

DOI: 10.3901/JME.2022.10.087

功率超声与挤压铸造耦合工艺对 Al-5.0Cu 合金凝固组织影响的数值模拟与试验研究^{*}

林波¹ 范滔¹ 张杨² 赵愈亮³ 张卫文² 王莹¹

- (1. 贵州大学机械工程学院 贵阳 550025;
2. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640;
3. 东莞理工学院机械工程学院 东莞 523808)

摘要: 采用挤压铸造和功率超声耦合的方式处理 Al-5.0Cu 合金熔体, 利用光学显微镜观察不同工艺参数下的 Al-5.0Cu 合金的微观组织。使用反分析法计算出耦合作用下铸件-模具的界面换热系数曲线, 在此基础上结合 CAFE 宏-微观耦合模型模拟出不同工艺下 Al-5.0Cu 合金的凝固组织, 并与宏观腐蚀结果进行对比, 试验同时测量了熔体内部不同位置的温度变化。通过数值模拟和试验验证相结合的方式, 对比研究了不同工艺对 Al-5.0Cu 合金凝固组织的影响。模拟和试验结果均表明, 功率超声和挤压铸造的耦合作用较于单一外场作用能进一步改善合金的凝固组织, 同时可以完全消除铸造缺陷; 耦合作用还可以使得熔体内部温度分布更加均匀, 显著细化 Al-5.0Cu 合金的初生晶粒, 有利于得到均匀、细小微观组织。该结果为细化 Al-5.0Cu 合金的组织, 提高合金的力学性能提供了新的思路。

关键词: Al-5.0Cu 合金; 超声振动; 挤压压力; 数值模拟; CAFE 模型

中图分类号: TG24

Numerical and Experimental Study on Solidification Microstructure of Al-5.0Cu Alloy under Combined Fields of Power Ultrasonic and Squeeze Casting

LIN Bo¹ FAN Tao¹ ZHANG Yang² ZHAO Yuliang³ ZHANG Weiwen² WANG Ying¹

- (1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025;
2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640;
3. School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808)

Abstract: The Al-5.0Cu alloy melt is processed by combined fields of squeeze casting and ultrasonic vibration, and the microstructure under different process parameters are examined by OM. The interfacial heat transfer coefficient curve between cast and mold under combined fields is calculated using inverse analysis, then the solidification microstructures under different conditions are simulated based on CAFE model and compared with the macrostructure, the temperature change during the experiment in the melt is also measured. The effects of different processes on the solidification structure of Al-5.0Cu alloy were studied by means of numerical simulation and experimental verification. The results show that combined fields can further improve the solidification structure of the alloy and completely eliminate the casting defects compared with the single external field. The combined fields can also lead to the uniformly distribution of temperature in the melt and significant refinement of Al-5.0Cu alloy primary grain, which is

^{*} 国家自然科学基金(51704084, 52074131)、贵州省自然科学基金(黔科合基础-ZK[2021]一般 267、黔科合基础 2019(1069))、贵州省科技成果应用及产业化(黔科合成果[2021]一般 067)和贵州大学培育(黔科合平台人才[2017]5788-42、贵大培育(2019)23 号)资助项目。20210522 收到初稿, 20210726 收到修改稿

beneficial to obtain uniform and fine microstructure. The results provide a new idea for refining the microstructure and improving the mechanical properties of Al-5.0Cu alloy.

Key words: Al-5.0Cu alloy; ultrasonic vibration; squeeze casting; numerical simulation; CAFE model

0 前言

铝合金具有密度小,可时效强化,易加工,耐腐蚀等优点,因而被广泛应用于航空、汽车、民用装饰材料及包装材料等各行各业中,其中以汽车领域用量最大^[1]。目前我国高性能铝合金产缺,采用传统方法制备高性能铝合金的难点在于:空间尺度效应和铸造环境的非均匀特性导致在凝固时的温度场与熔体流场分布不均匀,因此铸件局部位置可能会出现应力集中、组织成分分布严重不均匀等现象^[2-3]。此外,传统铸造铝合金还容易产生微孔缺陷,会引起质量和可靠性的下降。为改善铝合金铸锭的性能,国内外已尝试多种方法来细化铝合金晶粒,常见的有淬火法,细化剂化学改性法,过热法和物理外场改性法^[4-5]。其中,物理外场改性法具有环境友好,成本低廉等优点,因此具有良好的工业应用前景。

已有学者对机械搅拌^[6]、电磁外场^[7]、超声外场^[8]以及挤压力^[9]等物理外场改性工艺做了大量研究。单一物理外场在实际处理时由于其自身工艺的局限,如电磁场很难处理大型复杂铸件,并且长时间处理时会伴有焦耳热效应;功率超声处理熔体时间过长可能会导致熔体升温,从而引起晶粒粗化,合金性能降低。因此,针对上述单一物理外场在金属凝固过程中的耦合,目前已有相关的研究。如:ABRAMOV 等^[10]将超声振动和恒定磁场两种工艺结合来降低 Al-Pb 合金的重力偏析,HAGHAYEGHI 等^[11]将超声振动和旋转磁场结合起来,使得物理外场对 AA5754 铝合金的处理更加均匀。张敏等^[12-13]发现复合超声和电磁场对大型铸锭的处理相对单一场具有明显优越性。

凝固组织模拟技术是基于计算数值方法对合金结晶过程及铸态低倍组织进行预测。合金的凝固组织直接关系着铸锭的凝固质量、加工性能。近年来,凝固组织数值模拟技术日益受到关注,GANDIN 和 RAPPAZ 将元胞自动机(Cellular automation, CA)算法与有限元(Finite element, FE)算法结合,基于凝固温度场解析金属的组织演变,其 Al-Cu、Al-Si 等二元合金的凝固组织模拟结果与实际比较接近^[12]。NASTAC 和 STEFANESCU 利用微潜热法

(Microlatent heat method, MLHM)实现了 CA 模型与 FE 模型同时求解,并在 INCONEL718 合金浇注试验中得到验证,该算法被 ProCAST 软件采用^[13]。

本文以挤压铸造和功率超声耦合工艺下的 Al-5.0Cu 合金为对象,研究了不同工艺条件和参数对合金凝固组织的影响;此外,基于温度采集系统和 ProCAST 数值计算软件,采用反分析求解法,求解出更为准确的铸件-模具界面换热系数曲线,在此基础上结合 CAFE 模型模拟出不同工艺下的凝固组织。

1 试验过程

1.1 超声-挤压耦合工艺的微观组织模拟

1.1.1 铸件-模具界面换热系数反分析求解

铸件-模具界面换热系数是进行数值模拟的重要条件,它决定着最终计算结果的准确性。由于在耦合工艺下,铸件-模具之间存在着非线性、不稳定的导热,耦合工艺的复杂性也导致界面换热系数在不断变化,因此,本节采用反分析法来求解界面换热系数。

首先分别测得铸件和模具上 3 个点的温度-时间变化曲线;其次,通过 ProCAST 有限元软件模拟上述测温点的温度场;最后,建立换热系数求解迭代模型,模拟值经多次迭代以接近实测值。当模拟值和实测值之间插值满足迭代精度时,如式(2)所示,计算停止,得到最终换热系数曲线。

本文建立的优化模型,为温度测量值和计算值差的范数

$$F(h) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{r-1} [T_{i,L+j}^m - T_{i,L+j}^c]^2 \quad (1)$$

式中, $T_{i,M+j}^m$ 为测量点 i 和时间片 $L+j$ 的实测温度, $T_{i,M+j}^c$ 为计算温度, K; h_L 为该时间段内所需反求的界面传热系数, W/(m²·K); N 为温度测量点的总数, r 为未来时间节点的总数。对式(1)求偏导数,并泰勒展开,得到敏感系数的表达式,表征迭代方向。通过测量值和计算值可以计算出敏感系数的数值解,继而得到任一时刻的铸件-模具界面换热系数 h_L 和 $(1+\varepsilon_1)h_L$, ε_1 取 0.01 或更小。

迭代中,可以通过上一时间步满足迭代精度的

铸件温度, 计算出该时间步的传热系数修正值 Δh_L , 当迭代满足以下条件时, 计算终止。

$$\left| \frac{\Delta h_L}{h_L} \right| \leq \varepsilon_2 \quad (2)$$

本节中, ε_2 为 0.01, 最终求解出的耦合工艺下的界面换热系数曲线如图 1 所示, 可以看出界面换热系数取值在耦合工艺下的变化规律。

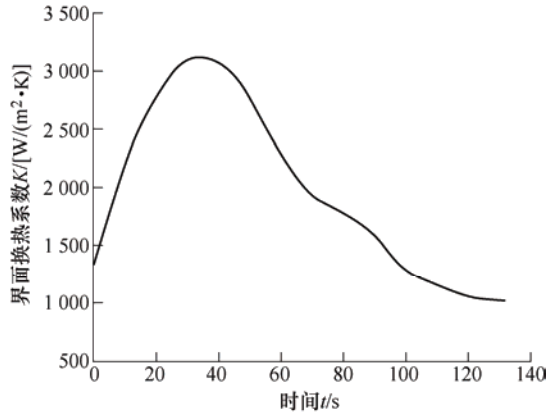


图 1 耦合作用下(75 MPa+1 000 W)铸件-模具界面换热系数曲线

1.1.2 宏观温度场的建立

首先建立试验平台的宏观三维有限元模型, 宏观温度场通过有限元方法(FE)插值求解。金属和型腔内壁之间的导热以不稳定的导热方式进行, 三维宏观温度场不稳定导热方程如下所示

$$\rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q \quad (3)$$

式中, ρ 为密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; c_p 为定压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; θ 为温度, K ; t 为时间, s ; λ 为热传导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; L 为熔化潜热, J/kg ; φ_s 为固相率; y 和 z 为坐标值, m ; Q 为热源项。

辐射换热按照 Stefan-Boltzman 定律: $q = \varepsilon \sigma_0 T^4$, T 为表面的热力学温度, K ; ε 为辐射温度, K ; σ_0 为 Stefan-Boltzman 常数。

1.1.3 形核和生长模型

形核采用 RAPPAP 等提出的基于高斯分布的连续形核模型^[12]

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2\pi}\Delta T} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta T - \Delta T_{\max}}{\Delta T_{\sigma}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中, ΔT 表示固、液界面处的形核过冷度; ΔT_{\max} 为最大形核过冷度; ΔT_{σ} 为形核过冷度标准方差; n_{\max} 为正态分布从 0 到 ∞ 积分得到的最大形核密度。其中, 在某一过冷度 $\Delta T'$ 所形成的晶粒密度 $n(\Delta T')$ 即可由对该分布曲线积分求得。功率超声和挤压力

对形核参数的影响参考试验统计和相关文献。

柱状晶和等轴晶的生长计算采用 KGT 模型^[13], KGT 模型可以实现枝晶生长的竞争, 其择优取向选取 $\langle 100 \rangle$ 方向, 计算时为了节省计算时间, 对 KGT 模型进行拟合, 拟合后枝晶尖端生长速率 v 为

$$v = \alpha \Delta T^2 + \beta \Delta T^3 \quad (5)$$

式中, α , β 为生长动力学参数。

1.1.4 CA-FE 模型的建立

宏观温度场计算采用四面体网格, 最大边长尺寸为 1 mm, 最小边长尺寸为 0.5 mm, 微观网格采用正方体, 用于计算形核和生长, 边长尺寸为 100 μm 。在元胞自动机(CA)模型中, 仅在超声导入杆横截面区域内进行凝固组织求解。采用不同的时间步长分别计算宏观温度场和微观组织, 宏观时间步长为 1 ms, 微观时间步长 dt 为时间函数。

熔体初始浇注温度为 $T=983 \text{ K}$, 环境温度初始设为 298 K。本文以 Al-5.0Cu 为原材料, 在 ProCAST 中采用 SCHEIL 方式得到 Al-5.0Cu 高温物性参数或近似参数, 如表 1 所示。型腔与空气的换热系数选通用值, 为 100 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。参考 Al-Cu 合金冷却曲线, 模拟中选用的比压为 75 MPa, 保压时间为 30 s, 保压压力是通过补缩面补缩法设置。

表 1 Al-5.0%Cu 合金热物性参数

参数	取值
液相线温度/K	911
固相线温度/K	775
液相线斜率	-1/640
液相溶质扩散系数/ $(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	3.0×10^{-9}
固相溶质扩散系数/ $(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	3.0×10^{-13}
平衡常数	0.14
界面能/ $(\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$	0.093
Gibbs-Thompson 系数/ $(\text{K}\cdot\text{m})$	3.0×10^{-7}

由合金组元含量、液相线斜率、溶质平衡分配系数、溶质扩散系数以及 Gibbs-Thompson 系数计算后得出枝晶生长动力学系数, $\alpha=1.0 \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$, $\beta=1.5 \times 10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-3}$; 通常情况下, 不同工艺下形核参数的取值是根据试验测定以及参考文献来确定的, 本文中的初始面、体形核密度 n_s , n_v 同样也是参考试验结果确定的, 而不同工艺下的过冷度 ΔT 的确定则进一步参考了不同工艺对过冷度的相对影响, 本文形核参数的具体取值如表 2 所示。

表 2 不同工作条件下的形核参数

形核参数	凝固前沿的液相区最大过冷度 $\Delta T_{s,max}/K$	凝固前沿的液相区平均过冷度 $\Delta T_s/K$	体形核密度 n_v/m^{-2}	最大形核过冷度 $\Delta T_{v,max}/K$	形核过冷度标准差 $\Delta T_{v,\sigma}/K$	面形核密度 n_v/m^{-3}
重力场	6	2	1.4×10^6	3	1	2.4×10^8
压力场	6	1	2.6×10^6	2	1	4.44×10^8
超声场	2	1	4.2×10^6	1.25	0.5	7.6×10^8
耦合场	2	1	2.0×10^7	1.25	0.1	2.4×10^9

1.2 试验验证

试验原材料采用高纯铝锭(99.95%)和 Al-50%Cu 中间合金,在 7.5 kW 坩埚井式电阻炉中熔炼合金,待完全熔化后进行精炼除气以及除渣,在熔体温度为 710 ℃左右时浇注。在 1 MN 四柱液压力机上进行试验,模具选用 H13 模具钢,模具预热温度为 250 ℃,挤压压力分别选取 50 MPa 和 75 MPa,挤压速度为 0.01~0.018 m/s,保压时间为 30 s。试验中,采用瑞士 Kistler 公司生产的温度采集系统对不同工艺条件下模具、模壁和金属熔体内部凝固过程的温度进行采集。采集点(A、B、C)示意图如图 2 所示。

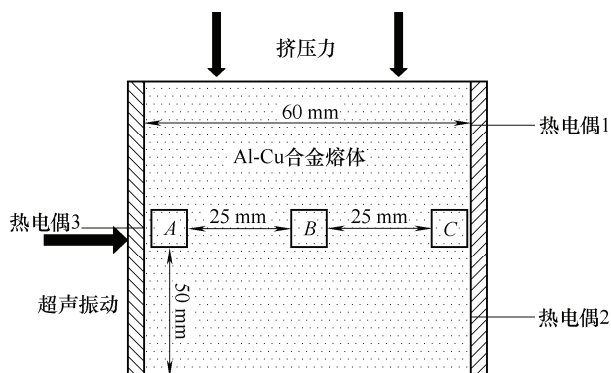


图 2 热电偶放置示意图

功率超声和挤压铸造耦合处理金属熔体的试验设备如图 3 所示。其中,超声变幅杆的直径为 6 mm,插入的深度为 10 mm,功率超声设备的功率为 0~1 kW 范围内可调。为防止不必要的热量损耗,在型腔底部和四周包裹一层保温石棉,为避免超声波换能器的过热,在试验时通过空气对流对其强制冷却。得到尺寸为 100 mm×100 mm×60 mm 的铸锭,在靠近变幅杆尖端处截取 $\phi 10$ mm×12 mm 的金相试样,抛光研磨后经质量分数为 0.5% 的 HF 溶液腐蚀,在 LEICA/DMI 5000M 金相显微镜下进行微观组织对比观察,利用 Image-Pro Plus 6.0 图像分析软件进行第二相比例分数的定量分析,在放大 500 倍时选取至少 30 个视场,每个视场选取不少于 10 条截线。金相中第二相具体成分在 Quanta 2 000 扫描电子显微镜下进行。

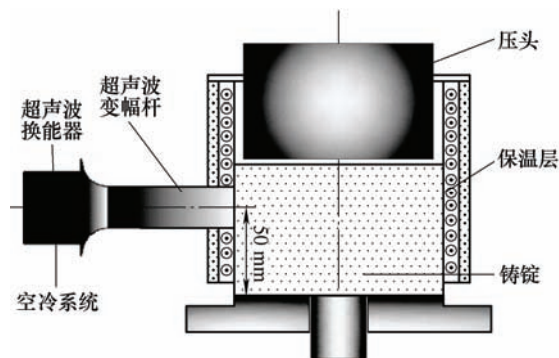


图 3 试验装置示意图

2 试验结果

图 4 和图 5 分别为不同工作条件下超声施加横截面的凝固组织的模拟结果和试验结果,可以看出,与重力铸造(图 4a、5a)条件相比,施加挤压力(图 4b、5b)或导入功率超声(图 4c、5c),晶粒尺寸均明显减小,由图 4d、5d,挤压力和功率超声耦合作用使得晶粒尺寸进一步降低,且整个横截面上晶粒尺寸大小分布均匀。采用 GB6394—1986 金属平均粒度测定法中

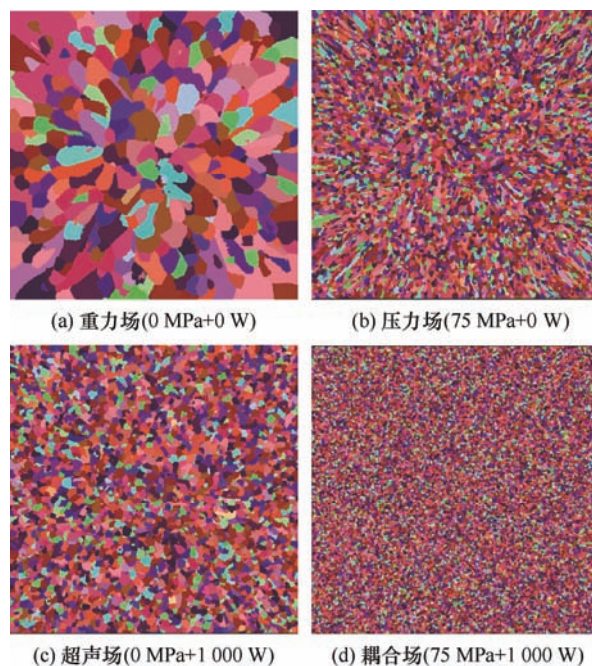


图 4 不同工作条件下凝固组织模拟结果

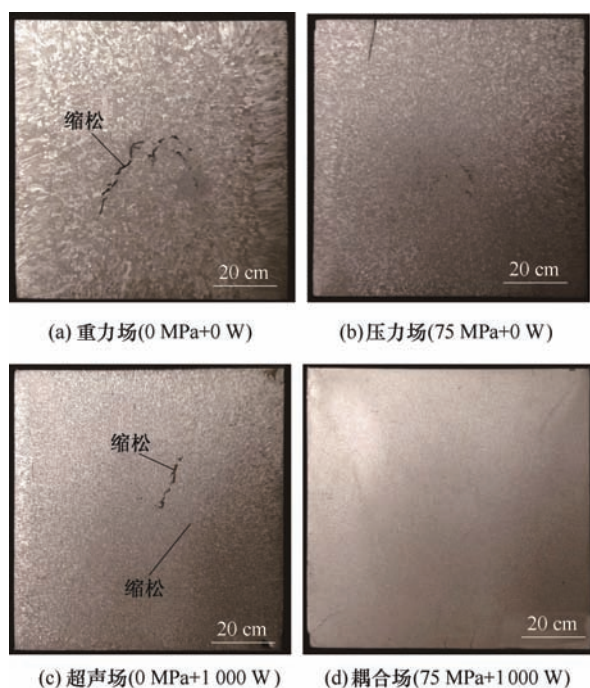


图5 不同工作条件下铸锭宏观腐蚀结果

直线节点测定法测出模拟横截面上的平均晶粒尺寸，并与试验结果进行比较，如图6所示，可以发现，试验所得试样凝固组织的晶粒尺寸与数值模拟所得的

凝固组织晶粒尺寸变化趋势相同，结果较吻合。

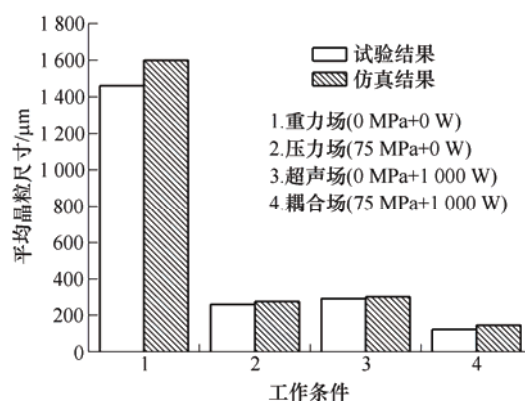


图6 不同工作条件下晶粒尺寸试验结果与仿真结果对比

图7为不同工艺参数下 Al-5.0Cu 合金的微观组织。由图7a可知，在普通重力铸造条件下，初生 α -Al 多为粗大的树枝晶和柱状晶，晶粒尺寸较大，缩孔、缩松等铸造缺陷十分明显。如图7b所示，对熔体施加 50 MPa 挤压力后，合金中的 α -Al 二次枝晶间距明显减小，铸造缺陷基本消失。随着挤压力继续增加至 75 MPa，即图7c中，可以看出，二次枝晶间距变化不大，说明当挤压压力大于 50 MPa 时，压

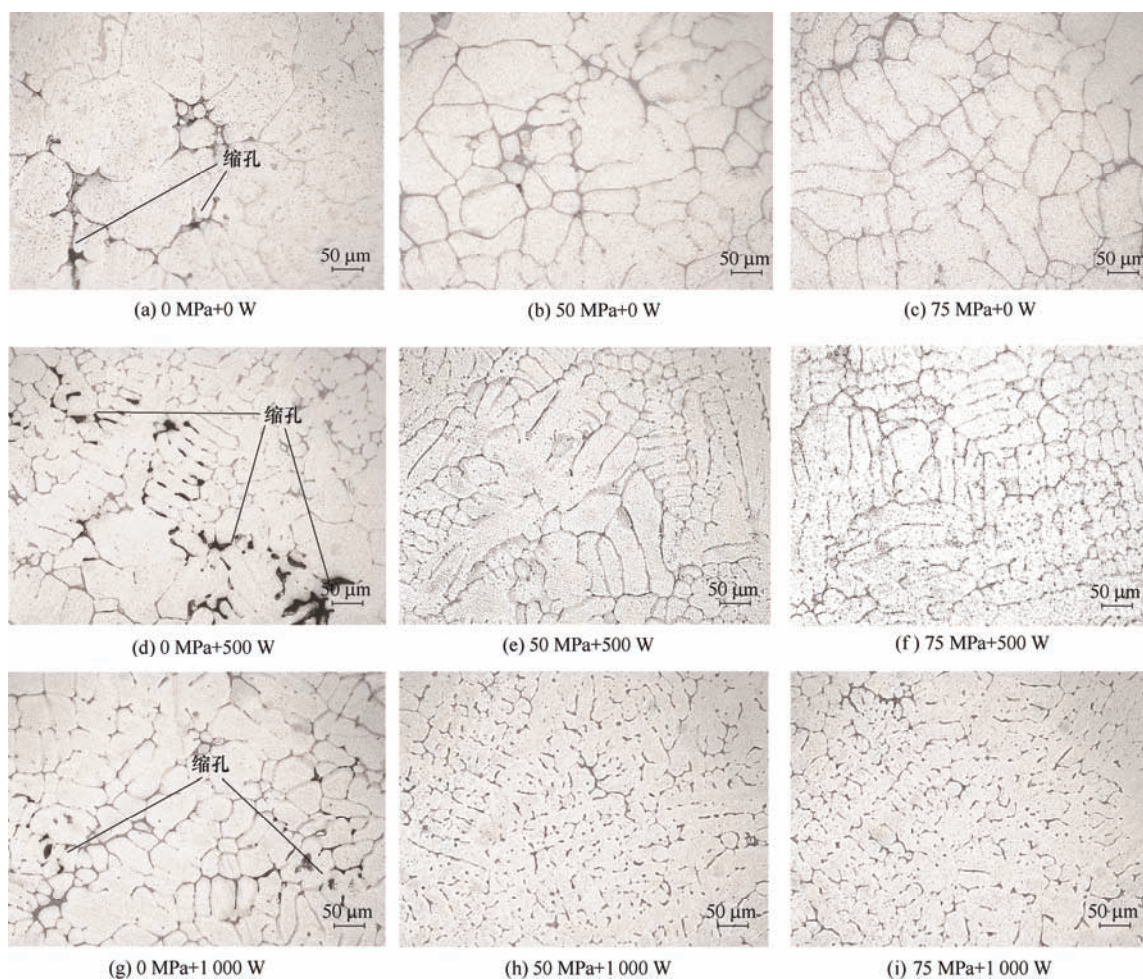


图7 不同工作条件下的显微组织

力的增加对微观组织的改善不明显。图 7d 所示为 500 W 功率超声作用下的微观组织,可以看出, α -Al 二次枝晶间距得到了明显的细化,但依然存在一定数量的缩孔,这是因为功率超声特殊的空化效应和声流效应,使得粗大的树枝晶在二次枝晶臂处熔断或者破裂,因此凝固组织中二次枝晶间距减小,但较小功率下超声的振动不足以完全消除铸造缺陷;而在 1 000 W 功率超声作用下(图 7g),相较于图 7d,可以看出,二次枝晶间距没有随着超声功率的增加而发生变化,但缩孔数量有一定程度的减少。这说明功率的增大对微观组织的细化影响甚微,但可以导致声流速度的增加^[8],加强声流搅拌效应,最终减少缩孔的数量。虽然单一物理外场可以改善合金的微观组织,但其改善效果并非随着其参数的增加而线性改变。还可以看出,功率超声对铸造缺陷的消除能力不如挤压铸造。图 7e、7f、7h、7i 分别为不同耦合工艺参数下 Al-5.0Cu 合金微观组织。可以发现,耦合工艺相较于单一外场作用,可以导致 α -Al 二次枝晶间距进一步减小,同时耦合工艺可以完全消除铸造缺陷。并且随着工艺参数的增加,凝固组织的改善程度(二次枝晶间距的减小)也随之增加。如图 7h、7i 所示,较高耦合工艺参数下,可以得到细小、均匀的微观组织。

3 讨论与分析

通过对比不同工艺下合金的微观组织,可以看出,重力铸造条件下,初生 α -Al 枝晶粗大,这是因为在金属熔液浇注后,模具型腔内壁被加热且不断升温,使得熔体冷却速度减缓,同时结晶过程中释放的潜热会导致枝晶前沿过冷度减小,形核变得困难,因此只有与散热方向相反的晶体择优生长,形成粗大的树枝晶区。施加挤压力后,压力作用下会形成较大的过冷度,这会促进形核率增大,从而细化晶粒。功率超声对金属熔体的改善主要是通过超声空化以及声流搅拌在熔体中产生空化过冷生核,激活异质形核等作用,与此同时形成的局部高温、高压还对初生枝晶起到破碎作用,破碎的枝晶伴随声流效应的搅拌而弥散分布于熔体各位置处,起到晶核作用,增加了形核率,最终使凝固组织得到细化,但功率超声无法完全消除铸造缺陷。

功率超声和挤压铸造的耦合作用对微观组织的

改善效果远远强于两种单一外场。本文进一步对不同测量位置(图 2)的熔体温度进行实时测量,得到图 8~10,可以看出,超声处理时熔体内部温度场分布不均匀($T_B > T_A > T_C$),即靠近超声杆处(A)、熔体中心处(B)和远离超声杆处(C)均存在温度差,这是因为超声的空化效应引起靠近 A 处出现高温高压^[14],同时导致了凝固时间的延后。耦合场作用下,温度分布相对均匀($T_B > T_A \approx T_C$),均匀的温度场可以提高合金过冷度,增加相变驱动力,因而耦合作用下形成的大量晶核趋于同时凝固,导致凝固加快并且合金结晶间距变小。

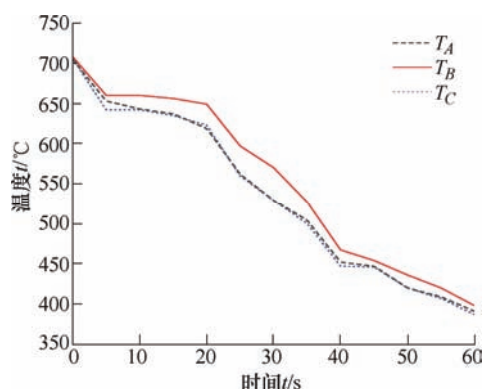


图 8 挤压力作用下不同测量位置熔体的温度变化值

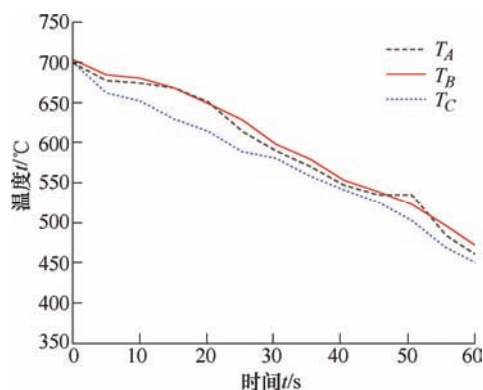


图 9 超声振动作用下不同测量位置熔体的温度变化值

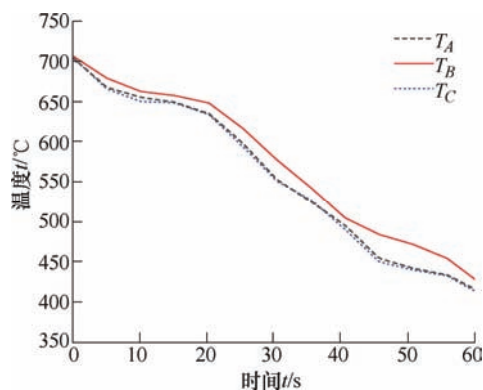


图 10 耦合作用下不同测量位置熔体的温度变化值

4 结论

(1) 采用反分析法求解出挤压铸造和功率超声耦合作用下的铸件-模具界面换热系数曲线, 可以充分体现耦合作用下铸件和模具之间的热交换, 在此基础上结合 CA-FE 模型, 模拟出了不同工艺下 Al-5.0Cu 合金的凝固组织。

(2) 本文搭建了挤压铸造和功率超声耦合作用处理金属熔体的试验平台, 对比研究了不同工艺对 Al-5.0Cu 合金凝固组织的影响, 发现耦合作用相较于单一外场作用能进一步改善合金的凝固组织, 同时可以完全消除铸造缺陷。模拟的结果与试验结果吻合较好。

(3) 通过测量不同工艺下 Al-5.0Cu 合金凝固过程中熔体内部不同位置的温度变化, 发现挤压铸造和功率超声的耦合作用可以使得熔体内部温度分布更加均匀, 有利于得到均匀、细小微观组织。

参 考 文 献

- [1] LIU Teng, WANG Qudong, SUI Yudong, et al. Microstructure and mechanical properties of overcast 6101-6101 wrought Al alloy joint by squeeze casting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(4): 298-304.
- [2] ZHANG Weiwen, LIN Bo, ZHANG Datong, et al. Microstructures and mechanical properties of squeeze cast Al-5.0Cu-0.6Mn alloys with different Fe content[J]. Materials & Design, 2013, 52(5): 225-233.
- [3] ZHANG Weiwen, LIN Bo, FAN Jianlei, et al. Microstructures and properties of heat-treated Al-5.0Cu-0.5Fe squeeze cast alloys with different Mn/Fe ratio[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 588(20): 366-375.
- [4] SINGLA A, SINGH Y. Fracture surface analysis of AA2218 Al-alloy MMCs and squeeze pressure effect on fracture mechanism[J]. International Journal of Materials Engineering Innovation, 2015, 6(2): 140-153.
- [5] BOLZONI L, NOWAK M, BABU N H. Grain refining potency of Nb-B inoculation on Al-12Si-0.6Fe-0.5Mn alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 623(25): 79-82.
- [6] ZHANG Xiaorong, GUO Jing, LIU Haipeng, et al. Influence of melt superheat treatment on corrosion resistance of Gd-based BMG in 3.5% NaCl solution[J]. Materials & Design, 2016, 100(15): 217-222.
- [7] JIANG Wenming, FAN Zitian, XU Chen, et al. Effects of mechanical vibration and wall thickness on microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium alloy processed by expendable pattern shell casting[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(4): 1776-1788.
- [8] HARINI R S, NAMPOOTHIRI J, NAGASIVAMUNI B, et al. Ultrasonic assisted grain refinement of Al-Mg alloy using in-situ MgAl₂O₄ particles[J]. Materials Letters, 2015, 145(15): 328-331.
- [9] KANG J W, ZHANG X P, WANG S, et al. The comparison of ultrasonic effects in different metal melts[J]. Ultrasonics, 2015, 57: 11-17.
- [10] ABRAMOV V O, SOMMER F. Properties of Al-Pb base alloys applying electromagnetic forces and ultrasonic vibration during casting[J]. Materials Letters, 1995, 23(13): 17-20.
- [11] HAGHAYEGHI R, KAPRANOS P. Direct-chill casting of wrought Al alloy under electromagnetic and ultrasonic combined fields[J]. Materials Letters, 2013, 105(15): 213-215.
- [12] 张敏, 徐蔼彦, 汪强, 等. Al-4%Cu 凝固过程枝晶生长的数值模拟[J]. 材料工程, 2016, 44(6): 9-16.
ZHANG Min, XU Aiyan, WANG Qiang, et al. Numerical simulation on dendrite growth during solidification of Al-4%Cu alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(6): 9-16.
- [13] 蒋日鹏, 李晓谦, 鞠增业, 等. 铝合金超声波半连铸多场耦合的模拟与实验[J]. 华南理工大学学报, 2014, 42(4): 86-90.
JIANG Ripeng, LI Xiaoqian, JU Zengye, et al. Simulation and experimental investigation of multi-field coupling for semi-continuous casting of aluminum alloy with ultrasonic treatment[J]. Journal of South China University of Technology, 2014, 42(4): 86-90.
- [14] 张宇博. 外场对铝硅合金富铁相形成及半连铸铸坯组织的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
ZHANG Yubo. Effects of physical fields on iron-phases and solidification structure of direct chill casting ingots in

Al-Si alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

作者简介: 林波, 男, 1985 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为多场耦合作用下金属凝固。

E-mail: linbo1234@126.com

范滔, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为铝基复合材料制备。

E-mail: 1208387805@qq.com

张杨, 男, 1990 年出生, 博士。主要研究方向为多场耦合作用下金属凝固。

E-mail: 794691669@qq.com

赵愈亮, 男, 1989 年出生, 博士。主要研究方向为同步辐射技术。

E-mail: zhaoyl@dgut.edu.cn

张卫文(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为多场耦合作用下金属凝固。

E-mail: mewzhang@scut.edu.cn

王莹, 女, 1986 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为铝合金焊接成形。

E-mail: 283751861@qq.com