

文章编号: 1000-8055(2006)01-0181-05

高压高剪切率下润滑剂剪切弹性模量的确定

王燕霜^{1,2}, 杨伯原², 王黎钦¹

(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, 河南 洛阳 471039)

摘要: 在自行研制的球盘式拖动力试验台上, 测得了 HKD-1 型航空润滑油的拖动力; 给出了高压高剪切率下滚子- 润滑膜系统有效剪切弹性模量的计算公式; 推导出了系统有效剪切弹性模量与润滑剂剪切弹性模量之间的关系式; 以 HKD-1 型航空润滑油为例, 计算了多种工况条件下系统有效剪切弹性模量及润滑剂本身的剪切弹性模量。结果表明: 系统有效剪切弹性模量和润滑剂剪切弹性模量随压力的增大而增大, 随入口油温和滚动速度的增大而减小; 压力越大, 入口油温和滚动速度越小, 滚子的柔量对剪切变形的贡献越大。

关键词: 航空、航天推进系统; 润滑剂; 流变参数; 剪切弹性模量; 高剪切应变率

中图分类号: V 317; TH 117

文献标识码: A

Determination of Lubricant Elastic Shear Modulus under Conditions of High Pressure and High Shear Rates

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

(1. School of Mechatrical Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

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

Abstract: Traction coefficients of the new aviation lubrication oil were measured on a self-made test rig. The formula for calculating the elastic shear modulus of rollers with lubricant under conditions of high pressure and high shear rates was presented. The expressions relating effective elastic shear modulus of rollers with lubricant to the lubricant elastic shear modulus were derived. Using the new aviation lubrication oil as an example, the effective elastic shear modulus were calculated in various operating conditions. The results show that both the elastic shear modulus and the lubricant elastic shear modulus increase with the increase of pressure, and the higher the pressure and the lower the temperature and rolling speed, the greater the effect of the tangential compliance on shear deformation will be.

Key words: aerospace propulsion system; lubricant; rheological parameters; elastic shear modulus; high shear rates

收稿日期: 2005- 01- 18; **修订日期:** 2005- 08- 22

基金项目: 国家“十五”重大科技攻关项目(HK-2002-043/6); 河南科技大学青年基金资助(2003QN 05)

作者简介: 王燕霜(1972-), 女, 河南洛阳人, 哈尔滨工业大学机电工程学院博士生, 副教授, 主要从事摩擦学及润滑理论的研究

为了逐步建立起更加完备的润滑油性能评价标准及相应的数据库,最需要填补的空白就是润滑油的高压流变性能参数,润滑剂的剪切弹性模量就是其中之一。Barlow 等^[1]提出了利用线性小应变区的高频剪切试验来测量润滑剂的剪切弹性模量。Bair 和W inner^[2]在高压容器中测得了润滑剂的剪切弹性模量。上述两种方法适合于低压低剪切率情况,如Bair 和W inner^[2]测量的压力范围为 0.275~0.59 GPa,温度范围为-27°C~29°C,剪切应变率低于 10^3 。当压力高于1 GPa,剪切率高于 10^3 ,测量润滑剂的剪切弹性模量,目前为止只有利用拖动力试验机来进行测量^[3~7]。在很多文献中^[4,6],对于系统有效剪切弹性模量,都是假设小应变时润滑剂为完全弹性情况下得出的。文献[8]中指出润滑剂剪切弹性模量与系统剪切模量的比值 G/G_e ,与干摩擦和有润滑摩擦下拖动曲线的斜率之比 m/m 及弹性常数 c 有关,可以通过求解位移相容性方程来获得。因为 c 和 m 难以准确确定,及求解位移相容性方程较复杂,所以该方法不适合工程应用。润滑剂在大多数工况条件下为粘弹性,仅在个别极限情况下表现为完全弹性,因此找到润滑剂粘弹性条件下的剪切弹性模量具有重要的意义。另外,通过拖动力试验机只能测得滚子-润滑剂系统的有效剪切弹性模量,无法得到润滑剂本身的剪切弹性模量。本文作者,给出了润滑剂为粘弹性时的系统有效剪切弹性模量的计算方法;建立了便于工程应用的系统有效剪切弹性模量和润滑剂剪切弹性模量之间的关系式;并以 HKD-1 型航空润滑油为例,进行了拖动力测量和剪切弹性模量计算。润滑剂剪切弹性模量的数据,可以为更加准确的估计诸如齿轮,滚动轴承等高副接触零件之间的摩擦力提供计算依据;而且,可对摩擦牵引装置在高压高剪切率下工作特性的了解提供指导意义。

1 试验

本试验采用自行研制的模拟航空发动机主轴承的拖动力试验机^[9]。关于试验机的结构和拖动力的测量方法可参考文献[9]。试验机中的两个滚子分别为球和盘试件。拖动力试验就是在给定压力 p 、滚动速度 $v = (v_1 + v_2)/2$ 和入口油温 T 的条件下,测量不同滑滚比时拖动力 F 的值,得出拖动系数 $\mu (\mu = F/p)$ 随滑滚比变化的试验曲线。不同接触压力,滚动速度和入口油温条件下,重复拖动力的测量循环。

试验机的性能指标为:球盘滚子表面的滚动速度为 $v = 10 \sim 50 \text{ m/s}$,并可无级调速;滚子表面的滑滚比 $s = 0 \sim 0.20$;滚子表面的最大赫兹压力为 $p_0 = 0.75 \sim 1.5 \text{ GPa}$;润滑油的入口油温为 $T = 20 \sim 125^\circ\text{C}$;球和盘的材料为 GCr15 钢,两者的综合表面粗糙度小于 $0.02 \mu\text{m}$;受载接触区处于全膜弹流润滑状态 $\lambda > 3$ 。

HKD-1 型航空润滑油的性能指标如下:室温为 27°C 时,动力粘度为 $\eta = 0.37 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,粘压系数为 $\alpha = 1.31 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$,粘温系数为 $\beta = 0.021^\circ\text{C}^{-1}$ 。

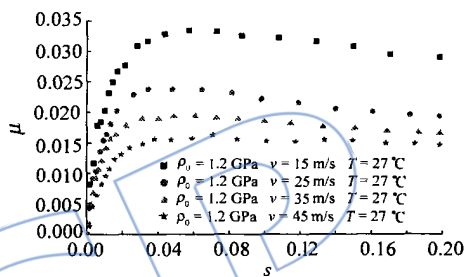


图1 拖动力系数-滑滚比试验曲线

Fig 1 The experimental curves of traction coefficients versus slide-to-roll ratios

图1给出了几条试验代表曲线,曲线中的线性段数据被用来计算剪切弹性模量。

2 系统有效剪切弹性模量的确定

在实际高压高剪切率润滑条件下,由于球盘接触表面的弹性变形,拖动力产生的应变有相当一部分来自滚子的贡献。由拖动力系数-滑滚比关系曲线的线性段斜率得到的剪切弹性模量 G_e 是滚子-润滑膜系统的剪切弹性模量。

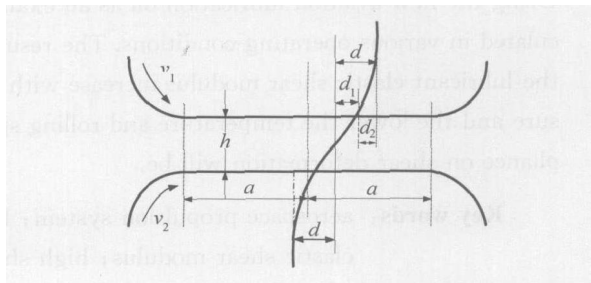


图2 滚子-润滑膜系统的剪切变形示意图

Fig 2 The sketch of the combined shear deformation of lubricant and surfaces of rollers

图2给出了滚子-润滑膜系统的剪切变形示意图,其中, v_1 和 v_2 为两个滚子的圆周线速度, a

为接触区半宽, h 为油膜厚度。接触区内任意一点处两滚子之间的相对切向变形 $2d$ 由两个分量组成: 油膜内的剪切变形 $2d_1$, 滚子的切向变形 $2d_2$ 。显然, 可得下式:

$$\Delta v = v_1 - v_2 = 2v = 2\dot{d}_1 + 2\dot{d}_2 \quad (1)$$

滚子- 润滑膜系统总的剪切应变率为:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta v}{h} = \frac{2\dot{d}_1 + 2\dot{d}_2}{h} \quad (2)$$

剪切弹性模量的测量必须以润滑剂实现粘弹转变为前提。Johnson^[10]等将Deborah 数超过1 作为润滑膜实现粘弹转变的标志。因此本文求解系统剪切弹性模量时, 假设流体在剪应变率较小的时候, 表现为线性粘弹性, 该特性可用线性Maxwell 公式来表示:

$$\frac{2\dot{d}_2}{h} = \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta} \quad (3)$$

其中: τ , η 和 G 分别为剪应力、润滑剂的粘度和剪切弹性模量。

滚子的切向变形可用下式来求得:

$$2d_2 = \tau/K \quad (4)$$

其中, 球盘滚子表面的切向刚度为 K 。公式(4)两边求导, 并同时除以 h 得:

$$\frac{2\dot{d}_2}{h} = \frac{d\tau}{K h dt} \quad (5)$$

所以, 滚子- 润滑膜系统总的剪切应变率可表示为:

$$\frac{\Delta v}{h} = \frac{(1/G + 1/Kh)d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta} \quad (6)$$

令 $1/G_e = 1/G + 1/Kh$, 则得:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\tau}{G_e dt} + \frac{\tau}{\eta} \quad (7)$$

其中, G_e 为滚子- 润滑膜系统有效剪切弹性模量。

即使在拖动力试验得到的拖动曲线中, 不能区分线性区的剪切是弹性还是粘弹性, 但在粘度与压力和温度之间的关系确定了之后(文中的粘度采用Roelands 粘度公式), 利用(7)式可以从拖动曲线的线性部分导出系统的有效剪切弹性模量。如果流体以平行于滚动方向的稳定速度流动, 则:

$$d/dt = v(d/dx) \quad (8)$$

球盘滚子- 润滑膜系统的剪切应变如下:

$$\begin{aligned} \gamma &= \int \dot{\gamma} dt = \int \left(\frac{v}{G_e} + \frac{d\tau}{dx} + \frac{\tau}{\eta} \right) \frac{dx}{v} = \\ &= \int \frac{dx}{G_e} + \int \frac{\tau dx}{\eta} \end{aligned} \quad (9)$$

因为从拖动力试验机上仅能获得平均剪切应力, 通常情况下, 我们取所有参数的平均值。线接触情况下, 接触区内的平均剪切应变可用下式来表示:

$$\bar{\gamma} = \bar{\tau}/\bar{G}_e + \bar{\tau}a/\bar{\eta} \quad (10)$$

对于圆点接触, 接触区内的平均剪应变可表示为:

$$\bar{\gamma} = \bar{\tau}/\bar{G}_e + 8\bar{\tau}r/3\pi\bar{\eta} \quad (11)$$

这里 r 为接触圆半径。

将 $\dot{\gamma} = \Delta v/h$, $\bar{\tau} = \mu p$, $\bar{\gamma} = \Delta va/vh$ 代入式(10)得线接触情况下系统有效剪切弹性模量:

$$\bar{G}_e = \frac{\bar{p}m h}{a(1 - \bar{p}m h/v\bar{\eta})} \quad (12)$$

将 $\dot{\gamma} = \Delta v/h$, $\bar{\tau} = \mu p$, $\bar{\gamma} = 8\Delta va/3\pi v r$ 代入式(11)得圆点接触情况下系统有效剪切弹性模量:

$$\bar{G}_e = \frac{3\pi\bar{p}m h}{8r(1 - \bar{p}m h/v\bar{\eta})} \quad (13)$$

其中, $m = \mu/s$ 为图1 中拖动曲线线性区斜率, h 为油膜厚度。本文中油膜厚度的计算考虑了热效应的影响, 采用如下公式:

$$\begin{aligned} h &= \Phi_r 2.69(\eta_v/E\dot{k})^{0.67}(\alpha E)^{0.53} \cdot \\ &\quad (W/E\dot{k})^{-0.067}(1 - 0.61e^{-0.73k})R \end{aligned}$$

其中: Φ_r ^[11] 为热修正因子。

$$\Phi_r = \frac{1 - 13.2(p_0/E)L^{0.42}}{1 + 0.213(1 + 2.23S^{0.83})L^{0.64}}$$

3 润滑剂剪切弹性模量的确定

要得到润滑剂本身的剪切弹性模量值, 应从系统剪切弹性模量 G_e 中除掉滚子接触表面切向变形的影响。将公式(8)代入公式(6), 则:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{(h/G + 1/K)d\tau}{dx} + \frac{\tau h}{\eta} \quad (14)$$

当 $h \rightarrow 0$ 时, 即无润滑状态, 上述方程简化为:

$$\Delta v/v = d\tau/K dx \quad (15)$$

对于线接触, 边界条件为 $x = -a$ 时, $\tau = 0$, 上式两边积分可得:

$$\tau = K(x + a)\Delta v/v \quad (16)$$

在区间 $[-a, a]$ 上积分, 可得单位宽度上的拖动力:

$$F = \int_{-a}^a \tau dx = 2K a^2 \frac{\Delta v}{v} \quad (17)$$

对于圆点接触, 边界条件为 $x = -\sqrt{r^2 - y^2}$ 时, $\tau = 0$, 公式(15)两边积分得:

$$\tau = K\left(x + \sqrt{r^2 - y^2}\right) \Delta v/v \quad (18)$$

在接触圆内积分可得到拖动力的大小:

$$F = \int_{-r}^r dy \int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{\sqrt{r^2-y^2}} \tau dx = \frac{8}{3} K r^3 \frac{\Delta v}{v} \quad (19)$$

根据文献[12], 无润滑的弹性固体滚动时的蠕变方程为:

对于线接触

$$F = \pi E' a \Delta v / 4v \quad (20)$$

对于圆点接触

$$F = 2.15(1 - \nu^2) E' l^2 \Delta v / v \quad (21)$$

其中, E' 为两滚子的综合弹性膜量, ν 为泊松比。公式(17)和(20)相比较, 可得线接触时滚子表面的刚度:

$$K = \pi E' / 8a \quad (22)$$

比较(19)和(21)可得圆点接触时滚子表面的刚度:

$$K = 6.45(1 - \nu^2) E' / 8r \quad (23)$$

所以, 对于线接触:

$$1/G_e = 1/G + 8a/\pi h E' \quad (24)$$

圆点接触情况下, 对于钢盘取泊松比 $\nu = 0.3$, 则 $K = 0.56 E' / r$, 可得:

$$1/G_e = 1/G + 1.77r/h E' \quad (25)$$

测得系统剪切弹性模量 G_e 之后, 根据公式(24)和(25)可分别求得线接触和圆点接触情况下润滑剂本身的剪切弹性模量 G 。

4 结果分析

试验中球盘之间的接触属于圆点接触, 球盘材料的泊松比为 0.3, 剪切弹性模量为 207 MPa。根据拖动曲线, 利用式(13)可求出滚子-润滑膜系统的剪切弹性模量, 利用公式(25)可求得润滑油本身的剪切弹性模量。图3~图5给出了 HKD-1 型航空润滑油系统剪切弹性模量和润滑剂剪切弹性模量随压力和入口油温及滚速的变化图。

从图中可以看出系统有效剪切弹性模量和润滑剂剪切弹性模量随压力的增大而增大, 随入口油温和滚动速度的增大而减小。这与油膜的一般特性相符合: 随入口油温增大以及压力的减小, 润滑油的特性趋于粘性。从图中还可以看出, 压力越大, 入口油温和滚动速度越小, 系统剪切弹性模量与润滑剂本身的剪切弹性模量之间的差值越大, 说明压力越大, 入口油温和滚动速度越小, 盘的柔量对剪切变形的贡献越大。利用上述方法获得润

滑剂的剪切弹性模量的值比稳态法^[1,2]中的值要小很多, 主要原因如下: 高压高剪切率润滑环境不是弹性测量的标准环境, 润滑剂在通过接触区时没有达到平衡状态; 接触区中润滑剂并非真正的完全弹性体, 润滑剂通过接触区时受温度和压力变化的影响, 在入口和出口区为粘性, 在靠近接触中心区为弹性; 另外, 本文计算中考虑了入口剪切热的影响。所有这些因素都使得润滑剂的弹性特

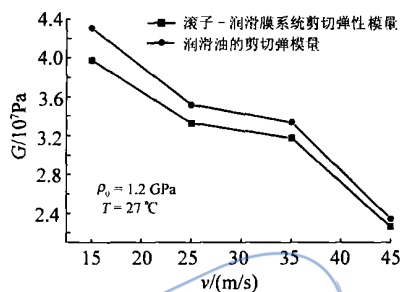


图3 剪切弹性模量随滚动速度的变化

Fig 3 Variation in elastic shear modulus with rolling velocities

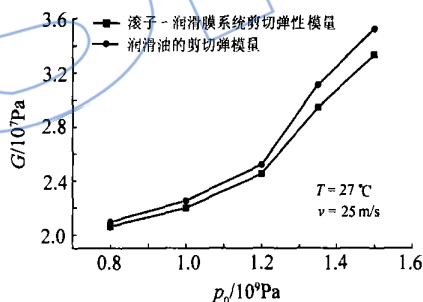


图4 剪切弹性模量随最大赫兹压力的变化

Fig 4 Variation in elastic shear modulus with the maximum Hertzian pressures

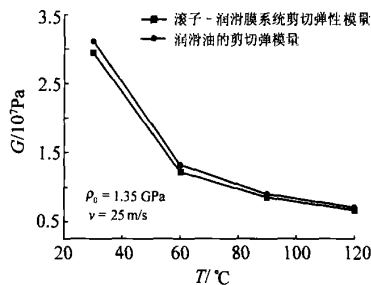


图5 剪切弹性模量随入口油温的变化

Fig 5 Variation of elastic shear modulus with the lubricant inlet temperatures

性变得不十分显著, 但这却反映了实际工况下润滑剂的真正特性。

图3中在滚动速度分别为15, 25, 35和45 m/s时润滑剂剪切弹性模量与系统剪切弹性模量的比值 G/G_e , 采用本文的方法计算出的结果分别为1.073, 1.056, 1.048, 1.032, 按照文献[8]中的方法计算出的结果分别为1.062, 1.049, 1.037, 1.028。两种计算方法得到的结果相近, 这说明本文给出的公式(24)和(25)是正确的。

5 结 论

(1) 由拖动力试验曲线的斜率及文中推导的公式(12和13)可以分别求得线接触和圆点接触情况下, 润滑剂发生粘弹转变时滚子-润滑膜系统的有效剪切弹性模量。

(2) 根据本文推导的系统剪切弹性模量与润滑剂剪切弹性模量之间的关系式(24)和(25)可以分别求得线接触和圆点接触时润滑剂本身的剪切弹性模量, 公式形式简单, 便于工程应用。

(3) 系统有效剪切弹性模量和润滑剂剪切弹性模量随压力的增大而增大, 随入口油温和滚动速度的增大而减小; 压力越大, 入口油温和滚动速度越小, 盘的柔量对剪切变形的贡献越大。

(4) 高压高剪切应变率下润滑剂剪切弹性模量的数值将填补国内该方面数据的空白, 是建立润滑油性能评价标准和数据库的必须数据, 也是润滑装置中摩擦力计算的必须参数之一。

参考文献

- [1] Barlow A J, Harrison G, Irving J B, et al The Effect of Pressure on the Viscoelastic Properties of Liquids[J]. *Proc Roy Soc, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1972, 327: 403
- [2] Bair S, Winer W O. Some Observations in High Pressure Rheology of Lubricants[J]. *Trans ASME J Lubric Technol*, 1982, 104(3): 357~364
- [3] Olver A V, Spikes H A. Prediction of Traction in Elastohydrodynamic Lubrication[J]. *Proc Instn Mech Engrs, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 1998, 212(5): 321~332
- [4] Tomoaki M, Tatsuo K. Estimation of Traction Properties Based on a Nonlinear Viscoelastic Model[J]. *Trans ASME, J Tribology*, 1999, 121(2): 286~293
- [5] Fang N, Chang L, Johnson G J, et al An Experimental/Theoretical Approach to Modeling the Viscous Behaviour of Liquid Lubricants in Elastohydrodynamic Lubrication Contacts[J]. *Proc Instn Mech Engrs, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2001, 215(4): 311~318
- [6] Bercea Maria, Bercea Ioan. Polyethylene as an Additive for Mineral Oils- Part II: EHL Traction behavior[J]. *STLE, Tribology Transaction*, 2002, 45(2): 145~152
- [7] 王燕霜, 杨伯原, 王黎钦, 等. 弹塑性流变模型在脂润滑特性分析中的应用[J]. *摩擦学学报*, 2005, 25(2): 159~163
Wang yanshuang, Yang boyuan, Wang L iqin, et al Application of Elastic/Plastic Rheological Model in Characteristics Analysis of Elastohydrodynamic Lubrication of Grease[J]. *Tribology*, 2005, 25(2): 159~163
- [8] 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
- [9] 王燕霜, 杨伯原, 王黎钦, 等. 4106 航空润滑油拖动特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2004, 24(2): 156~159
Wang yanshuang, Yang boyuan, Wang L iqin, et al Traction Behavior of 4106 Aviation Lubricating Oil[J]. *Tribology*, 2004, 24(2): 156~159
- [10] Johnson K L, Tevaarwerk J L. Shear Behavior of Elastohydrodynamic Oil Films[J]. *Proc Roy Soc Lond, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1977, 356: 215~236
- [11] Gupta P K, Cheng H S, Zhu D, et al Viscoelastic Effects in MIL-7808-Type Lubricant, Part I: Analytical Formulation[J]. *STLE, Tribology Transaction*, 1992, 35(2): 269~274
- [12] Johnson K L. Contact mechanics[M]. *England: Cambridge University Press*, 1985