



基于分形维数的立式连续铸造 Cu-15Ni-8Sn 合金铸锭偏析特征

牛冬鑫¹, 潘德清¹, 钟 敏^{2,3}, 吴 渊^{2,3}, 罗宗强¹, 张卫文¹

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640;

2. 汕头华兴冶金设备股份有限公司, 汕头 515063;

3. 汕头华兴(饶平)铜业有限公司, 饶平 515726)

摘 要:本文采用立式连续铸造制备直径 160 mm 的 Cu-15Ni-8Sn 合金铸锭,并基于分形维数对 Cu-15Ni-8Sn 合金中组织非均匀性进行了探究。结果表明: Cu-15Ni-8Sn 合金的微观组织由树枝晶组织和偏析组织构成,树枝晶组织分形维数可以作为衡量微观组织非均匀性的重要指标。浇铸温度为 1280 °C 时,随着树枝晶组织分形维数的增加(1.77~1.82),偏析率从 32%降低至 12.5%。与此同时,大偏析点逐渐向小偏析点转变, I 类偏析点面积占比从 60%下降至 10%, II 类偏析点面积占比从 35%上升到 80%;相对于二次枝晶间距,分形维数弥补了二次枝晶间距在描述 Cu-15Ni-8Sn 合金树枝晶组织形貌特征上的局限性。此外,树枝晶组织的分形维数与偏析组织的分形维数在一定程度上呈正相关关系。选择较低的浇铸温度有利于得到偏析率较低、组织分布更加均匀的铸锭。

关键词: Cu-15Ni-8Sn 合金铸锭; 分形维数; 偏析特征; 立式连续铸造

文章编号: 1004-0609(2022)-02-0396-10

中图分类号: TG249.7; TG244

文献标志码: A

引文格式: 牛冬鑫, 潘德清, 钟 敏, 等. 基于分形维数的立式连续铸造 Cu-15Ni-8Sn 合金铸锭偏析特征[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(2): 396–405. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-37837

NIU Dong-xin, PAN De-qing, ZHONG Min, et al. Segregation characteristic of vertical continuous casting Cu-15Ni-8Sn alloy ingot based on fractal dimension[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(2): 396–405. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-37837

Cu-15Ni-8Sn 合金作为一种调幅分解强化型铜基弹性材料, 凭借其高强度、耐磨损、耐腐蚀、高抗应力松弛性能等优势, 广泛应用于机械、航空、航天和海洋工程等领域^[1-3]。然而, 该合金中 Sn 元素含量过高、结晶区间较宽, 在合金制备过程中会产生严重的宏观偏析和枝晶偏析现象。Cu-15Ni-8Sn 合金的宏观偏析主要是由液相流动造成的。在合金凝固时, 由于铸锭内外凝固收缩的不同时性以及熔体中气体的析出, 枝晶间通道之间会产生负压, 从而导致液固界面前沿含锡量较高的熔体通过枝晶通道涌入铸锭表层区域, 从而形成反偏析^[4]。枝晶

偏析是凝固过程中合金元素再分配导致的。随着熔体温度的降低, 贫 Sn 的 α 相首先结晶析出, 导致固液界面前端的 Sn 元素含量不断升高, 从而形成枝晶偏析^[5]。不论是宏观偏析还是枝晶偏析均会降低合金的加工性能, 在后续的热加工时极易发生开裂。对铸锭进行高温长时的均匀化热处理虽然可以改善 Sn 元素的偏析程度, 但不可避免地会引起晶粒长大^[6-7]。尤其对于工业化大尺寸铸件而言, 更长时间的均匀化处理不仅会导致晶粒的过度长大, 而且会带来巨大的成本消耗。

目前, 国内外众多学者通过探究、优化各种制

基金项目: 广东省应用型科技研发专项资金资助项目(2016B090931002); 潮州市科技计划资助项目(2019ZX17); 汕头市重大科技攻关项目(2019ST066)

收稿日期: 2020-11-09; **修订日期:** 2021-03-11

通信作者: 张卫文, 教授, 博士; 电话: 13642315239; E-mail: mewzhang@scut.edu.cn

备工艺,以期改善 Sn 元素的偏析行为。COLLINS 等^[8]利用快速凝固工艺消除了 Cu-15Ni-8Sn 合金中的反偏析现象,但是即使在几十微米厚度的样品中仍存在厚度方向的微观偏析。瑞士和德国的两家公司^[9]也已经利用快速凝固工艺制备了 Cu-15Ni-8Sn 合金坯件,显著降低了合金中的元素偏析行为。ZHANG 等^[10]通过激光选区融化技术(SLM)来制备 Cu-15Ni-8Sn 合金,限制了基体中微米级的 Sn 偏析。WANG 等^[11]也采用 SLM 完全抑制了 Sn 元素的反偏析,并强化了该合金的力学性能。但以上几种方式设备昂贵、工艺复杂、尺寸受限、难以大规模生产。连续铸造工艺的生产效率更快、成本更低,国外已经实现了该工艺对于 Cu-15Ni-8Sn 合金的应用。国内而言, SHEN 等^[12]设计了电磁连铸技术 Cu-15Ni-8Sn 合金。通过磁场对金属液体的搅拌作用提高了金属液的冷却速度,并且使液体温度场更加均匀。采用该方法制备的 Cu-15Ni-8Sn 合金晶粒明显细化,偏析程度下降。潘德清等^[13]对水平连续铸造的结晶器进行了结构上的优化,通过底部开 U 形槽的方式,使得铸锭上下温度场的均匀性明显提高,组织和成分均匀性显著改善。

但以上研究对于 Sn 元素的偏析分析往往局限于成分测量。近年来,分形维数作为一种定量表征复杂图形轮廓形貌特征的有效方法,已经应用于铸造组织的形态描述。分析铸锭组织的局部形态与整体形态的相似程度可为铸锭组织非均匀性的研究提供新的途径^[14-15]。

本文针对 Cu-15Ni-8Sn 合金铸锭存在的成分偏析和组织非均匀性问题,尝试基于分形维数分析的方法来定量研究不同浇铸温度下铸坯内部不同位置的组织形貌特征,从而为立式连续铸造 Cu-15Ni-8Sn 合金工艺提供指导。

1 实验

Cu-15Ni-8Sn 合金熔体的熔炼采用电解铜、电解镍和高纯锡为原材料,在中频感应电阻炉中进行。先加入 Cu、Ni,待二者熔化后再加入 Sn,而后采用氩气精炼除气 10 min。在浇注前,对结晶器进行 100 ℃预热处理,且在结晶器表层刷上一层氧化锆涂料。通过红外测温枪测量熔体温度,按照表 1 的工艺参数进行三组立式连续铸造浇注。

表 1 Cu-15Ni-8Sn 棒材立式连续铸造工艺参数
Table 1 Preparation parameters of vertical continuous casting Cu-15Ni-8Sn bar

Drawing speed/ (mm·min ⁻¹)	Cooling water flow/(L·h ⁻¹)	Casting temperature/ ℃	Diameter of ingot/mm
60	1200	1400	160
		1280	
		1235	

对铸锭横截面表面打磨后用 50 mL H₂O+50 mL HNO₃ 溶液腐蚀 30 s,观察宏观组织。而后如图 1 所示,在横截面上沿半径方向均匀取样,观察微观组织。使用 5 g FeCl₃+10 mL HCL+100 mL H₂O 溶液腐蚀金相后,使用徕卡金相显微镜观察样品的微观组织。使用 Image-Pro Plus 软件测量偏析组织面积占比、数量占比等。

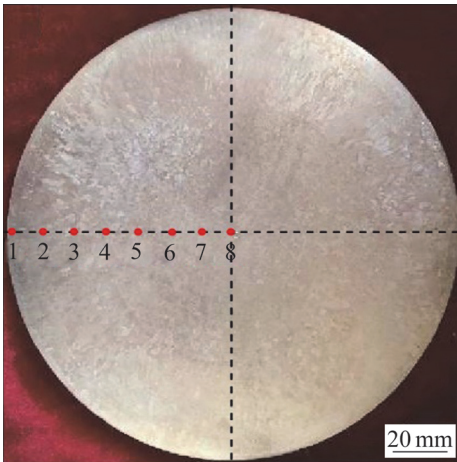


图 1 合金铸锭横截面取样位置示意图数
Fig. 1 Schematic diagram of sampling position of cross section of alloy ingots

本文采用面积周长法计算树枝晶组织的分形维数^[13]。首先,分别测量各个树枝晶组织周长 P 与面积 A ,而后以 $\ln A$ 为横坐标, $\ln P$ 为纵坐标做点状图,用最小二乘法进行线性拟合求得斜率 K ,则分形维数的计算公式为

$$D=2K$$

(1)

本文将偏析组织分为 I、II、III 三类,分别对应面积 $>0.001\text{ mm}^2$ 、 $0.0001\sim0.001\text{ mm}^2$ 、 $<0.0001\text{ mm}^2$ 的偏析组织。为定量描述铸锭不同位置的偏析组织,引入偏析率这一评估指标。特定位置偏析率

的计算方法为所分析区域的偏析点面积之和与分析区域面积的比值,其计算公式如式(2)所示:

$$R_{\text{seg}} = \frac{A_{\text{seg}}}{A_s} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_{seg} 为偏析率; A_{seg} 为所有偏析点面积之和; A_s 为分析区域面积。

2 结果与分析

2.1 铸锭的微观组织

图 2、3 和 4 所示分别为浇注温度 1400、1280 和 1235 °C 下铸锭的微观形貌。由图 2、3 和 4 可见, Cu-15Ni-8Sn 合金的铸造组织为发达的树枝晶, 且

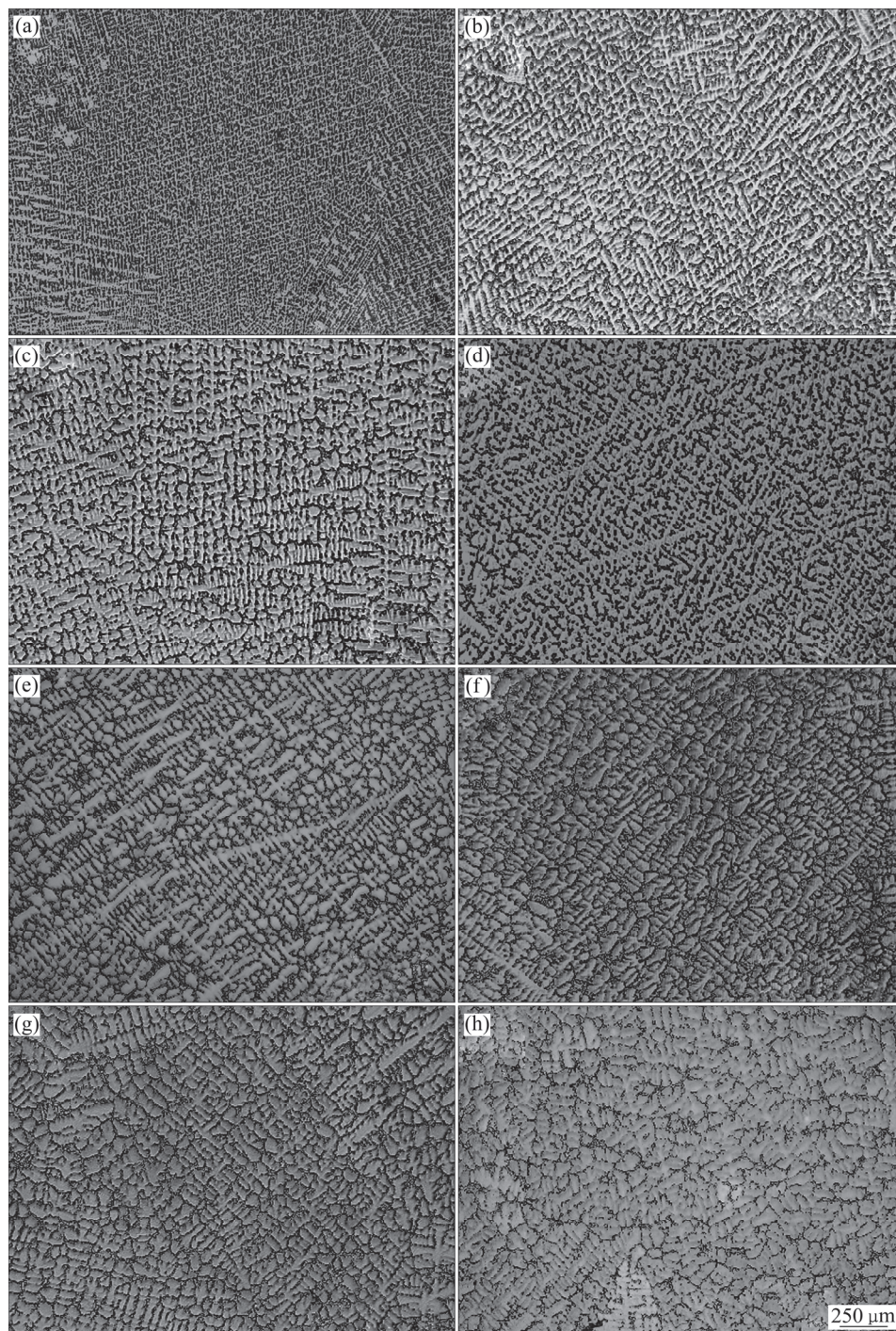


图 2 1400 °C 下合金铸锭不同位置的微观形貌

Fig. 2 Micromorphologies of alloy ingots under 1400 °C at different positions shown in Fig. 1: (a) Position 1; (b) Position 2; (c) Position 3; (d) Position 4; (e) Position 5 (f) Position 6; (g) Position 7; (h) Position 8

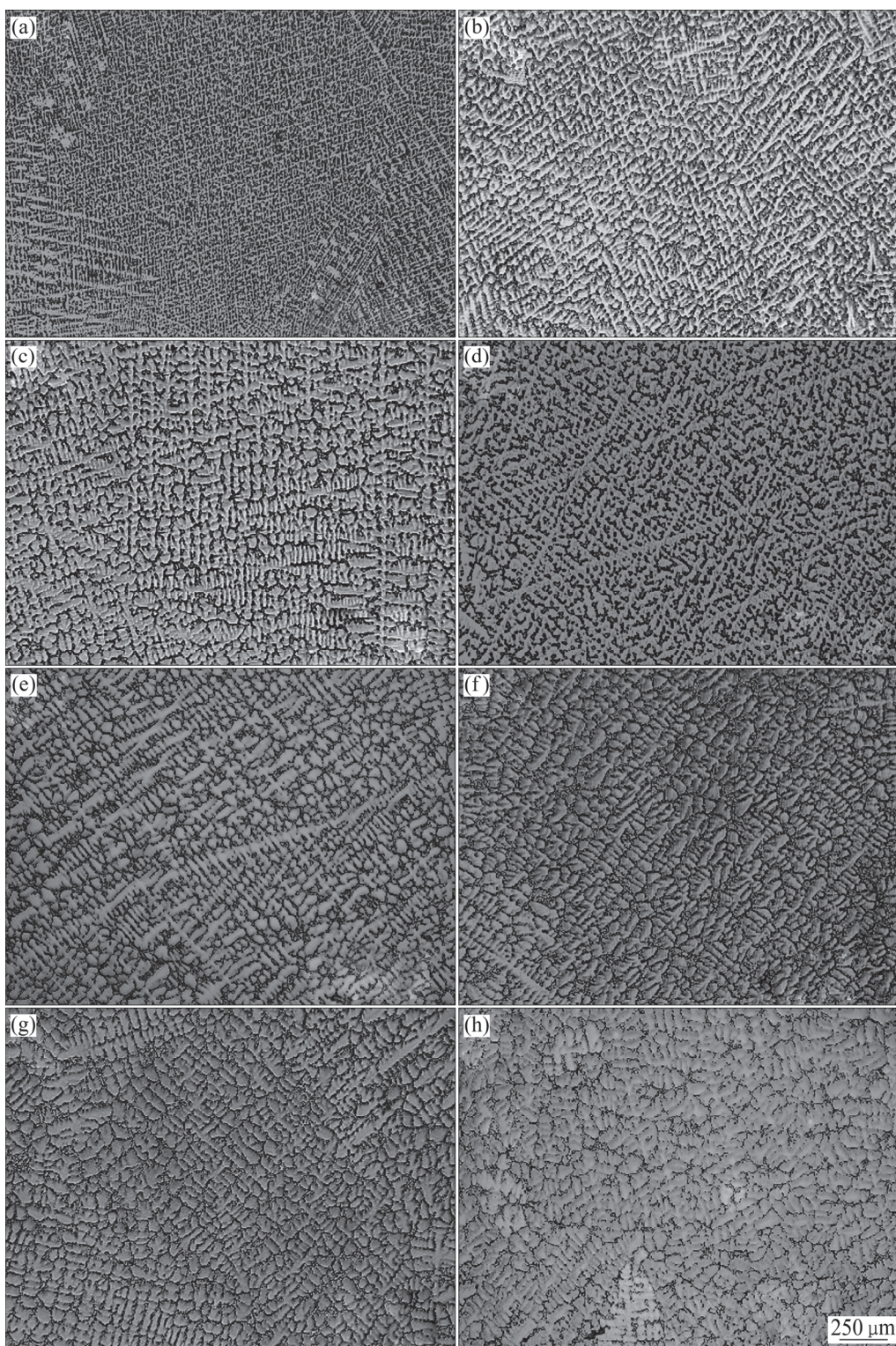


图 3 1280 °C 下合金铸锭不同位置的微观形貌

Fig. 3 Micromorphologies of alloy ingots under 1280 °C at different positions shown in Fig. 1: (a) Position 1; (b) Position 2; (c) Position 3; (d) Position 4; (e) Position 5 (f) Position 6; (g) Position 7; (h) Position 8

同一浇铸温度下, 铸锭不同部位的微观组织差异明显。随后, 通过 SEM 和 EDS 对铸造组织的相组成进行了进一步分析, 如图 5 所示。由图 5 可以看出, 合金组织由白色的枝晶(A)、黑色组织(B)以及小块

的骨状组织(C)组成。通过 EDS 分析并结合相关文献可知, 其中, A 为贫 Sn 的 α 固溶体, C 为富 Sn 的 γ 相, 其成分为 $(\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x})_3\text{Sn}$; B 为二者之间的过渡层, 为 $\alpha+\gamma$ 相。

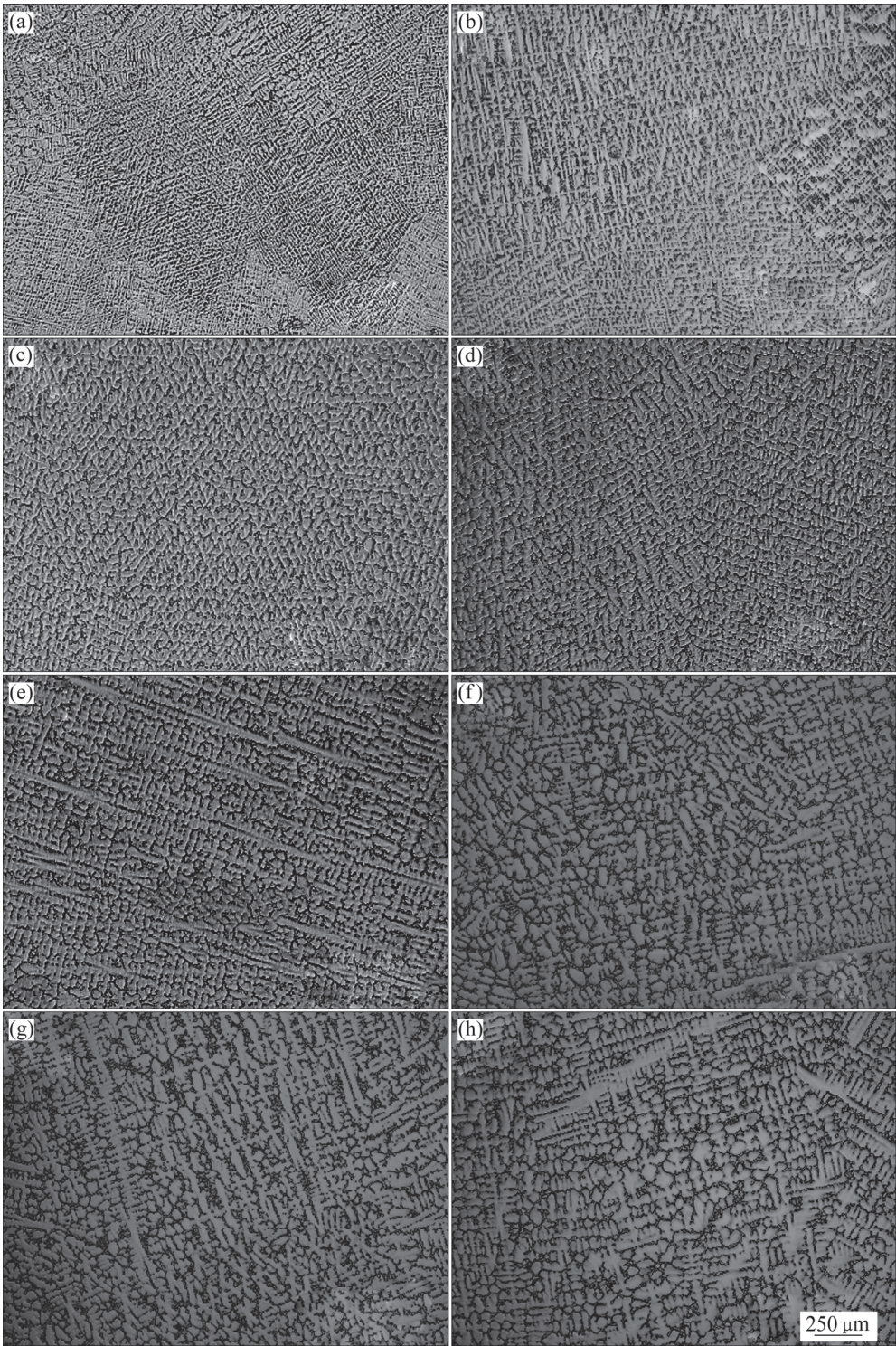


图 4 1235 ℃下合金铸锭不同位置的微观形貌

Fig. 4 Micromorphologies of alloy ingots under 1235 ℃ at different positions shown in Fig. 1: (a) Position 1; (b) Position 2; (c) Position 3; (d) Position 4; (e) Position 5 (f) Position 6; (g) Position 7; (h) Position 8

2.2 偏析率、偏析点与分形维数的关系

图 6 所示为不同浇铸温度下铸锭组织不同区域的偏析率。在浇注温度为 1400 ℃时，铸锭表层的偏析率为 43.0%，铸锭心部的偏析率为 7.5%，变化

幅度为 35.5%；当温度降低至 1235 ℃时，这种变化幅度相应地降低为 8.8%。这表明随着浇铸温度降低，内外偏析率差值降低，即偏析率均匀性提高。

图 7 和 8 所示分别为不同浇铸温度下铸锭

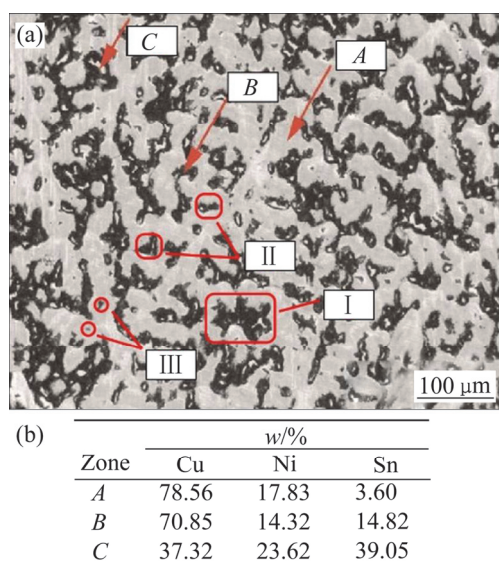


图 5 合金铸锭组织的 SEM 像和 EDS 结果

Fig. 5 SEM image(a) and EDS results(b) of Cu-15Ni-8Sn alloy ingots

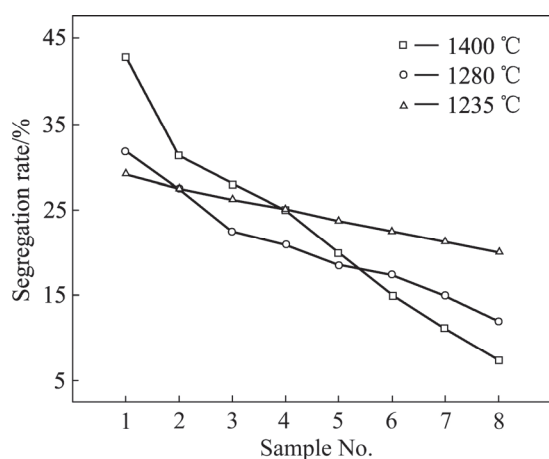


图 6 不同浇注温度下不同位置的偏析率

Fig. 6 Segregation rates at different locations under different pouring temperatures

I、II、III类偏析点的面积比和数量比统计结果。从图 7 可以看出, 当浇铸温度从 1400 °C 下降至 1280 °C 时, I 类偏析点面积占比下降, II、III类偏析点面积占比上升; 从 1280 °C 下降至 1235 °C 时, I、II 类偏析点面积占比变化不大, III类偏析点的面积占比更加均匀。从图 8 可以看出, 当浇铸温度从 1400 °C 下降至 1280 °C 时, II 类偏析点数目占比上升, I 类偏析点数目占比下降; 从 1280 °C 下降至 1235 °C 时, II 类偏析点数目占比下降, III类偏析点数目占比上升。这表明, 随着浇铸温度的降低, 偏析点逐渐从 I 类向 II 类再向 III 类转变, 大偏析点

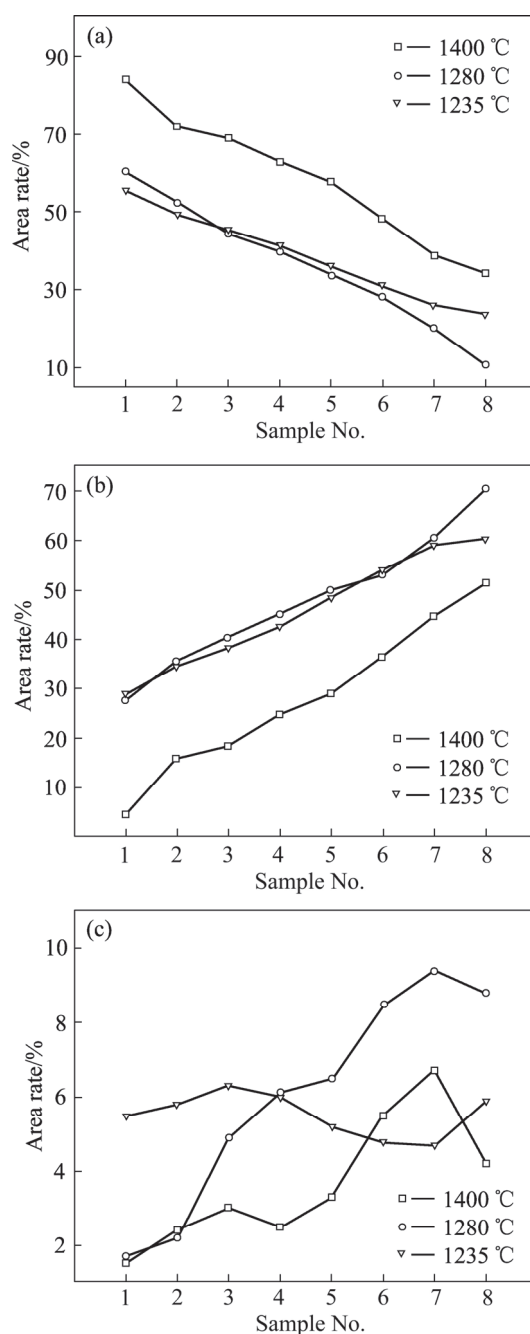


图 7 不同浇注温度下各类型偏析点的面积比

Fig. 7 Area ratio of various types of segregation points at different pouring temperatures: (a) Type I; (b) Type II; (c) Type III

逐渐转变为小偏析点。

图 9 所示为不同浇铸温度下偏析率与树枝晶组织分形维数的关系。由图 9 可知, 随着分形维数的增加, 偏析率有明显减小的趋势。如浇铸温度为 1280 °C 时, 树枝晶组织分形维数从 1.77 增加至 1.82, 偏析率从 32% 降低至 12.5%。图 10 所示为不同浇铸温度下 I、II、III 类偏析点面积占比与树枝

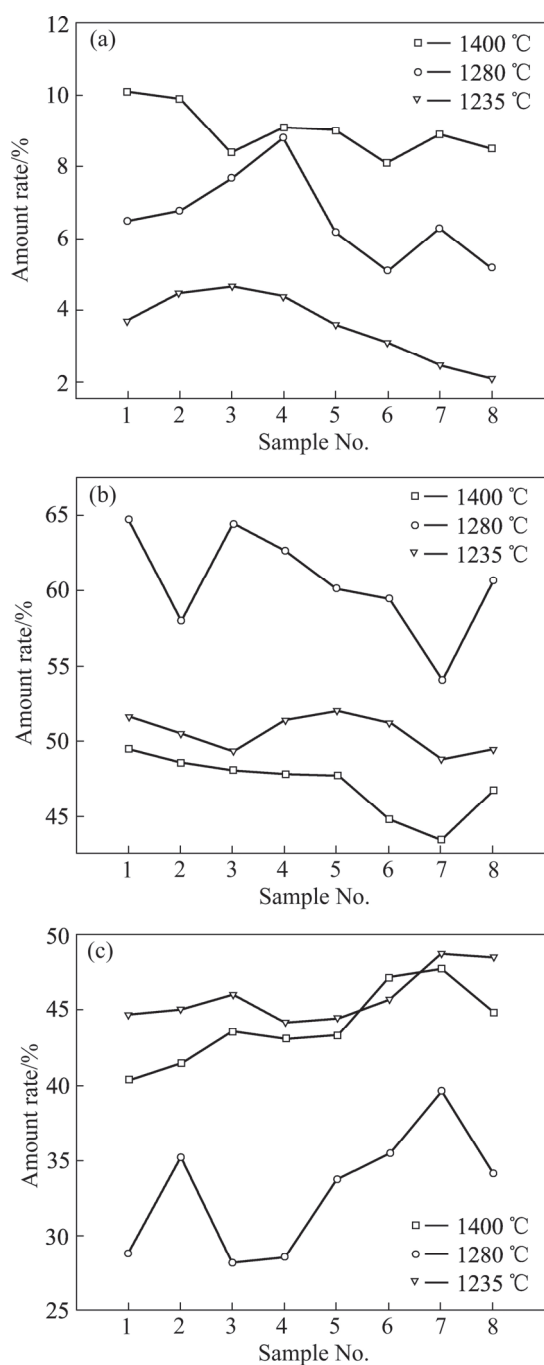


图8 不同浇注温度下各类型偏析点的数量比

Fig. 8 Amount rate of various types of segregation points at different pouring temperatures: (a) Type I; (b) Type II; (c) Type III

晶组织分形维数的关系。由图 10 可知,随着分形维数的增加, I 级偏析点面积占比下降, II 级偏析点面积占比上升,而 III 级偏析点体积占比无显著变化规律。如浇铸温度为 1280 °C 时, I 类偏析点面积占比从 60% 下降至 10%, II 类偏析点面积占比从 35% 上升到 80%。Cu-15Ni-8Sn 合金的偏析是由于

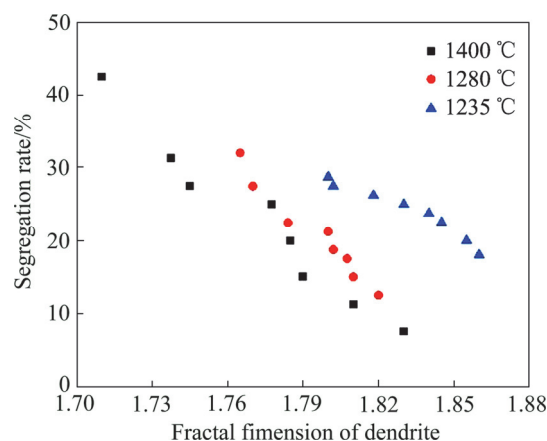


图9 偏析率与树枝晶组织分形维数的关系

Fig. 9 Relationship between segregation ratio and fractal dimension of dendrite

富 Sn 液相在枝晶间通道流动形成的。因此,铸坯的偏析程度与液相的流动能力相关。铸坯内部富 Sn 的液相流动能力越强,最终铸坯的偏析越严重。当树枝晶组织形貌的自相似复杂程度越高,即分形维数越大时,枝晶生长越复杂,造成富 Sn 的液相在枝晶通道的流动阻力增大,偏析率下降。同时,残余液相被分割成小区域,形成小偏析点、导致大的 I 类偏析点面积占比下降,而面积相对较小的 II 类偏析点面积占比升高。

2.3 二次枝晶间距与分形维数之间的关系

目前在有色合金铸态组织的研究中,二次枝晶间距是一个重要表征手段^[16-17]。因此,本文对树枝晶组织的分形维数和二次枝晶间距的关系进行了统计分析。

图 11 所示为 1280 °C 下铸锭二次枝晶间距和分形维数的统计结果。从图 11 可以看出,铸锭由表层至心部的二次枝晶间距逐渐增大。二次枝晶间距的改变主要受到冷却速度的影响。从表层至心部,熔体冷却速度下降,导致二次枝晶间距变大。与此同时,树枝晶的形貌也发生了较大改变(见图 2、3 和 4)。但二次枝晶间距只能描述树枝晶分枝间的一维特征长度值,对三种晶区的形貌特征的变化并不能进行表征。而分形维数弥补了二次枝晶间距在描述形貌特征上的局限性。如图 11 所示,铸锭由表层至心部的树枝晶分形维数逐渐增大,表明从激冷区、柱状晶区再到等轴晶区,树枝晶形貌的自相似复杂程度逐渐增大。

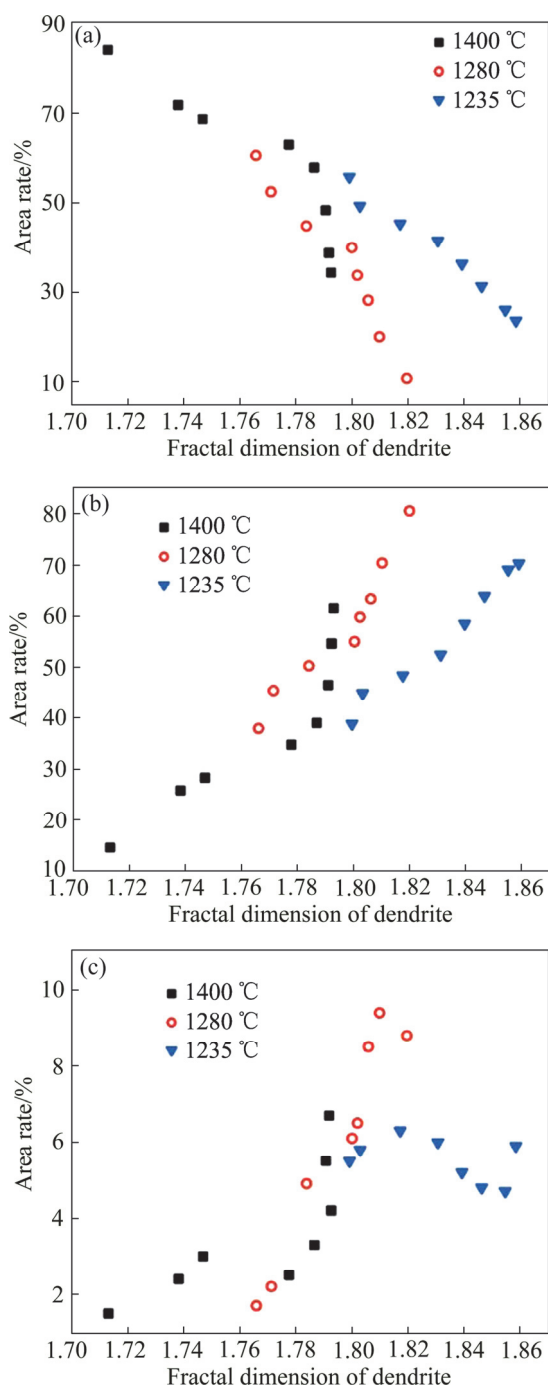


图 10 偏析点面积占比与树枝晶组织分形维数的关系

Fig. 10 Relationship between area rate of segregation points and fractal dimension of dendrite: (a) Type I; (b) Type II; (c) Type III

2.4 树枝晶组织分形维数与偏析组织分形维数的关系

图 12 所示为树枝晶组织分形维数与偏析组织分形维数的关系。由图 12 可知, 在任意一个浇铸温度, 随着树枝晶组织分形维数的增大, 偏析组织

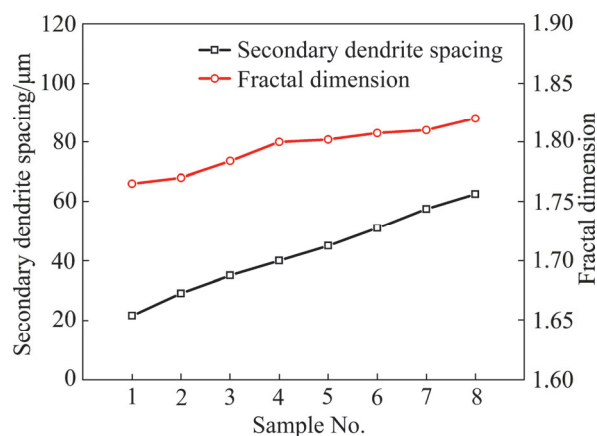


图 11 合金铸锭不同位置的二次枝晶间距和分形维数

Fig. 11 Fractal dimension and secondary dendrite spacing at different positions of alloy ingot

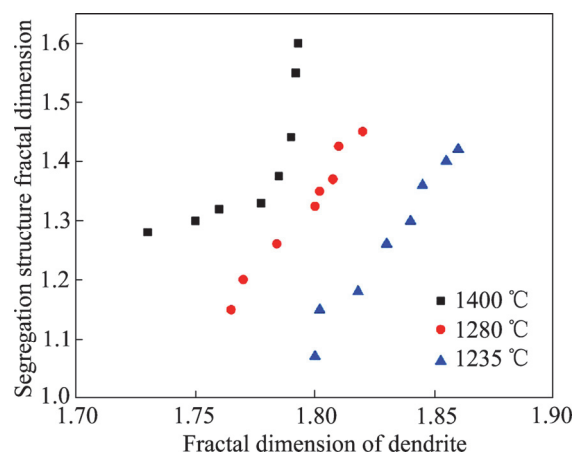


图 12 偏析组织分形维数与树枝晶组织分形维数的关系

Fig. 12 Relationship between segregation structure fractal dimension and fractal dimension of dendrite

分形维数增大。如浇铸温度为 1280 °C 时, 随着树枝晶组织分形维数的增加, 偏析组织分形维数从 1.15 增加至 1.45, 二者在一定程度上呈正相关关系。在 Cu-15Ni-8Sn 合金凝固时, 贫 Sn 的 α 相以树枝晶的方式生长。树枝晶之间发生连接及搭桥, 将富 Sn 的液相分割成 I、II、III 三类不同面积的偏析点。树枝晶组织分形维数越大, 即树枝晶的自相似复杂程度越大, 被分隔的偏析点的形貌轮廓也变得复杂, 从而偏析组织的分形维数增大。

3 结论

1) Cu-15Ni-8Sn 合金的微观组织由树枝晶组织和偏析组织构成, 树枝晶组织分形维数可以作为衡

量微观组织非均匀性的重要指标。浇铸温度为 1280 ℃ 时, 随着树枝晶组织分形维数的增加 (1.77~1.82), 偏析率从 32%降低至 12.5%。与此同时大偏析点逐渐向小偏析点转变, I 类偏析点面积占比从 60%下降至 10%, II 类偏析点面积占比从 35%上升到 80%。

2) 相对于二次枝晶间距, 分形维数弥补了二次枝晶间距在描述树枝晶组织形貌特征上的局限性, 可以定量描述铸坯树枝晶主干的二维形貌轮廓特征, 能更加准确地描述 Cu-15Ni-8Sn 合金铸锭中的组织非均匀性。

3) 树枝晶组织分形维数与偏析组织分形维数在一定程度上呈正相关关系, 浇铸温度为 1280 ℃ 时, 随着树枝晶组织分形维数的增加, 偏析组织分形维数从 1.15 增加至 1.45。

4) 选择较低的浇铸温度有利于得到偏析率较低、组织分布更加均匀的铸锭。

REFERENCES

- [1] ZHANG Y, XIAO Z, ZHAO Y Y, LI Z, XING Y, ZHOU K C. Effect of thermo-mechanical treatments on corrosion behavior of Cu-15Ni-8Sn alloy in 3.5wt% NaCl solution[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2017, 199: 54–66.
- [2] SINGH J B, CAI W, BELLON P. Dry sliding of Cu-15wt%Ni-8wt%Sn bronze: Wear behaviour and microstructures[J]. *Wear*, 2007, 263(1/2/3/4/5/6): 830–841.
- [3] CARIS J, LI D Q, STEPHENS J J Jr, LEWANDOWSKI J J. Microstructural effects on tension behavior of Cu-15Ni-8Sn sheet[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(3): 769–781.
- [4] 侯自兵, 曹江海, 常毅, 等. 基于分形维数的模具钢电渣重熔铸坯碳偏析形貌特征研究[J]. *金属学报*, 2017, 53(7): 769–777.
HOU Zi-bing, CAO Jiang-hai, CHANG Yi, et al. Morphology characteristics of carbon segregation in Die steel billet by ESR based on fractal dimension[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(7): 769–777.
- [5] 张英哲. Cu-15Ni-8Sn 合金垂直半连续铸造工艺及性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 7–8.
ZHANG Ying-zhe. Study on vertical semi-continuous casting process and properties of Cu-15Ni-8Sn alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018: 7–8.
- [6] ZHAO C, WANG Z, PAN D Q, et al. Effect of Si and Ti on dynamic recrystallization of high-performance Cu-15Ni-8Sn alloy during hot deformation[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(12): 2556–2565.
- [7] 罗保民. Al、Si 对低锡 Cu-Ni-Sn 合金微观组织和力学性能的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 21–22.
LUO Bao-min. Effect of Al and Si on microstructure and mechanical properties of Cu-Ni-Sn alloy with low Sn content[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 21–22.
- [8] COLLINS L E, BARRY J R. Reduced segregation in rapidly solidified Cu-Ni-Sn alloys[J]. *Materials Science and Engineering*, 1988, 98: 335–338.
- [9] 张少宗, 江伯鸿, 丁文江. 国内 Spinodal 分解 Cu-Ni-Sn 系合金研究进展[J]. *材料导报*, 2006, 20(8): 84–86.
ZHANG Shao-zong, JIANG Bo-hong, DING Wen-jiang. Research progress on spinodal Cu-Ni-Sn alloys in China[J]. *Materials Review*, 2006, 20(8): 84–86.
- [10] ZHANG G M, CHEN C, WANG X J, et al. Additive manufacturing of fine-structured copper alloy by selective laser melting of pre-alloyed Cu-15Ni-8Sn powder[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(9/10/11/12): 4223–4230.
- [11] WANG J B, ZHOU X L, LI J H, et al. Microstructures and properties of SLM-manufactured Cu-15Ni-8Sn alloy[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31: 100921.
- [12] SHEN Z, ZHOU B F, ZHONG J, et al. Evolutions of the micro- and macrostructure and tensile property of Cu-15Ni-8Sn alloy during electromagnetic stirring-assisted horizontal continuous casting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2019, 50(5): 2111–2120.
- [13] 潘德清, 李道喜, 牛冬鑫, 等. 气隙热阻对水平连铸 Cu-15Ni-8Sn 合金组织和成分分布影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(1): 69–74.
PAN De-qing, LI Dao-xi, NIU Dong-xin, et al. Effect of air gap thermal resistance on microstructure and composition distribution of horizontal continuous casting Cu-15Ni-8Sn alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2020, 40(1): 69–74.
- [14] 曹江海, 侯自兵, 郭东伟, 等. 模具钢电渣重熔铸坯凝固组织形貌的分形特征[J]. *钢铁研究学报*, 2019, 31(3): 286–295.
CAO Jiang-hai, HOU Zi-bing, GUO Dong-wei, et al. Fractal morphology characteristics of solidification structure in electroslog remelting billet of Die steel by ESR[J]. *Journal of*

- Iron and Steel Research, 2019, 31(3): 286–295.
- [15] 侯自兵, 成国光. 特殊钢连铸方坯中心区域宏观偏析定量化模型研究[J]. 连铸, 2011, 36(S1): 306–311.
- HOU Zi-bing, CHENG Guo-guang. Quantitative model on central region macrosegregation of continuously cast billet of special steel[J]. Continuous Casting, 2011, 36(S1): 306–311.
- [16] WANG W, HOU Z B, CHANG Y, et al. Effect of superheat on quality of central equiaxed grain zone of continuously cast bearing steel billet based on two-dimensional segregation ratio[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25(1): 9–18.
- [17] SPITTLE J A. Columnar to equiaxed grain transition in as solidified alloys[J]. International Materials Reviews, 2006, 51(4): 247–269.

Segregation characteristic of vertical continuous casting Cu-15Ni-8Sn alloy ingot based on fractal dimension

NIU Dong-xin¹, PAN De-qing¹, ZHONG Min^{2,3}, WU Yuan^{2,3}, LUO Zong-qiang¹, ZHANG Wei-wen¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Shantou Huaxing Metallurgical Equipment Co., Ltd., Shantou 515063, China;

3. Shantou Huaxing (Raoping) Copper Co., Ltd., Raoping 515726, China)

Abstract: In this work, Cu-15Ni-8Sn alloy ingot with diameter of 160mm was prepared by vertical continuous casting. Based on fractal dimension, the structure in homogeneity in Cu-15Ni-8Sn alloy was investigated. The results show that microstructure of Cu-15Ni-8Sn alloy consists of dendrite structure and segregation structure, and the fractal dimension of dendrite structure can be used as an important index to measure the microstructure in homogeneity. Under the pouring temperature of 1280 °C, with the increase of fractal dimension of dendrite structure, the segregation rate decreases from 32% to 12.5%. At the same time, the area proportion of segregation point I decreases from 60% to 10%, and that of segregation point II increases from 35% to 80%, which indicates that large segregation points gradually change to small segregation points. Moreover, compared with the secondary dendrite spacing, the fractal dimension compensates for the limitation of secondary dendrite spacing in describing the dendrite morphology of Cu-15Ni-8Sn alloy. Additionally, the fractal dimension of dendrite structure and the fractal dimension of segregation structure are positively correlated. Under the pouring temperature of 1280 °C, the fractal dimension of segregation structure increases from 1.15 to 1.45 with the increase of fractal dimension of dendrite structure. The lower pouring temperature is beneficial to obtain the ingot with lower segregation rate and more uniform microstructure distribution.

Key words: Cu-15Ni-8Sn alloy ingot; fractal dimension; segregation characteristic; vertical continuous casting

Foundation item: Project(2016B090931002) supported by the R&D Special Fund Project of Guangdong Province, China; Project(2019ZX17) supported by the Science and Technology Planning Project of Chaozhou, China; Project(2019ST066) supported by the Major Scientific and Technological Projects of Shantou, China

Received date: 2020-11-09; **Accepted date:** 2021-03-11

Corresponding author: ZHANG Wei-wen; Tel: +86-13642315239; E-mail: mewzhang@scut.edu.cn

(编辑 龙怀中)