

Cu-Al 合金内氧化工艺及动力学研究

申玉田¹ 崔春翔¹ 吴人洁² 徐艳姬¹ 孟凡斌¹

(1 河北工业大学 天津 300130)

(2 上海交通大学 上海 200030)

摘要 对Cu-Al合金的内氧化工艺及其动力学进行了系统研究。结果表明:本实验条件下以1223K, 0.5h内氧化工艺所得材料的性能最佳,其显微组织特征是Cu基体上均匀弥散分布着纳米级 γ - Al_2O_3 粒子。理想条件的内氧化初期和实际条件下的内氧化动力学曲线服从抛物线规律。温度、时间、Cu-Al合金粉颗粒半径和Al浓度是实际内氧化控制的4要素,它们间的函数关系近似满足下式: $t = 6.79R^2C_B \exp(23251/T)$ 。实际内氧化时间不宜过长,内氧化温度应该: $1123\text{K} < T < 1223\text{K}$ 。

关键词 Cu-Al合金 内氧化 动力学 电导率

中图分类号: TG146.1¹

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2001)01-0044-06

Cu-Al合金经内氧化制备的 Al_2O_3 弥散强化铜基复合材料是近年来发展的新型功能与结构复合材料,不仅具有高电导率、高强度,而且具有优越的高温性能和抗蚀性^[1-4],在电极、电触头、引线、微波管、先进飞行器的机翼或叶片前缘等方面具有广阔的应用前景。由于其价格低,已成为银基材料的理想代用品,其研究与应用在国内外日益受到重视。目前人们对内氧化工艺进行了很多实验研究,但不同的研究者对内氧化温度、时间和原材料等的选择往往差别很大^[4-7],比如采用的内氧化时间,其差别有时达十几个小时。本研究对Cu-Al合金粉内氧化的工艺参数及其动力学进行了实验研究和理论分析,力图对内氧化工艺的制定提供依据。

1 实验方法

实验用粉末包括粒度小于 $246\mu\text{m}$ 的Cu-0.6Al(质量分数)氮气雾化合金粉和粒度小于 $48\mu\text{m}$ 的 Cu_2O 试剂,2种粉末按要求配料、混合,然后通入高纯氮气($\text{O}_2, \text{H}_2\text{O}$ 均低于 4×10^{-6} ,实测氧分压为: $5.60 \times 10^{-4}\text{Pa} \sim 8.35 \times 10^{-7}\text{Pa}$)降低氧分压,不同温度、时间下进行内氧化处理,然后急冷至室温,炉内氧势由固体电解质氧探头连续监测;内氧化得到的Cu- Al_2O_3 粉末压制成型后,在高纯 N_2 中于950℃,1h烧

结。电导率和硬度分别用FQR-7501涡流导电仪和洛氏硬度计测量,用TEL2010透射电镜和D/m ax-ra转靶X射线衍射仪进行组织结构观察与分析。

2 结果与讨论

2.1 内氧化温度与时间对电导率和硬度的影响

图1,图2分别是电导率和硬度随内氧化温度和时间的变化曲线。由图可知,不同温度下内氧化初期电导率均迅速增大,继续延长时间,电导率略有提高,一定时间后又趋于水平。除1273K内氧化外,硬度的变化情况与电导率相似。

杂质造成点阵畸变是电导率下降的原因,从电导角度讲,固溶原子和第二相粒子都是杂质,但前者引起的点阵畸变要比后者大得多。例如在铜的固溶体中若含有0.023%Fe,其电导率就会降低到纯铜的86%;而如果Fe没有溶解,只有与铜形成机械混合物沉淀出来,电导率的降低则要小得多,高于99%^[8]。Cu-Al合金的内氧化处理对电导率具有双重作用:(1)析出的 Al_2O_3 质点本身使Cu基体电导率降低;(2) Al_2O_3 质点的析出,消耗了基体中固溶的Al,晶格畸变得以缓解,使电导率提高。后者的作用显著大于前者的作用,所以内氧化后材料的电导率显著提高。同时,生成的坚硬 Al_2O_3 粒子阻碍位错运动,又可提高材料的硬度、强度。

收到初稿日期:2000-01-30;收到修改稿日期:2000-03-24

基金项目:国家重点自然科学基金(2961080)和河北省教委博士基金资助项目

作者简介:申玉田,男,1971年生,博士生,河北工业大学材料学院电镜室145信箱,天津300130,电话:022-26564125

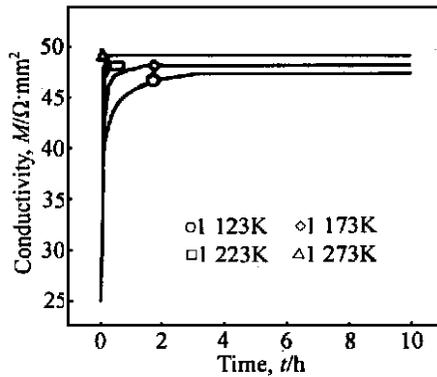


图1 电导率随内氧化温度及时间的变化

Fig. 1 Variation of conductivity with internal oxidizing temperature and time

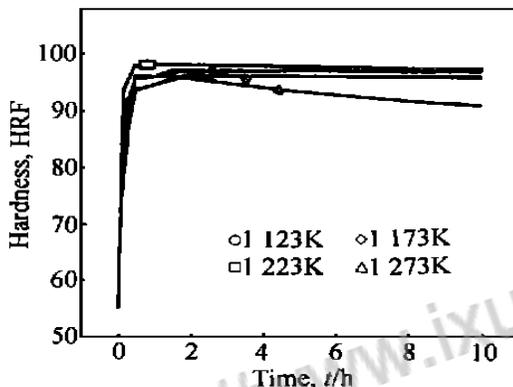


图2 硬度随内氧化温度及时间的变化

Fig. 2 Variation of hardness with internal oxidizing temperature and time

内氧化过程中电导率和硬度的变化是Al脱溶并与[O]形成 Al_2O_3 粒子的结果,电导率、硬度—时间曲线的走势随 Al_2O_3 生成量的多少而变化。由图1,图2可知,电导率的提高主要发生在内氧化开始后的一小段时间内,本实验条件下该时间段为10 min左右,这说明初期内氧化进行得很迅速,并且内氧化主要发生在初期较短的时间内,随时间的进一步延长,内氧化速度急剧减小。因此从曲线的变化趋势看,内氧化进程具有抛物线特征。

不同温度下电导率、硬度—时间曲线达到峰值并趋于水平可认为是内氧化结束的标志,峰值对应的时间即为该温度下内氧化完成所需的最短时间。表1,表2分别是不同温度下电导率和硬度达到峰值时对应的内氧化时间,两者得出的内氧化完成时间基本一致。随温度的提高, Al_2O_3 的扩散及化学反应速度均呈指数增加,从表中看,提高内氧化温度可大大缩短完成内氧化所用的时间。

表1 不同温度下电导率峰值对应的内氧化时间

Table 1 Internal oxidizing time corresponding to the conductivity peak at various temperatures

Temperature, T/K	1 123	1 173	1 223	1 273
Conductivity peak $M/\Omega \cdot mm^2$	47.2	48	49	49
Time, t/h	3	1.5	0.5	0.33

表2 不同温度下硬度峰值对应的内氧化时间

Table 2 Internal oxidizing time corresponding to the hardness peak at various temperatures

Temperature, T/K	1 123	1 173	1 223	1 273
Hardness peak HRF	96	97	98	96
Time, t/h	2	1.5	0.5	0.33

不同内氧化温度下,电导率、硬度峰值略有不同,可能与 Cu_2O 分解的程度及生成 Al_2O_3 的尺寸有关^[9]。随温度的升高,电导率峰值略有增大,1 223K时可达 $49 \Omega \cdot mm^2$,而经过同样烧结处理未经内氧化的Cu-Al合金的电导率仅为 $25 \Omega \cdot mm^2$ 左右,内氧化试样的电导率提高近一倍。硬度也以1 223K时为最高,达HRF98,与未内氧化的Cu-Al合金(硬度为HRF55)相比,提高78%。因此,与Al的固溶强化相比, Al_2O_3 粒子的弥散强化不仅大大提高了电导率,而且显著提高了材料的硬度,其中以1 223K,0.5 h内氧化制备的材料性能最佳。

1 273K内氧化时,硬度峰值较低,继峰值之后又明显下降,可能与 Al_2O_3 粒子的长大有关^[9],而1 223K以下长时间停留,硬度则几乎没有降低,因此实际内氧化温度不宜高于1 223K。

2.2 内氧化产物及其显微组织特征

图3是1 223K,0.5 h内氧化所得Cu-Al Al_2O_3 复合材料的TEM照片及衍射花样。在放大10万倍时(如图3a)可清楚地看到基体上均匀弥散分布的许多小颗粒,形状为球形或椭球形,其大小在5 nm~10 nm之间,平均7 nm,颗粒间距为20 nm~40 nm,平均30 nm。图3b中的环状花样为 $\gamma-Al_2O_3$ 的多晶衍射环,衍射斑则对应[001]Cu的衍射图,环与斑点的叠加表明在Cu基体上分布着细小的 $\gamma-Al_2O_3$ 粒子。细小的颗粒和小的间距可有效钉扎位错,起弥散强化作用。X-射线衍射分析表明,Cu-Al合金固溶体的晶格常数为0.362 0 nm,而内氧化过程中Al的脱溶,使得Cu-Al Al_2O_3 中基体的晶格常数减小为0.361 54 nm,这接近于纯Cu的晶格常数(0.361 5 nm),说明1 223K,0.5 h的实验条件下,内氧化已充分进行。

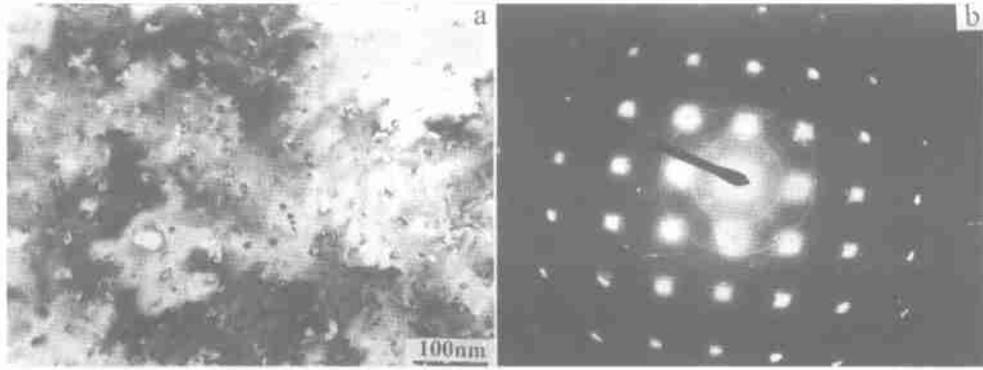
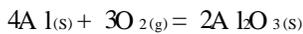
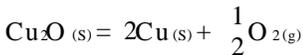
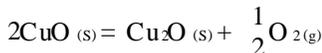


图 3 内氧化 Cu-Al₂O₃ 复合材料的 TEM 照片

Fig 3 TEM micrograph (a) and electron diffraction pattern (b) of internally oxidized Cu-Al₂O₃ composite

2.3 内氧化的热力学分析

从热力学角度讲, Cu-Al 合金内氧化首先是 Al 的择优氧化。温度和氧分压 P_{O_2} 是控制氧化物分解与形成的关键因素, 相关的氧化反应式如下:



令 Gibbs 函数变 $\Delta G = 0$, 代入相关的热力学数据^[10]并化简得到温度 T 和 CuO, Cu₂O, Al₂O₃ 形成或分解的临界氧分压 P_{O_2} (Pa) 间的函数关系,

$$CuO: \lg P_{O_2} = -\frac{15\,250}{T} + 16.54 \quad (1)$$

$$Cu_2O: \lg P_{O_2 \text{ 上限}} = -\frac{17\,611}{T} + 12.91 \quad (2)$$

$$Al_2O_3: \lg P_{O_2} = -\frac{58\,345}{T} + 15.91 \quad (3)$$

由上面 3 式可绘出 Cu-Al 合金氧化、择优氧化和无氧化的热力学条件区位图, 如图 4 所示, 择优氧化

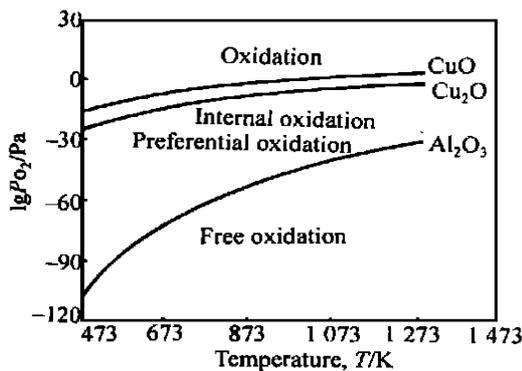


图 4 Cu-Al 合金氧化、择优氧化和无氧化热力学条件区位图

Fig 4 A rea chart of the thermodynamic requirements of oxidation, preferential oxidation and free oxidation of the alloys Cu-Al

区中的温度和氧压即为 Cu-Al 合金实现内氧化的热力学条件。内氧化的上限氧分压是一个温度的函数, 由 (2) 式确定。高于上限氧分压, Cu 将发生氧化; 反之, 如果介质中氧分压过低, 内氧化动力不足, Al 的逆扩散相对增强, 则将发生 Al 的外氧化, 因此内氧化的氧分压应尽可能接近但不能超过上限氧分压, 实际内氧化区是上限氧分压下方的一个很小区域, 据此可选择合理的内氧化工艺。

Cu₂O 粉末分解供氧时, 介质中的氧分压近似等于给定温度下的上限氧分压, 因此, 可最大限度地发挥内氧化的供氧潜力。由于上限氧分压随温度的提高而显著增大, 为了加速内氧化进程, 宜采用较高的内氧化温度。忽略 Al 含量的影响, 内氧化的下限氧分压由 (3) 式确定, 是一个极小量, 在实际内氧化控制中无实际意义。

2.4 内氧化的动力学分析

Cu-Al 合金粉用 Cu₂O 粉末作为氧化剂进行内氧化时, 包括: 分解、吸收、扩散、反应 4 个基本过程, 即 Cu₂O ^{分解} 2Cu + [O]; [O] 的吸附; [O] 溶入 Cu 基体形成 [O]_{cu}; [O] 扩散。反应: 2Al + 3 [O] Al₂O₃。一定时间内, 内氧化进行的程度取决于内氧化的动力学条件。对于球状颗粒的 Cu-Al 合金, 氧在 Cu 中的扩散系数 D_O 比 Al 在 Cu 中的扩散系数 D_B 要高几个数量级, 忽略 D_B , 则发生 Al 的原位内氧化, 如作出如下假设, 其原位内氧化动力学就变得很简单:

1) Cu₂O 粉与 Cu-Al 粉绝对均匀混合, 内氧化从球面向球心均匀推进;

2) 一定温度下氧在 Cu-Al 合金颗粒表面的溶解度 C_0 保持恒定, 沿半径方向, 氧浓度分布曲线为直线, 内氧化反应仅在反应界面处进行。

根据反应扩散原理, 如果内氧化由原子扩散控制, 则:

1) dt 时间内到达内氧化层边界处的氧量为:

$$C_{O_2} - C_1 \cdot D_{O_2} \cdot d\xi \quad C_{O_2} D_{O_2} \cdot A_1 dt$$

2) 边界处小体积内的 A1 转变成 Al_2O_3 需要的氧量为: $1.5C_B A_2 d\xi$

其中 ξ 为内氧化深度, t 为内氧化时间, C_1 为形成 Al_2O_3 的临界氧浓度, 实验条件下很小, 可忽略; C_B 为 A1 在 Cu 中的浓度, C_0, C_1, C_B 均为原子分数; R 为 Cu-A1 合金粉颗粒半径, A_1, A_2 分别是半径为 R 和 $R - \xi$ 的球面一部分对应的面积。

dt 时间内, 到达边界处的氧量应等于生成 Al_2O_3 需要的氧量。据此建立微分方程:

$$C_{O_2} D_{O_2} \cdot A_1 dt = 1.5 C_B A_2 d\xi$$

因 $A_1 = A_2 = \frac{R^2}{(R - \xi)^2}$

所以 $C_{O_2} D_{O_2} \cdot \frac{R^2}{(R - \xi)^2} dt = 1.5 C_B d\xi$

两边积分: $\int_0^{\xi} \frac{C_{O_2} D_{O_2} R^2}{1.5 D_B} dt = \int_0^{\xi} (R - \xi)^2 d\xi$

因此理想条件下原位内氧化动力学方程为:

$$\frac{C_{O_2} D_{O_2} R^2}{C_B} t = \frac{3R^2}{4} \xi^2 - R \xi^3 + \frac{3}{8} \xi^4 \quad (4)$$

理想条件下的内氧化初期: $\xi \ll R, A_1 = A_2$

假设 1) 不能成立的实际条件下: $A_1 \neq A_2$

这两种情况下近似发生等面积扩散, 相当于片状颗粒的内氧化, 此时原位内氧化的动力学方程为:

$$\xi^2 = \frac{4C_0 D_{O_2}}{3C_B} t \quad (5)$$

可见实际条件下粉末不能完全均匀混合时, 等面积扩散趋势增强, 球形颗粒的内氧化方式向片状颗粒或块材的内氧化方式转化, 一定温度下, 内氧化深度 ξ 与时间 t 呈抛物线关系, 类似于理想的扩散控制过程。由此可推导出内氧化界面推进的速度方程:

$$v = \frac{d\xi}{dt} = \frac{C_0 D_{O_2}}{3C_B} \cdot \frac{1}{t}$$

其它条件一定时, 不同时刻的内氧化速度之比为:

$$v_1 : v_2 = \frac{t_2}{t_1}$$

故初期内氧化速度可很大, 但随时间的延长内氧化速度将急剧减小, 因此超过一定的时间后, 通过延长时间来增加内氧化深度意义不大, 这与实验结果一致。

当内氧化充分完成时, $\xi = R$, 则由 (4), (5) 式得

理想条件下: $R^2 = \frac{8C_0 D_{O_2}}{C_B} t_1 \quad (6)$

实际条件下:

[O] 从颗粒的两面扩散, 最大扩散路径为 R , 此时

$$R^2 = \frac{4C_0 D_{O_2}}{3C_B} t_2 \quad (7)$$

[O] 从颗粒的一面扩散, 最大扩散路径为 $2R$, 此时

$$R^2 = \frac{C_0 D_{O_2}}{3C_B} t_3 \quad (8)$$

因此其它条件一定时, $t_3 = 4t_2 = 24t_1$ 。对于 Cu 基体^[11]: $C_0 D_{O_2} = 0.442 \exp(-193310/R T) \text{ cm}^2/\text{s}$, 取 $R = 8.314 \text{ 焦耳/克} \cdot \text{分子}$, 代入 (6), (7), (8) 式并整理得:

$$t_1 = 0.29R^2 C_B \exp(23251/T) \quad (9)$$

$$t_2 = 1.71R^2 C_B \exp(23251/T) \quad (10)$$

$$t_3 = 6.79R^2 C_B \exp(23251/T) \quad (11)$$

可见影响内氧化的主要因素是温度、时间、Cu-A1 合金粉颗粒半径和 A1 浓度。生产和实验条件下颗粒半径 R 和 A1 浓度 C_B 一定, 温度和时间是内氧化控制的主要工艺参数。

本实验条件下合金粉为 Cu-0.6Al, 相应的 $C_B = 0.014$, 由上面 3 式可确定 C_B 一定时, T, R 与 t 间的三维关系, 如图 5 所示。由图可知, 不同条件下完成内氧化所用的时间随 Cu-A1 合金颗粒半径的增大和内氧化温度的减小而急剧增大, 颗粒半径过大或者内氧化温度过低都将最终导致内氧化因时间过长而无实际意义。

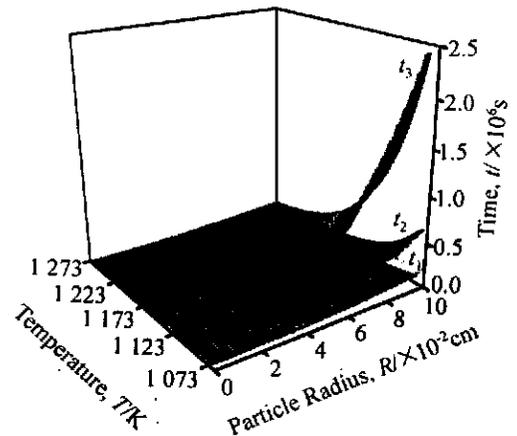


图 5 $C_B = 0.014$ 时 T, R 与 t 的三维关系图

Fig 5 Three dimensional relation diagram of T, R and t for $C_B = 0.014$

本实验条件下 Cu-A1 合金粉为粒度小于 $246 \mu\text{m}$, $R = 0.0123 \text{ cm}$, $C_B = 0.014$, 由 (9), (10), (11) 式得

理想条件下: $T = 10098 / (\lg t + 6.223)$

实际条件下:

最大扩散路径为 R 时

$$T = 10\,098 / (\lg t + 5.445)$$

最大扩散路径为 $2R$ 时

$$T = 10\,098 / (\lg t + 4.842)$$

图 6 表明了 R 一定时, 温度对完成内氧化所用时间的影响: 低于一定温度时, 随温度的进一步降低, 完成内氧化所用时间会急剧延长。表 1 中内氧化温度与时间的实验值如图中黑点所示, 可见实际的内氧化温度和时间接近扩散路径为 $2R$ 的实际条件, 由此可推知实际内氧化温度、时间、Cu-A1 合金粉颗粒半径和 Al 浓度间的函数关系近似满足 (11) 式, 即: $t = 6.79R^2 C_B \exp(23\,251/T)$, 据此可科学地选材, 并确定合理的内氧化工艺。

根据最小二乘法对表 1 中的 4 对实验值进行回归计算, 得到最佳拟合函数为: $T = 9\,593 / (\lg t + 4.48)$, 拟合曲线如图 6 所示。表 3 是由回归函数得到的部分计算结果, 从表中看, 1 123K 以下完成内氧化所用时间已很长, 所以实际的内氧化温度不宜低于 1 123K。

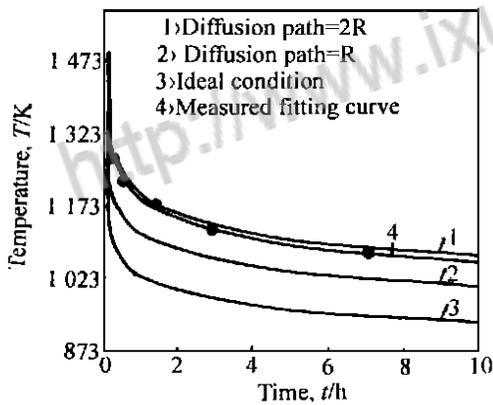


图 6 $R = 0.0123\text{ cm}$ 时, 温度 T 与时间 t 的关系
Fig. 6 Relationship of T with t for $R = 0.0123\text{ cm}$

表 3 由回归函数得到的部分计算结果

Table 3 Partial calculated values obtained from regressive function

Temperature, T/K	923	973	1 023	1 073	1 123	1 173	1 223	1 273	1 323
Time, t/h	213	63	21	7.5	3.0	1.3	0.6	0.3	0.2

3 结 论

1) 与 Al 的固溶强化相比, Al_2O_3 粒子的弥散强化不仅大大提高了电导率, 而且显著提高了材料的硬度, 本实验条件下以 1 223K, 0.5 h 内氧化工艺制备

的材料性能最佳, 其显微组织特征是 Cu 基体上均匀弥散分布着纳米级 Al_2O_3 粒子, 其平均尺寸为 7 nm, 间距为 30 nm。

2) Cu-A1 合金内氧化的上限氧分压由下式确定:

$\lg P_{O_2 \text{ 上限}} = -\frac{17\,611}{T} + 12.91$, 是一个温度的函数, 内氧化宜采用较高的温度; 下限氧分压是一个极小量, 对于内氧化控制无实际意义。

3) 理想条件下初期和实际条件下 Cu-A1 合金内氧化的动力学方程为: $\xi = \frac{4C_0 D_0}{3C_B} t$ 服从抛物线规律,

内氧化界面推进的速度方程为: $\frac{d\xi}{dt} = \frac{C_0 D_0}{3C_B} \cdot \frac{1}{t}$

4) 实验结果与动力学分析均表明: 内氧化主要发生在初期较短的一段时间内, 随时间的延长, 内氧化速度急剧下降, 实际内氧化时间不宜过长, 实际内氧化温度范围是: $1\,123\text{ K} < T < 1\,223\text{ K}$ 。

5) Cu-A1 合金的内氧化接近 $[O]$ 扩散路径为 $2R$ 的情况, 温度、时间、Cu-A1 合金粉颗粒半径和 Al 浓度是实际内氧化的 4 要素, 它们近似满足下式: $t = 6.79R^2 C_B \exp(23\,251/T)$, 据此可制定内氧化工艺。

参考文献 References

- 1 Broyles S E et al Metall Trans A [J], 1996; 27A (5): 1 217
- 2 Joanna G Journal of Materials Engineering and Perfomance[J], 1992; 1(1): 113
- 3 Sun H B, Wheat H G Journal of Materials Science [J], 1993; 28: 5 435
- 4 Shen Yutian (申玉田) et al Acta Metall Sin (金属学报) [J], 1999; 35(8): 888
- 5 Li Yutong (李玉桐) et al Acta Mater Camp Sin (复合材料学报) [J], 1996; 13(2): 42
- 6 Shi Ziyuan (石子源) et al Transactions of Metal Heat Treatment (金属热处理学报) [J], 1997; 18(4): 32
- 7 Tian Sugui (田素贵) et al Powder Metallurgy Technology (粉末冶金技术) [J], 1995; 13(4): 289
- 8 Zhao Zude (赵祖德) et al Handbook of Copper and Copper Alloys (铜及铜合金材料手册) [M] Beijing: Science Press, 1993: 155
- 9 Xie Wenguo (谢文果). Powder Metallurgy Technology (粉末冶金技术) [J], 1996; 14(2): 136
- 10 Teaching and Research Group of General Chemistry of Zhejiang University (浙江大学普通化学教研组). General Chemistry (普通化学) [M] Beijing: Higher Education Press, 1992: 584
- 11 Pastored R L, Rapp R A. Trans Met Soc AIME [J], 1969; 245: 1 711

Internal Oxidation Technology and Kinetics of the Alloy Cu-Al

Shen Yutian¹, Cui Chunxiang¹, Wu Renjie², Xu Yanji¹, Meng Fanbin¹

(1 Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

(2 Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract The internal oxidation technology and kinetics of the alloy Cu-Al have been systematically studied. The results show that optimum properties can be obtained for the materials oxidized internally at 1223K for 0.5h. Its microstructure is characterized by a uniform distribution of Al_2O_3 nano-particles in the Cu grains. The kinetic curves of internal oxidation in the initial stage of ideal condition and under practical condition obey parabolic law. Four key factors of practical internal oxidation are temperature, time, particle radius of the alloy Cu-Al and concentration of aluminum, and their functional relation can be approximately described by the following equation: $t = 6.79R^2C_B \exp(23251/T)$. The practical internal oxidation time should not be quite long, and temperature should be in the range $1123\text{K} < T < 1223\text{K}$.

Key words internal oxidation, kinetics, electric conductivity, hardness, diffusion

Biography: Shen Yutian, Ph. D. Graduate Student, School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, P. R. China, Tel: 0086-22-26564125

新材料发展现状及 21 世纪发展趋势研讨会 ——中国工程院化工、冶金与材料工程学部第三届学术会议

21 世纪,在基础科学,特别是信息、生物、能源和环境科学与工程迅猛发展的强劲推动下,材料科学与技术将在更深的层次与水平上获得前所未有的进步,材料的潜在功能将得到更全面、更充分的发挥和利用。为促进我国材料科学与工程学的进步,中国工程院化工、冶金与材料工程学部决定于 2001 年 9 月 16 日~20 日,在西安市召开学部第三届学术会议。会议将对新材料发展现状及 21 世纪发展趋势,材料科学的一些新的热点学科和研究前沿以及对策进行广泛的学术交流与讨论,同时为促进中西部材料科技发展做出贡献。

顾问委员会: 主席 师昌绪

委员: 王淀佐 严东生 李东英 李恒德 邱竹贤 张寿荣 邵象华 侯祥麟 徐承恩 殷瑞钰 黄培云

会议主席: 周 廉 **会议副主席:** 李大东 陆钟武 傅恒志

组织委员会: **主任:** 李大东 汪旭光

委员: 左铁镛 刘伯里 李正邦 李正名 邹 竞 张国成 陆钟武 金 涌 周 廉 顾真安 黄伯云 薛群基

学术委员会: **主任:** 陆钟武 左铁镛

委员: 闵恩泽 曹湘洪 徐端夫 王震西 李龙土 胡壮麒 邹 竞 徐更光 唐明述 崔 崑

雷廷权 薛群基 柯 伟 闻立时 陈昌麒 张立德 王占国 陈革涛 殷为宏

秘书处: 陈革涛 唐仁波 张 龙

会议主题: 涵盖当今材料科学研究的多数重点领域,包括:稀有、稀土新材料;特种功能材料(超导材料、磁性材料、能源材料);光电子材料;纳米材料与技术;高性能结构材料;石油、化工材料;催化、触媒材料;生物材料;有机高分子材料;无机陶瓷材料;铝、镁、钛、轻金属材料;钢铁及其新材料;表面科学与技术;特种材料成型与加工技术;材料性能检测与计算机模拟等。

论文和文集: 会后正式出版文集,以《中国工程科学》和《稀有金属材料与工程》杂志发行,发表文章以研究报告为主,可收录进 SC1。一般文章 4 页~6 页,个别文章可 7 页~8 页,要求用 Word 97 格式文件,并报送软盘。排版格式、报送方式另行通知。

报名时间: 3 月份以前,及时报名。

北京联系人: 陈革涛、张龙 (地址:北京白石桥路 7 号,中国材料研究学会,100081,电话:010-68428640)

西安联系人: 唐仁波 (地址:西安市 51 号信箱,西北有色金属研究院科协,710016,电话:029-6231084)

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>

阅读此文的还阅读了:

- [1. Al-Cu-Mn合金的铸造工艺研究](#)
- [2. Al-4.5Cu合金热裂倾向的研究](#)
- [3. 新型Al-Cu-Li-Ag铝合金](#)
- [4. Cu-Al合金内氧化工艺及动力学研究](#)
- [5. 含钕Al-Cu-Li合金的研究](#)
- [6. 内氧化Al₂O₃/Cu-Cr复合材料工艺与性能的研究](#)
- [7. 模具用Zn-Al-Cu合金老化问题的研究](#)
- [8. 高韧性Al-Cu合金](#)
- [9. 形变Cu-4Al合金再结晶动力学](#)
- [10. 内氧化Al₂O₃/Cu-Cr复合材料工艺与性能的研究](#)
- [11. Cu-Al合金粉体工业化生产的内氧化工艺研究与控制](#)
- [12. Al-5%Cu合金热处理工艺研究](#)
- [13. 内氧化制备Cu-5%Al₂O₃复合粉末的研究](#)
- [14. 银合金内氧化动力学分析](#)
- [15. Cu-Al-Mn合金脱合金腐蚀现象的研究](#)
- [16. 新型Al-Zn-Mg-Cu铸造合金](#)
- [17. Cu-Al合金内氧化热力学与动力学研究](#)
- [18. 不同Al含量Cu-Al合金内氧化后的组织对比](#)
- [19. Cu-Al合金内氧化产物及分布的研究](#)
- [20. 稀土Y对Cu-0.35Al合金薄板带内氧化动力学的影响](#)
- [21. 稀土Y对Cu-0.35Al合金薄板带内氧化动力学的影响](#)
- [22. Al-Mg-Si-Cu合金的热处理工艺](#)
- [23. Cu-Al预合金粉末中Al内氧化工艺的分析](#)
- [24. Cu-Al合金内氧化工艺参数对性能影响的研究](#)
- [25. Cu-Al粉末烧结合金内氧化研究](#)
- [26. 半固态成形Al-Si-Cu合金](#)

27. Cu-Al合金内氧化工艺的研究
28. Cu-Al合金薄板内氧化法制备块体Cu-Al₂O₃复合材料
29. Cu-Al-Y合金稀土渗铝及内氧化研究
30. Ag-Cu合金内氧化研究
31. Al-Cu合金的热处理工艺研究
32. 半固态成形Al-Si-Cu合金
33. Cu-Al合金薄板内氧化法制备块体Cu-Al₂O₃复合材料
34. 粉末烧结Cu-Al合金内氧化动力学的研究
35. Al-Cu合金压铸工艺研究
36. 热型连铸工艺制备Cu-Cr合金的研究
37. Al-Cu-Ce合金的退火工艺及组织研究
38. Cu-Al粉末烧结合金的内氧化行为
39. Al-Cu合金
40. 内氧化Al₂O₃/Cu-Cr复合材料工艺与性能的研究
41. Al-Cu合金应力时效的动力学研究
42. 内氧化制备Cu-Al₂O₃复合材料新工艺的研究
43. Al-Si-Cu合金工艺的特点
44. Cu-Al合金内氧化工艺及动力的研究
45. Al-Zn-Mg-Cu合金的时效工艺研究
46. 混合稀土对Cu-Al合金薄板内氧化组织和性能的影响
47. Al-Si-Cu合金热处理工艺的改进
48. 稀土Y对Cu-0.35Al合金薄板带内氧化动力学的影响
49. Cu-Al合金添加稀土元素内氧化研究
50. Cu-Al合金薄板内氧化法制备块体Cu-Al₂O₃复合材料