DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.08.006

脉冲磁场控制铝及铝合金凝固组织的研究进展

刘　佳,接金川,曲建平,李国梁,李廷举
(大连理工大学 凝固控制与数字化制备技术重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘　要:脉冲磁场(PMF)凭借瞬时强磁、对材料无污染和操作方便等优点,在铝及铝合金铸造方面具有良好的应用前景。针对形核的起源及柱状晶向等轴晶转变(CET)机制,论述了脉冲磁场对凝固组织的影响,总结了凝固组织的细化及控制机理,最后对数值模拟在此领域的应用进行了展望。

关键词:脉冲磁场;凝固组织;晶粒细化;柱状晶向等轴晶转变;计算机模拟

中图分类号:TG146.2+1; TG111.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)08-0625-08

Research Progress in Controlling Solidification Microstructure of Aluminum and Aluminum Alloy by Pulsed Magnetic Field

LIU Jia, JIE Jinchuan, QU Jianping, LI Guoliang, LI Tingju
(Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Pulsed magnetic field (PMF) has a good application prospect in aluminum and aluminum alloy casting by virtue of instantaneous strong magnetism, no pollution to materials and convenient operation. Based on the origin of nucleation and the mechanism of columnar to equiaxed transition (CET), the influence of pulsed magnetic field on solidification structure is reviewed, the mechanism of solidification microstructure refinement and control is summarized, and the application of numerical simulation in this field is prospected.

Key words: pulsed magnetic field; solidification microstructure; grain refinement; columnar to equiaxed transition; computer simulation

铝及铝合金具有密度小、易强化[1]、耐腐蚀、塑性高等优异性能而成为重要的民用、工业、战略材料。但是传统铸造工艺获得的凝固组织晶粒粗大、柱状晶发达,容易出现缩孔、气孔和缩松等[2]缺陷,导致铸锭的力学性能较差。由 Petch 提出的 Hall-Petch[3]公式:$\sigma=\sigma_0+kd^{-1/2}$ 可知,晶粒越小,强度越高。另外,高密度的晶粒使得应力集中,塑性变形均匀,同时大面积的晶界有阻碍裂纹扩展的倾向,不会使材料的塑性韧性下降。因此,铸件的力学性能与合金的晶粒尺寸及形态密切相关[4],控制及细化凝固组织在材料制备中显得尤为重要。在铸造过程施加电磁场,因其无污染、操作简单,且具有独特的细化效果[5]而引起广泛关注。在针对目前脉冲磁场存在晶核来源的不确定性,柱状晶到等轴晶的转变(Columnar to equiaxed transition, CET)机制不明确等问题,本文主要对凝固组织细化、晶粒形貌控制及影响因素进行综述,并对计算机模拟在该领域的应用进行了展望。

1　凝固特性及制备工艺

1.1　不同形貌晶粒的形成及性质

凝固通常导致两种类型的晶粒形态:柱状晶和等轴晶[6]。在过冷等温熔体中形核并长大的晶粒通常是等轴的,即在各个方向的生长和局部热流密度相等。另一方面,如果热流是单向,则生成的凝固组织一般为柱状。在等轴生长中,固–液界面的形态不稳定,导致单相凝固形成枝晶[7],而在柱状生长中,取决于局部生长条件,可能为平面、蜂窝或树枝状。当一定体积分数的等轴晶粒在柱状晶前沿形核时,就会发生 CET。

等轴晶的晶界面积大,而且偏析元素、杂质和气体分布比较分散,晶粒结合比较牢固,性能比较均

收稿日期:2022-07-18
基金项目:国家自然科学基金(52071050);国家重点研发计划(2018YFE0306103)
作者简介:刘　佳(1994—),博士.研究方向:电磁场作用下合金凝固组织及控制.电话:15232168675,
Email: ljyh615@mail.dlut.edu.cn
通讯作者:接金川(1981—),博士,教授.研究方向:多物理场(电磁场/压力场)作用下合金凝固组织及控制、高性能铜合金制备技术、高品质金属基复合材料制备、难混溶合金组织形成及控制机制等方面研究.
Email: jiejc@dlut.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

匀,近似各向同性。细化等轴晶可以使杂质元素、显微缩松等缺陷更加分散，显著提高材料的力学性能[8]和抗疲劳性能。柱状晶择优生长,形成的晶粒比较粗大,晶界面积小,同时柱状晶排列位向一致,因此其纵向性能较好。另外,柱状晶生长过程中某些杂质元素和气体易被排斥在界面前沿,使柱状晶的偏析比等轴晶要少且结构更致密。

1.2 制备工艺

细化凝固组织的技术分为两类:化学细化法[9],如添加细化剂和变质剂;物理场细化法,如电磁细化、机械振动、超声波细化等[10]。其中,电磁细化大致可分为:①电流通入液态金属;②金属熔体在磁场中凝固。作用原理为利用金属和电磁场的相互作用,使之振荡,从而细化金属的凝固组织[11]。

柱状晶凝固工艺包括高温合金的定向凝固[12]和外延激光金属成形(Epitaxial laser metal forming, E-LMF)。促进等轴晶形成的凝固工艺包括焊接和连铸[13]。我国是铝及其合金的生产和消耗大国,每年都要投入大量资金使用电磁装置来提高铸件的质量。这些特征表明,更好地了解和控制凝固组织在技术和经济上都具有重要意义。

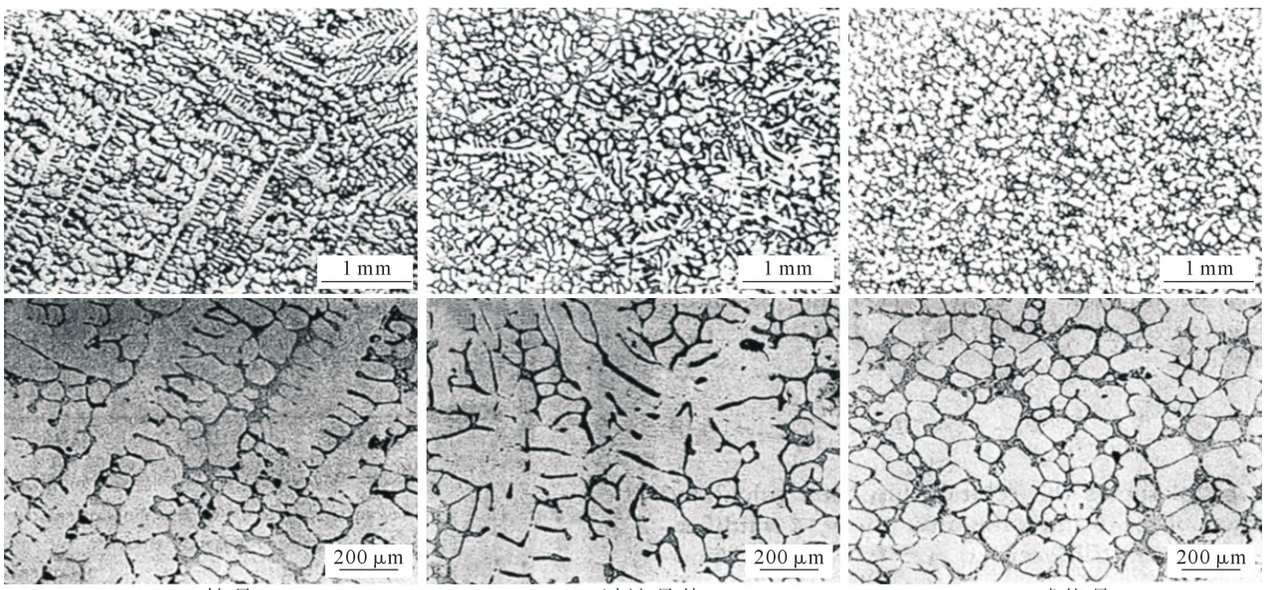
2 脉冲电磁场对凝固组织的影响

2.1 实验研究

20 世纪 80 年代以来，国内外学者因脉冲磁场具有瞬时强磁[14],对材料无污染及操作简单等优点,在脉冲磁场控制金属凝固组织方面进行了不断探索。Nakada 等[15]在研究脉冲电流对凝固组织的影响时发现,通过电容器组对 Sn-15 wt.%Pb 熔体施加脉冲电流，会使凝固组织从具有枝晶的大晶粒变为具有球状晶体的细晶粒,如图 1 所示。其中,脉冲电流作用在熔体凝固初期。但是,施加脉冲电流需要将电极插入熔体中,不仅对电极要求较高,存在危险且污染金属,为了克服这些缺点,脉冲磁场应运而生。

訾炳涛等[16]提出了用强脉冲磁场细化 LY12 铝合金凝固组织的新工艺。实验所用的脉冲发生装置通过对工作线圈释放脉冲电流，使线圈周围产生强脉冲磁场。该实验分析了向熔体施加不同强度脉冲磁场对凝固组织的影响。结果表明,随着脉冲磁场的增加,晶粒的平均尺寸逐渐减小(图 2),树枝晶逐步消失，组织也变得更加均匀。但是当脉冲磁场较强时，在样品外表面对应磁场强度最大的中部容易形成细沙状颗粒的粗糙表面。另外,该实验认为脉冲磁场造成熔体强迫对流，导致树枝晶难以长大或被折断、击碎,这些破碎的枝晶被认为是形核来源。

随后,脉冲磁场在定向凝固过程被应用。赵志龙等[17]对 Al-33.2 wt.%Cu 凝固界面施加脉冲磁场,探究定向凝固组织的演变规律。实验根据堵头处冷却曲线的测试结果选择合适的抽拉速度，以保证脉冲磁场作用于液、固界面处。研究发现,随着磁场强度的增加,凝固组织出现柱状晶趋向等轴化,枝晶化倾向增加且粗化,枝晶细化的一系列演变(图 3)。并指出了凝固组织的细化机制为：①脉冲磁场产生的洛伦兹力和磁压强使熔体强烈振动,过冷度增大,从而增大形核率；②强迫对流产生的剪切力使枝晶折断和游离,破碎枝晶成为新的形核质点。该研究对枝晶折断引入形核质点这一结论缺乏相应的实验证明,形核来源有待进一步探究。



(a) 枝晶　(b) 过渡晶体　(c) 球状晶

图 1 实验获得的 3 种类型组织的典型金相照片[15]

Fig.1 Typical samples of the three types of structures obtained[15]

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

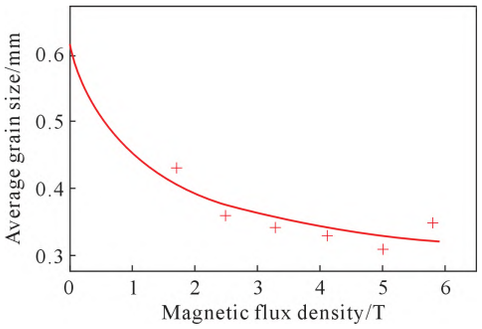
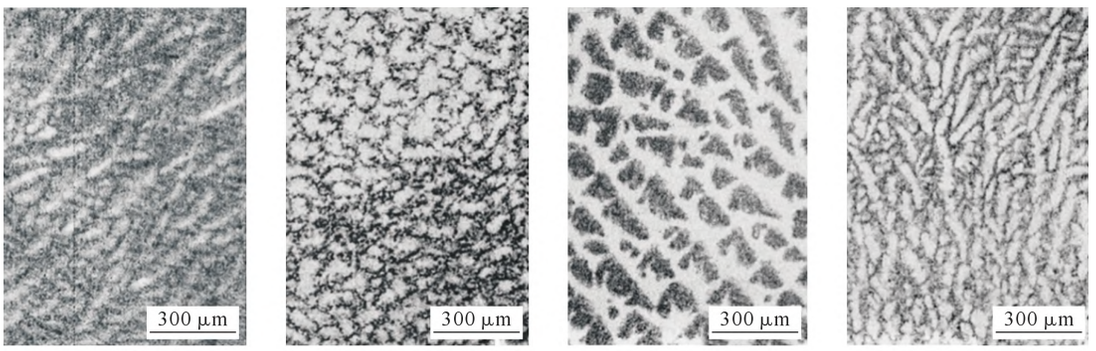


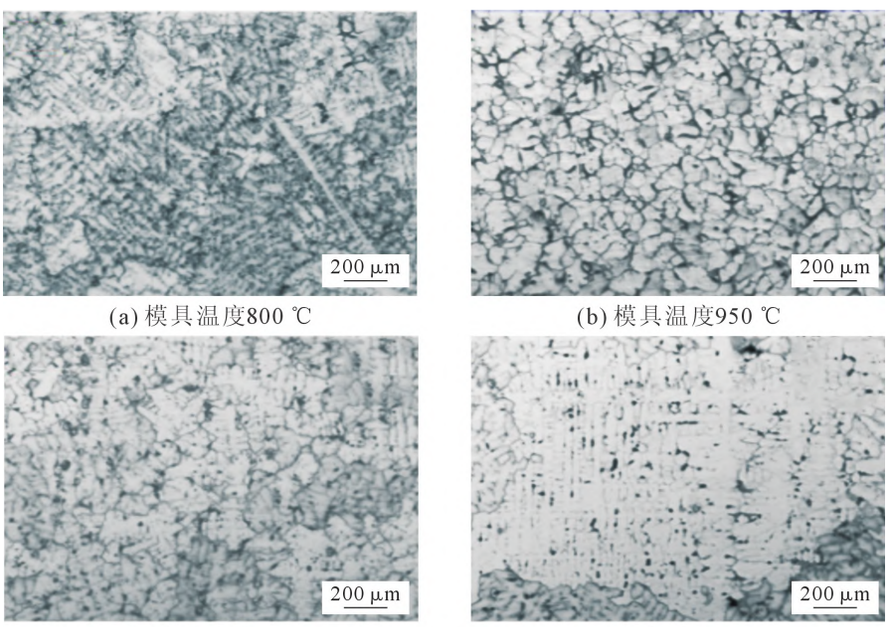
图 2 脉冲磁场强度对平均晶粒尺寸的影响[16]
Fig.2 Effect of PMF on average grain size[16]

Yang 等[18]将低压脉冲磁场铸造(Low voltage Pulse magnetic field casting, LVPMC)技术应用到 K417 合金的凝固过程，探究其对铸态凝固组织的影响规律。研究发现，在高冷却速率(图 4(a))下，凝固微观组织为树突发育良好的粗大的等轴晶，而在低冷却速率(图 4(b))下，凝固微观组织为细小的等轴晶粒。当熔体过热为 110 ℃(图 4(d))，凝固微观结构呈现粗大等轴晶，而当熔体过热 90 ℃(图 4(c))，会形成细的等轴晶。研究表明，低的冷却速率和过热会促进 LVPMC 的细化效应。



(a) 0 T　(b) 0.9 T　(c) 1.4 T　(d) 2.1 T

图 3 不同强度脉冲磁场作用下 Al-Cu 共晶定向凝固组织[17]
Fig.3 Microstructure of unidirectionally solidified Al-Cu eutectic under different peak strengths of PMF[17]



(a) 模具温度800 ℃　(b) 模具温度950 ℃

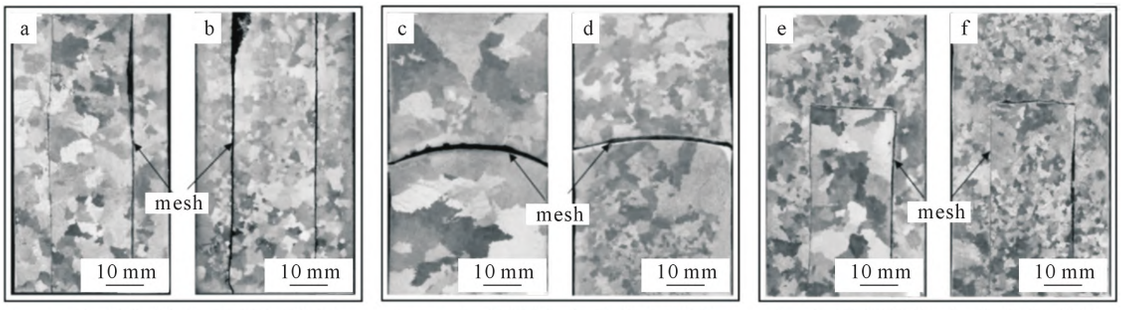
(c) 熔体过热90 ℃　(d) 熔体过热110 ℃

图 4 冷却速率与过热对施加低压脉冲磁场的凝固组织影响[19]
Fig.4 Effect of cooling rate and superheating on grain refinement with LVPMC[19]

Li 等[19]采用在模具中置入不锈钢网的方法来探索低压脉冲磁场（Low voltage pulsed magnetic field, LVPMF)对铝铜合金凝固组织的细化机理。研究发现，不锈钢网内外未经过 LVPMF 处理的凝固组织主要为粗等轴晶(图 5(a))，相反，经过 LVPMF 处理的网内外凝固组织主要为细等轴晶(图 5(b))。未经过与经过 LVPMF 处理的网上下的凝固组织（图 5(c~d))分别与图(5(a~b))类似。然而，图 5(e)未施加 LVPMF，网外出现大量细等轴晶，网内主要为粗等轴晶。当施加 LVPMF 时，网内外均为细等轴晶。这表明，晶核来源于模具壁，LVPMF 处理会促进凝固组织细化。

基于同步 X-ray 成像原位技术，Liotti 等[20]将脉冲磁场施加到 Al-15 wt.%Cu 熔体，探究脉冲电磁场

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a~b) 垂直放置:左,未施加磁场;右,施加磁场　(c~d) 水平放置:左,未施加磁场;右,施加磁场　(e~f) 顶部密封:左,未施加磁场;右,施加磁场

图 5 放置钢网试样的纵截面金相组织[19]

Fig.5 Longitudinal section structure of the specimens with mesh[19]

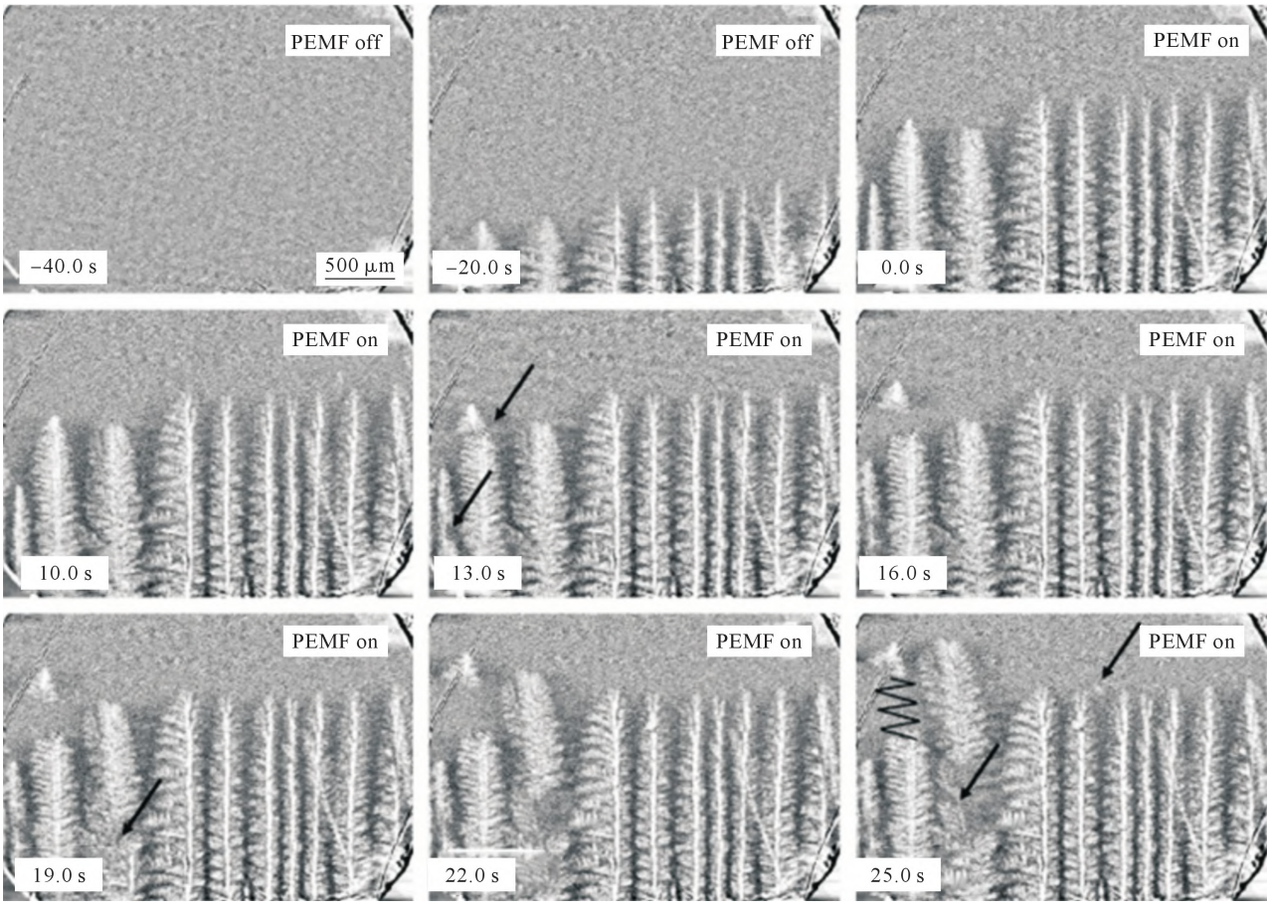


图 6 脉冲磁场作用下 Al-15 wt.%Cu 合金的凝固[20]

Fig.6 Solidification of Al-15 wt.%Cu alloy under PMF[20]

对枝晶破碎行为的影响。发现施加脉冲磁场会使枝晶断裂,悬浮枝晶碎片侧向振荡(图 6)。研究表明,脉冲磁场产生的洛伦兹力主要以剪切力的形式作用于枝晶臂,使其断裂,证明了破碎枝晶可以作为一种形核来源。

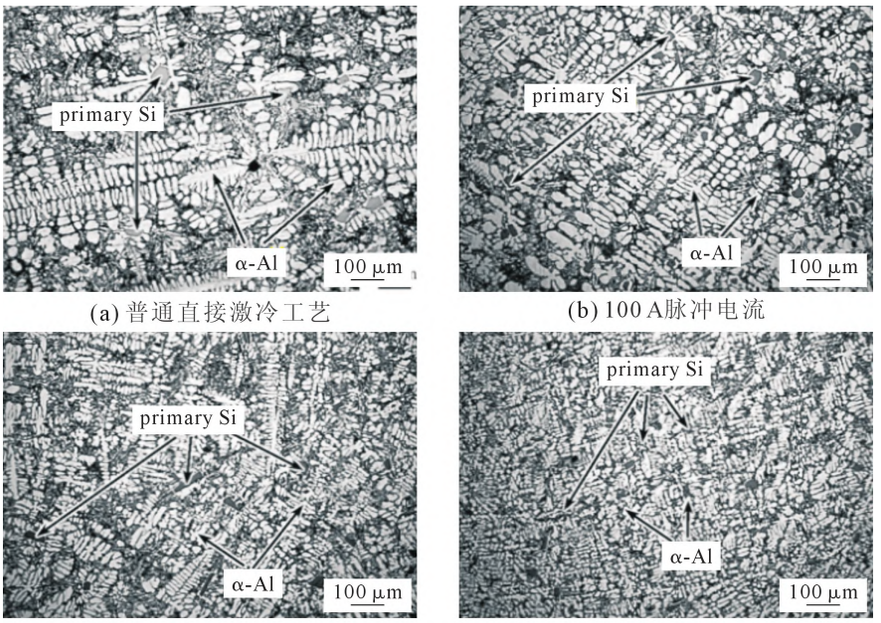
Bao 等[21]对直接激冷(Direct-chill, DC)铸造工艺的 Al-Si-Mg-Cu-Ni 合金熔体应用脉冲磁场(PMF)技术,探究 PMF 对坯料中的 α-Al 和初生 Si 的尺寸影响。研究发现,在常规工艺中,α-Al 晶粒形态为典型的粗大的等轴晶和树状晶体,初生 Si 为大的层片状(图 7(a))。然而,熔体经过 PMF 处理后,α-Al 和初生 Si 的尺寸会减小,且分布更加均匀。此外,随着线圈电流的增大,细化效果更加显著(图 7(b~d))。研究表明,对直接激冷铸造工艺施加PMF 会使 α-Al 和初生 Si 改性,从而提高Al-Si-Mg-Cu-Ni 合金的质量。

2.2 模拟计算

鉴于电磁场工程问题的复杂性,解析方法已经无法对工程问题求解[22]。随着计算机技术和计算方法的不断发展,电磁场近似计算方法得到了长足发展,数值模拟在解决工程问题方面被广泛关注。

Dong 等[23]对 Al-3 wt.%Cu 合金定向凝固过程进行了模拟。发现随着形核过冷度增加,细小等轴晶

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

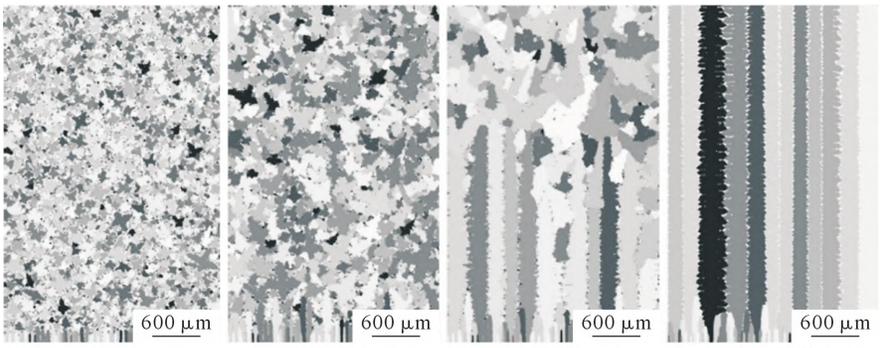


(a) 普通直接激冷工艺　(b) 100 A脉冲电流

(c) 150 A脉冲电流　(d) 200 A脉冲电流

图 7 不同脉冲电流下 Al-Si-Mg-Cu-Ni 铝合金坯中心的微观结构[21]

Fig.7 Microstructure in the center of Al-Si-Mg-Cu-Ni alloy billet under different pulsed current[21]



(a) ΔT=1 K　(b) ΔT=2 K　(c) ΔT=5 K　(d) ΔT=10 K

图 8 平均形核过冷对模拟的 Al-3 wt.%Cu 晶粒形貌的影响(V=5.5×10^{-4} m/s, G=3 000–100 t K/m)[23]

Fig.8 Influence of mean nucleation undercooling on simulated grain structures of Al-3 wt.%Cu (V=5.5×10^{-4} m/s, G=3 000–100 t K/m)[23]

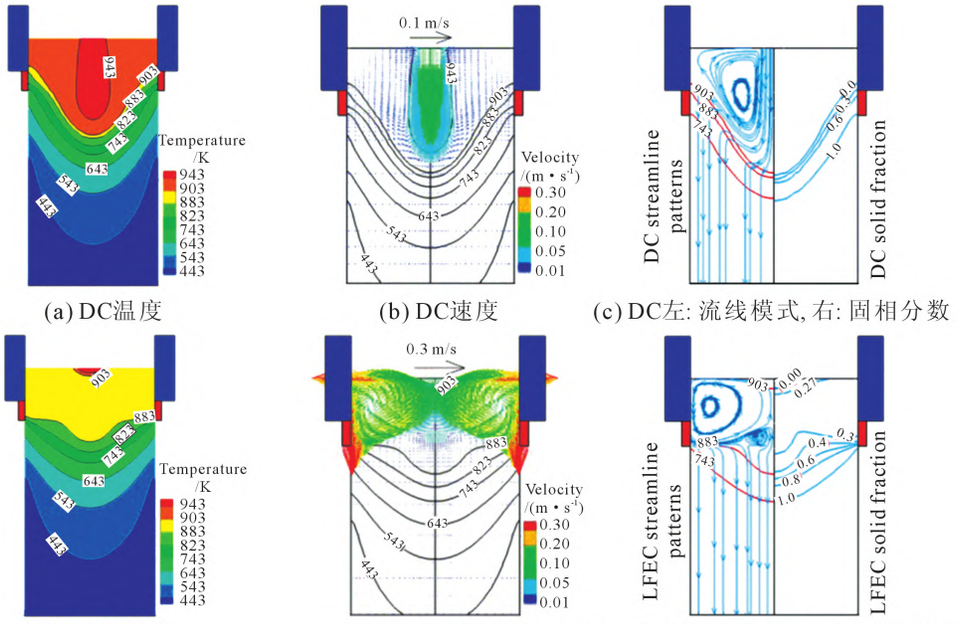
变粗大,后粗大等轴晶趋向柱状生长,当过冷度增大到一定程度时,晶粒全部呈现柱状生长(图 8)。CET 转变过程等轴晶粒形成的有利位置为在柱状枝晶尖端之间的沟槽中。研究表明,平均形核过冷度的降低有利于等轴晶的形成,溶质浓度和过冷度对非均质形核的共同影响导致 CET 转变。

Zhang 等[24]对传统直接激冷铸造(DC)和低频电磁铸造(LFEC)进行模拟。研究发现在 DC 过程中,铸锭液穴深度大,熔体中间速度大且产生涡流,侧壁速度几乎为 0,温度梯度明显陡峭且不均匀,如图 9(a~c)所示。此外,由于铝坯侧面热通量较大,所以该区域温度下降得更快。LFEC 过程中产生与拉速相反的速度,涡流靠近侧壁,温度场均匀分布和温度梯度较小,如图 9(d~f)。研究表明,LFEC 过程中铸锭等轴晶粒形成的主要原因为均匀的温度场、较低的温度梯度以及电磁搅拌产生的强制对流。另外,较小的温度梯度,降低了铝坯中的铸造应力,有效抑制了裂纹生长。

Gong 等[25]通过相场法模拟了合金凝固过程中的微观组织生长。研究发现,在凝固早期,因为 2 个晶粒之间的距离足够大,每个枝晶前沿的溶质浓度场不重叠,所以晶粒自由生长,如图 10(a)所示。随着凝固的进行,枝晶臂彼此靠近,枝晶周围的溶质浓度场重叠(图 10(b))。此外,当枝晶间的溶质浓度达到某一临界值,枝晶臂的尖端几乎停止生长,如图10(c~d)所示。最后,随着凝固继续进行,枝晶会变粗大。该文对电磁铸造过程的数值模拟是将凝固的宏观与微观过程单独计算的。将磁场、流场、温度场以及微观尺度晶粒生长涉及的相场都考虑到多场耦合模拟是不清晰的,这也是目前电磁凝固数值模拟面临的一个难题。

Jie 等[26]对商业纯铝施加 PMF 来揭示形核及等

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

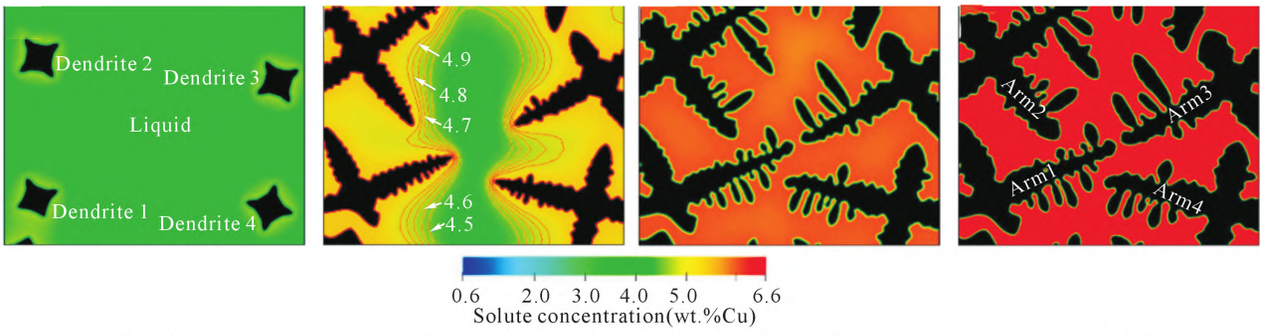


(a) DC温度 (b) DC速度 (c) DC左: 流线模式, 右: 固相分数

(d) LFEC温度 (e) LFEC速度 (f) LFEC左: 流线模式, 右: 固相分数

图 9 对 LFEC 和 DC 两个过程的模拟结果[24]

Fig.9 Calculated results during processes of DC and LFEC[24]



(a) t=40 s (b) t=80 s (c) t=120 s (d) t=160 s

图 10 冷却速率为 0.8 K/s 的 2D 模拟熔体溶质分布[25]

Fig.10 Calculated melt solute distribution with cooling rate[25]

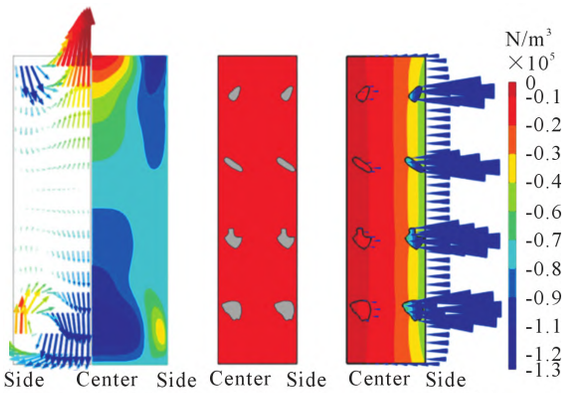
轴晶形成机制。研究发现,熔体中会产生 4 个涡流,熔体顶部中间的速度最大(图 11(a))。该研究将凝固过程产生的晶粒具体为 8 个(图 11(b)),计算熔体与固体所受洛伦兹力的差别。结果表明,作用于固体晶粒的洛伦兹力更强(图 11(c)),会将晶粒推向铸件的中心。晶粒到达一定位置,洛伦兹力就会大大减小,使得晶粒倾向于留存在熔体中。该凝固过程非常复杂,在模拟过程中将晶粒适当简化来探究问题是可取的。

3 脉冲磁场细化及控制机理

Easton[27]发现晶粒细化过程中至少存在两种晶粒形成机制:一种发生在模具壁(初始热过冷),另一种发生在熔体中(结构过冷)。实际上,在特定的铸造情况下可能不止一种机制发挥作用,不同的铸造条件有利于不同的机制。

3.1 等轴晶的形成机理

目前等轴晶的形成机制还未统一规定,被广泛



(a) 流体平均速度等值线 (b) 在熔体中的8个Al晶粒模型 (c) 固相和液相所受的洛伦兹力

图 11 凝固过程中流动和受洛伦兹力的模拟结果

Fig.11 Calculated results of flow and Lorentz force during solidification

公认的等轴晶粒形成机制包括:成分过冷、大爆炸假说、枝晶臂重熔及等轴晶体从模壁的分离。

Chalmers[28]提出“大爆炸”假说,指出等轴晶在

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模具壁的热过冷区域浇铸时成核，未附着在壁上的晶粒将通过对流/浇铸湍流扫入熔体中，经过重熔留存下来的晶粒将在过冷液体中生长。Jackson[29]提出枝晶臂重熔机制，指出对流/搅拌引起的生长速率波动会导致局部再辉现象，使枝晶的枝晶臂从主枝上熔化，碎片通过浮力和对流被带到熔体中，在过冷熔体中作为新的晶核生长。Ohno[30]提出等轴晶体从模壁的分离机制，指出粒状晶体通过根部附着在模具壁上，由于热对流引起的根部重熔而从结晶器壁分离，对流将熔断晶粒带至凝固前沿，在过冷熔体中成为新的形核质点。

脉冲磁场作用于金属及合金熔体会产生强制对流，迫使熔体剧烈振荡，使熔体温度均匀分布，抑制晶粒择优生长，还会使晶粒在电磁力的作用下游离到熔体内部，促进等轴晶的形成。

3.2　CET 的形成机理

目前，CET 的形成机理正在进一步探索中，由 Spittle[28]提出，在柱状前沿或附近的过冷熔体中存在等轴晶形核并生长或晶粒/枝晶碎片被运输到凝固前沿并生长这两种情况时，会产生 CET。其中，在后一种情况的凝固早期，熔体内部必须满足能使其他地方的形核/破碎枝晶运输和生存的条件。Hunt[31]研究表明，当柱状晶前沿的等轴晶的体积分数达到一定域值(0.49~0.66)时，会阻止柱状晶生长，进而产生 CET。Mahapatra[32]提出，当柱状晶尖端的温度梯度低于某一临界值时，会使其局部不稳定，从而导致溶质在尖端富集。因此，柱状晶前沿会产生成分过冷，导致等轴晶核生长并限制柱状晶的生长。

4　总结与展望

随着工业现代化对材料要求的提高，常规铸造方法制备金属及合金铸件已难以满足需求。应用脉冲磁场技术控制和细化金属凝固组织有助于制备高强度、良好塑性和韧性的金属材料，所以研究 CET 及晶粒细化的机理显得尤为重要。目前，脉冲磁场技术在工业生产中已经取得了较大进展，但其中影响组织演变的控制技术还不太成熟，而且脉冲磁场应用在高熔点金属及合金的制备过程中还存在一定的危险。为了促进脉冲磁场控制和细化晶粒技术的进一步发展，需要将数值模拟与实验相结合。可以通过数值模拟获得施加脉冲磁场的熔体温度场及流场，这些将为进一步研究凝固过程中脉冲电磁处理的优化提供基础。但对于晶粒生长和 CET 的模拟还有所欠缺，希望后续的工作可以对其进行深入研究，实现对凝固组织的有效控制。

参考文献：

[1] ZHANG L. Effect of pulsed magnetic field on microstructure and mechanical properties of eutectic Al-Si alloy[J]. Metallurgical and Material Transactions B, 2013, 44: 390-395.

[2] 马建宏，翟启杰. 金属凝固细晶技术及发展[J]. 现代铸铁，2008, 28: 15-21.

[3] WYRZYKOWSKI J W, GRABSKI M W. The Hall-Petch relation in aluminium and its dependence on the grain boundary structure [J]. Philosophical Magazine A, 1986, 53(4): 505-520.

[4] LI Y J, MA X P, YANG Y S. Grain refinement of as-cast superalloy IN718 under action of low voltage pulsed magnetic field [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(6): 1277-1282.

[5] MA X P, YANG Y S, WANG B. Effect of pulsed magnetic field on superalloy melt [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52: 5285-5292.

[6] EASTON M A, STJOHN D H. A model of grain refinement incorporating alloy constitution and potency of heterogeneous nucleant particles[J]. Acta Materialia, 2001, 49: 1867-1878.

[7] ASTA M, BECKERMANN C, KARMA A, et al. Solidification microstructures and solid-state parallels: Recent developments, future directions[J]. Acta Materialia, 2009, 57: 941-971.

[8] 班春燕，崔建中，巴启先，等. 在脉冲电流或脉冲磁场作用下 LY12 合金的凝固组织[J]. 材料研究学报，2002, 16: 322-326.

[9] 马建宏，高玉来，李杰，等. 脉冲电流作用下金属凝固研究现状评述[J]. 铸造，2007, 56(9): 905-908.

[10] 刘立强，李秋书，李仁兴，等. 脉冲磁场下铝液凝固组织的研究[J]. 中国铸造装备与技术，2004(1): 27-28.

[11] WANG B, YANG Y S, ZHOU J X, et al. Microstructure refinement of AZ91D alloy solidified with pulsed magnetic field [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18: 536-540.

[12] 闫猛，宋长江，张云虎，等. 电流对 Al-4.5%Cu 合金定向凝固组织的影响[J]. 铸造，2010, 59(1): 22-25.

[13] MANUWONG T, ZHANG W, KAZINCZI P L, et al. Solidification of Al alloys under electromagnetic pulses and characterization of the 3D microstructures using synchrotron X-ray tomography [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46: 2908-2915.

[14] CHEN Q P, SHEN H F. Numerical study on solidification characteristics under pulsed magnetic field [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 120: 997-1008.

[15] NAKADA M, SHIOHARA Y, FLEMINGS M C. Modification of solidification structures by pulse electric discharging [J]. ISIJ International, 1990, 30(1): 27-33.

[16] 訾炳涛，巴启先，崔建中，等. 强脉冲电磁场对金属凝固组织影响的研究[J]. 物理学报，2000, 49(5): 1010-1014.

[17] 赵志龙，张荣，刘林，等. 强脉冲磁场中 Al-Cu 共晶定向凝固组织的演变[J]. 材料研究学报，2005, 19(2): 208-212.

[18] YANG Y S, MA X P, LI Y J. Grain refinement and nuclei formation mechanism of Ni-based superalloy K417 with low voltage pulsed magnetic casting[J]. Materials Science Forum, 2010, 654-656: 428-431.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[19] LI Y J, TAO W Z, YANG Y S. Grain refinement of Al-Cu alloy in low voltage pulsed magnetic field[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(4): 903-909.

[20] LIOTTI E, LUI A, VINCENT R, et al. A synchrotron X-ray radiography study of dendrite fragmentation induced by a pulsed electromagnetic field in an Al-15Cu alloy[J]. Acta Materialia, 2014, 70: 228-239.

[21] BAO X Y, MA Y L, XING S Q, et al. Effects of pulsed magnetic field melt treatment on grain refinement of Al-Si-Mg-Cu-Ni alloy direct-chill casting billet[J]. Metals, 2022, 12: 1080.

[22] 牛晓武. 脉冲磁场下铝合金定向凝固磁场分布数值模拟[J]. 中国铸造装备与技术,2005, 4: 14-16.

[23] DONG H B, LEE P D. Simulation of the columnar-to-equiaxed transition in directionally solidified Al-Cu alloys[J]. Acta Materialia, 2005, 53: 659-668.

[24] ZHANG H T, NAGUMI H, ZUO Y, et al. Coupled modeling of electromagnetic field, fluid flow, heat transfer and solidification during low frequency electromagnetic casting of 7XXX aluminum alloys. Part I: Development of a mathematical model and comparison with experimental results[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 448(1-2): 189-203.

[25] GONG T Z, CHEN Y, CAO Y F, et al, Fast simulations of a large number of crystals growth in centimeter-scale during alloy solidification via nonlinearly preconditioned quantitative phase-field formula[J]. Computational Materials Science, 2018, 147: 338-352.

[26] JIE J C, YUE S P, LIU J, et al. Revealing the mechanisms for the nucleation and formation of equiaxed grains in commercial purity aluminum by fluid-solid coupling induced by a pulsed magnetic field[J]. Acta Materialia, 2021, 208: 116747.

[27] EASTON M, STJOHN D. Grain refinement of aluminum alloys: Part I. The nucleant and solute paradigms-a review of the literature [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30: 1613-1623.

[28] SPITTLE J A. Columnar to equiaxed grain transition in as solidified alloys[J]. International Materials Reviews, 2006, 51: 247-269.

[29] JACKSON K A, HUNT J D. Lamellar and rod eutectic growth[J]. Transactions ISIJ, 1971, 11: 18-23.

[30] OHNO A, MOTEGI T, SODA H. Origin of the equiaxed crystals in castings[J]. Transactions ISIJ, 1971, 11(1): 18-23.

[31] HUNT J D. Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic[J]. Materials Science and Engineering, 1984, 65 (1): 75-83.

[32] MAHAPATRA R B, WEINBERG F. The columnar to equiaxed transition in tin-lead alloys[J]. Metallurgical Transactions B, 1987, 18: 425-432.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net