DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2022.08.009

强磁场下金属材料凝固过程中的 晶体取向研究进展

孙 珂^{1,2},索玉松^{1,2},李 磊^{1,2},崔建忠^{1,2}

(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 材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要:近年来,在金属材料凝固过程中施加稳态强磁场受到广泛关注。具有磁晶各向异性的晶体以不同的晶轴平 行于磁场时所受的磁化能不同,在诱发的磁力矩作用下其会发生旋转直至磁化能降至最低状态,从而形成择优取向。择 优取向的形成通常会引起材料性能的各向异性,进而满足人们对材料特殊性能的需求,因此晶体取向是强磁场材料科 学领域的重点研究方向之一。本文介绍了强磁场下晶体发生择优取向的基本原理,并结合共晶型和包晶型合金的凝固 特点综述了强磁场下晶体取向方面的研究进展。对于共晶型合金,强磁场下初生相及与含相同初生相的共晶相可能同 时形成择优取向。对于包晶型合金,强磁场下初生相与包晶相通常存在特定的取向关系。若二者具有相似的晶体结构与 易磁化轴,则取向行为相互促进;若二者的晶体结构与易磁化轴相差较大,则取向过程中存在竞争关系,进而影响各自 的取向行为。

关键词:强磁场;金属材料;凝固过程;晶体取向

中图分类号:TG111.4 文献标识码:A 文章编号:1000-8365(2022)08-0647-07

Study on Crystal Orientation of Metallic Materials During Solidification in High Magnetic Field

SUN Ke^{1,2}, SUO Yusong^{1,2}, LI Lei^{1,2}, CUI Jianzhong^{1,2}

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

Abstract: In recent years, the application of steady-state high magnetic fields (HMFs) in the solidification process of metallic materials has received extensive attention. When the crystal with magnetic crystal anisotropy is parallel to the magnetic field with different crystal axes, it will undergo different magnetization energies. Under the induced magnetic torque, it will rotate until the magnetization energy drops to the lowest state, thus forming the preferred orientation. The formation of preferred orientation usually leads to the anisotropy of material properties, which can meet the needs of special properties of materials. Therefore, crystal orientation is one of the key research directions in the field of high magnetic field materials science. In this paper, the basic principle of preferred crystal orientation under strong magnetic field is introduced, and the research progress of crystal orientation under strong magnetic field is reviewed in combination with the solidification characteristics of eutectic and peritectic alloys. For eutectic alloys, the primary phase and the eutectic phase with the same primary phase may simultaneously form the preferred orientation under strong magnetic field. For peritectic alloys, there is usually a specific orientation relationship between primary phase and peritectic phase under strong magnetic field. If they have similar crystal structure and easy magnetization axis, the orientation behavior will promote each other. If there is a big difference between the crystal structure and the easy axis of magnetization, there will be a competitive relationship in the orientation process, which will affect the orientation behavior of each.

Key words: high magnetic fields; metallic materials; solidification process; crystal orientation

基金项目:国家自然科学基金(51874092,51690161)

金属材料的物理、化学和力学等性能与组织结 构密切相关,而绝大部分金属材料的制备都要经历 凝固阶段,因此控制金属材料的凝固过程进而调控 其组织结构十分重要。自20世纪80年代以来,低温 超导技术的不断发展使强磁场在金属材料凝固过程 中得以广泛应用。作为极端物理场,强磁场可将能量 无接触的传入材料中,有效改变材料的组织结构。大

收稿日期: 2022-07-05

作者简介: 孙 珂(1997—), 硕士研究生. 研究方向:强磁场下锌 合金晶体取向行为及耐蚀性调控. 电话:18842586497, Email: 2000581@stu.neu.edu.cn

通讯作者:李 磊(1979—),教授.研究方向:电磁冶金相变及新 材料开发.电话:02483681758,
Email: lilei@epm.neu.edu.cn

量研究表明,在金属材料凝固过程中施加强磁场会 改变熔体的流动^[14]、溶质和颗粒相的迁移与分布^[58] 及晶体取向^[9-38]等。其中,强磁场诱发的晶体择优取 向会引起材料性能的各向异性,进而满足人们对材 料特殊性能的需求,因此晶体取向在强磁场的应用 初期便受到了重点关注^[89]。进入新世纪以来,开发和 制备取向功能材料的迫切需求加速推动了强磁场在 调控金属材料晶体取向方面的研究^[11-27,30-37]。共晶型 和包晶型合金是金属材料凝固时常见的两类合金, 也是强磁场下研究最为广泛的金属材料类型。为系 统了解强磁场对金属材料晶体取向的影响,本文介 绍了强磁场下晶体发生择优取向的基本原理,并结 合共晶型和包晶型合金的凝固特点综述了强磁场下 晶体取向方面的研究进展。

1 强磁场下晶体发生旋转取向的机理

经过近 40 年的发展,强磁场下晶体发生旋转取 向的机理已相对完整地建立起来。一般来说,强磁场 下晶体发生旋转取向需满足 3 个基本条件^[39]:①磁 化能大于热能;②晶体具有显著的磁晶各向异性;③ 有可供晶体自由旋转的介质。对于条件①,其表达 式为^[40]:

$$V \frac{\Delta \chi}{2\mu_0} B^2 > kT \tag{1}$$

式中,V为晶体体积, \mathbf{m}^3 ; μ_0 为真空磁导率, $4\pi \times 10^7$ H·m⁻¹;B为磁感应强度, \mathbf{T} ; $\Delta \chi$ 为易磁化轴和难磁化轴的磁化率之差;k为玻尔兹曼常数,1.38×10⁻²³ J·K⁻¹;T为温度, \mathbf{K} 。在金属材料凝固过程中,晶体体积是决定磁化能大于热能的关键因素。对于条件②,晶体的磁晶各向异性主要有颗粒相自身所具有的晶体学差异及颗粒相所具有的形状差异两个来源^[41]。

1.1 磁晶各向异性晶体的取向

从能量角度分析,金属材料具有磁性,但由于晶 格结构不同,晶体在不同晶向上会表现出不同的磁 化能,导致其具有显著的磁晶各向异性。在强磁场作 用下,具有磁晶各向异性的晶体以不同的晶轴平行 于磁场时受到的磁化能不同。为使系统处于能量最 低状态,磁化能驱使晶体沿某一晶向或晶面择优生 长,或以对晶体产生磁力矩的方式使其发生旋转,从 而形成特定的晶体学取向。

对于具有磁晶各向异性的晶体,沿不同方向磁 化时所需的磁化能不同。Asai 等^[39]将单位体积物质 的磁化能表示为:

$$U_{i} = -\frac{\chi_{i}}{2\mu_{0}(1 + N\chi_{i})^{2}}H^{2}$$
(2)

式中,*i*为晶体的晶体学方向;*N*为退磁因子(*N*的大小取决于样品的几何形状和选取的坐标,对于沿长轴磁化的细长样品,*N*接近于 0;对于短而粗的样品,*N*值很大);*H*为外加磁场强度,A·m⁻¹。根据能量最低原理,在磁场作用下,若凝固过程中晶体的易磁化轴所处位向不能使其磁化能达到最小值,则该晶体就会受到磁力矩*T*的作用发生旋转。具有磁晶各向异性晶体所受磁力矩可表示为⁴⁰:

$$T = \frac{V\Delta\chi H^2 \sin 2\theta}{2\mu_0}$$
(3)

式中, θ 为施加的磁场方向与易磁化轴方向之间的 夹角。在该磁力矩的作用下,顺磁性物质和抗磁性物 质的择优取向特征可能不同。例如,对于顺磁性物质 ($\chi_c > \chi_a = \chi_b, U_c - U_{ab} < 0$),当磁化率最大的晶轴(易磁化 轴)与磁场方向平行时,晶体受到的磁化能最小;对于 抗磁性物质($\chi_c < \chi_a = \chi_b, U_c - U_{a,b} > 0$),当磁化率绝对值 最大的晶轴与磁场方向垂直时,晶体受到的磁化能最 小。对于六方结构晶体,这种取向过程可由图 1 表示^[41]。



图 1 强磁场下具有磁晶各向异性的六方结构晶体取向示意图^[41]

Fig.1 Schematic diagram of orientations of hexagonal crystals with magnetocrystalline anisotropy under a high magnetic field^[41]

1.2 形状各向异性晶体的取向

在金属凝固过程中,晶体的不规则外形使其具 有显著的形状各向异性,常见的有针状、棒状、层片 状、块状等^[5,17-18,24,33-34]。由于形状差异而导致其在不同 方向上被磁化的能力有所不同,因此同样具有显著 的磁晶各向异性。根据阿基米德效应,由形状引起的 磁晶各向异性还会引起周围熔体对晶体产生同样的 作用。假设晶体形状为棒状或针状,轴向为 *a*,径向 为 *r*,则弱磁性材料晶体的轴向和径向磁化能分别 为^[11,43]:

$$U_{a} = -\frac{\mu_{0}\chi_{p,a}}{2(1+N_{a}\chi_{p,a})^{2}}H^{2} + \frac{\mu_{0}\chi_{m,a}}{2(1+N_{a}\chi_{m,a})}H^{2}$$
(4)

$$U_{\rm r} = -\frac{\mu_0 \chi_{\rm p,r}}{2(1+N_{\rm r} \chi_{\rm p,r})^2} H^2 + \frac{\mu_0 x_{\rm m,r}}{2(1+N_{\rm r} \chi_{\rm m,r})} H^2$$
(5)

式中, χ_p 和 χ_m 分别表示晶体和熔体的磁化率。由于 液态下的熔体是非晶体,所以不具有晶体各向异性, 即*X*_{m,a}→*X*_{m,r},晶体在轴向和径向的磁化能差值可表示为:

$$\Delta U = U_{a} - U_{r} \approx \frac{\mu_{0} H^{2}}{2} [(\chi_{p,r} - \chi_{p,a}) + 2(\chi_{p,r} \chi_{p,a} - \chi_{m}^{2})(N_{a} - N_{r})]$$
(6)

当晶体的磁化率在不同方向相差不大时,即 X_{p.a}-X_{p.r},上式可简化为:

$$\Delta U = U_{\rm a} - U_{\rm r} \approx \mu_0 H^2 \left(\chi_{\rm m}^2 - \chi_{\rm p}^2 \right) (N_{\rm r} - N_{\rm a}) \tag{7}$$

对于针状或棒状晶体,总有径向的退磁因子大 于轴向的退磁因子,即 $N_r > N_a$ 。代入(7)式可知,当晶 体的磁化率绝对值大于熔体的磁化率绝对值时,晶 体在轴向和径向的磁化能差值小于零 (即 $|\chi_p| >$ $|\chi_m|, \Delta U < 0$),晶体的长轴沿平行于磁场方向取向; 当晶体的磁化率绝对值小于熔体的磁化率绝对值 时,晶体在轴向和径向的磁化能差值大于零(即 $|\chi_p|$ $<|\chi_m|, \Delta U > 0$),晶体的长轴沿垂直于磁场方向取向。

综上,在金属材料凝固过程中,当具有磁晶各向 异性的晶体长大到一定尺寸、且具有可供晶体自由 旋转的介质环境时,为使系统处于能量最低状态,磁 力矩趋势晶体发生旋转,从而形成择优取向。

2 强磁场对共晶型合金晶体取向的影响

共晶型合金具有熔点低、流动性好、切削加工性 能优异等特点,被广泛应用于工业生产中。在合金凝 固时,初生相先析出,随后发生共晶反应(即L→ α+β)。由于微观组织的演变会对合金性能产生极大 影响,为满足工业生产需要,对共晶型合金中的晶体 取向进行控制引起了研究者的极大兴趣。

2.1 强磁场对共晶型合金中初生相取向的影响

早在 1981 年, Mikelson 等¹⁹发现在 Al-3.5%Cu、 Al-10%Ni 和 Cd-60%Zn 共晶型合金凝固过程中施 加 0.5~1.5 T 磁场后, 初生相的形貌同磁场方向形成 了特定的取向关系, 研究认为这是具有磁晶各向异 性的晶体同磁场相互作用导致的结果, 并提出了具 有磁晶各向异性的晶体在磁场中受磁力矩作用而发 生旋转取向的理论。与此同时,Savitsky等^[10]在不同 成分的 Bi-Mn 共晶型合金凝固过程中施加 2.5 T 强 磁场后发现,初生 MnBi 相的 *c* 轴均沿平行于磁场 方向取向。1998年,Morikawa等^[11]发现在强磁场作 用下 Bi-4%Mn 合金中初生 MnBi 相的一次枝晶臂 沿平行于磁场方向取向。

进入21世纪后,研究人员对强磁场下共晶型合 金中初生相晶体取向的研究更加深入。早期,任忠 鸣、Yasuda 和李喜等^[12-15]在 Bi-Mn 合金半固态等温 退火过程中施加不同强度的磁场,发现初生 MnBi 相在试样中规则排列,其易磁化轴沿平行于磁场的 方向择优取向。2007年,Li 等^[5]在 Al-4.5%Cu 亚共 晶合金定向凝固过程中发现,枝晶状初生 α -Al 相的 <111>方向在强磁场下倾向沿平行于磁场的方向取 向,如图2所示。2008年,Wang等四研究了强磁场对 Al-6.8%Ni 共晶型合金凝固组织的影响,对有无磁 场作用下样品横/纵截面中的初生 Al₃Ni 相进行了 XRD分析。如图3所示,无磁场时样品横/纵截面中 初生 Al₃Ni 相均没有显示出特定的取向, 而施加磁 场后初生 Al₃Ni 相的(hk0)和(0kl)晶面分别平行和垂 直于磁场方向,表明 Al₃Ni 相的 c 轴与磁场方向平 行。2014年,Liu等110将Mn-89.7%Sb共晶型合金在



图 2 Al-4.5%Cu 合金定向凝固过程中 α-Al 枝晶取向的三维 示意图^[5]

Fig.2 A three-dimensional schematic illustration of the dendrite orientation during directional solidification of Al-4.5%Cu alloy^[5]



Fig.3 X-ray diffraction patterns of Al-6.8%Ni alloys parallel and perpendicular to the magnetic field direction^[7]

11.5 T 强磁场下半固态等温退火,对其横纵截面中 初生 MnSb 相进行晶体学分析发现,施加磁场后 MnSb 晶体的 c 轴沿垂直于磁场方向取向。2015 年, Zhong 等^[17]将强磁场施加到 Bi-5%Zn 过共晶合金凝 固过程中,发现随着磁场强度的增加富 Zn 晶体的 c 轴沿平行于磁场的方向取向。近年来,Li 等^[18-20]发现 在 Al-Fe、Al-Sr 和 Zn-Sn 等共晶型合金凝固过程中, 施加强磁场会对其初生相的取向产生显著影响。其 中,在 Al-6%Sr 过共晶合金凝固过程中,具有磁晶 各向异性的初生 Al_Sr 相的 c 轴垂直于磁场方向取 向,在磁力矩作用下其长轴沿平行于磁场方向规则 排列并均匀分布,如图 4 所示。



图 4 初生 Al₄Sr 相的三维排列示意图^[18] Fig.4 Schemes showing the 3D alignments of the primary Al₄Sr crystals^[18]

2.2 强磁场对共晶型合金中共晶相取向的影响

与初生相相比,研究人员关于强磁场对共晶相 取向影响的研究相对较少。2006年,Ren 等^[21]研究了 强磁场对 Al-35%Cu 过共晶合金中共晶 Al-Al₂Cu 相取向的影响,TEM 结果表明,10T强磁场下共晶 Al-Al₂Cu 相的取向关系与无磁场时的取向关系没有 显著差异,但施加磁场后,共晶 Al 相和 Al₂Cu 相的 [001]方向向磁场方向倾斜。

近年来,Li等^[22-25]将强磁场施加到Zn-1.8%Mg、 Zn-4.8%Mg等共晶型合金凝固过程中,发现初生相 和共晶相均形成了择优取向。在强磁场下凝固的 Zn-1.8%Mg微观组织中^[22],共晶富Zn相依附于初 生富 Zn 相生长并穿过共晶 Mg₂Zn₁₁ 相的间隙不断 延伸,如图 5(a)所示。晶体学分析表明,初生富 Zn 相 与共晶富 Zn 相具有相同的取向:取向图(图 5(b))中 1/1′、2/2′和 3/3′区域的初生富 Zn 相和共晶富 Zn 相 在 <0001> 散点极图(图 5(c))中共享极点。这表明共 晶富 Zn 相遵循了初生富 Zn 相的取向,在强磁场下 二者的 <0001> 方向均沿垂直于磁场的方向择优取 向。同样,在强磁场下凝固的 Zn-4.8%Mg 过共晶合 金组织中^[23],他们发现初生 MgZn₂ 相与非平衡共晶 MgZn₂ 相的 <0001> 方向均沿垂直于磁场方向择优 取向。

以上研究结果表明,在共晶型合金凝固过程中 初生相析出后被液相所包围,具有自由旋转的介质 环境。如果晶体具有显著的磁晶各向异性,且尺寸足 够大,为降低系统磁化能,在强磁场作用下初生相就 会发生择优取向。在随后的共晶反应中,如果与初生 相同相的共晶相依附于初生相继续生长,则在强磁 场作用下初生相和与之同相的共晶相会同时形成择 优取向。

3 强磁场对包晶型合金晶体取向的影响

包晶型合金应用广泛,Fe-Ni^{[44},Cu-Sn^{[43},Al-Ti^[49] 等工程类材料和 Nd-Fe-B 稀土永磁材料^[47] 以及 Y-Ba-Cu-O 高温超导材料^[48]的凝固过程中都包含包 晶反应。此前,已通过大量实验证明强磁场会对共晶 型合金的凝固组织产生显著影响,以此获得具有晶 体高度取向的功能材料,但对强磁场下包晶型合金 晶体取向的研究相对较少。包晶型合金凝固时,初生 相先析出,随后发生包晶反应(即α+L→β)。通常,包 晶相依附于初生相形核并长大,二者之间存在特定 的取向关系,在强磁场下初生相与包晶相的取向会 相互影响。

3.1 强磁场对包晶型合金中初生相取向的影响

在包晶型合金凝固过程中,由于包晶相依附于 初生相生长并包裹在初生相周围,二者之间通常存 在特殊的取向关系,关于强磁场单一对包晶型合金



中初生相晶体取向影响的研究相对较少。2016年, 左小伟等^[26]在 Cu-30%Fe 包晶型合金半固态等温退 火过程中施加强磁场,为使系统能量处于最低状态, 磁力矩驱使初生富 Fe 相沿平行于磁场方向排列。 2019年,Wang等^[27]发现在 Cu-20%Co 包晶型合金 非平衡凝固过程施加强磁场后,富 Co 相从球状转 为棒状,且棒状颗粒的长轴沿平行于磁场方向择优 取向。同年,Li等^[28]研究了强磁场对 Sn-1.5%Mn 包 晶型合金初生相取向的影响,结果表明,在强磁场作 用下,磁力矩驱使具有显著磁晶各向异性的条状初 生 MnSn₂相的易磁化轴平行于磁场方向取向。

3.2 强磁场对包晶型合金中包晶相取向的影响

对强磁场下包晶型合金晶体取向的研究可追溯 到上世纪。1998年,Legrand等[29]在不同磁场下进行 Sm-83.4%Co包晶型合金凝固实验,初生 Sm₂Co₁₇相 和包晶 SmCo5 相均为六方结构,且都以 c 轴为易磁 化轴^[30],施加磁场后二者均发生了 c 轴沿平行于磁 场方向的择优取向。2012年, Wang 等^[31]将强磁场施 加到 Tb-33%Fe 包晶型合金凝固过程中,由于初生 TbFe, 相和包晶 TbFe2 相具有不同的晶体结构和易 磁化轴,二者在取向过程中存在竞争关系,随着磁场 强度的增加,TbFe2相的取向发生了从 <113> 到 <111> 再到 <110> 方向的转变。2013 年,苑轶等[32]研 究了 11.5 T 强磁场对 Mn-56.5%Sb 包晶型合金凝固 组织的影响,强磁场下具有正方结构的初生 Mn₂Sb 相发生了(311)面平行于磁场方向的取向,而具有六 方结构的包晶 MnSb 相则发生了(110)面垂直于磁 场方向的取向。2014年, Wang和Liu等^[33-36]在 Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}合金凝固过程中施加强磁场,如图 6 所示,对垂直于磁场截面的包晶(Tb, Dy)Fe,相进行 XRD 分析后发现,受磁场作用下初生(Tb, Dy)Fe3 相 取向的影响,磁力矩诱导包晶(Tb, Dy)Fe2相的取向 发生了从 <111> 到 <113> 再到 <110> 方向的转变。



图 6 Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95} 合金在不同磁场下凝固时垂直于磁场方 向的 XRD 图谱^[36]



近年来,Li等¹⁷⁻³⁸系统研究了强磁场对Zn-4.5%Ag、 Sn-1.3%Co等包晶型合金凝固组织的影响。如图 7 (a) 所示, 在 Zn-4.5% Ag 合金中^[37], 包晶 η-Zn 相依 附于初生 ε-AgZn₃相形核和长大,二者存在如下取 向关系:[Ī213]_{AgZn}, //[Ī2Ī0]_{Zn}, (01Ī1)_{AgZn}, //(10Ī1)_{Zn}, (1010)gZn, //(0002)Zn。在12T强磁场下, 顺磁性初生 ε-AgZn,相受磁力矩作用发生旋转,形成 <0001>轴 平行于磁场方向的择优取向(图 7(b))。由于上述特 定取向关系,包晶 n-Zn 相也同时形成了 <0001>方向 垂直于磁场方向的择优取向(图 7(c))。在 Sn-1.3%Co 包晶型合金凝固过程中^[38],初生 CoSn₂相包裹在包 晶 CoSn₄相周围,并存在如下取向关系:(100)_{CoSn},// (100)_{CoSn}, , [001]_{CoSn}, // [001]_{CoSn}。在12T强磁场下, 初 生 CoSn2 相的[001]轴趋于沿平行磁场的方向择优 取向,并诱发包晶 CoSn4 相的[001]轴形成同样的择 优取向。

综上,对于包晶型合金,具有磁晶各向异性的颗 粒相同样会受到磁力矩的作用而发生旋转取向,但 初生相与包晶相之间通常存在特定的取向关系。在 强磁场下,若初生相与包晶相具有相似的晶体结构 与易磁化轴,则二者的取向行为相互促进,提高取向 度。反之,若初生相与包晶相的晶体结构与易磁化轴 相差较大,则二者在取向过程中存在竞争关系,进而 影响各自的取向行为。

4 总结与展望

强磁场下金属材料凝固过程中的晶体取向变化 同合金类型密切相关。为使系统处于能量最低状态, 当共晶和包晶型合金在凝固过程中生成的具有磁晶 各向异性的颗粒相长大到一定尺寸时,磁力矩会克 服洛伦兹力和黏性阻力驱使晶体发生择优取向。对 于共晶型合金,在强磁场的作用下,初生相和与之相 同的共晶相可能会同时形成择优取向。对于包晶型 合金,初生相与包晶相通常存在特定的取向关系。若 两相具有相似的晶体结构和易磁化轴,则强磁场下 初生相与包晶相将同时形成择优取向;若两相的晶 体结构和易磁化轴存在较大差异,则强磁场下初生 相与包晶相的择优取向存在竞争关系。

目前,强磁场已广泛应用到材料科学研究的诸 多领域中,但强磁场对不同类型合金的作用机制十 分复杂,尚未形成科学完整的理论体系,今后应进一 步加大强磁场对金属材料凝固过程的研究,明确强 磁场对不同类型合金晶体取向行为的影响规律和 机制。



(c)强磁场下η-Zn相的<0001>散点极图

图 7 强磁场下 Zn-4.5%Ag 合金的微观组织和相应极图^[37]

Fig.7 Microstructure and pole figures of Zn-4.5%Ag alloy under a high magnetic field^[37]

参考文献:

- ZHANG Y K, GAO J, NAGAMATSU D, et al. Reduced droplet coarsening in electromagnetically levitated and phase-separated Cu-Co alloys by imposition of a static magnetic field[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(9): 1002-1005.
- [2] 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.
- [3] XU B, LI B Q, STOCK D E. An experimental study of thermally induced convection of molten gallium in magnetic fields [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49 (13-14): 2009-2019.
- [4] 王强,王春江,庞雪君,等.利用强磁场控制过共晶铝硅合金的 凝固组织[J].材料研究学报,2004,18(6):568-576.
- [5] 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.
- [6] WANG Q, WANG C J, LIU T, et al. Contral of solidified structures in aluminum-silicon alloys by high magnetic fields[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42: 10000-10006.
- [7] WANG C J, WANG Q, WANG Z Y, et al. Phase alignment and crystal orientation of Al₃Ni in Al-Ni alloy by imposition of a uniform high magnetic field[J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310

(6): 1256-1263.

- [8] 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 Physical B, 2018, 27: 118103.
- [9] MIKELSON A E, KARKLIN Y K. Contral of crystallization processes by means of magnetic fields[J]. Journal of Crystal Growth, 1981, 52(2): 524-529.
- [10] SAVITSKY E M, TORCHINOVA R S, TURANOV S A. Effect of crystallization in magnetic field on the structure and magnetic properties of Bi-Mn alloys[J]. Journal of Crystal Growth, 1981, 52 (2): 519-523.
- [11] MORIKAWA H, SASSA K, ASAI S. Control of precipitating phase alignment and crystal orientation by imposition of a high magnetic field[J]. Materials Transactions, JIM, 1998, 39(8): 814-818.
- [12] 王晖,任忠鸣,邓康,等. 磁场对 Bi-Mn 合金两相区中 MnBi 相 凝固组织的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(1): 41-46.
- [13] YASUDA H, OHNAKA I, YAMAMOTO Y, et al. Alignment of BiMn crystal orientation in Bi-20 at% Mn alloys by laser melting under a magnetic field [J]. Materials Transactions, 2003, 44(12): 2550-2554.
- [14] 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,2005,41(7): 685-690.
- [15] 李喜.强静磁场下二元合金凝固行为研究[D].上海:上海大学,2009.
- [16] LIU T, WANG Q, GAO P F, et al. Crystal orientation and magnetic

anisotropy of Mn-Sb alloy induced by high magnetic field during treatment in semisolid state [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 2505603.

- [17] ZHENG T X, ZHONG Y B, LEI Z S, et al. Effects of high static magnetic field on crystal orientation and magnetic property of Bi-5wt.%Zn alloys[J]. Materials Letters, 2015, 140: 68-70.
- [18] LI L, SUO Y S, ZHANG R X, et al. A crystallographic investigation on the growth of Al₄Sr crystals under a high magnetic field[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(24): 245108.
- [19] 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-3.31wt.% Fe alloy [J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 339(1): 61-69.
- [20] LI L, BAN C Y, SHI X C, et al. Effects of a high magnetic field on the primary zinc-rich crystals in hypoeutectic Zn-Sn alloy[J]. Journal of Crystal Growth, 2017, 463: 59-66.
- [21] ZHU W W, REN Z M, REN W L, et al. Effect of high magnetic field on the unidirectionally solidified Al-Al₂Cu eutectic crystal orientations and the induced microstructures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 441(1-2): 181-186.
- [22] LI L, ZHANG R X, BAN C Y, et al. Growth behavior of Zn-rich phase in Zn-Mg alloy under a high magnetic field [J]. Materials Characterization, 2019, 151: 191-202.
- [23] LI L, LV G C, SUO Y S, et al. Effect of a high magnetic field on the macro- and microstructures of Zn-Mg alloy during semi-solid isothermal annealing process[J]. Journal of Crystal Growth, 2021, 554(15): 125947.
- [24] LI L, LI Z B, ZHANG Y D, et al. Crystallographic effect of a high magnetic field on a solidified hypoeutectic Zn-Al alloy[J]. Journal of Applied Crystallography, 2014, 47: 606-612.
- [25] LI L, BAN C Y, BI Y T, et al. A crystallographic study on the growth of Laves phase MgZn₂ during the solidification process of Zn-Mg alloy under a high magnetic field[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53: 15181-15195.
- [26] 左小伟,安佰灵,黄德洋,等.强磁场作用下 Cu 熔体中富 Fe 颗 粒的迁移与排列[J].物理学报,2016,65(13):137401.
- [27] WEI C, WANG J, HE Y X, et al. The effect of high magnetic field on the microstructure evolution of a Cu-Co alloy during non-equilibrium solidification [J]. Journal of Crystal Growth, 2019, 515: 78-82.
- [28] LI L, BI Y T, ZHANG H, et al. Alignments and orientations of MnSn₂ phase during the solidification process of Sn-Mn alloy under a high magnetic field [J]. Materials Transactions, 2019, 60 (6): 939-943.
- [29] LEGRAND B A, CHATEIGNER D, PERRIER DE LA BATHIE R, et al. Orientation of samarium-cobalt compounds by solidification in a magnetic field [J]. Journal of Alloys and Compounds, 1998, 275-277: 660-664.
- [30] KUMAR K. RETM₅ and RE₂TM₁₇ permanent magnets development[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 63(6): R13-R57.
- [31] LIU Y, WANG Q, LIU T, et al. Effects of high magnetic fields on

the crystal orientation and magnetostriction of a $TbFe_2$ based alloy during treatment in the semi-solid state[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 590: 110-115.

- [32] 苑轶,李英龙,王强,等.强磁场对 Mn-Sb 包晶合金相变及凝固 组织的影响[J].物理学报,2013,62(20):208106.
- [33] DONG M, LIU T, GUO X Y, et al. Crystal orientation induced by high magnetic fields during peritectic reaction of alloys[J]. Materials Characterization, 2022, 183: 111608.
- [34] LIU Y, WANG Q, KAZUHIKO I, et al. Magnetic-field-dependent microstructure evolution and magnetic properties of Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95} alloy during solidification[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 357: 18-23.
- [35] 高鹏飞,刘铁,柴少伟,等.磁感应强度和冷却速率对 Tb_{@2}Dy₀₃Fe₁₉₅合金凝固过程中取向行为的影响[J].物理学报,2015, 65(3):038104.
- [36] GAO P F, LIU T, DONG M, et al. Magnetic domain structure, crystal orientation, and magnetostriction of Tb₀₂₇Dy₀₇₃Fe_{1.95} solidified in various high magnetic fields[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2016, 401: 755-759.
- [37] LI L, SUO Y S, LIU T, et al. Effect of a high magnetic field on crystal growth in the solidification of hypoperitectic Zn-Ag alloy [J]. Crystal Growth & Design, 2019, 19: 6448-6462.
- [38] LI L, SUO Y S, BAN C Y, et al. Growth behaviors of CoSn₂/CoSn₄ composite particles in the solidification of Sn-Co alloy under a high magnetic field [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 816: 152540.
- [39] ASAI S, SASSA K, TAHASHI M. Crystal orientation of non-magnetic materials by imposition of a high magnetic field [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2003, 4(5): 455-460.
- [40] 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.
- [41] 王强,赫冀成.强磁场材料科学[M].北京:科学出版社,2014.
- [42] 任忠鸣,晋芳伟.强磁场在金属材料制备中应用研究的进展[J]. 上海大学学报,2008,14(5):446-455.
- [43] 娄长胜,王强,王春江,等.强磁场下熔体中晶粒旋转取向机制 及其影响因素[J]. 兵工学报,2013,34(7):858-864.
- [44] SWARTZENDRUBER L J, ITKIN V P, ALCOCK C B. The Fe-Ni (iron-nickel) system[J]. Journal of Phase Equilibria, 1991, 12: 288-312.
- [45] SAUNDERS N, MIODOWNIK A P. The Cu-Sn (copper-tin) system[J]. Bulletin of Alloy Phase Diagrams, 1990, 11: 278-287.
- [46] OKAMOTO H. Al-Ti (aluminum-titanium)[J]. Journal of Phase Equilibria, 2000, 21: 311.
- [47] ZHONG H, LI S M, LÜ H Y, et al. Microstructure evolution of peritectic Nd₁₄Fe₇₉B₇ alloy during directional solidification[J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310(14): 3366-3371.
- [48] TANG C Y, YAO X, HU J, et al. YBCO melt-textured growth seeded by superheating YBCO/MgO thin film[J]. Superconductor Science and Technology, 2005, 18: L31-L34.