

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.08.002

磁场下金属增材制造研究进展

陈超越^{1,2}, 王江^{1,2}, 任忠鸣^{1,2}

(1. 上海大学 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444; 2. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要: 磁场下增材制造 (Magnetic field tailored additive manufacturing, MAM) 技术凭借电磁场独特的无接触式控制特点, 可以显著影响金属微熔池内部流动及传热过程, 改善冶金质量并调控凝固组织。MAM 技术有助于解决传统高能束增材制造过程中难以避免的气孔、裂纹及元素偏析缺陷, 抑制组织柱状晶和强织构特征, 获得优异综合力学性能, 有望进一步扩展增材制造技术的应用范围。尽管电磁场下冶金及相变过程已有大量研究, 然而磁场对增材制造非稳态复杂热循环成形过程的作用机制及影响效果尚不明确。本文综述了静磁场以及交变磁场作用下的增材制造研究进展, 分析了磁场对于气孔、残余应力及元素偏析等冶金缺陷和微观凝固组织及综合力学性能的影响效果, 探讨了磁场对于增材制造成形过程中熔体流动、凝固及固态相变的影响机制, 并展望了未来研究方向和应用前景。

关键词: 增材制造; 静磁场; 交变磁场; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG113.25; TG669

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2022)08-0585-15

Research Progress in Metal Additive Manufacturing under Magnetic Field

CHEN Chaoyue^{1,2}, WANG Jiang^{1,2}, REN Zhongming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Special Steels, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Magnetic field tailored additive manufacturing (MAM) technology can significantly affect the flow and heat transfer process in metal micropools, improve the metallurgical quality and control the solidification structure by virtue of the unique contactless control characteristics of electromagnetic fields. MAM technology can help to solve the unavoidable pores, cracks and element segregation defects in the traditional high-energy beam additive manufacturing process, inhibit the columnar crystal and strong texture characteristics of the microstructure, and obtain excellent comprehensive mechanical properties, which is expected to further expand the application scope of additive manufacturing technology. Although there have been a lot of studies on metallurgy and phase transformation process under electromagnetic field, the mechanism and effect of magnetic field on unsteady complex thermal cycle forming process of additive manufacturing are still unclear. In this paper, the research progress of additive manufacturing under static and alternating magnetic fields is reviewed. The effects of magnetic field on metallurgical defects such as porosity, residual stress and elemental segregation, microstructure and comprehensive mechanical properties are analyzed. The influence mechanism of magnetic field on melt flow, solidification and solid phase transition in additive manufacturing is discussed, and the future research direction and application prospect are prospected.

Key words: additive manufacturing; static magnetic field; alternative magnetic field; microstructure; mechanical property

金属增材制造技术^[1-2]是可以通过计算机辅助三维建模设计立体模型, 采用高能束以挤压、烧结、熔融、喷射等方式逐层堆叠目标材料, 制造出实体物的加工工艺。金属增材制造技术可以分为电子束选

区熔化 (Electron beam selective melting, EBSM)^[3], 电弧增材制造 (Wire and arc additive manufacturing, WAAM)^[4], 激光选区熔化 (Selective laser melting, SLM)^[5], 激光熔化沉积 (Laser metal deposition, LMD)^[6]。

收稿日期: 2022-07-01

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3702502); 国家自然科学基金(52001191); 上海市科委基础研究项目(20511107700, 20511107700); 中国重燃项目(F035); 上海青年科技启明星计划(20QA1403800); 上海市教委曙光学者计划(20SG42); 广东省现代表面工程技术重点实验室开放课题(2020B1212060049)

作者简介: 陈超越(1987—), 博士, 副教授. 研究方向: 高性能合金的增材制造技术研究. 电话: 02166135623, Email: cchen1@shu.edu.cn

通讯作者: 王江(1985—), 博士, 教授. 研究方向: 增材制造及电磁冶金研究. Email: jiangwang@i.shu.edu.cn

相对于传统制造技术,增材制造技术无需模具就可以制造具有复杂几何形状的构件,尤其是需求量少,甚至单件产品,增材制造更具有成本优势。与此同时,增材制造还可以在目标产品上进行拓扑结构优化设计,基于复杂结构一体化直接成形的特点实现目标构件的轻量化^[7]。此外,在高功率的热源快速移动的条件下,该工艺具有快热快冷的特点,使最终产品的微观组织细小,力学性能显著提高。目前,金属增材制造技术已经在航空航天、军事、生物医学等领域的^[8-10]高端装备开展应用。

基于激光等高能束的快速熔化及快速凝固机制,各类金属增材制造技术往往可以获得细小及均质化的微观组织,其力学性能可以媲美铸造、锻造等传统工艺。然而,该技术仍存在一系列冶金缺陷(微裂纹、夹杂物、微孔等)以及室温塑性、疲劳及断裂韧性等力学性能较差的问题。高能束增材制造快速冷却过程中的热应力极易导致材料出现微裂纹^[11],同时也会出现大量柱状晶的微观结构^[12],由侧向保护气流、熔池的波动和反冲压力引起液态金属飞溅,其在表面张力作用下凝固成孤立球状,造成球化缺陷。材料的迅速熔化和凝固、熔池剧烈波动等也常常导致气孔等问题。此外,中间层的表面粗糙度会影响下一层的铺粉质量,导致内部缺陷产生。成形面的表面粗糙度会严重影响构件的疲劳性能,在熔池与凝固金属之间存在较大的温度梯度和应力,导致熔池产生较大形变。高温梯度下的自然对流以及表面张力梯度下的 Marangoni(马兰戈尼)流动,使熔池内部流动错综复杂。并且,高能激光束持续加热下,熔池内部的温度场受到极大的影响,加上相变等过程产生的潜热影响,从而导致凝固过程更加复杂^[13-15]。由于构件的几何特征、热积累、应力集中等原因会形成不同程度的几何缺陷,粉层填充密度会影响粉床的热导率和熔池的流动,粉层的厚度会影响熔池的稳定性、熔化状态和构件的内部缺陷^[16-18]。由于 SLM 的快冷快热的特点,容易导致材料的强度高而塑性差,造成材料应用的局限性。而且,在 SLM 的实验结果中会发现织构残余应力等问题,需要研究针对 SLM 熔化和凝固过程的调控手段,以实现凝固组织的优化和力学性能的提升。

电磁场因其独特的磁效应,开辟了凝固结晶控制的新领域。早在六七十年前,磁场已经在冶金材料制备过程得以应用,成为材料加工技术和磁流体力学的交叉学科。外加磁场可以在材料制备过程中影响熔化和凝固中的熔体流动和传热,从而达到优化材料组织和性能的目的。基于磁阻尼效应和热电

磁效应,不同的条件下磁场会促进或抑制金属熔体流动,进而影响凝固过程中的枝晶形貌、枝晶生长取向、枝晶间距、溶质分布以及糊状区的长度。以激光和电弧为代表的金属增材制造技术,性能提升的核心在于微熔池内部的熔体流动、传热以及快速凝固过程,这为外加磁场实现无接触式的控制提供了机会^[19-21]。

目前,已有包括上海大学等多家单位开展了磁场下增材制造(Magnetic field tailored additive manufacturing, MAM)的相关研究。MAM 研究中主要使用包括静磁场和交变磁场在内的多种磁场类型,开展了激光选区熔化、激光熔化沉积及电弧增材制造等多种金属增材制造技术的研究。初步研究表明,磁场可以显著影响增材制造的微熔池内部流动及传热过程,并改善冶金缺陷及凝固组织。然而,以激光为代表的高能束增材制造技术具有突出的非平衡快速凝固及复杂热循环机制,因此基于传统平衡凝固过程获得的磁场作用机制及理论无法直接适用于增材制造技术。静磁场及交变磁场下增材制造技术尚属有待研究的领域,其影响机制和作用效果并未完全了解,开展相关研究具有重要应用意义和理论价值。

本文主要综述了近年来磁场下激光增材制造技术的研究进展。介绍和讨论了静磁场(Static magnetic field, SMF)下的增材制造研究进展,包括其对于气孔、残余应力、元素偏析等冶金缺陷的优化效果,对于增材制造非平衡凝固组织的影响机制以及综合力学性能的改善效果;介绍了交变磁场(Alternating magnetic field, AMF)下的增材制造技术研究进展,包括适用于增材制造技术的交变磁场工艺及装置,及其对于增材制造冶金缺陷、凝固组织及力学性能的影响效果。对磁场下金属增材制造工艺的基本影响机理进行了探讨,包括静磁场及交变磁场对于熔体流动、凝固及固态相变过程;最后,总结和展望了磁场下增材制造技术的研究现状,期望通过研究揭示磁场对增材制造快速熔化、快速凝固及复杂热循环的影响机制,发展冶金缺陷的优化手段,建立综合性能的提升机制,进一步推动磁场手段在增材制造领域的应用和推广。

1 静磁场下金属增材制造技术

目前,众多学者开展了磁场下增材制造的研究。本节从优化冶金缺陷、影响凝固组织和提升力学性能 3 个方面讲述静磁场在金属增材制造方面的研究进展。

1.1 对气孔、残余应力及偏析等冶金缺陷的影响

气孔、残余应力与元素偏析一直是金属增材制造技术方面致力于不断优化的3个典型冶金缺陷,采用打印过程中施加外置静磁场对其实施优化,以期实现缩小孔隙率,减少残余应力以及降低元素偏析的作用。

气孔是金属增材制造中最常见的缺陷类型之一,通常由于微熔池内部气体难以及时逸出而被快速凝固组织包裹所形成,会严重影响材料的塑性及疲劳性能^[22-23]。为了减小孔隙率,Filimonov等^[24]在0.2 T的静磁场下通过激光熔化沉积制造 Inconel 718 高温合金,将平均平面孔隙率从0.3%降低至0.2%。杜大帆等^[25]采用纵向静磁场以调控 SLM 成形 Al-Si10Mg 合金,发现静磁场可以有效提升合金样品的致密度。他们认为在相对较低的激光能量密度(Laser energy density, LED)下,流速缓慢的熔体会导致大量气泡被困在熔池内,最终 SLM 零件出现孔隙。随着 LED 的增加,增强的 Marangoni 对流可以促进小气泡的聚集,形成较大的气泡,在浮力和对流的作用下逃逸到大气中。而在相对较高的 LED 下,Marangoni 对流将在熔池中形成涡流,扰乱气泡的浮动,使得熔池内部再次形成孔隙。

残余应力是增材制造技术的另一个典型缺陷。激光等高能束增材制造过程中超快冷却速度会产生难以抑制的局部应力集中,从而形成局部微裂

纹、结构变形甚至是合金构件的开裂失效。因此,抑制并减小残余应力是金属增材制造中的关键问题。上海大学笔者团队^[26]在 Inconel 718 高温合金的激光重熔中引入横向静磁场,发现随着磁场强度的增加,打印基板的变形程度不断减少(见图1),且重熔区的残余应力由392.50 MPa降低至315.45 MPa。这主要由于激光重熔过程中,施加的电磁力使熔池内的流场最小化,抑制了热传递并使冷却速度最小化。

元素偏析使合金材质不均匀,产生缺陷,最终影响其力学性能。在 Inconel 718 镍基高温合金中,Nb 元素不仅影响凝固组织,还影响强化相的析出,Nie等^[26]定量表征了有无磁场下的枝晶元素偏析,图2所示为枝晶间 Nb 元素的变化,Roi 是指示元素含量的无量纲变量,计算可知,0.55 T 磁场处理样品的 Roi 方差比无磁场处理的 Roi 方差低 11.1。这表明,在施加 0.55 T 横向磁场后,枝晶间区域的 Nb 元素偏析小于无磁场状态。Zhu 等^[27]认为这是由于固-液界面处的热电流最高,导致固-液界面处的热电磁力(Thermoelectric magnetic force, TEMF)最大,枝晶周围的热电磁对流(Thermoelectric magnetic convection, TEMC)可以使元素分布均匀化。Filimonov 等^[24]发现在 0.2 T 的静磁场下通过激光熔化沉积制造的 Inconel 718 高温合金中,糊状区中的 TEMC 占主导地位,导致沉淀中 Nb 含量从 14.1%减少至 9.1%。

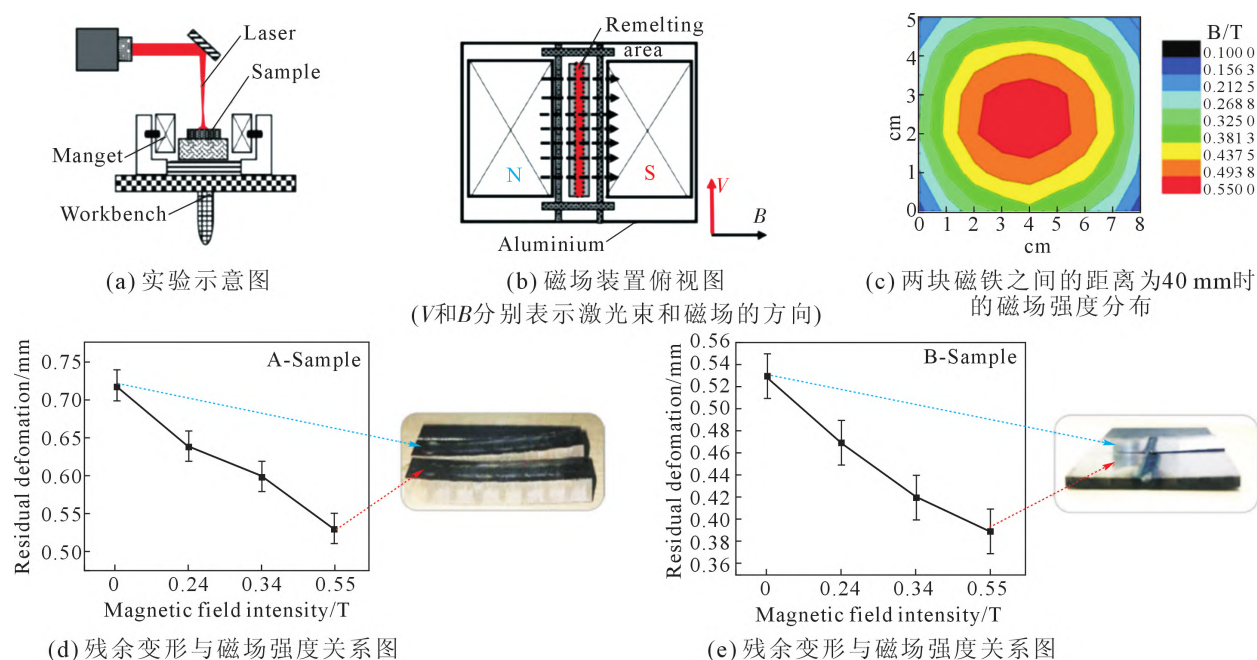
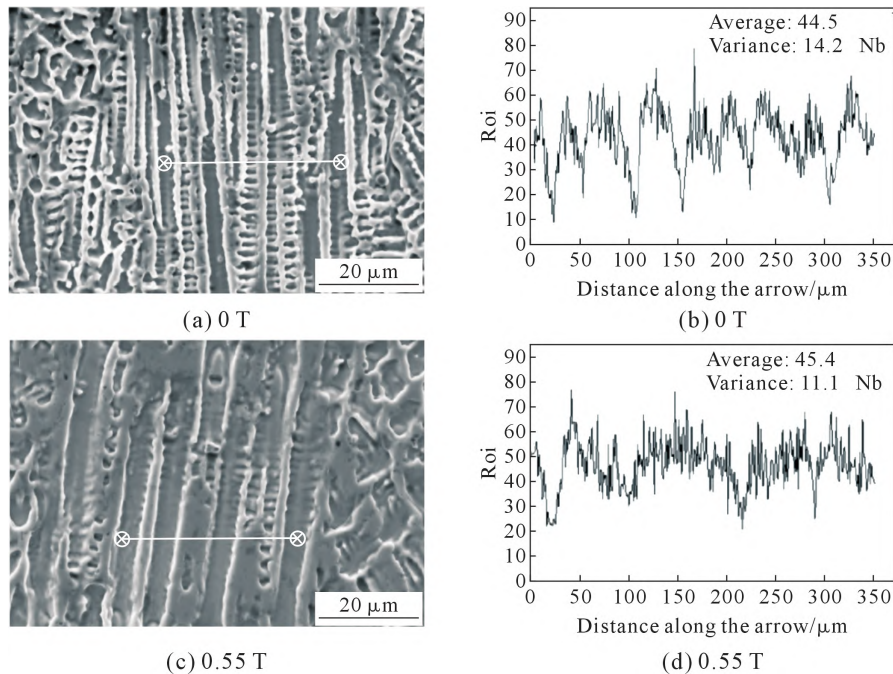


图1 静磁场下激光重熔 Inconel 718 基材的实验示意图,详细的磁场装置俯视图,两块磁铁之间的距离为40 mm时的磁场强度分布,样品的残余变形与磁场强度之间的关系^[26]

Fig.1 Experimental schematic diagram illustrating the laser remelting of Inconel 718 substrate under static magnetic field, top view of the detailed magnetic field device, the distribution of magnetic field intensity while the distance between the two magnet blocks is 40 mm, and relationship between the residual deformation of samples and magnetic field intensity^[26]

图2 不同磁场条件下激光重熔 Inconel 718 基板区域的 SEM-EDS 线扫^[26]Fig.2 SEM-EDS line scanning of the region within the laser remelted Inconel 718 substrate under different magnetic fields^[26]

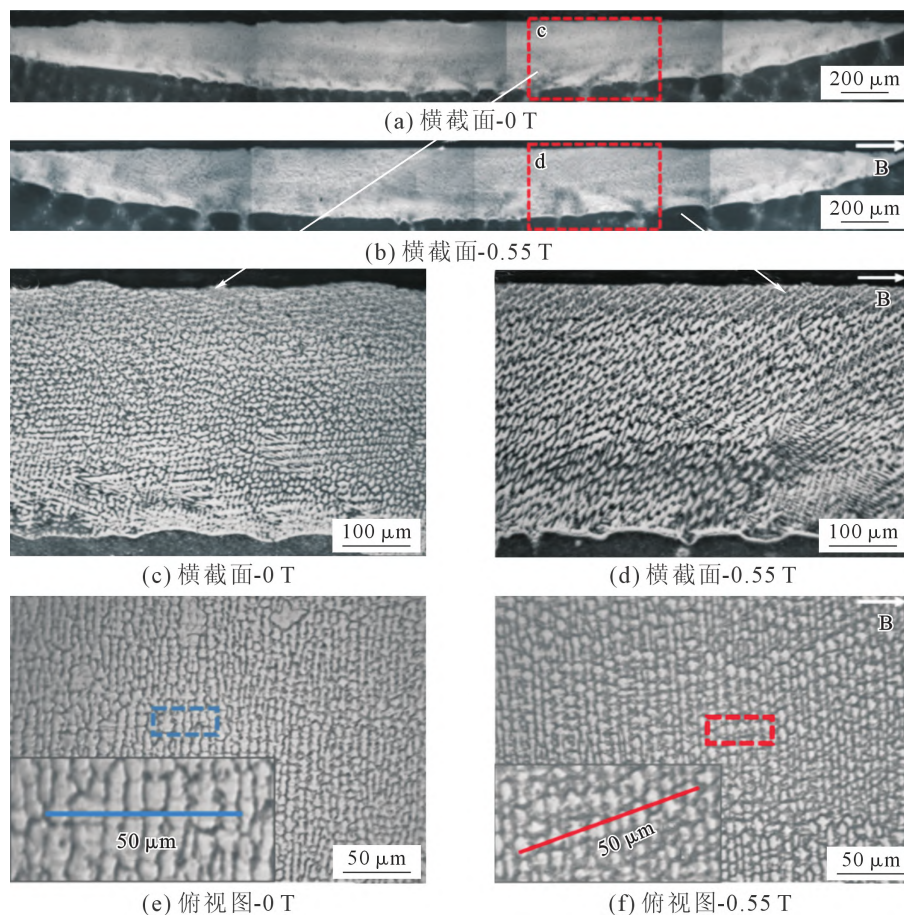
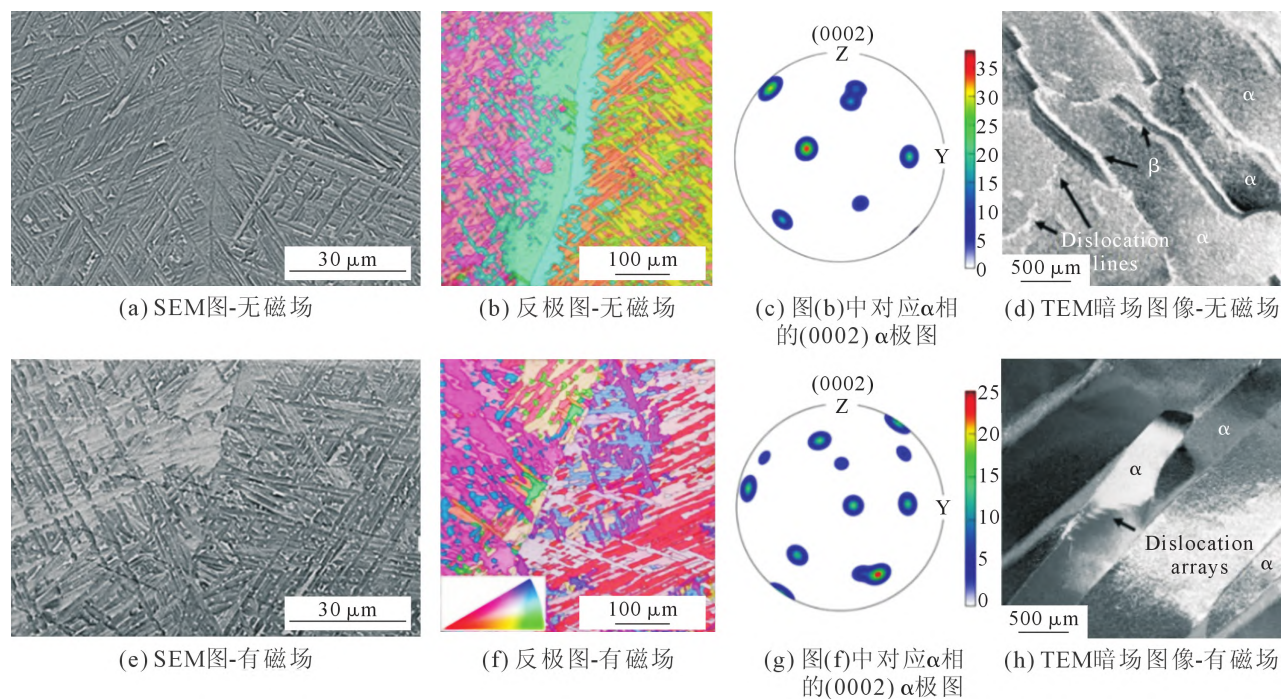
1.2 对微观凝固组织的影响

在金属增材制造过程中,使用激光束或电子束作为热源逐层将金属粉末熔化并形成熔池,熔池在金属基底或者上一层金属的强冷作用下快速凝固。凝固过程对最终凝固组织的形成具有重大作用,进而影响成品的最终性能。研究表明,静磁场可以实现增材制造合金凝固组织细化、柱状晶向等轴晶转变以及抑制晶体织构等现象。

静磁场可以促进增材制造合金的柱状晶向等轴晶转变 (Columnar to equiaxed transition, CET) 过程。笔者研究团队^[26]发现,即便是高冷速的激光重熔,由横向静磁场所引入的磁力矩和热电磁效应也可以显著改变熔池内的流场和传热模式。对于 0.55 T 磁场下 Inconel 718 合金的重熔过程而言,其凝固前沿微观尺度的哈特曼数为 4.539,这说明在枝晶前沿热电磁效应占据主导地位。在 TEMC 的作用下,相较于无磁场的样品,施加横向静磁场后的熔池内部平均枝晶间距从 6.25 μm 下降到 4.25 μm。然而在熔池尺度上,其哈特曼数高达 155.62,远高于 Lehmann 等^[28]所计算的 10。这说明磁阻尼效应在熔池尺度上更为显著,而对熔池内部熔体流动的控制会降低其冷却速度。如图 3 所示,在施加 0.55 T 磁场后,熔池内部从精细的胞状晶转变为倾斜的柱状树枝晶,这表明熔池内部的冷却速度在施加磁场后有所降低。笔者研究团队在 Inconel 713C 镍基高温合金的激光重熔研究^[29],也进一步证明了静磁场对于 CET 现象的促进作用。Du 等^[25]通过对比在无

磁场与 0.12 T 磁场下使用不同 SLM 工艺参数制造 AlSi10Mg 合金一文中,无磁场下熔池边界附近只形成了少量的等轴晶,添加磁场后,柱状晶转变为等轴晶的数量增多。

静磁场也可以有效改善增材制造合金的强织构特征。笔者研究团队针对静磁场下 Ti6Al4V 合金的 LMD 成形研究表明^[30],静磁场可以改变初生 β 晶粒取向,得到织构强度更低、尺寸更细小的初生 β 晶粒(图 4)。同时,由于 α 相和初生 β 相取向遵循典型的伯恩斯关系,β 织构的减弱也促进了 α 相织构强度的降低,增加了初生 β 晶界处不同取向的 α 形核数量,进一步减少影响性能的魏氏体组织,并且形成了不连续的晶界 α 相。法国 LERMPS 实验室 LIAO 教授团队^[31]在静磁场下进行激光选区熔化成形商业纯钛(CP-Ti)的过程中研究发现,样品观察到细小的针状马氏体 α-Ti 和板条状 α-Ti 的微观结构,磁场同时抑制了其显微织构。Wang 等^[32]利用外磁场对 LMD 成形 Inconel 718 高温合金的过程产生影响。当外磁场方向和热通量方向垂直时,晶核的取向将更严格地受到热通量和磁场的约束,导致高度定向的纹理。通过施加横向磁场,晶界偏向角从 32°显著减小到 19°。随着外加磁场强度从 0 增加到 1.8 T,最大 MUD 值从 3.01 增加到 5.25。当磁场强度增加时,XZ 垂直截面上的主要织构逐渐从 [010] 向 [110] 方向移动。此外,观察到更高的激光功率导致更大的糊状区尺寸和更少的成核率,这有利于磁场的取向效应,从而可以将织构可控化。

图3 不同条件下激光熔池的横截面微观结构及同一高度下俯视图^[26]Fig.3 The cross-sectional microstructure and the top view located at the same height of laser molten pool with and without magnetic field^[26]图4 无磁场和有磁场样品的显微表征^[30]Fig.4 Multi-scale microstructure characterizations of Ti64 sample without and with SMF^[30]

1.3 对性能的影响

如前文所述,外加磁场有助于消除增材制造冶金缺陷,调控显微组织。此外,大量研究人员针对外

加磁场下的增材制造合金力学性能(如硬度、强度和塑性等)开展了研究,以探究外加磁场的组织调控效应与改善力学性能的内在联系。

现有研究表明,静磁场作用下的增材制造技术可以有效改善室温拉伸力学性能。例如,笔者所在上海大学任鸣鸣教授团队^[30]在激光立体成型Ti6Al4V的过程中发现横向外加静磁场的施加显著地提高了水平方向上材料的塑性,从 $3.4\%\pm 0.7\%$ 提升至 $10.8\%\pm 2.8\%$,但使强度略微下降。如图5(a)所示,外加磁场的施加能够明显减少材料力学性能的各向异性,这主要归因于磁场的施加有利于细化 α 相尺寸和减弱 α 相择优取向。同时,通过比较增材制造Ti6Al4V合金的力学性能可知,基于外加磁场下的组织调控可以获得优异的综合力学性能如图5(b)所示。针对激光选区熔化AlSi10Mg,杜大帆等^[25]在打印平台下施加了纵向静磁场,发现磁场的施加既提高了材料的强度又提高了塑性,并将结果与铸造Al合金、激光选区熔化其他系列的Al合金以及锻造Al合金进行对比,发现磁场的施加使其性能与锻造Al合金相当,更好地应用于工业生产之中。其力学性能的改善主要归因于孔隙度的减少、一次枝晶间距的减少及CET转变引发的等轴晶占比提高等。除了AlSi10Mg外,宋长辉等^[33]也对316L材料进行了研究,发现磁场的施加既能提高强度又能提高塑性,并且将其归因于孔隙和熔合不良缺陷的减少、 $\langle 001 \rangle$ 组织的减弱和亚晶粒以及晶粒尺寸的减少。

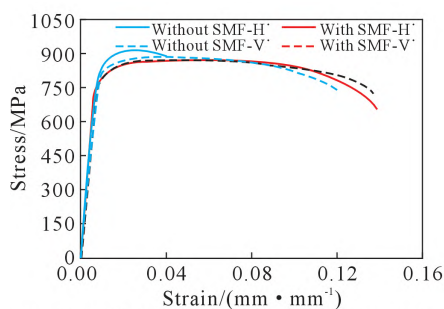
此外,静磁场可以有效改善增材制造合金的硬度及耐磨损性能。Filimonov等^[24]在0.2 T纵向静磁场下使用LMD成形Inconel 718。结果表明,纵向静

磁场对纵截面的显微硬度影响较小,但是使横截面的表面硬度降低了约5%,这归因于零件的孔隙率从底向上逐渐增加。同时发现在水平磁场作用下,其强度和塑性都得到了明显的增加。这主要归因于施加磁场之后,晶内区域中富Nb沉淀物的减少。法国LERMPS实验室的LIAO教授团队与笔者团队合作,采用纵向静磁场影响SLM成形Al-50Si过共晶铝合金的组织及性能,其中梯度磁场的磁场强度值沿SLM成形方向由0.175 T衰减至0.085 T,随着磁场强度的下降,Al-50Si合金的平均摩擦系数有所降低(图5(c)),其磨损率随之提高(图5(d)),但仍表现出相较于无磁场样品更优异的耐磨损性能^[34]。

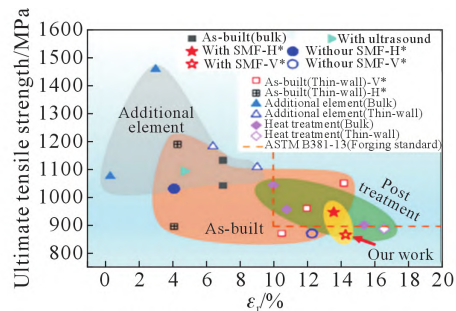
综上所述,对于不同凝固速度及温度梯度条件的SLM及LMD工艺,数十至数百毫特的静磁场均可以有效改善力学性能,尤其可以提高材料塑性、抑制并消除力学性能的各向异性特征。目前,研究人员均采用热处理、异质形核颗粒、元素成分优化等方法以实现上述增材制造力学性能的不足,尤其是塑性较差以及各向异性严重的问题。然而,增材制造过程中实时静磁场可以采用原位无接触的调控手段,通过磁场引发的热电磁力和热电磁流动作用带来的显微组织改变和冶金缺陷优化,最终实现上述力学性能的改善。

2 交变磁场下金属增材制造技术

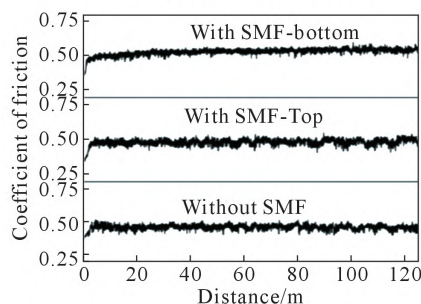
1933年,人们已经应用旋转磁场改善连铸合金



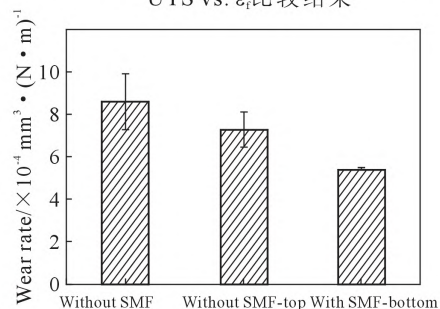
(a) 横向静磁场下LMD成形Ti6Al4V合金的室温拉伸应力应变曲线



(b) 横向静磁场下LMD成形Ti6Al4V合金的UTS vs. ϵ_t 比较结果



(c) 纵向静磁场下SLM成形Al-50Si合金的摩擦系数曲线



(d) 纵向静磁场下SLM成形Al-50Si合金的磨损率比较

图5 静磁场作用下激光增材制造合金的性能研究结果^[30,34]

Fig.5 Mechanical properties of LAM part under static magnetic field^[30,34]

的组织形貌,1970年后,电磁搅拌等交变磁场技术在国内得到了快速发展^[35]。朱明原^[36]对非树枝晶铝合金电磁搅拌开展了研究,发现磁场强度越大,电磁搅拌强度越高,金属的流动会强烈,温度梯度越小,这会促进合金产生细小的等轴晶。而国旭明等^[37]在管线钢埋弧焊过程中添加交变的纵向磁场,发现电磁搅拌产生了更多细小的夹杂物,细化了晶粒中的针状铁素体,抑制了不利组织的形成,显著提高了低温冲击韧性。而交变磁场对增材制造的影响作用,国内外研究人员已经有部分研究成果。

2.1 交变磁场辅助增材制造工艺

在金属熔体凝固过程中采用交变磁场技术,可以提高组织中等轴晶比例,降低偏析、缩孔等工艺缺陷,在激光焊接^[38]和激光熔覆^[39]等工艺中均得到了应用。而金属增材制造过程由于其复杂的热循环效应以及快速冷却特性,易在热输入方向上形成柱状晶。对于很多需要等轴晶的零件来说,引入交变磁场可以破碎枝晶,促进 CET 转变。目前已有的工作中,将交变磁场引入增材制造的研究主要利用成对永磁体的旋转,作用在磁极中间的工作台上形成电磁搅拌。采用的电磁体主要分为两种,一种是采用永磁体,旋转形成交变磁场,另一种则采用磁场电源控制

器在定子线圈通入三相对称电流,形成一个旋转磁场并在熔融金属内产生感应电流,通过载流电子的旋转形成电磁力,如图 6 所示^[40-41]。

2.2 对典型冶金缺陷的影响

袁志峰^[42]通过实验及计算的方式对有无交变磁场铝合金激光熔凝开展了研究,如图 7 所示,在无交变磁场的激光熔凝层的横纵截面的形貌图中,可以发现交变磁场对抑制气孔产生具有非常好的效果。在无交变磁场的样品中,小气孔均匀分布在熔池底部,而较大的气孔则分布于中上层。而在施加交变磁场后,熔池金属会受到一个向下的电磁力,而气孔受反向力便被向上排出;在施加中频交变磁场后,可以抑制熔覆层 80% 的孔隙。郑丽娟等^[43]也在激光熔覆过程中施加交变磁场,发现可以很好的排出气泡,对裂纹的萌生也有较好的抑制作用。

Lu 等^[44]在激光定向能量沉积不锈钢过程中施加旋转的磁场和电场,研究发现在电场和磁场的辅助下,可以抑制零件的表面拉应力。在表面处理后,试样表面的压缩应力高于正常条件下的试样,表明其内部残余应力较低,残余应力分布呈平衡状态。Liu^[45]采用 LMD 成形 Inconel 718 镍基高温合金研究表明,交变磁场在微熔池内部形成电磁搅拌效应

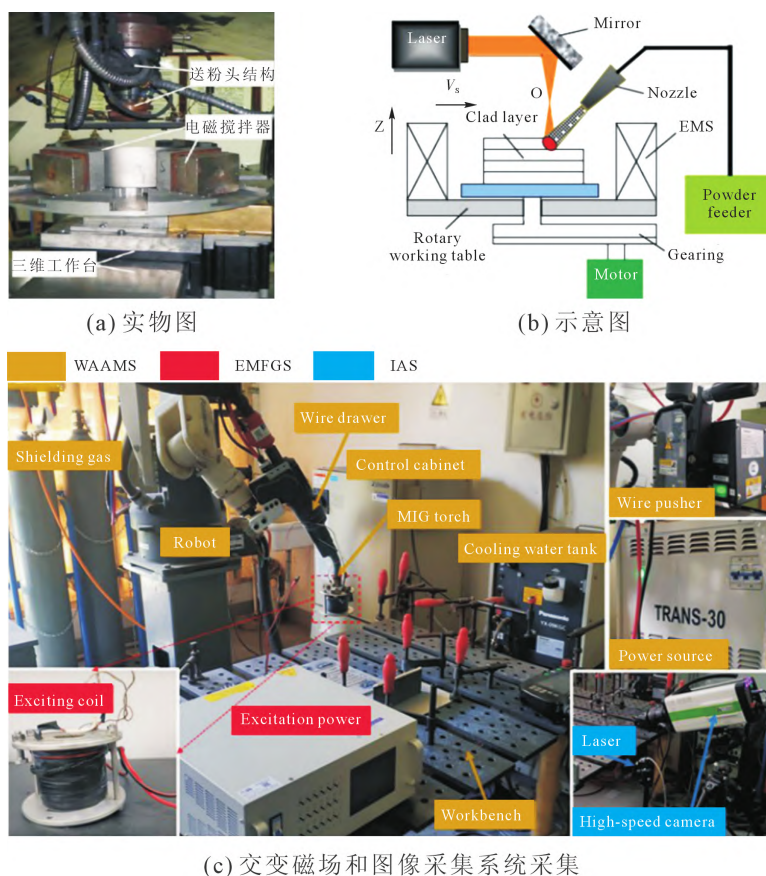
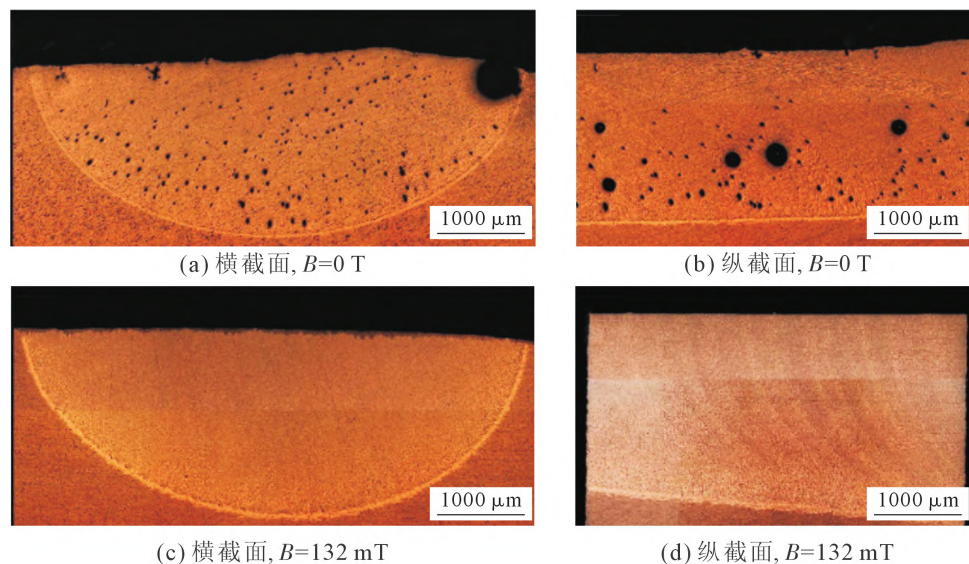


图 6 文献报道中相关电磁搅拌辅助激光立体成形的实物装置图^[40-41]
Fig.6 Electromagnetic stirring laser solid forming device^[40-41]

图7 铝合金激光熔凝层横截面与纵截面形貌^[42]Fig.7 Cross section and longitudinal section morphology of laser remelting layer of aluminum alloy^[42]

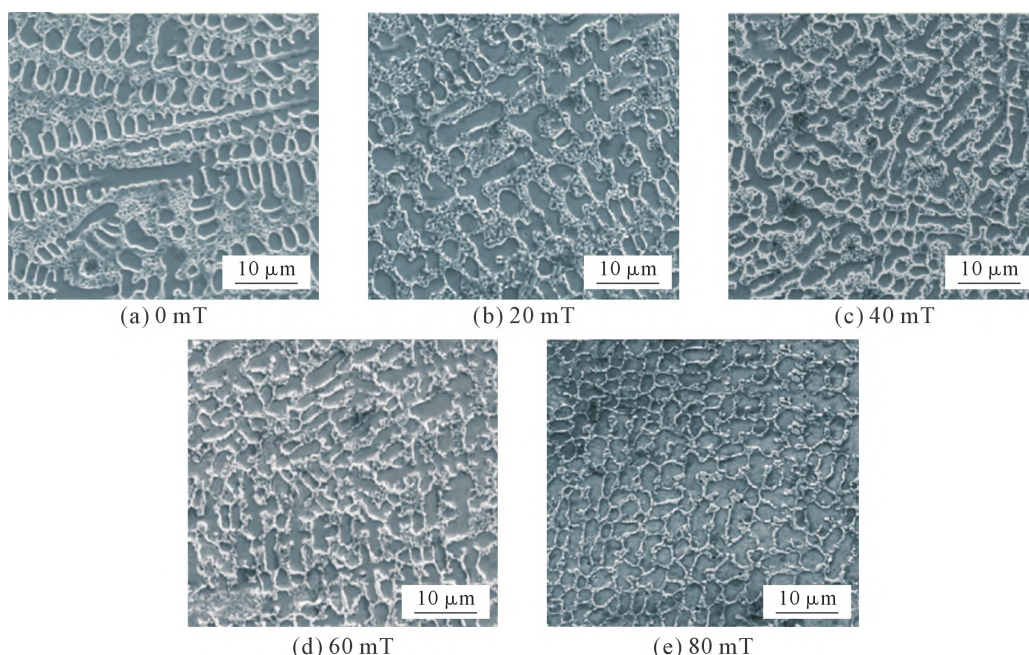
并影响温度场,进而获得更均匀的残余应力分布,有利于再结晶后晶粒的细化。

2.3 对微观凝固组织及性能的影响

众所周知,交变磁场被广泛应用于合金连铸过程以实现对于金属熔体的电磁搅拌,通过电磁力有效提升铸坯的等轴晶率,改善中心偏析。研究人员借助交变磁场技术,促进增材制造微熔池中剩余液相的流动,从而可以有效改善凝固组织的质量。

首先,交变磁场可以有效细化激光增材制造凝固组织。燕山大学的宗磊^[39]设计了中低频的交变磁场应用于Fe基合金激光熔覆,研究发现在交变磁场的搅拌作用下,其枝晶臂受到固相颗粒的冲击而断裂,并被均匀的搅拌到其它区域,扩大等轴晶的区

域。通过对比实验,发现随着磁场强度的增强,二次枝晶臂间距会随着缩小。交变磁场的施加并未对物相产生影响。此外,大连理工大学的于群等^[46]基于交变磁场辅助LMD成形Ni45合金研究表明,外加磁场的电磁搅拌作用增强了由表面张力梯度和浮力耦合产生的微熔池内部强制性环流,使得激光熔池凝固速率增大,最终可以获得逐渐细化的合金凝固组织(图8)。蔡川雄^[47]对有无交变磁场下激光熔覆Fe基涂层的组织变化开展了研究,研究发现添加磁场后,涂层组织由柱状晶转变为等轴晶,微观组织得到了细化。Zhang等^[48]将超声-电磁混合物理场引入Inconel 718合金的激光增材制造中,研究了超声-电磁混合物理场对微结构演化的影响,研究表明,施加

图8 不同磁场强度下激光成形铝合金试样的典型SEM形貌^[46]Fig.8 Typical SEM morphology of laser melting formed aluminum alloy samples under different magnetic field intensity^[46]

混杂超声-电磁混合物理场后,孔隙率显著降低,柱状枝晶沿沉积方向的外延生长趋势降低,柱状晶向等轴晶转变比较明显。南昌航天航空大学的 Liu^[45]采用交变磁场辅助 LMD 成形工艺制备 Inconel 718 高温合金工件。结果表明,最大磁场强度及其频率分别为 50 mT 和 50 Hz 的电磁搅拌工艺无法消除外延生长的柱状晶,但液态金属的强对流可以有效影响固液界面生长模式。电磁搅拌可以有效抑制合金元素在固液界面前缘的偏析,降低整体过冷度,从而有效细化枝晶间形成的 γ +Laves 共晶相。

此外,交变磁场也可以改善电弧增材制造凝固组织。Zhao 等^[41]在电弧增材制造焊枪处添加了一处励磁线圈以产生交变磁场,对 Al-5%Mg 合金的电弧增材制造开展了研究。研究发现,交变磁场所产生的电磁搅拌使底部及顶部的晶粒得到了细化,同时第二相 Al_3Mg_2 分布也更加均匀,其直径也缩小了 39%;而在施加交变磁场后,平均显微硬度更加相近,分布更加平均。Wang 等^[49]在电弧增材制造 Inconel 625 合金的过程中引入交变磁场以改变其微观结构。结果表明,交变磁场的搅拌作用可以细化枝晶,并且促进元素扩散进而抑制偏析。

基于组织调控效果,交变磁场可以有效改善增材制造构件的力学性能。如图 9(a)所示,于群等^[40]利用交变磁场辅助 LMD 成形 Ni45 合金的研究表明,交变磁场可以显著提升合金显微硬度,其中当磁场强度为 80 mT 时,显微硬度较未施加外磁场时增大了 15.7%。同时,随着磁场强度的增大,Ni45 合金的摩擦系数和磨痕宽度减小,体现出最优的减摩性和耐磨性。Zhou 等^[50]在基板下添加了交变磁场,对 AZ91D 镁合金进行激光熔覆,发现显微组织得到了细化,分布更为均匀,第二相也得到了细化,分布也更加均匀;施加交变磁场后,熔覆层获得了更加优异的耐磨性和耐腐蚀性。此外,基于电磁搅拌对于凝固枝晶组织及析出相的细化和均质化效果,Wang 等^[49]发现交

变磁场可以有效地提高了 Inconel 625 合金的力学性能和热稳定性(图 9(b))。Liu 等^[45]通过 LMD 成形 Inconel 718 镍基高温合金的研究表明,交变磁场可以显著提升样品综合力学性能,其中抗拉强度提高了 100 MPa,伸长率提高了 22%。合金的室温高周疲劳性能也从沉积态的 4.09×10^4 次循环提高到 8.21×10^4 次循环,热处理态的 5.45×10^4 次循环提高到 12.73×10^4 次循环。

3 磁场影响金属材料加工的基本机理

3.1 磁场影响熔体流动

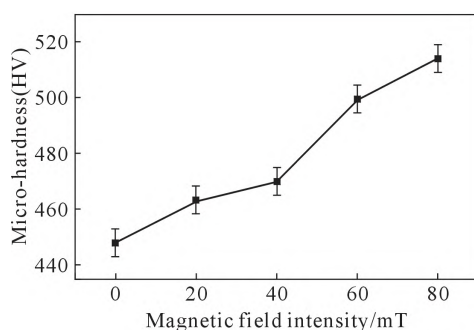
金属的凝固是一个较为复杂的过程,其中对流、传热和溶质分布等因素环环相扣且相互影响,并反映到最终凝固组织中。磁场作为一种无接触、无污染、高效且自动化程度高的外场已经被广泛应用于金属制备方向,利用磁场控制熔体流动是其最为显著的特点,进而影响到金属熔体的溶质分布和温度变化^[51]。基于定向凝固等传统铸造领域的研究表明,不同的磁感应强度会对熔体流动在不同尺度范围内产生抑制或促进流动不同影响。而现有研究表明,外加磁场也会对金属增材制造过程中的流动现象具有显著的尺寸效应。

3.1.1 磁场抑制熔体流动

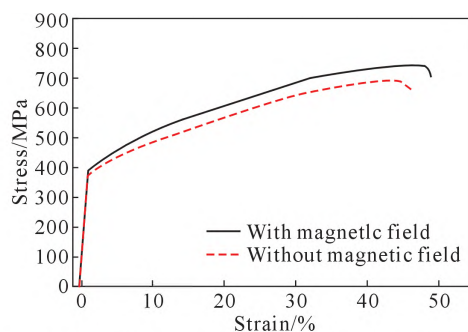
在凝固过程中,由于温度和溶质的梯度变化,熔体内不同区域的密度和表面张力存在差异,在重力或 Marangoni 效应的作用下熔体内将会产生对流。当施加磁场后,流动的熔体切割磁感线,感应生成 Lorentz 力(f),可用式(1)表示:

$$f = -\sigma \mu \nu B^2 \quad (1)$$

式中, σ 为熔体的电导率, S/m; μ 为磁导率, H/m; ν 为金属熔体的流速, m/s; B 为磁感应强度, T。在磁阻尼效应的作用下, Lorentz 力的方向与对流方向相反,且力的大小与磁感应强度的平方成正比。所以当磁感应强度足够大时, Lorentz 力会阻碍熔池内部的



(a) 不同交变磁场强度下激光熔化沉积制备 Ni45 镍基合金的硬度



(b) 20 mT 交变磁场以及无磁场作用下电弧增材制造成形 Inconel 625 镍基高温合金的室温拉伸应力应变曲线

图 9 交变磁场辅助增材制造样品的力学性能演化^[46,49]

Fig.9 Mechanical properties of AM parts under alternative magnetic field^[46,49]

流动,这被称为磁制动效应。早在上世纪六十年代,Utech 等^[52]发现 0.13 T 的磁场即可抑制熔体内的对流,消除溶质带。孙茂等^[53]研究表明当磁场强度大于 0.1 T 时就可以对硅单晶熔体的运动起明显的抑制作用。

在增材制造过程中,外加静磁场也可对微熔池金属熔体流动产生抑制作用。上海交通大学的杜大帆等^[25]在 SLM 成形 AlSi10Mg 的研究中发现,施加外置磁场后,熔池中的 Marangoni 对流切割磁感线,形成抑制对流的 Lorentz 力。图 10 所示为了不同长度尺度下(即熔池深度),磁场对流速的影响。可见随着磁场强度的增加,Lorentz 力导致流速急剧下降。所以在无磁场的情况下,快速的 Marangoni 对流导致气泡的形成,这些气泡最终会被困在涡流中(图 10(b))。而通过静磁场提供的阻尼效应,快速且不稳定的 Marangoni 对流将受到抑制,被困在涡流中的气泡将被驱赶到熔体表面并释放到环境中。

由于静磁场发生装置及 SLM 设备可用空间的限制,目前应用于 SLM 工艺的静磁场强度主要局限于 0.1 T 的量级。上海大学笔者团队基于数值模拟表明^[27],0.1 T 量级的纵向静磁场无法影响 SLM 成形 Inconel 625 镍基高温合金的熔池内部流动及传热过程。因此,实验研究中发现,该条件下的静磁场对于 SLM 微熔池尺寸并无变化。为了实现静磁场对于增材制造微熔池内部剧烈流动的磁阻尼效应,需要进一步设计适用于 SLM 设备的强磁场装置。

3.1.2 磁场促进熔体流动

相较于静磁场,时变磁场和脉冲磁场可以利用 Lorentz 力起到促进熔体流动的作用。这种宏观上的流动可以促进溶质均匀分布,减少缩孔缩松的产生。例如,在凝固的过程中施加交流电,线圈会在熔体中产生旋转电磁场,同时该场会在金属熔体中引起感

应涡流,熔体在感应涡流和旋转磁场的相互作用下产生轴向 Lorentz 力(f_0)和径向 Lorentz 力(f_z),该力可用式(2)和式(3)表示^[54]:

$$f_0 = J \times B_0 = \frac{1}{\mu} (\nabla \times B_0) \times B_0 \quad (2)$$

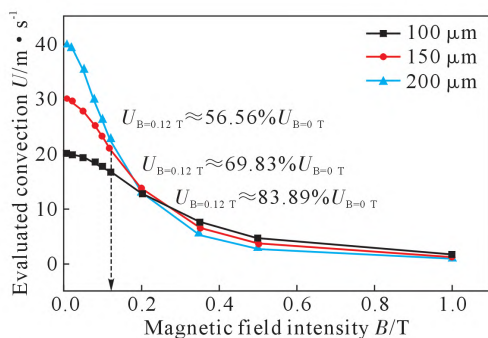
$$f_z = J \times B_z = \frac{1}{\mu} (\nabla \times B_z) \times B_z \quad (3)$$

式中, J 为感应涡流, A/μ 为磁导率, H/m ; B 为磁感应强度, T ; ∇ 为哈密顿算子。在 f_0 和 f_z 的共同作用下熔体会发生复杂的水平二维运动,促进熔体对流。脉冲电磁场中的脉冲涡流与磁场相互作用产生的 Lorentz 力是一个体积力,该力可由式(4)所示^[55]:

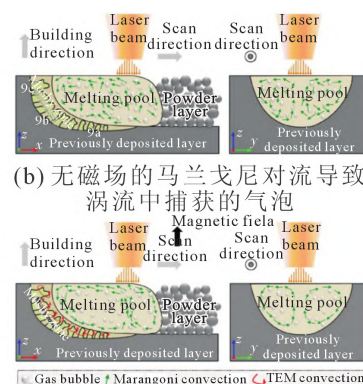
$$f = J \times B = \frac{1}{\mu} \left[(\nabla \times B) \times B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \right] \quad (4)$$

脉冲涡流产生的 Lorentz 力会使得金属熔体内产生强烈的振荡,从而引起对流。它使熔体内部的枝晶在振荡和对流的作用下被折断,具有细化晶粒的作用。

随着对磁场研究的深入,有学者发现在静磁场下枝晶会发生一定的变形,这很难用磁阻尼效应解释。Moreau 等^[56]发现在 Bi-Sn(60%Bi)合金中,相较于无磁场的样品,施加了 0.55 T 轴向磁场的样品具有更加粗大的枝晶,大“雀斑”的存在表明在糊状区存在明显的流动。Lehmann 等^[28]认为这与磁阻尼效应关系不大。因为磁场的制动效率取决于哈特曼数,它是流动尺寸(H)的大小与 MHD 效应产生的摩擦边界层($\frac{1}{B} \sqrt{\frac{\rho \nu}{\sigma}}$)大小的比值。这里 B 为磁场强度, T ; ν 是动力粘度, $Pa \cdot s$; ρ 是密度, kg/m^3 ; σ 是电导率, S/m 。摩擦边界层必须明显小于流量的典型尺寸,才能实现显著制动。然而枝晶间距的尺度过于细小,只有当哈特曼数的值超过 10 时,制动效应在枝晶周围才是可以实现的。在哈特曼数小于 10 的情况



(a) 不同磁场强度及不同典型长度尺度对熔池流速的影响



(c) 通过施加静磁场抑制熔池中的 Marangoni 对流并在糊状区引起 TEM 效应

图 10 静磁场下 SLM 成形 AlSi10Mg 研究^[25]

Fig.10 SLM fabrication of AlSi10Mg alloy under static magnetic field^[25]

下,热电磁效应占据主导地位,说明在低磁场强度下,这种流动是由磁场和热电磁效应之间的相互作用引起的。热电磁效应与 Seebeck 效应有关,Seebeck 效应是指当固液两相界面存在一定的温度差,并且两相的 Seebeck 系数也存在差值时,就会产生一个热电势,如图 11(c)所示^[57]。在高温梯度下枝晶和枝晶周围的熔体成分不同,产生 Seebeck 效应。同时,枝晶的底部和顶部都与金属液接触,这就形成了一个闭合回路,即在固液界面产生热电流 J_{TE} ,如图 11(a~b)所示。该电流在固相和液相之间具有连续性,热电流与磁场相互作用生成 TEMF,在该力的作用下枝晶周围会产生 TEMC。需要注意的是,施加不同方向的磁场对于熔体流动的作用是不同的。如图 11(a~b)所示,如果磁场平行于生长方向,则 TEMC 会在枝晶主臂的尖端周围引起旋转流动。如果磁场垂直于生长方向,则内部电流和外部磁场之间的相互作用会在糊状物内引起均匀流动^[58]。

笔者研究团队基于多尺度数值模拟研究表明^[27],静磁场作用下的磁阻尼效应对于 SLM 熔池的尺寸、流场和温度场均未发生明显的变化。如图 12 所示,

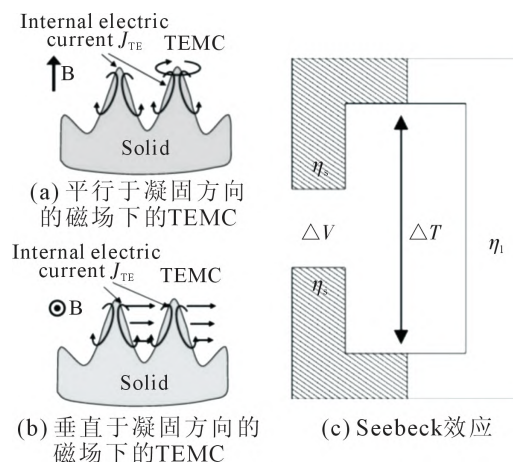


图 11 平行于凝固方向的磁场下的 TEMC,垂直于凝固方向的磁场下的 TEMC,Seebeck 效应^[57-58]

Fig.11 TEMC under a magnetic field parallel to the solidified direction; TEMC under a magnetic field perpendicular to the solidified direction; Seebeck effects^[57-58]

在微观尺度,外加磁场会在 SLM 微熔池固液两相区内枝晶周围会产生热电磁力。由熔池模拟的结果可知,该热电磁力与温度梯度成正比。由于 SLM 的温度梯度高达 $10^7 \sim 10^8$ K/m,即使外加磁场强度只有 0.1 T,亦可以获得高达 $10^7 \sim 10^8$ N/m³ 的热电磁力,进

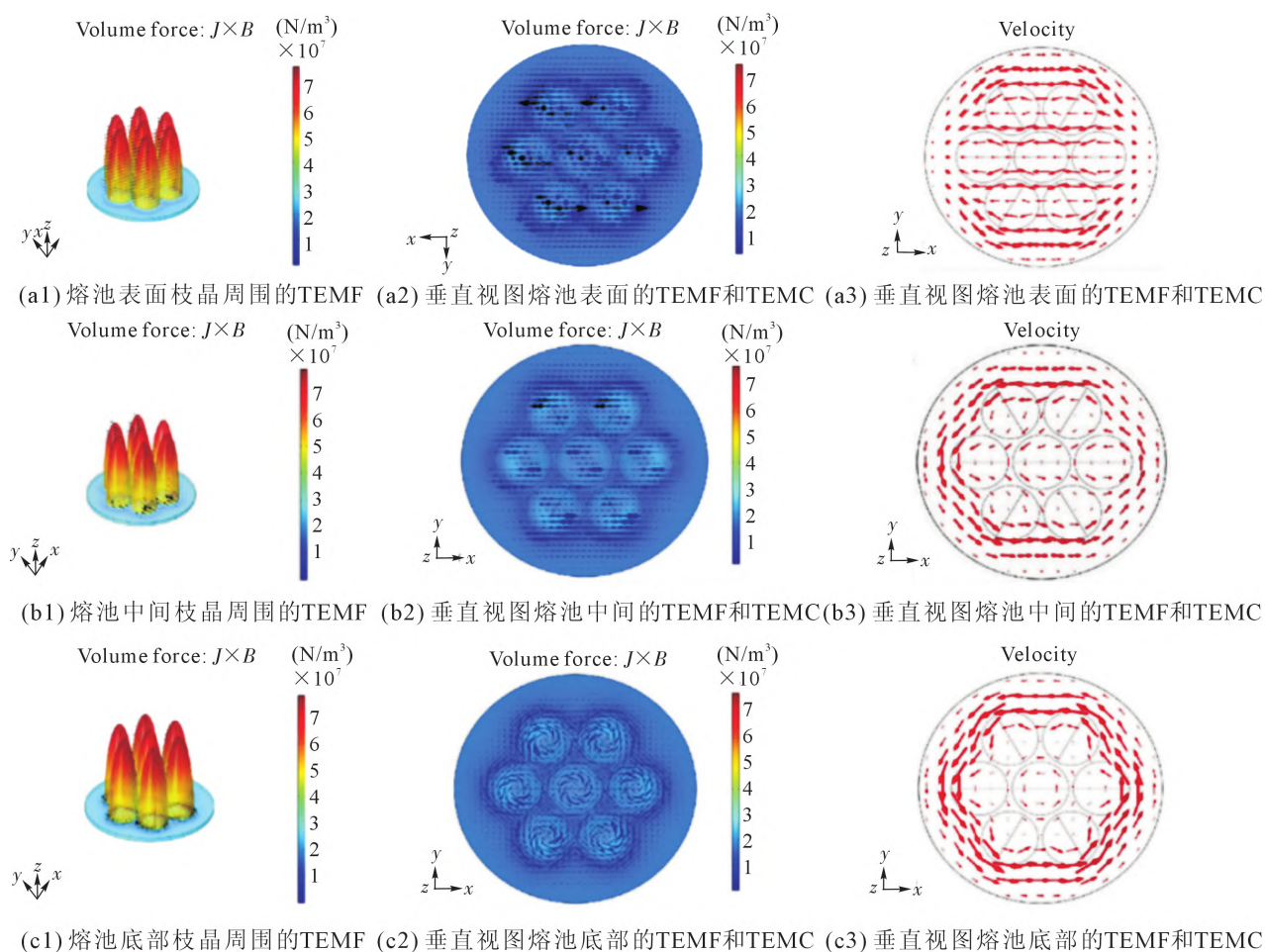


图 12 熔池中 3 个不同位置的 TEMF 和 TEMC^[27]

Fig.12 TEMF and TEMC at three different positions in the molten pool^[27]

而影响枝晶周围熔体流动并导致柱状晶向等轴晶转变。

3.2 磁场影响凝固组织

磁场对熔体流动的影响会直观地反映在最终凝固组织中,宏观上的磁制动效应、电磁搅拌和微观上的热电磁效应影响着溶质分布和枝晶的形貌以及间距。TEMF 可以将溶质输送到坩埚的周围,富集的溶质元素一方面阻碍一次枝晶的生长,另一方面促进枝晶的重熔脱落,形成枝晶碎片^[59]。同时,由磁场引起的体积力作用在枝晶上,导致枝晶碎裂。当糊状区的枝晶碎片足够多时,将会发生 CET 转变。值得注意的是,枝晶碎片在 TEMF 和重力的复合作用下会被移动到其他位置,呈现抛物线型移动的结果,导致大量的等轴晶粒聚集在样品的一侧,同时也降低了这一侧的晶粒尺寸^[60]。

TEMF 还会影响糊状区的微观结构。Li 等^[58]发现相比于无磁场状态,中等轴向磁场($B \leq 0.5$ T)下,枝晶间距减小,且形成环状凝固结构。这归因于磁场与径向温度梯度相互作用引起的 TEMF。径向的温度梯度导致径向 TE(thermoelectric)电流的产生,并在磁场下形成垂直于径向和轴向的 TEMF。TEMF 促使晶体之间的熔体沿方位角方向流动形成环形通道流。这种通道流动一方面促使晶体沿径向方向合并,另一方面沿方位角方向增加细胞边界之间的熔体,因此形成环状结构。至于枝晶间距(λ),Lehmann 等^[61]认为它与熔体对流存在如下关系:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 + \frac{\nu}{V}}} \quad (5)$$

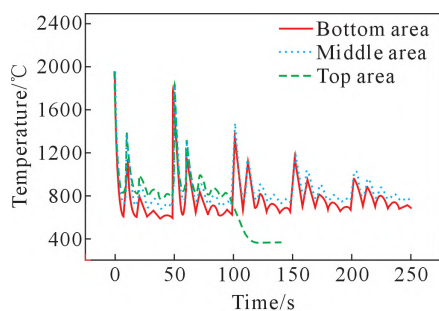
式中, λ_0 为无对流时的初生枝晶间距, μm ; ν 是对流速度, m/s ; V 是生长速度, $\mu\text{m/s}$ 。所以磁场下枝晶间距的降低也是因为 TEMF。Li 等^[62]发现 Al_3Ni 晶体在施加磁场后,其易磁化轴($\langle 001 \rangle$ 晶体方向)绕着优先生长方向($\langle 010 \rangle$ 晶体方向)旋转到磁场方向。这主要是因为具有磁各向异性的晶体以不同的晶轴平行

于磁场方向时所受的磁化能不同,在磁场的影响下,磁化轴的差值导致晶体发生偏转,直至晶体达到最小系统能量位置。王晖等^[63]发现在无磁场下, MnBi 相均匀排列且无明显取向,而在施加 1T 磁场后,铁磁性的 MnBi 相在磁力矩的作用下呈现短棒状且平行于磁场方向排列。

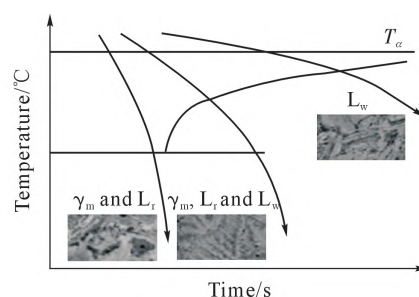
3.3 磁场影响固态相变

基于高能束的金属增材制造技术在本质上是“快速熔化-快速凝固”逐层循环堆叠的过程^[64-65]。在高能束能量输入作用下,每个沉积层都会在后续熔化层高温金属熔池作用下经受多周期的快速加热和快速冷却过程。尤其针对 LMD 等技术而言,成形构件内部不同高度、不同区域内部产生截然不同的热输入和热积累效应,从而产生不同的温度梯度及冷却速度曲线,并决定最终凝固组织及相组成。此外,增材制造过程中的典型原位热循环机制会在前序沉积层形成持续时间短、循环次数多的连续固态相变作用。如图 13 所示,LMD 成形 Ti4722 牌号 γ -TiAl 合金块状试样的不同部位,在不同热历史曲线作用下会形成不同的凝固组织^[66]。除了微熔池的快速凝固机制,金属增材制造过程原位热循环的固态相变行为将会直接决定其最终组织形貌及相组成。由此可知,外加磁场不仅仅会影响增材制造过程的微熔池流动、传热及凝固过程,更会对原位热循环作用下的固态相变机制产生不可忽略的影响。然而,目前尚无研究人员对此类问题开展深入研究。

笔者研究团队通过自然科学基金重大项目,开展了磁场下材料固态相变的初步研究,可以为磁场下增材制造过程原位热循环下的固态相变行为提供一些启示。众所周知,固态相变分为扩散相变和非扩散相变,铁素体和奥氏体之间的转变是典型的扩散相变,相的形核和长大都需要原子扩散,原子被激活后克服能量势垒重新排列成新相。而马氏体相变则为典型的非扩散相变,相变过程不需要原子的扩散,



(a) 块体样品不同区域的数值模拟热历史曲线

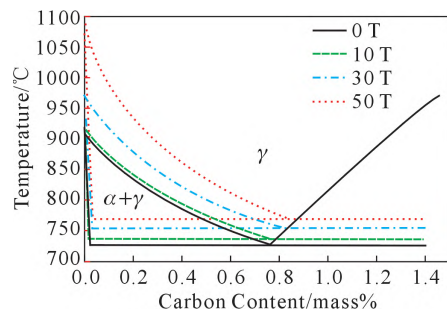


(b) 热历史对于凝固组织的影响

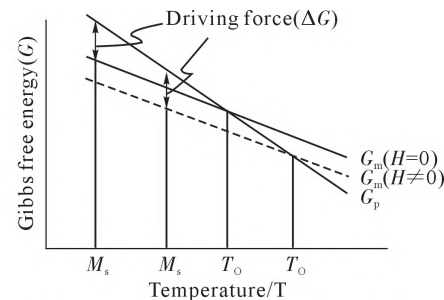
图 13 LMD 成形 Ti4722 和 γ -TiAl 牌号合金块体样品不同区域的数值模拟热史曲线及对凝固组织的影响^[66]
Fig.13 For bulk sample of LMD forming Ti4722 and γ -TiAl alloys, numerical simulated thermal history curve of different regions and its effect on solidification structure^[66]

并且新旧两相之间的化学成分也不发生变化。磁场可以通过影响相变动力学和相变热力学来控制相变过程。从动力学的角度上,磁场可以通过影响位错和晶界来影响相变过程。从热力学角度,在无磁场的情况下,当温度为 T_0 时两相的吉布斯自由能相等,两相此时达到平衡。但是在居里温度以下同为顺磁性的两相,铁素体的磁化率高于奥氏体,施加磁场后使

得铁素体更加稳定,这导致两相平衡温度随着磁场强度的增加而升高,如图14(a)所示^[67]。同时,临界温度 A_{c1} 、 A_{c3} ,共析温度和共析点的碳含量都随之增加。马氏体相变与此有些许不同,由于马氏体为铁磁性,在施加强磁场后其自由能显著降低,如图14(b)所示^[68]。因此两相自由能相等的平衡温度 T_0 升高,同样地马氏体初始转变温度 M_s 也因此升高。



(a) 磁场对基于分子场理论计算的Fe-C二元相图的影响



(b) 有、无磁场的情况下自由能随温度变化的示意图

图14 磁场对基于分子场理论计算的Fe-C二元相图的影响,有、无磁场的情况下自由能随温度变化的示意图^[67-68]
Fig.14 Effect of magnetic field on the calculated Fe-C binary phase diagram based on the molecular field theory; Schematic illustration of free energy as a function of temperature with and without magnetic field^[67-68]

4 结论与展望

增材制造技术具有典型的快速熔化、快速凝固及复杂热循环过程,基于传统工艺参数的优化手段难以有效消除内部冶金缺陷,控制其最终凝固组织。初步研究表明,磁场下增材制造技术可以显著影响微熔池内部流动及传热过程,并改善冶金缺陷及凝固组织。然而,以激光为代表的高能束增材制造技术具有突出的非平衡快速凝固及复杂热循环机制,基于传统平衡凝固过程获得的磁场作用机制及理论无法直接适用于增材制造技术。因此,静磁场及交变磁场等外场手段对于增材制造尚属有待研究的领域,其影响机制和作用效果并未完全了解,开展磁场控制增材制造的研究具有重要应用意义和理论价值。

由于增材制造具有典型的非平衡快速凝固特征及复杂热循环过程,基于传统研究结果的磁场控制流动、传热、凝固及固态相变等单一理论无法完整解释相关实验现象。此外,亟需开发适用于增材制造设备的磁场发生装置,实现该项技术从实验室研究向工业化应用的发展。磁场辅助增材制造技术仍处于初步探索阶段,还需开展大量工作深入理解其内在作用机理,进一步研究揭示磁场对于增材制造快速熔化、快速凝固及复杂热循环的影响机制,发展冶金缺陷的优化手段,建立综合性能的提升机制,进一步推动磁场手段在增材制造领域的应用和推广。

参考文献:

- [1] 王新艳,沈芳. 3D 打印技术综述[J]. 江西化工,2019(3): 242-243.
- [2] 卢秉恒,李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化,2013,42(4): 1-4.
- [3] 彭徽,陶申,陈博,等. 电子束选区熔化(SEBM)增材制造高温合金研究进展[J]. 中国材料进展,2022,41(4): 252-267.
- [4] 石珂,朱珍文,张刚,等. 金属电弧增材成形控制关键技术及研究现状[J]. 材料导报,2022,36(12): 131-138.
- [5] 任虔弘,陈超越,卢战军,等. 激光选区熔化制备镍钛合金的研究进展[J]. 材料研究与应用,2021,15(3): 276-286.
- [6] 贾晓慧,胡亚宝,宋欣灵,等. 激光熔化沉积 WC 复合 Inconel718 合金微观组织及磨损性能[J]. 表面技术. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.TG.20220615.1444.010.html>
- [7] 周安亮,王德成,屈贤明. 基于历史发展的等材制造智能化趋势研究[J]. 机电产品开发与创新,2018,31(2): 10-12.
- [8] PRASAD S V, ASTHANA R. Aluminum metal-matrix composites for automotive applications: tribological considerations[J]. Tribology Letters, 2004, 17: 445-453.
- [9] SANTHOSH KUMAR S, SESHU BAI V, RAJKUMAR K V, et al. Elastic modulus of Al-Si/SiC metal matrix composites as a function of volume fraction[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42: 175504.
- [10] SANTHOSH KUMAR S, SESHU BAI S, RAJASEKHARAN T. Aluminum matrix composites by pressureless infiltration: the metallurgical and physical properties[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41: 105403.
- [11] CHEN B, MOON S K, YAO X, et al. Strength and strain hardening of a selective laser melted AlSi10Mg alloy[J]. Scripta Materialia, 2017, 141: 45-49.
- [12] THIJS L, KEMPEN K, KRUTH J P, et al. Fine-structured alumini-

- um products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61 (5): 1809-1819.
- [13] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A. Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2627-2636.
- [14] KING W, ANDERSON A T, FERENCZ R M, et al. Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory[J]. *Materials Science and Technology*, 2014, 31(8): 957-968.
- [15] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A T, RUBENCHIK A, et al. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones[J]. *Acta Materialia*, 2016, 108: 36-45.
- [16] LI Y, WANG J, XIA K, et al. Research on droplets growth of Marangoni condensation during the time-series process [C]//*Journal of Physics: Conference Series*. Bristol: IOP Publishing, 2017, 925: 1-5.
- [17] KAYA H, JÉRÔME B, COLINET P. Marangoni effect from density variations in apolar ultrathin films[J]. *Europhysics Letters*, 2006, 74(5): 861-867.
- [18] SOVA A, GRIGORIEV S, OKUNKOVA A, et al. Cold spray deposition of 316L stainless steel coatings on aluminium surface with following laser post-treatment[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 235: 283-289.
- [19] GATZEN M, TANG Z, VOLLERTSEN F, et al. X-ray investigation of melt flow behavior under magnetic stirring regime in laser beam welding of aluminum[J]. *Journal of Laser Applications*, 2011, 23: 032002.
- [20] GATZEN M, TANG Z, VOLLERTSEN F. Effect of electromagnetic stirring on the element distribution in laser beam welding of aluminium with filler wire[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 56-65.
- [21] YAO Q, LUO Z, LI Y, et al. Effect of electromagnetic stirring on the microstructures and mechanical properties of magnesium alloy resistance spot weld [J]. *Materials & Design*, 2014, 63: 200-207.
- [22] LIU W, CHEN C Y, SHUAI S S, et al. Study of pore defect and mechanical properties in selective laser melted Ti6Al4V alloy based on X-ray computed tomography [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 797: 139981.
- [23] YAN X C, YIN S, CHEN C Y, et al. Effect of heat treatment on the phase transformation and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by selective laser melting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 764: 1056-1071.
- [24] FILIMONOV A M, ROGOZIN O A, DUBININ O N, et al. Modification of mechanical properties in directed energy deposition by a static magnetic field: Experimental and theoretical analysis[J]. *Materials*, 2021, 14(18): 5190.
- [25] DU D F, HALEY J C, DONG A P, et al. Influence of static magnetic field on microstructure and mechanical behavior of selective laser melted AlSi10Mg alloy [J]. *Materials & Design*, 2019, 181: 107923.
- [26] NIE J W, CHEN C Y, SHUAI S S, et al. Effect of static magnetic field on the evolution of residual stress and microstructure of laser remelted Inconel 718 superalloy [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, 29(6): 1410-1423.
- [27] ZHU W L, YU S, CHEN C Y, et al. Effects of static magnetic field on the microstructure of selective laser melted inconel 625 superalloy: numerical and experiment investigations[J]. *Metals*, 2021, 11 (11): 1846.
- [28] 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: 4067-4079.
- [29] LIU X Q, YU J B, SHUAI S S, et al. Cell-to-dendrite transition induced by a static transverse magnetic field during laser remelting of the nickel-based superalloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2018, 49: 3211-3219.
- [30] ZHAO R X, CHEN C Y, SHUAI S S, et al. Enhanced mechanical properties of Ti6Al4V alloy fabricated by laser additive manufacturing under static magnetic field [J]. *Materials Research Letters*, 2022, 10(8): 530-538.
- [31] KANG N, YUAN H, CODDET P, et al. On the texture, phase and tensile properties of commercially pure Ti produced via selective laser melting assisted by static magnetic field [J]. *Materials Science and Engineering C-Materials for Biological Applications*, 2017, 70: 405-407.
- [32] 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.
- [33] ZHOU H X, SONG C H, YANG Y Q, et al. The microstructure and properties evolution of SS316L fabricated by magnetic field-assisted laser powder bed fusion [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 845: 143216.
- [34] KANG N, CODDET P, WANG J, et al. A novel approach to in-situ produce functionally graded silicon matrix composite materials by selective laser melting [J]. *Composite Structures*, 2017, 172: 251-258.
- [35] 班春燕. 电磁场作用下铝合金凝固理论基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2002.
- [36] 朱明原. 非树枝晶铝合金材料的研究[D]. 上海: 上海大学, 2000.
- [37] 国旭明, 钱百年. 电磁搅拌对管线钢埋弧焊熔敷金属低温韧性的影响[J]. *金属学报*, 2000, 36(2): 177-180.
- [38] 戎易, 程东海, 熊震宇, 等. 交变磁场辅助添加镍中间层镁 / 钢激光熔钎焊接头的组织性能研究 [J]. *中国激光*, 2021, 48(22): 44-53.
- [39] 宗磊. 交变磁场下铁基合金粉末激光熔层组织与性能研究[D]. 燕山: 燕山大学, 2016.
- [40] 余小斌. 电磁搅拌激光立体成形 GH4169 合金的组织 and 力学性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- [41] ZHAO W Y, WEI Y H, ZHANG X J, et al. Comparative investigation of wire arc additive manufacturing of Al-5%Mg alloy with and without external alternating magnetic field [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119 (3-4): 2571-2587.
- [42] 袁志峰. 基于交变磁场辅助的激光熔凝气孔调控装置设计及实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- [43] 郑丽娟, 付宇明, 宗磊, 等. 交变磁场对高硬熔覆层成型质量的影响[J]. *材料导报*, 2018, 32(6): 905-908.
- [44] LU Y, SUN G E, WANG Z D, et al. Effects of electromagnetic

- field on the laser direct metal deposition of austenitic stainless steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 119: 105586.
- [45] LIU F C, CHENG H M, YU X B, et al. Control of microstructure and mechanical properties of laser solid formed Inconel 718 superalloy by electromagnetic stirring[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 99: 342-350.
- [46] 于群,王存山. 电磁搅拌辅助 Ni45 合金的激光增材制造[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 148-159.
- [47] 蔡川雄. 交变磁场下激光熔覆 Fe 基涂层的宏观质量及其耐磨性[D]. 昆明:昆明理工大学, 2013.
- [48] ZHANG T, LI P F, ZHOU J Z, et al. Microstructure evolution of laser cladding Inconel 718 assisted hybrid ultrasonic-electromagnetic field[J]. *Materials Letters*, 2021, 289: 129401.
- [49] WANG Y F, CHEN X Z, SHEN Q K, et al. Effect of magnetic Field on the microstructure and mechanical properties of inconel 625 superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64: 10-19.
- [50] ZHOU J Z, XU J L, HUANG S, et al. Effect of laser surface melting with alternating magnetic field on wear and corrosion resistance of magnesium alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 309: 212-219.
- [51] 任忠鸣,雷作胜,李传军,等. 电磁冶金技术研究新进展[J]. *金属学报*, 2020, 56(4): 583-600.
- [52] UTECH H P, FLEMINGS M C. Elimination of solute banding in indium antimonide crystals by growth in a magnetic field[J]. *Journal of Applied Physics*, 1966, 37: 2021.
- [53] 孙茂友,万群. 水平磁场对熔体热对流的抑制作用[J]. *稀有金属*, 1992(4): 283-285.
- [54] 李子全,吴炳尧. 旋转磁场作用下 ZA-27 合金初生相形貌演变过程及机理[J]. *铸造*, 1997(10): 3-7, 46.
- [55] 訾炳涛,巴启先,崔建忠,等. 强脉冲电磁场对金属凝固组织影响的研究[J]. *物理学报*, 2000, 49(5): 1010-1014.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] WANG J, REN Z M, FAUTRELLE Y, et al. Modification of liquid/solid interface shape in directionally solidifying Al-Cu alloys by a transverse magnetic field[J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48: 213-219.
- [60] LI X, WANG J, DU D F, et al. Effect of a transverse magnetic field on the growth of equiaxed grains during directional solidification[J]. *Materials Letters*, 2015, 161: 595-600.
- [61] LEHMANN P, MOREAU R, CAMEL D, et al. A simple analysis of the effect of convection on the structure of the mushy zone in the case of horizontal Bridgman solidification. Comparison with experimental results[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1998, 183(4): 690-704.
- [62] LI H, FAUTRELLE Y, HOU L, et al. Effect of a weak transverse magnetic field on the morphology and orientation of directionally solidified Al-Ni alloys[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2016, 436: 68-75.
- [63] 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.
- [64] THOMPSON S M, BIAN L K, SHAMSAEI N, et al. An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 8: 36-62.
- [65] DEZAKI M L, SERJOUEI A, ZOLFAGHARIAN A, et al. A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition(DED) process[J]. *Advanced Powder Materials*, 2022, 1(4): 100054.
- [66] CAO T W, CHEN C Y, WANG W, et al. Evolution of microstructure and mechanical property of Ti-47Al-2Cr-2Nb intermetallic alloy by laser direct energy deposition: From a single-track, thin-wall to bulk[J]. *Materials Characterization*, 2022, 190: 112053.
- [67] CHOI J K, OHTSUKA H, XU Y, et al. Effects of a strong magnetic field on the phase stability of plain carbon steels[J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43(3): 221-226.
- [68] OHTSUKA H. Structural control of Fe-based alloys through diffusional solid/solid phase transformations in a high magnetic field[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2008, 9: 013004.