

受制滚动钢摩擦副的摩擦特性研究*

刘启跃 周仲荣

(西南交通大学摩擦学研究所 成都 610031)

摘要: 利用往返滚动运动的试验装置, 试验研究了滚动摩擦特性。研究表明: 受制滚动中, 随着滚动阻力增加, 物体发生滚动时的预位移量也在增大; 滚动物体从静止到运动的过程中, 摩擦因数是变化的。摩擦因数的变化与接触表面的磨损过程是相关的; 表面磨损类型的不同对表面摩擦因数有较大的影响。

关键词: 滚动 滚滑接触 摩擦因数 试验装置

中图分类号: TH117

0 前言

滚动摩擦特性主要是指滚动物体由于牵引或制动等作用而发生的滚滑摩擦特性。滚动体发生滚动运动时, 由于几何轨道、坡道、牵引和制动等多种因素影响, 使滚动常处于受制滚动状态, 接触表面之间存在着滚滑现象, 使得滚动成为一种复杂的摩擦学运动形式。对滚动摩擦学的研究主要是借助于试验方法^[1,2], 这主要是人们对滚动摩擦的一些特性还不十分清楚, 如滚动摩擦因数的变化过程等。

物体发生滚动时, 在接触区域内总是存在着粘着区, 当滚动物体因牵引或制动导致表面摩擦力增加时, 接触区域内的粘着区不断减小, 此时物体为滚滑运动; 如果滑移区占据了整个接触区域时, 则物体就只会发生滑动, 不再有滚动运动。物体从滚动到滚滑、直至到滑动状态, 摩擦因数是不断增加的, 而当物体处于滑动运动过程中时, 摩擦因数不再变化。此外滚动物体从静止到运动的过程中, 摩擦因数也是一个变化的过程, 物体即将运动的瞬间摩擦因数数值为最大, 为测定瞬间摩擦因数数值需要借助于高精度的试验设备, 由于试验设备的限制以往相关的研究较少^[3]。利用往返滚动运动的试验装置, 研究滚动物体在滚滑过程中的摩擦学特性, 探索了滚动摩擦因数的变化规律。

1 试验部分

滚动试验装置如图 1 所示^[4]。表面摩擦力 F_t 是随制动压力 p 的增加而增大, 其值 F_t 的大小由载荷传感器控制。试验时选用的参数变化范围为: 运

动位移幅值 $d = \pm 2 \mu\text{m} \sim \pm 200 \mu\text{m}$; 法向载荷值 $F_n = 200 \text{ N}$; 频率 $f = 2 \text{ Hz}$; 滚动轴承外径的直径 $d = 30 \text{ mm}$; 接触宽度为 $b = 7 \text{ mm}$; 循环次数 $N = 100 \sim 10\,000$; 温度 $t = 21 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

滚动轴承试样材料为 GCr15, 平面试样材料为 45 碳钢。

对要施加制动力的试验, 利用载荷传感器显示施加的外加表面摩擦力。试验过程中通过接触表面间的摩擦力、位移量和循环次数(时间)的变化曲线来描述整个滚动动态变化过程。

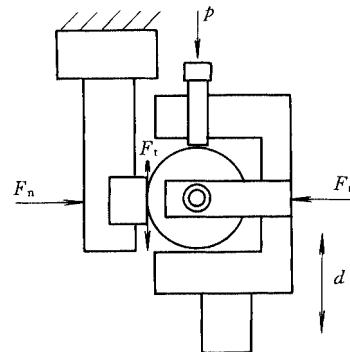


图 1 试验装置示意图

2 试验结果

图 2 所示是 5 种不同摩擦力作用时的试验工况, 也就是通过施加不同的制动力 p 而获得不同的摩擦力。其中有 2 个为极端条件, 即纯滚动与滑动工况, 其余 3 个为滚滑运动, 而不施加制动力时就是纯滚动工况。在试验过程中施加的制动力 p 从始至终是不变的, 试验参数为: 运动位移幅值 $d = \pm 40 \mu\text{m}$; 法向载荷值 $F_n = 200 \text{ N}$; 频率 $f = 2 \text{ Hz}$; 循环次数 $n = 100$ 。图 2 表明纯滚动时摩擦因数最

* 国家自然科学基金(59935100)和西南交通大学校基金资助项目。
20020627 收到初稿, 20021008 收到修改稿

低，为 0.02 左右；而滑动时摩擦因数最高，为 0.65 左右；滚滑状态的摩擦因数介于二者之间。

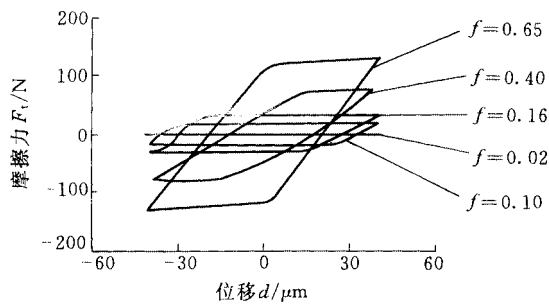


图 2 不同试验条件下摩擦力与位移曲线 (n=100)

从日常经验可知，为了使两个相互压紧的物体作相对运动，需要施加一定的切向力，在没有达到所需的力之前，物体处于相对静止状态。但我们已知道，实际上物体在开始作宏观滑移或滚动之前，就作了与作用力近似成正比的微观滑移了，即预位移运动。前苏联学者早在 1926 年发表的试验结果就已表明物体的预位移运动形式^[5]。Mindlin 曾对此现象进行了详尽的力学分析说明^[6]。有了预位移滑移的概念，就容易解释试验中的一些试验曲线了。

为了测定滚动物体从静止到运动的过程中，摩擦因数的变化过程，进行了一组特定的试验，即从物体静止状态，逐渐增加运动位移幅值，增加幅度最小为 1 μm。当试验位移幅值较小时，表面摩擦力—位移循环曲线关系近似为线性封闭的循环，接触表面部分区域不发生相对滑移，处于粘着状态，而接触边沿上发生微滑移。如图 3 中位移 d=5 μm 时的循环曲线。随着位移幅值增加，接触区内滑移区不断增加，摩擦力增大，当接触表面处于滚动的边缘时，表面摩擦力—位移循环曲线为椭圆循环，此时摩擦因数数值最高，如图 3 中位移 d=15 μm 时的循环曲线。随着位移幅值的进一步增大，物体发生滚动，此时表面摩擦力—位移循环曲线为四边形循环，如图 3 中位移 d=40 μm 时的循环曲线。此后随着位移幅值的增大，摩擦因数数值基本保持稳定，如图 4 所示。

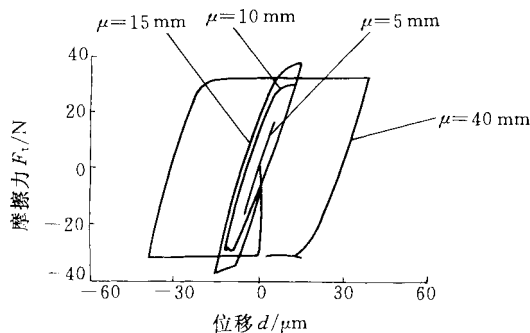


图 3 滚滑状态表面摩擦力与位移变化曲线图

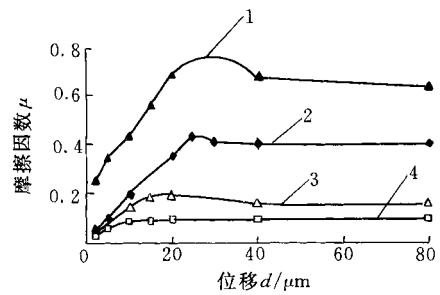


图 4 摩擦因数随运动位移幅值增加变化的曲线图

1. f=0.65 2. f=0.40 3. f=0.16 4. f=0.10

根据图 2 中的试验条件，绘制了随着运动位移幅值增加摩擦因数变化的曲线图，如图 4 所示。图中的摩擦因数为循环次数 n=100 时的对应值。图中表明在施加的制动力不变的条件下，物体从静止到运动过程中摩擦因数是一个变化的过程，首先是近似线性的增加，然后达到一个最大值，在物体发生运动后，摩擦因数略有下降，之后稳定在一定范围内。而随着制动力增加，物体发生运动时的预位移量也在增大。试验中由于纯滚动的摩擦力较小，其摩擦因数的变化基本为一直线，图 4 中没有列出。

上述试验研究表明了滚动物体从静止到运动时摩擦因数的变化过程：由于摩擦阻力的作用，物体在滚动初期首先有一个初始的滑移，随着施加的转动力距增大，摩擦力增加，物体接触表面之间的相对滑移量增加，粘着区域减小，当施加的转动力大于滚动摩擦阻力时物体发生滚动运动。物体运动后，由于运动惯量等因素的作用摩擦阻力会略有降低。滚动与滑动最大的区别是接触区域的接触状态不同，物体在发生滚动时接触区域始终存在有粘着区域。而当接触区域只存在滑移区域，粘着区域为零时滚动物体就只会发生滑动，这是滚动运动中应避免的一种极端现象。

为了解物体滚动过程中接触表面的磨损状态变化情况，我们进行了一组受制滚动磨损试验。其试验工况为：运动位移幅值 d=±200 μm；法向载荷值 F_n=200 N；频率 f=2 Hz。图 5 是摩擦因数随循

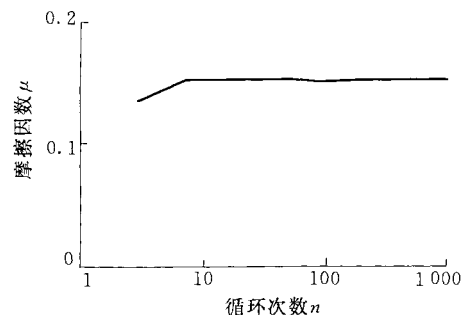


图 5 摩擦因数随循环次数变化的曲线

环次数变化的曲线。图中发现,在整个试验过程中,摩擦因数除在前十几次循环中有一些变化外,之后几百次的循环过程摩擦因数基本不变,约为 0.16 左右。

不同循环次数平面试样的表面磨痕图如图 6 所示,图片是通过三维激光共焦扫描显微镜 OLS1100 获取的。图 6a 中表明,在几次的往返运动中,平面试样表面被擦伤,表面有少量的擦伤痕迹,方向与运动方向相同。而随着循环次数的增加,表面擦伤加剧(如图 6b, 图 6c),磨痕沟槽加深,整个接触区域均发生磨损。一般表面摩擦力不是太大时,滚动磨损机制主要为磨粒磨损^[4],图 6 所示磨痕图都有明显的沟槽痕迹,而且方向与运动方向一致。但在大量的循环以后,磨痕中发现有明显的块状磨粒剥落(图 6d),表明表面在大循环次数作用下疲劳磨损也是一种主要的磨损形式。

通过表面磨损过程分析,可以发现摩擦因数的变化与接触表面的磨损过程密切相关。在最初的几次循环过程中,滚动物体与光滑的表面接触,由于表面的污染膜使接触表面之间的摩擦力减小。随着滚动运动循环作用,表面划伤,污染膜破坏,金属表面之间粘着力增加,摩擦力增大。而当金属表面完全接触并且产生的磨屑基本稳定后,表面的摩擦因数开始稳定。

为区别滚滑状态下表面磨痕与滑动状态的区别,获取了相同试验条件下滑动状态的表面磨痕图,滑动状态的摩擦因数为 0.65 左右,如图 7 所示。比较图 7 与图 6 可以发现,滑动状态下的接触表面之间的磨损机制是与滚滑状态不同的,滑动状态下表面主要是粘着磨损为主^[4],从磨痕图中可以发现磨损表面上没有明显的沟槽痕迹,表面粗糙,磨损量大,摩擦力增加。而滚滑状态下表面以磨粒磨损为主,磨损轻微,表面摩擦力较小;由此可以发现表面的磨损类型对表面的摩擦因数有较大的影响。

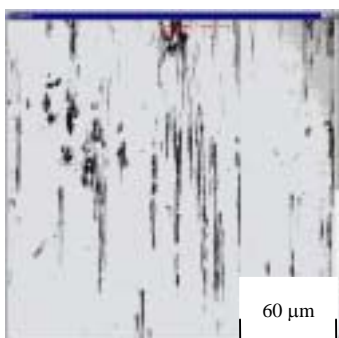
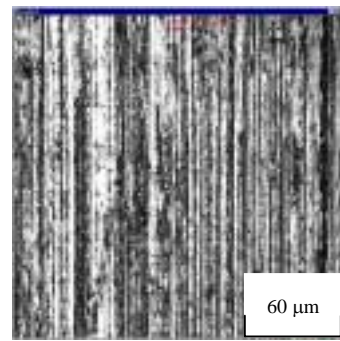
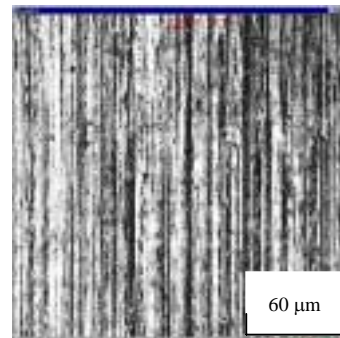
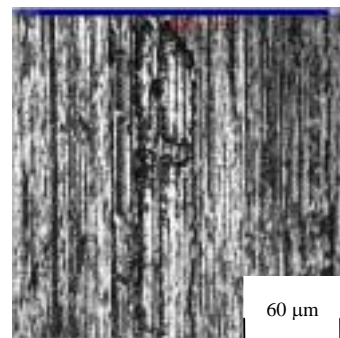
(a) $n = 5$ (b) $n = 50$ (c) $n = 100$ (d) $n = 1\ 000$

图 6 滚滑状态下不同循环次数的表面磨痕图

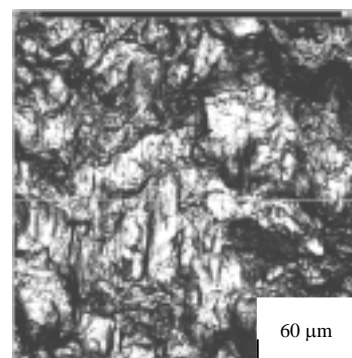


图 7 滑动状态的表面磨痕图

3 结论

受制滚动中,随着滚动阻力增加,物体发生滚动时的预位移量也在增大;滚动物体从静止到运动
(下转第 67 页)