

# 烧结黄铜(H68)的摩擦磨损特性<sup>①</sup>

李溪滨 苏春明 谭林英

(中南工业大学粉末冶金研究所, 长沙 410083)

**摘要** 研究了烧结黄铜(H68)的物理—机械性能对其摩擦磨损特性的影响, 探讨了在不同试验工艺下, 烧结黄铜的磨损机制, 结果表明: 烧结黄铜的主要磨损机制是粘结磨损和磨粒磨损, 与致密黄铜相比具有某些性能差异。

**关键词** 粉末冶金 烧结黄铜 磨损 摩擦学

随着现代科技的发展, 粉末冶金材料在汽车、机械、交通、农机、家电和国防等领域应用愈来愈广泛, 其性能直接影响到整体系统的工作寿命。据资料报道<sup>[1]</sup>, 材料的磨损是零件失效的主要原因, 约占 80%。早期摩擦学工作者对致密黄铜的研究表明: 黄铜的磨损数据具有重现性<sup>[2]</sup>。因此, 本研究以烧结黄铜为对象, 分析烧结材料固有的特性对摩擦磨损性能的影响, 力求揭示其磨损机制, 探讨其与致密黄铜的相关性。

## 1 实验方法

### 1.1 试样的制备

采用工业生产的一100目的雾化黄铜(H68)粉末, 在不同的单位压制压力下, 制取密度不同的压坯, 然后, 在同一烧结温度, 保温时间、氢气保护下烧结, 得到所需的试样。在进行摩擦磨损试验之前, 全部试样进行处理, 并且, 在同一试验工况下进行磨合试验。

### 1.2 性能检测

试验样品的物理—机械性能(孔隙度、密度、硬度等)按国标进行检测。摩擦磨损性能数据是在MHK-500环块磨损试验机上进行的, 对偶材料是GCr15合金钢。同时, 用日产

3014X射线衍射仪分析了磨屑的元素成分, 用JCA-733型扫描电镜对磨损痕和磨屑表面形貌进行了观察。

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 物理-力学性能对摩擦磨损性能的影响

烧结材料与致密材料的显著差异之一, 是前者具有一定的、均匀分布的孔隙, 其密度相应要低一些。本研究对不同密度和硬度的材料与其摩擦系数和磨损量的相互关系进行了探讨, 其结果分别列入图1和图2之中。从图1和图2的关系曲线可以看到, 随着材料密度和硬度的提高, 其摩擦系数和磨损量都是以不同的速率下降的。众所周知, 材料密度的提高, 意味着金属真实接触面积的增加, 金属键结合的增强, 从宏观表示出材料机械性能的提高(例如硬度、屈服极限、拉伸强度等)。而材料的机械性能与其摩擦系数和磨损量之间的关系, 在早期研究工作者的资料中已有许多报道<sup>[2, 3, 4]</sup>, 并可用下列关系式予以表示:

$$H = C \cdot P_c^{[3]} \quad (1)$$

式中  $H$  为材料硬度,  $P_c$  为屈服极限,  $c$  为常数(对经冷作硬化的金属而言, 其值约等于3)。

$$\mu = \frac{S^{[1]}}{P_c} \quad (2)$$

① 收稿日期: 1994-09-01; 修回日期: 1994-10-11

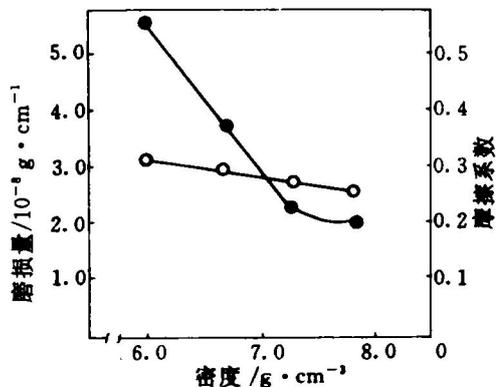


图1 材料密度与摩擦磨损特性之关系  
试验条件： $n=800 r/min$ ； $p=72.96 N$   
(○—摩擦系数，●—磨损量)

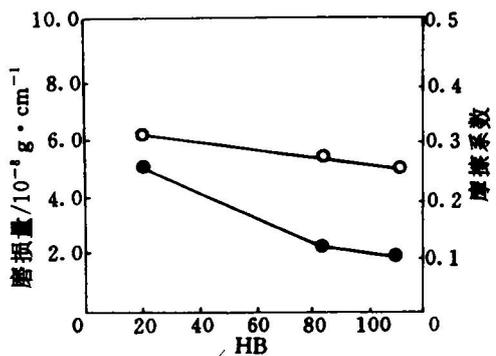


图2 材料硬度与摩擦磨损特性之关系  
试验条件： $n=800 r/min$ ； $p=72.96 N$   
(○—摩擦系数，●—磨损量)

式中  $\mu$  为摩擦系数， $\eta$  为较软材料的剪切强度。

$$W_v = K \cdot \frac{L}{H} \cdot S_0^{[3]} \quad (3)$$

式中  $W_v$  为体积磨损量， $K$  为磨损系数， $L$  为载荷， $S_0$  为滑动距离。

从上述一些关系式中可以得知，密度的提高，导致  $P_c$  值的增加，而材料的  $P_c$  值与硬度  $H$  存在正比关系。因此，曲线中随着密度和硬度的提高，摩擦系数和磨损量下降。本研究的结果也是符合这一规律的。应该指出，不同的材料性能和不同的磨损机制，以上关系式略有不同的表示方式，但是，其主要因素和规律大致是相似的。

## 2.2 试验工况对材料摩擦磨损性能的影响

### 2.2.1 运转速度对摩擦磨损性能的影响

在试验载荷不变 ( $P = 72.96 N$ ) 的情况下，采用不同的运转速度，测得其与材料摩擦磨损性能的关系的图3所示。

从图3纪录曲线可以看出，随着运转速度提高，材料的摩擦系数和磨损量略有下降，其规律与文献[1]报道的致密黄铜的规律是相似的。运转速度的变化，其实质是影响金属的转移频率和转移屑片的尺寸，以及滑移界面上的湿度和氧化膜的形成。试验过程中，可能是由于载荷不大，致使前两种因素起主导作用。由于在试验工况下，金属(主要是黄铜)的转移，在钢环上形成一层较薄的膜，降低了其摩擦系数。同时，运转速度的提高，可能由于时间不利于烧点的生长，致使转移屑片的尺寸减少，也即意味着金属转移的频率，随着运转速度的增加而减小，其结果导致磨损量的降低。

### 2.2.2 载荷对摩擦磨损性能的影响

在运转速度不变的试验工况下 ( $n = 800 r/min$ )，施加不同的载荷，探讨其对材料摩擦磨损性能的影响。试验结果列入图4中，图中曲线3是文献[2]报道的致密黄铜与合金钢滑动磨损的关系曲线。早期的研究工作表明<sup>[5]</sup>：致密黄铜的磨损率是载荷的函数，即  $q = f(W)$ ，并且，提出了如下关系式：

$$q = \beta \cdot \frac{W}{H} \cdot \rho$$

式中  $q$  为磨损率， $H$  为材料的硬度， $\beta$  为摩擦系数， $\rho$  为材料的密度， $W$  为施加载荷。

从试验记录曲线中可以明显地知道，随着载荷的增加，材料的摩擦系数和磨损量提高。载荷对摩擦磨损性能影响的实质在于使摩擦表面温度升高，增加金属结点，引起摩擦表面或次表面层的塑性变形，以及因塑性变形而造成冷作硬化。以上现象的出现，都会导致材料磨损量的增加。应该指出，磨损量与载荷在常规试验条件下都存在着线性关系，正如本研究所得到的实验结果。但是，大多数研究工作者的资料表明<sup>[1]</sup>：磨损量与载荷的函数关系中，存

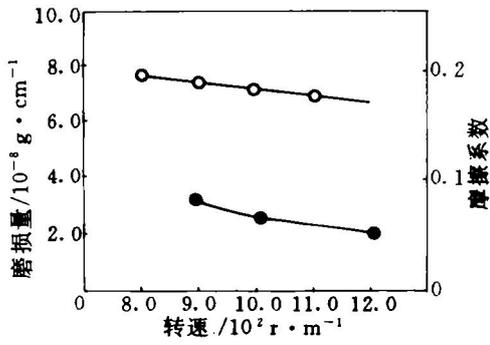


图3 运转速度与摩擦磨损性能之关系  
○—摩擦系数；●—磨损量

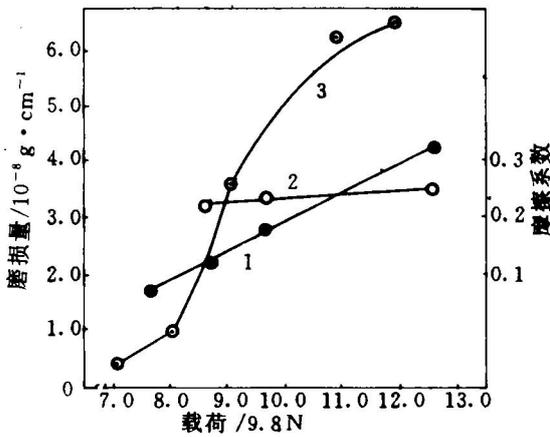


图4 载荷与摩擦磨损性能之关系  
(曲线3来自文献[2])  
○—摩擦系数；●—磨损量

在着一个临界载荷，超过此极限后，线性关系开始破坏，正如图4曲线3所示。在对比烧结黄铜和致密黄铜的实验曲线后不难发现：烧结黄铜在较低载荷下的磨损量和磨损速率都比致密黄铜要大一些，而当载荷超过78.4N，致密黄铜的磨损量和磨损速率又高于烧结黄铜。这种现象我们认为是烧结材料存在孔隙所致。烧结材料孔隙的存在，不仅减弱了金属键的总结合力，而且，作为一个缺陷(裂纹源)的存在，即使在较低载荷下，微凸结点的脱离和转移要比致密材料几率大一些，也即磨损量要高一些。但是，到了较高载荷时，致密金属的塑性变形和冷作硬化，以及受摩擦热作用等，促使

硬质磨损屑产生，以及粘结—磨粒磨损的建立，从而，出现大面积的磨损，乃至整体表面变形而咬死。相对而言，烧结材料由于存在均匀的孔隙，在未到达载荷临界极限之前，其冷作硬化和温度影响相对较小一些，在一定范围内载荷的增加，对材料的孔隙度的减少有一定的作用，因此，在一定程度上延缓了严重磨损(咬死)的过程，由此可见，对烧结黄铜材料而言，使用于中等P<sub>v</sub>值的工况较为理想。

### 2.3 摩擦表面形貌和磨屑的观察分析

为了探讨烧结黄铜磨损机制，本研究采用密度相同的试样( $\rho = 6.63 \text{ g/cm}^3$ )，在转速为800 r/min、摩擦运转时间为30 min的试验工况下，分别施加74.48、94.08和123.48N三种不同的载荷；然后，利用JCSA-733型扫描电镜观察其磨痕和磨屑形貌，并且，对磨屑元素成分进行分析，其结果分别列入图5和图6中。

从图5可以看到图5(a)SEM照片是施加74.48N载荷的磨损痕迹，摩擦轨迹中已出现少量的剥落坑，局部出现了沿摩擦方向的塑性变形，这是较典型的粘结磨损机理，同时，在垂直摩擦方向上出现了微裂纹。图5(b)SEM照片中，可以看到沿摩擦方向的塑性变形，并且，出现较多的平行于摩擦力的剥落坑，大块的剥落坑的形成，说明在载荷作用下，在摩擦表面的一定深处，产生了塑性变形，当作用力大于该层材料的剪切强度时，便出现较大的结点脱落，形成磨屑。因此，可以认为，在此载荷下，磨损是以粘结和磨粒磨损共存的机制，但仍然以粘结磨损为主。图5(c)SEM照片是在94.08N载荷下的摩擦痕迹，十分清楚的看到，在运转轨迹上，不仅存在大块的剥落坑，而且，出现明显的梨沟痕迹，这就是磨屑在冷作硬化后，以磨粒磨损方式造成的；同时，还可以发现局部材料被撕裂的现象。所以，在此工况下，其磨损应是以磨粒磨损为主。而且，实验结果也表明，其磨损量也最大。显然，磨损是一个十分复杂的过程，其影响因素也很多。在本研究中，除分析了以上两种主要磨损

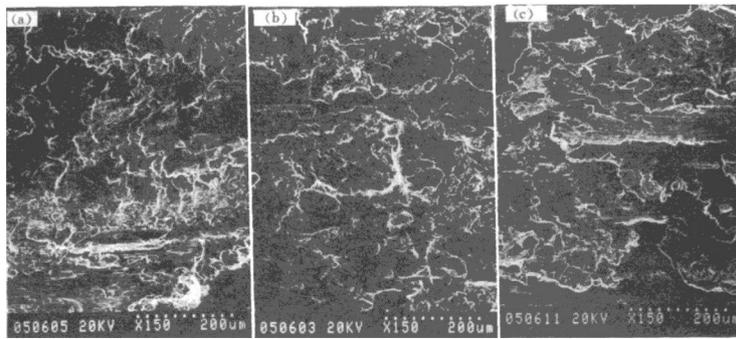


图5 不同载荷下摩擦表面的SEM照片,  $\times 150$

(a)—74.48 N,  $\times 150$ ; (b)—94.08 N,  $\times 150$ ; (c)—123.48 N,  $\times 150$

机制之外, 还经实验发现: 氧化磨损和疲劳磨损也存在一定的影响。对此, 由于研究工作的局限, 未能深入分析。

探讨烧结黄铜磨损机制的另一项工作, 是对磨屑形貌和元素成分进行了观察和分析, 其结果分别列入图6和图7。图6表示的磨屑形貌是在123.48 N载荷下收集到的。SEM照片表明, 磨屑外观近似球团状, 其尺寸在 $100\mu\text{m}$ 级, 进一步放大观察, 发现团状磨屑是由许多微细的颗粒( $1\sim 10\mu\text{m}$ 级)组成。资料<sup>[2]</sup>报导, 团块状的磨屑是在接触应力较高的状态下形成的, 本研究也得到了相似的结论。

图7是在载荷为12.6 kg的工况下, 磨屑的元素分析图谱。从中可以看到, 磨屑中的元素除了铜和锌以外, 还有铁元素谱线的存在, 说明在此试验工况下摩擦都出现了金属转移, 导致磨屑硬度提高, 形成图5(c)所示的犁沟现象, 从而证实了磨粒磨损机制作用的存在。

### 3 结论

(1) 烧结黄铜的密度和硬度提高, 在试验工况下, 其摩擦系数和磨损量都有一定程度的降低。

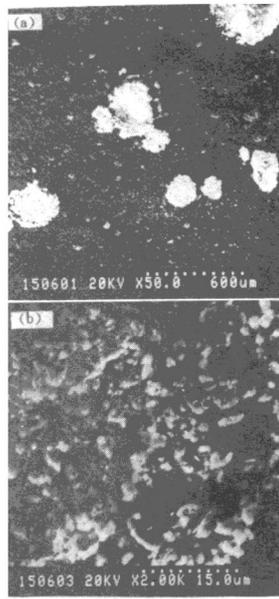


图6 烧结黄铜磨屑的SEM照片

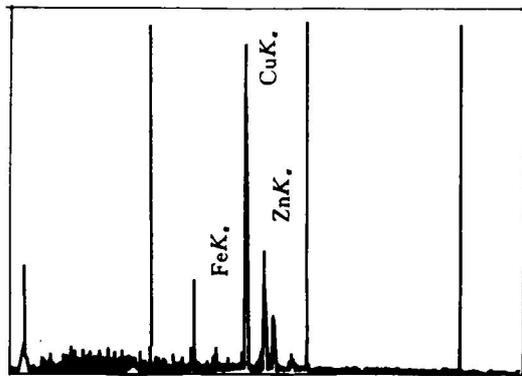


图7 磨屑元素分析图谱

(2) 随着载荷的增加，其摩擦系数和磨损量都有所提高，而且，载荷与磨损量呈线性关系。实验表明：烧结黄铜与致密黄铜的临界载荷值，存在一定的差异，这可能与前者具有均匀分布的孔隙有关。

(3) 在干摩擦工况下，烧结黄铜在低载荷时，以表面金属结点的迁移，粘结磨损类型为

主；随着载荷的增加，以磨粒磨损为基本磨损形式。

(4) 磨屑中含有铁元素，证实摩擦副金属的相互转移。而团块状的磨屑由许多微细金属粒子组成，这可能与烧结材料有关。

参考文献

- 1 邵荷生等著，金属的磨料磨损和耐磨材料. 北京：机械工业出版社，1988，32-116.
- 2 Sarkar, A D, Wear of Metals. England: Pergamon Press Ltd. 1976, 56-171.
- 3 哈比希 K H(著)，严立(译). 材料的磨损与硬度. 北京：机械工业出版社，1987，102-138.
- 4 Bowden F P, Tabor D. The Friction and Lubrication of solids. England: Oxford at the clarendon Press, 1954, 110-130.
- 5 鲍登 F B, 泰伯 D(著)，沈继飞(译). 摩擦学入门. 北京：机械工业出版社，1982：134-153.

(编辑 朱忠国)