热压烧结温度对元素掺杂 Cu-Al 合金组织与性能的影响①

李泽邦，刘二勇
（西安科技大学 材料科学与工程学院，陕西 西安 710054）

摘　要：选取 Fe、Mn、Ni 元素对 Cu-Al 合金进行掺杂，采用热压烧结工艺在不同温度下制备 Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金，并对其进行固溶和时效处理。运用金相显微镜、扫描电子显微镜（SEM）、X 射线衍射仪（XRD）等手段对合金微观组织进行表征，测试了合金的密度、硬度和导电率。结果表明，低温（750 ℃）时，合金密度较低（约为 7.946 g/cm^3）、力学性能较差（维氏硬度为 253.9HV）；随着温度升高，合金的密度、硬度均有所提升，950 ℃时合金密度增至 8.058 g/cm^3、维氏硬度上升至 281.5HV。热压烧结温度对合金导电率的影响不显著。固溶和时效处理可以提升合金的密度；固溶处理使合金的硬度和导电率略微降低，而时效处理能提高合金的硬度和导电率。

关键词：铜铝合金；热压烧结；烧结温度；元素掺杂；固溶处理；时效处理；析出相
中图分类号：TG146；TG115　　**文献标志码：**A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.033
文章编号：0253-6099（2025）06-0190-06

Effect of Hot-Pressing Sintering Temperature on Microstructures and Properties of Element-Doped Cu-Al Alloys

LI Zebang, LIU Eryong
(*School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an* 710054, *Shanxi, China*)

Abstract: Firstly, Cu-Al alloy was doped with selected elements of Fe, Mn and Ni, and Cu-Al-Fe-Mn-Ni alloy, after being synthesized by adopting hot-pressing sintering process respectively at different temperatures, was subjected to solution-aging treatment. The microstructure of the alloy was characterized by means of metallographic microscope, scanning electron microscope, X-ray diffractometer among others, and the density, hardness and electrical conductivity of the alloy were tested. It is found that at a low temperature (750 ℃), the synthesized alloy has lower density, around 7.946 g/cm^3, and poor mechanical properties, with Vickers hardness of 253.9HV. Both density and hardness of the alloy increase with the rise of temperature. At 950 ℃, the density increases to 8.058 g/cm^3 and the Vickers hardness rises to 281.5HV. But the hot-pressing sintering temperature hasn't significant impact on the electrical conductivity of the alloy. The solution-aging treatment can improve the density of the alloy. Meanwhile, solution treatment leads to slight reduce in the hardness and electrical conductivity of the alloy, while aging treatment brings the reverse effect.

Key words: Cu-Al alloy; hot-pressing sintering; sintering temperature; solution treatment; aging treatment; precipitated phase

Cu-Al 合金凭借其优良的力学性能、良好的导电性以及出色的耐腐蚀性[1]，在航空航天、电子信息、机械制造等众多领域展现出巨大的应用潜力。然而，随着各行业对材料性能要求越来越高，传统 Cu-Al 合金已难以满足实际需求。元素掺杂是提升合金性能的关键手段之一[2-3]，通过向 Cu-Al 合金中引入特定的合金元素，如 Fe、Mn、Ni 等，能够显著改变合金的晶体结构、相组成以及微观组织，进而对合金力学、电学、热学等性能进行有效调控。其中，掺杂 Fe 元素可以细化晶粒，提高合金的强度和硬度[4]；掺杂 Mn 元素有助于改善合金的加工性能和耐蚀性[5]；掺杂 Ni 元素能够增强合金的韧性和抗氧化性[6]。

热压烧结是一种高效的材料制备工艺[7]，热压烧结温度作为该工艺的关键参数，对元素掺杂 Cu-Al 合

① **收稿日期：**2025-05-25
基金项目：陕西省教育厅服务地方专项计划项目（23JC051）；陕西省自然科学基金（2023-JC-QN-0507）
作者简介：李泽邦（1999—），男，山东济南人，硕士研究生，主要研究方向为金属材料改性。E-mail：lzb585211@163.com

金的组织与性能有重要影响[8]。不同的烧结温度会导致原子扩散速率、晶粒生长速度以及相转变过程的差异,从而使合金的晶粒大小、形状和分布,相的种类、含量和形态等显著不同[9]。而这些微观组织的变化又直接决定了合金的宏观性能,包括密度、硬度、导电性等。本文采用热压烧结制备了 Fe、Mn、Ni 同时掺杂的 Cu-Al 合金,探讨了热压烧结温度对 Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金组织与性能的影响;并对该合金进行固溶处理和时效处理,分析其密度、硬度和导电性的变化规律,旨在揭示合金性能变化的内在机制,为优化热压烧结工艺参数、开发高性能的 Cu-Al 合金材料提供理论依据和技术支持。

1　实验材料与方法

1.1　材料制备

实验所选用的金属粉末原料包括铜粉、铝粉、镍粉、铁粉及锰粉,其中铜粉粒径约 20 μm,其余粉末粒径约 1 μm,所有粉末的纯度均达到 99.9%,可满足后续实验的高纯度要求。

按照配方要求,首先用精度达 0.000 1 g 的电子天平分别称量铜、铝、镍、铁和锰粉末,然后置于行星式球磨机中进行混合。研磨介质选用氧化锆磨球,直径依次为 10、5、2.5 mm,球料质量比设定为 3∶1。为避免氧化,在球磨罐内通入氩气作为保护气氛。球磨机转速为 200 r/min,每运转 30 min 后暂停 5 min,以控制温升,累计球磨 12 h,确保粉末混合均匀。

在 FHP-828 型放电等离子烧结(SPS)设备上制备掺杂 Fe、Ni、Mn 的 Cu-Al 合金样品。首先,将球磨得到的合金粉末(Fe、Ni、Mn、Cu、Al 质量分数分别为 4.7%、5.6%、2.9%、78.8%、8.0%)投入直径约 60 mm 的高纯石墨模具中,并在模具与粉末接触处垫入约 0.01 mm 厚的石墨纸。随后,将此模具组合体放入真空热压炉,调节好上下压头位置并覆盖隔热垫与炉盖。利用机械泵将炉腔内的真空度降至 15 Pa 以下后,启动扩散泵继续抽气,使压力进一步降低至 10^{-3} Pa 左右,随后开始升温。烧结温度分别设定为 750、800、850、900 及 950 ℃,在 30 MPa 条件下保温 60 min。保温结束后,随炉冷却,即可获得 Cu-Al-Fe-Ni-Mn 合金热压烧结样品。

利用 SX2-10-13 型高温电阻炉对热压烧结后的合金样品进行 1 h 固溶处理 ,炉温设置为 850 ℃。

针对固溶处理后的合金样品,采用 SRJX-4-13A 型电阻加热炉进行时效处理,时效温度 450 ℃,保温时间 8 h。

1.2　材料表征

使用金相显微镜(徕卡 DMI 8)观察样品金相组织;采用 TESCAN MIRA LMS 型扫描电子显微镜(SEM)及配套能谱分析系统(EDS)观察合金在微观尺度下的组织形貌;采用 Rigaku D/max 2500 型 X 射线衍射仪(XRD)表征样品的晶型结构;采用 X 射线光电子能谱仪(XPS,Thermo Scientific K-Alpha)分析腐蚀产物薄膜成分。

1.3　性能分析

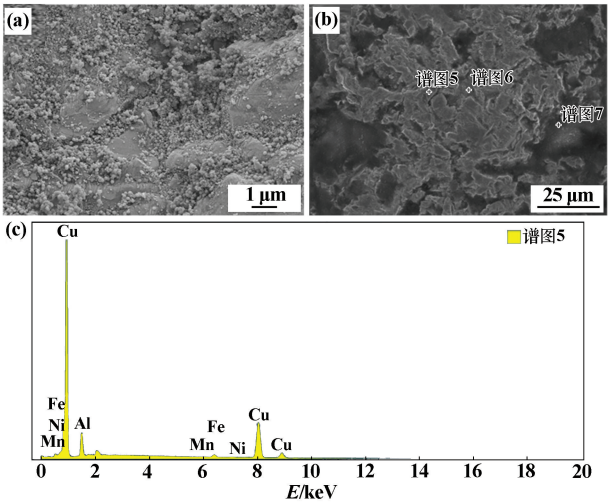
采用同步热分析仪(DSC,德国 NETZSCH-STA449F3)进行差热分析,测量合金中的固态相变及相变温度;使用荷兰 INNOVATEST FALCON507 型维氏硬度计检测经复合改性处理后的合金样品表面和截面梯度硬度,测试时施加 200 g 载荷并维持 10 s;采用 7501A 型涡流导电仪测试合金的导电性能。

2　实验结果与讨论

2.1　合金的显微组织及物相分析

2.1.1　合金显微组织分析

图 1 为 850 ℃下热压烧结制备的 Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金的 SEM-EDS 图。热压烧结后的合金表面平整度相对较高。合金表面颜色呈现金属特有的光泽,其颜色因各元素含量以及表面氧化程度不同而有所不同。同时,该合金表面由许多不同形状和大小的晶粒组成,晶粒呈现不规则多边形,晶粒分布存在一定的不均匀性。EDS 分析结果表明,合金样品中 Cu、Al、Fe、Mn、Ni 质量分数分别为 81.3%、7.9%、4.3%、2.4%、4.1%,与设计的各金属元素质量分数(分别为 78.8%、8.0%、4.7%、2.9%、5.6%)接近。



(a) SEM 图;(b) EDS 扫描图;
(c) 图(b)中谱图 5 处的 EDS 扫描图

图 1　Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金的 SEM-EDS 图

Fig. 1　SEM-EDS analysis of Cu-Al-Fe-Mn-Ni alloy

2.1.2 合金的 XRD 分析

Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金的 XRD 图谱如图 2 所示。750 ℃下主要出现 Cu 相和一些含 Al 的固溶体相的衍射峰;温度 900 ℃及以上时,出现了新的金属间化合物相的衍射峰,包括 CuAl 相、FeMn 相以及其他更复杂的多元相,表明升高温度促进了合金中元素之间的化学反应,形成了新的相。此外,温度较低(750 ℃)时,Cu-Al-Fe-Mn-Ni合金的结晶度相对较低,衍射峰强度较弱。900 ℃及以上时,原子的扩散能力增强,晶体结构更加完善,结晶度提高,衍射峰强度逐渐增强。

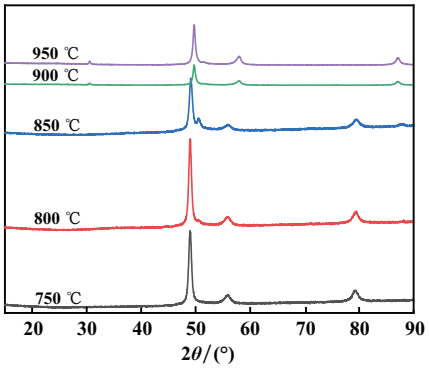


图 2 Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金的 XRD 图谱

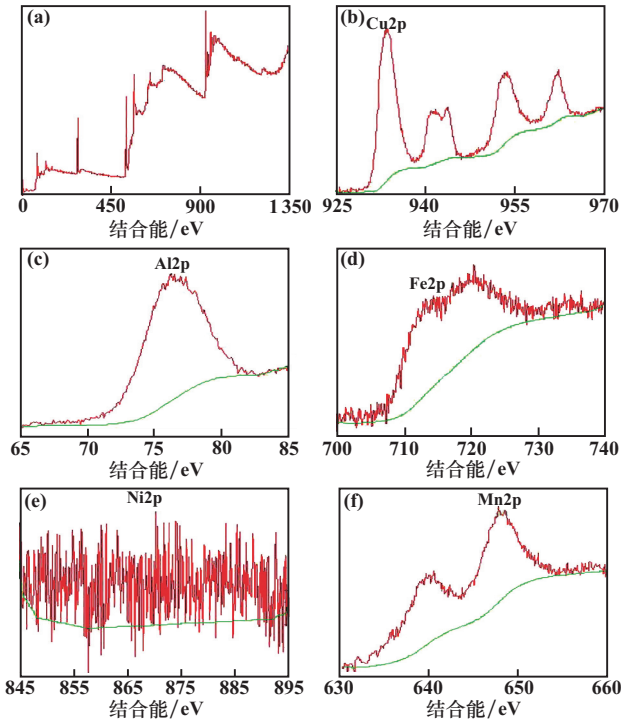
Fig. 2 XRD patterns of Cu-Al-Fe-Mn-Ni alloy

2.1.3 XPS 分析

Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金的 XPS 谱图如图 3 所示。通过 XPS 谱图中特征峰的结合能位置可以确定元素的氧化态。其中,Cu 元素存在 Cu^0、Cu^+ 和 Cu^{2+} 等价态;在谱图中观察到 Cu2p3/2 峰的结合能位于 934 eV 左右,表明存在 Cu^{2+}。此外,XPS 还可以提供关于元素之间化学键的信息。其中,Al 元素可能与 O 元素形成 Al—O 键,其 Al2p 峰的结合能会受到这种化学键的影响。在谱图中观察到 Al2p 峰的结合能向高能量方向偏移,表明 Al 与电负性较大的元素形成了化学键。

2.1.4 差热分析

Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金的差热分析结果见图 4。750、800、850、900、950 ℃烧结合金的第 1 个吸热峰的温度分别是 1 101、1 105、1 109、1 103 和 1 104 ℃,该温度高于 Cu 的熔点(1 083 ℃),结合图 1 和图 2,可认为是合金中 Cu 与掺杂元素形成的铁素体相(α 相)的熔化所致。此外,合金中的 Al 对 α 相的形成有促进作用。750、800、850、900、950 ℃烧结合金的第 2 个吸热峰的温度分别为 1 311、1 312、1 309、1 308、1 305 ℃,根据合金成分设计,可确定此处峰对应奥氏体相(γ 相)的熔化。



(a) 全谱;(b) Cu2p 分谱;(c) Al2p 分谱;(d) Fe2p 分谱;(e) Ni2p 分谱;(f) Mn2p 分谱

图 3 Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金的 XPS 谱图

Fig. 3 XPS spectrum of Cu-Al-Fe-Mn-Ni alloy

2.2 晶粒长大过程分析

2.2.1 热压烧结动力学指数

不同温度热压烧结合金样品的金相图像如图 5 所示。各温度下试样的组织特点较为接近,均由铜基体以及分散的颗粒相构成。热压烧结温度 750 ℃时,晶界轮廓并不明晰,初生相颗粒的分布也显露出不均匀性[见图 5(a)]。随着温度升高,Cu 基体的晶界逐渐变得清晰,初生相颗粒呈更为均匀的分散状态,同时在晶界内部亦生成细小的颗粒相[见图 5(b)~(d)]。热压烧结温度 950 ℃时,Cu 基体晶粒尺寸明显增大,晶界上的颗粒相有所减少,而基体内部细小颗粒相应增多[见图 5(e)]。

根据晶粒生长经典动力学理论,可得到晶粒长大的动力学方程[10-11]为:

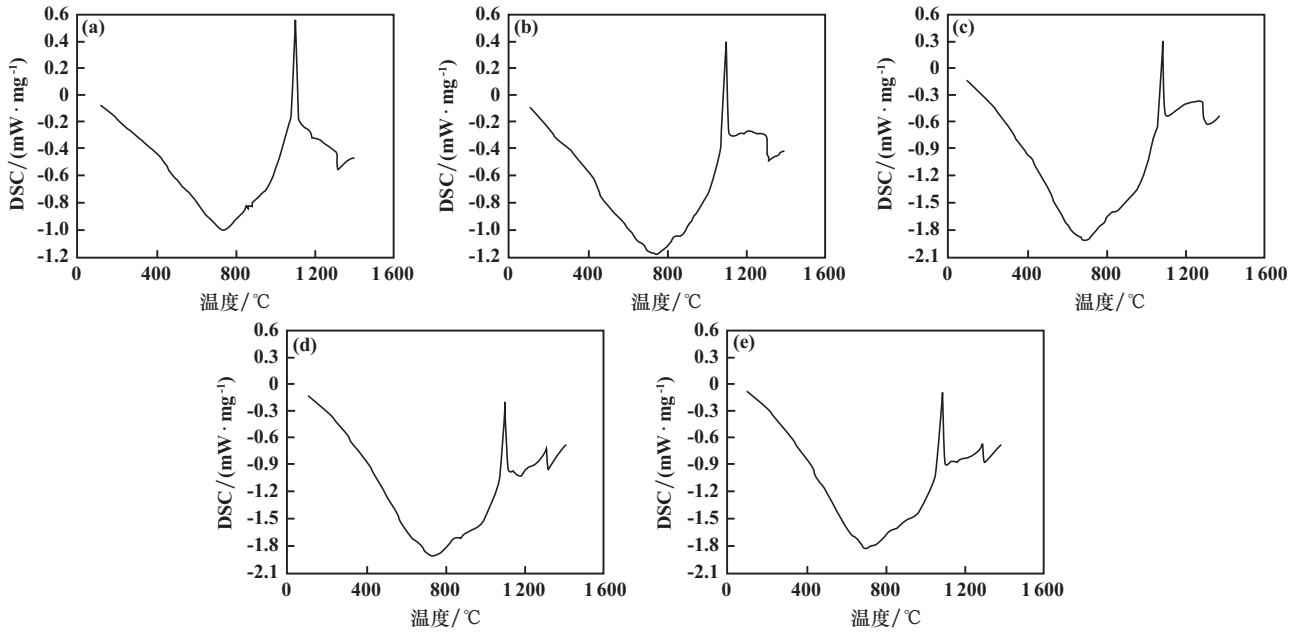
$$K(t - t_0) = D_t^m - D_0^m \tag{1}$$

式中:K 为随温度变化的速率参数;D_t 为时间 t 时的平均晶粒尺寸,μm;D_0 为时间 t_0 时的初始晶粒尺寸,μm;m 为晶粒长大过程的动力学指数。

K 并非常数,而是与温度相关。由 Arrhenius 公式:

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{Q_g}{RT}\right) \tag{2}$$

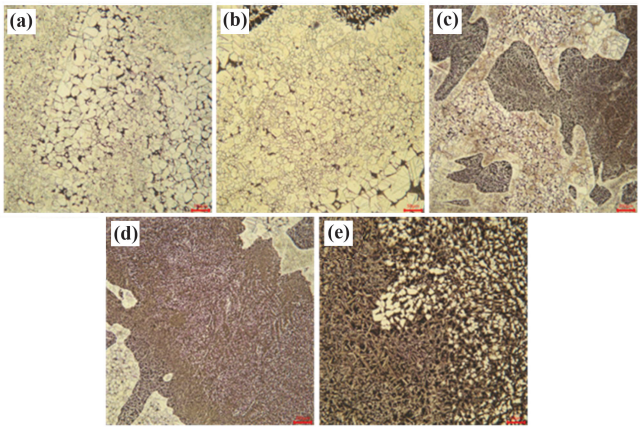
式中:K_0 为指前因子;Q_g 为晶粒生长活化能,J/mol;



(a) 750 ℃; (b) 800 ℃; (c) 850 ℃; (d) 900 ℃; (e) 950 ℃

图 4　不同烧结温度下 Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金的 DSC 曲线

Fig. 4　DSC curves of Cu-Al-Fe-Mn-Ni alloy at different sintering temperatures



(a) 750 ℃; (b) 800 ℃; (c) 850 ℃; (d) 900 ℃; (e) 950 ℃

图 5　不同温度热压烧结合金图像

Fig. 5　Metallographic microscope images

T 为热力学温度,K;R 为理想气体常数,J/(mol · K)。

式(1)中 D_0^m 可忽略不计,因此可得到简化的晶粒长大动力学方程为:

$$D_t^m = K_0 t \exp\left(-\frac{Q_g}{RT}\right) \tag{3}$$

对式(3)两边取对数可得:

$$m\ln D_t = \ln K_0 + \ln t - \frac{Q_g}{RT} \tag{4}$$

根据测量结果绘制成 ln$t$-ln$D$ 曲线,如图 6 所示。对图 6 中的 ln$t$-ln$D$ 曲线进行线性拟合,求出不同条件下晶粒生长的动力学指数 m。晶粒生长拟合方程如表 1 所示。随着热压烧结温度升高,动力学指数逐渐增大。950 ℃时,由于液态相出现等复杂因素,动力学指数的变化规律更显著。

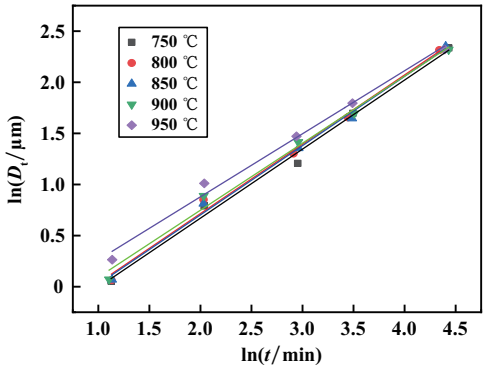


图 6　ln$t$-ln$D$ 曲线

Fig. 6　ln$t$-ln$D$ curves

表 1　晶粒生长拟合方程

Table 1　Fitting equation of grain growth

温度/℃	拟合方程	动力学指数 m
750	$\ln D_t = 0.686\ln t - 0.681$	1.458
800	$\ln D_t = 0.679\ln t - 0.642$	1.473
850	$\ln D_t = 0.678\ln t - 0.653$	1.475
900	$\ln D_t = 0.656\ln t - 0.563$	1.524
950	$\ln D_t = 0.617\ln t - 0.354$	1.621

2.2.2　晶体生长活化能

由式(2)可得晶粒生长速率 dD_t/dt 与 m、D_t 的关

系为：

$$\frac{\mathrm{d}D_t}{\mathrm{d}t}=K_0\frac{\exp\left(-\frac{Q_g}{RT}\right)}{mD_t^{m-1}} \tag{5}$$

绘制 $\ln D_t$-$1/T$ 关系曲线图(图 7)，并进行线性拟合，可得晶粒生长活化能 Q_g，如表 2 所示。随着热压烧结温度升高，合金的晶粒生长活化能增大。

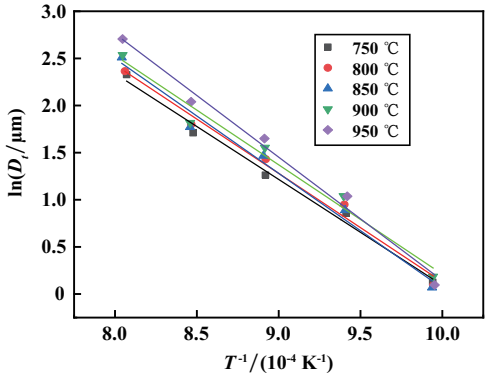


图 7 $\ln D_t$-$1/T$ 变化曲线

Fig. 7 $\ln D_t$-$1/T$ variation curves

表 2 晶粒生长活化能

Table 2 Activation energy of grain growth

温度/℃	拟合方程	晶粒生长活化能 Q_g/(J·mol^{-1})
750	$\ln D_t = 11.320 - 1.123T^{-1}$	13.613
800	$\ln D_t = 11.647 - 1.152T^{-1}$	14.108
850	$\ln D_t = 12.235 - 1.217T^{-1}$	14.924
900	$\ln D_t = 11.815 - 1.260T^{-1}$	15.965
950	$\ln D_t = 13.232 - 1.309T^{-1}$	17.641

2.3 烧结温度对合金性能的影响

2.3.1 合金密度及相对密度

图 8 给出了 Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金在不同烧结温度及多种热处理状态下的实测密度与相对密度。根据成分设计推算，该合金的理论密度为 8.314 g/cm^3。750 ℃时，合金密度最低(7.946 g/cm^3)，对应的相对密度为 95.58%；温度升至 950 ℃，密度增加至 8.058 g/cm^3，相对密度为 96.92%。固溶处理后，合金密度显著提升，最高可达 8.238 g/cm^3，相对密度为 99.08%。时效处理后，密度继续增加，最高达 8.256 g/cm^3，相对密度随之上升至 99.30%。

2.3.2 合金维氏硬度

合金维氏硬度如图 9 所示。烧结温度 750 ℃时，合金硬度仅 122.7HV；950 ℃下烧结时，硬度可升至 165.3HV。当合金在时效阶段经析出强化后，力学性能明显提升，其维氏硬度从 750 ℃时的 253.9HV 上升至 950 ℃时的 281.5HV。

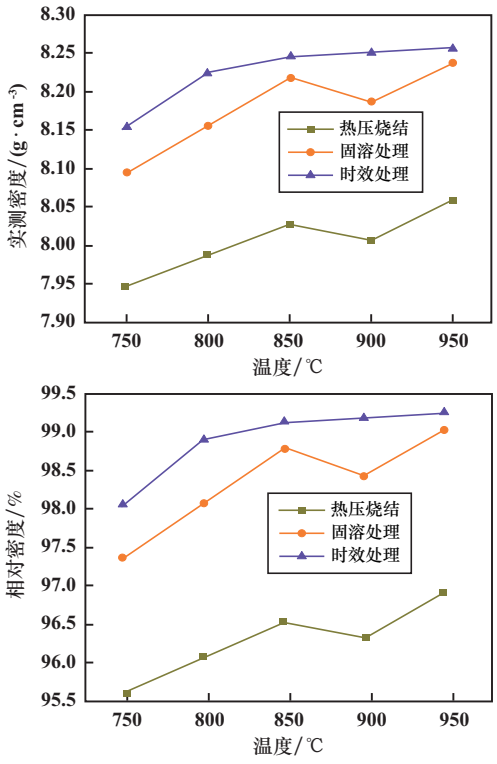


图 8 Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金实测密度和相对密度

Fig. 8 Density and relative density of Cu-Al-Fe-Mn-Ni alloy

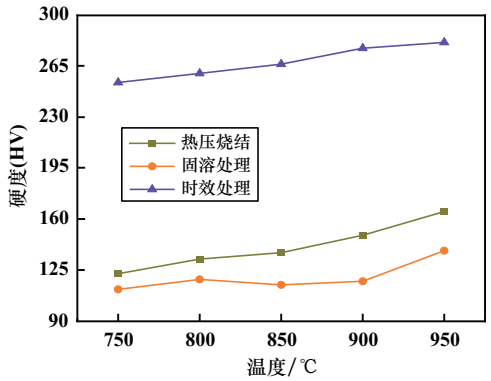


图 9 Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金硬度

Fig. 9 Hardness of Cu-Al-Fe-Mn-Ni alloy

2.3.3 合金导电率

Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金的导电率如图 10 所示。由图 10 可知，烧结温度对该合金的导电性能影响较小，但各类热处理工艺对其导电性能影响显著。热压烧结态下，合金的导电率处于 36.8%IACS 至 38.7%IACS 之间；经过固溶处理后，其导电率迅速下降至约 19.1%IACS；经过时效工艺，合金的导电率又有所回升，最高值可达 46.9%IACS。

在不考虑温度影响的情况下，合金的电阻率 ρ 可以用马西森定律[12]来表示。在热压烧结态、固溶态或时效态下，合金的晶粒尺寸普遍偏大，且位错密度相对

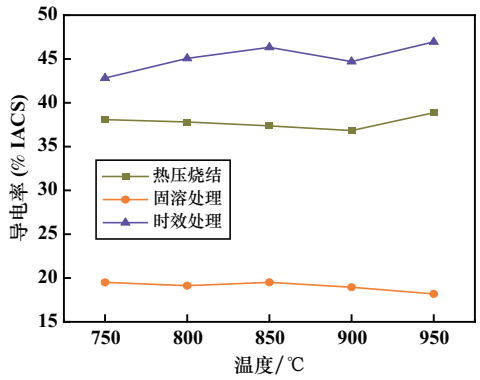


图 10　Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金导电率

Fig. 10　Conductivity of Cu-Al-Fe-Mn-Ni alloy

较低,因此可忽略源于晶粒和位错的散射效应[13]。此种由析出相导致的散射效应可表示为:

$$\Delta\rho_{\mathrm{p}} = \rho_{\mathrm{alloy}} - \rho_{\mathrm{Me}} \tag{6}$$

$$\frac{1}{\rho_{\mathrm{alloy}}} = \frac{1}{\rho_{\mathrm{Me}}}\left(1 - \frac{2}{3}f\right) \tag{7}$$

式中:$\Delta\rho_{\mathrm{p}}$ 为析出相散射导致的电阻率增量,Ω · m;ρ_{alloy} 和 ρ_{Me} 分别为合金和基体金属的电阻率,Ω · m;f 为析出相的体积分数,%。

根据文献[14]的报道,固溶散射产生的电阻率增量可表示为:

$$\Delta\rho_{\mathrm{ss}} = \frac{\Delta\rho}{\Delta x}x \tag{8}$$

式中:$\Delta\rho_{\mathrm{ss}}$ 为固溶散射产生的电阻率增量,Ω · m;$\Delta\rho$ 为电阻率的变化量,Ω · m;x 表示该元素在铜基体内的溶解度;Δx 为溶质在铜基体中溶解度的变化量。在该合金体系中,只有 Fe、Ni、Mn 等溶质原子会对电阻率产生影响。

由此可见,经过固溶处理后,Fe、Ni、Mn 原子在 Cu 基体内大量固溶,合金中固溶体含量显著增多,导致合金导电性能明显削弱。而在时效阶段,这些溶质原子陆续从基体中析出,生成强化相。

3　结论

1) 热压烧结的 Cu-Al-Fe-Mn-Ni 合金表面平整度相对较高,呈现金属光泽,其表面由不同形状和大小的晶粒组成。合金组织主要由 Cu 相和含 Al 的固溶体相组成。热压烧结温度对合金结构具有重要影响。

2) 温度升高,Cu 基体晶粒明显增大。热压烧结温度从 750 ℃升高到 950 ℃,合金的热压烧结动力学指数及晶体生长活化能均逐渐增大。

3) 低温(750 ℃)时,合金密度低(约 7.946 g/cm^3),力学性能较差(维氏硬度 253.9HV);高温(950 ℃)时,合金的密度、硬度分别为 8.058 g/cm^3 和 281.5HV。烧结温度对合金导电率影响不显著。

4) 固溶和时效处理可以提升合金的密度。固溶处理使合金的硬度和导电率略微降低,而时效处理能显著提高合金的硬度和导电率。

参考文献(References):

[1] 刘强,易格,冯佳文,等. 微量 Sm 元素对 TiC_p/Al-Cu-Mg-Mn 复合材料微观组织和力学性能的影响[J]. 材料工程, 2024(9):116-123.
LIU Qiang, YI Ge, FENG Jiawen, et al. Effect of trace Sm elements on microstructure and mechanical properties of TiC_p/Al-Cu-Mg-Mn composite materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(9):116-123.

[2] 舒文祥,侯陇刚,刘君城,等. 先进高强韧 Al-Zn-Mg-Cu 合金凝固和均匀化组织及相构成[J]. 北京科技大学学报, 2014,21(11):1534-1539.
SHU Wenxiang, HOU Longgang, LIU Juncheng, et al. Microstructure and phase components of as-cast and homogenized advanced Al-Zn-Mg-Cu alloys with high strength and toughness[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014,21(11):1534-1539.

[3] 余文涛,孟祥炜,张晗,等. 杂质 Fe 和 Si 对 Al-Cu-Mn-Mg 合金显微组织及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023,44(12):35-43.
YU Wentao, MENG Xiangwei, ZHANG Han, et al. Effect of impurities Fe and Si on microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mn-Mg alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023,44(12):35-43.

[4] 金淼,白静,徐佳鑫,等. Fe 掺杂对 Ni-Mn-Ti 全 d 族 Heusler 合金马氏体相变和磁性能影响的研究[J]. 物理学报, 2023,72(4):214-222.
JIN Miao, BAI Jing, XU Jiaxin, et al. Effects of Fe doping on Martensitic transformation and magnetic properties of Ni-Mn-Ti all-d-metal Heusler alloy[J]. Acta Physica Sinica, 2023,72(4):214-222.

[5] 李歌天,夏中昊,彭璐,等. 热处理与 Mn 掺杂对 $Fe_2Cr_{1-x}Mn_xGa$ 合金相变、磁性的影响[J]. 功能材料, 2023,54(11):11010-11014.
LI Getian, XIA Zhonghao, PENG Lu, et al. Influence of heat treatment and Mn doping on phase transition and magnetic properties of $Fe_2Cr_{1-x}Mn_xGa$ alloy[J]. Journal of Functional Materials, 2023, 54(11):11010-11014.

[6] 庞娜,史志铭,王存权,等. Cr、Mn、Co、Ni 掺杂对 $Al_{13}Fe_4$ 相稳定性和力学性能影响的第一性原理研究[J]. 原子与分子物理学报, 2021,38(6):171-178.
PANG Na, SHI Zhiming, WANG Cunquan, et al. The effect of Cr, Mn, Co and Ni on stability and mechanical properties of the $Al_{13}Fe_4$ phase from first-principles[J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2021,38(6):171-178.

[7] 邵亚云. 真空热压烧结制备 CuCrFeMnNi 高熵合金的退火软化行为[J]. 特种铸造及有色合金, 2024,44(7):935-939.
SHAO Yayun. Annealing softening behavior of CuCrFeMnNi high-entropy alloy via vacuum hot-pressing sintering[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024,44(7):935-939.

(下转第 202 页)

additively manufactured Al-Si-Mg alloys[J]. Materials Characterization, 2024,217:114384.

[21] PAN S, ZHENG J M, WANG Y, et al. Optimizing the mechanical performance of A356-Sc-Sr alloy via combining machine learning and mechanical stirring under vacuum[J]. Materials Characterization, 2024,212:114011.

[22] YE P C, JIANG F, WU F F, et al. Effects of Zr and Y additions on microstructure and mechanical properties of cast A356 alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024,30:6355-6365.

[23] HUANG Z Y, DU R, LI J, et al. Research on the microstructure and mechanism of high content Sn modified A356 alloy[J]. Materials Today Communications, 2024,41:110994.

[24] ILANGOVAN R K, AMIRTHALINGAM M, KRISHNASWAMY H, et al. Assessing critical role of iron on microstructure and deformation behaviour of $AlSi_{10}Mg$ processed via laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Materialia, 2025,39:102320.

[25] DONG S J, SHAN Z D, LIN F, et al. An inverse estimation of frozen sand mold-melt heat transfer coefficient in the solidification of A356 alloy[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024,157:107728.

[26] KAZUP Á, GARAMI A, GÁCSI Z. Prediction of the tensile properties of A356 casted alloy based on the pore structure using machine learning[J]. Materials Science and Engineering: A, 2025, 935: 148338.

[27] CERRI E, GHIO E, CABIBBO M. Gradient of precipitation phenomena in tall laser powder bed-fused $AlSi_7Mg$ samples: Effects of heated substrate and aging heat treatments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025,1020:179459.

[28] LUO Y J, YI J X, CHEN M Z, et al. Effect of hot rolling on microstructures and mechanical properties of SiCp/A356 aluminum matrix composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024,33:1776-1784.

[29] WU H P, CHEN X M, YANG L F, et al. Mechanism study of rare earth Y enhancing A356 tensile performance: Deep learning potential and Ab initio molecular dynamics[J]. Materials Today Communications, 2025,44:111868.

[30] KHEDR M, ABDALKAREEM A, MONIER A, et al. Machine learning-based prediction of bushing dimensions, surface roughness and induced temperature during friction drilling of pre-heated A356 aluminum alloy[J]. Materials Today Communications, 2025, 45: 112420.

[31] KOVACN, MOŽE M, KAPUN B, et al. Enhanced corrosion resistance and self-cleaning of $AlSi_7Mg_{0.3}$ via superhydrophobic surface using laser structuring and stearic acid grafting[J]. Surfaces and Interfaces, 2025,61:106089.

引用本文:顾琪,周鹏飞. 微量 La/Ce 对 A356.2 合金析出行为及活化能的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):196-202.

GU Qi, ZHOU Pengfei. Influence of trace La/Ce on precipitation behavior and activation energy of A356.2 alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):196-202.

(上接第 195 页)

[8] 高卡,赵桅,孙德建,等. 不同振荡热压烧结温度下 90W-10Cu 难熔合金组织及性能[J]. 工程科学与技术, 2024,56(3):269-276.
GAO Ka, ZHAO Wei, SUN Dejian, et al. Microstructures and properties of 90W-10Cu refractory alloy sintered under different hot oscillatory pressure sintering temperature[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024,56(3):269-276.

[9] 李季,曹振,罗平,等. 烧结温度对热压烧结 Ti-6Al-4V 合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2023,48(5):166-173.
LI Ji, CAO Zhen, LUO Ping, et al. Effect of sintering temperature on microstructure and properties of hot pressing sintered Ti-6Al-4V alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2023,48(5):166-173.

[10] 郑培毓,张玲,张晓序,等. Al_2O_3-Cr_2O_3 固溶体烧结动力学研究[J]. 辽宁科技大学学报, 2021,44(3):190-195.
ZHENG Peiyu, ZHANG Ling, ZHANG Xiaoxu, et al. Study on sintering kinetics of aluminum-chromium solid solution[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2021,44(3):190-195.

[11] 杜金晶,周猛,王斌,等. V_2O_5 掺杂 $NiFe_2O_4$ 材料的烧结动力学[J]. 矿冶工程, 2019,39(5):119-122.
DU Jinjing, ZHOU Meng, WANG Bin, et al. Sintering kinetics of V_2O_5-doped $NiFe_2O_4$ materials[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(5):119-122.

[12] QU L, WANG E, HAN K, et al. Studies of electrical resistivity of an annealed Cu-Fe composite[J]. Journal of Applied Physics, 2013,113(17):173708.

[13] JONSSON J C, CHAPMAN D J, FARBANIEC L, et al. Effect of dislocation density on the dynamic strength of aluminium[J]. Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2024,10(4):426-440.

[14] FAN Z. A new approach to the electrical resistivity of two-phase composites[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995,43(1):43-49.

引用本文:李泽邦,刘二勇. 热压烧结温度对元素掺杂 Cu-Al 合金组织与性能的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):190-195.

LI Zebang, LIU Eryong. Effect of hot-pressing sintering temperature on microstructures and properties of element-doped Cu-Al alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):190-195.