

在干摩擦和 46 号油润滑条件下滑动 导轨副的爬行性能研究

丁建宁

(江苏理工大学机械制造工程系 镇江 212013)

摘要 针对金属切削机床(特别是数控机床)等机械设备中工作台沿着导轨低速运动时发生的爬行现象,建立了模拟滑动导轨副的试验台架。利用这种试验台架分别在干摩擦和 46 号油润滑条件下,对滑动导轨副的爬行性能进行了模拟试验研究与考察,并且讨论了接触压力对具有固体润滑涂层的滑动导轨副防爬性能的影响。结果表明,摩擦引起法向接触振动导致摩擦系数随着滑动速度的增加而下降是产生爬行的直接原因,不同接触压力下固体润滑涂层滑动导轨副发生爬行的程度不同。在此基础上,提出用 $L = \mu_s / \mu_d$ 作为评价滑动导轨副防爬性能的准则: $L > 1.00$ 时的防爬性能差, L 在 $0.96 \sim 1.00$ 之间的防爬性能一般, $L \leq 0.95$ 时的防爬性能良好。此外,还针对性地提出了防爬措施。

关键词 干摩擦,油润滑,导轨,接触压力,爬行性能,防爬措施

1 前言

在机床等机械设备的工作台沿着导轨的滑移速度或距离很小的情况下,通常都会发生爬行现象。这会造成工作台的运动不均匀,降低其移动精度和灵敏度,致使加工精度和质量下降,同时还会导致机床传动系统产生附加动载荷引起刀具磨损加剧甚至折断,而且导轨的磨损也随之增大。

研究表明,减小动、静摩擦系数之间的差值,提高传动系统的刚度和阻尼比,都能够收到一定的防爬效果;降低载荷能够减小金属材料导轨的爬行程度,可就高弹性材料和无定形聚合物材料导轨而言,接触压力越高,其防爬性能越好,利用聚四氟乙烯(PTFE)材料所制导轨副的防爬性能也很好;含油性添加剂的各种导轨油都具有不同程度的防爬能力^[1],在工业用 HJ-20 和 HJ-30 机械油,以及 HU-20 汽轮机油中加入液晶添加剂也都具有一定的防爬效果^[2]。本文对几种材料摩擦副分别在干摩擦和 46 号油润滑条件下的爬行特性进行了试验研究与分析讨论,并且提出了相应的防爬措施。

2 试验部分

测定运动副的临界爬行速度 V_c 和静、动摩擦系数的试验装置如图 1 所示。当改变传力弹簧(2)的刚度 K 时,爬行幅值就随之变化,因而可以利用其对运动副的摩擦系数和爬行现象进行研究。试验台为无级变速,通过磁电传感器(6)和测速仪测定转动速度。静、动摩擦力由拉力传感器(4)测出并显示于函数仪(12)上,再通过数值处理便可以得到摩擦系数曲

1995-03-14 收到初稿, 1995-08-28 收到修改稿

线. 当试块爬行时, 通过位移传感器(11)便可以在函数仪上得到图2所示的理论爬行曲线.

3 试验结果与讨论

3.1 摩擦系数-滑动速度特性

在滑动摩擦过程中, 当滑动表面微凸体受到偶件表面微凸体的微脉冲作用时会产生法向振动, 而且滑动速度越高, 振幅越大, 滑块的平均水平面越高, 实际接触面积和摩擦力都越小. 因此, 由摩擦引起的接触振动可以使滑动摩擦力降低, 而由微振引起的接触振动则可使静摩擦力降低. 图3所示为干摩擦和46号油润滑条件下不同材料的静、动摩擦系数差值 $\Delta\mu$ 随着滑动速度变化的关系曲线. 可以看出, 3种涂层材料自摩擦副在油润滑下的 $\Delta\mu$ 值均比干摩擦下的高. 分析认为, 这可能是由于在干摩擦过程中, 涂层材料发生转移并在偶件表面形成转移膜且对表面凹坑起填充作用而使接触振动减小的缘故; 在油润滑时, 因为偶件表面很难形成固体润滑转移膜, 所以油润滑条件下的 $\Delta\mu$ 值比干摩擦下的高.

由静止到滑动的骤然加速会增大接触振动的振幅, 降低摩擦力而使滑块继续滑动, 然而因其受到外部弹性约束会逐渐减速. 这能减小法向接触振动振幅, 增大摩擦力而使滑块继续减速, 而且在某些情况

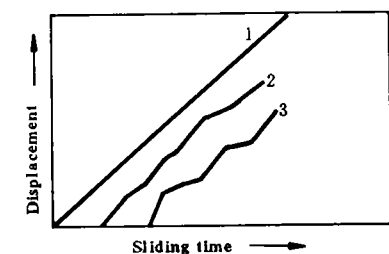


Fig. 2 The theoretical stick-slip curve

1. No stick-slip, 2. Unstable, 3. Stick-slip.

图2 理论爬行曲线示意图

1. 没有发生爬行, 2. 不稳定, 3. 爬行.

下还会使滑动停止. 但是, 由于此时弹性传动的牵引力增大, 滑块可以重新滑动. 在每次滑动时, 法向对称接触振动的振幅增大, 自振滑动不仅向前急冲, 而且还会沿着两轴向产生跳跃. 本文定义滑块不产生跳跃时的速度为临界爬行速度 V_c . 从试验台上测得的几种不同材料摩擦副分别在干摩擦和46号油润滑下的 V_c 值均如表1所列. 需要指出的是, 由于测试系统本身的误差, 表1给出的数据都是近似值.

由表1列出的5种材料的试验结果可以看出, 3种固体润滑涂层材料的临界爬行速度 V_c 值都比较低, 这是由于 MoS_2 、石墨和 PTFE 的润滑性能都好, 而且静摩擦系数都低的缘故. 观察发现, 固体润滑涂层材料在摩擦过程中通过向偶件表面转移, 又向原表面再粘附的动态过程, 致使转移膜材料一直是在摩擦副双方底材之间剪切滑动^[3]. 这可以明显地减小界面摩擦和接触振动, 能够在特定的速度范围以内

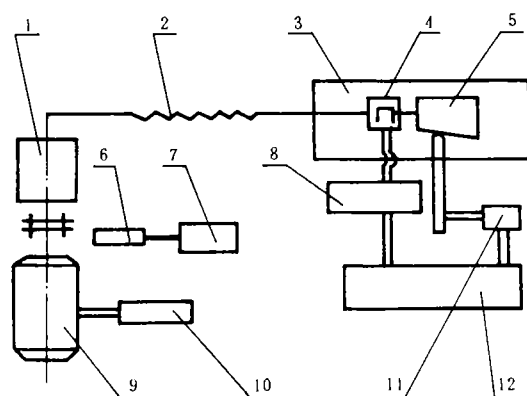


Fig. 1 The schematic diagram of experimental rig

1. Decelerator, 2. Spring, 3. Chassis, 4. Tension sensor, 5. Briquette, 6. Magnetosensor, 7. Tachometer, 8. Potentiostat, 9. JZT22-4 motor, 10. Regulator, 11. Displacement sensor, 12. Monoformer.

图1 试验装置简明示意图

1. 减速器, 2. 传力弹簧, 3. 底盘, 4. 拉力传感器, 5. 试块, 6. 磁电传感器, 7. 转速数显仪, 8. 稳压电源, 9. 电机, 10. 控制器, 11. 位移传感器, 12. 函数仪.

消除爬行. 因此, 分别利用 MoS_2 、石墨或 PTFE 制成的固体润滑膜都具有较好的防爬性能.

3.2 接触压力对固体润滑膜防爬性能的影响

就金属材料导轨而言, 接触压力增大会使移动部件产生明显的自振, 爬行现象也随着越来越严重; 对高弹性材料导轨和聚合物材料导轨来说, 因其从外摩擦转为内摩擦的临界点非

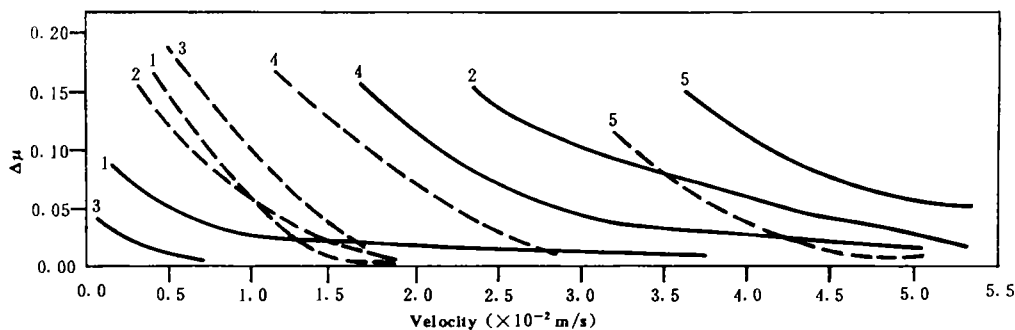


Fig. 3 Variation of $\Delta\mu$ between static friction coefficient and kinetic friction coefficient vs velocity

Load is 107 N.

— means dry friction, --- means 46# oil lubrication.

1. (MoS_2 +PTFE) film, 2. [MoS_2 +Graphite+ $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$] film,
3. (MoS_2 +Graphite+ Na_2SiO_3) film, 4. Cast iron-cast iron, 5. Cast iron-steel.

图3 静、动摩擦系数差值随滑动速度变化的关系曲线

载荷为107 N.

—表示干摩擦, ---表示46号油润滑.

1. (MoS_2 +PTFE)膜, 2. [MoS_2 +石墨+ $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$]膜, 3. (MoS_2 +石墨+ Na_2SiO_3)膜, 4. 铸铁-铸铁, 5. 铸铁-钢.

表1 不同材料的临界爬行速度 V_c 值的测试结果

Table 1 The measuring results of critical stick-slip speed V_c value of different materials

Materials	V_c (m/s)	
	Dry friction	46# oil lubrication
(MoS_2 +PTFE) film	0.040 4	0.013 5
[MoS_2 +Graphite+ $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$] film	0.053 5	0.020 3
(MoS_2 +Graphite+ Na_2SiO_3) film	0.006 7	0.020 3
Cast iron-cast iron	0.061 0	0.027 0
Cast iron-steel	0.082 0	0.054 0

Note: Experimental conditions; Load is 107 N.

注: 试验条件, 载荷为107 N.

常低, 只要有足够的接触压力, 偶件表面凹坑就可被填充, 于是接触便由不连续变成连续而使接触振动减轻. 接触压力越高, 不连续接触越少, 导轨防爬性能越好. 对于具有固体润滑膜的摩擦副, 接触压力对静、动摩擦系数差值 $\Delta\mu$ 的影响如图4(曲线1、2、3和1'、2'、3'分别为干摩擦和46号油润滑)所示, 爬行曲线见图5(其中, 纵坐标表示滑块在底盘上每次从起点开始滑动的位移, 由位移传感器读出; 横坐标表示试验全程所经历的时间, 由于测量过程是连

续的,因而各条曲线的起始时间不同,而且滑块每次从起点滑到终点所用的时间也不相同)。

联系图2所示理论爬行曲线可以明显地看出,图5(a)中的曲线2、(b)中的曲线3、(c)中的曲线2和(d)中的曲线3显示的爬行倾向都比较小。试验中也曾发现,在其它试验条件不变的前提下,当接触压力超过图中给出的这4条曲线所对应的载荷时,几种固体润滑膜都发生破裂且接触振动加剧,爬行趋于严重;同种固体润滑膜($\text{MoS}_2 + \text{PTFE}$)出现较小爬行倾向的载荷是随着滑动速度的增加而增大。

3.3 评价准则

表2所列是在一定的载荷、速度和刚度条件下测得的几种不同材料摩擦副的摩擦系数值,其中 $L = \mu_{\text{静}} / \mu_{\text{动}}$ 。表2列出的5种材料的 L 值的大小与表1给出的临界爬行速度 V_c 值的变化规律基本吻合,因而用 $L = \mu_{\text{静}} / \mu_{\text{动}}$ 可以表征材料在给定条件下的防爬性能。

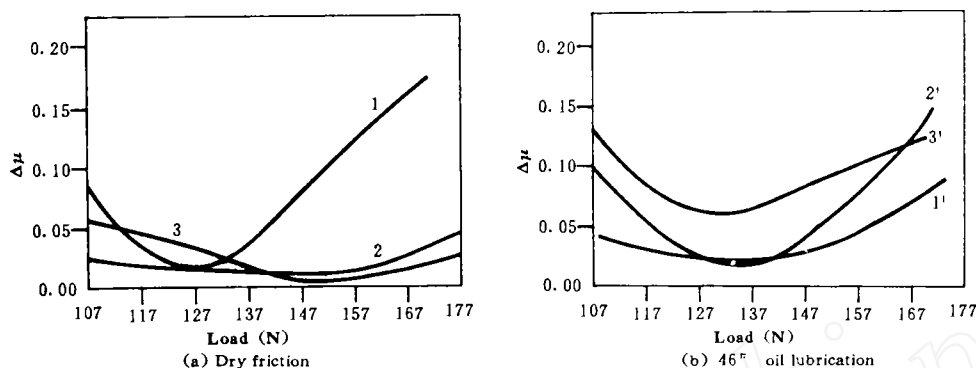


Fig. 4 Relationship between $\Delta\mu$ of several different film materials and load

1. $[\text{MoS}_2 + \text{Graphite} + \text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3]$ film, velocity is 0.040 4 m/s; 1'. $[\text{MoS}_2 + \text{Graphite} + \text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3]$ film, velocity is 0.013 5 m/s;
2. $(\text{MoS}_2 + \text{PTFE})$ film, velocity is 0.026 9 m/s; 2'. $(\text{MoS}_2 + \text{PTFE})$ film, velocity is 0.010 0 m/s;
3. $(\text{MoS}_2 + \text{Graphite} + \text{Na}_2\text{SiO}_3)$ film, velocity is 0.003 4 m/s; 3'. $(\text{MoS}_2 + \text{Graphite} + \text{Na}_2\text{SiO}_3)$ film, velocity is 0.010 0 m/s.

图4 几种不同薄膜材料的动、静摩擦系数差值 $\Delta\mu$ 随着载荷变化的关系曲线

1. $[\text{MoS}_2 + \text{石墨} + \text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3]$ 膜, 速度为 0.040 4 m/s; 1'. $[\text{MoS}_2 + \text{石墨} + \text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3]$ 膜, 速度为 0.013 5 m/s;
2. $(\text{MoS}_2 + \text{PTFE})$ 膜, 速度为 0.026 9 m/s; 2'. $(\text{MoS}_2 + \text{PTFE})$ 膜, 速度为 0.010 0 m/s;
3. $(\text{MoS}_2 + \text{石墨} + \text{Na}_2\text{SiO}_3)$ 膜, 速度为 0.003 4 m/s; 3'. $(\text{MoS}_2 + \text{石墨} + \text{Na}_2\text{SiO}_3)$ 膜, 速度为 0.010 0 m/s.

按照一般的情况来说, $L > 1.00$ 时的防爬性能差, L 值在 0.96—1.00 之间时的防爬性能一般, $L \leq 0.95$ 时的防爬性能良好。

一旦产生爬行就必然造成定位误差, 对此可以针对性地采取的防爬措施有: ① 利用法向阻尼消除法向接触振动; ② 以接触共振方式作强迫振动, 使滑块始终保持在最高水平面高度; ③ 减小静摩擦系数及静、动摩擦系数差值; ④ 提高传动刚度。

4 结论

- a. 摩擦引起法向接触振动使摩擦系数随滑动速度增加而下降是产生爬行的直接原因。

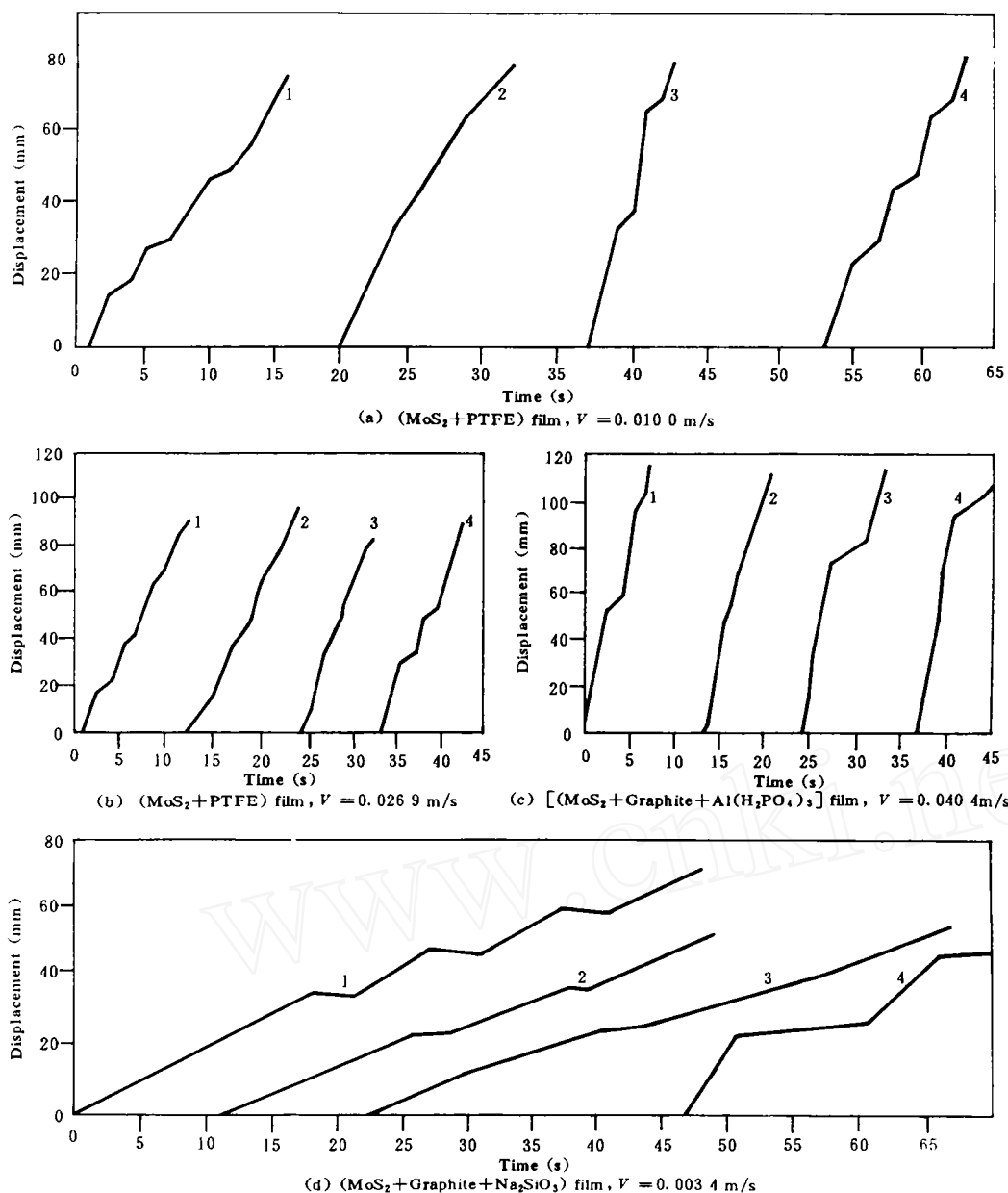


Fig. 5 The stick-slip curve of several solid lubricating films during dry friction under different loads

1. Load is 107 N, 2. Load is 127 N, 3. Load is 147 N, 4. Load is 167 N.

图5 几种不同的固体润滑涂层材料在干摩擦时于不同载荷条件下的爬行曲线

1. 载荷为107 N, 2. 载荷为127 N, 3. 载荷为147 N, 4. 载荷为167 N.

b. 在给定的试验条件下,几种固体润滑涂层材料自摩擦副都有一个最佳载荷值,其在此载荷下出现爬行的倾向最小,随着速度的增加,出现最小爬行倾向的载荷相应增大.

c. 可以利用 $L = \mu_{\text{静}} / \mu_{\text{动}}$ 作为在一定的载荷、速度和刚度条件下材料防爬性能的评价准则: $L > 1.00$ 时的防爬性能差, L 值在 $0.96 - 1.00$ 之间的防爬性能一般, $L \leq 0.95$ 时的

表 2 几种不同材料摩擦副的摩擦系数值

Table 2 The friction coefficient of different material friction pairs

Friction pairs	Dry friction			46# oil lubrication		
	Static friction coefficient	Kinetic friction coefficient	<i>L</i> value	Static friction coefficient	Kinetic friction coefficient	<i>L</i> value
(MoS ₂ +PTFE)film self-friction pair	0.170	0.140	1.210	0.070	0.090	0.780
[MoS ₂ +Graphite+Al(H ₂ PO ₄) ₃] film self-friction pair	0.180	0.120	1.500	0.065	0.070	0.930
(MoS ₂ +Graphite+Na ₂ SiO ₃) film self-friction pair	0.110	0.150	0.730	0.048	0.050	0.950
Cast iron-cast iron	0.260	0.170	1.530	0.120	0.090	1.330
Cast iron-steel	0.350	0.180	1.940	0.180	0.120	1.500

Note: Experimental conditions: Load is 107 N, velocity is 0.025 m/s.

注：试验条件：载荷为107 N，速度为0.025 m/s。

防爬性能良好。

参 考 文 献

- [1] 陈家靖. 第二次全国摩擦、磨损、润滑学术会议论文集. 北京:机械工业出版社,1980. 110—116.
- [2] 卢颂峰,于效光,汤晓英,等. 液晶添加剂对润滑油防爬性能影响的研究. 润滑与密封,1993,(2):19—23.
- [3] 松永正久主编. 固体润滑手册. 范煜,周国民,吴伟忠,等译. 北京:机械工业出版社,1986. 87.

Study on Stick-Slip Property of Slideway Pairs under Various Lubricating Conditions

Din Jianning

(Jiangsu University of Science and Technology Zhenjiang 212013 China)

Abstract A stick-slip testing equipment is developed. The cause for creeping of slideway pairs under various lubricating conditions is investigated and the effect of contact pressure on the property of anti-creeping is studied when slideway pairs are coated with solid lubricant. The results show that the direct cause of creeping is the feature of friction coefficient decreased with increasing of sliding velocity. The tendency of stick-slip of slideway pairs coated with solid lubricant is different under various contact pressure. Then, the anti-creeping effect of slideway pairs can be evaluated with the value of $L = \mu_s/\mu_k$, the anti-creeping effect is poor when the value of L is more than 1.00 and is when the value of L is from 0.96 to 1.00, but the anti-creeping effect is good when the value of L is up to 0.95. Finally, the measures are presented for anti-creeping.

Key words lubrication, slideway, contact pressure, stick-slip property, anti-creeping measures