

文章编号: 1004-0609(1999)03-0515-05

自润滑材料滑动摩擦特性与自润滑机理^①

丁华东¹ 韩文政¹ 李雅文² 王永兰² 金志浩²

(1. 装甲兵工程学院 材料工程系, 北京 100072; 2. 西安交通大学 材料科学与工程学院, 西安 710049)

摘 要: 通过研究含油量低、中、高三种铜石墨自润滑材料的滑动摩擦过程, 发现摩擦系数 μ 与滑动距离 n 的关系曲线由三部分构成, 即 $d\mu/dn < 0$ (自润滑开始工作阶段), $d\mu/dn \rightarrow 0$ (自润滑稳态工作阶段), $d\mu/dn \rightarrow \infty$ (自润滑失稳向干摩擦过渡阶段)。依据自润滑材料与润滑油的特性和摩擦过程的物理变化, 确立自润滑材料滑动摩擦自润滑机理为: 在法向载荷和摩擦热的作用下, 由于油的流动性、孔隙的可压缩性和油受热膨胀等特性, 使材料内部贮油被迫流向摩擦表面起润滑作用; 摩擦热、出油量、摩擦系数三者之间具有自反馈调节作用, 使稳态工作时保持低且稳定的摩擦系数; 摩擦面的油在滑动过程中不可避免地有所损耗, 在自反馈调节作用下, 通过提高摩擦面温度可向摩擦面补充油, 待摩擦面温度达到或高于油的闪点后, 摩擦面的油将大量挥发, 摩擦由自润滑向干摩擦过渡, 自润滑失效。

关键词: 粉末冶金; 滑动摩擦; 自润滑; 自润滑材料; 自润滑机理

中图分类号: TF125.6

文献标识码: A

人们习惯于把滑动摩擦特性归于图 1 所示的两种类型^[1, 2], 其特点是经过一定磨合距离后, 摩擦系数 μ 与路径 n 无关, 稳态摩擦时摩擦条件保持不变。对于自润滑材料, 滑动摩擦时靠其内部贮油流向摩擦面而起减摩作用, 随摩擦的进行, 向表面供油的能力能否保持恒定, 其摩擦特性是否可归于图 1 的类型, 未见文献报导。自润滑材料类别和应用范围越来越广, 但对自润滑机理的认识却一直局限于含油轴承的范围, 认为轴承工作时, 在轴和轴承的间隙中造成低真空状态, 把孔隙中所贮存的油吸到轴承工作表面^[1, 3, 4]; 同时, 摩擦热使轴承温度升高, 热膨胀效应使孔隙体积减小而油的体积增大, 把孔隙中的一部分油挤向轴承工作表面, 在轴和轴承之间形成润滑油膜。轴停止转动时, 表面的油又靠毛细管力作用渗入孔隙。油以此往复起自润滑作用, 只要各轴承参数匹配得当, 有可能建立全膜流体动力润滑。但两平面间滑动摩擦时, 工作条件与含油轴承

不同, 其自润滑机理有待研究。

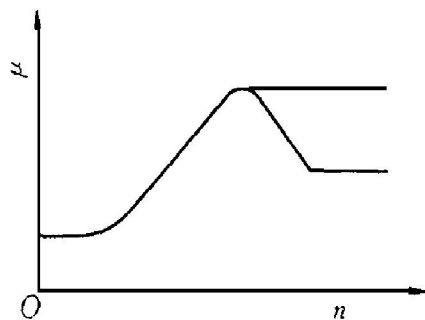


图 1 滑动摩擦特性曲线

Fig. 1 Slide friction characteristic curve

研究自润滑材料滑动摩擦特性与自润滑机理, 可为自润滑材料的设计和使用提供依据, 并丰富、发展摩擦学的内容。本文通过研究含油量低、中、高三种铜石墨自润滑材料的滑动摩擦过程, 确立其摩擦特性和自润滑机理。

1 实验方法

材料制备见文献[5~8], 经模压成型, 烧

① 收稿日期: 1999-01-04; 修回日期: 1999-04-12

丁华东(1961-), 男, 副教授, 博士

结, 真空浸(20[#])油后获得 12 mm × 6 mm × 6 mm 试样; 材质为 HDV6, HDV12 和 HDV20 三种; 含油率分别为 12%, 17% 和 20%。在 MM-200 型磨损试验机上作纯滑动摩擦, 法向载荷 L 分别为 150 N, 350 N 和 500 N; 对偶件为淬火 45[#] 钢环(硬度 HRC50 ± 3), 转速为 400 r/min。实验中, 测量摩擦系数 μ 和对应的转数 n , 同时用 DT9207 数字万用表测定摩擦表面附近的温度, 然后用文献[9]的方法求得摩擦面的平均温度 T , 由此获得表征自润滑材料动态摩擦特性的 $\mu-n$ 和 $T-n$ 曲线(简称 Z 态)。为便于表示滑动摩擦全图, $\mu-n$ 曲线数据只取 L 为 500 N 的, $T-n$ 曲线只取材料 HDV20 的。为便于讨论, 文中还给出了同类材料未浸油的 $\mu-n$ 曲线(简称 G 态)。

2 滑动摩擦特性

滑动摩擦 $\mu-n$ 曲线示于图 2 和图 3, 比

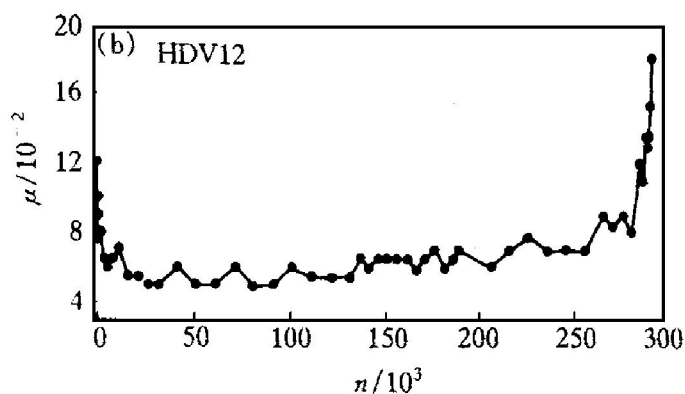
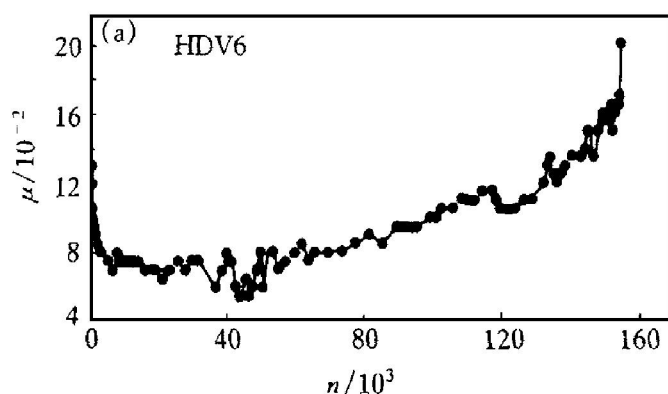


图 2 自润滑材料滑动摩擦的 $\mu-n$ 曲线($L = 500$ N)

Fig. 2 $\mu-n$ curves of slide friction for self-lubrication materials($L = 500$ N)

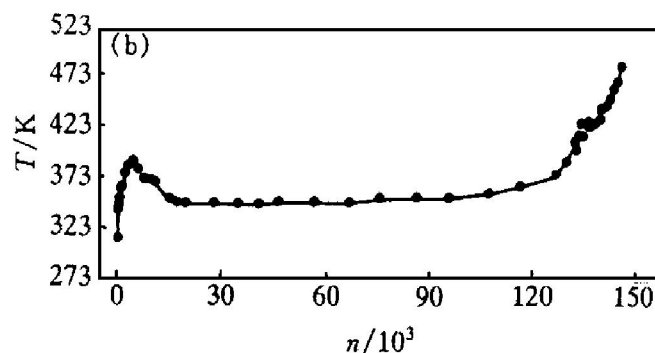
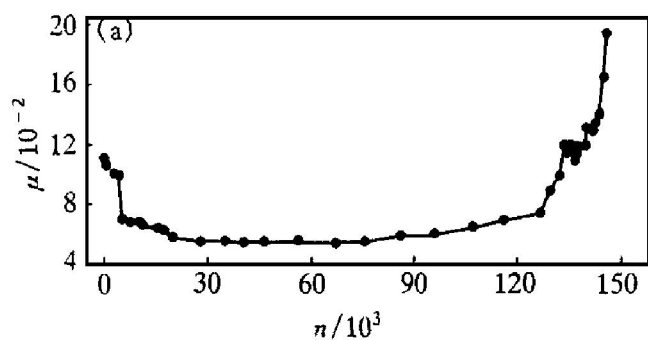


图 3 HDV20 自润滑材料滑动摩擦特性曲线(Z 态, $L = 500$ N)

Fig. 3 Slide friction characters of self-lubricating material HDV20(state Z, $L = 500$ N)

(a) — $\mu-n$ curve; (b) — $T-n$ curve

较图 2 中的(a), (b) 和图 3 可发现不同材料的曲线的形状相似, 其 μ 随 n 的变化态势相同; 而这三种材料分别代表含油量低、中、高三种类型的自润滑材料, 由此得知自润滑材料滑动摩擦特性是相同的, 可将其归纳成图 4 的形式, 用以讨论自润滑摩擦特性的基本规律。依图 4 可将 $\mu-n$ 曲线大致划分为三段, 即 I 段: $d\mu/dn < 0$, II 段: $d\mu/dn \rightarrow 0$, III 段: $d\mu/dn \rightarrow \infty$ 。

在图 4 的第 I 段, $d\mu/dn < 0$, 这表明随滑动摩擦的进行, 摩擦系数降低, 其实质是自润滑材料向摩擦表面供油的能力逐步提高, 是自润滑开始工作阶段。第 II 段, $d\mu/dn \rightarrow 0$, 表明随滑动摩擦的进行, 摩擦系数变化很小, 自润滑摩擦进入稳态, 是自润滑稳态工作阶段。第 III 段, $d\mu/dn \rightarrow \infty$, 表明随滑动摩擦的进行, 摩擦系数急剧升高, 自润滑稳态工作状态被破坏, 而材料丧失自润滑能力后, 摩擦将变成干摩擦, 是自润滑失稳向干摩擦过渡阶段。

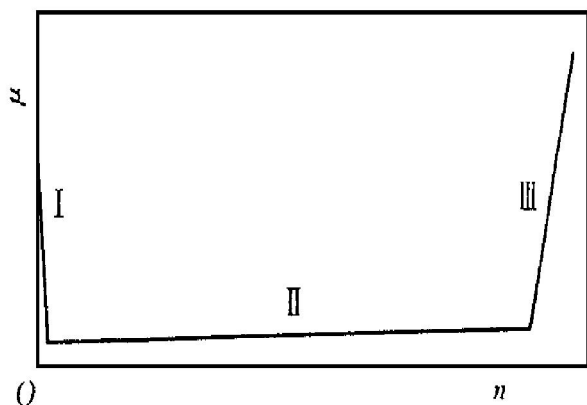
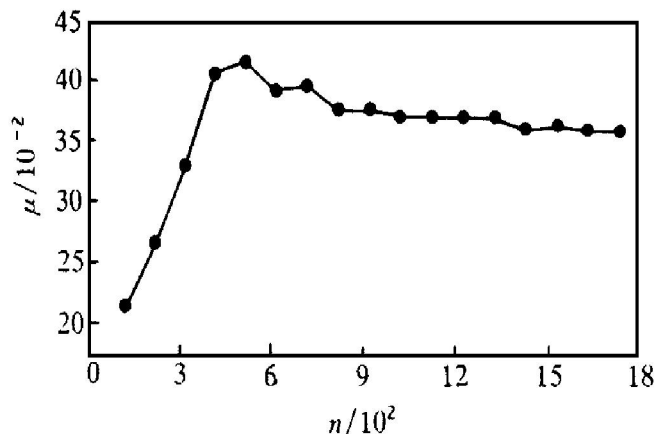


图4 自润滑材料滑动摩擦特性曲线

Fig. 4 Slide friction characteristic curve of self-lubricating materials

3 滑动摩擦自润滑机理

由于含油量低、中、高三种自润滑材料的摩擦特性是一致的, 故只讨论 HDV20 材料 Z 态的 $\mu-n$ 和 $T-n$ 曲线(图 3)及 G 态 $\mu-n$ 曲线(图 5), 由图可知 G 态的摩擦系数高于 Z 态的。

图5 材料滑动摩擦特性曲线
(G 态, HDV20, $L = 500\text{ N}$)Fig. 5 Slide friction characters of materials
(state G, HDV20, $L = 500\text{ N}$)

3.1 含油自润滑材料的基本假设

为便于讨论, 对试样假设如下:

- (1) 试样中, 任一微单元均是由金属基体、石墨和含油孔隙三者组成;
- (2) 孔隙体积与油的体积相等;
- (3) 金属、石墨、油三者均具备受压体积不变特性, 孔隙具备可压缩性;

(4) 油具有液体的流动性, 受压后向压力低的方向流动。

3.2 法向载荷对自润滑的贡献

两表面接触时, 界面由若干相接触的微凸体组成。两表面的初始接触只发生在少数表面微凸体的顶部, 因而单位压力很大, 足以引起弹、塑性变形而使真实接触面积增大, 直至能支承所受载荷为止。试样为含油多孔体, 组成试样的金属、石墨、油三者均具备受压体积不变特性, 试样受压变形后, 其体积将减小。这一现象的实质是试样内部孔隙的体积减小, 孔隙内贮油将因此而被迫流向摩擦表面。尽管整体试样受压变形将不再遵从质量不变和体积不变定律, 但依据对试样特性基本假设, 仍可计算试样受压变形而引起的孔隙体积减小量。

设试样受压前后的体积分别为 V_0 和 V , 则受压后油从试样内部流出的体积为 ΔV , 有

$$\Delta V = V_0 - V \quad (1)$$

对 ΔV 的数量级作估算^[5], 知其为 $1 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ 。润滑油对试样的润湿角为 0 , 油在摩擦表面将尽可能地铺展开^[5], 起到自润滑作用。任何滑动摩擦总是在施加法向载荷后才开始滑动摩擦过程, 故法向载荷使摩擦面在开始摩擦时即处于自润滑状态, 使摩擦开始时 G 态的摩擦系数便高于 Z 态的(图 3 和 5)。

3.3 摩擦热对自润滑的贡献

由 Z 态(图 3)的 $\mu-n$ 和 $T-n$ 曲线可知, 在第 I 阶段中, 随 n 增加, μ 值降低, 而 T 值则增加, 说明 μ 的降低与 T 有关。

滑动摩擦时, 摩擦力所作的功等于在摩擦面所产生的热量 Q , 即

$$Q = \mu P v \quad (2)$$

式中 v 为滑动速度。摩擦热是在界面上消散的, 实验中, 可把热源当成静热源处理, 对试样有^[10]

$$T - T_0 = \mu P v / 8 A_T \alpha \quad (3)$$

式中 T_0 为环境的温度, A_T 为摩擦接触面积, α 为热传导率。滑动过程中, 可假设 P , v , A_T 和 α 为常数, 并令 $C = \frac{P v}{8 A_T \alpha}$, 有

$$T - T_0 = C\mu$$

$$\text{或 } T = C\mu + T_0$$

式(4)说明 T 随着 μ 的升高而升高。

随 T 升高, 试样体积将发生变化, 固体部分和液体油的体积将增大, 固体部分的体积增大将使孔隙的体积减小^[5]。由于液体的膨胀系数远大于固体, 与液体油的体积变化相比, 孔隙的体积变化可以忽略; 若忽略温度对液态油的体膨胀系数 β 的影响, 则可取油的体膨胀系数为常数。

取 T_0 为 298 K, 则此时试样中孔隙的体积与贮油的体积相等, 均为 V_s 。当试样摩擦表面温度由 T_0 升至 T 时($T > T_0$), 试样中孔隙的体积几乎不变, 仍为 V_s , 而油的体积则为 V_L , 显然有

$$V_L = V_s + \beta(T - T_0)V_s \quad (5)$$

即由于 Q 的作用, 将有体积量为 $\beta(T - T_0) \cdot V_0$ 的液体油被迫由试样内部流向摩擦表面, 起到自润滑的作用。在摩擦的初始阶段, 随着摩擦过程的进行, Q 升高, 使 T 升高; 随着 T 的升高, 流向摩擦表面的油量 Y 也升高, 提高了润滑效果, 使 μ 降低(图3)。

3.4 滑动摩擦自润滑机理

多孔含油材料滑动摩擦时, 由于油的流动性和孔的可压缩性, 在法向载荷的作用下, 试样表层受压变形而减小其内部孔隙的体积, 使孔内贮油被强制输送到表面, 开始自润滑过程(本文称之为甲种机制), 使摩擦的起始阶段, Z 态的 μ 值便低于 G 态的。随滑动进行, 因摩擦热而使摩擦面及多孔含油材料温度升高, 孔隙内油的体积膨胀, 而孔隙的体积受热后则略

有减小, 由此把试样内贮油强行输送到摩擦面, 起到自润滑作用(本文称之为乙种机制)。

滑动时, 由于乙种机制的存在, 使摩擦面温度 T , 摩擦系数 μ 和摩擦面油量 Y 间存在相互作用关系。 μ 升高, 将使 T 升高(参见式(4)); 而 T 升高, 将使 Y 升高; Y 升高又使 μ 降低, 在摩擦面形成图6所示的自反馈调节润滑效果的机制(简称华东自反馈调节机制), 由于此机制的作用, 滑动摩擦经过一定距离后, μ 趋于常数, 即稳态滑动时的摩擦系数(图1中的第II阶段, n 介于 15 000~139 800)。因为滑动摩擦在开放体系中进行, 油的损耗是不可避免的, 每完成图6的一个循环, 为补充摩擦面油的损耗, 试样表面温度被迫升高一微量 ΔT , 且随温度的升高, 油的损耗量也升高。待摩擦面温度升至油的闪点(约 443 K)时, 由试样内部输送至摩擦表面的油会因气化而向环境中挥发, HD 自反馈机制便由于油的挥发而失效。摩擦的继续进行将导致试样贮油更快地向环境中挥发, 使 T 和 μ 均随摩擦的进行而升高(图3中的第III阶段, $n > 116 000$), 摩擦由自润滑态向干摩擦过渡(参见图3和5)。

REFERENCES

- 1 Quan Yongxing(全永昕). Engineering Tribology(工程摩擦学). Hangzhou: Zhejiang University Press, 1994: 78.
- 2 Suh N P. Tribophysics. Beijing: World Publishing Corporation, 1989: 73.
- 3 Zhou Guiru(周桂如), Ma Ji(马骥) and Quan Yongxing(全永昕). Theory of Liquid Lubrication(流体润滑理论). Hangzhou: Zhejiang University Press, 1990: 223.

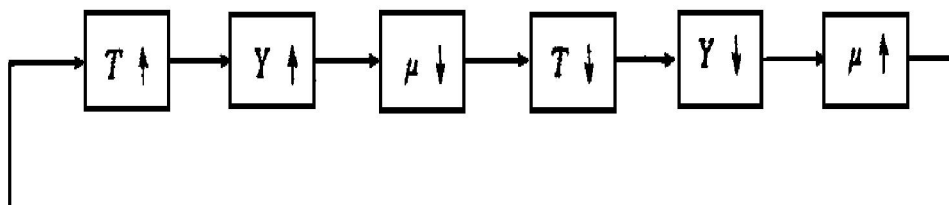


图6 滑动摩擦中的华东自反馈调节机制

Fig. 6 HD self-feedback adjusting mechanism during slid friction

T : average temperature of friction surface; Y : oil content of friction surface;

μ : friction coefficient; $\uparrow$: increase; $\downarrow$: decrease; $\rightarrow$: induce

- 4 Huang Peiyun(黄培云). Foundation of Powder Metallurgy(粉末冶金原理). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1983: 374.
- 5 Ding Huadong(丁华东). PhD thesis. (in Chinese), Xi'an Jiaotong University, 1997: 25.
- 6 Ding Huadong(丁华东), Hao Hongqi(浩宏奇) and Jin Zhihao(金志浩). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(3): 106.
- 7 Ding Huadong(丁华东), Li Yawen(李雅文), Hao Hongqi(浩宏奇) *et al.* Powder Metallurgy Technology(粉末冶金技术), 1998, 16(2): 89.
- 8 Ding Huadong(丁华东), Li Yawen(李雅文), Hao Hongqi(浩宏奇) *et al.* Ordnance Materials Science and Engineering(兵器材料科学与工程), 1997, 20(5): 17.
- 9 Ding Huadong(丁华东), Han Wenzheng(韩文政), Xie Fengkuan(谢凤宽) *et al.* The Chinese Surface Engineering(中国表面工程), 1999, 12(1): 41.
- 10 Xue Jangwen(薛景文). Tribology and Lubrication Technique(摩擦学及润滑技术). Beijing: Ordnance Industry Press, 1992: 41.

Slide friction characteristic of self-lubricating material and its self-lubricating mechanism

Ding Huadong¹, Han Wenzheng¹, Li Yawen², Wang Yonglan³, Jin Zhihao³

1. Department of Materials Engineering, Armored Force Engineering Institute,
Beijing 100072, P. R. China

2. Shanghai Silicate Research Institute, CAS, Shanghai 200050, P. R. China

3. The School of Materials Science and Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China

Abstract: The whole course friction characteristic curves, friction coefficient μ versus friction distance n , which consisted of three stages, i. e., $d\mu/dn < 0$ (initial self-lubricating stage), $d\mu/dn \rightarrow 0$ (stable self-lubricating stage) and $d\mu/dn \rightarrow \infty$ (failure stage, self-lubrication giving way to dry friction), were obtained for the oily self-lubricating materials. The self-lubricating mechanism in sliding friction was founded by studying the physical changes during friction course and analysing the properties of material and lubrication oil, and it may be given as follows: under the compressing action of normal load and friction heat, and based upon the fluidity of oil, compressibility of pores and heated expansibility of oil, the oil stored in the pores of material is compelled to flow to the friction surface to lubricate. During friction process, there are self feedback adjusting functions, i. e., HD mechanism, among friction heat, oil quantity and friction coefficient; and it is that which maintains the friction coefficient low and steady. It is unavoidable for oil to waste during friction process, but the wasted oil is able to supply under the HD mechanism by increasing the friction surface temperature. As soon as the friction surface temperature is near or beyond the flash point of oil, the oil between friction surfaces will volatilize greatly, and this makes the friction type transform from self-lubrication friction to dry friction and the self-lubrication fails.

Key words: powder metallurgy; sliding friction; self-lubrication; self-lubrication materials; self-lubrication mechanism

(编辑 彭超群)