

表面织构类型对摩擦副减摩性能的影响分析*

赵章行¹ 龙威¹ 任璞¹ 雷基林²

(1. 昆明理工大学机电工程学院 昆明 650500;

2. 昆明理工大学云南省内燃机重点实验室 昆明 650500)

摘要: 目前对表面织构润滑减摩机理的认识还不够完善。为研究不同织构类型所适用的最佳工况,以内燃机活塞-缸套摩擦副为研究对象,采用时均雷诺方程及周期边界条件,建立织构条件下平面摩擦副润滑油膜的控制方程。通过试验测试结合流场分析,明确表面均布凹坑型微织构和斜槽型微织构的润滑减摩机制。进一步对比坑-槽复合型织构和槽-槽耦合对摩时摩擦因数的变化规律,从转速和载荷的角度明确适合各织构类型的最优工况。研究发现:斜槽型织构具有更优的减摩效果,并在负载 100 N 时摩擦因数最优,转速对摩擦因数的影响较小;凹坑型织构和复合型织构在 80 N 载荷下减摩效果最佳,在 350 r/min 时摩擦因数达到最小值;耦合槽型织构在低承载时摩擦因数低于单斜槽织构(最大相差 10.2%),转速对摩擦因数的影响较小。针对几种织构类型所适应的最优工况进行研究,明确了不同工况下的织构类型的选择和优化。

关键词: 表面微织构; 不同类型; 润滑减摩; 最优工况; 摩擦因数

中图分类号: TG156; TB114

Analysis of Influence of Surface Texture Type on Lubrication and Friction Reduction Performance of Friction Pair

ZHAO Zhangxing¹ LONG Wei¹ REN Pu¹ LEI Jilin²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. Yunnan Province Key Laboratory of Internal Combustion Engines, Kunming 650500, China)

Abstract: The current understanding of the surface weave lubrication and friction reduction mechanism is not yet complete. In order to study the optimal working conditions for different texture types, this paper takes the piston-cylinder liner friction pair of internal combustion engine as the research object, and uses the time-averaged Reynolds equation and periodic boundary conditions to establish the control equation of the lubricating oil film of the plane friction pair under texture conditions. Experimental tests are combined with flow field analysis to clarify the lubrication and friction reduction mechanism of surface homogeneous crater type microweave and oblique groove type microweave. Further the variation law of friction factor is compared between pit-slot composite weave and slot-slot coupling pair friction, and the optimal working conditions are clarified for each weave type from the perspective of speed and load. It is found that the groove texture has better friction reduction effect and the friction factor is optimal when the load is 100 N. The rotational speed has little effect on the friction factor. Pit texture and composite texture have the best antifricition effect under 80 N load, and the friction factor reaches the minimum at 350 r/min. The friction factor of the coupled groove texture is lower than that of the monoclinic groove texture at low load-the maximum difference is 10.2%, and the rotational speed has little effect on the friction factor. The optimal working conditions for several weave types are studied, and the selection and optimization of the weave types under different working conditions are clarified.

Keywords: surface micro-texture; different types; lubrication and antifricition; optimal conditions; friction factor

* 国家自然科学基金资助项目(51766006)。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(51766006).

20210907 收到初稿, 20211130 收到修改稿

0 前言

机械运动中有 30%~50% 的能量损失在各种形式的摩擦上, 约有 80% 的零件因为摩擦损坏导致失效^[1]。传统的润滑减磨技术常采用润滑改善、机械设计和表面改性等方法, 但是它们的不足在于对摩擦副间承载力的提升有限, 且付出成本较大。表面微织构技术作为一种新兴的可实现润滑减磨的有效手段^[2-3], 在内燃机摩擦副之间逐渐被广泛应用^[4-5]。表面微织构技术通过激光刻蚀、电化学腐蚀和超精密机加工等方法在摩擦副表面加工制备出具有一定尺寸、形状和排列的微观结构, 在特定载荷和转速下改善摩擦副间的摩擦学性能。常见的微织构形式有凹坑型、斜槽型和四边形等几种, 合理设计和布置不同形式和参数的表面织构, 不仅可以显著改善机械零件表面的摩擦学性能^[6-7], 而且可以减小能耗提高效率, 延长系统使用寿命。因此, 开展不同类型织构对内燃机关键摩擦副润滑减磨性能的研究具有重要的科学意义和实践价值^[8-9]。

HAMILTON 等^[10]最早于 1966 年发现表面织构技术有利于提升摩擦副润滑减磨性能。近年来, 国内外许多学者对此进行了大量研究^[11-13]。SIRIPURAM 和 STEPHENS^[14]研究了圆形、正方形、菱形、三角形等七种形态的织构和不同密度的织构对摩擦因数的影响, 研究发现织构密度对降低摩擦副间摩擦因数起重要作用。NAKNAO 等^[15]对平行凹槽织构、网状凹槽织构和圆形凹坑织构进行了对比, 发现圆形凹坑织构会降低摩擦因数。YU 等^[16]对圆形织构、椭圆形织构和三角形织构进行数值分析, 认为椭圆形织构润滑减磨的性能较好。QIU 等^[17]认为 SIRIPURAM 等没有考虑不同深度和不同密度下不同形状织构的润滑减磨性能, 通过对相同形状下不同深度的织构进行研究后发现椭圆体织构的油膜承载力最大。SHEN 等^[18]对矩形、斜三角形和等腰三角形三种不同底部特征的凹坑织构进行研究, 发现平底圆形凹坑具有最高的油膜承载力。GRABON^[19]、朱世新等^[20]研究发现对于同一微织构类型, 通过合理设计其排列方式可以有效改善其润滑效果。麻凯等^[21]对双螺旋凹槽织构进行性能分析, 研究发现不同深度的双螺旋凹槽在 150 μm 深度时可以提升减磨性能, 50 μm 时效果相反。戴庆文等^[22]针对不同参数的直线型、V 型槽表面织构的密封特性进行研究, 发现某面积占有率和某倾斜角、展角参数的 V 型槽织构具有较优的减磨和密封效果。

综上所述, 对于微织构润滑减磨的研究多倾向于织构参数的改变^[23], 对于不同微织构类型在润滑机制和适用工况 (转速、承载) 的研究还不多见。因此, 本文针对凹坑型织构、斜槽型织构、坑槽复合型织构以及以斜槽型织构为例的耦合型织构在不同转速和不同载荷下的摩擦性能进行研究, 明确相同工况下不同微织构的润滑减磨机理, 给出不同类型微织构实现最小摩擦因数时的对应的转速和承载范围。

1 模型的建立

1.1 几何模型

本文以圆盘型摩擦副为试验对象, 在圆盘型摩擦试件表面分别加工凹坑型微织构和斜槽型微织构, 如图 1 所示。通过分析不同织构形式下油膜内流场特征和压力分布规律, 明确这两种微织构对摩擦力和摩擦因数的影响规律, 进而明确不同形式微织构在平面摩擦副工作过程中的润滑减磨机制。

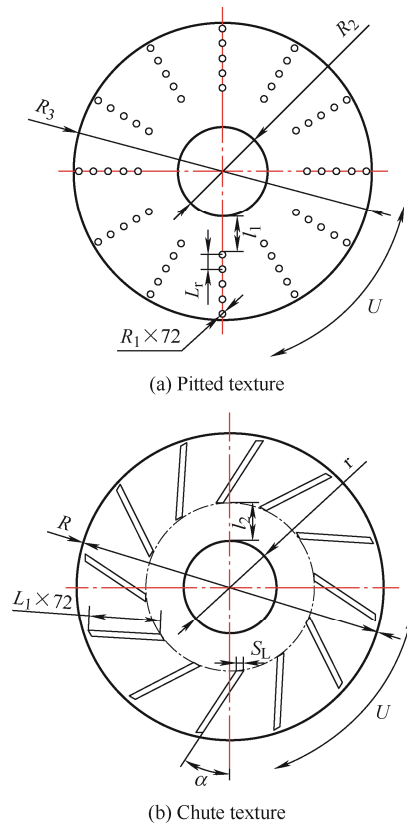


图 1 微织构示意图

Fig. 1 Sketch of microtexture

如图 1a 所示, 试件直径为 R , 内环直径为 r , 凹坑直径为 S_r , 坑间距为 L_r , 内环与织构间距离为 l_1 ; 如图 1b 所示, 槽型织构槽宽为 S_L , 槽长为 L_1 ,

槽的倾斜角度为 α , 内环与织构间距为 l_2 , 各参数具体数值如表 1 所示。

表 1 织构化表面具体参数

Table 1 Textured surface specific parameters

Parameter	Value
Specimen diameter R / mm	50
Inner ring diameter r / mm	15
Pit diameter S_t / μm	400
Slot width S_L / μm	120
Pit spacing L_t / mm	1
Slot length L_1 / mm	11.78
Slot length L_2 / mm	5.89
Spacing length l_1 / mm	13.8
Spacing length l_2 / mm	13.8
Spacing length l_3 / mm	13.8
Tilt angle α / ($^\circ$)	30
Area ratio S_p / %	7.8

面积占有率 S_p 如式(1)所示:

$$S_p = n\pi r^2 / [\pi(R_1^2 - R_2^2)] = nr^2 / (R_1^2 - R_2^2) \quad (1)$$

式中, n 为试件表面织构个数; U 为试件相对运动速度。

1.2 数学模型

1.2.1 控制方程

根据流体润滑理论对摩擦副间隙的油膜建立流体润滑数学模型。由于织构深度远小于油膜厚度, 因此忽略表面粗糙度影响, 无论凹坑型织构还是斜槽型织构, 其控制方程均可由挤压膜雷诺方程描述:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi x \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi y \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) &= 6\eta \phi_c \frac{\partial [(1-\theta)\rho h]}{\partial} + \\ 6U\sigma \frac{\partial [(1-\theta)\phi_s]}{\partial x} + 12\phi_c \frac{\partial [(1-\theta)\rho h]}{\partial} & \\ h = h(x, y) & \\ p + \theta - \sqrt{p^2 + \theta^2} = 0 & \end{aligned} \quad (2)$$

式中, p 为油膜压力, Pa; x 、 y 轴方向分别为摩擦副间隙油膜周向和径向, z 为油膜厚度方向, 由于油膜厚度为微米级, 所以忽略油膜厚度 z 方向上的压力梯度变化; η 为润滑油动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; U 为织构上表面运动速度, m/s ; ρ 为润滑油密度, kg/m^3 ; z 为油膜内各位置的厚度, μm ; θ 为空化比例; σ 为表面粗糙度, μm ; ϕ_c 为接触因子; ϕ_s 为剪切流量因子; ϕ_c 与 ϕ_s 由表面粗糙度决定。

1.2.2 边界条件

由于摩擦副表面织构呈旋转周期分布, 织构内

部的油膜压力也呈现出相同的变化规律, 且织构均为绕圆心阵列织构, 因此截取与摩擦副相对旋转方向垂直的一列区域为研究对象。

如图 2 所示, 油膜入口边界 (Inlet) 为模型的上边界; 出口边界 (Outlet) 为模型的下边界; 左右两侧为模型的旋转周期边界 (Rotationally-periodic); 织构所在表面以及织构表面为模型的旋转移动边界 (Moving-wall); 底面为固定壁面 (Stationary-wall)。模型旋转边界转速与电机转速同步。

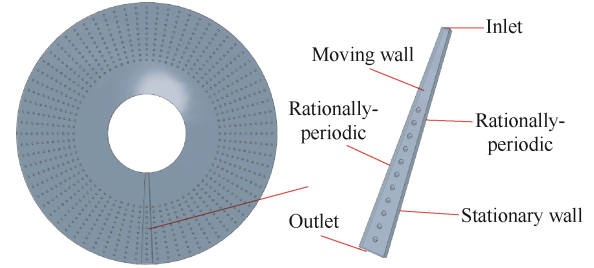


图 2 油膜边界示意图

Fig. 2 Schematic diagram of oil film boundary

1.2.3 流场分析

国内外学者对织构润滑减摩的机理研究主要分为三类: HAMILTON 等^[10]提出织构的同时发现织构可以依靠动压效应达到润滑减摩的效果, HIRAYAMA 等^[24]发现织构的空化效应也可以对减摩有所帮助, DU 等^[25]则发现涡流对减小阻力的影响。本文因试验转速未达到空化要求, 所以从油膜的压力分布和流线图来对油膜进行流场分析。

由于表面微织构的存在, 润滑油膜内部不再是均匀的层流状态, 利用 Ansys Fluent 平台, 采用 $k-\epsilon$ 计算模型对摩擦副间的润滑油膜流场进行数值计算: 设定流体密度为 804 kg/m^3 , 动力黏度为 $0.0228 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 压力-速度耦合器选择 Coupled 算法, 计算结果收敛残差小于 10^{-6} , 计算可知相同工况下的凹坑型微织构和斜槽型微织构摩擦副间润滑油膜内的压力分布如图 3 所示。

如图 3 所示, 在相同压力尺度下, 斜槽型微织构可以使摩擦副间获得更大的承载能力, 但是凹坑型微织构的压力分布较斜槽型微织构更加均匀。凹坑型微织构在整个油膜上形成均匀分布的流体动压, 织构内部的流体动压则会略高于无织构区域; 斜槽型微织构形成的动压则普遍高于凹坑型微织构, 并在圆盘形试件内圈区域集中形成高压区, 而试件最外圈区域则有小部分低压区。

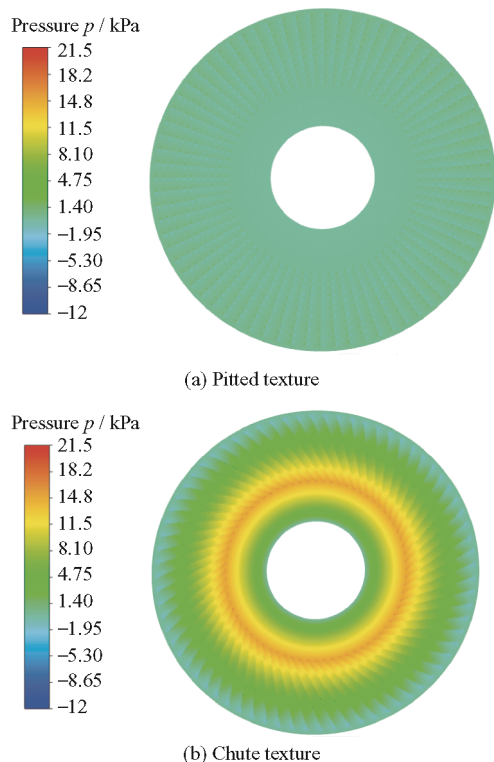


图3 不同类型织构下油膜压力分布图

Fig.3 Oil film pressure distribution under different textures

进一步分析凹坑型织构和斜槽型织构内部流场的运动学特征,如图4所示,在相同尺度标准下,凹坑型微织构在织构谷底处形成显著的瞬态涡流。涡流强度足以将凹坑底部附着的油液紧紧推向壁面一侧,涡流的旋向与外层流场的方向一致,进一步加速了油膜中间区域的流动速度,根据牛顿内摩擦定律可知,减小了油膜中间区域的水平方向剪切力;规则分布的一系列凹坑型微织构,其当地线速度越大时,内部瞬态涡流作用越强,使得上下试件表面的润滑油紧紧附着在金属表面上,而中间区域的油膜内部相当于分散了强度不同、转速相同的若干滚珠,上下试件表面不会因为润滑油的作用相互黏滞拖曳,更不会直接接触,起到类似于滚动轴承的作用;同时凹坑型织构还可以容纳一定的磨屑,起到储油和收纳的作用,避免摩擦副高速运动过程中出现局部接触、磨粒磨损甚至拉缸等现象出现,达到润滑减摩的效果。而对于斜槽型微织构,可以清楚地看到并未在织构内部形成涡流,润滑油以一种挤压的形式从试件表面进入织构底部,因过流截面变化形成的收敛楔导致流体受阻较凹坑型织构更大,流体动能损耗更加明显,在收敛楔附近转化的压力能更大,因此斜槽型织构形成的流体动压效应更加明显,如图3b所示。通过上述流场分析,不难发现:相同工况条件下,凹坑型织构主要通过涡流减阻的

方式达到润滑减摩的效果,而斜槽型织构则主要通过动压效应提升油膜承载力的方式减小摩擦。为了验证不同织构形式的润滑减磨机制的不同,本文进一步开展试验测试,对凹坑型微织构和斜槽型微织构的润滑减摩作用进行分析。

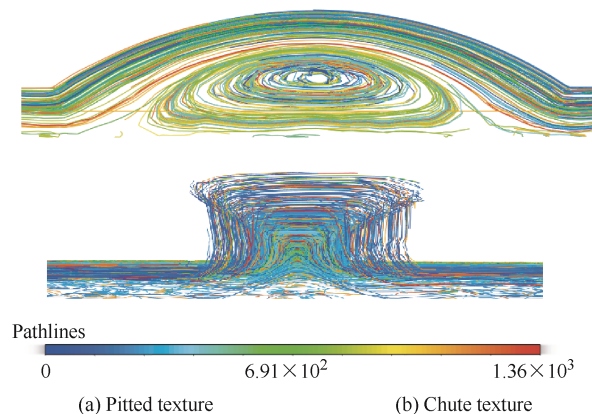


图4 不同类型织构下流线图

Fig. 4 Flow diagram of different types of texture

2 试验研究

2.1 试件的制备

本文采用激光刻蚀方法在试件表面加工参数如表1所示的不同类型微织构试件。

本文所需微织构由 LM-20 型光纤激光打标机加工而成。其具体技术参数为:脉冲激光波长 1 064 nm,激光功率范围 0~20 W,脉冲宽度 110 ns,重复频率 20~60 kHz,聚焦光斑直径 50 μm ,焦距 220 mm。图 5a、5b、5c 为本文微织构的加工设备加工出的实物图。

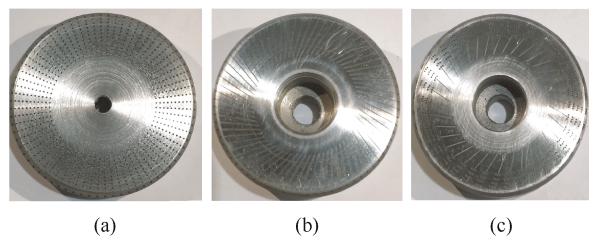


图5 试件的加工

Fig. 5 Machining of specimen

在激光加工前,首先将加工件表面用浸满丙酮溶液的化工棉擦洗干净,在激光打标机上固定好后调整聚焦,设置好加工参数后进行织构的激光加工;加工结束后,再次使用浸满丙酮溶液的化工棉擦拭试件表面,将清理后的试件放入装有丙酮溶液的超声波清洗机中清洗 15 min 后吹干备用。

为保证数值计算和试验测试的一致性, 采用 SEF-680 型表面粗糙度轮廓形状测量仪对加工后织构表面的粗糙度进行测量。

如图 6 所示, 加工后斜槽型织构和凹坑型织构的试件表面粗糙度为 $0.3 \sim 0.7 \mu\text{m}$, 且加工出的微织构存在一些微毛刺, 所以在加工后需使用 P600 目砂纸打磨试件表面清理毛刺; 在试验时, 需先在 100 N 的载荷下, 以 600 r/min 的转速对试件进行 30 min 的磨合, 磨合后方才可以对试件进行试验测量。

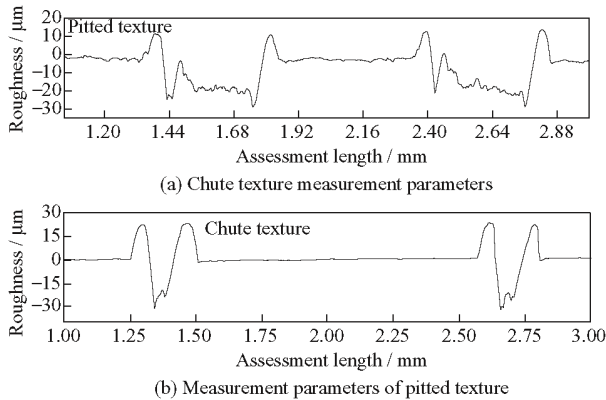


图 6 试件的测量

Fig. 6 Measurement of specimen

2.2 试验原理及装置

现有商用摩擦磨损试验台存在油膜间隙不可调节的缺陷, 因此本文设计了气动可调式摩擦磨损试验台。本试验台采用空气压缩机来压缩产生高压空气, 经高精密过滤减压组件除去气体中的水分、颗粒等杂质后输送给压力调节阀, 通过三通件分出两根气管连接气压阀, 两个气压阀各有两根气管连接两个气缸, 分别起到增压和减压的作用, 气缸在增压阀和减压阀的作用下对上托盘进行增压或减压, 从而达到对上试件加压或减压来调整负载的目的, 载荷的大小则由连接在两个压力传感器上的显示器上显示, 上试件和下试件的相对运动是由电机的转动通过联轴器的传递实现, 与下试件连接的扭矩传感器可以通过上试件对下试件的相对转动来检测试件的扭矩大小, 测出的数值将显示在与扭矩传感器相连接的显示器上。最后对传感器测出的扭矩与压力值进行计算得到摩擦副间的摩擦因数。

如图 7 所示, 负载压力由两个对称的气缸 (SC40x10 0S) 提供, 0.7 MPa 下单缸最大推力为 870 N , 拉力为 730 N ; 载荷测量采用轮辐式拉压力传感器, 量程为 $0 \sim 100 \text{ kg}$, 灵敏度为 $1.0 \sim 2.0 \pm 0.1 \text{ mV/V}$, 滞后误差为 $\pm 0.03\%$ (全范围内测量误差); 电机为 80 BL 型无刷电机, 额定转速为 1500 r/min , 额定扭矩为 3.5 Nm ; 扭矩传感器为 JNNT-T1 半法兰静态扭矩传感器, 量程为 $0 \sim$

$5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 灵敏度为 $1.0 \sim 2.0 \pm 0.1 \text{ mV/V}$, 综合精度为 0.1% (全范围内测量误差), 滞后误差为 $\pm 0.05\%$ (全范围内测量误差)。

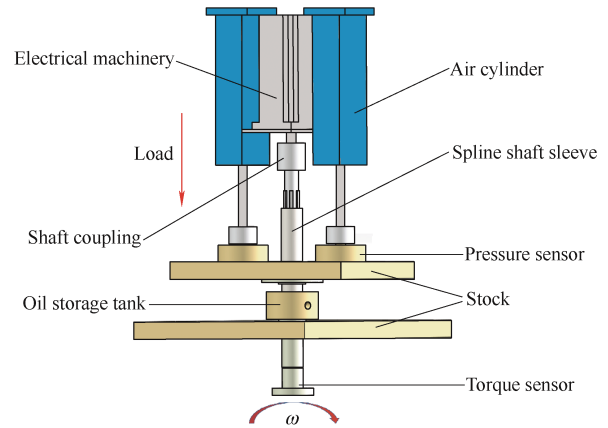


图 7 摩擦磨损试验台

Fig. 7 Measurement of specimen

如表 2 所示, 试验在负载为 40 、 60 、 80 和 100 N , 转速为 350 、 400 、 450 、 500 、 550 和 600 r/min 的情况下进行。所有试验在每个负载速度下持续 15 min , 试验在 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下进行。试验所用润滑油为 SLV5W-30 型号全合成润滑油, 具有良好的耐磨性和抗氧化性, 高速高温下可以很好的控制沉积物和泡沫的形成。润滑油性能如表 3 所示。

表 2 试验测试条件

Table 2 Experimental test conditions

Physical quantity	Value of number
Load / N	40, 60, 80, 100
Rotational speed / (r/min)	350, 400, 450, 500, 550, 600
Temperature / $^{\circ}\text{C}$	25
Lubricating oil	SLV5W-30

表 3 润滑油的性能

Table 3 Lubricating oil property

Designation	Density / (g/cm ³)	Flashpoint / $^{\circ}\text{C}$	Viscosity of 100 $^{\circ}\text{C}$ / (mm ² /s)
SLV5W-30	0.91	240	11.6

3 结果和讨论

为了对比不同织构类型对摩擦润滑减磨的影响, 本文分别对不同织构形式、不同转速、不同负载和不同配合方式下的摩擦因数进行分析。

3.1 织构类型

选取如图 1 所示凹坑型均布织构和斜槽式均布织构的试件与表面无织构的同尺寸试件, 在负载为 80 N , 转速分别为 400 、 500 和 600 r/min 工作条件下进行对比, 如图 8 所示: 织构化表面的摩擦因数整体低于非织构化表面, 摩擦因数最大减小了

40.2%，最低也减小了 27.8%。这是由于凹坑型结构产生的瞬态涡流会对增大油膜内局部的涡流强度，形成类似滚珠形式的滚动摩擦，减小了油膜内沿流动方向的剪切力；而斜槽型结构由于其独特的结构和偏转角度可以借助沟槽在润滑油膜内产生更大的动压效应，并能够将高压油迅速与低压区域进行沟通，使摩擦副呈现更加良好的稳定性。

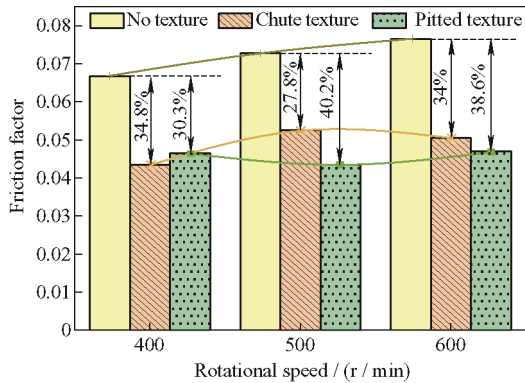


图 8 不同类型结构摩擦因数对比图

Fig.8 Comparison of friction factor of different textures

进一步分析不同载荷对斜槽型结构的影响，如图 9 所示，在相同转速下，斜槽型结构表面的摩擦因数随着载荷的增大而减小^[1]，在 100 N 时达到同转速下其他载荷的最小值。当载荷较小时(40 N)，随着转速的上升，摩擦因数呈现逐渐上涨的规律^[26]；随着载荷的进一步增大(60~80 N)，摩擦因数随着速度的上升呈现先减后增的规律，并分别在 450、500 r/min 达到最小值；当载荷较大时(100 N)，摩擦因数随转速的变化趋于平缓。

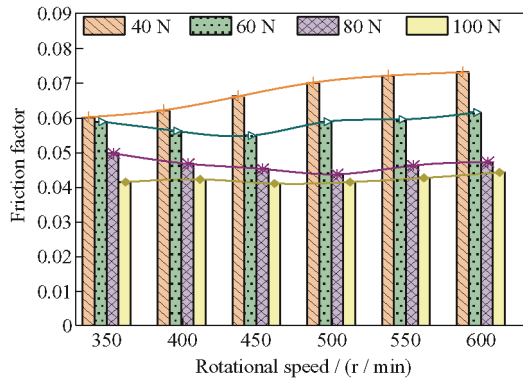


图 9 斜槽型结构摩擦因数

Fig. 9 Chute texture friction factor

对比分析不同载荷对凹坑型结构的影响，如图 10 所示，在相同转速下，凹坑型结构的摩擦因数随着载荷的增大而呈现出先减后增的规律，在 80 N 载荷下达到最小值；而在相同载荷下，60、80 和 100 N 时摩擦因数随着转速的增大呈现先增大后减小的规律，并在 500 r/min 时达到最大值，在

350 r/min 时摩擦因数最小。

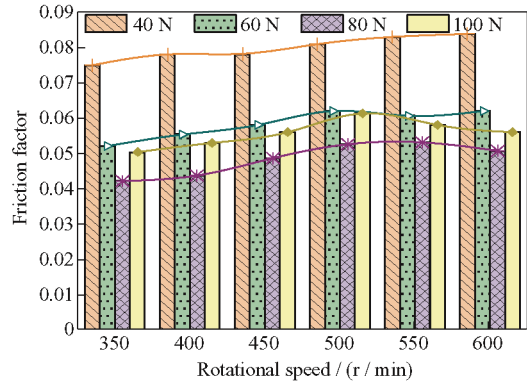
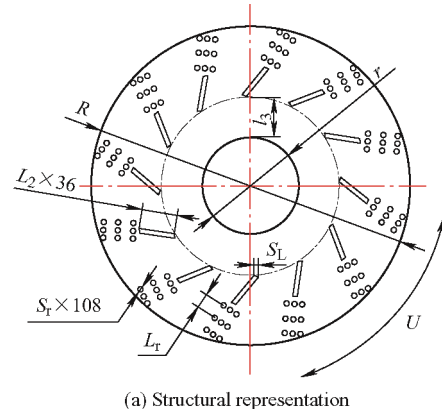


图 10 凹坑型结构摩擦因数

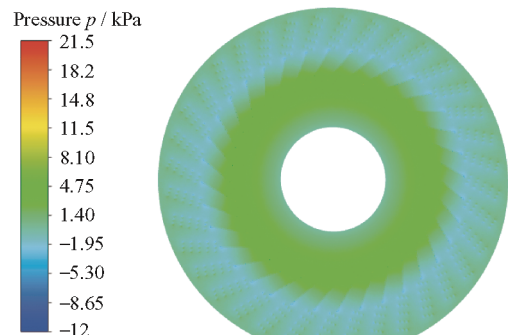
Fig. 10 Friction factor of pitted texture

3.2 坑-槽复合型结构

通过以上分析，为了验证涡流减阻和动压效应对摩擦副润滑减摩的作用，设计提出一种坑-槽复合型结构，如图 11a 所示，在试件外侧布置三圈 $\phi 400 \mu\text{m}$ 的凹坑型结构以获得更好的稳定性，在试件内侧布置 32 个倾斜角度为 30° 的斜槽型结构以提高试件内部的支撑压力，槽宽 S_1 不变，槽长 L_2 为 L_1 的一半，结构与内环间距 l_3 与 l_2 相等。



(a) Structural representation



(b) Pressure profile

图 11 复合型微结构

Fig. 11 Compound microtexture

通过计算此时油膜内压力分布可知，复合型结构条件下试件表面压力分布呈现最外圈和内圈高

压, 中间部分区域低压的分布状态, 虽然弥补了斜槽型织构最外侧动压较低的不足, 且油膜高压区的动压高于凹坑型织构, 但整体的动压却要小于斜槽型织构。这是由于凹坑型织构会在织构底部形成涡流, 而斜槽型织构内部流体呈现螺旋状形式向试件内圈汇集, 不同的结构形式以及流体流动方式的结合, 产生了如图所示的压力分布。为了进一步明确此复合型织构润滑减摩的效果, 本文试验测试了该复合织构下的摩擦因数。

如图 12 所示, 复合型织构相同转速下摩擦因数随转速的变化与凹坑型织构相似, 均呈现先减后增的规律, 并同样的在 80 N 载荷下达到最小值; 而在相同载荷时, 复合型织构摩擦因数随转速变化而呈现先增后减的趋势, 与凹坑型织构均在 500 r/min 时达到最大值。

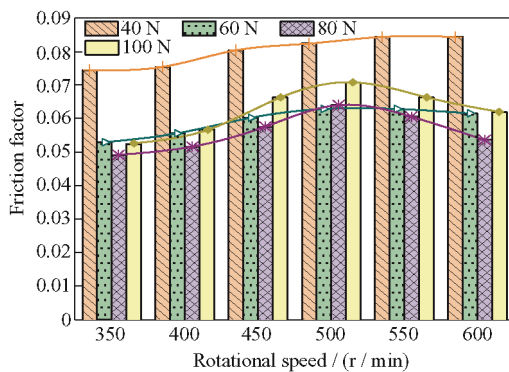


图 12 复合型织构摩擦因数

Fig. 12 Friction factor of compound texture

综合对比加工不同织构形式前后摩擦因数的变化, 如图 13 所示, 在最优载荷下, 除了斜槽型织构, 凹坑型织构和复合型织构在低转速时呈现出更好的减摩效果, 复合型织构摩擦因数在转速的上升过程中呈现出较大的起伏, 但整体润滑减摩效果依然优于无织构表面; 即凹坑型织构对降低摩擦因数的能力略低于斜槽型织构, 优于复合型织构。

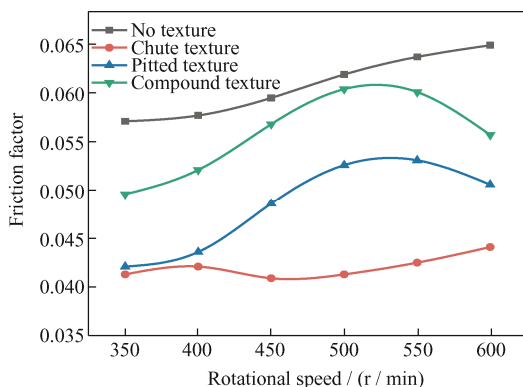


图 13 不同织构类型最优载荷下的摩擦因数

Fig. 13 Friction factor under optimal load of different texture types

结合图 11 复合型织构的动压分布来说, 复合型织构虽然优化了斜槽型织构动压分布不均匀可能导致不稳定的问题, 但摩擦因数较大, 并未达到预期的效果, 但对试件表面的润滑减摩性能依然有很大的提升。这是由于凹坑型织构对润滑油的导通性没有斜槽型织构的强, 在试件的转动过程中, 斜槽型织构使得润滑油可以更快的通过织构, 流体的高速流动会在斜槽型织构末端形成更大的流体动压, 而复合型织构由于外侧凹坑型织构的影响, 润滑油在经过凹坑型织构进入槽型织构时初始速度相对于纯槽型织构的较低, 且可以从图 11 的压力分布图中看出, 在凹坑型织构和槽型织构的接触部分产生了空压区域, 这是由于凹坑型织构的分布对润滑油产生了分流作用, 导致在试件的转动过程中部分润滑油从槽型织构入口两侧通过, 无法产生动压效果, 因此出现了图中的空压区。

3.3 槽-槽耦合型织构

通过上述分析发现, 增加合适的织构形式对润滑油膜内靠近织构一侧的流场, 无论从流线形态还是压力分布方面都有增益性, 因此, 在单边斜槽型织构的基础上对槽-槽双侧织构对摩条件下的润滑效果进行试验分析, 即上试件和下试件采用相同参数的槽型织构进行对摩。以 60 N 为界限, 分别对比单槽型织构和耦合槽型织构在低承载即 40、60 N 承载下不同转速的摩擦因数以及在高承载即 80、100 N 承载下不同转速时的摩擦因数, 观察耦合槽与单槽各自对摩擦副间润滑减摩效果的影响。

如图 14 所示, 通过对比单槽型织构和耦合槽型织构在 40 N 和 60 N 承载时的摩擦因数发现: 耦合槽型织构在低承载时对摩擦副间摩擦因数的减小有着更优的效果, 最大时比单槽型织构减小了 10.2%; 40 N 载荷的情况下, 槽型耦合织构在 350~500 r/min 的范围内摩擦因数随速度的增大变化较为平缓, 即低转速时转速对摩擦因数的影响较小, 而单槽型织构随速度的提升, 摩擦因数变化量较大; 60 N 载荷的情况下, 耦合槽型织构与单槽型织构的摩擦因数变化均呈现先减小后增大的规律, 在 450 r/min 时达到最小值。值得一提的是, 耦合槽型织构的摩擦因数在 350~600 r/min 的范围内, 初始值与最终值的变化量很小, 即相比单槽型织构来说, 耦合槽型织构在低承载时摩擦因数随转速的变化更小, 润滑减摩效果更好。这是因为低承载时槽-槽耦合织构会提供相比于单槽织构更强的流体动压, 达到更好的减摩效果。

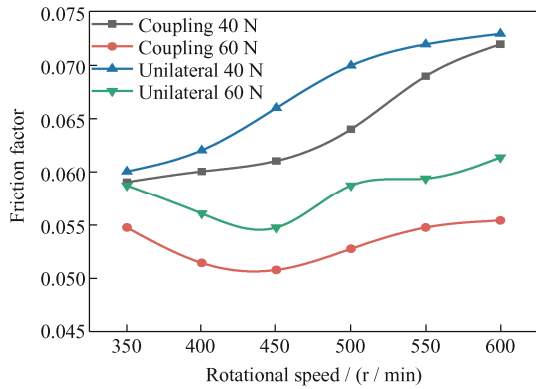


图 14 低承载下单槽和耦合槽摩擦因数对比

Fig. 14 Comparison of friction factor between low load single slot and coupled slot

如图 15 所示,通过对比单槽型织构和耦合槽织构在 80、100 N 承载下的摩擦因数发现:耦合槽织构在高承载时的摩擦因数比单槽型织构的高,单槽型织构具有更优的润滑减摩效果;80、100 N 的载荷下,耦合槽织构的摩擦因数随着转速提升均呈现出先减小后增大的趋势,在 500 r/min 时达到最优值。

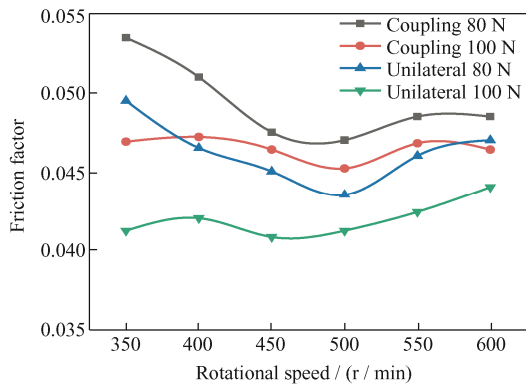


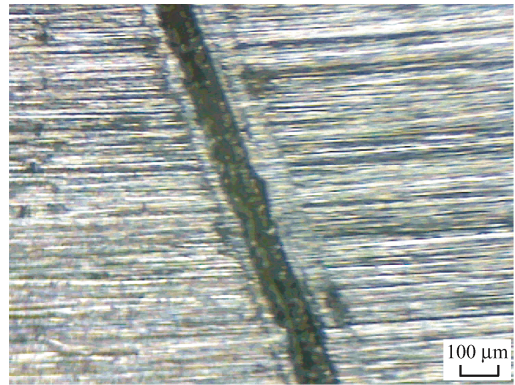
图 15 高承载下单槽和耦合槽摩擦因数对比

Fig. 15 Comparison of friction factor between single groove and coupled groove with high load

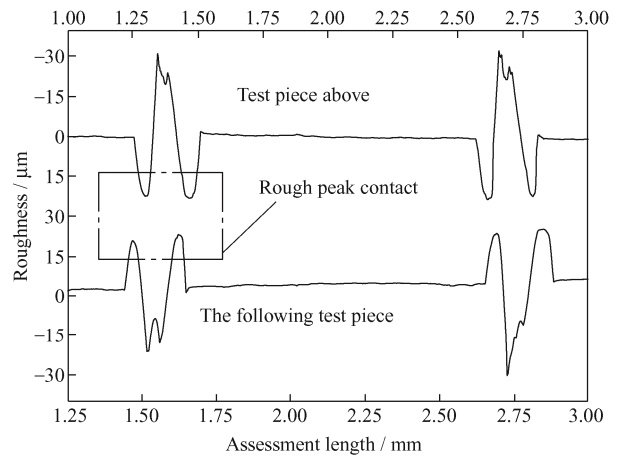
如图 16a 所示,通过显微镜观察磨合后的斜槽型织构,可看到在对试件进行织构激光加工后,会在织构两侧出现烧蚀堆积现象,这也可以解释为什么载荷加大后槽-槽耦合织构的摩擦因数会高于单槽型织构,这是因为随着载荷的加大,摩擦副间油膜会被挤压,如图 16b 所示,槽-槽耦合织构上试件和下试件由于烧蚀堆积产生的粗糙峰相互接触,润滑状态由流体润滑变为混合润滑,增大了摩擦副间的摩擦因数。

通过以上分析可以得出耦合槽织构在低载荷下对摩擦副间摩擦因数的减小有着比单槽型织构更加显著的效果,即在低承载时耦合槽织构的摩擦因数

更低,转速对摩擦因数的影响更小,有着更优秀的润滑减摩效果。



(a) Microscopically viewed chute texture



(b) Coupled chute texture roughness

图 16 斜槽织构的烧蚀堆积

Fig. 16 Ablative accumulation of chute texture

4 结论

分别研究凹坑型织构、斜槽型织构和复合型织构的内部流场特征和摩擦系数的测试结果,并进一步对比耦合槽织构的摩擦因数,探索不同织构所适宜的最佳工况,得到如下结论:

(1) 明确了凹坑型织构和斜槽型织构在相同工况条件下其摩擦副润滑减摩的作用机制:凹坑型织构主要通过涡流减阻的方式达到润滑减摩的效果,而斜槽型织构主要通过动压效应提升油膜承载力从而减小油膜内的剪切摩擦。

(2) 确定了不同类型织构的最优工况:凹坑型织构与复合型织构在高承载低转速时减摩效果较优;斜槽型织构在高承载下可以适用于更宽的转速变化范围。在低载荷情况下,双侧斜槽耦合织构同时作用比单侧斜槽织构可以获得更大的承载能力和更好的润滑效果,最大时摩擦因数减少了 10.2%,适用于低承载低转速的工况下。

参 考 文 献

- [1] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
WEN Shizhu. Principles of tribology[M]. BeiJing : Tsinghua University Press, 2018. (in Chinese)
- [2] ZHENG K, POLITIS D J, LIN J, et al. A study on the buckling behaviour of aluminium alloy sheet in deep drawing with macro-textured blankholder[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 110: 138-150.
- [3] GROPPER D, WANG L, HARVEY T J. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings[J]. Tribology International, 2016, 94: 509-529.
- [4] RICHARDSON D E. Review of power cylinder friction for diesel engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2000, 122(4): 506-519.
- [5] MUFTI R, PRIEST M. Technique of simultaneous synchronized evaluation of the tribological components of an engine under realistic conditions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2009, 223(D10): 1311-1325.
- [6] YIN Bifeng, QIAN Yanqiang, LU Zhentao, et al. Theoretical and experimental study on lubrication performance of composite textures on cylinder liners [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(9): 74-80, 135.
- [7] 尹必峰, 钱晏强, 李晓东, 等. 柴油机缸套表面微沟槽织构润滑性能仿真分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(5): 644-650.
YIN Bifeng, QIAN Yanqiang, LI Xiaodong, et al. Simulation and analysis on lubrication performance of surface micro-groove texturing on cylinder liner in diesel engine[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(5): 644-650. (in Chinese)
- [8] NOUTARY M P, BIBOULET N, LUBRECHT A A. A robust piston ring lubrication solver: Influence of liner groove shape, depth and density[J]. Tribology International, 2016, 100: 35-40.
- [9] WANG Qinghui, ZHENG Xu, PAN Minqiang, et al. Microtopographic modeling of three-dimension surfaces and simulation of flow characteristics of fluid in microchannels[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2011, 39(6): 1-6.
- [10] HAMILTON D B, WALOWIT J A, ALLEN C M. A theory of lubrication by micro-irregularities[J]. Journal of Basic Engineering, 1966, 88(1) : 177-185.
- [11] CHEN Y, ZHANG J, XU B, et al. Multi-objective optimization of micron-scale surface textures for the cylinder/valve plate interface in axial piston pumps[J]. Tribology International, 2019, 138: 316-329.
- [12] ZHANG Yali, ZHANG Xiaogang, et al. Effects of surface texturing on the tribological behavior of piston rings under lubricated conditions[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2016, 68(2): 158-169
- [13] VLĂDESCU S C, CINIERO A, TUFIL K, et al. Looking into a laser textured piston ring-liner contact[J]. Tribology International, 2017, 115: 140-153.
- [14] SIRIPURAM R B, STEPHENS L S. Effect of deterministic asperity geometry on hydrodynamic lubrication[J]. J Trib, 2004, 126(3): 527-534.
- [15] NAKANO M, KORENAGA A, KORENAGA A, et al. Applying micro-texture to cast iron surfaces to reduce the friction coefficient under lubricated conditions[J]. Tribology Letters, 2007, 28(2) : 131-137.
- [16] YU H, WANG X, FEI Z. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces[J]. Tribology Letters, 2010, 37(2): 123-130.
- [17] QIU M, DELIC A, RAEYMAEKERS B. The effect of texture shape on the load-carrying capacity of gas-lubricated parallel slider bearings[J]. Tribology Letters, 2012, 48(3): 315-327.
- [18] SHEN C, KHONSARI M M. Effect of dimple's internal structure on hydrodynamic lubrication[J]. Tribology Letters, 2013, 52(3): 415-430.
- [19] GRABON W, KOSZELA W, PAWLUS P, et al. Improving tribological behaviour of piston ring-cylinder liner frictional pair by liner surface texturing[J]. Tribology International, 2013, 61: 102-108.
- [20] 朱世新, 叶晓明, 姜羽泽, 等. 表面织构活塞环与 CuO 纳米润滑油协同润滑特性数值研究[J]. 车用发动机, 2019(3): 11-18.
ZHU Shixin, YE Xiaoming, JIANG Yuze, et al. Numerical study on synergistic lubrication characteristics of textured ring and CuO nano-lubricant[J]. Vehicle Engine, 2019(3): 11-18. (in Chinese)
- [21] 麻凯, 袁成清, 郭智威, 等. 双螺纹凹槽织构对缸套-活塞环摩擦磨损性能的影响[J]. 内燃机工程, 2019, 40(2): 59-66.
MA Kai, YUAN Chengqing, GUO Zhiwei, et al. Effect of double-thread groove texture on the friction and wear performance of cylinder liner and piston rings[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2019, 40(2): 59-66. (in Chinese)
- [22] 戴庆文, 李思远, 王秀英, 等. 不同密封副材料的表面织构设计及其润滑和密封特性[J]. 中国表面工程, 2019, 32(3): 21-29.

- DAI Qingwen, LI Siyuan, WANG Xiuying, et al. Surface texturing of different sealing materials and their lubrication and sealing performances[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3): 21-29. (in Chinese)
- [23] 付景国, 徐长旗, 朱新河, 等. 表面微织构复合固体润滑材料的摩擦学性能研究进展[J]. 中国表面工程, 2020, 33(2): 15-28.
- FU Jingguo, XU Changqi, ZHU Xinhe, et al. Research progress of surface micro-texture combined with solid lubricants on tribological properties[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(2): 15-28.
- [24] HIRAYAMA T. A Theoretical analysis considering cavitation occurrence in oil-lubricated spiral-grooved journal bearings with experimental verification[J]. Journal of Tribology Transactions of the ASME, 2004, 126(3): 140-144.
- [25] DU Y, SYMEONIDIS V, KARNIADAKIS G E. Drag reduction in wall-bounded turbulence via a transverse travelling wave[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 457: 1-34.
- [26] 尹必峰. 内燃机关键摩擦副表面微织构润滑与摩擦机理及应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- YIN Bifeng. Lubrication and friction mechanism and application research of laser surface texturing technology on the key friction pairs of internal combustion engine[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)
-
- 作者简介: 赵章行, 男, 1997 年出生, 硕士。主要研究方向为摩擦学与表面工程。
E-mail: 453883212@qq.com
- 龙威(通信作者), 女, 1981 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为摩擦学与表面工程、气体润滑技术。
E-mail: daifor@163.com