

搅拌摩擦沉积增材制造技术与装备研究进展

王 诺¹ 郭维诚¹ 杨天豪^{2,3} 吴重军⁴

(1 上海理工大学, 上海 200093)

(2 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200240)

(3 哈尔滨工业大学金属精密热加工国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

(4 东华大学, 上海 201620)

文 摘 从搅拌摩擦沉积增材(AFSO)成形机制的角度,总结了增材过程中材料温度演变、塑性流动和微观组织变化的研究成果,深入探讨了增材道次和工艺参数对AFSD增材件力学性能的影响,并对国内外AFSD增材工具及装备的研制进展进行了详细介绍,为AFSD的应用前景与发展方向提供了新思路。

关键词 搅拌摩擦沉积增材,热变形,塑性流动,微观组织特性,力学性能

中图分类号: TG44

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2025.02.001

Research Progress in Additive Friction Stir Deposition Technology and Equipment

WANG Nuo¹ GUO Weicheng¹ YANG Tianhao^{2,3} WU Chongjun⁴

(1 University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

(2 Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing General Factory Co., Ltd, Shanghai 200240)

(3 State Key Laboratory of Precision Thermal Processing of Metals, Harbin Institute of Technology, Haerbin 150001)

(4 Donghua University, Shanghai 201620)

Abstract Additive friction stir deposition (AFSD) technology, as an emerging additive manufacturing method, has attracted widespread attentions in the field of materials science and engineering in recent years. This study summarizes the results of research on the evolution of material temperature, plastic flow and microstructural changes during the additive process from the perspective of AFSD forming mechanisms. The influence of additive passes and process parameters on the mechanical properties of AFSD additive parts is discussed in depth. The domestic and international development progresses of AFSD additive tools and equipments are introduced in detail, which provide new ideas for the application prospects and development directions of AFSD.

Key words Additive friction stir deposition, Thermal deformation, Plastic flow, Microstructure properties, Mechanical properties

0 引言

搅拌摩擦增材制造是一种基于搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)原理的增材技术,它利用旋转的自耗型或非自耗型工具摩擦产生热量,使材料发生塑性变形,并逐层堆积增材材料,最终形成

增材构件,这项技术有助于避免热变形、气孔和晶粒粗化等问题,提高增材件的质量和性能^[1-5]。根据搅拌摩擦的特点,可将其分为3类,如图1所示。第一类是搅拌摩擦增材制造(Friction Stir Additive Manufacturing, FSAM),它基于搅拌摩擦搭接焊原理,

收稿日期:2024-01-15

基金项目:机械系统与振动国家重点实验室开放基金课题(MSV202312);哈尔滨工业大学金属精密热加工国家级重点实验室(6142909220208)

第一作者简介:王诺,1998年出生,硕士研究生,主要研究方向为金属增材制造技术。E-mail:15623068046@163.com

通信作者:郭维诚,1990年出生,博士,副教授,主要研究方向为精密加工技术、金属增材制造技术。E-mail:wcguo@usst.edu.cn

将薄板叠加并逐层连接,以制造增材构件^[6-8]。第二类是搅拌摩擦沉积增材制造(Additive Friction Stir Deposition, AFSD),它采用中空搅拌头,并通过添加粉末、丝材或棒料进行固相沉积增材制造^[9-11]。第三类是摩擦表面沉积增材制造(Friction Surfacing Deposition Additive Manufacturing, FSD-AM),它基于摩擦堆焊原理,利用旋转的消耗型棒料沉积材料进行增材制造^[12-15]。这些技术在解决热变形、气孔和晶粒粗化等问题方面发挥了积极作用,从而显著提升了增材构件的质量和性能水平。

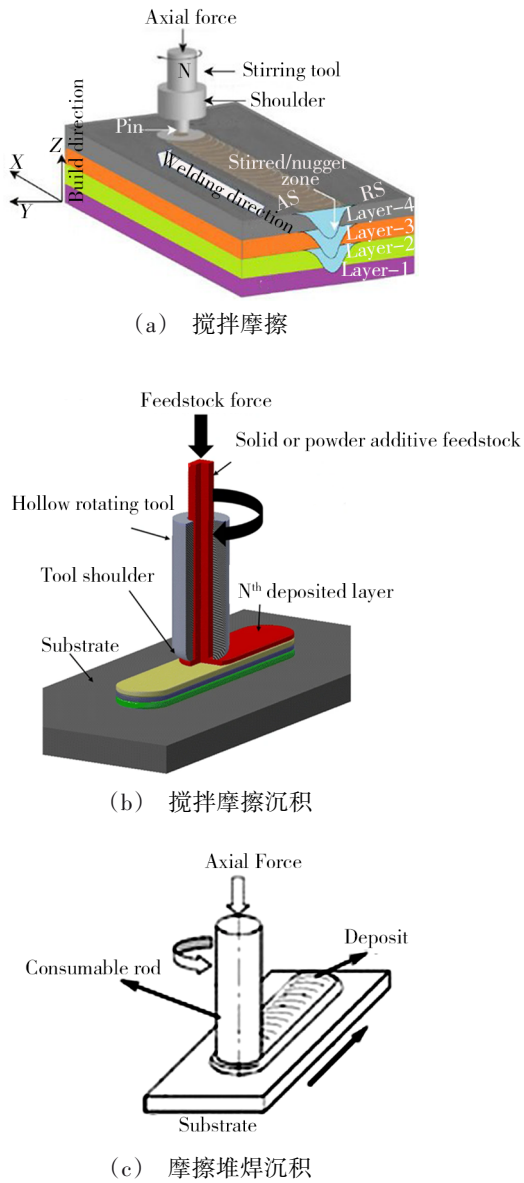


图1 基于搅拌摩擦的固相增材技术分类^[11,13,16]
Fig. 1 Classification of solid phase additive technology based on friction stir^[11,13,16]

相比FSAM,AFSD技术不需要使材料表面部分熔化与再凝固,因此只需要更低的热输入便能完成增材制造,从而减少了构件的热变形和内部应力,不会出现气孔、裂痕、元素偏析等缺陷^[17],提高了构件

制造的稳定性;与FSD-AM相比,AFSD技术在可消耗材料的外部添加轴肩结构,有效地抑制材料溢出,从而提高材料利用率^[5]。AFSD的原料包括金属粉末、丝材或棒料等,在增材过程中这些原料持续地被送入中空搅拌头,通过施加轴向力在原料和金属基板之间引发剧烈摩擦,使原料发生剪切变形,在轴向力、剪切力和摩擦热的共同作用下,原料和基板在接触处经历塑性变形,并在混合搅拌后形成冶金结合。之后,搅拌轴按照预设路线移动,完成初始沉积层的铺展。随着搅拌轴逐步抬升,进行后续层的沉积,最终完成零件的增材制造。本文综述了AFSD技术在国内外的最新研究进展,包括AFSD成形机制、力学性能、增材设备研制以及应用等方面,总结了相关的研究成果并提出了对于AFSD的展望。

1 AFSD成形机制研究

在搅拌摩擦沉积增材制造中,理解和控制材料的热变形对研究材料成形至关重要。由于在AFSD过程中需要高温和强烈的机械变形,材料会经历复杂的热应力和塑性变形,这直接影响增材件的质量和性能。深入研究材料的热变形行为有助于优化工艺参数,减少缺陷,提高增材件的强度和耐久性,并确保其满足工程应用的要求。

1.1 增材温度演化过程

AFSD技术沉积材料位于基材的顶部,而在搅拌摩擦焊接中,搅拌区位于工件材料的内部。因此,AFSD可以使用红外摄像机或高温计等非接触的方法,从侧面直接监测物料流动的表面以及沉积材料的温度。S. K. EVERTON等人^[18]使用红外相机研究了激光-粉末熔覆加工过程中由于散热不足而导致的孔隙和其他不规则现象的检测极限,同时展示了热影响区样品热像图。D. GARCIA等人^[19]通过使用原位监测的方法直接表征温度演变、材料流动和热产生机制,在研究过程中,作者研究了Cu和Al-Mg-Si两种材料,采用红外热成像技术从侧面监测沉积材料的温度变化,并将热电偶嵌入沉积材料正下方的基板中进行补充热测量。同时,从沉积层的前缘监测物质流动,发现Cu和Al-Mg-Si产热机制的差异是由不同的材料流动和界面接触状态造成的。图2为Cu在AFSD过程中沉积材料热分布,包括搅拌头下沉、平面内运动以及平面外层过渡3个阶段,时间步长 $t=0$ s对应的是骤降相的热剖面。平面内运动阶段是在 $t=25$ s时看到的,其中基板相对于旋转工具平移。工具头后面的轨迹在通过边界热损失(传导、对流和辐射)冷却时保持在较高的温度。在 $t=35$ s时,层转变开始,在 $t=55$ s时,第二层正在沉积,其中基板和搅拌头之间的相对运动与第一层沉积方向相反。

在 $t=75\text{ s}$ 时,所需的两层几何形状完成,最终的热图像显示沉积末端周围有一个碗状的高温区。

针对试验方法研究 AFSD 工艺过程温度演化的有限性,研究人员采用不同的方法对沉积增材过程的温度演变进行模拟研究。S. SHARMA 等人^[20]建立了 AZ31B 镁合金 AFSD 过程的有限元模型,通过 Zener-Holloman 参数与晶粒尺寸之间的关系,预测了动态再结晶晶粒尺寸以及晶粒粗化变形后的晶粒尺寸,这些预测结果与实验结果完全吻合。此外,该研

究还对温度-时间曲线进行了预测,如图 3 所示,这些预测结果与实验结果具有较高的一致性。G. G. STUBBLEFIELD 等人^[21]首次采用完全耦合的热-机械无网格方法,利用光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)模拟了 AA6061 铝合金 AFSD 过程,并进行了 3 组参数下的仿真实验。研究发现,随着材料进给量的增加,前进侧和后退侧的温度不对称性降低。

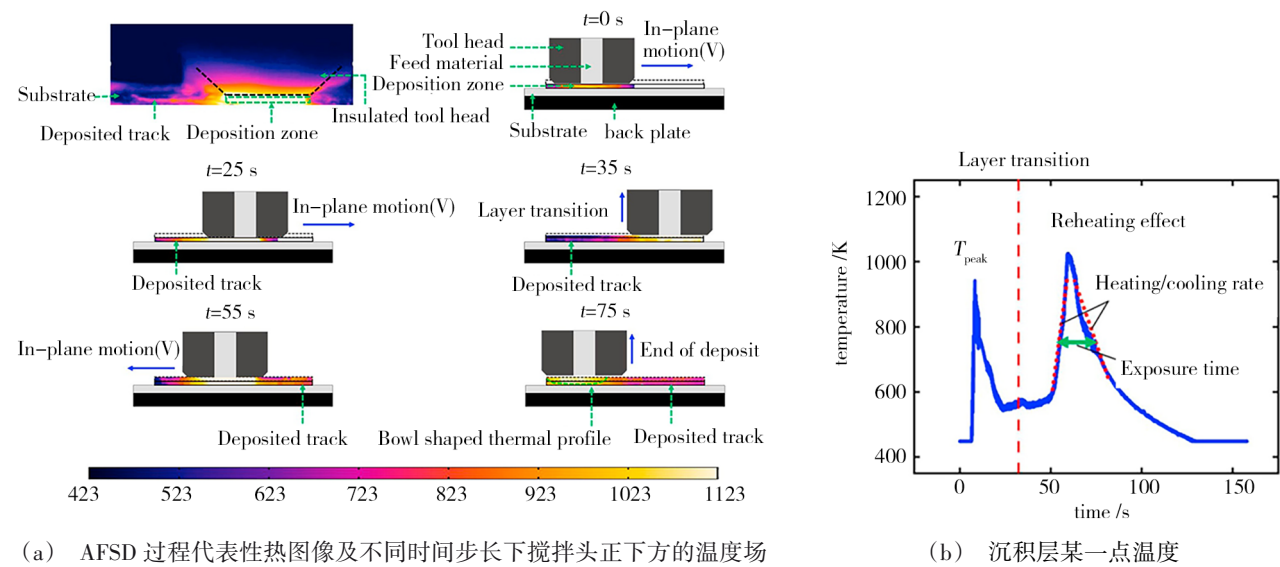


图 2 Cu 在 AFSD 过程中沉积材料热分布^[19]

Fig. 2 An overview of the thermal profile for Cu deposited^[19]

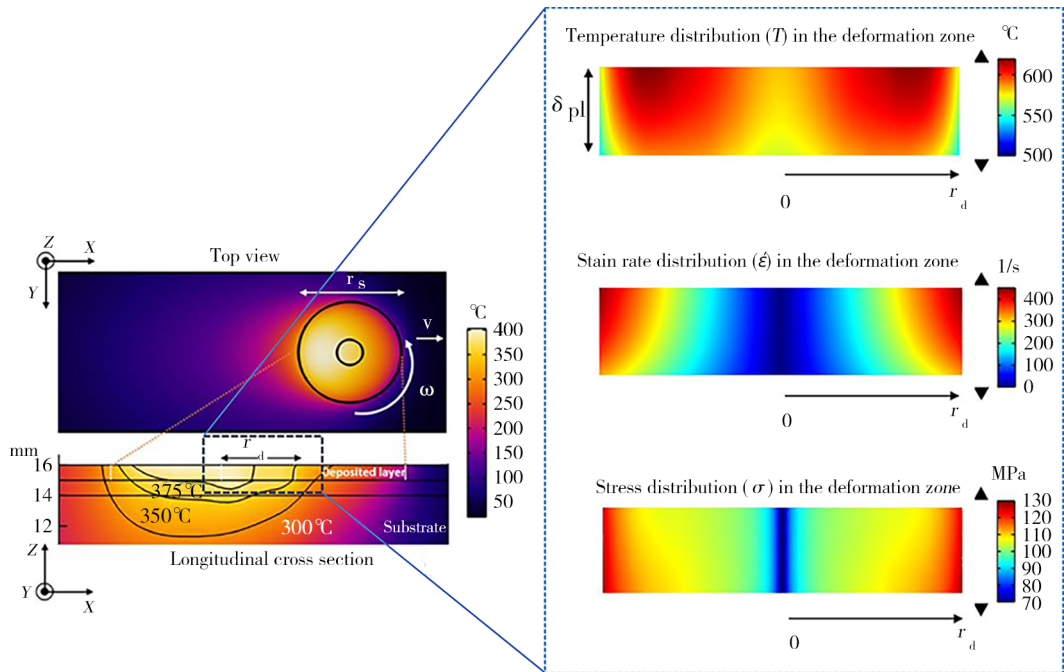


图 3 模拟 AFSD 过程中的热演化^[20]

Fig. 3 Simulated thermal evolution during AFSD^[20]

现有研究受限于温度检测技术,对于 AFSD 增材区温度演化过程的分析相对较为有限,多以仿真为

主。后期研究可以探索先进的增材温度实时监测技术,从而能够掌握增材温度演化规律,并实现不同材

料的增材温度动态调控。在此基础上,需要对增材区进行更详尽的温度场分布分析,重点研究在搅拌摩擦沉积增材过程中不同区域的温度变化,尤其关注搅拌工具接触区域、材料流动区域以及最终构件表面的温度分布。

1.2 塑性流动

相较于温度演化过程,研究 AFSD 过程中的材料变形过程难度更大,这包括了解材料在高温和高应变条件下的塑性变形、位错运动和晶粒重组。通过深入研究塑性流动,可以更好地掌握材料的形成过程,优化工艺参数,减少残余应力和缺陷,并提高最终增材件的力学性能^[22-24]。

M. E. J. PERRY 等人^[25]在 AA6061 基体上沉积 AA2024 铝合金,对其进行形貌分析,系统研究了 AFSD 中基体与沉积层之间界面以及沉积之后的界面,如图 4(a)所示。研究发现,AFSD 导致沉积材料和基板之间的非平面界面,在平面外方向上观察到明显的宏观混合;鳍状物和锯齿状在前进侧出现,如图 4(b)所示,而后退侧表现为光滑的倾斜表面。这种不对称源于平面内材料膨胀(由进料压缩驱动)和材料流动(由刀具头旋转驱动)的相互作用,这导致了更高水平的材料积累和对前进侧的约束。该研究团队继续通过 X 射线断层扫描技术和示踪器对进料中心体积和进料边缘体积的流动路径进行研究^[26],发现在最初进料的过程中至少应考虑两种应变分量。首先,由于进料杆上的压缩而产生挤压应变,导致横截面积变化。其次,由于转速梯度产生扭转应变,导致螺旋型形状的形成。在稳态沉积过程中,材料可能由于材料-突起相互作用而严重变薄,原始的圆柱中心和边缘 Al-Cu 示踪剂转变为沿沉积轨迹堆积厚度约为几十微米的微带,图 5 所示。R. J. GRIFFITHS 等人^[27]采用比较的方法研究 Al-Mg-Si 合金和 Cu 的热力学行为,在数字显微镜下观察到两种材料在 AFSD 过程中的材料变形和流动行为截然不同。在 Al-Mg-Si 中,沉积区存在明显的旋转运动,过量的原料以圆形飞边的形式离开沉积区[图 6(a)];而在 Cu 的沉积区几乎没有观察到旋转运动,其中沉积材料由于新材料的输入而被侧向推挤。结果,飞边以薄片的形式沿横向退出沉积区[图 6(b)]。由于旋转的物质流动在沉积区产生了额外的剪切力,因此,Al-Mg-Si 比 Cu 的变形更严重,而 Cu 主要在工具-材料界面处受到摩擦力作用。

在增材过程中,材料流动特性与材料性能、搅拌工具的几何形状、增材工艺参数等因素密切相关。这些参数相互耦合,导致材料流动特性难以准确分析。由于材料内部流动无法通过宏观观察分析,只

能依赖相关检测仪器和示踪材料进行微观分析。目前的研究局限于特定条件下探讨材料的流动形式,却未深入研究材料流动行为与各个因素之间的关系。后期需要深入探究搅拌工具与材料之间的相互作用,并考虑工艺参数作用下的多物理场耦合效应,以全面理解材料在增材过程中塑性流动的复杂性。

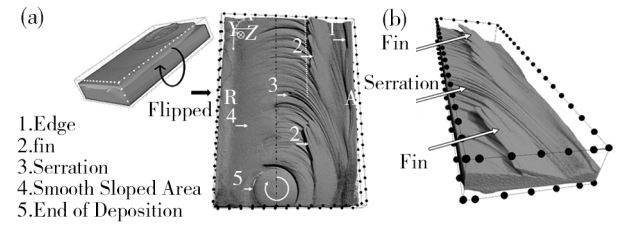


图 4 通过 AFSD 将 2024 沉积到 6061 上的 X 射线计算机断层扫描结果^[25]

Fig. 4 X-ray computed tomography results for AA 2024 deposited onto AA 6061 via AFSD^[25]

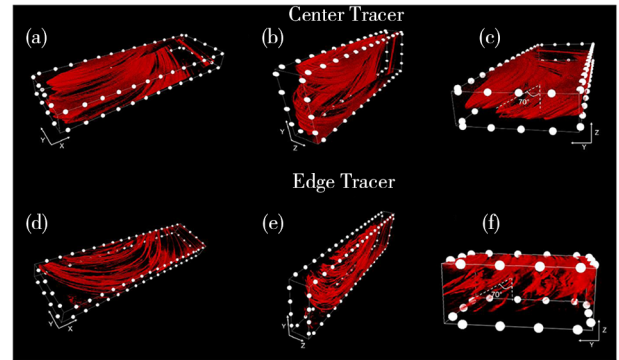


图 5 稳态沉积后的高分辨率 X 射线计算机断层扫描成像结果^[26]

Fig. 5 High-resolution X-ray computed tomography results after steady-state deposition^[26]

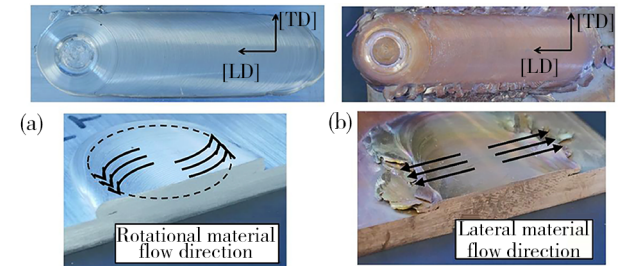


图 6 Al-Mg-Si 和 Cu 的 AFSD 过程中变形流动进行比较^[27]

Fig. 6 A comparison of the deformation flow during AFSD of Al-Mg-Si and Cu^[27]

在实验研究的同时,一些学者对 AFSD 过程中材料的塑性流动进行了数值模拟研究。Y. JIN 等人^[28]通过对 AFSD 过程进行热-力学模拟研究,探究了动态体积模量(Dynamic Bulk Modulus, DBM)在沉积方向周围存在强烈的左右空间不对称性的原因。研究发现,这种 DBM 的特征性质是由于 AFSD 加工过程中不对称的物质流动和热机械应力演化共同作用的结果。G. G. STUBBLEFIELD 等人^[29]首次提出了使

用光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 框架的粒子跟踪 AFSD 模拟。采用两根阳极氧化的 AA6061-T6 棒材和一根 AA6061-T6 铜线芯为原料沉积两种不同类型的 AFSD 实验,用于 SPH 模型校准。模拟结果表明,阳极氧化后的进料偏向后退侧,而在原料中心的铜线则向前进侧迁移。铜线芯沉积层内的铜集中在前进侧,碎片分散在整个沉积层中。模拟铜芯中的铜呈现出与实验铜芯沉积相似的弯曲铜浓度区。

1.3 微观组织特性

在 ASFD 工艺中,深入研究材料的微观组织对于优化制造过程参数、提高构件性能以及确保最终制造品质至为关键。O. G. RIVERA 等人^[30] 探究了 AA2219 铝合金在经历 AFSD 后的材料微观组织,提供了与沉积过程相关的纹理和晶粒尺寸的对比,如图 7 所示。初始材料的平均晶粒尺寸约为 30 μm ,而经过 AFSD 后增材件的平均晶粒尺寸则降至 2.5 μm ,呈现明显的晶粒细化现象。这一现象可以归因于 AFSD 过程中,材料在固态沉积过程中发生的剪切变形,从而促使动态再结晶的发生。在动态再结晶的微观结构中,存在大量低角度晶界,这些晶界的迁移正是导致动态再结晶现象的关键因素。B. J. PHILLIPS 等人^[31] 的研究也验证了晶粒细化现象,他们对 AA6061 铝合金的沉积路径进行了详细研究,结果显示其呈现出双道多层沉积的特点。经 AFSD 处理后,晶粒呈现出均匀的等轴形态,沉积路径中心的晶粒尺寸约 10.6 μm 。这一细化现象的产生是由于 AFSD 刀具在相反方向上连续多次切削导致沉积重叠区域的晶粒尺寸小于沉积路径中心晶粒尺寸,约 9.1 μm ,这直接源自于塑性诱导再结晶的影响。

P. AGRAWAL 等人^[32] 使用了高熵合金 CS-HEA

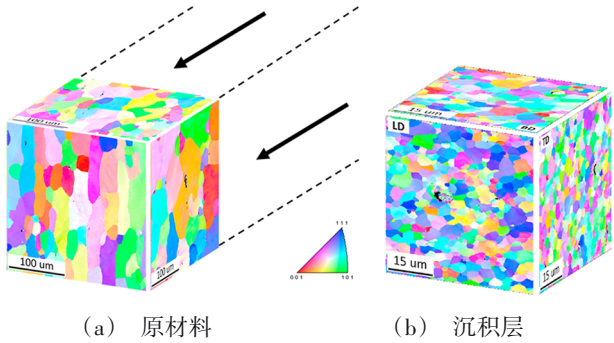


图 7 AA2219 沉积前后晶粒尺寸对比^[30]
Fig. 7 Comparison of grain size before and after AA2219 deposition^[30]

热轧棒料作为 AFSD 的基材,该基材的平均晶粒尺寸约为 50 μm ,并且其微观结构中包含 57% 的 γ 相和 43% 的 ϵ 相。在不同的工艺参数下,他们成功制造了四种不同的样本,反极图和相图如图 8 所示。在 AFSD 过程中观察到了非常细小的等轴晶粒,其平均晶粒尺寸约为 $(2.0 \pm 1.0) \mu\text{m}$ 。与此同时,在微观结构中, γ 相和 ϵ 相同样存在,但 ϵ 相的含量较高。这一高度的晶粒细化现象是由于 AFSD 过程中发生的剧烈塑性变形、热循环以及随后的冷却,这导致了 CS-HEA 沉积过程中 γ 相向 ϵ 相的转变。晶粒细化程度受多种因素影响,包括材料性质、工艺参数、热循环次数和热累计等,因此需要进一步深入研究。

AFSD 过程中材料经历了连续的动态再结晶,使得晶粒转化为细小且等轴的晶粒,晶粒尺寸显著变小,同时材料在增材过程中伴随着相转变。然而,当前对于许多材料增材后晶粒细化的程度以及相转变的方式仍难以准确掌握。尤其在制造大型结构件时,长时间的热循环和热累积是否对微观组织的演变产生影响,目前还没有相关研究成果予以证明。因此,这方面的问题仍需进一步深入研究。

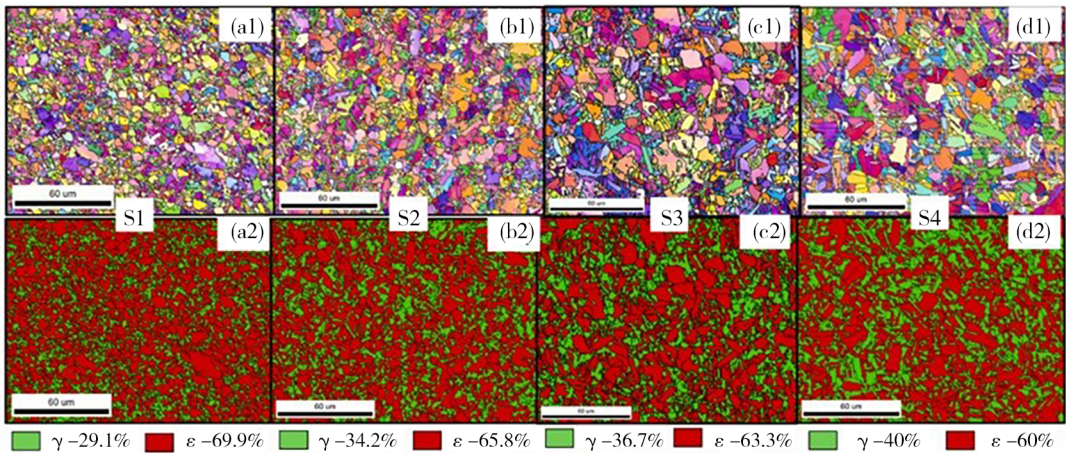


图 8 4 种 AFSD 沉积样品的反极图和相图^[32]

Fig. 8 Inverse polar and phase diagrams of four AFSD deposited samples^[32]

2 增材件力学性能研究

作为一种增材制造技术,AFSD 技术主要用于大
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025 年 第 2 期

型结构件的制造,因此评估其在工程实践中可行性的关键在于确定增材结构件是否能够满足所需的力

学性能标准。这些力学性能标准包括极限抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、微观硬度以及疲劳特性等^[33]。AFSD技术可以直接成形多层构件,从增材路径的分类角度来看,能够分为单道单层沉积、单道多层沉积和多道多层沉积,不同的增材道次以及工艺参数对结构件的力学性能有显著的影响。

2.1 增材道次对力学性能的影响

增材道次是AFSD技术中影响增材构件屈服强度、抗拉强度和延展性等力学性能的重要因素之一,确定最佳的增材参数配置,以确保制造的部件在满足工程需求的同时具有最佳的性能和质量。

C. J. T. MASON 等人^[34]对AA7050进行了交叉型增材实验,并对增材件的停留区、过渡区和交叉区进行了力学性能测试。结果显示,与传统合金相比,AFSD制造的AA7050屈服强度较低,主要因为在微观结构中出现了过多的强化相。在顶部横向方向上,各个位置的样本屈服强度相对较低,过渡区样本的屈服强度和抗拉强度明显降低。然而,在顶部横向方向,不同位置之间的延展性没有明显差异。另外,底部横向方向上,交叉部分的样本在屈服强度和抗拉强度方面表现最差,但3个部分的延展性相似,略低于顶部横向方向的样本。在对3个区域进行力学测试时,发现停留区的硬度峰值最高,交叉区硬度次之,而过渡区硬度最低。B. J. PHILLIPS 等人^[31]使用AFSD技术对AA6061铝合金进行了双道多层沉积,研究结果表明,由于沉淀强化相的减少,重叠区域的横向试样强度仍然明显低于母材,但略高于单道次纵向拉伸强度,如图9所示。此外,重叠区域的平均硬度低于两侧单道沉积硬度,这是由于重复的

热循环显著影响了机械强度。在一组可接受的工艺参数下,T. W. ROBINSON 等人^[35]进行Z字型沉积实验,以分析AZ31B镁合金AFSD过程中的力学性能变化。实验结果表明,尽管AZ31B-AFSD的屈服强度下降了20%,但其几乎达到了与初始材料相同的极限强度和显微硬度。由于AFSD增材过程会释放大热量,增材区内的温度可达到材料熔化温度的90%,因此会引起材料位错湮灭,从而降低增材件的屈服强度。

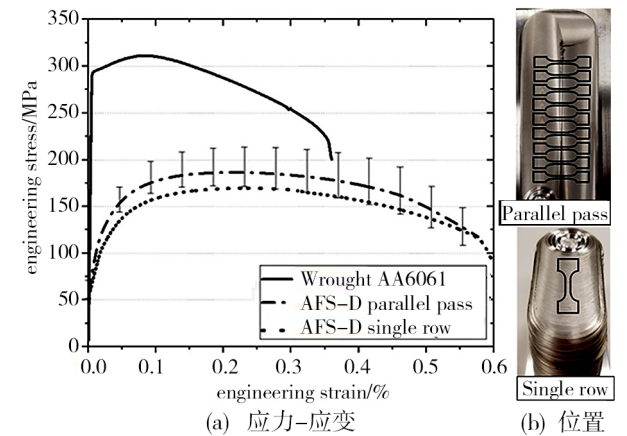
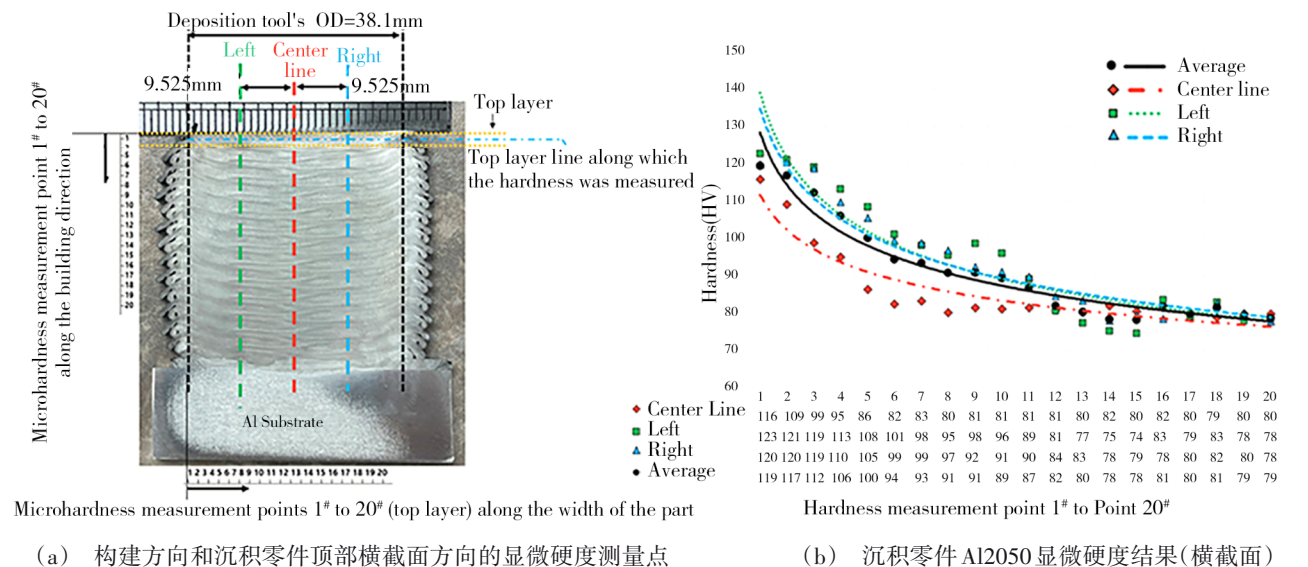


图9 平行道次和单道次沉积AFSD-AA6061准静态应力-应变响应及样品位置示意图^[31]
Fig. 9 Quasi-static stress-strain response and sample position diagram of AFSD-AA6061 deposited in parallel and single passes^[31]

此外,不少学者进行了单道多层AFSD实验,研究材料力学性能的变化。H. GHADIMI 等人对Al2050铝合金的AFSD过程中沿构建方向的硬度和沿沉积后零件横截面宽度方向顶部硬度变化进行了分析,发现沉积零件的截面显微硬度值在制造方向上逐渐减小。尽管沉积的顶层显微硬度最高,为118HV,但明显低于进给材料的(192HV),见图10。



(a) 构建方向和沉积零件顶部横截面方向的显微硬度测量点
(b) 沉积零件Al2050显微硬度结果(横截面)
图10 沉积零件Al2050显微硬度结果^[36]
Fig. 10 Microhardness results of the as-deposited Al2050 part^[36]

分析的原因是零件底部经历了多次热循环,导致沉积区域出现了次生相。在经历了多次热循环后,分散在基体中的合金元素形成了大尺寸的析出物,从而导致零件硬度不均匀。

K. ANDERSON-WEDGE 等人^[37]进行了参数研究,以确定 AFSD-AA2219 的最佳工艺参数组合,其中包括不同的搅拌头行进速度和转速。他们研究了 AFSD-AA2219 和 AA2219-T87 在单调和循环应变控制下的响应,这两种材料显示出完全相反的应变寿命曲线。研究表明,尽管 AFSD 材料的累积损伤速率低于锻造材料,但相对于锻造材料,AFSD 材料的早期损伤最终会降低其疲劳寿命。D. Z. AVERY 等人^[11]首次对采用 AFSD 技术制备的 AA7050 的显微组织演变和疲劳机制进行了定量研究。由于强化析出相 η 和 η' 的时效过长,沉积材料呈现硬度梯度。单调拉伸结果表明,AFSD-AA7075 的屈服应力、极限拉伸应力和断裂伸长率降低。力学性能下降的原因在于强化相的尺寸增大,这些强化相不再有效地抵抗位错运动,而是由于未变形的再结晶晶粒中位错的产生而增加了应变硬化率。S. S. JOSHI 等人^[38]研究了 AZ31B 镁合金经过 AFSD 技术后的硬度特性,并发现与进给材料相比,AFSD 样品的硬度略有

提高。

2.2 工艺参数对力学性能的影响

当前,已有大量研究关于 AFSD 技术对材料微观组织和力学性能的影响^[35,39-42],然而,受限于增材装备的技术参数以及材料增材过程中的不确定性,有关 AFSD 工艺参数对材料性能影响的研究目前相对较少。

天津大学固相摩擦焊研究室唐文坤等人^[43]进行了 AFSD 工艺实验研究,使用 6061 铝合金圆棒作为材料,旨在分析主轴转速对材料力学性能的影响规律。研究结果显示,在轴肩移动速度为 300 mm/min 的条件下,主轴转速为 600 r/min 的增材试样在硬度、沿 X 方向的抗拉强度和屈服强度方面均低于主轴转速为 800 r/min 的增材试样。不过,600 r/min 增材试样的断后伸长率却大于 800 r/min 增材试样,如图 11 所示。G. CHEN 等人^[44]研究了主轴转速和材料进给速度对 6061 铝合金力学性能的影响,研究结果表明,极限抗拉强度与主轴转速和材料进给速度呈正相关,而延伸率与其呈负相关。研究发现,随着主轴转速和材料进给速度的增加,显微硬度并未显示明显的变化,但在转速和进给量发生较大变化时,显微硬度随之增加。

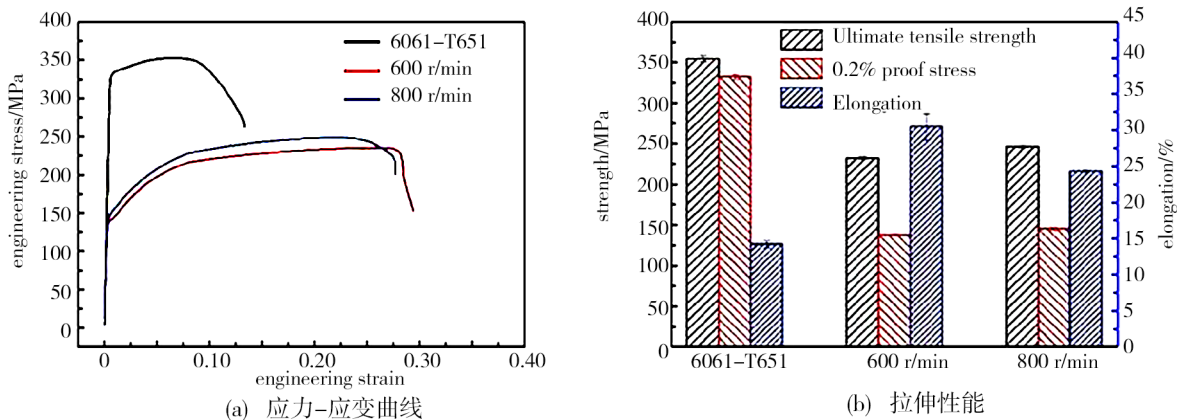


图 11 不同转速下沉积 Al6061 的应力-应变曲线及其拉伸性能^[43]

Fig. 11 Stress-strain curves and tensile properties of the as-deposited Al6061 at different rotational speeds^[43]

上述研究表明,经 AFSD 制备后构件的力学性能有所下降,主要原因是 AFSD 过程中产生的热量未达到材料的熔点,但是达到了相转变的温度,强化相溶解导致材料强度硬度均下降,因此增材后的构件需要根据实际生产与使用需求,进行适当的热处理强化,以提高增材件的服役性能。增材道次和工艺参数的改变均会影响材料的力学性能,但目前相关的研究较少,还不能形成系统的理论。未来可将增材实验分析与数值模拟相结合,建立更为准确的增材参数与力学性能关系模型,从而优化增材构件的制造性能。

3 AFSD 增材制造装备研制

3.1 搅拌工具设计

在 AFSD 技术中,搅拌工具是其核心技术之一。目前,研究中涉及的搅拌工具主要分为 3 类:底面平坦搅拌工具、底面两个小突起搅拌工具、“泪滴”状突起搅拌工具,如图 12 所示。P. AGRAWAL 等人^[45]采用底部完全平坦且没有凸出特征的搅拌头进行了对 Ti-6Al-4V 合金的回收削减沉积,而 M. E. J. PERRY 等人^[25]则选择了带有两个小凸起且搅拌头底面平坦的搅拌头,用于 AA2024 铝合金的沉积。大多数研究中使用的搅拌头底面具有四个“泪滴”状凸起,可增

加基材与进料界面的热量和机械混合^[36-37,46-49]。搅拌工具在 AFSD 技术中对材料的变形、堆积和最终构件质量有直接影响,因此搅拌工具的耐磨性和稳定性在连续增材制造过程中显得尤为关键。目前,搅

拌工具的形状与结构研究相对较为有限,为提高增材构件性能,需要针对不同的材料设计、分析并应用合适的搅拌工具结构。

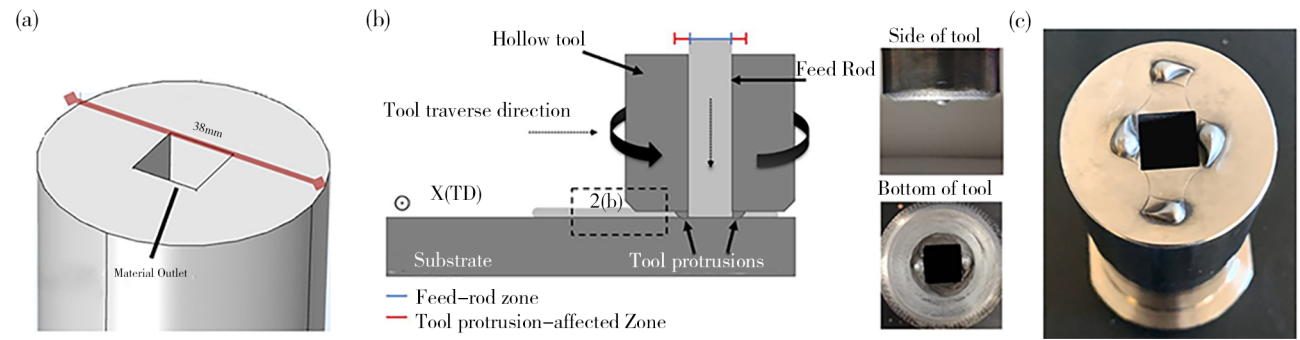


图 12 搅拌工具主要类型^[25,37,49]

Fig. 12 Main types of mixing tools^[25,37,49]

3.2 增材设备研发

目前,AFSD 增材设备主要用于制造铝合金、镁合金、高熵合金、镍基高温合金^[50]以及不锈钢^[42]等材料。2018 年,美国弗吉尼亚州 Aeroprobe 公司首次公开了他们研发的固相增材制造 3D 打印设备,并随后成立子公司 MELD^[51],专注于实现填充材料的自主沉积过程。经过多年发展,他们设计并生产了多种不同型号的机床,如图 13 所示。3PO 型采用了集成减材功能的 MELD 系统,从而消除了需要第二台机器

的减材加工步骤;K2 型专为生产和修复大型零件而设计;L3 型则是一款小尺寸机器,占地面积较小,并增加了夹具的设计;MELD CD-14 系统使用户能够将 MELD 沉积硬件和控制系统集成到现有的机器平台上。上述设备都使用棒料作为增材原料,但根据 AFSD 技术原理,增材原料不限于棒料,还可以是丝材和粉末。因此,Aeroprobe 公司采用立式铣床,以实现粉末原料的 AFSD 加工。目前尚未出现专门以丝材和粉末作为原料的 AFSD 设备。

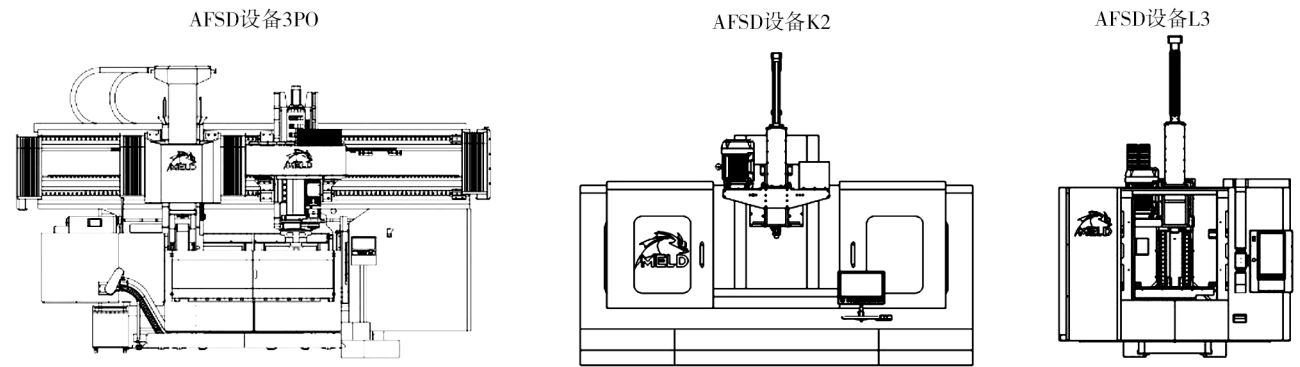


图 13 MELD 公司搅拌摩擦沉积增材设备^[51]

Fig. 13 AFSD machine of MELD corporation^[51]

尽管国内在 AFSD 领域的起步相对较晚,但随着学术界和研究机构的关注,AFSD 设备已经取得了初步的进展。在 2022 年 1 月,杨新岐教授领导的天津大学团队成功开发了固相摩擦挤压增材制造技术及相应设备^[52],这一技术是基于美国 MELD 的工艺原理,并已成功应用于增材制样制备。该设备最高转速可达 3 000 r/min,锻压力可达 100 kN,适用于直径 10~20 mm,长度 200~300 mm 的金属棒材进行大尺寸零件的增材制造。目前该设备仅作为实验平台存在,尚未进入批量生产阶段^[33]。此外,航天工程装备(苏州)有限公司研制的多功能固相复合增材设备^[53]

不仅可以同时实现圆形和方形棒料的固态增材制造,还具备了棒料及轴肩差速旋转的能力。该设备还配备有力控系统,可实现恒定位移或恒定压力的增材工艺,并通过自主设计的在线冷却机构和温度检测系统实现对增材温度的实时控制。此外,自主研发的送料机构成功实现了连续送料的功能。随着设备的不断研发,对 AFSD 技术的研究也会进一步深化。

除了专业设备的开发与研制,不少学者针对搅拌摩擦沉积增材设备也提出了一些想法。万龙等人^[54]设计的多材料搅拌摩擦增材装置结构包含增材

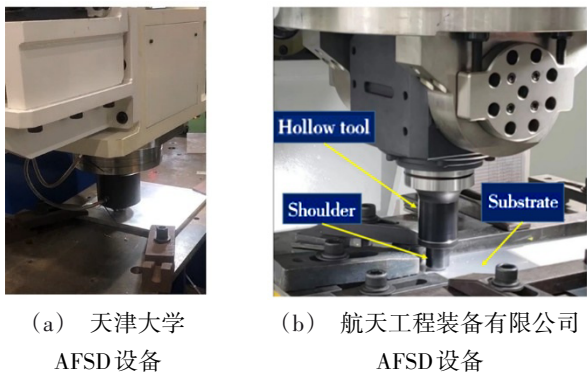


图 14 国内搅拌摩擦沉积增材设备^[44]
Fig. 14 Domestic AFSD machine^[44]

通道和与增材通道同轴设置的引导腔。引导腔位于增材通道上方,内部装有至少两个引导件,每个引导件用于引导不同的增材材料进入增材通道,从而实现多材料的交替供给,以进行多材料的增材打印。这种设计能够快速切换不同材料,避免了多次更换棒材,提高了增材制造的效率,简化了制造工序。黄永宪等人^[55]设计了一种连续进给的搅拌摩擦增材制造装置,该装置包括以下组件:自上而下布置的液压顶杆机构、盘式进料机构、上离合模块、下离合模块、定速送料机构、增材搅拌头和增材制造构件。在盘式送料机构内均匀放置了多根增材原料,盘式送料机构在不停转的情况下自动更换下一根增材原料。两个离合模块协同工作,将新的增材原料与上一根增材原料同步引入增材搅拌头中。液压顶杆机构推动新增材原料导入上离合模块,而定速送料机构则控制增材原料向下运动。搅拌头带动增材原料旋转,并通过摩擦热塑化沉积的方式,实现了连续进给的增材制造过程。孟祥晨及其团队^[56]设计了一种异轴增材制造装置,同时进行搅拌摩擦增材制造的处理。该装置主要由第一搅拌头、第二搅拌头、搅拌摩

擦增材制造基板、送丝机和增材丝组成。在增材制造过程中,送丝机将增材丝材运送到中空的搅拌摩擦增材头内部。在搅拌摩擦增材头旋转的同时施加摩擦挤压力,使增材丝发生热塑性软化并沉积在增材基体上。装置随后沿行进方向前进一段距离,经过后置摩擦处理装置进行处理,以改善两道次之间未处理区域,消除了弱连接等缺陷,最终实现了大型构件的全区域搅拌摩擦增材制造界面冶金结合,从而获得了高性能的搅拌摩擦增材制造。

目前,国内的 AFSD 装备研究仍处于初步发展阶段,尚无法进行批量生产,大部分专利着眼于在理论条件下实现增材技术,缺乏实际生产现场的操作性。现有的 AFSD 技术主要基于传统机床的运动控制,因此仅适用于增材制造形状相对简单的构件。此外,为了提高 AFSD 技术的成形能力和产品质量,有必要开发符合 AFSD 技术特点模型处理软件和路径规划软件。这些软件不仅应考虑到 AFSD 过程的特殊性,还需考虑机加工等后处理需求,从而提高增材件的适用范围。

4 应用现状及前景

搅拌摩擦沉积增材技术的研究尚处于初级阶段,研究人员正努力探索该技术在不同制造领域中的潜在应用场景。现阶段,AFSD 技术主要应用于大型结构件成形、特征结构增加以及材料修复^[57-62]等领域。

AFSD 技术可用于直接成形大型结构件、复杂几何零件以及定制零件等。MELD 公司^[51]的实例展示了其成功应用于制造直径达 3 米的大型铝合金框架,凸显了其在制造大型轻质结构件方面的潜力,如图 15 所示。此外,AFSD 技术具备制造复杂零件的高度灵活性,但需要专门设计的 AFSD 设备来实现这一点。

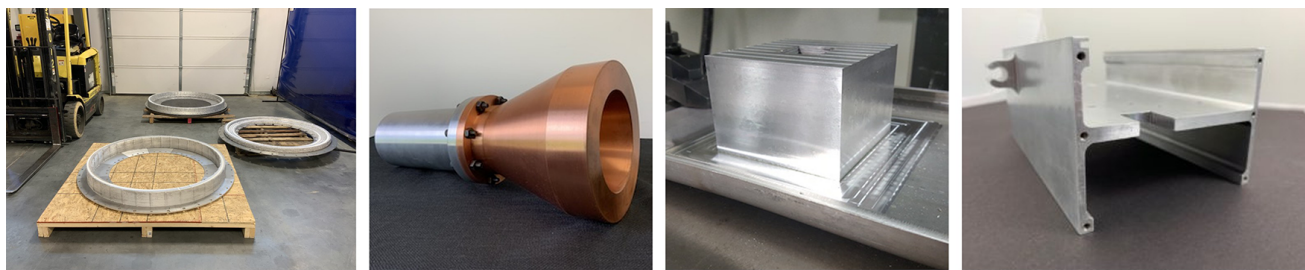


图 15 AFSD 技术制备的零件^[51]
Fig. 15 Parts prepared by AFSD technology^[51]

AFSD 技术的一个优势是能够连续供应填充材料,这使得它在快速修复等领域具有潜在应用。R. J. GRIFFITHS 等人^[63]首次尝试使用 AFSD 技术来修复 AA7075 中的体积损伤,研究了填充圆柱形通孔和长宽方槽的效果。AFSD 技术能够使沉积材料与修

复的孔或槽侧壁之间充分混合,一般下半部分的修复质量较上半部分差,作为 AFSD 技术修复零件的初步研究,尽管修复质量不理想,但仍取得了良好的效果。随后,L. P. MARTIN 等人^[64]利用 AFSD 技术修复 6061 铝板,研究了 V 形槽、半圆形槽和长宽方槽的修

复。在所进行的研究中,基于使用的工艺条件和凹槽几何形状,基板和沉积材料的有效混合达到了3.1~3.5 mm深度。然而,需要注意的是,在这一深度以下,界面的结合效果较差。这说明,根据当前的工艺参数、材料以及工具设计,通过沟槽填充来实现有效修复的深度实际上受到了约3 mm的限制。K. CHOU 等人^[65]利用AFSD技术使用镍钴合金钢100修复1080钢,为异种钢材料的AFSD修复和固态增材提供了参数选择。

目前AFSD技术已经在航天、航空、船舶、兵器等军工行业得到了初步的应用,未来还有望扩展到医疗、电子、建筑和其他各种工业领域。AFSD能够制造复杂几何形状和多材料组合的零部件,可以根据客户的需求和设计要求生产多品种小批量的产品。同时,未来AFSD的原材料将会有更多种类可供选择,如高温合金、高熵合金和复合材料等,这将扩展AFSD技术的适用范围。此外,AFSD制造过程中可以引入人工智能和大数据分析,实现对增材过程的监控、维护预测和质量控制,从而提增材件的高制造效率和一致性,减少废弃物和能源消耗,实现更加可持续的制造。总之,AFSD在制造领域有着广泛的前景,随着材料科学、自动化技术和人工智能的不断发展,这项增材技术将持续为各种行业带来更多的创新和效益。

5 结语

AFSD技术为金属增材制造提供了一种新的加工方式,可用于制造高质量的大型结构件,其细小的等轴组织和优良的力学性能能够与锻造件相媲美。考虑到其独特的优势和目前的研究局限性,目前主要将该工艺应用于零件增材、特征结构增加及修复等领域。在未来的研究和应用中仍然存在一些挑战和问题,主要包括以下几个方面。

(1)AFSD增材成形机理需要更深入地研究,特别是要理解材料变形和流动的物理基础、热生成机制、温度的演变以及与热变形的相互关系。另外,增材后材料晶粒的大小和取向对力学性能和疲劳寿命等方面都有影响,因此在增材过程中有效控制晶粒结构,以及在不同区域和层次上实现晶粒取向控制,从而准确掌握AFSD成形规律。

(2)材料物理力学性能、搅拌工具结构特征、增材工艺参数等不同因素之间的相互耦合效应需要进一步研究,从而更全面地理解它们对增材件最终质量的影响;同时,为确保AFSD的增材性能,需要根据不同的材料确定相应的最佳工艺参数,如搅拌速度、下压速度、行进速度、道间距、层间距等,选择不当的参数可能导致增材件结构不均匀或性能不稳定。

(3)为提高增材过程中的热输入与材料流动特性,可对搅拌工具进行优化设计,在底面采用不同结构的微织构的凸起,改善材料的塑性流动与微观结构;目前AFSD的增材效率较低,需要进一步优化增材设备的进料机构,设计原料连续进给的装置,使增材过程连续化;此外,为了提升增材件性能,可在AFSD装备上建立集成刀库,实现增减材一体制造,以提高构件整体的制造效率与质量。

(4)高熔点材料、复合材料、功能梯度材料等新型材料在AFSD增材制造中的可行性值得深入研究,以推动AFSD技术在各类材料中的广泛应用,而非仅限于轻质合金材料领域。同时基于其固相增材特征,研究AFSD技术在太空微重力、水下真空等复杂环境中的可行性,进一步扩大AFSD技术的应用范围与领域。

(5)AFSD技术可直接在受损或磨损的金属表面进行逐层增材修复,填补损伤或损耗区域,以恢复零部件的原始形状和功能。AFSD技术具有装备简单、工艺流程短等的优势,然而现有的一些研究结果表明AFSD技术的修复质量尚不理想,因此需要从增材机理、工艺控制与修复策略等因素进行综合优化,实现高质量和高灵活度的修复工作。

参考文献

- [1] SRIVASTAVA A K, MAURYA N K, MAURYA M, et al. Effect of Multiple passes on microstructural and mechanical properties of surface composite Al 2024/SiC produced by friction stir processing [J]. *Annales de Chimie – Science des Matériaux*, 2020, 44(6): 421–6.
- [2] GOPAN V, LEO DEV WINS K, SURENDRAN A. Innovative potential of additive friction stir deposition among current laser based metal additive manufacturing processes: A review [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, 32: 228–48.
- [3] KHODABAKHSHI F, GERLICH A P. Potentials and strategies of solid-state additive friction-stir manufacturing technology: A critical review [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 36: 77–92.
- [4] MISHRA R S, HARIDAS R S, AGRAWAL P. Friction stir-based additive manufacturing [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2022, 27(3): 141–65.
- [5] 温琦, 刘景麟, 孟祥晨, 等. 搅拌摩擦增材制造关键技术 with 装备发展 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(6): 01–10.
- WEN Q, LIU J L, MENG X C, et al. Key technologies and equipment development of friction stir additive manufacturing [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2022, 43(6): 01–10.
- [6] PALANIVEL S, NELATURU P, GLASS B, et al. Friction stir additive manufacturing for high structural

performance through microstructural control in an Mg based WE43 alloy [J]. *Materials & Design* (1980–2015), 2015, 65: 934–52.

[7] PALANIVEL S, SIDHAR H, MISHRA R S. Friction stir additive manufacturing: route to high structural performance [J]. *Jom*, 2015, 67(3): 616–21.

[8] ZHAO Z, YANG X, LI S, et al. Interfacial bonding features of friction stir additive manufactured build for 2195-T8 aluminum–lithium alloy [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 38: 396–410.

[9] 薛凤桐, 刘海滨. 摩擦搅拌增材制造发展概述[J]. *现代制造工程*, 2019, (04): 33–40+133.

XUE F T, LIU H B. The overview of friction stir additive manufacturing [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2019, (04): 33–40+133.

[10] YU H Z, MISHRA R S. Additive friction stir deposition: A deformation processing route to metal additive manufacturing [J]. *Materials Research Letters*, 2020, 9 (2): 71–83.

[11] 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): 2778–95.

[12] DILIP J J S, RAFI H K, RAM G D J. A new additive manufacturing process based on friction deposition [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2011, 64 (1): 27–30.

[13] DILIP J J S, BABU S, RAJAN S V, et al. Use of friction surfacing for additive manufacturing [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, 28(2): 189–94.

[14] SHEN J, HANKE S, ROOS A, et al. Fundamental study on additive manufacturing of aluminum alloys by friction surfacing layer deposition [C]. *Proceedings of the 22nd International Esaform Conference on Material Forming: Esaform 2019*. 2019. 10.1063/1.5112691

[15] 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(01): 1–14.

SHI L, LI Y, XIAO Y CH, et al. Research progress of metal solid phase additive manufacturing based on friction stir [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(01): 1–14.

[16] HASSAN A, PEDAPATI S R, AWANG M, et al. A comprehensive review of friction stir additive manufacturing (FSAM) of non-ferrous alloys [J]. *Materials*, 2023, 16 (7): 2723.

[17] 杨坤玉, 袁朝桥, 彭彬, 等. 搅拌摩擦焊近20年研究与发展情况概述 [J]. *焊接*, 2020(01): 21–28, 66.

YANG K Y, YUAN ZH Q, PENG B, et al. Overview of research and development of friction stir welding in the past 20 years [J]. *Welding & Joining*, 2020(01): 21–28, 66.

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第2期

[18] EVERTON S K, HIRSCH M, STRAVROULAKIS P, et al. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing [J]. *Materials & Design*, 2016, 95: 431–45.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 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.

[22] MORISADA Y, IMAIZUMI T, FUJII H. Determination of strain rate in friction stir welding by three-dimensional visualization of material flow using X-ray radiography [J]. *Scripta Materialia*, 2015, 106: 57–60.

[23] 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: 114–27.

[24] AMBROSIO D, MORISADA Y, USHIODA K, et al. Material flow in friction stir welding: A review [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 320: 118116.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 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.

[28] JIN Y, YANG T, WANG T, et al. Behavioral simulations and experimental evaluations of stress induced spatial nonuniformity of dynamic bulk modulus in additive friction stir deposited AA6061 [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 94: 454–65.

[29] STUBBLEFIELD G G, FRASER K A, ROBINSON T W, et al. A computational and experimental approach to

understanding material flow behavior during additive friction stir deposition (AFSD) [J]. *Computational Particle Mechanics*, 2023, 10(6): 1629–1643.

[30] 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: 547–58.

[31] 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.

[32] 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.

[33] 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 G, WU K, SUN Y, et al. Research progress in additive friction stir deposition [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(1): 52–63.

[34] MASON C J T, RODRIGUEZ R I, AVERY D Z, et al. Process–structure–property relations for as–deposited solid–state additively manufactured high–strength aluminum alloy [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 40.

[35] ROBINSON T W, WILLIAMS M B, RAO H M, et al. Microstructural and mechanical properties of a solid–state additive manufactured magnesium alloy [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2022, 144(6): 061013.

[36] 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.

[37] ANDERSON–WEDGE 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.

[38] 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.

[39] 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.

[40] WILLIAMS M B, ROBINSON T W, WILLIAMSON C J, et al. Elucidating the effect of additive friction stir deposition on the resulting microstructure and mechanical properties of magnesium alloy WE43[J]. *Metals*, 2021, 11(11): 1739.

[41] 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(5–6): 2733–41.

[42] BELADI H, FARABI E, HODGSON P D, et al. Microstructure evolution of 316L stainless steel during solid–state additive friction stir deposition[J]. *Philosophical Magazine*, 2021, 102(7): 618–33.

[43] 唐文坤, 杨新岐, 田超博, 等. 工艺参数对铝合金摩擦挤压增材组织及性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2022, 42(1): 59–67.

TANG W K, YANG X Q, TIAN C B, et al. Effects of process parameters on microstructure and properties of aluminum alloy fabricated by friction extrusion additive manufacturing[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2022, 42(1): 59–67.

[44] CHEN G, WU K, WANG Y, et al. Effect of rotational speed and feed rate on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy manufactured by additive friction stir deposition [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(3–4): 1165–76.

[45] 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.

[46] BECK S C, RUTHERFORD B A, AVERY D Z, et al. The effect of solutionizing and artificial aging on the microstructure and mechanical properties in solid–state additive manufacturing of precipitation hardened Al–Mg–Si alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 819: 141351.

[47] 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.

[48] 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.

[49] 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.

[50] 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.

[51] MELD 公司. MELD 公司官网[EB/OL]. (2020–4–15) [2023–10–15]. <https://www.meldmanufacturing.com/>.

MELD Corporation. The official website of MELD corporation [EB/OL]. (2020–4–15) [2023–10–15]. <https://www.meldmanufacturing.com/>.

[52] 南极熊3D打印网. 天津大学成功开发固相摩擦挤压增材制造技术及设备 [EB/OL]. (2022–01–27) [2023–10–15]. <http://www.nanjixiong.com/thread-152024-1-1.html>.

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第2期

Nan ji Xiong 3D printing network. Tianjin University successfully developed solid-phase friction extrusion additive manufacturing technology and equipment [EB/OL]. (2022-01-27) [2023-10-15]. <http://www.nanjixiong.com/thread-152024-1-1.html>.

[53] 航天工程装备(苏州)有限公司. 航天工程装备(苏州)有限公司官网 [EB/OL] (2022) [2023-09-25]. <https://www.aespace.com/product/18.html>.

Aerospace Engineering Equipment (Suzhou) Co. Ltd. The official website of Aerospace Engineering Equipment (Suzhou) Co. Ltd [EB/OL] (2022) [2023-09-25]. <https://www.aespace.com/product/18.html>.

[54] 万龙,高祎晗,温琦. 一种多材料搅拌摩擦增材装置:202110184578. 7[P]. 2021-06-22.

WAN L, GAO W H, WEN Q. A multi-material friction stir additive device:202110184578. 7[P]. 2021-06-22.

[55] 黄永宪,谢聿铭,孟祥晨. 一种连续进给送料搅拌摩擦增材制造装置及增材制造方法:202110411108. X [P]. 2021-07-27.

HUANG Y X, XIE Y M, MENG X C. A continuous feeding friction stir additive manufacturing device and additive manufacturing method:202110411108. X [P]. 2021-07-27.

[56] 孟祥晨,陈会子,陈思浩,等. 一种异轴增材且同步处理搅拌摩擦增材制造装置及方法:202210664889. 8 [P]. 2022-08-26.

MENG X CH, CHEN H Z, CHEN S H, et al. An off-axis additive and synchronous processing friction stir additive manufacturing device and method:202210664889. 8 [P]. 2022-08-26.

[57] 王子健,孙舒蕾,肖寒,等. 搅拌摩擦固相沉积增材制造研究现状 [J]. 材料导报, 2024, 38(12): 22100039.

WANG Z J, SUN S L, XIAO H, et al. Research status of additive friction stir deposition [J]. Materials Reports, 2024, 38 (12): 22100039.

[58] STUBBLEFIELD G G, WILLIAMS M B, MUNTER

M, et al. Ballistic evaluation of aluminum alloy (AA) 7075 plate repaired by additive friction stir deposition using AA7075 feedstock [J]. Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2022, 9(1): 79-89.

[59] 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.

[60] LI B, SHEN Y, LEI L, et al. Fabrication and evaluation of Ti₃Alp/Ti6Al4V- surface layer via additive friction-stir processing [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(4): 412-417.

[61] 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, 2018, 28(2): 648-656.

[62] GARCIA D, GRIFFITHS R J, YU H Z. Additive friction stir deposition for fabrication of silicon carbide metal matrix composites [Z]. Volume 1: Manufacturing Additive; Advanced Materials Manufacturing; Biomanufacturing; Life Cycle Engineering; Manufacturing Equipment and Automation. 2020. 10. 1115/msec2020-8532

[63] 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.

[64] 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, 2021, 118(3-4): 759-773.

[65] 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 Brief, 2022, 41: 107862.