

# MoS<sub>2</sub> 对铜基金属陶瓷摩擦材料性能的影响

Effects of MoS<sub>2</sub> on Properties of Copper-based  
Cermets Friction Materials

白同庆, 佟林松, 李东生  
(北京百慕航材高科技股份有限公司, 北京 100095)  
BAI Tong-qing, TONG Lin-song, LI Dong-sheng  
(Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100095, China)

摘要: 研究了 MoS<sub>2</sub> 在铜基摩擦材料中的作用, 结果表明, 作为润滑组元加入的 MoS<sub>2</sub> 并非以 MoS<sub>2</sub> 的形式影响摩擦材料的性能。在烧结过程中 MoS<sub>2</sub> 发生了分解反应, 分解后的 S 大部分生成了 FeS 等硫化物, 对材料起润滑作用。随着 MoS<sub>2</sub> 含量的增加, 材料的耐磨性、稳定系数逐渐提高, 而硬度、摩擦系数逐渐降低。

关键词: 铜基; 摩擦材料; 二硫化钼

中图分类号: TF125.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)05-0025-03

**Abstract:** The effect of MoS<sub>2</sub> content on the friction and wear properties of copper-based cermet material was investigated. The result showed that MoS<sub>2</sub> was decomposed S and Mo during sintered; the most of the S were combined with Fe into FeS, which acted as friction material lubricant. With increasing MoS<sub>2</sub> content, the wear resistance and stability coefficient were increased. However, the hardness and friction coefficient were decreased.

**Key words:** copper-based; friction material; MoS<sub>2</sub>

金属陶瓷摩擦材料是一种用粉末冶金方法制造并由金属基体、润滑组元和摩擦剂组成的多种组分复合材料。一般分为铜基和铁基两大类<sup>[1,2]</sup>。因其具有良好的高温摩擦性能及良好的导热性、耐磨性能等优点, 广泛应用在重载及恶劣的工况下, 例如飞机、坦克、汽车、火车、船舶和工程机械等的制动器和离合器材料。

摩擦材料中加入润滑组元的作用是改善其抗卡滞性能、提高其耐磨性。因 MoS<sub>2</sub> 是六方晶系层状结构, 层与层之间的结合力弱, 层内原子的结合力强。当分子间受到很小的剪切力时, 沿分子层很容易断裂而形成滑移面, 所以它是一种较理想的固体润滑剂。MoS<sub>2</sub> 作为一种润滑组元, 被广泛应用于铁基金属陶瓷摩擦材料中, 相关的研究报道也较多<sup>[1-4]</sup>, 而 MoS<sub>2</sub>

在铜基摩擦材料中使用得较少, 相关的报道也较少, 因此, 本工作重点研究了 MoS<sub>2</sub> 在铜基摩擦材料中的作用。

## 1 实验方法

### 1.1 实验材料及制备方法

实验采用的原材料如下: 铜粉, Cu ≥99.7% (质量分数, 下同), -200 目; 铁粉, Fe ≥98.0%, -100 目; 锰粉, -200 目; 鳞片石墨, 山东南墅石墨矿生产, -28 ~ +100 目, C ≥97%; SiO<sub>2</sub>, 天然石英砂, SiO<sub>2</sub> ≥97%; MoS<sub>2</sub> ≥99%, 胶体。

为了排除其他组元对实验结果的影响, 本实验仅改变 Cu 和 MoS<sub>2</sub> 粉的配比, 其他组元固定不变, 具体配方如表 1 所示。

表 1 材料配方 (质量分数/%)  
Table 1 Material component (mass fraction/%)

Number	Copper powder	MoS <sub>2</sub>	Iron powder	Manganese powder	Graphite	SiO <sub>2</sub>
1	66	0	15	2	9	8
2	64	2	15	2	9	8
3	62	4	15	2	9	8
4	60	6	15	2	9	8

按比例称取各种粉末,在 V 型混料筒内混合 4~6h;混合料在 400MPa 压力下在压模中压制成压坯;装入钟罩炉中,于 900~930℃和  $H_2$  的保护气氛下加压烧结,烧结压力为 2.0~3.0MPa,保温 3h,降温随炉冷,小于 100℃出炉。

## 1.2 测试方法

烧结后,采用 HB-3000 型布氏硬度计测量试样的表观硬度;用 HX-1000 显微硬度计测定基体组织的硬度;在 LEO-1450 扫描电镜下观察组织形貌并进行微区元素分析;将摩擦材料加工成外径 75mm 和内径 53mm 的试环,对偶材料为 30CrSiMoVA 钢,在 MM-1000 摩擦试验机上进行摩擦磨损实验,实验条件:转动惯量  $0.196kg \cdot m^2$ ,制动压力 0.6MPa,主轴转速为 6000r/min;并用金相显微镜进行摩擦表面形

貌分析。

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 基体显微组织分析

图 1 为不同含量的  $MoS_2$  摩擦材料的背散射照片。可以看出,浅灰色的是铜基体,深灰色的是铁颗粒。图 1a 中的  $MoS_2$  含量为 0%,铜基体表面干净,无杂质;图 1b 中的  $MoS_2$  含量为 2%,基体表面出现很多白亮色和黑色的小颗粒。随着  $MoS_2$  含量的增多,白亮色和黑色的小颗粒增多。将图 1d 的位置放大到 6000 倍进行能谱分析,如图 2 所示: A 点(白亮色小颗粒)是  $Mo$ ; B 点主要是铜基体,含有少量的 Fe 和 Mn; C 点(黑色的小颗粒)主要是 Fe, Mo 和 S。

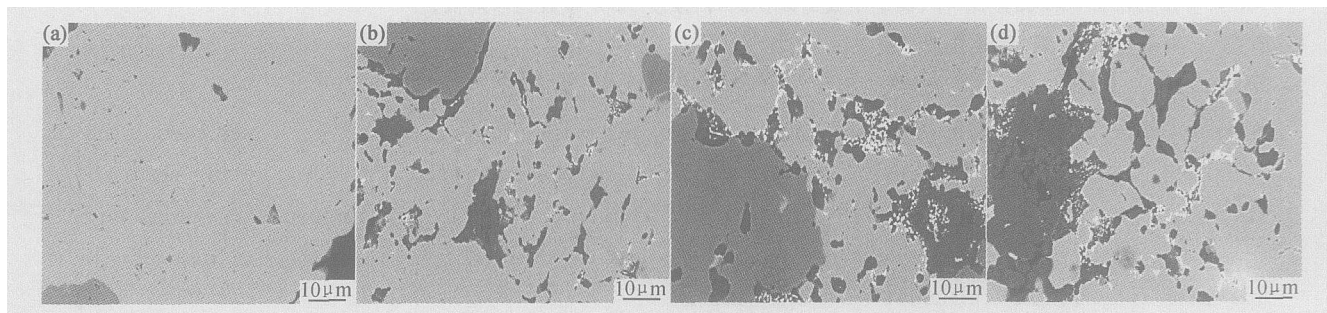


图 1 不同含量  $MoS_2$  的材料基体 (a) 不含  $MoS_2$ ; (b) 2%  $MoS_2$ ; (c) 4%  $MoS_2$ ; (d) 6%  $MoS_2$

Fig. 1 SEM micrographs of matrix with different content of  $MoS_2$  (a) without  $MoS_2$ ; (b) 2%  $MoS_2$ ; (c) 4%  $MoS_2$ ; (d) 6%  $MoS_2$

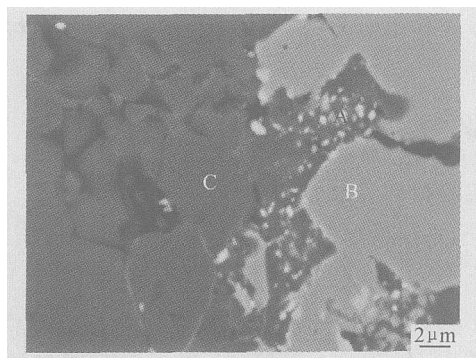


图 2 铜基体的背散射相

Fig. 2 SEM micrograph of Cu matrix

用化学分析法分析了含 6%  $MoS_2$  的样件。烧结前 S 的含量为 2.96%,烧结后 S 的含量为 2.85%,S 损失约 3.7%。

结合能谱分析和化学分析结果,可以认为,在  $H_2$  保护气氛下,  $MoS_2$  在烧结过程中发生了分解反应:  $MoS_2 \rightarrow Mo + 2S$ 。  $MoS_2$  分解的 S 绝大部分与基体中 Fe 和 Mn 等反应,生成了 FeS 和 MnS 等硫化物,只有很少量的 S 与  $H_2$  反应生成  $H_2S$  气体排出体外;分解后的 Mo 弥散于铜基体中,强化了铜基体<sup>[1]</sup>。

### 2.2 $MoS_2$ 含量对摩擦材料硬度的影响

图 3 是  $MoS_2$  含量对摩擦材料硬度的影响。从图 3 可见,  $MoS_2$  的含量对摩擦材料的硬度影响很大,与不含  $MoS_2$  的摩擦材料相比,添加了 2% 的  $MoS_2$ ,材料表观硬度从 44 降到 40.7,基体显微硬度从 129 降到 117;随着  $MoS_2$  含量继续增加,材料的硬度下降趋势变缓,当  $MoS_2$  含量为 6% 时,材料的表观硬度降到 39.4。硬度值的降低趋势是因为随着  $MoS_2$  含量增加,材料中非金属组元的比例增加,烧结过程中形成的 FeS 和 MnS 等硫化物增多,但 FeS 和 MnS 的硬度值较低,从而导致摩擦材料的硬度降低、强度下降。

### 2.3 $MoS_2$ 含量对摩擦材料摩擦磨损性能的影响

图 4 是  $MoS_2$  含量对摩擦系数和稳定系数的影响。从图 4 可见,随着  $MoS_2$  含量的增加,材料的摩擦系数逐渐降低,当  $MoS_2$  含量从 0% 增加到 2%,材料的摩擦系数降低了 0.02;继续增加  $MoS_2$  含量,摩擦系数降低的趋势变缓。当  $MoS_2$  含量从 4% 增加到 6%,摩擦系数只降低了 0.005。随着  $MoS_2$  含量的增加,材料的稳定系数逐渐增加。一般认为,摩擦系数是粘着和摩擦表面凹凸不平引起啮合大小及性质的

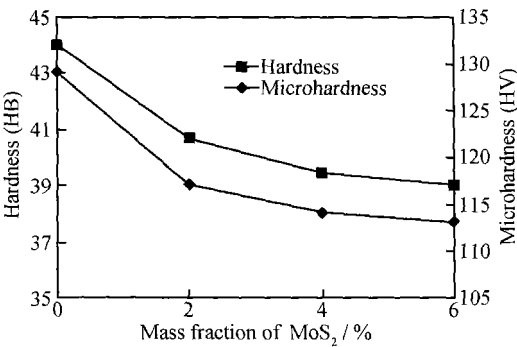


图3 MoS<sub>2</sub> 含量对摩擦材料硬度的影响

Fig. 3 Effect of MoS<sub>2</sub> content on hardness of friction materials

函数<sup>[1]</sup>，MoS<sub>2</sub> 烧结过程中分解的 S 与 Fe 等金属反应，生成 FeS 等硫化物，而 FeS 与 MoS<sub>2</sub> 同属密排六方点阵结构，层内原子结合力强，层间的结合力弱，当摩擦时，在摩擦表面形成硫化物的润滑膜，硫化膜的存在减少了粘着效应，使得材料的摩擦系数降低，稳定系数提高。

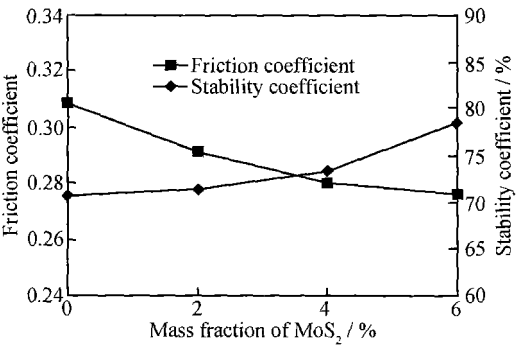


图4 MoS<sub>2</sub> 含量对摩擦系数和稳定系数的影响

Fig. 4 Effect of MoS<sub>2</sub> content on friction coefficient and stability coefficient of friction materials

图5是 MoS<sub>2</sub> 含量对摩擦材料和对偶材料磨损量的影响。从图5可见，随着 MoS<sub>2</sub> 含量的增加，摩擦材料的磨损量降低、耐磨性提高；对偶材料的磨损

量变化不大，但有逐渐降低的趋势。摩擦材料耐磨性提高的原因是：在摩擦时，摩擦表面形成的硫化物薄膜在减少粘着效应的同时也限制了破坏深度，从而提高材料的耐磨性。

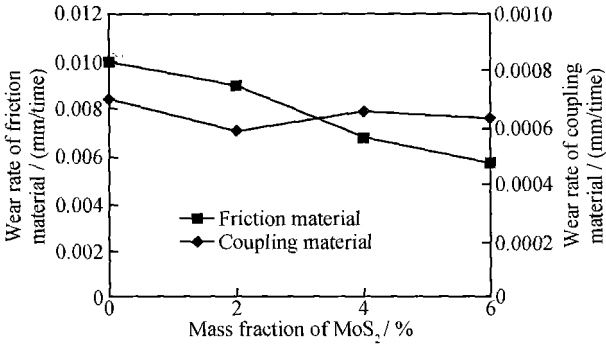


图5 MoS<sub>2</sub> 含量对摩擦材料及对偶材料磨损量的影响

Fig. 5 Effect of MoS<sub>2</sub> content on wear rate of friction material and coupling material

2.4 MoS<sub>2</sub> 含量对摩擦表面质量的影响

摩擦磨损实验后的试环表面状态如图6所示。不含 MoS<sub>2</sub> 时，材料的摩擦表面质量最差（图6a），出现很多剥落的小坑（照片中的黑色部分），此时的磨损主要为粘着磨损，摩擦材料向对偶的转移最为严重；当 MoS<sub>2</sub> 含量为 2% 时（图6b），摩擦表面质量稍好；当 MoS<sub>2</sub> 含量为 4%（图6c）和 6%（图6d）时，表面质量最好，表面膜均匀致密，润滑性能良好。这充分说明了不含 MoS<sub>2</sub> 时，摩擦材料与其对偶在摩擦时具有较强的粘着倾向；而随着 MoS<sub>2</sub> 含量增加，一方面，由于压力作用，在摩擦表面形成硫化物的润滑膜，减少了摩擦材料中的铜与对偶材料中金属直接接触，使粘着倾向减缓；另一方面，由 MoS<sub>2</sub> 分解的 Mo 热容量高，易于氧化，吸收了摩擦过程中产生的大量热，降低了摩擦表面温度，也使得粘着倾向减缓，因而导致摩擦材料的摩擦系数和磨损量降低，但其稳定系数提高。

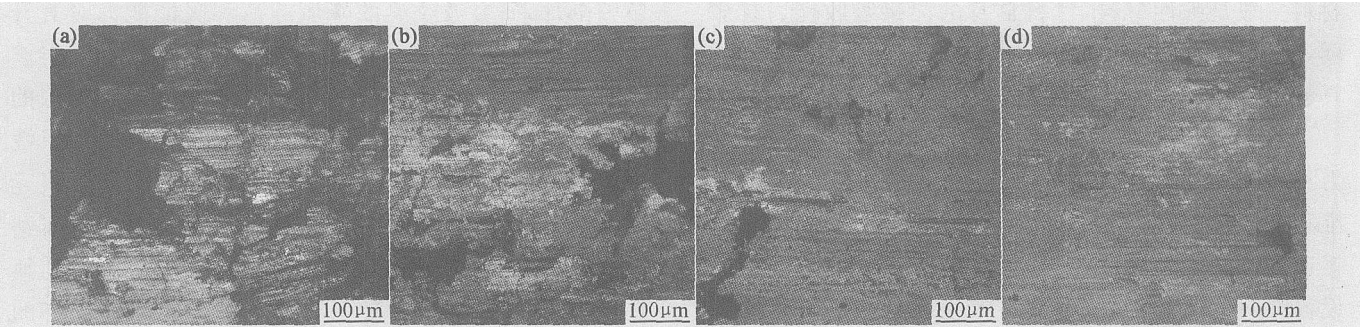


图6 MoS<sub>2</sub> 含量对摩擦表面的影响 (a) 不含 MoS<sub>2</sub>; (b) 2% MoS<sub>2</sub>; (c) 4% MoS<sub>2</sub>; (d) 6% MoS<sub>2</sub>

Fig. 6 Friction surface of friction material with different content of MoS<sub>2</sub>

(a) without MoS<sub>2</sub>; (b) 2% MoS<sub>2</sub>; (c) 4% MoS<sub>2</sub>; (d) 6% MoS<sub>2</sub>

$r = 2.5\text{ mm}$  时上刚性板的动能-时间与速度-时间曲线, 图 8 为  $r = 2.5, 4.0\text{ mm}$  时短单波波纹梁的能量变化-时间曲线。计算结果表明, 稳定性较好的三波波纹梁的吸能能力基本上是短单波波纹梁的 3 倍, 而稳定性不太好的长单波波纹梁的吸能能力则明显小于短单波波纹梁。

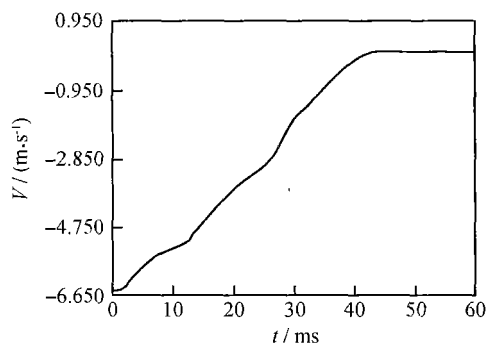


图 7 短单波波纹梁上刚性板的速度-时间曲线

Fig. 7 Velocity-time curve of the upper rigid plate of short waved beam

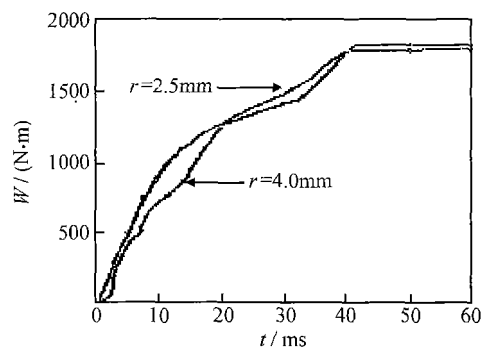


图 8  $r = 2.5, 4.0\text{ mm}$  时短单波波纹梁能量变化-时间曲线

Fig. 8 Energy-time curve of short single waved beam at  $r = 2.5, 4.0\text{ mm}$

## 5 结论

(1) 长单波波纹梁元件在没有设置有效的薄弱环节或者设置的薄弱环节过于薄弱时, 破坏过程不稳定, 吸能能力比较低; 短单波波纹梁及三波波纹梁虽然总体稳定性比较好, 但也会导致峰值载荷过高, 难以触发稳定的渐进破坏, 或者初始峰值载荷过低, 使得波纹梁的静强度不够。

(2) 当波纹梁的薄弱环节设置为  $r = 2.5\text{ mm}$  左右时, 其破坏过程才相对比较稳定, 吸能能力较强。

(3) 对于脆性的复合材料, 薄弱环节设置是影响复合材料结构吸能能力的关键设计之一。

### 参考文献

[1] JIMENEZ M A, MIRAVETE A, LARRODE E, et al. Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles[J].

Composite Structures, 2000, 48: 107–111.

- [2] 陈永刚, 许亚洪, 益小苏. 引发角对碳纤维/环氧复合材料圆管件轴向压溃性能的影响[J]. 材料工程, 2004, (12): 36–39.
- [3] 刘瑞同, 王鑫伟, 英淑萍. 碳纤维/环氧树脂波纹梁吸能能力的试验研究[J]. 航空学报, 2001, 1: 59–61.
- [4] 龚俊杰, 王鑫伟. 复合材料波纹梁吸能能力的数值模拟[J]. 航空学报, 2005, 3: 298–302.
- [5] 龚俊杰, 王鑫伟. 复合材料元件吸能能力的数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 2: 188–191.
- [6] 倪先平, 王永亮, 英淑萍, 等. 直升机机身下部复合材料典型结构耐坠特性研究[J]. 复合材料学报, 2003, 4: 51–57.

基金项目: 高校博士点基金资助项目(20020287003); 江苏省研究生创新计划项目(xm0421)

收稿日期: 2005-06-23; 修订日期: 2006-01-10

作者简介: 龚俊杰(1969–), 男, 博士, 主要从事复合材料结构耐撞性研究, 联系地址: 南京航空航天大学 257 信箱(210016)。

(上接第 27 页)

## 3 结论

(1) 在  $\text{H}_2$  保护气氛下, 含有铁粉的铜基摩擦材料中, 作为润滑组元加入的  $\text{MoS}_2$ , 在烧结过程中发生了分解反应, 并非以  $\text{MoS}_2$  的形式影响摩擦材料的性能。  $\text{MoS}_2$  分解后的 S 大部分生成了  $\text{FeS}$  等硫化物, 对材料起润滑作用; 少量的 S 与保护气氛  $\text{H}_2$  发生反应, 生成  $\text{H}_2\text{S}$  气体排出。

(2) 在铜基摩擦材料中加入  $\text{MoS}_2$ , 降低了材料的硬度; 摩擦时, 在摩擦表面形成了硫化物薄膜, 降低了摩擦系数, 提高了材料的耐磨性。

### 参考文献

- [1] 费多尔钦科 И. М. 现代摩擦材料[M]. 徐润泽译. 北京: 冶金工业出版社, 1983. 109–112.
- [2] 北京粉末冶金研究所. 粉末冶金摩擦材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 1977.
- [3] 樊毅, 刘先念.  $\text{MoS}_2$  在铁基摩擦材料中的应用研究[J]. 湖南冶金, 1994, (1): 14–16.
- [4] 陈洁, 姚萍屏.  $\text{MoS}_2$  在铁基摩擦材料烧结过程中的行为研究[J]. 非金属矿, 2003, 26(4): 50–52.

收稿日期: 2005-12-28; 修订日期: 2006-03-02

作者简介: 白同庆(1969–), 男, 硕士, 从事粉末冶金摩擦材料的研制、开发与生产, 联系地址: 北京 81 信箱 26 分箱(100095)。