

引文格式:王斌, 门西霖, 田苗, 等. 能场在金属构件塑性成形领域的应用综述[J]. 航空制造技术, 2026, 69(18): 26020198.

WANG Bin, MEN Xilin, TIAN Miao, et al. Review of energy-field applications for metal component plastic forming[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(18): 26020198.

能场在金属构件塑性成形领域的应用综述

王斌¹, 门西霖¹, 田苗¹, 张弘斌², 牛小森¹, 张长江³, 王涛¹

(1. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024;

2. 山东科技大学机械电子工程学院, 青岛 266590;

3. 太原理工大学材料科学与工程学院, 太原 030024)

[摘要] 航空、航天、航海等高端装备向高精尖发展, 对关键金属构件的需求日益迫切。装备的大型化、高精度、高可靠性的发展要求, 对高性能金属构件的制造技术提出了严苛要求。传统热力场成形工艺受限于成形载荷大、组织调控难、成形极限偏低等瓶颈, 已难以满足此类金属构件的制造需求。能场成形技术通过引入激光、电流、电磁、超声等一种或多种能场, 利用能场与材料相互作用产生的热效应与非热效应协同调控材料变形行为, 已成为突破传统热力场制造能力局限的重要手段。本文系统阐述了单一能场及多能场复合在金属塑性成形领域的应用现状, 剖析了当前技术存在的工程化应用瓶颈, 展望了能场制造技术未来的发展趋势, 以为高端装备核心部件的研制与生产提供理论与技术参考。

关键词: 能场成形; 特种能场; 金属构件; 控形控性; 多能场耦合

中图分类号: V261; TG306

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.26020198



王斌

教授, 博士, 主要研究方向为钛合金超塑成形/扩散连接技术、高温合金钎焊技术、航天轻量化结构制备技术。

我国“十五五”规划明确提出要强化国家战略科技力量, 深入实施航天强国、航空强国、海洋强国等国家重大战略, 巩固提升一体化国家战略体系和能力^[1]。高端装备及其核心构件的制造能力, 既是实现上述战略目标的重要支撑, 也是国家制造业核心竞争力的集中体现^[2-4]。在新一轮科技革命与产业变革加速演进的背景下, 航空航天、航海、轨道交通等领域的高端装备正朝着大型化、高可靠性和长寿命方向发展, 对关键金属构件的需求非常迫切。这类构件普遍呈现大型整体化、复杂薄壁化、结构轻量化的结构特征^[5-7], 面临高温、高

压等极端服役条件下苛刻性能要求, 其材料多为难变形金属材料, 材料难变形及其性能和精度的高要求, 导致制造难度急剧增大, 已成为制约高端装备制造发展的瓶颈^[8-9]。

为解决上述构件制造难题, 能场(如电场、磁场、超声场等)被逐步引入常规成形工艺中, 发展出能场成形技术^[10]。该技术作为一种非接触式、跨学科的先进制造方法, 通过可控能场与材料之间的多尺度相互作用, 实现构件的成形与性能一体化调控^[11-12], 可提高难变形材料的表面质量, 已成为拓展传统制造能力的重要手段。目前, 特种能场在多

收稿日期: 2026-05-25; 退修日期: 2026-07-09; 录用日期: 2026-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(52595665)

通信作者: 王斌, 教授, 博士。

门西霖, 硕士研究生, 主要研究方向为难变形金属构件能场辅助制造。

种金属材料的塑性提升与性能优化方面已展现出显著优势^[13-14],为难变形金属构件的成形提供了新的途径。

本文从难变形金属构件成形工艺角度出发,系统阐述了激光、电场、电磁、超声,以及多能场构件塑性成形技术方面的应用情况。总结了目前能场塑性成形构件存在的挑战,对该技术未来发展前景进行了展望,旨在为高性能金属构件的塑性成形制造提供参考。

1 能场成形技术分类

大型飞机、高超声速飞行器、新一代舰船等领域的高端装备所采用的核心零部件,多为复杂曲面、薄壁高筋等整体结构,材质采用先进复合材料、高温合金、耐高温钛合金等难变形材料,高精度成形难度较大^[15-16]。采用传统塑性成形工艺面临成形载荷大、工艺柔性差、成形极限低、组织调控差、性能损失大等严峻挑战,难以满足上述构件的制造需求^[17-19]。因此,发展面向复杂构件的能场成形技术,已成为突破现有装备和工艺制造能力瓶颈,实现核心零部件性能跃升与工艺变革的关键。能场成形技术通过引入激光、电、电磁及超声等特种能场,利用热效应与非热效应的协同作用调控材料的变形行为与微观组织演化,可有效降低变形抗力,提高成形极限。然而,不同的能量场因其物理本质的差异,在热效应与非热效应方面呈现出各具特色的机制与表现形式^[18-22],如图1所示。

激光成形可分为激光辅助成形和激光直接成形,二者都是利用激光能量高度集中、可控性好等特点,实现材料局部加热或冲击效果。其热效应主要源于连续波或长脉冲激光辐照引起的材料局部温度场变化,通过温度梯度机理、屈曲机理和增厚机理实现板材弯曲、局部热处理和激光

渐进成形等工艺应用;而非热效应主要由超短脉冲激光产生,由于脉冲宽度远小于热扩散时间,可利用光激发、应力波等效应实现无热损伤的高精度成形,主要应用于航空发动机叶片等关键部件的表面强化等领域^[20-22]。

电场辅助成形技术是通过向材料施加持续或脉冲电流,利用电致塑性效应改善材料成形性能的一种先进制造技术。该技术的热效应源于焦耳热,利用焦耳热效应快速升温,可实现热处理、快速热成形等方面的高效可控应用;其非热效应源于电子风效应、集肤效应、脱钉效应等机制,这些非热效应机制同样对材料的变形行为有显著影响。通过有效利用热效应和非热效应,电场辅助成形技术已广泛应用于金属拉拔、轧制、弯曲、冲压等塑性成形工艺^[22-24]。

电磁成形技术通过瞬态脉冲磁场在工件内部产生感应涡流,并借助洛伦兹力实现工件高速、无接触的塑性变形。该技术的热效应主要源于感应电流的焦耳热,由于感应加热速

率高、热影响区域可控,可实现对材料局部区域或整体的快速热软化,在板材热冲压、管材成形等领域具有显著优势;非热效应主要表现为电磁力直接作用于材料,产生高速变形或冲击成形,从而显著提高材料的成形极限。电磁成形过程中的高应变速率效应可有效抑制材料颈缩,使成形极限远高于准静态条件下的成形极限,已广泛应用于管材胀形、板材冲压、连接与装配等工艺^[15,20,25]。

超声场辅助成形技术通过在塑性变形过程中叠加高频机械振动来改善材料的成形性能。该技术的热效应主要源于部分声能被吸收转化为热能,使材料内部温度升高而产生热软化,与其他能量场有本质的区别^[26]。而非热效应分为体积效应和表面效应两大类,体积效应包括应力叠加、声软化、残余效应等,其中声软化效应能量利用效率高于传统热软化可通过影响材料微观结构演化来降低材料的变形抗力,且成形过程中材料温度升高可忽略,这对于钛合金、高温合金成形来说至关重要^[27-28];表面效应指超声振动在材料

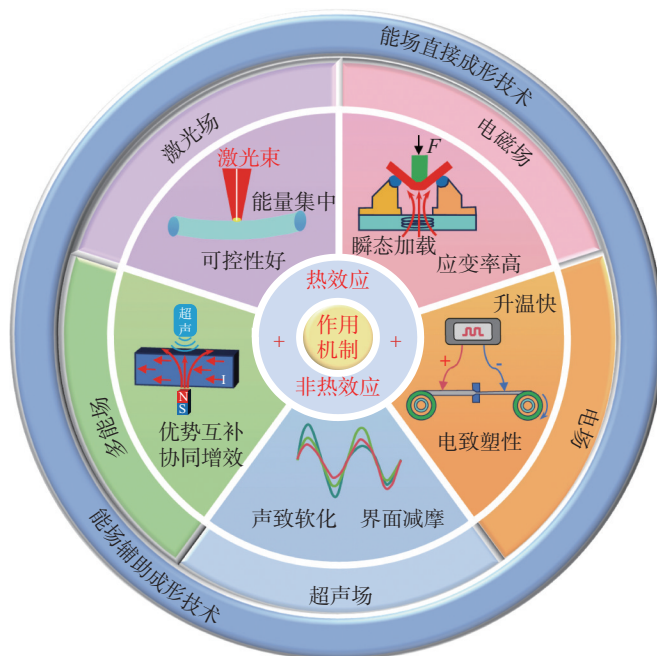


Fig.1 Classification and characteristics of field-forming technology^[18-22]

与模具的接触界面或材料自由表面引发的物理化学变化,可改善材料与模具界面摩擦、优化表面形貌,从而降低成形载荷,提升成形精度与表面质量。超声场辅助成形技术已在金属拉拔、挤压、冲压、微塑性成形等多种工艺中得到广泛应用^[29-31]。

多能场复合成形技术是在传统单一能场成形基础上发展而来的先进成形技术^[32-33]。该技术主要通过同时或顺序施加两种或两种以上的特种能场,利用各能场热效应与非热效应之间的协同耦合作用,优化能量传递与材料响应,产生协同增强的效果^[34-35],可显著拓宽材料成形极限并提高成形精度。目前,已开展了相关的多能场耦合成形研究。例如,电场辅助超声轧制工艺中,通过电场的电致塑性效应降低位错运动阻力,并结合超声场的高频振动,在降低轧制力的同时实现晶粒纳米化和表面硬度提升^[36];电磁场辅助超声场钛合金表面改性工艺中,利用磁场的磁致塑性效应加速原子扩散,配合超声场的体积效应和表面效应改变表面微观形貌,提高钛合金的表面纳米化程度与显微硬度^[37];在电磁场辅助激光场钛合金喷丸工艺中,依靠磁场的洛伦兹力对激光诱导等离子体产生非热效应约束,增强冲击波压力,再结合激光场的非热效应引入深层残余压应力,可改善钛合金构件的疲劳性能和表面硬度^[38]。

2 能场成形技术应用

2.1 激光成形技术

激光成形以高温合金、钛合金等难变形材料为成形对象,该技术主要基于温度梯度、屈曲和增厚三大核心变形机理,可实现各类异形、高精度金属构件的无模柔性成形与组织性能调控^[39-40]。激光成形技术通过将激光与旋压、喷丸等传统塑性成形工艺相结合,利用其能量可控与作用精准的突出优势,实现材料局部的精准

成形与性能优化,在铝合金球面薄壁件、TC4钛合金叶片等构件成形领域具有良好的应用前景^[41-43]。

在激光直接成形领域,激光弯曲成形作为一种无模具、非接触式的柔性成形技术,依靠激光热应力实现金属板材的精密塑性弯曲成形,在航空航天、精密制造等领域应用前景广阔^[44]。田欣宇^[45]搭建了CrMnFeCoNi高熵合金薄板纳秒脉冲激光弯曲试验平台,通过采用纳秒脉冲激光弯曲工艺,使构件能够实现更大的弯曲角度,丰富了激光弯曲技术在高熵合金材料成形领域的应用场景。严长等^[46]为了解决铝合金室温塑性差、成形易开裂的技术难题,采用激光冲击温热微弯曲成形技术对6061铝合金箔板进行弯曲成形试验,结果表明,当成形温度从25℃升高至250℃,成形深度增长了86%,且激光冲击可有效降低表面粗糙度,同时热场配合激光冲击可降低材料屈服强度,提升塑性与流动性,抑制工件内部缺陷和微裂纹的形成,使工件不易发生局部失效或破裂。姜森宝等^[47]开展了Ti₂AlNb钛合金轧板激光弯曲试验,结果表明,激光可改善构件弯曲角度和弯曲形状,提升构件表面质量,为航空钛合金薄壁构件精密成形提供了重要技术支撑。孙涛^[48]采用仿真与试验相结合的方式,开展复合层板激光弯曲一体化成形研究,结果表明,激光弯曲成形技术可以有效抑制激光多路径扫描中因应力释放而导致的构件回弹变形,为航空航天领域纤维金属层板单曲率零件高精度成形提供了理论依据。

除了激光弯曲成形,激光冲击强化作为一种典型的高能束表面处理技术,具有非接触成形、高精度、可控性强和绿色环保等优势,在改善零部件质量方面效果显著,已在航空发动机叶片、起落架等关键构件中实现工程化应用^[22]。Huang等^[42]分别采用磁场激光喷丸(MA-LSP)和激光喷

丸工艺(LSP)来强化7075-T6铝合金(图2(a)),结果表明,在MA-LSP工艺处理后,铝合金试件的屈服强度为517.7 MPa,比基材提高了6.5%,其表面产生了更细的晶粒,获得了更深的硬化层和更高的表面硬度。汤洋等^[43]为了提高航空发动机叶片抗外物损伤的能力,采用双面同时激光斜冲击方式对叶片前缘进行强化处理(图2(b)),结果表明,叶片表面显微硬度平均值增加了50%。除此之外,激光冲击技术在微凹坑、微压印等表面微结构的制造领域同样展现出广阔的应用前景^[49]。Liu等^[50]通过开展新型微尺度激光高速冲压的数值模拟与试验研究,利用激光诱发的冲击波,在有非圆形微型模具开口的薄金属板上制造非圆形微孔,获得了良好的边缘质量,试验表明激光高速冲压在微冲压技术领域具有一定的应用前景。陈秀玉^[51]以9Cr18轴承钢为研究对象,开展多次激光冲击强化试验,结果表明激光冲击工艺可通过能量梯度叠加显著增加微坑深度,以6 J为第1次冲击能量,并将第2次冲击能量提高到12 J,此时9Cr18轴承钢表面凹坑深度达到了58.61 μm,为激光冲击强化构件及表面结构化提供了工艺指导。

激光辅助成形作为一种典型的外部能量精确输入式成形技术,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^[20,52],典型的技术包括激光旋压、激光渐进成形等。激光旋压是将激光聚焦于旋轮作用前端的变形区,从而达到材料的局部瞬时加热与软化,可大幅提升材料的成形极限。冉津宇^[53]以椭球面构件为例开展铝合金薄板室温和激光剪切旋压试验(图2(c)),证实了激光旋压可显著提高难成形薄板的可旋性,使减薄率增加30%,同时明显改善薄壁旋压件的厚度均匀性。谭祖龙等^[54]为了改善Ti/Al双金属薄壁锥形件室温成形几

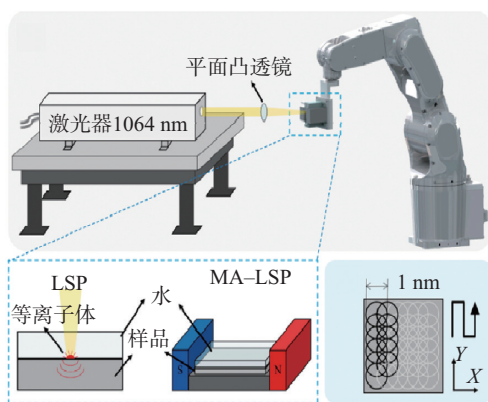
何精度和力学性能较差的问题,采用激光剪切旋压成形工艺进行了试验验证(图2(d)),发现室温剪切旋压的离模间隙最大值为0.448 mm,激光辅助剪切旋压的离模间隙最大值只有0.164 mm,结果表明激光剪切旋压可以显著提高Ti/Al双金属薄壁锥形件的变形均匀性,改善整体的力学性能。赵新海等^[41]利用数值模拟方式对激光渐进成形工艺进行了研究,确认该工艺可以提高零件的成形质量。

然而,对于塑性较低的金属材料,单纯依靠单一激光场难以有效引入残余压应力,且易产生表面裂纹。通过引入电脉冲场或电磁场,可显著降低材料流动应力,改善其塑性,从而提高对冲击载荷的响应能力并抑制裂纹形成^[22]。Zhang等^[55]为了解决难变形合金在激光冲击过程中塑

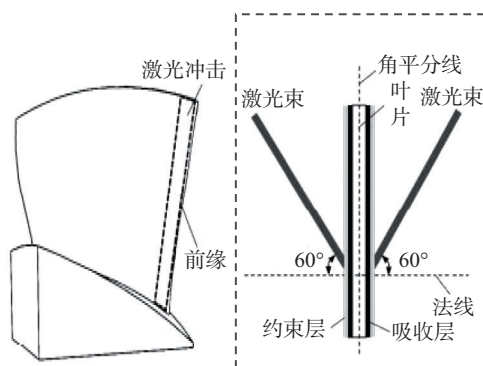
性变形能力不足、冲击响应差的技术难题,采用电脉冲辅助激光冲击强化技术,对TC4合金进行了微结构演化与电塑性效应试验,结果表明,电致塑性效应可降低材料流动应力,有助于激光冲击波诱导更深层的塑性变形,增强难变形合金对冲击载荷的响应能力。Zhang等^[56]采用低频电脉冲辅助激光冲击强化技术,对TC4合金进行了力学性能与强化机理试验,发现电场辅助可显著促进晶粒细化与位错增殖,使屈服强度和抗拉强度分别提高10.1%和11.3%,有助于解决TC4钛合金室温力学性能不足的技术难题。针对7075-T6铝合金常规激光冲击强化效果有限的问题,Huang等^[42]采用磁场辅助激光喷丸技术,对7075-T6铝合金板材进行了表面强化对比试验,结果表明磁场可

约束等离子体膨胀、强化冲击效应,从而获得更深的强化层与更均匀的硬化分布。激光冲击技术及其多能场技术已逐步在航空关键构件中形成系统的工程应用体系,逐渐成为提升航空类关键构件服役寿命与性能的重要技术手段。

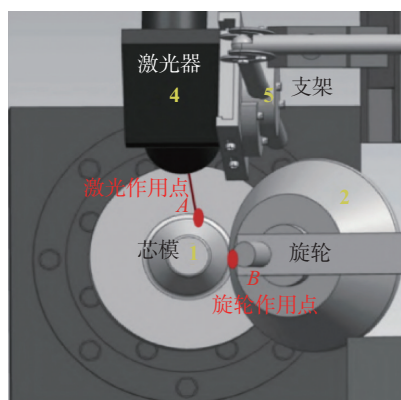
激光成形技术凭借能量精准可控、非接触成形、局部热影响区小等优势在难变形金属构件制造领域展现出显著潜力,但在应用层面仍存在多维度技术瓶颈:激光系统与旋压成形设备协同控制复杂,激光头与设备部件易发生空间干涉;激光束难以有效照射圆角、倒角等复杂几何特征区域,高转速工况下难以维持变形区均匀稳定的温度场,易形成陡峭热梯度导致局部过热或加热不足;激光成形构件表面易出现熔融氧化痕迹,表面



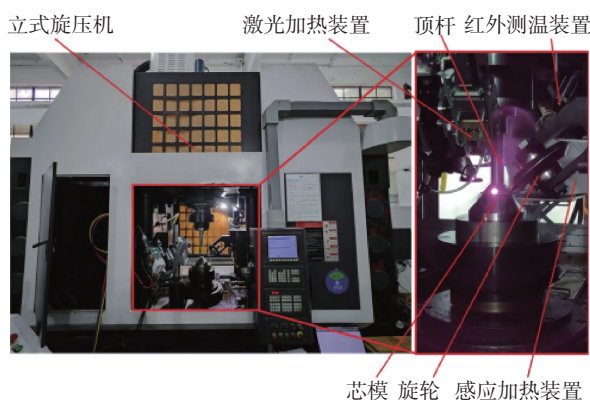
(a) MA-LSP和LSP工艺示意图^[42]



(b) 叶片激光冲击位置及强化示意图^[43]



(c) 激光旋压原理图^[53]



(d) 激光剪切旋压设备图^[54]

图2 激光成形工艺与试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser forming process and experimental apparatus

粗糙度较高且存在一定的成形锥度,需大量后续精加工工序,同时高功率激光设备初期投资大,运行能耗与维护成本也较高。

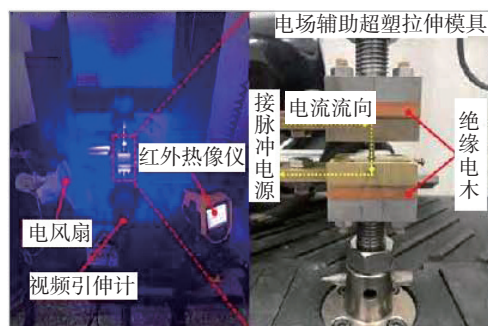
2.2 电场辅助成形技术

电塑性效应研究起步较早,电场辅助成形技术是最早实现应用的能场技术。该技术的核心机理是在钛合金、高温合金等难变形合金成形过程中施加脉冲电流或稳态电场,借助热效应与非热效应的协同作用,减小材料变形阻力、优化微观组织,最终实现构件精准成形^[23]。该技术的作用机制主要分为焦耳热效应和非热效应。焦耳热效应通过自由电子与晶格原子之间的碰撞作用将电子动能转化为热能,降低难变形合金流动应力、促进相变,提高成形极限^[57-58]。苑城玮等^[59]的研究证实,材料温度升高幅度与电流密度平方呈正相关,可精准适配航空航天构件成形的温度

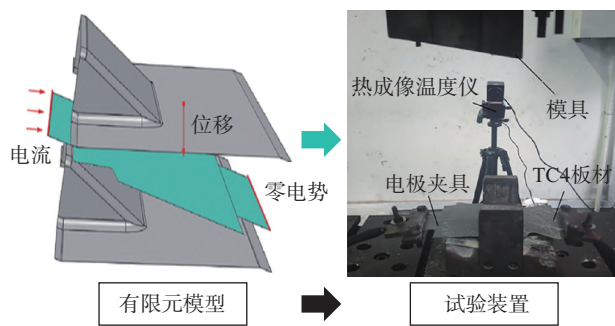
控制需求。非热效应(电子风效应、脱钉效应等)通过推动位错运动,降低位错与钉扎中心的结合能,增强难变形合金的塑性,解决复杂构件成形过程中开裂、变形不均的难题^[24,60-63]。随着研究的深入,电塑性效应在轧制、折弯、拉伸、拉拔及车削等多种成形工艺中均表现出显著效果,电场的施加能够有效降低材料变形抗力,从而获得更优的力学性能与表面质量^[64]。

近年来,随着航空航天装备向着高精度、高性能、轻量化方向快速发展,电场辅助成形技术作为融合电学、材料学、机械工程学的新型复合成形技术,在材料成形中工程化应用的需求日益迫切,已成为突破传统成形技术瓶颈、推动航空航天装备升级的关键支撑技术之一(图3)。韩昊霖等^[65]进行了超薄316L板在脉冲电流下的冲压工艺研究,研究了脉冲电流对316L板微流道成形精度的影响,发

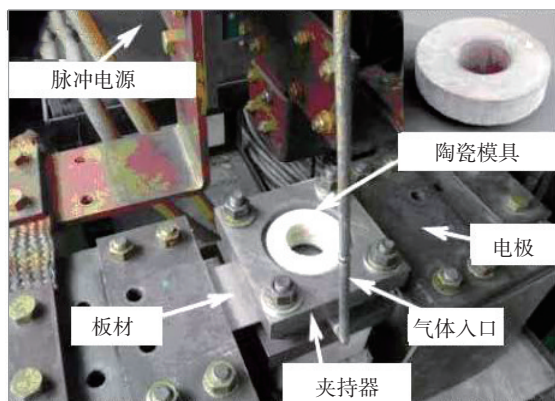
现在冲压阶段未通电流时,由保压松弛带来的流道深度仅提升了 $6.51\text{ }\mu\text{m}$,而在施加脉冲电流后,由保压松弛带来的流道深度最多提升 $28.979\text{ }\mu\text{m}$,而且控制电流作用在不同的成形阶段还可以提升对流道回弹的抑制效果。为了探究电场作用下LZ91镁锂合金的超塑变形行为,孟宝^[66]设计了电场超塑单向拉伸试验平台,如图3(a)所示,通过递减式恒压供电方案,发现电场可以有效降低超塑变形温度,在 $4\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 的初始应变速率下LZ91镁锂合金达到了110%的最大伸长率,为微型热管电场辅助成形工艺提供了有益探索。此外,该团队还提出了一种电场辊压成形制备大面积阵列微流道结构的工艺方法^[67],其研发的阵列微流道辊压工装,采用板-板直接通电的方式,有效解决了传统工艺变形不均的问题,证实了电场辊压成形技术在制造高强大面积



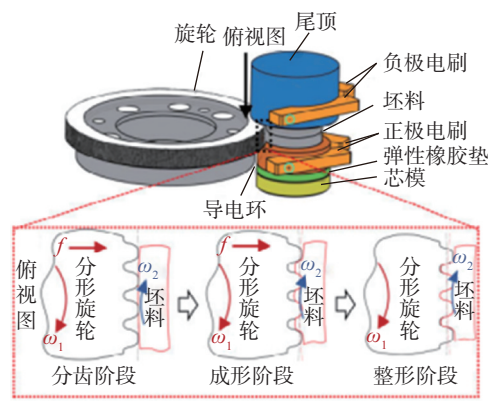
(a) 电场超塑单向拉伸试验平台^[66]



(b) 电场冲压工艺有限元模型及试验装置^[69]



(c) 脉冲电流超塑成形设备图^[70]



(d) 电流分形旋压成形工艺示意图^[72]

图3 电场辅助成形工艺与试验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of electric field-assisted forming process and experimental apparatus

阵列微流道方面的应用潜力。

太原理工大学范婉婉^[68]研发的脉冲电流十二辊轧机,通过导向辊绝缘改造与参数优化,解决了SUS304极薄板轧制翘曲、厚度不均的问题,实现了该极薄板稳定批量生产,产品厚度方向的精度达 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$,强度较传统工艺提升15%以上,满足了航空航天领域精密仪器、机身结构件等高端需求。此外,为了解决飞机钛合金钣金件加热-成形一体化和零件成形性能差等难题,邓锋等^[69]提出了一种电场冲压工艺,通过模拟仿真与试验结合(图3(b)),发现当电流密度为 10.452 A/mm^2 ,合模速度为 $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,板材最大减薄率为12.2%,有效解决了钛合金钣金件成形开裂、变形等成形难题。李超等^[70]针对TC4合金板材超塑成形能耗高、效率低的问题,提出了一种脉冲电流超塑成形工艺(图3(c)),该工艺利用脉冲电流迅速将坯料加热至超塑成形温度,可使整个工艺效率提高2倍,降低能耗80%左右,成形件总高度与模口直径之比可达1以上,提升了TC4合金板材的超塑成形能力。

目前,电场辅助成形技术已走出实验室阶段,成功应用于不锈钢、铝合金、钛合金等多种金属构件制造,成为材料成形与制造领域的核心技术之一。Bumgardner等^[61]针对铝合金精密成形需求,揭示了低能量电塑性效应的作用机制,解决了传统成形中电流密度过高、能耗偏大的问题,证实了低能量电辅助技术在铝合金构件制造中具有重要应用价值。Jiang等^[71]为整体制造大型TC4钛合金部件,提出了一种电辅助增量成形工艺,解决了传统热成形加热工艺繁琐和时间长的问题,证实了电辅助增量成形技术在一体成形的大型钛合金部件制造领域有较好的应用前景。夏琴香等^[72]提出了一种用于制备难变形复杂构件的电流流动分形旋压成形工艺方法,施加脉冲电流后可降

低材料变形抗力,增强材料径向填充的能力,提高齿形填充饱和度(图3(d))。采用该工艺可解决难变形金属复杂件(如发动机叶片、精密齿轮)制备流程长、材料利用率低等问题,实现了难变形复杂构件的高精度高性能制造。此外,电辅助成形技术还可以用于辅助热处理,Zhang等^[73]利用电场辅助热处理解决了ZrTiAlV合金热处理过程中 β 相晶粒过度膨大的问题,表明电场辅助热处理技术在调控微观结构方面具有一定的应用前景。

尽管电场辅助成形技术展现出诸多优势,其在实际应用中仍面临若干局限性:高强电流对装备绝缘与运行安全构成严峻挑战;电场与材料交互作用的局部性、瞬时性特征加剧了工艺控制的复杂性;该技术对导电性差或电致塑性响应不敏感材料适用性有限;工艺模型与规模化生产的衔接尚需深入验证。

2.3 电磁成形技术

电磁成形技术是近年来塑性成

形领域的重要发展方向之一,自1959年获得首项专利以来,该技术经历了长期的理论与试验积累,逐步实现从理论研究向工业应用的转化^[25]。成形过程中,高应变速率的动态加载条件有助于延迟局部颈缩发生,从而显著提高材料的成形极限;同时,非接触加载方式也避免了模具与工件之间的摩擦损伤,有利于提升成形件表面质量。此外,电磁成形还具有能效高、污染低、成形效率高等技术优势,使其在航空航天、新能源汽车等对轻量化需求迫切的领域展现出良好的应用前景^[25,74-75]。

电磁成形技术现已发展出较为成熟的工艺体系,涵盖无模翻边、板材冲压、圆孔翻边、管材胀形、缩径及电磁连接等多种成形方式^[25]。飞机表面曲面是决定其空气动力学形状的关键组成部分,使用传统成形方法常常会出现较大的弹簧回弹,采用电磁成形可以显著减少回弹(图4)。Cui等^[75]提出了一种电磁分区成形方法(图4(a)和(b)),将弹性变形有效转

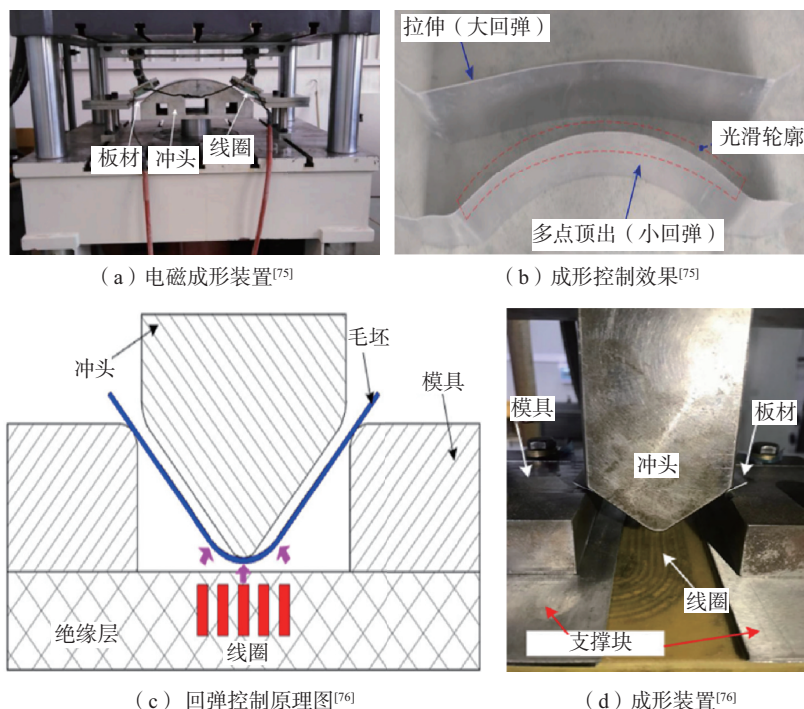


图4 电磁成形装置与回弹控制原理示意图

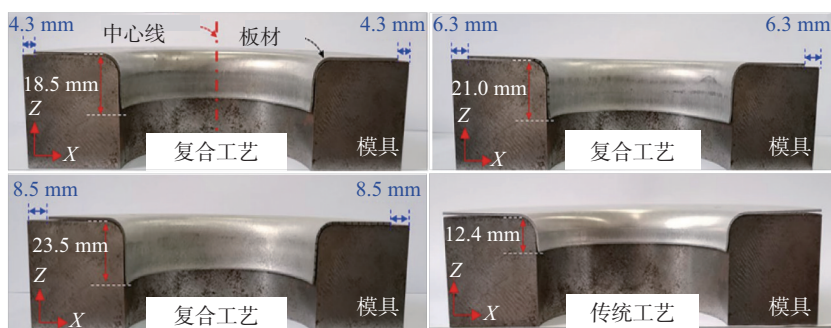
Fig.4 Schematic diagram of electromagnetic forming apparatus and springback control principle

化为塑性变形,而且产生的残余应力也很小,实现了精确制造和回弹控制。Cui等^[76]团队还提出了一种电磁冲压与磁力反向加载技术控制回弹(图4(c)),其试验装置如图4(d)所示,该技术无需改变传统冲压模具结构,仅通过调节电压即可实现对回弹角度的灵活控制,由于不涉及模具结构调整且能有效抑制回弹,不仅延长了模具使用寿命,也更具有商业化生产潜力。Woodward等^[77]使用电磁成形技术对预制的部件进行了校准,显著降低了回弹效果,结果表明,曲面部件的曲率分量回弹减少了87%,带法兰部件褶皱被消除,连接件形状得到妥善成形。目前,电磁成形技术已逐步发展为航空航天领域部分关键板件与管类零件制造的重要工艺手段。

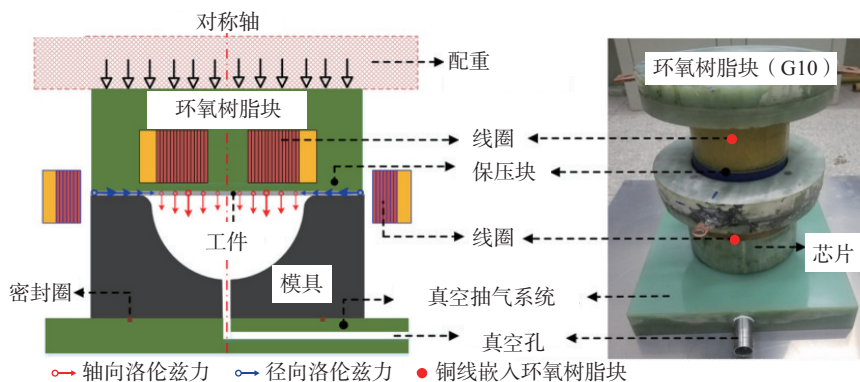
随着构件尺寸及几何形状愈发复杂,仅依靠单一的电磁场已经难以满足复杂构件的制造需求。基于此背景,传统成形技术与电磁成形技术相结合的复合成形技术应运而生。Yan等^[78]为提高法兰高度和成形精度,提出了一种复合材料成形方法,结合多向电磁法兰和冲头成形工艺,在相同的初始孔径条件下,复合成形工艺的成形高度比传统冲压提高了89.5%(图5(a))。Chen等^[79]提出了一种双线圈电磁成形方法,借助径向洛伦兹力实现深腔金属板件的成形,试验结果显示,双线圈电动势使深腔工件形成高成形精度,厚度分布更均匀,极大提升了构件的成形质量和成形精度(图5(b))。大尺寸变曲率薄壁椭球件在采用常规技术成形后,易出现失稳起皱、尺寸超差和装备复杂等问题。为解决上述问题,杜志浩等^[80]研发了一种多道次冲压与环形线圈渐进成形工艺,有效抑制了起皱,获得了表面光滑的椭球形零件(图5(c))。Kim等^[81]将电磁成形与液压成形工艺相结合,形成新兴的电磁液压成形(EMHF)技术。该技术

增设驱动片与流体传力结构,成形力经多层介质传递,因此坯料成形收敛时长由传统电磁成形(EMF)自由胀形工况下的0.5 ms延长至1.4 ms,可在更长时间内对工件施加更均匀的载荷,弥补了传统电磁成形技术的不足,实现成形工艺的改进。电磁成形与热成形、脉冲电流及多点模具成形等工艺的复合集成,是实现成形过程优势互补与载荷条件优化的重要发展方向。然而,多工艺耦合下的协同强化效应及其对构件成形极限、组织性能的调控机制仍有待深入揭示与系统阐明。

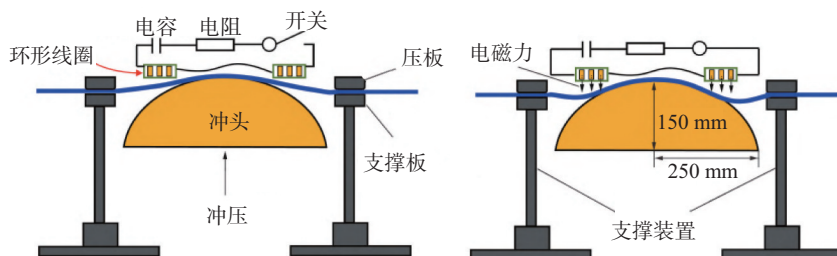
尽管电磁成形技术展现出诸多独特优势,其在工业化应用中仍面临若干关键问题:工艺参数与线圈结构设计高度依赖经验试错,缺乏系统的理论支撑与标准化设计体系;受洛伦兹力产生机制的固有约束,非导电材料无法直接成形,低导电材料的能量转换效率与成形质量难以保证;受线圈结构与放电能量的双重限制,难以实现复杂曲面、深腔特征及大尺寸构件的精密成形,而且生产多为单工件生产模式,效率低下,难以适配大规模工业化批量生产的要求。



(a) 电磁成形复合工艺与传统工艺构件成形结果对比^[78]



(b) 双线圈电磁成形示意图及试验装置^[79]



(c) 环形线圈渐进成形工艺原理图^[80]

图5 电磁成形工艺与试验装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of electromagnetic forming process and experimental apparatus

2.4 超声场辅助成形技术

超声场辅助成形是构件塑性成形领域另一重要技术,其核心机理是对成形过程施加频率、振幅及方向可控的超声振动,利用体积效应与表面效应协同作用降低材料流动应力,细化微观组织,从而有效提升难变形金属构件的成形质量与力学性能^[27,82]。该技术已在挤压、轧制、拉拔等典型塑性成形工艺中得到验证,尤其适用于钛合金、高温合金等难变形金属及金属基复合材料的成形,可实现大塑性变形下的组织均匀化与强韧性匹配,在航空航天轻量化承力构件、精密电子微构件等领域展现出巨大应用潜力^[30,33]。

为准确描述轻质薄壁构件在超声振动辅助成形中的变形行为,宋鹏飞等^[83]开展了超声振动法向激励单向拉伸试验(图6(a)),为极端应变速率成形技术在轻质薄壁构件成形制

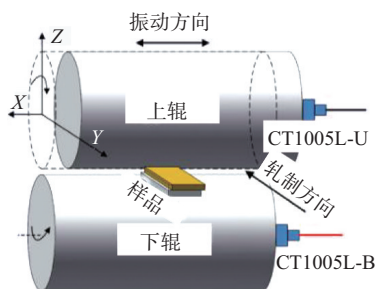
造中的应用(如超声振动薄壁圆管弯曲成形、薄板拉伸成形、薄板渐进成形等)提供了理论支撑。在超声场作用机理层面,钟斌等^[84]从超声的体积效应和表面效应两方面综述了超声振动辅助塑性成形本构模型的研究进展,为超声制造工艺进一步发展和应用提供了理论指导。在超声辅助塑性成形设备需求方面,雷玉兰^[85]设计开发了10 kN超声辅助塑性成形压力机,主要通过安装自行设计的多孔超声振动平台以实现超声辅助塑性成形过程(图6(b)),发现当超声输出功率为额定功率95%时,AZ31镁合金最大真实应变与静态相比降低了约5.3%,结果表明,该设备可满足超声辅助塑性成形需求,超声振动可有效改变镁合金的压缩断裂特性。

近年来,随着金属构件对精度和效率要求的提升,适配构件制造的超声装备体系正逐步向定制化、高精

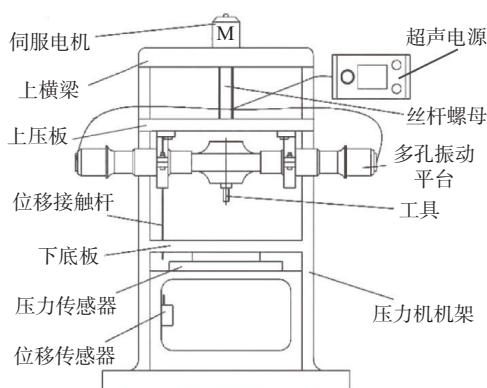
度、一体化方向发展,这类装备通常由超声发生器、换能器、变幅杆及成形装置组成^[26]。Tian等^[86]自主研发了超声辅助轧制设备,该设备主要由轧制装置、振动装置和振动控制装置组成(图6(c)),通过轧辊错位引入主动剪切应力,并通过振动、热量和力的综合作用制造具有优异界面粘结质量的Mg/Al复合板,解决了Mg/Al复合板轧制时界面结合不紧密、易分层难题,制造出高界面连接质量的Mg/Al复合板,为其他轻量化复合板的成形提供了新思路。在超声辅助塑性成形技术中,超声振动系统及其谐振设计理论和方法对成形件的质量有重要影响。郭昊等^[87]建立了超声能场激励下轧机辊系垂直振动模型,以及相应的非线性动力学方程,研究了谐振/共振特性与幅频设计等理论,并给出了谐振控制方法,为超声振动轧制问题的研究提供了理论支撑。Liu



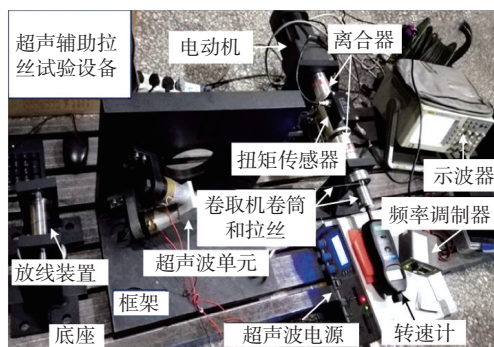
(a) 超声振动法向激励单向拉伸试验装置^[83]



(c) 超声轧制工艺示意图^[86]



(b) 超声塑性成形压力机示意图^[85]



(d) 超声拉丝的试验设备^[88]

图6 超声场辅助成形工艺与试验装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of ultrasonic field-assisted forming process and experimental apparatus

等^[88]为了克服室温下传统钛丝拉制工艺中的困难,开发了一套超声钛丝拉丝装置(图6(d)),在拉丝工具上叠加超声波振动,与传统的冷拔方法相比超声振动拉拔的拉拔力平均降低了5%,超声波振动有助于润滑剂状况的改善和金属软化,其制备的高精度钛丝应用于发动机零部件、航天器连接件等关键部件。

随着超声辅助成形技术及装备的深入研究,超声辅助成形技术已广泛应用于航空航天材料增量成形、微成形、冲压、挤压等塑性成形领域,突破了航空航天难变形合金成形瓶颈^[89]。在增量成形领域,基于超声波振动在塑性成形中的优势,超声波振动被引入单点增量成形工艺中,形成超声辅助单点增量成形技术,该技术通过对球头施加规律振动载荷,使球头周期性作用于金属板(图7(a)^[90]),可降低成形作用力,改善成形后的表面质量,有效解决复杂曲面钣金件成形难、精度低的问题。在微成形制造领域,翟继

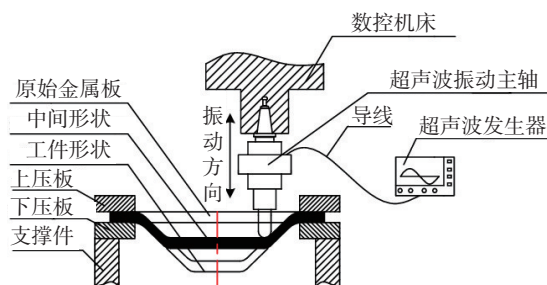
强等^[91]基于超声振动微成形系统(图7(b))进行了微圆柱压印,将超声场引入了微压印工艺中,扩大了超声振动在微成形领域的工程应用,为微构件高精度成形提供了技术参考^[92]。Lou等^[93]利用自行设计的超声波微挤压装置(图7(c))进行了铜的超声波微挤压试验,解决了纯铜微构件摩擦阻力大、晶粒粗大的问题,该技术在机电系统、航空、精密仪器仪表、生物医学等各个领域具有较好的应用前景。在冲压、挤压等塑性成形领域,曹秒艳等^[94]基于超声技术进行了铝合金冲裁研究(图7(d))和镁合金异形件的冲压成形试验,通过施加振幅为 $3.83\text{ }\mu\text{m}$ 的超声振动,发现间隙为 0.15 mm 时,6061铝合金成形力下降了 1.56 kN ,间隙为 0.1 mm 时成形力下降了 3.12 kN ;对于AZ31B镁合金板材,当振幅为 $5.6\text{ }\mu\text{m}$ 时成形力峰值下降约26%,振幅为 $7.7\text{ }\mu\text{m}$ 时成形力峰值下降约31.5%,且零件凸缘部分分布较为均匀,成形件表面光

滑,为复杂截面异形件成形提供了新的路径^[95]。

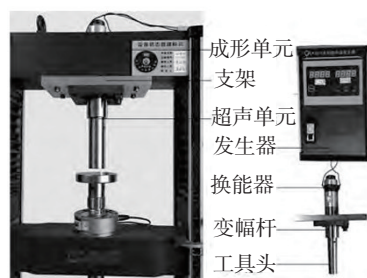
尽管超声场在辅助成形等方面展现出显著优势,但其在工业化应用中仍面临若干关键瓶颈:与电磁场类似,工艺参数设计高度依赖经验试错,超声振幅、频率等关键参数对成形结果的影响呈现强非线性特征;受超声能量衰减特性的固有约束,对高硬度、高脆性及大厚度材料的成形能力显著受限,不同材料对超声参数的敏感性差异显著,工艺适配难度大幅提升;复杂形状构件成形时超声能量分布不均匀,且振动能量难以高效可靠地传递至材料塑性变形区;大功率超声振动系统投资成本高,换能器、变幅杆等核心部件易发生疲劳失效,与传统成形装备集成难度大、定制化程度高,难以形成标准化规模化生产体系。

2.5 多能场复合成形技术

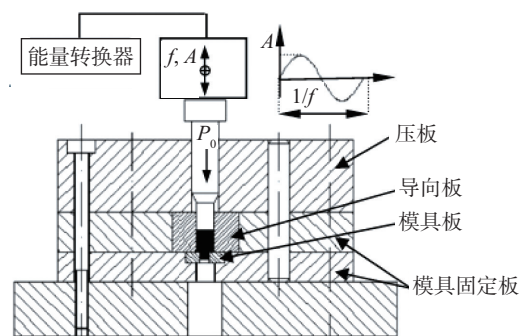
多能场复合成形技术通过不同能量场的参数精准匹配与协同控制,



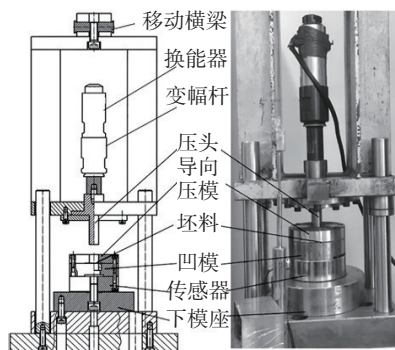
(a) 超声单点增量成形装置示意图^[90]



(b) 超声振动微成形系统^[91]



(c) 超声波微挤压成形装置示意图^[93]



(d) 超声振动辅助冲裁试验设备图^[94]

图7 超声场辅助增量及微成形工艺装置示意图

Fig.7 Schematic diagram of ultrasonic field-assisted incremental and micro forming process and apparatus

可在复杂构件关键区域实现增塑、降载、抑损等效果,为突破难变形材料在塑性成形中遇到的“高抗力、易缺陷、难控性”等瓶颈问题提供了新途径^[10,96]。宏观上,多能场可通过应力叠加、热软化等效应显著降低材料流变抗力,提升其塑性变形能力;微观上,其借助电子风、磁致塑性、声软化等机制,直接影响位错运动、增殖与湮灭过程,并能诱导相变、再结晶及晶粒取向优化^[33,64]。近年来,多能场复合成形技术已开展系列的试验与

模拟研究,在高性能金属构件制造领域具有广泛的应用前景。

随着空天技术的发展,高超声速飞行器、航空发动机及战略武器等装备正面临着日益苛刻的服役环境。这类装备所需的构件具有复杂曲面、薄壁、异形等几何特征,并普遍存在材料难变形、结构难成形、性能要求高等制造难题。在此背景下,多种复合能场工艺被提出,并得到了验证(图8)。Ye等^[36]通过电脉冲辅助超声波表面轧制工艺(EP-USRP)对商

业纯钛进行处理(图8(a)),在500 Hz的最优频率参数下,其摩擦系数和磨损损失更低,最大磨痕深度可减少到传统超声波表面轧制工艺的2/3。Li等^[97]借助电磁耦合场激光定向能量沉积,制备了镍基WC复合涂层,研究发现电磁耦合场重塑了熔池流动模式,有效抑制孔隙和裂纹,将缺陷密度降低至0.075%,研究结果表明,外部耦合场可以调控微观结构演变和磨损行为,为复合涂层性能量身定制提供了新的路径。除了电磁

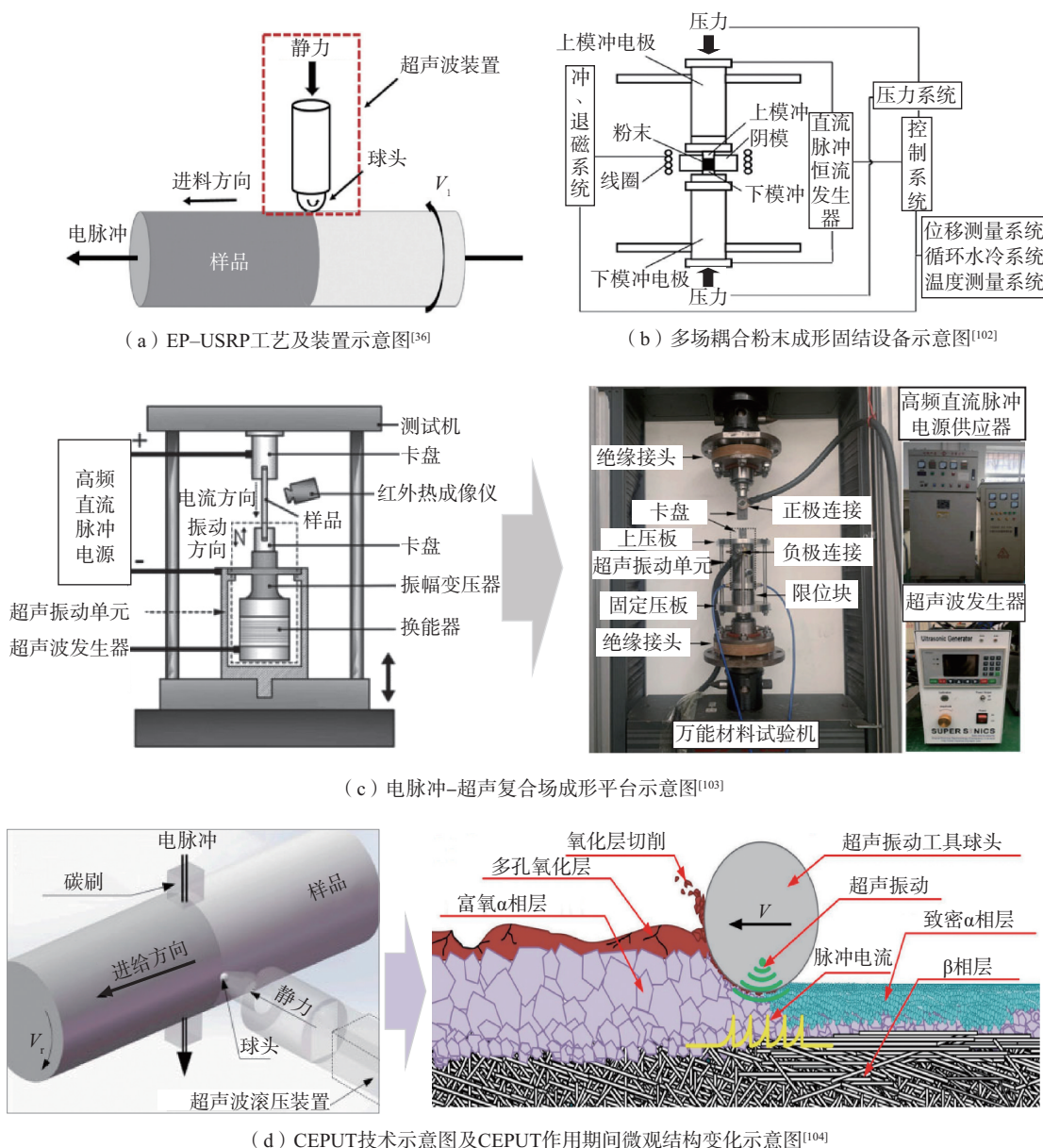


图8 多能场辅助成形工艺与试验装置示意图

Fig.8 Schematic diagram of multi-energy field-assisted forming process and experimental apparatus

场,电化学和超声场等都可以与激光进行复合,形成激光复合表面改性技术,该技术既可用于关键零部件表面性能(如耐磨性、耐蚀性、耐高温氧化性)的提升,又可用于金属材料的高效率、高质量、低成本的增材制造与再制造,已应用于能源、化工、船舶、航空航天等高端装备关键部件的制造与改性^[98]。

多能场复合成形技术所具备的高精度形性协同调控优势,为其在异种金属焊接领域的应用创造了条件。为实现铜/铝合金的异形连接,Liu等^[99]采用电流辅助超声波焊接(EUSW)技术对两者进行了焊接测试。采用EUSW焊接的铜铝接头,其极限拉伸强度和断裂能比超声波焊接(USW)技术焊接的铜铝接头高12%和21%,为异种金属的高性能连接提供了新的思路。陈玉华等^[100]采用热场辅助电磁脉冲焊接技术对Al/Cu异种金属进行了焊接,结果表明,在外场温度作用下,焊接接头的有效结合区增大,界面波形结构发生改变,进而有效提升了接头的力学性能,热场辅助电磁脉冲焊接技术能够实现Al/Cu异种金属的优质焊接。Chen等^[101]提出了一种基于磁场超高速摩擦搅拌焊接方法,在搅拌头作用位置施加磁场,细化了晶粒,使材料的抗拉强度达到了基材的81.4%,表明磁场超高速摩擦搅拌焊具有实现高质量焊接的潜力,有助于非磁性金属的塑化过程,并为能量搅拌摩擦焊接技术的发展提供了新颖思路。

随着多能场复合成形技术的深入研究,传统成形设备难以实现构件形性一体化调控,对专用多能场成形装备的需求日益迫切。多能场复合成形设备通过电、电磁、超声等特种能场的精准施加与协同耦合,可显著提升难成形复杂构件的成形极限与服役性能。为了深入研究电场、磁场、温度场和应力场等多物理场耦合

作用下的粉末成形与固结机制,探索高精度和低成本的粉末成形固结技术,华中科技大学的李元元院士团队^[102]研发了多场耦合下粉末成形固结设备,该设备由逆变电源、磁场发生装置、液压系统、模具及控制系统等部分组成(图8(b)),该装置揭示了温度场与应力场耦合作用下的粉末致密化机理,从而系统确定并优化了铁基、WC基等粉末体系的多场耦合烧结工艺,为粉末精密成形与集成制造提供了新的技术途径。近年来,以电脉冲和超声波振动复合的特殊能量场逐渐被应用于金属板成形工艺。山东大学的Zhang等^[103]自主搭建了电脉冲-超声复合能场成形平台(图8(c)),其超声振动单元主要包括换能器、锥头和夹具,通过锥头法兰与支撑壳连接,整体经绝缘接头安装于MTS试验机上,发现超声振动使镁合金屈服强度比常规拉伸降低8.2%,在脉冲电流作用下屈服强度比常规拉伸降低8.2%,而在两者的共同作用下,屈服强度比常规拉伸降低16.5%,结果表明,超声场与电场的耦合作用可有效降低镁合金的宏观变形抗力,且表现出显著的协同增强效果。

然而,当前的多能场辅助成形设备仅简单地将能场施加装置与传统热力成形设备进行功能叠加,未能实现特种能场与热力场的精确匹配与协同调控,导致此类设备大多仅适用于易成形材料或简单结构件的制造,难以满足耐高温、难成形构件在制备方面的复杂需求。Ji等^[104]通过电脉冲和超声处理(CEPUT)耦合技术(图8(d)),去除了TC4钛合金表面的松散氧化层,同时在表面生成了厚度为11 μm 的致密 α 相层,提高了钛合金的耐腐蚀性,然而该技术通过将脉冲电源和超声发生器安装在车床上来实现,只是对传统成形装备进行了适应性改造以实现多能场的复合施加,未能深入推进多能场成形工艺

与装备的协同设计与系统开发。总体而言,多能场耦合成形技术为耐高温难变形关键金属构件的一体化制造开辟了新路径,然而目前针对此类材料及构件级别的相关研究较少。此外,当前的多能场辅助塑性成形设备仍以试验测试装置为主,构件级别的大型成形装备鲜有报道,且多为现有装备的适应性改造,缺乏专用的多能场耦合成形装备。

3 结论与展望

能场成形技术有效突破了传统热力成形技术在难变形材料成形中的性能瓶颈,已成为航空航天、运载火箭等领域高端装备关键难变形构件制造的核心技术之一。然而,单一特种能场的固有物理特性决定了其在能量时空分布上存在难以克服的局限性,无法满足复杂构件全流程、多维度的成形需求。这些固有物性的不足导致单一能场难以同时兼顾成形精度、材料性能与生产效率的协同优化。多能场成形技术为解决上述单一特种能场的固有不足提供了可行路径,但不同能量场之间的强非线性耦合机理尚未完全阐明,已成为制约该技术发展的核心科学瓶颈。同时,多能场成形的参数维度呈指数级增长,传统试错法与单因素优化方法已无法满足工艺设计需求,且不同材料、不同结构构件的最优参数组合差异显著,缺乏通用的参数设计准则与工艺规范。此外,多能场耦合作用下的微观组织演化规律尚不明确,难以实现构件组织性能的精准调控。

装备层面的工程化瓶颈也制约了能场成形技术的规模化应用。现有能场装备大多是传统热力成形设备与能场施加装置的简单叠加,存在集成度低、控制精度差、可靠性不足等问题。同时,现有装备的能场施加方式单一且固定,无法根据构件的复杂几何特征实现能量的时空

精准调控,难以满足复杂曲面构件不同区域对能场强度与作用时间的差异化需求,易导致局部区域成形不足或过成形。此外,现有装备普遍缺乏多物理场在线监测与闭环控制系统,无法实时获取成形过程中工件的温度、应力、微观组织等关键参数,而且不同能场装置之间的电磁干扰、振动干扰等问题也未得到有效解决,严重影响装备的长期运行可靠性。

未来,能场成形技术需以典型难变形复杂构件的制造需求为导向,从基础理论、工艺创新、装备研发3个维度出发,实现从实验室研究向工程化应用的跨越。在基础理论方面,需构建“原子-微纳-宏观”跨尺度多物理场耦合理论体系,利用多尺度数值模拟方法揭示多能场耦合下的位错运动与缺陷演化机制,基于晶体塑性理论建立多能场协同效应的统一本构模型,为工艺设计与优化提供坚实的理论支撑;在工艺创新方面,需发展适配不同材料与构件结构特点的多能场协同成形新工艺,充分发挥各能场的优势互补作用,支撑关键构件的一体化制造;在装备研发方面,需推进工艺与装备的一体化设计,研发大型专用多能场复合成形装备,集成大功率能场发生装置与智能控制系统,实现能场的时空精准调控与成形过程的闭环反馈。同时,融合数字孪生与机器学习技术,构建多能场成形工艺智能优化平台,实现工艺参数的自动匹配与构件质量的精准预测,推动该技术在高端装备制造领域的规模化应用。

参考文献

- [1] 徐政, 占智勇. “十五五”时期系统谋划未来产业的机遇、困境和着力点[J]. 统一战线学研究, 2026, 10(2): 128–139.
- [2] 江耘, 陈曼姣, 蒋建东. 锚定产业需求, 破解高端装备技术瓶颈[N]. 科技日报, 2026–03–17.
- [3] 张大伟. 大型模锻件低能耗省力整体成形研究现状、挑战与展望[J]. 精密成形工程, 2025, 17(4): 10–34.
- [4] 王哲, 丰飞, 郭峰. 大尺度复杂构件群体机器人协同并行制造系统集成的关键技术[J]. 航空制造技术, 2025, 68(4): 53–66.
- [5] 陈璇, 揭庆祥, 王抒, 等. 复杂薄壁构件电磁成形制造技术的发展与展望[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(9): 2–17.
- [6] 单德彬. 复杂微型构件特种能场辅助微成形研究进展[J]. 精密成形工程, 2024, 16(7): 23–47.
- [7] 荣沁, 陈源源, 黄大中, 等. 旋转超声复合多能场加工机理研究与试验[J]. 机械工程学报, 2025, 61(1): 335–344.
- [8] 吴淑晶, 王大中, 谷顾全, 等. 多种能场高性能加工复杂曲面关键技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2024, 60(9): 152–167.
- [9] 范滔, 姚倡锋, 谭靓, 等. γ -TiAl合金的加工特性及能场辅助技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2025, 36(4): 636–654.
- [10] 王新宇, 霍元明, 王志军, 等. 不同能场对金属材料塑性诱导提升的技术研究现状[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(3): 10–22.
- [11] FAN W W, WANG T, HOU J X, et al. Pulsed current-assisted twelve-roll precision rolling deformation of SUS304 ultra-thin strips with exceptional mechanical properties[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6(4): 045101.
- [12] 夏琴香, 陈灿, 肖刚锋, 等. 难变形金属电-热-力耦合作用下的电致塑性效应研究现状[J]. 锻压技术, 2021, 46(9): 124–131.
- [13] CUI Q H, LIU X F, WANG W J, et al. Microstructure and forming mechanism of metals subjected to ultrasonic vibration plastic forming: A mini review[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(6): 1322–1332.
- [14] YIN F, MA S T, HU S, et al. Understanding the microstructure evolution and mechanical behavior of titanium alloy during five-year plan period: Opportunities, challenges and key focus areas[J]. Journal of United Front Science, 2026, 10(2): 128–139.
- [15] JIANG Yun, CHEN Manjiao, JIANG Jiandong. Anchoring industrial demands to break through technical bottlenecks of high-end equipment[N]. Science and Technology Daily, 2026–03–17.
- [16] ZHANG Dawei. Current status, challenges and prospects of integral forming with low energy consumption and less-force for heavy closed-die forging[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(4): 10–34.
- [17] WANG Zhe, FENG Fei, GUO Feng. Key technologies of swarm robotic cooperative parallel manufacturing system integration for large scale complex components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(4): 53–66.
- [18] CHEN Xuan, JIE Qingxiang, WANG Shu, et al. Development and prospect of electromagnetic forming manufacturing technology for complex thin-wall components[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32(9): 2–17.
- [19] SHAN Debin. Research progress on energy field assisted micro-forming of complex micro parts[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(7): 23–47.
- [20] RONG Qin, CHEN Yuanyuan, HUANG Dazhong, et al. Study and experiment on mechanism of rotary ultrasonic combined multi-energy field machining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(1): 335–344.
- [21] WU Shujing, WANG Dazhong, GU Guquan, et al. High-performance machining of complex curved surfaces in multi-energy fields: Key technologies and advancements[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(9): 152–167.
- [22] FAN Tao, YAO Changfeng, TAN Liang, et al. Research progresses for machining characteristics and field-assisted techniques of γ -TiAl alloys[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(4): 636–654.
- [23] WANG Xinyu, HUO Yuanming, WANG Zhijun, et al. Current research status of techniques for enhancing metal material plasticity induced by different energy fields[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32(3): 10–22.
- [24] XIA Qinxian, CHEN Can, XIAO Gangfeng, et al. Current status of research on electroplasticity effect for difficult-to-deform metals under electro-thermo-mechanical coupling[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(9): 124–131.
- [25] CUI Q H, LIU X F, WANG W J, et al. Microstructure and forming mechanism of metals subjected to ultrasonic vibration plastic forming: A mini review[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(6): 1322–1332.
- [26] YIN F, MA S T, HU S, et al. Understanding the microstructure evolution and mechanical behavior of titanium alloy during

electrically assisted plastic deformation process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 869: 144815.

[15] ZHANG D W, FAN X G. Review on intermittent local loading forming of large-size complicated component: Deformation characteristics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(5): 1427–1448.

[16] 何佳珏, 熊威. 先进复材在航空飞行器上的应用及加工成形技术探究[J]. 粘接, 2025, 52(6): 92–96.

HE Jiajue, XIONG Wei. Application and processing forming technology of advanced composite materials in aviation aircraft[J]. Adhesion, 2025, 52(6): 92–96.

[17] 聂杨峻峰. VW124A 合金大型变壁厚复杂构件成形及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2025.

NIE Yangjunfeng. Study on forming and properties of large complex components with variable wall thickness of VW124A alloy[D]. Taiyuan: North University of China, 2025.

[18] 王磊, 王尧, 李晓峰, 等. 我国钛及钛合金塑性加工技术研究进展与应用现状[J]. 钛工业进展, 2025, 42(5): 43–48.

WANG Lei, WANG Yao, LI Xiaofeng, et al. Research progress and application status of plastic processing technologies of titanium and titanium alloys in China[J]. Titanium Industry Progress, 2025, 42(5): 43–48.

[19] 刘璟辰, 孙朝阳, 钱凌云, 等. 旋转挤压成形技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2025, 17(4): 35–51.

LIU Jingchen, SUN Zhaoyang, QIAN Lingyun, et al. Research progress of rotary extrusion forming technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(4): 35–51.

[20] 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): 77–97.

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): 77–97.

[21] 邢胤天, 叶惠思, 杜雪. 能场辅助超精密金刚石切削技术的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2026, 55(2): 1–19.

XING Yintian, YE Huisi, DU Xue.

Research progress on energy field-assisted ultra-precision diamond cutting technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2026, 55(2): 1–19.

[22] 孟宪凯, 林珂, 韦帅, 等. 能场辅助激光冲击强化在航空构件上的应用[J]. 航空制造技术, 2026, 69(4): 14–34.

MENG Xiankai, LIN Ke, WEI Shuai, et al. Applications of energy field assisted laser shock peening in aerospace components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(4): 14–34.

[23] LIU J H, JIA D Z, FU Y, et al. Electroplasticity effects: From mechanism to application[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 131(5): 3267–3286.

[24] ZHU Z H, ZHOU L, HE F, et al. Effect of electropulsing on austenite to ferrite transformation in low-carbon steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(4): 437–444.

[25] LI H, PENG L F, MENG B, et al. Energy field assisted metal forming: Current status, challenges and prospects[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 192: 104075.

[26] SHAO G D, LI H W, ZHAN M. A review on ultrasonic-assisted forming: Mechanism, model, and process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34: 99.

[27] KUMAR S, WU C S, PADHY G K, et al. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26: 295–322.

[28] PRABHAKAR A, VERMA G C, KRISHNASAMY H, et al. Dislocation density based constitutive model for ultrasonic assisted deformation[J]. Mechanics Research Communications, 2017, 85: 76–80.

[29] LIAO J, ZHANG L X, XIANG H L, et al. Mechanical behavior and microstructure evolution of AZ31 magnesium alloy sheet in an ultrasonic vibration-assisted hot tensile test[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 895: 162575.

[30] 韩光超, 胡济涛, 万炜强, 等. 超声振动辅助塑性成形及形性预测研究进展[J]. 精密成形工程, 2023, 15(7): 48–62.

HAN Guangchao, HU Jitao, WAN Weiqiang, et al. Advances in ultrasonic vibration-assisted plastic forming and prediction of formability[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(7): 48–62.

[31] HU J, SHIMIZU T, YANG M. Investigation on ultrasonic volume effects: Stress superposition, acoustic softening and dynamic impact[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 48: 240–248.

[32] 张洪瑞, 詹梅, 郑泽邦, 等. 航天大型薄壁回转曲面构件成形制造技术的发展与挑战[J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 166–185.

ZHANG Hongrui, ZHAN Mei, ZHENG Zebang, et al. Development and challenge of forming manufacturing technologies for aerospace large-scale thin-wall axisymmetric curved-surface components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(20): 166–185.

[33] ZHANG Z Y, ZHOU K, SHEN S X, et al. A review on research and application of energy field-assisted in the manufacturing process of aerospace parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 139(7): 3257–3289.

[34] ZHAO R, ZHANG D X, WAN M. A review of strengthening mechanisms and applications of the multifield-coupled manufacturing process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 320: 118128.

[35] LIU J Y, WANG Z H, DUAN Z J, et al. Multi-energy field coupling assisted micro-milling of pure iron[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2026, 157: 1224–1232.

[36] YE Y D, KURE-CHU S Z, SUN Z Y, et al. Nanocrystallization and enhanced surface mechanical properties of commercial pure titanium by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling[J]. Materials & Design, 2018, 149: 214–227.

[37] YE Y X, TANG C, ZHANG Y, et al. Magnetic-assisted ultrasonic nanocrystal surface modification induced microstructures of titanium alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 485: 130892.

[38] HE G Z, QIAN C K, CAI Z P, et al. Magnetic field-assisted laser shock peening of

Ti₆Al₄V alloy[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(10): 2370034.

[39] 苏海军, 尉凯晨, 郭伟, 等. 激光快速成形技术新进展及其在高性能材料加工中的应用[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(6): 1567–1574.

SU Haijun, WEI Kaichen, GUO Wei, et al. New development of laser rapid forming and its application in high performance materials processing[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(6): 1567–1574.

[40] SALAH E S, MOSTAFA R, TAWFIK M M, et al. Laser forming technology: A comprehensive review of mechanisms, process optimization, and industrial applications[J]. *International Journal of Material Forming*, 2025, 18(4): 82.

[41] 赵新海, 司志渊, 李梦平, 等. 激光辅助渐进成形工艺数值模拟分析[J]. *装备机械*, 2024(2): 92–96.

ZHAO Xinhai, SI Zhiyuan, LI Mengping, et al. Numerical simulation analysis of laser-assisted progressive forming process[J]. *The Magazine on Equipment Machinery*, 2024(2): 92–96.

[42] HUANG B H, XU L J, TANG C, et al. Magnetic-assisted laser shock peening of 7075–T6 aluminum alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111923.

[43] 汤洋, 廖一凡, 李斯魏, 等. TC4钛合金叶片双面同时激光斜冲击强化研究[J]. *机械工程与自动化*, 2024, 53(3): 103–104, 107.

TANG Yang, LIAO Yifan, LI Siwei, et al. Study of double-sided simultaneous laser oblique shock peening strengthening of TC4 titanium alloy blades[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2024, 53(3): 103–104, 107.

[44] 张鹏, 季忠, 刘国强. 板料激光弯曲成形技术的研究现状及展望[J]. *山东机械*, 2004, 40(5): 13–16.

ZHANG Peng, JI Zhong, LIU Guoqiang. Status and prospect of laser forming technology of sheet metal[J]. *Shandong Machinery*, 2004, 40(5): 13–16.

[45] 田欣宇. CrMnFeCoNi高熵合金薄板纳秒脉冲激光弯曲成形特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.

TIAN Xinyu. Investigation on bending

characteristics of CrMnFeCoNi high-entropy alloy sheets during nanosecond pulsed laser forming[D]. Changchun: Jilin University, 2025.

[46] 严长, 贺晓, 刘会霞, 等. 6061铝合金箔板激光冲击温热微弯曲成形试验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2026, 63(9): 0914002.

YAN Zhang, HE Xiao, LIU Huixia, et al. Experimental study on laser shock warm micro-bending forming of 6061 aluminum alloy foil plates[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2026, 63(9): 0914002.

[47] 姜森宝, 王宇盛, 陈瑶, 等. Ti₂AlNb钛合金轧板激光弯曲工艺及微观组织[J]. *锻压技术*, 2024, 49(5): 61–66.

JIANG Senbao, WANG Yusheng, CHEN Yao, et al. Laser bending process and microstructure of Ti₂AlNb titanium alloy rolled plate[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2024, 49(5): 61–66.

[48] 孙涛. 玻璃纤维增强铝合金层板激光弯曲成形试验及模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.

SUN Tao. Experiment and simulation on laser bending forming of glass fiber reinforced aluminum alloy laminate[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.

[49] SAGISAKA Y, YAMASHITA K, YANAGIHARA W, et al. Microparts processing using laser cutting and ultra-short-pulse laser peen forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 219: 230–236.

[50] LIU H X, SHEN Z B, WANG X, et al. Numerical simulation and experimentation of a novel micro scale laser high speed punching[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(5): 491–494.

[51] 陈秀玉. 激光冲击强化9Cr18钢及协同制备表面微坑研究[J]. *表面技术*, 2024, 53(11): 193–204.

CHEN Xiuyu. Laser shock processing of 9Cr18 steel and synergistic preparation of surface micro-pits[J]. *Surface Technology*, 2024, 53(11): 193–204.

[52] 姚建华. 激光复合制造技术研究现状及展望[J]. *电加工与模具*, 2017(S1): 4–11.

YAO Jianhua. Research progress and future prospect of laser hybrid manufacturing technology[J]. *Electromachining & Mould*,

2017(S1): 4–11.

[53] 冉津宇. 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. 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.

[54] 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.

[55] ZHANG H, REN Z C, LIU J, et al. Microstructure evolution and electroplasticity in Ti64 subjected to electropulsing-assisted laser shock peening[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 802: 573–582.

[56] ZHANG S W, OUYANG W T, JIANG R, et al. Mechanical properties and strengthening mechanisms of Ti–6Al–4V treated by electro-pulsing assisted laser shock peening[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 326: 118316.

[57] BIESUZ M, SAUNDERS T, KE D Y, et al. A review of electromagnetic processing of materials (EPM): Heating, sintering, joining and forming[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 69: 239–272.

[58] MA Y R, YANG H J, BEN D D, et al. Anisotropic electroplastic effects on the mechanical properties of a nano-lamellar austenitic stainless steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2021, 34(4): 534–542.

[59] 苑城玮, 陈树君, 蒋凡, 等. 电阻加热金属丝材塑性变形电–热–机械响应分析[J]. *焊接学报*, 2020, 41(12): 10–16.

YUAN Chengwei, CHEN Shujun, JIANG Fan, et al. Electro–thermal–mechanical response analysis of plastic deformation of resistance heating metal wire[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(12): 10–16.

[60] MOLOTSKII M, FLEUROV V. Magnetic effects in electroplasticity of metals[J]. *Physical Review B*, 1995, 52(22): 15829–15834.

- [61] BUMGARDNER C H, CROOM B P, SONG N N, et al. Low energy electroplasticity in aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 798: 140235.
- [62] XIANG S Q, ZHANG X F. Dislocation structure evolution under electroplastic effect[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 761: 138026.
- [63] ZHOU C, ZHAN L H, LI H, et al. Dislocation reconfiguration during creep deformation of an Al - Cu - Li alloy via electropulsing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 130: 27-34.
- [64] 姜洋, 李正宁, 王伟, 等. 金属材料电塑性辅助加工研究进展[J]. 热加工工艺, 2025, 54(18): 1-8, 20.
- JIANG Yang, LI Zhengning, WANG Wei, et al. Research progress in electroplastic assisted machining of metallic materials[J]. Hot Working Technology, 2025, 54(18): 1-8, 20.
- [65] 韩昊霖, 张宝, 李细锋, 等. 脉冲电流对超薄 316L 板微流道成形精度的影响[J]. 精密成形工程, 2024, 16(6): 100-106.
- HAN Haolin, ZHANG Bao, LI Xifeng, et al. Effect of pulse current on the forming accuracy of microchannels in ultra-thin 316L plates[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(6): 100-106.
- [66] 孟宝. 电场辅助镁铝合金超塑变形行为及其在微型热管成形中的应用[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(6): 142-150.
- MENG Bao. Electric field assisted superplastic deformation behavior of Mg - Li alloy and its application in micro heat pipe forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(6): 142-150.
- [67] 孟宝, 潘丰, 杜默, 等. 阵列微流道电场辅助辊压成形技术研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 231-241.
- MENG Bao, PAN Feng, DU Mo, et al. Research on arrayed micro-channel electric field assisted roll forming technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(20): 231-241.
- [68] 范婉婉. 304 不锈钢极薄带轧制变形区细观力学行为研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- FAN Wanwan. Study on micromechanical behavior of 304 ultra-thin stainless steel strip in rolling deformation zone[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [69] 邓锋, 徐雪峰, 曾祥, 等. 某型飞机钛合金钣金件电辅助冲压成形工艺[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(12): 58-69.
- DENG Feng, XU Xuefeng, ZENG Xiang, et al. Electrically assisted stamping process of titanium alloy sheet metal parts for a certain type of aircraft[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32(12): 58-69.
- [70] 李超, 张凯锋, 蒋少松. Ti-6Al-4V 合金双半球结构脉冲电流辅助超塑成形[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(8): 1400-1404.
- LI Chao, ZHANG Kaifeng, JIANG Shaosong. Pulse current auxiliary superplastic forming of Ti - 6Al - 4V alloy double hemisphere structure[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(8): 1400-1404.
- [71] JIANG B, YANG W B, ZHANG Z Y, et al. Numerical simulation and experiment of electrically-assisted incremental forming of thin TC4 titanium alloy sheet[J]. Materials, 2020, 13(6): 1335.
- [72] 夏琴香, 陈灿, 周昊阳, 等. 难变形金属复杂构件电流辅助流动-分形旋压成形机理研究[J]. 机电工程技术, 2025, 54(1): 1-8.
- XIA Qinxian, CHEN Can, ZHOU Haoyang, et al. Research on mechanism of current-assisted flow-splitting spinning for the complex component made of difficult-to-deform metal[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2025, 54(1): 1-8.
- [73] ZHANG C X, XUE H, XING S P, et al. Effect of electric field-assisted heat treatment on microstructure and phase transformation of ZrTiAlV alloy[J]. Metals and Materials International, 2023, 29(8): 2137-2150.
- [74] SHARMA Y P, SIDHU B S, KANT R, et al. Enhancing the bend angle and mechanical properties of mild steel using fiber laser bending technique under the influence of electromagnetic force[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 168: 107631.
- [75] CUI X H, DU Z H, XIAO A, et al. Electromagnetic partitioning forming and springback control in the fabrication of curved parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116889.
- [76] CUI X H, ZHANG Z W, DU Z H, et al. Inverse bending and springback-control using magnetic pulse forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 275: 116374.
- [77] WOODWARD S, WEDDELING C, DAEHN G, et al. Production of low-volume aviation components using disposable electromagnetic actuators[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(5): 886-895.
- [78] YAN Z Q, CUI X H, XIAO A, et al. Improvement of circular hole flanging height using multi-directional electromagnetic flanging [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(3): 1281-1292.
- [79] CHEN M, LAI Z P, CAO Q L, et al. Improvement on formability and forming accuracy in electromagnetic forming of deep-cavity sheet metal part using a dual-coil system[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 209-221.
- [80] 杜志浩, 韩栋, 张旖诺, 等. 多道次冲压与电磁渐进成形复合工艺下薄壁椭球件塑性变形机制[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(4): 243-253.
- DU Zhihao, HAN Dong, ZHANG Yinuo, et al. Plastic deformation mechanism of thin-walled ellipsoidal parts under multi-pass stamping and electromagnetic incremental forming composite process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(4): 243-253.
- [81] KIM Y B, KIM J. Numerical study on electromagnetic hydraulic forming process to overcome limitations of electromagnetic forming process[J]. Materials, 2024, 17(7): 1586.
- [82] XU Z C, YANG H L, YANG W J, et al. Recent progress and development of vibration-assisted metal forming process[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 1090-1112.
- [83] 宋鹏飞, 曹秒艳, 付敏, 等. 超声振动软化 Johnson-Cook 模型建立及薄管卷边实验验证[J]. 中国机械工程, 2024, 35(12): 2106-2113, 2121.

SONG Pengfei, CAO Miaoyan, FU Min, et al. Ultrasonic vibration softening Johnson-Cook modeling and validation of thin tube curling experiments[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(12): 2106-2113, 2121.

[84] 钟斌, 王元龙, 张传伟, 等. 超声振动塑性机理及本构建模研究进展[J]. 精密成形工程, 2025, 17(1): 164-182.

ZHONG Bin, WANG Yuanlong, ZHANG Chuanwei, et al. Research advances in plastic mechanism and constitutive modelling of ultrasonic vibration[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(1): 164-182.

[85] 雷玉兰. 10 kN 超声辅助塑性成形压力机设计与试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(8): 1622-1629.

LEI Yulan. Design of 10 kN ultrasonic-assisted plastic forming press machine and experiment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(8): 1622-1629.

[86] TIAN S J, LIU X F, WANG W J, et al. Mechanisms of microstructure formation and strength-ductility enhancement in Mg/Al composites via mechanical-ultrasonic vibration assisted rolling[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2026, 36(8): 2264-2280.

[87] 郭昊, 徐慧东, 王涛, 等. 超声能场激励下轧机辊系垂直振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(11): 188-195, 202.

GUO Hao, XU Huidong, WANG Tao, et al. Vertical vibration characteristics of rolling mill roller system under excitation of ultrasonic energy field[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(11): 188-195, 202.

[88] LIU S, SHAN X B, GUO K, et al. Experimental study on titanium wire drawing with ultrasonic vibration[J]. Ultrasonics, 2018, 83: 60-67.

[89] GRIMM T, MEARS L. Heat treatment of AA7075 by electropulsing and DC current application[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2023, 7(2): 73-77.

[90] LI P Y, HE J, LIU Q, et al. Evaluation of forming forces in ultrasonic incremental sheet metal forming[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 63: 132-139.

[91] 翟继强, 管延锦, 陈凤娇, 等. 超声振动辅助微压印成形及其作用机制[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(6): 187-193.

ZHAI Jiqiang, GUAN Yanjin, CHEN Fengjiao, et al. Ultrasonic vibration assisted micro-coining and its mechanism[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(6): 187-193.

[92] 翟继强. 超声振动辅助微成形中的超声作用机制及其对材料变形行为的影响研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.

ZHAI Jiqiang. Study on ultrasonic action mechanism and its influence on material deformation behavior in ultrasonic vibration-assisted micro-forming[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

[93] LOU Y, HE J S, CHEN H, et al. Effects of vibration amplitude and relative grain size on the rheological behavior of copper during ultrasonic-assisted microextrusion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5): 2421-2433.

[94] 曹秒艳, 田少杰, 胡晗, 等. 超声振动辅助铝合金板冲裁研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(3): 1-9.

CAO Miaoyan, TIAN Shaojie, HU Han, et al. Research on ultrasonic vibration assisted blanking of aluminum alloy sheet[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(3): 1-9.

[95] 曹秒艳, 房凯旋, 高明欣, 等. 基于超声振动的镁合金双锥件颗粒介质成形工艺[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(4): 726-732.

CAO Miaoyan, FANG Kaixuan, GAO Mingxin, et al. Granular medium forming technology of magnesium alloy biconical parts based on ultrasonic vibration[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(4): 726-732.

[96] 王在铎, 王惠, 丁楠, 等. 高超声速飞行器技术研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(11): 59-67.

WANG Zaiduo, WANG Hui, DING Nan, et al. Research on the development of hypersonic vehicle technology[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(11): 59-67.

[97] LI W Y, LIU W W, LIU H Q, et al. Electro-magnetic coupled field-assisted laser-directed energy of Ni-based WC composite

coatings: Defect suppression, microstructural evolution, and tribological behavior[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2026, 160: 389-412.

[98] 姚建华, 张群莉, 李波, 等. 多能场激光复合表面改性技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.

YAO Jianhua, ZHANG Qunli, LI Bo, et al. Multi-energy field laser composite surface modification technology and its application [M]. Beijing: China Machine Press, 2021.

[99] LIU J, CAO B. Microstructure characteristics and mechanical properties of the Cu/Al dissimilar joints by electric current assisted ultrasonic welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117239.

[100] 陈玉华, 吴鸿燕, 周春培, 等. 热场辅助电磁脉冲焊接 Al/Cu 异种金属接头组织性能研究[J]. 电焊机, 2023, 53(8): 16-21.

CHEN Yuhua, WU Hongyan, ZHOU Chunpei, et al. Study on microstructure and properties of Al/Cu joints fabricated by heat-assisted electromagnetic pulse welding[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(8): 16-21.

[101] CHEN X Y, CHEN S J, LIU Z H, et al. Magnetic field-assisted ultra-high-speed friction stir welding[J]. Materials Letters, 2023, 331: 133447.

[102] 李元元, 李小明. 多场耦合下的粉末成形固结理论及关键技术[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(10): 14-19.

LI Yuanyuan, LI Xiaoqiang. Theory and key technology of powder forming and consolidation in multiple coupled fields[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35(10): 14-19.

[103] ZHANG H R, CHU X R, LIU C X, et al. Deformation mechanisms of AZ31 Mg alloy sheet assisted by electrical pulse-ultrasonic composite energy field[J]. Materials & Design, 2024, 247: 113437.

[104] JI R J, WANG H Y, WANG B K. Removing loose oxide layer and producing dense α -phase layer simultaneously to improve corrosion resistance of Ti-6Al-4V titanium alloy by coupling electrical pulse and ultrasonic treatment[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 384: 125329.

Review of Energy-Field Applications for Metal Component Plastic Forming

WANG Bin¹, MEN Xilin¹, TIAN Miao¹, ZHANG Hongbin², NIU Xiaomiao¹,

ZHANG Changjiang³, WANG Tao¹

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao 266590, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

[ABSTRACT] The advancement of high-end equipment in aviation, aerospace, and marine engineering toward high precision and superior performance has driven an increasingly urgent demand for critical metal components. Development requirements for large-size dimension, high precision and enhanced reliability of such equipment impose stringent requirements on the manufacturing technologies for high performance metal components. Conventional thermo-mechanical forming processes are restricted by inherent bottlenecks, including high forming loads, difficulty in microstructure regulation and low forming limits, which render them inadequate to satisfy the manufacturing requirements of advanced metal components. Energy field-assisted forming technology introduces single or coupled energy fields including lasers, electric currents, electromagnetic fields, and ultrasonic fields. It exploits the synergistic thermal and athermal effects generated by energy field-material interactions to precisely control material deformation behavior, serving as a vital approach to breaking through the capability limitations of conventional thermo-mechanical manufacturing. This paper systematically reviews the state-of-the-art applications of single-energy field and multi-energy field composite forming technologies in metal plastic forming, analyzes the key bottlenecks in current technologies for engineering application, and prospects the future development trends of energy field-assisted manufacturing technology. This paper aims to provide a theoretical basis and technical references for the development and production of core components for high-end equipment.

Keywords: Energy field-assisted forming; Special energy field; Metal components; Shape and performance control; Multi-energy field coupling

(责编 七七)

