DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.08.007

静磁场下高温合金定向凝固组织与缺陷的研究进展

赵　勇,苏海军,杨培鑫,郭一诺,夏　乐
(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072)

摘　要:磁场下定向凝固为高温合金凝固组织优化与缺陷控制提供了新的思路。本文综述了近年来静磁场下高温合金定向凝固的研究进展。在作用机理方面,重点介绍了静磁场下高温合金的热电磁效应及其模拟研究结果;在凝固组织方面,系统总结了横向静磁场和纵向强磁场对定向和单晶高温合金枝晶组织、γ/γ′共晶和γ′析出相等的影响;在缺陷控制方面,探讨了静磁场对高温合金枝晶偏析、杂晶等缺陷的影响机制。展望了磁场作用下通过凝固制备高温合金的突破点和未来发展趋势。

关键词:静磁场;高温合金;定向凝固;热电磁效应

中图分类号:TG132.3+2; TG244+.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)08-0633-08

Research Progress on Microstructures and Defects in Directionally Solidified Superalloys under Static Magnetic Field

ZHAO Yong, SU Haijun, YANG Peixin, GUO Yinuo, XIA Le
(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710072, China)

Abstract: Directional solidification under magnetic field provides a new method for tailoring microstructures and controlling defects in superalloys. The research progress on directional solidification of superalloys under static magnetic field is reviewed in this paper. The thermoelectromagnetic effect in superalloys under the magnetic field and the corresponding simulation results are primarily introduced. The effects of transverse static magnetic field and longitudinal static magnetic field on dendrites, γ/γ′ eutectics, and γ′ phases of directionally solidified superalloys are systematically summarized. The influences of static magnetic field on the defects such as dendritic segregation and stray grains of superalloys are also overviewed. Finally, the problems that need to be further solved are pointed out, and the future development trend of superalloys solidified under magnetic field is also prospected.

Key words: static magnetic field; superalloy; directional solidification; thermoelectromagnetic effect

定向和单晶高温合金凭借其优异的中高温力学性能和良好的组织稳定性被广泛用于制造先进航空发动机、燃气轮机的核心热端部件,其应用水平也是国家工业基础的重要体现[1]。先进定向和单晶高温合金叶片采用定向凝固技术制备,其中温度梯度和抽拉速率是定向凝固工艺的关键参数,提高温度梯度可以显著提高叶片的合格率[2]。目前,基于Bridgman定向凝固原理的高速凝固法(High rate solidification, HRS)是国内外广泛采用的定向凝固工艺,但其制备的叶片往往存在枝晶组织粗大、合金元素偏析严重等问题[3-4]。随后,液态金属冷却法(Liquid metal cooling, LMC)[5]、区域熔化液态金属冷却法(Zonemelting liquid metal cooling, ZMLMC)[6]、气冷法(Gas cooling casting, GCC)[7]、流态床冷却法(Fluidized bed cooling, FBC)[8-9]等技术被相继开发出来,进一步提高了温度梯度,达到了细化枝晶组织、降低铸造缺陷形成几率的目的。然而,将这些方法应用于实际工业生产时通常也会产生一些不利影响,如冷却介质对铸件的污染、非均匀热场等[2]。此外,受实际工业条件的限制,温度梯度的进一步提高十分有限。另一方面,为进一步满足高性能航空发动机对高温合金承温能力的要求,定向和单晶叶片朝着高难熔元素含量的方向发展。随着合金中难熔元素的不断添加,合金的承温能力提升但同时也带来了严重的元素偏析、有害相析出倾向增大等问题[2,10]。

与温度、压力一样,磁场(以下所述磁场均指静

收稿日期:2022-07-22
基金项目:国家自然科学基金(51690163,52130204,52174376)
作者简介:赵　勇(1995—),博士生.研究方向:高温合金定向凝固技术研究.Email:yongzhao@mail.nwpu.edu.cn
通讯作者:苏海军(1981—),博士,教授.研究方向:高温合金定向凝固技术研究.Email: shjnpu@nwpu.edu.cn

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

磁场)对合金的凝固过程同样具有重要的影响,是材料处理的有效手段之一。磁场作为一种外加物理场,主要以力和能的形式非接触地作用于材料的凝固过程,进而影响材料中原子的排列、匹配和迁移等行为[11]。近年来,随着超导技术和超低温冷却技术的发展,磁场强度大于 2 T 的强磁场已经得到了商业化,研究学者们将强磁场应用于材料的凝固过程,并取得了许多新的成果。研究表明,在磁场作用下材料(如纯 Al、Al-Cu、Al-Si 等)的相变过程、过冷度、凝固组织、微观偏析和性能等均发生显著变化[12-13]。基于此,国内外研究者们将磁场引入到高温合金的定向凝固过程中,也取得了一定的成果。研究表明,定向和单晶高温合金的凝固组织、典型凝固缺陷等均受到磁场的显著影响[14-17]。因此,磁场下定向凝固是除改变凝固工艺参数外极具前景的一种新思路,有望解决现有高温合金定向凝固工艺中的若干问题,成为制备高质量合金铸件的新途径。

本文结合近年来的相关研究,针对定向和单晶高温合金,在作用机理、凝固组织、铸造缺陷等方面,分别阐述了横向静磁场和纵向强磁场对合金凝固过程的影响,并展望了磁场下高温合金定向凝固的发展趋势和研究方向。

1 磁场下的热电磁效应

任一金属材料在凝固时,固相(S_S)和液相(S_L)本身的热电势系数不同,由于塞贝克效应(Seebeck effect),当液固界面处的温度梯度与热电势梯度不平行时便会产生热电流[18]。图 1 为固液界面处和三维枝晶尖端处产生的热电流回路。当施加磁场后,热电流与外加磁场相互作用,产生洛伦兹力,称之为热电磁力。热电磁力作用于糊状区液相,促使液相产生新的流动,称为热电磁对流(Thermoelectric magnetic convection, TEMC);作用于糊状区固相,会使固相枝晶受到力的作用[19-22]。

在合金凝固过程中施加静磁场时,磁场还会抑制熔体流动,此即磁阻尼效应(Electromagnetic damping, EMD)[13]。在静磁场下,导电熔体流动会切割磁感应线,从而产生与流动方向相反的洛伦兹力以抑制熔体流动。考虑热电磁效应和磁阻尼效应的欧姆定律如式(1)所示:

$$\boldsymbol{J}=\sigma(\boldsymbol{E}-S\nabla T+\boldsymbol{u}\times\boldsymbol{B}) \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{J}$ 为电流;σ 为电导率;$\boldsymbol{E}$ 是电场强度;S为热电势系数;∇T为温度梯度;$\boldsymbol{u}$ 为流体流速;$\boldsymbol{B}$ 为磁场强度。其中,$-S\nabla T$代表热电流,$\boldsymbol{u}\times\boldsymbol{B}$ 代表流体流动产生的感应电流。

电流与磁场相互作用产生洛伦兹力,该力会对熔体流动产生一定影响。在假设流体是不可压缩的和不考虑浮力的条件下,熔体流动可由Navier-Stokes方程来描述[23]:

$$\rho\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\rho(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}=-\nabla p+\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}+\rho\nu\nabla^2\boldsymbol{u} \tag{2}$$

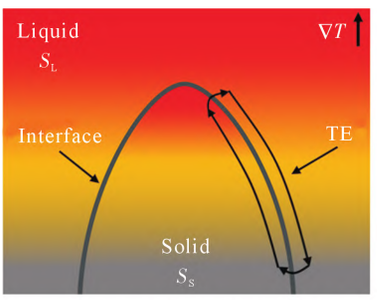
式中,ρ,p,ν 分别代表熔体密度,压力和运动黏度。

电荷守恒方程和不可压缩流体的质量守恒方程分别如式(3)、(4)所示:

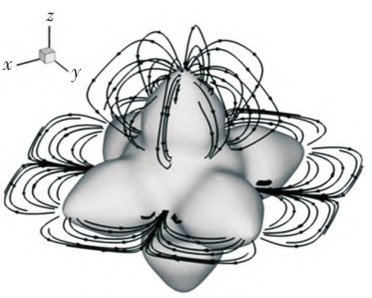
$$\nabla\cdot\boldsymbol{J}=0 \tag{3}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0 \tag{4}$$

通过求解上述方程,可以获得磁场作用下合金凝固过程中的熔体流动情况。Yuan 等[24]采用有限元方法分别模拟研究了横向和纵向磁场下单晶高温合金 PWA1483 单个枝晶域的热电磁效应。研究发现,在 65 K/cm 的温度梯度下,枝晶尖端产生的热电流密度为 1.5×10^5 A/m^2。在横向静磁场下,纵截面内产生横向的热电磁对流;在纵向静磁场下,产生环绕单个枝晶的热电磁对流。最近,Zhao 等[17]利用COMSOL 多物理场耦合软件分别对横向静磁场和纵向强磁场下DD3 单晶高温合金糊状区热电磁对流的分布进行了模拟研究,其结果如图 2～3 所示(定向凝固过程中的温度梯度约为 70 K/cm,试样直径为 4 mm)。研究发现(图 2),在横向静磁场下,合金糊状区内产生的热电磁对流沿垂直于磁场的方向从试样边缘一侧



(a) 固液界面处热电流示意图



(b) 三维等轴枝晶产生的热电流示意图

图 1 固液界面处和三维等轴枝晶产生的热电流示意图[22]

Fig.1 Schematic diagram of the thermoelectric current (TE) generated at the solid-liquid interface and around an equiaxed dendrite[22]

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

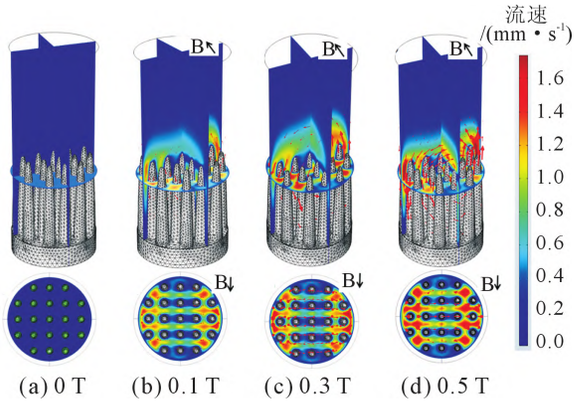


图 2　横向静磁场下 DD3 单晶高温合金糊状区热电磁对流(TEMC)的分布[17]

Fig.2　Distributions of the TEMC around the dendrite in DD3 single crystal (SX) superalloys under the transverse static magnetic field[17]

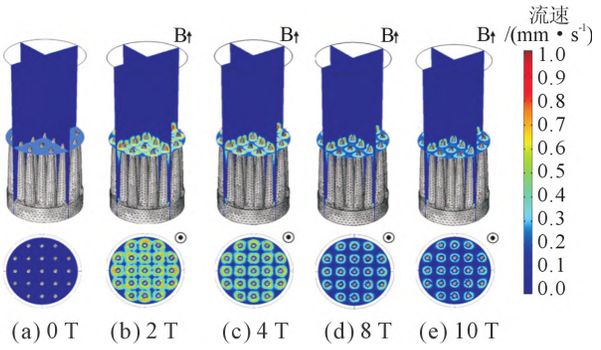


图 3　纵向强磁场下 DD3 单晶高温合金糊状区热电磁对流(TEMC)的分布

Fig.3　Distributions of the TEMC around the dendrite in DD3 SX superalloys under the high static magnetic field

流向另一侧，然后经枝晶尖端前沿液相形成回路，这与 Hu 等[25]在 Al-40 wt.%Cu 合金中的研究结果类似。相同条件下，随着磁场强度的增大，合金中产生的热电磁对流逐渐增强，0.5 T 磁场下糊状区内产生的最大热电磁对流流速约为 1.7 mm/s。

对纵向强磁场下 DD3 单晶高温合金糊状区内热电磁对流的模拟研究发现(图 3)，产生的热电磁对流围绕单个枝晶呈环状分布，这与 Yuan 等[24]的模拟结果类似；在较高的磁场强度下(4、6、8 T)，随着磁场强度的增大，合金糊状区内产生的热电磁对流逐渐减弱。这表明，在较强的纵向磁场下(>2 T)，磁阻尼效应逐渐发挥作用。

由此可见，在高温合金定向凝固过程中施加横向或纵向静磁场时，均会在合金糊状区内产生不同流动形式的热电磁对流，这将对合金的凝固组织或凝固缺陷产生一定影响。

2　横向静磁场对高温合金定向凝固组织的影响

图 4 为横向静磁场下定向凝固装置示意图，其中两个直流电磁体可以产生高达 0.7 T 的横向静磁场[17]。研究发现，在定向凝固过程中施加横向静磁场可以显著影响高温合金的凝固组织。董建文等[26]在定向凝固过程中对定向高温合金 DZ417G 施加横向静磁场(0～0.7 T)，发现当温度梯度为 150 K/cm 时，在较低抽拉速率(<50 μm/s)下，合金的一次枝晶间距随磁场强度的增大而减小，而在较高的抽拉速率(>50 μm/s)下，磁场对其影响则减弱。此外，作者还发现，在较低的抽拉速率下，横向静磁场的施加会导致宏观偏析的出现。李旭等[16,27]研究发现，当在 CMSX-6 单晶高温合金定向凝固过程中施加 0.5 T 的横向静磁场时，合金的一次枝晶间距最大可减少50%，但同样会在合金糊状区内产生宏观偏析。需要注意的是，CMSX-6 合金的凝固组织为定向组织，因而其研究结果与董建文等类似。Zhao 等[17]在 DD3 单晶高温合金定向凝固过程中，在抽拉速率为 30 μm/s，温度梯度为 70 K/cm 的条件下，施加 0～0.5 T 横向静磁场，发现随着磁场强度增大，合金的一次枝晶间距(图 5)、γ/γ′共晶的体积分数、γ′析出相的尺寸均显著减小。在 0.5 T磁场下，合金的一次枝晶间距降低了 21%，γ′析出相的尺寸由 0 T 下的 0.85 μm 降低至 0.25 μm，γ/γ′共晶的体积分数由 0 T 的 3.4%降低至 0.6%。

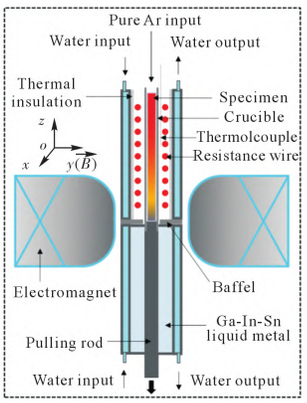


图 4　横向静磁场下定向凝固装置示意图[17]

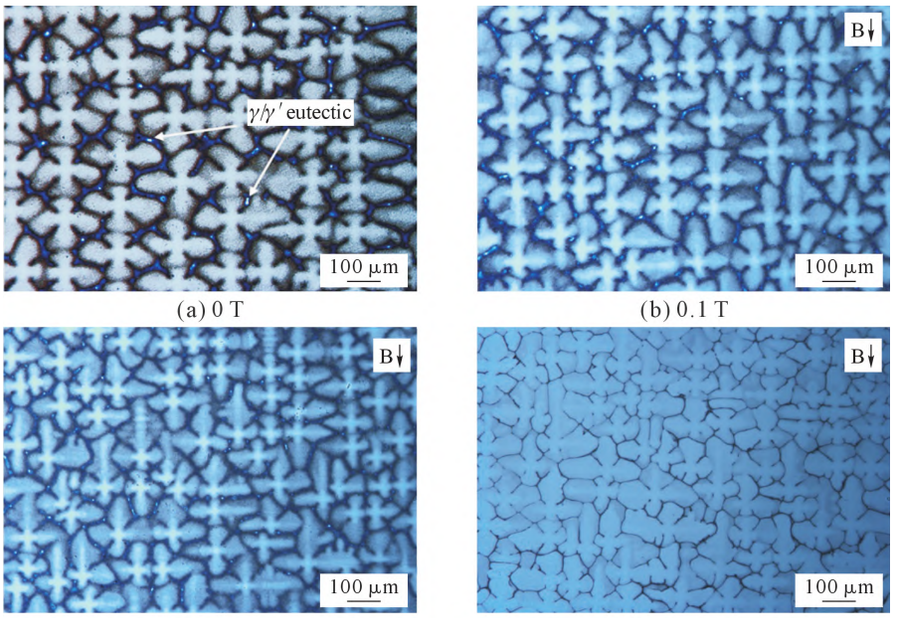
Fig.4　Illustration of the directional solidification apparatus under the transverse static magnetic field[17]

Lehmann 等[20]给出了熔体流动速度 U 与一次枝晶间距 λ 之间的关系：

$$\lambda=\lambda_0/\sqrt{1+U/R} \tag{5}$$

式中，λ_0 为没有熔体流动时的枝晶间距；R 为枝晶生长速率。可以看出，在一定条件下，随着磁场诱发的热电磁对流的逐渐增强，合金的一次枝晶间距逐渐减小。结合上述模拟研究结果(图 2[17])，认为热电磁对流是枝晶间距减小的主要原因。此外，在较低的抽拉速率下，热电磁对流对糊状区溶质的输运会导致定向合金宏观偏析的出现。

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



(a) 0 T (b) 0.1 T (c) 0.3 T (d) 0.5 T

图 5 横向静磁场对单晶高温合金 DD3 枝晶组织和枝晶间共晶组织的影响[17]

Fig.5 Effect of transverse static magnetic field on dendrites and eutectics of SX superalloy DD3[17]

近年来，激光增材制造因其具有极高的热梯度使得制备定向和单晶高温合金成为可能[28]。由于激光增材制造工艺的温度梯度显著高于传统的定向凝固工艺，较小的静磁场强度也会与温度梯度相互作用产生较为明显的热电磁效应。Wang 等[29]研究了横向静磁场(由电磁体产生，0~1.8 T)对激光增材制造 IN718 高温合金微观组织的影响，发现在一定激光工艺参数下施加磁场可以产生明显的织构组织。Du 等[30]在 IN718 高温合金激光定向能量沉积过程中施加横向静磁场(由永磁体 NbFeB 产生)，发现磁场的施加会导致合金的一次枝晶间距和大角度晶界比例增加。作者认为该结果是磁场抑制了熔体流动导致的。目前，关于磁场对高温合金激光增材制造过程的影响研究还比较少，相关研究需要进一步开展。

3 纵向静磁场对高温合金定向凝固组织的影响

随着超导技术的发展，磁场强度大于 2 T 的强静磁场已得到了商业化。图 6 为纵向强磁场下定向凝固装置示意图[31]，外加超导磁体可以实现高达 14 T 的纵向静磁场。研究发现，在定向和单晶高温合金的定向凝固过程中，施加纵向静磁场同样可以显著改变高温合金的凝固组织。对于定向镍基高温合金，Ren 等[32-33]考察了不同抽拉速率(40、80、120 μm/s)下纵向静磁场对合金一次枝晶间距的影响，结果表明，合金的一次枝晶间距随磁场强度的增大呈现先减小后增大的规律，在 6 T 磁场下合金的一次枝晶间距最小。Li 等[34]研究了纵向弱磁场(≤0.5 T)对不同直径试样(4、10 mm)一次枝晶间距的影响(抽拉速率为 20 μm/s)，也发现了类似的规律。分析认为这是磁阻尼效应和热电磁效应相互竞争导致的。在一定抽拉速率下，当磁场强度较小时，以热电磁效应为主；而当磁场较强时，磁阻尼效应开始发挥作用，这和上述模拟研究结果一致。

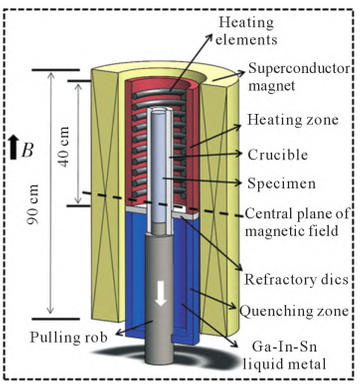
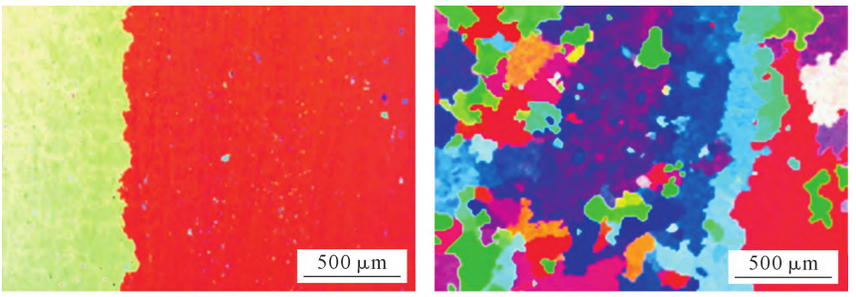


图 6 纵向静磁场下定向凝固装置示意图[31]

Fig.6 Schematic illustration of the directional solidification apparatus under the longitudinal static magnetic field[31]

在更低的抽拉速率下(5、10 μm/s)，强磁场的施加会破坏枝晶的生长，促使合金发生柱状晶向等轴晶转变(Columnar to equiaxed transition, CET 转变)[35-37]。如图 7 所示，在温度梯度为 150 K/cm、抽拉速率为 10 μm/s 条件下，未施加磁场时，DZ417G 高温合金为典型的柱状晶组织；施加 6 T 纵向强磁场后，其组织为等轴晶组织[37]。对于钴基高温合金(Co-Al-W基)，研究发现[15,38-39]，在低抽拉速率下施加强磁场同样会诱发 CET 转变的发生。如前所述，在定向凝固过程

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



(a) DZ417G,10 μm/s,0 T　　(b) DZ417G,10 μm/s,6 T

图 7 强磁场诱使 DZ417G 高温合金发生柱状晶到等轴晶转变[37]

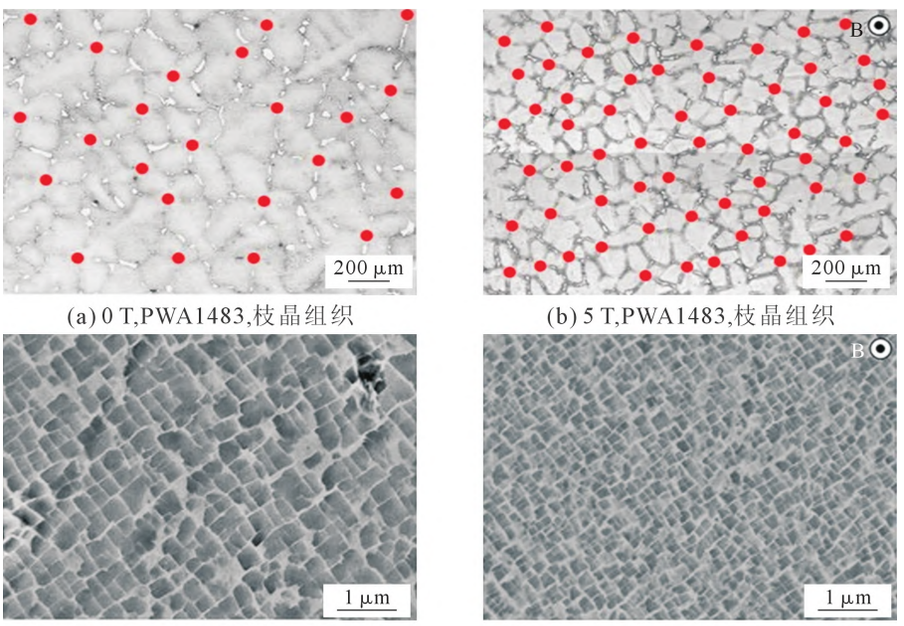
Fig.7 High magnetic field induces the columnar to equiaxed transition in superalloy DZ417G at 10 μm/s[37]

中施加静磁场，除了使枝晶间液相产生热电磁流动外，还会使固相枝晶受到热电磁力的作用。计算结果表明[37,40]，强磁场诱发的热电磁力的数量级约为 10^5 N/m^3，该力足以将枝晶碎断。因此，热电磁力是合金发生 CET 转变的主要原因。

在磁场下定向凝固过程中，采用籽晶法可以制备镍基单晶高温合金。研究表明[14,41-42]，在一定抽拉速率下，在单晶高温合金的定向凝固过程中施加纵向强磁场不会破坏合金的单晶完整性，一定强度磁场的施加可以显著细化合金的枝晶组织，降低 γ′相的尺寸和 γ/γ′共晶的含量。如图 8 所示[41]，当温度梯度为 120 K/cm、抽拉速率为 50 μm/s 时，在PWA1483 单晶高温合金定向凝固过程中施加 5 T 的强磁场，合金的一次枝晶间距由未施加磁场时的 260 μm 降低至 180 μm；枝晶干 γ′析出相的尺寸由 450 μm 降低至 250 μm；γ/γ′共晶的含量由 1.92%降低至 1.06%。如前所述，枝晶组织的细化可归因于枝晶间的热电磁对流。对于 γ′析出相，研究认为[43]，强磁场的施加可能增大了过冷而降低了固态转变期间 γ′相的形核活化能，从而显著细化枝晶干 γ′析出相的尺寸，相关研究还需要进一步开展。

4　静磁场对高温合金凝固缺陷的影响

定向凝固是一个非平衡凝固过程，加上高温合金所含难熔元素的扩散系数较小，使得合金凝固组织中出现严重的枝晶偏析。通常，采用偏析系数 k 来表征枝晶的偏析程度，其定义为 $k=C_{DC}/C_{ID}$，C_{DC} 为枝晶干元素浓度，C_{ID} 为枝晶间所含元素的浓度。本课题组[17,44]最近的研究结果表明，在单晶高温合金定向凝固过程中施加一定强度的磁场可以显著降低合金元素的偏析程度。在温度梯度为 70 K/cm、抽拉速率为 30 μm/s 条件下，随着横向静磁场强度的增加，DD3 单晶合金中正偏析元素 Ti、Al 和负偏析元素 W、Mo 的偏析系数均逐渐趋近于 1，元素的偏析程度降低(图 9 (a))[17]。Xuan 等[41]的研究结果也表明，在 50 μm/s 抽拉速率下，分别对 PWA1483 和 CMSX-4



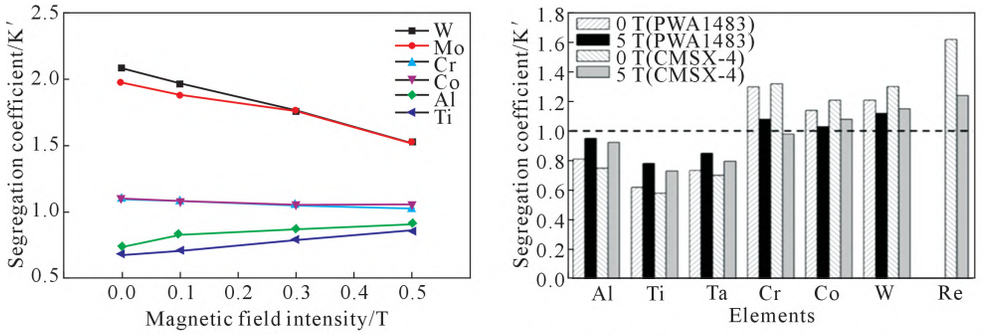
(a) 0 T,PWA1483,枝晶组织　　(b) 5 T,PWA1483,枝晶组织

(c) 0 T,PWA1483,枝晶干γ′析出相　　(d) 5 T,PWA1483,枝晶干γ′析出相

图 8 纵向静磁场对单晶高温合金 PWA1483 枝晶组织和枝晶干 γ′析出相的影响[41]

Fig.8 Effect of a longitudinal static magnetic field on dendrites and γ′ phases of SX superalloy PWA1483[41]

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



(a) 横向静磁场,DD3, 30 μm/s　　(b) 纵向静磁场,PWA1483、CMSX-4,50 μm/s

图 9 静磁场对单晶高温合金微观偏析的影响[17,41]

Fig.9 Effect of a static magnetic field on microsegregation of SX superalloys[17,41]

单晶高温合金施加 5T 纵向强磁场，合金元素的偏析系数趋近于 1(图 9 (b))。研究认为[45],磁场诱发的热电磁对流会促进糊状区的溶质传输,使得先凝固的部分(即枝晶干)和后凝固部分(即枝晶间)的成分差异减小,因而合金元素的偏析程度降低。另外,γ/γ′共晶是枝晶偏析的产物,当枝晶间残余液相中的溶质浓度达到共晶成分点时就会发生共晶反应形成γ/γ′共晶[46-47]。因此,上述施加磁场能够显著降低γ/γ′共晶含量应归因于磁场降低了枝晶偏析，使得枝晶间残余液相中共晶形成元素的含量显著降低。

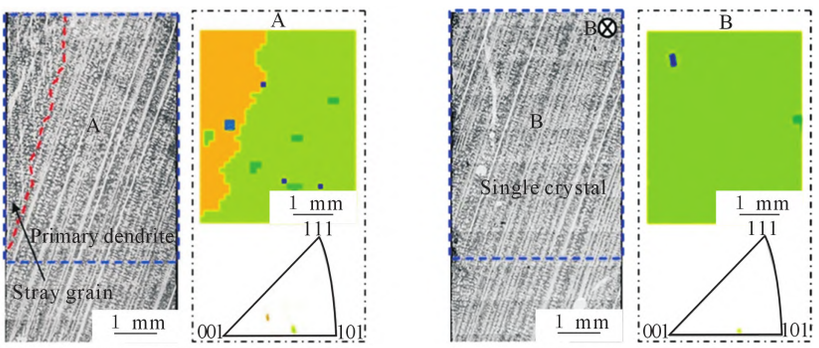
杂晶是单晶铸件中的一种典型凝固缺陷。研究表明，在保证磁场不破坏单晶完整性的前提下,在合适的工艺参数范围内,一定强度的纵向强磁场和横向静磁场可以抑制镍基单晶高温合金杂晶缺陷的产生。玄伟东等[14,48]考察了强磁场对截面突变处单晶高温合金杂晶缺陷形成的影响,发现在温度梯度为 70 K/cm、抽拉速率为 150 μm/s 条件下,未施加磁场时在截面突变处形成了杂晶;施加 12 T 强磁场后,杂晶得到了抑制。测温结果表明,强磁场的施加增大了形核过冷度,使得杂晶形核变得困难。需要注意的是，籽晶取向也会对杂晶形成产生影响,当籽晶取向偏离度(即偏离 <001> 取向的度数)较大时容易在截面突变处形成杂晶,反之则不容易形成杂晶缺陷。强磁场对杂晶缺陷的影响及作用机制还需要进一步研究。

横向静磁场对杂晶形成的影响,如图 10[49]所示。当籽晶取向偏离度较大时,会在试样边缘发散侧形成杂晶(图 10(a));相同条件下施加 0.7 T 的横向静磁场后,发散侧杂晶得到了抑制(图 10(b))。研究认为,横向静磁场诱发的热电磁对流垂直于枝晶生长方向,促进了二次等高次枝晶的生长,从而避免了发散侧的过冷形核。

此外,部分研究结果还表明,强磁场的施加可以降低合金内微孔的大小和体积分数，进而提高单晶高温合金的蠕变寿命。Ren 等[50]研究发现,在 50 μm/s 抽拉速率下，在有无 5 T 强磁场下分别对 CMSX-4 单晶高温合金进行定向凝固，然后经相同热处理后,在 980 ℃/250 MPa 下,单晶高温合金的蠕变寿命由 0 T 下的 231 h 提高到 5 T 下的 313.8 h。目前,对磁场下定向凝固的高温合金的性能研究还比较少。在合适的工艺参数下,需进一步评估磁场下凝固制备的高温合金的力学性能。

5 总结与展望

静磁场下定向凝固为先进定向和单晶高温合金的凝固制备提供了新的途径。横向静磁场和纵向强磁场均会显著影响高温合金的定向凝固组织。在合适的凝固工艺参数和磁场强度下,静磁场的施加



(a) PWA1483,0 T,100 μm/s　　(b) PWA1483,0.7 T,100 μm/s

图 10 横向静磁场对单晶高温合金杂晶缺陷的影响[49]

Fig.10 Effect of a transverse static magnetic field on stray grains in SX superalloy PWA1483[49]

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

可以显著细化高温合金的枝晶组织，降低γ/γ′共晶的含量和γ′析出相的尺寸，减轻枝晶偏析，抑制杂晶等典型缺陷的形成等。一定条件下，强磁场的施加可以促进高温合金发生CET转变。在高温合金激光增材制造领域，横向静磁场的施加还可以显著改变合金的凝固组织和导致织构的形成。然而，尽管目前国内外研究学者针对磁场下高温合金凝固制备的研究已经取得了一定进展，针对下述问题仍需进一步研究：

(1)系统开展宽凝固速率范围下，磁场对先进高温合金CET转变的影响，获得合金发生CET转变所需的临界磁场强度和临界凝固工艺参数(如凝固速率、温度梯度)，结合理论研究和数值模拟，丰富和发展磁场下多组元高熔点合金的CET转变模型。

(2)在不发生CET转变的条件下，系统研究磁场作用下先进定向和单晶高温合金凝固组织与缺陷的演变规律，发展更为精确的计算模拟研究，阐明磁场、温度场、溶质场、应力场等多场耦合作用对合金凝固组织和典型缺陷的影响机理，并进一步评估其力学性能。

(3)利用磁致CET转变，发展强磁场下制备等轴晶高温合金新工艺，系统考察利用磁致CET转变制备等轴晶高温合金的组织、缺陷与力学性能的响应关系，结合理论计算和模拟研究，实现组织与性能的有效预测。

(4)激光增材制造技术在高温合金领域得到了飞速发展，有望成功制备等轴晶、定向和单晶高温合金。利用增材制造技术超高温度梯度的特点，施加一定强度的磁场可以产生显著的热电磁效应。因而将磁场应用于高温合金的增材制造过程有望进一步调控增材制造高温合金的组织与性能。

参考文献：

[1] 张健，楼琅洪. 铸造高温合金研发中的应用基础研究[J]. 金属学报，2018, 54(11): 1637-1652.

[2] 张健，王莉，王栋，等. 镍基单晶高温合金的研发进展[J]. 金属学报，2019, 55(9): 1077-1094.

[3] 刘林，孙德建，黄太文，等. 高梯度定向凝固技术及其在高温合金制备中的应用[J]. 金属学报，2018, 54(5): 615-626.

[4] 刘林. 高温合金精密铸造技术研究进展[J]. 铸造，2012, 61(11): 1273-1285.

[5] BRUNDIDGE C L, VAN DRASEK D, WANG B, et al. Structure refinement by a liquid metal cooling solidification process for single-crystal nickel-base superalloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43: 965-976.

[6] LIU L, HUANG T W, ZHANG J, et al. Microstructure and stress rupture properties of single crystal superalloy CMSX-2 under high thermal gradient directional solidification [J]. Materials Letters, 2007, 61(1): 227-230.

[7] 马德新. 高温合金叶片单晶凝固技术的新发展[J]. 金属学报，2015, 51(10): 1179-1190.

[8] HOFMEISTER M, FRANKE M M, KOERNER C, et al. Single crystal casting with fluidized carbon bed cooling: A process innovation for quality improvement and cost reduction[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48: 3132-3142.

[9] 张朝，黄太文，蒲茜，等. 流态床冷却定向凝固技术研究进展[J]. 材料导报，2022, 36(7): 213-218.

[10] 曹凯莉，杨文超，屈鹏飞，等. Ru对镍基单晶高温合金凝固特性、TCP相析出及蠕变性能影响的研究进展[J]. 材料工程，2022, 50(1): 80-92.

[11] 王强，赫冀成. 强磁场材料科学[M]. 北京：科学出版社，2014.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 玄伟东. 高温合金定向凝固杂晶形成规律及其控制研究[D]. 上海：上海大学，2013.

[15] 张超. 磁场下新型钴基高温合金Co-Al-W定向凝固组织的研究[D]. 镇江：江苏科技大学，2017.

[16] 李旭. 横向静磁场作用下单晶高温合金CMSX-6定向凝固组织生长行为的研究[D]. 上海：上海交通大学，2015.

[17] ZHAO Y, SU H J, FAN G R, et al. Tailoring microstructure and microsegregation in a directionally solidified Ni-based SX superalloy by a weak transverse static magnetic field[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35: 1164-1174.

[18] SHERCLIFF J A. Thermoelectric magnetohydrodynamics[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1979, 91(2): 231-251.

[19] MOREAU R, LASKAR O, TANAKA M, et al. Thermoelectric magnetohydrodynamic effects on solidification of metallic alloys in the dendritic regime[J]. Materials Science and Engineering: A, 1993, 173(1-2): 93-100.

[20] LEHMANN P, MOREAU R, CAMEL D, et al. Modification of interdendritic convection in directional solidification by a uniform magnetic field[J]. Acta Materialia, 1998, 46(11): 4067-4079.

[21] 李喜，任忠鸣. 静磁场下热电磁效应及其对凝固组织的影响[J]. 中国材料进展，2014, 33(6): 349-354.

[22] GAO J R, HAN M K, KAO A, et al. Dendritic growth velocities in an undercooled melt of pure nickel under static magnetic fields: A test of theory with convection[J]. Acta Materialia, 2016, 103: 184-191.

[23] 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.

[24] YUAN X T, ZHOU T, REN W L, et al. Nondestructive effect of the cusp magnetic field on the dendritic microstructure during the directional solidification of nickel-based single crystal superalloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 62(30): 52-59.

[25] HU S D, HOU L, WANG K, et al. Effect of transverse static magnetic field on radial microstructure of hypereutectic aluminum alloy during directional solidification [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 76: 207-214.

[26] 董建文，任忠鸣，任维丽，等. 横向磁场对镍基高温合金定向凝

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

固组织的影响[J]. 金属学报,2010, 46(1): 71-76.

[27] 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.

[28] LI Y, LIANG X Y, YU Y F, et al. Review on additive manufacturing of single-crystal nickel-based superalloys[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2022, 1(1): 100019.

[29] WANG Y C, SHI J. Texture control of Inconel 718 superalloy in laser additive manufacturing by an external magnetic field [J]. Journal of Materials Science, 2019, 54: 9809-9823.

[30] DU D F, DONG A P, SHU D, et al. Influence of static magnetic field on the microstructure of nickel-based superalloy by laser-directed energy deposition[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51: 3354-3359.

[31] DONG Y H, SHUAI S S, YU J B, et al. Effect of high static magnetic field on the microstructure and mechanical properties of directionally solidified alloy 2024[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 749: 978-989.

[32] REN W L, ZHANG T, REN Z M, et al. A dramatic increase in dendrite number for directionally solidified superalloy DZ417G with a strong static magnetic field [J]. Materials Letters, 2009, 63(3-4): 382-385.

[33] ZHANG T, REN W L, DONG J W, et al. Effect of high magnetic field on the primary dendrite arm spacing and segregation of directionally solidified superalloy DZ417G[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 487(1-2): 612-617.

[34] LI X, REN Z M, WANG J, et al. Influence of a weak static magnetic field on the primary dendrite arm spacing of a directionally solidified Ni-based superalloy[J]. Materials Letters, 2012, 67(1): 205-209.

[35] 李旭,任忠鸣,任维丽,等. 纵向磁场作用下 DZ417G 高温合金的枝晶生长行为[J]. 中国有色金属学报,2010, 20(10): 1913-1921.

[36] 玄伟东,任忠鸣,李传军,等. 纵向磁场对不同尺寸定向凝固高温合金 DZ417G 组织的影响[J]. 金属学报,2012, 48(5): 629-635.

[37] XUAN W D, REN Z M, LI C J. Effect of a high magnetic field on microstructures of Ni-based superalloy during directional solidification[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 620: 10-17.

[38] 余建波,侯渊,张超,等. 静磁场对新型 Co-Al-W 基高温合金定向凝固组织的影响[J]. 金属学报,2017, 53(12): 1620-1626.

[39] 张超,刘欢,兰健,等. 纵向磁场对 Co-8.8Al-9.8W-2Ta 钴基高温合金定向凝固组织的影响[J]. 上海金属,2018, 40(3): 79-83.

[40] YU J B, DU D F, REN Z M, et al. Influence of an axial magnetic field on microstructures and alignment in directionally solidified Ni-based superalloy[J]. ISIJ International, 2017, 57(2): 337-342.

[41] XUAN W D, LAN J, LIU H, et al. Effects of a high magnetic field on the microstructure of Ni-based single-crystal superalloys during directional solidification[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48: 3804-3813.

[42] REN W L, NIU C L, DING B, et al. Improvement in creep life of a nickel-based single-crystal superalloy via composition homogeneity on the multiscales by magnetic-field-assisted directional solidification[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1452.

[43] XUAN W D, LAN J, ZHAO D K, et al. Effect of a high magnetic field on γ′ phase for Ni-based single crystal superalloy during directional solidification[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49: 1919-1924.

[44] 刘承林,苏海军,张军,等. 电磁场对镍基单晶高温合金组织的影响[J]. 金属学报,2018, 54(10): 1428-1434.

[45] JIANG P F, WANG J T, HOU L, et al. Controlling and adjusting the concentration distribution during solidification process using static magnetic fields[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 50: 86-91.

[46] BOROUNI A, KERMANPUR A. Effect of Ta/W ratio on microstructural features and segregation patterns of the single crystal PWA1483 Ni-based superalloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29: 7567-7586.

[47] KEARSEY R M, BEDDOES J C, JONES P, et al. Compositional design considerations for microsegregation in single crystal superalloy systems[J]. Intermetallics, 2004, 12(7-9): 903-910.

[48] XUAN W D, REN Z M, LI C J. Experimental evidence of the effect of a high magnetic field on the stray grains formation in cross-section change region for Ni-based superalloy during directional solidification[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46: 1461-1466.

[49] XUAN W D, LIU H, LAN J, et al. Effect of a transverse magnetic field on stray grain formation of Ni-based single crystal superalloy during directional solidification[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(6): 3231-3236.

[50] XUAN W D, SONG G, DUAN F M, et al. Enhanced creep properties of nickel-base single crystal superalloy CMSX-4 by high magnetic field[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 803: 140729.

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