引用格式：梁桢，郭伟，刘青，等.航空发动机钛合金线性摩擦焊研究进展[J].材料工程，2026，54(5)：104-118.
LIANG Zhen, GUO Wei, LIU Qing, et al. Research progress in linear friction welding of titanium alloys for aeronautical engines[J].Journal of Materials Engineering, 2026, 54(5): 104-118.

航空发动机钛合金线性摩擦焊研究进展

梁 桢[1]，郭 伟[1,2]，刘 青[3]，付 强[3]，张宏强[1,2*]
（1 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191；2 北京航空航天大学 高能束流加工技术全国重点实验室，北京 100191；3 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 技术中心，沈阳 110043）

摘要：钛合金凭借其高强度、低密度、优异的抗蠕变性能及耐腐蚀性，成为航空发动机核心承力部件的首选材料，其可靠连接直接决定着发动机的服役安全性及寿命。线性摩擦焊(linear friction welding，LFW)作为一种适配航空发动机精密制造需求的高效固态连接技术，具有近净成形、焊接缺陷少、接头性能优异等显著优势，能够实现钛合金构件的高质量连接，在航空发动机整体叶盘等复杂部件的制造与修复中有着不可替代的作用。本文聚焦航空发动机构件LFW技术的研究与应用需求，从工艺实验、物理模拟、有限元数值模拟及焊后热处理4个核心方向，综述了钛合金LFW的研究成果，对各方向的研究现状及存在问题进行了系统总结，并展望了未来研究需从长期服役性能评价、多尺度数值模拟、LFW工艺改型优化等多个角度展开，以推动钛合金LFW技术在工业领域的更广阔应用。

关键词：航空发动机；钛合金；线性摩擦焊；工艺实验；物理模拟；有限元数值模拟；焊后热处理
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000456 **CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000456
中图分类号：TG453.9 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4381(2026)05-0104-15

Research progress in linear friction welding of titanium alloys for aeronautical engines

LIANG Zhen[1], GUO Wei[1,2], LIU Qing[3], FU Qiang[3], ZHANG Hongqiang[1,2*]
(1 School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;
2 National Key Laboratory of High Energy Beam Processing Technology, Beihang University, Beijing 100191, China;
3 Technology Center, AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

Abstract: Titanium alloys are universally recognized as the prime option for core load-bearing structures in aero-engines, owing to their remarkable blend of high strength, low density, exceptional creep resistance, and outstanding corrosion resistance. The reliability of titanium alloy joints has a direct bearing on the operational safety and service life of aero-engines. Linear friction welding (LFW), an efficient solid-state joining technique that is precisely tailored to the precision manufacturing requirements of aero-engines, offers substantial benefits such as near-net shaping, minimal welding flaws, and excellent joint integrity. It facilitates the high-quality and consistent bonding of titanium alloy components and plays a pivotal role in the fabrication and repair of complex, integrated components like blisks. This paper centers on the research and application demands of LFW technology for aero-engine components. It provides an in-depth review of the progress in titanium alloy LFW across four key areas: process experimentation, physical simulation, finite element numerical modeling, and post-weld heat treatment. It systematically summarizes the current research status and identifies the existing challenges in each field. Moreover, the paper points out future research directions, including the evaluation of long-term service performance, multi-scale numerical simulations ranging from the microstructural to the macroscopic level, and the optimization of modified LFW process parameters. These efforts are crucial for promoting the wider industrial application of titanium alloy LFW technology.

Key words: aero-engines; titanium alloy; linear friction welding; process test; physical simulation; finite element numerical simulation; post-weld heat treatment

在航空发动机中，高推重比是其迭代更新的核心指标，采用轻质高性能材料的同时使用先进结构的发动机零部件已成为提升推重比的突破口[1-3]。作为发动机性能提升的关键结构创新，整体叶盘通过将发动机涡轮盘和叶片一体化连接，相对于传统的榫接式叶盘而言在减少了零件数目、减轻质量的同时提高了发动机性能[4-5]。

要实现整体叶盘的高效制造与性能最大化，优选材料与制造工艺是两大核心环节。在材料方面，钛合金凭借高强度、低密度、优异的抗蠕变性能及耐腐蚀性，被誉为“太空金属”，成为涡轮盘与叶片等关键部件的主力材料，在提高航空整体装备的可靠性及轻量化上起到了关键的作用[6-7]。在工艺方面，当前整体叶盘的制造方法可按增减材特性分为两类，减材制造通过数控铣削或电解加工将毛坯料一次性加工成型，虽能实现精密加工，但存在材料利用率低、修复难度大、加工效率低等问题，且仅适用于同种均质材料；增材制造则通过焊接实现叶片与涡轮盘的连接，尤其适用于异种非均质材料的组合场景，该特性精准匹配了整体叶盘中叶片与轮盘因工作环境差异需采用不同材料的实际需求，成为新一代发动机整体叶盘制造的主流方向[8]。

线性摩擦焊(linear friction welding，LFW)是一种集焊接、塑性加工、摩擦学等技术为一体的先进固相焊接方法，具有工艺简单、节能、污染小、效率高等优点[9-10]，不仅可以满足航空发动机整体叶盘的加工需求，同时也适用于叶盘损伤后的修理过程。相较于电子束焊接等其他叶盘增材制造方法，LFW无需真空环境，更适配发动机整体叶盘的生产制造，且焊接过程最高温度在材料熔点以下，可避免一般熔焊时易产生的气孔、裂纹、夹杂等冶金缺陷，同时焊接界面附近晶粒细小、组织致密，接头部分力学性能超过母材基体。此外，LFW不仅可以实现异种材料的焊接，还能突破旋转摩擦焊等其他固相焊接方法对工件形状的限制，可根据整体叶盘中叶片与涡轮盘的工作环境、特殊需求选择合适的材料及工件结构[11-13]。因此，在航空发动机整体叶盘制造领域，LFW技术的应用前景非常广阔。

近年来，国内外学者们围绕钛合金LFW的工艺实验、热物理模拟、有限元数值模拟和热处理制度等方面开展了许多研究工作，初步揭示了LFW的工艺参数及热处理制度对接头微观组织及力学性能影响的基本规律，但还存在着评价手段缺失、模拟尺度单一、工艺适配局限等问题。本文基于相关研究进展，详细分析了钛合金LFW领域的研究现状，并对未来的研究方向和发展趋势进行展望。

1　LFW工艺原理

LFW的工艺原理如图1所示，在焊接时，其中一个工件作为振动件被夹持在往复运动机构中，在动力源的驱动下以一定的振动频率和幅值做线性往复运动；另一个工件作为移动件被夹持在设备的进给端，在压力的作用下持续向振动工件顶进。两个工件发生接触后，界面通过相对运动产生摩擦热，使接触界面附近材料逐渐软化而形成高温黏塑性金属层，同时在轴向压力的作用下，塑性金属被挤出形成飞边，轴向缩短量增大。当达到预设摩擦时间或轴向缩短量要求后，工件停止振动并回中对齐，并通过施加顶锻压力使界面金属发生相互扩散与再结晶，完成焊接过程[14-16]。

在LFW过程中呈现出显著的动态变化特征，可清晰划分为初始、过渡、平衡、顶锻4个阶段[17-19]如图1(a)所示，不同研究中TC4钛合金LFW过程中焊接参量随时间的变化曲线[20-21]如图1(b)，(c)所示，直观印证了这种阶段性演变规律。在初始阶段，两个工件在摩擦压力的作用下相互接触，并开始进行相对线性往复运动，其中粗糙界面上的大量微观凸起部分首先通过摩擦与剪切产生热量，随着温度的升高，工件接触区域因材料微变形逐渐贴合，实际接触面积持续增大，摩擦因数也随界面状态变化发生相应改变。进入过渡阶段，摩擦界面形态与产热机制发生关键转变：界面在热力作用下逐渐变得平整，温度持续升高使界面表层材料开始软化，形成连续的高温黏塑性金属层；产热机制由最初的库仑摩擦产热转变为黏着摩擦和塑性变形协同产热。同时，少量夹杂与氧化层在热力耦合作用下从界面处挤出，轴向缩短量开始产生。平衡阶段以热与力的动态稳定为核心特征：在摩擦剪应力和轴向压力的共同作用下，高温黏塑性金属持续生成并被挤出，飞边量与轴向缩短量呈线性快速增长，此时飞边带走的热量与界面产生的热量趋于平衡，界面温度场分布更加均匀，材料流动与能量转化

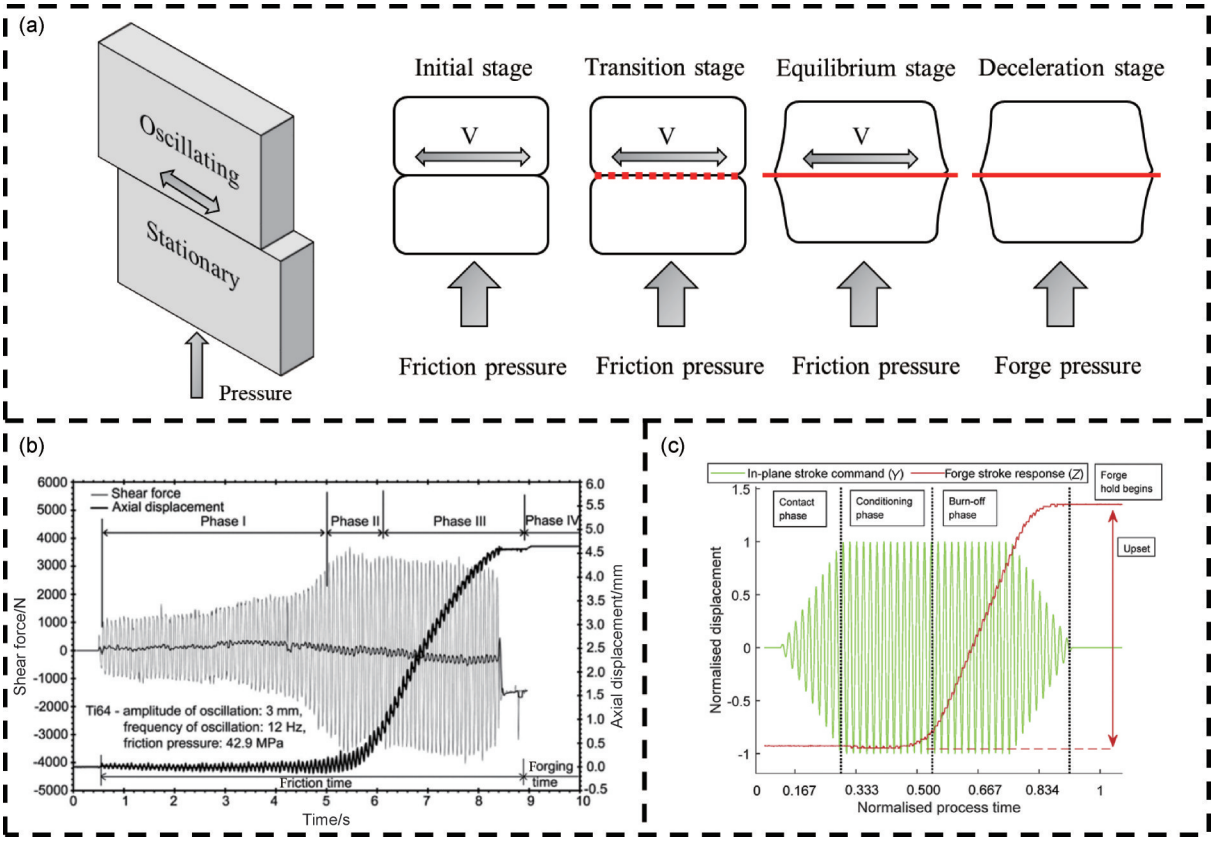


图1 LFW工艺原理

(a)LFW过程示意图[17-19];(b)~(c)LFW过程各方向位移及剪切力随时间变化曲线[20-21]

Fig.1 Principle of LFW

(a)schematic diagram of LFW process[17-19];(b)-(c)curves of displacement and shear force in each direction during LFW process varying with time[20-21]

进入稳定状态。当焊接达到目标缩短量或摩擦时间后,LFW进入顶锻阶段,振动工件即刻停止线性往复运动,两个工件迅速回中对齐,界面产热随即终止。同时在顶锻压力的作用下,界面温度迅速降低,残留的黏塑性金属在热力耦合作用下发生充分的扩散和再结晶,形成致密的冶金结合层,最终实现工件的可靠连接,完成整个LFW过程。

2 钛合金LFW研究现状

作为一种热力耦合的焊接方法,LFW过程涉及界面摩擦、产热传热、高温材料塑性流动与变形、再结晶等能量-材料-力耦合的物理现象[22-24]。目前,国内外学者们主要通过工艺实验、热物理模拟、有限元数值模拟等手段,对钛合金LFW过程中的热场、材料流变行为、应力-应变场、轴向缩短量等物理参量开展了研究,进而揭示焊接工艺参数对LFW过程的影响规律,为该技术在航空发动机应用中的工艺控制提供了重要支撑。此外,为实现改善接头组织、消除残余应力、提高接头性能的目标[25-27],研究者们也对钛合金LFW的热处理工艺进行了大量探索,为钛合金LFW全过程的系统性研究奠定了良好的基础。

2.1 LFW工艺实验

LFW过程中,材料的固有属性与振频、振幅、摩擦压力、顶锻压力等关键参数共同构成了影响LFW焊接质量的核心要素,这些要素均会影响焊接过程中复杂的力-热行为,进而导致接头的组织和性能的改变,因此,钛合金LFW工艺实验始终是国内外学者们关注的重点领域[28-31]。

20世纪90年代Vairis等[32]率先开展了TC4钛合金LFW的工艺实验,发现实现有效焊接所需的最小功率输入主要取决于振荡的频率与幅度,同时提高顶锻压力有助于在能量输入略低于最佳焊接条件的情况下有效改善焊缝的力学性能。近年来,随着LFW焊接设备的迭代更新和技术的持续进步,针对钛合金焊接工艺实验研究愈发深入,围绕不同材料在多样化的工艺参数组合下对焊接过程及接头质量的影响展开了更为系统的探索。

Scherillo等[33]研究了TC4零件的LFW工艺,测试了40~50 Hz频率和55~75 MPa摩擦压力下的焊接

效果，发现在其在0.7～1.2 W/mm²的输入功率范围内焊接效果良好。Wang等[34]研究了LFW参数对TC11钛合金接头微观结构及力学性能的影响，发现焊缝中心区（weld center zone，WCZ）形成再结晶β晶粒和针状α相共存的微观组织，随着摩擦压力或剪切速度的增加，WCZ晶粒愈发细化，显微硬度相应增大，同时热机械影响区（thermo-mechanical affected zone，TMAZ）宽度略有减小，接头伸长率有所提升。Ballat-Durand等[35]通过8组焊接参数，分别对β-亚稳态TC17和近α型TA19两种钛合金的LFW过程开展研究，发现提高比功率输入可以缩短焊接时间并提升材料挤出速率，同时较高的法向压力能有效减小工艺影响区的范围，且更有利于界面污染物的挤出和消除。Choi等[36-37]在各种施加压力和振荡频率下对TC4钛合金开展了LFW实验，各参数下接头焊缝区域温度及组织演变如图2所示。发现峰值界面温度主要由施加压力主导，而加热和冷却速率则由频率主导，当焊接温度高于β相变温度（低压力条件）时，WCZ形成α片层组织；当温度低于β相变温度（高压力条件）时，WCZ则以等轴α晶粒为主；同时随着频率的升高，无论是α片层间距还是等轴α晶粒尺寸均呈现细化趋势。Guo等[38]采用LFW技术成功实现了Ti_2AlNb与Ti60异种材料的焊接，获得了强度优于Ti60母材的焊接接头，同时通过对接头界面微观结构演变和拉伸性能的系统表征，揭示了两种合金的界面键合机制并建立了相关的物理模型。马核[22]建立了双态组织TC4和网篮态组织TC17异种合金在LFW过程中的微观结构演变模型，发现在焊接过程中，接头的TC4侧比TC17侧发生更显著的塑性变形与塑性流动，母材（base metal，BM）组织从TMAZ到WCZ依次经历了塑性变形、塑性失稳、剧烈塑性流变过程，原始微观组织在焊缝区转变为β相并发生剧烈破碎。

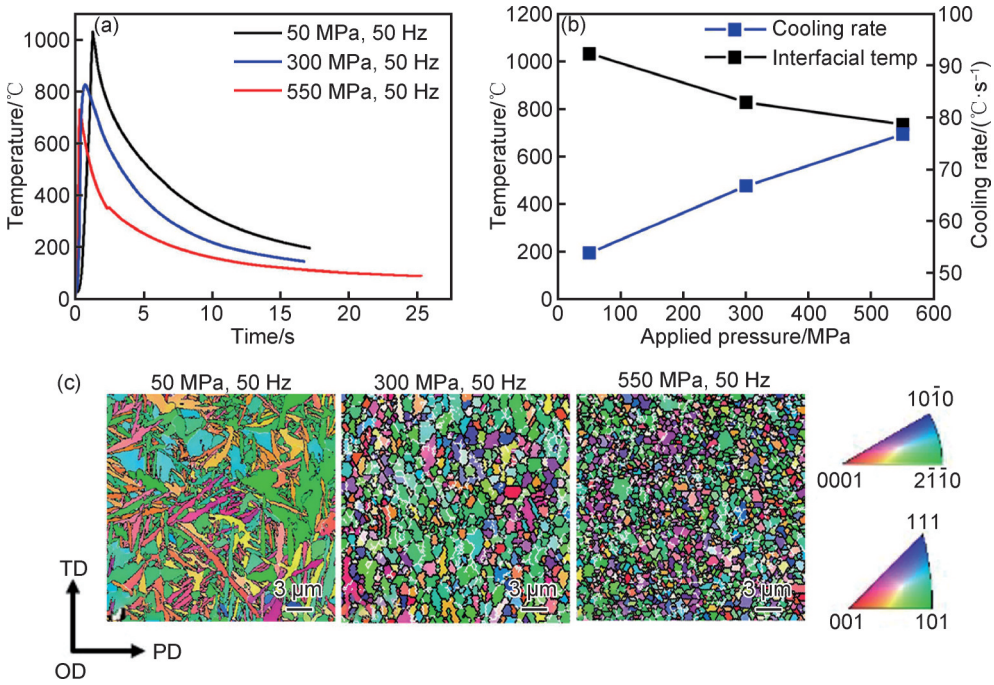


图2　不同压力下TC4钛合金LFW接头焊缝区的温度及组织演变图[37]

（a）焊接界面热循环曲线；（b）焊接界面峰值温度及冷却速率；（c）焊接界面EBSD图

Fig.2　Temperature and microstructure evolution diagrams of weld zone of TC4 titanium alloy LFW joints under different pressures[37]

(a)thermal cycle curve of welding interface; (b)peak temperature and cooling rate of welding interface; (c)EBSD maps of welding interface

针对于不同类型的钛合金，通过合理设置摩擦压力与振荡参数以精准控制热输入是保证LFW焊接接头质量的关键因素[39-40]。优化焊接工艺参数以去除界面污染物，同时改善WCZ与TMAZ内的微观组织是提升接头性能的主要途径。目前已有不少研究实现了同种或异种钛合金LFW的高质量连接，为钛合金LFW的工业应用提供了参考。但现有研究多聚焦于一种或多种焊接参数对于焊接过程、微观组织演变和拉伸、冲击等短期力学性能的影响，对于焊接接头疲劳、蠕变等长期服役性能的研究较少，同时将工艺参数组合与接头性能直接关联的优化方法尚未完善。

2.2　LFW物理模拟

LFW过程常伴随着摩擦热和挤压变形，同种材料在不同焊接参数下，接头各微区显微组织与接头力学

性能会表现出不同的特征，但是由于变形条件复杂多样，直接分析变形条件与显微组织和力学性能之间的关联较为困难，通常需要针对某个特定变形条件进行针对性分析。物理模拟正是一个经济成本较低，且可以定量研究合金在不同温度或应变速率等特定变形条件下微观组织演变和材料塑性流动的实验手段。其中，单轴压缩、平面应变压缩、扭转等物理模拟实验已被证实是研究实际热变形过程的一种简单有效的方法[41-43]。近年来，为深入探究钛合金LFW的复杂过程，国内外学者们针对其工艺特点和材料特性设置了不同形式的模拟方法，如图3所示[44-47]。这些模拟手段各有侧重，为揭示钛合金LFW界面行为提供了多维度视角，为后续解析焊接机理，优化焊接工艺参数提供了重要支撑。

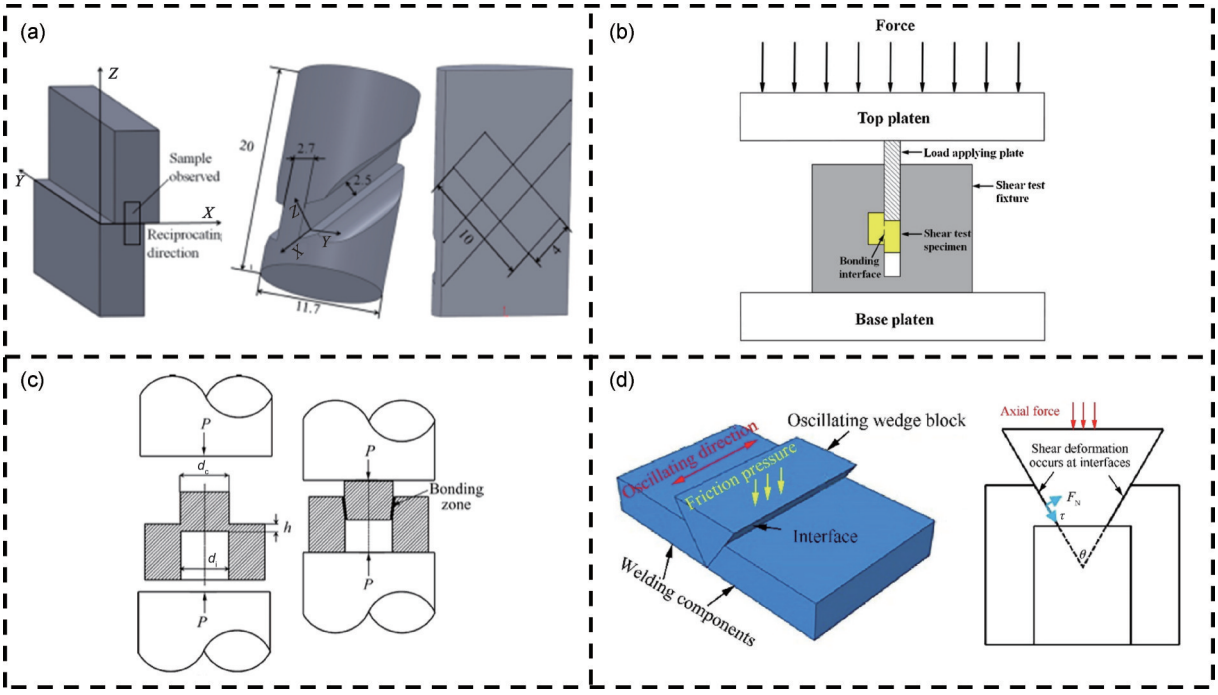


图3 不同形式的物理模拟工艺示意图

(a)剪切压缩[44]；(b)热压缩固态连接[45]；(c)帽型试样热压缩[46]；(d)嵌入式热压缩[47]

Fig.3 Schematic diagrams of physical simulation processes in different forms

(a)shear compression[44]; (b)hot compression solid-state bonding[45]; (c)hot compression of hat-shaped specimens[46]; (d)hot compression of embedded specimens[47]

Jing等[44]设计了一种新型剪切压缩试样成功模拟了TC4钛合金的LFW过程，发现在剪切压缩试样中存在与LFW接头类似的微观组织演变机制，并通过热物理模拟结果计算得出LFW过程中界面应变速率超过70 s^{-1}，与实际LFW的高应变速率特征高度吻合，证实了该种剪切压缩方法可以有效模拟LFW的热机械条件，为复杂变形模式的热变形过程提供了新的模拟途径。相比之下，Sun等[45]所设计的TC4和TC17钛合金的固态连接实验则更聚焦于温度、压力、时间等宏观工艺参数对界面结合质量的影响，虽未直接模拟出LFW的动态摩擦过程，但也通过对固态连接条件的调控，明确了孔洞主要分布于TC4侧或界面晶界处，且升高压力或温度均可显著减少孔洞数量、提高界面结合率，进而提升接头剪切强度，为异种钛合金LFW压力与温度参数的优化提供了参考依据。针对LFW的工艺特点，Guo等[46]对特殊设计的帽形试样开展了不同温度、应变速率和压缩位移的热压缩实验，并重点分析了近β型TB2钛合金的变形行为。结果表明，热压缩时变形温度的降低和应变速率的增加均会导致键合区宽度减小，峰值应力增大；且热压区边缘的变形晶粒与中心区域的细小再结晶晶粒均与LFW焊缝区特征高度一致。由此可见，该方法兼顾了材料的动态变形和晶粒再结晶特性，适用于解析近β型钛合金在LFW过程中的界面结合机理。Ma等[47]提出了一种主要应用于飞机中长或超长承载结构件组合制造的嵌入式LFW工艺，通过嵌入式热压缩的热物理模拟方法结合数值模拟研究了该工艺的界面塑性流动行为和黏合机理，并讨论了塑性流动不均匀导致焊接缺陷的形成机理，提出了嵌入式LFW过程的塑性流动模型。研究表明，垂直振荡方向热塑性金

属主要沿焊接界面向下流动，导致形成了倒“V”形的塑性区，向上的塑性流动较弱，导致接头顶部易出现未焊缺陷，并据此提出了高振频、低振幅、低压力的工艺优化方案。该方法以复杂结构件成形缺陷的作用机制为核心研究对象，构建了数值模拟结果与工艺参数优化之间的直接关联路径，为相关工程实践提供了重要的理论指导和参考价值。

LFW作为钛合金构件高效连接的固相焊接技术，其力学性能高度依赖于焊接界面的微观结构，从动态再结晶所产生的晶粒尺寸大小到晶粒取向分布，均直接影响焊缝的强度、韧性及疲劳性能。目前已有的研究成果表明，物理模拟手段可以通过复现LFW过程中的部分机械条件（压缩、剪切等），与实际焊接接头的微观形貌进行对比，以推断真实焊接过程中的热机械变形规律[44-49]。因此，国内外研究学者们采用了多种形式的物理模拟手段以系统研究LFW过程中变形行为对接头成型性的影响，这些方法为解析LFW中复杂的热力耦合作用机制提供了有效途径。然而，LFW过程变形本质有着显著特殊性，沿振荡方向的剪切力与垂直于界面的挤压力相互垂直，二者分别主导塑性材料的滑移与挤出，形成差异化的变形模式。现有的研究多集中于单一变形模式或两种变形共存时的整体表现，但对于钛合金LFW而言，在不同工艺参数下哪种变形模式起主导作用的相关定量研究仍较为匮乏。因此，现有的物理模拟方法在匹配实际LFW工艺的变形特征时仍有提升空间，有待进一步优化及完善。

2.3　LFW数值模拟

LFW作为一种典型的热力耦合过程，焊接界面的温度分布规律与材料塑性流动行为具有高度复杂性，难以通过传统的实验方法揭示。因此，开展LFW过程温度场、应力应变场及界面变形行为的数值模拟研究，对于优化焊接工艺参数、提升焊接效率及焊缝质量有着重要的指导意义。早在21世纪初期，Vairis[18]和王庆[50]等就分别采用ELFEN和ANSYS有限元软件建立了LFW的计算模型，并对其温度场分布开展了系统分析，验证了模型的可靠性，为后续LFW有限元模型的优化提供了基础框架。在此基础上，国内外学者们采用二维或三维计算模型，针对铝合金[51-53]、高温合金[54-60]、钢材[61-64]等多种金属材料的LFW过程开展了大量研究。其中，鉴于钛合金在航空航天等高端装备领域的关键应用，其LFW的数值模拟研究尤为深入。

2.3.1　二维建模方法

在钛合金LFW数值模拟研究早期，受限于计算效率，简化几何维度和边界条件以平衡计算成本的二维有限元模型成为主流选择。围绕模型精度提升、物理机制揭示和工艺参数关联等核心问题，对LFW过程中的温度场分布和飞边形貌演化开展了系统研究。

钛合金LFW二维模型相关现象模拟图如图4所示，从建模方式及模型简化策略来看，不同研究呈现出差异化的技术路径。Li等[65]基于ABAQUS/Explicit显式模块，采用考虑应变、应变率及温度影响的Johnson-Cook本构模型，通过“单侧工件进行刚性简化”策略构建了TC4钛合金LFW过程的二维模型，重点研究了工艺参数对接头温度场及轴向缩短量的影响。但LFW过程中强烈的热-机械耦合作用会引发大应变，易导致计算过程异常终止，为此该团队进一步尝试采用了ABAQUS/Standard隐式模块中的网格重划分与映射技术（remesh and map solution），有效解决了焊接过程中的网格畸变问题[66]。该工作不仅验证了“显式＋隐式”混合求解的可行性，且计算结果一致显示，LFW过程摩擦界面峰值温度约为1000 ℃，随着振荡频率、振幅、摩擦压力的增加，界面升温速率及轴向缩短速度均显著提高。相比之下，Turner等[67]的研究在模型真实性上更进一步，采用FORGE软件建立了含夹具的二维模型，摒弃了“单侧工件刚性简化”策略，更贴近于实际焊接的约束条件，并通过分析轴向缩短量、峰值温度、应力应变、应变率及计算时间等关键结果对网格划分密度的敏感性，优化了LFW界面附近的网格尺寸，使模型可合理模拟振动摩擦与轴向载荷共同作用下的飞边生成过程。此外，该研究首次通过点跟踪法证实了LFW工艺的自清洁效应，证明在足够的轴向缩短量下，所有位于界面处的污染物均会被挤压至飞边之中，为判断焊接工艺参数组合能否形成无污染物的优质焊缝提供了有效手段。在后续针对残余应力的研究中，发现LFW的残余应力主要源于焊后冷却阶段，焊接过程对残余应力影响较小，进而提出“焊接阶段采用黏塑性模型，冷却阶段切换为弹-黏塑性模型”的分段策略，在保证精度的同时显著提高了计算效率[68]，为后续其他研究者们对该种复杂热-力过程的仿真优化提供了重要参考。在上述研究基础上，Mcandrew等[69]采用DEFORM软件聚焦于焊接过程的自清洁行为和工件的几何形状[70]继续对TC4钛合金的LFW过程展开了深入研究，通过细致分析仿真得出的飞边形貌，研究者们进一步明确了提高摩擦压力在减少材料消耗与保证焊缝清洁性中的关键作用，使工艺参数的优化方向更具有针对性。

随着研究深入，二维模型的应用场景也进一步向异种材料和动态过程解析的方向扩展。Zhao等[71]同

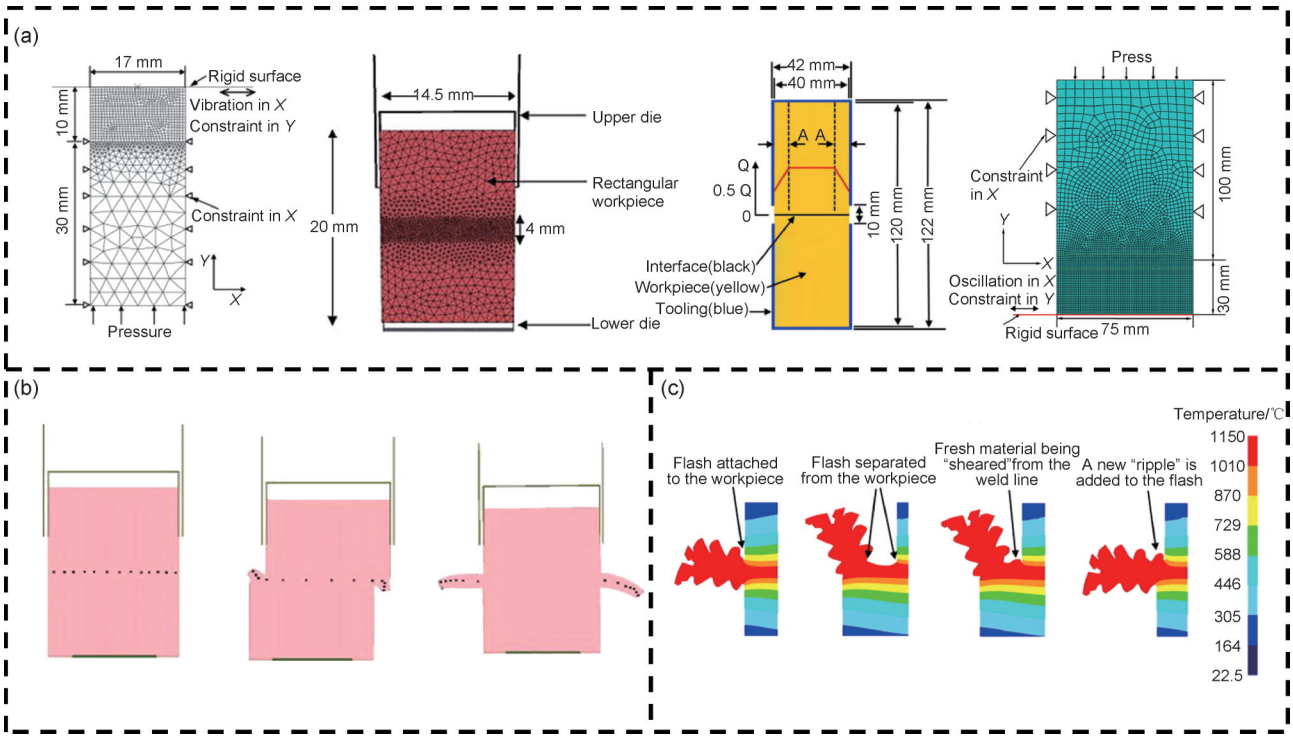


图4 钛合金LFW二维模型相关现象模拟图

(a)不同建模方式[65,67,69,71];(b)焊缝自清洁过程[67];(c)不同飞边形貌[70]

Fig.4 Simulation diagrams of phenomena related to 2D model of titanium alloy LFW

(a)various modeling approaches[65,67,69,71];(b)weld zone self-cleaning process[67];(c)different flash morphologies[70]

样采用1/2简化模型,基于ABAQUS/Explicit显式模块对TC11和TC17异种钛合金之间的LFW过程中瞬态温度场及飞边形貌进行了二维模拟,并结合实验验证重点分析了不同阶段的温度分布特征及振荡频率的影响规律。结果表明,初始阶段最高温度位于界面边缘,且TC17侧温度更高;后续阶段高温区向中心转移,界面中心温度超过边缘,此时TC11侧温度较高。此外,随着振荡频率的增加,摩擦阶段界面与飞边的温度和加热速率略有上升;顶锻阶段界面中心冷却速率加快而飞边处减慢,整体轴向缩短量显著增加。

由此可见早期的二维有限元模型虽存在简化性局限,但其研究进程也从“解决计算可行性”、“同种材料焊接”逐步向“提升模型准确度”、“异种材料”进步,为LFW的数值仿真提供了关键的方法支撑,为后续更精确的三维仿真模型发展奠定了基础。

2.3.2 三维建模方法

由于二维模型难以精准反映LFW过程中多维度的热力场分布,也无法准确预测飞边在垂直于振动方向的形态特征,相关研究者们进而开展了三维模型的研究,以求更真实地模拟界面热力演化和材料流动行为,完整体现飞边地复杂成形过程,钛合金LFW三维模型下相关现象的模拟结果如图5所示。

三维模型的早期探索聚焦于基础框架的搭建及可靠性验证,为后续研究奠定理论方法基础。Tao等[72]率先采用DEFORM软件建立了TC4钛合金LFW的三维热力耦合模型,与二维模型类似,其也采用了“单侧工件刚性简化”策略以平衡计算成本。计算结果与实验数据对比显示,数值模拟的界面峰值温度和接头轴向缩短量的误差分别被控制在12%和16%以内,虽然进行了模型的适度简化,但也为三维模型的工程应用提供了可靠依据。在此基础上,Sorina-Müller等[73]进一步扩展了模型的工业适配性,选取了工业中具有代表性的棱柱状和刀片状两种典型接触界面几何结构,利用ANSYS有限元软件对β锻造和α+β锻造两种锻造态的TC19钛合金的LFW过程开展了完整的结构-热耦合瞬态三维仿真,计算了轴向缩短量随摩擦时间的变化关系。

三维模型的核心优势在于可以精准捕捉材料在空间各个方向上的流动规律,研究者们以此为切入点,借助三维仿真模型更深化了对LFW过程摩擦界面处材料流动行为的理解。基于前期的研究结果[72],Ji等[74]着重分析了工艺参数对材料流动行为的影响,发现材料流速在摩擦阶段随时间快速增大,进入顶锻阶段后则急剧降低;振频,振幅和摩擦压力的增大均可以提高摩擦阶段内的材料流速,其中摩擦压力的影响更加显著,而锻造压力的增大则会促进高温材料挤

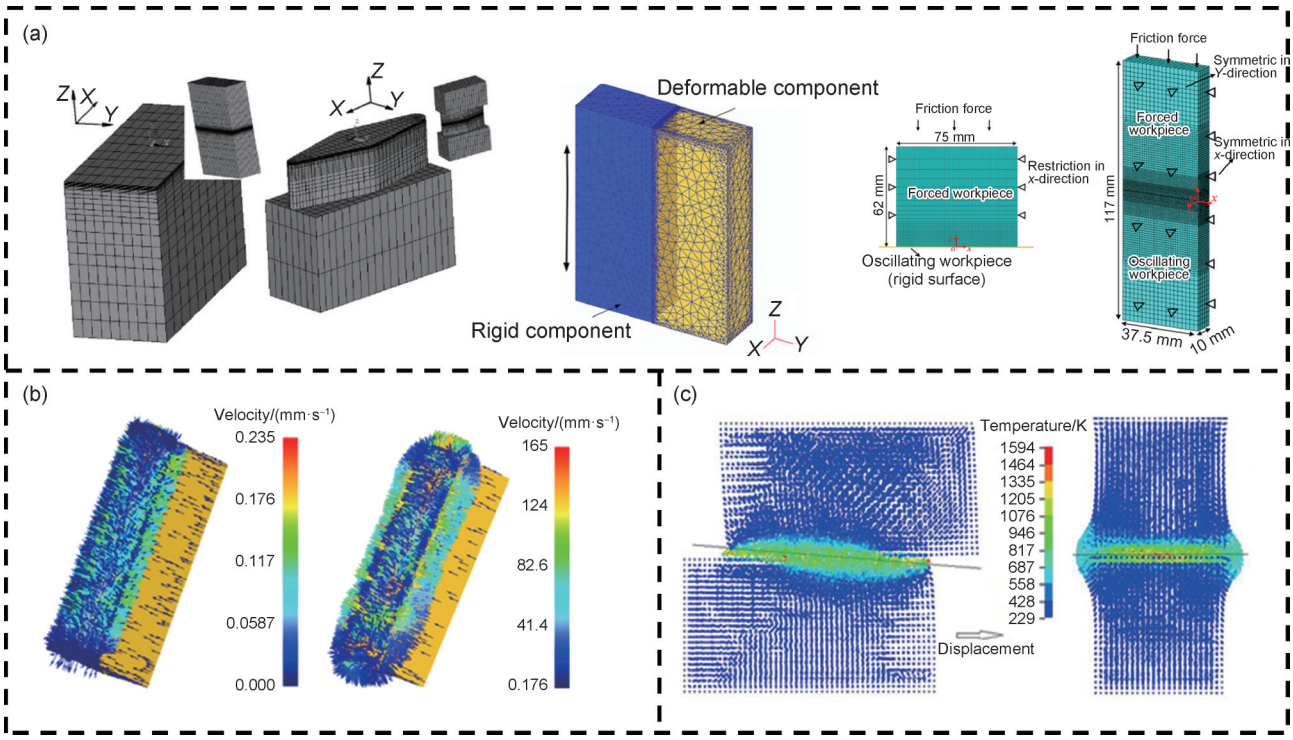


图 5　钛合金 LFW 三维模型相关现象模拟图

(a)不同建模方式[73-74,77]；(b)不同频率下材料流动速度[74]；(c)焊接接触区温度分布[75]

Fig.5　Simulation diagrams of phenomena related to 3D model of titanium alloy LFW

(a)various modeling approaches[73-74,77]; (b)material flow velocity at different frequencies[74,67]; (c)temperature distribution in the welding contact zone[75]

出并加快冷却速率。同时，该研究还量化了特定界面尺寸和振幅条件下制造无污染物焊缝所需的最小轴向缩短量，将三维模型的预测能力转化为了工艺优化的量化依据。针对传统的有限元方法在涉及大变形仿真中的局限性，Skripnyak 等[75]引入了光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics，SPH)方法，结合自行开发的本构方程，基于 LS DYNA 软件建立了近 α 型和 α＋β 型两类钛合金 LFW 的三维热力耦合模型。该方法突破了网格畸变的限制，清晰揭示了焊接接头形成于复杂的非稳态应力应变场中，界面层首先发生剧烈的塑性变形，且塑性变形区的对称面会偏离初始接触界面，压力梯度和温度升高导致的流动应力下降共同促使材料沿横向挤出，从微观机制层面系统地揭示了 LFW 过程中三维空间内材料塑性流动的非对称演化规律，为明确复杂界面行为提供了全新视角。

在各类焊接方法中，残余应力均是决定焊接质量的核心因素，提升残余应力预测精度在有限元仿真中具有至关重要的意义。Gong 等[76]重点分析了 TC17 钛合金 LFW 中的冷却过程，并结合轮廓法进行了实验验证，发现三维模型可精准捕捉残余应力“纵向＞横向＞法向”的分布特征，且这一规律与冷却初期 3 个方向的冷却速率差异直接相关；同时，经参数优化后，最大残余应力可以降低 30%，体现了三维模型在残余应力预测中的实用价值。考虑到残余应力主要受锻造阶段温度变化的影响，振荡阶段产生的应力影响较小，He 等[77]在先前研究的基础上，将 TC17 钛合金的 LFW 过程分为振荡和顶锻阶段分别建模，确定了振荡模型聚焦温度场，锻造模型关注残余应力场的研究思路。通过 X 射线衍射、钻孔法、等值线法等多种手段验证了模型的可行性，并基于接头内部残余应力分布的形状函数以及峰值表面应力和峰值内应力之间的定量关系，构建了接头内部残余应力的预测方法，实现了通过测量表面应力对内部残余应力的有效预测，为后续大型构件内部残余应力的评估提供了高效路径。

2.3.3　简化建模方法

在针对于 LFW 过程的数值建模中，无论是二维还是三维模型，均以显式分析的热力耦合全过程模拟为主。由于 LFW 过程涉及大变形行为，易引发网格畸变，这类行为通常需要通过任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrangian-Eulerian，ALE)方法或其他网格重划分技术处理。然而，这类复杂的网格重划分方法往往会消耗大量时间计算资源，导致计算成本居高不下。为此，许多研究采用“单侧工件刚性简化”策略以平衡计算成本[65-66,69,72,74]，但即便如此，计算耗时问题仍未根本解决；同时，该方法对于异种材料或非均质材料的 LFW 过程适用性较差，难以保证计算精度。

因此，近年来许多相关研究者针对于钛合金LFW数值模拟的简化建模方法开展了大量探索，旨在保证关键所需结果准确性的前提下，最大限度降低计算成本，从而加快研究进展。

在前期的研究成果中[69-70]，Mcandrew等[78]发现已有的二维模型难以满足其精度要求，而建立的三维模型因网格数量激增导致计算耗时过长。为此，将整个建模过程分为热模型和塑性流动模型两阶段：首先通过二维模型模拟LFW初始阶段的加热过程，采用均匀热流（边缘处因工件正弦运动线性降低50%），并结合热物性参数，生成初始阶段结束时的温度分布；随后将该温度分布映射至三维塑性流动模型中，以体现初始阶段产生热量对后续过程的影响。此外，还采用了“回顾性”分析方法，将实验测得的振动位移和轴向缩短量作为塑性流动模型的输入参数，用位移路径代替力作为工艺输入定义，从而可以使用共轭梯度求解器，极大地减少了计算时间和内存存储需求。与Mcandrew等的简化思路类似，针对无需关注飞边形貌与材料塑性流动行为的研究场景，为规避耗时过长的振荡建模过程，Bühr等[79]基于试验机器数据（如界面力、振荡速度等），在TC4钛合金的LFW过程中以表面热通量代替振荡行为。具体而言，忽略了振荡细节，针对于焊接过程各个阶段的产热特点，通过不同公式计算得出平均热流，并在焊接界面直接施加；同时，由于建模过程不涉及材料塑性变形，通过逐步移除单元层的方法以模拟材料的轴向缩短，确保了热分布与实验的轴向缩短量相匹配。后续还通过不同参数下的实验结果验证了模型的准确性，为后续LFW过程残余应力的预测[80]提供了简化途径，也为研究大型3D结构中的残余应力发展提供了一种高效技术手段。在建立了与Bühr等[79]相同的纯热模型后，Jedrasiak等[81-82]在此基础上开发了一种小应变有限元方法以耦合热场与材料变形。在热模型连续运行的基础上，机械模型仅在离散时间点进行“快照分析”（每次覆盖单次振荡的四分之一周期），并在此间隔内通过多次小应变分析以捕捉塑性变形行为，成功避免了网格畸变问题，在加快计算速度的同时，相比纯热模型进一步提升了仿真精度。

总体来看，LFW数值模拟的简化方法呈现从“全过程模拟”到“靶向聚焦式模拟”转变，其核心逻辑在于仅针对研究目标所聚焦的特定阶段进行精细化建模，对于其他阶段则通过二维简化模型、实验实测数据或计算得出的平均热流等方式代替，以此来降低计算成本。

就钛合金LFW的数值模拟而言，目前研究主要围绕着二维、三维及简化模型展开，几类模型各有侧重又形成互补：二维模型凭借低成本优势成为基础规律探索与工艺参数筛选的有效工具，三维模型凭借对空间特征的精准描述，致力于提升仿真结果的真实准确性，而简化模型则通过靶向简化策略将效率优化作为核心目标。然而，如何在更复杂的场景中进一步平衡计算精度与时间成本仍是当前有限元数值模拟研究的核心挑战。

2.4 LFW焊后热处理

尽管LFW作为一种低热输入的固相焊接方法，可以避免传统熔焊时熔化与凝固过程导致的焊接缺陷，但在其过程中，局部温度与变形水平的剧烈变化会使热量和应力集中作用于摩擦界面附近，最终形成具有异质微观结构的焊接接头，且焊缝附近常伴随应力集中现象。这种组织与应力的不均匀性会显著影响接头性能稳定性，因此，需要通过焊后热处理（post-weld heat treatment，PWHT）调控接头微观组织、消除残余应力，进而实现接头力学性能的优化[83-84]。各类PWHT方法始终是钛合金LFW研究的一大重点，国内外研究者们已针对不同钛合金的LFW接头开展了大量探索，形成了丰富的研究成果。

对于同种钛合金的LFW接头，其PWHT研究多以母材自身的热处理制度为基础参照，通过针对性调整形成适配接头特性的工艺方案，以探究PWHT过程中组织演变机制与性能强化规律的内在关联。Chen等[85]通过单级时效处理及不同温度下的固溶＋时效处理[86]，对Ti_2AlNb合金LFW接头的PWHT开展了系统研究，探究了不同热处理制度对接头微观组织与力学性能的影响，明确了O相析出是Ti_2AlNb合金LFW接头PWHT强化的核心机制，通过不同的热处理方式可以有效调控O相的形态与分布，进而实现对接头硬度及强度的控制，为基于性能需求选择合适热处理制度提供了依据。对于近α型和β亚稳态的钛合金，均质化是PWHT的核心目标，Ballat-Durand等[87]通过分析LFW接头特征区域的微观结构与晶体学特征，揭示了焊缝区相变、再结晶等热机械载荷调节机制，并据此设计出“910 ℃退火2 h-炉冷至635 ℃后时效8 h-空冷”的焊后均质化PWHT工艺。将该工艺分别应用于近α型TA19钛合金和β亚稳态Ti17钛合金的LFW接头后，拉伸实验结果显示，该PWHT工艺通过调控α相析出和β相稳定化程度，既能实现β亚稳态钛合金LFW接头组织的均质化，又可以有效改善近α型钛合金热影响区的软化问题，为该两类钛合金LFW接头的性能优化提供了有效途径[88]。

异种钛合金由于材料本质属性的差异，其LFW

接头的形成机制更加复杂，接头组织与性能的匹配难度显著提升，因此，探索适配的PWHT工艺以调控界面组织、优化接头综合性能有着重大的现实意义。在传统热处理框架内，研究者们通过参考两端母材各自的PWHT工艺，并进行多方案对比与融合，以力求实现异种合金接头的性能平衡。Zhao等[89]尝试了多次热循环＋退火、双重时效、固溶＋时效等多种PWHT工艺，对TC11/TC17异种钛合金LFW接头的组织和性能开展了大量研究与对比，发现固溶＋双重时效工艺通过调控马氏体转变与α相析出，可有效均质化组织及提升接头韧性，可作为最优PWHT方案。Wang等[90]研究了退火温度对TC17/TA15异种钛合金LFW接头的影响，发现650 ℃×3 h的真空退火能增加焊缝区α相含量、细化晶粒并减少α/β相界，进而同步改善接头的力学性能与耐蚀性。

Liu等[91]对焊接参数优化后的TC4/TC17异种钛合金LFW接头进行了550～680 ℃×4 h的真空时效处理，观察到不同温度的时效过程，虽然TC17侧析出层状α相，但是接头整体组织特征未发生显著改变，疲劳寿命与焊态持平，疲劳源仍位于TC4母材，说明传统的时效难以突破异种材料的性能瓶颈，同步改善接头的强度及韧性。为此，Zhang等[92]提出电脉冲处理（electric pulse treatment，EPT）的创新方法，通过局部焦耳热效应与电子风效应的协同作用，在保持强度的同时大幅提升塑性，传统时效热处理与电脉冲处理各自对应的微观结构响应示意图如图6所示，其效果显著优于传统时效处理，为异种钛合金LFW接头的PWHT方案提供了新的思路。

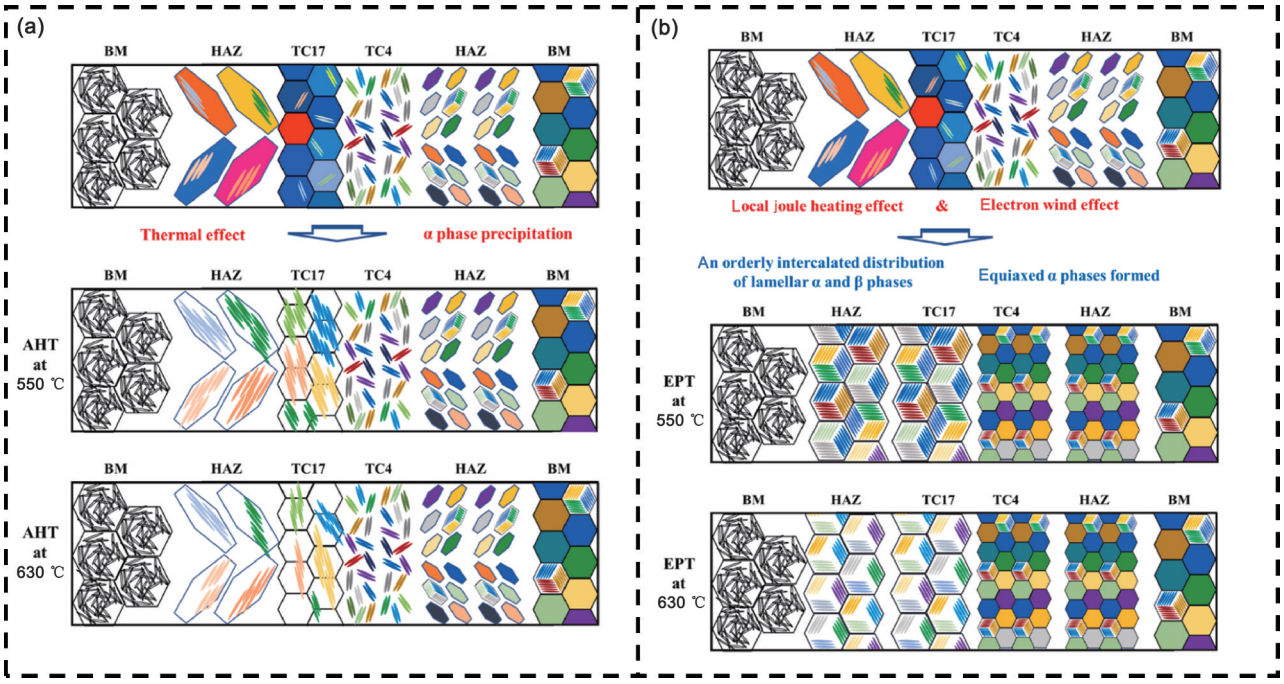


图6　不同热处理方式接头微观结构响应示意图[92]

（a）传统时效热处理（AHT）；（b）电脉冲处理（EPT）

Fig.6　Schematic diagrams of microstructure responses of joints with different heat treatments[92]

(a)traditional aging heat treatment(AHT); (b)electron pulse treatment(EPT)

综上所述，钛合金LFW接头的质量及可靠性不仅取决于焊接过程，更与PWHT制度直接相关。现有研究已明确：单一合金的PWHT可通过析出相调控或均质化实现性能提升，异种合金则需应对材料差异带来的组织匹配难题。随着航空发动机整体叶盘向双性能发展，异种钛合金LFW接头需求增加，因此，后续应针对接头因局部组织不均匀形成的力学性能薄弱环节，从微观组织演变机理入手，探究新型PWHT方式对焊后组织的调控作用，开发针对性调控异种合金界面的PWHT工艺方案，进而实现接头力学性能的针对性提升。

3　结束语

国内外学者针对航空发动机钛合金LFW过程开展了多维度研究，分别通过工艺实验、物理模拟、有限元数值模拟等手段，系统地探究了接头微观组织与力学性能的内在关联，揭示了焊接过程中温度场与塑性

变形场的演变特征，对焊接工艺参数进行了优化控制；同时，通过对接头焊后热处理方式的探究，实现了接头焊后组织的调控，进一步改善了接头力学性能。这些研究从不同角度推动了钛合金LFW技术的发展，为其在航空发动机等领域的工业应用提供了理论与技术支持。然而，当前的研究手段较为单一，仍存在许多待突破与拓展的研究方向：

（1）航空发动机整体叶盘作为核心承力部件，其服役过程常面临高温氧化、交变载荷、应力腐蚀等多因素耦合的极端工况。然而，当前对航空发动机钛合金LFW的研究多数围绕短期力学性能展开，缺乏对不同条件的长期服役环境下接头性能的系统评价，难以匹配整体叶盘的实际服役需求。未来需建立疲劳、蠕变、高温热暴露等长期服役性能的评价体系，深入探究接头在长期服役条件下的性能退化规律，构建基于微观组织演变的寿命预测模型，从而为焊接工艺参数优化及焊后热处理制度的调控提供更贴合实际需求的理论依据。

（2）现有的钛合金LFW数值模拟方法存在明显的尺度缺陷，模拟多局限于试样级工件的宏观尺度，主要围绕工艺参数组合对焊接过程温度演变和材料塑性变形行为展开，既未涉及整体叶盘级大型复杂构件的仿真，又缺失微观尺度的数值模拟，难以与接头的微观组织演化机制或力学性能直接关联。未来应拓展微观尺度的数值模拟研究，通过构建原子扩散模型、晶粒生长动力学模型等，深入探究钛合金LFW过程中的原子迁移规律、平均晶粒尺寸演变和微观结构的动态变化，与工艺实验相结合，建立宏观工艺参数与微观组织之间的关联，为工艺参数优化提供更精细的理论支撑。同时，也应逐步开展包含工装夹具、考虑焊接路径的整体叶盘级LFW有限元仿真，重点模拟焊接过程中叶片根部等复杂结构下的温度场演变及应力-应变分布，为焊接工装优化及焊接路径规划提供依据，解决现有模拟与工程实际脱节的问题。

（3）现有研究多数围绕航空发动机整体叶盘展开，仅聚焦于同种或异种合金的LFW过程，对工艺场景的拓展探索相对有限。值得关注的是，当前已涌现出薄板LFW[93]、嵌入式LFW[47]、中心驱动双面LFW[94]等新型工艺雏形，但相关研究仍相对匮乏，未来研究应突破单一应用场景的限制，结合汽车制造、医疗器械、航空航天等多元化工业背景，针对不同构件形态开展常规LFW工艺的改型优化，适配多样化的连接需求，推动LFW技术向更广泛的工业领域内应用。

综上所述，未来的研究方向应从长期服役性能的评价、多尺度的数值模拟、LFW工艺改型优化等多个角度展开，以推动钛合金LFW技术在工业领域的更广阔应用。

参考文献

[1] 黄云，李少川，肖贵坚，等. 航空发动机叶片材料及抗疲劳磨削技术现状[J]. 航空材料学报，2021，41(4)：17-35.
HUANG Y，LI S C，XIAO G J，et al. Research progress of aero-engine blade materials and anti-fatigue grinding technology [J]. Journal of Aeronautical Materials，2021，41(4)：17-35.

[2] XU Z Y，WANG Y D. Electrochemical machining of complex components of aero-engines：developments，trends，and technological advances [J]. Chinese Journal of Aeronautics，2021，34(2)：28-53.

[3] 张安琴，王江，张林嘉. 航空发动机先进材料发展现状和趋势研究[J]. 内燃机与配件，2024(14)：130-136.
ZHANG A Q，WANG J，ZHANG L J. Research on development status and trends of advanced materials for aircraft engines [J]. Internal Combustion Engine & Parts，2024(14)：130-136.

[4] 杨万辉，徐新发，杨金发. 整体叶盘先进制造技术应用与发展[J]. 世界制造技术与装备市场，2019(2)：69-72.
YANG W H，XU X F，YANG J F. Application and development of advanced manufacturing technology for whole leaf discs [J]. World Manufacturing Engineering & Market. 2019 (2)：69-72.

[5] 罗皎，李森泉. 高性能整体叶盘制造技术研究进展[J]. 精密成形工程，2015，7(6)：1-7.
LUO J，LI M Q. A review on the manufacturing technology of high property blisk[J]. Journal of Netshape Forming Engineering，2015，7(6)：1-7.

[6] 郭鲤，何伟霞，周鹏，等. 我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景[J]. 热加工工艺，2020，49(22)：22-28.
GUO L，HE W X，ZHOU P，et al. Research status and development prospect of titanium and titanium alloy products in China[J]. Hot Working Technology，2020，49(22)：22-28.

[7] PETERS M，KUMPFERT J，WARD C H，et al. Titanium alloys for aerospace applications [J]. Advanced Engineering Materials，2003，5(6)：419-427.

[8] 陈燕. TC4钛合金线性摩擦焊接头组织结构分析[D]. 大连：大连交通大学，2012.
CHEN Y. Study on the microstructure of TC4 joints welded by linear friction welding[D]. Dalian：Dalian Jiaotong University，2012.

[9] 陈亮，李文亚，马铁军. 线性摩擦焊接技术研究进展与展望[J]. 航空工程进展，2010，1(2)：178-183.
CHEN L，LI W Y，MA T J. The State-of-the-art and perspectives of linear friction welding technology [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering，2010，1(2)：178-183.

[10] 苏宇，李文亚，王新宇，等. 钛合金线性摩擦焊研究现状及展望[J]. 中国材料进展，2017，36(11)：852-859.
SU Y，LI W Y，WANG X Y，et al. Linear friction welding of titanium alloys：state-of-the-art and perspectives [J]. Materials China，2017，36(11)：852-859.

[11] MCANDREW A R，COLEGROVE P A，BÜHR C，et al. A lit-

erature review of Ti-6Al-4V linear friction welding[J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 225-257.

[12] YANG X, MENG T, CHU Q, et al. A review of linear friction welding of Ni-based superalloys[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(6): 1382-1391.

[13] CAI W, DAEHN G, VIVEK A, et al. A state-of-the-art review on solid-state metal joining[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2019, 141(3): 031012.

[14] 刘建丽, 王严, 耿培皓, 等. 线性摩擦焊接技术及其在航空航天领域中的应用[J]. 焊接, 2016(10): 11-17.
LIU J L, WANG Y, GENG P H, et al. Application of linear friction welding technology in aerospace industry[J]. Welding & Joining, 2016(10): 11-17.

[15] 赵鹏康. TC11/TC17钛合金线性摩擦焊接头组织与性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
ZHAO P K. Investigation on microstructure and properties of linear friction welded joints of TC11/TC17 titanium alloys[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.

[16] BHAMJI I, PREUSS M, THREADGIL P L, et al. Solid state joining of metals by linear friction welding: a literature review[J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(1): 2-12.

[17] VAIRIS A, FROST M. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti 6Al 4V[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 271(1/2): 477-484.

[18] VAIRIS A, FROST M. Modelling the linear friction welding of titanium blocks[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 292(1): 8-17.

[19] MA T J, LI W Y, XU Q Z, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of linear friction welded 45 steel joint[J]. Advanced Engineering Materials, 2007, 9(8): 703-707.

[20] LI W Y, VAIRIS A, PREUSS M, et al. Linear and rotary friction welding review[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(2): 71-100.

[21] LACHOWICZ D S, BENNETT C, AXINTE D A, et al. On the influence of tooling behaviour over axial shortening mechanisms in linear friction welding of titanium alloys and modelling plasticisation effects[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 161: 103674.

[22] 马核. 钛合金线性摩擦焊力热效应与工艺模型研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2023.
MA H. Mechano-thermal effect and process model of linear friction welding of titanium alloy[D]. Beijing: Beihang University, 2023.

[23] VAIRIS A, PAPAZAFEIROPOULOS G, TSAINIS A M. A comparison between friction stir welding, linear friction welding and rotary friction welding[J]. Advances in Manufacturing, 2016, 4(4): 296-304.

[24] CHAMANFAR A, JAHAZI M, CORMIER J. A review on inertia and linear friction welding of Ni-based superalloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46: 1639-1669.

[25] 王旭扬, 李菊, 陶军, 等. 焊后热处理对TC11钛合金线性摩擦焊接头组织与性能的影响[J]. 材料工程, 2023, 51(10): 118-125.
WANG X Y, LI J, TAO J, et al. Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of linear friction welded TC11 titanium alloy joints[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(10): 118-125.

[26] FALODUN O, OKE S, BODUNRIN M. A comprehensive review of residual stresses in carbon steel welding: formation mechanisms, mitigation strategies, and advanced post-weld heat treatment techniques[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025: 1-34.

[27] 肖桂枝, 李丰博, 王洋, 等. 焊接接头焊后处理工艺研究现状[J]. 材料导报, 2016, 30(1): 115-121.
XIAO G Z, LI F B, WANG Y, et al. Review on the post-weld treatment of welded joint[J]. Materials Reports, 2016, 30(1): 115-121.

[28] WANJARA P, JAHAZI M. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: processing, microstructure, and mechanical-property interrelationships[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(8): 2149-2164.

[29] ROMERO J, ATTALLAH M M, PREUSS M, et al. Effect of the forging pressure on the microstructure and residual stress development in Ti-6Al-4V linear friction welds[J]. Acta Materialia, 2009, 57(18): 5582-5592.

[30] MA T, CHEN T, LI W Y, et al. Formation mechanism of linear friction welded Ti-6Al-4V alloy joint based on microstructure observation[J]. Materials Characterization, 2011, 62(1): 130-135.

[31] 张传臣, 黄继华, 张田仓, 等. 振幅对线性摩擦焊接头组织及界面原子浓度分布的影响[J]. 材料工程, 2011(10): 38-41.
ZHANG C C, HUANG J H, ZHANG T C, et al. Effects of amplitude on joint microstructure and the interfacial atomic concentration distribution of linear friction welding[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(10): 38-41.

[32] VAIRIS A, FROST M. High frequency linear friction welding of a titanium alloy[J]. Wear, 1998, 217(1): 117-131.

[33] SCHERILLO F, ASTARITA A, CARRINO L, et al. Linear friction welding of Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(2): 201-207.

[34] WANG X, LI W, MA T, et al. Effect of welding parameters on the microstructure and mechanical properties of linear friction welded Ti-6.5 Al-3.5 Mo-1.5 Zr-0.3 Si joints[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 46: 100-108.

[35] BALLAT-DURAND D, BOUVIER S, RISBET M. Deep understanding of the influence of the process parameters during linear friction welding on the joint quality and the microstructural changes of two mono-material titanium alloy joints: the β-metastable Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (Ti17) and the near-α Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti6242)[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2020, 51(1): 263-278.

[36] CHOI J W, AOKI Y, USHIODA K, et al. Linear friction welding of Ti-6Al-4V alloy fabricated below β-phase transformation temperature[J]. Scripta Materialia, 2021, 191: 12-16.

[37] CHOI J W, AOKI Y, USHIODA K, et al. Effect of the welding

parameters on microstructure and mechanical properties of linear friction welded Ti-6Al-4V alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 75: 651-663.

[38] GUO Z, MA T, CHEN X, et al. Interfacial bonding mechanism of linear friction welded dissimilar Ti2AlNb-Ti60 joint: grain intergrowth induced by combined effects of dynamic recrystallization, phase transformation and elemental diffusion[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 5660-5668.

[39] 赵治鹏, 马铁军, 李文亚, 等. 不同摩擦压力下TB2线性摩擦焊过程参量的变化规律研究[J]. 精密成形工程, 2019, 11(6): 24-28.
ZHAO Z P, MA T J, LI W Y, et al. Process variables during linear friction welding of TB2 under different friction pressures [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(6): 24-28.

[40] 李菊, 常川川, 李晓红, 等. TC17钛合金线性摩擦焊工艺研究及显微组织分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(3): 940-946.
LI J, CHANG C C, LI X H, et al. Study on linear friction welding process and microstructure analysis of TC17 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(3): 940-946.

[41] CHOI S H, SHIN E J, SEONG B S. Simulation of deformation twins and deformation texture in an AZ31 Mg alloy under uniaxial compression[J]. Acta Materialia, 2007, 55(12): 4181-4192.

[42] LIPPOLD J C, LIVINGSTON J J. Microstructure evolution during friction stir processing and hot torsion simulation of Ti-6Al-4V [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(8): 3815-3825.

[43] RULE J R, LIPPOLD J C. Physical simulation of friction stir welding and processing of nickel-base alloys using hot torsion[J]. Metallurgical and Materials Transactions A: 2013, 44(8): 3649-3663.

[44] JING L, FU R D, LI Y J, et al. Physical simulation of microstructural evolution in linear friction welded joints of Ti-6Al-4V alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20(4): 286-290.

[45] SUN L X, LI M Q. Interfacial voids, microstructure and shear strength of TC4/TC17 bond[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 270: 265-273.

[46] GUO Z, YANG X, LI W, et al. Thermo-physical simulation of deformation behavior and microstructure evolution for linear friction welding of near-β titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(2): 481-493.

[47] MA T, GUO Z, YANG X, et al. Plastic flow and interfacial bonding behaviors of embedded linear friction welding process: Numerical simulation combined with thermo-physical experiment [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2025, 38(1): 102899.

[48] YANG X, LI W, MA J, et al. Thermo-physical simulation of the compression testing for constitutive modeling of GH4169 superalloy during linear friction welding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 656: 395-407.

[49] YANG X, LI W, FENG Y, et al. Physical simulation of interfacial microstructure evolution for hot compression bonding behavior in linear friction welded joints of GH4169 superalloy[J]. Materials & Design, 2016, 104: 436-452.

[50] 王庆. 线性摩擦焊接过程有限元热力耦合分析[D]. 西安:西北工业大学, 2001.
WANG Q. Finite element thermo-mechanical coupling analysis of the linear friction welding process[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001.

[51] SONG X, XIE M, HOFMANN F, et al. Residual stresses in linear friction welding of aluminium alloys[J]. Materials & Design, 2013, 50: 360-369.

[52] BUFFA G, CAMPANELLA D, PELLEGRINO S, et al. Weld quality prediction in linear friction welding of AA6082-T6 through an integrated numerical tool[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 389-396.

[53] LIS A, MOGAMI H, MATSUDA T, et al. Hardening and softening effects in aluminium alloys during high-frequency linear friction welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 547-558.

[54] YANG X, LI W, LI J, et al. Finite element modeling of the linear friction welding of GH4169 superalloy[J]. Materials & Design, 2015, 87: 215-230.

[55] GENG P, QIN G, ZHOU J, et al. Finite element models of friction behaviour in linear friction welding of a Ni-based superalloy [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 152: 420-431.

[56] QIN G, GENG P, ZHOU J, et al. Modeling of thermo-mechanical coupling in linear friction welding of Ni-based superalloy[J]. Materials & Design, 2019, 172: 107766.

[57] GENG P, QIN G, CHEN L, et al. Simulation of plastic flow driven by periodically alternating pressure and related deformation mechanism in linear friction welding[J]. Materials & Design, 2019, 178: 107863.

[58] GENG P, QIN G, ZHOU J. A computational modeling of fully friction contact-interaction in linear friction welding of Ni-based superalloys[J]. Materials & Design, 2020, 185: 108244.

[59] GENG P, QIN G, MA H, et al. Numerical modelling on the plastic flow and interfacial self-cleaning in linear friction welding of superalloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 296: 117198.

[60] SU Y, YANG X, MENG T, et al. Strengthening mechanism and forming control of linear friction welded GH4169 alloy joints [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(4): 609-626.

[61] FRATINI L, BUFFA G, CAMPANELLA D, et al. Investigations on the linear friction welding process through numerical simulations and experiments[J]. Materials & Design, 2012, 40: 285-291.

[62] LI W Y, SHI S X, WANG F F, et al. Heat reflux in flash and its effect on joint temperature history during linear friction welding of steel[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 67: 192-199.

[63] EFFERTZ P S, FUCHS F, ENZINGER N. Modelling the flash formation of linear friction welded 30CrNiMo8 high strength steel chains[J]. The International Journal of Advanced Manufac-

turing Technology, 2017, 92(5): 2479-2486.

[64] GENG P, QIN G, ZHOU J. Computational investigation of welding heat transfer characteristics and parameters effectiveness in mild steel linear friction welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49: 234-246.

[65] LI W Y, MA T, LI J. Numerical simulation of linear friction welding of titanium alloy: Effects of processing parameters[J]. Materials & Design, 2010, 31(3): 1497-1507.

[66] 陈亮, 李文亚, 马铁军, 等. 基于 ABAQUS 二次开发 TC4 线性摩擦焊过程的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(增刊1): 348-351.
CHEN L, LI W Y, MA T J, et al. Numerical simulation of secondary development TC4 titanium alloy based on ABAQUS software during linear friction welding[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2010, 20(Suppl.1): 348-351.

[67] TURNER R, GEBELIN J C, WARD R M, et al. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: modelling and validation[J]. Acta Materialia, 2011, 59(10): 3792-3803.

[68] TURNER R, WARD R M, MARCH R, et al. The magnitude and origin of residual stress in Ti-6Al-4V linear friction welds: an investigation by validated numerical modeling[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43(1): 186-197.

[69] MCANDREW A R, COLEGROVE P A, ADDISON A C, et al. Modelling the influence of the process inputs on the removal of surface contaminants from Ti-6Al-4V linear friction welds[J]. Materials & Design, 2015, 66: 183-195.

[70] MCANDREW A R, COLEGROVE P A, ADDISON A C, et al. Modelling of the workpiece geometry effects on Ti-6Al-4V linear friction welds[J]. Materials & Design, 2015, 87: 1087-1099.

[71] ZHAO P, FU L, ZHONG D. Numerical simulation of transient temperature and axial deformation during linear friction welding between TC11 and TC17 titanium alloys[J]. Computational Materials science, 2014, 92: 325-333.

[72] TAO J, ZHANG C T, LIU T P, et al. Numerical computation of a linear friction welding process[J]. Materials Science Forum, 2008, 720(575/578): 811-815.

[73] SORINA-MÜLLER J, RETTENMAYR M, SCHNEEFELD D, et al. FEM simulation of the linear friction welding of titanium alloys [J]. Computational Materials Science, 2010, 48 (4): 749-758.

[74] JI S, WANG Y, LIU J, et al. Effects of welding parameters on material flow behavior during linear friction welding of Ti6Al4V titanium alloy by numerical investigation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(5): 927-938.

[75] SKRIPNYAK V A, IOKHIM K, SKRIPNYAK E, et al. Modeling of titanium alloys plastic flow in linear friction welding[J]. Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, 2021, 19 (1): 91-104.

[76] GONG H, LIU M, ZHANG T, et al. Study on residual stress and optimization of welding parameters in linear friction welding of TC17 titanium alloy[J]. Materials, 2022, 15(24): 8963.

[77] HE P, WU Y, ZHANG T, et al. Residual stress analysis in linear friction welded Ti17[J]. Materials, 2024, 17(18): 4507.

[78] MCANDREW A R, COLEGROVE P A, FLIPO B C D, et al. 3D modelling of Ti-6Al-4V linear friction welds[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2017, 22(6): 496-504.

[79] BÜHR C, COLEGROVE P A, MCANDREW A R. A computationally efficient thermal modelling approach of the linear friction welding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 849-858.

[80] BÜHR C, AHMAD B, COLEGROVE P A, et al. Prediction of residual stress within linear friction welds using a computationally efficient modelling approach[J]. Materials & Design, 2018, 139: 222-233.

[81] JEDRASIAK P, SHERCLIFF H R, MCANDREW A R, et al. Thermal modelling of linear friction welding[J]. Materials & Design, 2018, 156: 362-369.

[82] JEDRASIAK P, SHERCLIFF H R. Modelling of heat generation in linear friction welding using a small strain finite element method[J]. Materials & Design, 2019, 177: 107833.

[83] 李晓红, 张彦华, 李赞, 等. 热处理温度对 TC17(α+β)/TC17(β)钛合金线性摩擦焊接头组织及力学性能的影响[J]. 材料工程, 2020, 48(1): 115-120.
LI X H, ZHANG Y H, LI Z, et al. Effect of heat treatment temperatures on microstructure and mechanical property of linear friction welded joints of titanium alloys TC17(α+β)/TC17(β)[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(1): 115-120.

[84] 魏晨. TC11/TC17 线性摩擦焊接头焊后热处理对其组织和性能的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
WEI C. Study on the effect of post-weld heat treatment of TC11/TC17 linear friction welded joints on its microstructure and properties[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

[85] CHEN X, XIE F Q, MA T J, et al. Effects of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of linear friction welded Ti_2AlNb alloy[J]. Materials & Design, 2016, 94: 45-53.

[86] CHEN X, XIE F Q, MA T J, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of linear friction welded Ti_2AlNb joint during solution and aging treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 668: 125-136.

[87] BALLAT-DURAND D, BOUVIER S, RISBET M, et al. Multi-scale and multi-technic microstructure analysis of a linear friction weld of the metastable-β titanium alloy Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (Ti17) towards a new post-weld heat treatment[J]. Materials Characterization, 2018, 144: 661-670.

[88] BALLAT-DURAND D, BOUVIER S, RISBET M. Contributions of an innovative post-weld heat treatment to the microtensile behavior of two mono-material linear friction welded joints using: the β-metastable Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (Ti17) and the near-α Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti6242) Ti-alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 766: 138334.

[89] ZHAO P, WEI C, LI Y, et al. Effect of heat treatment on the microstructure, microhardness and impact toughness of TC11 and TC17 linear friction welded joint[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 803: 140496.

[90] WANG C, GUO Q, ZHU X, et al. Effect of post-weld heat treatment on microstructure and property of linear friction welded TC17/TA15 titanium alloy joint[J]. Materials Characterization, 2023, 199: 112799.

[91] LIU J, LI J, JIN F, et al. Macro and micro structural responses of dissimilar TC4/TC17 titanium alloy joints in linear friction welding and post-welding heat treatment processes and their effects on tensile and fatigue performance[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 37: 484-492.

[92] ZHANG X, XUE K, LIU L, et al. Effect of electrical pulse treatment on the microstructural and mechanical responses of heterogeneous linear friction welded TC17/TC4 dissimilar joint[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 1-12.

[93] SHOTRI R, MIURA T, GENG P, et al. Understanding thermal-mechanical variations and resulting joint integrity of pressure-controlled linear friction welding of thin-steel sheets[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2025, 204: 104235.

[94] KHAN F, MIURA T, MORISADA Y, et al. Dissimilar joining of A7075 aluminum and SS400 steel utilizing center-driven double-sided linear friction welding using mild steel as a center material: processing, mechanical and microstructure characterization[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 139: 67-80.

基金项目:材料结构精密焊接与连接全国重点实验室基金项目(CT2024060169)

收稿日期:2025-08-11;**录用日期**:2025-09-21

通讯作者:张宏强(1985—),男,副教授,博士,从事焊接、增材制造方向,联系地址:北京市海淀区学院路37号北京航空航天大学机械工程及自动化学院(100191),E-mail:zhanghq@buaa.edu.cn

(本文责编:张宝玲)