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 high 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

收稿日期:2022-07-05

基金项目:国家自然科学基金(51874092, 51690161)

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

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

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

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[1-4]、溶质和颗粒相的迁移与分布[5-8]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[8-9]。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，m^3；μ_0 为真空磁导率，$4\pi\times10^{-7}$ $H\cdot m^{-1}$；B 为磁感应强度，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} $J\cdot K^{-1}$；T 为温度，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：

$$U_i=-\frac{\chi_i}{2\mu_0(1+N\chi_i)^2}H^2 \tag{2}$$

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，$A\cdot m^{-1}$。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]：

$$T=\frac{V\Delta\chi H^2\sin2\theta}{2\mu_0} \tag{3}$$

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($\chi_c>\chi_a=\chi_b$, $U_c-U_{a,b}<0$)，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]。

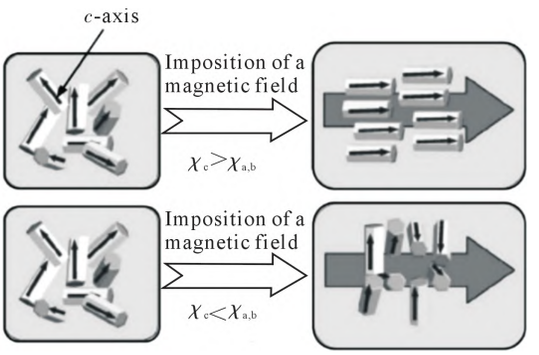


图 1 强磁场下具有磁晶各向异性的六方结构晶体取向示意图[41]

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]：

$$U_a=-\frac{\mu_0\chi_{p,a}}{2(1+N_a\chi_{p,a})^2}H^2+\frac{\mu_0\chi_{m,a}}{2(1+N_a\chi_{m,a})}H^2 \tag{4}$$

$$U_r=-\frac{\mu_0\chi_{p,r}}{2(1+N_r\chi_{p,r})^2}H^2+\frac{\mu_0 x_{m,r}}{2(1+N_r\chi_{m,r})}H^2 \tag{5}$$

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，

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

即$\chi_{m,a}\approx\chi_{m,r}$，晶体在轴向和径向的磁化能差值可表示为：

$$\Delta U=U_a-U_r\approx\frac{\mu_0H^2}{2}[(\chi_{p,r}-\chi_{p,a})+2(\chi_{p,r}\chi_{p,a}-\chi_m^2)(N_a-N_r)] \quad (6)$$

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

$$\Delta U=U_a-U_r\approx\mu_0H^2(\chi_m^2-\chi_p^2)(N_r-N_a) \quad (7)$$

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。

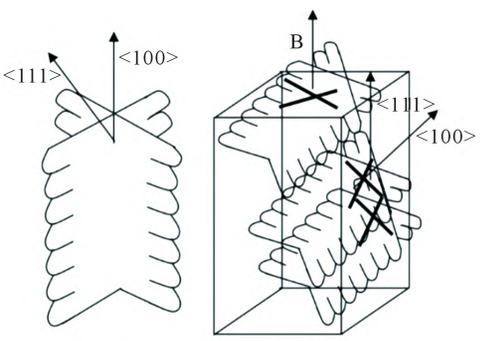
2　强磁场对共晶型合金晶体取向的影响

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[9]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。

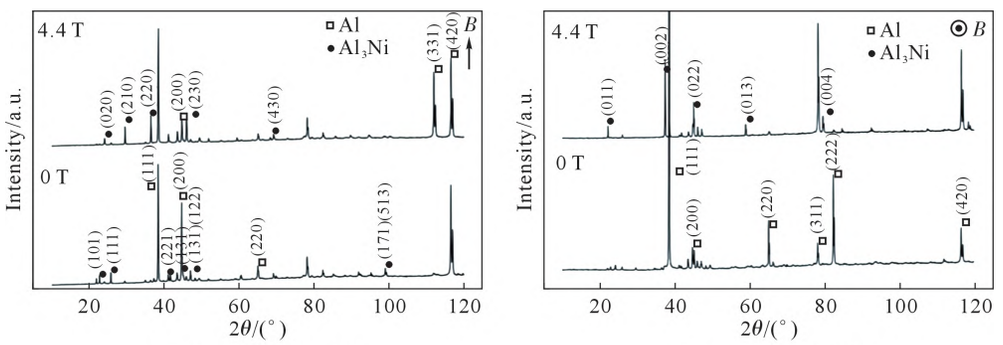
进入21世纪后，研究人员对强磁场下共晶型合金中初生相晶体取向的研究更加深入。早期，任忠鸣、Yasuda和李喜等[12-15]在Bi-Mn合金半固态等温退火过程中施加不同强度的磁场，发现初生MnBi相在试样中规则排列，其易磁化轴沿平行于磁场的方向择优取向。2007年，Li等[5]在Al-4.5%Cu亚共晶合金定向凝固过程中发现，枝晶状初生α-Al相的<111>方向在强磁场下倾向沿平行于磁场的方向取向，如图2所示。2008年，Wang等[7]研究了强磁场对Al-6.8%Ni共晶型合金凝固组织的影响，对有无磁场作用下样品横/纵截面中的初生Al_3Ni相进行了XRD分析。如图3所示，无磁场时样品横/纵截面中初生Al_3Ni相均没有显示出特定的取向，而施加磁场后初生Al_3Ni相的(hk0)和(0kl)晶面分别平行和垂直于磁场方向，表明Al_3Ni相的c轴与磁场方向平行。2014年，Liu等[16]将Mn-89.7%Sb共晶型合金在



(a) 0 T　　(b) 10 T

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]



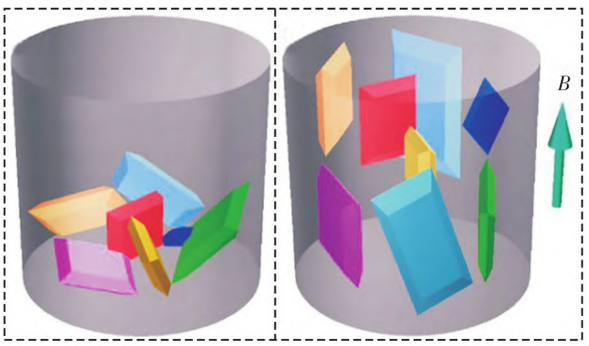
(a) 平行于磁场截面　　(b) 垂直于磁场截面

图3　Al-6.8%Ni合金平行和垂直于磁场方向样品的X射线衍射图谱[7]

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

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

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_4Sr 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。



(a) 0 T　(b) 8.8 T

图 4 初生 Al_4Sr 相的三维排列示意图[18]

Fig.4 Schemes showing the 3D alignments of the primary Al_4Sr 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-Al_2Cu 相取向的影响，TEM 结果表明，10 T 强磁场下共晶 Al-Al_2Cu 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 Al_2Cu 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 Mg_2Zn_{11} 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 $MgZn_2$ 相与非平衡共晶 $MgZn_2$ 相的 <0001> 方向均沿垂直于磁场方向择优取向。

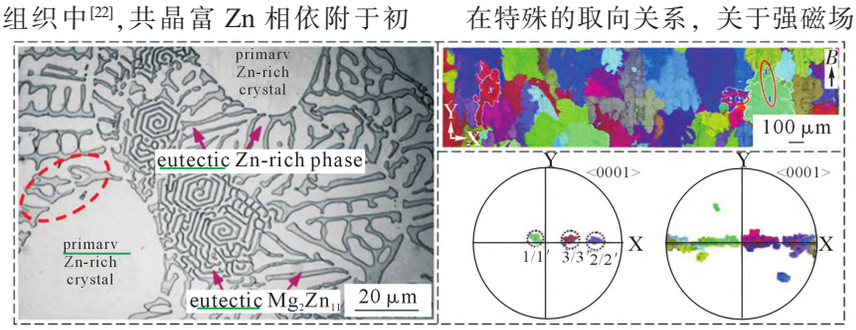
以上研究结果表明，在共晶型合金凝固过程中初生相析出后被液相所包围，具有自由旋转的介质环境。如果晶体具有显著的磁晶各向异性，且尺寸足够大，为降低系统磁化能，在强磁场作用下初生相就会发生择优取向。在随后的共晶反应中，如果与初生相同相的共晶相依附于初生相继续生长，则在强磁场作用下初生相和与之同相的共晶相会同时形成择优取向。

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[45]、Al-Ti[46]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



(a) 初生富Zn相及其附近共晶组织　(b) EBSD取向图　(c) <0001>散点极图

图 5 12 T 强磁场下 Zn-1.8%Mg 合金微观组织和极图[22]

Fig.5 Microstructure and pole figures of Zn-1.8%Mg alloy under 12 T high magnetic field[22]

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

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 $MnSn_2$ 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 Sm_2Co_{17} 相和包晶 $SmCo_5$ 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 $TbFe_3$ 相和包晶 $TbFe_2$ 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，$TbFe_2$ 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 Mn_2Sb 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_2 相进行 XRD 分析后发现，受磁场作用下初生(Tb, Dy)Fe_3 相取向的影响，磁力矩诱导包晶(Tb, Dy)Fe_2 相的取向发生了从 <111> 到 <113> 再到 <110> 方向的转变。

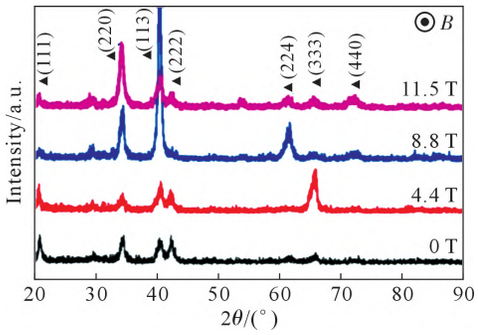


图 6　$Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}$ 合金在不同磁场下凝固时垂直于磁场方向的 XRD 图谱[36]

Fig.6　XRD patterns of $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}$ alloys solidified in various HMFs in the plane perpendicular to the magnetic field direction[36]

近年来，Li 等[37-38]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-$AgZn_3$ 相形核和长大，二者存在如下取向关系：$[\bar{1}21\bar{3}]_{AgZn_3}$ // $[\bar{1}2\bar{1}0]_{Zn}$，$(01\bar{1}1)_{AgZn_3}$ // $(10\bar{1}1)_{Zn}$，$(10\bar{1}0)_{gZn_3}$ // $(0002)_{Zn}$。在 12 T 强磁场下，顺磁性初生 ε-$AgZn_3$ 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 η-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 $CoSn_2$ 相包裹在包晶 $CoSn_4$ 相周围，并存在如下取向关系：$(100)_{CoSn_2}$ // $(100)_{CoSn_4}$，$[001]_{CoSn_2}$ // $[001]_{CoSn_4}$。在 12 T 强磁场下，初生 $CoSn_2$ 相的[001]轴趋于沿平行磁场的方向择优取向，并诱发包晶 $CoSn_4$ 相的[001]轴形成同样的择优取向。

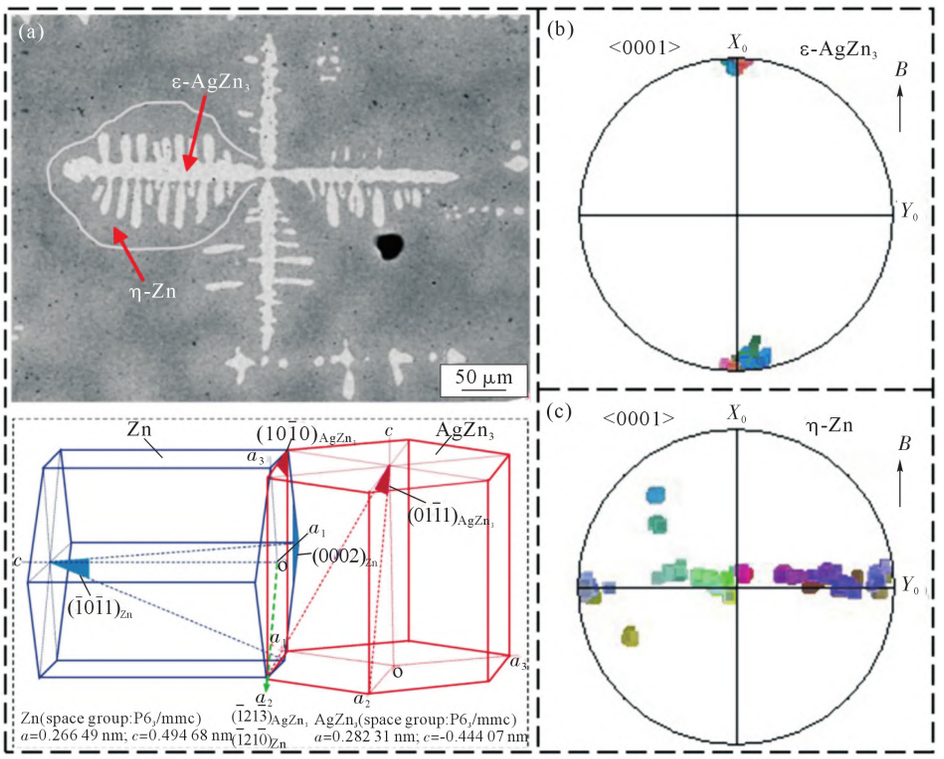
综上，对于包晶型合金，具有磁晶各向异性的颗粒相同样会受到磁力矩的作用而发生旋转取向，但初生相与包晶相之间通常存在特定的取向关系。在强磁场下，若初生相与包晶相具有相似的晶体结构与易磁化轴，则二者的取向行为相互促进，提高取向度。反之，若初生相与包晶相的晶体结构与易磁化轴相差较大，则二者在取向过程中存在竞争关系，进而影响各自的取向行为。

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



(a) 初生ε-$AgZn_3$相与包晶η-Zn相的微观组织图和相应晶体结构
(b) 强磁场下ε-$AgZn_3$相的<0001>散点极图
(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：

[1] 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 Al_3Ni 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

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

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 Al_4Sr 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 Al_3Fe 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-Al_2Cu 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 $MgZn_2$ 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 $MnSn_2$ 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. $RETM_5$ and RE_2TM_{17} 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 $Tb_{027}Dy_{073}Fe_{195}$ 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 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}$ 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 $CoSn_2$/$CoSn_4$ 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 $Nd_{14}Fe_{79}B_7$ 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.

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