

引文格式: 李志欣, 曾晗鹏, 李天旭, 等. 高性能薄壁构件多能场辅助旋压成形研究现状[J]. 航空制造技术, 2026, 69(7): 25010185.

LI Zhixin, ZENG Hanpeng, LI Tianxu, et al. A review on multi-energy field assisted spinning forming of high-performance thin-walled components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(7): 25010185.

高性能薄壁构件多能场辅助旋压成形研究现状

李志欣¹, 曾晗鹏², 李天旭², 王思齐¹, 王思议¹, 龙涛², 张洪瑞^{3,4,5}

1. 中国民用航空飞行学院理学院, 广汉 618307;
2. 中国民用航空飞行学院航空工程学院, 广汉 618307;
3. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119;
4. 中国科学院大学, 北京 100049;
5. 西北工业大学, 西安 710072)

[摘要] 高性能薄壁构件是航空航天等领域迫切需求的关键部件, 具有广泛的应用前景。旋压技术是实现该类构件整体制造与性能提升的一种有效途径。然而, 由于高性能薄壁构件常采用难变形材料制造, 使其在旋压成形过程中易出现因不均匀变形程度大导致的起皱、破裂、不贴模等缺陷, 制约了此类构件的高性能制造和应用。近年来, 为改善其成形性能, 研究逐渐将电、磁、超声、激光等多种能场引入旋压过程, 开展了大量多能场辅助成形研究。本文综述了多能场在薄壁件旋压成形中实现高性能制造的研究进展; 对比了不同能场对难成形材料的作用机理, 以及对旋压成形过程、成形质量的影响规律; 分析了与多能场辅助旋压成形过程相关的有限元建模关键技术; 基于上述对比分析, 总结了各能场在旋压成形中的优势与局限, 并对高性能薄壁件多能场辅助旋压成形技术仍面临的挑战与发展方向进行了展望。

关键词: 高性能薄壁构件; 旋压成形; 多能场辅助; 难变形材料; 成形质量

中图分类号: V261; TG316.8

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010185



李志欣

副教授, 博士, 研究方向为高性能薄壁构件塑性成形理论与技术。

随着我国运载火箭、空间飞行器等航空航天装备的快速发展, 对其关键结构部件的性能与制造精度提出了越来越高的要求——薄壁轻量化、高性能、高精度、耐腐蚀等^[1-2]。在这一背景下, 旋压作为一种近净成形技术, 因其材料利用率高、成形精度高、构件力学性能稳定等优势, 被广泛应用于航空发动机壳体、导弹锥段、燃料贮箱等薄壁构件的制造, 已成为推动航空航天结构轻量化与高性能化的关键工艺之一^[3-4]。然而, 随着装

备性能要求的不断提高, 高强铝合金、钛合金、高温合金等难变形材料的使用日益广泛。这类材料强度高、变形抗力大, 在传统旋压过程中极易出现回弹显著、开裂、起皱等缺陷, 尤其在多次成形中, 累积损伤与变形失稳问题更为突出, 严重制约了其在高端装备中的应用^[5]。

为突破上述工艺瓶颈, 研究者逐渐将目光投向多能场辅助旋压技术^[6-8]。该技术通过在旋压过程中引入电流、超声、电磁、激光等外部能量

收稿日期: 2025-12-09; 退修日期: 2026-01-05; 录用日期: 2026-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(52105417); 中央高校基本科研业务费专项资金(25CAFUC09019、25CAFUC04073); 陕西省重点研发计划(2025CY-YBXM-086); 陕西省博士后科研资助项目(2025BSHSDZZ391)

通信作者: 张洪瑞, 助理研究员, 博士, 研究方向为空天装备结构轻量化设计与先进制造技术。

场,主动调控材料的变形机制,从而有效降低流动应力、提升材料塑性,抑制缺陷产生,实现“难成形材料”向“高性能构件”的转化。本文旨在梳理薄壁构件多能场辅助旋压成形的研究进展,重点分析其作用机理与工艺优势,并对其未来发展方向与关键技术挑战进行了展望。

1 多能场辅助塑性成形作用机理

1.1 能场诱导的软化与塑性效应

多能场辅助成形技术的核心在于利用外部能量场与金属塑性变形过程的耦合作用,调控材料的变形抗力与塑性流动行为。其作用机理主要可分为能场诱导的热软化效应与非热效应(如电致塑性、磁致塑性效应),二者共同或分别作用于材料,从而实现高效、高精度的难变形材料的高性能成形。

1.1.1 热软化效应

热软化效应是多能场辅助成形中提升材料塑性的核心物理机制。其本质在于外部能场对材料的加热作用为原子扩散与位错运动提供了必需的热激活能,通过降低晶格阻力(Peierls-Nabarro力)和促进位错动态回复,有效降低材料的流动应力、延缓加工硬化,从而显著提高其宏观流动性与成形极限。根据能量传递路径与热场形成方式的不同,该效应主要体现在于电场、电磁场和激光3种辅助形式。

在电辅助成形中,焦耳热是实现材料软化的主要途径之一。焦耳热效应使材料整体或局部温度迅速上升,从而促进变形区位错回复,加速相转变,显著降低材料的变形抗力。如图1所示^[9],局部焦耳热效应可促进钛合金软化组织转变。现有研究表明,焦耳热引起的温升是电辅助成形中流动应力降低的主要原因。王建华^[10]和Jin^[11]等的研究表明,电流通过焦耳热效应将纯钛加热至温成

形区间(如400~500℃),有效降低了材料的旋压变形抗力。蔡继文^[12]在对AZ31B镁合金的电流辅助剪切旋压研究中发现,当电流强度大于500A时,板料温度可迅速升至200℃以上,促进了镁合金动态再结晶过程,从而降低了变形抗力。Chen等^[13]在对壁厚为0.49mm、径厚比>48的30CrMnSiA钢薄壁杯型件的电辅助旋压中,通过将电流集中于变形区,显著降低了成形力。值得注意的是,电流产生的焦耳热效应的效率远高于其他加热方式(如火焰加热)。Liao等^[14]对6111铝合金的研究表明,电流加热在实现与常规热处理类似塑性提升效果时,所需时间仅为后者的1/30~1/60。然而,过度的焦耳热也可能导致负面效果,如塑性下降^[15]和晶粒粗化^[16]。因此,在电辅助旋压成形中,对焦耳热效应进行精确控制是提高成形质量的关键。

在电磁场辅助成形中,感应加热是实现局部或整体热软化效应的手段。该技术利用交变磁场在导电坯料中感生出涡流,通过焦耳热使材料迅速升温,从而有效降低流动应力,显著提升成形性。这一效应在难变形金属的旋压工艺中尤为重要。Al-Obaidi等^[17]开发的感应加热辅助单点渐进成形工艺,通过在板材

背面进行局部同步加热,使DP980、22MnB5等高强度钢的平均成形力分别降低了59.98%和37.80%,并有效减小了回弹,提高了成形后构件的几何精度。对于2219铝合金薄壁封头,易兆祥^[18]和Gan^[19]等的研究表明,采用电磁感应加热旋压,在250℃内对法兰区域进行加热,能显著抑制因大径厚比导致的起皱失稳,改善壁厚均匀性。江鹏^[20]在壁厚<2mm、径厚比>28的ZK61镁合金带内筋筒形件旋压中,利用感应加热构建了外高内低的梯度温度场,有效改善了材料的流动性,促进了复杂内筋的填充。对于极端难变形的镍基高温合金,高频感应加热产生的热软化效应可以将坯料温度迅速提升至1000~1150℃的高温区间,从而显著降低其变形抗力,实现筒形件的稳定旋压成形^[21-23]。这些研究共同表明,电磁感应加热提供的可控、高效热源,是实现难变形材料热软化、突破其成形极限的关键技术。

在各种能场中,激光凭借其极高的方向性、单色性和能量密度,成为实现精准、高效、局部热软化的最理想工具之一。激光加热的原理在于将高度集中的光能精准转化为热能。当高功率激光束聚焦于材料表面时,光子能量被电子吸收并通过碰

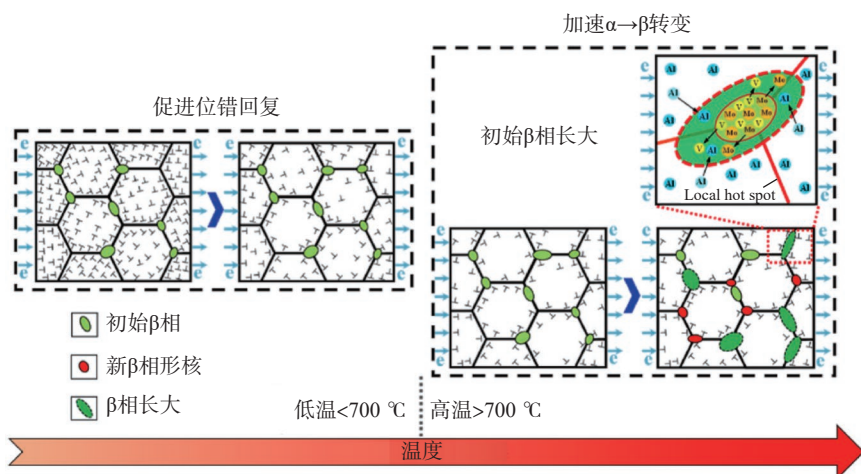


图1 电流局部焦耳热效应对TA15合金组织转变促进作用示意图^[9]

Fig.1 Schematic diagram of the promotion of microstructural transformation in TA15 alloy by localized Joule heating effect of electric current^[9]

撞传递给晶格,引起局部温度的急剧升高。这种非接触式加热方式对材料类型无特殊要求,且具有加热效率高、速度快、空间控制精度高(光斑尺寸可调)等优势^[24]。相较于电磁感应加热或传统炉内加热,激光加热能实现真正意义上的“靶向”软化,即仅在需要变形的极小区域(如旋轮前方)产生高温,而工件整体热负荷很低,从而避免了因整体升温导致的组织劣化、氧化和热变形^[25-26]。激光热软化效应的直接宏观表现是材料流动应力和成形力的大幅降低。Klocke等^[26]的研究表明,在旋压成形过程中,通过激光可以将工业纯钛(Ti Grade 2)成形区的温度稳定维持在400~500℃,同时将激光束焦点温度限制在800℃以下,有效避免了钛合金在882℃发生的相变和材料组织劣化。Cusanno等^[27]的对比试验量化了激光热软化的效果,对于AZ31B镁合金,将变形区加热

至450℃(激光功率250W)可使厚度1mm和直径96mm的板材壁厚<1.08mm的薄壁件成形高度较400℃(激光功率250W)时提高64.8%;最小成形厚度由0.825mm降低至0.78mm。另外,激光诱导的热软化还能促进变形过程中的动态回复与再结晶,优化微观组织^[28]。然而,热软化效应也需精确控制,过高的温度或不当的加热可能导致不利的微观组织演变,如Wang等^[29]在对7075-T6铝合金进行激光加热时发现,激光加热可能导致强化相(GP区)重新溶解或粗化,造成材料软化,影响最终构件强度。综上,激光提供的可控局部热软化,是突破难变形材料室温成形极限、实现高精度旋压的关键。

1.1.2 电致塑性效应

电场和电磁场除了通过焦耳热效应使材料发生软化,增加材料的流动性,还能基于电致塑性效应(Electroplastic effect, EPE)直接提高

材料的塑性变形能力。电致塑性效应是指电流或电场直接作用于金属材料时,通过非热机制(如电子风、电迁移等)促进位错运动、湮灭、重排,以及影响相变、再结晶等微观演变过程,从而在相同或更低温度下,降低材料流动应力、提升塑性或改变变形机制的现象。大量研究致力于将电致塑性效应与焦耳热效应进行区分和解耦。Zhang等^[30]通过镍基高温合金原位透射试验,发现电流的焦耳热效应和非热效应与电流密度密切相关。Simonetto等^[15]通过温控试验,明确证实了对于高位错密度的AA1050铝合金,在试样温度保持室温的条件下,电流仍能通过促进位错湮灭显著提升断裂应变。Niu等^[31]通过TA15钛合金电拉伸过程电-热解耦试验,区分了电塑性效应中的热贡献与非热贡献(图2),研究表明,非热电致塑性效应主要通过促进溶质原子向位错线扩散和增强钉扎点处

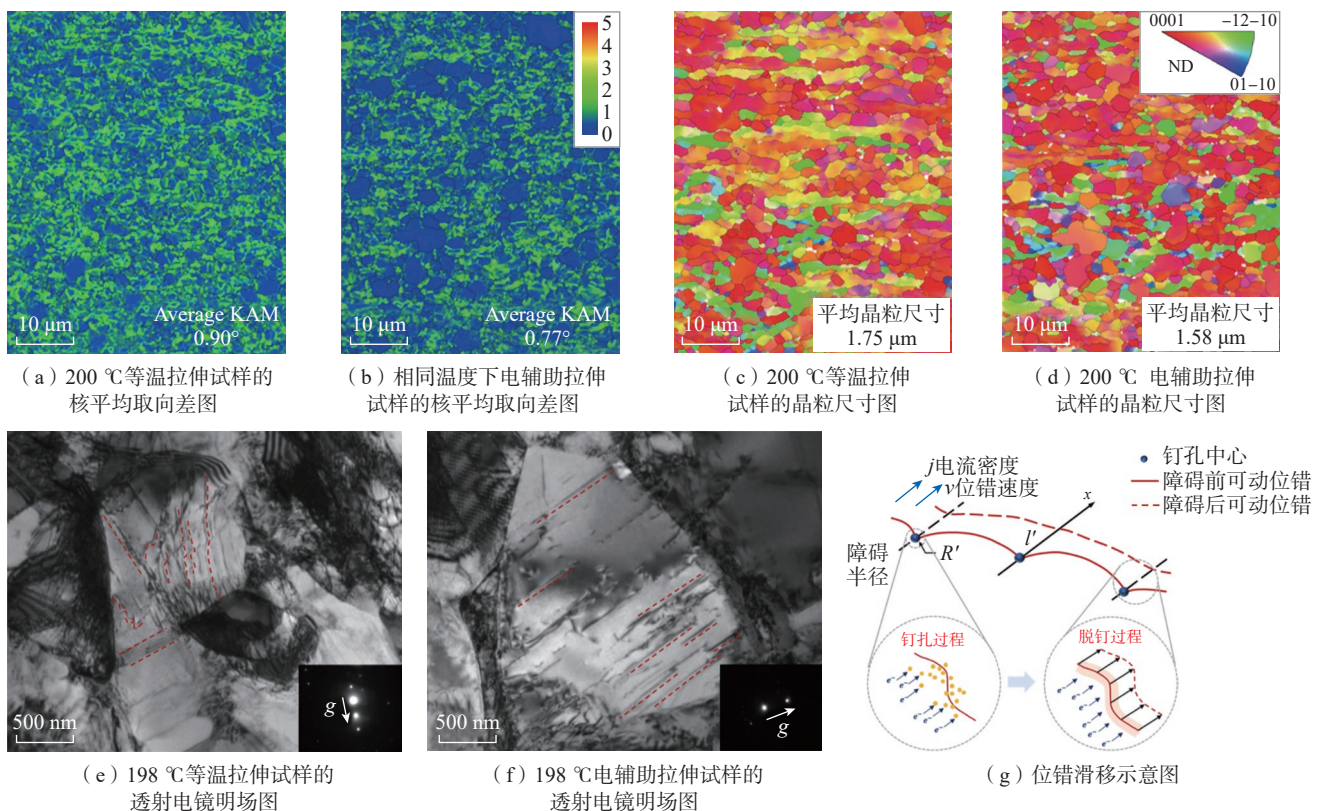


图2 电流对TA15合金拉伸变形组织的影响^[31]

Fig.2 Effect of electric current on the tensile deformation microstructure of TA15 alloy^[31]

的电自由能来影响位错的钉扎与脱钉行为。Xu 等^[32]的研究则从位错动力学层面揭示了纯铝非热效应的微观机制：通过三维离散位错动力学 (Discrete dislocation dynamics, DDD) 模拟,首次定量捕捉了电子与位错间的散射过程(电子风),发现电流能改变位错的激活模式,促进难以运动的位错系激活,从而形成更均匀的位错分布,而非简单的降低位错密度。电致塑性效应对材料的作用具有显著的材料及其状态依赖性。电致塑性效应的作用机制与材料的结构有关。对于面心立方结构的纯铜,电流产生的非热效应能有效促进位错运动和回复^[33]。对于加工硬化态的铝合金,电致塑性效应通过促进位错湮灭来提升塑性^[15],而对于固溶强化型材料,其效应可能更为复杂。例如,在 Haynes 230 镍基合金中,电流诱导的“快速时效”效应(加速碳化物析出)反而提高了流动应力并降低了塑性^[34]。在 SS304 不锈钢中,强烈的固溶硬化效应抑制了电流对位错的脱钉作用,使其非热应力降低效应不明显^[33]。此外,电致塑性效应还能显著影响材料的变形机制。Kuang 等^[35]发现,脉冲电流能特异性地促进 AZ31 镁合金中棱柱面 $\langle a \rangle$ 滑移的启动,从而诱导形成有利于成形的 TD (轧制方向)分离织构。Yan^[36]和 Li^[37]等的研究表明,电流能促进 TC4 钛合金(图 3)和 2219 铝合金的动态再结晶,并改变其应变率敏感性。在电磁辅助成形中,尤其是在中低温或瞬时作用条件下,电致塑性效应仍然是一种重要的非热机制,可以实现材料塑性提升和变形抗力降低。例如,Zhao 等^[38]在 Ti-7Al 合金的脉冲电流辅助拉伸中观察到,电流使位错从平面滑移模式转变为均匀的多方向性三维配置,表明电脉冲促进了交滑移。严思梁^[39]在铝合金电磁渐进成形的研究中,通过理论模型量化了电致塑性效应的贡献,且流动应力下降幅值随电能

量密度和预应变增大而增大。综上,电致塑性效应是一个复杂的非热效应,它能够绕过单纯热激活的限制,直接影响材料的微观变形机制,为实现材料性能与组织的调控提供了新的途径。

1.1.3 磁致塑性效应

磁致塑性效应是指稳态或脉冲磁场本身对金属材料的微观组织演变和力学性能产生的非热影响。这种效应不依赖于明显的温升,而是通过磁场与晶体缺陷(如位错、晶界、相界)的相互作用,以及磁场诱导的洛伦兹力、磁化力等,直接影响材料的相变、再结晶、元素扩散及缺陷行为。

强磁场能够显著细化凝固组织和影响固态相变。Zhao 等^[40]发现,施加 3~9 T 的强磁场能使过冷 Inconel 718 高温合金的晶粒尺寸细化至无磁场时的约 1/3,其机制在于磁场改变了熔体结构,促进了形核,并通过热电磁洛伦兹力折断枝晶臂。Song 等^[41]的研究表明,深冷耦合磁场 (Deep cold coupled magnetic field, CCMF) 处理

能加速 Ti-6Al-4V 合金中亚稳 β 相的分解,并提高位错密度,同时促进再结晶,从而在保持强度的同时显著提升材料塑性。Zhang 等^[42]提出的电磁冲击 (Electromagnetic shock, EMS) 方法,则利用了电磁能量对钛合金高电阻区域(如晶界、位错)的“靶向”效应,驱动 α 晶界迁移、诱发位错湮灭,从而优化微观组织,将钛合金螺栓的疲劳寿命提升了约 17.6%。

此外,稳态磁场也能在加工过程中优化组织和性能。Wang 等^[43]在激光熔覆中引入稳态磁场,发现其产生的热电磁流体效应细化了镍基合金涂层晶粒,提高了固溶度,并使硬质相呈现择优取向,最终将涂层显微硬度提升了 8.6%。这些研究共同表明,磁场作为一种区别于电/磁的物理场,能够通过多种非热机制影响材料的微观组织与性能,这为发展电磁辅助成形工艺提供了依据。

1.1.4 电磁复合场效应

在电磁复合场中,电场和磁场存在强烈的耦合作用。Ye 等^[44]的研

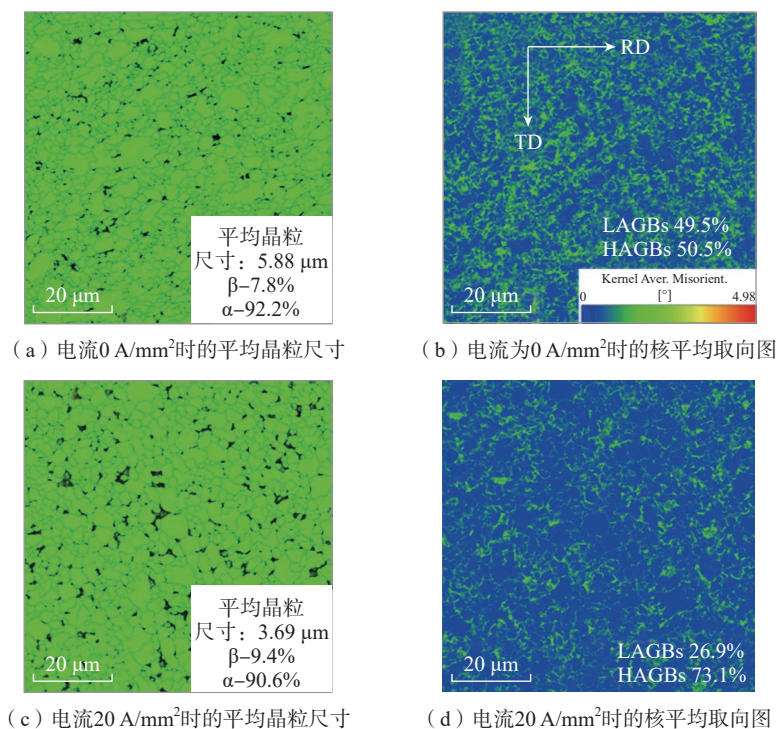


图 3 电流对 TC4 钛合金动态再结晶行为的影响^[36]

Fig.3 Effect of electric current on dynamic recrystallization behavior of TC4 titanium alloy^[36]

究表明,对钛合金分别施加 0.25 T 磁场和 100 A/mm^2 电脉冲后材料硬度分别降低了 3.98% 和 31.5%,而同时施加相同条件下的电磁场则会将硬度显著降低至 67.9%;微观机制研究表明,电辅助变形主要激活低能态的 $\langle a \rangle$ 型位错,位错构型仍趋于平面滑移,而电磁耦合辅助变形能显著激活高能态的 $\langle c \rangle$ 型与 $\langle c+a \rangle$ 型位错(图 4)。这一效应强于单一电场或磁场的简单叠加,揭示了电磁耦合对塑性变形的促进作用。

1.2 能场引入的应力叠加与振动效应

超声振动辅助塑性成形是通过在传统变形工具或坯料上施加高频(通常为 $10 \sim 40 \text{ kHz}$)、低振幅(微米级)的机械振动,利用其引入的动态应力场与振动效应来改善材料变形行为的技术。其核心作用机制并非基于热软化或电磁场耦合,而是源于加工过程中的“应力叠加与体积效

应”和“减摩效应”。

1.2.1 应力叠加与体积效应

超声振动在静态变形应力上叠加了一个周期性交变应力。这一叠加效应能有效降低宏观平均变形抗力,其原理可用“振荡应力模型”进行解释。当叠加的振动应力达到一定水平时,它能够促进位错脱钉、运动与湮灭,从而在微观上产生“声软化”效应,降低材料的瞬时流变应力。杨枫等^[45]的研究表明,由于振动对位错运动的促进作用,对 TA1 纯钛施加超声振动能显著降低其屈服强度和抗拉强度,从而有利于材料在更低的应力下开始塑性变形,提高其成形性能。Daud 等^[46]通过有限元模拟进一步指出,超声振动对铝合金的作用不能仅用应力叠加解释,更可能是因为其激发了材料微观结构的瞬时软化。

超声振动能量以应力波形式传入材料内部,引发微观质点的受迫振

动。这种“体积效应”不仅能促进位错运动(声软化),还能在材料内部产生独特的效应。例如,在随焊超声旋压中利用超声的空化与声流效应,促进了高温焊缝金属的塑性延展^[47-48]。对于旋压成形过程,魏丽武^[49]和 Zhang^[50]等揭示了超声振动通过“体积效应”改变铜和钛合金组织的规律(图 5)。

1.2.2 减摩效应

超声振动显著改变了工具与坯料接触界面的状态。高频振动使接触界面间的静摩擦转变为动摩擦,有效减小了摩擦系数,即“减摩效应”。Kumar 等^[51]的研究量化了纵向和横向超声振动对多种金属与工具钢间滑动摩擦的减摩效果,降幅最高可超 80%,并建立了摩擦力与峰值振动速度和平均滑动速度的函数模型。Cao 等^[52]针对 AZ31B 镁合金板材,研究了基于接触力学与粗糙表面弹塑性接触模型,建立了超声振动条件下板材摩擦行为的理论表达,发现超声振动可以将摩擦系数降低约 40%。其作用机制在于,随着法向载荷增大,粗糙表面的微凸体由初始弹性变形逐渐发展为弹塑性变形,实际接触区域增加而法向距离减小;超声振动改变了接触表面的法向距离,促使微凸体发生切向变形,从而有效降低了摩擦阻力。在旋压等成形工艺中,这种减摩效应能优化材料流动,减少因摩擦不均导致的缺陷^[53]。

综上所述,尽管多能场辅助塑性成形的作用机理研究已取得显著进展,但仍存在若干局限。首先,跨尺度关联与定量预测能力不足。尽管研究确认了能场可促进位错运动、相变等,但如何将这微观过程的变化,通过具有明确物理意义的本构参数量化并准确预测宏观的流动应力、塑性失稳等行为,尚未建立可靠桥梁。再者,目前仅有一些电磁复合场相关研究,其他能场间耦合作用机制还很缺乏。未来机理研究可聚焦于:

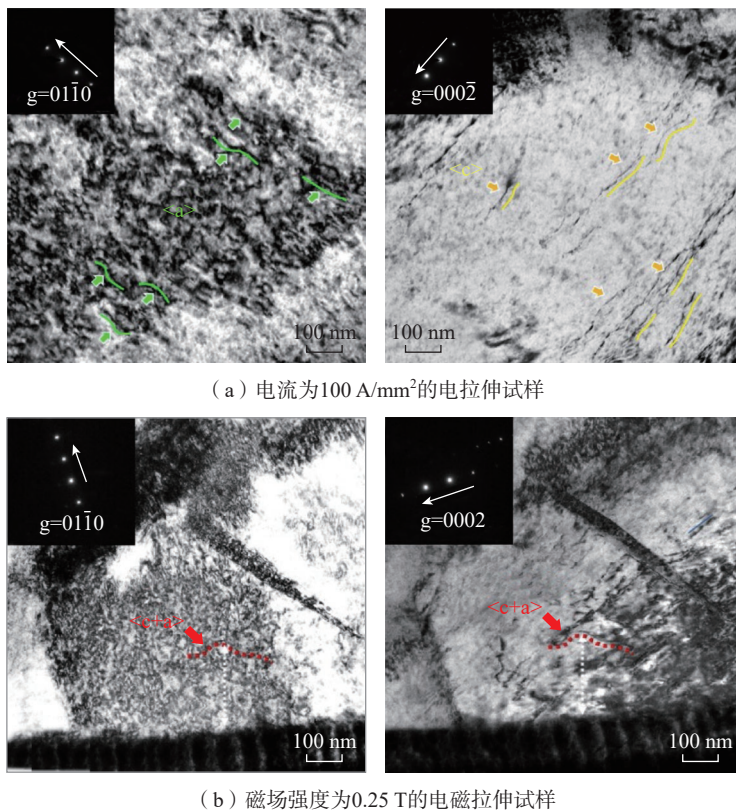


图 4 Ti-6Al-4V 合金透射电子显微镜双束明场像^[44] (电子束方向近似平行于 $[2 \bar{1} \bar{1} 0]$ 带轴)
Fig.4 Two-beam bright-field transmission electron microscopy images of Ti-6Al-4V alloy^[44] (with the electron beam direction approximately parallel to the $[2 \bar{1} \bar{1} 0]$ zone axis)

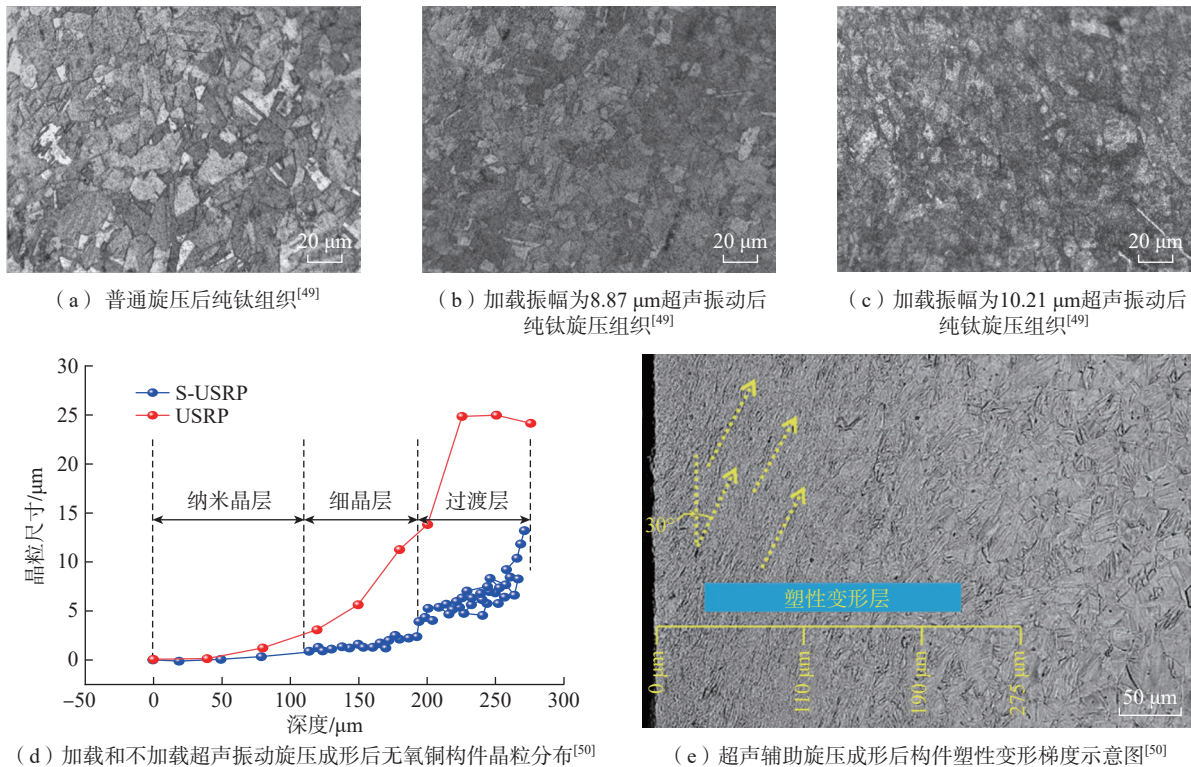


图5 超声辅助对旋压成形构件金相组织的影响

Fig.5 Effect of ultrasonic assistance on the metallographic structure of spun components

(1) 发展原位、实时的跨尺度表征与模拟方法,直接观测并量化能场作用下组织及缺陷的动态演化,实现从微观尺度到宏观尺度的多尺度预测;
(2) 研究多能场耦合作用机制,建立基于微观物理机制的本构理论。

2 多能场辅助旋压的工艺特性与应用

2.1 基于电热/电致塑性效应的辅助旋压

基于电热效应与电致塑性效应的辅助旋压技术,是通过将电能(直流/脉冲电流)或电磁能(感应加热)精准引入旋压变形区,利用电热效应(焦耳热、感应热)与非热电致塑性/磁致塑性效应的协同作用,改善难变形金属的塑性流动能力与成形性能。该技术根据能量输入方式,主要分为电流直接导入式辅助旋压与电磁感应加热式辅助旋压两类。前者通过电极将电流直接通入工件,同时激发显著的焦耳热效应与电致塑性效应^[10,13];

后者则通过交变磁场在工件内部产生涡流,主要利用高效、局部化的感应热软化效应,并可能在特定条件下耦合电磁场的非热效应^[17-18]。二者共同构成了利用电学原理提升旋压成形能力的关键技术。

2.1.1 成形极限、精度与缺陷控制

电(磁)辅助旋压能显著提高材料的室温成形极限和精度。对于钛合金,王建华等^[10]研究表明,壁厚<1 mm、径厚比>120的TA2纯钛封头件的电辅助旋压成形极限是室温旋压的1.5倍以上,成形构件最大轮廓偏差由3.25 mm降低至0.5 mm。Chen等^[13]对比了常温和强冷电辅助旋压成形的30CrMnSiA钢杯形件(厚度1.06 mm、径厚比>48)尺寸精度,发现在旋压成形过程中加载电流可以使成形构件椭圆度、内径偏差和壁厚偏差指标分别降低12.74%、22.16%和13.54%,如图6(a)和(b)所示。对于铝合金,2219铝合金薄壁封头在250~300℃的电磁感应加

热下可有效抑制法兰起皱,提高旋压减薄率^[19],如图6(c)和(d)所示。易兆祥等^[18]通过试验研究表明,2219铝合金薄壁封头经过电磁辅助旋压后,壁厚偏差由25%降低至20%。对于更难成形的镁合金(如ZK61)^[20]和高强度钢^[17],感应加热通过降低变形抗力和优化温度场,也能有效减小回弹和提高几何精度。然而,电(磁)辅助旋压中温度或电流参数的精确控制至关重要:温度过低则塑性不足,过高则易引发材料过度软化导致法兰上翘^[18]或已成形区鼓包^[21]。对于高温合金旋压,还需控制由减薄率等参数主导的内壁龟裂、圆柱度超差等缺陷^[22-23]。另有研究表明,旋压前增加预通电时间可使旋压过程中三向旋压力最大值呈减小趋势^[54-55]。

2.1.2 微观组织与性能调控

将电场或电磁场引入旋压成形过程,可以实现构件微观组织与性能的调控。能场与旋压塑性变形的耦

合,能主动调控变形区的微观组织演变,从而同步优化成形构件最终性能。在钛合金旋压成形中,电流能加速原子扩散和位错运动,使破碎的 α 相晶粒发生动态再结晶,从而促进旋压变形过程中的动态再结晶行为,获得更规则的细化晶粒^[56]。这些因电场作用而细化的晶粒区域相较于无电条件下硬度提高了7.42%^[13]。王磊^[54]对电辅助旋压件进行了力学性能测试,结果表明,构件最大屈服强度和抗拉强度相对原始坯料可分别提高68.76%和42.01%;对于铝合金旋压件,电流可通过促进位错湮灭来提升铝合金的塑性流动能力,提高旋压变形组织的均匀性^[57]。在镁合金旋压方面,研究表明,高密度脉冲电流能特异性激活AZ31镁合金的棱柱面滑移,从而在变形中诱导形成全新的横向分离织构,这为通过电辅助工艺改善镁合金旋压件的各向异性与成形性提供了新的途径^[51]。另外,对于镍基高温合金等难变形材料,感应加热提供的强热软化效应是其实现旋压成形的先决条件,而在此过程中,能场参数(如温度)的精确控制直接决定了动态再结晶程度与最终晶粒尺寸,从而影响构件强度与塑性^[22]。这些研究均表明,在旋压中多能场的应用可以靶向干预位错重组、相变、再结晶及织构演变等过程,实现微观组织和性能提升。

2.1.3 工艺参数优化与能场控制

实现成形精度的提高依赖于对电(磁)能场参数与旋压工艺参数的协同优化。对于电流直接导入方式,关键参数包括电流/密度、波形(直流/脉冲)、频率及电极布置方案。Tang等^[16]发现低频脉冲有利于促进动态再结晶和均匀变形;王磊^[54]采用响应面法与神经网络优化了电流、预通电时间、进给比等多参数组合;石艺龙^[57]则确定了能实现最均匀的电流与温度分布,获得了最优零件质量的电极布置方案。对于电磁感应加热

式,核心控制在于通过感应器设计、电流频率与功率的调控,实现对变形区温度场时空分布的精确控制(图7^[54])。易兆祥等^[18]通过仿真确定了2219铝合金封头旋压的最佳加热温度区间(250~300℃);江鹏^[20]则优化了ZK61镁合金的感应加热参数(电流135A、频率10kHz)以形成有利于内筋填充的梯度温度场。两类

技术的优化共同表明,将能场参数(电/磁)与变形参数(减薄率、进给比)进行合理匹配,可以充分发挥电热/电致塑性效应、实现高质量成形和性能调控。

2.1.4 电/电磁辅助旋压设备设计

针对电辅助旋压成形,向坯料整体施加电流的方法在实施上存在困难,且易导致能量浪费和局部温度过

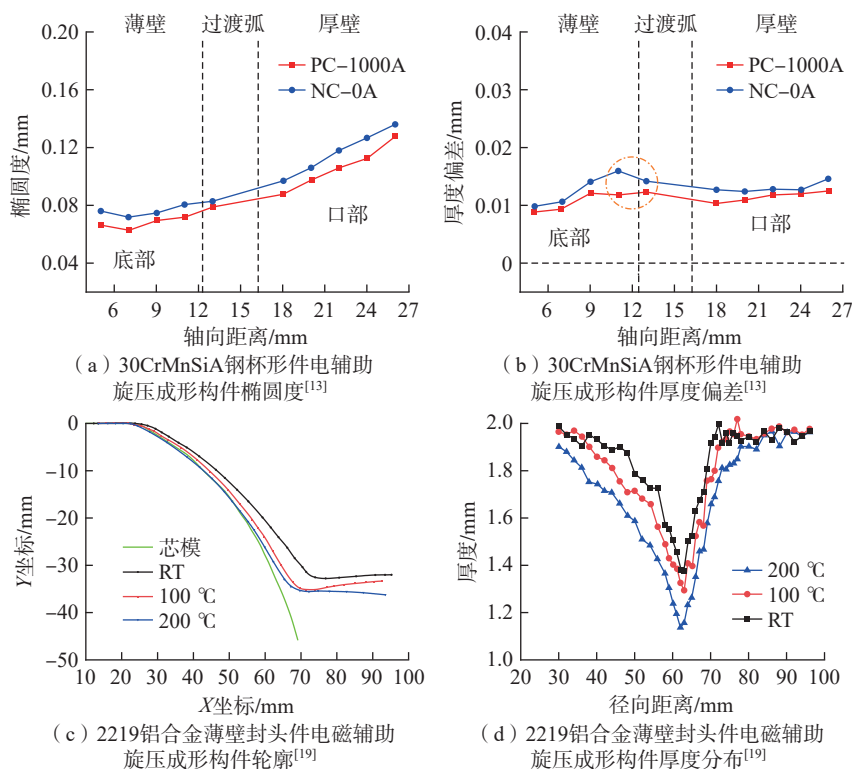


图6 电/电磁辅助对旋压成形精度的影响

Fig.6 Effect of electric/electromagnetic assistance on spinning forming accuracy

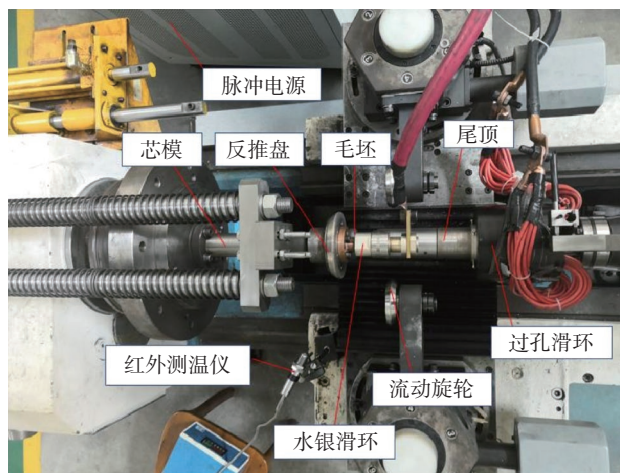


图7 电辅助流动旋压装置^[54]

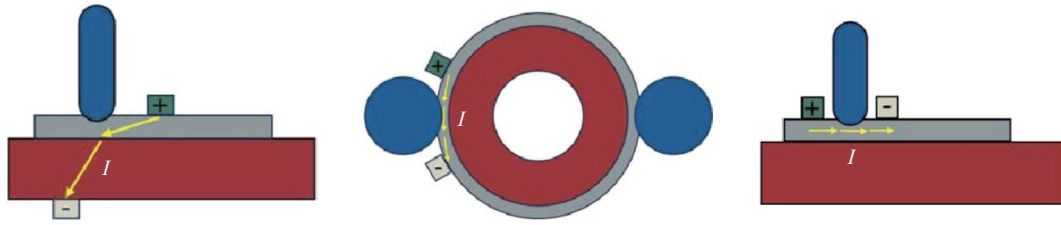
Fig.7 Electrically-assisted flow spinning device^[54]

高。当前的主流工艺方案是通过在薄壁构件内外两侧布置运动电极,实现对变形区的局部电流加载。研究表明,这种局部加载方式能有效集中能量、提升效率。例如,在筒形件电辅助流动旋压过程中,可以通过分析电流密度、温度分布和材料流动规律,获得最优电极布置方案(图8(a)),从而使得工件变形更均匀、成形精度更高^[57]。在装备设计方面,

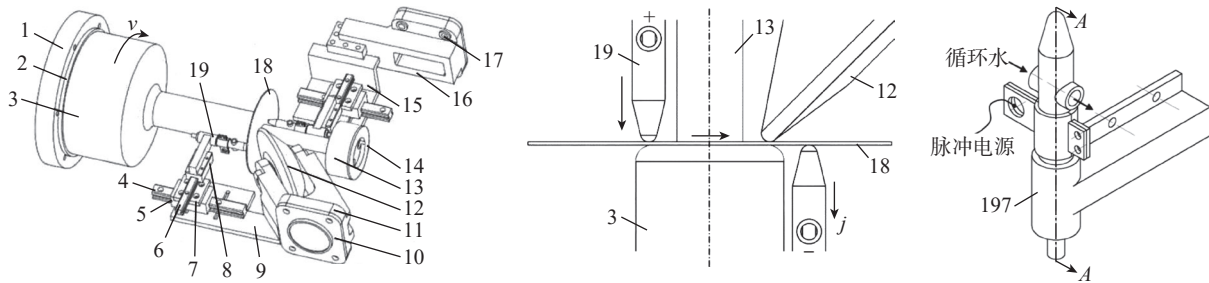
詹梅等^[58]发明了一种集成度高的电辅助旋压成形装置(图8(b)),其核心创新在于:夹持机构可驱动导电头沿坯料径向同步运动,避免因固定接触点导致的电流集中与过热;同时,采用带有循环水冷系统的特种导电头,有效抑制了高电流下的电火花放电与局部高温,保证了成形过程稳定性。

对于电磁辅助旋压成形,其装备

设计的核心在于感应线圈的选型与布置,需避免与旋轮发生干涉。通常,薄壁板材加工多采用面型电磁线圈(图9),而回转类薄壁件则适用环型电磁线圈^[18-23]。尽管可通过预热芯模等方式部分缓解内外壁温差,但如何在动态成形过程中实时、精准地调控薄壁件内外表面温度场的均匀性,仍是当前电磁辅助旋压技术面临的主要挑战,也是制约其成形精度和性



(a) 3个电流加载方向下筒形件电辅助旋压成形电极布置方案^[57]

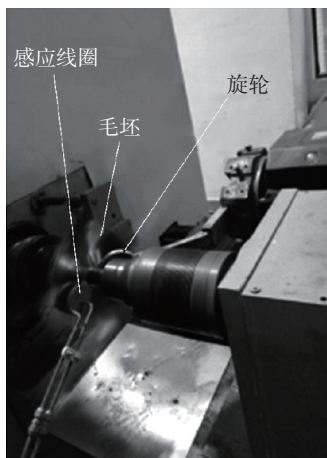


1—芯模转接盘; 2—芯模绝缘垫板; 3—芯模; 4—纵向导轨; 5—纵向滑块; 6—横向导轨; 7—横纵导轨转接板; 8—横向滑块; 9—第一导电头机构连接板; 10—支撑绝缘垫板; 11—旋轮架; 12—旋轮; 13—尾顶; 14—尾顶绝缘垫板; 15—第二导电头机构连接板; 16—90°刀杆; 17—绝缘套管; 18—金属坯料; 19—导电头机构。

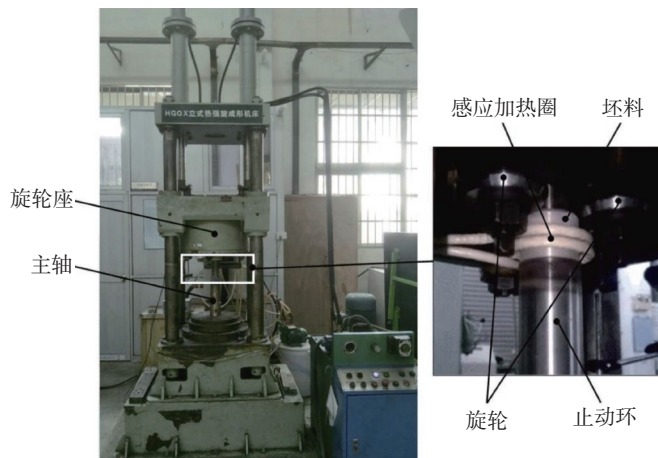
(b) 锥形件电辅助旋压成形设备及电极头^[58]

图8 电辅助旋压成形装备设计

Fig.8 Equipment design for electric-assisted spinning



(a) 卧式旋压设备^[18]



(b) 立式旋压设备^[20-23]

图9 电磁辅助旋压成形装备

Fig.9 Equipment for electromagnetic-assisted spinning

能进一步提升的关键瓶颈。

2.2 基于外部能量输入的辅助旋压

激光辅助旋压(Laser-assisted spinning, LAS)通过将高能激光束聚焦于旋轮前方的变形区,实现材料的局部瞬时加热与软化。作为一种典型的外部能量精确输入式辅助成形技术,它在提升难变形材料成形性、改善零件质量和实现高效近净成形方面展现出显著优势。

2.2.1 成形质量提高

激光辅助旋压最核心的贡献在于大幅提升材料的成形极限。Brummer等^[59]探究了激光辅助对壁厚 $<2\text{ mm}$ 的奥氏体不锈钢 X5CrNi18-10、镍基合金 Inconel 718 和工业纯钛 Ti Grade 2 锥形件进行剪切旋压与多道次旋压成形的影响,发现激光局部加热能显著提升材料的成形性能和成形后构件的质量(图 10)。Wang^[29]和冉津宇^[60]等对壁厚 $<2\text{ mm}$ 的铝合金薄壁球形件的研究均表明,激光辅助旋压可使材料发生破裂的临界减薄率提高 30% 以上。Romero 等^[28]甚至观察到,在锥形件旋压中,激光加热能使材料承受超过理论变形量 20% 以上的拉伸应变而不破裂。而且,在低主轴转速条件下,激光加工有助于实现微观结构的恢复效应并改善力学性能,在环形扩径变形模式下,材料的延伸率和极限强度最高可提升 20%。Klocke 等^[25]的研究表明,对钛合金(TiAl6V4)的激光辅助旋压可使最大成形力降低 20%。成形力的降低和材料流动性的改善,直接带来了零件尺寸精度和表面质量的提升。冉津宇^[60]和谭祖龙^[61]等的研究也表明,激光辅助工艺能显著提高壁厚 $<2.25\text{ mm}$ 的 Ti/Al 锥形件和铝合金椭球面件的帖模度和壁厚均匀性。

2.2.2 温度场的精确控制与局部化优势

激光辅助旋压的技术关键在于对变形区温度场的精确闭环控制。Klocke 等^[26]通过调控激光功率与进

给速度,配合闭环控制,成功将工业纯钛成形区温度稳定维持在 $400\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的理想窗口,避开了相变温度。谭祖龙等^[61]通过建立激光功率模型,为实现温度场稳定控制提供了理论依据。这种局部化加热的优势在于,它使热影响区最小化,避免了传统整体加热导致的组织氧化、性能不均和严重变形。而且,激光允许对复杂构件进行差异化加热,例如在肖刚锋等^[62]研究的铲旋成形中,通过对法兰区补热而保持锥壁相对低温,从而控制材料流动模式。

2.2.3 激光辅助旋压设备设计

激光辅助旋压设备主要由数控

旋压机床、激光加热系统、温度监控系统 and 集成控制系统四大核心单元构成。其工艺本质是通过激光输入能量与成形区温度场的精确控制,实现对材料软化与流动行为的主动调控,从而提升成形质量。典型的设备配置如图 11(a)所示,其核心在于利用激光束对旋轮前方的坯料实施局部、实时的精准加热^[60]。将激光系统集成到现有旋压机床是实现该技术的一条可行路径,但这个过程对设备整体精度与稳定性提出了严苛挑战。主要技术瓶颈包括:一是空间干涉,激光头与机床运动部件的布局需重新规划以避免碰撞;二是动

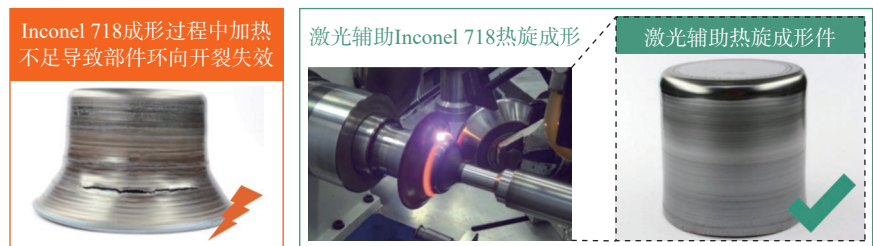
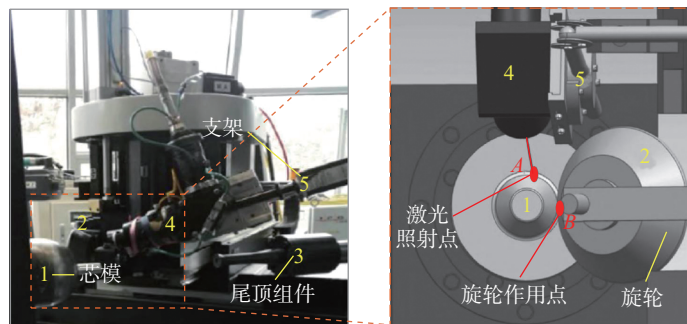
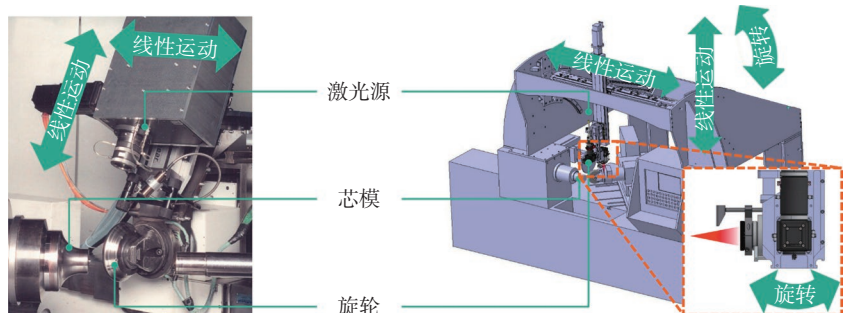


图 10 有无激光辅助的薄壁件成形质量对比^[59]

Fig.10 Comparison of forming quality of thin-walled parts with and without laser assistance^[59]



(a) 激光辅助旋压试验平台^[60]



(b) 激光在旋压设备中的集成方法^[25]

图 11 激光辅助旋压成形设备

Fig.11 Laser-assisted spinning equipment

态精度,系统改造后可能因新增质量与振动影响整体运动精度;三是可达性与均匀性,激光束难以有效照射到具有圆角、倒角等复杂几何特征的区域,易导致温度不均;四是集成系统难度大,如图 11 (b) 所示,激光源和旋压主机均是多轴运动,协同控制算法复杂^[25]。

2.3 基于应力叠加效应的辅助旋压

目前,基于应力叠加效应的辅助旋压主要指超声振动辅助旋压。超声振动辅助旋压 (Ultrasonic vibration assisted spinning, UVAS) 是将高频机械振动引入旋轮、芯模或坯料,通过振动效应改善旋压过程的力能参数、成形质量与构件性能的一种成形技术。这种成形技术尤其适用于对表面质量要求高和需要特殊梯度组织的精密零件制造。

2.3.1 成形精度与表面质量改善

超声振动通过优化材料流动和降低摩擦,显著提升了构件的尺寸精度和表面质量。在尺寸精度方面,适当的超声振动可减少管件旋压过程中材料的周向流动,使实际减薄量更接近名义值^[53];在表面质量方面,减

摩效应直接降低了表面划伤和黏结。例如,对于壁厚 < 3 mm、径厚比 > 23 的纯钛筒形件的超声辅助旋压过程,旋压-超声表面滚压复合工艺能显著改善单一旋压产生的表面波纹,获得粗糙度 (R_a) 较小的光亮表面 (图 12)^[50]。庞世缘^[63] 的研究也证实了超声振动辅助旋压技术在降低成形力、提高加工稳定性与改善表面质量方面的有效性,为抑制旋压加工中起皱、破裂等缺陷提供了工艺指导。

2.3.2 微观组织调控与性能优化

超声振动不仅是成形手段,也是有效的微观组织调控工具。其引入的高频能量可以细化晶粒^[40]、影响析出相和位错结构。Zhang 等^[64] 对壁厚 < 5 mm、径厚比 > 40 的 2219 铝合金筒形件的研究揭示了超声振动的深层微观机制:超声激发的位错能剪切、破碎 θ' 析出相,驱动其再熔解与重新析出,从而显著影响材料力学性能。通过旋压与超声表面滚压复合,可将峰值时效时间从 12 h 大幅缩短至 1 h,并在维持高强度的同时将伸长率提升 25.6%,实现了强塑性协同。而且,在纯钛管复合成形中

也发现,旋压预变形与后续超声滚压相结合,能获得更厚的梯度纳米结构层和更高的综合强度^[50]。

另外,超声振动还能与其他工艺复合,解决特定难题。季星红等^[47-48] 提出的“随焊超声旋压”技术,在焊接热循环的特定温度区间施加超声振动与旋压力,成功控制了 7075 铝合金薄板的焊接变形 (纵向挠度降低 58.3%),并同步细化了焊缝晶粒、提升了接头强度和塑性。

2.3.3 超声辅助旋压设备设计

目前,超声辅助旋压设备正处于从实验室研究迈向工业化应用的过渡阶段。主流的设备方案依据振动施加对象的不同可分为两类:一类是将超声振动直接施加于坯料,另一类则是将超声振动施加于旋轮或主轴,如图 13 (a) 所示^[49,65]。然而,后一种方案因施振单元直接作用于机床的核心运动部件,长期运行易对旋压机床的本身精度与动态稳定性构成潜在威胁。而且,超声设备的核心组成部分 (如施振头、换能器、变幅杆) 及其固有结构设计,直接决定了能量传递效率与工艺效果。为满足



图 12 引入超声后纯钛筒形件表面质量的变化^[50]

Fig.12 Changes in surface quality of pure titanium cylindrical parts after introduction of ultrasound^[50]

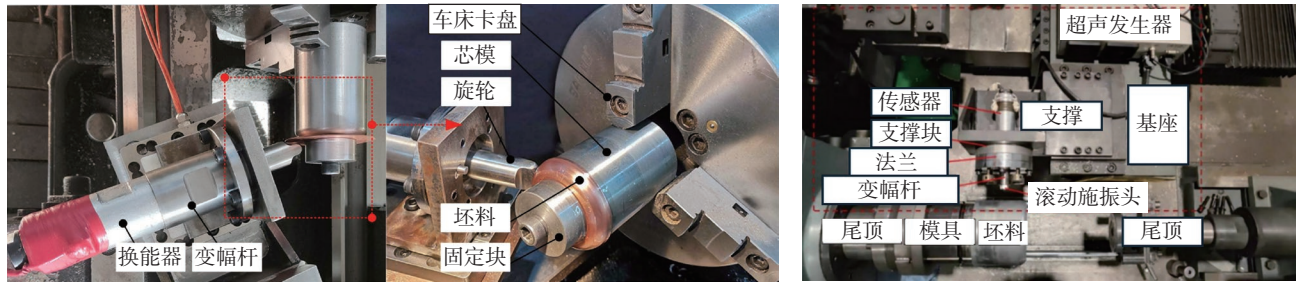
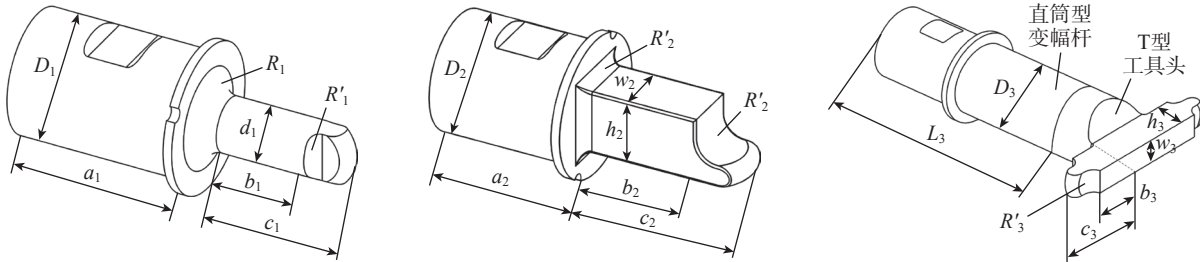
(b) 超声辅助旋压设备^[49, 65](b) 特种超声施加振动工具头^[63]

图 13 超声辅助旋压设备及其工具头

Fig.13 Ultrasonic-assisted spinning equipment and its tool head

不同旋压工艺(如不同构件形状、材料)对振动模式与能量场的特定需求,研究人员开发了多种特种工具头。例如,庞世缘等^[63]为优化能量传递与聚焦,设计并试验验证了阶梯形纵振旋压工具头、结构不对称的L型工具头及局部共振型工具头(图13(b));试验结果表明,施加纵向振动或纵弯复合振动均能有效降低旋压成形力,证明通过工具头创新定制振动场以匹配具体工艺需求的可行性。

综上,多能场辅助旋压能显著提高薄壁构件的成形质量和极限,然而仍然面临一些制约其工程化应用的实际挑战。例如,在电场和电磁场加载的均匀性与方向性方面,电流通过固定电极加载易在接触点形成局部过热与电火花,而感应加热固有的集肤效应导致薄壁件内外表面存在显著温差,材料温度和组织均匀性控制困难。而且,对于大型薄壁构件,现有能场加载设备能力不足。另外,现有研究多集中于简单回转体,缺乏针对复杂几何(如非轴对称、带内筋结构)的靶向加载方法与专用装备,限制了该技术向更广泛构件类型的

拓展。未来研究可着力于:(1)开发自适应柔性加载技术,如随形感应线圈、多束激光协同扫描或阵列式超声工具头,以实现复杂曲面及关键变形区域的“靶向”能量匹配;(2)研制大功率、长行程的专用能场集成旋压装备,突破现有实验室设备在尺度与功率上的限制;(3)开展面向大型、异形薄壁构件的系统性工艺试验与仿真,发展多能场加载的工艺优化与质量控制方法。

3 多能场辅助旋压过程的数值模拟

3.1 电辅助旋压过程有限元建模

电辅助旋压是一个涉及电场、温度场、应力应变场强耦合的复杂物理过程。为了深入理解其机理、预测成形结果并优化工艺参数,发展高精度的有限元数值模型至关重要。近年来,研究者们通过建立多能场耦合的有限元模型,在电辅助旋压过程的模拟方面取得了显著进展。

3.1.1 考虑电致塑性效应的本构模型建立

准确描述材料在电流、温度、应

变速率等多场耦合下的流变行为,是电辅助旋压过程有限元模拟成功的关键。当前研究主要通过用户程序(如UMAT、UHARD、VUMAT)将复杂的电塑性本构模型嵌入商业软件,其建模路径主要分为宏观唯象模型和基于微观物理机制的模型两大类。

其中,宏观唯象模型通过引入电流参数修正经典本构方程,以直接拟合试验观测到的宏观软化行为。张宁等^[66]针对1420铝锂合金的脉冲电流辅助变形,在经典超塑性本构框架中引入脉冲电流密度和频率的修正项,成功量化了流动应力与伸长率对电流参数的非单调响应(式(1))。Li等^[37]则针对固溶态2219铝合金,通过修正J-C(Johnson Cook)模型,描述了电流对动态应变时效行为和流动应力跌幅的复杂影响(式(2))。针对复杂应变路径下的行为,Dong等^[67]通过修正Y-U双面硬化模型,引入了描述边界曲面与屈服曲面尺寸演化的函数,以模拟电流和温度共同作用下的宏观软化与增强的非对称变形。另外,李泽宇^[68]和范旭东^[69]

等基于 Voce 模型框架,考虑了电流密度、占空比等参数的影响,构建了电-热-力耦合的高强钢本构方程,并应用于旋压成形中。

$$\sigma = K\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \exp(aI + bf) \quad (1)$$

式中, K 为强度系数; ε 为应变; n 为应变硬化指数; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; m 为应变速率敏感性指数; I 为脉冲电流; f 为脉冲频率; a 、 b 为常数。

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, j)g(\dot{\varepsilon}, T, j) \quad (2)$$

式中, $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, j)$ 为电流密度、温度和应变速率对流动应力跌幅的耦合影响; $g(\dot{\varepsilon}, T, j)$ 为电流密度对材料应变速率敏感性函数的影响。

$$\sigma = \{R_{cl} + A[1 - \exp(-B\dot{\varepsilon})] \cdot [1 + m \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \exp[a(T - T^*) + bJ + cD]\} \quad (3)$$

式中, σ 为真实应力; R_{cl} 为屈服强度; ε 为真实应变; A 和 B 为材料应变强化参数; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; m 为应变速率敏感系数; T^* 为参考温度; a 、 b 和 c 为试验参数影响因子。

基于微观物理机制的模型则致力于从位错、晶界等微观结构演化角度揭示电塑性效应的本质。Chen 等^[13,70] 针对 30CrMnSiA 钢,建立了耦合晶内与晶界位错密度独立演化及相互转化的物理模型(式(4)),通过等效电流密度来量化电塑性效应对位错湮灭率和晶粒细化的影响,预测精度高。Tiwari 等^[71] 通过位错密度模型(式(5))耦合焦耳热效应,实现了对 AA6061-T6 合金变形行为的高精度预测。Kim 等^[72] 构建了耦合位错密度演化与析出强化的物理模型,电流的影响通过修正恢复项系数、析出相间距等具有物理意义的参数来实现,从而解释了不同热处理状态下看似矛盾的宏观响应。Niu 等^[31] 针对 TA15 钛合金,创新地将总流变应力分解为克服短程与长程障碍的应力分量(式(6)),并分别量化了热效应与非热电效应对位错钉扎、脱钉等微观过程的影响,模型预测误差小于

7.9%。

$$\begin{cases} \dot{\rho}_c = \alpha^* \sqrt{\rho_{ws} + \rho_{wg}} \dot{\gamma} / (\sqrt{3}b) - 6\beta^* \dot{\gamma} / (bd_g(1-f)^{1/3}) - K_0 \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{1/m_1} \rho_c \dot{\gamma} \\ \sigma_y = \sigma_0 + M[\alpha Gb \sqrt{\rho_w} + (1-f)\sqrt{\rho_c}] \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{1/m} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ρ_c 和 ρ_w 分别代表晶胞和晶界的位错密度; b 是 Burgers 向量的值; $\dot{\gamma}$ 是剪切率分量; ρ_w 可分为统计位错密度 ρ_{ws} 和几何必要密度 ρ_{wg} ; d_g 是晶粒尺寸; σ_y 是屈服应力; σ_0 是初始屈服强度; M 是泰勒因子; f 是晶界因子。其余参数请见原文表格。

$$\sigma = M\alpha Gb \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}} \right)^{1/m} \sqrt{\rho_f - \rho_r} \quad (5)$$

式中, ρ_f 为总位错密度的正向分量; ρ_r 为总位错密度的反向分量; α 和 ε 均取决于温度和应变速率; M 、 G 、 b 和 m 分别为泰勒因子、剪切模数、Burger 矢量和应变速率指数。

$$\sigma^* = \hat{\sigma} \left[1 - \left(-\frac{KT}{F_0} \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{\frac{1}{q}} \right]^{\frac{1}{p}} \quad (6)$$

式中, $\hat{\sigma}$ 是短程障碍物的剪切强度; F_0 是在没有外功的情况下克服短程障碍物所需的总势能; K 是玻尔兹曼常数; T 为温度; b 为 Burgers 矢量值; ε 是应变速率; $\dot{\varepsilon}_0$ 是参考应变速率; p 和 q 是描述短程障碍物势垒的常量。

上述研究表明,宏观唯象模型形式简洁、参数易于获取,适用于工艺快速评估;而微观物理模型可以反映深层机理、预测能力更强,但计算复杂、参数标定困难。另外,Shang 等^[73] 对比发现,基于人工神经网络的模型在捕捉电脉冲下复杂响应方面表现出独特优势。未来,发展兼顾物理机理与计算效率的多尺度、智能化本构模型,并将其稳定集成于旋压成形专用有限元平台,是推动电辅助旋压精确模拟的关键方向。

3.1.2 电-热-力耦合接触界面模型构建

在电辅助旋压有限元仿真中,由于电极(或旋轮)、坯料与芯模之间的接触状态直接决定了电流通路的分布、焦耳热的生成效率及力与热的传递,因此构建能够精确描述电-热-力多场耦合的接触界面模型至关重要。该模型的核心在于合理设定接触界面的摩擦系数、接触导热系数及接触电导率(或等效接触电阻)。其中,接触电阻的处理尤为关键,因为它直接影响焦耳热的分布和大小,进而改变材料的局部软化状态与流动行为。

理论上,总接触电阻由电流流经微观导电斑点时因电流线收缩产生的收缩电阻,以及由接触表面氧化膜、吸附层等形成的膜层电阻共同构成^[54]。在旋压成形仿真中,为简化模型,研究者常采用基于经验或特定条件假设的恒定值或分段函数来定义接触电导率^[68-69]。然而,旋压过程中接触压力、温度、表面状态及接触形式(点、线、面)均处于动态变化中,上述简化方法难以精确反映其耦合影响。

为提升模拟精度,研究者引入了动态计算接触电阻的模型。张冠生^[74] 给出了一个基于接触压力的经验公式(式(7)),该公式将接触电阻与宏观力学载荷直接关联。吴承创等^[75] 的研究表明,实际接触发生在离散微凸体上。他们基于 Hertz 接触理论,导出了理想光滑半球面与平面接触时,导电斑点半径与接触压力的立方根关系(式(8)和(9))。基于 Berger 的接触电阻理论^[76] 及 ABAQUS 用户手册中的接触面积计算方法^[77],石艺龙^[57] 提出了一种通过有限元软件实时计算有效接触面积以动态确定接触电导率的方法,该方法将接触电阻与瞬态接触力学状态直接耦合,更具物理基础。蔡继文^[12] 在构建镁合金电流辅助旋压模型时,采用 Gould

公式^[78]描述接触电阻随温度的演化(式(10)),并结合设定的界面摩擦系数和导热系数,建立了完整的电-热-力接触对。

$$R_j = K(0.102F)^{-m} \quad (7)$$

式中, R_j 为接触电阻; K 为经验系数; F 为接触压力; m 为与接触形式有关的系数,点、线、面接触分别为 0.5、0.7、1.0。

$$a = \left(\frac{3Fr}{4E^*} \right)^{1/3} \quad (8)$$

$$R_n = \frac{\rho}{2na_p} \quad (9)$$

式中, r 为曲率半径; a 为圆形接触斑点半径; F 为接触压力; E^* 为等效弹性模量; R_n 为接触面的收缩电阻; a_p 为接触面中 n 个圆形接触斑点半径的平均值; n 为接触点数量; ρ 为电导率。

$$R_T = \frac{T_m - T}{T_m - T_0} R_c \quad (10)$$

式中, R_T 为当前温度的接触电阻; T_m 为金属熔化温度; T 为当前温度; T_0 为环境基准温度; R_c 为室温下金属的接触电阻。

3.1.3 耦合算法实现与仿真应用

电辅助旋压的多场耦合本质决定了其有限元建模依赖于“电-热-

力”顺序或完全耦合算法。其流程通常为:先分析求解电流分布和焦耳热,再进行瞬态热分析获得温度场,最后将温度场作为预定义场并调用电塑性本构模型进行力学变形求解,如图 14 所示^[13,57]。该方法计算效率高,在电阻连续加热成形等模拟中已被验证有效^[79]。

3.2 电磁辅助旋压过程有限元建模

对于电磁辅助成形过程,其建模方法与电辅助成形既有相通之处,也存在显著差异。电磁辅助旋压的数值模拟通常采用顺序耦合策略:首先进行电磁场分析,计算感应涡流分布与焦耳热生成率;然后将热生成率作为内热源导入瞬态热传导分析,获得工件的温度场;最后将该温度场作为预定义场,结合材料的高温本构模型,进行力学变形分析。在电磁复杂旋压成形的材料本构建模中,目前主要考虑了电磁感应引发的热效应和电致塑性效应^[20,39]。若需进一步模拟组织演变,则须耦合元胞自动机(Cellular automata, CA)或动力学模型来描述再结晶、相变等过程^[22-23]。

与电辅助成形不同,电磁辅助成形建模还需重点考虑集肤效应的影

响,该效应可导致工件温度呈非均匀分布^[80-81]。当前,电磁辅助旋压的有限元仿真仍面临若干关键难点:磁致塑性的微观机制尚未完全阐明、多物理场耦合下的本构关系构建复杂、几何大变形与电磁趋肤效应之间存在强非线性耦合等。受限于相关理论与试验数据的不足,多数研究仍采用简化方法,即直接使用高温下的材料属性进行建模。例如,杜军^[21]将 Haynes 230 合金的高温拉伸本构数据直接导入 ABAQUS,实现了对电磁辅助旋压过程的快速模拟与预测。类似地,江鹏^[20]先利用 COMSOL 多物理场软件计算镁合金感应加热的温度场,再将其作为预定义场导入 ABAQUS 进行变形分析(图 15)。尽管 J-C、Arrhenius(式(11))等高温本构模型能在一定程度上反映工艺趋势,但也表明建立高精度的电磁辅助旋压有限元模型并进行可靠仿真,仍是一项极具挑战性的任务。

$$A[\sinh(\alpha\sigma)]^n = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (11)$$

式中, A 、 n 、 α 为材料常数; δ 为流变应力; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; T 为变形温度; Q 为热变形激活; R 为理想气体常数。

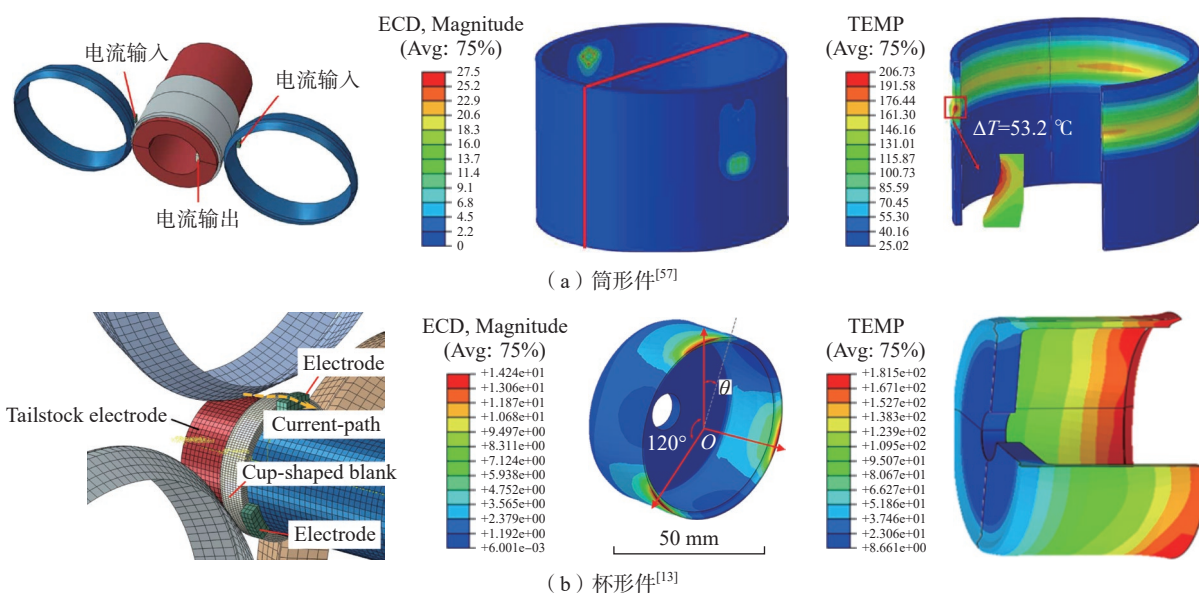


图 14 电辅助旋压有限元建模

Fig.14 Finite element modeling of electrically assisted spinning

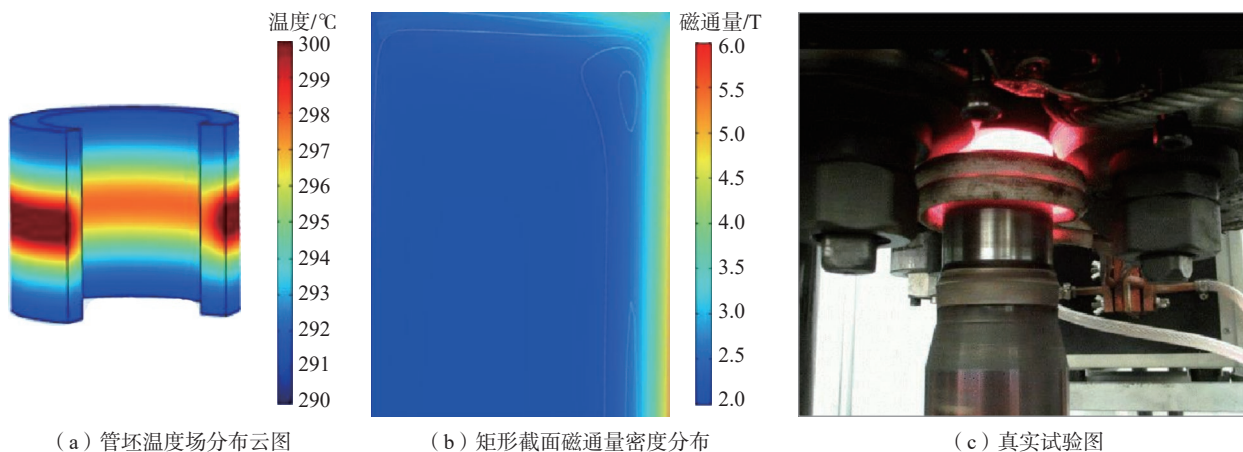


图 15 镁合金管坯电磁感应加热有限元模型^[20]

Fig.15 Finite element model for electromagnetic induction heating of magnesium alloy tube blank^[20]

3.3 激光辅助旋压过程有限元建模

激光辅助旋压涉及瞬态移动热源、剧烈的温度梯度、温度相关的材料非线性及复杂接触等多物理场强耦合问题。建立高精度的有限元模型,对于预测温度场、优化工艺参数、理解热-力耦合机理及避免热缺陷至关重要。

3.3.1 激光作用下材料高温本构模型的建立

在激光辅助旋压的有限元建模中,当前研究主要采用材料的高温本构模型来描述其在热-力耦合下的力学行为。研究者常采用经典的J-C本构模型或其高温修正形式来表征材料性能^[82]。类似地,在激光辅助铣削等工艺模拟中,也常采用顺序耦合策略,即先将激光热源子程序计算的温度场作为预定义场导入,再结合J-C等本构模型进行力学分析^[83]。对于涉及更复杂热-力路径的情况,如激光弯曲成形,则需采用更严谨的热弹塑性增量本构模型。朱晓勇等^[84]在模拟不锈钢板激光弯曲时,基于增量理论并判断加载/卸载状态,准确描述了由非均匀温度场所引起的差异塑性变形(式(12))。总之,当前激光辅助旋压模拟中的本构处理仍以高温唯象模型为主,尚未系统考虑激光特有的非热效应(如光子-电子耦合)对材料微观结构及宏观力学

性能的直接影响。建立耦合激光能量特性与材料微观组织演变的物理本构模型,是未来实现高精度仿真的重要方向。

$$\lambda = \left[\left\{ \frac{\partial f}{\partial a} \right\}^T [D]_e \{d\epsilon\} - \left[\frac{\partial f}{\partial a} \right]^T [D]_e \left\{ \alpha \right\} + \frac{\partial [D]_e^{-1}}{\partial T} \{ \sigma \} dT - \frac{\partial f_0}{\partial T} dT \right] / S \quad (12)$$

式中, $\{ \sigma \}$ 为达到的某一应力状态; $[D]_e$ 为弹性模量矩阵; T 为材料的温度; $\{d\epsilon\}$ 是与材料热膨胀有关的增量微分; $\{ \alpha \}$ 是热膨胀系数的有效值矩阵。

3.3.2 激光热源模型的建立

激光辅助旋压的数值模拟通常采用热-力顺序耦合方法。模拟的核心和难点在于瞬态热传导分析,其关键在于如何精确地将激光热源描述为一个具有特定空间能量分布、并能随旋轮或坯料运动而移动的表面热流密度载荷。激光热源根据空间能量分布主要分为高斯分布(圆形光斑)与平顶分布(矩形光斑)两类,其热流密度通常按式(13)计算^[65]。

$$q_{(r)} = \frac{P \cdot \eta}{a \cdot b} \quad (13)$$

式中, P 为激光功率; η 为坯料表面对激光的吸收; a 和 b 分别为光斑的长度和宽度。

高斯热源模型因其与实际光束能量分布相近而被广泛应用。谭祖龙等^[61]在模拟激光辅助剪切旋压时,针对加热区域动态变化及散热条件的影响,建立了激光功率随时间变化的二次函数模型;该模型表明,随着旋轮进给,实际加热区域减小且对流散热增强,为维持变形区温度稳定,需动态提升激光功率。将此动态热源模型嵌入有限元分析,有效实现了对热-力耦合过程的模拟,如图16所示。冉津宇等^[60]则通过ABAQUS二次开发将高斯面热源公式嵌入模型,并系统研究了激光参数(功率、扫描速率)对温度场的影响;其研究发现,板材反面最高温度点相对激光照射正面存在空间滞后,该滞后量受扫描速率、离焦量和板厚影响。基于此,他们提出了激光照射点应领先于旋轮作用点特定距离的加载策略,并将热源精准加载于易发生拉裂的拉弯区,有效提升了该区域的材料塑性。平顶热源模型则以其能量分布均匀、能有效避免局部过热的优势受到关注。肖刚锋等^[62]在研究中即采用平顶高斯光束模型建立了矩形均匀光斑热源(尺寸6 mm × 15 mm),旨在消除传统高斯光斑造成的陡峭热梯度,从而优化加工区的热分布均匀性,为后续工艺仿真提供了更稳定的热输入条件。

3.4 超声辅助旋压过程有限元建模

超声辅助旋压过程的数值模拟面临动态加载、接触状态瞬变和材料本构关系复杂等多重挑战。建立反映真实情况的超声辅助旋压有限元模型需要解决如下问题。

3.4.1 超声振动效应的模型化表征

模拟的关键在于如何将超声振动的影响合理地集成到有限元框架中。目前主要采用两种路径：一是直接动态仿真，通过赋予工具（如旋轮或芯模）随时间变化的高频位移边界条件来模拟实际振动，这种方法能直接反映应力波的传播与动态接触，但计算成本高^[49]。二是等效静态/准静态模型，通过修改材料本构关系或接触属性来“等效”超声的宏观效果，计算效率高，更适用于工程分析。例如，Daud等^[46]在模拟中发现，必须同时考虑超声引起的材料瞬时软化（修改本构）和接触面摩擦系数瞬时下降，才能复现试验测得的应力-应变响应。

3.4.2 声软化本构模型的建立

由于超声振动的“体积效应”会显著降低材料的宏观流变应力，在有限元模型中集成考虑“声软化”效应的材料本构方程是超声辅助旋压模拟的关键与难点。当前研究主要通过建立包含超声参数（如振幅、频率、能量密度等）的唯象或物理本构模型来实现这一耦合。

唯象本构模型通常基于经典模型框架进行修正，直接建立流动应力与超声参数的经验关系。例如，Cui等^[65]基于AA2219-O铝合金的超声辅助拉伸与压缩试验，建立了考虑声软化效应的硬化模型，并将其成功嵌入带纵筋筒形件超声辅助流动旋压的有限元模型（图17）。Song等^[85]则在经典的J-C本构模型中引入超声软化函数，提出了式（14）所示的超声塑性本构方程，其中超声能量密度作为关键变量。这类模型形式相对简洁，便于工程应用。

$$\sigma_c = kE_{uv}^l (A + B\dot{\epsilon}_c^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_c}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \times \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (14)$$

式中， A 、 B 、 n 、 C 和 m 分别为材料常数； $\dot{\epsilon}_c$ 、 $\dot{\epsilon}_c$ 和 $\dot{\epsilon}_0$ 分别为当量塑性应变、应变率和参考应变率； T 、 T_r 和 T_m 分别为材料的当前温度、参考温度和熔化温度； k 为声学软化常数； l 为指数； E_{uv} 为超声波能量密度。

基于微观机理的统一本构模型则从位错动力学等物理机制出发，以统一描述超声作用下的即时软化与残余硬化等复杂行为。Rusinko等^[86]基于“不可逆变形综合理论”，提出了一个引入“超声缺陷强度”变量的统一本构框架，该模型能在同一体系内描述声软化与声硬化现象，并能处

理非光滑加载路径（式（15））。Song等^[87]针对面心立方金属，构建了一个以位错密度和晶粒尺寸为内变量的统一超声塑性本构模型；该模型从微观上解释了超声波通过降低原子键合力、削弱位错运动能垒而产生的声软化效应，并耦合了动态再结晶与晶粒生长的影响，实现了对即时与残余软化行为的统一描述。Wang等^[88]建立的模型则同时考虑了声软化效应和应力叠加效应，从能量吸收角度将声强与位错滑移所需能量关联，在机理层面定量描述了声软化行为。

$$H^2 = \Psi + \frac{2}{3} \sigma_s^2 + F(|S|, U) \Psi_u, \Psi = r\phi \quad (15)$$

式中， Ψ 为静载荷引起的缺陷强度； Ψ_u 为超声诱导的缺陷强度； σ_s 为屈服强度； H 为判断是否开始发生塑

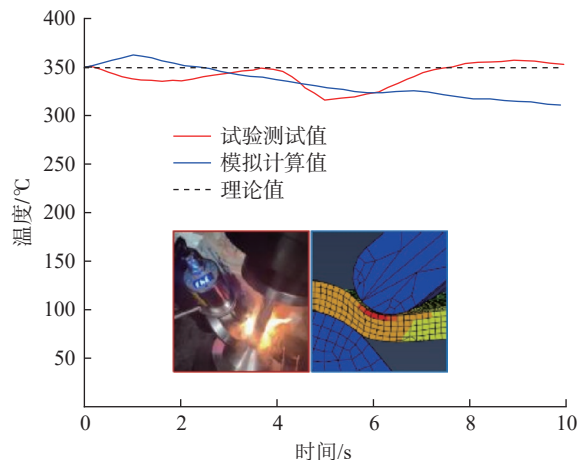


图16 激光辅助旋压试验与模拟结果温度对比^[61]

Fig.16 Comparison of experimental and simulated temperatures in laser-assisted spinning^[61]

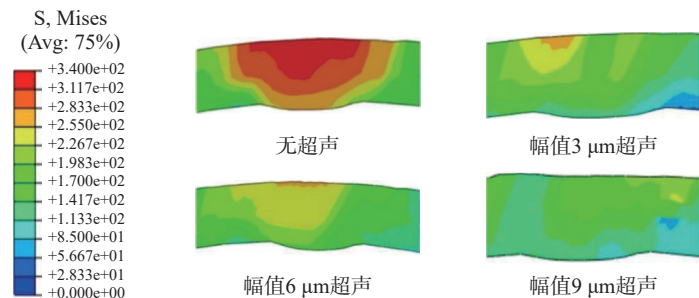


图17 带纵筋筒形件超声辅助流动旋压模拟结果^[65]

Fig.17 Simulation results of ultrasonic-assisted flow spinning for a cylindrical part with longitudinal ribs^[65]

性屈服的判据; φ 为永久应变强度; $F(\cdot)$ 为决定超声硬化或超声软化表现的函数; U 为 Heaviside 步长; $|S|$ 为应力矢量。

此外,一些研究采用了间接嵌入的简化方法。崔子扬^[89]通过试验建立了耦合超声参数的修正蠕变本构方程,描述超声对应力松弛过程的加速作用,并将此本构方程直接导入 ABAQUS 进行常规仿真,从而避免了直接模拟振动载荷的难题,实现了对超声辅助变形行为的高效预测。然而,如何构建一个既能准确反映超声能量场与材料微观机制(位错运动、再结晶)的内在联系,又兼具计算效率、适用于旋压大变形仿真的统一本构模型,是当前面临的主要挑战。

3.4.3 超声振动动态载荷建模

精确量化由超声振动引入的动态接触载荷是建立超声辅助有限元模型的关键。目前研究主要基于运动学分析和接触力学理论构建数学模型。一种方法基于能量守恒与赫兹接触理论。例如,王魏庆^[90]的研究将工具头的超声振动简化为简谐运动,然后基于能量守恒求解出动态载荷,从而将振动参数与动态力学响应直接关联,如式(16)所示。

$$\begin{cases} F = F_s + F_d \\ F_d = -P_0 \sin(2\pi ft) \end{cases} \quad (16)$$

式中, F 为成形载荷; F_s 为静态载荷;

F_d 为动态载荷; P_0 为施加在工具头上的力; f 为频率; t 为时间。

另一种方法基于运动学与牛顿第二定律。例如,魏丽武^[49]从运动学出发,定义了核心工艺参数接触比 $d=t_m/T$ (接触时间 t_m 与振动周期 T 之比),并将其表达为进给速度 V_f 、振动频率 f_r 和振幅 A 的复杂函数。在此基础上,将工具头(质量为 m)作简谐振动的加速度 $a=-4(\pi f_r)2A \sin(2\pi f_r t)$ 代入牛顿第二定律,直接推导出动态力分量 F_d 。最终,总旋压力模型 $F=F_s-4\pi^2 f_r^2 A \sin(2\pi f_r t)$ 。该模型表明,瞬时成形力是在静态力基础上叠加了一个幅值与振动频率、质量和振幅成正比的正弦动态力。

3.4.4 界面摩擦修正与模型实现

超声振动通过改变接触界面的相对运动状态,显著影响摩擦行为(“表面效应”),建模时必须对此进行修正。目前,针对界面摩擦修正方面的研究表明,超声的减摩效果依赖于输入功率(与振幅等相关),其机理复杂,甚至可能在过高功率下导致润滑失效^[53]。因此,在有限元模型中,通常需要将恒定的库伦摩擦系数替换为与超声振动参数(如振幅、频率等)相关的变量或函数,以更真实地模拟从静摩擦到动摩擦的转变及减摩效应^[46,53]。

在有限元软件(如 ABAQUS)中实现超声加载,常通过边界条件或载

荷模块施加周期性位移或速度。具体而言,将工具头的进给运动定义为静态速度与一个简谐振动的叠加,并将此速度曲线作为工具头的进给载荷^[90]。类似的方法也应用于超声辅助切削等工艺中,通过在刀具上施加一维或二维的简谐振动位移来实现^[91]。

3.5 不同能场下有限元建模的异同与难点

表1对各能场辅助旋压数值模拟的关键异同和难点进行了归纳总结。其中,4类能场辅助模拟的共同基础在于热-力或力学的耦合框架,但各自的独特作用机制决定了其建模的差异。电场辅助模拟的关键是构建电-热-力全耦合模型,其区别于其他能场的关键在于必须引入考虑电流参数的电塑性本构,并精确求解由动态接触电阻决定的非均匀焦耳热源。电磁场辅助模拟则需在耦合中增加电磁场分析模块,其特有的集肤效应使得温度场呈梯度分布,增加了热-力分析的复杂性,且本构上仍基于热软化模型。激光场辅助模拟的显著特征是将移动的高能量密度热源作为边界条件引入,其对空间定位精度要求高,本构上通常简化为温度依赖模型。超声场辅助模拟本质上是高频动态力学问题,其核心是通过声软化本构和动态摩擦模型来等效振动带来的宏观软化与减摩效

表1 不同能场辅助旋压数值模拟要点对比

Table 1 Comparison of key points in numerical simulation of spinning assisted by different energy fields

能场类型	主要物理场	关键本构建模重点	特有界面/边界处理	主要耦合策略与挑战
电场	电场、温度场、结构场	电塑性本构: 需耦合电流密度, 分离热效应与非热效应(电致塑性)贡献	动态接触电导率: 需建模电极/工件界面电阻随压力、温度、接触状态的动态变化	电-热-力耦合。挑战在于对电塑性微观机理的准确描述及接触电阻的精确建模
电磁场	电磁场、温度场、结构场	高温流变本构: 重点描述感应加热下的热软化, 电致塑性效应耦合仍不成熟	集肤效应: 需考虑涡流及热源在工件厚度方向的非均匀分布	电磁-热-力耦合。挑战在于多场强非线性耦合、磁致塑性机理缺失及计算规模大
激光场	(光场)温度场、结构场	高温热力本构: 重点描述与温度相关的软化行为, 通常未考虑激光非热效应	移动热源模型: 需精确描述高斯/平顶光束的能量分布及其与运动工件的相对移动	顺序热-力耦合。挑战在于实现变形几何与热加载边界的实时更新(强耦合), 避免局部过热模拟
超声场	(振动位移场)、结构场	声软化本构: 需在经典模型中引入振幅、频率等参数, 或建立基于位错动力学的物理模型	动态摩擦模型: 需将摩擦系数修正为与振动参数相关的函数, 以模拟减摩效应	直接动态分析(计算成本高)或等效静态分析。挑战在于高频动态接触的精确模拟及声软化机理的量化

果,而非直接模拟波动场。

4 结论与展望

多能场(电场、电磁场、超声场及激光场)辅助旋压技术,通过引入外部能量场影响材料塑性变形过程,为解决高性能薄壁构件在传统旋压中面临的变形抗力大、成形性能低等瓶颈问题提供了新途径。本文系统综述了各能场的作用机理、工艺特性及数值模拟研究进展,主要结论如下。

(1) 电场辅助旋压技术能显著降低材料的变形抗力、提高成形极限与尺寸精度,并兼具快速升温和优化微观组织的优势。然而,该技术的工程化应用仍面临挑战:其一,对于成形大型构件,设备能力不足,且能耗高;其二,在高电流密度下,电极与工件接触界面易引发电火花,可能导致工件表面损伤。未来研究需着力于开发自适应柔性电极及动态电流加载方法,以实现复杂构件变形区的靶向能量加载与均匀性控制。

(2) 电磁场辅助旋压技术通过非接触式的感应加热方式,避免了直接电接触带来的问题,在促进材料流动、提升塑性及改善成形质量方面具有一定的优势。然而,该技术同样受限于材料的导磁导电性,且感应加热固有的集肤效应易造成工件厚度方向温度分布不均,影响内外层变形的同步性。探索通过复合线圈设计、多频段加热或辅助预热等手段,以优化薄壁构件内外温度场的均匀性,是提升该技术成形精度的关键方向。

(3) 超声场辅助旋压技术凭借其高频振动产生的声软化、体积效应和减摩效应,在降低瞬时成形载荷、显著改善构件表面质量(如减少划痕、降低表面粗糙度等)及优化表层梯度组织方面具有独特优势。其非热特性有效避免了热辅助工艺可能引发的材料热损伤。然而,长期高频振动对机床系统动态稳定性及成形精度构成潜在影响,且在整体提升材

料宏观成形极限方面,其效果通常弱于基于热软化的辅助工艺。

(4) 激光场辅助旋压技术作为一种高精度、非接触的局部热源,能够实现能量的极致聚焦与时空精准控制,从而极大提升材料的局部塑性,改善简单回转体构件的成形精度。但其高能束特性使得在复杂曲面或高转速工况下实现均匀、稳定的温度场面临巨大挑战,且对于时效强化铝合金等材料,不当的加热可能诱发时效,导致材料软化。

展望未来,高性能薄壁构件多能场辅助旋压技术虽已展现出巨大潜力,但其发展仍面临理论认知和工程应用挑战,未来的研究可能聚焦于以下方向。

(1) 研究多物理场耦合机理与跨尺度建模方法。当前,对于多能场(尤其是复合场)与材料微观缺陷(位错、晶界、相界)相互作用的动态过程与耦合本质,尚缺乏普适的微观机理描述与高精度的跨尺度预测模型。未来可进一步利用原位试验(如高温电镜)与多尺度模拟相结合的方法,揭示能场作用下位错运动、动态再结晶及织构演变的实时过程,从而建立更精确、基于微观物理机制的多场耦合本构模型。这对于实现成形过程与构件性能的精准预测与主动控制至关重要。

(2) 发展面向复杂构件的自适应智能化调控技术与装备。现有研究多集中于简单回转体,而航空发动机机匣、带复杂内筋的燃料贮箱等构件具有非轴对称、变曲率、局部特征密集等特点,对能场的“靶向”施加与均匀性控制提出了更高要求。未来的装备研发需突破刚性加载模式的限制,开发随形感应线圈、多光束激光协同扫描、阵列式柔性超声工具头等自适应加载装置,实现对关键变形区域的动态能量匹配。同时,集成机器学习与人工智能技术,基于多传感器信息(如温度、力、视觉)构建

数字孪生模型,实现对工艺参数的在线感知、智能决策与闭环优化,是提升该技术工程适用性与稳定性的一种具有潜力的路线。

(3) 探索多能场协同与复合新工艺。单一能场往往在解决特定问题上存在局限,而多能场的有机协同可能产生“1+1>2”的复合效应。例如,将电场(或电磁场)的体软化优势与超声场的表面改性能力相结合,有望同步实现构件宏观形性的高效成形与表层性能的提升;将激光的精准局部加热与感应加热的整体预热相结合,可协同解决复杂构件局部难成形与整体温度均匀性的矛盾。研究多能场加载的时序、空间配比与能量配比,阐明其协同作用机制,并开发相应的复合工艺与专用装备,为突破极端难变形材料复杂构件的制造瓶颈开辟新途径。

(4) 拓展材料体系与全生命周期性能关联研究。目前研究多聚焦于传统铝合金、钛合金、高强度钢等,未来应将该技术拓展至更广泛的先进材料,如金属基复合材料、高熵合金及异质材料(如层状复合材料)的旋压成形。同时,研究应从“成形过程”延伸至“全生命周期性能”,系统揭示多能场辅助旋压工艺-微观组织-使役性能(如疲劳、腐蚀、高温性能)之间的内在关联,建立“工艺调控组织、组织决定性能”的全链条设计理论,从而为实现构件“成形-成性”一体化制造提供理论依据。

总而言之,高性能薄壁构件多能场辅助旋压正从一种工艺创新迈向一个涉及材料、力学、物理、信息等多学科交叉的前沿领域。通过开展机理、工艺、装备、智能技术研究,该技术有望为实现航空航天等领域高端装备的轻量化、高性能与高可靠制造提供创新性的解决方案。

参考文献

- [1] 李勇,李东升,李小强.大型复杂壁

板构件塑性成形技术研究与应用进展[J]. 航空制造技术, 2020, 63(21): 36-45, 53.

LI Yong, LI Dongsheng, LI Xiaoqiang. A review of plastic forming technologies and applications for large and complex-shaped panels[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(21): 36-45, 53.

[2] LI Z X, ZHAN M, FAN X G, et al. Effect of blank quenching on shear spinning forming precision of 2219 aluminum alloy complex thin-walled components[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(4): 538-555.

[3] MUSIC O, ALLWOOD J M, KAWAI K. A review of the mechanics of metal spinning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(1): 3-23.

[4] 贾震, 王诗琪, 李运涛. 非圆截面/非对称板坯旋压技术研究现状及展望[J]. 航空制造技术, 2025, 68(10): 68-73.

JIA Zhen, WANG Shiqi, LI Yuntao. Research status and prospects of spinning technology for non-circular cross-section/asymmetric sheet blanks[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(10): 68-73.

[5] 杨合, 詹梅, 李甜, 等. 铝合金大型复杂薄壁壳体旋压研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2534-2550.

YANG He, ZHAN Mei, LI Tian, et al. Advances in spinning of aluminum alloy large-sized complicated thin-walled shells[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2534-2550.

[6] ZHAN M, YANG H, GUO J, et al. Review on hot spinning for difficult-to-deform lightweight metals[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(6): 1732-1743.

[7] KRATKY A. Laser assisted forming techniques[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Beijing, 2007.

[8] XIE L C, SUN H X, WEN Y, et al. Electromagnetic treatment enhancing performance of metal materials: A review[J]. Progress in Materials Science, 2025, 153: 101488.

[9] LI M H, ZHANG B, CHEN G Q, et al. Temperature dependence of electroplastic effect on reducing the ultimate stress in Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V alloy during tension[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 863: 144545.

[10] 王建华, 毛佳新, 靳凯, 等. TA2纯钛构件电流辅助旋压成形实验研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(4): 61-67.

WANG Jianhua, MAO Jiixin, JIN Kai, et al. Experimental research on current-assisted spin-forming of TA2 pure titanium components[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(4): 61-67.

[11] JIN K, WANG J H, GUO X Z, et al.

Experimental analysis of electro-assisted warm spin forming of commercial pure titanium components[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(1-4): 293-304.

[12] 蔡继文. AZ31B镁合金板电流辅助剪切旋压成形技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021: 30-37, 48-57.

CAI Jiwen. Study on electro-assisted shear spin forming performances of AZ31B magnesium alloy sheet[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021: 30-37, 48-57.

[13] CHEN C, XIAO G F, XIA Q X, et al. Macroscopic and microscopic deformation mechanism of cup-shaped part made of difficult-to-deform metal during the current-assisted flow spinning process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 340: 118859.

[14] LIAO C Z, HUANG J, XUE L, et al. Another reason for plasticity enhancement of cold-deformed aluminium alloy induced by electric pulse treatment[J]. Materials Today Communications, 2023, 34: 104969.

[15] SIMONETTO E, BRUSCHI S, GHIOTTI A. Electroplastic effect on AA1050 plastic flow behavior in H24 tempered and fully annealed conditions[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 34: 83-89.

[16] TANG Z J, CHEN J, DANG K X, et al. Experimental investigation into the electropulsing assisted pulsating gas forming of CP-Ti tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 278: 116492.

[17] AL-OBAIDI A, KRÄUSEL V, LANDGREBE D. Hot single-point incremental forming assisted by induction heating[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(5-8): 1163-1171.

[18] 易兆祥, 李新和, 常士武, 等. 薄壁封头电磁感应加热旋压工艺[J]. 锻压技术, 2018, 43(1): 60-65.

YI Zhaoxiang, LI Xinhe, CHANG Shiwu, et al. Electromagnetic induction heating spinning process of thin-wall head[J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(1): 60-65.

[19] GAN T, NI J, YU Z Q, et al. Study on warm formability of aluminum alloy 2219 in hemispherical part conventional spinning[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 50: 45-50.

[20] 江鹏. 镁合金带内筋筒形件热强旋成形材料流动规律研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021: 15-50, 63.

JIANG Peng. Research on the material flow law of magnesium alloy cylindrical parts with inner ribs during hot power spinning[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021: 15-50, 63.

[21] 杜军. 难变形金属热强旋成形方

法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 28-34, 45-48.

DU Jun. Research on forming method of difficult-to-deform metal in hot power spinning[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015: 28-34, 45-48.

[22] 朱宁远. 难变形金属筒形件热强旋过程形/性一体化控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 63-69, 78-91.

ZHU Ningyuan. Research on precision & property integrated control of tubular parts of difficult-to-deform metal in hot power spinning[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 63-69, 78-91.

[23] 王兴坤. 难变形金属筒形件热强旋成形机理及工艺参数优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 60-85.

WANG Xingkun. Study on forming mechanism and process optimization of hot power spinning for hard-to-deform material tubular parts[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 60-85.

[24] 武慧敏. 基于光斑检测的激光加热系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2019: 10-16, 35-46.

WU Huimin. Research on laser heating system based on spot detection[D]. Taiyuan: North University of China, 2019: 10-16, 35-46.

[25] KLOCKE F, BRUMMER C M. Laser-assisted metal spinning of challenging materials[J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 2385-2390.

[26] KLOCKE F, WEHRMEISTER T. Laser-assisted metal spinning of advanced materials[C]//International Conference on Lasers in Manufacturing. Shenzhen, 2003.

[27] CUSANNO A, SORGENTE D, GUGLIELMI P, et al. Laser-assisted gas incremental forming of sheet metal[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 151: 1058-1069.

[28] ROMERO P, OTERO N, CABRERA J M, et al. Laser assisted conical spin forming of dual phase automotive steel. Experimental demonstration of work hardening reduction and forming limit extension[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 215-225.

[29] WANG F Q, RAN J Y, DU C Y, et al. Study on laser-assisted spinning of aged Aluminum alloy sheet[J]. METAL 2021 Conference Proceedings, 2021, 2021: 199-204.

[30] ZHANG X, LI H W, XIANG Z Y, et al. Targeted control of microstructure homogeneity of Ni-based superalloy complex component by electric pulse[J]. Materials Letters, 2022, 321: 132429.

[31] NIU H T, GAO P F, LI H W, et al. Mechanism and modelling of the electroplastic effect in titanium alloy: From the perspective of dislocation slip[J]. International Journal of Plasticity, 2025, 192: 104405.

- [32] XU Z T, LI X N, ZHANG R, et al. The effect of electric current on dislocation activity in pure aluminum: A 3D discrete dislocation dynamics study[J]. *International Journal of Plasticity*, 2023, 171: 103826.
- [33] XU Z T, JIANG T H, HUANG J H, et al. Electroplasticity in electrically-assisted forming: Process phenomena, performances and modelling[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2022, 175: 103871.
- [34] MCNEFF P S, PAUL B K. Electroplasticity effects in Haynes 230[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 829: 154438.
- [35] KUANG J, LOW T S E, NIEZGODA S R, et al. Abnormal texture development in magnesium alloy Mg-3Al-1Zn during large strain electroplastic rolling: Effect of pulsed electric current[J]. *International Journal of Plasticity*, 2016, 87: 86-99.
- [36] YAN S L, YANG L Q, HU L, et al. Strain rate sensitivity of TC4 alloy sheet under electrically-assisted tension: Mechanical responses and electroplastic mechanisms[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 38: 474-489.
- [37] LI Z X, SHI Y L, XU L P, et al. Electrically-assisted deformation behavior and constitutive modeling of as-quenched 2219 aluminum alloy considering negative-to-positive strain rate sensitivity[J]. *Materials Characterization*, 2025, 219: 114638.
- [38] ZHAO S T, ZHANG R P, CHONG Y, et al. Defect reconfiguration in a Ti-Al alloy via electroplasticity[J]. *Nature Materials*, 2021, 20(4): 468-472.
- [39] 严思梁. 基于建模的铝合金薄壁件电磁渐进成形机理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017: 102-103, 137-138.
- YAN Siliang. Modelling based study on mechanism of electromagnetic incremental forming of thin-walled aluminum component[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017: 102-103, 137-138.
- [40] ZHAO Y, WANG J, DENG N, et al. High magnetic field-induced grain refinement of undercooled Inconel 718 superalloy[J]. *Materials Research Letters*, 2024, 12(9): 617-625.
- [41] SONG X, QI H P, LI S, et al. Effect of cryogenic coupled magnetic field treatment on the microstructure and mechanical properties on Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 40: 109417.
- [42] ZHANG D H, SHI D P, WANG F, et al. Electromagnetic shocking induced fatigue improvement via tailoring the α -grain boundary in metastable β titanium alloy bolts[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 966: 171536.
- [43] WANG Q, ZHAI L L, ZHANG L, et al. Effect of steady magnetic field on microstructure and properties of laser cladding Ni-based alloy coating[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17: 2145-2157.
- [44] YE Y X, TANG C, MA H Y, et al. Effects of electro-magnetic compound field on the plastic behavior and microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy[J]. *Applied Materials Today*, 2025, 46: 102900.
- [45] 杨枫, 申昱, 曹常印, 等. 基于超声振动的纯钛TA1板材的成形性能[J]. *塑性工程学报*, 2014, 21(4): 42-46.
- YANG Feng, SHEN Yu, CAO Changyin, et al. Research on forming performance of TA1 subjected to ultrasonic vibration[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2014, 21(4): 42-46.
- [46] DAUD Y, LUCAS M, HUANG Z H. Modelling the effects of superimposed ultrasonic vibrations on tension and compression tests of aluminium[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 186(1-3): 179-190.
- [47] 季星红. 随焊超声旋压焊接7075铝合金薄板变形控制研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2024: 23-32, 58-59.
- JI Xinghong. Research on deformation control of 7075 aluminum alloy thin plates through welding with trailing ultrasonic rotating extrusion[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024: 23-32, 58-59.
- [48] 季星红, 梁召峰, 张格睿, 等. 随焊超声旋压对7075铝合金焊接接头微观组织与力学性能的影响[J]. *焊接学报*, 2025, 46(3): 36-42.
- JI Xinghong, LIANG Zhaofeng, ZHANG Gerui, et al. Effect of ultrasonic spinning with welding on the microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy welded joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2025, 46(3): 36-42.
- [49] 魏丽武. 超声辅助无氧铜TU1板材旋压成形工艺研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022: 39-55.
- WEI Liwu. Study on ultrasonic assisted oxygen free copper TU1 sheet spinning process[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022: 39-55.
- [50] ZHANG Y Q, ZHAN M, FAN X G, et al. Forming of pure titanium tubes by combined spinning-ultrasonic surface rolling process: Microstructure and mechanical properties[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 105: 70-83.
- [51] KUMAR V C, HUTCHINGS I M. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration[J]. *Tribology International*, 2004, 37(10): 833-840.
- [52] CAO M Y, LI J C, LIU Y Y, et al. Frictional characteristics of sheet metals with superimposed ultrasonic vibrations[J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(8): 1879-1887.
- [53] RASOLI M A, ABDULLAH A, FARZIN M, et al. Influence of ultrasonic vibrations on tube spinning process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(6): 1443-1452.
- [54] 王磊. 30CrMnSiA杯形件电流辅助流动旋压成形工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 43, 64-70.
- WANG Lei. Research on the electrically assisted flow spinning process of 30CrMnSiA cup-shaped parts[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 43, 64-70.
- [55] 徐晓, 王磊, 李泽宇, 等. 30CrMnSiA杯形件电流辅助拉深旋压成形工艺优化[J]. *锻压技术*, 2020, 45(1): 96-102.
- XU Xiao, WANG Lei, LI Zeyu, et al. Optimization on electrically assisted deep drawing spinning process for 30CrMnSiA cup-shaped part[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45(1): 96-102.
- [56] WANG J H, JIN X, JIN K, et al. Thickness reduction effects on the deformation mechanism and microscopic properties in electro-assisted pure titanium spinning[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(9-12): 4587-4595.
- [57] 石艺龙. 2219铝合金薄壁筒形件电辅助流动旋压建模与变形规律研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2025: 57-72.
- SHI Yilong. Study on modeling and deformation behavior of electrically-assisted flow spinning of 2219 aluminum alloy thin-walled tubular parts[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2025: 57-72.
- [58] 詹梅, 牛浩通, 高鹏飞, 等. 一种电辅助旋压成形装置及方法: CN119588809B[P]. 2025-11-25.
- ZHAN Mei, NIU Haotong, GAO Pengfei, et al. An electric-assisted spin forming device and method: CN119588809B[P]. 2025-11-25.
- [59] BRUMMER C, ECK S, MARSONER S, et al. Laser-assisted metal spinning for an efficient and flexible processing of challenging materials[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 119: 012022.
- [60] 冉津宇, 王凤琪, 于忠奇, 等. 铝合金球面薄壁件激光辅助剪切旋压成形实验[J]. *上海交通大学学报*, 2023, 57(10): 1337-1345.
- RAN Jinyu, WANG Fengqi, YU Zhongqi, et al. Experiment of laser assisted shear spinning for aluminum alloy spherical thin-walled parts[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2023, 57(10): 1337-1345.
- [61] 谭祖龙, 龙锦川, 金俊松, 等. Ti/Al双金属薄壁件激光辅助旋压成形规律[J]. 中

- 国机械工程, 2025, 36(10): 2389–2396.
- TAN Zulong, LONG Jinchuan, JIN Junsong, et al. Laser-assisted spinning forming laws of Ti/Al bimetallic thin-walled parts[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(10): 2389–2396.
- [62] 肖刚锋, 杨博文, 常世荣, 等. 基于数值模拟的钛合金锥形件激光辅助铲旋成形研究[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(4): 200–207.
- XIAO Gangfeng, YANG Bowen, CHANG Shirong, et al. Research on laser-assisted shovel spinning forming of titanium alloy conical parts based on numerical simulation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(4): 200–207.
- [63] 庞世缘. 单激励超声辅助金属板材旋压加工装置的研制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022: 49–65.
- PANG Shiyuan. Development of single excitation ultrasonic assisted spinning device for sheet metal[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022: 49–65.
- [64] ZHANG Y Q, ZHAN M, FAN X G, et al. The interaction among deformation, precipitation/precipitates, and properties of 2219 aluminum alloy tubes under complex thermo-mechanical paths of solution treatment-deformation-aging[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 38: 352–366.
- [65] CUI J H, ZHAO Y X, LI X K, et al. Research on the influence of ultrasonic on the inner rib's surface morphology of ribbed cylindrical parts in flow spinning process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 67: 376–387.
- [66] 张宁, 张艳苓, 毕静, 等. 1420铝锂合金电致超塑性本构方程[J]. 锻压技术, 2015, 40(5): 63–68.
- ZHANG Ning, ZHANG Yanling, BI Jing, et al. Constitutive equation of electro-superplastic for 1420 Al–Li alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(5): 63–68.
- [67] DONG H R, LI X Q, LI Y, et al. An experimental and modelling study of cyclic tension-compression behavior of AA7075–T6 under electrically-assisted condition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 307: 117661.
- [68] 李泽宇, 徐晓, 王磊, 等. 脉冲电流对30CrMnSiA合金钢流动应力的影响[J]. 锻压技术, 2019, 44(2): 74–80.
- LI Zeyu, XU Xiao, WANG Lei, et al. Influence of pulse current on flow stress of 30CrMnSiA alloy steel[J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44(2): 74–80.
- [69] 范旭东. 杯形薄壁小模数齿形件电流辅助分形旋压成形工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2024: 20.
- FAN Xudong. Research on current-assisted splitting spinning forming process for cup-shaped thin-walled small modules toothed parts[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024: 20.
- [70] XIA Q X, CHEN C, XIAO G F, et al. A modified dislocation density-based model of 30CrMnSiA considering the coupling effect of electroplasticity and grain refinement during the pulsed current-assisted plane strain deformation[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(31): 12793–12810.
- [71] TIWARI J, KRISHNASWAMY H, AMIRTHALINGAM M. Modelling transient mechanical behavior of aluminum alloy during electric-assisted forming[M]/NUMISHEET 2022. Cham: Springer International Publishing, 2022: 105–113.
- [72] KIM M J, LEE M G, HARIHARAN K, et al. Electric current-assisted deformation behavior of Al–Mg–Si alloy under uniaxial tension[J]. International Journal of Plasticity, 2017, 94: 148–170.
- [73] SHANG H C, WANG S C, LOU Y S. Modeling and characterization on electroplastic effect during dynamic deformation of 5182–O aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(8): 2455–2475.
- [74] 张冠生. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 153.
- ZHANG Guansheng. Fundamentals of electrical theory[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1997: 153.
- [75] 吴承创, 周宇, 张超, 等. 考虑触点粗糙表面特征的接触电阻仿真分析方法[J]. 电器与能效管理技术, 2025(3): 6–10.
- WU Chengchuang, ZHOU Yu, ZHANG Chao, et al. Simulation analysis method of contact resistance considering characteristics of rough contact surfaces[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2025(3): 6–10.
- [76] BERGER H H. Contact resistance and contact resistivity[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1972, 119(4): 507.
- [77] DASSAULT SYSTÈMES SI MULIA CORP. Abaqus user's manual: Version 6[S/OL]. Providence, RI: Dassault Systèmes, 1995.
- [78] ISHIYAMA M, TANGO Y. Advanced line-heating process for hull-steel assembly[J]. Journal of Ship Production, 2000, 16(2): 121–132.
- [79] 门正兴. 电阻连续加热成形电—热—力耦合试验及模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2010: 31–32, 61–74, 93.
- MEN Zhengxing. Simulation analysis and experimental research of the forming process by continuous resistance heating[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010: 31–32, 61–74, 93.
- [80] ZHAO X Z, ZHANG D H, REN Z Y, et al. Accurate prediction of eddy current losses in SMC cores considering skin effect and contact deformation based on analytical calculation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2025, 61(11): 2001208.
- [81] 张鹏飞, 王德成, 程鹏, 等. 基于电磁热耦合的感应加热65Mn带钢有限元仿真[J]. 材料导报, 2022, 36(12): 154–159.
- ZHANG Pengfei, WANG Decheng, CHENG Peng, et al. Finite element simulation of induction heating 65Mn tape-steel based on electromagnetic thermal coupling[J]. Materials Reports, 2022, 36(12): 154–159.
- [82] 宋华伟. 激光辅助加工熔石英玻璃的切削机理与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 48–60.
- SONG Huawei. Research on cutting mechanism of laser assisted machining for fused silica with experiments[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 48–60.
- [83] 施宇豪, 刘长毅, 沈孝栋. 激光加热辅助铣削钛合金TC4的有限元分析[J]. 机械制造, 2014, 52(7): 60–63.
- SHI Yuhao, LIU Changyi, SHEN Xiaodong. Finite element analysis of laser heating assisted milling of titanium alloy TC4[J]. Machinery, 2014, 52(7): 60–63.
- [84] 朱晓勇. 激光弯曲成形1Cr17Ni2不锈钢板料应力—应变场有限元模拟[J]. 热处理, 2009, 24(4): 45–48.
- ZHU Xiaoyong. FEM simulation of stress-strain field in 1Cr17Ni2 steel sheet during laser bending forming[J]. Heat Treatment, 2009, 24(4): 45–48.
- [85] SONG P F, CAO M Y, FU M, et al. Effect of ultrasonic vibration modes on the residual stress relaxation and mechanical properties of aluminum alloy[J]. Journal of Central South University, 2025, 32(3): 1008–1023.
- [86] RUSINKO A, RUSINKO K. Synthetic theory of irreversible deformation in the context of fundamental bases of plasticity[J]. Mechanics of Materials, 2009, 41(2): 106–120.
- [87] SONG P F, CAO M Y, HU H, et al. A unified constitutive model of FCC metal in ultrasonic vibration with application to oxygen-free high-thermal conductivity copper[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(7): 2245–2259.
- [88] WANG C J, LIU Y, GUO B, et al. Acoustic softening and stress superposition in ultrasonic vibration assisted uniaxial tension of copper foil: Experiments and modeling[J]. Materials & Design, 2016, 112: 246–253.
- [89] 崔子扬. TC4钛合金超声振动应力松弛本构关系研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023: 37–59.
- CUI Ziyang. Study on ultrasonic vibration stress relaxation constitutive relation of TC4

titanium alloy[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023: 37–59.

[90] 王魏庆. 多楔带轮超声辅助旋压成形及其性能研究[D]. 厦门: 集美大学, 2024: 14–19.

WANG Weiqing. Ultrasonic-assisted spin forming of multi-ribbed pulleys and its performance study[D]. Xiamen: Jimei University, 2024: 14–19.

[91] 李丰变. 超硬合金激光超声复合精密切削机理的有限元仿真[D]. 焦作: 河南理工

大学, 2013: 43.

LI Fengbian. Research on mechanism of laser and ultrasonic-assisted precision cutting super-hard alloy with FEA method[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2013: 43.

A Review on Multi-Energy Field Assisted Spinning Forming of High-Performance Thin-Walled Components

LI Zhixin¹, ZENG Hanpeng², LI Tianxu², WANG Siqu¹, WANG Siyi¹, LONG Tao²,
ZHANG Hongrui^{3,4,5}

(1. Faculty of Science, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

2. College of Aviation Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

3. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

5. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] High-performance thin-walled components are critical and urgently needed parts in fields such as aerospace, boasting broad application prospects. Spinning technology has emerged as an effective technical pathway for the integrated manufacturing and performance enhancement of such components. However, these components are frequently manufactured from hard-to-deform materials, which makes them prone to defects such as wrinkling, cracking, and poor mold conformity during the spinning process due to significant uneven deformation. These challenges constrain the high-performance manufacturing and application of these components. In recent years, to improve their formability, research has progressively introduced various energy fields including electric, magnetic, ultrasonic, and laser into the spinning process, leading to extensive studies on multi-energy field assisted forming. This paper reviews the research progress in applying multi-energy fields to achieve high-performance manufacturing in the spinning of thin-walled components. Firstly, it compares the mechanisms of different energy fields on hard-to-deform materials and their influence on the spinning process and forming quality. Subsequently, it analyzes the key finite element modeling technologies related to the multi-energy field assisted spinning process. Finally, based on the comparative analysis, the advantages and limitations of each energy field in spinning are summarized, and the remaining challenges along with future development directions for multi-energy field assisted spinning technology of high-performance thin-walled components are discussed.

Keywords: High-performance thin-walled components; Spinning forming; Multi-energy field assistance; Hard-to-deform materials; Forming quality

(责编 阳光)