2021 年 5 月 May 2021

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39795

稳恒强磁场对 Cu-15Ni-8Sn 合金凝固组织、 微观偏析及显微硬度的影响



沈 喆^{1,2}, 任 朗^{1,2}, 林中泽^{1,2}, 朱家乐^{1,2}, 钟云波^{1,2}

(1. 上海大学 材料科学与工程学院,上海 200444;2. 上海大学 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室,上海 200444)

摘 要:研究稳恒强磁场对 Cu-15Ni-8Sn 合金凝固过程中微观组织形貌、枝晶主干处成分偏析及显微硬度 的影响规律。结果表明:对比无磁场条件,2T强磁场对 Cu-15Ni-8Sn 合金试样微观组织与枝晶主干处微观 偏析的影响并不大。但当磁感应强度提高至 4~6 T 时,试样枝晶数量明显减少,尺寸显著粗化;且枝晶主 干处 Sn 元素含量明显下降,Ni 元素含量则明显升高。此外,强磁场的施加能显著提高 Cu-15Ni-8Sn 合金枝 晶主干的显微硬度,对比无磁场条件,施加 6T强磁场时合金中枝晶主干处显微硬度上升 74.4%。强磁场对 Cu-Ni-Sn 合金微观偏析及显微硬度的影响主要与磁场在合金凝固过程中对 Sn、Ni 等元素扩散的影响有关。 关键词: Cu-15Ni-8Sn 合金;纵向强磁场;微观偏析;成分分布

文章编号: 1004-0609(2021)-05-1134-09 中图分类号: TF11.31 文献标志码: A

引文格式: 沈 喆, 任 朗, 林中泽, 等. 稳恒强磁场对 Cu-15Ni-8Sn 合金凝固组织、微观偏析及显微硬度 的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(5): 1134-1142. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39795 SHEN Zhe, REN Lang, LIN Zhong-ze, et al. Effect of static high magnetic field on solidification structure, microsegregation and microhardness of Cu-15Ni-8Sn alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(5): 1134-1142. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39795

金属材料的性能最终取决于其微观组织及成 分。近几十年来,研究人员采用定向凝固^[1]、快速 凝固^[2]、深过冷^[3]、微重力^[4]和外加物理场^[5-6]等手 段来实现对材料微观组织及成分的优化与调控。强 磁场能显著影响金属凝固过程中的熔体流动^[7-8]、 原子扩散^[9-10]、第二相迁移和分布^[11-12]以及晶体取 向^[13-14]等行为,进而影响材料的组织形貌及成分偏 析^[15-19]。HOU等^[15]提出强磁场的施加有助于细化 Ni-Mn-Ga 合金定向凝固组织,减少微观偏析。HE 等^[16, 19]研究了强磁场对 Al-Cu、Ni-Cr 等合金定向 凝固过程中微观偏析的影响,提出强磁场对合金微 观偏析的影响与其生长界面形貌有关。对于胞状或 枝晶状界面生长的合金而言,强磁场能有效减少其 微观偏析,而对于平界面生长的合金来说,强磁场则会提高其微观偏析程度。由此可见,合金凝固过程中的微观偏析行为受诸多因素影响,而强磁场对这些因素的影响规律尚未完全清晰,其相关机制需要进一步研究。

Cu-15Ni-8Sn 合金具有很高的屈服强度、优良的抗应力松弛性能,是新一代高强弹性铜合金的代表^[20-22]。但由于 Sn 熔点较低,凝固间隔极大,在传统凝固条件下,Cu-Ni-Sn 合金极易形成粗大的 Cu 枝晶,这将导致该合金凝固时存在明显的宏/微观偏析。为解决该合金制备的偏析问题,国内外学者从不同角度进行了研究:从凝固速度入手,提出快速凝固^[23]、等离子喷涂^[24]等方法来解决 Cu-Ni-Sn

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0301401, 2016YFB0300401);国家自然科学基金资助项目(U1860202, U1732276, 50134010, 51704193, 51904184)

收稿日期: 2020-10-01; 修订日期: 2020-11-13

通信作者:钟云波,教授,博士;电话: 021-66136562; E-mail: yunboz@shu.edu.cn

合金的成分偏析问题,但该方法存在着试样尺寸的 限制;从粉末冶金角度出发,提出了机械合金化^[25] 方法来实现 Cu、Ni、Sn 这 3 种元素的合金化,从 而减少偏析,但该方法存在着易氧化夹杂、工艺复 杂等问题。研究表明^[9-10],强磁场对合金凝固过程 中原子扩散具有显著的影响,而目前关于强磁场对 Cu-Ni-Sn 合金凝固微观组织及成分偏析影响的研 究尚未见深入报道。因此,本文提出从合金凝固过 程中原子扩散角度,研究强磁场对 Cu-Ni-Sn 合金凝 固过程中组织粗化、成分偏析及显微硬度的影响规 律,并对其相关影响机制进行讨论。

1 实验

本实验研究对象为 Cu-15Ni-8Sn 合金,以电解 纯 Cu(99.99%)、纯 Ni(99.99%)及纯 Sn(99.99%)为原 料,按质量比 m(Cu):m(Ni):m(Sn)=77:15:8 的配比在 真空感应熔炼炉中熔配。随后,将熔配好的 Cu-15Ni-8Sn 合金铸锭线切割制成直径 8 mm、长 10 mm的试样,并将其置于强磁场下凝固加热炉中, 如图 1(a)所示。经 30 min,加热到 1200 ℃并保温 1 h,并随炉冷却,温度制度如图 1(c)所示。本实验 在不同磁感应强度(0 T、2 T、4 T、6 T)下进行。待 实验结束后,对试样进行横/纵截面切割(见图 1(b)), 经磨抛加工后,使用光学显微镜、扫描电镜及显微 硬度仪等分别考察了不同磁感应强度对 Cu-15Ni-8Sn 合金凝固微观组织、成分分布及显微 硬度的影响。其中成分分布测定方法如图 2 所示, 随机选取试样边缘处枝晶 (见图 2(a)中黄框),在该 枝晶主干上,以 20×20 的矩阵进行 EDS 点扫描, 测试该区域内 400 个点的成分,并将所得数据按照 Rank Sort 方法进行统计和分析^[26-27]。显微硬度测试 采用维氏硬度仪对 Cu-15Ni-8Sn 合金枝晶主干处硬 度进行测定,测试载荷为 2 N,加载时间为 20 s。 每个试样测试 10 次,取其平均值。

2 结果与分析

2.1 微观组织相组成及成分分布

Cu-15Ni-8Sn 合金凝固微观组织主要有两相组 成: 枝晶主干的 α-Cu 固溶相(见黑色区域 C)和枝晶 间的富 Sn 相(见白色区域 A),如图 3(b)所示。在两 相之间还存在一个灰色的过渡区域(见区域 B)。表 1 列出了图 3(b)中 A、B、C 这 3 个不同区域的元素含 量。图 3(c)所示为图 3(b)的元素面分布图。从图中 可以看出,枝晶主干即 α-Cu 固溶相中 Sn 含量较少,





Fig. 1 Experimental scheme for solidification of Cu-15Ni-8Sn alloy in high magnetic field: (a) Schematic diagram of experimental device; (b) Schematic diagram of sampling method; (c) Experimental temperature regime



图 2 Cu-15Ni-8Sn 合金枝晶主干处微观偏析及显微硬度检测方法

Fig. 2 Determination method for microsegregation and microhardness on dendrite trunk of Cu-15Ni-8Sn alloy: (a) Schematic diagram of point scanning method; (c) Hardness test indentation



图 3 Cu-15Ni-8Sn 合金试样微观组织、相组成及成分分布 Fig. 3 Microstructure(a), phase composition(b) and element distribution of Cu(c), Ni(c') and Sn(c") for Cu-15Ni-8Sn alloy

而枝晶间的富 Sn 相中 Ni、Sn 两种元素含量较高, 这与表 1 中的结果相一致。因此,通过元素含量的 测定,可以初步区分 Cu-15Ni-8Sn 合金微观组织的 各区域。

表1 Cu-15Ni-8Sn 合金不同区域元素含量

Table 1Element contents in different regions ofCu-15Ni-8Sn alloy

Zone	Mass fraction/%		
	Cu	Ni	Sn
A	39.39	24.62	35.99
В	75.56	12.29	12.16
С	80.34	14.22	5.44

2.2 强磁场对微观组织的影响

图 4 所示为不同磁感应强度下 Cu-15Ni-8Sn 合

金的微观组织。从图4可以看出,在0T时,试样 呈现为致密的枝晶组织,且具有明显沿径向生长的 趋势,这是由于径向上存在一定的温度梯度。当施 加2T磁场后,枝晶仍然呈现沿径向生长的趋势, 这与无磁场条件下的微观组织一致。但随着磁感应 强度的提高(4T),试样横截面枝晶数目开始明显较 少,枝晶组织开始粗化,但纵截面微观组织未有明 显差异。当磁感应强度进一步提高到6T时,不仅 试样横截面微观组织出现了明显粗化:纵截面组织 中枝晶数目也开始减少,枝晶尺寸粗化。



图 4 不同磁感应强度下 Cu-15Ni-8Sn 合金的凝固微观组织

Fig. 4 Solidification microstructures of Cu-15Ni-8Sn alloy under different magnetic flux densities: (a) 0 T; (b) 2 T; (c) 4 T; (d) 6 T

1138

2.3 强磁场对枝晶成分的影响

强磁场能明显促进 Cu-15Ni-8Sn 合金凝固过程 中枝晶组织的粗化,而枝晶组织又与成分偏析关系 密切。因此,本实验采用对枝晶主干处点扫描测成 分的方法检测了强磁场对 Cu-15Ni-8Sn 合金凝固组 织微观偏析的影响,结果如图 5 所示。从图 5 中可



图 5 不同磁感应强度下微观组织中 Sn、Ni 元素分布

Fig. 5 Distribution of Sn and Ni element on solidification microstructure under different magnetic flux densities: (a1), (a2) 0 T; (b1), (b2) 2 T; (c1), (c2) 4 T; (d1), (d2) 6 T

以看出,枝晶主干即 α-Cu 固溶体相出现在图片中 心处,且该区域为贫 Sn 区,Sn 含量在 2.3%~7%之 间。枝晶间隙即富 Sn 相出现在图片的四角,该区 域内 Sn 含量最高,约为 37.5%,这与表 1 中各区域 成分测定结果一致。Sn 含量在枝晶主干与枝晶间存 在的过渡区域中呈现由枝晶主干到枝晶间隙逐渐 上升的趋势。对比不同磁感应强度下枝晶主干位置 处 Sn 含量的变化可以看出,在 0 T 磁场下(见图 5(a1)),α-Cu 固溶体相中最低 Sn 含量为 4.1%;而 在施加了 2 T 磁场后,该区域中最低 Sn 含量下降为 3.7%;随磁感应强度的进一步提高(至 6 T),该区域 中最低 Sn 含量下降到了 2.3%。这表明强磁场的施 加大大降低了枝晶主干区域内 Sn 元素的含量。

Sn 含量在枝晶主干、过渡区及枝晶间 3 个区域 内呈现逐渐上升的趋势,而不同区域内 Ni 含量的 检测结果与 Sn 含量则并不相同。从图 5 中可以看 到,在枝晶间即富 Sn 相区域内,Ni 含量最高,约 为 30%。在枝晶主干即 α-Cu 区域内,Ni 含量最高,约 为 14%~20%。过渡区域内 Ni 含量最低。对比图 5(a2)、(b2)、(c2)及(d2)可以看出,随着磁感应强度 的提高,Ni 含量为 14%~20%的区域呈现明显扩大 的趋势。这表明强磁场的施加能有效提高枝晶主干 处和过渡区域内 Ni 元素的含量。

为进一步量化研究强磁场对 Cu-15Ni-8Sn 合金 凝固过程中枝晶微观偏析的影响,本文对微观枝晶 不同位置处的 EDS 测试结果进行了排序,结果如图 6 所示。图 6(a)所示为不同磁感应强度下各区域内 Sn 元素含量的对比图。从图 5 中可以看出, 枝晶主 干区域内 Sn 含量≤7%, 而 Ni 含量约为 14%~20%。 因此,只需对比不同磁感应强度对 Sn 含量≤7%及 Ni含量在14%~20%之间的两个区域中Sn、Ni元素 含量的影响,即可推测不同磁场作用下 Cu-15Ni-8Sn 合金枝晶主干处微观偏析的演变行 为。从图 6(a)中黄色区域可以看出,施加 2T 磁场 对枝晶主干处 Sn 含量影响不大。而当磁感应强度 提高到4T时,枝晶主干位置处Sn含量明显降低。 进一步提升磁感应强度至 6 T 时,图 6(a)中绿色曲 线所示, 枝晶主干位置处 Sn 含量略有下降。从图 6(b)可以得到,随着磁场的施加,枝晶主干区域内 Ni 含量逐渐上升。由此可见, 强磁场的施加确实能 显著改变枝晶主干位置处 Sn、Ni 元素的含量。在 强磁场的作用下, 枝晶主干处 Sn 元素含量呈现降

低的趋势,而 Ni 元素含量则逐渐上升。这表明, 在凝固过程中,磁场的施加影响了 Sn、Ni 元素的 溶质再分配过程。前人研究表明,磁场对固液界面 处元素扩散存在着显著的影响^[28-30]。因此,有理由 相信,本实验中不同磁感应强度下枝晶主干处 Sn、 Ni 元素含量的变化是由于磁场对 Sn、Ni 元素固液 扩散的不同影响作用导致的。从结果来看,施加磁 场后,枝晶主干处 Sn 元素含量的下降是由于磁场 促进了凝固过程中 Sn 元素的析出,而枝晶主干处 Ni 元素含量的上升,则主要归因于磁场抑制了凝固 过程中 Ni 元素的扩散。



图 6 不同磁感应强度下微观组织中 Sn、Ni 元素含量排序

Fig. 6 Ordering of Sn and Ni contents in solidification microstructure under different magnetic flux densities: (a) Sn; (b) Ni

2.4 强磁场对枝晶主干显微硬度的影响

为进一步证明强磁场对枝晶主干处 Sn、Ni 元 素含量的影响,本文对不同磁感应强度下枝晶主干

处显微硬度进行了测定,结果如图7所示。当无磁 场时,试样枝晶主干处硬度为131 HV0.2;而当施加 2 T 磁场以后,试样枝晶主干处硬度上升到 142.23HV_{0.2}。从图 6 可以看出,随着 2 T 磁场的施 加, 枝晶主干处 Sn 含量并没有出现明显的下降, 而 Ni 含量则有明显的上升。因此, 2 T 磁场下测得 的枝晶主干显微硬度的上升主要来源于 α-Cu 中 Ni 元素固溶度的上升。随着磁感应强度的进一步上 升,枝晶主干处的硬度也随之提高。在6T磁场下, 枝晶主干处的显微硬度达到了最大值,为 228.43 HV02。对比无磁场条件, 6T磁场时合金中枝晶主 干处显微硬度上升了 74.4%。枝晶主干处显微硬度 与组织中 Cu、Ni、Sn 等元素的含量息息相关,强 磁场的施加能显著提高枝晶主干处 Ni 元素的含量, 降低 Sn 元素的含量,而 Cu-Ni-Sn 合金中 Ni 含量 的上升与 Sn 含量的下降都能促使枝晶主干处显微 硬度的提高,这与图7中的检测结果一致。



图 7 不问磁感应强反对权丽主 7 处显 减硬度 时影响 Fig. 7 Effect of different magnetic flux densities on microhardness of dendritic trunk

3 结论

1) 在 Cu-15Ni-8Sn 合金凝固过程中施加稳恒 强磁场(≥4 T),能明显促进凝固枝晶组织的粗化。

2) 强磁场能显著影响 Cu-15Ni-8Sn 合金枝晶 主干处 Sn、Ni 等元素的含量及分布。随着磁感应 强度的上升,枝晶主干处 Sn 元素含量逐渐下降, 而 Ni 元素含量则逐渐上升。这种强磁场诱导的 Sn、 Ni 等元素不同的微观偏析行为应归因于磁场对 Sn、 Ni 元素固液扩散影响的不同。 3) 强磁场能显著提高 Cu-15Ni-8Sn 合金枝晶 主干的显微硬度,这主要与强磁场作用下枝晶主干 处 Sn 含量的下降和 Ni 含量的上升有关。

REFERENCES

- CHEN G, PENG Y, ZHENG G, et al. Polysynthetic twinned TiAl single crystals for high-temperature applications[J]. Nature Materials, 2016, 15(8): 876–881.
- [2] ROEHLING J D, COUGHLIN D R, GIBBS J W, et al. Rapid solidification growth mode transitions in Al-Si alloys by dynamic transmission electron microscopy[J]. Acta Materialia, 2017, 131: 22–30.
- [3] WANG J, LI J, HU R, et al. Anomalous magnetism and normal field instability in supercooled liquid cobalt[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105: 144101.
- [4] WU Y, WANG W, CHANG J, et al. Evolution kinetics of microgravity facilitated spherical macrosegregation within immiscible alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 763: 808–814.
- [5] SHEN Z, PENG M, ZHU D, et al. Evolution of the microstructure and solute distribution of Sn-10wt% Bi alloys during electromagnetic field-assisted directional solidification[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(4): 568–577.
- [6] 王 强,董 蒙,孙金妹,等.强磁场下合金凝固过程控制及功能材料制备[J].金属学报,2018,54(5):742-756.
 WANG Qiang, DONG Meng, SUN Jin-mei, et al. Control of solidification process and fabrication of functional materials with high magnetic fields[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(5): 742-756.
- [7] LI X, FAUTRELLE Y, GAGNOUD A, et al. Effect of a weak transverse magnetic field on solidification structure during directional solidification[J]. Acta Materialia, 2014, 64(2): 367–381.
- [8] LEHMANN P, MOREAU R, CAMEL D, et al. Modification of interdendritic convection in directional solidification by a uniform magnetic field[J]. Acta Materialia, 1998, 46(11): 4067–4079.
- [9] FAN L, ZHONG Y, XU Y, et al. Promoted diffusion mechanism of Fe2.7wt.%Si-Fe10wt.%Si couples under magnetic field by atomic-scale observations[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 19920.

- [10] ZHENG T, SHI P, SHEN Z, et al. Diffusion-controlled mechanical property-enhancement of Al-20wt.%Si ribbon annealed under high static magnetic fields, from the microscale to the atomic scale[J]. Materials & Design, 2020, 188: 108476.
- [11] REN Z, LI X, WANG H, et al. The segregated structure of MnBi in Bi-Mn alloy solidified under a high magnetic field[J]. Materials Letters, 2004, 58(27/28): 3405–3409.
- [12] YASUDA H, OHNAKA I, FUJIMOTO S, et al. Fabrication of aligned pores in aluminum by electrochemical dissolution of monotectic alloys solidified under a magnetic field[J]. Scripta Materialia, 2006, 54(4): 527–532.
- [13] LIU C, ZHONG Y, SHEN Z, et al. Magnetic field-dependent microstructure evolution and magnetic property of Fe-6.5Si-0.05B alloy during solidification[J]. Journal of Materials Research, 2019, 34(24): 4076–4084.
- [14] ZHENG T, ZHONG Y, LEI Z, et al. Effects of high static magnetic field on crystal orientation and magnetic property of Bi-5wt.% Zn alloys[J]. Materials Letters, 2015, 140: 68-70.
- [15] HOU L, DAI Y, FAUTRELLE Y, et al. Evolution of microstructure and microsegregation in Ni-Mn-Ga alloys directionally solidified under axial magnetic field[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 758: 54–61.
- [16] HE S, LI C, GUO R, et al. Evolution of microsegregation in directionally solidified Al-Cu alloys under steady magnetic field[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 800: 41–49.
- [17] LI X, GAGNOUD A, REN Z, et al. Effect of strong magnetic field on solid solubility and microsegregation during directional solidification of Al-Cu alloy[J]. Journal of Materials Research, 2013, 28(20): 2810–2818.
- [18] 钟 华,李传军,王 江,等.强磁场对定向凝固
 Al-4.5Cu 合金微观偏析的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(5):
 575-582.
 ZHONG Hua, LI Chuan-jun, WANG Jiang, et al. Effect of a high static magnetic field on microsegregation of directionally solidified Al-4.5Cu alloy[J]. Acta Metallurgica
 - Sinica, 2016, 52(5): 575-582.
- [19] HE S, LI C, YUAN Z, et al. Magnetic-field-induced liquid-solid interface transformation and its effect on microsegregation in directionally solidified Ni-Cr alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(9):

4592-4601.

- [20] ZHAO J, NOTIS M R. Spinodal decomposition, ordering transformation, and discontinuous precipitation in a Cu-15Ni-8Sn alloy[J]. Acta Materialia, 1998, 46(12): 4203–4218.
- [21] 祁红璋,安建军,严 彪. Cu-15Ni-8Sn 合金的开发与应用现状[J]. 金属功能材料, 2009, 16(4): 57-60.
 QI Hong-zhang, AN Jian-jun, YAN Biao. Current application and development of Cu-15Ni-8Snalloy[J]. Metallic Functional Materials, 2009, 16(4): 57-60.
- [22] 韩 芳,从善海,汪旭超.不同冷却条件对铸态
 Cu-15Ni-8Sn 合金析出物的影响[J].金属热处理,2012, 37(6):17-19.

HAN Fang, CONG Shan-hai, WANG Xu-chao. Influence of different cooling conditions on segregation of Cu-15Ni-8Sn alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(6): 17–19.

- [23] 刘施峰, 汪明朴, 李 周, 等. 真空熔铸法和快速凝固法 制备的 Cu-15Ni-8Sn-XSi 合金组织研究[J]. 矿冶工程, 2005, 25(3): 73-80.
 LIU Shi-feng, WANG Ming-pu, LI Zhou, et al. A study on cast structure of Cu-15Ni-8Sn-XSi alloys prepared by vacuum melting and rapid solidification[J]. Mining and
- [24] XIAO J, ZHANG W, LIU L, et al. Microstructure and tribological properties of plasma sprayed Cu-15Ni-8Sn coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 337: 159–167.

Metallurgical Engineering, 2005, 25(3): 73-80.

- [25] 曾 跃 武,李志章.机 械 合金化和熔炼法制备的Cu-15Ni-8Sn 合金的Spinodal分解[J].中国有色金属学报,2001,11(6):1059–1063.
 ZENG Yue-wu, LI Zhi-zhang. Spinodal decomposition in Cu-15Ni-8Sn alloys prepared by mechanical alloying and casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(6): 1059–1063.
- [26] GANESAN M, DYE D, LEE P D. A technique for characterizing microsegregation in multicomponent alloys and its application to single-crystal superalloy castings[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2005, 36(8): 2191–2204.
- [27] GANESAN M, THUINET L, DYE D, et al. Quantification of microsegregation in cast Al-Si-Cu alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2007, 38(4): 557–566.
- [28] LI D, WANG Q, LIU T, et al. Growth of diffusion layers at

liquid Al-solid Cu interface under uniform and gradient high magnetic field conditions[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 117(2/3): 504–510.

[29] LI D, WANG Q, LI G, et al. High magnetic field controlled interdiffusion behavior at Bi-Bi0.4Sb0.6 liquid/solid interface[J]. Journal of Materials Science, 2009, 44(8): 1918-1922.

[30] WATANABE Y, HAGIO T, KOBAYASHI R, et al. Phase formation of a solid-liquid Mn-Ga diffusion couple under a magnetic field[J]. Materials Transactions, 2019, 60(10): 2195–2198.

Effect of static high magnetic field on solidification structure, microsegregation and microhardness of Cu-15Ni-8Sn alloy

SHEN Zhe^{1, 2}, REN Lang^{1, 2}, LIN Zhong-ze^{1, 2}, ZHU Jia-le^{1, 2}, ZHONG Yun-bo^{1, 2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The effect of static high magnetic field on the microstructure morphology, dendrite microsegregation and microhardness during the solidification of Cu-15Ni-8Sn alloy was studied. The results show that the 2 T high magnetic field has almost no effect on the microstructure or dendrite microsegregation of Cu-15Ni-8Sn alloy comparing with the condition of no magnetic field. While when the magnetic field increases to 4–6 T, the number of dendrites is significantly reduced, while the size of dendrites is significantly coarsened, and the content of Sn in the trunk of the dendrites is significantly reduced, while the content of Ni in the trunk of the dendrites is significantly increased. In addition, the application of high magnetic field can significantly increase the microhardness of dendrite trunk in Cu-15Ni-8Sn alloy. Comparing with the case without magnetic field, the magnetic field of 6 T increases the microhardness of dendrite trunk by 74.4%. The effect of static high magnetic field on the microsegregation and microhardness of Cu-Ni-Sn alloy is mainly related to the effect of magnetic field on the diffusion of Sn and Ni during solidification process.

Key words: Cu-15Ni-8Snalloy; high magnetic field; microsegregation; composition distribution

Foundation item: Projects(2016YFB0301401, 2016YFB0300401) supported by the National Key Research and Development Program of China; Projects(U1860202, U1732276, 50134010, 51704193, 51904184) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2020-10-01; Accepted date: 2020-11-13

Corresponding author: ZHONG Yun-bo; Tel: +86-21-66136562; E-mail: yunboz@shu.edu.cn

(编辑 龙怀中)