

# 高速润滑脂的弹流拖动特性

杨伯原, 郑培斌, 苏冰, 吴勇军, 邓四二

(洛阳工学院, 河南 洛阳 471039)

**[摘要]** 弹流拖动特性是润滑剂的重要性能, 它对滚动轴承的动态性能有着很大的影响。阐述了用自行设计的高速润滑脂弹流拖动力试验台在充分供脂条件下对国产 7007 和 7018 润滑脂进行的拖动力测试以及试验数据的处理, 并提出了可供工程上使用的这两种润滑脂的弹流拖动系数计算公式。

**[关键词]** 弹流润滑; 拖动力试验; 拖动特性

**[中图分类号]** TH117.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)04-0075-04

## 1 前言

润滑剂的弹流拖动力是高速轴承现代设计中不可缺少的参数, 然而它是弹流润滑中最难计算的量。因此, 在工程上拖动力问题经常依靠试验来解决。R. L. Smith 和 J. A. Walowit<sup>[1]</sup>(1972), P. K. Gupta<sup>[2]</sup>(1981), L. Houpert 和 L. Flamand<sup>[3]</sup>, J. I. McCool<sup>[4]</sup>(1990), 以及郑绪云<sup>[5]</sup>(1994) 分别对不同润滑油进行了拖动力的试验研究。D. Y. Hua 和 M. M. Khonsari<sup>[6]</sup>(1996) 对带有固体颗粒的液态润滑剂进行了拖动力的研究。而目前润滑脂在高速条件下弹流拖动特性的研究尚属空白。随着合成润滑脂的出现和不断发展, 润滑脂的极限速度指标——DN 值正在不断被突破。如航空轴承润滑脂、高速电主轴轴承润滑脂的 DN 值都超过了  $100 \times 10^4$ , 甚至达  $150 \times 10^4$ , 逐渐进入以往润滑脂的使用禁区<sup>[7]</sup>。因此, 对润滑脂在高速条件下的拖动特性的研究很有必要。本文选择高速轴承润滑脂 7007 和 7018 进行了不同载荷、速度及滑滚比条件下的拖动力测试, 并用数学方法进行处理, 获得了可供工程上使用的拖动系数和滑滚比关系的计算公式。

## 2 试验原理和试验方案

### 2.1 试验油品

本试验所用 7007 润滑脂为双酯锂基脂。这种脂是采用硬脂酸和 12-羟基硬脂酸的混合酸锂皂稠化双酯并加有结构改善剂和抗氧化剂制成, 相当于英国的 D·T·D825B 及 MIL-G-3278A 同类产品。具有优良的高低温性能、热稳定性和机械安定性。7018 润滑脂是采用十八烷基对苯二甲酸酰胺钠皂稠化合成油, 并加入抗氧、抗腐蚀等添加剂制成。属于宽温度范围润滑脂, 具有各种良好的性能。这两种润滑脂适用于各种高速轴承、高速长寿命的陀螺马达以及其他高速仪表轴承等的润滑。它们的物理参数具体如表 1 所示。

表 1 7007 和 7018 润滑脂参数

Table 1 Features of greases 7007 and 7018

	锥入度/ 0.1mm	滴点/ ℃	压力分油/ %	蒸发量/ %	粘度/ Pa·s
7007	66	178	23.46	0.36	790
7018	63		4.44	0.33	298

### 2.2 试验装置

本试验采用自行研制的拖动力试验机<sup>[8]</sup>, 主

**[收稿日期]** 2001-07-09; **修回日期** 2001-09-25

**[基金项目]** 河南省自然科学基金资助项目 (994052200)

**[作者简介]** 杨伯原 (1952-), 男, 上海市人, 洛阳工学院教授

结构原理如图1所示。在充分润滑的条件下，圆盘试件和球试件分别以速度  $U_1$  和  $U_2$  旋转。在一定的载荷下，接触区发生弹性变形并形成一定厚度的弹流润滑膜。定义平均速度  $U = (U_1 + U_2) / 2$ ，滑滚比  $s = (U_1 - U_2) / U$ 。弹流拖动力试验就是在给定载荷  $W$ 、滚动速度  $U$  的条件下，测量不同滑滚比时拖动力  $F$  的值，得出弹流拖动系数  $\mu$  ( $\mu = F/W$ ) 随滑滚比  $s$  变化的试验曲线。

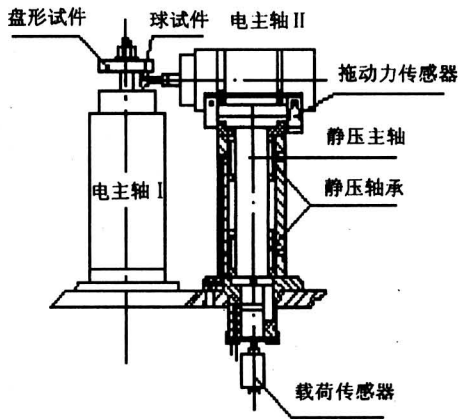


图1 拖动力试验装置

Fig.1 The construction of the rig for testing traction forces of greases

### 3 试验结果及特点

在试验中，模拟工况条件参数如下：

滚动速度：20 m/s, 25m/s, 30 m/s, 35m/s, 40m/s；

名义载荷：20 N, 40 N, 69 N, 98 N, 135N；

对应于最大赫兹应力：0.8 GPa, 1.0 GPa, 1.2 GPa, 1.35 GPa, 1.5 GPa。

在以上条件不同组合下进行测试，两种润滑脂各得到25组弹流拖动系数  $\mu$  随滑滚比  $s$  变化的试验曲线。图2和图3分别给出了7007和7018润滑脂在速度  $U = 20$  m/s、30 m/s和40 m/s的三组弹流拖动系数  $\mu$  随滑滚比  $s$  变化的试验点图。图4和图5为这两种润滑脂试验结果中各自的最大拖动系数和与之对应的最大赫兹应力的关系图。上述试验曲线具有如下特征：

1) 7007和7018润滑脂拖动系数  $\mu$  随滑滚比  $s$  的变化 从图2和图3中可以看出，两种润滑脂的曲线在小滑滚比时，拖动系数  $\mu$  随滑滚比  $s$  的增大近似呈线性上升；随着滑滚比  $s$  的继续增大，拖动

系数增大趋势变缓，呈现非线性特征；当达到某一滑滚比后，拖动系数  $\mu$  将趋近于一恒定值：7007润滑脂略有上升，7018润滑脂略有下降。

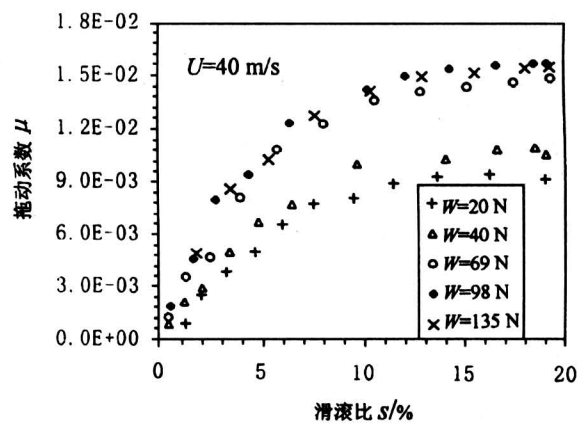
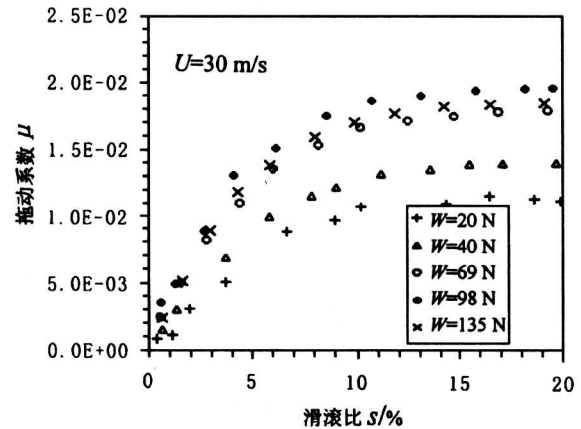
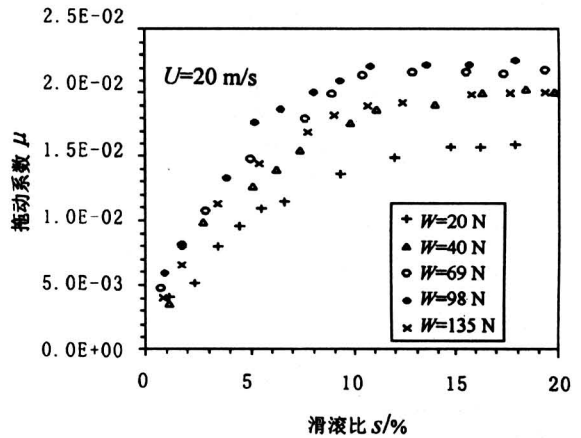


图2 7007 润滑脂试验结果

Fig.2 Result of test for the grease 7007

2) 7007和7018润滑脂拖动系数  $\mu$  随速度的变化 图2和图3表明，当载荷保持一定时，随着滚动速度的增加，拖动系数  $\mu$  将逐渐减小。

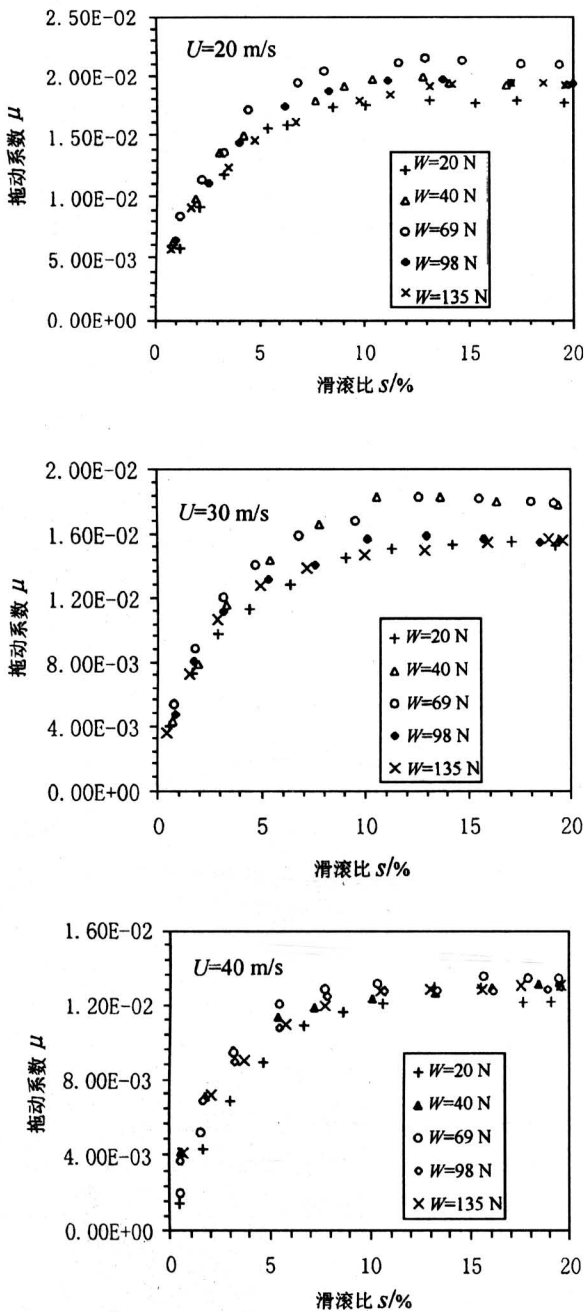


图 3 7018 润滑脂试验结果

Fig.3 Result of test for the grease 7018

3) 7007 和 7018 润滑脂拖拽系数  $\mu$  随载荷的变化 综合图 2 和图 3 可见, 在各种速度下, 不同载荷对 7018 润滑脂拖拽系数的影响明显小于对 7007 脂的影响, 说明 7018 脂对载荷不敏感, 具有较好的受载摩擦稳定性。

另外, 从图 4 和图 5 中可以看出, 当滚动速度

保持一定时, 随着载荷的变化, 7007 和 7018 润滑脂的拖拽系数  $\mu$  均将经历一个转折点: 7007 润滑脂大约在 1.35 GPa 附近, 而 7018 润滑脂大约在 1.2 GPa 附近, 这里称之为转折载荷。当载荷小于转折载荷时, 随着载荷的增大, 拖拽系数  $\mu$  将增大; 当载荷大于转折载荷时, 随着载荷的增大, 拖拽系数  $\mu$  将减小。

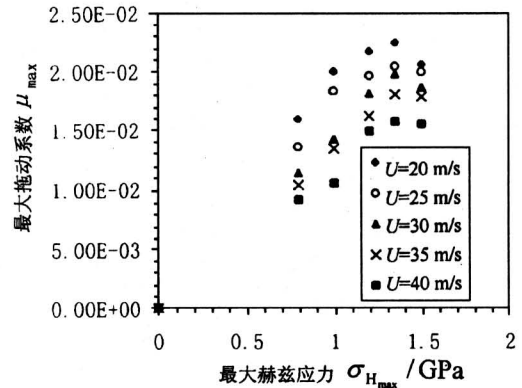


图 4 7007 润滑脂的  $\mu_{\max} - \sigma_{H_{\max}}$  图

Fig.4  $\mu_{\max}$  changing with  $\sigma_{H_{\max}}$  for the grease 7007

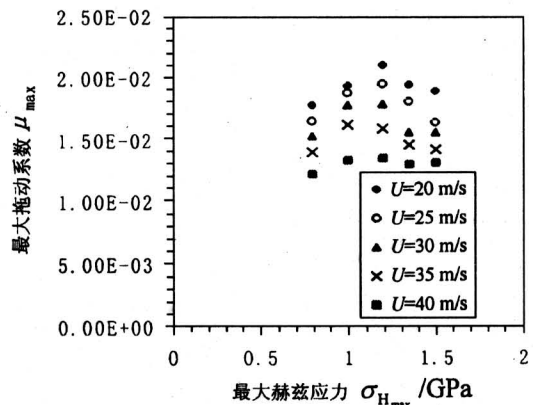


图 5 7018 润滑脂的  $\mu_{\max} - \sigma_{H_{\max}}$  图

Fig.5  $\mu_{\max}$  changing with  $\sigma_{H_{\max}}$  for the grease 7018

#### 4 7007 和 7018 润滑脂弹流拖动系数计算公式

根据试验点的变化趋势, 弹流拖动系数  $\mu$  和滑滚比  $s$  之间的关系近似于如下函数形式:

$$\mu = (A + Bs)e^{-Cs} + D, \quad (1)$$

用此模型对每一种工况条件下的试验点采用最小二

乘法进行拟合,可各得25组系数A、B、C、D值。

弹流润滑理论中,常以无量纲量表达数学计算公式。本文沿用如下两个无量纲参数:

载荷参数:

$$\bar{W} = W/(E^*R^2) \quad (2)$$

速度参数:

$$\bar{U} = \eta_m U/(E^*R), \quad (3)$$

式中,  $E^*$  为试件材料的当量弹性模量,  $R$  为综合曲率半径,  $W$  为载荷,  $U$  为平均速度,  $\eta_m$  为基础油常温下的粘度, 这里均为  $0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

按照弹流参数的计算惯例, 系数A、B、C、D可表示为无量纲量参数  $\bar{W}$ 、 $\bar{U}$  的指数函数, 见式(4)~(7):

$$A = A_0 \bar{W}^{A_1} \bar{W}_c^{A_2/\bar{W}-11} \bar{U}^{A_2} \quad (4)$$

$$B = B_0 \bar{W}^{B_1} \bar{W}_c^{B_2/\bar{W}-11} \bar{U}^{B_2} \quad (5)$$

$$C = C_0 \bar{W}^{C_1} \bar{W}_c^{C_2/\bar{W}-11} \bar{U}^{C_2} \quad (6)$$

$$D = D_0 \bar{W}^{D_1} \bar{W}_c^{D_2/\bar{W}-11} \bar{U}^{D_2}, \quad (7)$$

式中,  $\bar{W}_c$  为7007和7018润滑脂对应的无量纲转折载荷参数。经数学拟合  $\bar{W}_c$  可分别由式(8)、式(9)表达。

对于7007润滑脂:

$$\bar{W}_c = 1.975417 \times 10^{-6} + 6.493964 \times 10^3 \bar{U} - 3.240116 \times 10^{12} \bar{U}^2 \quad (8)$$

对于7018润滑脂:

$$\bar{W}_c = 8.850946 \times 10^{-6} - 1.850983 \times 10^4 \bar{U} + 1.458944 \times 10^{13} \bar{U}^2. \quad (9)$$

数学模型系数拟合公式(4)~(7)属于二元非线性函数, 通过数学变换将其化为二元线性函数, 然后和式(8)或式(9)一起将各自的25组系数A、B、C、D的值分别用最小二乘法进行拟合, 从而得出系数的数学表达式。

通过数学模型以及其系数拟合公式的建立和拟合, 就得到了便于工程上应用的高速润滑脂7007和7018弹流拖动系数的计算公式(1)。

对于7007润滑脂:

$$A = -1.478736 \times 10^{-7} \bar{W}^{7.775285 \times 10^{-3}} \bar{W}_c^{A_2/\bar{W}-11} \bar{U}^{-0.5615844} \quad (10)$$

$$B = 1.026666 \times 10^{-5} \bar{W}^{3.971968 \times 10^{-3}} \bar{W}_c^{B_2/\bar{W}-11} \bar{U}^{-0.4311928} \quad (11)$$

$$C = 1.560972 \times 10^{-2} \bar{W}^{8.289153 \times 10^{-3}} \bar{W}_c^{C_2/\bar{W}-11} \bar{U}^{-0.3306366} \quad (12)$$

$$\bar{U}^{-0.3306366} \quad (12)$$

$$D = 1.278736 \times 10^{-7} \bar{W}^{7.775285 \times 10^{-3}} \bar{W}_c^{D_2/\bar{W}-11} \bar{U}^{-0.5615844} \quad (13)$$

对于7018润滑脂:

$$A = -1.614903 \times 10^{-7} \bar{W}^{2.538857 \times 10^{-3}} \bar{W}_c^{A_2/\bar{W}-11} \bar{U}^{-0.5448607} \quad (14)$$

$$B = 6.006778 \times 10^{-6} \bar{W}^{3.069419 \times 10^{-3}} \bar{W}_c^{B_2/\bar{W}-11} \bar{U}^{-0.4763323} \quad (15)$$

$$C = 0.8511407 \bar{W}^{2.094837 \times 10^{-3}} \bar{W}_c^{C_2/\bar{W}-11} \bar{U}^{-0.1603263} \quad (16)$$

$$D = 1.614903 \times 10^{-7} \bar{W}^{2.538857 \times 10^{-3}} \bar{W}_c^{D_2/\bar{W}-11} \bar{U}^{-0.5448607} \quad (17)$$

在工程实际应用中, 将工况及有关参数代入式(2)和式(3)进行无量纲化, 然后对于7007润滑脂代入式(8)和式(10)~(13), 对于7018润滑脂代入式(9)和(14)~(17)计算出A、B、C、D的值, 最后代入式(1)便可得到该工况下的拖动系数与滑滚比间的关系式。

由多步拟合得出的7007和7018润滑脂拖动系数计算公式均具有很高的精度。经回归分析验证, 所有试验曲线与公式计算值的相关系数在0.9418以上, 且多数曲线在0.99以上。因此作为工程应用具有足够的精确度。

## 5 结论

1) 最大拖动系数: 在滚动速度20~40 m/s的变化过程中, 7007润滑脂为0.009~0.022, 7018润滑脂为0.012~0.021; 在载荷20~135 N的变化过程中, 7007润滑脂拖动系数的变化范围也较7018润滑脂大, 说明7007润滑脂的拖动系数受滚动速度和载荷的影响比7018润滑脂大。

2) 从纯滚动到滑滚比逐渐增大的过程中, 7018润滑脂的拖动系数比较容易就可以达到相对稳定的最大值, 而7007润滑脂的拖动系数上升趋势相对弱些。

3) 多组数据试验结果表明, 7007和7018高速润滑脂的弹流拖动系数都具有显著的非牛顿特征。本文采用指数曲线模型对其进行描述, 精度高、相关性好, 得到的拖动系数计算公式较为准确可靠, 可以作为设计依据应用于高速滚动轴承的设计。

(下转第82页)

1992

- [4] 侯定丕. 管理科学定量分析引论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1993
- [5] 汪应洛,李怀祖,陶谦坎. 系统工程理论方法与应用[M]. 北京:高等教育出版社, 1998

## On Operational Research Applications in China-Brazil Joint TT&C Satellites Engineering Project

Yang Tianshe, Chen Zhongbin

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**[Abstract]** As one of the most important cooperations between China and Brazil in high technology field, the engineering project of the China-Brazil joint TT&C supports to satellites is the first cooperation between the two countries in satellite TT&C supports. The engineering project was completed successfully, and it has provided China with plentiful experiences in international satellite TT&C cooperation, which are very useful for future cooperation. In this paper, the applications of operational research in the engineering project management are described.

**[Key words]** China and Brazil; TT&C satellite; engineering project; applications of operational research.

(上接第78页)

### 参考文献

- [1] Smith R L. Elastohydrodynamic traction characteristics of 5P4E polyphenyl ether[J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1973, (7): 353~360
- [2] Gupta P K. On the traction behaviour of several lubricants[J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1981, (1): 55~62
- [3] Houpert L, Flamand L. Rheological and thermal effects in lubricated EHD contacts[J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1981, (10): 526~532
- [4] McCool J I. Evaluating the Tevaarwerk - Johnson elastic/plastic traction model in the presence of lateral sliding and spin[J]. *Tribology Transactions*, 1990, (1): 122~130
- [5] Wu S, Cheng H S. Empirical determination of effective lubrication rheological parameters[J]. *Tribology Transactions*, 1994, (1): 138~145
- [6] Hua D Y, Khonsari M M. Elastohydrodynamic lubrication by powder slurries[J]. *Journal of Tribology*, 1996, (1): 67~73
- [7] 钟泰岗. 滚动轴承润滑脂的速度因素及潜力[J]. *轴承*, 2000, (8): 36~37
- [8] Yang Boyuan, Zheng Peibin. Development of an experimental rig with hydrostatic bearings for testing the EHD traction force of high-speed lubricants[J]. *Tribotest Journal*, 1998, (9): 31~38

## Behaviors of EHD Traction Characteristics for High-speed Lubricating Grease

Yang Boyuan, Zheng Peibin, Su Bing, Wu Yongjun, Deng Sier

(Luoyang Institute of Technology, Luoyang, Henan 471039, China)

**[Abstract]** The study on traction behaviors of lubricants which have great influences on dynamic properties of rolling bearings is a vital field of elastohydrodynamic lubrication research. In this paper, a concise description of the traction test pattern, the results of test and data processing of No. 7007 and No. 7018 high speed aviation grease are involved. In the end, two useful formulas are advanced to calculate the traction coefficients of No. 7007 and No. 7018 lubricating grease.

**[Key words]** EHD lubrication; traction test; traction behaviors