

稀土微合金化对大变形 Cu-2Ag 合金组织和性能的影响

曾延琦^{1,2} 余辉辉¹ 邹晋^{1,2} 胡晓娜¹ 郭玉松¹

(1. 江西省科学院应用物理研究所; 2. 江西省铜钨新材料重点实验室)

摘 要 采用真空感应熔炼、热锻和冷拉拔等工艺制备了大变形量加工的稀土微合金化 Cu-2Ag 合金线坯,通过显微组织观察、选区成分分析、拉伸性能测试和导电性能测试等研究稀土微合金化对 Cu-2Ag 大变形量加工合金组织和性能的影响。结果表明,较 Cu-2Ag 合金,大变形量加工至 $\phi 2.6$ mm 的 Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 合金试样组织更加细小,且存在尺寸为 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 、分布较均匀的富稀土相和富 Ag 相;相比 Cu-2Ag 合金,Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 合金试样抗拉强度和电导率均略微提高,但伸长率略微降低,拉伸断口的韧窝更多、更细、更深。

关键词 稀土; Cu-2Ag 合金; 大变形量加工; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG166.3; TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Rare Earth Microalloying on Microstructure and Properties of Cu-2Ag Alloy with Large Deformation Processing

Zeng Yanqi^{1,2}, Yu Huihui¹, Zou Jin^{1,2}, Hu Xiaona¹, Guo Yusong¹

(1. Institute of Applied Physics, Jiangxi Academy of Sciences;

2. Jiangxi Key Laboratory of Advanced Copper and Tungsten Materials)

Abstract: Rare earth microalloyed Cu-2Ag alloy wirebar with large deformation processing was prepared by vacuum induction melting, hot forging and cold drawing. Effects of rare earth microalloying on microstructure and properties of Cu-2Ag alloy with large deformation processing were investigated by microstructure observation, composition analysis, tensile performance testing, and conductivity testing. The results indicate that the microstructure of Cu-2Ag-0.075Y and Cu-2Ag-0.075La alloy specimens with large deformation processing to $\phi 2.6$ mm are finer than that of Cu-2Ag alloy, and there exists RE-rich and Ag-rich phases ranging from $1\sim 5\ \mu\text{m}$ with uniform distribution. The tensile strength and conductivity of Cu-2Ag-0.075Y and Cu-2Ag-0.075La alloy specimens are slightly increased, while the elongation is slightly reduced compared with those of Cu-2Ag alloy. The dimples on tensile fracture surface exhibits more, finer, and deeper.

Key Words: Rare Earth, Cu-2Ag Alloy, High Deformation Processing, Microstructure, Mechanical Properties

Cu-Ag 合金具有高强度、高导电、低衰减、耐高温、耐弯折等特点,常被加工成超微细丝线材,广泛用于电子通讯、微型机器人、医疗器械、无人机以及新能源汽车等领域^[1-5]。随着通讯、终端信号传输及无人机等产品向“轻、小、薄、智能”方向快速发展,对 Cu-2Ag 合金超微细丝线材的需求量日益增大,而且要求其线径更小、力学性能和导电性能更优,因此对 Cu-2Ag 合金线坯组织和性能的要求越来越苛刻。

稀土元素具有较低的电负性、较高的化学活性,在有色金属等材料制备时,添加稀土微合金化,可以净化

熔体,细化和均匀化组织,减少铸坯夹杂物和微孔洞等^[6-7]。目前,大多数研究集中在稀土元素(如 La、Ce 等)微合金化对 Cu-2Ag 合金熔体成分洁净化、铸态组织细化的作用上,而研究稀土微合金化对大变形量加工 Cu-2Ag 合金组织和性能的影响报道很少。因此,本研究制备了 Cu-2Ag、Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 合金线坯,初步探讨了稀土 Y 和 La 微合金化对 Cu-2Ag 合金大变形量加工组织和性能的影响,以期制备超微细拉拔的高品质、高性能 Cu-2Ag 合金线坯提供参考。

收稿日期:2023-07-06;修改稿收到日期:2023-07-27
基金项目:江西省学科学术带头人资助项目(20232BCJ22053);江西省科学院省级财政科研项目经费包干制试点示范项目(2022YSBG22021);江西省重点研发计划资助项目(20202BBEL53022)
第一作者简介:曾延琦,男,1987 年出生,高级工程师,南昌(330096),E-mail: zengyq03@163.com
引用格式:曾延琦,余辉辉,邹晋,等. 稀土微合金化对大变形 Cu-2Ag 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 633-1 636.
ZENG Y Q, YU H H, ZOU J, et al. Effects of rare earth microalloying on microstructure and properties of Cu-2Ag alloy with large deformation processing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 633-1 636.

1 试验材料与方法

试验原材料选用质量分数均 $\geq 99.99\%$ 的电解 Cu 块和高纯 Ag 粒、Cu-12Y、Cu-12La 中间合金。配料时考虑了稀土中间合金 20% 的稀土元素烧损。将电解 Cu 和高纯 Ag 粒在真空中频感应炉内熔化后,将中间合金从上位仓加入,经熔化、除渣、静置后再浇注成 $\phi 40$ mm 的铸锭。表 1 为试验合金铸锭成分。对铸锭试样进行 $850\text{ }^{\circ}\text{C}\times 6\text{ h}$ 的均匀化退火处理,去除表面氧化皮后进行 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下热锻成 $\phi 15\text{ mm}$ 的棒材,对棒材进行 $800\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$ 的固溶处理,最后将棒材表面洗净后再进行多道次拉拔,加工成 $\phi 2.6\text{ mm}$ 的线坯试样。

表 1 试验 Cu-2Ag 合金试样的化学成分

试样 编号	名义 成分	w_B			
		Ag	Y	La	Cu
1	Cu-2Ag	1.99	-	-	余量
2	Cu-2Ag-0.075Y	1.99	0.072	-	余量
3	Cu-2Ag-0.075La	1.99	-	0.068	余量

采用牛津 X-Max20 型 X 射线能谱分析仪和 EVO18 型扫描电镜对试样进行显微组织、断口形貌观察和选区成分分析。采用 CMT5205 型电子万能试验机测量试样的抗拉强度、伸长率,按 GB/T 228.1-2021

检测,试样按上述标准中附录 F 里的 R9 试样编号要求取样,拉伸速率为 15 mm/min 。采用 ZY9987 数字式微欧计,在环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测量合金电导率。

2 试验结果及分析

2.1 微观组织

图 1 和图 2 分别为 $\phi 2.6\text{ mm}$ 的 3 种合金线坯的横截面和纵截面的金相组织。可以看出,横截面晶粒组织受不同程度挤压变形,发生破碎、扭折,纵截面晶粒组织受不同程度的拉拔力作用,沿拉拔方向拉长,呈细条状,均呈典型的拉拔态组织形貌特征^[8]。分别经稀土 Y 和 La 微合金化 Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 试样的金相组织相貌基本一致,但是晶粒尺寸比 Cu-2Ag 试样略微细小,这与稀土元素微合金化后细化了铸态、固溶态组织有关。因为在熔炼过程中稀土 La、Y 在 Cu 中的固溶度极低,可以与杂质元素化合,形成高熔点化合物,以极微细颗粒悬浮于熔体之中,成为弥散的结晶晶核,凝固时产生的异质晶核和机械阻碍作用,增加形核核心,阻碍晶粒长大,从而细化铸锭晶粒尺寸。在固溶处理时,细小弥散分布的富稀土相可作为再结晶形核核心,阻碍晶界运动,有助于细化再结晶晶粒尺寸。

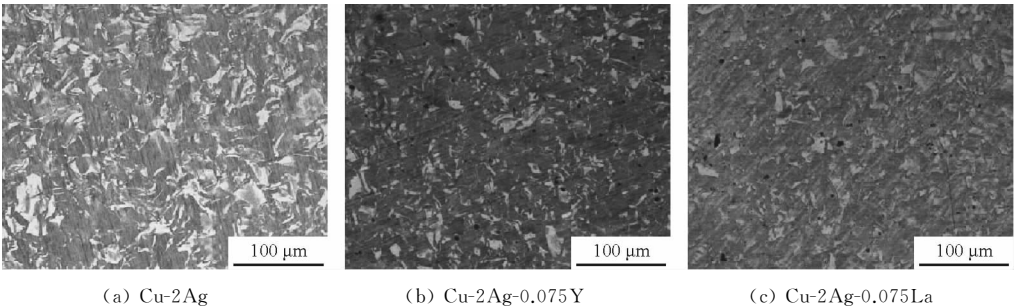


图 1 Cu-2Ag 试样横截面的金相组织
Fig.1 Metallographic structure of cross section of Cu-2Ag specimen

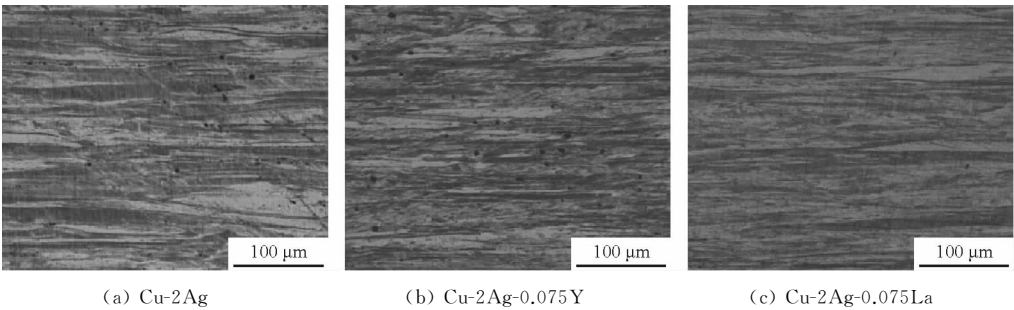


图 2 Cu-2Ag 试样纵截面的金相组织
Fig.2 Metallographic structure of longitudinal section of Cu-2Ag specimen

图 3 为 $\phi 2.6\text{ mm}$ 的 Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 合金线坯的 SEM 组织观察和能谱分析结果。可以看出,Cu-2Ag 试样的组织中几乎观察不到第二相,而 Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 试样中有一些尺寸小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的富稀土相或富 Ag 相存在,见图 3c

和图 3e。这些富稀土相或富 Ag 相呈球形,一部分可能是在拉拔过程中由于受拉拔、挤压变形及其带来的加工变形热,使得部分 Ag 原子与稀土形成富稀土相或富 Ag 相析出,另一部分可能是拉拔加工前就存在于铜基体中。

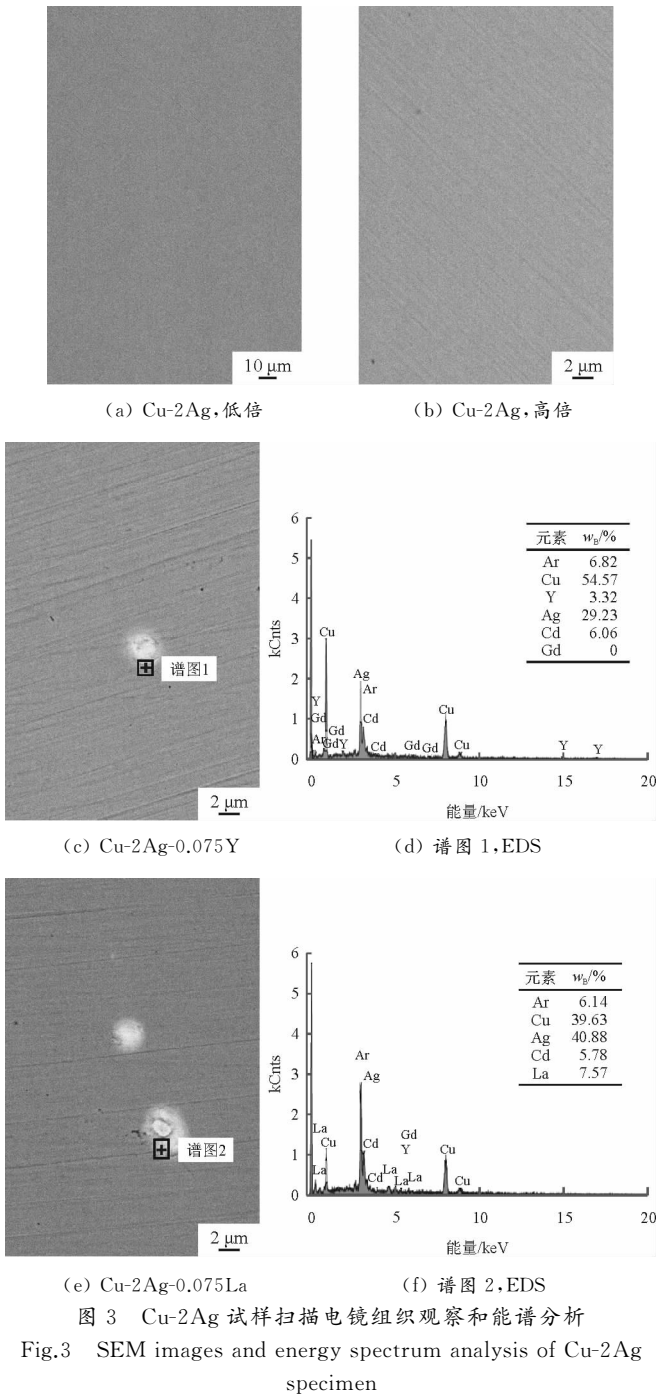


Fig.3 SEM images and energy spectrum analysis of Cu-2Ag specimen

2.2 力学和导电性能

对 $\phi 2.6$ mm 的 Cu-2Ag、Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 合金线坯试样进行了拉伸力学性能和电

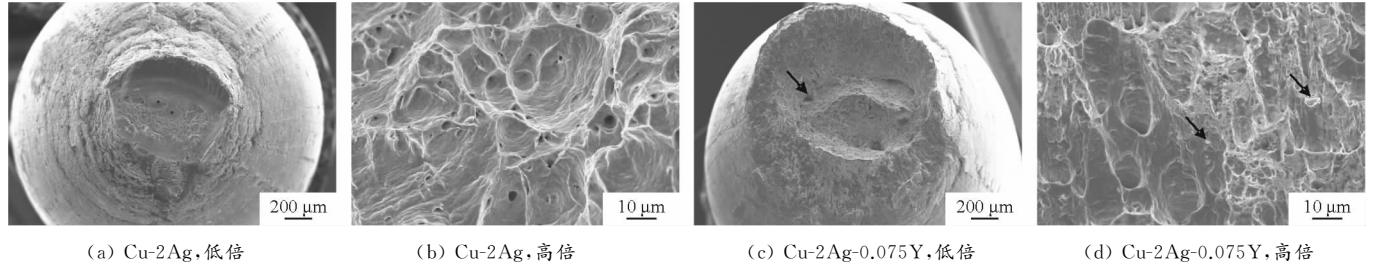


Fig.4 Tensile fracture morphologies of Cu-2Ag and Cu-2Ag-0.075Y alloy specimens

导率测试,见表 2。可以发现,较 Cu-2Ag 试样,经稀土 Y 和 La 微合金化的 Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 试样,其抗拉强度和电导率均略微提高,但伸长率明显降低。

表 2 试验 Cu-2Ag 合金的力学性能和导电性能

合金	抗拉强度/MPa	伸长率/%	电导率/(MS · m ⁻¹)
Cu-2Ag	489.3	2.3	49.648
Cu-2Ag-0.075Y	498.1	1.7	49.764
Cu-2Ag-0.075La	495.5	1.9	49.822

图 4 为 $\phi 2.6$ mm 的 Cu-2Ag 和 Cu-2Ag-0.075Y 合金线坯试样拉伸断口形貌。可以看出,拉伸断口呈现颈缩,并伴有一定数量的韧窝,表明试样发生了韧性断裂^[9-10],其中稀土微合金化 Y 的 Cu-2Ag-0.075Y 试样断口的韧窝较 Cu-2Ag 试样更多、更细、更密、更深,这也表明稀土微合金化试样的强韧性较好。另外,在 Cu-2Ag-0.075Y 试样断口中发现个别原生组织缺陷,见图 4c 中箭头处,以及一些脱落的、尺寸在 1~5 μ m 的第二相颗粒,见图 4d 中箭头处,结合能谱分析,可能是富稀土的第二相。这可能是表 2 中稀土微合金化的 Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 试样伸长率降低的原因。

杂质元素在材料中一般以两种形式存在,一是偏聚在晶界处,二是形成夹杂物。一般而言,铸造缺陷、杂质元素偏聚和夹杂物是金属材料的较薄弱处,在载荷作用下容易形成早期裂纹。从 Cu-Ag 二元合金相图可知,在高温熔体状态下,Ag 和 Cu 可以无限混熔,但是在室温状态下,Ag 在 Cu 中的溶解度仅为 0.1%。因此,在 600 $^{\circ}$ C 以上,固溶在铜基体中的过饱和的 Ag 原子可以脱溶析出,生成富 Ag 相,而富 Ag 相为脆性相,特别是在晶界处析出的富 Ag 相,对合金的力学性能不利。与杂质元素偏聚和夹杂物类似,在载荷作用下,富 Ag 相也很容易萌生裂纹并扩展,最终导致线材断裂^[6]。晶粒细化可以在提高材料强度的同时提高塑性。根据晶粒细化提高材料的塑性机制可知,晶粒越细、越均匀,在一定体积内的晶粒数目则越多,在同样塑性变形量下,变形则可以分散在更多的晶粒内,使得每个晶粒承受的变形较小、较均匀,且每个晶粒中塞积的位错少,因而应力集中引起的开裂几率较低,材料在断裂之前可承受较大

挤压铸造参数对 B390 合金组织和性能的影响

王 彬 游志勇 马振星 于 杰
(太原理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 以 B390 合金为原料,采用控制变量法研究了挤压铸造工艺参数对过共晶 Al-Si 合金组织和性能的影响。结果表明,挤压压力和浇注温度对合金组织、孔隙率和力学性能影响明显,压射速度的影响较小,但对铸件表面质量影响较大。综合考虑,认为 B390 铸件最佳挤压工艺参数:铸造压力为 150 MPa,浇注温度为 740 ℃,压射速度为 0.05 m/s,此时铸件室温抗拉强度和硬度(HB)分别为 232 MPa 和 143.4。

关键词 B390 合金;挤压铸造;初生 Si;孔隙率

中图分类号 TG249.2;TG146.21

文献标志码 A

DOI 10.15980/j.tzzz.2023.012.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Squeeze Casting Parameters on Microstructure and Properties of B390 Alloy

Wang Bin, You Zhiyong, Ma Zhenxing, Yu Jie

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology)

Abstract: The effects of squeeze casting process parameters on the microstructure and properties of supereutectic B390 alloy were investigated. The results reveal that the squeezing pressure and pouring temperature have obvious effects on the microstructure, porosity and mechanical properties of the alloy, while the injection velocity has little effect, which has great effect on the surface quality of the casting. It is concluded that the desirable squeezing parameters of B390 casting are presented as follows: casting pressure of 150 MPa, casting temperature of 740 ℃, and injection velocity of 0.05 m/s, where the tensile strength and hardness of the casting at room temperature reach up to 232 MPa and 143.4 HB, respectively.

Key Words: B390 Alloy, Squeezing Casting, Primary Si, Porosity

收稿日期:2023-01-26;修改稿收到日期:2023-04-14

第一作者简介:王彬,男,1998 年出生,硕士研究生,太原(030000),E-mail:2973156146@qq.com

通信作者:游志勇,男,1971 年出生,副教授,太原(030000),E-mail:13603511486@163.com

引用格式:王彬,游志勇,马振星,等.挤压铸造参数对 B390 合金组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 636-1 640.

WANG B, YOU Z Y, MA Z X, et al. Effects of squeeze casting parameters on microstructure and properties of B390 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 636-1 640.

的变形量。对 Cu-2Ag 合金进行稀土微合金化,可显著降低材料中的杂质元素含量、抑制富 Ag 相在晶界处析出、细化晶粒,这有利于提高 Cu-2Ag 合金力学性能和导电性能。然而 Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 试样的抗拉强度和电导率相对 Cu-2Ag 仅略微提高,而伸长率略微降低,这是因为稀土 Y 和 La 微合金化可能过量,在材料中形成了一些对伸长率不利的富稀土第二相,抵消了稀土微合金化对伸长率的有利作用。

3 结 论

(1)较 Cu-2Ag 合金,大变形加工至 $\phi 2.6$ mm 的 Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 合金组织更细小,且存在尺寸在 1~5 μm 、分布较均匀的富稀土相和富 Ag 相。

(2)较 Cu-2Ag 合金,大变形量加工至 $\phi 2.6$ mm 的 Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 合金试样抗拉强度和电导率均略微提高,但伸长率略微降低,拉伸断口的韧窝更多、更细、更深。

参 考 文 献

- [1] 苏华光. 导体铜及铜合金的应用和加工工艺综述[J]. 电线电缆, 2022(5): 22-29, 33.
- [2] 宋克兴,周延军,米绪军,等.铜基丝线材制备和组织性能研究进展[J].中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2 845-2 874.
- [3] 代雪琴,贾淑果,范俊玲,等.高强高导铜合金的强化机理与研究热点[J].材料热处理学报, 2021, 42(10): 18-26.
- [4] 张道琦,张林,郭晓,等. Cu-Ag 高强高导合金的研究现状与进展[J].材料导报, 2023(37): 189-194.
- [5] 李龙健,于风云,李仁庚,等.高性能铜合金研究现状及发展趋势[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(3): 293-298.
- [6] HUP H, ZHANG S H, CHEN S F, et al. Effect of La addition on Ag-rich phase formation and mechanical properties of Cu-2Ag alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022(18): 998-1 008.
- [7] 李桂荣,王宏明,赵玉涛,等.稀土钇对 7055 铝合金熔炼和凝固过程的作用机制[J].稀有金属材料与工程, 2010, 39(1): 80-84.
- [8] 孔令宝,周延军,宋克兴,等.拉拔变形和热处理对铜银合金组织性能的影响[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(10): 1 160-1 163.
- [9] 杜靖文,安佰灵,张林,等.预变形对 Cu-6Ag 合金时效析出及性能的影响[J].稀有金属材料与工程, 2023, 52(1): 403-408.
- [10] 陈俭兰,赵莫迪,韩福生.退火对冷轧 Cu-Ag 合金组织及性能的影响[J].金属热处理, 2022, 47(8): 129-134.

(编辑:刘晨辉)