

4116 航天润滑油摩擦特性的影响因素

王燕霜^{1,2}, 李 刚¹, 承军伟²

(1. 天津职业技术师范大学 机械工程学院

天津市高速切削与精密加工重点实验室, 天津 300222;

2. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072)

摘 要: 采用球盘试验机测定了 4116 航天润滑油在不同工况下的摩擦因数, 尤其成功实现了高低温环境下的测试. 应用正交试验设计方法, 研究了滚动速度、滑动速度、最大工作压力和入口油温 4 个因素对润滑油摩擦特性的影响, 并绘出各因素对摩擦因数的影响曲线. 研究表明: 滑动速度和滚动速度对摩擦因数有显著影响, 入口油温和最大工作压力对摩擦因数影响不显著. 摩擦因数随着滑动速度的增加而增加, 但是增加的幅度随滑动速度的增加而逐渐减小; 随着滚动速度的增加, 摩擦因数迅速减小, 当滚速高于 20 m/s 时趋于稳定; 入口油温低于 0 °C 时, 其对摩擦因数有较大影响; 随最大工作压力的增加摩擦因数缓慢增加.

关 键 词: 航天润滑油; 摩擦特性; 影响因素; 摩擦因数; 正交试验设计

中图分类号: V317.1

文献标志码: A

Impact factors to friction characteristics of space lubricating oil No. 4116

WANG Yan-shuang^{1,2}, LI Gang¹, CHENG Jun-wei²

(1. Tianjin Key Laboratory of High Speed Cutting and Precision Machining,
College of Mechanical Engineering,

Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Friction coefficients of a space lubricating oil No. 4116 were experimented on the ball-on-disc experiment rig at various operating conditions, especially in high and low temperature conditions. The influences of rolling speed, sliding speed, the maximum working pressure and oil inlet temperature on friction coefficient were researched by adopting the orthogonal experimental design method. The curves of the friction coefficient versus each impact factor were plotted respectively. The research results show that the sliding speed and rolling speed have significant influence on the friction coefficient, while the oil inlet temperature and the maximum working pressure have only a certain influence on the friction coefficient. The friction coefficient of the oil increases with the increase of the sliding speed but the increase amplitude becomes smaller and smaller. When the rolling speed increases, the friction coefficient decreases quickly until the rolling speed exceeds 20 m/s and finally keeps at a stable value. The oil inlet temperature below 0 °C has a bigger influence on the friction coefficient. The friction coefficient increases slowly with the increase of the maximum working pressure.

Key words: space lubricating oil; friction characteristic; impact factor;
friction coefficient; orthogonal experimental design

国外卫星统计资料表明:运动机构轴承润滑不良而出现的“卡死”是造成卫星失效的主要原因之一.因此,航天轴承的润滑技术研究具有重大意义.对于运行精度和稳定性要求较高的航天轴承如陀螺仪轴承、飞行器姿态控制轴承、动量飞轮轴承等,一般选用液体润滑剂,如精制矿物油、氯苯基硅油、合成酯、全氟聚醚和多烷基环戊烷等^[1-8].

常规的四球试验机、高频往复线性振动试验机、多试件摩擦磨损试验机等,一般是在纯滑动摩擦下评定液体润滑剂的边界润滑性能.螺旋轨道摩擦试验机(SOT)^[9]可以模拟滚动、绕着枢轴转动和滑动接触工况,但仅局限于测量边界润滑状态下的摩擦特性.而实际液体润滑航天轴承,其滚动体与滚道之间处于弹流润滑或混合润滑状态,弹流润滑状态下润滑剂的摩擦特性与其在边界润滑下的摩擦特性相差甚远,因此模拟航天润滑油实际摩擦工况,建立相关的评定方法对于长寿命液体润滑剂的研制已迫在眉睫.

目前国内外关于航天润滑油特性的研究大多集中在润滑油的爬移性、抗辐射性和黏温性能的研究,以及边界润滑下润滑油摩擦磨损特性的研究^[10-18].关于国产航天润滑油在高低温环境下、滑滚接触(滚动伴随滑动接触)以及弹流润滑状态下的摩擦特性研究还是一项空白.本文以4116航天润滑油作为试验对象,在模拟航天轴承实际工况的球盘试验机上完成不同工况下摩擦力的测量,采用正交试验法分析润滑油摩擦特性的影响因素,为航天液体润滑剂的研制以及航天轴承的设计提供可靠的试验数据和理论依据.

1 试验部分

1.1 试验样品

本试验所用的4116航天润滑油是以优质的氯苯基硅油为基础油的高低温仪表油,具有黏温性好,蒸发度小,闪点高等特点.其物理性能参数:0℃时运动黏度 $\nu=48.12\text{ mm}^2/\text{s}$, -20℃时运动黏度 $\nu=98.95\text{ mm}^2/\text{s}$,倾点小于-70℃,闪点为204℃.适用于航天高速微型电动机轴承及减速齿轮的润滑.

1.2 试验装置

润滑油的摩擦特性试验是在改进的球盘试验机上进行的,其主机结构如图1(a)所示,其工作原理和试验方法详见文献^[19].为了模拟航天轴承的高低温环境,增加了高低温箱装置.低温箱主

要结构示意图见图1(b),启动低温箱中的压缩机,制冷剂氟利昂经冷凝器和节流装置进入放置于酒精浴中的蒸发器,氟利昂通过蒸发器与酒精浴中的酒精发生热交换,使得酒精的温度降低.由电动机Ⅰ和油泵泵出的被测试润滑油流经盘旋于酒精浴中的油管并与酒精进行热交换来达到降低温度的效果.电动机Ⅱ带动搅拌器搅拌酒精浴的酒精,使得其内部的温度均匀分布.油管中的被测试润滑油温度降低到所需试验温度后,通过位于油管末端的喷油嘴喷射进球试件和盘试件接触区,其中的球试件和盘试件分别模拟轴承中的球和滚道,球盘试件材料均采用GCr15.在喷油嘴处设置一个温度传感器来检测进入球盘接触区的入口油温的大小,该油温的信号反馈给PID(proportion, integration and differentiation)温度控制仪,与设定好的温度进行比较来决定酒精浴中加热棒的通断和通断时间的长短,从而来控制入口油温达到设定温度.高温箱中,酒精浴换成甘油浴,被测试润滑油进入甘油浴中与甘油发生热交换,通过加热棒可使得甘油浴的温度升高,通过喷油嘴处的温度传感器测得的入口油温与PID温

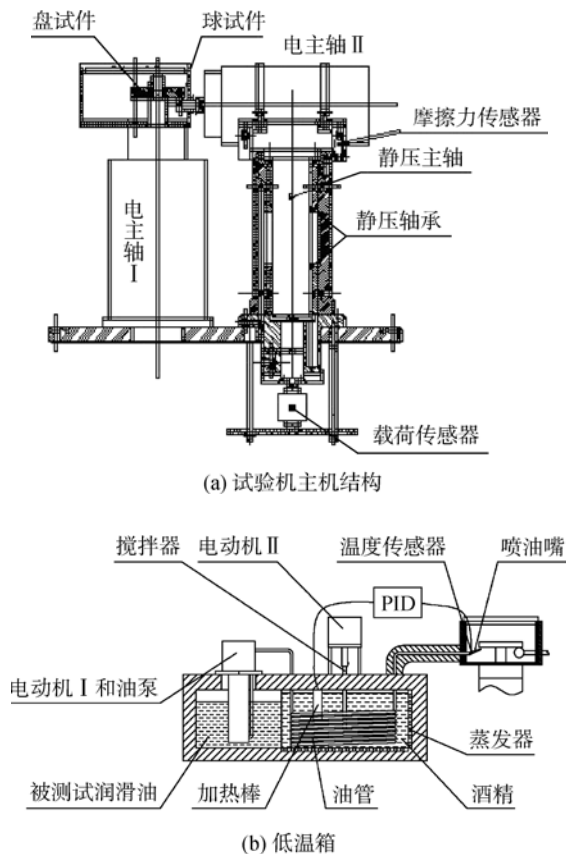


图1 试验机^[19]

Fig. 1 Experiment rig^[19]

度控制仪设定的温度比较来决定加热棒的通电时间,从而控制喷射进接触区的入口油温达到设定温度.

达到设定温度的润滑油经过喷油嘴连续喷射进试验机的球盘接触区后,由于球盘滚动速度 U 的作用,把被测试润滑油带进球盘接触区形成一定厚度的弹流润滑油膜,球盘试件之间的相对滑动速度 $\Delta U=U_2-U_1$ (U_1 和 U_2 分别为球试件和盘试件在接触点处的线速度)剪切油膜而产生摩擦力(又被称为牵引力),摩擦力的大小可以由试验机中的摩擦力传感器来测量.球盘之间所加法向载荷的大小可由载荷传感器来测量,滚动速度可由速度传感器来测量.各种传感器在试验前均进行了标定,以保证试验的精度.球和盘的表面经研磨和抛光,保证表面粗糙度小于 $0.02\text{ }\mu\text{m}$,而试验中的最小油膜厚度大于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,所以膜厚比大于 5,保证球盘试件处于完全弹流润滑状态,球盘表面粗糙度对摩擦力没有影响.

1.3 正交试验设计

在模拟航天轴承实际工况的测试试验中,不

同的工况参数(滚动速度、滑动速度、最大工作压力和入口油温)对润滑油摩擦特性都有不同程度的影响.为了深入研究影响润滑油摩擦性能的因素,更好预测润滑油摩擦因数的大小,辅助滚动轴承的设计,利用正交试验分析方法对摩擦特性的影响因素进行定性和定量的分析.为分析各因素对摩擦因数的影响,取滚动速度 U 、滑动速度 ΔU 、最大工作压力 p_0 和入口油温 t 各 4 个水平下的摩擦因数值,进行正交试验研究.各因素水平如下,A 因素(滚动速度 U): $A_1=5\text{ m/s}$, $A_2=9\text{ m/s}$, $A_3=15\text{ m/s}$, $A_4=20\text{ m/s}$; B 因素(滑动速度 ΔU): $B_1=0.25\text{ m/s}$, $B_2=0.5\text{ m/s}$, $B_3=0.75\text{ m/s}$, $B_4=1\text{ m/s}$; C 因素(最大工作压力 p_0): $C_1=1\text{ GPa}$, $C_2=1.2\text{ GPa}$, $C_3=1.35\text{ GPa}$, $C_4=1.5\text{ GPa}$; D 因素(入口油温 t): $D_1=-20\text{ }^\circ\text{C}$, $D_2=0\text{ }^\circ\text{C}$, $D_3=30\text{ }^\circ\text{C}$, $D_4=65\text{ }^\circ\text{C}$.

根据各试验变量取值,结合正交试验设计出 $A_1B_1C_1D_1\sim A_4B_4C_3D_2$ 十六组试验,采用 $L_{16}4^5$ 四因素四水平正交表^[20],具体试验安排如表 1,表中列 5 为空白列,用来分析误差.

表 1 正交试验方案及数据表
Table 1 Orthogonal experiment plan and data

序号	水平				误差	摩擦因数
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1		0.03623
2	1	2	2	2		0.04021
3	1	3	3	3		0.04164
4	1	4	4	4		0.04587
5	2	1	3	4		0.02089
6	2	2	4	3		0.03275
7	2	3	1	2		0.03132
8	2	4	2	1		0.05261
9	3	1	4	2		0.02127
10	3	2	3	1		0.03215
11	3	3	2	4		0.02505
12	3	4	1	3		0.03335
13	4	1	2	3		0.01442
14	4	2	1	4		0.01366
15	4	3	4	1		0.03804
16	4	4	3	2		0.03657
$\bar{K}_{1j}$	0.04098	0.02320	0.02864	0.03975	0.03265	$\sum = 0.51603$
$\bar{K}_{2j}$	0.03439	0.02969	0.03307	0.03234	0.03312	
$\bar{K}_{3j}$	0.02795	0.03401	0.03281	0.03054	0.03229	
$\bar{K}_{4j}$	0.02567	0.04210	0.03448	0.02636	0.03094	
R_j	0.01531	0.01890	0.00584	0.01339		

如果运用传统的方法完成对四因素四水平全部影响因素的分析,总共需要做 $4^4=256$ 次试验,而按照正交试验进行分析时只需要根据各因素的水平进行 16 次试验,这大大提高了分析摩擦影响因素的效率。

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果分析

极差 R 是指某因素在不同水平下相应指标的最大值与最小值之间的差值,反映了试验中各个因素影响的主次关系。极差越大,表示这个因素的数值在试验范围内变化时,导致试验结果的变化越大。各因素的极差由式(1)计算得到

$$R_j = \max(\bar{K}_{ij}) - \min(\bar{K}_{ij}) \quad (1)$$

式中 i, j 分别为水平数和因素数; $\bar{K}_{ij}$ 为因素 j 在 i 水平下的各试验结果之和的平均值。对试验得出的各指标值采用极差分析法,得到每个因素的不同水平对指标的影响关系柱状图,如图 2 所示。

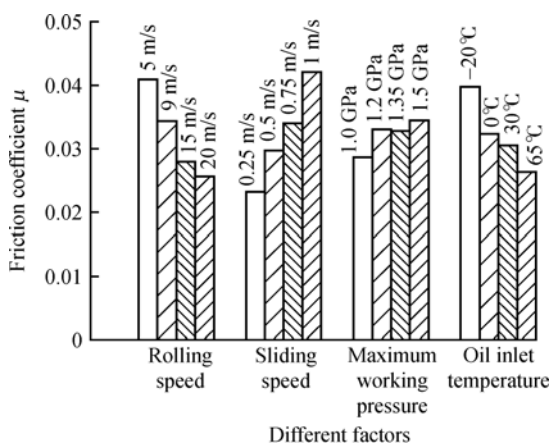


图 2 摩擦因数随不同因素的变化

Fig. 2 Friction coefficient versus different factors

表 1 中 $\bar{K}_{1j}, \bar{K}_{2j}, \bar{K}_{3j}, \bar{K}_{4j}$ 行分别计算出了每个因素各个水平摩擦因数之和的平均值。从图 2、表 1 可见,滑动速度因素的极差值最大为 0.0189,表明滑动速度对摩擦因数的影响程度最大;最大工作压力因素的极差值最小为 0.00584,表明最大工作压力对摩擦因数的影响较弱。各个影响因素的极差依次为 $B > A > D > C$,即在试验范围内,滑动速度 ΔU 对摩擦因数的影响最大,其次是滚动速度 U ,然后是入口油温 t ,最后是最大工作压力 p_0 。

极差分析具有直观形象、简单易懂的特点,但无法区分试验条件改变所引起的数据波动与试验误差所引起的数据波动。方差分析利用各因素的

偏差平方和与误差平方和构造 F 检验统计量,来判断各因素对试验指标是否显著,常用的显著性水平 α 为 0.01, 0.05, 0.1。

总偏差平方和 S 为

$$S = \sum_{i=1}^n X_{ij}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^k K_{ij} \right)^2 \quad (2)$$

各因素的偏差平方和 S_j 为

$$S_j = \frac{k}{n} \sum_{i=1}^k K_{ij}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^k K_{ij} \right)^2 \quad (3)$$

式中 X_{ij} 为因素 j 在 i 水平下的试验结果; n 为因素 j 在不同水平下试验次数之和; k 为每个试验因素的水平数。 K_{ij} 为因素 j 在 i 水平下的各试验结果之和。

试验误差 S_e 主要包括随机误差和系统误差,可用下式求得:

$$S_e = S - S_j \quad (4)$$

于是统计量 F_j 表示为

$$F_j = \frac{S_j/f_j}{S_e/f_e} \quad (5)$$

式中 f_j 为第 j 列因素的自由度, $f_j = k - 1$; f_e 为误差自由度。

各因素方差分析的结果见表 2 所示。当显著性水平 α 为 0.01, 0.05 和 0.1 时,查方差表^[20]可得: $F_{0.01}(3, 3) = 29.5$, $F_{0.05}(3, 3) = 9.28$, $F_{0.1}(3, 3) = 5.39$ 。由表 2 可知, $F_A > F_{0.01}(3, 3)$, $F_B > F_{0.01}(3, 3)$ 说明因素 A 和 B 对摩擦因数的影响高度显著,记为“***”; F_D 略大于 $F_{0.01}(3, 3)$,说明因素 D 对摩擦因数的影响较大,记为“**”; $F_{0.1}(3, 3) < F_C < F_{0.05}(3, 3)$,说明因素 C 对试验结果有一定的影响,记为“*”。方差检验表明,滑动速度波动引起的方差对整体方差的影响占 42.43%,滚动速度的变化对整体方差的影响占 32.13%,入口油温的变化对整体方差的影响占 21.16%,最大工作压力变化对整体方差的影响只占 4.28%。由此可见 4 个试验因素对摩擦因数影响显著性的先后顺序为:滑动速度最大,滚动速度和入口油温次之,最大工作压力影响最小,与极差分析的结果一致。同时从各因素的 F 指标分析,滑动速度、滚动速度及入口油温对摩擦因数有影响的置信度为 95% 以上,而最大工作压力的改变对摩擦因数仅有一定的影响。

2.2 单因素试验结果分析

为了便于分析各项因素对摩擦因数的影响,限定 3 个因素的值,变化另外一个因素的取值范

表2 正交试验方差分析表

Table 2 Variance analysis of the orthogonal experiment

因素	平方和/ 10^{-4}	自由度	均方和/ 10^{-4}	F 值	显著性
A	5.71	3	1.9	53.824	* * *
B	7.54	3	2.51	71.104	* * *
C	0.76	3	0.253	7.167	*
D	3.76	3	1.25	35.411	* *
误差	0.106	3	0.0353		
总和	17.7	15			

围,可以得到单因素对试验结果的影响数据.其中,滚动速度的试验范围为 $5\sim 25\text{ m/s}$,最大工作压力试验范围为 $1\sim 1.5\text{ GPa}$,滑动速度试验范围为 $0.25\sim 1\text{ m/s}$,入口油温的试验范围为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.2.1 滑动速度对摩擦因数的影响

图3是在最大工作压力 $p_0=1.35\text{ GPa}$ 和入口油温 $t=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同滚动速度下滑动速度对摩擦因数的影响.从图中可以发现,在其他影响因素一定的情况下,摩擦因数随着滑动速度的增加而增加,但是增加的幅度随滑动速度的增加而逐渐减小.这是因为球盘接触面之间的滑动速度剪切油膜产生摩擦力,滑动速度越大,摩擦力越大;但是随滑动速度的增大,剪切热增大造成润滑油运动黏度减小,从而影响摩擦力的继续增大,导致随滑动速度的增加摩擦因数增加的幅度减小.

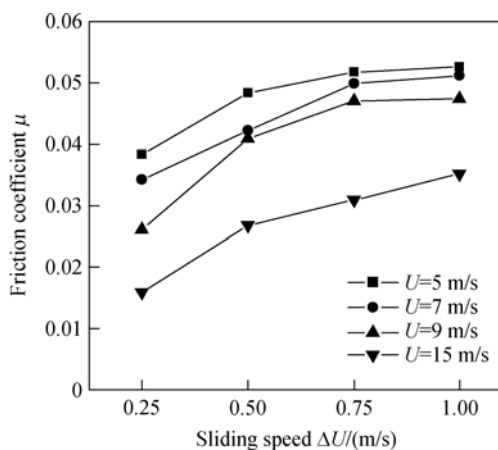


图3 摩擦因数在不同滚动速度时随滑动速度的变化

($p_0=1.35\text{ GPa}$, $t=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3 Friction coefficient versus sliding speed at different rolling speeds
($p_0=1.35\text{ GPa}$, $t=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

2.2.2 滚动速度对摩擦因数的影响

图4反映的是最大工作压力 $p_0=1.5\text{ GPa}$ 和入口油温 $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下,摩擦因数在不同滑动速度时随滚动速度的变化.由图中可见,摩擦因数随滚动速度的增加而明显减小,最终趋于平缓.滚动速度越小,摩擦因数变化越大,滚动速度大于 20 m/s 时,摩擦因数变化较小,可见该润滑油适合应用在高速下,即滚动速度大于 20 m/s .因为较大的滚动速度会使更多的润滑油卷吸进接触区,减小接触区的摩擦;另一方面滚动速度的增加使球盘接触区温度升高,导致润滑油运动黏度降低,也可使润滑油摩擦因数减小.当滚动速度增加到一定值,接触区油量充足无法卷吸更多的油;而运动黏度随温度变化为对数关系,温度越高润滑油运动黏度的变化越小,滑动速度增加到一定程度引起的温升导致润滑油运动黏度的变化减小,所以摩擦因数变化较小.

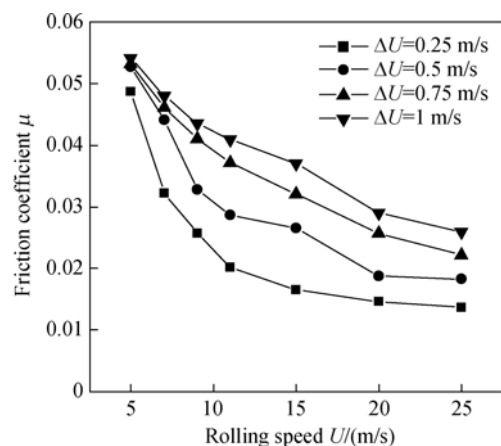


图4 摩擦因数在不同滑动速度时随滚动速度的变化

($p_0=1.5\text{ GPa}$, $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 Friction coefficient versus rolling speed at different sliding speeds ($p_0=1.5\text{ GPa}$, $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

2.2.3 入口油温对摩擦因数的影响

图5给出的是最大工作压力 $p_0 = 1.2 \text{ GPa}$ 和滚动速度 $U = 9 \text{ m/s}$ 工况下,摩擦因数在不同滑动速度时随入口油温的变化.根据图5可以看出,在一定滚动速度和压力时,随着入口油温的升高,摩擦因数会逐渐减小,其中入口油温从 -20°C 降低到 -10°C 时,摩擦因数 μ 值变化幅度相对较大,而入口油温升高到 0°C 以上时,摩擦因数 μ 值变化幅度相对较小.原因是入口油温升高时,润滑油的运动黏度会降低,从而使润滑油摩擦因数减小.从图中可以看出:4116 航天润滑油具有较好的温度适应性,即在 $-20^\circ\text{C} \sim 65^\circ\text{C}$ 的使用范围内,摩擦因数随入口油温的变化较小,尤其入口油温高于 0°C 时对温度适应性更好,说明该高低温润滑油的研制是成功的.在上述极差分析中得出的入口油温对摩擦因数的 F 检验统计量略大,主要是低温(入口油温低于 0°C)时入口油温对摩擦因数的影响略大造成的.

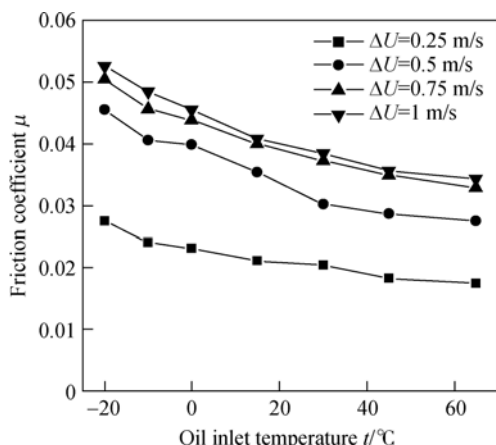


图5 摩擦因数在不同滑动速度时随入口油温的变化
($p_0 = 1.2 \text{ GPa}$, $U = 9 \text{ m/s}$)

Fig. 5 Friction coefficient versus oil inlet temperature at different sliding speeds
($p_0 = 1.2 \text{ GPa}$, $U = 9 \text{ m/s}$)

2.2.4 最大工作压力对摩擦因数的影响

图6给出了入口油温 $t = 65^\circ\text{C}$ 和滚动速度 $U = 15 \text{ m/s}$ 工况下,摩擦因数在不同滑动速度时随最大工作压力的变化.图6表明,摩擦因数随着最大工作压力的增加而增大,但是不同最大工作压力工况下,摩擦因数的变化幅度较小,可见该油对工作压力变化的敏感度相对较低,因此4116 航天润滑油适合在交变载荷作用下的空间机械运动部件中使用.

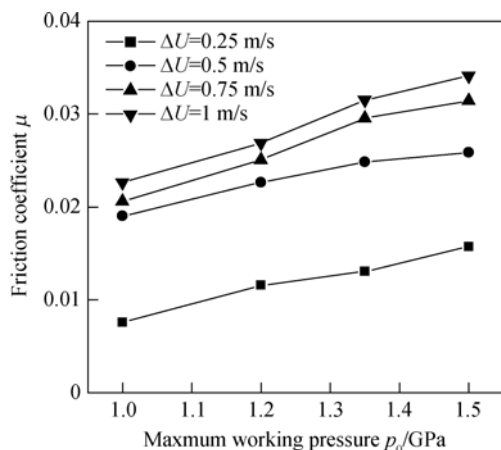


图6 摩擦因数在不同滑动速度时随最大工作压力的变化($t = 65^\circ\text{C}$, $U = 15 \text{ m/s}$)

Fig. 6 Friction coefficient versus maximum working pressure at different sliding speeds
($t = 65^\circ\text{C}$, $U = 15 \text{ m/s}$)

3 结 论

1) 对4116 航天润滑油弹流摩擦特性的影响因素应用正交试验设计进行分析,得出因素显著性顺序为: $\Delta U > U > t > p_0$,滑动速度对摩擦因数的影响最大,入口油温和最大工作压力对摩擦因数的影响较小.

2) 4116 航天润滑油摩擦因数随着滑动速度的增加而增加,但是增加的幅度随滑动速度的增加而逐渐减小;随着滚动速度的增加,其摩擦因数逐渐减小,滚速越高摩擦因数变化越小;其摩擦因数随着入口油温的升高而逐渐减小,入口油温低于 0°C 时,入口油温对摩擦因数的影响较大;该油摩擦因数随最大工作压力的增大而缓慢增加.

3) 4116 航天润滑油适合工作在温度和工作压力变化较大的环境中,更适合高滚动速度下使用,应避免较大的滑动速度.

参考文献:

- [1] 翁立军,刘维民,孙嘉奕,等.空间摩擦学的机遇和挑战[J].摩擦学学报,2005,25(1):92-95.
WENG Lijun, LIU Weimin, SUN Jiayi, et al. Opportunity and challenge of space tribology[J]. Tribology, 2005, 25(1):92-95. (in Chinese)
- [2] 刘维民,许俊,冯大鹏,等.合成润滑油的研究现状及发展趋势[J].摩擦学学报,2013,33(1):91-104.
LIU Weimin, XU Jun, FENG Dapeng, et al. The research status and prospect of synthetic lubricating oils[J]. Tribology, 2013, 33(1):91-104. (in Chinese)
- [3] Marko M, Kyle J, Branson B, et al. Tribological improve-

- ments of dispersed nanodiamond additives in lubricating mineral oil[J]. *Journal of Tribology*, 2014, 137(1): 011802. 1-011802. 7.
- [4] Sahoo B C, Das D K, Vajjha R S, et al. Measurement of the thermal conductivity of silicon dioxide nanofluid and development of correlations[J]. *Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine*, 2013, 3(4): 041006. 1-041006. 10.
- [5] YU Bo, ZHOU Feng, MU Zonggang, et al. Tribological properties of ultra-thin ionic liquid films on single-crystal silicon wafers with functionalized surfaces[J]. *Tribology International*, 2006, 39(9): 879-887.
- [6] Ntais S, Dracopoulos V, Siokou A. TiCl_4 (THF)₂ impregnation on a flat $\text{SiO}_x/\text{Si}(100)$ and on polycrystalline Au foil: determination of surface species using XPS[J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2004, 220(2): 199-205.
- [7] 王金清, 任嗣利, 杨生荣. 全氟聚醚润滑剂及其摩擦学特性研究[J]. *润滑与密封*, 2002(2): 18-21.
- WANG Jinqing, REN Sili, YANG Shengrong. Study on PFPE lubricants and their tribological characteristics[J]. *Lubrication Engineering*, 2002(2): 18-21. (in Chinese)
- [8] Bair S, Qureshi F. Time-temperature-pressure superposition in polymer thickened liquid lubricants[J]. *Journal of Tribology*, 2014, 136(2): 021505. 1-021505. 6.
- [9] Pepper S V, Kingsbury E. Spiral orbit tribo-metry: Part I description of the tribometer[J]. *Tribology Transactions*, 2003, 46(1): 57-64.
- [10] Choo J H, Glovnea R P, Forrest A K, et al. A low friction bearing based on liquid slip at the wall[J]. *Journal of Tribology*, 2007, 129(3): 611-620.
- [11] Martini A, ZHU Dong, WANG Qian. Friction reduction in mixed lubrication[J]. *Tribology Letters*, 2011, 41(1): 191-197.
- [12] SUN Jianlin, YI Meirong, SUN Qiao, et al. Experimental investigation of the relationship between lubricants' tribological properties and their lubricating performances in cold rolling [J]. *Journal of Tribology*, 2014, 136(3): 034502. 1-034502. 4.
- [13] 张旭, 姜克娟. 氟硅油的抗磨添加剂及其摩擦学性能评价[J]. *航空材料学报*, 2011, 31(增刊1): 226-231.
- ZHANG Xu, JIANG Kejuan. Anti-wear additives in fluorosilicone lubricating oil and its tribological behavior[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2011, 31(Suppl. 1): 226-231. (in Chinese)
- [14] 侯玲玲, 张景利. 全氟润滑油的合成、性质及应用[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2012, 10(2): 48-51.
- HOU Lingling, ZHANG Jingli. Synthesis, properties and applications of perfluoro lubricants[J]. *Chemical Propellants and Polymeric Materials*, 2012, 10(2): 48-51. (in Chinese)
- [15] 林冠宇, 王淑荣, 王立朋. 氯苯基硅油润滑球轴承在真空环境下摩擦性能与泄露量研究[J]. *摩擦学学报*, 2009, 29(6): 526-530.
- LIN Guanyu, WANG Shurong, WANG Lipeng. Frictional performance and leakage of ball bearings lubricated by chlorophenyl silicone oil in vacuum[J]. *Tribology*, 2009, 29(6): 526-530. (in Chinese)
- [16] 冯欣. 硅油作为润滑油添加剂的摩擦和磨损性能[J]. *石油学报: 石油加工*, 2011, 27(6): 989-993.
- FENG Xin. Friction and wear properties of silicone oils as lubricant additives [J]. *Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section*, 2011, 27(6): 989-993. (in Chinese)
- [17] 高平, 彭立, 刘维民. 多烷基环戊烷对钢/钢摩擦副的润滑性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(6): 546-550.
- GAO Ping, PENG Li, LIU Weimin. Tribological behavior and action mechanism of several multiply-alkylated cyclopentanes as lubricants of a steel/steel system[J]. *Tribology*, 2011, 31(6): 546-550. (in Chinese)
- [18] 付忠学, 郭峰, 黄柏林. 表面特性对纯弹流油膜形状和摩擦力的影响的试验研究[J]. *摩擦学学报*, 2013, 33(2): 112-117.
- FU Zhongxue, GUO Feng, HUANG Bailin. Experimental investigation of effect of surface property on film shape and friction in EHL[J]. *Tribology*, 2013, 33(2): 112-117. (in Chinese)
- [19] WANG Yanshuang, ZHANG Luoping, YANG Boyuan. The development of a lubricant traction measurement system[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2011, 23(4): 516-520.
- [20] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

(编辑: 陈越)