

# 混合织构发动机缸套的减摩试验研究

李凯凯,于海武,王静秋,王晓雷

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室,南京 210016)

## Experimental Investigation on Friction Reduction of Mixed Texture Cylinder Liner

LI Kai-kai, YU Hai-wu, WANG Jing-qiu, WANG Xiao-lei

(Jiangsu Key Laboratory of Precision & Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University  
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to study effect of mixed surface texture on friction reduction performance of piston ring-cylinder liner tribopair, the micro-pit array was regularly made on the cylinder inner wall having the honing stripes machined by electrochemical machining technology to achieve a mixed texture with different diameters and area coverage rate and dimple densities reciprocating friction tests were carried out on the cylinder liner-piston ring tribopair. The results show that the mixed texture surface specimen with appropriate parameters can better reduce friction compared to only mechanically honed specimen. In this test the even density mixed texture specimen with diameter  $300\ \mu\text{m}$  and area coverage rate 5% can further reduce friction by 17%, and the specimen with variable density mixed texture of 5%-15%-5% reaches 26%. Under constant micro-pit depth and load conditions, the friction reduction effect of micro-pit diameter is more obviously than area coverage rate. In certain conditions, using variable density texture can decrease friction better than even density texture.

**摘要:** 为探索混合型表面织构对缸套-活塞环摩擦副减摩性能的影响,考虑均匀面积率和变面积率两种密度形式,利用活动模板电解加工技术,在有机械珩磨条纹的缸套试件表面继续加工出具有不同直径及面积率参数的微凹坑织构组成混合织构,并与活塞环试件进行往复摩擦试验。研究表明:相比仅有机械珩磨条纹的试件,具有适当参数的混合织构试件可以继续减小摩擦。其中,直径为  $300\ \mu\text{m}$ 、面积率为 5% 的均匀密度混合织构试件,在试验条件下继续减小摩擦达 17%;面积率组合为 5%-15%-5% 的变密度混合织构试件可进一步减小摩擦达 26%。当微凹坑深度及载荷一定时,微凹坑直径对混合织构的减摩效果影响较大,微凹坑面积率次之。在一定条件下,适当组合的变密度织构比均匀密度织构的减摩效果更显著。

**关键词:** 内燃机;缸套;混合织构;密度;减摩;往复运动

**Key words:** IC engine; cylinder liner; mixed texture; density; friction reduction; reciprocation

中图分类号:TK406

文献标识码:A

收稿日期:2012-11-26

基金项目:国家自然科学基金项目(U1134003,51175246);南京航空航天大学基本科研业务费专项科研资助项目(NP2011028)

作者简介:李凯凯(1986—),男,硕士,主要研究方向为微纳米表面工程,E-mail:mylovekai@yaho. cn.

## 0 概述

缸套-活塞-活塞环系统由缸套-活塞和缸套-活塞环两类工作环境苛刻的摩擦副组成,整个系统的摩擦损失占发动机摩擦损失的 44%<sup>[1-2]</sup>。其中,缸套内表面受高温、高压气体的作用且与高速运动的活塞环接触而极易磨损,因而有效减小缸套与活塞环之间的摩擦对提高整个发动机系统的摩擦学性能具有重要的意义。

在摩擦副表面进行人工微造型的表面织构技术可以有效改善接触表面的摩擦学性能,因而近年来国内外学者对其进行了大量的理论及试验研究,并成功应用于计算机硬盘<sup>[3]</sup>、轴承和密封<sup>[4-5]</sup>、发动机缸套<sup>[6]</sup>中。目前对表面织构的研究主要集中在摩擦学性能试验和润滑减摩机理的研究,研究表明,选择合适的表面织构几何参数(深度、直径、面积率)可以使织构化表面达到最优的摩擦学性能。对于缸套-活塞环摩擦副而言,文献<sup>[7]</sup>通过建立具有表面织构的活塞环与缸套间往复运动的数学模型,研究了凹坑深径比与面积率对其摩擦性能的影响,结果表明微凹坑深径比对摩擦性能的影响较大,面积率的影响较小;文献<sup>[8]</sup>利用自制的往复摩擦磨损试验机,模拟活塞环与缸套间的往复运动,试验结果所获得的最佳织构参数与计算结果一致,减摩率可以达到 30%;对于混合织构而言,文献<sup>[9]</sup>利用反应离子刻蚀技术对碳化硅表面进行织构化处理,试验研究表明混合有直径 350  $\mu\text{m}$  和边长为 40  $\mu\text{m}$  凹坑的表面织构既能产生有效的流体动压力,又能均匀地向接触面供水,混合有不同尺寸凹坑的极限载荷分别比无凹坑表面和单一尺寸凹坑表面提高了 2.4 倍和 1.6 倍。

对于缸套内壁的织构化,研究较多的是在摩擦副表面加工单一微沟槽织构或者微凹坑织构。文献<sup>[10]</sup>采用激光微造型加工技术在某柴油机气缸套表面上加工出规则的交叉网纹型微观形貌,结果表明采用该工艺得到的表面评定参数优于传统平台网纹缸套,并且发动机机油消耗相对于传统工艺降低了 48.1%,活塞漏气量下降了 49.2%;文献<sup>[11]</sup>采用激光刻蚀的方法在缸套内壁加工微凹坑阵列,将激光刻蚀缸套与机械珩磨缸套摩擦磨损特性进行比较,发现激光刻蚀微坑可获得更低的摩擦系数和更小的磨损量;文献<sup>[12]</sup>考虑往复运动中速度对称变化的特点,使用 UMT-II 型多功能试验机研究了变密度微凹坑表面织构在往复运动下的减摩效果,结果表明密度组合为 0.3-0.1-0.3 的变密度织构在较高载

荷和滑动速度时能达到最佳的润滑减摩效果,说明变密度织构在改善往复运动摩擦副的减摩性能方面有着很大的潜力。

综上所述,表面织构是一种减少摩擦和提高摩擦性能的有效方法,不同密度组合的变密度织构可以改善摩擦副的减摩性能<sup>[12]</sup>。本文考虑均匀面积率和变面积率两种密度形式,缸套与活塞环片断均取自于真实发动机,利用电解加工技术在有机珩磨条纹的缸套内壁继续加工微凹坑织构,采用试验的方法研究混合有珩磨条纹和微凹坑两种形式的表面织构对缸套-活塞环摩擦副减摩性能的影响。

## 1 试验方法

### 1.1 试验装置与试件制备

试验在自制往复摩擦磨损试验机上进行,试验装置结构如图 1 所示。该试验装置利用曲柄滑块机构将旋转运动转换为往复运动,试验过程中采用杠杆砝码加载,摩擦力由力传感器测得,并由多功能数据采集卡实时采集。

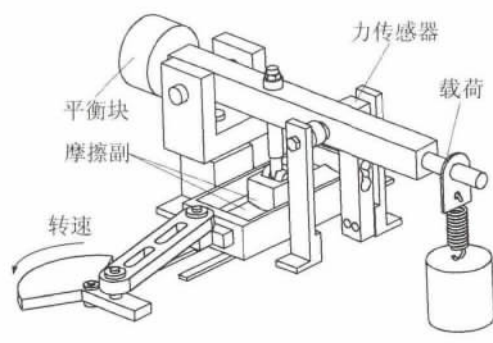


图 1 往复摩擦磨损试验机结构图

为保证贴合实际工况,上下试件均取自真实发动机的活塞环和缸套。活塞环选择南京溧水活塞环有限公司提供的 95 型第一道单面气环,外圆直径为 86 mm,材质为合金铸铁,外圆表面镀铬处理,表面维氏硬度可达到 800  $\text{HV}_{0.1}$  以上;缸套为文峰缸套厂提供的钢制薄壁表面镀铬气缸套,内径为 86 mm,壁厚为 1 mm,缸套内壁有 45° 的珩磨条纹。试验中全部保留了真实发动机的材料和表面处理,上试件选取一对从活塞环开口处开始沿环外轮廓选取的 40° 片断<sup>[13]</sup>,下试件选取与活塞环曲率相配的缸套的 1/6 片断,实物如图 2 所示。

### 1.2 混合织构试件的制备

为研究混合织构对缸套-活塞环摩擦副摩擦性能的影响,本文采用电解加工(electrochemical machine, ECM)的方法进行混合织构的加工,该技术利

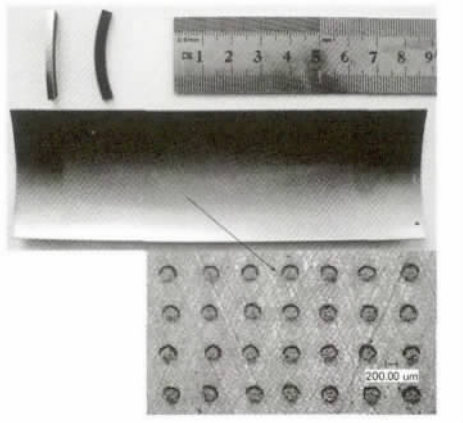


图2 试件照片

用金属在电解液中进行阳极溶解的原理去除多余材料将零件加工成形<sup>[14-15]</sup>。本研究采用活动模板电解加工方法,在曲面上加工出微米级别的混合织构。如图3所示,阳极表面活动模板(覆铜板)具有阵列通孔,电解液在活动模板表面高速通过,阳极表面暴露于电解液部分不断被溶解,同时高速流动的电解液将电解产物带出加工区域,该加工方法无变形和飞边毛刺,高效且无热应力,加工后的金相组织基本不发生变化,阴极工具无损耗。

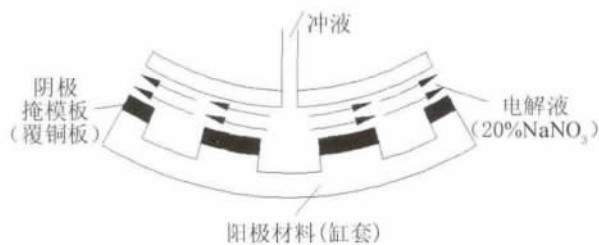


图3 活动模板电解加工示意图

经过电解加工过后的混合织构试样实物形貌如图2所示。可以看出,表面织构形状和排列规整,可以满足试验要求。

### 1.3 试验设计

受试验机行程的限制,试验中缸套-活塞环摩擦副往复运动的行程设计成100 mm。在均匀密度混合织构的设计中,整个往复行程中加工单一面积率的微凹坑织构,其织构形式如表1所示。在变密度混合织构的设计中,本文选择加工两种面积率的组合即双密度形式的微凹坑织构。由于往复行程为100 mm,不能将织构表面的接触区域分成三等份,为近似等分,三个区域对应的宽度分别为33、34和33 mm,其织构形式如表2所示,密度分布形式有两

种情况,分别为低密度织构在中间区域和高密度织构在中间区域。

表1 均匀密度混合织构微凹坑的几何尺寸

深度/ $\mu\text{m}$	直径/ $\mu\text{m}$	面积率/%	织构形式
11~15	200	5,10,15	
11~15	250	5,10,15	
11~15	300	5,10,15	

表2 变密度混合织构的几何尺寸设计

密度形式	密度分布	密度组合	织构形式/mm
双密度	中间低两端高	10%-5%-10%	
		15%-5%-15%	
		15%-10%-15%	
双密度	中间高两端低	5%-10%-5%	
		5%-15%-5%	
		10%-15%-10%	

如表1所示,在固定单个微凹坑深度的条件下,分别选取三种不同的微凹坑直径和三种不同的微凹坑面积率加工均匀密度混合织构,并以仅有机械珩磨条纹的试件作为研究参照。试验在载荷为200 N的条件下进行,转化为缸套受到的实际压力为1.2 MPa,选择六种曲柄转速,分别为50、100、200、300、400和500 r/min。

如表2所示,在微凹坑直径和深度尺寸一定的情况下(微凹坑直径选择300  $\mu\text{m}$ ,深度选择11~15  $\mu\text{m}$ ),选取5%、10%和15%三种面积率,安排六种不同面积率的组合,以仅有机械珩磨条纹的试件作为研究参照,考察变密度混合织构对缸套-活塞环摩擦副摩擦性能的影响。载荷及曲柄转速与均匀密度混合织构的选择相同。

试验的润滑条件采用富油润滑,选用长城牌柴油机油作为润滑剂,其牌号为CD15W-40,每次试验开始时加入2 mL润滑油,开始试验后不再添加润滑剂。

试验步骤如下:(1)缸套表面珩磨条纹上存在毛刺,为确保获得稳定的摩擦系数,需对每个下试件进行试验前跑合,跑合载荷为400 N即2.4 MPa,跑合时间20 min;(2)重新安装试件,在各个速度下往复运动1000次,取这1000次往复运动的摩擦系数绝对值的算术平均值作为该载荷及速度下的摩擦系数;(3)每种转速下重复试验三次,试验结果取平均值。

## 2 均匀密度试验结果与讨论

### 2.1 直径的影响

图4为不同直径混合织构在三种不同面积率

下,与单一珩磨条纹织构(凹坑直径为  $0\ \mu\text{m}$ )相比较的摩擦学试验曲线图。从图 4 可以看出,随着曲柄转速的增加,摩擦系数有相同的减小趋势。在曲柄转速为  $50\ \text{r}/\text{min}$  和  $100\ \text{r}/\text{min}$  时,不同直径的混合织构与单一珩磨条纹织构相比优势较小,摩擦系数在很小的范围内波动;曲柄转速在  $200\ \text{r}/\text{min}$  及以上时,摩擦系数随着直径的增大而减小;直径为  $300\ \mu\text{m}$  的混合织构试件减摩效果比较显著,在面积率为  $5\%$ ,转速为  $500\ \text{r}/\text{min}$  时,其摩擦系数与单一珩磨条纹织构的试件相比能下降  $17\%$ 。

### 2.2 面积率的影响

图 5 为不同面积率下,不同直径的混合织构与单一珩磨条纹织构(面积率为  $0\%$ )相比较的摩擦学试验曲线图。如图 5 所示,随着面积率的增大,直径为  $200$  和  $250\ \mu\text{m}$  的混合织构在不同曲柄转速下具有相似的摩擦系数曲线,转速为  $300\sim 500\ \text{r}/\text{min}$  时,面积率为  $5\%$  的混合织构相对于单一珩磨条纹织构才有一定的减摩效果;直径为  $300\ \mu\text{m}$  时,随着转速的增加,在不同面积率下摩擦系数的波动比较明显,在试验转速下,除面积率为  $10\%$  时略有增摩外,其他面积率下都是减摩,在面积率为  $5\%$  速度为  $500\ \text{r}/\text{min}$  时,摩擦系数与单一珩磨条纹织构的试件相比下降  $17\%$ 。

比较图 4 和图 5 试验结果发现,直径与面积率都是影响混合织构摩擦性能的重要因素,并且相互影响。随着直径的变化(图 4),混合织构试件对应的摩擦系数变化显著,直径为  $300\ \mu\text{m}$  的混合织构在不同面积率下表现出较好的摩擦特性;而随着面积率的变化(图 5),混合织构相比于单一珩磨条纹织构摩擦系数变化不明显。结果表明:与面积率相比,直径对混合织构的摩擦系数影响较大。

综合以上试验研究,转速  $50\sim 200\ \text{r}/\text{min}$  时,均匀密度混合织构与单一珩磨条纹织构的摩擦系数相比优势不大,说明在速度较低时摩擦副之间难以形成润滑油膜,导致摩擦副表面粗糙峰直接接触,因而摩擦系数变化不大;转速为  $300\sim 500\ \text{r}/\text{min}$  时,与单一珩磨条纹织构相比,均匀密度混合织构产生润滑油膜的能力更强,有效避免了摩擦副表面粗糙峰的直接接触,因而摩擦系数较低,有进一步减摩的效果。

## 3 变密度试验结果与讨论

### 3.1 低密度织构在中间区域

图 6(a)为载荷  $200\ \text{N}$  条件下,中间区域低密度两端区域高密度的变密度混合织构表面的摩擦系数随曲柄转速的变化曲线,并以单一珩磨条纹织构作

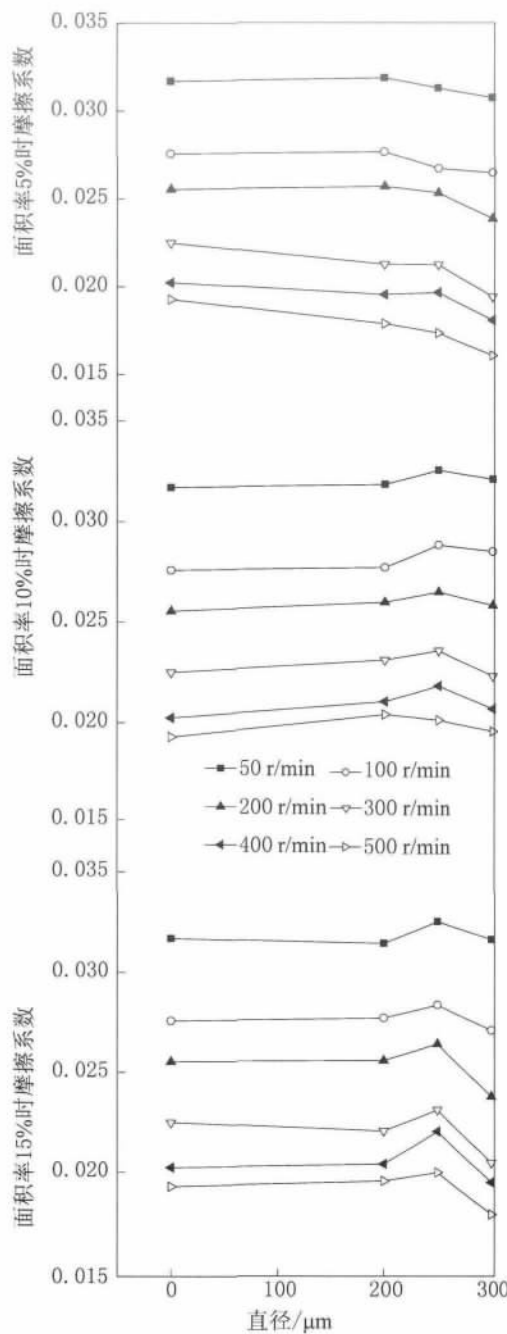


图 4 不同凹坑面积率下直径与摩擦系数的关系(载荷  $200\ \text{N}$ )

为参照。

由图 6(a)可以看出,密度组合为  $15\%-5\%-15\%$  和  $15\%-10\%-15\%$  的变密度混合织构在转速超过  $300\ \text{r}/\text{min}$  时,摩擦系数开始低于单一珩磨条纹织构;密度组合为  $10\%-5\%-10\%$  的混合织构在试验速度下均表现出最优的摩擦性能。在转速超过  $300\ \text{r}/\text{min}$  时,不同组合的变密度织构相对于单一珩磨条纹织构均有不同程度的进一步减小摩擦的效果;在转速为  $500\ \text{r}/\text{min}$  时,与单一珩磨条纹织构相比,密

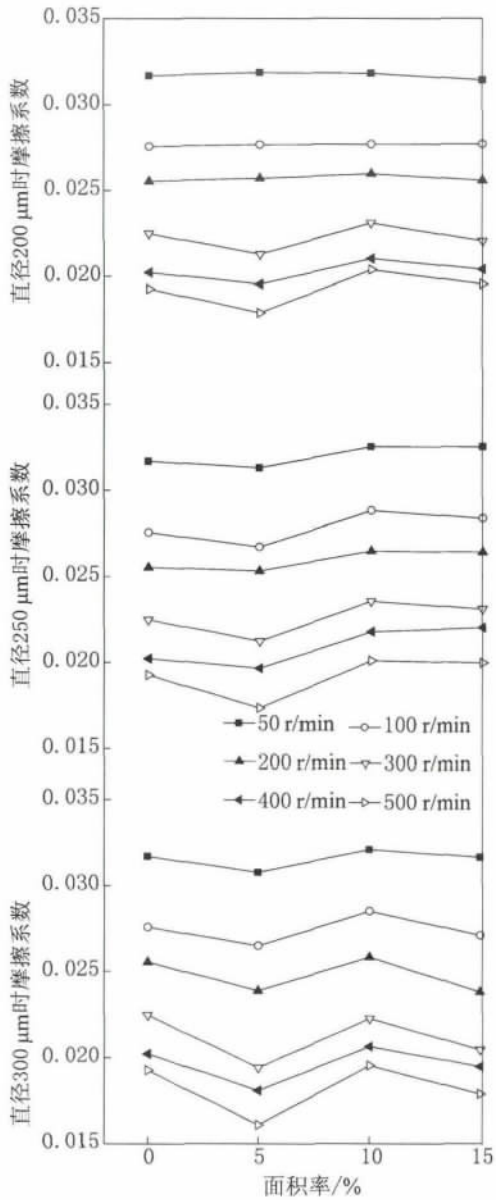


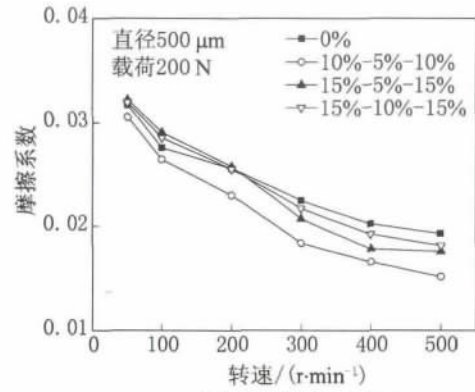
图5 不同凹坑直径下面积率与摩擦系数的关系(载荷 200 N)

度组合为 10%-5%-10% 的变密度织构能进一步减摩达 22%。

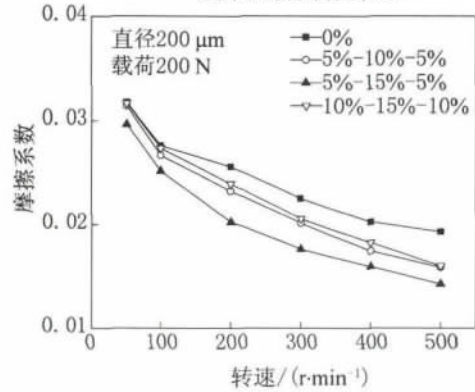
### 3.2 高密度织构在中间区域

图 6(b) 为载荷 200 N 条件下, 中间区域高密度两端区域低密度的变密度混合织构表面的摩擦系数随曲柄转速的变化曲线, 并以单一珩磨条纹织构作为参照。

由图 6(b) 可以看出, 在试验转速超过 100 r/min 时, 变密度组合的混合织构均起到提高摩擦性能的作用, 其摩擦系数均低于单一珩磨条纹织构; 密度组合为 5%-15%-5% 的混合织构在试验速度下均表现出较好的减摩效果, 其最高能进一步减摩达 26%。



(a) 低密度织构在中间



(b) 高密度织构在中间

图6 变密度织构下转速与摩擦系数的关系

由图 6 结果可得, 适当的密度组合在一定条件下能有效的降低摩擦系数。

由凹坑直径 300 μm、载荷 200 N 条件下的试验研究表明: 在三种均匀密度织构中, 密度为 5% 的织构表面减摩效果最优; 在三种低密度织构在中间区域的变密度织构中, 10%-5%-10% 的织构表面减摩效果最优; 在三种高密度织构在中间区域的变密度织构中, 5%-15%-5% 的织构表面减摩效果最优。图 7 为在凹坑直径和载荷一定的条件下, 均匀密度为 5% 的织构与变密度组合为 10%-5%-10% 和 5%-15%-5% 的减摩率对比试验结果。结果表明: 随着转速的增加, 变密度织构的减摩率逐渐增高, 表明速度也是影响变密度织构摩擦性能的重要因素; 在试验条件下, 最优变密度织构的减摩率明显高于最优均匀密度织构, 说明最优变密度织构相比于最优均匀密度织构产生润滑油膜的能力更强, 更有效地避免了表面粗糙峰的直接接触, 因而减摩效果更显著, 摩擦系数更低。

### 4 结论

(1) 混合织构试件比仅进行机械珩磨的试件更能减摩, 转速越高, 混合织构降低摩擦的能力越强。

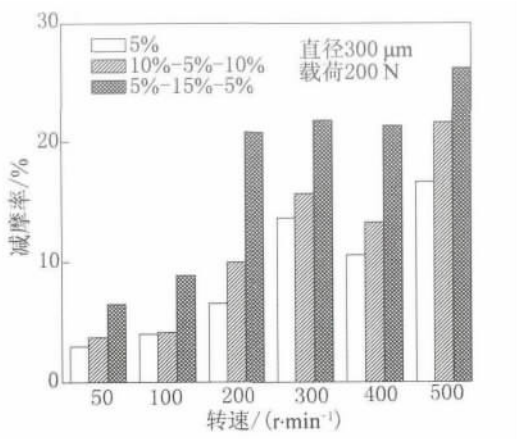


图 7 较优密度结构表面减摩率与转速的关系

这是由于在高速时,表面织构的存在使润滑膜更易形成,从而有效缓解了表面间粗糙峰的直接接触。

(2) 对于均匀密度混合织构,当微凹坑深度固定时,直径和面积率均是影响其摩擦性能的重要因素,并且它们之间相互影响。另外,它们对均匀密度混合织构摩擦性能的影响程度不同,直径的影响程度较大,面积率次之。

(3) 对于变密度混合织构,适当密度组合的变密度织构在一定条件下能有效的降低摩擦系数,且比均匀密度织构的减摩能力更强,说明在一定条件下,适当密度组合的变密度织构比均匀密度织构更加容易产生润滑油膜,因而减摩效果更显著。

参考文献:

[1] 王成焘,姚振强,陈铭. 汽车摩擦学[M]. 上海:上海交通大学出版社,2002.

[2] Simon C, Tung M L, McMillan. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future[J]. Tribology International,2004,1(37):517-536.

[3] Tan A H, Cheng S W. A novel textured design for hard disk tribology improvement[J]. Tribology International, 2006, 36(6):506-511.

[4] Brizmer V, Kligerman Y, Etsion I. A laser surface textured parallel thrust bearing[J]. Tribology Transactions, 2003, 46(3):397-403.

[5] Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing[J]. Tribology Letters, 2004, 17

(4):733-737.

[6] 符永宏,叶云霞,张永康,等. 用于显著改善摩擦副润滑状态的激光珩磨技术[J]. 机械工程学报,2002,38(8):115-117. Fu Y H, Ye Y X, Zhang Y K, et al. Technology of laser honing applied in distinctively improving the lubrication of frictional units[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002,38(8):115-117.

[7] Ronen A, Etsion I. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components [J]. Tribology Transactions,2001,44(3):359-366.

[8] Ryk G, Kligerman Y, Etsion I. Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components [J]. Tribology Transactions,2002,45(4):444-449.

[9] 王晓雷,韩文非,加藤康司. 碳化硅陶瓷的水润滑特性及其表面微细结构的优化设计[J]. 中国机械工程,2006,19(4):457-460. Wang X L, Han W F, Kato K J. Surface texture optimal design for silicon carbide under water lubrication[J]. China Mechanical Engineering,2006,19(4):457-460.

[10] 尹必峰,符永宏,王霄,等. 激光微造型柴油机缸套的试验研究[J]. 内燃机工程,2008,29(1):81-84. Yin B F, Fu Y H, et al. Investigation on laser micro-texturing cylinder liner of diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2008,29(1):81-84.

[11] 占剑,杨明江. YAG 激光微坑蚀分布对缸套-活塞环摩擦磨损性能影响[J]. 内燃机学报,2011,29(1):84-89. Zhan J, Yang M J. 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.

[12] 朱华,历健全,陆彬彬,等. 变密度微凹坑表面织构在往复运动下的减摩作用[J]. 东南大学学报,2010,40(4):741-745. Zhu H, Li J Q, Lu B B, et al. Friction reduction effect of micro-round dimple surface texture with variable density in reciprocating[J]. Journal of Southeast University,2010,40(4):741-745.

[13] 袁明超. 表面织构对活塞环/缸套摩擦副摩擦学性能的影响[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.

[14] 王建业,徐家文. 电解加工原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2001.

[15] 宫超林,曲宁松,李寒松. 活动阴极模板电解加工发动机缸套微坑阵列试验研究[C]. 苏州:第 14 届全国特种加工学术会议,2011.

(编辑:许蕾)