

文章编号: 1004-0609(2005)01-0055-06

与钢背轧制复合的纳米复合 Al-Pb-Cu 合金的组织及摩擦性能^①

曾美琴, 戴乐阳, 王 涛, 王 辉, 李元元, 朱 敏

(华南理工大学 机械工程学院, 广州 510640)

摘 要: 用机械合金化制备了纳米复合 Al-Pb-Cu 合金粉末, 然后将之与钢背轧制复合, 并进行烧结。运用 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)分析了轧制复合到钢背的 Al-Pb-Cu 合金的组织结构变化, 并测定了其摩擦磨损性能。结果表明: 烧结后的 Al-Pb-Cu 合金粉末已较好地与钢背结合在一起, 并形成了过渡层; 在合金层中, 细小的 Pb 相保持均匀弥散的分布; 在 550 ℃烧结保温 1 h 后, Pb 的平均晶粒尺寸只有 200 nm 左右, 其摩擦磨损性能显著优于普通的 Al-Pb-Cu 合金。

关键词: 机械合金化; Al-Pb-Cu 合金; 轧制复合; 摩擦性能

中图分类号: TG 115.5⁺ 8

文献标识码: A

Microstructure and wear properties of nanocomposite Al-Pb-Cu alloy cold-rolled onto steel matrix

ZENG Mei-qin, DAI Le-yang, WANG Tao, WANG Hui, LI Yuan-yuan, ZHU Min

(College of Mechanical Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou 510640, China)

Abstract: Nanocomposite Al-Pb-Cu alloy powder was prepared by mechanical alloying (MA), and was cold rolled onto the steel matrix, then was sintered. The microstructure of the sintered Al-Pb-Cu alloy was characterized by X-ray diffraction and SEM and its wear properties were measured. The results show that the sintered Al-Pb-Cu alloy powder combines well with the steel matrix and a transition layer is formed. In the sintered Al-Pb-Cu alloy layer, tiny Pb phases are homogeneously distributed. For the alloy layer sintered for 1 h at 550 ℃, the average grain size of Pb is about 200 nm, which explains that the nanocomposite Al-Pb-Cu alloy exhibits much better wear properties than the common Al-Pb-Cu alloy.

Key words: mechanical alloying; Al-Pb-Cu alloys; cold rolling; wear properties

轴瓦是在钢背上复合一层减摩合金, 减摩合金不仅需具有很好的减摩性能, 也要有一定的承载能力。Al-Pb 基轴承合金因减摩性能好和成本低而一直备受关注。但 Al-Pb 为互不溶体系, 且 Al、Pb 两种金属的密度差别很大, 在铸造过程中容易产生严重的偏晶问题。近年来一些研究者采用搅拌铸

造^[1, 2]、快速凝固^[3, 4]、粉末冶金^[5]和机械合金化(MA)^[6~8]等各种不同的方法制备 Al-Pb 系合金, 以期获得均匀的组织和良好的摩擦磨损性能。本文作者的前期研究工作表明: 采用 MA 法能够实现 Pb 在 Al 基体中均匀弥散分布, 其尺寸为 100~200 nm, 合金强度也显著提高, 使 Al-Pb 合金的摩擦磨

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50371027); 广东省自然科学基金资助项目(C036549); 福建省自然科学基金资助项目(E0440001)

收稿日期: 2004-06-24; 修订日期: 2004-11-08

作者简介: 曾美琴(1964-), 女, 副教授。

通讯作者: 曾美琴, 副教授; 电话: 020-87112762; E-mail: meizengmq@scut.edu.cn

损性能和承载能力比其它方法制备的 Al-Pb 合金有显著的提高^[9]。

通过在 Al-Pb 合金中加入一定量的 Cu 产生固溶强化和析出 CuAl₂ 等第二相进行强化, 可以进一步提高合金的减摩性能和承载能力^[10-13]。研究结果还表明^[14, 15]: 采用 MA 法制备的 Al-Pb-Cu 合金具有纳米相复合结构, 相对 Al-Pb 合金而言, 添加 Cu 在一定程度上抑制了 Pb 相的长大, 这也进一步提高了合金的摩擦磨损性能。

需要指出的是, 本文作者的上述研究是在将 MA Al-Pb 和 Al-Pb-Cu 合金压制烧结的块体上完成的, 但实际的轴瓦合金需要复合在钢背上。因此, 本研究以热喷涂铝钢板作为钢背, 采用连续轧制法将机械合金化制备的 Al-10% Pb-4.5% Cu 合金(MA Al-Pb-Cu) 粉末复合到钢背上制成轴瓦材料, 然后研究了 MA Al-Pb-Cu 合金粉末与钢背轧制复合后在烧结过程中的组织结构变化以及摩擦磨损性能, 以期为进一步的工业应用提供参考。

1 实验

1.1 粉末制备及粉末与轴承衬背的轧制复合

将纯度为 99.9%、粒度为 74 μm 的 Al、Pb、Cu 粉按 Al-10% Pb-4.5% Cu(质量分数) 比例配成混合粉, 然后进行高能球磨。球磨过程在氩气保护下进行, 钢球与粉末的质量比为 10:1, 所用球磨机为 Fritsch P5。球磨转速为 250 r/min, 时间为 40 h。

用高速电弧喷涂的方法在表面预处理过的低碳钢条表面均匀喷涂上厚度为 100 μm 左右的铝层, 喷涂材料为 $d2\text{ mm}$ 铝丝, 然后将 MA 制备的 Al-Pb-Cu 合金粉均匀地铺在热喷涂铝层上, 厚度约为 4 mm, 压实, 进行多道重复轧制, 制得合金带坯样品。实验中使用的轧机为二辊轧机($d200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$), 电机功率为 40 kW, 转速为 980 r/min, 减速器传动比为 31.5。

1.2 磨损实验及组织结构分析

将冷轧成形的板材在氩气保护下进行烧结。用 Philips X'Pert Pro X 射线衍射仪(采用 Cu K α 辐射)、XL30FEG 扫描电镜分析合金的组织结构变化。摩擦磨损实验在 MM-200 磨损实验机上完成。试样尺寸为 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 8 mm。实验为滑动摩擦磨损(不加润滑的干摩擦条件), 对磨材料为 GCr15 钢环, 表面硬度为 HRC58~60, 对磨环转速

为 400 r/min, 对磨环的尺寸为 $d47\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。

2 结果与分析

2.1 MA Al-Pb-Cu 合金粉末轧制复合后的组织结构

作者的前期研究工作^[14, 15]表明: Al-Pb-Cu 混合粉末在球磨过程中, Pb 相被细化并均匀弥散分布于 Al 基体中, Pb 的平均晶粒尺寸约为 10 nm; Cu 组元则随着球磨时间的增加, 先部分固溶到 Al 中, 随后相继有 Cu₉Al₄ 和 CuAl₂ 相生成。图 1 所示是 MA 后的 Al-10% Pb-4.5% Cu(质量分数)合金粉末和球磨后轧制到钢背上的 Al-Pb-Cu 合金的 X 射线衍射图。显然, 合金粉末与钢背轧制复合后的 X 射线衍射图与未轧制的 MA 合金粉末的几乎一致, 说明轧制并未对球磨制备的 Al-Pb-Cu 合金产生显著影响。

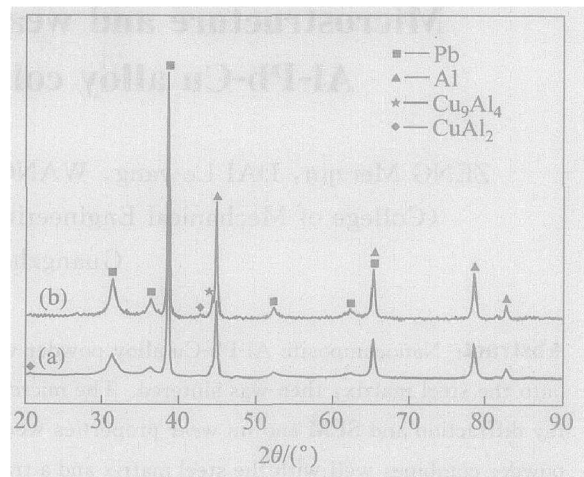


图 1 MA Al-10% Pb-4.5% Cu 合金粉末与钢背轧制复合后的 X 射线衍射谱

Fig. 1 XRD patterns of MA Al-10% Pb-4.5% Cu alloy bonded on steel matrix by cold rolling (a) —Before cold rolling; (b) —After cold rolling

图 2 所示是轧制层的扫描电镜照片, 由图可见, 喷涂在钢背上的 Al 过渡层和合金层已经较好地镶嵌在一起, 呈锯齿状, 达到了较好的界面初结合(机械结合), 但是 Al-Pb-Cu 合金层中仍有很多孔隙, 致密度不高。

2.2 MA Al-Pb-Cu 合金粉末轧制烧结后的组织结构变化

图 3 所示是将 MA Al-Pb-Cu 合金粉末与钢背轧制复合并经 350 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后的横截面组织。由图可见, 轧制得到的 Al-Pb-Cu 减摩层与钢背形成了良好的结合, 致密度提高。图 4 所示是 Al/Al-Pb-Cu

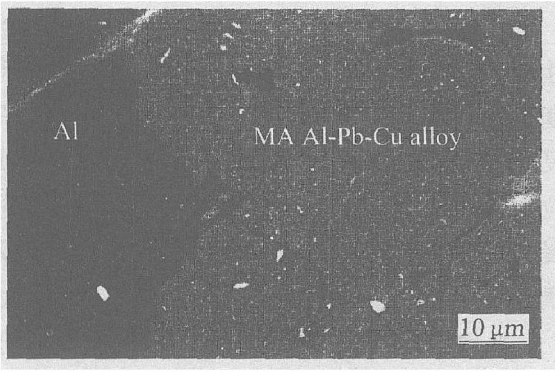


图 2 轧制后 Al/Al-Pb-Cu 界面的 SEM 图

Fig. 2 SEM micrograph of Al/Al-Pb-Cu interface after cold rolling

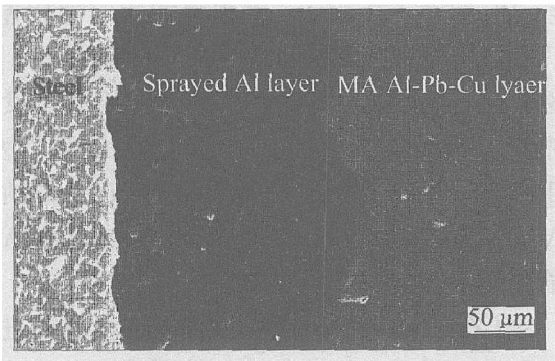


图 3 轧制复合试样经 350 °C 烧结 1 h 后的 SEM 图

Fig. 3 SEM micrograph of cold rolled specimen sintered at 350 °C for 1 h

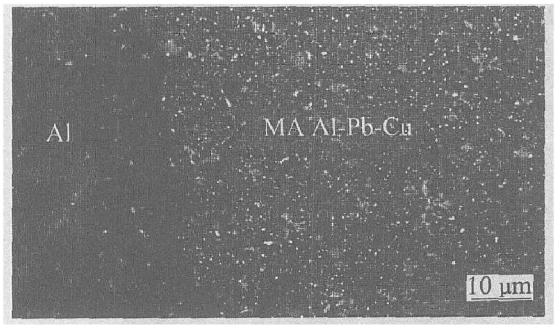


图 4 Al/Al-Pb-Cu 结合界面的 SEM 图

Fig. 4 SEM micrograph of Al/Al-Pb-Cu interface (Bright particles are Pb phase)

结合界面的 SEM 图, 由图可见原来的纯铝过渡层在烧结后出现了少量的 Pb, 说明烧结后 Pb 沿垂直于界面方向发生扩散, 在界面处形成过渡层。图 5 所示是将合金粉末与钢背轧制复合后在不同温度烧结 1 h 的 X 射线衍射谱。图中显示, 在不同温度烧结 1 h 之后的试样中主要存在 3 种相: Al、Pb 和 CuAl₂。与未烧结合合金相比, 最显著的变化就是 CuAl₂ 相的大量增加, 同时 Al、Pb 的衍射峰的半

高宽比未烧结的样品的窄, 而且, 随着烧结温度的增加, Al、Pb 所对应的衍射峰变得越来越窄, 说明其晶粒大小随温度的增加而长大。根据衍射峰的宽化计算出的 Pb 晶粒大小随烧结温度变化的趋势如图 6 所示。由图可见, Pb 的长大速度在低温段(350 °C 以下) 与高温段呈明显不同, 烧结温度超过 350 °C 时, 长大速度有明显升高。这是因为高于这个温度, Pb 已熔化, 由于 Al-Pb 不互溶, 部分液态 Pb 相在某些合金颗粒之间的孔洞中流动, 促使颗粒滑

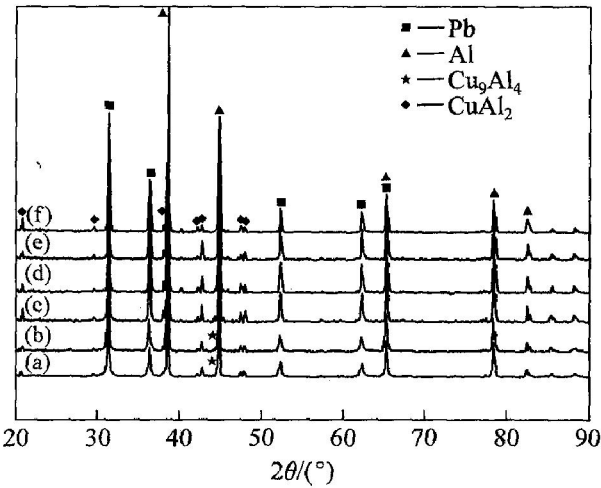


图 5 MA Al-10% Pb-4.5% Cu 合金粉末与钢背轧制复合后在不同温度烧结 1 h 的 X 射线衍射谱

Fig. 5 XRD patterns of MA Al-10% Pb-4.5% Cu alloy sintered at different temperatures for 1 h after cold rolling onto steel matrix (a) —300 °C; (b) —350 °C; (c) —400 °C; (d) —450 °C; (e) —500 °C; (f) —550 °C

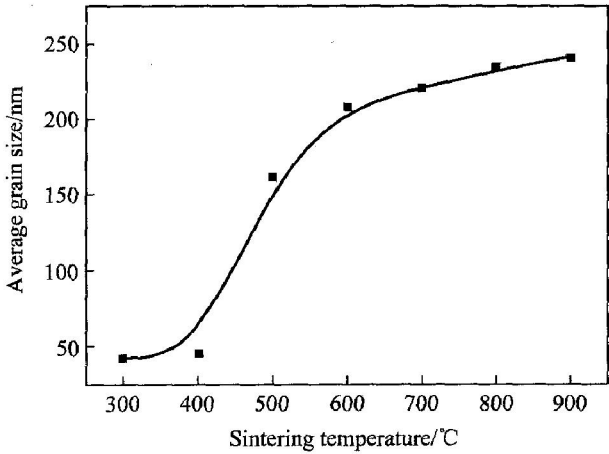


图 6 Al-10% Pb-4.5% Cu 合金中 Pb 的平均晶粒尺寸和烧结温度的关系

Fig. 6 Relationship between sintering temperature and average grain size of Pb in Al-10% Pb-4.5% Cu alloy

动、旋转、重新排列,而 Pb 粒子也部分地融合在一起,造成 Pb 粒子粗化。

图 7 所示是在不同温度烧结后 Al-Pb-Cu 合金层的 SEM 图。从图中可以看出,显微组织明显分为 3 种;基体部分、灰白色小块(箭头 A 所指)、弥散的白亮颗粒(箭头 B 所指)。能谱分析表明,灰白色区域富含 Cu、Al,应是富 Cu 相,白亮颗粒为 Pb。从图中还可以看出,与未烧结的合金相比,在 350 °C, Pb 颗粒的长大并不明显,但是在 350 °C 以后,随着烧结温度的升高, Pb 颗粒明显长大,这与前面 X 射线衍射分析的结果一致,但是由于 MA 制备的合金粉末具有独特的纳米复合显微结构,使得其烧结过程中的长大倾向比非机械合金化制备的合金要小得多。同时,由于添加了 Cu,可以通过溶质原子拖曳机制和第二相钉扎机制阻碍烧结过程中 Pb 相的长大。因此,即使在 550 °C 后, Pb 相的平均尺寸也只有 200 nm 左右,保持了良好的组织结构。

2.3 Al-Pb-Cu 轴瓦材料的摩擦磨损性能

将 MA Al-10%Pb-4.5%Cu 合金粉末与钢背轧制复合试样在不同温度烧结 1 h 后,在不同载荷下(98, 147, 196, 245 N)进行摩擦磨损实验,合金磨

损量与载荷之间的关系如图 8 所示。由图可以看出,当载荷增大时,Al-10%Pb-4.5%Cu 合金的磨损性能基本是随烧结温度增加而降低。这是因为低温度烧结比高温度烧结得到的组织中 Pb 粒子的平均尺寸更细小,在合金磨损过程中,分布更均匀、晶粒更细小的 Pb 粒子就相应地能形成更加均匀地铺展在摩擦接触面上的 Pb 润滑膜,这层 Pb 膜使得两摩擦面之间发生的反复冷焊和断裂现象大大减弱^[9],从而提高合金的耐磨性。但在载荷高于 200 N 的区域,可以发现 400 °C 烧结的 Al-10%Pb-4.5%Cu 合金的磨损性能比其它温度烧结的合金稍好。这可能是由于烧结后合金的强度和 Pb 相分布的综合作用产生的结果。在 400 °C 以上温度烧结的合金, Pb 相粒子较粗大,磨损性能相应地较差;而 400 °C 以下温度烧结的合金,烧结体欠致密,强度不够,当受到大的压力作用时,合金层易于发生断裂剥落,从而增加了磨损体积。由图还可以发现,在相同的磨损条件下,与钢背轧制复合后的纳米复合 Al-Pb-Cu 合金与 MA 后压制烧结的块体 Al-Pb-Cu 合金^[14]的磨损性能相当。

为了探讨其磨损机理,对磨损试样表面进行了 SEM 观察,结果如图 9 所示。由图可见,400 °C 烧结后的合金经 1 h 磨损后形成均匀分布的条状磨

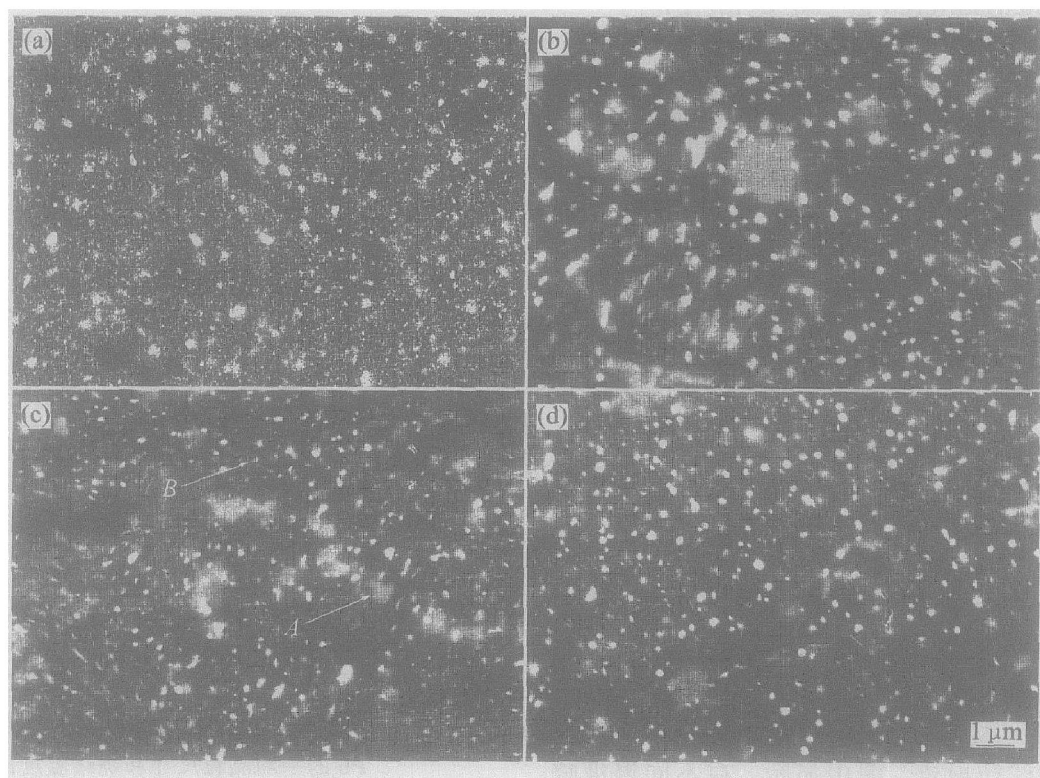


图 7 MA Al-Pb-Cu 合金轧制坯材在不同温度下烧结后的 SEM 照片

Fig. 7 SEM images of MA Al-Pb-Cu alloy sintered at different temperatures for 1 h after cold rolling onto steel matrix
(a) —350 °C; (b) —400 °C; (c) —450 °C; (d) —550 °C

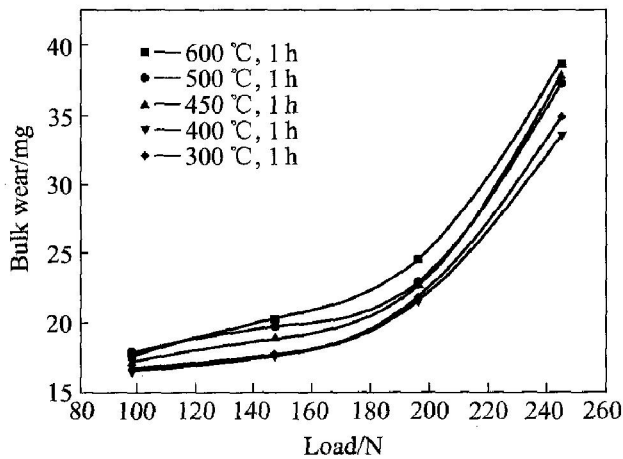


图 8 干摩擦条件下 MA Al-10% Pb-4.5% Cu 合金的磨损量与载荷的关系

Fig. 8 Dependence of wear volume of MA Al-10% Pb-4.5% Cu alloy sintered at different temperatures on load applied in wear test

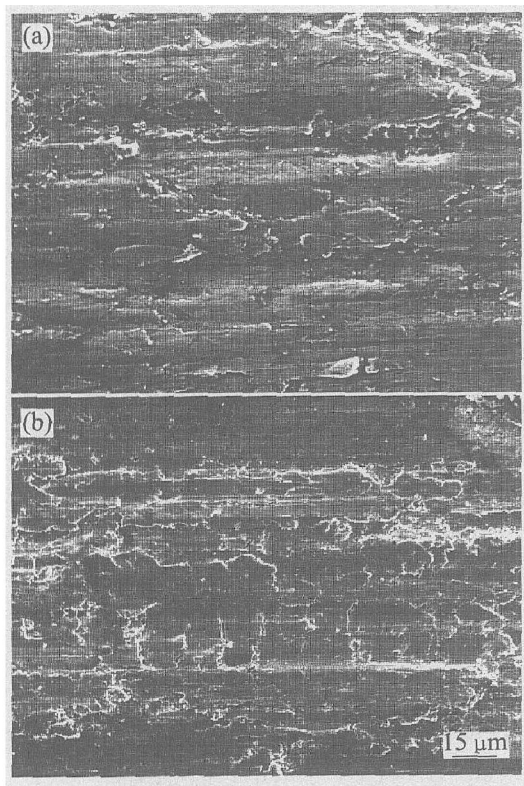


图 9 Al-10% Pb-4.5% Cu 轴承合金磨损表面的 SEM 照片

Fig. 9 SEM micrographs of wear surface of MA Al-10% Pb-4.5% Cu bearing alloy at load of 196 N and wear time of 1 h
(a) —Sintered at 400 °C;
(b) —Sintered at 500 °C

痕, 证明细小 Pb 粒子已经较稳定地形成了均匀、致密的润滑膜, 从而降低了粘着磨损的倾向。500

℃烧结的合金经 1 h 磨损后, 由于较粗大 Pb 粒子的堆积, 在磨损表面形成了堆叠在一起的絮状结构, 这种组织结构的强度不高, 容易脱落, 形成较大尺寸的磨屑, 增加了磨粒磨损的倾向。

3 结论

1) 以热喷涂铝钢板作为钢背, 将 MA Al-10% Pb-4.5% Cu 合金粉末轧制复合到钢背上, Al/ 钢以及 Al/ Al-Pb-Cu 达到了良好的界面初结合(机械咬合)。烧结后发生扩散, 原 Al/ Al-Pb-Cu 界面处形成过渡层。

2) 随着烧结的进行, CuAl_2 相大量增加, 合金中的 Pb 相仍保持均匀弥散的分布, 其长大速度较慢, 经 550 °C 烧结 1 h 后, Pb 的平均晶粒大小只有 200 nm 左右。

3) 在干摩擦条件下, 400 °C 烧结的 Al-10% Pb-4.5% Cu 合金具有最佳的摩擦磨损性能。

REFERENCES

- [1] Mohan S, Agarwala V, Ray S. Liquid-liquid dispersion for fabrication of Al-Pb metal-metal composites [J]. Mater Sci Eng A, 1991, A144(1): 215-219.
- [2] Mohan S, Agarwala V, Ray S. Friction characteristics of stir-cast Al-Pb alloys [J]. Wear, 1992, 157(1): 9-17.
- [3] Cole J F, Goodwin F E. The development and potential applications of a Pb-Al alloy [J]. JOM, 1990, 1: 41-43.
- [4] Bhattacharya V, Chattopadhyay K. Microstructure and wear behavior of aluminium alloys containing embedded nanoscaled lead dispersoids [J]. Acta Mater, 2004, 52(8): 2293-2304.
- [5] Nath D, Bolla R, Chandra S. Compacting behavior of Al-Pb mixture [J]. International Powder Metallurgy, 1992, 24(2): 84-87.
- [6] ZHU M, LI B L, GAO Y, et al. Microstructure characteristics of nanophase composite synthesized by mechanical alloying of immiscible Pb-Al and Fe-Cu systems [J]. Scripta Mater, 1997, 36(4): 447-453.
- [7] SHENG H W, LU K, MA E. Melting and freezing behavior of embedded nanoparticles in ball-milled Al-10wt% M (M = In, Sn, Bi, Cd, Pb) mixtures [J]. Acta Mater, 1998, 46(14): 5195-5205.
- [8] ZHU M, CHE X Z, LI Z X. Mechanical alloying of immiscible Pb-Al binary system by high energy ball

- milling[J]. Journal of Materials Science, 1998, 33 (24): 5873 - 5881.
- [9] Zhu M, Gao Y, Chung C Y, et al. Improvement of the wear behaviour of Al-Pb alloys by mechanical alloying [J]. Wear, 2000, 242(1): 47 - 53.
- [10] ZHANG Y C, HAO Y Y, LIU Z F, et al. Production of rapidly solidified Al-Pb-Cu by liquid stirring, ultrasonic gas atomization and liquid dynamic compaction[J]. Mater Sci Eng, 1988, 98: 119 - 121.
- [11] Pkthak J P, Sing V, Tiwari S N. Effect of lead content on tensile fracture of Al-4.5Cu-Pb bearing alloy [J]. Journal of Materials Science Letters, 1993, 12: 1450 - 1452.
- [12] Sharma A, Rajia T V. Bearing characteristics of cast leaded aluminum-silicon alloys[J]. Wear, 1996, 197 (1): 105 - 114.
- [13] Kim H M, Kim T S, Suryanarayana C, et al. Microstructure and wear characteristics of rapidly solidified Al-Pb-Cu alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2000, A287 (1): 59 - 65.
- [14] 曾美琴, 张 耀, 欧阳柳章, 等. 机械合金化制备的 Al-Pb-Cu 合金的结构与摩擦性能[J]. 金属学报, 2002, 38(8): 814 - 818.
- ZENG Meiqin, ZHANG Yao, OUYANG Liuzhang, et al. Microstructure and wear properties of Al-Pb-Cu alloys synthesized by mechanically alloying [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(8): 814 - 818.
- [15] ZHU M, ZENG M Q, GAO Y, et al. Microstructure and wear properties of Al-Pb-Cu alloys prepared by mechanical alloying[J]. Wear, 2002, 253(8): 832 - 838.

(编辑 龙怀中)