

静磁场辅助金属增材制造技术研究进展

杜大帆¹, 董安平¹, 祝国梁¹, 雷力明², 孙宝德¹

(1. 上海交通大学材料科学与工程学院 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海 200240)

(2. 中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司, 上海 201306)

摘要: 增材制造作为一种新型的材料加工技术, 具有制造周期短、材料利用率高和可制备结构复杂零件等优势, 可以为定制形状复杂的产品开辟新途径, 目前该技术在装备、材料、工艺、标准等方面都呈现迅猛发展之势, 尤其在航空航天等高端制造领域展示出了极大的应用前景。然而, 对增材制造金属材料的组织、缺陷演化机理尚不明确, 极大地制约了增材制造技术的大规模应用。外加物理能场作为外界辅助手段可以直接对金属材料制备过程的物理变化和化学反应过程产生影响, 因而被用来控制其变化或反应过程。在金属增材制造过程施加外部磁场, 可以影响其微熔池冶金过程、微观组织和力学性能。介绍了静磁场对金属凝固过程的影响的基本效应, 并着重介绍了静磁场对 3 种具有代表性的增材制造方法, 即: 激光定向能量沉积、粉末床激光熔融和电弧送丝增材制造方法的成形过程、组织和性能的影响机制, 从材料、方法和应用的角度综述了静磁场辅助下金属增材制造领域的研究进展。此外, 指出了静磁场辅助金属增材制造技术面对的挑战, 并讨论了未来发展趋势。

关键词: 金属材料; 增材制造; 静磁场; 组织; 力学性能

中图分类号: TG14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)04-0311-12

引用格式: 杜大帆, 董安平, 祝国梁, 等. 静磁场辅助金属增材制造技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2024, 43(4): 311-322.

DU D F, DONG A P, ZHU G L, *et al.* Progress in Research of the Assistance of Static Magnetic Field on Metal Additive Manufacturing [J]. Materials China, 2024, 43(4): 311-322.

Progress in Research of the Assistance of Static Magnetic Field on Metal Additive Manufacturing

DU Dafan¹, DONG Anping¹, ZHU Guoliang¹, LEI Liming², SUN Baode¹

(1. Shanghai Key Lab of Advanced High-Temperature Materials and Precision Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2. AECC Shanghai Commercial Aircraft Engine Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract: As a new type of material processing technology, additive manufacturing has many advantages, such as short manufacturing cycle, high material utilization rate and ability of processing complex structures, *etc.* This technology performs a rapid development trend in aspects of equipment, materials, processes, standards, *etc.*, especially in high-end manufacturing fields such as aerospace, showing great application prospects. However, the mechanism of microstructure forming and defect evolution during metallic additive manufacturing is still unclear, which greatly restricts the large-scale application of additive manufacturing technology. As an external auxiliary means, the external physical energy field can directly affect the physical change and chemical reaction process of the metal part preparation. The application of a static external magnetic field in the additive manufacturing process can affect the solidification process of the microscale melt pool, microstructure and mechanical properties. The basic effects of static magnetic field on the metallic solidification, the microstructure and mechanical properties during additive manufacturing were described. The research progress in the field of static magnetic field assisted additive manufacturing was reviewed from the perspective of materials, methods and applications. In addition, the challenges faced by static magnetic field assisted additive manufacturing were pointed out and the future development trend was discussed.

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

收稿日期: 2021-12-07 修回日期: 2022-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51901135, 51771118, 52071205, 51821001)

第一作者: 杜大帆, 男, 1987 年生, 助理教授

通讯作者: 董安平, 男, 1977 年生, 研究员, 博士生导师,

Email: apdong@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202111025

1 前言

有别于传统金属材料加工过程的减材制造,金属增材制造具有设计自由、材料利用率高和交货时间短等优势。经过多年的发展,增材制造可以为定制的、形状复杂的产品制备开辟新途径,并有潜力重新定义制造业。尽管金属增材制造有诸多优势,但仍存在着合金牌号选择有限、材料性能各向异性明显、组织缺陷难控制、生产效率低和粗糙度高等诸多问题。这些问题引起了研究人员的广泛关注和研究。磁场作为一种非接触物理能量场,可对金属材料制备过程的物理变化和化学反应过程产生影响,因而被用来控制其中的变化或反应过程。将磁场引入金属增材制造过程,研究磁场对微熔池内冶金过程的影响,一方面,可以利用磁场的磁-电-热-力耦合效应改善增材制造构件微观组织,提高材料成形质量;另一方面,有助于揭示和了解增材制造的微观成形机理,为改善增材制造构件的组织性能提供帮助。本文主要回顾近年来围绕静磁场辅助下金属增材制造过程的研究工作,相关研究一方面可以从金属熔化和快速凝固角度帮助科研人员更深入理解增材制造过程,为增材制造组织调控和缺陷控制提供理论支撑;另一方面,通过对外加磁场装备的设计和改装,可以进一步提高金属增材制造构件的综合性能,也为开发新型的增材制造装置提供新思路。

2 静磁场对金属凝固的基本影响

金属增材制造过程涉及两个主要相变过程,即金属粉末的熔化和液态熔池的凝固。其中熔池的凝固过程直接影响增材制造构件的微观组织和力学性能,对于增材制造过程至关重要。有关磁场对于金属凝固过程影响的研究起源于 20 世纪初, Garnier 等^[1]尝试利用磁场对液态金属进行搅拌以改善冶金组织,并由此提出磁场处理方式。到了 20 世纪 40 年代,形成了磁流体力学学科,这是建立在电磁场理论、流体力学和冶金学基础上的交叉学科^[2]。自 2000 年以来,由于超导技术的迅速发展,10 T 及以上的强磁场可以更容易获得,强磁场对金属凝固过程影响的研究迅速发展,不仅发现了凝固过程有价值的现象和规律,丰富和发展了金属凝固理论;更为调控材料组织和改善性能,以及为制备常规方法难以加工的材料提供了新方法^[3]。

静磁场对于金属凝固的效应可以大致分为以下几个方面:磁化能效应、磁化力效应、磁极间相互作用、热电磁效应、磁阻尼效应等。

2.1 磁化能效应

磁化能是由于物质在磁场中被磁化导致,物质的不

同状态具有磁性差异,因此磁场下物质在不同状态下自由能存在差异,进而导致稳定性的变化。对于金属凝固过程,初生相和液相之间存在一定的磁性差异,磁场必然会引起不同相自由能发生变化,进而改变体系的反应和相平衡。磁化能大小不仅取决于不同物质的磁性差异,也与磁场强度直接相关,因此,研究人员引入强磁场来考察磁场对相变过程的影响。将具有磁化率各向异性的晶体置于磁场中,磁化作用会导致晶体的不同晶向间产生磁化能差值,即磁各向异性能。Li 等^[4-6]研究了强磁场下 Al-Ni 合金凝固过程中初生相 Al_3Ni 的取向行为,研究表明,施加磁场后凝固组织中 Al_3Ni 相发生了偏转,其 $\langle 001 \rangle$ 晶向转向磁场方向。初生相的取向程度也随磁场强度和温度提高进一步提高。

具有磁各向异性的晶体在磁场中受到不同磁化能的作用,旋转至能量最低的位置,并最终形成稳定的取向。晶体在磁场中沿不同晶轴磁化的能量差值 ΔE 通过式(1)计算:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \mu_0 \Delta \chi H_{\text{ex}}^2 V \quad (1)$$

其中 μ_0 为真空磁导率, $\Delta \chi$ 为易磁化轴和难磁化轴的磁化率之差, H_{ex} 为磁场强度, V 为晶体体积。磁各向异性会导致晶体在磁场中受到磁力矩的作用而发生旋转,从而使系统的能量最低。研究者们利用晶体的这个性能来制备有取向的功能材料。对于磁化率小于零的抗磁性材料,晶体磁化率最大的方向旋转至垂直于磁场方向;对于磁化率大于零的铁磁性和顺磁性材料,晶体磁化率最大的方向将旋转至磁场方向。

自 1981 年 Mikelson 和 Karklin^[7]研究了不同体系合金的凝固过程以来,他们陆续发现了析出相排列与磁场方向具有一定关系的凝固现象。他们的研究表明,凝固时析出相晶体的磁晶各向异性导致了晶体发生取向,并提出了晶体在稳恒磁场中受到磁力矩作用受力、旋转和取向的理论。

但是他们并没有对磁晶各向异性和形貌各向异性进行严格区分,析出相晶体不仅受到磁晶各向异性的作用时发生旋转和取向,也会受到形貌各向异性的影响。因此当晶体的磁晶各向异性取向与形貌各向异性取向不同时,凝固后的初生相晶体取向可能是随机无序的。随后的研究者们则通过大量的实验探究了磁晶各向异性和形貌各向异性的区别,并先后在二元 Sm-Co、Bi-Mn、Bi-Zn、Al-Fe 和 Al-Ni 系合金^[8-10]中获得初生相晶体在磁场下取向的凝固组织,以及高温超导材料中取向性的组织结构^[11]。根据实验结果,研究者们进行了深入的理论分析,并总结出磁场中初生相晶体取向分布只能发生在晶体生长的初始阶段,且必须满足:晶体具有磁化率各向

异性、磁各向异性能大于热扰动能和有可供晶体自由转动的介质这3个基本条件。进一步的研究结果表明, 晶体和坩埚壁之间的机械作用、液相的粘性和液体中的流动等因素直接影响晶体的旋转和取向。

2.2 磁化力效应

磁化力即电磁作用力, 是人类迄今发现的4种作用力之一, 最简单例子是磁铁对铁器的吸引。电磁作用力的本质是物体之间的电荷作用, 通过带电粒子与电磁场相互作用产生的力场。磁化过程包含了将物质磁化和被磁化后物质与磁铁的磁场梯度相互作用而产生磁化力这两个步骤。人们将这一原理运用到铁磁材料处理的工业

过程, 如电磁选矿等^[12]。即使非磁性物质的磁导率较弱, 但由于磁化力的大小与磁场强度的平方成正比, 因此高强度磁场也会对材料产生显著的磁化力效应。

Wang等^[13, 14]研究了纵向梯度强磁场对 Mn-Sb 合金的半固态等温和熔融态淬火过程的影响(如图1所示), 发现所制备合金的 MnSb 枝晶梯度分布于组织内, 这是由于 Mn 团簇受到磁化力驱动进而引起 Mn 溶质富集, 并在随后的淬火过程中快速凝固导致。在对强磁场下 Al-Cu 合金定向凝固研究中, Li 等^[15]发现磁场可以将固/液界面前沿的溶质元素磁化, 导致溶质元素在界面前沿富集, 进而诱发了更大的成分过冷和界面失稳现象。

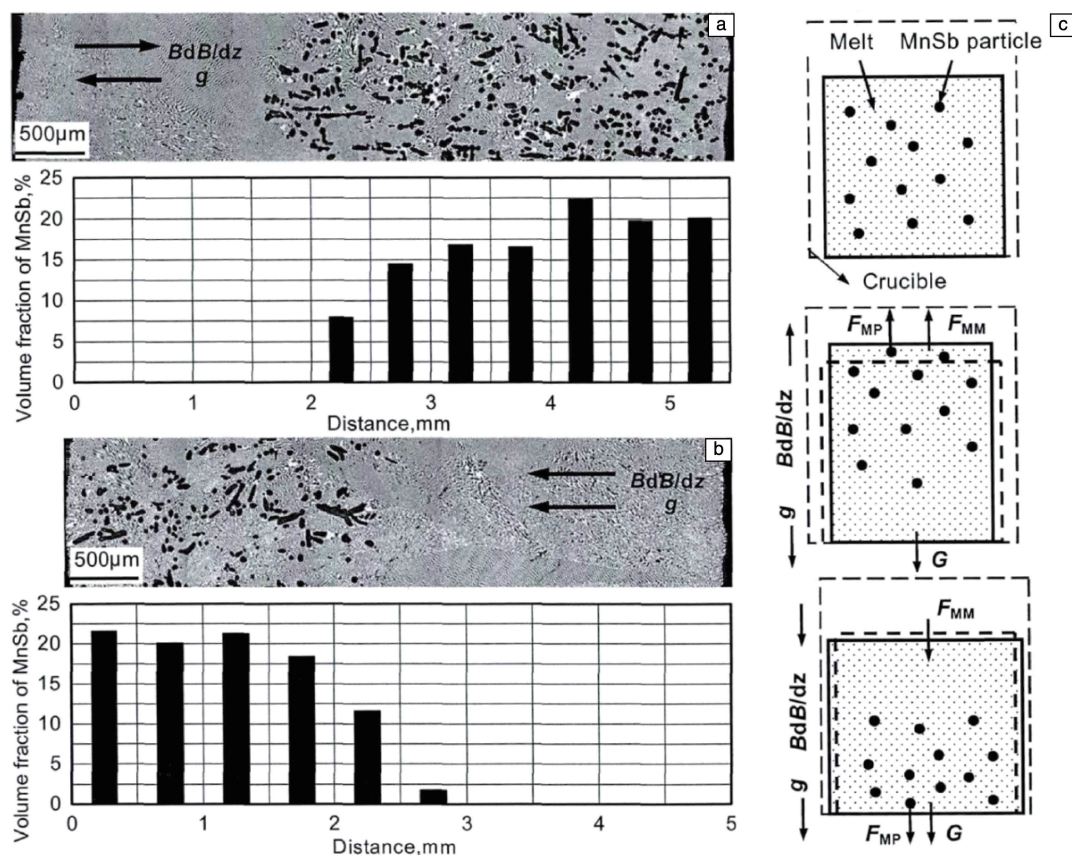


图1 Mn-89.7Sb合金在不同磁场梯度下($B = 11.5$ T)保温30 min后的微观组织及相应的初生MnSb颗粒在试样中自下而上的分布^[13]: (a) $BdB/dz = 282$ T²/m, (b) $BdB/dz = -282$ T²/m; (c) MnSb颗粒受磁化力和重力以及合金受拉和受压的示意图

Fig. 1 Microstructures and the corresponding distributions of the MnSb particles along the depth from the lower surface in Mn-89.7wt% Sb alloys solidified under magnetic field gradient of $BdB/dz = 282$ T²/m (a) and $BdB/dz = -282$ T²/m (b) with a holding time of 30 min; schematic illustrations of the magnetic force and gravity acting on the Mn-Sb particles, which stretches or compresses the alloy (c)^[13]

2.3 磁极间相互作用

很早以前, 人们就在磁性材料中发现了磁偶极现象, 比如, 一根小磁针就可以视为一个磁偶极子。随着超导技术的快速发展, 通过较强磁场可以使磁极间的相互作用在非磁性物质中体现。为了探究非磁性物质间的磁偶极作用, 并试图将相关效应运用到材料的制备过程中, 材料研究者们开展了大量的理论和实验探索。Shimotomai

等^[16]研究了强磁场对 Fe-0.1C 和 Fe-0.6C (质量分数, %) 钢的奥氏体向铁素体转变的影响, 认为顺磁性的奥氏体晶粒间产生了相互吸引的磁偶极作用, 促使铁素体基体中的链状或柱状奥氏体相沿磁场方向排列。此外, 王强等^[17]在研究强磁场下的过共晶成分 BiMn 合金凝固过程时发现了初生相沿磁场方向排列的凝固组织, 他们认为初生 MnBi 相在生长过程中通过磁偶极作用而在磁场方向

相互吸引,并在垂直磁场方向相互排斥是导致这种组织形成的主要原因。Zheng 等^[18]研究了 30 T 超高强磁场下 Bi-4.5Mn(质量分数,%)合金的凝固过程,发现在较低的冷却速度($R=5\text{ K/min}$)下,凝固组织中初生 MnBi 相聚集成层片状,且层片法向与磁场方向平行;相反地,在较高的冷却速度($R=60\text{ K/min}$)下,则获得与磁场方向平行的链状组织。这是由于磁极间相互作用和磁力矩作用相互协调所导致。

2.4 热电磁效应

热电磁效应是金属凝固过程中固液界面处存在的热电效应受到磁场作用形成的,当固液界面法线方向与温度梯度不完全平行时,在液固界面处产生热电流^[19],凝固过程中热电流在磁场下将受到洛伦兹力作用,称为热电磁力。固液界面处的热电磁力一方面施加在液相,导致熔体流动(称为热电磁流动),热电磁流动可以显著影响凝固过程的微观和宏观偏析、凝固组织和晶界形貌等微观组织;另一方面导致固相受力,进而导致平界面生长的界面失稳^[20],胞状向树枝晶转变^[21],以及枝晶断裂并诱导等轴晶组织^[22]。近年来,得益于同步辐射 X 射线衍射技术的发展,研究者原位实时观测了定向凝固过程热电磁效应对枝晶生长的影响,游离的枝晶在热电磁力的作用下向试样一侧定向运动,形成梯度组织^[23]。

2.5 磁阻尼效应

熔体中的磁阻尼效应起源于金属熔体流动切割磁感线感生出电流,磁场与感生电流交互作用产生与流动方向相反的力的作用,进而抑制熔体流动。Chandrasekhar^[24]和 Utech 等^[25]在 20 世纪中期已开始系统化理论分析了强磁场下流体的热对流抑制机理。随后,研究者们采用数值模拟和实验的方法对磁场下的熔体磁阻尼效应开展了一系列研究,并进一步研究了通过磁阻尼效应所引起的凝固过程中传热、传质等的变化改善凝固组织。磁场下抑制熔体对流的磁阻尼效应主要控制参数是磁场强度,但是 Oreper 和 Szekely^[26]通过数值模拟发现其抑制效果与体系的几何形状和尺度也密切相关。此外,研究者们还考察了立方容器内壁温度梯度和磁场分布方式对抑制对流的影响,研究表明,抑制效果在磁场与加热壁面垂直时效果最明显,两者方向平行时最弱^[27-29]。不同凝固方式下磁阻尼效应的研究表明,强磁场不仅抑制熔体对流,还会降低熔体热导率并最终引起熔体降温速率变缓;但在定向凝固过程,磁场对于熔体流动抑制的同时,却不影响熔体的热导率。另外,对于 Czochralski 法生长过程^[30-32],磁场可以有效抑制熔体在凝固过程受到的浮力对流和温度波动,并有助于消除溶质富集,提高溶质的均匀分布。

3 磁场辅助对金属增材制造过程的影响

外加物理场(磁场、超声场、电场等)可以有效地改变金属凝固过程中的形核、生长和粗化等行为,是调控金属凝固微观组织行之有效的方法。近年来研究者们开展了大量基于外加物理场对金属增材制造过程进行调控的研究^[33,34]。一方面这些研究有助于人们利用外加物理场改变增材制造过程微熔池凝固过程,进而对微观组织进行控制及获得理想的组织;另一方面,通过外加物理场的特殊作用有助于人们对增材制造过程的理解和掌握。静磁场作为一种无接触的物理能场,可以影响增材制造微熔池凝固过程,并有效改善微观组织,提高材料综合性能,为开发新型增材制造工艺提供新思路。

3.1 激光定向能量沉积

激光定向能量沉积(laser directed energy deposition, LDED)技术作为一种同轴送粉式金属增材制造技术,以其制造效率高、成形尺寸大等优势在航空、航天等领域具有广阔的应用前景。帅三三等^[35]研究了送粉式激光 3D 打印 Al-12%Si 合金(质量分数)时外加横向静磁场对组织的影响。结果表明,施加磁场对激光熔化单道薄壁试样的宏观凝固组织无明显影响,宏观组织以白亮带(α -Al 相为主)和灰暗区(Al-Si 共晶相为主)为基本单元叠加构成;微观组织分析表明,无磁场时灰暗区内的初生 α -Al 相呈柱状枝晶形态,施加了 0.35 T 横向稳恒磁场后,这些初生 α -Al 相全部转变为等轴枝晶形态,且枝晶臂发达。分析表明,0.35 T 静磁场下,作用于初生 α -Al 枝晶上的热电磁力可达 10^5 N/m^3 量级;哈特曼数(Hartman number, Ha)远大于 10,这表明激光熔化微小金属熔池中强烈的马兰戈尼(Marangoni)对流以及热溶质对流一定程度上被抑制。分析认为,稳恒磁场下凝固组织的灰暗区内 α -Al 相柱状枝晶向等轴枝晶的转变是固相中热电磁力(约 10^5 N/m^3)对枝晶的破碎作用导致,而等轴枝晶发达的枝晶臂则是横向稳恒磁场抑制熔体流动的结果。随后, Liu 等^[36]和 Nie 等^[37]分别研究了高温合金激光加工过程中磁场对熔池微观组织和残余应力的影响,研究结果表明,横向静磁场可以引起高温合金组织由柱状晶向等轴晶转变,且可以削弱由于热效应产生的应力。Wang 等^[38]也报道了外加稳恒磁场对 316 不锈钢同轴送粉成形构件组织和元素偏析的影响,研究结果显示,随着磁场强度增加,枝晶间微观偏析的组织从连续形态转变到非连续形态;此外,随着水平磁场强度的增加,奥氏体和铁素体中镍和铬元素含量发生显著变化。

Du 等^[39]研究了静态磁场对 LDED 打印 Inconel 718 合金显微组织和晶体织构的影响,研究者通过将两个

NbFeB 永磁体与 LDED 打印设备组装在一起, 提供水平方向的稳恒磁场。通过调节磁体之间的距离将磁场强度设置为 0.05 和 0.1 T (如图 2a)。实验结果表明, 在相同打印参数下, 磁场强度越大, 枝晶间距越大 (如图 2b)。此外, 在相同的激光功率下, 磁场的存在可以诱导柱状晶的外延生长 (图 2c 和 2d), 并产生较高比例的小角度晶界 ($\leq 15^\circ$)。在凝固过程中熔体对流的变化是导致显微组织和晶体结构变化的主要原因。一般来说, 磁场可以从两个方面影响熔体对流, 包括热电磁对流和磁阻尼效应。在没有磁场的情况下, 由于微熔池表面存在极高的

温度梯度, 会形成相对强的熔体对流 (即 Marangoni 对流), 继而导致熔池底部生长的一些枝晶臂断裂并卷入到熔体中。在熔池内, 断裂的枝晶臂形成新的形核点, 进而引发随机取向晶粒的形成。在引入磁场的情况下, 由于磁阻尼效应, Marangoni 对流被显著地抑制。他们在考虑磁阻尼效应的存在下, 评估了微熔池内流速与磁场强度的关系; 对微观组织的研究发现, 合金中 $\langle 110 \rangle$ 方向组织与打印方向平行, 且随着磁场强度的增大组织强度增大; 组织中小角晶界的含量随着磁场强度的增大也逐渐增大。

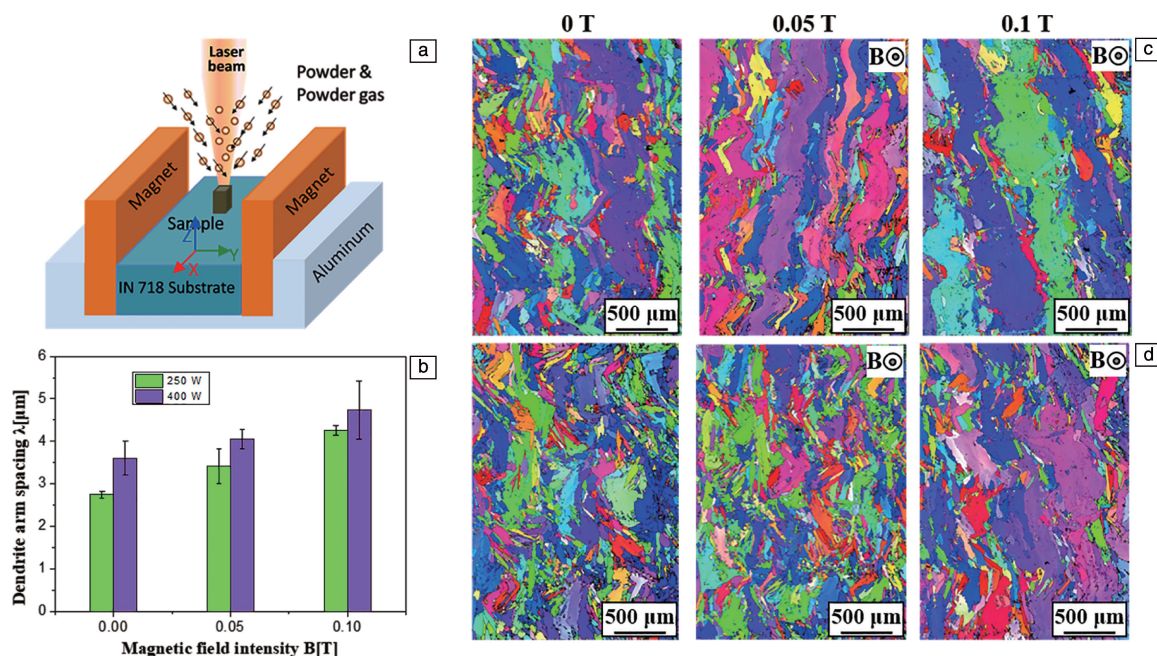


图2 稳恒磁场对激光定向能量沉积 (laser directed energy deposition, LDED) 打印 Inconel 718 合金显微组织的影响^[39]: (a) 制备装置示意图, (b) 枝晶间距随磁场强度变化规律; 分别在激光功率 250 (c) 和 400 W (d) 和不同磁场强度下形成的凝固组织的电子背散射衍射 (electron backscatter diffraction, EBSD) 分析结果

Fig. 2 Effect of static magnetic fields on the microstructure of LDED fabricated Inconel 718 alloys^[39]: (a) schematic representation of the setup for the LDED process, (b) dendrite arm spacing of the samples deposited with various magnetic field intensities at laser power of 250 and 400 W; EBSD results of LDED fabricated Inconel 718 samples with various magnetic field intensities at laser power of 250 (c) and 400 W (d)

Seidel 等^[40]研究了静磁场对 MAR-A-247 高温合金激光同轴送粉熔覆组织和裂纹的影响, 他们对磁场下激光熔覆层微熔池流场进行理论评估, 并通过自行研制的随行磁场激发装置 (如图 3a) 测量了在励磁电流为 60 A 时不同位置处的磁场强度, 装置激发的磁场强度可达到 200 mT。对比施加磁场前后熔覆层金相照片 (图 3b 和图 3c) 可以发现, 施加磁场后熔覆层的热裂纹明显减少, 研究者认为磁场抑制了 Marangoni 对流, 因此减少了熔覆层的裂纹形成。但是他们并没有对 Marangoni 对流受抑制的程度及熔覆层中裂纹形成的影响机理进行更深入的研究。Filimonov 等^[41]通过理论计算及与实验结合的方法研

究了不同外加磁场施加方式对 LDED 过程 Inconel 718 合金组织和性能的影响, 理论计算得出在系统较小的 H_a 下, 磁场对熔池 Marangoni 对流的抑制效果很有限, 但仍然可将组织内孔隙率从 0.3% 降至 0.2% (如图 4b), 并将打印件的极限延伸率提高了 4%。明显的是, 通过 EDS 分析发现施加磁场后组织内的 Nb 基析出相质量分数从 14.1% 降低至 9.1% (如图 4c), 研究者认为这是由于枝晶尺度的热电磁流效应所致, 并认为这是导致材料力学性能发生变化的主要原因。Ge 等^[42]的研究也表明磁场可以抑制激光熔覆过程熔池内的流场, 并导致合金中的元素在熔覆层中分布不均匀。

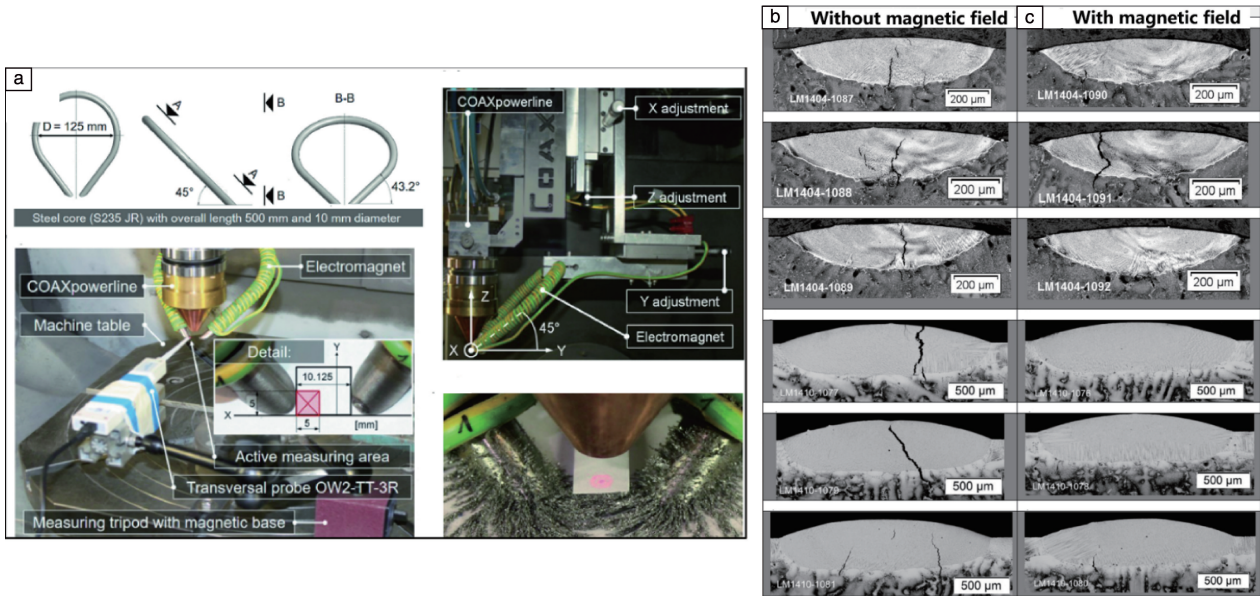


图 3 激光诱导 Marangoni 流动中磁流体动力学改变对于热裂纹的抑制^[40]: (a) 激光增材制造配置的磁场激发装置, 同一基材上无磁场(b)和有磁场(c)下的激光覆层 Mar-M-247 合金单熔道横截面的光学显微镜照片

Fig. 3 Novel approach for suppressing hot cracking via magneto-fluid dynamic modification of the laser-induced Marangoni convection^[40]: (a) electrical magnet setup assembled in laser additive manufacturing equipment, optical microscopy images of Mar-M-247 alloy single weld on the same substrate laser clad without (b) and with (c) magnetic field

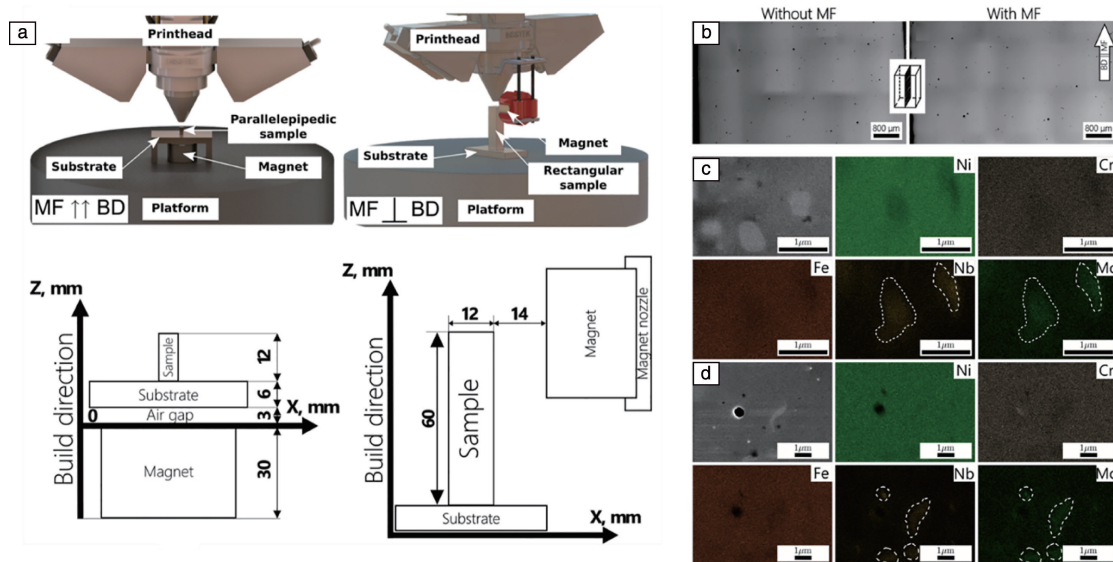


图 4 施加外磁场对激光定向能量沉积(laser directed energy deposition, LDED)Inconel 718 合金组织和性能的影响^[41]: (a) 不同的磁场施加方式示意图, (b) 金相照片显示组织孔隙率的变化, (c) 无磁场和(d)有垂直磁场的 EDS 元素面扫描结果

Fig. 4 Influence of static magnetic field on the microstructure and mechanical property of Inconel 718 alloys fabricated by LDED method^[41]: (a) schematic illustration of the magnetic field setup, (b) metallographs showing porosity distributions, EDS element mappings for samples fabricated without (c) and with (d) vertical magnetic field

Kao 等^[43]通过基于格子玻尔兹曼方法的数值模拟方法, 研究了不同静磁场施加方式下 Al10Si 合金增材制造过程微熔池内热电磁流体动力学(thermo-electric magneto-hydrodynamic, TEMHD)效应和 Marangoni 效应主导的

耦合流场及对组织的影响, 并通过相关实验进行佐证。模拟结果表明, 在竖直方向的 0.5 T 静磁场作用下, 微熔池的流场将由无磁场时对称的 Marangoni 对流(如图 5b)转变为不规则的对流(如图 5c), 进而导致熔池

尺度的成分偏析。

上述研究表明, 稳恒磁场对 LDED 增材制造的金属材料微观组织有显著影响。静磁场诱发的磁阻尼效应抑制熔池内的 Marangoni 对流, 并导致了熔池尺度的溶质偏析发生, 有助于减少组织内的缺陷。但到目前为止,

静磁场对于微熔池凝固的影响机理的研究尚不系统, 只有零星的报道; 熔池显微组织变化机理及与力学性能之间的关系仍不清楚。搞清磁场下 LDED 增材制造过程熔池凝固机理及对组织和力学性能的影响机制具有重要意义。

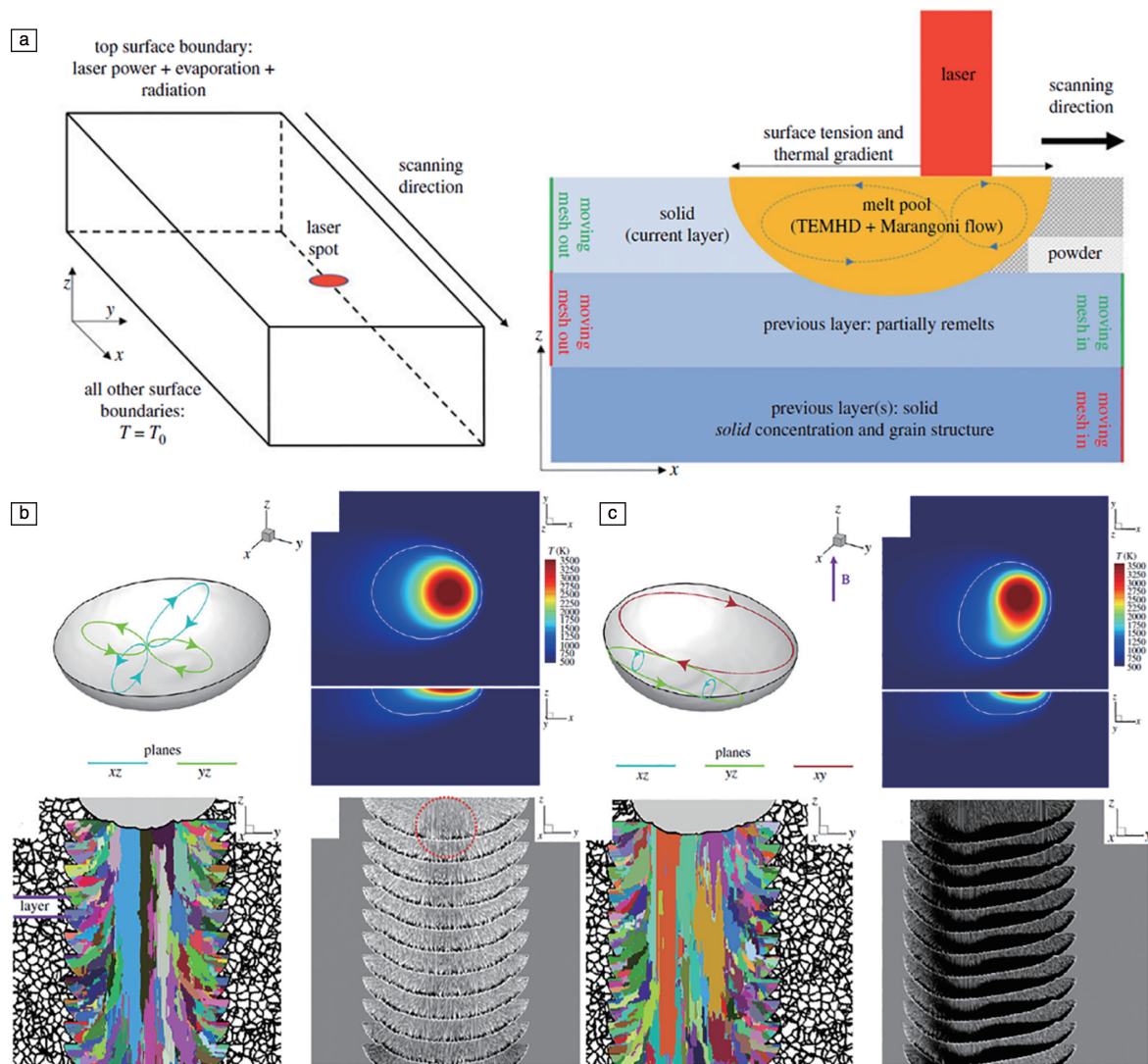


图5 基于格子玻尔兹曼方法的静磁场下增材制造过程熔池流体动力学和组织模拟^[43]: (a) 模型建立, (b) 无磁场时熔池内流场和组织模拟结果, (c) 竖直方向施加 0.5 T 静磁场时熔池内流场和组织模拟结果

Fig. 5 Simulation of the hydrodynamics of melt pool and microstructure for laser powder bed fusion under static magnetic field based on the lattice Boltzmann method^[43]: (a) schematic of the numerical model, (b) simulation results of flow field in melt pool and microstructure without magnetic field, (c) simulation results of flow field in melt pool and microstructure with a vertical 0.5 T magnetic field

3.2 粉末床熔融增材制造

尽管粉末床熔融增材制造技术被证明能有效地加工具有复杂结构(如蜂窝结构)的多种材料(如金属、复合材料和陶瓷等), 但粉末床熔融增材制造中温度梯度在平行和垂直于构建方向时的差异导致了构件的组织 and 机械性能的各向异性。为解决这个问题, Kang 等^[44]将粉末床

熔融工艺与静态磁场相结合, 在打印平台的两侧放置了两个永磁铁, 如图 6a 所示, 这两个永磁体产生了强度为 0.1 T 的水平静态磁场。为了比较, 他们在有/无静态磁场下制备了两组商业纯钛 (CP-Ti) 样品。使用 SEM 对马氏体 α' -Ti 的晶粒尺寸进行观察, 并采用 EBSD 技术对 Ti 的晶粒形态进行分析(图 6d), 结果表明, 在静态磁场

的作用下, 马氏体 α' -Ti 产生了显著细化, 并且组织均匀。晶粒细化和显微组织均匀化都有助于改善拉伸性能。静态磁场下制备的样品的极限拉伸强度从 766 增加到 794 MPa, 断裂应变从 28% 增大到 35% (如图 6b)。图 6c 的断口形貌显示, 有无磁场作用下制备的试样断口均为韧性断裂, 但无磁场时断面存在一些孔洞缺陷。他们认为显微组织均质化可归因于静态磁场引起的搅拌运动。在粉末床熔融制备的熔融、凝固过程中, 熔融材料流动会切断电磁感应线并感应出电流, 电流与静态磁场之间的相互作用将增强洛伦兹力。但是, 他们并没有给出增强洛伦兹力可使组织均匀化的原因。

与 Kang 等不同, Du 等^[45]是在粉末床熔融制备 AlSi10Mg 构件的打印平台正下方放置永磁铁, 产生的磁场方向竖直向上, 如图 7a 所示。因此, 磁场强度沿构建方向逐渐降低。实验结果证明, 磁场的引入可以有效地增加打印材料的相对密度, 同时减小枝晶间距。为了进一步揭示由磁场引起的微观结构变化, 他们对有/无磁场下粉末床熔融制备的 AlSi10Mg 构件进行 EBSD 分析。如图 7b 所示, 在没有磁场的情况下, 晶粒沿 Z 方向外延生长, 并

呈圆柱状。然而, 在有磁场的情况下, 具有 $\langle 001 \rangle$ 晶体结构的柱状晶粒的数量显著减少, 等轴晶粒的数量增加。如图 7c 所示, 磁场辅助粉末床熔融制造的 AlSi10Mg 构件显示出比粉末床熔融制造的 AlSi10Mg 构件、粉末床熔融制造的 Al-Si 构件、粉末床熔融制造的 7075Al 构件、碳纳米管(CNTs)增强和石墨烯增强的 Al 基复合材料(蓝色区域)具有更高的抗拉强度和延展性, 接近回火锻造的 2xxx 到 7xxx 铝合金构件。他们分析认为组织内缺陷的减少和晶粒的细化是合金的极限抗拉强度和塑性提高的主要原因。这种方法的一个缺点是沿着构建方向的磁场强度不均匀, 由于这个原因, 磁场沿构建方向对构建层的影响将减弱。

Li 等^[46]通过商用软件 COMSOL 模拟研究了静磁场作用下粉末床熔融 AlSi10Mg 合金的微熔池流动变化规律。研究表明, 外加磁场可在一定程度抑制熔池内流动, 流速随磁场强度增大而减小。由于微熔池内的流场更加缓和, 因此样品表面会更平整。Yan 等^[47]则通过将塞贝克效应的模型结合到多物理场热流体流动模型中, 开发了 SLM 过程的 TEMHD 模型, 不同磁场强度的 TEMHD

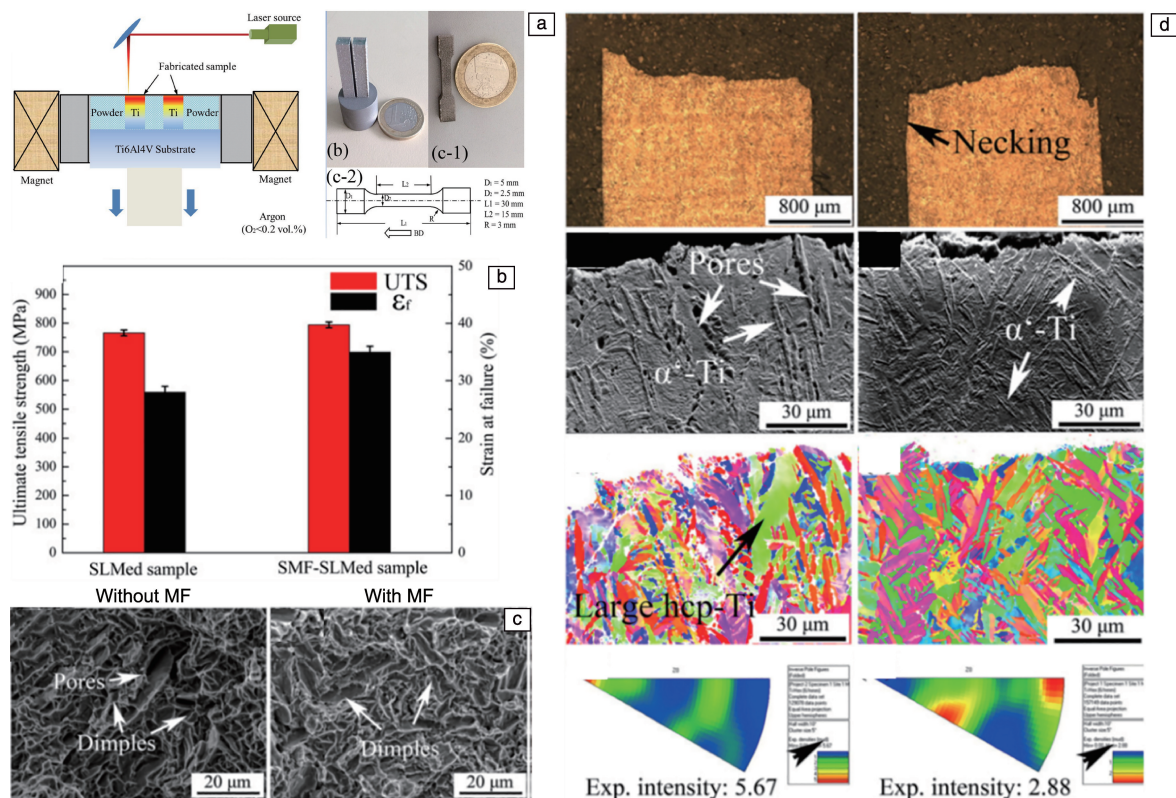


图 6 静磁场对选区激光熔化(selective laser melting, SLM)制备的纯 Ti 的组织 and 性能的影响^[44]: (a) SLM 设备示意图, (b) 施加磁场前后材料强度和塑性的变化, (c) 拉伸断口形貌对比, (d) 断口附近组织形貌对比

Fig. 6 Effect of static magnetic field on microstructure and mechanical properties of the SLM fabricated pure Ti^[44]: (a) schematic of the SLM process, (b) mechanical property of pure Ti without and with applied magnetic field, (c) fracture morphologies of samples fabricated without and with magnetic field and (d) comparison of the microstructures near the fracture

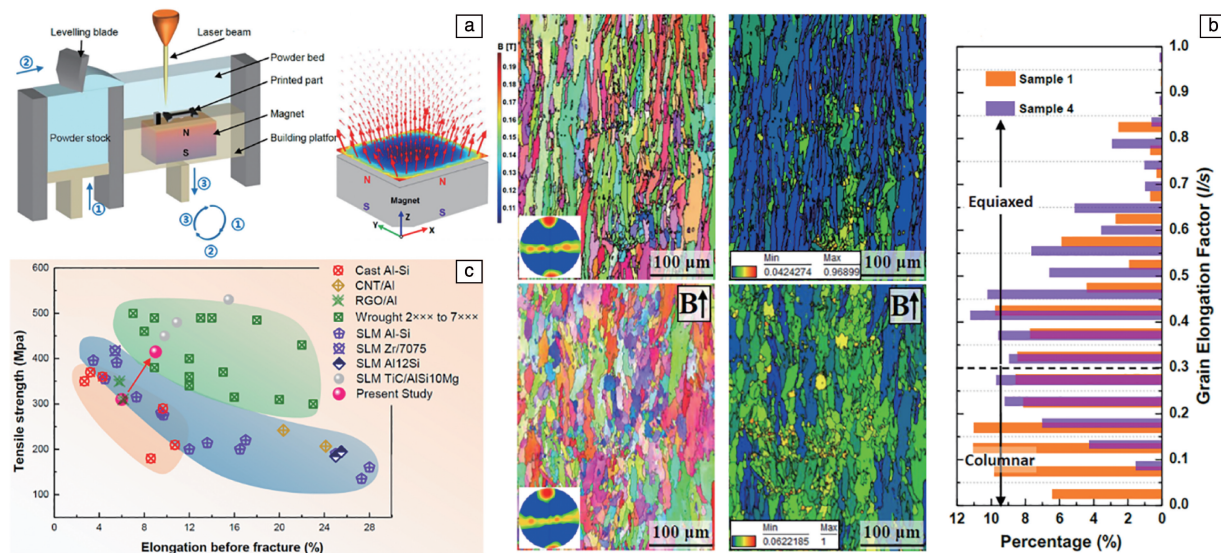


图7 静磁场对 SLM 制备的 AlSi10Mg 合金的组织 and 性能影响^[45]: (a) 装备示意图, (b) 组织对比; (c) 与其他加工方式制备的铝合金的力学性能对比

Fig. 7 Effect of static magnetic field on microstructure and mechanical properties of the SLM fabricated AlSi10Mg alloys^[45]: (a) schematic illustration of setup, (b) microstructure comparison, (c) mechanical properties comparison with aluminum alloys fabricated by other processes

模拟表明洛伦兹力可以抑制小孔波动。此外, 与 Li 等^[46] 的模拟结果相似, Yan 等的模拟结果也表明洛伦兹力可以使熔池中的流场更平滑, 并增加凝固组织中等轴晶的比例。Sarah 等^[48] 通过同步辐射实时原位观察的方法研究了静磁场对于 4140 钢 SLM 成形过程的影响。实验结果表明, 随着磁场强度的增大, 熔池深度呈变浅的趋势(如图 8a)。此外, 原位观察的结果表明, 当磁场强度为 600 mT 时, 熔池中的匙孔现象较 300 mT 时减少很多(如图 8b 和 8c)。

以上研究结果表明, 磁场可以有效地改善粉末床熔融制造零件的微观组织和机械性能。2019 年获授权的一项美国专利表明, 磁场也可以用于去除支撑粉末, 特别是那些粘附在零件内部结构中的粉末^[49]。在该专利中, Karlen 等为含有铁磁颗粒的粉末床熔融设备提供了外部磁场, 在粉末床熔融制造过程中, 随着铁磁颗粒的运动而产生了剪切力, 铁磁粒子撞击未熔化的粉末, 并将未熔化的粉末推出内部结构或通道。为了提高除粉效率, 加快除粉速度, Karlen 等采用了时变磁场。

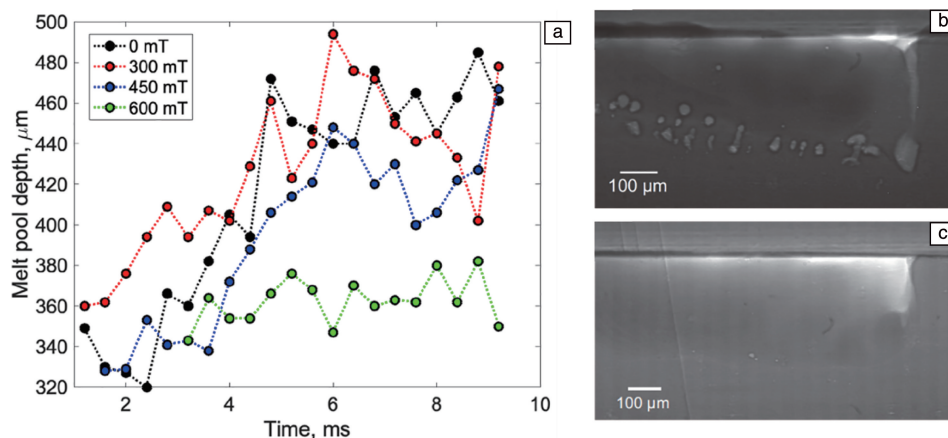


图8 同步辐射实时原位观察静磁场对 4140 合金钢 SLM 成形过程的影响^[48]: (a) 熔池深度随磁场强度变化规律, 300 (b) 和 600 mT (c) 磁场下的熔池形貌

Fig. 8 Influence of an external magnetic field on melt pool behavior in SLM manufacturing of 4140 steel observed by using *in-situ* synchrotron X-ray imaging^[48]: (a) variation of melt pool depth with magnetic field intensity, melt pool morphology under magnetic field intensity of 300 (b) and 600 mT (c)

3.3 电弧送丝增材制造

不同于上面两种增材制造技术采用的原材料为金属粉末, 电弧送丝增材制造 (wire and arc additive manufacturing, WAAM) 技术采用焊接电弧作为热源将金属丝材熔化, 按设定成形路径在基板上堆积每一层片, 层层堆敷直至成形金属件。与上述采用粉末原料的多种增材制造技术相比, WAAM 的沉积效率是基于激光和电子束的增材制造技术的 5~10 倍, 能量利用率可达到后者的几十倍, 因此其材料利用率更高, 成形效率高, 设备成本低, 对成形件的尺寸基本无限制, 虽然成形精度稍差, 成形件微观组织粗大, 但仍是与激光增材制造方法优势互补的增材制造成形技术, 是继激光、电子束增材制造技术后的又一新的金属增材制造技术^[50]。

电弧焊接过程与电弧送丝增材制造过程相似, 国内外相关学者对电磁场辅助电弧焊接过程已开展大量研究, 主要涉及两种类型电磁场。第一种为与熔积方向垂直的横向磁场, 其与熔池电流作用产生的电磁力可以抑制高速焊接过程中的“驼峰”^[51, 52]。日本学者 Shoichi 等^[53]通过后置焊丝插入熔池增强沿焊道方向的电流, 进而与外加横向磁场作用产生向上的电磁力来抑制重力带来的熔

体流淌, 实现仰焊。Lim 等^[54]在电弧焊接过程施加纵向磁场, 使熔池中产生绕焊枪轴向上的旋转搅动力, 驱动电弧和熔池金属做旋转运动, 起到调控组织晶粒大小的作用。Yin 等^[55]通过数值模拟方法研究了焊接过程施加磁场对熔池内的流场和形貌的影响。

在电弧送丝增材成形过程辅助以外部磁场, 通过磁场影响工作区温度场、电弧运动状态、熔池金属流动及熔滴过渡方式, 可以改善熔覆层内部组织和减小热变形, 从而提高增材成形工件质量。周祥曼等^[56-58]从实验和模拟的角度对比了施加纵向磁场作用前后电弧送丝增材制造合金钢的打印层表面形貌, 发现施加磁场时熔覆层表面更平整, 质量更高。他们分析认为, 除了磁场作用下宽高比更大的焊道可以提高搭接精度外, 周向的电磁搅拌还能驱动熔池金属填充焊道之间的“低谷”区域 (图 9a); 此外, 电磁场的施加有利于熔池内气体排出, 电磁搅拌作用也使得整个熔池的温度分布更加均匀, 降低了熔池中心高温区域的集中趋势, 减弱了晶粒的交汇、竞争生长的趋势, 使得晶粒尺寸更加均匀 (图 9b)。力学性能测试结果显示, 磁场作用使得成形样件在熔积方向和搭接方向的力学性能有一定的提升, 力学性能的各向异性减小 (图 9c)。

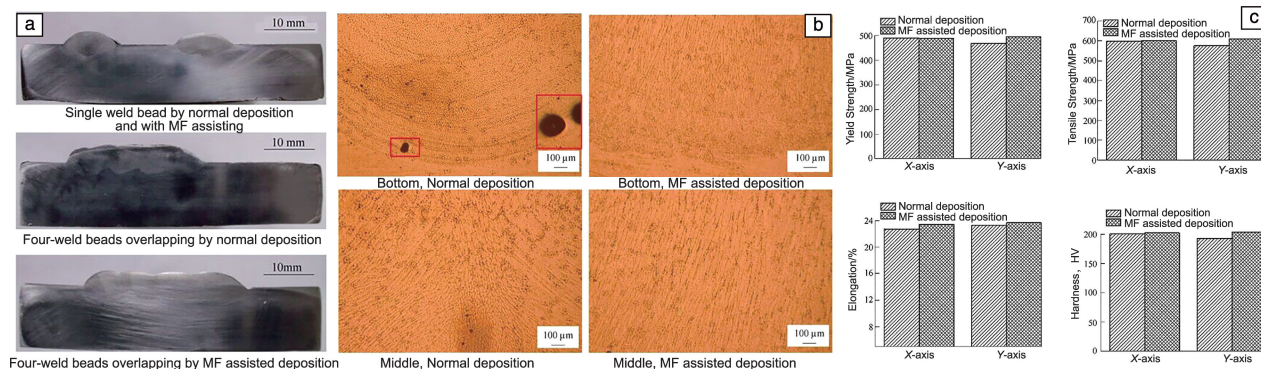


图 9 纵向稳态磁场对电弧送丝增材制造的零件表面质量和性能影响^[56]: (a) 熔池形貌和搭接, (b) 孔隙和组织, (c) 力学性能

Fig. 9 Effect of static longitudinal magnetic field on the morphology and mechanical property of wire and arc additive manufactured parts^[56]: (a) melt pool and overlapping, (b) pores and microstructure, (c) mechanical properties

Wang 等^[59]研究了外加磁场对电弧送丝增材成形的 Inconel 625 合金组织和性能的影响, 研究表明, 施加磁场可以显著减小枝晶的尺寸 (如图 10b), 磁搅拌力可以减少枝晶间 Nb 和 Mo 元素偏析, 并提高了打印件的显微硬度和室温抗拉强度 (图 10c 和 10d)。

4 结 语

综上所述, 国内外学者对于静磁场在金属增材制造过程的影响已开展了一定的研究, 相关的研究成果不断涌现。对静磁场下增材制造微熔池凝固过程微观结构演化的研究丰富了增材制造微熔池凝固理论, 通过磁场对

于熔池内流体的主观控制, 可以加强人们理解微熔池流动引发的传热传质变化及其对凝固过程中枝晶外延生长、择优取向、偏析和组织演化等影响。此外, 对静磁场下的金属增材制造进行研究, 也为辅助调控增材制造微熔池凝固过程和构件的控形控性提供理论指导。

然而, 对静磁场下金属增材制造过程的研究仍面临诸多问题, 主要体现在两个方面。首先, 增材制造过程涉及到多效应多尺度复杂物理过程, 其复杂物理机制目前尚不明确。相比于对金属定向凝固过程较深入的物理机制认识, 对于磁场对增材制造复杂多物理过程的影响机制的研究不够深入。另外, 目前磁场的施加方式多为

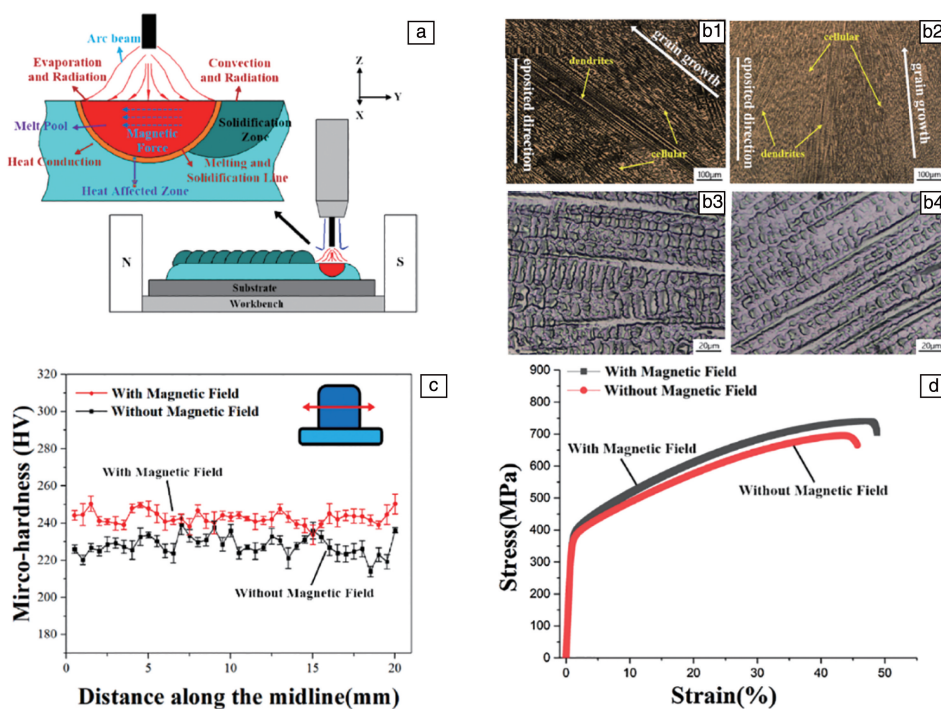


图10 横向静磁场对电弧送丝增材制造的 Inconel 625 合金组织和性能的影响^[59]: (a) 加工过程的示意图, (b₁) 无磁场时的金相照片, (b₂) 施加磁场的金相照片, (b₃) 无磁场时的微观组织, (b₄) 施加磁场的微观组织, (c) 微观硬度, (d) 力学性能

Fig. 10 Effect of static transverse magnetic field on the microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Inconel 625 alloys^[59]: (a) schematic illustration of processing, (b₁) metallograph without magnetic field, (b₂) metallograph with magnetic field, (b₃) microstructure without magnetic field, (b₄) microstructure with magnetic field, (c) micro-hardness, (d) mechanical properties

永磁体和电磁铁, 磁场强度较低, 作用效果有限, 阻碍了静磁场辅助增材制造的应用和发展。未来, 对静磁场辅助的金属增材制造研究可围绕以下两个方向进行: ① 通过同步辐射表征技术和与数值模拟相结合的方法深入研究静磁场对微熔池凝固过程的影响机制, 通过调控磁场强度和方向改变微熔池组织和析出相, 改善组织内孔隙和裂纹等缺陷; ② 开发适用于增材制造过程的新型磁场, 将有助于该领域研究的进一步开展, 也有助于增材制造技术的进一步应用推广, 对于我国的工业强国建设特别是航空航天等国防军事领域的发展具有重要的经济意义和战略价值。

参考文献 References

- [1] MARCEL G. ISIJ International[J], 1990, 30(1): 1-7.
- [2] 訾炳涛, 刘文今, 姚可夫, 等. 天津冶金[J], 2002, 5: 5-10.
ZI B T, LIU W J, YAO K F, *et al.* Tianjin Metallurgy[J], 2002, 5: 5-10.
- [3] 孙珂, 索玉松, 李磊, 等. 铸造技术[J], 2022, 43(8): 647-653.
SUN K, SUO Y S, LI L, *et al.* Foundry Technology[J], 2022, 43(8): 647-653.
- [4] 李喜, 任忠鸣, 王晖, 等. 中国有色金属学报[J], 2006, 16(3): 476-481.
LI X, REN Z M, WANG H, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous
- [5] LI X, REN Z M, FAUTRELLE Y. Journal of Crystal Growth[J], 2008, 310: 3488-3497.
- [6] LI X, FAUTRELLE Y, GAGNOUD A, *et al.* Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2016, 47: 1180-1197.
- [7] MIKELSON A E, KARKLIN Y K. Journal of Crystal Growth[J], 1981, 52(2): 524-529.
- [8] YASUDA H, OHNAKA I, YAMAMOTO Y, *et al.* Materials Transactions[J], 2003, 44(12): 2550-2554.
- [9] HAN Y, BAN C Y, GUO S J, *et al.* Materials Letters[J], 2007, 61(4-5): 983-986.
- [10] WANG Q, WANG Z Y, LIU T, *et al.* Science in China Series E-Technological Sciences[J], 2009, 52(4): 857-863.
- [11] DE RANGO P, LEES M, LEJAY P, *et al.* Nature[J], 1991, 349(6312): 770-772.
- [12] WILLIS B A. Mineral Process Technology[M]. 6th Ed. London: Butterworth and Heinmann, 1997.
- [13] WANG Q, LIU T, GAO A, *et al.* Scripta Materials[J], 2007, 56: 1087-1090.
- [14] LIU T, WANG Q, GAO A, *et al.* Scripta Materials[J], 2007, 57: 992-995.
- [15] LI X, FAUTRELLE Y, REN Z M, *et al.* Acta Materials[J], 2009, 57: 1689-1701.
- [16] SHIMOTOMAI M, MARUTA K. Scripta Materials[J], 2000, 42(5): 499-503.

- [17] WANG Q, LOU C S, LIU T, *et al.* Journal of Physics D: Applied Physics[J], 2009, 42(2): 025001.
- [18] ZHENG T X, ZHONG Y B, DONG L C, *et al.* Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2018, 49: 1981–1985.
- [19] BALTARETU F, WANG J, LETOUT S, *et al.* Magnetohydrodynamics[J], 2015, 51: 45–55.
- [20] LI X, FAUTRELLE Y, REN Z M. Acta Materials[J], 2007, 55: 1377–1386.
- [21] LI X, FAUTRELLE Y, REN Z M. Acta Materials[J], 2007, 55: 3803–3813.
- [22] DU D F, HOU L, GAGNOUD A, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2014, 588: 190–198.
- [23] DU D F, FAUTRELLE Y, DONG A P, *et al.* Materials Characterization[J], 2018, 141: 423–432.
- [24] CHANDRASEKHAR S. Philosophical Magazine[J], 1954, 45(370): 1177–1191.
- [25] UTECH H P, FLEMINGS M C. Journal of Applied Physics[J], 1966, 37(5): 2021–2024.
- [26] OREPER G M, SZEKELY J. Journal of Crystal Growth[J], 1984, 67(3): 405–419.
- [27] GARANDET J P, ALBOUSSIÈRE T, MOREAU R. International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 1992, 35(4): 741–748.
- [28] ALBOUSSIÈRE T, MOREAU R, CAMEL D. Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie II Fascicule C-Chimie[J], 1991, 313(7): 749–755.
- [29] BEN H H, HENRY D. Journal of Fluid Mechanics[J], 1997, 333: 57–83.
- [30] KINJI H, NOBUYUKI I, TOSHIHIKO S, *et al.* Journal of Crystal Growth[J], 2001, 230: 100–107.
- [31] KAKIMOTO K. Journal of Crystal Growth[J], 2000, 212: 429–437.
- [32] SHEN Z, ZHONG Y B, WANG H, *et al.* Journal of Crystal Growth[J], 2015, 432: 116–122.
- [33] 郭艳华, 戴国庆, 孙中刚, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2022, 51(12): 4733–4744.
- GUO Y H, DAI G Q, SUN Z G, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2022, 51(12): 4733–4744.
- [34] 袁丁. 超声振动对 ER321 不锈钢和 TC4 钛合金激光增材制造组织性能影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- YUAN D. Effect of Supersonic Vibration on the Microstructure and Properties of Laser Welding Additive Manufactured ER321 and TC4. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [35] 帅三三, 林鑫, 肖武泉, 等. 金属学报[J], 2018, 54(6): 918–926.
- SHUAI S S, LIN X, XIAO W Q, *et al.* Acta Metallurgica Sinica[J], 2018, 54(6): 918–926.
- [36] LIU X Q, YU J B, SHUAI S S, *et al.* Metallurgical and Materials Transactions B[J], 2018, 4: 3211–3219.
- [37] NIE J W, CHEN C Y, SHUAI S S, *et al.* Journal of Thermal Spray Technology[J], 2020, 29: 1410–1423.
- [38] DU D F, DONG A P, SHU D, *et al.* Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2020, 51: 3354–3359.
- [39] WANG J, WANG Y, SHI J, *et al.* Effect of External Magnetic Field on the Microstructure of 316L Stainless Steel Fabricated by Directed Energy Deposition[C]// Proceedings of the ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 2B: Advanced Manufacturing. Salt Lake City, Utah, USA: ASME, 2019.
- [40] SEIDEL A, DEGENER L, SCHNEIDER J, *et al.* Superalloys[M]. Switzerland: Springer, 2020.
- [41] FILIMONOV A M, ROGOZIN O A, DUBININ O N, *et al.* Materials[J], 2021, 14(18): 5190–5207.
- [42] GE H H, FANG H, ZHANG C W, *et al.* Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2022, 53: 370–376.
- [43] KAO A, GAN T, TONRY C, *et al.* Philosophical Transactions of the Royal Society A[J], 2020, 378: 20190249.
- [44] KANG N, YUAN H, CODDET P, *et al.* Materials Science Engineering C[J], 2017, 70(1): 405–407.
- [45] DU D F, HALEY J C, DONG A P, *et al.* Materials & Design[J], 2019, 181: 107923.
- [46] CHEN L W, LI H, LIU S, *et al.* AIP Advances[J], 2019, 9: 045012.
- [47] WANG L, YAN W T. Physical Review Applied[J], 2021, 15(6): 0640051.
- [48] SARAH J W, BENJAMIN G, NIRANJAN P, *et al.* Journal of Micro and Nano-Manufacturing[J], 2020, 4(8): 041016.
- [49] KARLEN E, MIRONETS S, GIULIETTI D, *et al.* Powdered Removal for Element Formed by Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Processes; US Pat. , 10259045[P]. 2019–04–16.
- [50] SREENATHBABU A, KARUNAKARAN K P, AMARNATH C. Rapid Prototyping Journal[J], 1995, 11(4): 235–248.
- [51] LI Y, WU C S, WANG L, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2016, 229: 207–215.
- [52] WU C S, YANG F Z, GAO J Q. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture[J], 2016, 230(1): 188–193.
- [53] SHOICHI M, YUKIO M, KOKI T, *et al.* Science and Technology of Welding & Joining[J], 2013, 18(1): 38–44.
- [54] LIM Y C, YU X, CHO J H, *et al.* Science and Technology of Welding & Joining[J], 2010, 15(7): 583–589.
- [55] YIN X, GOU J, ZHANG J, *et al.* Journal of Physics D: Applied Physics[J], 2012, 45(45): 285203.
- [56] 周祥曼, 田启华, 杜义贤, 等. 机械工程学报[J], 2018, 54(2): 84–96.
- ZHOU X M, TIAN Q H, DU Y X, *et al.* Chinese Journal of Mechanical Engineering[J], 2018, 54(2): 84–96.
- [57] 周祥曼, 田启华, 杜义贤, 等. 机械工程学报[J], 2018, 54(12): 193–206.
- ZHOU X M, TIAN Q H, DU Y X, *et al.* Chinese Journal of Mechanical Engineering[J], 2018, 54(12): 193–206.
- [58] ZHOU X M, ZHANG H O, WANG G L, *et al.* International Solid Freeform Fabrication Symposium[J], 2015, 7: 156–170.
- [59] WANG Y F, CHEN X Z, SHEN Q K, *et al.* Journal of Manufacturing Processes[J], 2021, 64: 10–19.