

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.01.001

固相搅拌摩擦沉积增材制造技术研究进展

沈一洲^{1,2}, 周泽星^{1,2}, 吕万程^{1,2}, 郭训忠^{1,2}, 陈晓荻^{1,2}, 王笑^{1,2}

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106;

2. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016)

摘要: 搅拌摩擦沉积增材 (Additive friction stir deposition, AFSD) 是一种先进的固相增材制造 (Additive manufacturing, AM) 技术。与传统基于熔融的增材制造技术相比, 它具有增材结构致密、材料低变形和过程高效节能等优势, 在航空装备制造、交通运输、机械制造等领域拥有广阔的应用前景。本文综述了 AFSD 技术的原理、优势、组织演变特点和应用情况。重点介绍了 AFSD 过程中“工艺条件-微观组织-力学性能”相关性的研究现状, 沉积材料力学性能受材料流动状态、界面连接机制、微观组织演变情况的综合影响。列举了 AFSD 技术在大型构件整体制造、高性能涂层、表面缺陷修复等领域的应用。最后, 对 AFSD 技术进行了展望, 指出该技术在工艺与组织变化耦合、原位变形条件模拟、工具头设计和新材料增材等方面需进一步研究和突破。

关键词: 增材制造; 搅拌摩擦; 材料流动; 界面连接; 微观组织

中图分类号: TG453.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)01-0001-16

Research Progress on Solid-State Additive Friction Stir Deposition Manufacturing Technology

SHEN Yizhou^{1,2}, ZHOU Zexing^{1,2}, LYU Wancheng^{1,2}, GUO Xunzhong^{1,2},
CHEN Xiaodi^{1,2}, WANG Xiao^{1,2}

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics &

Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Additive friction stir deposition (AFSD) is an advanced solid-state additive manufacturing (AM) technology. Compared with traditional melt-based additive manufacturing techniques, AFSD offers several advantages including a dense additive structure, low material deformation, high process efficiency and energy savings. It has extensive applications in aerospace equipment manufacturing, transportation, mechanical

基金项目: 国家自然科学基金(52075246); 江苏省自然科学基金(BK20211568); 中央高校基础研究基金(NE2022005); 苏州市基础研究项目(SJC2022032); 航空工业气动院“新风向”联合创新项目(XFX20220301)。

收稿日期: 2023-11-27; **修订日期:** 2023-12-30

作者简介: 沈一洲, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 国家“万人计划”青年拔尖人才, 江苏省某创新平台负责人, 国家首批“博新计划”人才, 江苏省“优青”基金获得者, 江苏省“青蓝工程”优秀骨干教师, 南京航空航天大学“长空学者”, 新加坡南洋理工大学博士后, 主要从事材料表界面加工与应用研究。研究成果被 *Advances in Engineering*、*科技日报* 等媒体杂志报道, 入选全球前 2% 顶尖科学家榜单(2022/2023)。在表/界面科学与工程领域, 出版中英文学术专著各 1 部, 以第一/通信作者发表了 80 余篇高水平学术论文, 其中 10 篇 IF > 10, 封面论文 2 篇, SCI 高被引论文 3 篇, 他引超 4 000 次, 获邀在顶级综述期刊上发表长文综述 (*Progress in Materials Science*); 先后申请国家发明专利 40 余项, 其中 PCT 国际发明专利 2 项, 美国专利 2 项, 已授权 20 项, 登记软件著作权 5 项。研究成果获江苏省科学技术二等奖、军事科学技术进步二等奖、日内瓦国际发明展特别金奖/银奖、江苏省航空航天学会科学技术一等奖、江苏省复合材料学会科学技术一等奖、江苏省材料学会科学技术一等奖、江苏省科协优秀论文二等奖、南京市优秀自然科学论文奖、美国 GE 通用电气公司科技创新三等奖、南京航空航天大学“青年学者”创新奖等, 在多家军/民口单位实现技术转化。

通信作者: 周泽星, 男, 硕士研究生, E-mail: zhouzexing@nuaa.edu.cn。

引用格式: 沈一洲, 周泽星, 吕万程, 等. 固相搅拌摩擦沉积增材制造技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(1): 1-16. SHEN Yizhou, ZHOU Zexing, LYU Wancheng, et al. Research progress on solid-state additive friction stir deposition manufacturing technology[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2024, 56(1): 1-16.

manufacturing, and other fields. This paper presents a review of the principles, superiorities, microstructure evolution characteristics, and applications of AFSD technology. The focus is on the current research status regarding the correlation between “process conditions-microstructure-mechanical properties” during the AFSD process, and the mechanical properties of deposited materials are affected by the flow state of materials, interfacial connection mechanism, and microstructural evolution. The applications of the AFSD technology in integral manufacturing of large components, high-performance coatings, and surface defect repair are listed. Finally, the prospects of the AFSD technology are discussed, pointing out that further research and breakthroughs are needed in areas such as coupling of process parameters with microstructural changes, in-situ deformation condition simulation, tool head design, and additive manufacturing of new materials.

Key words: additive manufacturing(AM); stirring friction; material flow; interfacial connections; microstructure

增材制造 (Additive manufacturing, AM) 是“工业 4.0”的关键组成部分,它作为制造复杂目标构件的领先技术,为复杂组件的加工提供了前所未有的设计自由度和制造灵活性^[1],可实现复杂形状或异形件的快速、无模具、自动化制造。AM 技术一般选用激光或电子束作为热源,通过熔合金粉末,逐层添加合金或金属,实现对金属构件的净成形^[2]。由于利用 AM 技术制造的 3D 零件结构是通过熔化的填充材料分层沉积而形成的,这类似于熔焊过程中的沉积,因此会产生各种非平衡凝固缺陷,如裂纹、气孔等^[3]。当施加的能量过大时,材料会产生溅射而造成污染,此外在增材的过程中,连续的再加热可能导致已增材层内产生不希望发生的相转变和残余应力^[4],这对材料性能产生极大的不利影响。因此,传统基于熔融的金属 AM 技术仍然存在各种挑战。因此,有必要开发新技术来克服这些挑战。

近年来,搅拌摩擦沉积增材 (Additive friction stir deposition, AFSD) 作为一种新型 3D 结构增材制造技术,突破了传统的熔覆成形方式,在金属结构件的制造方面具有较大优势,成了固态金属增材制造领域的重要分支^[5]。AFSD 以先进材料成形制造和绿色制造为特点,通过高速搅拌摩擦使材料温度升高,在工件表面逐层沉积金属,形成独特的金属沉积增材结构^[6]。目前 AFSD 技术在航空装备制造、交通运输、机械制造等多个领域得到广泛应用^[7-9]。AFSD 技术来源于基本的搅拌摩擦原理,在微观结构和机械特性上与搅拌摩擦焊接 (Friction stir welding, FSW) 相似^[10],传统熔融增材以熔化和凝固为基础,与铸造具有相同的材料成形机制,面临着孔隙度大、晶粒粗大、组织偏析、热裂纹和高残余应力等成形限制。而基于热机械加工的 AFSD 从根本上避免了熔融增材的质量问

题,AFSD 继承了锻造加工在去除孔隙、形成等轴细晶组织和各向同性力学性能方面的优点,可应用于一系列金属和合金,通过 AFSD 增材后的材料在热机械加工的作用下产生锻造组织而不是铸造组织,因此具有优异的机械性能。此外,AFSD 工艺的可扩展性和多层制造能力为批量制造精细结构材料提供了新的机会^[4],它还可以扩展到金属零件的涂层、修复和连接上。

到目前为止,AFSD 研究进程还处于起步阶段,该过程涉及多个工艺参数与微观结构演变之间的复杂相互作用,并最终导致沉积层机械性能的变化^[11]。本文介绍了搅拌摩擦沉积增材制造技术的相关国内外研究进展,侧重分析了 AFSD 过程中沉积层材料流动和微观组织演变情况,包括工艺参数、原材料属性、工具头形状等对组织演变的影响,以微观组织结构演变为基本准则,对 AFSD 沉积组织的相关力学性能变化进行评估。最后对 AFSD 技术的发展前景和趋势进行了展望,为后续开发更高效增材技术以及未来该技术在大面积工业化应用上提供参考。

1 AFSD 技术概况

1.1 技术来源与技术原理

摩擦是焊接、沉积和加工结构金属和合金所需要的理想热源,搅拌摩擦技术成了代替传统熔融加工的潜在优势技术,这种以摩擦为前提的新型增材技术最早源于 1991 年英国焊接所 TWI 发明的 FSW^[12]。经过不断发展和国内外学者的深入研究,对可能实现的固相金属增材工艺优化探索,逐步衍生出了搅拌摩擦点焊 (Friction stir spot welding, FSSW)^[13]、搅拌摩擦搭接焊 (Friction stir lap welding, FSLW)^[14]、搅拌摩擦增材制造 (Friction stir additive manufacturing, FSAM)^[15]、摩擦堆焊 (Friction surfacing, FS)^[16]、AFSD^[17] 等技术。

AFSD是由美国 Aeroprobe 公司(现为 MELD 制造公司)开发的一种固态渐进式增材制造技术^[18]。图 1 显示了 AFSD 的技术原理示意图。在 AFSD 过程中使用非消耗性空心旋转的工具头,进给料受进料装置顶锻力,通过工具头内部空心通道输送。在预设定好的速度下,工具头和进给料同步高速旋转,进给料和基材接触时,由于动态接触摩擦和挤压^[11],进给料快速受热升温并塑化。在进料装置顶锻力和工具头剪切力作用下,塑化进给料被挤压填充至工具头和基材之间的空隙中,进给料被持续下压,在工具头下方形成沉积区。由于工具头旋转,沉积材料与基材在搅拌和剪切作用下产生物理结合,塑化进给料沿着工具头行进路径在基材上形成沉积层,如此往复,可在基材上进行多层材料沉积。

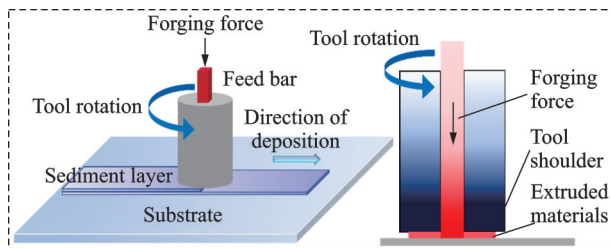


图 1 搅拌摩擦沉积增材制造技术原理图

Fig.1 Schematic diagram of AFSD manufacturing technology

在整个 AFSD 过程中,进给料经历严重的塑性变形,其中大部分变形功转化为热量。摩擦热和塑性耗散热的总和将沉积界面处温度提高至原材料熔点的 60%~90%。由于界面和沉积材料的温度不会达到熔点,因此增材过程仍处于固态。同时,旋转主轴在基材上定向移动以辅助剪切沉积,与摩擦焊接不同的是,AFSD 热量主要产生于工具头和沉积层的表面,而层间连接是通过顶层向下传导的热量以及工具头和进料装置施加在沉积层上的轴向压缩力实现的,这种沉积层间的伪摩擦焊接

作用保证了多个沉积层之间的有效连接,最后通过逐层沉积以产生所需的几何形状。

1.2 技术优势与研究进展

AFSD 技术具有独特的增材制造特性,与其他基于摩擦的增材技术不同,AFSD 可以使用棒材、丝材、粉末等形式各异的材料作为进给料^[19]。由于 AFSD 是材料在高温和高应变率下发生严重塑性变形的过程,在沉积时伴随着连续或不连续的动态再结晶产生细小而等轴的晶粒,动态再结晶程度越高,形成的微观组织结构特征越均匀^[20]。因此,在高效率增材的同时,能够获得均匀、致密、等轴的微观结构,同时,AFSD 因其固态特性避免了热裂纹、大变形和高残余应力^[21],在材料加工过程中产生的热影响区小,密集的材料流动和低的孔隙度也促进了增材界面间牢固结合。

由近些年关于 AFSD 的研究发现,该技术适用于各种类型的原材料,从较软的铝、镁合金到较硬的镍、铬合金。这就要求该技术适应大范围的工艺参数,提供足够用的热量,以实现良好的沉积增材。表 1 总结了近年来 AFSD 技术的研究进展情况^[17,19,22-32]。研究者们发现,工具头转速和移动速度是主要影响沉积过程中产热程度的关键参数,产热量随着转速的增加而增加,随着横移速度的增加而减少,如果热量输入不足,会导致材料流动不充分,而过多的热量输入则会导致材料在反复热循环下发生疲劳和损伤。除上述因素,进给速率也会影响沉积物的质量。过高的进给速率会导致飞边形成,而进给不足会在沉积物中产生空隙。研究还发现,工具头几何形状(突起特征)在确定沉积质量方面起着重要作用。目前对于该新型技术的研究仍处于起步阶段,对于该技术所涉及的工艺机理、工艺过程的优化控制以及增材构件可靠性等方面的研究仍然不够,尚未形成系统的工艺基础理论和数据库来指导该技术的实际工程应用。

表 1 AFSD 研究发展时间进程

Table 1 Time course of AFSD research development

序号	AFSD 研究发展进程	AFSD 技术发展关键点
1	Calvert ^[22]	首次使用 AFSD 技术对 WE43 镁合金增材
2	Kandasamy ^[17]	AFSD 技术首次被授予专利
3	Rivera 等 ^[23] , Karthik 等 ^[24]	AFSD 在 Ni-Fe625、Ti-Al 硬质材料基体上增材
4	Srivastava 等 ^[19] , Griffiths 等 ^[25]	最早关于 AFSD 技术的系统性综述
5	Phillips 等 ^[26]	首次描述了 6061 铝合金工艺参数-微观组织/结构-力学性能之间的关系
6	Perry 等 ^[27]	首次探究了 AFSD 过程中沉积界面三维形貌、形成过程以及动态组织演变情况
7	MELD 公司 ^[28]	使用 AFSD 技术进行大尺寸圆环件增材
8	Stubblefield 等 ^[29]	开发全耦合无网格计算框架模拟 AFSD 沉积中材料流动
9	杨新岐等 ^[30] , 李会朝等 ^[31]	基于 MELD 工艺,自主研制设计搅拌摩擦增材设备,填补国内送丝、送棒增材设备空白
10	Wu 等 ^[32]	AFSD 制备超细纳米金刚石颗粒增强铝基复合材料涂层

2 AFSD 工艺-组织-性能相关性

AFSD是一种逐层的材料沉积过程,虽然在这个过程中,进料的受热软化和塑性变形与搅拌摩擦焊接/摩擦堆焊十分相似,但与之不同的是,AFSD过程塑性软化的材料会被挤压在工具头和基体之间的间隙内,随着主轴移动而经历极端剪切^[33]。在每一层的沉积过程中,摩擦热-机械变形现象会重复发生,使得沉积层处于不同程度的复杂循环热-机械过程中,从而影响微观组织结构的变化。因此,摩擦热-机械变形是基于搅拌摩擦的AFSD基本工艺原理,AFSD工具头与原料在界面处摩擦产生的热量以及其对塑性软化进给料的耗散可以表示如下^[33-34]

$$Q = \frac{2}{3} \pi \tau_s \frac{\omega}{v} (R_0^3 - R_i^3) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \rho C_p + \rho C_p (\mathbf{u} \cdot \nabla T) + \nabla \cdot (k \nabla T) = q_p \quad (2)$$

$$Q_{\text{plastic}} = \eta_{\text{th}} \sigma_e \dot{\epsilon} \quad (3)$$

式中: Q 为单位沉积长度的热输入,即工具头与基体接触界面上的总产热量; τ_s 为工具头与基体接触界面上的接触切应力; ω 为工具头旋转角速率; v 为主轴横移速度; R_0 与 R_i 分别为工具头轴肩半径与进料口的半径; ρ 、 C_p 和 k 分别为沉积材料的密度、比热容和导热系数; T 为沉积过程中产生的温度; \mathbf{u} 为沉积材料的流动速度矢量; q_p 为体积产热速率; Q_{plastic} 为塑化进给料的体积耗散热, η_{th} 为产热系数; σ_e 和 $\dot{\epsilon}$ 分别为等效应力和等效应变率。

由式(1~3)可以看出,加工过程工艺参数的设定和工具头设计(\mathbf{u} 的变化)会影响沉积过程。工具头转速(ω)、移动速度(v)和沉积进给速率(F)等参数的耦合变化,对沉积过程中的热输入和应变率产生重要影响。通过调节AFSD工艺参数,可以控制沉积过程所形成的微观组织结构特征,进而影响后续沉积组织再结晶程度。由此,增材构件的微观结构和力学性能也会受到影响。

2.1 材料流动

AFSD中材料流动指的是沉积材料在外力或能量作用下发生塑性变形和移动的过程,研究材料流动的目的是为了更好地理解和控制沉积过程中材料的行为,以提高沉积质量和性能。目前,研究材料流动一般采用实验和数值模拟两种方法。实验方法包括使用高速摄像技术观察材料流动行为、使用原位成像技术分析材料流场以及通过力学测试测量材料性能等。数值模拟方法则基于计算流体力学(Computational fluid mechanics, CFD)或有限元分析(Finite element analysis, FEA)等方

法,通过建立数学模型来模拟材料流动过程。尽管AFSD中产生的热量与其他基于摩擦搅拌的工艺相当,但在考虑热流动和塑性流动边界条件时存在重大差异。在FSW/FSP(Friction stir processing),搅拌针在材料内部旋转(没有新材料),而在AFSD中,沉积材料受到周围工具的约束,工具头轴肩处金属原料端面与基体(或与先前沉积层)之间摩擦产生热量,热量经由搅拌区传导散热,沉积层在AFSD中不受横向约束,因此沉积区可以通过传导、自由对流和辐射进行散热。因此,AFSD过程中的材料流动特性与FSW有本质上的不同。一方面,塑性软化的材料在横向方向上没有足够的约束,可以自由流动在轴肩面与基体之间^[35];另一方面,由于工具尺寸因素,AFSD中软化材料受到的搅拌作用相较于FSW作用要弱^[36]。

Perry等^[27]专门研究了AFSD过程中的材料流动情况,采用X射线断层扫描技术表征AA2024铝合金在6061铝合金上沉积时的材料流动情况,扫描结果显示,材料从前进侧流向后退侧,沉积表面呈现出典型的“洋葱切片”特征。这是由于每次工具头旋转时,工具头边缘与沉积材料顶部表面相互耦合所引起的。如图2所示,当工具头向前运动时,工具头下方的沉积材料从搅拌头后侧流出沉积区,而在搅拌头直径方向上,材料没有受到约束,向后侧上方流动^[27]。此外,在材料流动过程中还伴随着温度变化,材料流动决定了塑性变形所产生的体积能量^[37],同时也有助于热量通过对流和热流的传递。材料流动还受到沉积材料内部温度分布的影响,因为材料的本构特性(如动态黏度和流动应力)强烈依赖于温度。Phillips等^[38]研究了AFSD过程中平行重叠增材沉积时AA6061的材料流

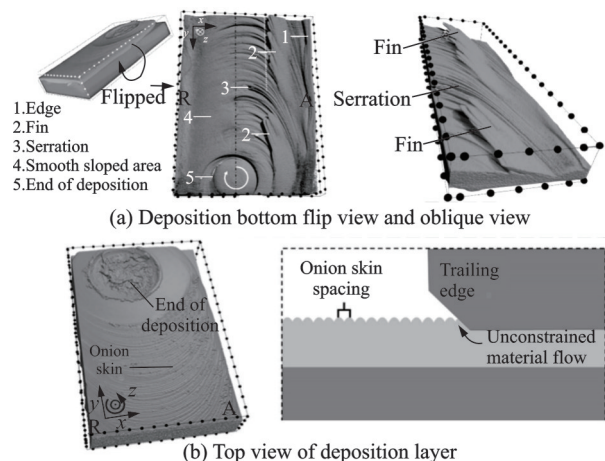


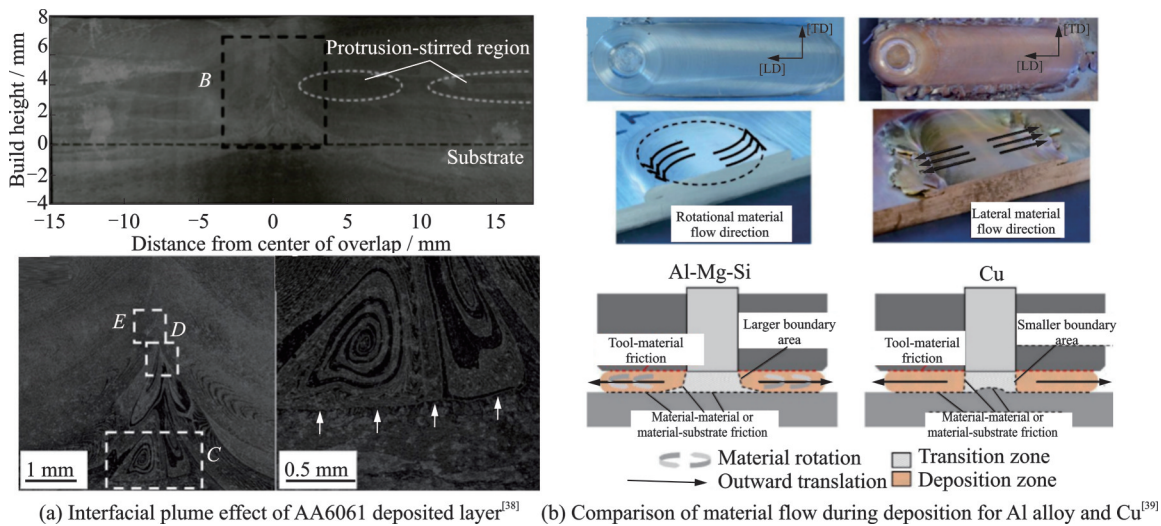
图2 沉积过程材料流动“洋葱环”形成轨迹^[27]

Fig.2 Trajectory of “onion ring” formation for material flow during deposition^[27]

动情况,搅拌工具通过摩擦热软化原料和基材,可视化光栅观察到了形成沉积羽流的现象,如图 3(a)所示。局部热并不会降低基材的整体力学性能,这样可以防止材料向下流动并产生约束。同时,由于基底和较硬的工具头之间的垂直约束,原料受到更大的热不稳定性影响,并开始从工具中心径向流动。当材料流出工具头的直径范围时,会产生飞边。在沉积物的返回路径上,这些飞边对横向材料流动起到额外的约束作用。这导致主动沉积的材料和平行材料在沉积过程中相互对抗,从而通过系统对材料施加的力使平行沉积的每一侧朝向衬底方向下移。

在涉及异种材料时,由于材料属性的不同,在沉积过程中所展现的流动特性也各不相同。

Griffiths 等^[39]研究了 Cu 和 Al-Mg-Si 合金在 AFSD 过程中的流动情况,在 Al-Mg-Si 合金的沉积区观察到明显的旋转运动,并且过量的进给料以环形飞边的形式离开沉积区,相反,Cu 的沉积区几乎没有观察到旋转运动,材料沿横向被推动,环形飞边以横移的方式离开沉积区域,如图 3(b)所示,由于增材过程中旋转物质流动会在沉积区的大部分区域产生额外的剪切力,因此 Al-Mg-Si 合金的变形比 Cu 更为严重,Cu 主要受到工具头和材料界面处的摩擦力。工具头和沉积材料的黏附系数不同,从而产生不同的剪切应力。黏附系数与材料特性有关,Al-Mg-Si 合金的黏着系数要高于 Cu,且能随着工具头转动,所以在沉积区可观察到明显的旋转运动。相反,Cu 的黏着系数较小,其主要的流动形式为滑动。



(a) Interfacial plume effect of AA6061 deposited layer^[38] (b) Comparison of material flow during deposition for Al alloy and Cu^[39]

图 3 AFSD 过程中材料流动情况
Fig.3 Material flow during AFSD process

除了对材料流动的宏观观察,研究人员还对材料流动过程进行了数值模拟研究,Stubblefield 等^[29]模拟了 3 种不同进给速率下材料沉积时的塑性应变情况,以展示材料混合流动和变形行为,如图 4(a)所示。3 种不同的进给速率之间存在差异,表明搅拌区可能存在进给速率阈值,该阈值将材料混合不足区与充分混合区分开。低进给速率无法向搅拌区内输入足够的材料以确保材料充分混合流动,而最佳进给速率可以向搅拌区内提供充足的物料流。然而,在过量的进给速率下,不仅不能促进材料流动混合,反而会因为飞边产生过多而造成浪费。Gotawala 等^[40]描述了 AFSD 过程中材料流动的路径和特性。通过基于 CFD 的建模框架,确定了材料颗粒的流动路径,该路径呈现出逐渐形成的圆形形状,如图 4(b)中所示的螺旋(3D)、螺旋线(2D)或两者组合。流动路径的深度和形状取决于

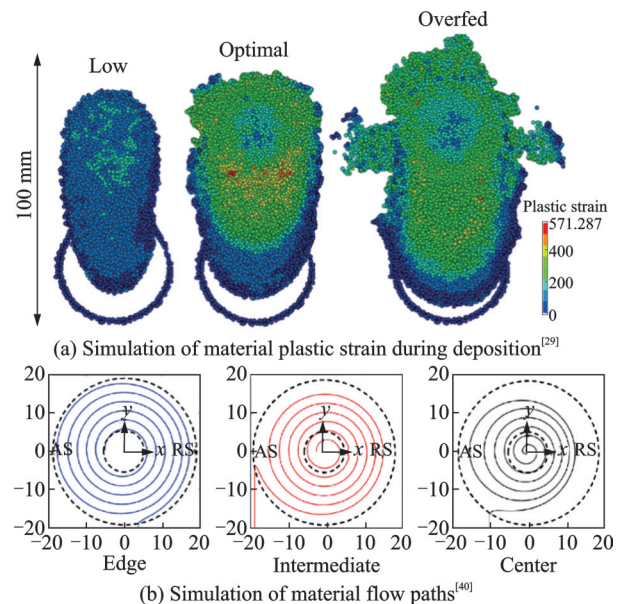


图 4 材料流动过程数值模拟
Fig.4 Numerical simulation of material flow process

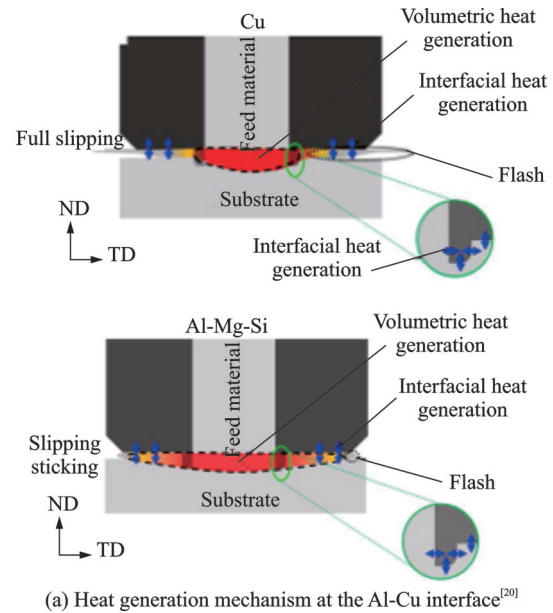
材料体素的初始位置和速度演化,不同位置的颗粒流动路径具有不同的几何形状和深度,中心体素的流动路径在 $x-y$ 平面上呈现出向下运动和圆周运动(螺旋形状),而边缘体素的流动路径主要由螺旋形状主导,半径随时间增加,但没有明显的向下运动。中间体素的流动路径介于两者之间,但更接近顶层。

AFSD过程中材料流动特点与工艺参数、工具头几何特征、温度和应力分布情况、沉积原材料本身属性均密切相关。目前材料流动研究停留于对材料外部的宏观观察和分析,对沉积层内部材料流动原位监测与分析以及在多因素耦合影响下的材料流动尚未有相关研究出现;在数值模拟方面,虽然已经提出了相关材料流动理论模型,但不够完整和精确,由于材料流动过程受多个因素的影响,因此建立准确的数学模型是一项挑战,并仍需要进一步结合实验验证和完善。

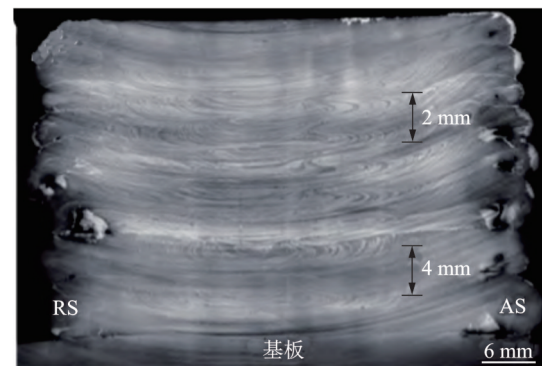
2.2 界面连接

沉积过程中界面连接区域的质量和性能直接影响整个沉积结构的强度、密实性和耐久性,沉积过程中界面连接又分为沉积层与基材的连接和沉积层间的连接。通过研究界面连接,可以优化工艺参数和材料选择,提高沉积效率和成本效益。

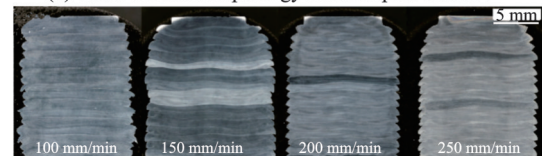
在沉积层与基材之间的界面连接方面,Perry等^[27]对搅拌摩擦沉积层中界面的形态学分析发现,沉积时所形成的界面为非平面界面,沉积中心显示出明显的界面混合。在沉积过程中,由于前进侧和后退侧出现不同程度的塑性流动,前进侧界面处产生了棱纹和锯齿,而后退侧界面表现为光滑的倾斜表面,形成微观机械互锁结构,该结构显著增强了沉积层与基材界面的结合强度。沉积过程中材料内部温度演化和产热机制也对界面连接质量的好坏起着关键作用。Garcia等^[20]通过使用原位监测方法直接揭示了AFSD过程中Al合金和Cu之间的界面发热机制。如图5(a)所示,研究发现在Cu的AFSD期间,沉积区的主要发热机制是界面摩擦,材料旋转主要发生在进料杆下方的材料中,工具头与沉积材料之间的界面呈完全滑移状态。在铝合金的AFSD过程中,工具头旋转导致沉积区域中的材料旋转,界面材料接触呈部分滑移状态。Martin等^[41]提出了利用AISI316L对AISI304进行表面涂敷式AFSD沉积的方法,他们观察到涂覆层和衬底材料之间界面清晰,沉积材料下方没有明显的热机影响区。仔细观察可以发现,界面处存在类似的局部混合,表明基底合金夹带进填充金属中,而且观察到的局部混合通常是短程的。通过腐蚀操作发现,界面之间存在明显的流线,可推断剪切混合对填充合金的局部耐腐蚀性有潜在有害影响。



(a) Heat generation mechanism at the Al-Cu interface^[20]



(b) Cross-section morphology of multi-pass additive^[30]



(c) Cross-section of multilayer deposited layers at different deposition rates^[42]

图5 沉积过程中产热机制与界面结合

Fig.5 Heat generation mechanism and interfacial bonding during the deposition process

在沉积层间的界面连接方面,杨新岐等^[30]研究了不同主轴转速下单道双层和单道九层6061铝合金增材试样的组织情况,研究结果发现,在连续摩擦挤压的热-力耦合作用下,沉积层间界面处呈现扩散冶金连接。同时,他们也发现沉积厚度 d 以及轴肩表面特征对界面结合状态有影响。图5(b)显示了不同层厚下沉积层截面形貌,当 d 增加时,轴肩对沉积层的摩擦加热作用会减小,从而导致界面间产生弱连接,削弱界面结合强度;反之,当 d 减小时有助于提高沉积层界面结合强度。此外,当工

具头上使用非等直径的轴肩时,轴肩的强烈摩擦挤压作用会使沉积层界面向下弯曲,并产生明显的宏观变形,这将进一步促进界面上下方的材料混合,有助于沉积界面的冶金连接并提高界面结合强度,但这也影响沉积过程中的工艺效率与稳定性。Rezaeinejad 等^[42]使用 SEM 对不同沉积速度下制造多层构件进行分析。如图 5(c) 所示,在较低的沉积速度(100 mm/min)下,沉积层之间存在大量的裂纹和未结合区域,这些裂纹和未结合区域通常出现在连续层之间的界面处。然而,在较高的沉积速度(250 mm/min)下,几乎没有观察到裂纹和未结合区域。笔者认为较低的打印速度导致了相对较低的平均法向力和平均工具头温度,限制了层间材料的相互扩散和混合,从而导致了裂纹和未结合区域的形成。相反,较高的沉积速度提供了更高的平均法向力和平均工具头温度,有利于改善层间材料混合和扩散,在沉积过程中,足够的温度和法向力是减少沉积层间裂缝和缺陷产生的关键因素。

沉积原材料的形态也对沉积后的界面结合有显著影响。Chaudhary 等^[43]使用了专门设计的不产生任何飞边的非消耗性工具,并采用粉末进料的方式获得多层沉积材料。与采用棒状进料方式获得的沉积层相比,粉末形式获得的沉积层表面光洁度更好。它能与随后新增的沉积层产生强烈的冶

金结合,且粉末形式获得的沉积层间界面无裂纹,表明冶金结合力强。在采用棒状进料方式获得的沉积物中,在层之间的界面可以观察到微裂纹,由于产生飞边和表面光洁度差,界面粘合较弱,抑制了后续层的塑性材料与沉积层形成强界面粘结。

此外,AFSD 工具头的几何特征也会影响界面材料混合,AFSD 技术使用类似空心圆柱的无搅拌针工具头,文献[44-47]中研究了两种不同几何特征的 AFSD 工具头:端部平直无突起状和端部有特征突起状,如图 6 所示。使用平直工具头时,由于缺乏外部的搅拌作用,进料与基体或先前沉积层的相互作用限制了塑化材料的向下混合流动。在这种情况下主要出现径向扩散,这会扩大层间界面,但不利于材料的层间混合^[10]。而使用有特征突起状的工具头时,“水滴”状突起部分插入基材或先前沉积层,工具头的旋转为材料提供了额外的搅拌作用,以实现更好的层间混合效果。对于低温合金材料(如 Al/Mg/Cu 合金)的沉积,适用于无突起的工具头,高温合金(如镍基合金)更适合端面有突起的工具头。增加工具头突起的数量和大小会导致更多垂直物质流动和混合,从而产生更复杂的三维界面流动特征,例如鳍状、锯齿状和叶状。此外,在存在突起的情况下,由于更强的搅拌作用飞边宽度会减小^[48]。

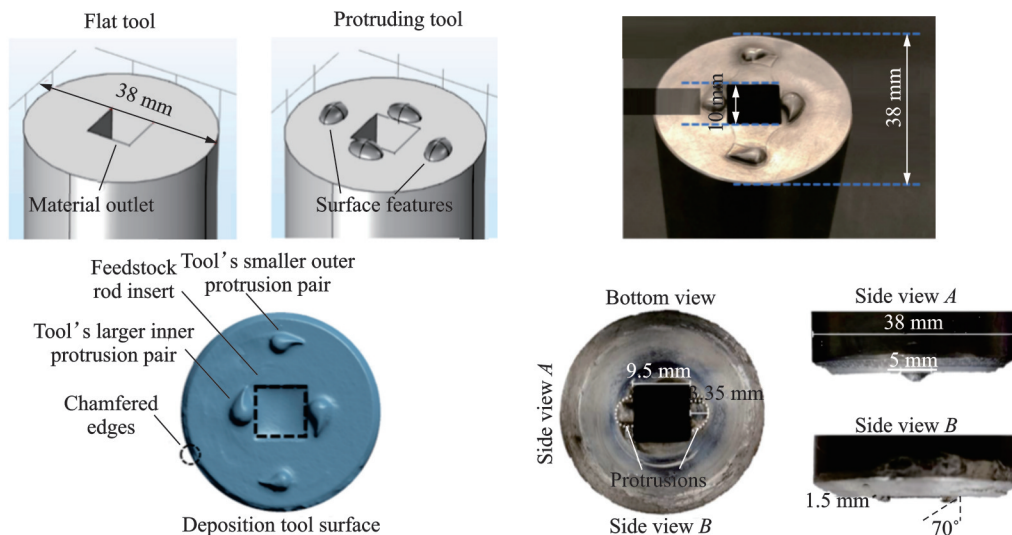


图 6 AFSD 平直工具头与“水滴”突起工具头^[44-48]

Fig.6 AFSD flat tool head and “teardrop” protruding tool head^[44-48]

综上,沉积层与基材之间所形成的界面为非平面界面,存在明显的界面混合,界面之间存在微观互锁结构。在连续摩擦挤压的热-力耦合作用下,沉积层间界面呈现扩散冶金连接。以粉末作为进料时,沉积层表面面貌光洁,且层间结合良好。端面带突起的工具头会对塑性材料流施加额外的搅拌作用,可以实现较好的层间混合效果。

2.3 微观组织演变

与基于熔融的增材制造技术相比,AFSD 可以产生细小的等轴晶粒。目前,关于 AFSD 过程中微观组织演变的机制主要集中在研究大剪切应力和轴向力下材料发生剧烈塑性变形、连续或不连续动态再结晶以及晶粒平均尺寸减小和出现等轴细晶粒等方面。根据表 2 的数据总结,笔者观察到不

同合金种类的原始晶粒尺寸与沉积后晶粒尺寸之间的对比。沉积后这些合金的晶粒尺寸显著减小。通过AFSD技术晶粒尺寸得到有效控制,实现了晶粒尺寸的细化。

表2 不同种类合金沉积前后晶粒尺寸对比

Table 2 Comparison of grain size before and after deposition of different types of alloys

合金种类	原始晶粒尺寸/ μm	沉积后晶粒尺寸/ μm	晶粒细化程度/%
6061 ^[49]	163.5 \pm 96.2	8.5 \pm 3.1	94.8
AA7075 ^[50]	100	4.77	95.2
AA2024 ^[27]	57.2	4.9	91.4
Inconel 625 ^[23]	30	0.5	98
Al-Mg-Si ^[39]	113	10~16	88.5
Ti6Al4V ^[51]	—	17~26	—
AZ31 ^[52]	13.5	5~6	63
SS316 ^[53]	22.22 \pm 4.41	5.0 \pm 0.5	77.5

AFSD沉积工艺参数是影响沉积后微观组织演变的重要因素之一,通过调节AFSD技术中的工艺参数,可以对最终的微观组织进行精细调控。如图7所示,Griffiths等^[39]研究了不同 ω/v 比值对AA6061-T6沉积物微观结构演变的影响。实验中 F/v 均保持在1:3,并使用了3组不同的 ω/v 来表征热输入的大小,分别用“低”($\omega=200$ r/min, $v=1$ mm/s, $\omega/v=200$)、“混合”($\omega=600$ r/min, $v=1$ mm/s, $\omega/v=600$)和“高”($\omega=600$ r/min, $v=3$ mm/s, $\omega/v=200$)表示。发现在“低”和“混合”参数下,沉积铝合金均出现明显晶粒细化(平均晶粒尺寸由113 μm 下降至10和16 μm)。从晶粒取向差分布来看,沉积层中小角度晶界(LAGB)比例提升较多,在3组参数下相应增加了32.2%、42.7%和77.4%。这些数据表明在热输入较少的“低”参数沉积中存在更多的大角度晶界(HAGB),大角度晶界占比越高,动态再结晶程度越好。因此,在“低”参数下再结晶程度最完全。Phillips等^[26]也同样定义了类似“慢速”和“快速”参数对铝合金沉积层的影响,在“慢速”和“快速”参数下,平均晶粒尺寸为(15 \pm 4) μm ,尺寸减小93%。在“快速”参数下不连续动态再结晶过程中,大角度晶界的形成和原始晶粒的变形也可能使晶粒的细化,这与在“慢速”参数中获得的晶粒相类似。对于“快速”和“慢速”沉积,都表现出晶粒尺寸转变。然而,与“快速”沉积相比,观察到的“慢速”沉积中再结晶的微观结构更为明显。这可以归因于在“快速”的沉积过程中发生的剪切应变和黏度降低。Rivera等^[54]也记录AFSD沉积AA2219过程中类似的90%晶粒度减小率,但是最终晶粒尺寸较小。这种再结晶机制被认为与初始晶粒结构的分布有关。

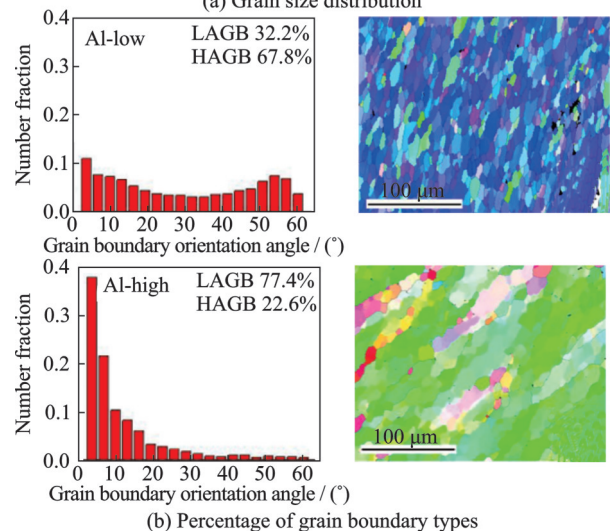
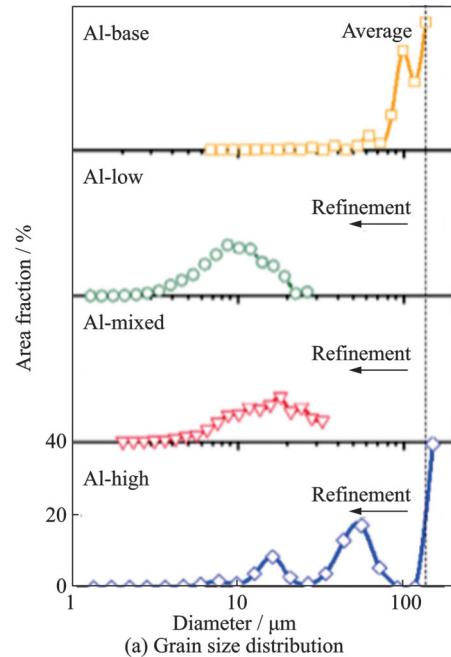


图7 沉积后Al-Mg-Si合金的微观结构表征^[39]

Fig.7 Microstructural characterisation of Al-Mg-Si alloy after deposition^[39]

Agrawal等^[53]探究了工艺参数对SS316搅拌摩擦沉积增材中微观组织演变的影响。在沉积进给速率和沉积层数不变的情况下,他们设置了3组不同的工具头转速,高温下强烈的剪切变形导致了沉积材料的回复、再结晶和组织变化。研究结果发现,随着工具头转速的增加,沉积过程中的热输入也随之增加,而随着刀具移动速度的增加,热输入则减少。热输入越高,晶粒尺寸越大。此外,剪切变形还导致沉积材料中产生了如图8所示的(111)变形织构,较低的主轴移动速度会保持更长时间的峰值温度,从而导致更明显的织构纹理,其中Max表示具有最大晶粒取向差异的区域,即晶粒取向的变化较大。随着沉积层数的增加,底层区域会由于重复的热循环引起晶粒生长。同样,笔者将AFSD技术应用于亚稳高熵合金的增材制造中,也观察到

类似的规律^[55]。Farabi 等^[56]在对 Ti6Al4V 进行搅拌摩擦沉积增材时发现,通过降低沉积温度可以实现显著的微观组织结构细化。为了降低沉积温度,笔者考虑增加移动速率和降低主轴速度。进给速

率和横移速度之间的比率保持在 0.44 不变,以获得相似的体积沉积速率。另外,在较低的主轴转速和沉积温度下,Ti6Al4V 中 β 晶粒显著细化,同时减小 α 板条尺寸并抑制 α 晶界形成。

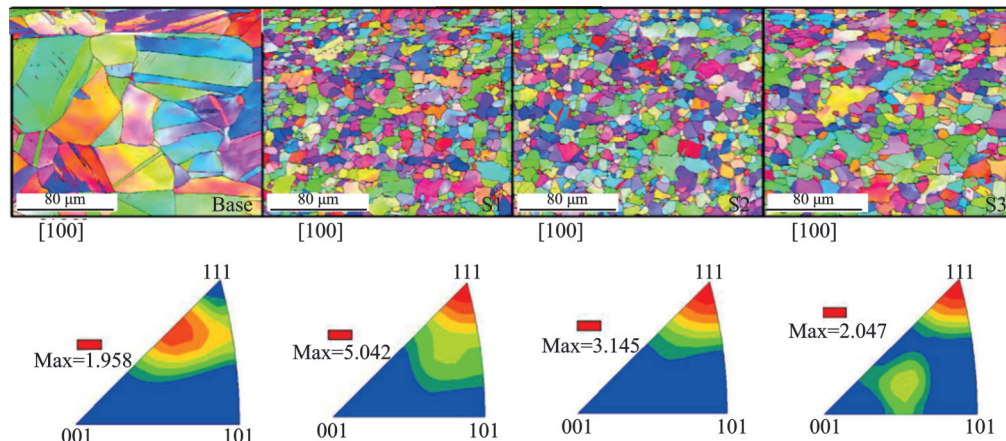


图 8 不同工艺参数下沉积态 SS316 的晶粒和织构情况^[53]

Fig.8 Grain and texture of SS316 in the as-deposited state under different process parameters^[53]

Perry 等^[27]研究了 AA2024 和 AA6061 铝合金连续沉积物界面处发生的微观组织和形态变化。微观结构分析显示,在整个 AA2024 沉积过程中,完全重结晶的微观结构分布均匀,这表明沉积过程中温度和变形的一致性。然而,AA6061 微观结构显示出部分重结晶区域和沉积物微观结构的不均匀性。Perry 等^[44]还以示踪剂为原料,探究了搅拌摩擦沉积的微观组织演化机理,量化了 AFSD 过程中的应变,并建立了晶粒尺寸与应变之间的定量关系,研究发现,在沉积过程中连续动态再结晶(Continuous dynamic recrystallization, CDRX)为主要的再结晶机制,而 CDRX 通常由几何动态再结晶(Geometric dynamic recrystallization, GDRX)进行,其特征是形成细长且具有锯齿状大角度晶界的细晶粒,晶界会夹断原始晶粒形成等轴亚晶粒,这是位错逐渐积聚的结果,晶粒间的取向差变大,晶界由亚晶界依次向小角度晶界、大角度晶界转变。

原材料本身的物理化学属性同样是定义 AFSD 后微观组织质量的关键因素之一,由于原材料的热机械属性不同,材料在沉积时混合,赋予了沉积层不同的再结晶能量,从而影响后续沉积层的再结晶程度。合金元素含量以及内部相(如沉淀物)的分布和占比也会影响沉积层微观结构。文献^[52]利用 AFSD 技术制备了 AZ31B 镁合金固态沉积件,发现在沉积样中晶粒表现出更加紧密的粒度分布,大多数晶粒尺寸分布在 0~10 μm 范围内。根据相关参数计算,新沉积的材料中产生了具有细晶粒的再结晶微观结构。Avery 等^[57]对 AFSD 修复 AA7075 铝合金后的显微组织变化做了评价,发

现在沉积过程中热输入作用下,晶界处析出的 Zn-Mg-Cu 沉淀物被溶解并重新析出了额外的强化相 η' 和 $\eta(\text{MgZn}_2)$ 。在热处理后,晶粒内部可观察到直径为 100~200 nm 的析出相颗粒分布,晶界区域出现 15~30 nm 的析出物。Phillips 等^[26]在 TEM 明场图像研究了 AA6061 沉积层的沉淀析出行为。这与原料中的沉淀行为不同,在高于 240 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下,棒状沉淀析出物 $\beta''(\text{Mg}_{17}\text{Si})$ 会溶解。随后的再析出导致独立的 Mg 和 Si 原子被 Mg-Si 的共簇取代。由于沉积过程中的显著剪切变形和均质化效应,团簇更小且分布均匀。

在 AFSD 微观组织演变多尺度多物理场的模拟仿真方面,文献^[29,40]建立了基于 CFD 的模型框架,用于量化沉积中重要物理变量(如温度、应变率、应力等)。通过颗粒跟踪材料流动路径,追溯热变形历史,揭示了 AFSD 背后的热加工条件,这为连续动态再结晶后的微观结构均匀性提供了新的理论基础。Sharma 等^[33]开发了一种伪机械热模型,该模型的适用性在于能够预测 AFSD 过程中合理的变形机制和晶粒尺寸演变,并且考虑了多层由于摩擦和塑性耗散而产生的热量,将工艺参数与微观结构演变相联系,探究热机械作用对于沉积过程中微观结构演变的影响。

2.4 力学性能变化

AFSD 沉积物的质量主要通过其抗拉强度、硬度和疲劳强度等来评估。沉积后材料所表现出的力学性能和服役寿命的长短,决定了材料能否应用于实际工程场景,表 3 总结了各种合金在 AFSD 前后的力学性能^[50-51,53,58-60],其中,YS、UTS、A 分别表

示屈服强度、极限抗拉强度和延伸率。在AFSD中,材料流动状态、界面连接情况以及动态再结晶形成等轴细晶微观组织都是影响沉积后材料力学性能的重要因素,其中沉积层的强度对工艺参数表现出很强的依赖性,根据霍尔-佩奇强化机制,通过提高晶粒度增加晶界数量阻碍位错运动从而提高强度,位错的堆积也会增加沉积层的强度,但部分合金由于强化相高温溶解或粗化使力学性能有所降低。

表3 不同种类合金在AFSD前后拉伸性能

Table 3 Tensile properties of different alloys before and after AFSD

合金	加工条件	YS/MPa	UTS/MPa	A/%
AA6061 ^[58]	LD	61.3±6.4	137.1±14.8	—
	BD	63.9±2.7	129.9±3.5	—
AA7075 ^[50]	基材	525	583	19
	沉积后	140	295	16
5083-H112 ^[59]	基材	186.8	304.0	17.8
	沉积后	179.4	349.6	19.4
SS316 ^[53]	基材	406±5	600±3	48
	沉积后	410-425	640-663	70-79
Ti6Al4V ^[51]	沉积后	1050±25	1140±20	7±1
GW83K ^[60]	基材	218.3±3.9	284.7±4.1	12.2±1.6
	沉积后	229.8±6.8	284.4±2.8	9.0±2.2

张明等^[61]探究了主轴转速对2219铝合金沉积增材组织和性能的影响。在200 r/min、300 r/min和400 r/min 3个不同转速下,与合金母材相比,沉积态组织相对均匀,无明显组织缺陷,晶粒得到明显

细化。沉积过程中温度越高,沉积层晶粒尺寸越大。沉积层极限抗拉强度范围为265.6~312.5 MPa,为母材的58%~68%;而沉积层的伸长率优于母材,可达到母材的278%~294%。晶粒尺寸和极限抗拉强度与主轴转速呈正相关,断裂伸长率与主轴转速呈负相关。如图9(a)所示,Agrawal等^[53]发现在4种不同AFSD工艺参数下,SS316沉积材料的屈服强度和极限抗拉强度适度提高,屈服强度为(415±10) MPa,延展性为(75±5)%,对比基材和沉积样品,AFSD样品的总伸长率显著提高,材料的延展性几乎提高了1.5倍,但样品硬度沿沉积方向自上而下逐渐降低。Shen等^[62]使用AFSD方法制备AA5B70铝合金单层沉积构件,他们发现沉积层横截面的硬度呈现梯度分布,与边缘区域相比,中心区域的硬度降低了10%。在对沉积层的横向和纵向试样进行拉伸时,出现应变分布不均匀的现象,横向和纵向试样的强度分别下降了20%和37%,而伸长率增加了16%和42%。此外,所有的试样都出现韧性断裂。

Anderson等^[63]对沉积后AA2219铝合金力学性能做了表征,给出了参数化的研究结果,确定了局部力学性能最佳的AFSD工艺参数为 $\omega=200$ r/min, $v=101.6$ mm/min,与锻造AA2219-T87进行比较,沉积后AA2219晶粒尺寸细化约5.5倍,但极限抗拉强度降低了约75%,屈服应力降低了170%,伸长率增加了87%,尽管AFSD使晶粒细化产生细晶强化作用,但沉积后AA2219整体机械性能是下降的,因为在沉积层中缺乏可用于提供强化的弥

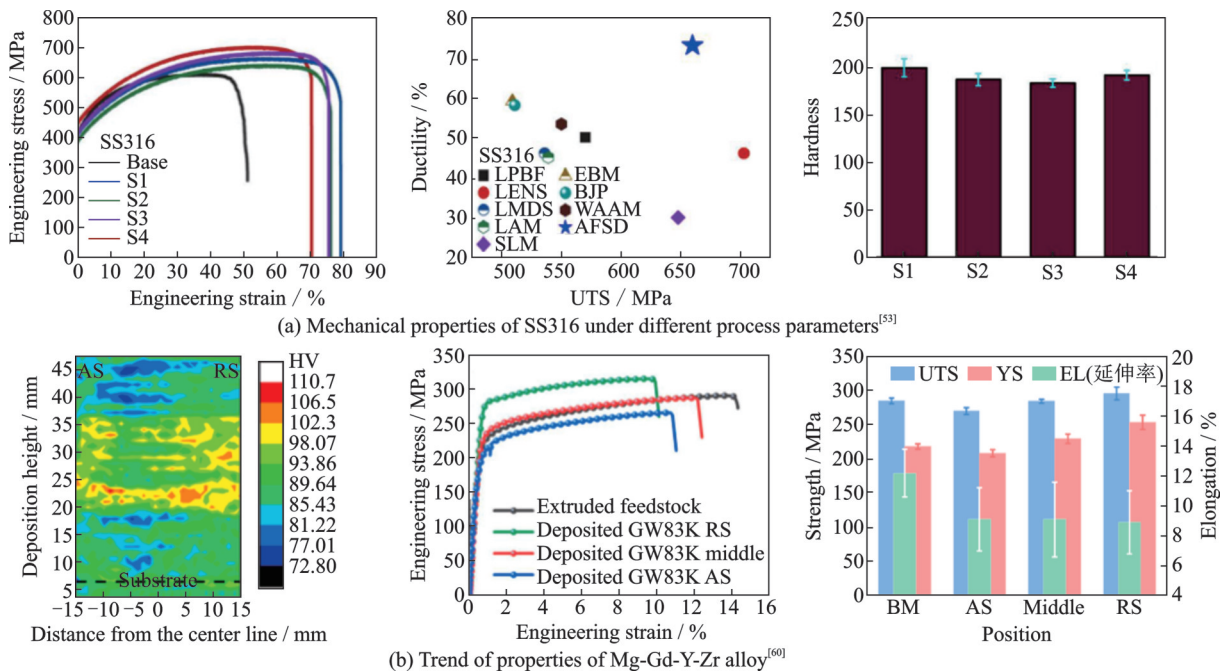


图9 沉积组织力学性能变化

Fig.9 Variation of mechanical properties of deposited tissues

散 Al_2Cu 相,这使得沉积材料在给定的应变振幅下难以抵抗变形,也对应变下的疲劳累积损伤速率造成负面影响。Li 等^[64]研究了 5083Al-Mg 合金沉积增材后的力学性能情况,发现 AFSD 后 5083Al-Mg 合金细化了晶粒,二次相颗粒的尺寸和数量也被细化,沉积层析出均匀的小规模二次颗粒,表现出强度和出色延展性的良好组合。

Luo 等^[60]使用高沉积速率 AFSD 制备了高性能 Mg-Gd-Y-Zr 合金的多层沉积物,探究了沉积物的微观结构和力学性能的异质性。研究发现,在沉积件的大部分区域都产生了均匀细化的等轴晶粒,晶粒尺寸 $4\sim 7\ \mu\text{m}$,然而沉积层的硬度分布非常不均匀,其中图 9(b) 显示后退侧的硬度明显高于前进侧和中间部分,但整体硬度仍然高于母材。极限抗拉强度和屈服强度从前进侧到中心再到后退侧的方向上呈上升趋势,最终沉积物的强度与母材相当,但断裂伸长率略低于母材。在沉积过程中, Mg-Gd-Y-Zr 合金表现出时效反应,主要析出 $Mg_{24}Y_5$ 和 Mg_5Gd 弥散强化相,除此之外,通过霍尔-佩奇关系可计算出不同沉积区域的晶粒细化对强度贡献值,发现不同区域晶粒细化的差异是最终沉积层力学性能异性的主要原因。Ghadimi 等^[47]使用 AFSD 制造 Al2050 合金构件,并测量沉积成型部件各个区域的硬度值。结果显示 Al2050 构件具有独特的硬度分布,在零件横截面上,沿沉积方向从上到下,显微硬度值逐渐减小,顶层的硬度值最高 $[(118.16\pm 2.90)\text{HV}]$,但明显小于原料的硬度值 $[(192.32\pm 6.52)\text{HV}]$ 。原料中合金元素均匀分散在基体中,在 AFSD 热机械和热循环作用下,沉积区域出现了 3 种元素 (Mn/Cu/Fe) 的大尺寸二次相析出,以及特定沉积区域温度的波动变化,这些因素影响了沉积微观组织,导致了零件内部硬度值变化。

3 技术应用与扩展

3.1 大型构件整体制造

由于工具头尺寸因素和使用 AFSD 技术制造的构件具有类似锻造加工的性能,AFSD 适用于大型构件整体制造,尤其适用于米级及以上的规模。大型整体结构件的制造对于国防工业具有重要意义,如图 10(a) 所示, MELD 公司已经使用 AFSD 技术成功制造出两个大型铝合金环形构件,最大圆环直径可达 $3.05\ \text{m}$ ^[28]。美国陆军利用 AFSD 技术制造了军用无缝船体部件,尺寸达到 $6\ \text{m}\times 10\ \text{m}\times 4\ \text{m}$,以制造陆军地面车辆中常见的大型金

属部件。图 10(b) 展示的是使用 AFSD 技术制造的航空用大尺寸网格加强壁板和大深度圆环件,这些零件整体铸造困难,AFSD 工艺可简化铸造工艺的复杂性,缩短加工周期。大型构件整体制造的挑战不仅在于制造速率和技术可扩展性的提升,更应避免在制造过程中构件因热应力产生严重翘曲。相比于熔融增材,AFSD 技术具有较小的热梯度和低残余应力,这一优势在制造大型薄板部件上得到体现。Hartley 等^[45]研究表明,在制造大型汽车覆层加强结构上,AFSD 技术能够实现均匀的厚度覆盖,不会使钣金局部弯曲、起皱或损坏,覆层结构具有高强度和良好的延展性。微观结构分析显示,在连接界面存在均匀的晶粒结构,由于没有材料的熔化,制造过程中产生的残余应力很小,界面处的热效应仅为材料弹性极限的一小部分。



图 10 使用 AFSD 技术生产的大型构件

Fig.10 Large components produced using AFSD technology

3.2 高性能涂层

过去对于 AFSD 的研究主要集中在合金材料的制造方面,很少有研究使用 AFSD 制造金属材料涂层和复合材料涂层^[65],这是因为 AFSD 的加工特性不会产生类似于 FS 中棒材的多余飞边,并且可以通过快速更换进料实现连续涂覆,不会因为进料消耗而导致涂覆层中断。图 11 展示了 Wu 等^[32]使用高速 AFSD 改善纳米金刚石 (ND) 增强铝基复合材料的组织分布,他们在柔软的 AA1060 基板上沉积了 AA6061 铝合金和 0.5%ND (重量百分比) 增强的 AA6061 铝基复合材料 (ND/AA6061),并对两类涂层的微观结构、析出物、显微硬度和摩擦学性能进行了分析和比较。Aghaja-

ni等^[66]开发了一种专注于聚合物基体纳米复合材料的粉末搅拌摩擦工艺,结合了AFSD工具头和FSP的基本原理,他们通过搅拌摩擦作用将胶体氧化铝纳米颗粒原位注入增塑聚合物中,制造出纳米聚碳酸酯复合材料。研究发现,将约8%的氧化铝纳米颗粒嵌入沉积物中,样品硬度增加9%,横向和纵向抗冲击性能提高111%和127%。Hartley等^[45]利用AFSD在铝合金板材上进行选区沉积涂覆,并评估了涂覆层的质量在实际应用中的可行性,他们发现,当基材厚度为1.4 mm时,AFSD可以产生没有表面缺陷或界面缺陷的涂敷层,由于界面处发生冶金结合,弯曲测试中未发现界面分层现象。虽然界面处由于材料强烈混合和摩擦加热,显微硬度有所降低,但涂覆后仍保持面内优良延展性,涂层结构极限抗拉强度为250 MPa,伸长率为30%。

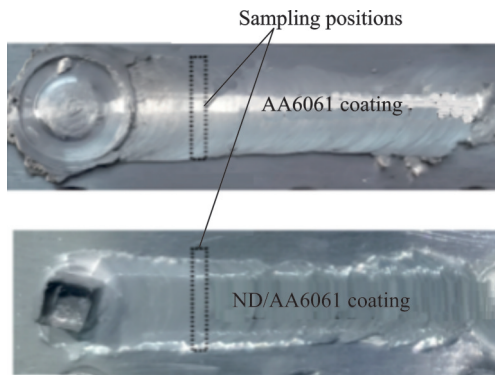


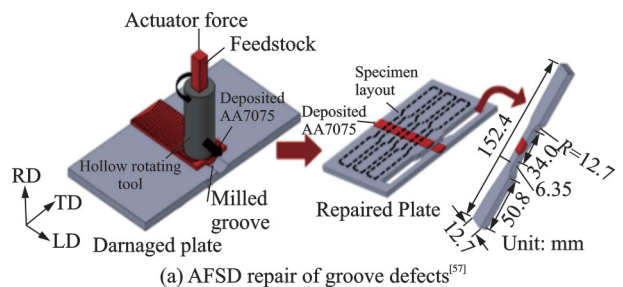
图11 纳米增强AA6061涂层^[32]

Fig.11 Nano-enhanced AA6061 coating^[32]

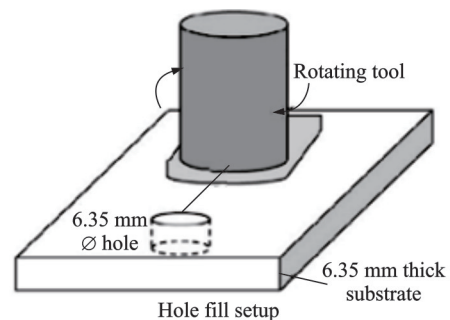
3.3 表面缺陷修复

AFSD基于连续的塑性变形以及沉积层界面之间产生出色的冶金结合,更适用于体积损伤修复操作,可以消除孔洞、裂缝、磨损等缺陷。如图12(a)所示,Avery等^[57]研究了通过AFSD修复AA7075铝合金凹槽缺陷的过程-结构-性能关系,研究结果显示,修复后AA7075板材在热处理后能够恢复类似于母材的力学性能,热处理使得强化相得以恢复,从而实现了与母材相当的屈服强度和极限抗拉强度。此外,热处理还使得粒界区域的大颗粒相减少,从而提高了材料的延伸率。研究还发现,AFSD修复的材料在微观结构上表现出细化的晶粒和流动线,这可能是由于热处理过程中的再结晶作用。Martin等^[67]提出了使用6061-T6原料填充6061-T651铝合金板凹槽的AFSD沉积修复策略,对3种不同几何形状的裂缝(“V”形、“R”形和“S”形)修复展开研究。修复区微观结构表现出严重的变形,原始沟槽几何形状也发生变形。在低于焊接温度的温度下混合时,界面呈现出锯齿状的图

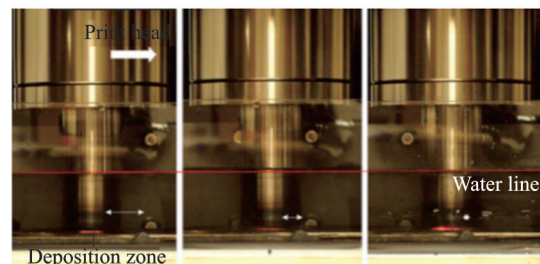
案特征。图12(b)展示了Griffiths等^[68]基于AFSD技术对7075铝合金进行预填充孔洞修复,提出一种沉积材料和孔边缘之间相互作用的机制。在搅拌摩擦沉积修复中,施加在沉积材料上的应力传递到基板上,导致其表面层与沉积材料一起大量流动。沿着搅拌区边缘基材经历较低程度的变形,有效地形成热机械影响区。当沉积材料被搅拌头推动向孔洞移动时,孔的顶部边缘与搅拌区的变形前沿相互作用,产生变形并最终随着前进的材料移动。Chou等^[69]使用AFSD多层沉积修复1080钢板凹槽缺陷,并提供了不同钢合金沉积修复的可视化表征和相关硬度测量。研究发现,在缺陷区域,沉积物能完全填充基材并与之粘合。沿修复样横截面一直延伸到基材,在测量其维氏硬度值变化时,发现与室温21℃下进行的沉积修复相比,在329℃的预热条件下,热影响区的维氏硬度峰值下降。此外,Griffiths等^[70]将AFSD技术运用在水下,图12(c)表明在摩擦工具头和基板浸水的条件下,成功实现了对304不锈钢的搅拌摩擦沉积增材,这也预示该技术将来可运用在水下复杂环境下工程构件的修复。



(a) AFSD repair of groove defects^[57]



(b) AFSD repair of surface hole defects^[68]



(c) AFSD underwater material additions^[70]

图12 AFSD技术应用

Fig.12 Application of AFSD technology

4 总结与展望

4.1 总结

AFSD 过程中材料受热软化并沿进给方向向前流动,总体流动趋势呈漩涡状并从工具头前进侧流向后退侧,且有向轴肩中心流动的趋势,沉积区域材料呈非对称流动,向前流动的材料和向后流动的材料相互交织。冶金结合与微观机械互锁是沉积过程中的主要连接界面机制,端面有特征突起状的工具头在沉积过程中可赋予额外搅拌作用,有利于层间混合。AFSD 过程中的变形机理是连续动态或不连续再结晶,小角度晶界向大角度晶界转变,晶粒平均尺寸减小。沉积层质量受工艺参数的影响,具体取决于热输入,低的热输入(ω/v)能够产生更明显的再结晶结构,但过低的热输入会导致不连续的再结晶,不同原材料选择的 ω/v 也不同。动态再结晶导致沉积层力学性能变化,不同种类合金在沉积后拉伸强度变化趋势不同,但沉积层伸长率有所增加。对于铝合金来说,在一定工艺参数条件下,热输入将铝合金中的强化相溶解,沉积层中缺乏可用于提供强化的弥散相,虽然晶粒尺寸有所细化,但沉积层整体强度有所下降,前进侧与后退侧、沉积层层间硬度分布不均匀。在实际应用方面,AFSD 能制造高强度涂层和复合材料涂层,有效修复孔洞、裂缝和磨损等缺陷,低热梯度和低残余应力的优势使其适用于大型构件整体制造。

4.2 展望

(1) 目前 AFSD 研究主要集中在分析单一工艺参数对沉积后组织和性能的影响,缺乏对多个工艺参数之间相互耦合的综合考虑。在组织特征和性能评估方面,当前更多关注沉积后构件的组织性能表征,对于增材过程中组织形成和演变的动态过程研究较少,对于不同沉积阶段工艺-组织-性能之间的关系了解不足。对增材过程中整体定性研究转变为精确定量研究是当前 AFSD 技术亟待突破的方向。

(2) 在实验过程中很难探测到 AFSD 过程中原位变形条件,如每层沉积物的温度、应力应变、材料流动等,因此对沉积过程的深入数值模拟可在探寻不同加工条件下各种原料的原位参数方面发挥重要作用。基于计算流体力学或固体力学的物理建模和模拟是对实验的补充,可以成为未来重要的研究领域。

(3) 工具头几何特征是影响沉积层材料流动和界面混合的核心要素之一,探索优化工具头形状、尺寸和表面特性,以促进均匀的材料流动和分布,寻找最佳设计以实现高质量的界面连接。研发

先进的监测系统,实时监测工具头与材料之间的接触状态、温度分布、材料流动速度等参数。通过反馈控制实现对工具头几何特征的实时设计调整,以控制优化沉积层的质量和性能。

(4) 通过对进给材料进行工程设计,功能梯度材料、分级材料和异质结构材料的固态增材制造将成为可能。此外,可将人工智能引入 AFSD 加工过程,将基于物理的策略和数据驱动的策略相结合,有效地实现沉积质量控制和工艺优化。

参考文献:

- [1] TAN C, LI R, SU J, et al. Review on field assisted metal additive manufacturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 189: 104032.
- [2] ZHU Z, HU Z, SEETHI L, et al. Recent progress on the additive manufacturing of aluminum alloys and aluminum matrix composites: Microstructure, properties, and applications[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 190: 104047.
- [3] MANJHI S K, SEKAR P, BONTA S, et al. Additive manufacturing of magnesium alloys: Characterization and postprocessing[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2024, 7(1): 184-213.
- [4] RATHEE S, SRIVASTAVA M, PANDEY P M, et al. Metal additive manufacturing using friction stir engineering: A review on microstructural evolution, tooling and design strategies[J]. Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021, 35: 560-588.
- [5] PRABHAKAR D A P, SHETTIGAR A K, HERBERT M A, et al. A comprehensive review of friction stir techniques in structural materials and alloys: Challenges and trends[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 3025-3060.
- [6] 石磊, 李阳, 肖亦辰, 等. 基于搅拌摩擦的金属固相增材制造研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(1): 1-14.
SHI Lei, LI Yang, XIAO Yichen, et al. Research progress of metal solid phase additive manufacturing based on friction stir[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(1): 1-14.
- [7] NI J, SUI Y, LIU H, et al. Applications of additive manufacturing in foreign aerospace propulsion systems [J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(3): 144-146, 152.
- [8] URHAL P, WEIGHTMAN A, DIVER C, et al. Robot assisted additive manufacturing: A review[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019,

- 59: 335-345.
- [9] RENJITH S C, PARK K, OKUDAN KREMER G E. A design framework for additive manufacturing: Integration of additive manufacturing capabilities in the early design process[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, 21(2): 329-345.
- [10] MUKHOPADHYAY A, SAHA P. A critical review on process metrics-microstructural evolution-process performance correlation in additive friction stir deposition (AFS-D)[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022, 44(9): 422.
- [11] MISHRA R S, HARIDAS R S, AGRAWAL P. Friction stir-based additive manufacturing[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2022, 27(3): 141-165.
- [12] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM J C, et al. Friction stir butt welding: International Patent Application No. Pct/Gb92/02203, GB patent application No. 9125978.8[P]. 1991-02-20.
- [13] SHEN Z, YANG X, ZHANG Z, et al. Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints[J]. *Materials & Design*, 2013, 44: 476-486.
- [14] GENG P, MA Y, MA N, et al. Effects of rotation tool-induced heat and material flow behaviour on friction stir lapped Al/steel joint formation and resultant microstructure[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2022, 174: 103858.
- [15] CHEN H, MENG X, CHEN J, et al. Wire-based friction stir additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 70: 103557.
- [16] KALLIEN Z, ROOS A, KNOTHE-HORSTMANN C, et al. Temperature-dependent mechanical behavior of aluminum AM structures generated via multi-layer friction surfacing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 871: 144872.
- [17] KANDASAMY K. Solid state joining using additive friction stir processing: US201514640077 [P]. 2016-12-06.
- [18] SCHULTZ J P, CREEHAN K. System for continuous feeding of filler material for friction stir welding, processing and fabrication: US8875976[P]. 2014-11-04.
- [19] SRIVASTAVA M, RATHEE S, MAHESHWARI S, et al. A review on recent progress in solid state friction based metal additive manufacturing: Friction stir additive techniques[J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2019, 44(5): 345-377.
- [20] GARCIA D, HARTLEY W D, RAUCH H A, et al. In situ investigation into temperature evolution and heat generation during additive Friction stir deposition: A comparative study of Cu and Al-Mg-Si[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34: 101386.
- [21] 赵剑峰, 谢德巧, 梁绘昕, 等. 金属增材制造变形与残余应力的研究现状[J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(1): 1-6.
- ZHAO Jianfeng, XIE Deqiao, LIANG Huixin, et al. Research progress of monitoring and control technology for metal additive manufacturing [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 51(1): 1-6.
- [22] CALVERT J R. Microstructure and mechanical properties of WE43 alloy produced via additive friction stir technology[D]. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2015.
- [23] RIVERA O G, ALLISON P G, JORDON J B, et al. Microstructures and mechanical behavior of inconel 625 fabricated by solid-state additive manufacturing [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 694: 1-9.
- [24] KARTHIK G M, RAM G D J, KOTTADA R S. Friction deposition of titanium particle reinforced aluminum matrix composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 653: 71-83.
- [25] GRIFFITHS R J, PERRY M E J, SIETINS J M, et al. A perspective on solid-state additive manufacturing of aluminum matrix composites using MELD[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(2): 648-656.
- [26] PHILLIPS B J, AVERY D Z, LIU T, et al. Microstructure-deformation relationship of additive friction stir-deposition Al-Mg-Si[J]. *Materialia*, 2019, 7: 100387.
- [27] PERRY M E J, GRIFFITHS R J, GARCIA D, et al. Morphological and microstructural investigation of the non-planar interface formed in solid-state metal additive manufacturing by additive friction stir deposition [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 35: 101293.
- [28] MELD Manufacturing Corporation. MELD prints 10-foot aluminum cylinder-open-air printing process used to create large cylinder with off-the-shelf aluminum [EB/OL]. (2020-08-19). <https://www.digitalengineering247.com/article/meld-prints-10-foot-aluminum-cylinder/>.
- [29] STUBBLEFIELD G G, FRASER K, PHILLIPS B J, et al. A meshfree computational framework for the numerical simulation of the solid-state additive manufacturing process, additive friction stir-deposition (AFS-D)[J]. *Materials & Design*, 2021, 202: 109514.
- [30] 杨新岐, 田超博, 唐文珅, 等. 高强铝合金固相摩擦

- 挤压增材制造工艺及力学性能[J]. 金属加工(热加工), 2022(6): 1-9.
- YANG Xinqi, TIAN Chaobo, TANG Wenkun, et al. The process and mechanical properties of friction extrusion additive manufacturing of high-strength aluminum alloys[J]. *Metal Working (Hot Working)*, 2022(6): 1-9.
- [31] 李会朝, 王彩妹, 张华, 等. 搅拌摩擦增材制造技术研究进展[J]. 金属学报, 2023, 59(1): 106-124.
- LI Huizhao, WANG Caimei, ZHANG Hua, et al. Research progress of friction stir additive manufacturing technology[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2023, 59(1): 106-124.
- [32] WU B, PENG Y, TANG H, et al. Improving grain structure and dispersoid distribution of nanodiamond reinforced AA6061 matrix composite coatings via high-speed additive friction stir deposition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 317: 117983.
- [33] SHARMA S, MANI KRISHNA K V, RADHAKRISHNAN M, et al. A pseudo thermo-mechanical model linking process parameters to microstructural evolution in multilayer additive friction stir deposition of magnesium alloy[J]. *Materials & Design*, 2022, 224: 111412.
- [34] 武传松, 宿浩, 石磊. 搅拌摩擦焊接产热传热过程与材料流动的数值模拟[J]. 金属学报, 2018, 54(2): 265-277.
- WU Chuansong, SU Hao, SHI Lei. Numerical simulation of heat generation, heat transfer and material flow in friction stir welding[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(2): 265-277.
- [35] 陈刚, 武凯, 孙宇, 等. 搅拌摩擦沉积增材技术研究进展[J]. 材料工程, 2023, 51(1): 52-63.
- CHEN Gang, WU Kai, SUN Yu, et al. Research progress in additive friction stir deposition[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(1): 52-63.
- [36] 陈立国, 王江峰, 杨国舜, 等. 搅拌摩擦焊搅拌头研究新进展[J]. 热加工工艺, 2022, 52(21): 1-7.
- CHEN Ligu, WANG Jiangfeng, YANG Guoshun, et al. New research progress on friction stir welding tools[J]. *Hot Working Technology*, 2022, 52(21): 1-7.
- [37] GARCIA D, HARTLEY W D, RAUCH H A, et al. In situ investigation into temperature evolution and heat generation during additive friction stir deposition: A comparative study of Cu and Al-Mg-Si[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34: 101386.
- [38] PHILLIPS B J, MASON C J T, BECK S C, et al. Effect of parallel deposition path and interface material flow on resulting microstructure and tensile behavior of Al-Mg-Si alloy fabricated by additive friction stir deposition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 295: 117169.
- [39] GRIFFITHS R J, GARCIA D, SONG J, et al. Solid-state additive manufacturing of aluminum and copper using additive friction stir deposition: Process-microstructure linkages[J]. *Materialia*, 2021, 15: 100967.
- [40] GOTAWALA N, YU H Z. Material flow path and extreme thermomechanical processing history during additive friction stir deposition[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 101: 114-127.
- [41] MARTIN L P, LUCCITTI A, WALLUK M. Evaluation of additive friction stir deposition of AISI 316L for repairing surface material loss in AISI 4340[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(3/4): 2365-2381.
- [42] REZAEINEJAD S S, STRIK D H, VISSER R M, et al. Solid-state additive manufacturing of AA6060 employing friction screw extrusion additive manufacturing[J]. *JOM*, 2023, 75(10): 4199-4211.
- [43] CHAUDHARY B, JAIN N K, MURUGESAN J, et al. Study of microstructure evolution and mechanical properties in friction stir based additive multi-layer manufacturing of Al 6061 alloy: Effect of feedstock material form and heat treatment[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 34: 105156.
- [44] PERRY M E J, RAUCH H A, GRIFFITHS R J, et al. Tracing plastic deformation path and concurrent grain refinement during additive friction stir deposition[J]. *Materialia*, 2021, 18: 101159.
- [45] HARTLEY W D, GARCIA D, YODER J K, et al. Solid-state cladding on thin automotive sheet metals enabled by additive friction stir deposition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 291: 117045.
- [46] ZHU N, AVERY D Z, RUTHERFORD B A, et al. The effect of anodization on the mechanical properties of AA6061 produced by additive friction stir-deposition[J]. *Metals*, 2021, 11(11): 1773.
- [47] GHADIMI H, DING H, EMANET S, et al. Hardness distribution of Al2050 parts fabricated using additive friction stir deposition[J]. *Materials*, 2023, 16(3): 1278.
- [48] YU H Z. Effects of tool geometry[M]//Additive Friction Stir Deposition. [S.l.]: Elsevier, 2022: 183-201.
- [49] ZENG C, GHADIMI H, DING H, et al. Microstructure evolution of Al6061 alloy made by additive friction stir deposition[J]. *Materials*, 2022, 15(10): 3676.
- [50] AVERY D Z, PHILLIPS B J, MASON C J T, et al. Influence of grain refinement and microstructure on fatigue behavior for solid-state additively manufactured Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2020, 51(6): 2778-2795.
- [51] AGRAWAL P, HARIDAS R S, YADAV S, et al.

- Processing-structure-property correlation in additive friction stir deposited Ti-6Al-4V alloy from recycled metal chips[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102259.
- [52] JOSHI S S, PATIL S M, MAZUMDER S, et al. Additive friction stir deposition of AZ31B magnesium alloy[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10(9): 2404-2420.
- [53] AGRAWAL P, HARIDAS R S, YADAV S, et al. Additive friction stir deposition of SS316: Effect of process parameters on microstructure evolution[J]. *Materials Characterization*, 2023, 195: 112470.
- [54] RIVERA O G, ALLISON P G, BREWER L N, et al. Influence of texture and grain refinement on the mechanical behavior of AA2219 fabricated by high shear solid state material deposition[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 724: 547-558.
- [55] AGRAWAL P, HARIDAS R S, AGRAWAL P, et al. Deformation based additive manufacturing of a metastable high entropy alloy via Additive friction stir deposition[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 60: 103282.
- [56] FARABI E, BABANIARIS S, BARNETT M R, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloys fabricated by additive friction stir deposition[J]. *Additive Manufacturing Letters*, 2022, 2: 100034.
- [57] AVERY D Z, CLEEK C E, PHILLIPS B J, et al. Evaluation of microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy repaired via additive friction stir deposition[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2022, 144(3): 031003.
- [58] RUTHERFORD B A, AVERY D Z, PHILLIPS B J, et al. Effect of thermomechanical processing on fatigue behavior in solid-state additive manufacturing of Al-Mg-Si alloy[J]. *Metals*, 2020, 10(7): 947.
- [59] LI Y, YANG B, ZHANG M, et al. The corrosion behavior and mechanical properties of 5083 Al-Mg alloy manufactured by additive friction stir deposition[J]. *Corrosion Science*, 2023, 213: 110972.
- [60] LUO T, TANG W, WANG R, et al. Microstructure heterogeneity and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy fabricated by force-controlled additive friction stir deposition[J]. *Materials Letters*, 2023, 340: 134164.
- [61] 张明, 李一迪, 汪辉, 等. 主轴转速对搅拌摩擦增材 2219 铝合金组织及性能的影响[J/OL]. *中国有色金属学报*, 2023: 1-15 [2023-09-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20230905.2100.004.html>.
- ZHANG Ming, LI Yidi, WANG Hui, et al. Effect of rotational speed on structure and properties of 2219 aluminum alloy manufactured by additive friction stir deposition [J/OL]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2023: 1-15 [2023-09-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20230905.2100.004.html>.
- [62] SHEN Z, ZHANG M, LI D, et al. Microstructural characterization and mechanical properties of AlMg alloy fabricated by additive friction stir deposition[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(5): 2733-2741.
- [63] ANDERSON W K, AVERY D Z, DANIEWICZ S R, et al. Characterization of the fatigue behavior of additive friction stir-deposition AA2219[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 142: 105951.
- [64] LI Y, YANG B, ZHANG M, et al. The corrosion behavior and mechanical properties of 5083 Al-Mg alloy manufactured by additive friction stir deposition [J]. *Corrosion Science*, 2023, 213: 110972.
- [65] YU H Z. Beyond metals and alloys: Additive friction stir deposition of metal matrix composites[M]//*Additive Friction Stir Deposition*. [S.l.]: Elsevier, 2022: 203-232.
- [66] AGHAJANI D H, SIMCHI A. Processing and characterizations of polycarbonate/alumina nanocomposites by additive powder fed friction stir processing[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 107086.
- [67] MARTIN L P, LUCCITTI A, WALLUK M. Repair of aluminum 6061 plate by additive friction stir deposition[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 118(3/4): 759-773.
- [68] GRIFFITHS R J, PETERSEN D T, GARCIA D, et al. Additive friction stir-enabled solid-state additive manufacturing for the repair of 7075 aluminum alloy [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(17): 3486.
- [69] CHOU K, EFF M, COX C D, et al. Optical image and Vickers hardness dataset for repair of 1080 steel using additive friction stir deposition of Aermet 100 [J]. *Data in Brief*, 2022, 41: 107862.
- [70] GRIFFITHS R J, GOTAWALA N, HAHN G D, et al. Towards underwater additive manufacturing via additive friction stir deposition[J]. *Materials & Design*, 2022, 223: 111148.