

[文章编号] 1004- 0609(2001) 04- 0616- 05

自润滑材料滑动摩擦磨损性能与机理^①

丁华东¹, 傅苏黎², 朱有利¹, 王永兰³, 金志浩³

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

[摘 要] 研究了低、中、高 3 种含油量的铜石墨自润滑材料的滑动摩擦磨损过程, 发现其磨损量很微小, 处于稳态工作时的磨损量最低。依据摩擦系数的变化, 利用 SEM 分析磨损表面形貌和剖面结构, 得知自润滑材料滑动摩擦第 I 阶段对应的磨损机理是磨粒磨损, 第 II 和第 III 阶段对应的是疲劳磨损, 疲劳裂纹的扩展方向接近试样表层拉应力区域的最大剪切圆轨迹, 疲劳磨屑最终脱落是法向力的作用结果, 依此, 确立形成疲劳磨屑的判据。

[关键词] 粉末冶金材料; 滑动摩擦; 自润滑材料; 磨损

[中图分类号] TF 125. 6

[文献标识码] A

文献[1]研究了自润滑材料滑动摩擦特性与自润滑机理, 文献[2]通过实验验证了自润滑机理, 但自润滑材料的滑动摩擦磨损机理尚未见报道, 无疑, 开展此研究工作, 可丰富、发展摩擦学的内容, 同时也为提高这类材料的性能提供依据。作者通过低、中、高 3 种含油量的铜石墨自润滑材料的滑动摩擦磨损实验, 研究其摩擦磨损性能与机理。

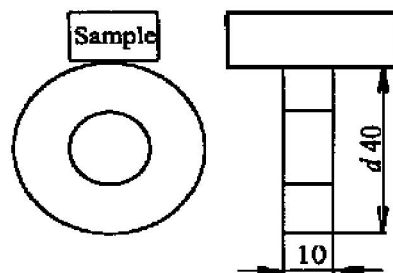


图 1 滑动摩擦示意图

Fig. 1 Sketch map of friction

1 实验

材料制备见文献[3~ 6], 经模压成型, 烧结, 真空浸(20[#])油后得 12 mm × 6 mm × 6 mm 试样, 材质分别为 HDV6, HDV12, HDV20, 含油率见表 1。在 MM-200 型磨损试验机上进行纯滑动摩擦(图 1), 法向载荷 F 分别为 150, 350 和 500 N, 对偶件为淬火 45[#] 钢环(硬度 HRC50 ± 3), 转速为 400 r/min。测量摩擦系数 μ 和对应的转数 n 。

摩擦磨损实验后, 用工具显微镜和游标卡尺测定磨痕尺寸 $2a_1$ 和 $2a_2$, 用扫描电镜(SEM)分析

磨损表面(xoy 平面)和磨损剖面(yoz 平面)。试样的体积磨损量 ΔV 由式(1)确定^[7], 即

$$\Delta V = L_0 \left[R^2 \arcsin \frac{a}{R} - a(R^2 - a^2)^{1/2} \right] \quad (1)$$

式中 $L_0 = 10$ mm, 为磨损面长度; $R = 20$ mm, 对偶件外半径; $a = (a_1 + a_2)/2$ 为磨损面平均宽度。

为评定不同自润滑材料的磨损性能, 把滑动路程均定为 50 000 转, 比较其对应的体积磨损量来评价材料的耐磨性能。研究同一材料磨损性能的具体方法是, 考查其不同摩擦阶段的磨损量, 取滑程转数 $n_1 < n_2$, 测其对应的磨损量 ΔV_1 和 ΔV_2 , 则在区间 $n_1 \sim n_2$ 的磨损量为 $\Delta V_{1,2}$, 有

$$\Delta V_{1,2} = \Delta V_2 - \Delta V_1 \quad (2)$$

记此区间的磨损性能为 $\eta_{1,2}$, 有

$$\eta_{1,2} = \frac{\Delta V_2 - \Delta V_1}{n_2 - n_1} \quad (3)$$

表 1 试样含油率

Table 1 Oiliness ratio of sample

Sample	Oiliness ratio/ %
HDV6	12
HDV12	17
HDV20	20

① [基金项目] 坦克传动国防科技重点实验室资助项目(00JS37. 3. 1. JB3501); 国家自然科学基金资助项目(59705009)

[收稿日期] 2000- 10- 20; [修订日期] 2000- 12- 25

[作者简介] 丁华东(1961-), 男, 副教授, 博士。

2 摩擦磨损结果

自润滑材料的滑动摩擦磨损结果分别如表 2 和表 3 所示, 自润滑滑动摩擦特性见图 3, 由文献[1, 2] 的 $\mu \sim n$ 曲线, 可确定图 3 中 I, II, III 阶段的 n 值范围。由于材料 HDV6 的含油量低, 其滑动摩擦 $\mu \sim n$ 曲线中各阶段的界限极为模糊, 表 3 中没有列出它摩擦磨损结果。

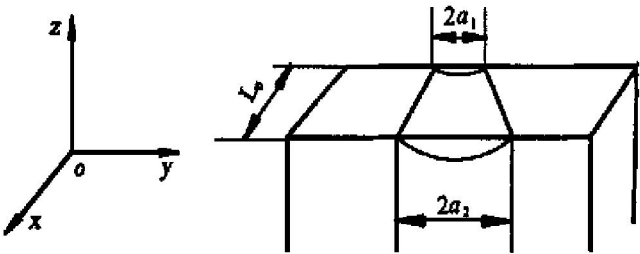


图 2 试样磨痕形状
Fig. 2 Wear figure of sample

表 2 摩擦磨损结果

Table 2 Wear results for different normal pressures

F/N	Rotations, n	$\Delta V/mm^3$		
		HDV6	HDV12	HDV20
150	50 000	0. 023	0. 037	0. 040
350	50 000	0. 032	0. 040	0. 071
500	50 000	0. 048	0. 054	0. 131

表 3 滑动摩擦不同阶段的摩擦磨损性能

Table 3 Sliding wear properties for different friction stages ($F=500\text{ N}$)

Material	$\eta_{1,2}/(\text{mm}^3\cdot\text{r}^{-1})$		
	I	II	III
HDV12	4.2×10^{-6}	2.8×10^{-7}	1.1×10^{-6}
HDV20	4.2×10^{-6}	1.1×10^{-6}	2.1×10^{-6}

Rotation ranges for different friction stages:

(1) HDV12: I 0~ 5 000, II 5 000~ 200 000, III 200 000~ 287 000, (2) HDV20: I 0~ 10 000, II 10 000~ 100 000, III 100 000~ 140 000

由文献[1, 2] 和图 3 可知, 自润滑材料滑动摩擦的不同阶段, 其摩擦系数是不同的。在第 II 阶段 μ 值最低且稳定, 第 I 阶段的和第 III 阶段的 μ 值变化均较大, 且后者高于前者。对于同一材料, 在摩擦条件基本相同时, 磨损量随着摩擦系数的升高而升高。但表 3 的实验结果却显示第 I 阶段的 $\eta_{1,2}$ 值高于第 III 阶段的, 其实质是对偶件的硬度远远高于

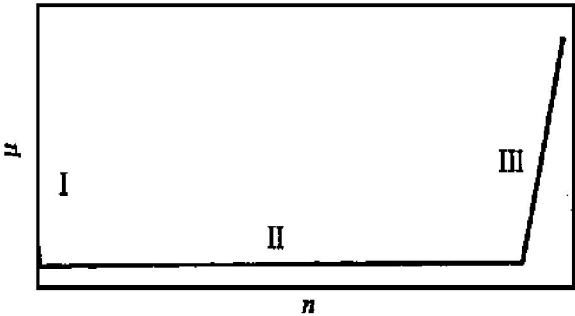


图 3 自润滑滑动摩擦特性($\mu \sim n$ 曲线) 全图^[1, 2]

Fig. 3 Sliding friction characteristic ($\mu \sim n$) curve of self-lubrication material^[1, 2]

试样的^[5]。当偶件与试样接触时, 由于试样内部孔隙的可压缩性和油的流动性, 在 F 的作用下, 试样表层和亚表层受压变形使其体积减小, 所测的 a_1 和 a_2 实际为摩擦磨损与塑性变形的叠加。这种非摩擦磨损因素叠加在第 I 阶段的 ΔV 上, 从而使此阶段中的 $\eta_{1,2}$ 较 II, III 阶段的高。II 阶段的 μ 值逐渐升高, 其对应的磨损量也会逐渐升高, 而 III 阶段的起始 μ 值与 II 阶段的相近, 故 III 阶段的磨损性能高于 II 阶段的。第 III 阶段是向干摩擦过渡的阶段, 由摩擦学的基本原理, 也可知其磨损量最大。

由表 2 和表 3 可知, 自润滑滑动摩擦的磨损量是很微小的, 自润滑摩擦处于稳态工作时的磨损量最低, 同一材料在不同的滑动摩擦阶段其磨损量也只差一个数量级。

3 摩擦磨损机理

HDV6, HDV20 和 HDV20 3 种材料的自润滑滑动摩擦磨损具有相同的磨损机理, 以 HDV20 的磨损机理为例, 其不同摩擦阶段的磨损形貌见图 4。

在摩擦的第 I 阶段, 磨损表面有少量犁沟, 没有粘着磨损的痕迹, 属于磨粒磨损。试样表面微凸体在偶件的作用下断裂脱落而构成摩擦面间的第三体, 图中白色小粒子(μm 数量级) 即为试样磨损面残留的第三体。在摩擦力作用下, 第三体沿着滑动方向滑过试样表面, 在试样表面留下其滑动轨迹(犁沟); 偶件表面微凸体在滑过试样表面时也会形成犁沟。磨损面未见到粘着磨损的痕迹, 说明在摩擦前, 试样内部贮油已流向摩擦面而阻止试样与磨轮间的粘着, 这与自润滑工作机理^[1] 是一致的。

在摩擦的第 II 阶段, n 取 50 000 时, 磨损面以蚀坑为主, 伴有犁沟, 并有少量垂直于犁沟方向(即滑动方向) 的裂纹。蚀坑是疲劳磨损的标志, 与

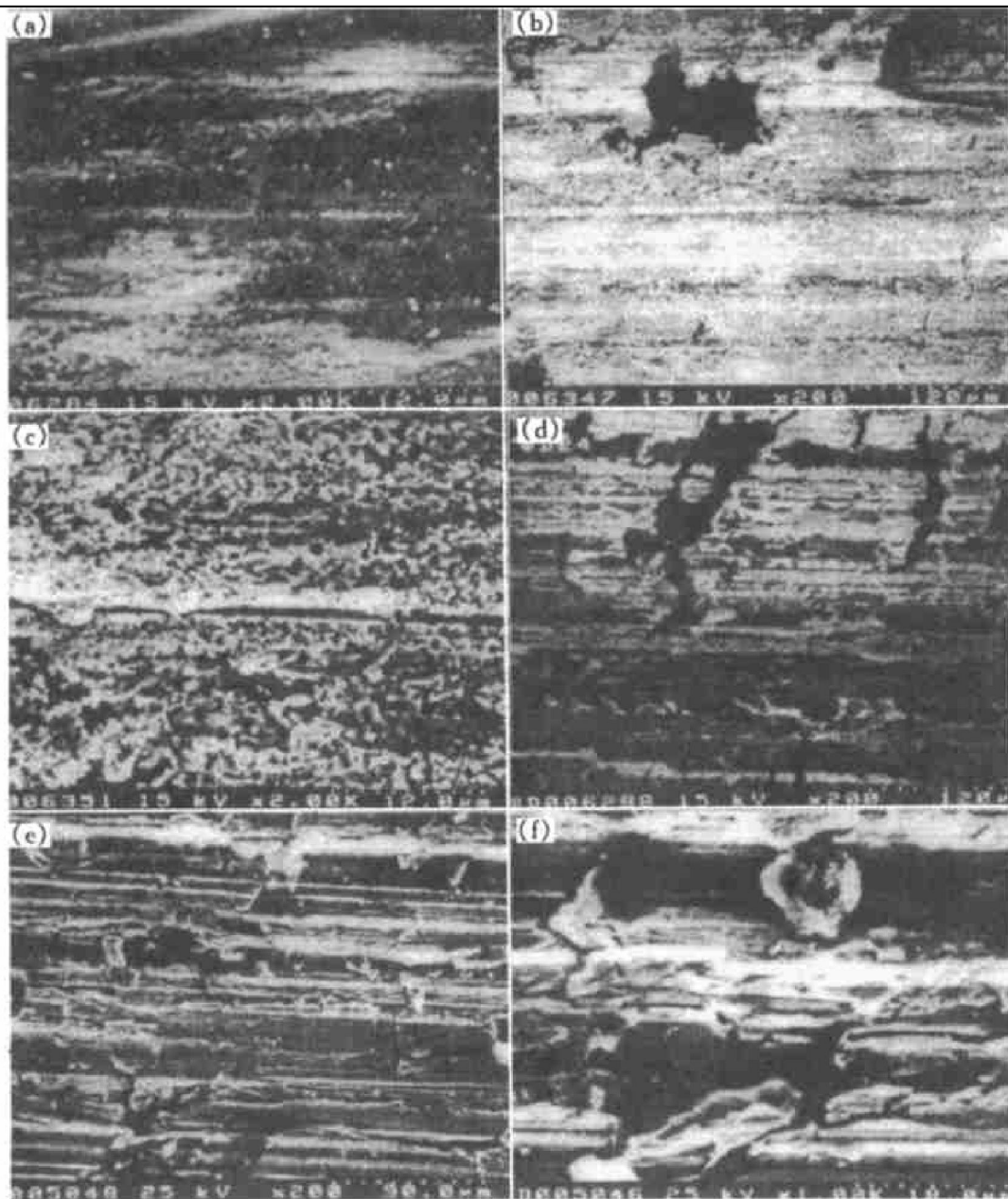


图 4 自润滑 3 个阶段的滑动摩擦磨损微观形貌

Fig. 4 Wear microstructure of self-lubrication sliding friction(HDV 20, $F = 500 \text{ N}$, surface xoy)

滑动方向垂直的裂纹则是疲劳裂纹。此时的磨损以疲劳磨损为主, 辅以磨粒磨损。 n 取 100 000 时, 疲劳裂纹增多, 出现疲劳剥落坑, 仍有蚀坑和犁沟。比较图(b)和(d)可发现 $n = 100\ 000$ 的蚀坑面积远大于 $n = 50\ 000$ 时的, 说明在第 II 段后期的疲劳磨损程度比初期的要严重些, 这与疲劳磨损的特性是一致的。

在摩擦的第 III 阶段, 磨损面由大量鳞片状疲劳磨屑和疲劳裂纹构成, 疲劳磨屑在偶件碾压作用下发生明显的塑性变形, 这种变形会掩盖疲劳坑的原始面积, 难以见到图(d)中的那种疲劳剥落坑的原始形貌。在第 III 阶段滑动中, 随转数 n 的增加, μ 值急骤升高, 摩擦面所受的切向力越来越大, 这将引起越来越严重的疲劳磨损, 使疲劳磨屑增多。磨屑在摩擦力的作用下, 沿滑移方向移动, 移动中磨

屑相互接触, 因受力不均, 有的磨屑会发生转动, 于是出现图(f)下部磨屑表面犁沟与基体犁沟不连续的情况。磨损表面未见到粘着磨损的痕迹, 说明摩擦未过渡到干摩擦。

两滑动表面的接触模型见图 5, 微凸体滑过试样表面时, 在应力 p 和 q 的作用下, 试样的表层将发生弹、塑性变形。压应力为 p 时, 由文献[8]可估算出微凸体直接与试样表面接触时, $q = 0.35p$; 若微凸体通过油膜与试样接触, 则由文献[1, 2, 9]中 $\mu \sim n$ 曲线第 II 阶段的 μ 值 ($\mu = 0.04 \sim 0.06$) 可知 $q = (0.04 \sim 0.06)p$ 。微凸体的间距比微凸体的尺寸大, 在接触点附近的应力状态不受其它微凸体的影响, 试样的尺度远大于微凸体的, 故可把试样当作半无限大物体。由线弹性断裂力学方法, 获试样表层在微凸体作用下的应力状态(图 6), 图中直

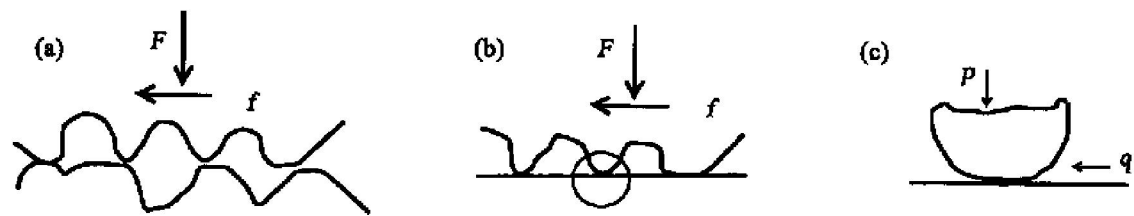


图 5 滑动表面接触的微观模型

Fig. 5 Slide surface contact microcosmic model

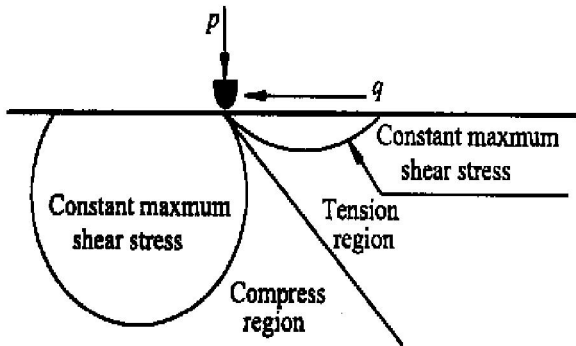


图 6 微凸体与半无限大平面接触时的应力状态

Fig. 6 Stress condition between micro-convexity and half infinity plane

线 z 代表零应力线, 在微凸体滑移后方, 试样表层处于拉应力区域, 而滑移前方的试样则处于压应力区域。当一个微凸体在试样表面滑过一次后, 试样上各点都经历了从压应力到拉应力的变换过程, 在此交变应力的作用下, 试样的表面或亚表面可萌生裂纹或扩展; 而试样的多孔性决定了无需裂纹形核, 裸露在表面的孔隙便为裂纹源, 在拉应力作用下, 裂纹扩展, 开始了疲劳摩擦磨损过程。比较图 6 和图 7, 可以认为疲劳裂纹基本上是与最大剪应力圆的轨迹形状一致。对于多孔材料, 裂纹扩展在各处的阻力是不同的, 这便是裂纹扩展方向与最大剪应力圆不完全一致的原因。

通过上面的讨论, 可将自润滑滑动摩擦的疲劳磨损过程表述如下: 摩擦时, 在偶件表面微凸体所

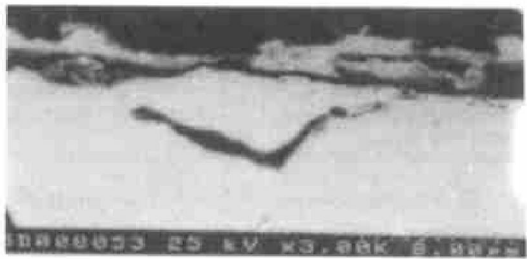


图 7 试样滑动摩擦产生的疲劳裂纹(剖面)

Fig. 7 Fatigue crack caused by self-lubrication sliding friction (cross-section yoz)

施加的交变应力的作用下, 试样表面和次表面受到积累损伤; 在摩擦力的作用下, 其表面的孔隙开始沿扩展动力最大的方向(约为图 6 的最大剪应力圆方向)扩展, 其扩展过程示于图 8, 此类孔隙即为疲劳磨损的裂纹源。

设 F 施加在试样表面的平均压应力为 p , 试样的剪切强度为 τ_c , 裂纹沿 x 方向的尺寸为 B (参图 2), 裂纹沿最大剪应力圆方向扩展。根据强度理论, 只要满足关系 $pLB < \tau_chB$, 即

$$\frac{pL}{h} < \tau_c \tag{4}$$

则裂纹不会产生磨屑。

在应力 p 的作用下, 裂纹与摩擦面所夹区域的材料构成悬臂梁, 它承受剪切力, 伴随着裂纹的扩展, 此剪切力增大, 当其值大于材料的剪切强度时, 裂纹与表面所夹区域的材料将从母体分离, 形

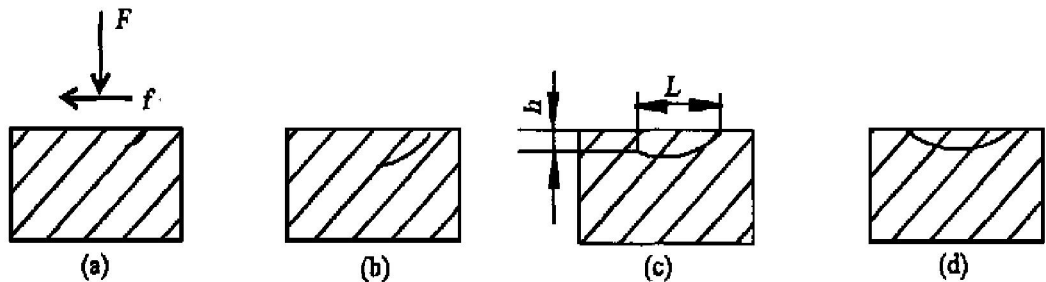


图 8 疲劳摩擦磨屑形成 (a) → (b) → (c) → (d) 过程示意图(yoz 剖面)

Fig. 8 Schematic of friction fatigue wear sheet forming process (a) → (b) → (c) → (d) (cross section yoz)

成疲劳磨屑。于是,形成疲劳磨屑的判据为:

$$\frac{pL}{h} > \tau_c \quad (5)$$

Suh 和 Jahanmir^[8, 10]在研究致密材料的摩擦磨损时发现:随摩擦系数增大,产生裂纹区域的深度增大,由此,可推论:对于多孔自润滑材料,随摩擦系数的增大,图6的最大剪应力圆的最大深度增大,这说明随摩擦系数升高,疲劳磨屑尺寸增大。

[REFERENCES]

- [1] DING Hua-dong(丁华东), HAN Wen-zheng(韩文政), LI Ya-wen(李雅文), et al. Slid friction characteristic of self-lubrication material and its self-lubrication mechanism [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1999, 9(3): 515– 518.
- [2] DING Hua-dong(丁华东), XU Shi-meng(许世蒙). Test of working mechanism for self-lubrication material and its regeneration [J]. Journal of Armored Force Engineering Institute(装甲兵工程学院学报), 2000, 14(3): 26– 29.
- [3] DING Hua-dong(丁华东), LI Ya-wen(李雅文), HAO Hong-qi(浩宏奇), et al. Grey equation between strength and porosity of copper-graphite composite [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(4): 123– 126.
- [4] DING Hua-dong(丁华东), HAO Hong-qi(浩宏奇), JIN Zhi-hao(金志浩). Influence of graphite content on sintering expansion of copper base alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(3): 106– 110.
- [5] DING Hua-dong(丁华东), LI Ya-wen(李雅文), HAO Hong-qi(浩宏奇), et al. Grey relation analysis among copper-graphite material properties [J]. Powder Metallurgy Technology(粉末冶金技术), 1998, 16(2): 89– 92.
- [6] DING Hua-dong(丁华东), LI Ya-wen(李雅文), HAO Hong-qi(浩宏奇), et al. Effect of repressing on strength of copper-graphite oily material [J]. Ordnance Material Science and Engineering(兵器材料科学与工程), 1997, 20(5): 17– 22.
- [7] Mathematics Handbook Editor Group(数学手册编写组). Mathematics Handbook(数学手册) [M]. Beijing: Advanced Education Press, 1984. 82– 84.
- [8] Nam P. Suh. Tribophysics. Beijing: World Publishing Corporation, 1989. 155– 156.
- [9] DING Hua-dong(丁华东). The Study of Copper-graphite Self-lubrication Material and Its Friction and Wear Characteristics [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1997. 72– 83.
- [10] Jahanmir S, Suh N P. Mechanics of subsurface void nucleation in delamination wear [J]. Wear, 1977, 44: 17– 38.

Wear investigation of self-lubrication material slid friction

DING Hua-dong¹, FU Su-li², ZHU You-li¹, WANG Yong-lan³, JIN Zhi-hao³

(1. Department of Materials Science and Engineering, Armored Force Engineering Institute;

2. Department of Discipline, Armored Force Engineering Institute,

P. L. A, Beijing 100072, P. R. China;

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

[Abstract] The wear experiment was taken in Amsler friction experiment device, and the wear property was judged by the volume loss of the sample. It was found that the sample volume loss during self-lubrication friction process is very small and the least wear is taken place in the stable self-lubrication friction stage. The wear mechanisms were studied by analyzing the wear surface and wear section plane through SEM. It was found that in $dW/dn < 0$ friction stage, the wear mechanism is plowing; in $dW/dn \rightarrow 0$ and $dW/dn \rightarrow \infty$ stages, the mechanism is fatigue wear. At last, the criterion of forming fatigue wear bit was given.

[Key words] powder metallurgy material; sliding friction; self-lubrication material; wear

(编辑 黄劲松)