

文章编号: 1004 - 0609(2005) 11 - 1766 - 04

梯度结构 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料的制备及性能^①

张 雷, 周科朝, 刘文胜, 周荣兴, 李世伟

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 在气氛保护下采用热压工艺制备了具有梯度结构的 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料, 对该材料的制备工艺、显微结构、电性能和摩擦磨损性能等进行了分析。结果表明: 在热压过程中, 由于氩气的保护作用, 虽然工艺温度达到 850 ℃, MoS₂ 并未发生氧化反应, 保障了材料的自润滑性能; 所用工艺较好地实现了梯度结构的构造及材料的制备, MoS₂ 均匀而弥散地分布于 Ag-Cu 基体中, 该材料具有优良的电性能、摩擦磨损性能及焊接性能。

关键词: Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料; 显微结构; 导电性; 摩擦磨损

中图分类号: TM 97

文献标识码: A

Preparation and properties of Ag-Cu-MoS₂ brush materials

ZHANG Lei, ZHOU Ke-chao, LIU Wen-sheng, ZHOU Rong-xing, LI Shi-wei

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University,
Changsha 410083, China)

Abstract: Ag-Cu-MoS₂ brush materials with a graded structure was produced by hot press process in protective atmosphere. The processing, microstructure, conductivity and wear properties of Ag-Cu-MoS₂ brush materials were studied. The results show that MoS₂ is not oxidized in the process, and Ar₂ has protection effect. The materials and the graded structure can be constructed by proper process-control, and MoS₂ is distributed homogeneously in the Ag-Cu matrix. The Ag-Cu-MoS₂ brush materials have good conductivity, wear properties and welding performance.

Key words: Ag-Cu-MoS₂ brush materials; microstructure; conductivity; wear

银基电刷材料是航空和航天仪表系统、自动控制系统以及电机、电器及电路装置中必不可少的电器元件^[1, 2], 它担负着相对滑动部件电信号和电流的接通、关闭以及电流传递的作用, 因此不仅要求其具有较好的导电性能、优异的摩擦磨损性能、较低的电噪声, 同时也需具有尺寸精度高、工作可靠性强和寿命长的特点。一般地说, 对高可靠性电刷-滑环系统的主要性能要求是: 1) 较低的磨损率和较长的使用寿命; 2) 在动力传递过程中具有较低的接触电阻, 使摩擦生热所导致的温度升高保持在低水平; 3) 电噪音低, 以保证电信号的稳定性; 4) 摩擦低以使传动力矩较小; 5) 储存稳定性好。金属银具有高的导电性, 但力学性能及耐磨性较差; 而 MoS₂ 是一种良好的固体自润滑材料, 因此

结合两者的特点研制既具有高的导电性, 较低摩擦因子和良好力学性能的银基电刷复合材料, 是航天和航空工业对电接触元件的迫切需要^[3, 4]。本文作者引入梯度材料的设计理念, 制备了具有梯度结构的 Ag-Cu-MoS₂ 自润滑电刷材料, 解决了普通 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料焊接性能差的问题, 并对该材料的显微组织、电性能和摩擦磨损性能进行了研究。

1 实验

采用昆明贵研铂业生产的纯度为 99.95% 以上的 Ag 粉末, MoS₂ 为上海胶体化工厂 0[#] MoS₂ 粉末, 金属 Cu 采用化学法加入。银基复合电刷材料

① 收稿日期: 2005 - 07 - 15; 修订日期: 2005 - 08 - 20

作者简介: 张 雷(1975 -), 博士研究生

通讯作者: 周科朝, 教授, 博士; 电话: 0731-8836264; E-mail: zhoukechao@mail.csu.edu.cn

的工作层成分为 Ag-2.5Cu-8MoS₂ (质量分数, 下同), 过渡层为 Ag-4MoS₂, 焊接层为 Ag-5Cu, 将配制好的粉料依次按工作层、过渡层和焊接层的顺序置于石墨模具中, 在氩气保护下于 850 °C 进行热压烧结, 压制压力为 20~25 MPa, 保压时间为 15~20 min, 得到尺寸为 20 mm × 30 mm × 25 mm 的块状材料。滑环材料为热压烧结 Ag-10Cu 的银合金环, 外径为 d_{45} mm, 厚度 8 mm。摩擦磨损性能测试在 MHK500 环块试验机上进行, 负载约 76 N, 转速 200 r/min, 时间 45 min。静态电阻测试在铁道部产品质量监督检验中心的 6 位半数字电压表上进行, 测试方法采用凯尔文四端钮法, 试样尺寸为 6.10 mm × 3.9 mm × 45 mm, 采用 Dmax-2550 对材料进行 X 射线衍射物相分析, 材料的显微结构分析在 FM-6700 型扫描电镜上进行。

2 结果与讨论

2.1 工艺控制及材料物相成分

在材料的制备过程中, 温度、时间、压力等工艺参数对材料的物相成分有着重要的影响。作为一种良好的固体自润滑材料, MoS₂ 的润滑作用不受吸附气体的影响, 真空中乃至高真空中仍然具有良好的润滑和耐磨损性能。但是 MoS₂ 在 349 °C 以上就会发生氧化^[57], Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料的制备过程中温度高达 850 °C, 极易发生 MoS₂ 的氧化反应, 造成 MoS₂ 的损失, 而使材料失去润滑作用, 因此在热压工艺中采用氩气作为保护气氛。热压中保压时间也对材料有重要的影响, 保压时间过长, 原来均匀分布于 Ag 粉末表面的 Cu 会因为 Ag 颗粒的聚集长大而发生偏析, 从而偏离所要求的合金成分; 保压时间过短, 会造成材料密度低, 而且工作层、过渡层及焊接层间的结合力小, 甚至发生分层开裂的现象。图 1 所示为 Ag-2.5Cu-8MoS₂ 热压烧结工艺温度—时间—压力曲线。压制压力的施加要配合升温过程, 而且最大压力不能超过 25 MPa, 否则软化的金属会通过模具的边缝溢出造成加工过程失败。因此对 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料实施热压工艺时必须实现温度、压力和操作时间的协调控制。

检验物相中 MoS₂ 的存在形式对 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料的制备和生产至关重要。图 2 所示为 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料的 X 射线衍射谱。物相分析结果显示 MoS₂ 相以单一物相形式存在, 没有发生氧化, 说明 Ag-Cu-MoS₂ 经过热压烧结后 MoS₂ 相成分稳定, 氩气起到了良好的保护作用; 半定量分析

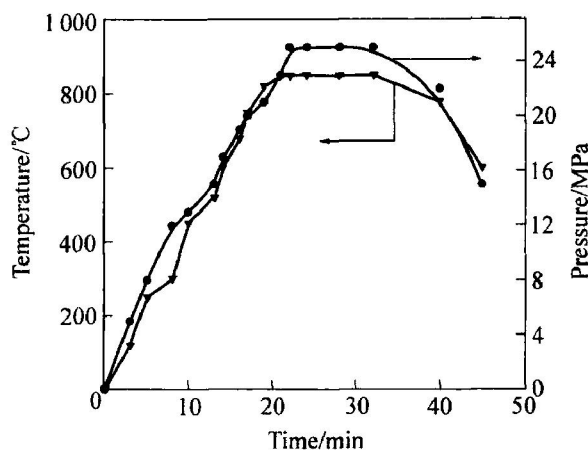


图 1 Ag-2.5Cu-8MoS₂ 热压烧结工艺的温度—时间—压力曲线

Fig. 1 Curves of temperature—time—pressure of Ag-2.5Cu-8MoS₂ during hot press sintering process

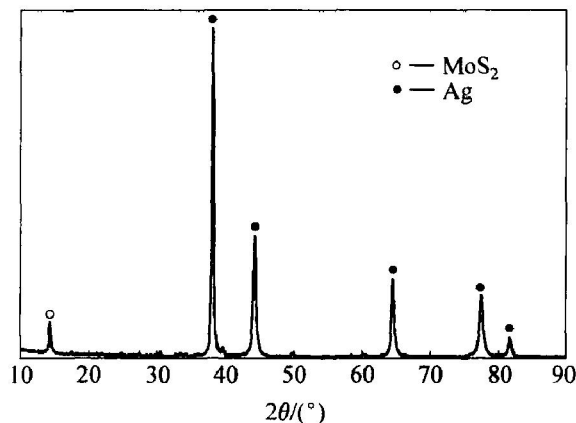


图 2 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料的 X 射线衍射谱

Fig. 2 XRD pattern of Ag-Cu-MoS₂ brush materials

显示 MoS₂ 的含量约为 8.05%。结果表明现有工艺解决了二硫化钼在 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料热压制备过程中的氧化问题, 确保了材料具有优良的自润滑性能。

2.2 材料显微形貌及力学性能

MoS₂ 颗粒及其细小且呈胶状, 很容易团聚, 难以在基体中均匀分布。MoS₂ 粉末的团聚将提高电刷材料的电噪声值, 最高值可达 9 mVRMS/A 以上, 平均在 3 mVRMS/A 左右, 随着 MoS₂ 分散度的提高, 材料的电噪声值也随之下落。当 MoS₂ 粉末均匀弥散地分布于银基体中时, 平均电噪声值可降低到 0.59 mVRMS/A 以下。试样经研磨抛光后的显微组织如图 3 所示, 作为固体润滑相的 MoS₂

均匀而弥散地分布于导电基体 Ag-Cu 之中, MoS₂ 和 Ag 两相组织黑白分明, 无气孔, 结构致密^[8], 说明通过热压烧结使材料具有较高的致密度。Ag 基体中的 MoS₂ 不但可起到润滑效果, 而且可通过弥散强化作用来提高银基体的力学性能, 经测试热压烧结所得 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料的硬度 (HB) 为 50.1~ 61.2, 抗弯强度 σ_b 为 230~ 244 MPa, 抗弯强度 σ_c 为 242~ 248 MPa。经测量材料的密度为 9.15~ 9.41 g/cm³。

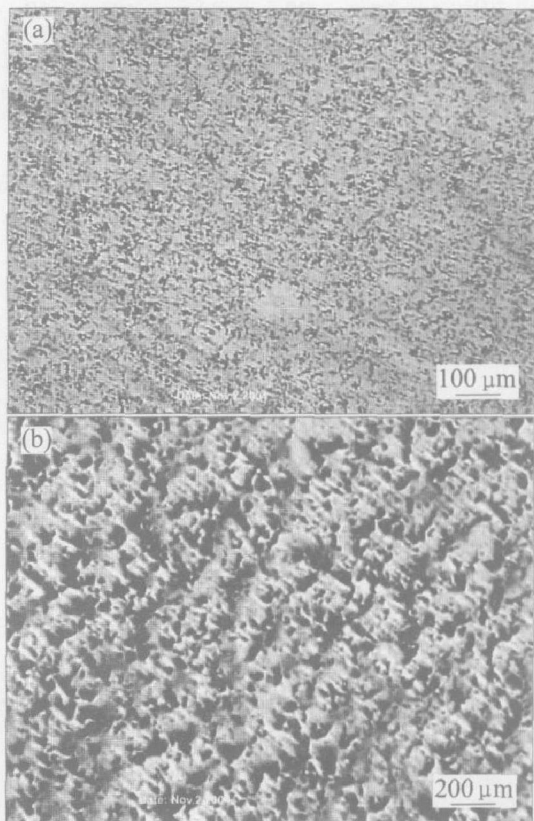


图 3 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料的 SEM 像

Fig. 3 SEM images of Ag-Cu-MoS₂ materials

梯度结构的设计主要是为较好地解决 Ag-Cu-MoS₂ 材料焊接性差的问题。由于 MoS₂ 在焊接过程中极易发生氧化反应, 严重降低了材料的焊接性能。梯度结构的构造主要是通过设置以纯金属银为主的焊接层, 在保证工作层良好性能的同时提高该

材料与银和铜等金属的可焊性。图 4 所示为 Ag-Cu-MoS₂ 电刷梯度结构显微形貌, 从左到右依次为焊接层、过渡层和工作层, 梯度结构明显, 各层材料间界面结合良好。同时过渡层的设计也较好地解决了材料由焊接层的纯金属 (Ag-5Cu) 到工作层的金属复合材料 (Ag-4MoS₂) 的过渡连接问题, 避免了因材料成分和性能差异所造成的分层和开裂等现象的发生。

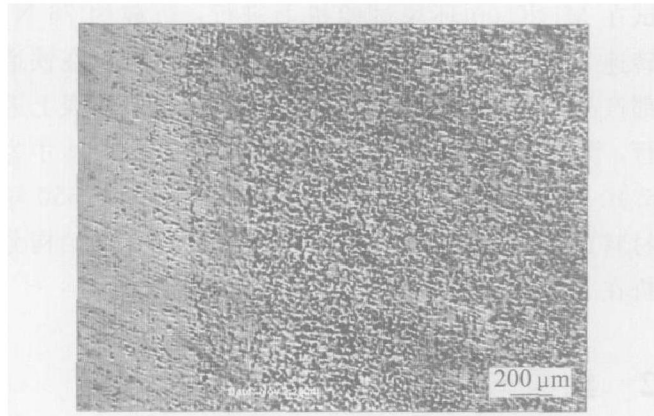


图 4 梯度结构 Ag-Cu-MoS₂ 电刷的 SEM 像

Fig. 4 SEM image of graded structure of Ag-Cu-MoS₂ brush

2.3 材料的静态电阻

四端钮法是精密测量低值电阻所必须采用的方法, 这种测量方法能有效地消除引线电阻对测量结果的影响, 显著提高测量精度。静态电阻测试采用两根试样 (样品 A 和 B) 相搭载并在其上施加压力的方式进行, 测试电流为 1.5 A。测试结果见表 1。结果显示载荷每增加一倍, 材料的静态接触电阻约下降 20% 左右, 但由于材料的电阻值本身是以毫欧计量的, 因而 20% 的电阻变化实际上对材料整体电阻不会产生较大的影响, 不会在工作中产生明显的电噪声。测试结果显示 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料静态电阻值基本满足低压大电流电机工作的要求^[9]。

2.4 材料的摩擦性能

电刷的机械磨损过程中粘着磨损发生在电刷接

表 1 不同载荷时 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料静态电阻的测试结果

Table 1 Electric resistance test results of Ag-Cu-MoS₂ brush materials at different loads

Sample	2.0 N		1.0 N		0.5 N	
	Contacted voltage/ mV	Contacted resistance/ mΩ	Contacted voltage/ mV	Contacted resistance/ mΩ	Contacted voltage/ mV	Contacted resistance/ mΩ
A	0.26	0.177	0.347	0.231	0.383	0.255
B	0.217	0.145	0.285	0.190	0.389	0.259

触的早期, 表面疲劳在晚期比较明显, 而磨粒磨损和摩擦氧化在电刷整个滑动接触过程中都起作用。作为真空用电刷材料, Ag-Cu-MoS₂ 在使用过程中基本可以避免摩擦氧化现象的发生, 同时, 由于用于制备该材料的 MoS₂ 粉末颗粒非常细小, 且均匀分布于金属基体中, 可降低材料在摩擦过程中磨粒磨损机制所造成的影响。因此, 对于高真空用 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料来说, 粘着磨损和表面疲劳是造成材料磨损的主要作用机理。所制备的 Ag-Cu-MoS₂ 电刷工作于真空条件下, 易产生换向火花及引起电刷粉化磨损, 该材料在使用过程中要求尽量避免磨屑的产生^[10], 摩擦机理分析表明只有磨粒磨损和表面疲劳才能直接产生磨屑, 所以在该材料的使用寿命内可以最大限度地避免磨屑的产生。Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料的摩擦实验结果采用摩擦因数(μ)和磨损率(W)两个参数来表征, 经过 MHK500 环块摩擦试验机对材料进行摩擦磨损实验测得, 材料的摩擦因数 $\mu \approx 0.1379$, 磨损率 $W \approx 1.418 \times 10^{-13} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。因此该电刷材料具有低摩擦、耐磨损的特点, 在单刷压 0.78 N、转动速度 50 r/min 的条件下, 充分满足 3 a 的使用期中总磨损量小于 0.1 mm 的要求。

3 结论

1) 采用热压工艺成功制备了梯度结构 Ag-Cu-MoS₂ 复合电刷材料, 梯度结构的引入较好地解决了该材料焊接性能差的问题。

2) 制备的 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料具有优异的电性能和良好的摩擦磨损性能。实机应用表明, 该电刷材料工作时可获得较为稳定的电信号和电流; 同时, 均匀分布的细小 MoS₂ 颗粒保证了电刷在高真空下具有较好的润滑性能和耐磨损性能。实践证明, Ag-Cu-MoS₂ 是一种摩擦磨损性能好、电噪声低、工作稳定可靠的优质电刷材料。

REFERENCES

- [1] 李克明, 魏力, 于存江. 电刷的选择方法[J]. 长春大学学报, 2001, 11(14): 11-14.
LI Ke-ming, WEI Li, YU Cun-jiang. A method to choose brush[J]. Journal of Changchun University, 2001, 11(4): 11-14.
- [2] 郑冀, 欧阳锦林, 朱家佩. 真空长寿命自润滑电刷滑环材料的研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(2): 129-139.
- ZHENG Ji, OUYANG Jin-lin, ZHU Jia-pei. Study on long life electrical brush slip ring in vacuum[J]. Tribology, 1997, 17(2): 129-139.
- [3] 郑冀, 高后秀, 李宝银. 银基电刷材料组织及性能的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2001, 24(2): 25-29.
ZHEGN Ji, GAO Hou-xiu, LI Bao-yin. Study on structures and properties of silver-based brush materials[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2001, 24(2): 25-29.
- [4] 颜士钦, 许少凡, 凤仪, 等. 碳纤维/石墨/银基复合材料电刷的应用研究[J]. 功能材料, 1997, 28(2): 191-195.
YAN Shi-qin, XU Shao-fan, FENG Yi, et al. Application study of carbon fiber/graphite/silver matrix composite electric brushes[J]. Functional Materials, 1997, 28(2): 191-195.
- [5] 曲在纲, 黄月初. 粉末冶金摩擦材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005. 50-55.
QU Za-gang, HUANG Yue-chu. Friction Materials of Powder Metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005. 50-55.
- [6] 齐尚奎, 冯良波, 高玲, 等. 二硫化钼粉晶表面氧化机理研究[J]. 摩擦学学报, 1995, 15(1): 39-44.
QI Shang-kui, FENG Liang-bo, GAO Ling, et al. Study on the mechanism of oxidation of MoS₂ powdered crystal surface[J]. Tribology, 1995, 15(1): 39-44.
- [7] 齐尚奎, 薛群基, 张绪寿, 等. 二硫化钼表面氧化行为研究(II)[J]. 摩擦学学报, 1994, 14(1): 17-24.
QI Shang-kui, XUE Qun-ji, ZHANG Xu-shou, et al. Study on the surface oxidation behavior of MoS₂(II)[J]. Tribology, 1994, 14(1): 17-24.
- [8] 周序科, 徐红军, 巴力学, 等. 浸银石墨电刷的显微组织结构与摩擦磨损的研究[J]. 新型炭材料, 2000, 15(1): 28-34.
ZHOU Xu-ke, XU Hong-jun, BA Li-xue, et al. Microstructure of graphite brush impregnated with silver and its friction-ware behaviour[J]. New Carbon Materials, 2000, 15(1): 28-34.
- [9] 郑冀, 欧阳锦林. 真空长寿命电刷滑环抗湿热性能的研究[J]. 空间科学学报, 1996, 16(增刊): 53-59.
ZHENG Ji, OUYANG Jin-lin. Study on the anti-humid hot property of the long life electric brush slip ring used in vacuum[J]. Chinese Journal of Space Science, 1996, 16(Supp): 53-59.
- [10] 冯智海, 窦满锋, 师春月. 低气压及真空条件下有刷直流电机电刷磨损的研究[J]. 微电机, 2004, 37(5): 64-65.
FENG Zhi-hai, DUO Man-feng, SHI Chun-yue. Research of brush abrasion in vacuum condition[J]. Micro-machine, 2004, 37(5): 64-65.