

# 杂质颗粒对脂润滑轮毂轴承影响的试验

彭朝林<sup>1,2</sup>, 谢小鹏<sup>3</sup>, 李光乐<sup>3</sup>, 李兴林<sup>2</sup>

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 杭州轴承试验研究中心有限公司, 浙江 杭州 310022;  
3. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:**为研究汽车轮毂轴承润滑脂中杂质颗粒的来源及杂质颗粒混入润滑脂中对轮毂轴承性能的影响,采用 MOA-II 型发射光谱仪和颗粒计数器,对汽车轮毂轴承润滑脂中的元素含量和所含杂质颗粒的粒径分布进行了分析;并以此分析为基础采用四球摩擦磨损试验机,研究了分别加入不同质量分数和粒径大小的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Cu}$  微纳米颗粒对复合锂基润滑脂润滑性能的影响。研究结果表明:轮毂轴承中杂质颗粒产生的原因主要包括外界侵入和轴承内部自生 2 种,杂质颗粒粒径和数量的分布呈指数函数关系,杂质颗粒粒径越小,其数量越多;在试验所选定的微纳米颗粒粒径范围内,分别加入不同质量分数的硬质脆性颗粒  $\text{SiO}_2$  和软质塑性颗粒  $\text{Cu}$  后,润滑脂的摩擦因数随颗粒粒径的增大均呈先增大后减小的趋势,但与基础脂的摩擦因数相比均有不同程度的增大。

**关键词:**机械工程;轮毂轴承;杂质颗粒;失效机理;试验研究

**中图分类号:**TH117.3

**文献标志码:**A

## Experiment on influence of impurity particles on wheel hub bearing grease

PENG Chao-lin<sup>1,2</sup>, XIE Xiao-peng<sup>3</sup>, LI Guang-le<sup>3</sup>, LI Xing-lin<sup>2</sup>

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Hangzhou Bearing Test & Research Center (HBRC), Hangzhou 310022, Zhejiang, China; 3. School of Mechanical and Automobile Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to research on the origin of impurity particles and the influences of grease mixed with these particles on the performance of automobile wheel hub bearings, this paper analyzed element contents and distribution of particles size in failure wheel hub bearing grease by using MOA-II emission spectrometer and particle counter.  $\text{Cu}$  and  $\text{SiO}_2$  submicron particles with different mass fractions and diameters were added into lithium complex grease. Based on that, influences of submicron particles on lubrication performance for testing grease were tested by using four-ball test rig. The results show that the reasons for debris particles emergence mainly contain external invade and self-generated in bearing surface. The diameter and number of debris particles have an exponential function relation in which the number of particles increases with the decrease of the diameter of particle more smaller. Within the scope of selected particles diameter, after adding  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Cu}$  with different mass fractions respectively, the friction coefficient

**收稿日期:**2015-10-13

**基金项目:**中央高校基本科研业务费专项资金项目(310822161007);陕西省国际科技合作与交流计划项目(2015KW-009);广东省自然科学基金项目(S2011010002118)

**作者简介:**彭朝林(1987-),男,湖南永州人,长安大学讲师,工学博士,杭州轴承试验研究中心有限公司在站博士后,E-mail: peng. c. l@fox-mail.com。

increases at first then decreases with the increase of particles size, but the increase degree of friction is different from that of the base grease. 2 tabs, 7 figs, 27 refs.

**Key words:** mechanical engineering; wheel hub bearing; impurity particle; failure mechanism; experimental study

0 引言

汽车轮毂轴承作为保证汽车安全性和舒适性的关键零部件,在汽车行驶过程中主要起到承受汽车重量以及为汽车轮毂传动提供精确向导的作用<sup>[1,2]</sup>。一般情况下,汽车轮毂轴承均采用润滑脂作为润滑剂,由于汽车轮毂轴承相比于一般滚动轴承其工况更为恶劣、可靠性要求更高,所以常选用具有良好抗高速剪切、极压抗磨等性能的润滑脂作为汽车轮毂轴承润滑剂。为延长轴承寿命和提高轴承使用性能,目前常采用的方法主要分为 2 类:①研制新型轴承材料,改进轴承结构、加工技术和工艺等手段以达到优化轴承本身性能的目的<sup>[3-5]</sup>;②研制高性能润滑脂以减小轴承在工作过程中的摩擦磨损和噪声等。文献[6]通过考察锂基润滑脂的微观结构,并测试滚动噪声值和各项理化指标值,确定了一种合成低噪声滚动轴承锂基脂;文献[7]采用试验方法得出了在复合锂基脂中加入 WS<sub>2</sub> 亚微米粒子可以在高温使用工况条件下有效地提高润滑脂的极压抗磨性能。但是,由于轮毂轴承实际工作过程中所处外界环境以及滚道表面受摩擦磨损的作用,使得轮毂轴承润滑脂中必然存在大量的、粒径分布范围广、颗粒理化性能不同的杂质颗粒,因此理想润滑条件下轮毂轴承寿命和使用性能的优化方法具有一定的局限性<sup>[8-11]</sup>。文献[12-14]综述了润滑剂中杂质颗粒的形貌及相应的形成机理,并通过数值计算方法分析了固体颗粒在 Hertz 接触区域及附近区域的颗粒运动轨迹;文献[15]研究了杂质颗粒对 Hertz 接触区油膜厚度分布以及摩擦副表面磨损的影响,建立了杂质颗粒与滚动轴承寿命的关系;文献[8,16]通过试验方法研究了润滑剂受杂质污染后对其摩擦因数以及摩擦副表面磨损的影响。

基于此,本文首先采用发射光谱仪分析了汽车轮毂轴承润滑脂样品中杂质颗粒的来源,然后采用颗粒计数器统计了润滑脂样品中杂质颗粒数量与粒径大小的分布关系,并在此基础上研究了在润滑脂中分别加入不同物理属性、质量分数和粒径大小的固体颗粒对润滑脂润滑性能的影响。本文研究对轮毂轴承失效的形成机理和轴承寿命公式的修正具有

一定的指导意义。

1 轮毂轴承润滑脂中的杂质颗粒

对比正常运转和失效的汽车轮毂轴承可以发现:正常运转的汽车轮毂轴承滚道表面光滑、润滑脂颜色与未使用润滑脂的相比变化不大;失效的轮毂轴承其滚道表面通常会出现剥落、划痕等,而其润滑脂会出现由于高温氧化变黑或者由于密封失效而使得润滑脂颜色变黄的现象,如图 1 所示。

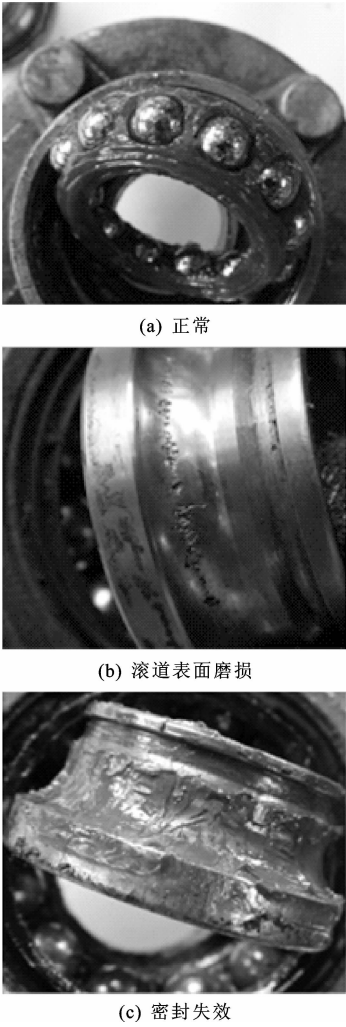


图 1 正常运转和失效汽车轮毂轴承内部情况对比

Fig. 1 Comparison the internal situation of operating properly with failed wheel hub bearings

1.1 杂质颗粒来源分析

为分析轮毂轴承润滑脂中杂质颗粒的来源,首

先随机选取 3 套出现滚道表面磨损(图 1(b)所示)和密封失效(图 1(c)所示)的轮毂轴承作为分析样本,然后提取样本轴承中的润滑脂,分别标记为样品 A<sub>1</sub>、样品 B<sub>1</sub> 和样品 C<sub>1</sub>,最后采用 MOA-II 型发射光谱仪对各样品所含的元素含量进行测定。由于发射光谱仪仅能对溶液中的元素含量进行分析,因此需要将采集的样品制作成溶液,具体步骤如下:①分别取 0.14 g 的样品润滑脂加入到 2 mL 石油醚中进行溶解;②在上述溶液中分别加入 12 mL 的 0<sup>#</sup> 基础油稀释并充分振荡;③将溶液置于超声波环境中 40 min 进行加热分散。溶液制作完毕后,采用油液发射光谱仪测试样品中的元素种类及含量,每个样品试验重复 3 次,然后取各元素含量的平均值作为其最终结果。同时,对未使用的轮毂轴承润滑脂也按照相同步骤进行测试以作为对比分析,最终各样品中元素测试结果如表 1 所示(为节省篇幅,表中只给出了部分元素的测试结果)。

表 1 轮毂轴承润滑脂的元素含量变化对比  
Tab.1 Comparison the element contents of grease in different wheel hub bearings

元素	未使用	样品 A <sub>1</sub>	样品 B <sub>1</sub>	样品 C <sub>1</sub>
Ca	56.3	253.0	165.0	153.0
Cr	0.0	49.1	11.1	9.4
Fe	0.0	2 819.3	2 102.3	1 019.3
Mn	0.0	55.2	21.1	4.8
Pb	0.0	57.2	12.4	8.6
Si	0.0	50.9	37.7	10.0

从表 1 给出的各轮毂轴承润滑脂样品元素含量的情况可知,失效轮毂轴承润滑脂中的 Ca、Fe、Cr、Si、Pb 和 Mn 等元素的含量相比于未使用的轮毂轴承润滑脂显著升高。其中,Fe、Cr、Mn 和 Pb 元素是轴承材料中不可缺少的 4 种元素,而在未使用的轮毂轴承润滑脂中不含这 4 种元素,因此可以得出,导致失效轮毂轴承润滑脂中 Fe、Cr、Mn 和 Pb 元素含量显著升高的主要原因是:在轮毂轴承运转过程中,轴承的内、外圈滚道表面和滚动体表面受摩擦磨损的作用,摩擦副表面的部分材料转移至润滑脂中,其最终结果是内、外圈滚道表面或滚动体表面出现擦伤、划痕和点蚀凹坑等失效表现形式。Ca 和 Si 元素在未使用的轮毂轴承润滑脂中不存在或者少量存在,而在失效轮毂轴承的润滑脂中测得 Ca 和 Si 元素含量出现较为显著的升高。据此可以推断轮毂轴承在工作过程中由于密封失效等原因使得轴承外部环境中的灰尘、泥沙等杂质进入到轮毂轴承内部,并与润滑脂混合在一起,其最终结果是润滑脂颜色发

生变化、润滑脂性能降低,同时伴随着氧化硅等硬质颗粒的混入。

通过对比轮毂轴承润滑脂使用前后元素含量的变化情况可知,在轮毂轴承润滑脂中存在杂质颗粒是不可避免的,其主要来源有以下 4 个方面:①润滑脂在生产、包装和运输过程中混入了泥沙和灰尘等杂质;②由于轮毂轴承密封失效,使得轴承外部环境中的泥沙、灰尘等进入润滑部位,与润滑脂混合,主要表现为使得润滑脂中 Ca 和 Si 元素含量升高;③滚道表面及滚动体在摩擦磨损作用下,摩擦副表面材料以颗粒形态转移至润滑脂中;④为改善润滑脂润滑性能而加入的固体添加剂<sup>[6]</sup>。

1.2 杂质颗粒粒径与数量的分布

为统计失效轮毂轴承润滑脂中杂质颗粒的数量随粒径变化的分布情况,采用与样品 A<sub>1</sub>、样品 B<sub>1</sub> 和样品 C<sub>1</sub> 相同的制备方法,得到用于润滑脂杂质颗粒计数的样品 A<sub>2</sub>、样品 B<sub>2</sub> 和样品 C<sub>2</sub>,然后采用油液颗粒度分析仪对溶液中的颗粒粒径及数量进行统计,每次试验重复 3 次,并取平均值作为试验结果。

采用双对数坐标图描述颗粒粒径与颗粒数量的分布关系,如下页图 2 所示。从图中可知,失效轮毂轴承润滑脂中含有大量的、粒径分布范围较广的杂质颗粒,对于不同样品中的杂质颗粒,其数量随粒径变化的趋势大致相同,即随着颗粒粒径的增大,颗粒数量趋于减小,且绝大多数杂质颗粒的粒径在 1~10 μm 之间。出现该现象的原因如下所述。

(1)由于轴承密封失效导致外部环境中的灰尘和泥沙进入轴承内部所产生的杂质颗粒,其颗粒粒径较大的部分大多由于密封圈的过滤作用仍会被阻拦在轴承外,而粒径较小的杂质颗粒则会进入到轴承内,并与润滑脂混合。即使润滑脂中存在从外部环境中侵入的粒径相对较大的杂质颗粒,也会在轴承运转过程中,受到压力作用而被碾压成粒径较小的颗粒,或者以镶嵌的形式使得滚道表面形成表面凸起。不论是随着润滑脂流动的小粒径杂质颗粒,还是由于杂质颗粒镶嵌至滚道表面而形成的表面凸起均会对润滑脂的成膜特性产生影响。

(2)对于轮毂轴承内、外圈滚道及滚动体表面在磨损、腐蚀或疲劳破坏作用下导致材料转移而自生的杂质颗粒,前 2 种因素产生的杂质颗粒通常情况下会以粒径较小的颗粒形态进入到润滑脂中,而由于疲劳破坏产生的摩擦副表面材料转移,由于其材料属性与滚道表面材料相同,因此会在应力作用下发生弹塑性变形,最终形成片状杂质颗粒或进一

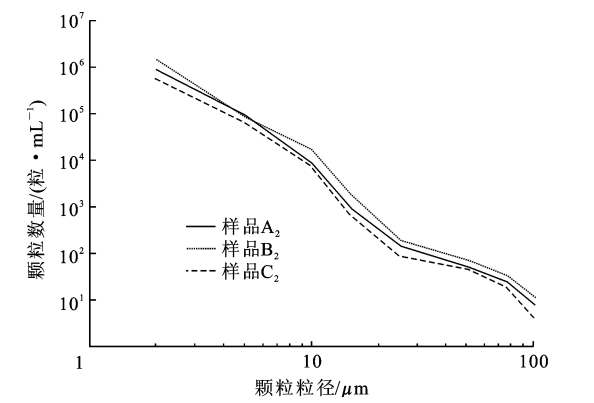


图 2 轮毂轴承润滑脂中固体颗粒粒径与数量分布关系曲线

Fig. 2 Relationship between size and quantity of particles in contaminated grease

步被碾压成小粒径颗粒。

## 2 固体颗粒对润滑脂润滑性能的影响

由 1.1 节分析可知,轮毂轴承润滑脂存在的杂质颗粒主要分为自生和外界环境侵入 2 种,其中自生杂质颗粒主要是由滚道表面材料转移产生,因此其硬度接近于轴承材料的硬度,而轮毂轴承外界环境进入润滑脂中的杂质颗粒主要以二氧化硅、硅酸盐和碳酸钙为主,所以从物理属性上看该部分杂质颗粒属于低断裂韧度的硬质颗粒。为进一步研究杂质颗粒对润滑脂减摩抗磨性能和轴承失效的影响,本文分别选取一定粒径范围内的软质塑性 Cu 颗粒和低断裂韧度的硬质 SiO<sub>2</sub> 颗粒,并以一定质量分数加入到润滑脂中进行摩擦因数的测试<sup>[17-18]</sup>。为避免润滑脂添加剂对试验测试结果的影响,本文采用的基础脂为自制不含添加剂的试验用复合锂基润滑脂,其制备成分和比例如表 2 所示。

表 2 试验用复合锂基润滑脂的制备配方

Tab. 2 Chemistry composite of lithium complex grease for experimentation

原材料名称	质量分数/%
12-羟基硬脂酸	12.8
癸二酸	4.0
单水氢氧化锂	根据有机酸含量添加
石蜡基矿物油	38.4
环烷基矿物油	32.0
酯类油(多元醇酯)	12.8

具体的润滑脂制备工艺路线如图 3 所示。

### 2.1 试验样品制备

根据图 2 中失效轮毂轴承润滑脂所含杂质颗粒粒径与数量的分布关系可知,颗粒粒径的分布范围主要在 1~10 μm 之间,因此本文选取 Cu 颗粒的平

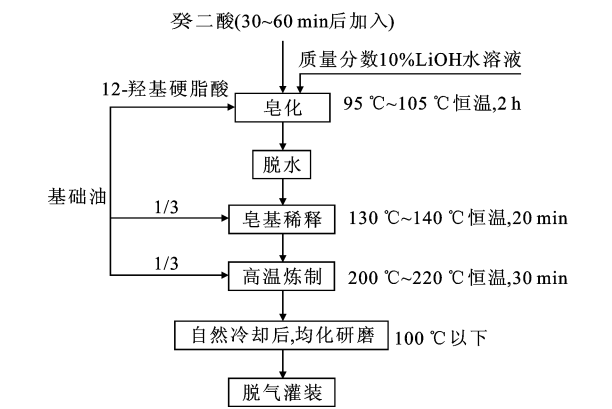


图 3 试验用复合锂基润滑脂的制备工艺路线

Fig. 3 Preparation process of lithium complex grease for experimentation

均粒径分别为 0.1、0.5、1~2、8~10、40 μm, SiO<sub>2</sub> 颗粒的平均粒径分别为 80 nm、1.5 μm、3 μm 和 10 μm。图 4、图 5 分别给出了平均粒径为 0.1 μm 的 Cu 颗粒和平均粒径为 3 μm 的 SiO<sub>2</sub> 颗粒在不同放大倍数下的外部形貌。

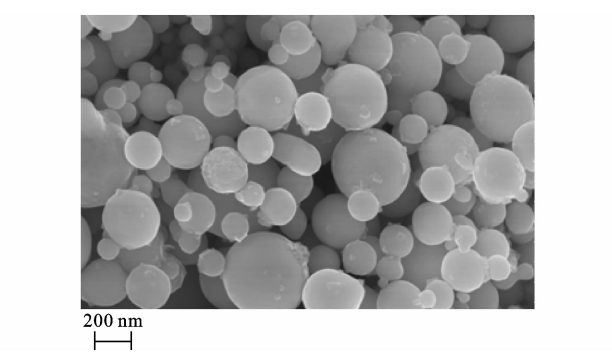


图 4 Cu 微纳米颗粒(平均粒径 0.1 μm)

Fig. 4 SEM micrographs of nano Cu particles (average diameter: 0.1 μm)

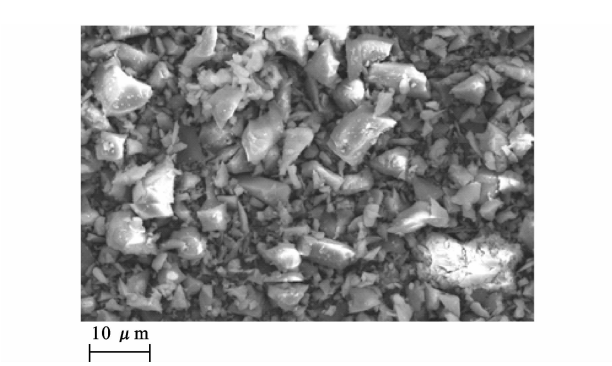


图 5 SiO<sub>2</sub> 微纳米颗粒(平均粒径 3.0 μm)

Fig. 5 SEM micrographs of micro SiO<sub>2</sub> particles (average diameter: 3 μm)

由图可知,Cu微纳米颗粒呈圆球状,粒径分布均匀, SiO<sub>2</sub> 颗粒则呈不规则多面体形状,粒径分布较为均匀。分别将不同粒径的 Cu 和 SiO<sub>2</sub> 颗粒以

1%和2%的质量分数加入到自制的复合锂基润滑脂中,采用均脂三辊研磨机对润滑脂样品进行搅拌和均匀处理,每个样品的均脂过程重复3次,从而配制出含不同粒径和质量分数固体颗粒的润滑脂样品。其中,将平均粒径分别为0.1、0.5、1~2、8~10、40  $\mu\text{m}$ 的Cu颗粒加入基础脂后,分别记为样品A、B、C、D和E;将平均粒径分别为80 nm、1.5  $\mu\text{m}$ 、3  $\mu\text{m}$ 和10  $\mu\text{m}$ 的 $\text{SiO}_2$ 颗粒加入基础脂后,分别记为样品F、G、H和I。

## 2.2 试验结果与讨论

采用济南益华摩擦学测试技术有限公司生产的四球摩擦磨损试验机测试润滑脂样品的减摩抗磨性能,四球机试验钢球材料为45Cr钢,直径12.7 mm。试验在常温下进行,试验参数选取:主轴转速为1 450 r/min,试验时间为45 min,加载力为392 N。测量数据为润滑脂的平均摩擦因数。为保证测试数据的重复性和准确性,每次试验重复3次,并取平均值作为最终的润滑脂摩擦因数值。

自制复合锂基润滑脂在不加入任何固体颗粒时的摩擦因数为0.049 2。图6所示为加入不同质量分数和平均粒径的Cu微纳米颗粒后,润滑脂样品的摩擦因数随粒径和质量分数的变化情况。加入不同质量分数的Cu微纳米颗粒,随着颗粒粒径的增大润滑脂摩擦因数均呈先增大后减小的趋势,但出现最大摩擦因数时对应的Cu颗粒粒径不同。当加入Cu微纳米颗粒的质量分数为1%,颗粒平均粒径为8~10  $\mu\text{m}$ 时,润滑脂的摩擦因数达到最大,而质量分数为2%,润滑脂的摩擦因数达到最大时,颗粒平均粒径为0.1  $\mu\text{m}$ ;加入的Cu颗粒平均粒径为1~2  $\mu\text{m}$ ,质量分数分别为1%和2%时,润滑脂的摩擦因数基本相等;加入不同质量分数的Cu微纳米颗粒,在试验所选取的颗粒粒径范围内,润滑脂的摩擦因数均比不加入Cu微纳米颗粒的基础脂摩擦因数大。由此可知,当在自制复合锂基润滑脂中加入试验所选择的几种不同粒径Cu微纳米颗粒后,润滑脂的减摩抗磨性能均出现了不同程度的劣化,而这种劣化程度的大小是受颗粒粒径和质量分数2个因素共同作用的结果。

从图7给出的当基础脂加入不同质量分数 $\text{SiO}_2$ 微纳米颗粒时其摩擦因数与颗粒平均粒径的关系可知:基础脂在加入 $\text{SiO}_2$ 颗粒后其摩擦因数均比基础脂摩擦因数大;不论加入的颗粒质量分数为1%或是2%,摩擦因数随着颗粒粒径的增大,其变化趋势均为先增大后减小,当颗粒粒径为3  $\mu\text{m}$ 时,

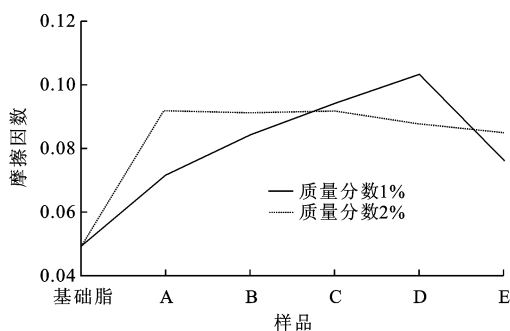


图6 含Cu微纳米颗粒润滑脂平均摩擦因数随粒径变化关系  
Fig. 6 Average friction coefficient for grease with solid particle Cu in different particle diameters and mass fractions

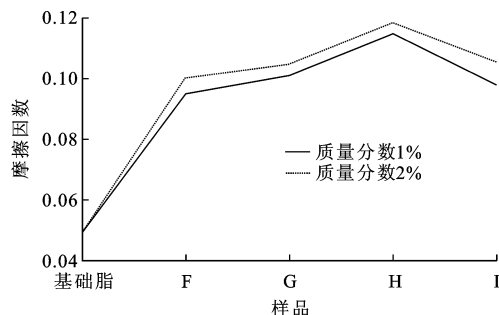


图7 含 $\text{SiO}_2$ 微纳米颗粒润滑脂平均摩擦因数随粒径变化关系  
Fig. 7 Average friction coefficient for grease with solid particle  $\text{SiO}_2$  in different particle diameters and mass fractions

润滑脂摩擦因数达到最大值;在不同颗粒粒径下,当加入的颗粒质量分数为2%时,润滑脂摩擦因数比加入颗粒质量分数为1%时大。

汽车轮毂轴承不论是采用双列角接触球轴承或双列圆锥滚子轴承,滚动体与滚道之间的润滑状态特征均属于高应力弹性流体动力润滑。对于低断裂韧度的硬质颗粒在未进入Hertz接触中心区域就已经被压碎,因此不会对滚道表面造成直接破坏,其对轴承润滑的影响主要是通过压碎成的微小颗粒混入润滑脂后,随着润滑脂被卷吸入弹流润滑中心区域从而对油膜厚度和油膜压力分布造成影响<sup>[19-21]</sup>;当硬质颗粒断裂韧度大于滚道表面硬度时,硬质颗粒不能被碾压成微小颗粒,通常会在应力作用下产生挤压效应而使得滚道表面出现凹坑;同时,软质塑性颗粒也会对滚道表面产生破坏<sup>[22]</sup>。因此,图6和图7所示的试验结果很好地验证了上述研究结论,同时为轴承滚道表面失效机理的研究提供了试验依据。

此外,由于润滑脂与润滑油相比具有强烈的非牛顿流体性质,且轮毂轴承通常为终身润滑零部件,所以在使用过程中不能采用与油润滑零部件相同的方法对润滑脂中的杂质颗粒进行过滤,从而达到降

低杂质颗粒对润滑脂润滑性能和摩擦副表面产生不良影响的目的。基于本文对轮毂轴承润滑脂中杂质颗粒来源、粒径分布以及杂质颗粒对轴承润滑性能影响的研究结果,提高轮毂轴承使用寿命、降低滚道和滚动体表面磨损的方法主要包括以下 2 个方面:①对于外界混入的杂质颗粒,首先需要在润滑脂的生产、包装和运输过程中避免杂质颗粒的混入,其次是优化轴承密封结构和提高密封圈材料性能,从而避免轮毂轴承在工作过程中出现密封失效<sup>[23]</sup>;②对于轮毂轴承自生的杂质颗粒,首先是在轴承加工过程中采用表面改性技术提高滚道和滚动体表面的耐磨性能<sup>[24-25]</sup>,其次是选用高性能润滑脂从而减少摩擦副表面的摩擦磨损<sup>[26-27]</sup>。

### 3 结 语

(1)轮毂轴承润滑脂中存在着大量粒径分布范围较广、物化属性不同的杂质颗粒,且主要以粒径在 1~10  $\mu\text{m}$  之间的杂质颗粒为主,其产生机理主要是外界环境的侵入和轴承运转过程中摩擦副表面发生材料转移。

(2)不论是软质塑性杂质颗粒还是低断裂韧度的硬质杂质颗粒,均会对润滑脂的润滑性能产生不良影响,主要表现为润滑脂摩擦因数增大以及润滑油膜压力和厚度分布发生变化,但是产生这种不良影响的机理根据颗粒杂质的物理属性不同而有所不同。

(3)本文在研究固体颗粒对润滑脂润滑性能的影响时,选取的固体颗粒种类和粒径有限,同时未对试验钢球表面的微观摩擦磨损特性进行深入分析,因此还可以对这些方面开展进一步的研究,对解决滚动轴承失效和延长轴承使用寿命具有重要意义。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 张雪萍,陈以农,姚振强.轿车轮毂轴承城市道路载荷谱测试与分析[J].上海交通大学学报,2001,35(12): 1813-1816.  
ZHANG Xue-ping, CHEN Yi-nong, YAO Zhen-qiang. Test and analysis of hub bearings load spectrum for saloon car running in city road[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35 (12): 1813-1816. (in Chinese)
- [2] ZHANG X P, AHMED H, YAO Z. Multi-body contact modeling and statistical experimental validation for hub-bearing unit [J]. Tribology International,

- 2003,36(7):505-510.
- [3] 尹延国,焦明华,解挺,等.滑动轴承材料的研究进展[J].润滑与密封,2006(5):183-187.  
YIN Yan-guo, JIAO Ming-hua, XIE Ting, et al. Research progress in sliding bearing materials[J]. Lubrication Engineering, 2006(5):183-187. (in Chinese)
- [4] 夏新涛,王中宇,常洪.滚动轴承加工质量与振动的灰色关联度[J].航空动力学报,2005,20(2): 250-254.  
XIA Xin-tao, WANG Zhong-yu, CHANG Hong. Grey correlation of vibration with rolling bearing's machining quality[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20 (2): 250-254. (in Chinese)
- [5] 梁建钊,尹延国.无铅铜铋石墨轴承材料摩擦学特性研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2013,36(4):389-394.  
LIANG Jian-zhao, YIN Yan-guo. Study of tribological characteristics of lead-free copper-bismuth-graphite bearing materials[J]. Journal of Hefei University of Technology Natural Science, 2013, 36(4):389-394. (in Chinese)
- [6] 米红英,郭小川,杨廷栋,等.滚动轴承润滑脂的噪声特性及低噪声脂的合成[J].机械工程学报,2006,42(9):233-238.  
MI Hong-ying, GUO Xiao-chuan, YANG Ting-dong, et al. Rolling bearing greases' noise feature and development of low noise grease[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42 (9): 233-238. (in Chinese)
- [7] 毛大恒,石琛,俸颢,等.高温润滑脂中  $\text{WS}_2$  亚微米粒子的摩擦学性能研究[J].摩擦学学报,2010,30(1):68-74.  
MAO Da-heng, SHI Chen, FENG Hao, et al. Tribological performance of high temperature grease containing  $\text{WS}_2$  submicron particles[J]. Tribology, 2010, 30 (1): 68-74. (in Chinese)
- [8] SADA T, MIKAMI T. Effect of lubricant film thickness on ball bearing life under contaminated lubrication (part 1): life test for ball bearings in contaminated oil[J]. Journal of Japanese Society of Tribologists, 2004, 49(12): 948-953.
- [9] 赵联春,马家驹,马纯青,等.润滑对球轴承振动特性的影响[J].摩擦学学报,2003,23(5):421-425.  
ZHAO Lian-chun, MA Jia-ju, MA Chun-qing, et al. Effect of lubrication on the vibration characteristics of ball bearings[J]. Tribology, 2003, 23(5): 421-425. (in Chinese)
- [10] MIETTINEN J, ANDERSSON P. Acoustic emission

- of rolling bearing lubricated with contaminated grease [J]. Tribology International, 2000, 33(11): 778-787.
- [11] MARU M M, SERRATO-CASTILLO R, PADOVESE L R. Influence of oil contamination on vibration and wear in ball and roller bearings[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2007, 59(3): 137-142.
- [12] NIKAS G K. A state-of-the-art review on the effects of particulate contamination and related topics in machine-element contacts [J]. Journal of Engineering Tribology, 2010, 224(5): 453-479.
- [13] NIKAS G K. Effects of operating conditions and friction on the entrapment of spherical debris particles in elliptical contacts[J]. Journal of Engineering Tribology, 2007, 221(6): 727-741.
- [14] NIKAS G K. Debris particle indentation and abrasion of machine-element contacts: an experimentally validated, thermoelastoplastic numerical model with micro-hardness and frictional heating effects[J]. Journal of Engineering Tribology, 2013, 227(6): 579-617.
- [15] GABELLI A, MORALES-ESPEJEL G E, IOANNIDES E. Particle damage in Hertzian contacts and life ratings of rolling bearings[J]. Tribology Transactions, 2008, 51(4): 428-445.
- [16] SARI M R, VILLE F, HAIAHEM A, et al. Effect of lubricant contamination on friction and wear in an EHL sliding contact [J]. Mechanika, 2010, 82(2): 43-49.
- [17] 董凌, 陈国需, 李华峰, 等.  $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$  复合纳米添加剂的摩擦学性能及其对磨损表面的修复作用研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(6): 517-521.
- DONG Ling, CHEN Guo-xu, LI Hua-feng, et al. Tribological properties and self-healing action of  $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$  complex nanoparticles as an additive in a mineral oil[J]. Tribology, 2004, 24(6): 517-521. (in Chinese)
- [18] 刘维民. 纳米颗粒及其在润滑油脂中的应用[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(4): 265-267.
- LIU Wei-min. Application of nanoparticles in lubricants [J]. Tribology, 2003, 23(4): 265-267. (in Chinese)
- [19] 谢小鹏, 彭朝林, 陈树林. 固体颗粒对脂润滑线接触弹流影响的数值分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2012, 40(7): 51-56.
- XIE Xiao-peng, PENG Chao-lin, CHEN Shu-lin. Numerical analysis of influence of solid particles on elastohydrodynamic line contacts under grease lubrication [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(7): 51-56. (in Chinese)
- [20] 彭朝林. 汽车轮毂轴承脂润滑理论与润滑失效机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- PENG Chao-lin. Study on the grease lubrication theory and failure mechanism of wheel hub bearing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [21] KANG S Y, SADEGHI F, AI X L. Debris effects on EHL contact[J]. Journal of Tribology, 2000, 122(4): 711-720.
- [22] AI X L. Effect of debris contamination on the fatigue life of roller bearings[J]. Journal of Engineering Tribology, 2001, 215(6): 563-575.
- [23] 王正良. 滚动轴承的磁性流体润滑和密封研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 88-91.
- WANG Zheng-liang. Study on the lubrication and seal of a rolling bearing with ferrofluid [J]. Tribology, 2005, 25(1): 88-91. (in Chinese)
- [24] ETSION I. Modeling of surface texturing in hydrodynamic lubrication[J]. Friction, 2013, 1(3): 195-209.
- [25] 王文中, 黄志祥, 沈殿, 等. 圆柱形表面微坑阵列对点接触润滑摩擦性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(4): 371-376.
- WANG Wen-zhong, HUANG Zhi-xiang, SHEN Dian, et al. Effect of the patterned cylindrical dimple array on the tribological performance of lubricated point-contacts [J]. Tribology, 2012, 32(4): 371-376. (in Chinese)
- [26] 张博, 许一, 王建华, 等. 非皂基凹凸棒石润滑脂磨损修复机理研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(6): 697-704.
- ZHANG Bo, XU Yi, WANG Jian-hua, et al. Wear repairing mechanism of non-soap base attapulgite grease (NBAG) [J]. Tribology, 2014, 34(6): 697-704. (in Chinese)
- [27] WANG L B, WANG B, WANG X B, et al. Tribological investigation of  $\text{CaF}_2$  nanocrystals as grease additives [J]. Tribology International, 2007, 40(3): 1179-1185.