

DOI: 10.11973/jxgccl202112007

润滑条件与缸套材料对活塞环-缸套摩擦磨损特性的影响

瞿磊¹, 蒋安², 王忠³, 谢纬安¹

(1. 南通职业大学汽车与交通工程学院, 南通 226007; 2. 上汽大通汽车有限公司, 上海 200438;

3. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

摘要: 在润滑油中未添加和添加质量分数 0.1% MoS₂ 润滑条件下, 对 YH31 合金铸铁活塞环和不同材料(高硼铜铸铁和铬钼铝铸铁)缸套进行摩擦磨损试验, 研究了润滑条件和缸套材料对摩擦因数、体积磨损量和磨损表面形貌的影响, 分析了磨损机制。结果表明: MoS₂ 的添加可以缩短活塞环与高硼铜铸铁缸套的磨合时间, 延长稳定磨损时间, 降低摩擦因数, 减小体积磨损量; 摩擦副表面磨痕较未添加 MoS₂ 润滑条件下细而浅, 且未出现裂纹。在未添加 MoS₂ 润滑条件下, 活塞环与铬钼铝铸铁缸套对磨比与高硼铜铸铁缸套对磨更早进入稳定磨损阶段, 但稳定磨损持续时间较短, 平均摩擦因数有所增大, 体积磨损量大幅增加; 活塞环的磨损机制均为抛光磨损, 高硼铜铸铁缸套和铬钼铝铸铁缸套的磨损机制分别为磨粒磨损+疲劳磨损和磨粒磨损。

关键词: 活塞环; 缸套; 摩擦副; 磨损; 表面形貌

中图分类号: TK421

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2021)12-0036-06

Influence of Lubrication Condition and Cylinder Liner Material on Friction and Wear Characteristics of Piston Ring-Cylinder Liner

QU Lei¹, JIANG An², WANG Zhong³, XIE Weian¹

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Nantong Vocational University, Nantong 226007, China; 2. SAIC MAXUS Co., Ltd., Shanghai 200438, China; 3. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Friction and wear tests were conducted on YH31 alloy cast iron piston ring and cylinder liner of different materials (high boron copper cast iron and CrMoAl cast iron) under lubrication conditions of lubricating oil without and adding 0.1wt% MoS₂. Influence of the lubrication condition and cylinder liner material on the friction coefficient, volumetric wear loss and wear surface morphology was studied, and the wear mechanism was analyzed. The results show that adding MoS₂ shortened the running in period of the piston ring and high boron copper cast iron cylinder liner, prolonged the stable wear period, decreased the friction coefficient and reduced the volumetric wear loss; the wear marks on the rubbing pair surfaces were finer and more shallow than those under the lubrication condition without MoS₂, and no cracks were found. Under the lubrication condition without MoS₂, the piston ring matched with CrMoAl cast iron cylinder liner entered the stable wear stage earlier than that matched high boron copper cast iron cylinder liner, but the stable wear stage lasted shortly, the average friction coefficient increased, and the volumetric wear loss increased greatly. The wear mechanism of the piston ring was polishing wear; the high boron copper cast iron and CrMoAl cast iron cylinder liner had abrasive wear + fatigue wear and abrasive wear mechanisms, respectively.

Key words: piston ring; cylinder liner; rubbing pair; wear; surface morphology

收稿日期: 2020-11-25; 修订日期: 2021-11-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51776089); 江苏高校“青蓝工程”资助项目; 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(21KJD470002); 南通市市级科技计划项目(JC2021166)

作者简介: 瞿磊(1987—), 男, 江苏南通人, 讲师, 博士

0 引言

活塞环-缸套作为柴油机最重要的运动副之一, 在相对运动过程中会发生摩擦磨损。研究^[1-4]表明, 因活塞环与缸套磨损而导致的整机失效约占整机摩

擦故障的40%,活塞环-缸套摩擦功耗约占柴油机摩擦总功耗的45%~65%;活塞环与缸套之间的摩擦磨损对柴油机的动力性、经济性、可靠性和使用寿命有着较大影响。随着柴油机向高升功率、低油耗、低排放方向发展,活塞环-缸套运动副的工作条件更为苛刻,摩擦功耗进一步增大,活塞环与缸套之间的磨损变得更加严重^[5-7]。如何改善活塞环和缸套之间的磨损成为研究的重点。BUDZYŃSKI等^[8]采用离子氮化工艺对活塞环进行处理,氮化后活塞环的平均摩擦因数降低了64%,磨损量减少了36%。甄洪梅等^[9]研究了表面处理对活塞环-缸套匹配特性的影响,结果表明镀铬缸套对润滑条件比较敏感,在润滑不良时易出现拉缸现象,氮化缸套匹配氮化铬活塞环的摩擦磨损性能优良。江仁埔等^[10]研究发现,加工表面织构(螺纹条数为1、螺距为40 mm、槽宽为3 mm)缸套的磨损量比未加工表面织构缸套减少了37.4%,匹配活塞环磨损量减少了约49%。KOVALCHENKO等^[11]研究了活塞环表面织构对摩擦磨损特性的影响,发现表面织构可以扩大流体润滑区域,提升摩擦副的摩擦学性能。

综上所述,通过表面处理工艺和结构设计改善活塞环-缸套的摩擦磨损性能已有较多的研究。此外,材料属性及润滑条件对活塞环-缸套的摩擦磨损

也会产生一定影响,而相关研究较少。为此,作者以某柴油机用活塞环-缸套为研究对象,研究了润滑条件和缸套材料的改变对活塞环-缸套摩擦副摩擦性能的影响,以期优化活塞环-缸套摩擦副的设计、降低摩擦损失提供一定依据。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验用活塞环为YH31合金铸铁锥面环,由仪征亚新科双环活塞环有限公司提供,外径为114 mm,锥度为1°,化学成分如表1所示。其中,未经离子氮化处理的活塞环的表面硬度在97~108 HRB,经离子氮化处理的活塞环的表面硬度在815~903 HV。试验过程中采用的缸套均由扬州五亭桥缸套有限公司提供,一种为高硼铜铸铁缸套,另一种为铬钼铝铸铁缸套。2种缸套的外径均为106 mm,内径为96 mm,表面粗糙度不大于1.9 μm 。高硼铜铸铁缸套的表面硬度要求在450~460 HV,铬钼铝铸铁缸套要求在320~340 HV。润滑剂分别为CH-4润滑油和添加质量分数为0.1% MoS₂的CH-4润滑油。CH-4润滑油为市售润滑油;MoS₂固体润滑剂由安徽科润纳米科技有限公司提供,组分如表2所示,平均粒径为1.5 μm ,弹性模量为 3.2×10^5 MPa,密度为4.8 g·cm⁻³。

表1 YH31合金铸铁活塞环的化学成分

Table 1 Chemical composition of YH31 alloy cast iron piston ring										%
元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	W	B	V	Ti
质量分数	3.60~3.90	2.40~2.90	0.60~0.90	0.40~0.50	≤0.04	≤0.03	0.40~0.60	0.03~0.06	0.20~0.30	0.10~0.20

表2 MoS₂固体润滑剂的组成

Table 2 Composition of MoS ₂ solid lubricant						%
组分	MoS ₂	总不溶物	Fe	MoO ₃	H ₂ O	SiO ₂
质量分数	≥98.0	≤0.65	0.25	0.25	0.30	0.20

1.2 试验方法

在室温下,采用圆盘式摩擦磨损试验机进行活塞环-缸套的摩擦磨损试验,缸套固定于圆盘中央,用金属杆将活塞环固定并紧贴在缸套上方。在金属杆一端施加载荷200 N,通过电机带动圆盘转动使活塞环与缸套发生相对运动,模拟柴油机活塞环-缸套实际工作时的运行状态。摩擦磨损试验时,圆盘转速为200 r·min⁻¹,端面跳动不超过0.05 mm,试验时间为60 min。润滑形式为全润滑,应用离心力原理将润滑剂均匀布满活塞环与缸套的接触表面。

在摩擦磨损过程中,利用压力传感器采集摩擦力信号,摩擦力与正压力的比值即为摩擦因数。在研究未添加和添加MoS₂润滑条件对活塞环-缸套摩擦磨损特性的影响时,所用合金铸铁活塞环的表面未经离子氮化处理,并采用高硼铜铸铁缸套与之配合,两种润滑条件下各测试4组;在研究高硼铜铸铁及铬钼铝铸铁两种缸套材料对摩擦磨损特性影响时,所用合金铸铁活塞环的表面经离子氮化处理,两种缸套材料条件下各测试2组,且润滑条件为未添加MoS₂。

摩擦磨损试验结束后,将活塞环和缸套置于乙醇中超声波清洗15 min,采用CV-3100型轮廓仪测定摩擦表面沿法向方向的尺寸变化,计算得到活塞环及缸套的体积磨损量。采用JSM-7001F型热场发射扫描电子显微镜(SEM)观察活塞环和缸套磨损表面形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 摩擦因数

2.1.1 润滑条件对摩擦因数的影响

根据摩擦因数波动幅值和频率,可以将活塞环和缸套的摩擦磨损过程分为磨合、稳定磨损和剧烈磨损3个阶段。

由图1可以看出:润滑油中未添加 MoS_2 时,在磨合阶段,表面未氮化合金铸铁活塞环-高硼铜铸铁缸套摩擦副的摩擦因数变化显著,最大值达到0.0715,这主要是由于未经磨损的活塞环和缸套具有一定的表面粗糙度,活塞环与缸套接触表面的凸起处发生微观金属接触,且摩擦表面未能建立稳定的油膜,摩擦力的变化幅值较大,因此摩擦因数波动较大;进入稳定磨损阶段后摩擦因数幅值逐渐稳定,主要集中在0.06~0.07区间,这是因为经过磨合阶段,摩擦副表面微凸体已被磨平,且该阶段的摩擦副表面已形成较为稳定的油膜,处于流体动力润滑状态,磨损较为稳定;当试验时间达到30 min时,摩擦副出现剧烈磨损现象,摩擦因数幅值有所增加,这主

要是由于摩擦副在长期的交变应力作用下发生疲劳磨损,油膜遭到破坏,磨损加剧。润滑油中添加 MoS_2 后,摩擦副磨合阶段对应的时间明显缩短,由未添加 MoS_2 的8 min缩短至5 min左右;稳定磨损阶段对应的时间明显延长,摩擦因数变化较小,主要集中在0.028~0.037区间,且摩擦因数远小于未添加 MoS_2 的摩擦因数。

计算得到润滑油中未添加 MoS_2 和添加0.1% MoS_2 时,合金铸铁活塞环-高硼铜铸铁缸套摩擦副的平均摩擦因数分别为0.0565,0.0228。可见在润滑油中添加 MoS_2 固体润滑剂能够有效降低活塞环-缸套摩擦副的摩擦因数。 MoS_2 是由S—Mo—S原子共价键结合形成的层状结构,具有较高的表面能与吸附力。在活塞与缸套摩擦过程中, MoS_2 结构中的滑移面会依附于二者表面,使得原本金属之间的摩擦转化为 MoS_2 层状结构之间剪切面的滑移^[12];此外, MoS_2 为球状微纳米颗粒,在摩擦过程中能起到类似于“微轴承”作用,形成滚动摩擦^[13]。因此, MoS_2 的添加能减小摩擦副的摩擦力,从而降低摩擦因数。

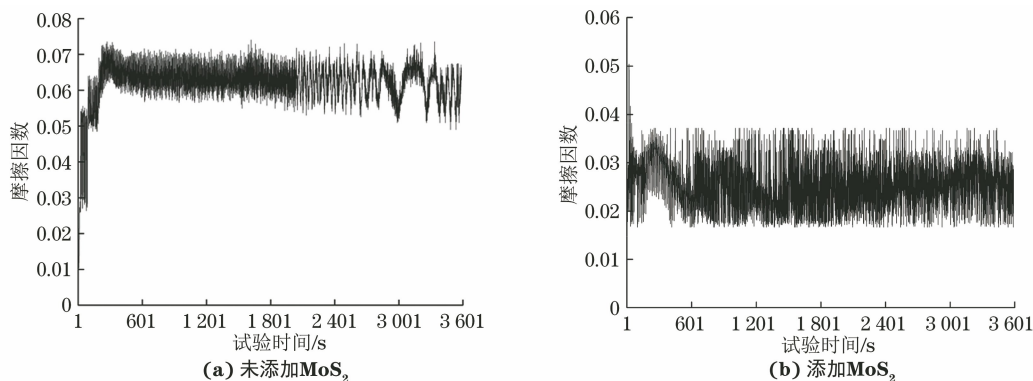


图1 不同润滑条件下未氮化合金铸铁活塞环-高硼铜铸铁缸套摩擦副的摩擦因数曲线

Fig.1 Friction coefficient curves of rubbing pair of unnitrided alloy cast iron piston ring-high boron copper cast iron cylinder liner under different lubrication conditions: (a) without MoS_2 and (b) adding MoS_2

2.1.2 缸套材料对摩擦因数的影响

在润滑油中未添加 MoS_2 的润滑条件下,经表面氮化处理的YH31合金铸铁活塞环和不同材料(高硼铜铸铁和铬钼铝铸铁)缸套摩擦副的摩擦因数变化曲线如图2所示。由图2(a)可以看出:活塞环配合高硼铜铸铁缸套,磨合阶段共持续了约15 min,该阶段摩擦因数变化剧烈,最小为0.024,最大为0.066;磨合15 min后进入稳定磨损阶段,摩擦因数主要集中在0.035~0.047区间,波动较小,且稳定磨损阶段一直持续到试验结束。由图2(b)可以看出,活塞环配合铬钼铝铸铁缸套,磨合阶段大约

持续了10 min,该阶段摩擦因数最大为0.091;稳定磨损阶段持续了20 min,该阶段摩擦因数变化较小;摩擦磨损30 min后摩擦因数变化剧烈,进入剧烈磨损阶段。与高硼铜铸铁缸套相比,采用铬钼铝铸铁缸套时的稳定磨损开始时间较早,且稳定磨损阶段持续时间较短。计算得到活塞环配合高硼铜铸铁缸套和铬钼铝铸铁缸套时的平均摩擦因数分别为0.0400,0.0413。在铸铁材料中添加少量铬、钼、铝等元素,在一定程度上提高了缸套的耐磨性能、耐热性和强度,但也使得缸套硬度有所降低^[14],在摩擦过程中会产生较多磨屑;随着摩擦磨损的进行,磨屑

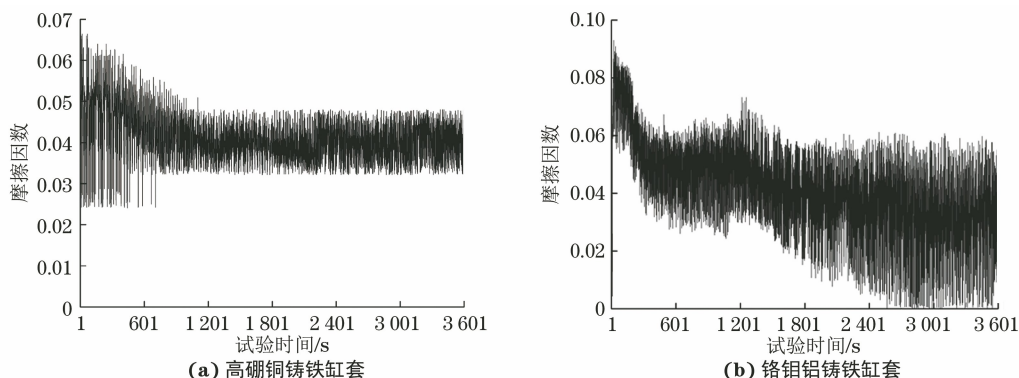


图2 未添加 MoS_2 润滑条件下氮化合金铸铁活塞环-不同材料缸套摩擦副的摩擦因数变化曲线

Fig. 2 Friction coefficient curves of rubbing pair of nitrided alloy cast iron piston ring-different-material cylinder liner under lubrication condition without MoS_2 : (a) high boron copper cast iron cylinder liner and (b) CrMoAl cast iron cylinder liner

数量逐渐增多,导致在后期摩擦因数变化剧烈,平均摩擦因数稍有增大。

2.2 体积磨损量

计算得到未添加 MoS_2 润滑条件下,表面未氮化合金铸铁活塞环和高硼铜铸铁缸套的平均体积磨损量分别为 7.815×10^{-11} , $5.820 \times 10^{-10} \text{ mm}^3$; 添加 $0.1\% \text{ MoS}_2$ 润滑条件下,活塞环和缸套的平均体积磨损量分别为 4.185×10^{-11} , $3.853 \times 10^{-10} \text{ mm}^3$ 。在润滑油中添加 MoS_2 后,活塞环与缸套的体积磨损量均减少,且活塞环体积磨损量减少的程度高于缸套。这是因为 MoS_2 固体润滑剂的运动轨迹平行于活塞环和缸套的运动轨迹, MoS_2 颗粒与两表面的接触应力较低,且 MoS_2 颗粒粒径小于润滑油在摩擦副表面形成的油膜厚度,这有助于减少摩擦副表面大颗粒磨粒的产生^[15],从而降低磨粒磨损程度。

在未添加 MoS_2 的润滑条件下对磨后,表面氮化合金铸铁活塞环和高硼铜铸铁缸套的平均体积磨损量分别为 7.465×10^{-11} , $7.130 \times 10^{-10} \text{ mm}^3$, 活塞

环和铬钼铝铸铁缸套的平均体积磨损量分别为 2.230×10^{-10} , $3.535 \times 10^{-9} \text{ mm}^3$ 。可见合金铸铁活塞环和铬钼铝铸铁缸套对磨后磨损较为严重。这主要是由于铬钼铝铸铁的硬度较小,在摩擦过程中其表面易发生崩塌,产生较多磨粒而导致磨粒磨损;同时磨粒聚集在摩擦副表面,导致油膜不完整而使得摩擦副表面易被擦伤,体积磨损量增加。

2.3 磨损形貌

2.3.1 润滑条件对磨损形貌的影响

由图3可以看出:未添加 MoS_2 润滑条件下摩擦磨损后,合金铸铁活塞环和高硼铜铸铁缸套表面因磨削而出现较深的磨痕,并且附着大量黏着物,同时表面出现裂纹;在润滑油中添加 MoS_2 后,合金铸铁活塞环和高硼铜铸铁缸套表面磨痕清晰且较为规律,没有附着黏着物,磨削产生的磨痕较未添加 MoS_2 条件下更细更浅,未出现裂纹等现象。对比可知,润滑油中添加的 MoS_2 在整个磨损过程中发挥了抗磨效果,能够明显改善活塞环-缸套摩擦副表面的磨损行为。这主要是由于在磨损过程中, MoS_2

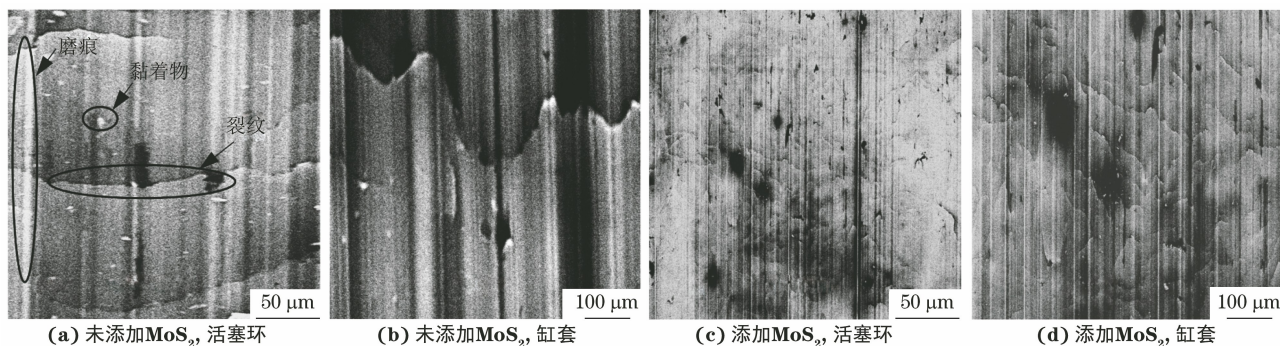


图3 未添加和添加 MoS_2 润滑条件下未氮化合金铸铁活塞环和高硼铜铸铁缸套的表面磨损形貌

Fig. 3 Surface wear morphology of unnitrided alloy cast iron piston ring (a, c) and high boron copper cast iron cylinder liner (b, d) under lubrication conditions without (a-b) and with (c-d) MoS_2

微纳米颗粒能够填充摩擦表面的凹坑与磨痕,对摩擦表面起到一定的修复作用^[16]。

2.3.2 缸套材料对磨损形貌的影响

由图4可以看出:与高硼铜铸铁缸套对磨的表面氮化合金铸铁活塞环表面较为光滑,沿滑动方向出现轻微磨痕,局部出现材料剥落的现象,该活塞环的磨损机制主要为抛光磨损;高硼铜铸铁缸套磨损表面除了存在与滑动方向平行且深浅不一的磨痕外,局部还存在轻微划伤、微裂纹及材料剥落的现象,其磨损机制主要为磨粒磨损和疲劳磨损^[9]。由图5可以看出:与铬钼铝铸铁缸套对磨的表面氮化合金铸铁活塞环表面存在与滑动方向平行的深浅不一的磨痕,磨损表面较平整,未出现明显塑性变形和材料剥落现象,主要表现为抛光磨损机制;铬钼铝铸铁缸套磨损表面分布着与滑动方向平行且深浅不一的磨痕,并无明显塑性变形和黏着磨损特征,磨损机制主要为磨粒磨损。

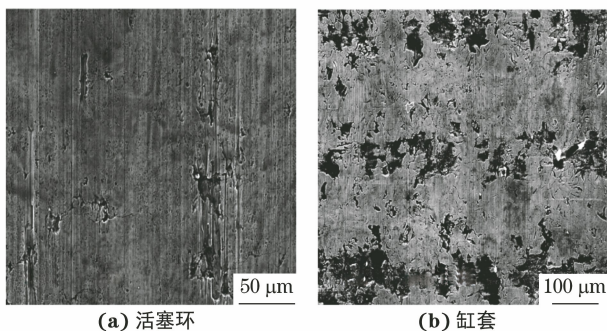


图4 未添加 MoS_2 润滑条件下氮化合金铸铁活塞环和高硼铜铸铁缸套的表面磨损形貌

Fig.4 Surface wear morphology of nitrided alloy cast iron piston ring (a) and high boron copper cast iron cylinder liner (b) under lubrication condition without MoS_2

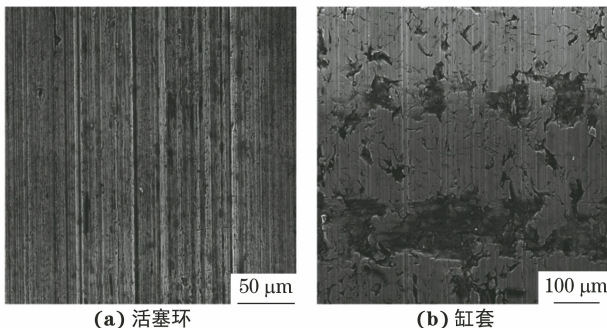


图5 未添加 MoS_2 润滑条件下氮化合金铸铁活塞环和铬钼铝铸铁缸套的表面磨损形貌

Fig.5 Surface wear morphology of nitrided alloy cast iron piston ring (a) and CrMoAl cast iron cylinder liner (b) under lubrication condition without MoS_2

3 结 论

(1) 在润滑油中添加 MoS_2 固体润滑剂,可以缩短表面未氮化合金铸铁活塞环与高硼铜铸铁缸套的磨合时间,延长稳定磨损时间,摩擦副摩擦因数明显降低,体积磨损量减小;摩擦副表面的磨痕清晰且较为规律,没有附着黏着物,磨削产生的磨痕较未添加 MoS_2 条件下更细更浅,未出现裂纹缺陷。

(2) 在未添加 MoS_2 润滑条件下,相比于与高硼铜铸铁缸套对磨,表面氮化合金铸铁活塞环与铬钼铝铸铁缸套对磨时更早进入稳定磨损阶段,但稳定磨损持续时间较短,平均摩擦因数有所增大,体积磨损量大幅增加;表面氮化合金铸铁活塞环的磨损机制均为抛光磨损,与之对磨的高硼铜铸铁缸套和铬钼铝缸套的磨损机制分别为磨粒磨损+疲劳磨损和磨粒磨损。

参考文献:

- [1] KAPSIZ M, DURAT M, FICICI F. Friction and wear studies between cylinder liner and piston ring pair using Taguchi design method[J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(8): 595-603.
- [2] 胡勇, 屈盛官, 李彬, 等. 不同表面织构对柴油机缸套-活塞环摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2013, 38(4): 57-62.
HU Y, QU S G, LI B, et al. Effects of different surface textures on friction and wear performance of diesel cylinder liner-piston ring[J]. Lubrication Engineering, 2013, 38(4): 57-62.
- [3] 何星, 李若亭, 毛杰键, 等. 环境与工况对柴油机缸套-活塞环磨损的影响[J]. 润滑与密封, 2020, 45(1): 106-112.
HE X, LI R T, MAO J J, et al. Influence of environment and working conditions on the wear of diesel engine cylinder liner and piston ring[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(1): 106-112.
- [4] TUNG S C, MCMILLAN M L. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future[J]. Tribology International, 2004, 37(7): 517-536.
- [5] 朱峰, 王增全, 王建平, 等. 合金铸铁缸套与 PVD(CrN) 活塞环配对时缸套磨损机理[J]. 内燃机学报, 2014, 32(5): 474-479.
ZHU F, WANG Z Q, WANG J P, et al. Wear mechanism of alloy cast iron cylinder liner coupled with PVD(CrN) piston ring[J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(5): 474-479.
- [6] 周龙, 白敏丽, 吕继组. 结构参数对活塞环-缸套润滑摩擦性能影响的数值模拟[J]. 内燃机学报, 2012, 30(5): 796-801.
ZHOU L, BAI M L, LÜ J Z. Numerical simulation into influence of structural parameters on lubrication and friction performance of piston ring-liner[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(5): 796-801.

- [7] 唐令,何鹏飞,马国政,等. 缸套-活塞环摩擦副表面性能强化研究进展[J]. 表面技术,2019,48(8):185-198.
TANG L, HE P F, MA G Z, et al. Research progress in surface performance reinforcement of cylinder liner and piston ring friction pair[J]. Surface Technology, 2019, 48(8): 185-198.
- [8] BUDZYŃSKI P, KAMIŃSKI M, PYSZNIAK K. The influence of nitrogen ion implantation on the tribological properties of piston rings made of Hardox and Raex steels[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 148: 012044.
- [9] 甄洪梅,宋吉林,王旭兰,等. 柴油机气缸套-活塞环副匹配特性研究[J]. 车用发动机,2014(3):46-49.
ZHEN H M, SONG J L, WANG X L, et al. Matching characteristics of cylinder liner and piston ring pair for diesel engine[J]. Vehicle Engine, 2014(3): 46-49.
- [10] 江仁埔,郭智威,饶响,等. 表面织构对缸套-活塞环摩擦学性能的影响[J]. 内燃机学报,2018,36(5):471-479.
JIANG R P, GUO Z W, RAO X, et al. Influences of thread grooves surface texturing on tribological properties of cylinder liner-piston ring[J]. Transactions of CSICE, 2018, 36(5): 471-479.
- [11] KOVALCHENKO A, AJAYI O, ERDEMIR A, et al. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact[J]. Tribology International, 2005, 38(3): 219-225.
- [12] 林春元. 二硫化钼的润滑机理[J]. 中国钼业,1993(2):40-46.
LIN C Y. Lubrication mechanism of MoS₂ [J]. China Molybdenum Industry, 1993(2): 40-46.
- [13] ROSENSTVEIG R, GORODNEV A, FEUERSTEIN N, et al. Fullerene-like MoS₂ nanoparticles and their tribological behavior[J]. Tribology Letters, 2009, 36(5): 175.
- [14] HSU C H, SHY Y H, YU Y H, et al. Effect of austempering heat treatment on fracture toughness of copper alloyed gray iron[J]. Materials Chemistry and Physics, 2000, 63(1): 75-81.
- [15] 华希俊,王皓,解玄,等. 纳米固体润滑颗粒对微织构表面摩擦学性能的影响研究[J]. 机械制造,2019,57(7):84-89.
HUA X J, WANG H, XIE X, et al. Effect of nano solid lubricating particles on tribological properties of micro textured surface[J]. Machinery, 2019, 57(7): 84-89.
- [16] 李斌,谢凤,张蒙蒙,等. 纳米二硫化钼作为润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封,2014,39(9):91-95.
LI B, XIE F, ZHANG M M, et al. Study on tribological properties of nano-MoS₂ as additive in lubricating oils[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(9): 91-95.

(上接第30页)

- [6] RIZOV V. Non-linear elastic delamination of multilayered functionally graded beam [J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2017, 13(3): 434-447.
- [7] HER S C, SU W B. Interfacial fracture toughness of multilayer composite structures[J]. Strength of Materials, 2015, 47(1): 186-191.
- [8] HSUEH C H, TUAN W H, WEI W C J. Analyses of steady-state interface fracture of elastic multilayered beams under four-point bending[J]. Scripta Materialia, 2009, 60(8): 721-724.
- [9] PEI Y T, OCELÍK V, DE HOSSON J T M. Interfacial adhesion of laser clad functionally graded materials [J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 342(1/2): 192-200.
- [10] SEO D W, LIM J K. Interfacial bonding strength of graded ZrO₂/NiCrAlY coatings accumulated by detonation Gun spraying[J]. International Journal of Modern Physics B, 2003, 17(8/9): 1152-1157.
- [11] CHAI H, LEE J J W, MIELESZKO A J, et al. On the interfacial fracture of porcelain/zirconia and graded zirconia dental structures[J]. Acta Biomaterialia, 2014, 10(8): 3756-3761.
- [12] BANDYOPADHYAY A, HEER B. Additive manufacturing of multi-material structures [J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2018, 129: 1-16.
- [13] ZHANG C, CHEN F, HUANG Z F, et al. Additive manufacturing of functionally graded materials: A review[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 764: 138209.
- [14] CALVERT P. Inkjet printing for materials and devices[J]. Chemistry of Materials, 2001, 13(10): 3299-3305.
- [15] DE GANS B J, DUINEVELD P, SCHUBERT U. Inkjet printing of polymers: state of the art and future developments [J]. Advanced Materials, 2004, 16(3): 203-213.

欢 迎 来 稿

欢 迎 订 阅

欢 迎 刊 登 广 告