

超导体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的摩擦学特性研究

董丽荣^{1,2}, 李长生¹, 华敏奇³, 巧党¹

(1. 江苏大学 材料摩擦学省重点实验室, 江苏 镇江 212013)

2 吉林师范大学, 吉林 四平 136000 3 中国科学院 兰州化学物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 采用溶胶-凝胶法制备 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 和 $\text{Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超导材料, 并分析其相组成及结构, 用 SFT-4000 型高真空超低温摩擦磨损试验机对其从室温至液氮温度范围内的摩擦学特性进行评价。结果表明: 在室温条件下, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 与不锈钢盘对磨时的摩擦系数在 0.50 左右, 当温度降到超导转变温度以下时, 其摩擦系数急剧降低至 0.13 最后稳定在 0.20 以下。添加 Ag 可以改善 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的常温摩擦磨损性能, $\text{Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 复合材料的摩擦系数低且非常平稳, 其中 10% $\text{Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的摩擦系数为 0.20, 磨损率为 $8.96 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, $\text{Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的磨损机制为 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 硬基底承载与软金属 Ag 转移膜的润滑作用。

关键词: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$; Ag; 超导转变温度; 摩擦系数

中图分类号: TB33 TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2008)04-0345-06

Krim 等^[1-3] 利用石英晶体微天平研究 Pb 表面与吸附在其上氮气的界面摩擦, 试验中发现当温度降到 Pb 超导转变温度时摩擦力突然大幅降低, 他们认为摩擦能量耗散形式有电子和声子激励 2 种。超导态下材料电阻为 0 电子散射很小, 对应了摩擦系数大幅降低。随后 Persson 等^[4-7] 提出相应的物理模型, 通过数值计算讨论声子和电子对摩擦的贡献。

在空间技术及航空工业中, 许多工况条件超越了润滑油、脂的使用极限, 对固体润滑技术提出了更高要求。如空间站外部的一些机械, 工作环境温度变化大, 要求材料适应从低温到高温较宽的温度范围, 以及液体火箭发动机燃料泵中的滚动和滑动轴承等, 在液氧和液氢中工作, 低温环境的限制只能采用固体润滑。低温下润滑膜变脆和低温介质浸入使其易于产生裂纹, 破裂后没有自修复能力, 因此有必要关注极端苛刻条件下材料摩擦磨损和润滑问题, 开发新型固体润滑材料^[8,9]。

纯金属的超导转变温度 T_c 很低 (液氮温度), 而高温超导体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 在液氮温度下便可实现超导, 成本大幅降低, 因此研究 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的摩擦学特性既有理论意义又有实用价值。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 属于氧化物陶瓷, Ag 可以作为低温润滑剂, Ag 添加到其中不影响超导电性而且可以改善其脆性^[10-14]。本

文作者采用溶胶-凝胶法制备 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 和 $\text{Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超导复合材料, 从 $-196 \sim 20^\circ\text{C}$ 研究其宏观摩擦磨损特性, 探讨其磨损机制。

1 实验部分

1.1 样品制备

将分析纯 $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ 、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 按照 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 金属离子的摩尔比 $\text{Y}:\text{Ba}:\text{Cu}=1:2:3$ 配成浓度为 0.6 mol/L 的水溶液, 溶液中滴入氨水, 调节 $\text{pH}=5.2$ 加入分散剂 NH_4C 溶液使其成为溶胶, 70°C 水浴 2 h 得到凝胶, 300°C 干燥 15 h 600°C 预烧 5 h 930°C 煅烧 10 h 得到材质均匀、纯度高、粒度均匀的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 粉体。将质量分数分别为 0.5%、10% 的 Ag 粉与 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 粉体充分混合后置于钢模内, 在 CSS2210 型电子万能试验机上冷压, 成型压力 500 MPa , 经 930°C 、5 h 烧结后, 放入管式炉中, 通入流动的氧气进行 500°C 、24 h 以上吸氧处理, 制备出 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 和 $\text{Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 复合材料。用金相砂纸打磨抛光样品表面, 超声波无水乙醇清洗烘干备用。

1.2 性能评价

用 Rigaku D/max2500 型 X 射线衍射仪 (XRD) 测定样品物相结构; 用中国科学院兰州化学物理研

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50372026)。

收稿日期: 2007-08-30 修回日期: 2008-04-15 联系人李长生, email: lichangsheng@ujn.edu.cn

作者简介: 李长生, 男, 1957 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 目前主要从事固体润滑材料、及纳米材料等研究。

研究所研制的 SFT-4000 型高真空超低温摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验, 试样尺寸 $\phi 6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 摩擦副运动为销盘滑动方式, 偶件用 $\phi 60.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的不锈钢圆盘, 硬度为 HRC62, 表面粗糙度 R_a 为 $0.8 \mu\text{m}$; 试验条件: 法向载荷 12.05 N , 旋转半径 25 mm , 旋转速度为 $10 \sim 100 \text{ r/min}$ (即滑行速度为 $0.026 \sim 0.262 \text{ m/s}$); 温度范围: 液氮温度至室温 ($-196 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$), 真空度 $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 作为参考, 选用 $\phi 6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的不锈钢销 (HRC60) 进行相同条件下的低温摩擦试验. 用精度 0.1 mg 分析天平测量样品的磨损质量损失, 并转换为体积磨损率, 以 Hitachi S570 型扫描电子显微镜观察样品微观结构及磨损表面形貌, 以 PV-9900 型 X 射线能谱仪对磨损表面元素进行分析.

2 结果与讨论

2.1 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 结构

图 1 是 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 和 $10\% \text{ Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 的

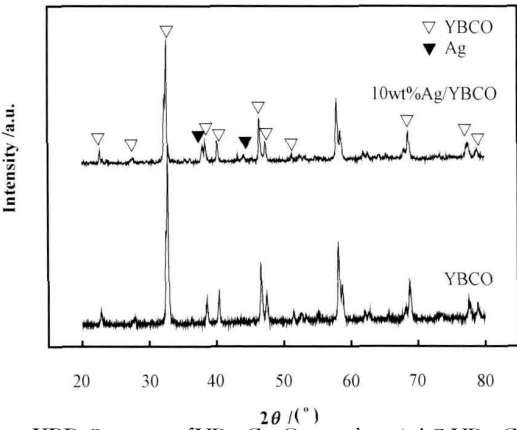


Fig 1 XRD patterns of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ and $10\% \text{ Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
图 1 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 和 $10\% \text{ Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 的 XRD 图谱

XRD 图谱. 结果表明, $\text{Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 复合材料的主要相组成是 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 和单质银 Ag. Ag 与 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 在烧结过程中没有发生化学反应. Ag 颗粒分布于 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 晶粒间, 从而提高了复合材料的密度, Ag 可以克服 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 晶粒间的弱连接, 从而保证了复合材料的良好超导性^[10-14]. 另外, Ag 还可以降低超导陶瓷脆性, 提高超导陶瓷韧性并抑制裂纹萌生和扩展^[10-14]. 从图 2 中 $10\% \text{ Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 断面显微结构形貌 SEM 照片可见, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 的晶粒大小均匀, 粒度小且较致密, 长方体晶粒无序排列, 有少量孔隙存在.

2.2 低温下 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 摩擦学特性

图 3 (a) 是 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 从室温至液氮温度 ($20 \sim$

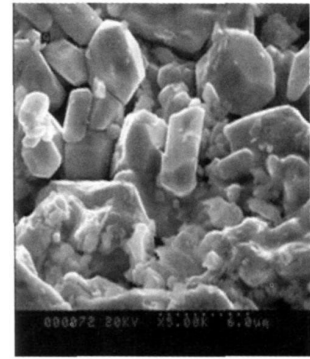


Fig 2 SEM micrograph of $10\% \text{ Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
图 2 $10\% \text{ Ag}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 断面形貌 SEM 照片

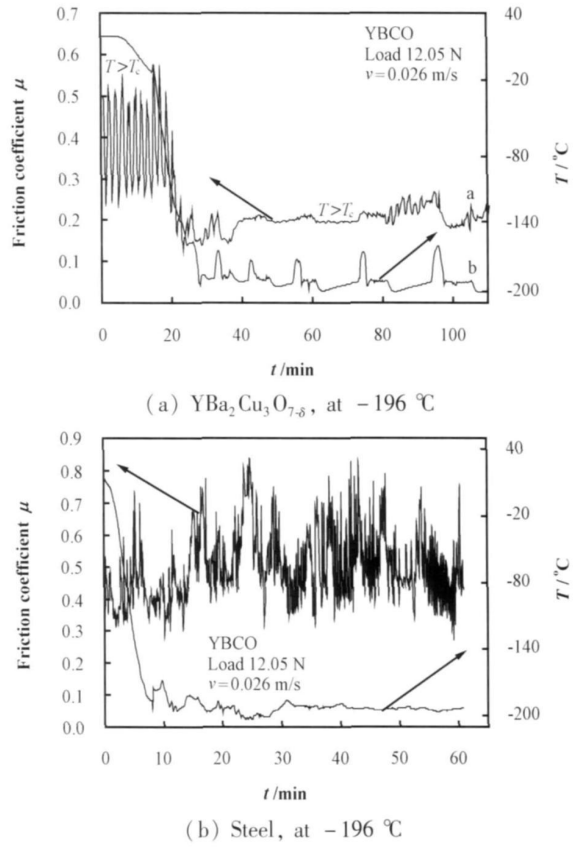


Fig 3 Friction coefficient of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ and steel as function of the test time and temperature

图 3 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 和 steel 摩擦系数随温度与时间变化的关系曲线

$-196 \text{ }^\circ\text{C}$) 下的摩擦曲线. 结果表明: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 在正常态 ($T > T_c$) 时, 随着温度降低, 摩擦系数在 0.50 左右, 平均保持在 0.40 . 当温度降至 $-160 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右时, 摩擦系数大幅度降低, 摩擦系数对温度的依赖关系很强, 波动范围缩小在 $0.15 \sim 0.25$ 之间; 当温度进一步降至液氮温度 ($-196 \text{ }^\circ\text{C}$) 时, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 完全处于超导态 ($T < T_c$), 摩擦系数急剧降到 0.13 , 最后稳定在 0.2 以下. 为了证实这是否为超导态所独

有的行为, 我们进行了同样条件下的钢-钢摩擦试验, 图 3(b) 是不锈钢销-盘在液氮温度下的摩擦试验曲线. 可见, 低温下不锈钢的摩擦系数波动范围大, 没有表现出如超导体的摩擦系数突降和 T_c 温度下平稳的特性.

试验过程中往下方样品台沟槽喷射液氮快速降温, 蒸发的氮气与外界系统传导热量, 导致了 $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 温度曲线上的几处波动 [见图 3(a), 在 25 ~ 35 min 和 85 ~ 95 min 之间], 使 $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 处于超导态与正常态转变的临界状态, 摩擦系数变化幅度在 0.05 左右. 这是由于多晶粒构成的超导体的转

变不可能同单晶一样在同一时刻、同一温度下集体超导转变, 而是先从部分晶粒开始, 因而在时间和温度上有 1 个宽度分布.

在超导态下, $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 的摩擦系数大幅度降低, 这与 Krin 等研究纯金属的界面摩擦试验结果类似. 超导态下电阻为 0, 材料表面没有电子积累, 电子散射很小, 使得电子对摩擦能量耗散减小, 因此其摩擦系数降低. $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 的摩擦试验结果也证实了电子对摩擦的贡献.

图 4 是在载荷 12.05 N 滑行速度 0.026 m/s 测试时间 110 min 的 $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 摩擦前后表面形貌的

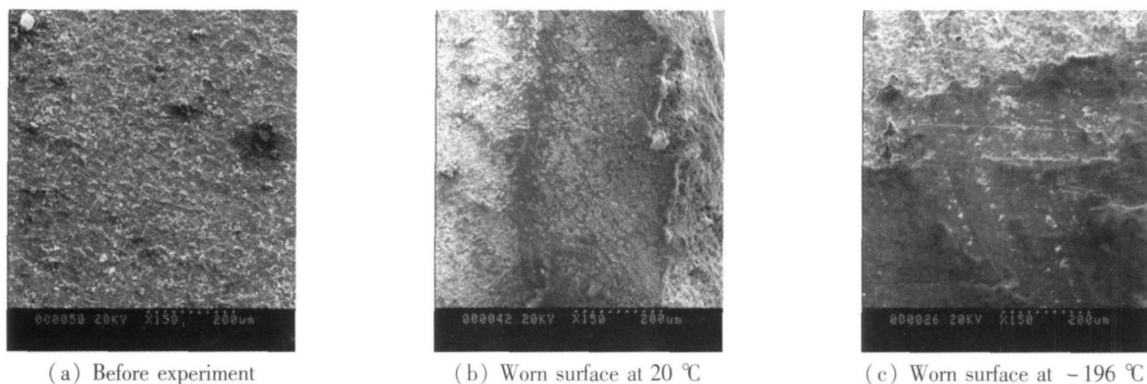


Fig 4 SEM photographs of $YBa_2Cu_3O_{7.8}$

图 4 $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 摩擦前后表面形貌的 SEM 照片

SEM 照片. 可见摩擦前样品表面有孔隙和微裂纹; 20 °C 摩擦后其表面仍有微裂纹且较粗糙, 对应于摩擦系数的较大波动; 经 -196 °C ($T < T_c$) 摩擦后, 磨

痕变得平滑且磨屑细小, 在低温下摩擦系数的变化幅度很小. 图 5(a) 和 (b) 是 $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 与上述测试条件相同、经液氮温度 (-196 °C) 摩擦前后表面形

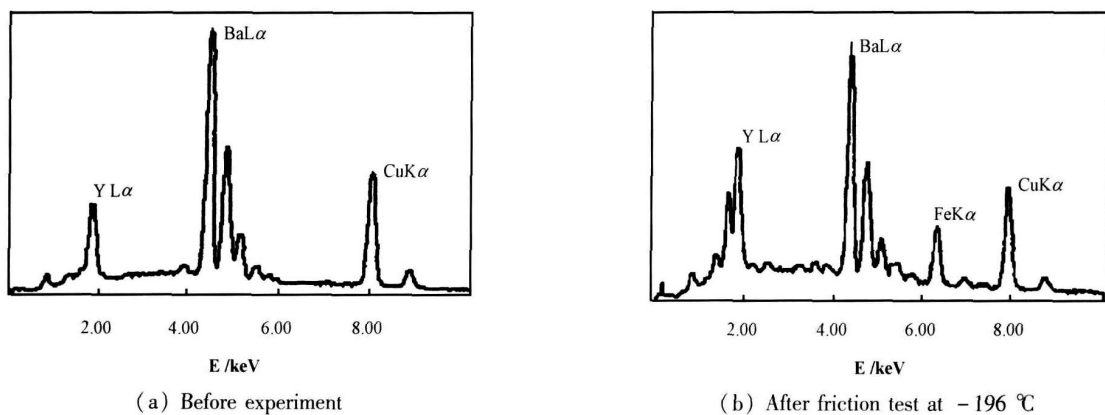


Fig 5 EDS analysis of $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ surface

图 5 $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 摩擦前后表面形貌的 EDS 图谱

貌的 EDS 图谱. 可见, 摩擦表面存在 Fe 元素, Fe 含量占被检测到元素的 9.0%, 由于摩擦偶件是不锈钢盘, 在 $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 摩擦表面形成了 Fe 的转移膜, 随着摩擦试验时间延长, Fe 的转移增多, 使得

$YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 的摩擦系数增大 [见图 3(a) 中 100 ~ 110 min 时间内].

2.3 常温大气、真空下材料的摩擦学性能

图 6(a) 是 $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 在常温大气中摩擦系数

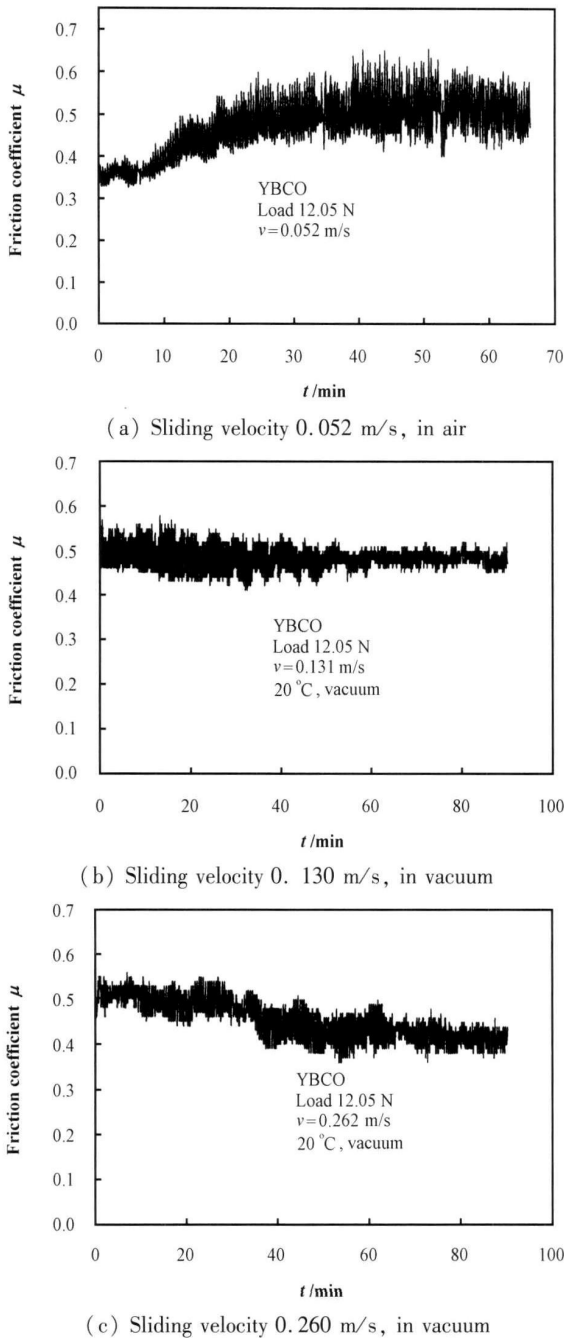


Fig 6 Friction coefficient of $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ as function of test time at 20 °C

图 6 在常温大气中 $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 摩擦系数随时间变化的关系曲线

随时间变化的关系曲线. 可以看出, $YBa_2Cu_3O_7$ 在启动阶段的摩擦系数不稳定, 随着时间延长, 摩擦系数在 0.50 左右, 且波动也较大. 图 6 (b 和 c) 是 $YBa_2Cu_3O_7$ 在真空中不同滑行速度下摩擦系数随时间变化的关系曲线. 可见, 与大气环境相比较, 真空中 $YBa_2Cu_3O_7$ 摩擦系数波动幅度有所减少, 但下降幅度并不大. 随着滑行速度的增大, 摩擦系数降

低到 0.40 左右, 表明真空环境对降低材料的摩擦系数并没有明显的影响作用.

图 7 是在常温真空条件下, 添加 Ag 粉后 $Ag/YBa_2Cu_3O_7$ 复合材料摩擦系数随测试时间变化的关系曲线. 可以看出, 5% $Ag/YBa_2Cu_3O_7$ 平均摩擦系数是 0.27, 10% $Ag/YBa_2Cu_3O_7$ 平均摩擦系数是 0.21, 随着测试时间延长, 材料摩擦系数非常平稳,

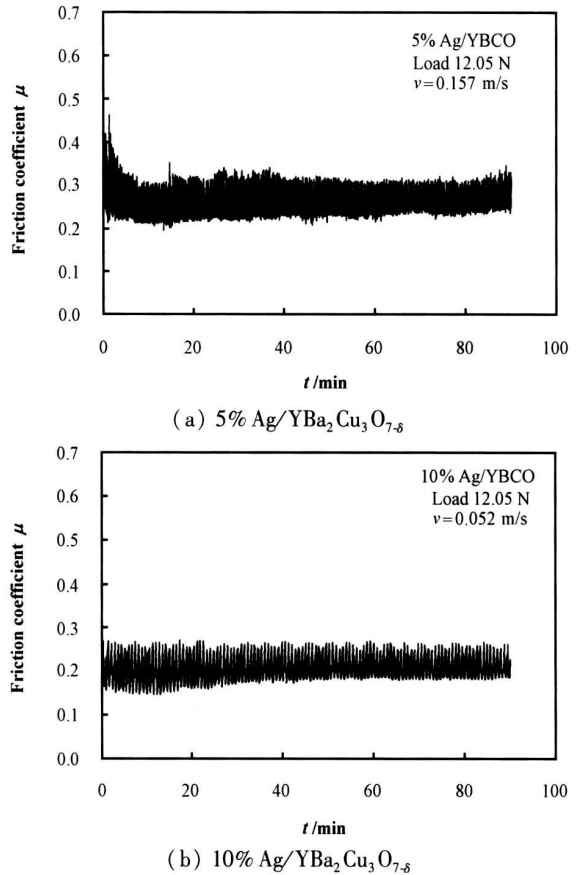
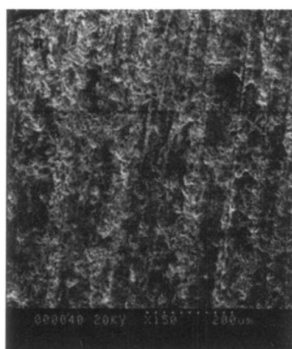


Fig 7 Friction coefficient of $Ag/YBa_2Cu_3O_{7.8}$ composites as function of test time at 20 °C in vacuum

图 7 常温真空条件下 $Ag/YBa_2Cu_3O_{7.8}$ 复合材料摩擦系数随时间变化的关系曲线

表现出了自润滑特性. 经载荷为 12.05 N 滑行速度 0.262 m/s 时间 60 min 下的磨损率测量结果表明: $YBa_2Cu_3O_7$ 、5% $Ag/YBa_2Cu_3O_7$ 以及 10% $Ag/YBa_2Cu_3O_7$ 的磨损率分别为 $6.32 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 、 $4.67 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 和 $8.96 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 可见 10% $Ag/YBa_2Cu_3O_7$ 的磨损率最低. 从图 8 可见, 在与上述相同的测试条件下, 常温大气中 $Ag/YBa_2Cu_3O_7$ 复合材料的磨损表面较为光亮, 其中 10% $Ag/YBa_2Cu_3O_7$ 的磨损表面没有明显裂纹和犁沟; 对 $Ag/YBa_2Cu_3O_7$ 复合材料摩擦前后表面的 Ag 含量进行 EDS 分析发现, 磨损表面 Ag 含量显

(a) 5% Ag/YBa₂Cu₃O_{7.8}(b) 10% Ag/YBa₂Cu₃O_{7.8}Fig 8 SEM photographs of worn surfaces of Ag/YBa₂Cu₃O_{7.8} composites图 8 Ag/YBa₂Cu₃O_{7.8}复合材料的磨损表面形貌 SEM 照片

著提高;其中 5% Ag/YBa₂Cu₃O_{7.8}摩擦前的 Ag含量占所检测元素的 4.13%,摩擦后为 8.89%。

与纯 YBa₂Cu₃O_{7.8}比较, Ag/YBa₂Cu₃O_{7.8}复合材料的摩擦系数明显降低,耐磨性能得到明显改善。Ag可以抑制磨损表面微裂纹的产生,对裂纹起到桥连和弥合作用。由于复合材料基体内晶界处的单质 Ag在摩擦作用下向表面转移,在摩擦表面生成一层 Ag转移膜,其低剪切强度起到很好的润滑作用,同时可将摩擦产生的热量散发出去。Ag/YBa₂Cu₃O_{7.8}复合材料的主要磨损机制为 YBa₂Cu₃O_{7.8}硬基底承载和软金属 Ag转移膜润滑作用。

对 Ag/YBa₂Cu₃O_{7.8}超导复合材料进行液氮温度(即超导态)下的摩擦试验,得到与纯 YBa₂Cu₃O_{7.8}相同的结果,低温超导态下复合材料的摩擦系数低且稳定,表明该复合材料是一种适用于较宽温度范围的固体润滑超导复合材料。

3 结论

a 制备出高温超导体 YBa₂Cu₃O_{7.8}和 Ag/YBa₂Cu₃O_{7.8}复合材料。

b YBa₂Cu₃O_{7.8}与不锈钢盘对磨时的摩擦系数为 0.50左右,当材料处于超导态($T < T_c$)时,摩擦系数急剧下降,最后稳定在 0.20以下。超导体 YBa₂Cu₃O_{7.8}的摩擦特性与超导电性有关;在超导态下,电子激励对摩擦的贡献降到最低。

c 添加 Ag可以改善 YBa₂Cu₃O_{7.8}的常温摩擦磨损性能。Ag/YBa₂Cu₃O_{7.8}复合材料的摩擦系数低且非常平稳,这是由于 YBa₂Cu₃O_{7.8}硬基底承载与软金属 Ag转移膜的润滑作用的缘故。

参考文献:

[1] Mason B L, Winder S M, Krim J. On the current status of quartz

crystal microbalance studies of superconductivity dependent sliding friction [J]. Tribology Letters, 2001, 10 (1-2): 59-65

[2] Krim J. Surface science and the atomic scale origins of friction: what once was old is new again [J]. Surface Science Letters, 2002, 500: 741-758

[3] Dayo A, Alhasrallah W, Krim J. Superconductivity-dependent sliding friction [J]. Physical Review Letters, 1998, 80 (8): 1690-1693

[4] Peisson B N J. Electronic friction on a superconductor surface [J]. Solid State Communications, 2000, 115: 145-148

[5] Peisson B N J, Tosatti F. The puzzling collapse of electronic sliding friction on a superconductor surface [J]. Surface Science Letters, 1998, 411: 855-857

[6] Popov V I. Electronic and phononic friction of solids at low temperatures [J]. Tribology International, 2001, 34: 277-286

[7] Sokoloff J B, Tomassone M S, Widom A. Strongly temperature dependent sliding friction for a superconducting interface [J]. Physical Review Letters, 2000, 17: 515-517

[8] 于德洋,薛群基.空间摩擦学研究的前沿领域[J].摩擦学报, 1997, 17 (4): 380-384.

Yu D Y, Xue Q J. Frontiers for space tribology investigation [J]. Tribology, 1997, 17 (4): 380-384.

[9] 古乐,王黎钦,李秀娟,等.超低温环境固体润滑研究的发展现状[J].摩擦学报, 2002, 22 (4): 314-320.

Gu L, Wang L Q, Li X J et al. Research status of cryogenic solid lubrication [J]. Tribology, 2002, 22 (4): 314-320.

[10] Fang Y, Danyluk S. Coefficients of friction of YBCO-YBCO and YBCO-Ag ball-on-flat couples [J]. Materials Science, 1993, 28: 5658-5662.

[11] Joo J, Kim J G, Nah W. Improvement of mechanical properties of YBCO-Ag composite superconductor made by mixing with metallic Ag powder and AgNO₃ solution [J]. Superconductor Science & Technology, 1998, 11 (7): 645-649.

[12] Jinho J, SeungBoo J, Wansoo N et al. Effects of silver additions on the mechanical properties and resistance to thermal shock of YBa₂Cu₃O_{7.8} superconductors [J]. Cryogenics, 1999, 39: 107-113.

- [13] Hadi S, Ali A B, Medhi S. Investigation of weak links and the role of silver addition on YBCO superconductors [J]. Superconductor Science & Technology, 2001, 14: 816-819.
- [14] Mendoza E, Puig T, Varela E, et al. Critical current enhancement in YBCO-Ag melt textured composites: influence of microcrack density [J]. Physica C, 334(2000): 7-14.

Tribological Properties of High Temperature Superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

DONG Li-rong², LI Chang-sheng², HUAM in-qi¹, DING Qiao-dang³

(1. Province Key Laboratory of Material Tribology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Jilin Normal University, Siping 136000, China

3. Chinese Academy of Sciences Lanzhou Chemistry Physics Research Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ samples were prepared by sol-gel method. The tribological properties were measured on friction and wear tester from ambient temperature to liquid nitrogen temperature. Results indicate that the friction coefficient of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ against stainless steel was about 0.5 at ambient temperature and it decreased abruptly to half of the normal state value when the temperature was below superconducting transition temperature of the $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. The measurement proves directly the effect of electronic excitation on friction. There were no electric charges accumulating on material surface at superconducting state when resistance fell zero, effect of electron excitation on friction decreased to minimum, so the friction coefficient decreased dramatically. Moreover, Ag/ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ composite samples were prepared by sintering $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ with Ag at different mass fraction to improve the tribological properties of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ at ambient temperature. The structure and morphology were investigated by XRD, SEM, and the elemental composition of the worn surfaces of Ag/ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ composites was determined using EDX. Results show that the Ag particles distributed in the $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ matrix improved the density, flexibility and toughness of Ag/ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ composites, and Ag film formed on the surfaces of Ag/ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ composites during friction process and lower the friction coefficient. The friction coefficient of 10% Ag/ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ against stainless steel was about 0.2 and the wear rate was $96 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ at ambient temperature. Ag/ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ composites showed improved tribological properties.

Key words: $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, Ag, superconducting transition temperature, friction behavior

Author: LI Chang-sheng, male, born in 1957, Ph.D., Professor, email: lichangsheng@ujst.edu.cn