

• 电磁场下的金属凝固及材料制备 Metal Solidification and Material Fabrication under Electromagnetic Field •
DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2022.08.001

强磁场下金属凝固过程中的溶质迁移行为及组织演变

周天儒^{1,2}, 刘铁¹, 阎金戈^{1,2}, 孙金妹^{1,3}, 袁双², 王强¹

(1. 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:凝固过程是金属材料加工制备中的重要步骤,对金属材料最终的性能起决定作用。熔体流动、溶质迁移、固/液界面形态演变等是凝固过程中的重要现象,其中合金熔体凝固过程中的溶质迁移行为决定了晶体生长情况和凝固组织的形成。有效地调控溶质迁移,可以改变固/液界面形态,重塑凝固组织结构。本文综述了强磁场下金属凝固过程中溶质迁移及组织演变,分析了强磁场各种效果的作用机制,介绍了强磁场控制溶质迁移行为及凝固组织演变的具体效果,并提出了功能材料制备的发展方向。

关键词:强磁场;梯度磁场;溶质迁移;凝固组织;成分过冷

中图分类号: TG111.4; TG111.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2022)08-0573-12

Solute Migration Behavior and Microstructure Evolution During Metal Solidification under High Magnetic Field

ZHOU Tianru^{1,2}, LIU Tie¹, YAN Jing^{1,2}, SUN Jinmei^{1,3}, YUAN Shuang², WANG Qiang¹

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The solidification process is an important step in preparation of metal materials and plays a decisive role in the final properties of metal materials. Melt flow, solute migration and the evolution of solid-liquid interface morphology are important phenomena in the solidification process. The solute migration behavior in the solidification process of alloy melt determines the crystal growth and the formation of solidification structure. Effectively regulating solute migration can change the morphology of solid/liquid interface and reshape the solidification structure. In this paper, the solute migration and microstructure evolution during metal solidification under strong magnetic field is reviewed, the action mechanism of various effects of strong magnetic field is analyzed, the specific effects of strong magnetic field on solute migration behavior and microstructure evolution is introduced, and the development direction of functional material preparation is also proposed.

Key words: high magnetic field; gradient magnetic field; solute migration; solidification microstructure; constitutional supercooling

材料的性能与其微观结构密切相关,微观结构受凝固过程中复杂的传热传质现象影响。因此,在凝固过程中控制微观结构的形成变得越来越重

要^[1-3]。近年来,强磁场作为一种非接触方法被应用于材料加工,尤其是凝固过程中,以更精确地控制材料的微观结构^[4-7]。强磁场对合金熔体中的对流、溶质扩散和溶质或相迁移等现象均会产生影响^[8-9]。研究发现,微观结构强烈依赖于溶质和颗粒(或类颗粒相)的迁移行为^[10-11]。因此,全面了解强磁场下凝固过程中溶质和颗粒的迁移行为,对于预测和控制材料的最终微观结构和性能至关重要。

导电液体在磁场中做切割磁感线运动产生感应电流,通过电流和外加磁场的共同作用将产生洛伦兹力(Lorentz force);如果在固/液界面上存在由塞贝克效应引起的热电流,则电流与外加磁场的相互作

收稿日期: 2022-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(51690161);凝固技术国家重点实验室开放课题(SKLS202101)

作者简介: 周天儒(1996—),硕士生,研究方向: 梯度磁场下金属定向凝固过程组织演变及成分过冷行为。

电话: 13079839080, Email: zhoutr1220@163.com

通讯作者: 刘铁(1975—),教授,研究方向: 强磁场下合金凝固行为及其组织控制,新能源材料制备,电磁流体力学理论及其应用。电话: 02483685967, Email: liutie@epm.neu.edu.cn

用将产生热电磁力 (Thermal electro magnetic force, TEMF), 一种特殊的 Lorentz 力; 如果存在磁场梯度, 则材料的磁化强度与外加磁场梯度的相互作用将产生磁化力^[7]。在 Lorentz 力、TEMF、磁化力、磁力矩和磁偶极子间相互作用的调控下, 溶质和粒子的迁移行为会发生改变。其中, 磁化力显示出控制溶质和粒子迁移的强大能力^[12-13]。通过将磁化力与其他磁场效应耦合, 已经可以在微观和宏观尺度上强烈抑制偏析, 并原位制备出一系列层状和梯度复合结构^[14]。利用该技术有望原位控制合金凝固过程中的溶质和颗粒迁移, 从而控制凝固微观结构。

本文主要综述了强磁场下金属凝固过程中的溶质迁移行为以及由此引发的凝固组织演变。介绍了强磁场下液态金属熔体中溶质和粒子迁移的演化 and 协同作用基本原理; 讨论了强磁场各种作用效果控制输运现象及溶质迁移的具体方式; 分析了强磁场控制溶质迁移引起凝固组织演变的作用机制; 对强磁场下金属凝固过程中的溶质迁移及凝固组织演变研究进行了总结和展望, 期望通过对强磁场控制合金凝固过程中的溶质和颗粒迁移的深入研究, 丰富金属凝固理论, 为制备新型功能材料提供新技术。

1 强磁场对材料的作用机理

磁场主要通过 3 种力和 2 种作用效果来控制凝固过程中溶质或颗粒的迁移, 即: Lorentz 力、热电磁力、磁化力, 以及对磁各向异性物质产生磁力矩作用、对磁性颗粒产生磁偶极子间相互作用。实验研究表明, 强磁场会显著影响金属凝固过程中金属液的流动^[15-17]、溶质和颗粒的迁移和分布^[18-20], 以及晶体取向行为^[21-25]等。

1.1 洛伦兹力

在磁场中, 导电流体做切割磁感线运动产生感应电流, 在电流和外加磁场的相互作用下产生洛伦兹力。洛伦兹力由下式给出:

$$F_L = J \times B = \sigma(\mu \times B) \times B \quad (1)$$

式中, σ 表示流体的电导率; μ 为流体的速度; J 是等效电流; B 为磁感应强度。此 Lorentz 力作用方向异于导电流体的流动方向, 可阻碍流体的流动。当金属熔体在强磁场作用下凝固时, 该 Lorentz 力对由重力场引起的对流有抑制作用, 进而影响材料的凝固过程和组织形貌。

1.2 热电磁力

金属凝固过程即固/液界面向液相中推移的过程, 如果固/液界面上存在由塞贝克效应引起的热电流, 电流和外加磁场共同作用会产生热电磁力(TEMF)。

例如, 枝晶在磁场中生长时, 基于塞贝克效应, 固态枝晶和剩余液相之间的温差可以诱导产生电流。TEMF 可由下式^[26]给出:

$$F_{\text{TEMF}} = i_{\text{TE}} \times B = \frac{\sigma_s \sigma_L^2}{(\sigma_s - \sigma_L)^2} f_s (\xi_s - \xi_L) \nabla T \times B \quad (2)$$

式中, i_{TE} 是热等效电流; σ_L 是液体的电导率; σ_s 是固体的电导率; ξ_L 是液体的热电势; ξ_s 是固体的热电势; f_s 是固体的体积分; T 为温度。当磁场强度足够大时, 热电磁力将促进导电流体流动, 产生热电磁对流(Thermal electromagnetic convection, TEMC)。

1.3 磁化力

合金熔体中析出相或溶质元素的迁移会影响其在凝固组织中的分布, 这对合金的性能至关重要。梯度磁场产生的磁化力作用可以很好地控制溶质或类颗粒相在合金熔体中的迁移行为, 对凝固组织有着重要影响。

在磁化和外加磁场梯度的相互作用下, 非磁性物质在梯度磁场中将受到磁化力的作用。感应磁化力的方向与材料磁性和磁场梯度方向有关, 例如, 顺磁性物质在正磁场梯度作用下会顺着磁场梯度方向运动。在实际应用中, 通常会施加纵向梯度磁场, 根据材料的磁化率, 将沿重力方向或反重力方向对材料施加磁化力。力的 z 轴分量可以表示为:

$$F = V(1/\mu_0) \chi B \, dB/dz \quad (3)$$

式中, V 是物质的体积; μ_0 是真空磁导率; χ 是单位体积的磁化率; B 是沿 z 方向的磁感应强度。

由液体基质 M 和不同磁化率的分散粒子 P 组成的二元系统, 在考虑浮力效应的情况下, 作用在 P 上的合力可由下式^[27]给出:

$$F_p = V_p(1/\mu_0)(\chi_p - \chi_M)B(dB/dz) - (\rho_p - \rho_M)V_p g \quad (4)$$

式中, ρ 是密度; g 是 z 方向上的重力加速度。假设 P 的绝对磁化率大于 M 的绝对磁化率, 那么如果 $B(dB/dz)$ 的值足够高, M 倾向于沿磁力方向(正磁化率)或与磁力方向(负磁化率)相反的方向在基质中迁移。

1.4 磁转矩

当非磁性材料(如顺磁性和抗磁性材料)被磁场磁化时, 由于磁化力方向与磁场方向不同, 材料将受到磁力矩的影响。 z 轴方向上的磁力矩可表示为^[28]:

$$L = \frac{V(\chi_1 - \chi_2)B^2 \sin 2\theta}{2\mu_0} \quad (5)$$

式中, χ_1 (沿 x 轴)为易磁化轴磁化率; χ_2 (沿 y 轴)为难磁化轴磁化率; θ 表示易磁化轴和外加磁场方向之间的角度。

1.5 磁偶极子间相互作用

磁性粒子在磁场中由于磁化作用, 转变成磁偶

极子。偶极-偶极相互作用使平行于磁场的平面内的粒子之间相互吸引,而垂直于磁场的平面内的粒子相互排斥。将粒子近似为球形,则两个相邻的磁偶极子 m_1 和 m_2 之间的相互作用能可以表示为^[29]:

$$U_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{l^2 q_{m_1} \cdot q_{m_2} - 3(q_{m_1} \cdot l)(q_{m_2} \cdot l)}{l^5} \quad (6)$$

式中, q_{m_1} 和 q_{m_2} 分别是 m_1 和 m_2 磁偶极子的磁偶极矩; l 表示粒子 m_1 和 m_2 中心之间的距离。

当粒子为顺磁性时,感应磁偶极矩可通过下面的公式计算:

$$q = \frac{\pi r_p^3}{6} \mu_0 \chi_e H_{ex} \quad (7)$$

式中, r_p 是粒子的半径; χ_e 是粒子的有效磁化率; H_{ex} 是外加磁场的磁场强度。

2 强磁场影响金属凝固过程中的溶质迁移

对流、溶质扩散和溶质或相迁移对合金凝固组织的形成起着至关重要的作用。强磁场通过 Lorentz 力、热电磁力和磁化力分别作用或耦合作用,可以有效地调控合金凝固过程中溶质迁移行为。Lorentz 力可抑制初生相沉降^[30],降低层片间距^[31]。热电磁力及其产生的热电磁对流可促进溶质流动,引发晶粒尺寸变化^[32]、组织偏析^[33-34]。磁化力促进溶质和颗粒相迁移,控制相的聚集^[35-36]。研究表明,多种作用效果之间存在协同或竞争关系,共同影响金属凝固过程的溶质迁移行为^[37]。

2.1 洛伦兹力抑制溶质对流

强磁场施加的 Lorentz 力可阻碍金属熔体的流动, Utech 等^[38]研究了 InSb 合金在强磁场下的凝固过程,发现产生的 Lorentz 力抑制了由液相中温度变化造成的溶质偏聚带的形成。Bergman 等^[39]在对 Pb-Sn 合金在磁场下的定向凝固过程研究中发现,水平磁场与液态合金感生出的 Lorentz 力抑制了糊状区前端对流通道的形成。

Liu 等^[31]研究了强磁场对铝硅合金凝固组织的影响,选取 Al-7.2 wt.%Si 合金和 Al-11.8 wt.%Si 合金在不同的强磁场和不同的冷却速度下进行凝固实验,测量了初生 Al 枝晶的二次枝晶臂间距 (Secondary dendrite arm spacing, SDAS) 和共晶片层间距 (Lamellar spacing, LS)。结果表明,强磁场可以降低 Al-7.2 wt.%Si 合金中初生 Al 枝晶的二次枝晶臂间距 (图 1)^[31],降低 Al-11.8 wt.%Si 合金中共晶片层间距,同时冷却速率的增加使得强磁场对二次枝晶臂间距的影响逐渐减小。SDAS 和 LS 的减小可归因于枝晶和共晶生长过程中固/液界面前沿液体中溶质扩散率的降低,而降低的原因正是由于洛伦兹力抑制了溶质的对流。

2.2 热电磁力促进溶质对流

热电磁力产生的热电磁对流可促进金属溶质流动, Gel'fgat 等^[40]对 InSb 晶体生长过程的研究表明,磁场改变了晶体形状,使其发生变形,这证明了热电磁对流的存在。Li 等^[41]考察了 Al-Cu 合金在强磁场下的定向凝固情况,发现强磁场降低 Al-Cu 合金定

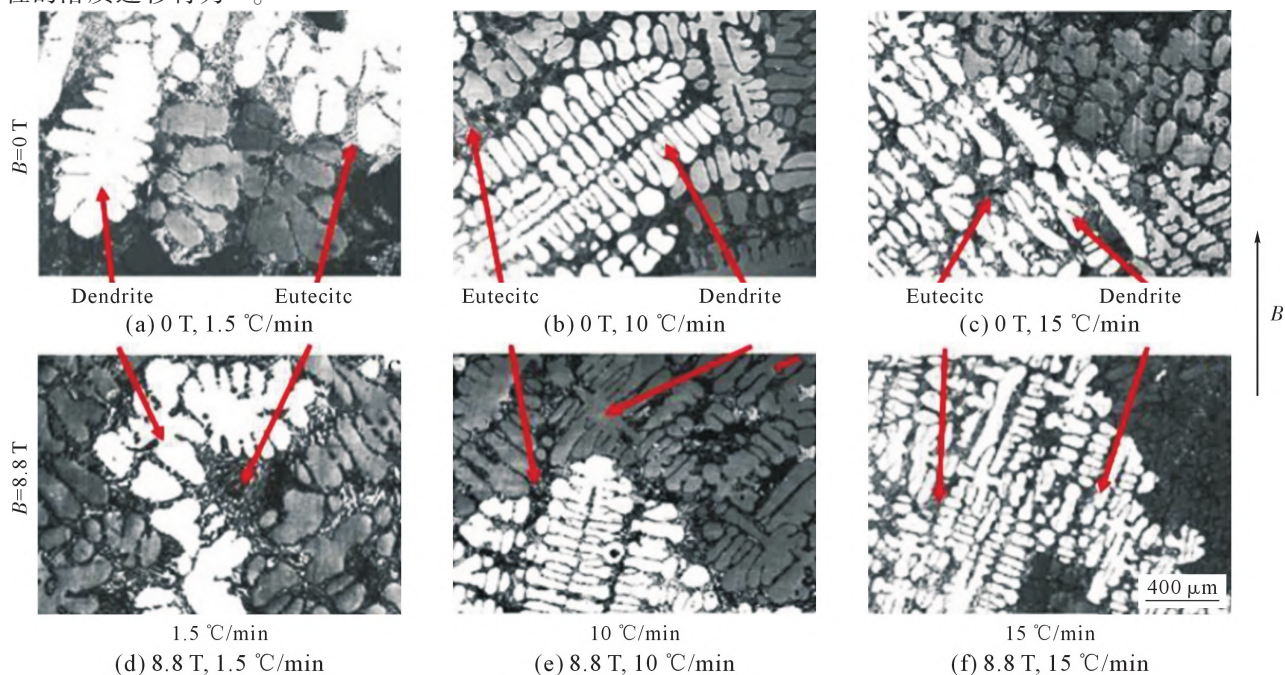


图 1 Al-7.2 wt.%Si 合金在不同磁场强度和冷却速率下定向凝固典型组织^[31]

Fig.1 Typical microstructure diagram of Al-7.2 wt.%Si alloy directionally solidified at different magnetic field strength and cooling rate^[31]

向凝固过程中固/液界面的稳定性^[42-44],同时热电磁对流效应改变了二次枝晶臂周围溶质原子分布,促进二次枝晶臂发生断裂,并在样品边缘处形成了杂晶。Du 等^[32]对 Al-10 wt.%Cu 合金施加垂直于生长方向的水平磁场,发现 Al-10 wt.%Cu 合金初生 α (Al) 晶粒尺寸呈梯度分布,从左侧到右侧晶粒尺寸逐渐减小,并且形成了斜向偏析通道(图 2)^[32]。这是由于在定向凝固过程中,受固/液界面温度梯度和不同热物性影响产生的塞贝克效应导致热电流在固液两相流动,引发了两种热电磁效应:TEMF 直接作用于初生晶粒和 TEMC 在熔体附近导致晶粒表面流体运动变化。这两种效应共同作用,使初生晶粒在水平方向尺寸梯度分布,垂直方向上发生偏析,导致了偏析通道的形成。Li 等^[33]研究了横向磁场对 Al-40 wt.%Cu 合金定向凝固过程初生 Al_2Cu 枝晶偏析和生长的影响,发现横向磁场在定向凝固过程中会造成径向偏析,从而形成通道状和斑点状偏析。此外,磁场减小了糊状区长度和一次枝晶间距,且随着磁场强度的增加,这些影响逐渐减弱。上述结果可能是由于 TEMC 驱动溶质在糊状区域的传输导致的。Kao 等^[34]研究了固/液界面溶质边界层的溶质羽流(当溶质的密度低于液相密度时,溶质层中的浮力指向液相,引发溶质向液相迁移),通过实验和模拟结合的方法研究了 0.2 T 磁场对 Ga-25 wt.%In 合金凝固过程的影响,发现磁场使高浓度 Ga 羽流的微观结构发生变化。微观结构表现出二次枝晶臂优先生长、一次枝晶臂间距变化、样品一侧发生粗化(图 3(a~c))^[34],在凝固过程中,由于温度梯度的变化,会

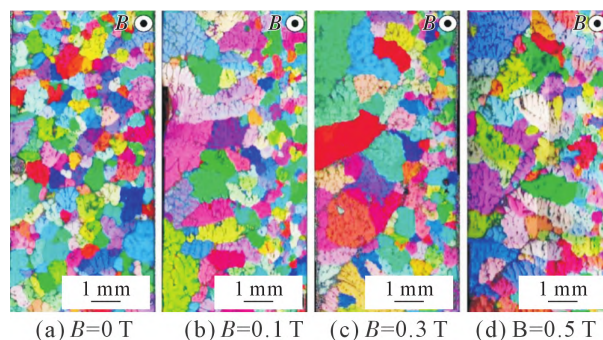


图 2 凝固速率为 $20 \mu\text{m/s}$ 时 Al-10 wt.%Cu 合金在不同磁场强度的定向凝固样品 EBSD 图^[32]

Fig.2 EBSD maps for the samples in directionally solidified Al-10 wt.%Cu alloys at the growth speed of $20 \mu\text{m/s}$ under various magnetic field intensities^[32]

形成热电流。这些电流与外部施加的磁场相互作用,产生热电洛伦兹力 (TEF),通过热电磁流体力学 (Thermoelectric magnetohydrodynamic, TEMHD) 现象驱动流体运动。TEMHD 同时造成宏观偏析,在下部形成稳定的通道,进一步促进了 Ga 羽流的迁移(图 3(d~f))^[34]。

洛伦兹力和热电磁力对溶质迁移的耦合作用也得到了研究者的关注,Yan 等^[37]研究了强磁场下 Al-18 wt.%Ni 合金糊状区的溶质迁移行为,发现强磁场对糊状区的溶质迁移有显著影响。在磁场下原来的胞状包晶 Al_3Ni 转变为不规则的块状,并析出许多以前未观察到的树枝状 Al_3Ni 相;原来直而清晰的包晶界面变得不均匀且凹凸不平 (图 4(a1~a2))^[37];无磁场时 Al_3Ni 相和 Al_3Ni_2 相在界面上分布均匀,施加磁场改变了糊状区内的溶质分布(图 4(b1~b3))^[37]。这是因为在温度梯度和磁场的作用下,TEMC 导致

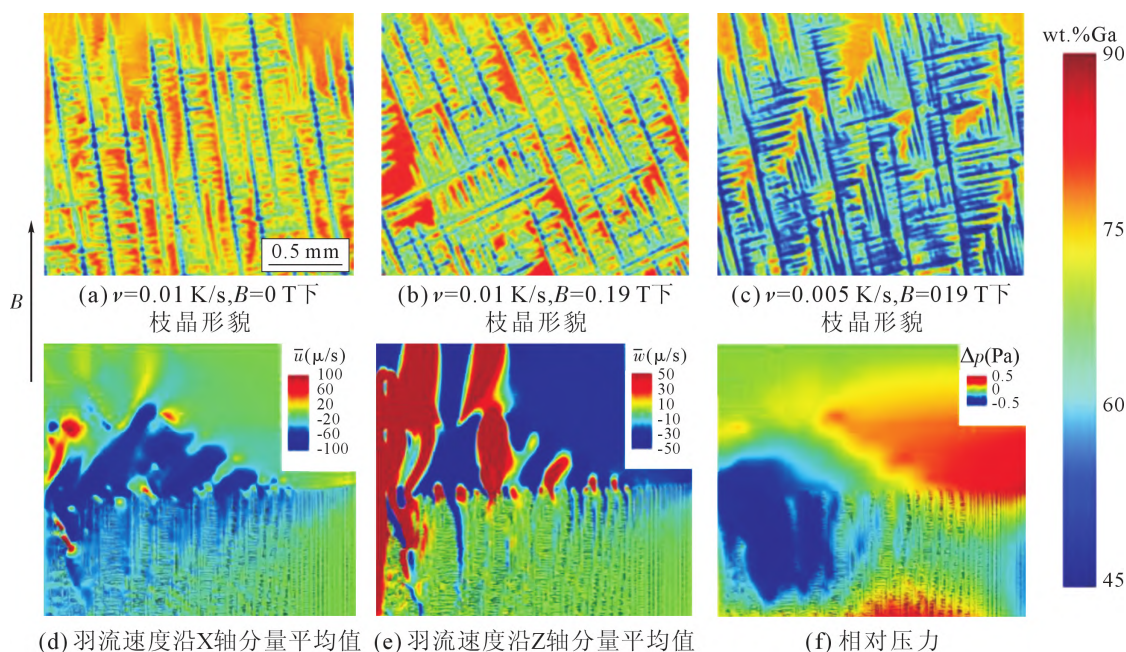
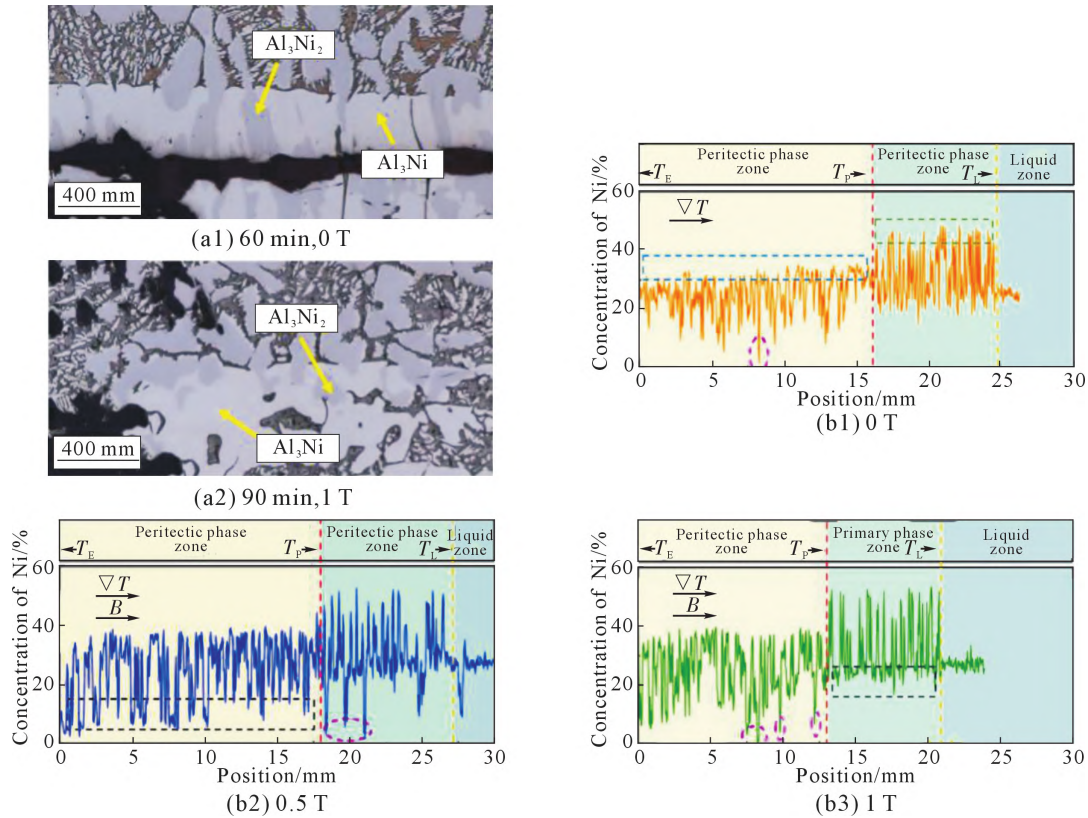


图 3 Ga-25 wt.%In 合金定向凝固枝晶形貌、羽流速度及相对压力^[34]

Fig.3 Dendrite morphology, plume velocity and relative pressure of directionally solidified Ga-25 wt.%In alloy^[34]

图4 不同磁场强度和保温时间长度下包晶反应界面形貌^[37]Fig.4 Morphology of peritectic reaction interface under different magnetic field intensity and holding time^[37]

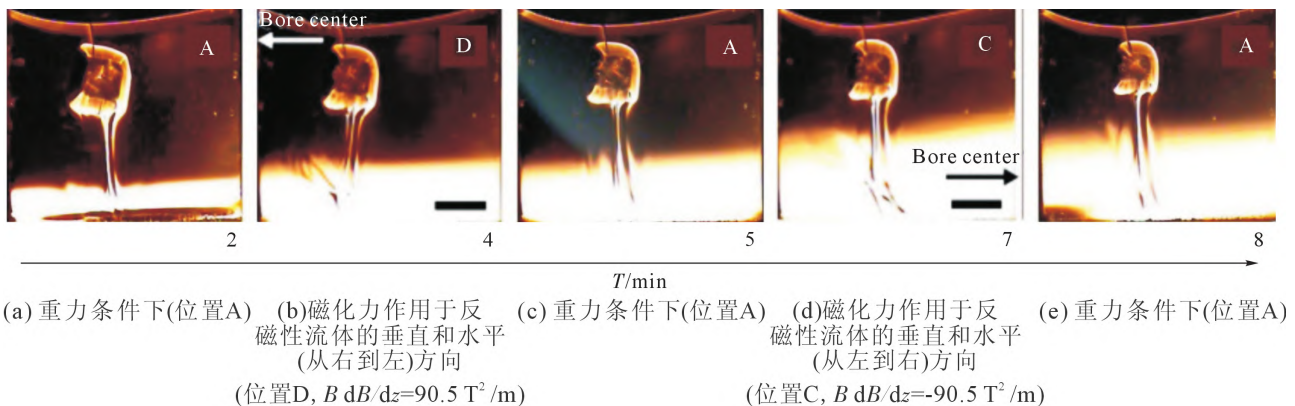
溶质偏析;洛伦兹力和热电磁力共同作用,在横向上,热电磁力大于洛伦兹力,从而导致Ni原子的横向迁移,结构变得不均匀,界面凹凸不平;在纵向上,洛伦兹力产生的阻尼效应阻碍了溶质梯度引起的Ni原子向下迁移趋势,破坏了原来的温度梯度区熔(Temperature gradient zone melting, TGZM)效应。

2.3 磁化力促进对流和颗粒相迁移

梯度磁场对合金熔体中溶质团簇或颗粒的磁化力作用可以控制其在凝固过程中的迁移。Li等^[45]研究了Al-18 wt.%Si合金在高梯度磁场中溶质Si和初生Si相的分布,发现高梯度磁场可以影响溶质Si和初生Si相的分布。同时,强磁场也会影响初生

Si相的形状,诱导初生Si相由片状向晶粒转变,并使初生Si相尺寸减小。Wang等^[46]通过原位观测方法,研究了强磁场对十二水硫酸铝钾流动的影响,图5^[46]显示在高梯度磁场中,抗磁流体的流动方向发生了变化。在没有磁场的情况下,溶解液流直接向下移动到样品架的底部(图5(a))^[46],而在有磁场的情况下(图5(b~d))^[46],溶解液流略微弯曲。这一实验观察表明,即使是对磁场响应很小的材料也可以利用磁化力来控制流体的流动,而无需与物质直接接触。

在液态合金中,浓度的随机波动会产生较小的短程有序域,即使在远高于熔化温度的温度下,也会产生大量溶质富集区^[47]。如果梯度磁场的 $|B(dB/dz)|$ 值

图5 不同磁场条件下十二水合硫酸铝钾溶解过程的纹影图像^[46]Fig.5 Schlieren images obtained in the dissolution process of aluminum potassium sulfate dodecahydrate under different magnetic field conditions^[46]

足够大,则磁场产生的磁阿基米德浮力很可能会驱动溶质富集区沿磁场方向或相反方向迁移,并在合金熔体中产生溶质再分配。研究表明,高梯度磁场有效地控制了铝熔体中初生硅板的迁移^[48],铝/硅熔体中的 TiAl_3 颗粒的迁移^[35],锰/锑熔体中的初生 MnSb 颗粒的迁移^[36]。Liu 等^[36]改变梯度强磁场的大小和方向,考察了 $\text{Mn-89.7 wt.\%Sb}$ 合金的凝固组织及初生 MnSb 相在基体中的迁移行为。如图 6^[36]所示,无磁场时,初生 MnSb 颗粒在 Mn/Sb 共晶基体中均匀分布;施加梯度强磁场后,初生 MnSb 相颗粒在试样中聚集分布,且聚集方向受磁场梯度方向控制。同时发现 $|B(\text{dB}/\text{dz})|$ 值和保温时间的增加也会增强初生 MnSb 相颗粒在试样底部的聚集程度。

3 强磁场控制溶质和颗粒迁移及凝固组织演变

在设计或调控合金凝固组织时,合金元素和析出相在凝固前或凝固过程中的分布至关重要^[49]。凝固组织中的溶质偏析无论是宏观尺度还是微观尺度,都会导致合金性能的下降^[50-53]。例如,晶间偏析不仅会导致晶粒尺寸上的物理和化学性能差异,还会对铸件的机械性能产生显著影响;重力偏析对铸造材料的后续加工行为和性能有不利影响。因此,通过强磁场控制溶质和颗粒的迁移,减少材料偏析,进而改变凝固组织结构引起了研究者的广泛关注^[54-55]。

3.1 强磁场控制相沉积和溶质分离

合金熔体中固相的迁移受对流的强烈影响^[56],洛伦兹力可以显著抑制熔体中的热对流^[57-58]。利用这种效应,可以明显抑制某些合金在凝固过程中的相沉积,并获得更均匀的微观结构^[33,59]。

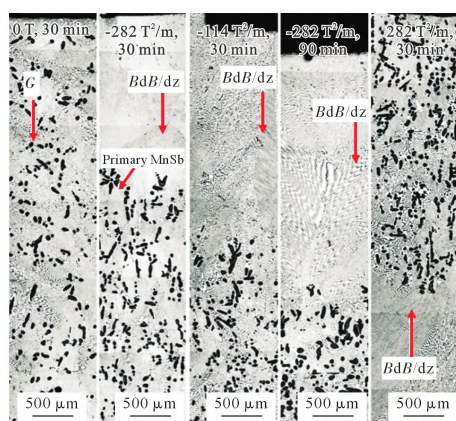
在早期的实验中,研究者选择 Al-Si 合金作为模型材料,以证明高梯度磁场对合金熔体中固相迁

移行为的控制作用。Wang 等^[48]在过共晶 Al-Si 合金凝固过程中应用了此类磁场,并成功地控制了初生 Si 颗粒的偏析,Jin 等^[60]也观察到了类似的现象。在这些研究之后,Lou 等^[35]比较了匀强磁场和高梯度磁场的控制效率,发现通过耦合磁化力和洛伦兹力,梯度磁场可以更好地抑制合金中 TiAl_3 粒子的偏析。

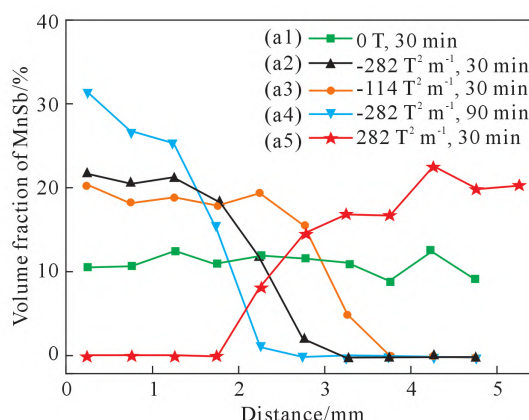
通过使用高梯度磁场,一些合金中合金元素的重力偏析也得到了改善。Wang 等^[61]的研究表明,Cu 和 Mg 通常分别在 Al-Cu 合金的下部和 Al-Mg 合金的上部分离,而应用负高梯度磁场可以抑制这种分离。这种抑制强烈依赖于磁场梯度方向:如果施加正梯度,两种合金中的重力偏析都会加剧。上述影响取决于元素的物理性质,如磁化率、密度和电导率等。

3.2 强磁场诱发具有成分梯度的颗粒或聚集相

在控制相沉积和溶质分离的研究基础上,通过控制合金中类颗粒相在凝固过程中的迁移行为,已经可以在几种合金系统中制备出具有体积分数梯度的颗粒或相结构^[36]。该方法已扩展到多相合金系统,如 $\text{Al-12Si-11.8Mg-6.5Ti}$,其在平衡凝固条件下具有 5 种以上的不同相。Liu 等^[62]在高梯度磁场中以相对较低的冷却速度对该合金进行凝固,发现随着温度的降低,初生 Ti_5Si_4 颗粒、初生 $(\text{Al}, \text{Si})_3\text{Ti}$ 颗粒、初生 Mg_2Si 和 Al/Si 共晶在不同的温度范围内沉淀,并在最终的显微组织中形成了这些相的层状和梯度分布。Li 等^[63]在径向梯度磁场中对凝固的 Bi-Mn 合金进行了类似的研究,结果表明该磁场产生径向分布的磁力,凝固过程中析出的初生 MnBi 相在磁力的驱动下与液态 Bi 基体分离,在垂直于磁场方向的平面上形成环状结构。Dong 等^[64]在对称分布的梯度磁场下,在凝固和等温退火过程中原位制备了形貌和成分均呈现对称分布的 MnSb/Sb(共晶)-MnSb (初生



(a) $\text{Mn-89.7\%}$ 合金中 MnSb/Sb-MnSb 相微观组织



(b) MnSb 颗粒体积分数分布

图 6 不同磁场条件下保温不同时间时 $\text{Mn-89.7\%Sb}$ (质量分数)合金中 MnSb/Sb-MnSb 相微观组织^[36]
Fig.6 Microstructure of MnSb/Sb-MnSb phase in $\text{Mn-89.7 wt.\%Sb}$ alloy with different magnetic field and holding time^[36]

相)-MnSb/Sb(共晶)复合结构。这是由于施加对称梯度强磁场后,产生的正、负阿基米德磁化力使富锰区或 MnSb 颗粒向试样中心移动,使得 MnSb 初生枝晶和合金颗粒沿试样中部呈对称梯度分布。初生 MnSb 相枝晶和颗粒的含量沿样品的纵轴先增加后减少, MnSb 相含量在样品中部最高,两端最低(图7)^[64]。

3.3 强磁场改变固/液界面稳定性及相结构

在合金定向生长过程中,磁场会产生 TEMF,从而诱发热电磁对流(TEMC)并导致溶质迁移^[65-66]。Li

等^[67]研究了 Zn-Cu 包晶合金在轴向强磁场作用下的定向凝固组织变化情况。结果表明,磁场诱导了固/液界面的失稳,形成了带状结构。磁场导致柱状 η -Zn 和 ε -Zn₃Cu 枝晶断裂。随着外加磁场的增大,规则的柱状枝晶转变为取向各异的等轴晶,且尺寸逐渐减小(图8)^[67]。在轴向磁场定向凝固过程中,如果晶体易磁轴与择优生长方向不一致,则易磁轴向磁场方向旋转时,枝晶的主臂会偏离凝固方向,破坏枝晶阵列和固/液界面。此外,由于塞贝克效应,在固/液界面和胞枝晶界面尖端处会产生热电流。当施加磁场

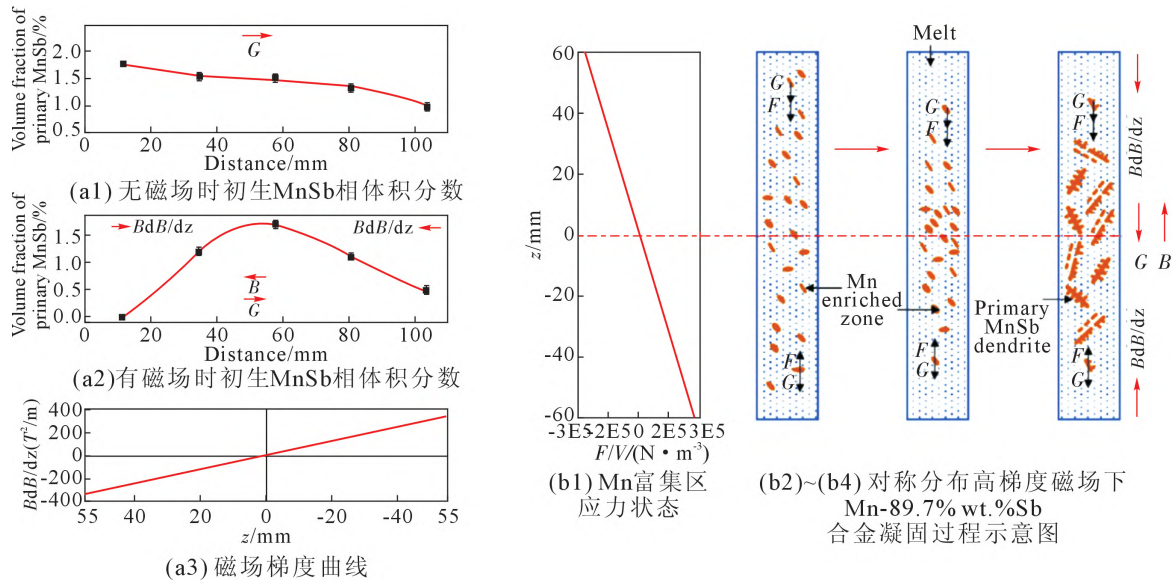


图7 Mn-89.7% Sb 合金定向凝固初生相体积分数及凝固示意图^[64]

Fig.7 Volume fraction and solidification diagram of primary phase in directional solidification of Mn-89.7% Sb alloy^[64]

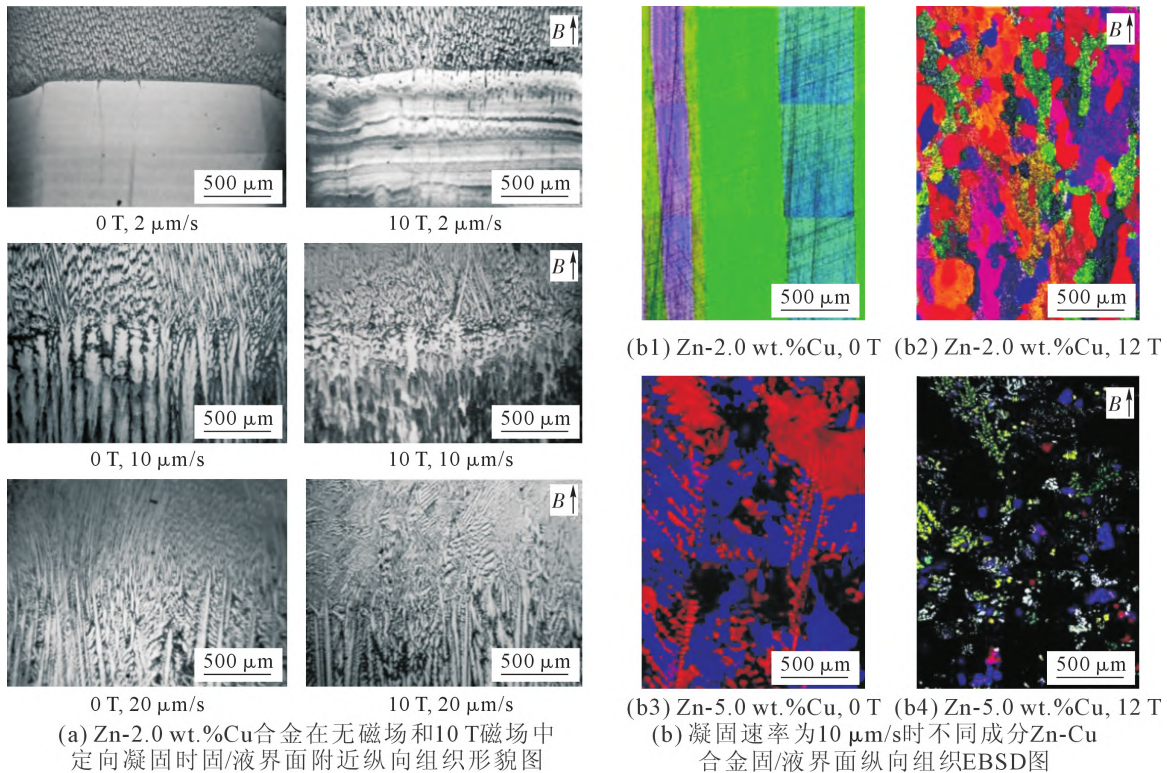


图8 Zn-Cu 合金定向凝固组织形貌及 EBSD 图^[67]

Fig.8 Microstructure morphology and EBSD diagram of Zn-Cu alloy during directional solidification^[67]

时,电流与磁场之间的相互作用会产生热电磁力。这种热电磁力也破坏了枝晶阵列,使液固界面不稳定。

Shen 等^[68]考察了磁场下 Sn-10 wt.%Bi 合金定向凝固过程,发现随着磁场强度增加,固/液界面形貌逐渐变陡(图 9(a))^[68],这是因为 TEMC 的强度随磁场强度同步增加,从而增强了 Bi 溶质从样品左侧向右侧的输运;同时还发现磁场对一次枝晶间距的细化有显著影响(图 9(b))^[68]。根据 Kurz-Fisher 模型,一次枝晶间距将随着温度梯度 G 的增加或非平衡固相和枝晶尖端之间温差 ΔT 的减小而减小。溶质分布的测量结果表明,在 0.5 T 磁场作用下,样品右侧(位置 c2、c4)的溶质含量远高于左侧(位置 c1、c3),如图 9(c)^[68]所示。这说明 TEMC 将 Bi 溶质输送到样

品右侧,使样品左侧溶质含量降低,从而减小非平衡固相和枝晶尖端之间的温差,进而减小一次枝晶间距。

此外,由 TEMC 引起的液体运动可诱发 Lorentz 力,而 Lorentz 力反过来又会抑制这种运动,从而降低 TEMC 效应。因此,在影响对流方面,Lorentz 力和 TEMF 之间将存在竞争,竞争程度取决于磁场强度大小^[69-70]。如果对合金定向凝固过程施加高梯度磁场,磁场将通过 Lorentz 力、TEMF 和磁化力影响凝固。这些力会对溶质和颗粒迁移产生耦合效应,并可能产生更复杂的凝固微观结构。

Wu 等^[71]研究了高梯度磁场对过共晶 Al-8 wt.% Fe 合金定向凝固的影响。在梯度磁场作用下,初生 Al_3Fe 相发生扭曲和断裂,一些相在样品中聚集并随

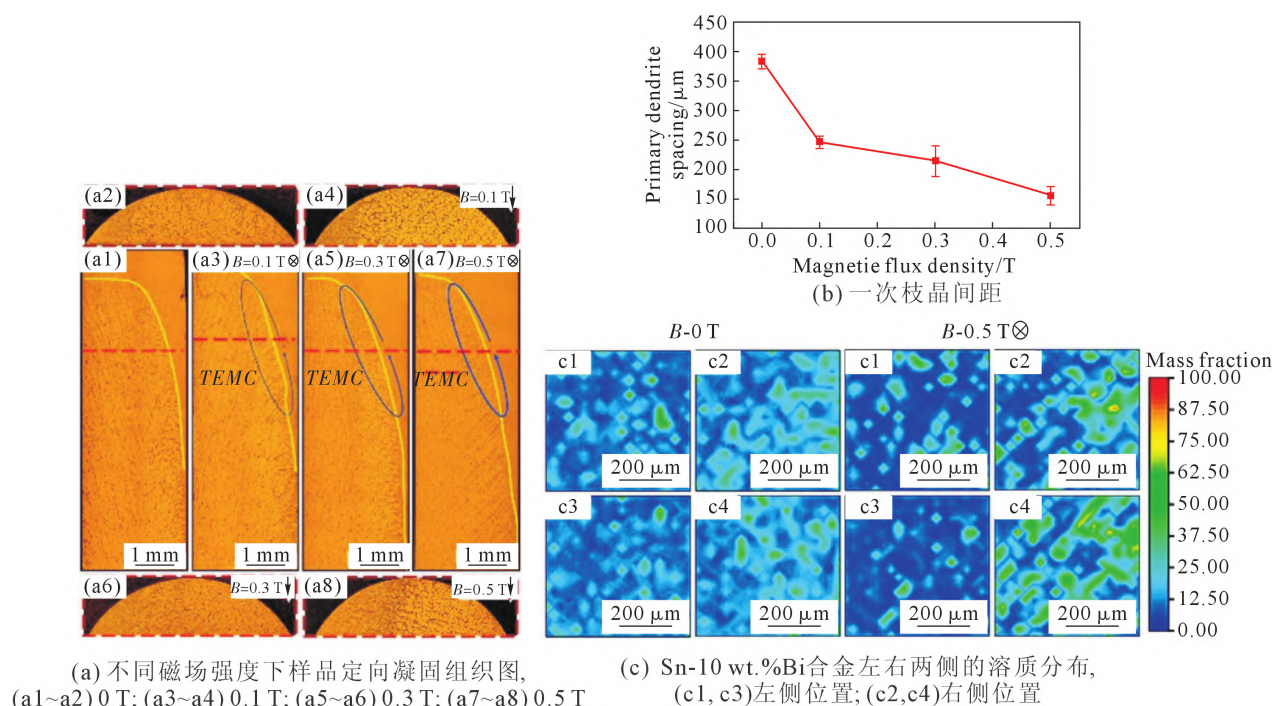


图 9 Sn-10 wt.%Bi 合金不同磁场强度下定向凝固的微观结构、一次枝晶间距和溶质分布^[68]
Fig.9 Microstructure, primary dendrite spacing and solute distribution of Sn-10 wt.%Bi alloy during directional solidification under different magnetic field strength^[68]

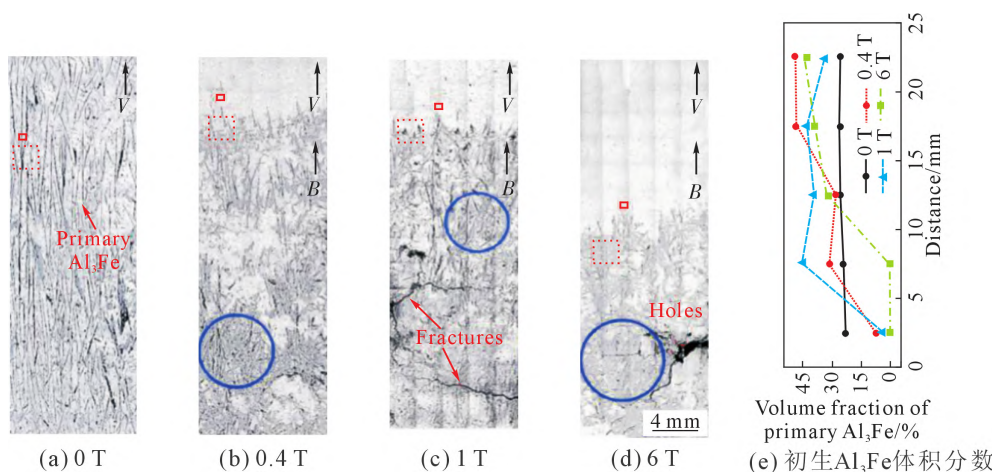


图 10 Al-8 wt.%Fe 合金定向凝固微观组织及初生相体积分数^[71]
Fig.10 Microstructure and volume fraction of primary phase in directional solidification of Al-8 wt.%Fe alloy^[71]

机分布,形成层状组织,样品顶部出现共晶区(图10)^[71]。在定向凝固过程中,磁化力使液态基体中的富铁区向下移动到样品底部,TEMF在固液界面前部引起交叉对流,同时 Lorentz 力抑制了对流,以维持磁化力引起的富铁区的运动,并抵消 TEMF 效应来维持磁化力诱导的富铁区的运动。这3种力的耦合效应导致初生 Al_3Fe 相变形和断裂,共晶区和初生 Al_3Fe 相之间界面形态不稳定,聚集初生 Al_3Fe 相随机分布。

3.4 强磁场引发成分过冷及凝固组织演变

Tang 等^[72]研究了 Al-1.9 wt.%Fe 合金在不同凝固速率和磁场强度下的定向凝固情况,分析了强磁场对定向凝固过程中合金组织演变的影响及其与生长速度的关系。发现随着生长速度的增加,微观组织呈现共晶→胞状共晶→亚共晶的转变。根据 Liu 等^[73]的研究,Lorentz 力可以通过抑制对流来减慢溶质在糊状区域的迁移,并产生溶质截留。因此可以推断这是由于在强磁场的作用下,Lorentz 力对溶质的迁移有较强的抑制作用,固液界面前的成分过冷进一步放大。同时 Lorentz 力和热电磁对流之间也存在竞争关系,在凝固速率较低时,热电磁力更有效地推动对流,进而促进溶质迁移。在凝固速率较高时,Lorentz 力更有效地抑制对流,进而增大成分过冷。

Yan 等^[74]对 Al-1.9 wt.%Fe 合金在不同强磁场梯度下的定向凝固进行了实验研究。发现高磁场梯度改变了凝固过程中的组织形貌,导致凝固组织发生共晶失稳、胞状转变、单相失稳和枝晶转变(图11)^[74]。这种现象类似于在无磁场的情况下,随着生长速度的增加而引起的平面胞状枝晶生长模式转变。在单相失稳过程中, $\alpha\text{-Al}$ 相通过一种独立的形核机制形成,即首先破坏共晶胞,然后独立于原始共

晶胞结构内部形核。高磁场梯度通过磁化力和 Lorentz 力对凝固过程中溶质迁移和扩散的耦合作用,在固液界面前沿触发了成分过冷,导致生长模式转变。同时还提出了一种高磁场梯度下共晶合金的凝固模型,修正了高磁场梯度下 Al-Fe 合金耦合区的边界,首次定性绘制了梯度磁场下 Al-Fe 合金的组织选择图像(图12)^[74]。

4 总结

凝固是合金制备中的重要过程,包含复杂的传热传质行为,其中的溶质迁移和再分配行为对材料最终的性能有着决定性的影响。强磁场作为一种清洁高效的外物理场,通过洛伦兹力、热电磁力和磁化力等作用效果控制金属凝固过程中溶质迁移和相的分布,进而调控凝固组织,受到了研究者的广泛关注。

关于强磁场调控溶质迁移和凝固组织演变的研究取得了很大进展。强磁场通过一种或多种作用效果共同作用,可以促进或抑制溶质及颗粒相的迁移。同时还能控制相的沉积,形成具有成分梯度的聚集相,改变固/液界面稳定性及诱导凝固组织发生转变。

目前,强磁场多种作用效果的耦合作用的具体机制还需要深入研究,发展并完善强磁场理论对丰富凝固技术、优化工艺设计和调控材料组织及性能具有重要的理论和现实意义。近年来提出了利用梯度磁场控制溶质迁移进而调控成分过冷行为的理念,有望拓宽材料制备的工艺技术,开发新型凝固技术,推动材料的性能优化和新材料开发,是未来的研究方向之一。

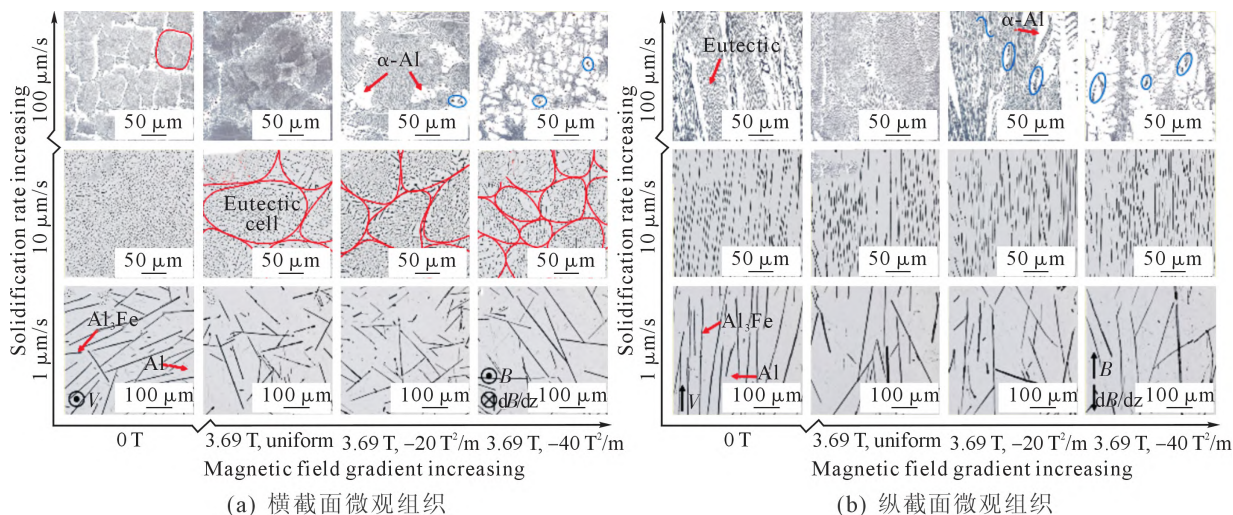


图 11 Al-1.9 wt.%Fe 合金不同条件下定向凝固组织形貌^[74]
Fig.11 Directionally solidified microstructure of Al-1.9 wt.%Fe alloy under different conditions^[74]

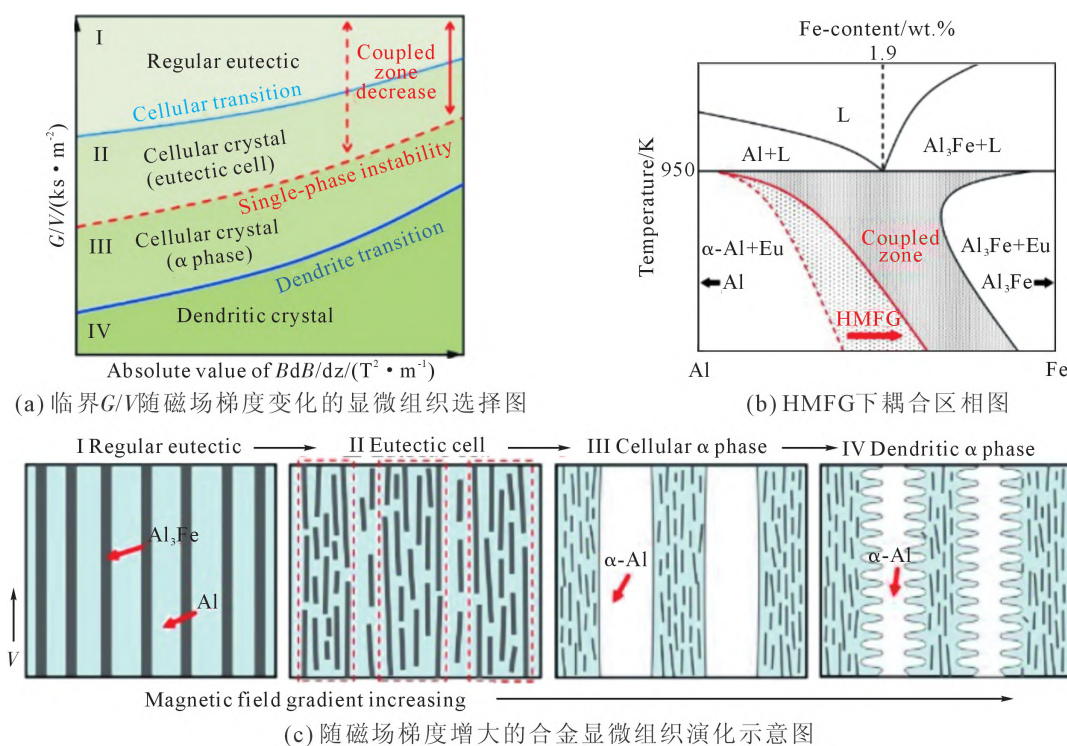


图 12 磁场梯度对 Al-Fe 合金显微组织选择的影响^[74]
Fig.12 Effect of gradient magnetic field on microstructure selection of Al-Fe alloy^[74]

参考文献:

- [1] WEI X X, XU W, KANG J L, et al. Phase selection in solidification of undercooled Co-B alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(4): 352-358.
- [2] LIU T, DONG Q, FU Y A, et al. Effect of addition of La and Ce on solidification behavior of Al-Cu alloys[J]. Materials Letters, 2022, 324: 132653.
- [3] 翟薇, 常健, 耿德路, 等. 金属材料凝固过程研究现状与未来展望[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1953-2008.
- [4] 刘昱东, 魏晨, 闫育洁, 等. 强磁场对 CrCoNi 中熵合金过冷凝固组织与性能的影响[J]. 铸造技术, 2022, 43(5): 346-350.
- [5] LIN W H, ZHOU B F, LIU Y, et al. Dendrite morphology in Al-20 wt.%Cu hypoeutectic alloys in 24 T high magnetic field quantified by ex-situ X-ray tomography[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 918: 165679.
- [6] WANG Q, LIU T, WANG K, et al. Solidified structure control of metallic materials by static high magnetic fields[J]. ISIJ International, 2010, 50(12): 1941-1946.
- [7] WANG Q, LIU T, WANG K, et al. Progress on high magnetic field-controlled transport phenomena and their effects on solidification microstructure[J]. ISIJ International, 2014, 54(3): 516-525.
- [8] ZHAO C C, WANG E G, ZUO X W. Effect of composition, high magnetic field and solidification parameters on eutectic morphology in Cu-Ag alloys[J]. High Temperature Materials and Processes, 2017, 36(4): 373-379.
- [9] WANG Q, LIU Y, LIU T, et al. Magnetostriction of TbFe₂-based alloy treated in a semi-solid state with a high magnetic field[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(13): 3642-3657.
- [10] 袁双, 刘泽昆, 刘家岐, 等. 强磁场条件下材料可控制备的研究进展[J]. 中国材料进展, 2019, 38(8): 759-767.
- [11] 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.
- [12] LIU T, WANG Q, YUAN Y, et al. High-gradient magnetic field-controlled migration of solutes and particles and their effects on solidification microstructure: A review[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(11): 118103.
- [13] LI L, ZHANG Y D, ESLING C, et al. Influence of a high magnetic field on the precipitation behavior of the primary Al₃Fe phase during the solidification of a hypereutectic Al-3.31 wt.% Fe alloy[J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 339(1): 61-69.
- [14] DONG S L, LIU T, DONG M, et al. Crystallographic orientation of primary and eutectic phases in a hypoeutectic Mn-Sb alloy induced by solidification in high magnetic fields[J]. Journal of Applied Crystallography, 2019, 52(5): 945-950.
- [15] LI L, XU B, TONG W P, et al. Directional growth of tin crystals controlled by combined solute concentration gradient field and static magnetic field[J]. Acta Metallurgica Sinica(English letters), 2015, 28(6): 725-732.
- [16] SHVYDKIY E, BAAKE E, KÖPPEN D. Liquid metal flow under traveling magnetic field-solidification simulation and pulsating flow analysis[J]. Metals, 2020, 10(4): 532.
- [17] WROBEL W A, FORMALIK-WAJS E, SZMYD J S. Analysis of the influence of a strong magnetic field gradient on convection process of paramagnetic fluid in the annulus between horizontal concentric cylinders[J]. Journal of Physics: Conference series, 2012, 395: 012124.
- [18] HU S D, GAGNOUD A, FAUTRELLE Y, et al. Fabrication of aluminum alloy functionally graded material using directional solidification under an axial static magnetic field[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 7945.

- [19] LI Y J, TENG Y F, FENG X H, et al. Effects of pulsed magnetic field on microsegregation of solute elements in a Ni-Based single crystal superalloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, 33(1): 105-110.
- [20] 李喜, 任忠鸣, 余建波, 等. Bi-Mn 合金片状初生 MnBi 相在强磁场中的凝固组织[J]. *金属学报*, 2005(7): 685-690.
- [21] GAO P F, LIU T, DONG M, et al. Magnetostrictive gradient in $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}$ induced by high magnetic field gradient applied during solidification[J]. *Functional Materials Letters*, 2016, 9(1): 1650003.
- [22] LIU T, LIU Y, WANG Q, et al. Microstructural, magnetic and magnetostrictive properties of $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.95}$ prepared by solidification in a high magnetic field [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(12): 125005.
- [23] GAO P F, WANG Q, LIU T, et al. Effect of cooling rate on crystal orientation, and magnetic and magnetostrictive properties of TbFe₂-based alloy treated in semisolid state under a high magnetic field[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(5): 1-6.
- [24] LIU T, GAO P F, DONG M, et al. Effect of cooling rate on magnetostriction gradients of $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}$ alloys solidified in high magnetic field gradients[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(5): 056216.
- [25] DONG S L, LIU T, DONG M, et al. Enhanced magnetostriction of Tb-Dy-Fe via simultaneous <111>-crystallographic orientation and morphological alignment induced by directional solidification in high magnetic fields[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(5): 053903.
- [26] DAVOUST L, MOREAU R, BOLCATO R, et al. Influence of a vertical magnetic field on convection in the horizontal Bridgman crystal growth configuration[J]. *Magnetohydrodynamics*, 1995, 31(3): 218-227.
- [27] IKEZOE Y, HIROTA N, NAKAGAWA J, et al. Making water levitate[J]. *Nature*, 1998, 393(6687): 749-750.
- [28] SUGIYAMA T, TAHASHI M, SASSA K, et al. The control of crystal orientation in non-magnetic metals by imposition of a high magnetic field[J]. *ISIJ International*, 2003, 43(6): 855-861.
- [29] MARTIN J E, VENTURINI E, ODINEK J, et al. Anisotropic magnetism in field-structured composites[J]. *Physical Review E*, 2000, 61(3): 2818-2830.
- [30] WANG C J, WANG Q, WANG Z Y, et al. Phase alignment and crystal orientation of Al_3Ni in Al-Ni alloy by imposition of a uniform high magnetic field[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2008, 310(6): 1256-1263.
- [31] LIU T, WANG Q, ZHANG H W, et al. Effects of high magnetic fields on solidification microstructure of Al-Si alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(6): 1628-1634.
- [32] DU D F, FAUTRELLE Y, DONG A P, et al. In-situ fabrication of graded material with the application of a horizontal magnetic field during directional solidification [J]. *Materials Characterization*, 2018, 141: 423-432.
- [33] LI H X, DU D F, GAGNOUD A, et al. Effect of a transverse magnetic field on solidification structure in directionally solidified Al-40 wt.% Cu alloys[J]. *Journal of Materials Research*, 2016, 31(2): 213-221.
- [34] KAO A, SHEVCHENKO N, HE S, et al. Magnetic effects on microstructure and solute plume dynamics of directionally solidifying Ga-In alloy [J]. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2020, 72(19): 3645-3651.
- [35] LOU C S, WANG Q, WANG C J, et al. Migration and rotation of $TiAl_3$ particles in an Al-melt solidified under high magnetic field conditions[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 472(1-2): 225-229.
- [36] LIU T, WANG Q, GAO A, et al. Fabrication of functionally graded materials by a semi-solid forming process under magnetic field gradients[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57(11): 992-995.
- [37] YAN J G, LIU T, LIAO J, et al. Microstructural evolution and solute migration in the mushy zone of peritectic Al-18 wt.%Ni alloy in high magnetic fields[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2021, 52(2): 726-740.
- [38] UTECH H P, FLEMING M C. Elimination of solute banding in indium antimonide crystals by growth in a magnetic field[J]. *Journal of Applied Physics*, 1966, 37(5): 2021-2024.
- [39] BERGMAN M I, FEARN D R, BLOXHAM J. Suppression of channel convection in solidifying Pb-Sn alloys via an applied magnetic field[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, 30: 1809-1815.
- [40] GEL'FGAT Y M, GORBUNOV L A. An additional source of forced convection in semiconductor melts during single-crystal growth in magnetic fields[J]. *Soviet Physics Doklady*, 1989, 34: 470-478.
- [41] LI X, FAUTRELLE Y, REN Z M. Influence of thermoelectric effects on the solid-liquid interface shape and cellular morphology in the mushy zone during the directional solidification of Al-Cu alloys under a magnetic field[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(11): 3803-3813.
- [42] LI X, FAUTRELLE Y, REN Z M. Influence of an axial high magnetic field on the liquid-solid transformation in Al-Cu hypoeutectic alloys and on the microstructure of the solid[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(4): 1377-1386.
- [43] LI X, FAUTRELLE Y, REN Z M, et al. Effect of a high magnetic field on the morphological instability and irregularity of the interface of a binary alloy during directional solidification[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(5): 1689-1701.
- [44] ZHONG H, LI C J, REN Z M, et al. Effect of interdendritic thermoelectric magnetic convection on evolution of tertiary dendrite during directional solidification [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2016, 439: 66-73.
- [45] LI X, REN Z M, FAUTRELLE Y. Effect of a high gradient magnetic field on the distribution of the solute Si and the morphology of the primary Si phase[J]. *Materials Letters*, 2009, 63(15): 1235-1238.
- [46] WANG Y, HIROTA N, OKADA H, et al. In situ observation of diamagnetic fluid flow in high magnetic fields[J]. *Key Engineering Materials*, 2014, 616: 188-193.
- [47] ZU F Q, ZHU Z G, GUO L J, et al. Observation of an anomalous discontinuous liquid-structure change with temperature[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(12): 125505.
- [48] WANG Q, WANG C J, LIU T, et al. Control of solidified structures in aluminum-silicon alloys by high magnetic fields[J]. *Journal of*

- Materials Science, 2007, 42(24): 10000-10006.
- [49] JIE W Q. Solute redistribution and segregation in solidification processes [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2001, 2(1): 29-35.
- [50] KONG Y F, LUO X H, LI Y, et al. Role of gravity in grain and bubble morphology evolution during solidification of Al-9.5 wt.% Zn alloy[J]. Microgravity Science and Technology, 2022, 34(3): 34-48.
- [51] CUI J J, LI B K, LIU Z Q, et al. Numerical investigations on solute transport and freckle formation during directional solidification of nickel-based super alloy ingot [J]. Thermal Science, 2022, 26(2): 1579-1591.
- [52] LI Z, SAMUEL A M, SAMUEL F H, et al. Effect of alloying elements on the segregation and dissolution of CuAl₂ phase in Al-Si-Cu 319 alloys[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(6): 1203-1218.
- [53] ABDELHAKEM A, NOURI A, HACHANI L, et al. Three-dimensional numerical simulation and experimental investigations of benchmark experiment of Sn-10 wt.% Pb alloy solidification under thermosolutal convection[J]. Journal of Heat Transfer, 2022, 144(4): 042401.
- [54] AN B L, XIN Y, NIU R M, et al. Nucleation and growth of discontinuous precipitates in Cu-Ag alloys [J]. Materials Research Express, 2022, 9(2): 026530.
- [55] HERMANN R, BEHR G, GERBETH G, et al. Magnetic field controlled FZ single crystal growth of intermetallic compounds [J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 275(1-2): e1533-e1538.
- [56] YASUDA H, OHNAKA I, KAWAKAMI O, et al. Effect of magnetic field on solidification in Cu-Pb monotectic alloys[J]. ISIJ International, 2003, 43(6): 942-949.
- [57] LUO D W, GUO J, YAN Z M, et al. Effect of high magnetic fields on the solidification microstructure of an Al-Mn alloy [J]. Rare Metals 2009, 28(3): 302-308.
- [58] MATTHIESEN D H, WARGO M J, MOTAKEF S, et al. Dopant segregation during vertical bridgman-stockbarger growth with melt stabilization by strong axial magnetic fields[J]. Journal of Crystal Growth, 1987, 85(3): 557-560.
- [59] LI L, ZHANG Y D, ESLING C, et al. Formation of feathery grains with the application of a static magnetic field during direct chill casting of Al-9.8wt.% Zn alloy [J]. Journal of Materials Science, 2009, 44(4): 1063-1068.
- [60] JIN F W, REN Z M, REN W L, et al. Effects of a high-gradient magnetic field on the migratory behavior of primary crystal silicon in hypereutectic Al-Si alloy [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2008, 9(2): 024202.
- [61] WANG Q, LOU C S, LIU T, et al. Effects of uniform and gradient high magnetic fields on gravity segregation in aluminum alloys[J]. ISIJ International, 2009, 49(7): 1094-1097.
- [62] LIU T, WANG Q, WANG C J, et al. Effects of high magnetic fields on the distribution and alignment of primary phases in an Al-12Si-11.8Mg-6.5Ti alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(7): 1863-1869.
- [63] LI X, Ren Z M, FAUTRELLE Y. Phase distribution and phase structure control through a high gradient magnetic field during the solidification process[J]. Materials & Design, 2008, 29(9): 1796-1801.
- [64] DONG M, LIU T, LIAO J, et al. In situ preparation of symmetrically graded microstructures by solidification in high-gradient magnetic field after melt and partial-melt processes[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 689: 1020-1027.
- [65] LI X, FAUTRELLE Y, Ren Z M. Morphological instability of cell and dendrite during directional solidification under a high magnetic field[J]. Acta Materialia, 2008, 56(13): 3146-3161.
- [66] LI X, GAGNOUD A, FAUTRELLE Y, et al. Investigation of thermoelectric magnetic force in solid and its effect on morphological instability in directional solidification[J]. Journal of Crystal Growth, 2011, 324(1): 217-224.
- [67] LI X, GAGNOUD A, WANG J, et al. Effect of a high magnetic field on the microstructures in directionally solidified Zn-Cu peritectic alloys[J]. Acta Materialia, 2014, 73: 83-96.
- [68] SHEN Z, ZHOU B F, ZHONG Y B, et al. Revealing influence mechanism of a transverse static magnetic field on the refinement of primary dendrite spacing during directional solidification[J]. Journal of Crystal Growth, 2019, 517(1): 54-58.
- [69] WANG Q, LI D G, WANG K, et al. Effects of high uniform magnetic fields on diffusion behavior at the Cu/Al solid/liquid interface[J]. Scripta Materialia, 2007, 56(6): 485-488.
- [70] LI X, WANG J, ZHANG J, et al. Directional solidification microstructure of a Ni-based superalloy: Influence of a weak transverse magnetic field[J]. Materials, 2015, 8(6): 3428-3441.
- [71] WU M X, LIU T, DONG M, et al. Directional solidification of Al-8 wt.%Fe alloy under high magnetic field gradient[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(6): 064901.
- [72] TANG P C, TIAN Y H, LIU S S, et al. Microstructure development in eutectic Al-Fe alloy during directional solidification under high magnetic fields at different growth velocities[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(28): 16134-16144.
- [73] LIU T, MIAO L, WANG K, et al. High magnetic-field-induced solute interception among dendrite arms in the mushy zone of a Mn-Sb alloy[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(4): 045901.
- [74] YAN J G, LIU T, WANG M M, et al. Constitutional supercooling and corresponding microstructure transition triggered by high magnetic field gradient during directional solidification of Al-Fe eutectic alloy[J]. Materials Characterization, 2022, 188(7): 111920.

客座主编



刘铁 东北大学教授、博导，中国金属学会电磁冶金与强磁场材料科学分会秘书长 主要从事强磁场下金属凝固及组织控制研究，主持国家自然科学基金项目4项，国家重点研发计划课题等项目14项。合著专著3部、教材1部，发表SCI论文100余篇，授权专利7项。获教育部自然科学一等奖1项、辽宁省自然科学二等奖2项。



王江 上海大学教授、博导，上海市“曙光学者”，国家级青年人才 主要从事电磁冶金金属增材制造研究，主持国家自然科学基金重大项目和重点研发计划课题等科研项目19项。合著专著、调研报告4部，发表论文150余篇，授权专利20项，获国际电磁冶金青年科学家奖、全国高校冶金院长奖和上海市自然科学一等奖1项。

编者按：

电磁场具有超强磁、热、力和能效效应，对冶金和材料过程具有强大的调控能力，在高端金属材料制备领域具有重要应用前景。本专栏特邀东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室刘铁教授，上海大学材料科学与工程学院王江教授组织国内相关领域学者对“电磁场下的金属凝固及材料制备”方向的研究进展和发展趋势进行总结和展望，希望为该领域的研究者提供参考。

特邀撰稿人(排名不分先后，按姓氏拼音排序)：



陈超越 上海大学副教授，上海市青年东方学者及上海青年英才扬帆计划 主要从事增材制造和电磁冶金等研究，主持国家自然科学基金、上海市科委、国家重点研发计划子课题等项目6项，发表SCI论文64篇，申请国家发明专利15项，PCT专利1项，美国专利2项。



接金川 大连理工大学教授、博导 主要从事铜合金及其复合材料制备技术研究，主持国家自然科学基金项目4项，国家重点研发计划子课题等其他项目10余项，在Acta Mater等期刊发表论文37篇，授权发明专利12项。担任辽宁省机械工程学会铸造分会理事、China Foundry编委。



董蒙 清华大学博士后 主要从事强磁场下金属凝固过程控制、磁致伸缩材料制备与改性、磁致伸缩式换能器研发等研究，主持和参与国家自然科学基金、国家重点研发计划课题、北京市科技计划等项目5项。发表SCI论文10余篇，申请发明专利8项（授权2项）。



李磊 东北大学教授、博导 主要从事磁场下金属凝固行为及其组织控制、生物医用金属材料开发及铝合金材料加工等研究，主持国家自然科学基金、辽宁省自然科学基金和教育部基本科研业务费等多项科研项目，发表SCI论文50余篇，参编外文专著1部。



高中堂 西安科技大学副教授、硕导 主要从事精密铸造及外场下凝固、表面工程与增材制造、耐磨耐蚀涂层制备等研究，主持国家自然科学基金、中国博士后科学基金、陕西省重点研发计划项目等项目10余项，发表学术论文30余篇，申请/授权发明专利15项。



苏海军 西北工业大学教授、博导，国家优秀青年，陕西省重点科技创新团队带头人，材料学院副院长 主要从事先进高温结构材料与凝固技术研究，主持国家自然科学基金重点等项目20余项，发表SCI论文150余篇，授权专利50余项。获陕西省高校科技奖特等奖、陕西省科学技术奖一等奖等省部级奖励4项。



侯廷平 武汉科技大学教授，剑桥大学博士后，湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队负责人 主要从事强磁场下Fe基材料相变、结构表征、性能调控等研究，主持包括国家自然科学基金在内的国家和省部级项目6项。在Acta Mater等期刊发表学术论文80余篇，主编教材1部。



徐松哲 上海大学讲师、硕导，入选上海市海外高层次人才计划 主要从事材料计算和人工智能大数据挖掘工作，先后在美国伊利诺伊大学香槟分校和犹他大学从事博士后工作，参与完成多个美国国家科学基金(NSF)项目，发表SCI论文近20篇。



贺天轩 西北工业大学副教授、博导 主要从事强磁场作用下材料制备及组织性能调控等研究，主持国家自然科学基金、国家重大科研仪器研制项目课题、国家重点研发计划子课题、上海市青年英才扬帆计划等项目7项，发表SCI论文30余篇，授权国家发明专利10余项。



郑天祥 上海大学副研究员、博导，入选中国科协“青年托举”计划 主要从事强磁场下冶金与材料制备研究，主持国家自然科学基金、上海市自然科学基金、中国博士后基金等项目10余项。在Science、Mater Today、Nat Commun等期刊上发表论文70余篇，授权专利9项。