

4106 航空润滑油拖动特性研究

王燕霜^{1,2}, 杨伯原², 王黎钦¹, 郑培斌²

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471039)

摘要: 采用高速球-盘式拖动力试验装置测定了 4106 航空润滑油在不同载荷、滚动速度、入口油温及滑滚比下的拖动系数, 分析了润滑油的拖动特性, 建立了拖动系数的简单计算公式. 结果表明: 4106 航空润滑油的拖动系数随着载荷变化出现转折; 在高速和高压条件下, 4106 航空润滑油呈现非牛顿特性; 当入口油温较低时润滑油的热效应较显著; 随着载荷增大, 入口油温和滚动速度对拖动系数的影响减小; 理论计算结果同实测值吻合良好.

关键词: 润滑油; 拖动特性; 非牛顿流体; 理论计算

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2004)02-0156-04

润滑油膜在高速、高压及不同温度下的拖动特性是决定轴承动态特性的关键因素之一. 位于接触区内的润滑油在上述条件下表现出非牛顿特性, 因此可采用各种非牛顿流变模型来计算拖动力^[1~10]. 但现有的流变模型均存在不同程度的局限性, 从而导致理论计算值同试验测量值相差较大, 且计算复杂. 我们利用自行研制的拖动力试验装置^[11], 针对 4106 航空润滑油进行了多种工况条件下的试验, 并用曲线拟合法建立了较为便捷的计算拖动系数的公式. 相关研究结果对航空发动机主轴轴承动力学设计具有指导意义, 有助于推动弹流拖动理论研究.

1 实验部分

1.1 试验装置及方法

本试验台采用 GCr15 钢球和圆盘组成接触副以模拟轴承滚动体和滚道之间的接触. 钢球和钢盘试件表面粗糙度均方差 $< 0.02 \mu\text{m}$, 油膜厚度 $> 0.1 \mu\text{m}$, 故试件表面粗糙度对拖动力的影响可忽略不计^[11]. 图 1 示出了拖动力试验装置的结构示意图. 试球和试盘分别由水平和垂直放置的电机主轴 I 和 II 驱动. 在油压的作用下, 静压立轴向上运动, 从而使试球和试盘发生接触并加载, 载荷 p 的大小由静压立轴下端的载荷传感器采集并测量. 润滑油由安装在靠近试球和试盘接触表面的喷油嘴导入, 用配备温控仪的加热器控制入口油温 T . 当试球和试盘在充分润滑条件下高速旋转时, 通过调整电机主轴 I 和 II 的转速使试

球和试盘接触表面产生相对滑动速度 $\Delta v = v_2 - v_1$ (v_1 和 v_2 分别为球试件和盘试件在接触点的线速度), 试

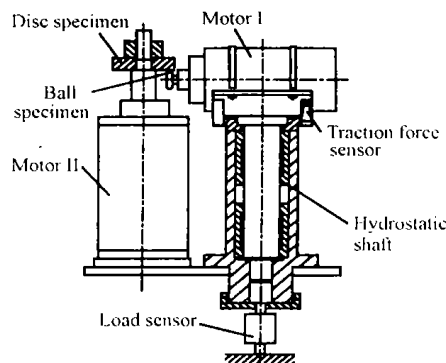


Fig 1 Construction of the test rig

图 1 试验装置结构示意图

盘通过接触区的油膜对试球产生切向拖动力 F , 从而使得试球连同电机主轴 I 和托架一起绕静压立轴的轴线发生偏转并压迫机架上的拖动力传感器来测定油膜拖动力. 依次调整电机主轴 I 和 II 的转速可测得不同滑滚比 $S = \Delta v / v$ [$v = (v_1 + v_2) / 2$, 表示试球和试盘的平均滚动速度] 下的拖动力 F , 进而可绘制出拖动系数 $\mu = F / p$ 随滑滚比 S 的变化曲线. 通过改变载荷、滚动速度或入口油温可得到不同工况条件下拖动系数随滑滚比变化的关系曲线.

1.2 试验条件

4106 航空润滑油的特性参数为: 室温动力粘度 $\eta_0 = 0.055 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、粘压系数 $\alpha = 1.85 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ 、粘

基金项目: 国家经贸委军工办基础研究资助项目 (96006); 教育部重点研究资助项目 (01072).

收稿日期: 2003-04-02; 修回日期: 2003-07-14/ 联系人杨伯原, e-mail: yangby@mail.haust.edu.cn.

作者简介: 杨伯原, 男, 1952 年生, 教授, 目前主要从事航空润滑油拖动特性的研究.

温系数 $\beta = 0.031531/^\circ\text{C}$, 热传导系数 $K = 0.0965788 \text{ N}/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$. 试验中选择工况参数为: 润滑油入口温度 20°C 、 75°C 和 125°C , 滚动速度分别为 25 m/s 、 30 m/s 、 35 m/s 、 40 m/s , 名义载荷为 20 N 、 29 N 、 41 N 、 53 N 、 69 N 、 88 N 、 110 N 、 135 N , 最大赫兹应力 0.8 GPa 、 0.9 GPa 、 1.0 GPa 、 1.1 GPa 、 1.2 GPa 、 1.3 GPa 、 1.4 GPa 、 1.5 GPa .

航空发动机主轴轴承在高速运转时的滑滚比小于 0.2 , 本文试验选定的滑滚比为 $0.00 \sim 0.2$.

2 结果及分析

2.1 润滑油拖动特性

在选定的工况条件下共测得 96 组拖动系数随滑滚比变化的曲线. 图2~图5给出了不同试验条件下

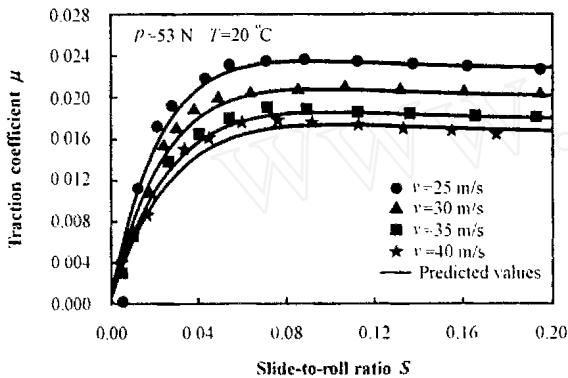


Fig 2 Comparison between experimental and predicted values of traction coefficient and influence of rolling speed on traction coefficient at medium load and ambient temperature

图2 中载、室温下拖动系数的预测值与实测值的比较及滚动速度对拖动系数的影响

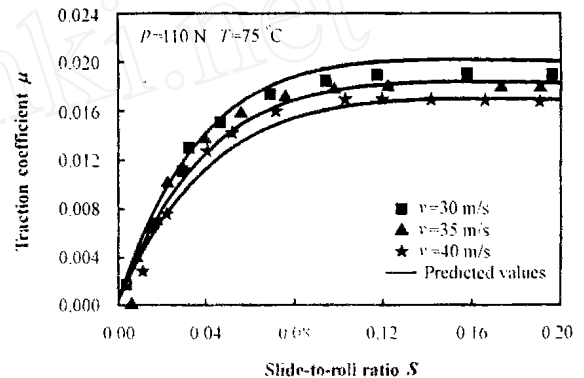


Fig 3 Comparison between experimental and predicted values of traction coefficient and influence of rolling speed on traction coefficient at high load and medium temperature

图3 高载、中温下拖动系数的预测值与实测值的比较及滚动速度对拖动系数的影响

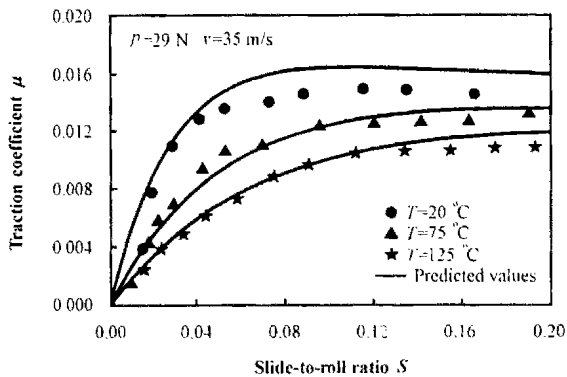


Fig 4 Comparison between experimental and predicted values of traction coefficient and influence of lubricating oil inlet temperature on traction coefficient at low load

图4 低载情况下拖动系数的预测值与实测值的比较及入口油温对拖动系数的影响

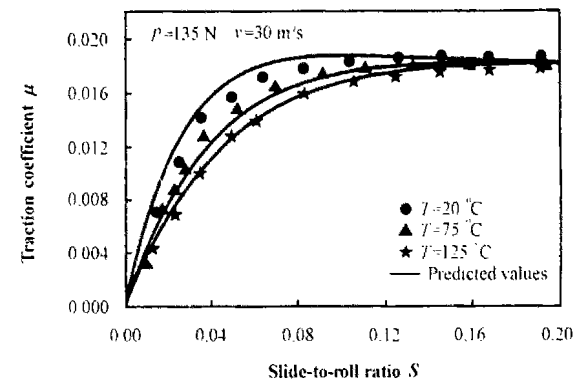


Fig 5 Comparison between experimental and predicted values of traction coefficient and influence of lubricating oil inlet temperature on traction coefficient at high load

图5 高载下拖动系数的预测值与实测值的比较及入口油温对拖动系数的影响

拖动系数随滑滚比变化的代表性曲线(点线表示试验测量值,实线表示理论预测值).可以看出,在不同工况条件下所得到的曲线具有相似的特征.在小滑滚比范围内,拖动系数 μ 随滑滚比 S 增加呈近似线性增加;当滑滚比 S 大于 0.03 时,随着滑滚比 S 增加, μ 缓慢增大,两者之间呈现非线性关系,此时润滑油表

现出明显的非牛顿特性;当 μ 值达到最大值后,随着滑滚比 S 增加 μ 值保持不变或略微减小.这是由于润滑油的流变特性以及在高压接触区内摩擦热使得润滑油粘度相对降低所致.当润滑油温度为 75°C 和 125°C 时,随着滑动速度增加, μ - S 曲线未出现下降趋势,这表明当入口油温较高时,热效应对拖动系数

的影响较小.当润滑油温度相同时,不同载荷下的拖动曲线的形状基本相同,这表明载荷引起的热效应较弱.

对比图(2和3)可知,当载荷和入口油温保持不变时,油品的拖动系数 μ 随滚动速度 v 增大而减小.这是由于滚动速度增大使得接触表面温度升高而导致润滑油粘度降低所致.随着载荷增大,滚动速度对拖动系数的影响变小,因此载荷对润滑油粘度的影响大于滚动速度的影响.对比图(4和5)可知,在给定的载荷和滚动速度下,拖动系数 μ 随入口油温增大而减小;随滑滚比的增加,入口油温对拖动系数的影响越来越小.当载荷较大时,温度对拖动系数的影响较小.总体而言,随滑动速度的增加,滑动速度对该润滑油粘度的影响超过了入口油温的影响,因此可以认为4106航空润滑油对载荷较敏感.从图6可知,当载荷

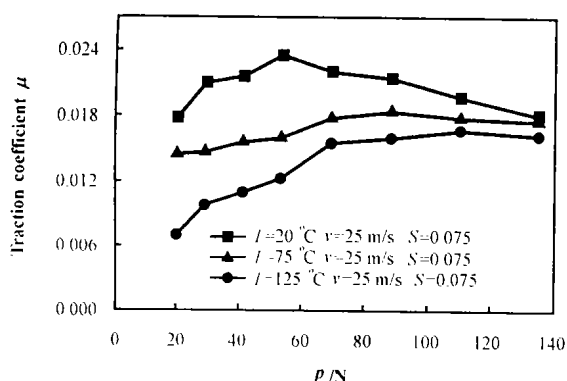


Fig 6 Variation in traction coefficient with normal load

图6 拖动系数随法向载荷变化的关系曲线

p 小于某一转折载荷 p_c 时,油品拖动系数随载荷增加而增大;当载荷 p 超过转折载荷 p_c 后,拖动系数随载荷增加而减小.转折载荷 p_c 随入口油温 T 的变化而变化(见表1).这说明当载荷超过转折载荷后,拖

表1 转折载荷 p_c 与入口油温 T 的关系

Table 1 Critical load versus lubricating oil inlet temperature

$T/^\circ\text{C}$	p_c/N	$\mu(\times 10^{-10})$	$\overline{p_c}(\times 10^{-6})$
20	53	1.201061	2.329952
75	88	4.503979	3.868599
125	110	7.506631	4.835749

动力的增加逐渐变缓,润滑油呈现塑性化趋势.润滑油温度越低,转折载荷越小,相应的润滑油塑性化趋势越强.

2.2 拖动系数计算公式的建立和拟合

分析上述拖动系数试验曲线变化规律并结合工

程经验,可以确定拖动系数 μ 和滑滚比 S 之间的关系如下:

$$\mu = (A + BS) e^{-\frac{p}{p_c}} + D. \quad (1)$$

$$A = A_0 \overline{p_c}^{\frac{1}{A_1}} \overline{v}^{\frac{1}{A_2}} \overline{T}^{\frac{1}{A_3}}. \quad (2a)$$

$$B = B_0 \overline{p_c}^{\frac{1}{B_1}} \overline{v}^{\frac{1}{B_2}} \overline{T}^{\frac{1}{B_3}}. \quad (2b)$$

$$C = C_0 \overline{p_c}^{\frac{1}{C_1}} \overline{v}^{\frac{1}{C_2}} \overline{T}^{\frac{1}{C_3}}. \quad (2c)$$

$$D = D_0 \overline{p_c}^{\frac{1}{D_1}} \overline{v}^{\frac{1}{D_2}} \overline{T}^{\frac{1}{D_3}}. \quad (2d)$$

$$\overline{p_c} = L \overline{p_c}^2 + M \overline{p_c} + N. \quad (2e)$$

$$\text{无量纲载荷参数 } \overline{p_c} = p / (E^* R^2). \quad (3a)$$

$$\text{无量纲速度参数 } \overline{v} = \eta_0 v / (E^* R). \quad (3b)$$

$$\text{无量纲温度参数 } \overline{T} = T \sqrt{k\beta\eta_0} / (E^* R). \quad (3c)$$

其中: E^* 为当量弹性模量, R 为当量半径. $\overline{p_c} = p_c / (E^* R^2)$ 是转折载荷 p_c 的无量纲参数,其随温度的变化见表1.利用非线性最小二乘法,用式(1)对各种工况下的试验数据进行拟合,确定出96组A、B、C、D值.通过分析A、B、C、D的变化规律,进而利用式(2)建立其表达式,其中无量纲载荷、速度及温度可利用式(3)求出.

利用最小二乘法,可以得到 $L = -1.945610 \times 10^{12}$, $M = 5.555780 \times 10^3$, $N = 1.761100 \times 10^{-6}$,同时可以求得 $A_0 \sim A_3$, $B_0 \sim B_3$, $C_0 \sim C_3$, $D_0 \sim D_3$ 的值(见表2).

对比图(2~5)给出的拖动系数计算值和试验测量值可知,拖动系数预测值同实验测量值吻合良好,表明所建立的计算公式合理可用.在本文试验条件范围内,拖动系数的理论预测值同试验测量值之间的误差小于17%,明显小于拖动力计算领域理论计算结果误差(30%).

3 结论

a. 4106航空润滑油在高温高压下表现出显著的非牛顿特性,在低温高压下呈现塑性化趋势.当入口油温较低时润滑油的热效应较显著,载荷对热效应的影响很小.载荷越高,拖动系数对入口油温和滚动速度越不敏感.随着滑滚比增加,入口油温对拖动系数的影响显著减小.

b. 4106航空润滑油的拖动系数随着载荷变化出现转折;当载荷小于转折载荷时,拖动系数随载荷增加而增大,此后随载荷增加而减小;拖动系数随滚动速度和入口油温的增大而减小.

c. 建立了拖动系数计算公式,基于计算公式的拖动系数预测值同实验测量值吻合良好.故所建立的公式可用以指导滚动轴承动力学设计.

表 2 拖动系数计算公式中参数的回归值

Table 2 Regression values of the parameters in the formulae of traction coefficient

Parameters	<i>i</i>				Correlation coefficients
	0	1	2	3	
<i>Ai</i>	- 1.140123 ×10 ⁻⁷	0.01040735	- 0.5306184	- 0.03840747	0.933
<i>Bi</i>	1.116875 ×10 ⁻¹¹	0.01460056	- 0.6593296	- 0.4458718	0.927
<i>Ci</i>	3.811010 ×10 ⁻⁶	0.009827884	- 0.3987678	- 0.3254213	0.920
<i>Di</i>	1.140123 ×10 ⁻⁷	0.01040735	- 0.5306184	- 0.03840747	0.933

参考文献：

[1] Bair S, Khonsari M, Winer W O. High-pressure rheology of lubricants and limitations of the reynolds equation[J]. Tribology International, 1998, 31(10) : 573-586.

[2] Fang N, Chang L, Webster M N, *et al.* A non-averaging method of determining the rheological properties of traction fluids[J]. Tribology International, 2000, 33(11) : 751-760.

[3] Olver A V, Spike H A. Prediction of traction in elastohydrodynamic lubrication[J]. Proc Inst Mech Eng, 1998, 212(5) : 321-332.

[4] Muraki M, Dong D. Derivation of basic rheological parameters from experimental elastohydrodynamic lubrication traction curves of low-viscosity lubricants[J]. Proc Inst Mech Eng, 1999, 213(1) : 53-61.

[5] Fang N, Chang L, Jonson G J. An experimental/ theoretical approach to modeling the viscous behavior of liquid lubricants in elastohydrodynamic lubrication contacts[J]. Proc Inst Mech Eng, 2001, 215(4) : 311-318.

[6] Bair S, McCabe C, Cummings P T. Calculation of viscous EHL traction for squalane using molecular simulation and rheometry[J]. Tribology Letters, 2002, 13(4) : 251-254.

[7] Wang X L (王晓力), Gui C L (桂长林), Zhu Tingbin (朱廷斌), *et al.* Study on rheological parameters of domestic lubricating grease (国产润滑脂流变参数的确定与研究)[J]. Tribology (摩擦学学报), 1997, 17 (3) : 232-235.

[8] Yu H Y (于红英), Zhang P S (张鹏顺), Huang Hao (黄浩), *et al.* Numerical analysis for line contact EHL using a general non-Newtonian fluid model (非牛顿通用模型线接触弹流润滑的数值分析)[J]. Tribology (摩擦学学报), 2000, 20(1) : 55-58.

[9] Hoglund E. Influence of lubricant properties on elastohydrodynamic lubrication[J]. Wear, 1999, 232 (2) : 176-184.

[10] Bair S. The nature of the logarithmic traction gradient[J]. Tribology International, 2002, 35 (9) : 591-597.

[11] Yang B Y, Zheng P B, Yang R P, *et al.* Development of an experiment rig with hydrostatic bearings for testing the EHD traction force of high-speed lubricants[J]. Journal of Tribotest, 1998, 5 (1) : 31-38.

Traction Behavior of 4106 Aviation Lubricating Oil

WANG Yan-shuang^{1,2}, YANG Bo-yuan², WANG Li-qin¹, ZHENG Pei-bin²

(1. School of Mechatronical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Mechatronics Engineering Henan University of Science and Technology, Luoyang 471039, China)

Abstract : The traction coefficients of 4106 aviation lubricating oil were measured at various normal loads, rolling speeds, lubricant inlet temperatures, and slide-to-roll ratios, on a ball-disk traction rig. The traction behavior of the oil was analyzed and a new formula to calculate the traction coefficient was established. It was found that the tested oil showed significant non-Newtonian characteristics and there existed a critical normal load at which the traction coefficient assumed a transition with increasing normal load. The thermal effects in the contact zone became more prominent at a relatively lower lubricant oil inlet temperature. The higher the normal load, the smaller the effect of the lubricating oil inlet temperature and rolling speed on the traction coefficient. Moreover, the prediction results based on the established formula agreed well with the experimental ones. Thus the establish formula could be applied to guide the dynamics design of rolling bearings.

Key words : lubricant; traction behavior; non-Newtonian fluid; theoretical calculation

Author : YANG Bo-yuan, male, born in 1952, Professor, e-mail: yangby@mail.haust.edu.cn