

电磁搅拌对 Cu-Fe 合金铸锭凝固组织和性能的影响

董彦非¹ 石磊² 刘力铭²

(1.洛阳市质量计量检测中心; 2.洛阳理工学院材料科学与工程学院)

摘 要 研究了电磁搅拌对 Cu-10Fe 合金铸锭的晶粒度、Fe 枝晶、宏观偏析和性能的影响。结果表明,电磁搅拌可以进一步细化 Cu-10Fe 合金的晶粒度,并降低了其凝固时的过冷度,使合金在进入亚稳液态组元不混溶温度区域前形核生长成树枝晶 Fe 相,有效避免了球团状 Fe 相的生成;在搅拌电流为 300 A 时,枝晶 Fe 相被打碎,先凝固的 Fe 相在剧烈旋转搅拌的离心力作用下向铸锭的边部移动,造成显著的宏观偏析;电磁搅拌对 Cu-10Fe 合金铸锭的电导率没有显著的影响,但由于电磁搅拌对铸态 Fe 枝晶的破碎细化作用,对其力学性能有着显著的强化作用。但电磁搅拌电流不宜过大,在 150 A 时就可达到提高铸锭品质的目的。

关键词 电磁搅拌;Cu-Fe 合金;凝固组织;Fe 枝晶相;导电性能

中图分类号 TG146.1⁺1;TG391 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Electromagnetic Stirring on the Solidification Microstructure and Properties of the Cu-Fe Alloy Ingot

Dong Yanfei¹, Shi Lei², Liu Liming²

(1.Test Center of Luoyang Bureau of Quality and Technology Supervision;

2.School of Materials Science and Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology)

Abstract: Effects of the electromagnetic stirring (EMS) on the solidification microstructure and properties of the Cu-10Fe alloy were investigated. The results indicate that the EMS can effectively refine the grain in Cu-10Fe alloy and reduce the supercooling degree of melted alloy, resulting in the formation of dendritic Fe phase instead of spherical Fe phase before the alloy enters the immiscible temperature region of the metastable liquid components. When the EMS current is 300 A, the Fe dendrites are broken and the Fe phases solidified firstly are separated to ingot surface by centrifugal force of violent rotating and stirring, resulting in the significant macrosegregation. Moreover, EMS has little influence on the conductivity of Cu-Fe ingot in the range of 21.46~22.04 MS/m. However, the fragmentation and refinement of electromagnetic stirring is contributed to the strengthening of the mechanical properties of Cu-10Fe alloy during drawing. In conclusion, the electromagnetic stirring current of Cu-10Fe alloy should not be too large, and 150 A is a reasonable parameter to improve the Cu-10Fe ingot quality.

Key Words: Electromagnetic Stirring, Cu-Fe Alloy, Solidification Microstructure, Fe Dendrites, Conductivity

收稿日期:2021-03-02;修改稿收到日期:2021-03-27

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(21B430011)

第一作者简介:董彦非,男,1983 年出生,工程师,河南洛阳(471000),E-mail:277891200@qq.com

引用格式:董彦非,石磊,刘力铭. 电磁搅拌对 Cu-Fe 合金铸锭凝固组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 234-1 237.

DONG Y F, SHI L, LIU L M. Effects of electromagnetic stirring on the solidification microstructure and properties of the Cu-Fe alloy ingot [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 234-1 237.

没有热处理单丝效果明显,但是通过对铝杆热处理,不会造成单丝表面油膜破坏,同时对电阻率有很大的提升。

(3)可以根据实际情况,建议当耐热性≤88.5%时,选择对单丝热处理;当 88.5%≤耐热性≤90%时,选择对铝杆热处理;当耐热性≥90%时可以直接批量使用。

参 考 文 献

[1] 尤传永. 耐热铝合金导线的耐热机理及其在输电线路中的应用 [A]. 输配技术国际会议[C]. 中国电力企业联合会, 2003.

[2] 王明, 杨玉群, 王新, 等. 运用新型耐热导线提高线路输送容量 [J]. 陕西电力, 2009, 37(3): 19-22.
[3] 刘东雨, 李文杰, 韩钰, 等. 高电导率耐热铝合金导体材料的合金设计[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(S1): 17-21.
[4] 赖存明. Zr,B,Er 对耐热导电铝合金微观组织及性能影响的研究 [D]. 郑州:郑州大学, 2018.
[5] 高兆和. Al-Zr-Yb(Er)合金的组织性能研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.
[6] 张俊杰. 耐热铝合金电工圆杆组织与性能研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2017.

(编辑:栗万仲)

Cu-X 原位形变合金是一类新型的高强度、高电导率铜合金,包括 Cu-Fe、Cu-Nb、Cu-Cr 和 Cu-Ag 等合金^[1]。其第二相合金元素的含量较高(10%~30%,质量分数,下同),铸态组织中的第二相以树枝晶状或弥散颗粒状分布在 Cu 基体中,并在随后的拉拔变形过程中原位生成第二相纤维组织^[2]。Nb、Fe、Cr、Ag 等第二相元素在 Cu 基体中具有较低的固溶度,可较低限度地降低固溶元素对电阻率的影响。因此原位形变铜基复合材料在具有良好电导率的同时,又具有超高的强度。与其他合金系相比,Cu-Fe 系合金兼具良好的加工性能和抗腐蚀性,Fe 元素还具有很好的成本优势,从而得到研究者的广泛关注。VERHOEVEN J D 等^[3]制备的 Cu-20Fe 合金的抗拉强度达到 1 090~1 250 MPa,电导率为 30.16~31.9 MS/m。BISELLI C 等^[4]制备的 Cu-15Fe 合金的抗拉强度为 1 000 MPa,电导率为 29.0 MS/m。

凝固组织调控是制备高品质 Cu-Fe 复合材料的关键环节,铸锭组织的均匀性和枝晶形貌都会显著影响形变后 Fe 纤维的均一性、尺寸和纤维间距的演变过程,进而影响电子散射和强度。目前 Cu-Fe 合金铸锭主要采用粉末冶金、传统模铸等方法制备,工艺复杂,对粉末的纯度要求较高,会引入空隙增加氧含量,限制了其工业应用前景。而传统模铸方式制备的高 Fe 含量 Cu-Fe 铸锭又通常伴随着严重的重力偏析,Fe 易富集团聚等缺陷^[5]。因此,改善 Cu-Fe 合金的凝固工艺,获得发达、细小的 Fe 树枝晶组织,是制备高品质 Cu-Fe 合金的关键技术^[6,7]。

本课题以 Cu-10Fe 合金为研究对象,采用电磁搅拌技术制备 Cu-Fe 合金,研究了不同搅拌参数下 Cu-10Fe 合金铸锭组织的变化,进而探索提高 Cu-Fe 合金综合性能的有效途径。

1 试验方法

试验原材料为 TU1 无氧铜、纯度为 99.9%(质量分

数)以上的工业纯铁,原料在使用前打磨掉表面的氧化皮,并酸洗烘干。合金采用中频感应炉和高纯度的刚玉坩埚进行熔炼,为减少空气对试样的污染,将原料和坩埚密封在石英管中,铸锭尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 。熔炼时采用双铂铑热电偶测量管壁的温度,当管壁温度达到 Cu-10Fe 合金的熔点时,则认为管内合金液达到了熔点,并具有一定的过热度,再加热 5 min 后停止加热。然后迅速将试样转移至电磁搅拌器中心位置,进行不同搅拌参数下的自然冷却。采用的搅拌器为三相六极旋转型电磁搅拌器。具体试验条件:试样 1 无电磁搅拌,试样 2 为 6 Hz、150 A,试样 3 为 6 Hz、300 A。

采用标准金相制备方法对试样进行研磨、抛光,用 120 mL 的 $\text{H}_2\text{O}+20\text{ mL}$ 的 $\text{HCl}+5\text{ g}$ 的 FeCl_3 混合溶液腐蚀,利用 DW/T-400 光学显微镜观察试样的显微组织。采用直线截点法测量试样的晶粒度,精度为 ± 0.25 级。采用微欧计测量导线的室温电阻^[8]。

选取试样 1 和试样 2 拉拔成线材,将直径为 50 mm 的合金铸锭车削至 $\phi 45\text{ mm}$ (即 A_0)。随后将经过多道次锻造成 $\phi 10\text{ mm}$ 的试棒用平锉和砂纸打磨掉毛刺等缺陷。然后,用盘丝机将试样拉拔成不同直径的线材,在拉拔过程中不经过中间热处理。材料的变形量用 $\eta=\ln(A_0/A_f)$ 表示,其中 A_f 为加工过程中的截面积。

然后对拉拔后的线材进行力学性能测试,对于直径大于 3 mm 的试样,加工标准拉伸试样,拉伸时采用 10 mm 的引伸计。对于直径小于 3 mm 的线材截取长度大于 100 mm 的试样,夹头间自由端的长度至少为 100 mm,拉伸时使用 25 mm 的引伸计。

2 试验结果与讨论

2.1 电磁搅拌对晶粒度的影响

图 1 为不同电磁搅拌参数下 Cu-10Fe 合金的宏观组织。对比可知,不同搅拌参数下的组织基本相同,都为均匀分布在试样表面上的细小等轴晶,没有出现细晶区-柱状晶区-等轴晶区的典型铸锭宏观组织。同时,施

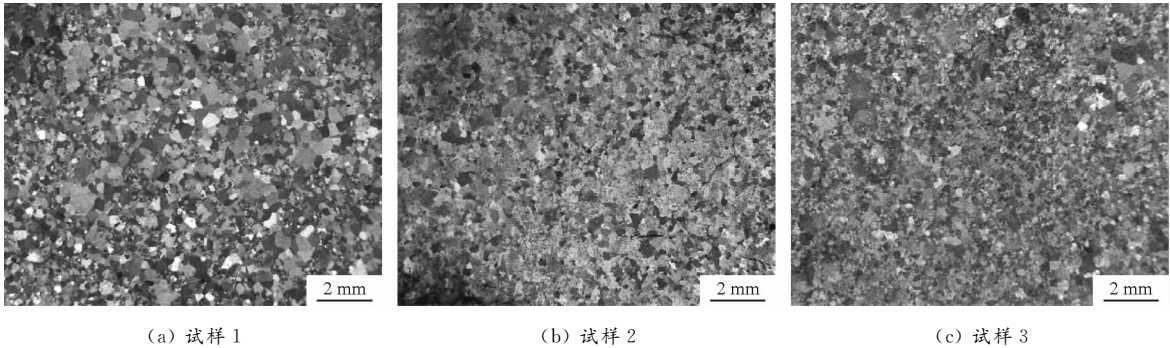


图 1 Cu-10Fe 合金在不同电磁搅拌条件下的宏观形貌
Fig.1 The macro morphology of Cu-10Fe alloy with or without EMS

加电磁搅拌后试样的宏观晶粒尺寸得到显著的细化,并随着搅拌电流的增加晶粒细化效果明显,无电磁搅拌时,合金的晶粒度 $G=10.44$,在 150 A 和 300 A 电磁搅拌后的晶粒度 G 分别为 11.14 和 11.45,与图 1 结果一致。综上所述,由于未施加电磁搅拌时 Fe 元素对 Cu 合金有较好的细晶作用^[9],电磁搅拌可进一步细化高成分的 Cu-Fe 合金,并且随着搅拌电流的增加,宏观晶粒尺寸进一步细化,提高了铸锭品质^[10]。

2.2 电磁搅拌对第二相 Fe 枝晶的影响

图 2 为 Cu-10Fe 合金在不同电磁搅拌条件下的显微组织。由图 2a 可知,无电磁搅拌时,合金中第二相 Fe 树枝晶的一次枝晶臂较为发达,同时在 Cu 基体中出

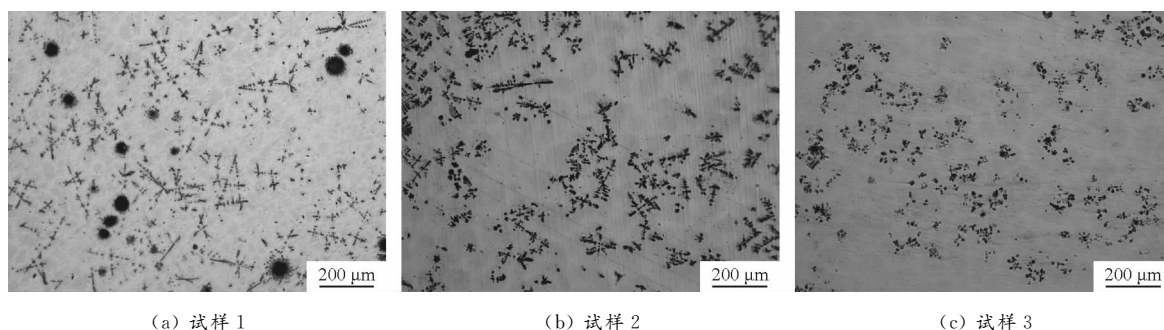


图 2 Cu-10Fe 合金在不同电磁搅拌条件下的显微组织对比

Fig.2 The microstructure of Cu-10Fe alloy with or without EMS

由图 2c 可以看出,试样 3 球状的 Fe 富集相基本消失。这是因为在电磁搅拌作用下的旋转运动使芯部温度剧烈下降,而凝固前沿的温度升高,起到了“削峰填谷”的作用,在铸锭的截面上温度分布也更加均匀,从而有效降低了凝固前沿的温度梯度,使凝固速度减慢^[12]。在较低的过冷度条件下熔液在进入亚稳液态组元不混溶温度区域之前,第二相 Fe 逐渐长大形成树枝晶,从而凝固组织中避免了球状的 Fe 富集相的生成。此外,随着搅拌电流和搅拌强度增加,第二相 Fe 树枝晶越不发达,在 300 A 电流强度下 Fe 枝晶组织变得更加破碎细小。这是由于在电磁搅拌产生的强制对流作用下,初生 Fe 枝晶在生长过程中被碎断,这些碎断的 Fe 枝晶游离到熔体中,形成细小的 Fe 颗粒相或者不发达的枝晶相,同时细小的 Fe 枝晶组织又成为 Cu 晶粒的形核质点,起到了细化晶粒的作用(见图 1)。

2.3 电磁搅拌对 Fe 元素宏观偏析的影响

图 3 为不同条件下 Cu-10Fe 合金中的 Fe 含量分析和取样位置示意图。其中 1 号采样点接近铸锭表面位置、4 号采样点在铸锭芯部。比较可知,在无电磁搅拌和 150 A 电磁搅拌的条件下,边部到芯部的成分分布较为均匀,未出现宏观偏析。在 300 A 下,Fe 含量从边部到芯部逐渐降低,边部和芯部成分偏析明显。这是因为

现了呈球团状的 Fe 富集相。通过 Cu-Fe 相图可知^[11],由于 Cu 和 Fe 熔点较大的差距相图中出现一个跨度很大、且平缓的液相线,在液相线温度下存在一个亚稳液态组元不混溶温度区域,属于亚稳态难混溶合金。在较快的冷却条件下,Cu-Fe 合金会进入该不混溶区间,并发生液-液分离,即生成富 Cu 液相(L_1)和富 Fe 液相(L_2)。图 2a 中的球状的 Fe 富集相就是在较快冷却条件下 L_2 液相凝固后的组织。球状的 Fe 富集相对 Cu-Fe 复合材料的 Fe 纤维形成是抑制作用,因其形貌特征在随后的拉拔变形过程中不会发生原位变形生成纤维状组织,所以必须采用控制手段避免球状 Fe 富集相的存在^[11]。

搅拌电流为 300 A 时产生的电磁力过大,导致金属熔液剧烈旋转运动,并使 Fe 析出相在离心力的作用下向边缘偏析。此外,3 个试样的 Fe 含量都明显小于 10%,这是因为在熔融状态下 Fe 的密度小于 Cu 的密度,高成分 Cu-Fe 合金熔炼时的初生 Fe 相漂浮到上部,产生密度偏析^[13]。

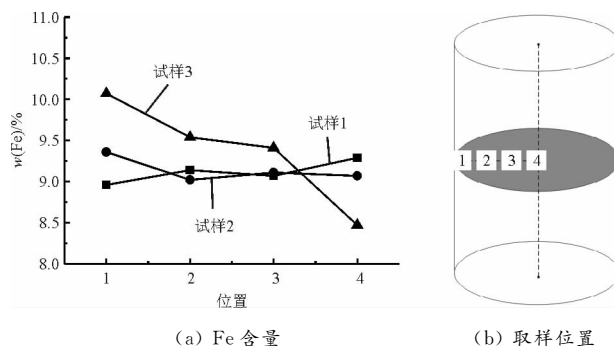


图 3 不同条件下 Cu-10Fe 合金不同位置的 Fe 含量和取样位置示意图

Fig.3 The concentration analysis of Fe at different locations in Cu-10Fe alloys and schematic diagram of sampling position

2.4 电磁搅拌对拉拔后综合性能的影响

图 4 为无电磁搅拌和 150 A、6 Hz 条件下制备的 Cu-10Fe 合金经拉拔变形后的电导率和抗拉强度。对于导电性能,在铸态和各形变量下电磁搅拌对 Cu-10Fe

合金的影响较弱,两者没有显著的差别。同时,随着变形量的增加合金的电导率逐渐降低,从铸态下的 21.46~22.04 MS/m 降低到在 $\eta=6.2$ 时的约 16.24 MS/m。对于抗拉强度,首先随着变形量的增加,合金的强度也随之增加;其次,对比可知,在各变形量下电磁搅拌制备的 Cu-10Fe 合金在抗拉强度上明显高于无电磁搅拌制备的试样,在 $\eta=6.2$ 时合金抗拉强度从 625 MPa 提升至 675 MPa。

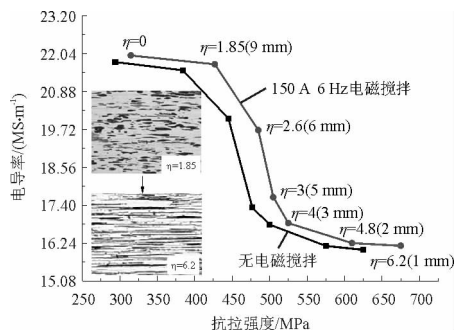


图4 不同电磁搅拌条件下制备的 Cu-10Fe 合金在不同形变量时的电导率和抗拉强度

Fig.4 Conductivity and tensile strength of deformed Cu-10Fe alloys prepared with or without EMS at different deformation rates

大量研究表明,高 Fe 含量的 Cu-Fe 合金变形后,Fe 枝晶演变为沿拉拔方向分布的 Fe 纤维^[14,15],此类 Cu 合金也被称为 Cu-Fe 原位复合材料,其抗拉强度可以近似的用 Hall-Petch 关系来表示:

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

式中, d 为纤维的平均间距。根据显微组织的遗传性,在相同的变形制度下,Fe 纤维的间距与原始铸锭的 Fe 枝晶间距和尺寸密切相关^[14,15]。由图 2 可知,在电磁搅拌作用下,第二相 Fe 未形成发达的树枝晶,较未施加电磁搅拌的试样,Fe 枝晶更为密集细小,因此其在拉拔变形后会原位形成间距更密、且细小的 Fe 纤维,对合金起到了更好的强化作用。

3 结 论

(1) Fe 元素对 Cu 合金有较好的细晶作用,电磁搅拌可进一步细化高 Fe 含量 Cu-Fe 合金的晶粒;电磁搅拌可以降低 Cu-Fe 合金冷却的过冷度,使合金在进入亚稳液态组元不混溶温度区域前形成 Fe 树枝晶相,有效避免了球状 Fe 相的生成。

(2) 在 300 A 的搅拌作用下,对 Fe 枝晶相有较强烈的破碎作用,并造成先凝固的 Fe 相向铸锭边部的移动,造成显著的宏观偏析。

(3) 电磁搅拌对 Cu-Fe 合金铸态和变形后的电导

率没有显著的影响,但由于电磁搅拌对铸态 Fe 枝晶的破碎细化作用,导致在后续拉拔过程中,Cu-Fe 合金的力学性能显著提高。

参 考 文 献

- [1] 王碧文.引线框架铜合金新材料研制现状及发展[J].世界有色金属, 2012(8): 58-59.
- [2] 葛继平,姚再起.高强度高导电的形变 Cu-Fe 原位复合材料[J].中国有色金属学报, 2004, 14(4): 568-573.
- [3] VERHOEVEN J D, CHUMBLEY L S, LAABS F C, et al. Measurement of filament spacing in deformation processed Cu-Nb alloys [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1991, 39(11): 2 825-2 834.
- [4] BISELLI C, MORRIS D G. Microstructure and strength of Cu-Fe in situ composites after very high drawing strains[J]. Acta Materialia, 1996, 44: 493-504.
- [5] 左小伟,范正洁,屈磊,等.均匀化处理对 Cu-20Fe 复合材料组织与性能的影响[J].功能材料, 2016, 47(4): 4 143-4 146.
- [6] 屈磊,王恩刚,左小伟,等.原位形变 Cu-14.5Fe 复合材料的组织和性能研究(I)——组织演变[J].东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(9): 1 254-1 257.
- [7] 邓安元,柳世铭,王恩刚,等.电磁搅拌对 Cu-6Fe 复合材料凝固组织的影响[J].东北大学学报(自然科学版), 2011(10): 1 435-1 439.
- [8] 张玉伟,康慧君,张邵建,等.原位自生 Fe_3Al 增强 Cu 基复合材料的组织和性能[J].特种铸造及有色合金, 2019, 39(7): 776-780.
- [9] PATCHETT J A, ABBASCHIAN G J. Grain refinement of copper by the addition of iron and by electromagnetic stirring[J]. Metallurgical Transactions, 1985, B16(3): 505-511.
- [10] 谢敏,王梅丰,戴晓琴,等.综论偏晶合金的制备技术:外场下凝固、快速凝固及激光技术[J].材料导报, 2019, 33(3): 490-499.
- [11] 廖若望,肖来荣,刘轩涛,等. Cu-Zn-Al-Fe 合金的组织与性能[J].热加工工艺, 2019(16): 75-79.
- [12] 邹晋,谢仕芳,周喆,等.交变磁场下 Cu-Fe 复合材料的凝固组织与性能[J].材料热处理学报, 2016, 37(2): 6-11.
- [13] 李贵茂,柳艳,刘常万,等.电磁搅拌参数对 Cu-6Ag 合金凝固组织及性能的影响[J].铸造技术, 2019(2): 165-169.
- [14] GO Y S, SPITZIG W A. Strength in deformation-processed Cu-20% Fe composites [J]. Journal of Materials Science, 1991, 26: 163-171.
- [15] WU Z W, MENG L. Influences of different prior heat treatments on the microstructural and mechanical properties of Cu-Fe filamentary composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509: 8 917-8 921.

(编辑:刘晨辉)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com