 模拟内燃机凸轮/滚轮工况条件, 考察了多种激光微造型形貌试样表面的摩擦磨损特性。实验结果发现, 与未处理光滑表面相比, 激光微造型试样表面的耐磨、抗擦伤性显著提高, 其中, 凹坑造型表面的摩擦因数显著下降, 而凹槽表面的摩擦因数相对较大。这说明凹槽形貌会增大表面摩擦, 而凹坑形貌具有一定的减摩效果。合理选择凹坑的深度及其面积占有率, 并进行微形貌几何参数的优化组合, 可达到最佳减摩效果。

关键词: 凸轮 激光微造型 几何形貌 摩擦学性能

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)01-0216-05

Friction and Wear of Cam with Laser Micro-texture under Lubrication

Fu Yonghong Yang Wei Zhang Huawei Hua Xijun

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Steel-45 surface was treated as micro-texture (groove patterns and concave patterns) by using laser micro-texturing technology. Friction and wear properties of the textured samples were examined by using an UMT-2 wear tester in cam/roller simulation work condition. As the results, the laser micro-texturing surface was significantly improved in the anti-scuffing property and wear resistance compared with the conventional smooth surface. The textured surfaces with groove patterns had higher friction coefficients than the conventional smooth surfaces, while the textured surfaces with concave patterns had lower friction coefficients than the conventional smooth surfaces. The results indicated that the groove patterns on the working surface increase friction and the cavity patterns on the working surface can reduce friction. It can be concluded that an optimal friction reduction effect of the textured surface can be obtained by choosing a suitable concave depth and the ratio of the projected area of the concaves with the total area of the working surface.

Key words Cam, Laser micro-texturing, Geometrical texture, Tribological properties

引言

激光表面微造型技术(LST)以其加工速度快、对环境无污染和良好的可控性^[1-2]等特点尤为引人注目,利用该技术在摩擦副表面加工出的微观形貌,可起到动压润滑、储存润滑油以及收集磨损颗粒等作用^[3]。与此相适应,先后有学者就机械密封^[4-5]、

缸套/活塞环^[6-8]以及推力轴承^[9]等表面的激光微造型技术开展了大量研究,发现微造型形貌可以有效地改善表面润滑、增强抗磨效果。然而相关研究主要集中于面接触摩擦副表面,对于凸轮/滚轮副这种线接触方式的表面几何形貌同摩擦学性能之间的关系研究较少。本文选用淬火-回火45号钢作为试样材料,模拟油泵凸轮工况(低速重载),考察油润

收稿日期: 2008-11-24 修回日期: 2008-12-16

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50475122)、江苏省高技术重大项目(BG2007023)、江苏省高校自然科学基金基础研究项目(06KJB480019)、教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(20071108)和江苏省高校自然科学基金研究计划资助项目(07KJD460035)

作者简介: 符永宏, 教授, 博士, 主要从事润滑理论和激光应用技术研究, E-mail: fyh@ujs.edu.cn

滑状态下各种造型形貌对 45 号钢表面摩擦磨损性能的影响。

1 实验方法

1.1 试件及表面形貌

将尺寸为 $29\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的 45 号钢试样用砂纸打磨并进行抛光(表面粗糙度达到 $R_a 0.1$),在二级管泵浦 Nd:YAG 激光器上对抛光面

进行激光微造型处理,采用声光调 Q 控制产生脉冲激光,激光波长为 532 nm ,功率密度在 10^7 W/cm^2 左右,重复频率在 $5 \sim 15\text{ kHz}$,得到凹坑、断续槽、交叉网纹等 14 种表面形貌。WKYO-NT1100 型表面微观几何形貌测量仪测得的激光微造型 45 号钢试样表面三维形貌如图 1 所示。变化这 3 种基本形貌的组合和几何参数,构成试样表面不同的造型方案,各种造型形貌示意图及几何尺寸如表 1 所示。

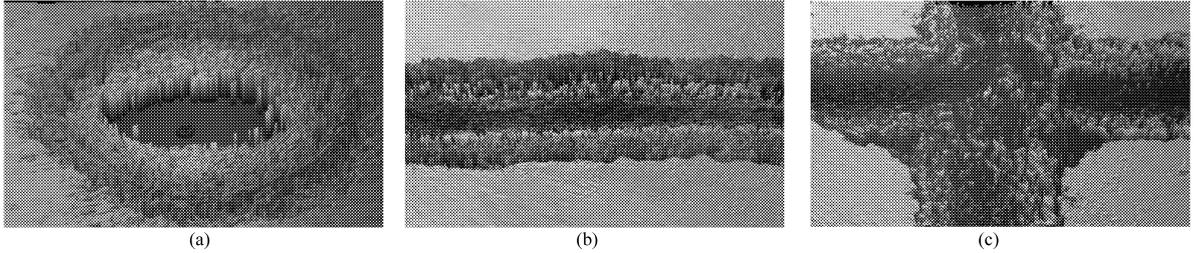


图 1 激光微造型试样表面的三维实体形貌图

Fig. 1 Conformal microscope 3-D images of laser micro-texturing surfaces

(a) 凹坑 (b) 断续槽 (c) 网纹

表 1 激光微造型试件表面形貌、几何参数、磨损量

Tab. 1 Profile, geometrical parameters and wear of the laser micro-texturing surfaces

下试样编号	造型形貌示意图	凹坑或凹槽深度 $H/\mu\text{m}$	凹坑间距 $L/\mu\text{m}$ (面积占有率/%)	凹槽方向(与 滑行方向夹角/ $^\circ$)	凹坑直径 $D/\mu\text{m}$ 或 凹槽宽度 $W/\mu\text{m}$	磨损量/g
1(凹坑)		8 ~ 10	100(38.5)		70	0.001 3
2(凹坑)		8 ~ 10	200(9.6)		70	0.002 0
3(凹坑)		10 ~ 14	300(4.3)		70	0.001 9
4(凹坑)		11 ~ 15	400(2.4)		70	0.001 2
5(凹坑)		13 ~ 16	400(3.1)		80	0.001 1
6(凹坑)		14 ~ 20	400(3.1)		80	0.001 1
7(断续纹)		20 ~ 25		0	60	0.000 7
8(断续纹)		20 ~ 25		90	60	0.001 5
9(断续纹)		20 ~ 25		90	60	0.002 3
10(断续纹)		20 ~ 25		30	60	0.001 3
11(断续纹)		20 ~ 25		45	60	0.001 6
12(断续纹)		20 ~ 25		60	60	0.001 4
13(交叉线凹坑组合)		20 ~ 25		45/135	60	0.001 4
14(交叉网纹)		20 ~ 25		45/135	60	0.001 0
15(光滑面)	光滑试样					0.003 0

1.2 实验方法

实验研究线接触油润滑状态下,多种激光微造型形貌对 45 号钢表面摩擦磨损性能的影响,选用 UMT-2 型摩擦磨损实验机的销盘实验装置,如图 2 所示,滚轮和盘沿箭头所示方向相对运动。上试件选用 $\phi 17\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ 的合金铸铁滚轮(滚轮周向对称开有 3 个螺纹孔 $3 - \text{M}6 \times 0.75 - 6\text{H}$,钻深 7 mm ,攻深 5 mm ,相邻两螺纹孔中心线夹角 120°),并通

过标准件销(下端加工有部分螺纹)与实验机相连,硬度为 $58 \sim 62\text{ HRC}$,滚轮材料成分如表 2 所示,下试件为 $29\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的激光微造型试样或未经激光处理的光滑试样,材料精选含碳量为 $0.42\% \sim 0.47\%$ 的 45 号钢,经淬火-回火处理,硬度 $42 \sim 48\text{ HRC}$ 。实验中上试件固定,下试件做往复运动,往复行程为 6 mm 。利用传感器在线检测接触面间的载荷和摩擦因数,并通过电脑输出数据。实验

所用润滑油为 GL-5 85W/90 重负荷车辆齿轮油, 相当于 GB13895—1992。粘度等级符合美国 SAE 85W/90 标准。

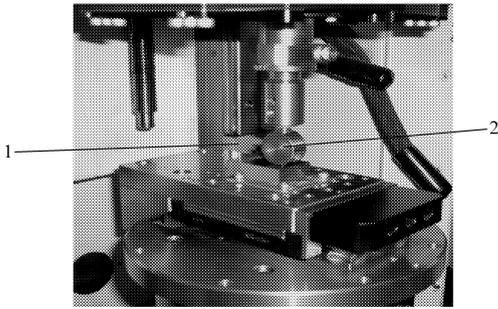


图2 摩擦磨损实验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of friction and wear tester

1. 盘 2. 滚轮

实验步骤:①对每个试样在线磨合,以保证上下试样沿滚轮接触宽度方向基本为均匀线接触。②将试样在丙酮中超声清洗 20 min 后晾干待用。③将晾干的试样在电子天平上称量,并做好记录,电子天平测量范围 0~100 g,精度为 0.000 1 g。④实验前在接触区域滴加 0.2 mL 的润滑油,实验开始后每 10 min 加油一次,以保证上下接触面间始终处于富

表2 合金铸铁的成分

Tab. 2 Composition of alloying cast iron

合金铸铁成分	C	Si	Cr	Mn	Mo	Fe
含量/%	3.35~3.85	1.6~1.9	0.3~0.6	0.4~0.8	0.3~0.6	其余

了 45 号钢试样表面的耐磨性能。

2.2 抗擦伤性能

实验中观察到:光滑试样 15 在磨合后期表面出现冒白烟现象,而激光微造型试样 1~14 在磨合过程中未观察到白烟现象。图 3 给出了光滑、微造型试样磨痕表面形貌 SEM 照片,可以看出,光滑试样磨痕表面呈现较为严重的粘着、擦伤和疲劳脱落迹象^[10](图 10a),而激光微造型凹坑和凹槽试样磨痕表面的粘着、擦伤和疲劳脱落现象相对较轻(图 10b、10c、10d)。据此可推测,经过激光微造型处理后,45 号钢试样表面的凹坑、凹槽等结构,更有利于改善表面减摩和抗磨效果,从而显著提高激光微造型处理表面的抗擦伤能力。

2.3 摩擦学性能

图 4 示出了几种形貌参数各不相同的凹坑(表 1 中试样 1~6)表面的摩擦磨损性能测试结果。可以看出,除试样 1、2 外,同光滑表面相比,带凹坑的试样表面摩擦因数较小。也就是说,线接触时,在富油的情况下,表面的凹坑能起到一定的减摩效果,文献^[11~12]中针对面接触形式也有过类似结论。

试样 1、2 表面的摩擦因数比光滑表面增大的

油状态。⑤实验温度为室温 20℃,通过上试件加载,施加载荷 147 N(允许加载的极大值),下试件往复运动的平均线速度为 0.04 m/s,每个试样在线磨合 30 min。⑥实验结束后,再次对试件进行超声波清洗和称量,并对前后两次的质量进行对比。实验结束后利用扫描电子显微镜(SEM)分析试件的磨损表面,并对表面磨痕及轮廓形状进行测量。

2 结果与讨论

2.1 耐磨性

摩擦磨损实验中各激光微造型试样和光滑 45 号钢试样表面的磨损量如表 1 所示。可以看出,各种激光微造型试样表面的磨损量皆低于光滑试样表面。分析其原因,一方面可能由于微造型形貌可在上下表面间产生一定的流体动压润滑效果,将上下接触面分开;另一方面由于凹坑或凹槽可以起收集磨损磨粒的作用,从而减少了接触面发生磨粒磨损现象的几率。此外,骤冷骤热的激光加工过程,还会引起造型区域表面的材料微观组织变化,形成具有高硬度和超细组织的硬化层,也在一定程度上提高

原因:一方面试样 1 表面凹坑的面积占有率过大,高达 38.5%,而试样 2 表面凹坑形状很不规则(图 5),另一方面可能由于凹坑深度过浅;这些都对其表面摩擦因数的增大有影响。试样 3、4、5、6 四种凹坑试样的深度从浅到深为:试样 3、试样 4、试样 5、试样 6,它们的摩擦因数从大到小为:试样 6、试样 3、试样 4、试样 5。可以看到,凹坑不宜过深也不宜过浅,过深或过浅的凹坑都会引起接触表面摩擦因数的增大。在一定范围内摩擦因数随着凹坑深度增大而减小,但是有一个最佳值,结合实验结果可知此最佳值为 15 μm 左右。

图 6 是交叉网纹、交叉短线和凹坑组合形貌以及光滑表面的摩擦因数。可以看出,网纹表面的摩擦因数与未处理的光滑表面基本相等,而交叉短槽与凹坑的组合形貌表面摩擦因数远高于光滑表面,但都比光滑表面更平稳。Pettersson^[13]等也曾针对面接触摩擦副指出凹槽或网纹等形貌表面的摩擦因数比光滑面波动小,但大小相同^[10]。文献^[13]中针对微造型铸铁表面也有相似的结论。

图 7 为 0°~90°(与滑行速度方向夹角)断续槽及光滑试件表面的摩擦因数。可以看到,凹槽试样

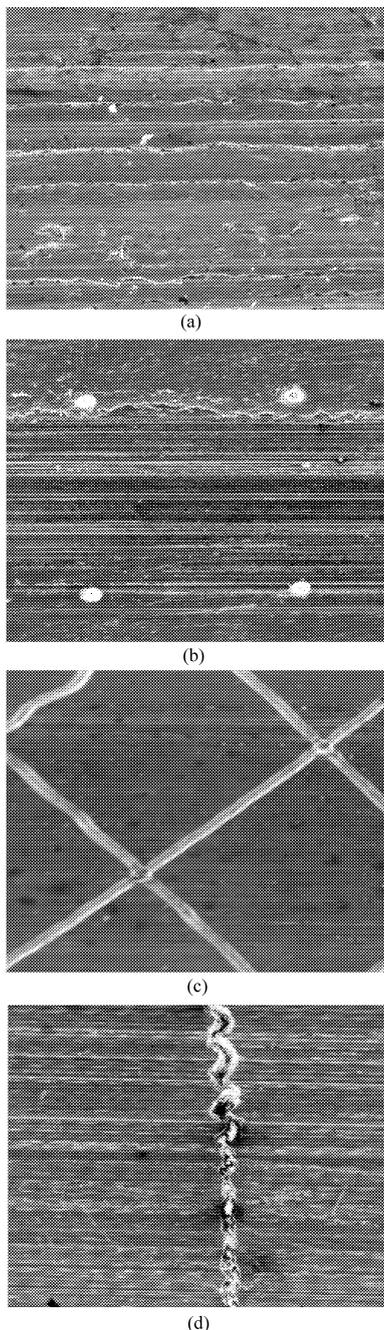


图 3 扫描电子显微镜下光滑型和激光微造型试件表面磨损形貌

Fig. 3 SEM morphologies of wear scars on smooth and laser-textured discs

(a) 光滑面 (b) 凹坑面 (c) 网纹面 (d) 断续槽面

表面的摩擦因数比光滑表面均显著增大(45°断续槽表面略有下降),但相对光滑表面较稳定。这说明在线接触油润滑状态下,不论是贯通的或是断续的凹槽,都会增大表面摩擦。究其原因,一方面润滑油顺沟槽流走,造成了造型区域局部低压区,使表面油膜变薄^[14],另一方面,在线接触油润滑条件下,断续槽造型使原本光滑、平坦的试样表面形成了富有规律的凹凸不平状搓板纹,增加表面粗糙度的同时,增大表面摩擦阻力。此外,在 0°~90°断续槽试样中,

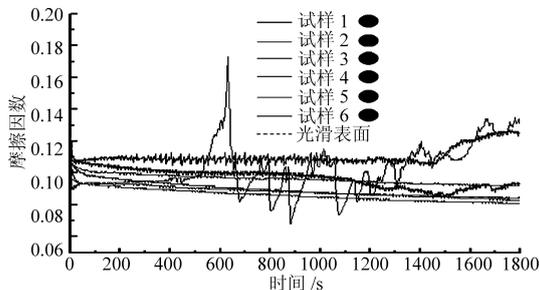


图 4 凹坑及光滑试样表面的摩擦因数

Fig. 4 Friction coefficient of concave and smooth surface

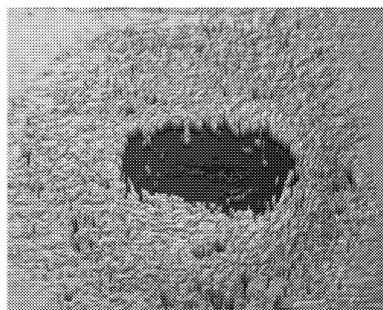


图 5 试样 2 表面的微凹坑形貌

Fig. 5 Shape of the microcavity on pattern 2

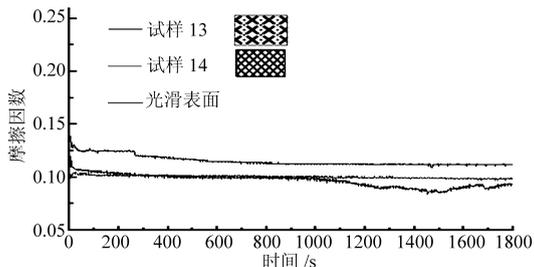


图 6 网纹、组合形貌和光滑试样表面的摩擦因数

Fig. 6 Friction coefficient of textured surfaces with reticulate pattern, composite topography and smooth surface

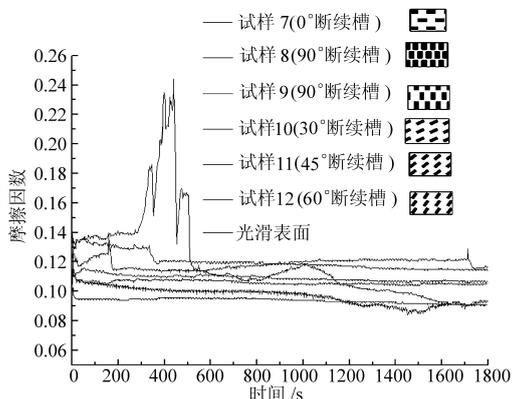


图 7 断续槽和光滑试样表面的摩擦因数

Fig. 7 Friction coefficient of textured surfaces with interrupted grooves and smooth surface

30°断续槽试样表面的摩擦因数随时间不断下降,并在 1 600 s 时降到光滑表面以下,45°断续槽试样表面的摩擦因数较光滑表面显著减小,因此推测斜度在 30°~45°之间的断续槽造型具有一定的减摩效果,且越接近 45°减摩效果越好。

3 结论

(1) 与光滑试样相比,激光微造型试样表面的耐磨性和抗擦伤性得到提高。

(2) 在线接触油润滑条件下,表面凹坑对润滑

的减摩效果明显,而凹槽效果相反。

(3) 凹坑深度和断续槽的斜度各有一个最佳值,深度或斜度在这个最佳点附近,减摩效果最好。

(4) 不论是凹坑、凹槽或是其组合形貌造型表面,它们的摩擦因数均比光滑表面稳定得多。

参 考 文 献

- 1 任露泉,王再宙,韩志武. 仿生非光滑表面滑动摩擦磨损试验研究[J]. 农业机械学报,2003,34(2):86~88.
Ren Luquan, Wang Zaizhou, Han Zhiwu. Experimental research on sliding wear of bionic nonsmoothed surface[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(2):86~88. (in Chinese)
- 2 华希俊,符永宏,袁润,等. 激光表面微造型工艺试验与应用[J]. 农业机械学报,2007,38(12):177~180.
Hua Xijun, Fu Yonghong, Yuan Run, et al. Experimental investigations on laser surface micro-texturing technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(12):177~180. (in Chinese)
- 3 Etsion I. State of the art in laser surface texturing[J]. ASME J. Tribol., 2005,127(1):248~252.
- 4 Etsion I, Halperin G. A laser surface textured hydrostatic mechanical seal[J]. Tribol. Trans., 2002,45(3):430~434.
- 5 Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing[J]. Tribol. Lett., 2004,17(4):733~737.
- 6 Klink U. New technologies of honing[C]//International Honing Conference, Atlanta, Georgia, 1998:1~11.
- 7 Golloch R, Merker G P, Kessen U, et al. Functional properties of micro-structured cylinder liner surfaces for internal combustion engines[J]. Tribol. Test, 2005,11(4):307~324.
- 8 Kligerman Y, Etsion I, Shinkarenko A. Improving tribological performance of piston rings by partial surface texturing[J]. Transactions of the ASME, Journal of Tribology, 2005,127(3):632~638.
- 9 Brizmer V, Kligerman Y, Etsion I. A laser surface texture parallel thrust bearing[J]. Tribol. Trans., 2003,46(3):397~403.
- 10 夏延秋,赵文珍,任霞. 激光处理合金铸铁的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005,25(2):140~144.
Xia Yanqiu, Zhao Wenzhen, Ren Xia. Study of the friction and wear behavior of laser micro-precisely treated alloy cast iron under lubrication[J]. Tribology, 2005,25(2):140~144. (in Chinese)
- 11 汪家道,陈大融,孔宪梅. 面接触规则凹坑表面流体润滑计算[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2001,41(2):42~45.
Wang Jiadao, Chen Darong, Kong Xianmei. Lubricating calculation for area contact of regular concave profiles[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2001,41(2):42~45. (in Chinese)
- 12 韩中领,汪家道,陈大融. 表面形貌在面接触乏油状态下的减阻效果实验[J]. 润滑与密封, 2006(7):91~93.
Han Zhongling, Wang Jiadao, Chen Darong. The friction-reduce experiment of the surface profile on plane-plane contact and oil-lack lubrication[J]. Lubrication Engineering, 2006(7):91~93. (in Chinese)
- 13 Pettersson U, Jacobson S. Textured surfaces for improved lubrication at high pressure and low sliding speed of roller/piston in hydraulic motors[J]. Tribol. Int., 2007,40(2):355~359.
- 14 Miki Nakano, Atsuko Korenaga, Atsushi Korenaga, et al. Applying micro-texture to cast iron surfaces to reduce the friction coefficient under lubricated conditions[J]. Tribol. Lett., 2007,28(2):131~137.
- 15 Andersson P, Koskinen J, Varjus S, et al. Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces[J]. Wear, 2007,262(3~4):369~379.
- 16 Ronen A, Etsion I, Kligerman Y. Friction-reducing surface texturing in reciprocating automotive components[J]. Tribol. Trans., 2001,44(3):359~366.
- 17 Burstein L, Ingma D. Pore ensemble statistics in application to lubrication under reciprocating motion[J]. Tribol. Trans., 2000,43(2):205~212.