

Al₂O₃/铜合金复合材料的磨损特性研究

Study on Wear Properties of Al₂O₃-Copper Alloy Composites

万怡灶 王玉林 成国祥 杜希文 罗红林 曹阳 (天津大学材料系)

Wan Yizao Wang Yulin Cheng Guoxiang Du Xiwen Luo Honglin Cao Yang
(Dept. of Materials Science and Engineering, Tianjin University)

[摘要] 研究了冷压烧结 Al₂O₃/铜合金复合材料在摩擦条件下的磨损特性。采用化学镀的方法在一些 Al₂O₃颗粒表面包覆铜镍,获得了具有不同界面结合强度的 Al₂O₃/铜合金复合材料,进而研究了界面结合强度对该复合材料耐磨性的影响。本文还探讨了颗粒大小及体积分数对其耐磨性的影响。

关键词 Al₂O₃颗粒 铜合金复合材料 界面结合强度 耐磨性

[Abstract] The wear properties of Al₂O₃-copper alloy composites prepared by sintering were investigated under the condition of dry friction. Some Al₂O₃ particles were electroless plated with copper or nickel so as to get the composites with different interfacial bonding strength. The effects of interfacial bonding strength, particle size and volume fraction on the wear properties of the composites were studied in this paper.

Keywords Al₂O₃ particles copper alloy composites interfacial bonding strength wear properties

1 前言

自然界丰富的陶瓷材料具有廉价、轻质、耐磨和高硬度的特性,且当前超细粉、亚微粉的制造技术日趋成熟,促进了颗粒增强金属基复合材料的发展。与纤维增强金属基复合材料相比,它的制造工艺简单、成本低,且具有可加工性和性能各向同性,同时具有高的比模量、比强度、高的抗疲劳性能、优异的耐磨性能、良好的热稳定性能等^[1,2],已开始应用于民用工业,如汽车、电子、石油等部门^[3]。

颗粒增强金属基复合材料首先是作为耐磨、耐热和耐蚀材料被开发和应用的。因此,耐磨性始终是其重要的性能之一。而目前大量耐磨性的研究都集中于铝基复合材料^[4~6]。本实验研究了一种有广泛应用前景的 Al₂O₃/铜合金复合材料的磨损特性。

2 材料制备及实验方法

2.1 复合材料的制备

实验选用四种不同粒径(2.5 μm, 10 μm, 20 μm, 50 μm) Al₂O₃作为增强颗粒,基体材料是平均粒径为 50 μm 的铜合金粉末,平均化学成分为(wt%): Zn-6.54, Sn-6.72, Pb-3.06, 其余-Cu。采用冷压烧结的方法制备 Al₂O₃/铜合金复合材料,其制备工艺为:

配料 混粉 初压 初烧 复压 复烧 复合材料

工艺参数为:初压压力220MPa,初烧温度930℃,复压压力180MPa,复烧温度900℃,无压烧结时,真空度保持为10⁻¹~10⁻²Pa。

为了改善 Al₂O₃与铜合金基体的界面结合,实验采用化学镀的方法在部分 Al₂O₃颗粒的表面包覆镍或铜,用包镍和包铜的 Al₂O₃增强的复合材料分别记为 (Al₂O₃)_{Ni}/Cu 和 (Al₂O₃)_{Cu}/Cu,未包覆的 Al₂O₃增强的复合材料记为 Al₂O₃/Cu。

2.2 实验方法

复烧后的复合材料加工成7mm×7mm×25mm的试样,于MM-200型磨损试验机上进行耐磨性试验。试验条件为:干摩擦,对摩环材料GCr15(硬度为HRC60),外圆直径40mm,转速200转/分,载荷70N。以试样的体积损失衡量其耐磨性。磨损表面用X-650型扫描电镜观察。

3 试验结果

3.1 颗粒度对耐磨性的影响

图1给出了颗粒度对 Al₂O₃/铜合金复合材料耐磨性能的影响。可以看出,粒径为2.5 μm和50 μm的 Al₂O₃

颗粒增强的复合材料, 其耐磨性远不如粒径为 10 μm 和 20 μm 的 Al₂O₃ 颗粒增强的复合材料。

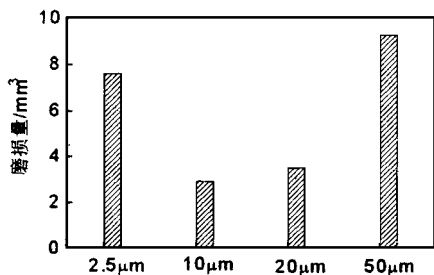


图1 不同粒径 Al₂O₃/Cu 复合材料耐磨性对比 ($V_p = 0.10$)

Fig. 1 Influence of the particle size on the wear property of Al₂O₃/Cu composite

3.2 颗粒体积百分数 V_p 对耐磨性的影响

考虑到 2.5 μm 和 50 μm 的 Al₂O₃ 颗粒增强复合材料的耐磨性极差, 试验只对两种复合材料 V_p 与耐磨性的关系进行了研究, 见图2。与纯基体相比, 复合材料的耐磨性大幅度提高, 且开始时 V_p 增加, 耐磨性提高, 当 V_p 增至一定程度时, 复合材料的耐磨性趋于稳定。

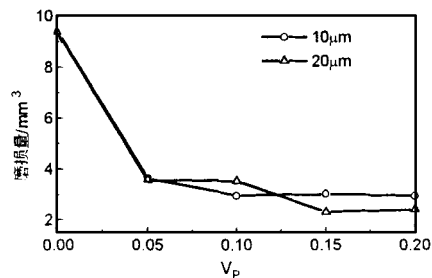


图2 复合材料耐磨性与颗粒体积百分数的关系

Fig. 2 The relation between the wearability of composite and V_p , the volume percent of Al₂O₃ particle

3.3 界面结合强度对耐磨性的影响

与纤维增强金属基复合材料相似, 界面结合状态对颗粒增强金属基复合材料的性能同样起着非常重要的作用。为此, 试验对三种不同的复合材料进行了界面结合强度的测试。与预想的结果一致, 由于 (Al₂O₃)_{Ni}/Cu 复合材料发生了界面化学反应, 其界面结合 (剪切) 强度最高, 为 250MPa, (Al₂O₃)_{Cu}/Cu 复合材料次之, 为 200MPa, Al₂O₃/Cu 复合材料的界面结合强度最低, 仅为 180MPa。相应的三种材料的磨损曲线示于图3。由图可知, (Al₂O₃)_{Ni}/Cu 复合材料的耐磨性最好, (Al₂O₃)_{Cu}/Cu 复合材料次之, Al₂O₃/Cu 复合材料的耐磨性最差。

4 分析及讨论

4.1 Al₂O₃/铜合金复合材料磨损机理探讨

材料磨损形式通常有磨粒磨损、粘着磨损、氧化磨损等, 对 Al₂O₃/铜合金复合材料来说, 由于 Al₂O₃ 与基体的结合不太紧密, 尤其是 Al₂O₃/Cu 复合材料更是如此。在磨损过程中, 当颗粒周围起支撑作用的部分基体被磨去时, 在剪切力的作用下, Al₂O₃ 颗粒极易从基体中剥落, 进而被夹在摩擦副之间构成三体磨粒磨损。从图4可以看到 Al₂O₃ 剥落后留下的孔洞, 同时磨损表面的划痕清楚可见, 这是典型磨粒磨损的痕迹; 其次, 基体有塑性变形痕迹, 说明存在粘着磨损; 另外, X 射线光电子能谱试验证实磨损表面有 CuO 和 Fe₂O₃ 存在, 表明还伴有氧化磨损, 但磨粒磨损为主要的磨损形式。

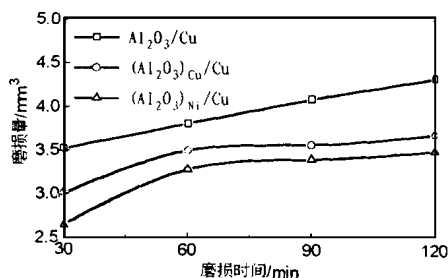


图3 界面结合强度对复合材料磨损性能的影响

Fig. 3 Influence of the interfacial bonding strength on the wear properties of composites



图4 Al₂O₃/Cu 复合材料的磨损表面
($V_p = 0.10$, $d = 10 \mu m$)

Fig. 4 The wearing surface of Al₂O₃/Cu composite

4.2 磨损结果分析

颗粒复合材料的良好耐磨性已被许多研究所证实^[7], 同样, 在 Al₂O₃/铜合金复合材料中, 由于 Al₂O₃ 颗粒的支承作用, 减慢了复合材料的磨损过程。颗粒大小的影响主要体现为: 粒径太小, 容易出现团聚现象,

Al_2O_3 团簇之内有许多孔隙, Al_2O_3 之间组织松散, 容易出现群体剥落, 从而降低了复合材料的耐磨性。相反, 如果颗粒的粒径太大, 单位体积中 Al_2O_3 颗粒的数目减少 (如单位体积中 50 μm 和 10 μm 颗粒数之比为 1:125), 支撑点减少, 于是每个 Al_2O_3 颗粒所受的压力及剪切力都增加, 使颗粒更容易剥落。硬度试验还发现, 50 μm Al_2O_3 颗粒增强的复合材料的硬度最低, 这些都导致耐磨性的降低。只有颗粒粒度适中 (10 μm 和 20 μm) 的复合材料的耐磨性才最好。体积百分数的影响是显然的, V_p 增加, 支撑点的数目增加, 耐磨性提高, 但 V_p 太高, 虽支撑作用加强, 但因颗粒聚集和剥落的几率增加, 磨损条件恶化, 所以, 复合材料的耐磨性不再增加。

界面结合强度对复合材料的耐磨性有显著的影响, 对比图4、图5和图6可知其原因。由于 Al_2O_3 颗粒包铜或包镍后与铜合金基体的界面结合加强, 因此 Al_2O_3 颗粒不易从基体中剥落, 而且, 界面结合强度越高, 颗粒剥落的几率越小, 磨损条件越有利, 耐磨性就越好。从磨面的 SEM 照片可以看到, $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{Cu}}/\text{Cu}$ 和 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{Ni}}/\text{Cu}$ 复合材料, 其磨损表面无颗粒剥离后留下的孔洞, 而只见一些似镶嵌在基体中的 Al_2O_3 颗粒, 表明颗粒可能是被逐渐磨掉的, 为验证这一点, 试验对磨损磨屑进行了分析, 磨屑形貌如图7所示。与纯基体的磨屑对比 (图7a), $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料 (图7b) 的磨屑中多了一些形状尖锐的 Al_2O_3 颗粒其大小一般为 2 ~ 5 μm , 而 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{Ni}}/\text{Cu}$ 复合材料的磨屑中未见有可辨的 Al_2O_3 颗粒 (见图7c), 表明 Al_2O_3 颗粒是被逐渐磨碎成非常细小的颗粒, 这种细小颗粒对复合材料的损伤较小, 所以磨损表面的划痕也细小。由此可见, 加强颗粒复合材料的界面结合可有效地提高复合材料的耐磨性。

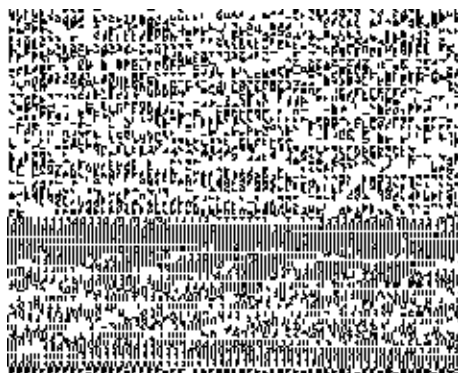


图5 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{Cu}}/\text{Cu}$ 复合材料的磨损表面形貌
($V_p = 0.10$, $d = 10 \mu\text{m}$)

Fig. 5 The wearing surface of $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{Cu}}/\text{Cu}$ composite

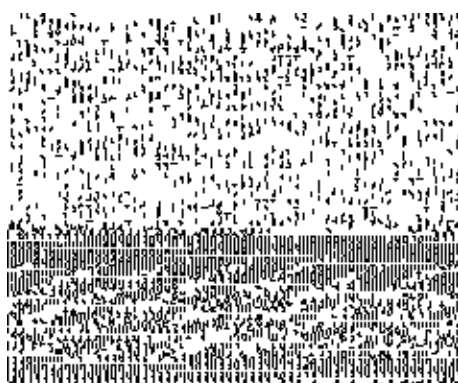


图6 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{Ni}}/\text{Cu}$ 复合材料的磨损表面
形貌 ($V_p = 0.10$, $d = 10 \mu\text{m}$)

Fig. 6 The wearing surface of $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{Ni}}/\text{Cu}$ composite

(a) matrix; (b) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ composite; (c) the SEM micrograph of broken particles from the $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{Ni}}/\text{Cu}$ composite

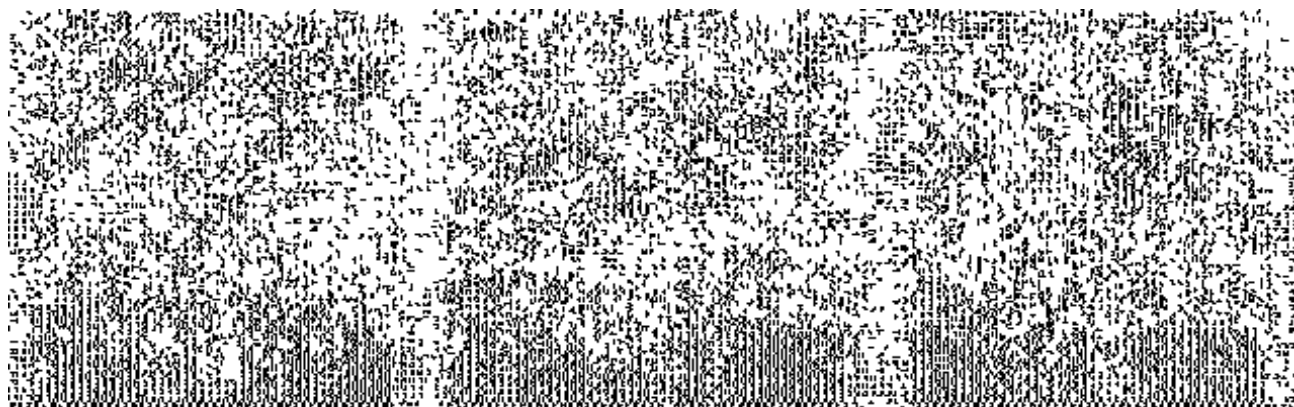


图7 基体 (a), $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料 (b) 和 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{Ni}}/\text{Cu}$ (c) 复合材料磨屑的 SEM 形貌 ($V_p = 0.10$, $d = 10 \mu\text{m}$)

Fig. 7 SEM photographs of the fragments: (a) matrix; (b) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ composite and (c) $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{Ni}}/\text{Cu}$ composite

(下转第11页)

可以看到: 850 °C 下的长期时效直到 1000h 后的尺寸和形态基本不变, 同时也未发现 TCP 相和其他异常相。在 950 °C 的长期时效实验中, 未发现 TCP 相和其他异常相。前 200h, TCP 相未发生明显变化, 600h 时效后 TCP 相明显长大, 而且在某些区域产生合并现象, 1000h, TCP 相长大到 1.5 μm 左右, 而一般 DD4 合金中的尺寸平均为 0.15 ~ 0.3 μm 左右。

实验结果与进行的 TCP 相预测相符。一般说, $M_{23}C_6$ 和 M_6C 等碳化物可能促使 TCP 相析出, DD4 单晶合金的显微组织中没有碳化物相, 这也消除了 TCP 相的形核源。

通常认为作为合金基体的强化相 γ' 在合金的 0.6T_m 以上温度时效时, 温度越高, 元素扩散越快, 随着时间的延长而聚集长大的速率就加快, 它们之间的关系遵循 Ostwald 熟化理论, 本试验中采用了 950 °C 试验温度, 高于 0.6T_m 值, 而且时效时间长达 1000h, 所以 γ' 的长大就比较明显。

3.3 长期时效对持久性能的影响

测试了 850 °C 和 950 °C 1000h 时效后的持久性能, 并与标准状态进行对比, 实验结果如图 3 所示。

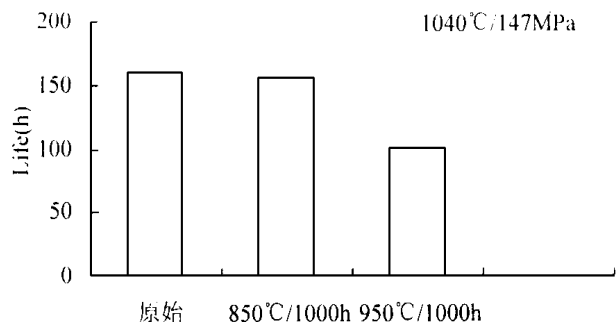


图3 长期时效对 DD4 持久性能的影响

Fig. 3 Effect of prolonged ageing on the DD4 stress-rupture life

可以看出, 850 °C / 1000h 后, 合金的持久寿命没有什么变化, 与未经过长期时效的试样相比, 处于同一水平。950 °C / 1000h 后, 合金的持久寿命有所降低 (但仍能满足该合金材料的技术标准规定值, 即 1040 °C / 147MPa, 100h)。

这是由于 γ' 粒子长大聚集的熟化现象造成的。也就是说, 由于 γ' 相粒子尺寸长大, 在持久蠕变过程中位错容易发生攀移, 从而降低了长期蠕变的抗力, 导致持久性能下降。

4 结论

(1) DD4 单晶合金在 850 °C 和 950 °C (TCP 相析出

的敏感温度) 下时效 1000h, 未出现 TCP 相, 这与相计算相符。

(2) 在 850 °C 时效至 1000h, TCP 相无明显变化, 组织稳定。在 950 °C 时效至 200h, TCP 相开始有所长大, 到 1000h, TCP 相长大到 1.5 μm, 导致持久寿命降低 35% 左右。

参考文献

- 1 刘泽尧等. DD4 单晶合金研究报告, 1995
- 2 [美] 西姆斯等著. 高温合金. 赵杰等译. 大连理工大学出版社, 1992
- 3 Chester T. Sims, William C. Hagel. The Superalloys. copyright by John Wiley & Sons, Inc. 1992

(上接第 8 页)

5 结论

(1) Al_2O_3 / 铜合金复合材料的耐磨性远高于基体, 其磨损形式主要为磨粒磨损, 同时伴有氧化磨损和粘着磨损。

(2) Al_2O_3 颗粒的大小对复合材料的耐磨性有大的影响。颗粒太大或太小都不好, 粒度适中时复合材料的耐磨性最好。

(3) 颗粒的体积分数 V_p 增加, Al_2O_3 / 铜合金复合材料的耐磨性提高, 当 V_p 增至一定值时, 复合材料的耐磨性趋于稳定。

(4) 界面结合强度对复合材料耐磨性有显著影响, 界面结合强度越高, 其耐磨性越好。增加界面结合强度是提高 Al_2O_3 / 铜合金复合材料耐磨性的有效途径。

参考文献

- 1 F. J. Humphreys. Mater. Sci. Eng., 1993, A135: 267
- 2 J. F. Doloury. Light Metal Age, 1986, 70: 7
- 3 H. A. Zufikar, J. Z. Ruby and Z. L. Wang. Mater. Sci. Eng., 1995, A203: 286
- 4 B. N. Pramila Bai, B. S. Ramasesh and M. K. Surappa. Wear, 1992, 157: 293
- 5 K. R. Razavizadeh and T. S. Eyre. Wear, 1983, 79: 261
- 6 B. N. Pramila Bai and S. K. Biswas. Acta. Metall., 1991, 39 (5): 833
- 7 H. Rbes et al. Mater. Sci. Technol, 1990, 6: 621