

基于 CAFE 法的 Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn 连铸坯凝固组织模拟研究

党博宇¹, 吴慧云¹, 张梦飞¹, 段庆阳², 冯泽强², 赵 耿², 景 洁²

(1. 中北大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030051; 2. 太原晋西春雷铜业有限公司, 山西 太原 030008)

摘要: Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn 合金因成本低廉且具有良好的加工性能, 是制造电连接器的优选材料。连续铸造作为该合金板带制备过程中的关键工序, 其凝固组织对材料加工过程和最终产品性能具有显著影响。本文采用元胞自动机-有限元耦合模型(CAFE)法, 对 Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn 合金在连续铸造条件下的凝固组织演化进行了数值模拟。结果显示, 模拟得到的柱状晶与等轴晶比例分别为 87.4% 和 12.6%, 与低倍组织实测结果(柱状晶比例 88.6%、等轴晶比例 11.4%) 在晶粒类型、分布区域及形貌特征方面高度一致, 验证了所构建模型的可靠性与准确性。在此基础上, 研究了形核过冷度与形核密度对凝固组织的影响。结果表明: 形核过冷度升高会导致等轴晶区比例降低, 当形核过冷度从 1 K 提升至 6 K 时, 等轴晶区面积占比由 17.1% 下降至 9.2%; 而形核密度的增加有利于等轴晶区比例的提高, 随着形核密度由 $0.5 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 增大到 $40 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$, 等轴晶区比例由 10.4% 上升至 18.5%。

关键词: CAFE 法; Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn 合金; 连续铸造; 凝固组织; 形核参数

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.03.009

中图分类号: TG166 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)03-0077-09

铜合金因具有良好的导电性和力学性能, 主要应用于电子信息等领域^[1-2]。目前常见的铜合金体系包括 Cu-Al-Ni 系^[3-4]、Cu-Ni-Si 系^[5]、Cu-Cr-Zr 系^[6-7]、Cu-Fe-P 系等。其中, Cu-Fe-P 合金因成本低廉、加工与焊接性能优良, 被广泛用于制造电连接器等关键部件, 特别是 Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn 作为一种典型的 Cu-Fe-P 系合金, 在导电型结构件中具有较高的应用价值。Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn 合金电连接器的制备过程包括连铸、热轧、固溶、冷轧和多级时效等工序^[8-9], 其中连铸过程的凝固组织演变对材料后续加工及最终性能具有决定性影响。由于该合金的热导率高、冷却速度快, 若工艺控制不当, 易出现温度梯度过大、柱状晶发达、等轴晶比例低及晶粒粗大等问题, 严重影响其强度与导电性^[10]。根据凝固理论, 凝固组织与温度梯度(G)和凝固速度(R)相关, G/R 比值可用于判断柱状晶—等轴晶的转变。当 G/R 较大时, 固液界面前沿的成分过冷区较窄, 柱状晶稳定生长; 而当 G/R 减小时, 异质形核作用增强, 凝固组织逐渐由柱状晶向等轴晶转变^[11]。因此, 深入研究 Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn 合金的凝固组

织演变规律, 对优化其铸造工艺和提升铸坯组织均匀性具有重要意义。

连铸过程中凝固组织的形成与演变受宏观温度场、流场以及微观溶质传输等多场耦合作用影响, 其过程复杂, 单纯依靠实验手段难以对组织演变行为进行全过程、可视化的揭示。相比之下, 数值模拟技术能够在宏观尺度准确描述温度梯度与流动状态, 在微观尺度捕捉晶粒形核、生长及竞争行为, 为凝固组织调控机制研究和工艺参数优化提供了可靠的理论工具^[12-13]。在众多模拟方法中, CAFE (cellular automaton-finite element) 模型因能够同时耦合宏观传热与微观晶粒生长行为而被广泛用于金属凝固组织预测。大量研究表明, CAFE 模型不仅可再现凝固过程中柱状晶生长、等轴晶形核与柱状晶—等轴晶转变 (CET) 等关键组织特征, 还能通过与实验对比获得较高的预测精度^[14]。例如, Cui 等^[15]利用 ProCAST 软件的 CAFE 模块, 对 Ti-6Al-4V 钛合金阶梯试样凝固过程进行多尺度模拟, 揭示了铸件表面至心部由柱状晶向等轴晶的转变规律, 并通过精密铸造试验验证了模拟可靠性。率先实现了铸件

收稿日期: 2025-08-31; 修订日期: 2026-03-28

基金项目: 太原市“揭榜挂帅”项目(2024TYJB0113); 天津市科学基金(202401, 202403); 中央引导地方科技发展资金项目(YDJJSX2024C009); 浙江省博士后科研项目(ZJ2024127)

作者简介: 党博宇(2003—), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 研究方向: 高温合金涂层, E-mail: dangboyu2025@163.com; 通信作者: 吴慧云, 工程师, E-mail: 565220853@qq.com

宏观尺度晶粒形貌与尺寸的定量预测,平均晶粒直径模拟与试验吻合率达80%~99%,其中薄壁区域达99%。该成果突破了钛合金凝固组织预测的工程难题,为航空航天领域关键铸件工艺优化提供了低成本、高精度的数字化解决方案。Li等^[16]在研究高速连铸薄板坯时,将CAFE模型与实际连铸速度、过热度及结晶器冷却条件相结合,定量预测了凝固末端的CET位置、晶粒尺寸分布,并提出了优化冷却强度与拉速的工艺窗口,为工业薄板坯生产提供了重要理论依据。近年来,研究者将CAFE模型应用于Cu-Ni-Sn、Cu-Ni-Si等铜合金体系的凝固组织模拟,研究其凝固过程和组织演变规律^[17-18]。相关研究为铜合金凝固过程的数值模拟与工艺优化奠定了良好的基础。然而,现有研究多集中于Cu-Ni或Cu-Sn等体系,对Cu-Fe-P合金凝固组织的模拟研究仍十分有限,尤其缺乏关于形核参数对凝固组织演变影响规律的系统性、量化分析。鉴于Cu-Fe-P合金在电子连接器等领域的广泛应用,其连铸凝固组织的形成机理亟须深入研究。基于此,本文采用CAFE模型模拟计算Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn合金在连铸过程中的凝固组织转变情况,探讨形核参数对凝固组织特征的影响,旨在为提升工业生产中Cu-Fe-P合金铸坯的质量提供科学依据。

1 模型与方法

1.1 晶粒形核模型

在本研究中,应用异质形核模型描述Cu-Fe-P合金连铸凝固中晶粒的形成情况。该模型源于Rappaz等^[19-20]提出的连续形核模型理论,具体如公式(1)所示,而公式(1)表示了晶粒密度的变化,其中, $dn/d(\Delta T)$ 与高斯分布相关,具体形式为公式(2):

$$n(\Delta T) = \int_0^{\Delta T} \frac{dn}{d(\Delta T)} d(\Delta T) \quad \text{式(1)}$$

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\Delta T_{\sigma} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta T - \Delta T_{\max}}{\Delta T_{\sigma}} \right)^2 \right] \quad \text{式(2)}$$

式中: dn 为晶粒密度的变化量; $d(\Delta T)$ 表示某一过冷度下晶粒密度;而 $dn/d(\Delta T)$ 表示单位过冷度区间内晶粒密度的变化率; n 为晶粒密度; $n_{\max}$ 为最

大形核密度; ΔT 为过冷度; $\Delta T_{\max}$ 为最大过冷度; ΔT_{σ} 为形核过冷度标准方差^[21]。

1.2 枝晶生长的动力学模型

凝固枝晶的生长与枝晶前沿过冷度(包括动力学、成分、热以及曲率等多种过冷效应)相关。枝晶前沿过冷度如公式(3)所示:

$$\Delta T = \Delta T_c + \Delta T_l + \Delta T_k + \Delta T_r \quad \text{式(3)}$$

式中: ΔT_c 为成分过冷; ΔT_l 为热力学过冷; ΔT_k 为生长动力学过冷; ΔT_r 为固-液界面曲率过冷。对于大多数的金属材料而言,成分过冷度为主要影响因素,可以用KGT(Kurz-Giouanola-Trivedi)模型计算枝晶尖端生长速度^[22],如公式(4)所示:

$$v(\Delta T) = a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^2 \quad \text{式(4)}$$

式中: $v(\Delta T)$ 为计算时间步长 ΔT 内的生长速率; a_2 , a_3 为生长动力学参数; ΔT 为过冷度。

1.3 模型建立与模拟参数设定

本次研究以Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn为研究对象,具体化学成分见表1。计算过程如下:建立长度420 mm、宽度210 mm、高度8000 mm的立体铸坯模型。结晶器模型尺寸为425 mm × 215 mm × 395 mm(长 × 宽 × 高),对其网格划分,模型示意图如图1所示。在模拟计算过程中,采用稳态模型算法,铸坯材料设置为Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn合金,浇注初始温度设定为1210 ℃。结晶器为铜合金,初始温度为30 ℃。基于ProCAST软件计算的热物理性参数结果和已有相关文献报道结果,设置相应的材料热物理性能参数(表2)。对应组织模拟参数为:体形核最大过冷度 $\Delta T_{v \max}$ 为3 K,面形核最大过冷度 $\Delta T_{s \max}$ 为1 K;体过冷度的标准方差 $\Delta T_{v \sigma}$ 为0.1 K,面过冷度的标准方差 $\Delta T_{s \sigma}$ 为0.1 K;体形核最大密度 $n_{v \max}$ 为 $3 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$,面形核最大密度 $n_{s \max}$ 为 $5 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$ 。枝晶尖端生长动力学系数 $a_2=4.68 \times 10^{-6}$, $a_3=6.46 \times 10^{-5}$ 。

1.4 凝固实验研究

采用中频感应熔炼炉熔炼Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn合金熔液,并进行连铸实验。浇注温度控制在(1200 ± 5 ℃)范围内,结晶器材的尺寸为425 mm × 215 mm × 395 mm(长 × 宽 × 高),材质为铜合金。结晶器初始温度设为30 ℃,结晶器内通入冷却水,冷却水流量为34~36 m³/h。当熔体在结晶器中形成初生

表1 Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn合金成分

Table 1 Chemical composition of Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn alloy (%, mass fraction)

元素名称	Fe	P	Zn	Cu
Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn	1.90~2.10	0.02~0.04	0.10~0.15	Bal

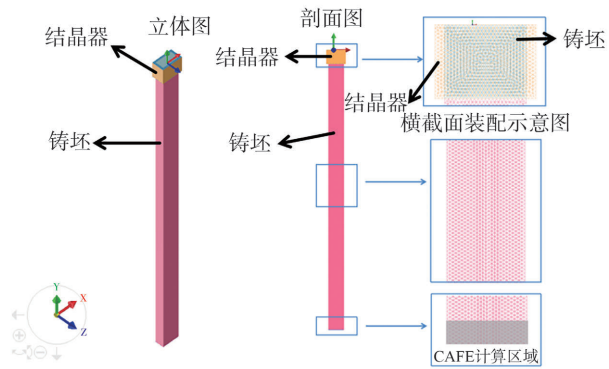


图1 Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn合金连铸坯模型
Fig. 1 Continuous casting billet model of Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn alloy

坯壳后，在引锭杆牵引下以 1.08×10^{-3} m/s 的速度连续拉坯。获得的连铸坯经过机械加工截取截面，然后打磨、抛光，并经 $\text{FeCl}_3 + \text{HCl}$ 溶液腐蚀，观察凝固组织特征，并将实验结果与 CAFE 模拟结果进行对比分析。

2 结果与分析

2.1 铸坯凝固组织场模拟

在浇注温度 1200 °C、拉坯速度 1.08×10^{-3} m/s、结晶器换热系数 $5000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 条件下，利用数值模拟得到 Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn 合金连铸坯凝固过程中截面组织场的演变规律，如图 2 所示。凝固组织演变主要受传热条件影响。随着凝固的推进，热量由熔体中心逐步向表面传递，柱状晶沿热流方向的反向由表面向心部生长，并通过竞争生长机制吞

表2 Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn热物性参数表

Table 2 Thermophysical properties of Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn alloy

热物理性参数	符号	数值
固相线温度	T_s	1038 °C
液相线温度	T_l	1090 °C
结晶潜热	Q	232 J/g
导热系数	λ	105 W/(m·K)
比热容	c_p	0.54 J/(g·K)
密度	ρ	$8.93 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

续降低，柱状晶凝固前沿局部过冷度达到临界形核条件，诱发大量晶核产生。同时中心熔体温度梯度差异小，使晶粒自由生长形成芯部等轴晶区^[24]。

如图 3 所示，将数值模拟结果与连铸坯的低倍组织对比发现，两者具有良好的一致性。对比图 3(a) 与图 3(b) 可见，模拟结果与实验结果均呈现出表面激冷层，中间区域为柱状晶区，内部为等轴晶区。图 3(c) 和图 3(d) 分别对应图 3(a) 中的 A 区域和图 3(b) 中的 C 区域，观察发现，模拟结果和实验结果的柱状晶区在晶粒生长方向、形貌特征及取向排列上具有良好的对应关系；图 3(e) 与图 3(f) 分别对应图 3(a) 中的 B 区域和图 3(b) 中的 D 区域，观察发现，两者在中心等轴晶区的晶粒尺寸和形态分布也具有良好对应性。采用 Image-ProPlus (IPP) 图像分析软件对模拟与实验结果中柱状晶与等轴晶比例进行统计分析。表 3 与表 4 分别为 5 次实验与模拟后根据图像分析出的柱状晶与等轴晶占比。在数值模拟结果中，基于 CAFE 模型输出的晶粒组织图像计算分析后，第 1~5 次统计所得柱状晶面积占比分别为 86.9%、87.6%、88.1%、86.8% 和 87.5%，对应等轴晶面积占比分别为 13.1%、12.4%、11.9%、13.2% 和 12.5%。对上述 5 次统计结果取平均值后，得到模拟结果中柱状晶与等轴晶的平均面积占比分别为 87.4% 和 12.6%。对实验获得的连铸坯低倍组织

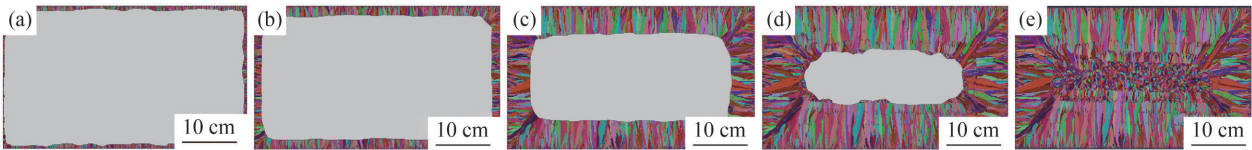


图2 模拟连铸坯横截面凝固组织场演变过程
Fig. 2 Evolution of solidification microstructure field in the cross-section of simulated continuous casting billet:
(a) 3 s; (b) 7 s; (c) 41 s; (d) 77 s; (e) 130 s

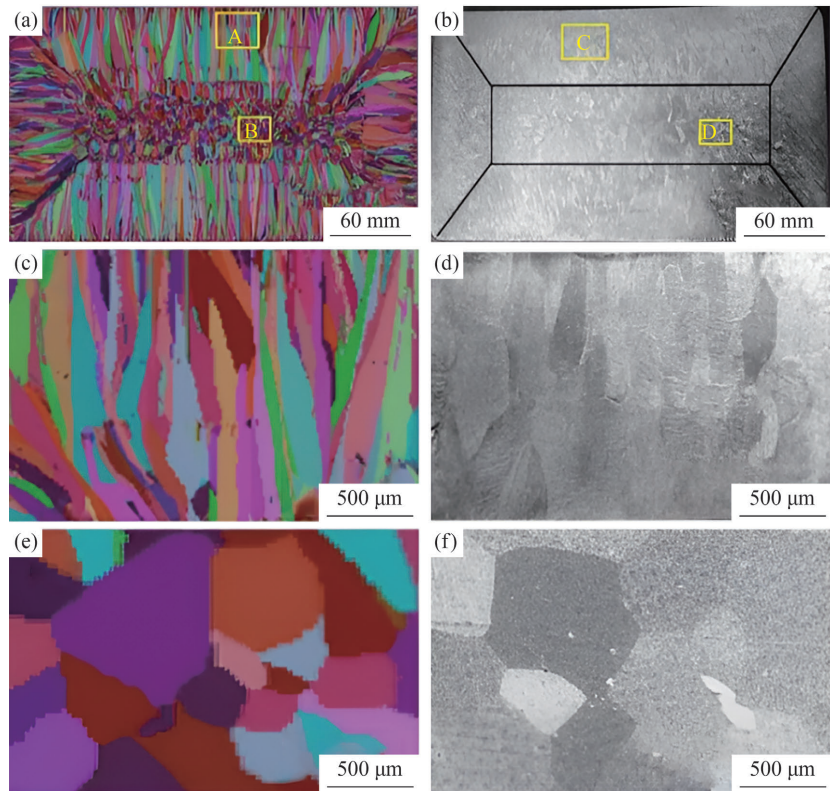


图3 连铸坯横截面组织模拟结果(a, c, e)与实验结果(b, d, f)比较

Fig. 3 Comparison between (a, c, e) simulated and (b, d, f) experimental results of the microstructure in the cross-section of continuous casting billet

表3 模拟结果与实验结果的柱状晶区面积占比统计结果

Table 3 Simulation and experiment results of the area fraction of columnar grain zone (%)

类型	1	2	3	4	5	平均值
实验	89.2	88.1	87.9	88.7	89.1	88.6
模拟	86.9	87.6	88.1	86.8	87.5	87.4

表4 模拟结果与实验结果的等轴晶区面积占比统计结果

Table 4 Simulation and experiment results of the area fraction of equiaxed grain zone (%)

类型	1	2	3	4	5	平均值
实验	10.8	11.9	12.1	11.3	10.9	11.4
模拟	13.1	12.4	11.9	13.2	12.5	12.6

图像,采用相同的统计方法进行定量分析。对5个不同试样横截面进行统计,第1~5次统计中柱状晶面积占比分别为89.2%、88.1%、87.9%、88.7%和89.1%,对应等轴晶面积占比分别为10.8%、11.9%、12.1%、11.3%和10.9%。对实验统计结果取平均值后,得到实验结果中柱状晶与等轴晶的平均面积占比分别为88.6%和11.4%。由此可以得出,模拟结

果中柱状晶与等轴晶的比例分别为87.4%和12.6%,与实验结果中的88.6%和11.4%基本一致。

对Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn合金凝固组织特征分析可知,在该工艺条件下凝固组织中柱状晶发达、等轴晶比例较低。这主要源于该合金体系较高的热导率使热量在凝固过程中迅速传递,导致较大的温度梯度(G)。在连铸条件下,较低的拉坯速度与较慢的凝固速率使 G/R 比值增大,有利于柱状晶沿热流方向稳定生长,从而抑制等轴晶的形成与扩展。为改善组织结构,可通过降低温度梯度、提高形核密度等措施,促进等轴晶形核与长大,实现晶粒细化与组织均匀化。

在Cu-Fe-P体系合金中,微量Fe元素不仅能够提高合金的强度和硬度,还可起到细化晶粒、延缓再结晶过程的作用;而微量P元素具有脱氧和抑制氢脆的功能,有利于提升合金组织的整体稳定性。对于Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn合金而言,Fe和P元素在Cu基体中的固溶度较低,在凝固过程中随着凝固界面的不断推进,这两种元素易在铸坯中心区域

发生溶质富集。当局部溶质浓度达到 Fe_3P 相的稳定区间时，析出相开始形核并逐渐长大，最终形成 Fe_3P 析出物。结合能谱分析结果与Fe-P二元相图，可对析出相的类型进行进一步判定。EDS分析结果表明，析出相区域内Fe和P元素含量显著升高，而Cu含量相对较低，表明该相属于Fe-P富集相。如图4所示的Fe-P二元相图，在Fe富集条件下，当P含量处于10%~20%范围内时，体系中稳定存在 Fe_3P 相，且该相在较宽的温度区间内具有良好的热力学稳定性。综合析出相的成分特征以及连铸过程中实际冷却条件，可以合理推断本文中观察到的析出相为 Fe_3P 相。对实验制备的Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn合金铸坯中心等轴晶区进行SEM形貌观察，其结果如图5所示。在图5(a)中可以观察到等轴晶区内分布

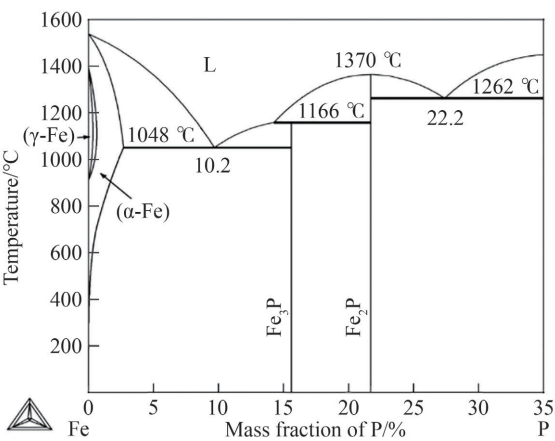


图4 Fe-P 二元相图

Fig. 4 Fe-P binary phase diagram^[25]

有尺寸约为1~2 μm 的球状析出相。进一步对该析出相进行元素分析发现，如图5(b~h)所示，析出相

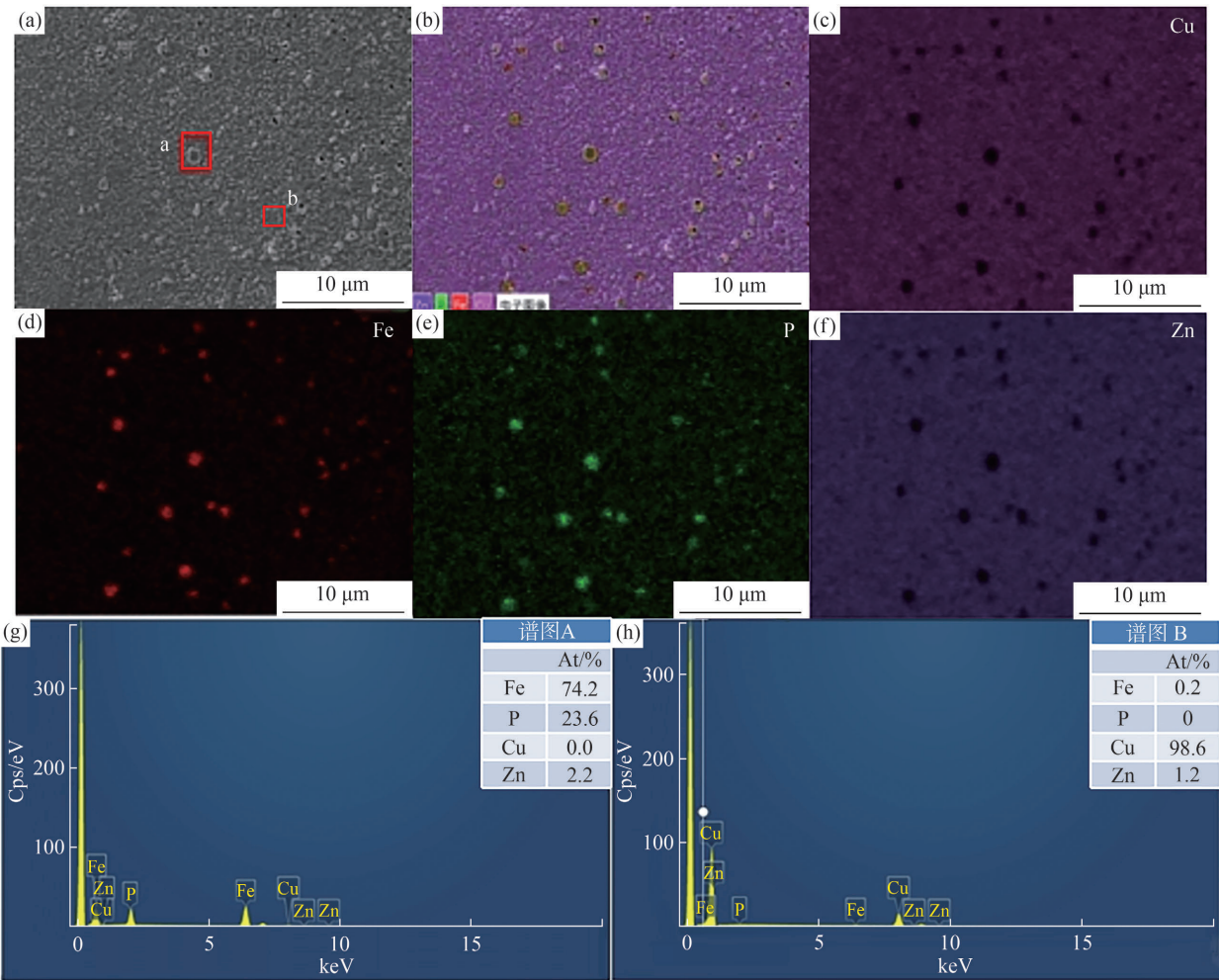


图5 Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn合金铸坯中心SEM形貌观察图与EDS分析图：(a)SEM；(b)元素分布；(c)Cu；(d)Fe；(e)P；(f)Zn；(g)a点EDS；(h)b点EDS

Fig. 5 SEM morphology and EDS analysis of the center of Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn alloy billet: (a) SEM image; (b~f) Elemental distribution; (g) EDS spectrum at point a, (h) EDS spectrum at point b

颗粒中Fe和P元素明显富集,其原子比约为3:1,表明凝固过程中形成的析出相主要为Fe₃P相。

2.2 形核参数对组织场模拟结果的影响

2.2.1 形核过冷度的影响

基于CAFE模型探讨形核过冷度对Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn合金凝固组织的影响。图6为不同过

冷条件下的组织形貌。形核过冷度升高会导致等轴晶区比例降低,这一规律与钢铁材料中凝固组织的相关研究结果相一致。例如,Pang等^[26]在研究430铁素体不锈钢凝固组织时,同样发现了随着形核过冷度增加,凝固组织中柱状晶区比例增加、等轴晶区比例减小的情况。

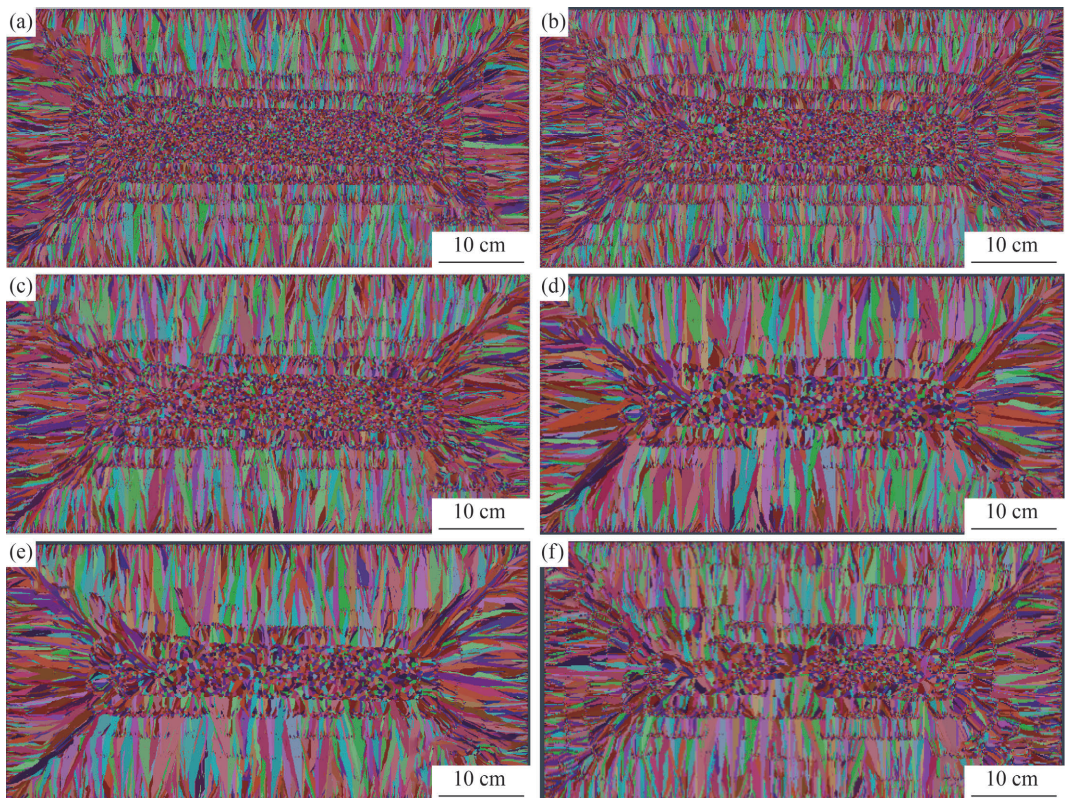


图6 不同形核过冷下的模拟结果

Fig. 6 Simulation results under different nucleation undercooling: (a) 1 K; (b) 2 K; (c) 3 K; (d) 4 K; (e) 5 K; (f) 6 K

为进一步定量分析,统计了不同形核过冷度下柱状晶区与等轴晶区的比例。结果如图7所示,当形核过冷度由1 K增加至6 K时,等轴晶区面积占比由17.1%降至9.2%,柱状晶区面积占比则由82.9%升至90.8%。研究表明,过冷度升高会抑制晶核的均匀产生,导致初生晶核数量减少;在柱状晶生长前端,由于缺乏足够的晶核阻碍,晶粒得以快速生长,从而促进柱状晶区的扩展,同时限制等轴晶区的发展^[27-28]。

2.2.2 形核密度的影响

本研究在维持其他成核参数以及连铸工艺条件恒定的基础上,探究了形核密度对铸锭凝固组织

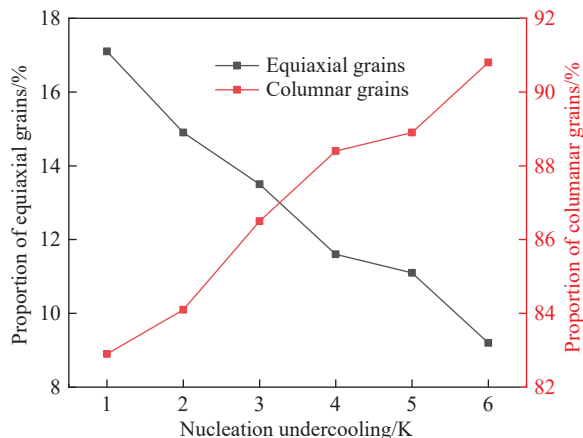


图7 形核过冷度与等轴晶、柱状晶面积占比关系

Fig. 7 Relationship between nucleation undercooling and area fractions of equiaxed and columnar grains

的影响机制。图8为不同形核密度下铸坯凝固组织的模拟情况。随着形核密度的增大，柱状晶区面积占比下降，等轴晶区面积占比提高。图9为不同形核密度下等轴晶区与柱状晶区的占比情况。结果表

明，当形核密度由 $0.5 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 增大到 $40 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ ，等轴晶区比例由10.4%上升至18.5%，柱状晶区比例从89.6%减至81.5%。这一规律表明，较高的形核密度可有效抑制柱状晶生长，有利于提高等轴晶比例^[29]。

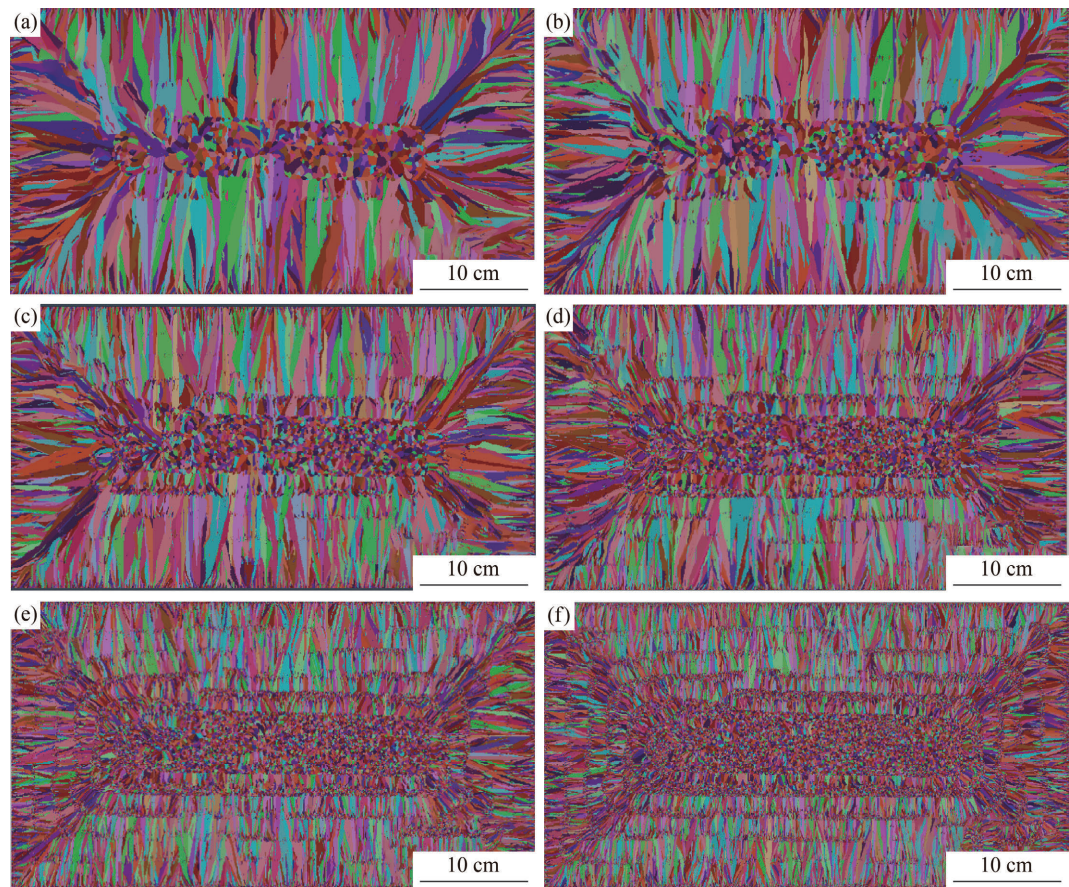


图8 不同形核密度的铸坯组织场结果

Fig. 8 Microstructure field of the billet under different nucleation densities: (a) $0.5 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$; (b) $1 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$; (c) $3 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$; (d) $7 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$; (e) $20 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$; (f) $40 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$

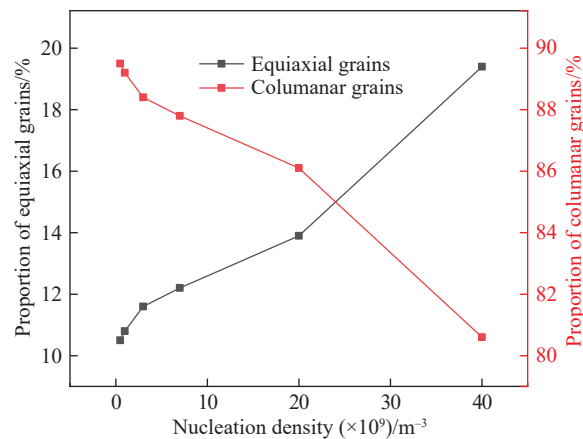


图9 形核密度与等轴晶、柱状晶面积占比的关系

Fig. 9 Relationship between nucleation density and area fractions of equiaxed and columnar grains

3 结 论

本研究采用CAFE模型对Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn合金在连续铸造条件下的凝固组织进行模拟计算，主要结论如下：

1) CAFE模拟结果表明，合金横截面凝固组织由表层细小等轴晶逐步过渡为沿逆热流方向生长的柱状晶，并在中心区域重新形成等轴晶区，呈现典型的柱状—等轴晶复合组织特征。模拟结果中柱状晶比例为87.4%，等轴晶比例为12.6%，与低倍组织实测结果(柱状晶比例88.6%、等轴晶比例11.4%)在晶粒类型、分布区域及形貌特征方面高度一致，说明了CAFE模型的准确性。

2) Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn合金铸坯中心区域呈典型等轴晶组织特征,并且等轴晶内存在尺寸约为1~2 μm 的球状析出相。该析出相为 Fe_3P ,其形成主要是由于凝固过程中Fe和P在Cu基体中的固溶度极低,随凝固界面推进,在中心区域发生Fe和P溶质富集,并逐渐形核长大形成 Fe_3P 析出相。

3)形核动力学参数对凝固组织具有显著影响。形核过冷度升高导致等轴晶比例下降,而形核密度增加则促进等轴晶形成。当形核过冷度由1 K增至6 K时,等轴晶比例由17.1%降至9.2%;形核密度由 $0.5 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 增至 $40 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 时,等轴晶比例由10.4%升至18.5%。该规律揭示了控制形核动力学参数可有效调节柱状晶—等轴晶转变,为Cu-Fe-P-Zn合金连铸工艺的组织细化与均匀化提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 李周,肖柱,姜雁斌,等. 高强导电铜合金的成分设计、相变与制备[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2009-2049.
- [2] 肖柱,丁燕军,王泽军,等. 先进铜基复合材料的研究与发展[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(12): 3789-3821.
- [3] Tian X L, Zhao Y H, Gu T, et al. Cooperative effect of strength and ductility processed by thermomechanical treatment for Cu-Al-Ni alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 849: 143485.
- [4] Zhang S X, Wu L, Gu T, et al. Effect of microstructure on the mechanical properties of ultrafine-grained Cu-Al-Ni alloys processed by deformation and annealing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 923: 166413.
- [5] 姜雁斌,黄承智,李周,等. 集成电路引线框架用铜合金研究现状[J]. 铜业工程, 2024(3): 131-144.
- [6] 李明茂,杨斌,王智祥. 高强高导 CuCrZr 合金熔炼技术研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(4): 252-253.
- [7] Gu T, Li J W, Xu F Q, et al. Effect of high temperature-high pressure treatment on microstructure and mechanical properties of Cu-Cr alloy[J]. Materials Research Express, 2020, 7(2): 026505.
- [8] 郑济森,张峻嘉,唐天轶,等. 形变热处理工艺对Cu-Fe-P合金组织与性能的影响[J]. 材料与冶金学报, 2023, 22(5): 489-494.
- [9] 邵烨,刘峰,程万林,等. 端子连接器用 Cu-Fe-P-Zn-Sn-Mg合金的热变形行为[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(3): 342-345.
- [10] 王旭锋,张真豪,高绪锋,等. Cu-Fe合金凝固过程中结构变化研究[J]. 原子与分子物理学报, 2025, 42(6): 183-192.
- [11] 董琦玮,汪明朴,贾延琳,等. Cu-Fe-P-Zn合金铸态及均匀化组织[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(12): 4658-4665.
- [12] 崔雨薇,赵宇宏,裴小龙,等. 基于边界网格投影的铸造模拟仿真网格剖分方法[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(5): 614-619.
- [13] 李静怡,赵宇宏,陈利文,等. 镁合金隔板铸件低压铸造工艺数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 588-592.
- [14] 许庆彦,柳百成. 铸造合金凝固组织的计算机模拟与预测[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(6): 401-406.
- [15] 崔新鹏,李峰,马静,等. Ti-6Al-4V 钛合金凝固组织的CAFE法模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(5): 717-720.
- [16] Li Y, Chang X N, Yang G Y, et al. Numerical simulation of solidification structures in continuous casting of a thin slab at high casting speed[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2023, 50(1): 21-29.
- [17] Lv Z, Sun Z J, Hou Z H, et al. Numerical and experimental research on solidification of T2 copper alloy during the twin-roll casting[J]. High Temperature Materials and Processes, 2022, 41(1): 1-7.
- [18] Mouralova K, Benes L, Prokes T, et al. Analysis of the machinability of copper alloy ampcoloy by WEDM[J]. Materials, 2020, 13(4): 893.
- [19] Rappaz M, Gandin C A, Desbiolles J L, et al. Prediction of grain structures in various solidification processes[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27(3): 695-705.
- [20] Rappaz M, Gandin C H A. Probabilistic modelling of microstructure formation in solidification processes[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1993, 41(2): 345-360.
- [21] Oldfield W. A quantitative approach to casting solidification: freezing of cast iron[J]. Transactions of the ASM, 1966, 59: 945-964.
- [22] Kurz W, Giovanola B, Trivedi R. Theory of microstructural

- development during rapid solidification [J]. *Acta Metallurgica*, 1986, 34(5): 823-830.
- [23] Yang J J, Yu H C, Yang H H, et al. Prediction of microstructure in selective laser melted Ti-6Al-4V alloy by cellular automaton [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 748: 281-291.
- [24] Jia H M, Feng X H, Yang Y S. Microstructure evolution and growth orientation of directionally solidified Mg-4 wt% Zn alloy with different growth rates [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, 30(12): 1185-1191.
- [25] 陆德平. 高强高导电铜合金研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [26] 庞瑞朋, 王福明, 李长荣. 基于 3D-CAFE 模型研究过冷度对 430 铁素体不锈钢凝固组织的影响 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42(5): 58-61, 65.
- [27] 杨庆宝, 王兰浩, 曾浩, 等. Cu-Sn 合金上引连铸凝固组织数值模拟 [J]. *铸造技术*, 2022, 43(2): 123-130.
- [28] 张威武, 汪渊源, 李彬, 等. AZ61 镁合金电磁连铸过程流场-温度场-组织的数值模拟 [J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(2): 241-247.
- [29] 胡勇, 张文格, 马好放, 等. 增材制造镍基高温合金成形过程数值模拟研究进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2024, 34(12): 3923-3946.

Simulation of Solidification Structure Evolution of Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn Alloy Continuous Casting Billets Based on CAFE Method

Dang Boyu¹, Wu Huiyun¹, Zhang Mengfei¹, Duan Qingyang², Feng Zeqiang², Zhao Geng², Jing Jie²

(1. *School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China*; 2. *Taiyuan Jinxi Chunlei Copper Co., Ltd., Taiyuan 030008, China*)

Abstract: Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn alloy is a promising candidate material for electrical connectors owing to the low cost and excellent castability. Continuous casting serves as a key process in strip and plate production, where the solidification microstructure strongly influences subsequent processing and final product properties. In this study, a cellular automaton-finite element (CAFE) model was developed to simulate the solidification microstructure evolution of the Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn alloy under continuous casting conditions. Simulated fractions of columnar and equiaxed grains were 87.4% and 12.6%, respectively, which were in close agreement with those of experimentally measured macrostructures (88.6% and 11.4%), confirming reliability and accuracy of the established model. Further investigations were conducted on effects of nucleation undercooling and nucleation density on solidification microstructure. Results indicated that increasing nucleation undercooling reduced the proportion of equiaxed grains: as undercooling increased from 1 K to 6 K, equiaxed grain fraction decreased from 17.1% to 9.2%, respectively. In contrast, increasing nucleation density promoted equiaxed grain formation, with equiaxed grain fraction increasing from 10.4% to 18.5% as the nucleation density increased from $0.5 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ to $40 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$, respectively.

Key words: CAFE method; Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn alloy; continuous casting; solidification microstructure; nucleation parameter

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.03.009

引文格式: 党博宇, 吴慧云, 张梦飞, 段庆阳, 冯泽强, 赵耿, 景洁. 基于 CAFE 法的 Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn 连铸坯凝固组织模拟研究 [J]. *铜业工程*, 2026(3): 77-85.

Dang Boyu, Wu Huiyun, Zhang Mengfei, Duan Qingyang, Feng Zeqiang, Zhao Geng, Jing Jie. Simulation of solidification structure evolution of Cu-2.0Fe-0.03P-0.11Zn alloy continuous casting billets based on CAFE method [J]. *Copper Engineering*, 2026(3): 77-85.