

激光表面织构对铸铁摩擦磨损性能的影响

陈傲, 王书文, 蒋春燕

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: 目的 找出最佳的表面织构方案, 将其应用在摩擦副的表面处理上, 从而达到降摩减阻、节能减排的目的。方法 设计了两种不同的加工面积占有率 (10%和20%), 三种不同形状的表面织构 (圆坑、椭圆坑、沟槽), 对铸铁试件进行激光表面加工, 并利用环-块磨损试验机进行油润滑摩擦磨损实验。结果 表面织构对铸铁材料的摩擦磨损性能有明显改善, 尤其在磨损量方面。三种不同形状的表面织构相比, 圆形表面织构试件的磨损量最小。两种不同面积占有率相比, 面积占有率为20%的圆形微织构试件的磨损量最小, 并在一定程度上减小了摩擦系数。结论 在本实验研究条件下, 面积占有率为20%的圆形表面织构对改善铸铁材料的摩擦磨损性能最显著。

关键词: 表面织构; 激光; 摩擦; 磨损; 润滑; 铸铁

中图分类号: TG174.442; TG115.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)09-0163-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.025

Effect of Laser Surface Texturing on Frictional and Wear Performance of Cast Iron

CHEN Ao, WANG Shu-wen, JIANG Chun-yan

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: **Objective** To find out the best design of surface texture and apply it to the surface treatment of friction pair for the purpose of wear resistance and friction reduction, energy conservation and emission reduction. **Methods** Two kinds of area ratio (10% and 20%) and three different designs of surface texture (circular, elliptical and groove) were designed and manufactured on cast iron specimens by means of laser surface texturing technique. The friction and wear performance of the textured specimens was tested using the high-speed ring-block wear testing machine with oil lubrication. **Results** Experimental results showed that the surface texture had significant effect on the tribological properties of cast iron, especially in wear rate. Within the three different surface micro textures, the circular dimples on the surface of specimens had the best performance on wear reduction, and the 20% textured surface with circular dimples had smaller wear rate and coefficient of friction than that of 10% textured surface. **Conclusion** Under the operating condition of this experimental study, 20% textured surface with circular dimples has the most significant improvement on the friction and wear properties of cast iron.

收稿时间: 2016-03-14; 修订时间: 2016-06-16

Received: 2016-03-14; Revised: 2016-06-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51275126); 清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金重点项目 (SKLTKF12B10)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51275126), State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University Open Fund Key Projects (SKLTKF12B10)

作者简介: 陈傲 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究车辆 NVH。

Biography: CHEN Ao (1992—), Male, Master graduate student, Research focus: the NVH performance of vehicle.

通讯作者: 王书文 (1963—), 男, 教授, 主要从事汽车摩擦学、车辆 NVH 以及表面技术等研究。

Corresponding author: WANG Shu-wen (1963—), Male, Professor, Research focus: automotive tribology, vehicle NVH, and surface technology.

KEY WORDS: surface texturing; laser; friction; wear; lubrication; cast iron

观察和研究发现,具有一定微结构的表面比光滑表面具有更好的摩擦磨损和润滑性能,国内外学者对此已开展大量研究工作并取得丰硕成果^[1-9]。对激光表面微织构技术的研究和应用已有几十年的历史。以色列科学家 Etsion 等^[10]是激光表面微织构应用研究的代表,他们采用了激光微造型技术在活塞环的表面加工出微坑阵列,研究不同微坑深度、不同直径、不同面积占有率对材料摩擦性能的影响。结果表明,微坑的深径比在 0.1~0.18 之间时,平均摩擦力减少 20%~25%,同时不同的微坑大小以及不同的表面织构密度对摩擦性能有重要影响。Ryk 等^[11]通过控制润滑油的流速来改变活塞环工作表面的润滑状态(富油或乏油),研究发现,当活塞环部分圆周面被激光微造型时,活塞环和气缸套之间的摩擦降低了 25%。美国科学家 Bolander 等人^[12]使用激光加工技术在活塞环的表面加工出圆形凹坑阵列,将其放置于一台活塞环往复缸套试验机上进行试验。他们准备了具有相同的面积占有率,不同直径和深度的 4 个活塞环,实验结果显示,通过与没有表面织构的活塞环相比较,4 个具有不同表面织构的活塞环在一个周期内的平均摩擦系数要明显小于没有表面织构的活塞环。中国科学院占剑等^[13]采用激光刻蚀方法在缸套内壁加工出微凹坑阵列,来研究微凹坑面积占有率及微凹坑分布角度等对缸套/活塞环的摩擦磨损性能的影响。结果表明,在其他参数不变的情况下,微凹坑分布角度为 30°时摩擦系数最低,微凹坑分布角度为 45°时磨损量最小;当深径比为 0.1、微凹坑分布角度为 30°以及微凹坑面积占有率为 35%时,试件表面具有最好的摩擦磨损性能。目前国内外对于

这方面的研究主要集中于同一种表面织构、不同的几何参数对材料摩擦磨损润滑特性的影响上,而关于不同织构形状对摩擦副润滑特性方面影响的研究较少^[14-15]。

本研究采用 P 秒激光在铸铁材料试件表面加工出不同面积占有率的圆形坑、椭圆形坑以及沟槽三种不同形状的表面织构。利用环-块磨损试验机来进行油润滑状态下摩擦磨损实验研究,通过比较不同表面织构对摩擦磨损性能的影响,找出最佳的表面织构方案,将其应用在摩擦副的表面处理上,从而达到降摩减阻、节能减排的目的。

1 实验

1.1 试样制备

本次实验是环-块线接触摩擦磨损实验,由带有内锥面的环和长方块组成摩擦副,其中块是上试件(尺寸 10 mm×10 mm×15 mm),环是下试件(尺寸 $\phi 40$ mm×10 mm)。上下试件的材料都是铸铁。利用 Lumera P 秒激光器对其进行微织构加工,由于工作台的限制及环试件外圆周表面不便进行测量,所以只对块试件的侧面进行了激光加工。分别制作了面积占有率为 10%和 20%,织构形状为圆形、椭圆形和沟槽等三种不同形状的试件,其具体参数见表 1。

加工完后,在乙醇溶液中对试件进行超声波清洗。无表面织构和三种有激光表面织构的不同表面形貌图见图 1。

表 1 三种不同形状表面织构的尺寸参数
Tab.1 Dimensional parameters of three different surface textures

Surface-texture	Area rate/%	Diameter or width/ μm	Ellipse long radius/ μm	Ellipse short radius/ μm	Dimple depth/ μm	Line space/mm	Column space/mm
Circular dimple	10	100			10	0.2	0.4
	20	200			10	0.4	0.4
Elliptical-dimple	10		60	40	10	0.19	0.4
	20		120	80	10	0.25	0.6
Groove	10	100			10	1	
	20	100			10	0.5	

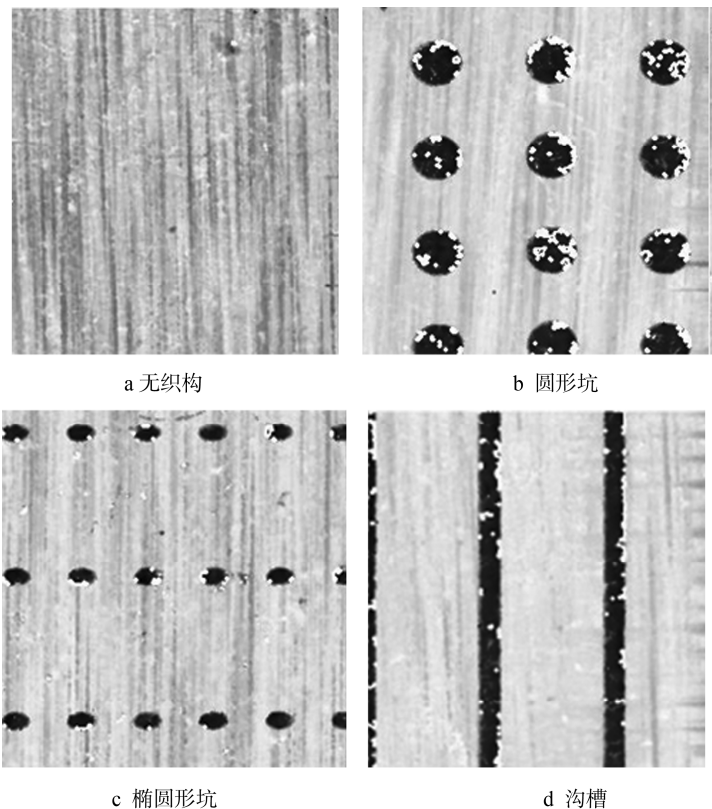


图 1 不同表面形貌

Fig.1 The topography of different surfaces without and with micro textures: a) untextured, b) circular dimple, c) elliptical dimple, d) groove

1.2 设备

本次试验是在清华大学摩擦学国家重点实验室进行的，实验设备是常用的 MR-H5 型高速环-

块磨损试验机，其工作原理如图 2a 所示，环-块的摩擦接触形式如图 2b 所示。在本研究的全部试验过程中，环-块始终浸沉在润滑油中，摩擦副的接触形式是线接触纯滑动磨损。

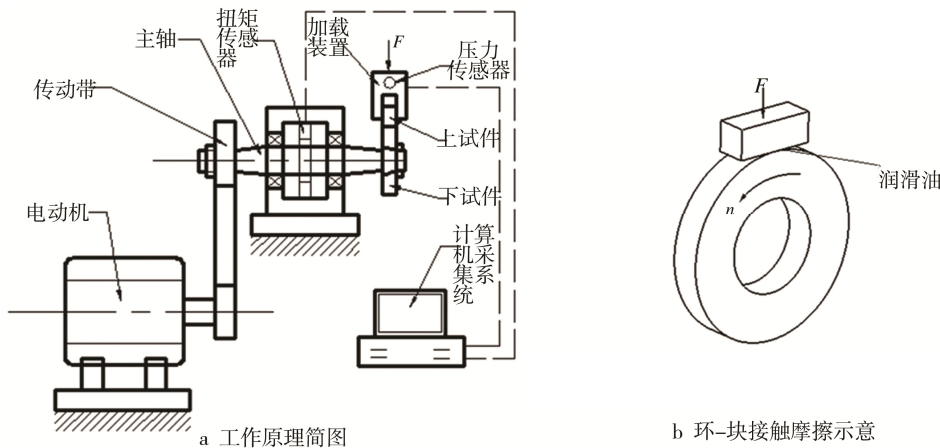


图 2 高速环-块磨损试验机

Fig.2 The high-speed ring-block wear testing machine (a) working principle diagram; (b) illustration of ring-block friction contact

1.3 方法

实验前分别将上下试件放入实验设备的上试件和下试件安装处，实验过程中上试件固定不动，

下试件绕轴旋转与上试件滑动接触。在上试件上方装有压力传感器，可以实时测量上下试件的接触正压力，在设备的主轴上装有扭矩传感器，通过计算机进行数据采集和处理得到实时摩擦系数。试验

后,用超声波清洗机将试件表面清洗干净,并用白光干涉表面形貌仪对上试件表面磨痕深度进行测量和分析。比较两种不同织构面积占有率、三种不同形状的表面织构对上试件摩擦磨损性能的影响。

为了探究不同的表面织构对材料摩擦磨损性能的影响,实验前,需要确定一个较佳的试验工况。于是对未加工表面织构的试件进行了多个不同工况的试验,最终确定实验工况为:试验载荷 500 N,转速 1000 r/min,每组试验测试时间 5 min。

2 结果与讨论

2.1 不同形状表面织构试件实时摩擦系数的比较

图 3、图 4 分别是面积占有率为 10% 和 20%、不同表面织构试件在同一工况下的实时摩擦系数和摩擦力测试结果。由图 3 和图 4 可知,摩擦系数大约在 0.13 左右。当面积占有率为 10% 时,圆形

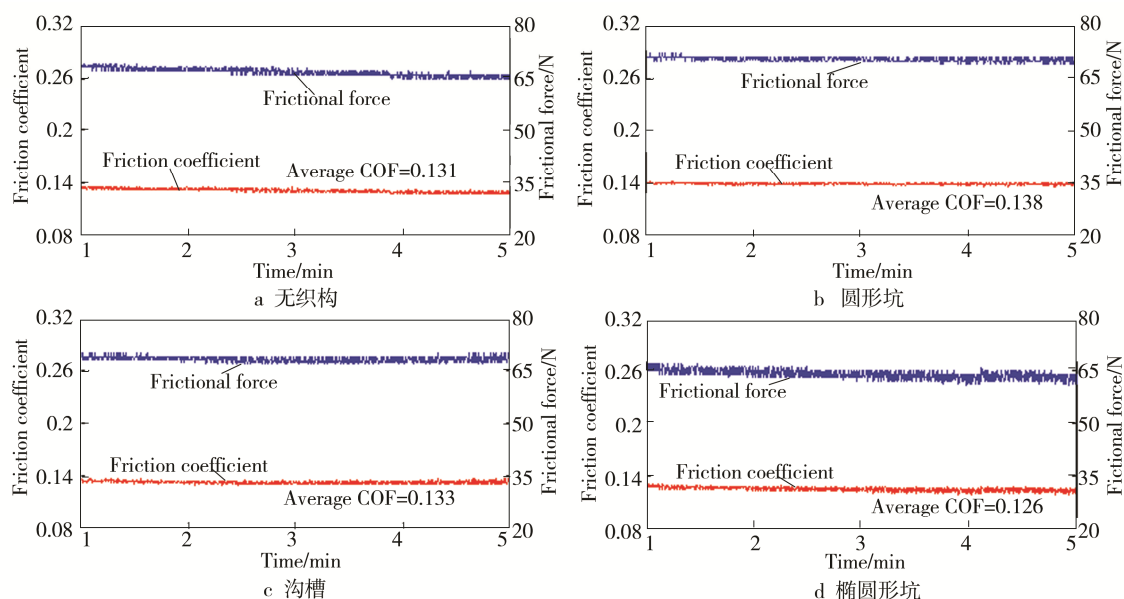


图 3 不同表面织构对摩擦系数和摩擦力的影响 (织构面积占有率为 10%)
Fig.3 The effect of surface texture on friction coefficient and frictional force ($A=10\%$)

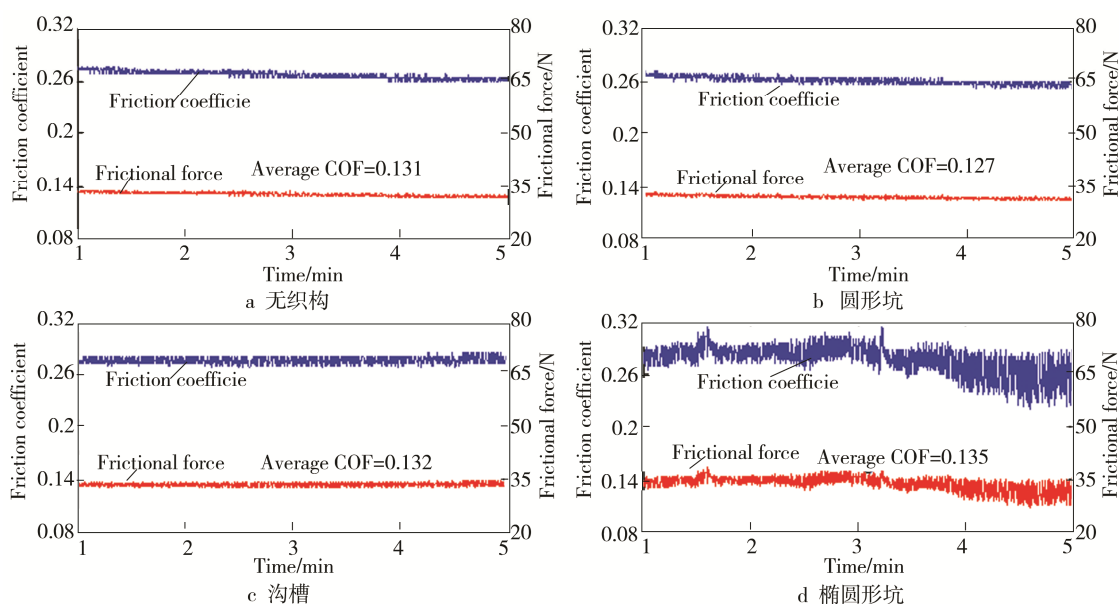


图 4 不同表面织构对摩擦系数和摩擦力的影响 (织构面积占有率为 20%)
Fig.4 The effect of surface texture on friction coefficient and frictional force ($A=20\%$)

坑和凹槽试件的平均摩擦系数比无织构试件的略微增大,但在整个测试过程中比较稳定;而椭圆形坑试件的平均摩擦系数比未加工织构试件的略低,随着测试过程的进行,有进一步降低的趋势,但是出现了轻微的波动。当面积占有率为 20%时,摩擦系数值与面积占有率为 10%的数值差别不大,基本维持在 0.13 附近,但是与未加工织构试件相比较,圆形织构试件的平均摩擦系数有明显减小,而椭圆形试件的平均摩擦系数增大并出现了明显的波动。沟槽和椭圆形表面织构对于减小摩擦的效果不是特别明显,反而引起了摩擦系数的不稳定,但是 20%圆形织构试件的摩擦系数变得更加稳定且有

一定程度的降低,减阻效果比较明显。

2.2 不同形状的表面织构对磨损的影响

利用白光干涉表面形貌仪测量的磨痕深度作为磨损量。图 5 是利用白光干涉表面形貌仪测得的表面织构面积占有率为 20%时试件的表面磨痕形貌图。图 6 是白光干涉表面形貌仪测出相应试件的磨痕二维图。

为了更直观地反映不同表面织构与试件磨痕深度的关系,把实验测得的不同表面织构试件的磨痕深度用图 7 所示的柱状图表示。

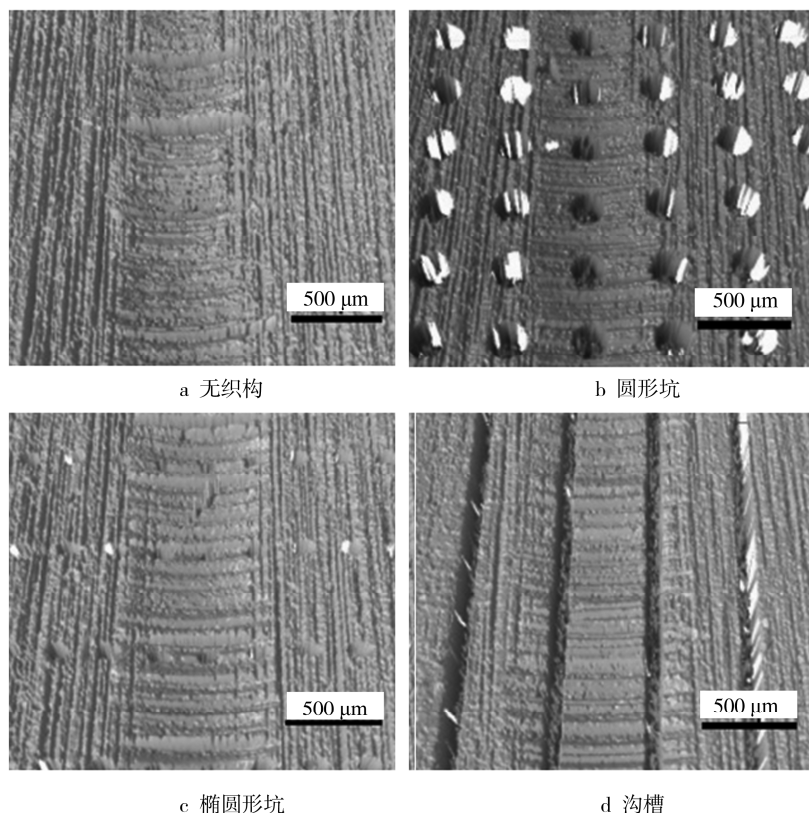


图 5 织构面积占有率为 20%时的磨痕形貌

Fig.5 The topography of wear off ($A=20\%$): a) untextured, b) circular dimple, c) elliptical dimple, d) groove

根据图 7 可以看出,当表面织构面积占有率为 10%时,有表面织构铸铁试件的磨痕深度均小于无表面织构试件的磨痕深度;将三种不同形状表面织构试件的磨痕深度进行比较,圆形织构试件的磨痕深度最浅,即磨损量最少。当表面织构面积占有率为 20%时,圆形织构试件的磨痕深度明显小于无织构试件的磨痕深度,其他形状表面织构的试件磨痕深度都稍大于无表面织构的试件。

由以上实验数据可知,圆坑形表面织构能明显提高铸铁的抗磨性,并且织构面积占有率为 20%的圆坑形织构的抗磨性比面积占有率为 10%的圆坑形织构的抗磨性好。但是,织构面积占有率为 20%的椭圆坑形和沟槽形表面织构的抗磨性却比面积占有率为 10%的表面织构的抗磨性差。因此可以推测,不同织构形状的表面可能具有不同的最优表面织构占有率。

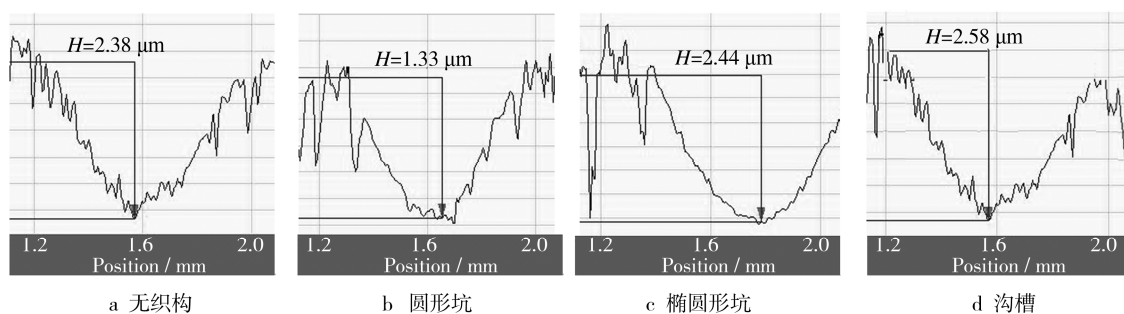


图6 织构面积占有率 20%时的磨痕深度

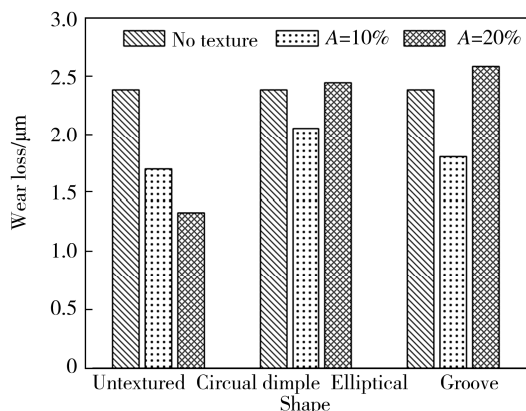
Fig.6 The depth of wear off ($A=20\%$): a) untextured, b) circular dimple, c) elliptical dimple, d) groove

图7 不同形状和不同表面织构面积占有率对试件磨痕深度的影响

Fig.7 The influence of different surface texture and area density on the wear depth

2.3 对试验结果的机理分析

从本文的研究结果来看,圆坑形激光表面织构对铸铁试件的摩擦系数和磨损量有明显影响。这是由于激光加工的特点是将金属表面汽化和熔化,这样会导致表面温度迅速上升和下降,对凹坑及其周围表面“淬火”而变硬,最终激光织构化表面形成了硬度相间的格局。较硬的圆形微坑起到支撑载荷、抵抗磨损、阻止磨粒磨损等作用,而周围较软的组织可以缓解接触表面应力集中。另一方面,在本润滑摩擦过程中,摩擦副的相对速度较大,圆坑形表面织构在高速相对滑动的过程中可能会形成动压润滑,从而减少摩擦磨损。然而,在试验结果中,出现部分有表面织构试件的摩擦磨损性能不但没有改善反而有所下降的现象。发生这种现象的原因,可能跟上下试件的线接触摩擦形式有关,也可能是因为表面织构的密度或尺寸不是最优的,无法形成可靠的动压润滑效应,导致试件的摩擦磨损性能得不到改善。这些问题都是后续研究的重要内容。

3 结论

1) 不同几何形貌的激光表面微织构对铸铁的摩擦磨损性能影响不同。对比圆坑形、椭圆坑形和沟槽三种不同表面织构,圆坑形表面织构改善铸铁的摩擦磨损性能最显著。

2) 表面织构面积占有率对铸铁的摩擦磨损性能影响显著。当织构面积占有率为 10% 时,三种不同表面织构都有助于减少磨损;当织构面积占有率为 20% 时,圆坑形表面织构显著地减少了磨损量,而椭圆形织构与凹槽织构的磨损量没有减少。不同的表面织构形状可能存在不同的最优表面织构密度。

3) 合理的激光表面织构能够改善材料表面的摩擦磨损性能,而不合理的激光表面织构反而会恶化材料表面的摩擦磨损性能。

参考文献

- [1] WANG X L, KATO K, ADACHI K, et al. The Lubrication Effect of Micro-pits on Parallel Sliding Faces of SiC in Water[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(3): 294—301.
- [2] WANG X L, KATO K. Improving the Anti-seizure Ability of SiC Seal in Water with RIE Texturing[J]. Tribology Letters, 2003, 14(4): 275—280.
- [3] WANG X L, KATO K, ADACHI K, et al. Loads Carrying Capacity Map for the Surface Texture Design of SiC Thrust Bearing Sliding in Water[J]. Tribology International, 2003, 36(3): 189—197.
- [4] ETSION I, SHER E. Improving Fuel Efficiency with Laser Surface Textured Piston Rings[J]. Tribology International, 2009, 42(4): 542—547.
- [5] 郝丽春,孟永钢,陈诚,等. 重载乏油条件下线接触微凹坑织构摩擦特性研究[C]//第十一届全国摩擦学大会.兰州:

- 中国机械工程学会, 2013.
- HAO Li-chun, MENG Yong-gang, CHEN Cheng, et al. Study on Line Contact Frictional Properties of Micro Texture under Overload Condition[C]//The Eleventh National Conference on Tribology. Lanzhou: China Construction Machinery Society, 2013.
- [6] 张金煜, 孟永钢. 推力滑动轴承表面织构的优化设计[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 91—99.
- ZHANG Jin-yu, MENG Yong-gang. Optimal Design of Surface Texture in Parallel Thrust Bearings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 91—99.
- [7] HAO L C, MENG Y G, CHEN C, et al. Experimental Investigation on Effects of Surface Texturing on Lubrication of Initial Line Contacts[J]. Lubrication Science, 2014, 25(5): 363—373.
- [8] 符永宏, 高兴东, 华希俊, 等. 基于特殊激光微造型工艺的平面阵列加工研究[J]. 激光技术, 2012, 36(4): 467—470.
- FU Yong-hong, GAO Xing-dong, HUA Xi-jun, et al. Study on Processing Process of The Planar Array Based on Novel Laser Surface Texturing Technology[J]. Laser Technology, 2012, 36(4): 467—470.
- [9] VILHENA L M, SEDLACEK M, PODGOMIK B, et al. Surface Texturing by Pulsed Nd: YAG Laser[J]. Tribology International, 2009, 42(10): 1496—1504.
- [10] ETSION I, BURSTEIN L. A Model for Mechanical Seals with Regular Micro Surface Structure[J]. Tribology Transactions, 1996, 39(3): 677—683.
- [11] YK G, ETSION I. Testing Piston Rings with Partial Laser Surface Texturing for Friction Reduction[J]. Wear, 2006, 261(7/8): 792—796.
- [12] BOLANDER N W, SADEGHI F, GORDON R, et al. Piston Ring Friction Reduction through Surface Modification[C]//ASME Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. British Columbia: [I.s.], 2005: 663—671.
- [13] 占剑, 杨明江. YAG 激光微坑刻蚀分布对缸套-活塞环摩擦磨损性能影响[J]. 内燃机学报, 2011, 29(1): 84—89.
- ZHAN Jian, YANG Ming-jiang. Friction and Wear Properties of Cylinder Liner and Piston Ring with Different YAG Laser Honing Micro-pits Distributions[J]. Transactions of CSICE, 2011, 29(1): 84—89.
- [14] 汪家道, 陈大融, 孔献梅, 等. 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 Jia-dao, CHEN Da-rong, KONG Xian-mei, et al. Lubricating Calculation for Area Contact of Regular Concave Profiles[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2001, 41(2): 42—45.
- [15] 彭旭东, 杜东波, 李纪云, 等. 不同型面微孔对激光加工多孔端面机械密封性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(4): 42—45.
- PENG Xu-dong, DU Dong-bo, LI Ji-yun, et al. Effect on the Properties of Laser Machining Porous Mechanical Seal of Different Type of Surface Microporous[J]. Tribology, 2006, 26(4): 42—45.