

连杆小头衬套材料工艺及试验评价的研究进展

魏满晖, 向建华

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 针对连杆小头摆动摩擦副载荷过大、润滑不良、温升过高而导致的衬套早期失效问题, 归纳了近年来衬套常用衬层金属材料铅青铜、锡青铜、铝青铜和共晶硅铝合金的性能特点, 分析了电镀涂层、热喷涂和气相沉积镀膜等常用的衬套表面处理技术的原理及其应用前景, 介绍了磨损试验、疲劳试验和抗咬合试验等衬套失效试验评价方法的研究进展。从材料、工艺及试验评价的角度为连杆小头摆动摩擦副失效问题的改善提供参考。

关键词: 连杆小头; 衬套; 材料; 表面处理; 试验评价

中图分类号: TK423.3⁺2; TK425 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)03-0049-06

Research Progress on Bushing Material & Technology and Its Experimental Evaluation in Connecting Rod Small End

Wei Manhui, Xiang Jianhua

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: Aiming at the problem of early failure of the bushing caused by excessive load, poor lubrication and high temperature rise of the swinging friction pair on the connecting rod small end, the performance characteristics of lead bronze, tin bronze, aluminum bronze and eutectic silicon aluminum alloy which have been commonly used on the bushing in recent years are summarized. The bushing surface treatment technologies such as electroplating coating, thermal spraying and vapor deposition coating are analyzed from the aspects of principle and application prospect. The research progress of the bushing failure experimental evaluation methods such as wear test, fatigue test and anti-occlusion test were all introduced. It is intended to provide a reference for the improvement of the failure of the swinging friction pair on the connecting rod small end from the aspects of materials, technique and test evaluation.

Key words: connecting rod small end; bushing; material; surface treatment; experimental evaluation

0 引言

连杆作为内燃机热功转换的核心部件, 在工作过程中, 承受着巨大的气缸燃烧压力、往复惯性力和螺栓预紧力作用, 机械负荷重, 工作条件恶劣。而由活塞销-连杆小头衬套-连杆小头组成的摆动摩擦副情况尤为严重: 一方面, 轴承比压可达 25~80 MPa, 约为气缸最高燃烧压力的 5~9 倍^[1];

另一方面, 由于部分机型不采用压力润滑而采用飞溅润滑, 使得衬套常处于边界润滑状态, 润滑条件恶劣, 衬套磨损情况加剧。随着近几年内燃机高强度、高增压化的发展趋势, 该摆动摩擦副的工作条件进一步恶化, 衬套失效问题更加凸显。连杆小头轴承比压大、相对速度低、油膜形成困难等问题导致的衬套过热、异常磨损以及变形松脱等故障, 已严重影响内燃机工作的质量与可靠性。

收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-09-06

基金项目: 国防基础科研项目。

作者简介: 魏满晖(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为内燃机结构强度及摩擦磨损分析, 1589302969@qq.com。

国内外研究机构多年来对衬套的失效机理、结构协调匹配规律、非稳态润滑规律、表面完整性加工技术、过盈装配影响规律、材料适应性以及试验方法等进行了大量研究^[2]。本文仅从衬套材料、表面处理技术及试验评价方法等方面总结分析近年的研究现状及发展趋势,以期为连杆小头摆动摩擦副失效问题的改善提供参考。

1 衬套材料

早在 20 世纪 90 年代,学者陈培琴、黄翔如对柴油机连杆小头铜衬套改为双金属卷制衬套的可行性进行了分析,通过耐久试验证明了后者具有更高的承载能力与可靠性^[3]。至此以后,国内外普遍采用双金属卷制衬套代替单金属轴套作为连杆小头衬套。之后,研究者们又尝试在衬套内表面增加镀层,形成三金属卷制衬套,并且试验表明,三金属卷制衬套性能更优。由此,逐步完善并使用至今。

三金属卷制衬套由衬背、衬层和镀层三部分组成,结构示意图如图 1 所示。其中,衬层与衬背的厚度比约为 1:1.5~1:9,表面镀层的厚度一般不超过 0.025 mm^[4]。

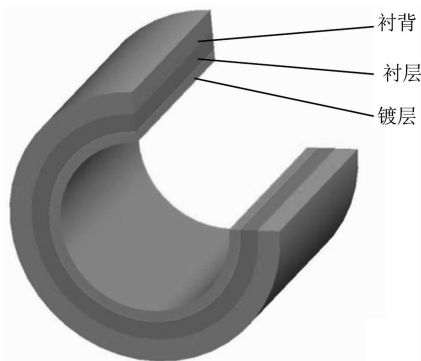


图 1 连杆小头衬套

衬背材料常选用 08、08F 和 10 号优质碳素钢,主要是因为其具有较高的抗压屈服极限和较好的粘接性能。镀层则通常以表面减摩抗磨处理的方式添加一些高性能合金,本文将在第 2 节详细讲述。而衬层金属材料则要求较为严格,这是因为衬层金属材料的选配对衬套性能的稳定与否起着至关重要的作用。衬层材料应具有较高的屈服强度、硬度、弹性模量和良好的减摩性能等。为此,国内外各大轴承研发机构进行了几十年的研究工作,取得了一定的成果。衬层金属材料也从过去的铅基、锡基巴氏合金过渡为目前普遍使用的铅青铜、锡青铜等传统材料和铝青铜、共晶硅铝合金等新兴材料^[5]。

(1) 铅青铜

铅青铜是悠久的、使用最为广泛的衬层金属材料。它具有良好的切削性和耐磨性,摩擦系数在润滑情况下仅为 0.004~0.008,比其他铜合金低 1~4 倍。使用时须严格控制铅的含量,因为铅含量高易被腐蚀,含量低易发生粘着磨损,所以常常辅以其它金属元素以提高铅青铜的性能。如添加锌元素可以提高材料的耐高温性,添加锡元素可以提高材料的耐蚀性。目前国内外广泛使用的铅青铜衬层金属材料为 CuPb10Sn10,它从 20 世纪 30 年代开始应用于连杆小头衬套,如今几乎所有滑动轴承供应商都提供该材料的衬套产品。如图 2 所示为该材料的金相组织结构^[4]。此外, CuPb15Sn8 和 CuPb17Sn4Zn4 等铅青铜材料的衬套产品使用也较为广泛。

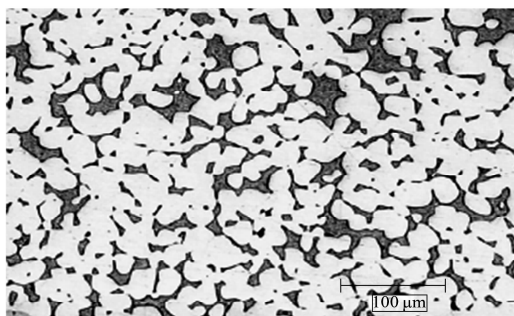


图 2 常温下 CuPb10Sn10 的金相组织结构^[6]
(其中深色的是铅,浅色的块状结构是锡铜合金)

(2) 锡青铜

锡青铜也是常用的衬层金属材料。近年来,国内某些高转速、高负荷、高功率密度柴油机常使用 QSn7-0.2 锡青铜材料的衬套产品。该材料具有屈服强度高、弹性和耐磨性好、易焊接和钎焊、耐蚀性和可切削性良好的优点,适于热压加工^[6]。此外,还有部分衬套使用锡磷青铜,它是在锡青铜的基础上添加含磷量大于 0.2% 的磷元素。其耐磨性和耐蚀性俱佳,同时具备很强的抗疲劳性,若向其中再增加一定量的锌元素,则耐高温性将变得更好。CuSn10P1 和 CuSn5Pb5Zn5 是两种常见的锡青铜衬层金属材料。

(3) 铝青铜

自 20 世纪 50 年代,英国 Glacier 公司成功解决了铝锡合金生产中的关键问题,铝青铜材料便开始得到初步使用。该材料虽不含铅,但可用其它金属元素替代铅元素发挥同样的合金性能。所以目前铝青铜材料逐渐成为人们研究的重点。近年来常用的含锰元素的铝青铜 CuAl9Mn 具有较高的屈服强度,高温耐蚀性和耐磨性良好,在德国 DIN 17665

标准中有所介绍。除此之外，常用的铝青铜衬层金属材料还包括 ISO 1504383/1 – 1982（E）标准中的 CuAl10Fe5Ni5^[7]。

（4）共晶硅铝合金

20 世纪 60 年代，在欧洲锡铝合金 AlSn20Cu1 已经被用作连杆小头衬层金属材料。但该材料承载能力较差，不适用于高功率发动机。在此基础上，经过逐年改进，研发出了性能更优的共晶硅铝合金材料。该材料中硅元素含量一般为 8.5% ~ 13%，其特点是导热性、耐蚀性、铸造工艺性和切削性良好，密度小、疲劳强度高、承载能力强。为进一步提高其性能，可在其中加入 Cu、Mg、Mn、Ni 等元素进行多元合金化，如 AlSi11Cu1。试验表明：AlSi11Cu1 的抗疲劳能力要比 AlSn20Cu1 高 65%；同时疲劳强度也有所增加，大致与 CuPb22Sn4 相等^[8]，足以满足大多数高功率高速柴油机常用的最大负荷要求。

2008 年，在欧洲立法规定的推动下，美国 Federal-Megul 公司作为全球首家提供全面无铅轴瓦产品组合的企业^[9]，为了增加衬层金属材料合金层的嵌藏性能和疲劳性能，在个别牌号合金中加入了与铅元素同族的铋元素；为了细化晶粒以提高轴承的承载能力加入了 1% ~ 2% 的镍元素，如 CuSn10Bi3 和 CuSn8Ni。此举为衬层金属材料的无铅化进程树立了标杆^[6]。

总之，在实际使用时应根据动力机械不同的工作条件和强化程度，选择与其匹配的衬层材料。如德国 Wieland 公司就可根据客户的使用环境及工况，推荐采用不同种类的衬层材料。

表 1 所示为几种常用的衬层金属材料的力学特性。

表 1 常见衬层金属材料的力学特性

合金牌号	σ_b /MPa	δ_s	HB
CuPb10Sn10	≥ 330	$\geq 4\%$	≥ 95
QSn7 - 0.2	≥ 440	$\geq 19\%$	$\geq (130 \sim 200)$
CuSn10P1	≥ 330	$\geq 4\%$	≥ 95
CuAl9Mn	≥ 540	$\geq 16\%$	-
AlSi11Cu	$\geq (194 \sim 210)$	$\geq (15\% \sim 20\%)$	$\geq (50 \sim 60)$

2 衬套表面处理技术

连杆小头衬套在选配衬层金属材料后，为提高性能，通常还要对其内表面进行减摩抗磨处理。目前，各大滑动轴承研究机构最常使用的表面处理技术为电镀涂层技术，该技术相对较为成熟。此外，近年来，热喷涂技术和气相沉积镀膜技术也逐渐兴

起，成为趋势。

（1）电镀涂层技术

对于减摩合金电镀涂层的研究和应用最早可追溯至 20 世纪中期。目前，我国已经从 20 世纪的二元、三元电镀发展到如今的四元电镀技术。例如，在铅 – 锡涂层中加入铜和锡，利用二者的高硬度和高耐蚀性形成均匀的四元合金，这样生产出来的衬套具有较好的抗疲劳、抗剥落、抗腐蚀和抗气蚀特性。类似的四元电镀衬套已大量应用在 230 kW 以上的高速重载柴油机上，表现出极优的性能^[10]。近年来，日本 Daido 公司针对铅镀层对环境的污染问题，开发出一种新型锡 – 铜镀层^[11]。加工时，先在衬套内表面电镀一层镍，然后增加锡 – 铜镀层，在大大提高衬套表面性能的同时，符合绿色环保的要求，已经成为发展趋势。此外，奥地利 Miba 公司最新开发了一种新型合成镀层^[12]，并逐步解决了该镀层导热性差、抗蠕变和与多种润滑剂不相容等问题。该合成镀层有良好的抗咬合、耐磨、抗腐蚀和抗穴蚀性能，且不含有毒元素，可用作铝合金和铜合金的衬内镀层。

（2）热喷涂技术

热喷涂技术发展非常迅速，并且有了一定的试验研究基础，未来极有可能替代电镀涂层技术。2010 年，美国 Federal – Megul 公司推出一种由微观强化的聚酰胺酰亚胺（PAI）制成的耐用覆层——IROX 高分子涂层^[13]。该涂层通过热喷涂工艺覆于衬套内表面，使衬套具有良好的耐磨性和较高的承载能力，并可防止早期的磨粒磨损。覆有该涂层的衬套能够承受较高的机械载荷，能有效解决具有自动起停功能的内燃机因频繁起动而导致过度磨损的难题，适用于当今的高效增压直喷内燃机。此外，国内的汪专武、李柱国将经过特殊处理的纳米 MoS₂ + C 复合涂层材料，采用环保型热喷涂工艺，涂于原轴瓦合金表面。经过与四元涂层和国外涂层的测试对比不难发现：从环保的角度，纳米 MoS₂ + C 复合涂层与国外涂层均不含铅等会对环境造成污染的元素；从力学性能的角度，该复合涂层的抗疲劳能力和高温适应性均略高于国外涂层，明显高于四元涂层；虽表面硬度较低但自润滑特性好，可以在高温高载状态下工作，可达到现代内燃机在全工况下对衬套综合性能的要求^[14]。由此可知，具有该涂层的轴瓦其承载能力和摩擦学性能均优于目前广泛应用的国外电镀轴承和四元电镀轴承。表 2 所示为纳米 MoS₂ + C 复合涂层与国内外电镀涂层的性能对比。

表 2 三种涂层性能比较^[14]

涂层	疲劳强度/MPa	表面硬度/HV	工作最高温度/℃	环保性
MoS ₂ + C	80 ~ 89	22.5	320	无 Pb
四元涂层	60 ~ 70	30	220	含 Pb
国外涂层	75 ~ 85	30	300	无 Pb

(3) 气相沉积镀膜技术

气相沉积镀膜技术是一种新兴技术。对连杆小头衬套而言,可采用物理气相沉积,即 PVD 技术,获得表面镀层。PVD 技术是通过物理反应(如蒸发、溅射等)使镀膜材料气化,然后在基体表面沉积成膜的一种技术。除传统的真空蒸发和溅射沉积技术外,还包括近 30 多年发展起来的离子束沉积、离子镀和离子束辅助沉积技术^[15]。目前,美国 Federal - Megul 公司已经开发出应用 PVD 技术进行表面处理的连杆小头衬套产品。由于 PVD 技术可以获得极细小和致密的金相组织,故研究者们尝试采用该方法将 AlSn20Cu 合金镀层处理后喷涂在衬套内表面上^[16]。这样,AlSn20Cu 减摩层的承载能力可达到 110 MPa 以上,结合强度、疲劳强度等性能都较电镀时有了极大的提高,完全满足重型柴油机及车用直喷增压汽油机对轴承的要求。

由于衬套涂层广泛采用的电镀技术对环境影响较大,所以其发展不被看好。而新兴技术——热喷涂技术和气相沉积镀膜技术更加绿色、高效,是未来的发展方向。但气相沉积镀膜技术的成熟度和推广度还不够,目前只有少数几个国家掌握了该技术。目前,基于该技术的多层纳米复合膜已成为研究热点,该复合膜的应用将为 PVD 技术在连杆衬套上的运用提供广阔的前景^[15]。此外,在轴承表面处理技术方面走在世界前列的德国 Mahle 公司和美国 Federal - Megul 公司正在尝试基于不同的基础材料配合不同的涂层,以适应不同负荷的轴承需求。此举极大地推动了表面处理技术的研究进程,并丰富了轴承的种类。

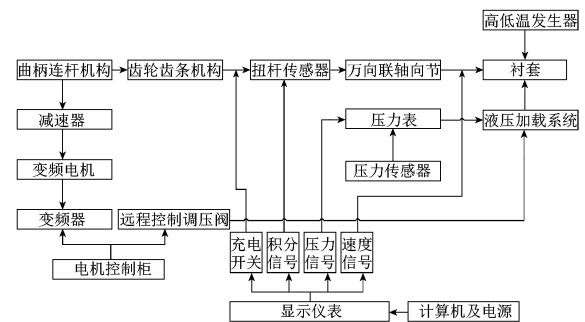
3 衬套试验评价方法

在选配了合适的衬层金属材料,采用了恰当的表面处理技术后,为验证衬套是否能达到预期的性能要求,通常要对衬套进行试验评价。其中常用的试验方法包括磨损试验、疲劳试验和抗咬合试验。

(1) 磨损试验

由于磨损使衬套与活塞销的游隙明显加大,从而引起振动和噪声增强,使机械不能正常工作,因此,开展轴承磨损试验显得尤为重要。哈尔滨轴承

集团公司技术中心为了检测摆动轴承在模拟环境状态下的性能和寿命,研制了高低温环境摆动轴承试验机^[17]。被试验轴承的尺寸内径 5 ~ 20 mm; 试验温度 -60 ~ +250 ℃; 试验载荷 0 ~ 215.6 kN; 试验转速由变频调速电机实现,频率 0 ~ 100 Hz; 轴承往复摆动角度 $\pm 18^\circ$ 。该试验机能够对被测试轴承的温度、载荷、转速、扭矩和摆动角度等参数在规定的范围内任意设定,并对这些参数进行实时采集、显示和存储。如图 3 所示为试验机系统构成。此外,奥地利 Miba 公司开发的滑动轴承磨损试验台,通过计算滑动轴承摩擦功耗,进而分析衬套样件的磨损情况^[18]。该试验台可承受的载荷较其它试验台要高,而且经 AVL 公司的验证:该试验台的试验数据与仿真结果相差不大,证明了该试验台的试验精度较高。

图 3 高低温环境摆动轴承试验机系统构成^[17]

(2) 疲劳试验

通过疲劳试验可以测定衬套材料的疲劳强度,从而绘制出疲劳强度与疲劳寿命之间的关系曲线,即 S-N 曲线;并观察疲劳破坏现象和断口特征^[19]。2014 年,美国 Federal-Megul 公司曾为研究 CuSn10Bi3、CuSn8Ni 能否替代 CuSn10Pb10 作为衬套材料而做了疲劳试验^[4]。试验采用 50 Hz 正弦波加载试验载荷,循环 1 500 万次,以 10 MPa 为测试步长,并在“阶梯法”的基础上制定试验规范,即当测试完一个衬套后,对试验件表面进行观察,若没有发现疲劳则增加一个阶次载荷再进行测试,若发现疲劳则降低测试载荷,直至找出疲劳破坏载荷。Federal-Megul 公司所用的疲劳试验机如图 4 所示。

近年来,上海交通大学滑动轴承研发中心开发了一种轴瓦疲劳试验机(图 5)。该试验机主要由主机系统、控制系统、动力系统、液压油箱以及冷却水箱等组成。加载方式为液压缸加载,并通过测试系统监控轴瓦载荷大小、润滑油压力以及润滑油膜温度等参数。该试验机是在英国 Glacier 公司新

型蓝宝石轴瓦试验机的基础上加以改进。试验验证表明: 二者具有可比性, 误差在 5% 以内。该试验机可替代价格昂贵的进口蓝宝石轴瓦疲劳试验机。

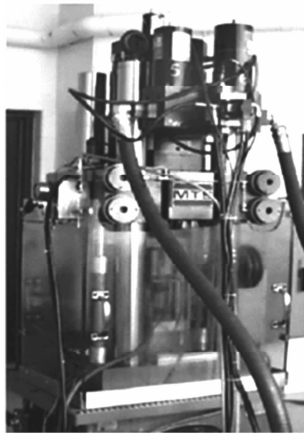


图 4 美国 Federal-Megul 公司疲劳试验机^[6]

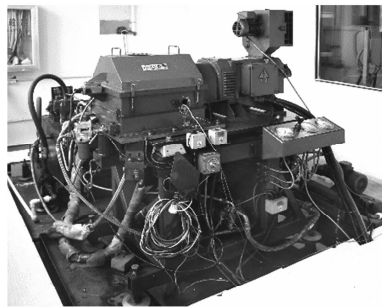


图 5 上海交通大学改进的轴瓦疲劳试验机

(3) 抗咬合试验

目前, 随着内燃机向高速、高增压强化方向发展, 衬套因粘着而磨损、咬合, 从而失效的情况经常发生。为此, 很多滑动轴承研发机构建立了专门的试验装置, 以深入研究轴承材料的抗咬合性^[20]。在威墅堰机车车辆工艺研究所开发的 YD-1A 型抗咬合试验台上, 对国内生产的几种不同材料的衬套产品分别进行了试验。试验过程中严格控制润滑油膜厚度, 即在极薄的油膜下运转, 并可随时中断油路, 模拟活塞销与衬套在典型载荷下发生咬合的情况, 可真实地反映材料抗咬合性的差别^[21-22]。此外, 英国 Glacier 公司开发的 Beta 咬合试验台, 对衬套在每 $3n$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$) 个载荷下试验 144 个循环, 观察其何时发生咬合。若在 15 MPa 的载荷下经过 144 个循环仍未发生咬合, 则在该载荷下再试验 1 300 个循环, 并观察记录。该试验台使用诱发咬合的载荷来衡量衬套材料的抗咬合性, 即咬合时的载荷越高, 材料的抗咬合性越好^[23]。不足之处在于, 它和“织女星”不同心度咬合试验台一样, 使用的载荷和速度都较低, 对于不具软

相或软相数量非常少的衬套来说, 根据试验结果无法推断出它们在内燃机中的表现^[24]。即便如此, 它在抗咬合试验方面仍然发挥着极为重要的作用。

目前, 在连杆小头衬套磨损试验、疲劳试验和抗咬合试验方面开发了众多试验设备并开展了大量的试验工作, 但是对于摆动摩擦副的特殊运动形式, 还有一定的局限性。相信随着学者们的深入研究, 未来的试验设备将会更加完善。

4 总结

本文对连杆小头衬套材料、表面处理技术及试验评价方法的研究进展进行了综述。总结了近年常用的衬层金属材料、衬套表面处理技术及衬套性能试验评价方法, 并分析了各自的特点及待改进之处。可为改善衬套早期失效问题提供参考。

参考文献

- [1] 马伟. 铜铅合金-钢烧结双金属材料在发动机连杆衬套上的应用 [J]. 内燃机, 2006 (6): 44-45.
- [2] 李柱国. 内燃机滑动轴承 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [3] 陈培琴, 黄翔如. 钢背卷制连杆衬套代替整体铜衬套的试验研究 [J]. 柴油机设计与制造, 1995 (4): 2-8.
- [4] 李鹏. 替代 CuSn10Pb10 的无铅铜基衬套材料 [J]. 汽车工艺与材料, 2014 (4): 12-15.
- [5] SAXTON D M. Lead-free replacements for SAE792 in bushing application [J]. SAE2006-01-1097.
- [6] 李鹏. 国外内燃机滑动轴承材料无铅化及其应用 [J]. 汽车工艺与材料, 2009 (7): 1-4.
- [7] YOSHIOKUMADA. Bearings of lead-free [J]. Journal of Japanese Society of Tribologists, 2004, 49 (1): 2.
- [8] 尹延国. 滑动轴承材料的研究进展 [J]. 润滑与密封, 2006 (5): 183-187.
- [9] 辉门再获 2014 年度《美国汽车新闻》PACE™ 奖-无铅发动机轴瓦为汽车制造商提供环保型解决方案 [J]. 时代汽车, 2014 (4): 74-75.
- [10] 李柱国. 内燃机滑动轴承镀层的现状和发展 [C]. 内燃机滑动轴承学术年会论文集, 2010.
- [11] TSUJI H, TOMITA Y, KAWAKAMI N, et al. Development of a new tin based overlay for medium speed diesel engines [C]. CIMAC 2004, 51.
- [12] 安健. 铝铅轴承合金的复合强度与摩擦学特性 [D]. 吉林: 吉林大学, 2001.
- [13] 安宇鹏, 易戈文. 汽车发动机轴瓦用新型聚合物基固体润滑涂层的研究 [C]. 2014 中国汽车工程学会年

会: 176-179.

- [14] 汪专武, 李柱国. 内燃机轴瓦高性能纳 $\text{MoS}_2 + \text{C}$ 复合涂层的研究 [J]. 润滑与密封, 2011, 36 (7): 106-111.
- [15] 郭亚军, 李庆芬, 尹树桐, 等. 磁溅镀膜轴承新材料的研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22 (6): 93-97.
- [16] MERGEN R, LANG H, HARREITHER L. Synthetic coated bearings as future alternative for large engines [C]. CIMAC 2004, 65.
- [17] 蔡冬萍. 高低温环境摆动轴承试验器的研制 [J]. 轴承, 2007 (4).
- [18] ETTEFAGHI, EHSAN O L, AHMADI H. Investigation of the anti-wear properties of nano additives on sliding bearings of internal combustion engines [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing 2013, 14 (5): 805-809.
- [19] 李溪滨, 刘如铁, 杨慧敏. 铝铅石墨固体自润滑复合材料的性能 [J]. 中国有色金属学报, 2003, 13 (2): 465-468.
- [20] UECKER A. Lead-free carbon brushes for automotive starters [J]. Wear, 2003, 255: 1286-1290.
- [21] 郭振杰. 摩擦损耗对发动机连杆轴瓦寿命的影响 [J]. 润滑与密封, 2006 (9): 152-154.
- [22] 张绪寿, 余来贵, 陈建敏. 表面工程摩擦学研究进展 [J]. 摩擦学学报, 2000, 20 (2): 156-160.
- [23] 刘瑞堂. 机械零件失效分析 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [24] CHENG X H, XUE Y J, XIE C Y. Friction and wear of rare-earth modified glass-fiber filled PTFE composites in dry reciprocating sliding motion with impact loads [J]. Wear, 2002, 253 (7/8): 869.

(上接第 39 页)

参考文献

- [1] WANG X L, SHANGGUAN W B, RAKHEJA S, et al. A method to develop a unified fatigue life prediction model for filled natural rubbers under uniaxial loads [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2013, 37 (1): 50-61.
- [2] 祖海英, 耿春丽, 李大奇, 等. 基于 FE-SAFE 螺杆泵定子橡胶疲劳裂纹形成寿命预测 [J]. 机械强度, 2018 (1): 195-199.
- [3] 王小莉, 上官文斌, 刘泰凯, 等. 填充橡胶材料单轴拉伸疲劳试验及疲劳寿命模型研究 [J]. 机械工程学
- 报, 2013, 49 (14): 65-73.
- [4] 王文涛, 肖苏华, 黄健龙, 等. 单轴拉伸状态下橡胶隔振器的疲劳寿命预测研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33 (5).
- [5] Huan Z, 丁家松, 张欢, 等. 船用橡胶隔振器寿命评估方法研究 [J]. 振动与冲击, 2010, 29 (12): 230-233.
- [6] 王小莉. 橡胶隔振器多轴疲劳寿命预测方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [7] 李晓芳, 杨晓翔. 橡胶材料的超弹性本构模型 [J]. 弹性体, 2005, 15 (1): 50-58.