

综述

## 金属板料数控渐进成形工艺的研究现状

鲁世红, 付婧颐, 丁腾飞, 陈 晟

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 数控渐进成形工艺作为无模成形技术之一, 在钣金零件制造领域受到了广泛的关注与研究。总结了近年来金属板料数控渐进成形工艺的研究进展, 综述了有关新型板料数控渐进成形工艺方面的研究现状, 并全面地概述了板料数控渐进成形加工质量控制、成形工艺优化以及数控渐进成形辅助装置研发等方面的研究成果。现有研究和应用表明, 不断深化开发和研究新型板料数控渐进成形技术并提高渐进成形零件的尺寸精度、形状精度是热点研究内容, 而以全面优化工艺参数为手段, 获得更高的加工质量是该技术研究的核心目标, 同时一些新型板料数控渐进成形加工工艺的变形机制及成形件的微观组织变化与成形过程之间的联系尚有待于揭示和研究。

**关键词:** 渐进成形; 金属板料; 成形工艺优化; 成形精度; 表面质量; 辅助装置

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.001

**中图分类号:** TG306

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 10-0001-11

## Research status on NC incremental forming process for sheet metal

Lu Shihong, Fu Jingyi, Ding Tengfei, Chen Sheng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** As one of the dieless forming technologies, NC incremental forming process has received extensive attention and research in the field of sheet metal parts manufacturing. Therefore, the research progress of sheet metal NC incremental forming technology in recent years was summarized, and the research status of new sheet metal NC incremental forming process was stated. Then, the research results of the processing quality control and forming process optimization of sheet metal NC incremental forming, and the research and development of NC incremental forming auxiliary device were introduced comprehensively. Existing research and applications show that the continuous deepening of the development and research of new sheet metal NC incremental forming technology and improving of the dimensional and shape accuracies of incremental forming parts are hot research topics. While using comprehensive optimization of process parameters as a means to obtain higher processing quality is the core target of this technology research. Simultaneously, the deformation mechanism of some new sheet metal NC incremental forming processes and the relationship between the microstructure changes of formed parts and the forming process need to be revealed and studied.

**Key words:** incremental forming; sheet metal; forming process optimization; forming accuracy; surface quality; auxiliary devices

传统的板料成形大多依赖模具生产, 模具制造的经济成本和时间成本一定程度上制约了金属板料制造业的生产水平, 为此各国学者将目光转向无模成形技术。板料数控渐进成形 (Numerical Control Incremental Sheet Forming, NCISF) 作为一种新兴的无模成形技术<sup>[1]</sup>, 采用快速成形技术的“分层制造”思想, 降低了对模具的依赖度, 提高了柔性制造的程度, 因而受到许多学者的关注。与传统的板料成形方式相比, NCISF可实现复杂曲面零件的加

工, 同时受益于小变形累积的成形方式, 使其进一步提高了板料的成形性能。

自 20 世纪 90 年代初日本学者松原茂夫<sup>[2]</sup>提出了板料数控渐进成形技术以来, NCISF 受到了国内外众多学者的广泛研究。得益于相关领域学者的不断探索与研究, 渐进成形技术持续发展、走向成熟, 并不断结合其他技术形成新型渐进成形工艺。作为一种灵活的柔性制造技术, NCISF 集计算机技术、数控技术和塑性成形技术于一体。相比于传统成形, NCISF 工艺的数字化程度高、成本低, 特别适合小规模 and 个性化生产, 符合现代制造业多样化的需求以及科研工作中新产品的试制, 因此, 其在航空航天、交通及医疗等领域具有广阔的应用前景。目前,

收稿日期: 2021-10-10; 修订日期: 2022-01-06

作者简介: 鲁世红 (1964-), 女, 博士, 教授

E-mail: lush@nuaa.edu.cn

NCISF 在航天领域的火箭筒壁板和整流罩、航空领域的飞机蒙皮, 汽车用翼子板、医疗领域的人颅骨修复体和牙牙齿板修复体等方面已有应用<sup>[3]</sup>。

本文从新型技术、质量控制、工艺优化和辅助装置 4 个方面总结、分析了近年来国内外在 NCISF 领域的研究成果, 为进一步研究提供了一些参考和思路。

## 1 新型板料数控渐进成形工艺

渐进成形工艺自 20 世纪末提出以来的 30 年间, 国内外学者对其进行了广泛的研究, 使得渐进成形工艺技术不断完善、应用推广力度不断加大。近年来, 随着难加工材料的应用, 传统单点渐进成形难以满足难加工材料的加工质量要求, 也进一步推动了单点渐进成形工艺向新型板料数控渐进成形工艺方向升级, 目前, 国内外学者已经提出了电热辅助渐进成形、双面渐进成形、电磁辅助渐进成形及超声波辅助渐进成形等多种新型板料数控渐进成形工艺。

### 1.1 电热辅助渐进成形

电热辅助渐进成形 (Electrically Assisted Incremental Forming, E-AIF) 工艺是目前研究较为深入的新型板料数控渐进成形工艺之一。其中, 自电阻加热渐进成形技术通过构造通电回路, 利用工具头与板料接触区的可控电流产生电阻热局部软化材料, 从而降低了材料的屈服强度和成形载荷, 进而提高了材料的加工精度和表面质量<sup>[4]</sup>。意大利帕多瓦大学 Valoppi B 等<sup>[5]</sup>进一步研究发现, E-AIF 工艺不但能够降低板料的成形载荷, 同时能够提高板料的成形极限。除了基于焦耳热效应的自电阻加热渐进成形以外, 脉冲电流辅助加热渐进成形是另外一种电热辅助渐进成形的方式。脉冲电流辅助加热渐进成形技术将电脉冲辅助成形技术与局部加载成形工艺相结合, 利用电脉冲产生的热效应来提高板料的成形性能。上海交通大学 Li X F 等<sup>[6]</sup>和山东大学敖冬威<sup>[7]</sup>研究发现, 脉冲电流辅助加热渐进成形不但拥有热效应产生的优势, 同时脉冲电流非热效应形成的电子风力能够推动位错运动, 在热效应作用的基础上进一步促进位错运动并打开位错缠结, 有利于板料塑性的提高。

### 1.2 双面渐进成形

双面渐进成形 (Double-sided Incremental Forming, DSIF) 工艺是相关学者在单点渐进成形技术基础上提出的新型板料数控渐进成形技术, 与传统单点渐进成形 (Single Point Incremental Forming,

SPIF) 相比, DSIF 工艺在成形过程中的反向弯曲作用以及刀具挤压效应能够降低变形区域的应力三轴性, 延迟材料变形到达破裂极限, 进而提高材料的成形性能<sup>[8]</sup>; 同时, DSIF 工艺允许刀具在板料相同侧或不同侧同步或独立地移动, 使得刀具路径灵活化, 更易在形状复杂的零件制造方面得到应用。美国西北大学 Cao J J 等<sup>[9]</sup>研究发现, DSIF 工艺改变了板料的变形状态, 使其变形过程转变为类似于传统的挤压变形, 精确地控制了材料的变形, 从而使得成形精度大大提高。上海交通大学 Xu D K 等<sup>[10]</sup>对比了电热辅助单点渐进成形 (Electrically-assisted Single Point Incremental Forming, E-SPIF) 与电热辅助双点渐进成形 (Electrically-assisted Double Sided Incremental Forming, E-DSIF) 工艺的成形精度。研究发现, 与 E-SPIF 工艺相比, E-DSIF 成形件的最大几何偏差减少了 29.8%, 拥有更高的成形精度。德国鲁尔波鸿大学 Meier H 等<sup>[11]</sup>发现, 在双面渐进成形过程中, 协调两工具之间在运行过程中的相对位置关系很重要, 这成为了之后提升 DSIF 工艺成形精度的关键技术问题。随着智能制造的发展, 机械手的应用逐渐推广开来, 在双面渐进成形领域, 一些学者进一步引入机械手配合板料加工。在国外, 很早便有一些学者通过引入机器人手臂对渐进成形技术进行研究<sup>[12-13]</sup>; 工业机械手相比于传统数控机床, 其加工路径更加多元化, 进一步拓展了双面渐进成形技术的实现方式。上海交通大学陆彬团队<sup>[14]</sup>采用工业机械手实现了单点与双面复合渐进成形, 获得了厚度分布更均匀的成形件, 并提高了加工效率。

### 1.3 电磁辅助渐进成形

利用电磁技术进行金属成形工艺并不少见, 国内哈尔滨工业大学很早便利用电磁辅助冲压成形工艺来加工金属零件<sup>[15]</sup>。进入 21 世纪, 国内外学者将电磁技术与渐进成形技术结合, 开辟了电磁辅助渐进成形工艺 (Electro-magnetic Assisted Incremental Forming, EMAIF)。电磁辅助渐进成形工艺采用电磁线圈来代替传统工具头, 利用脉冲电流生成磁场力, 按照轨迹移动并放电, 从而完成渐进成形的逐层加工。电磁辅助渐进成形中的成形线圈比起尺寸、刚度要求较高的工具头, 其成本低、易获取, 降低了原有渐进成形工艺对成形设备的要求。同时, 电磁辅助渐进成形工艺融合渐进成形思想进行复杂形状零件的柔性加工, 进一步扩大了电磁无模成形技术的应用范围。华中科技大学的莫健华团队<sup>[16]</sup>对电磁辅助渐进成形方法进行了深入研究, 其团队发现:

电磁辅助渐进成形过程中晶粒在轴向和径向的压缩应力下变得扁平, 位错密度显著增加, 成形件的硬度更高; 同时, 辅助线圈产生的径向磁场力减小了径向拉伸应力, 改善了成形件的应力分布, 提高了成形性能。对于直壁类零件的加工, 电磁力的引入在直壁件弯角区域加工过程中提供了一个横向压力, 有效地降低了起皱缺陷, 能够改善成形件的壁厚分布和成形质量<sup>[17-18]</sup>。

#### 1.4 超声波辅助渐进成形

超声波辅助渐进成形 (Ultrasonic-assisted Incremental Forming, UAIF), 即在渐进成形工艺中加入超声波能量, 利用超声波在加工中的振动特性, 提高加工效果。与电磁技术相同, 超声振动早在挤压、冲压等多种塑性加工工艺中得到了应用, 超声振动的引入降低了加工过程中的成形载荷、改善了成形件的表面质量<sup>[19]</sup>。山东大学李燕乐团队<sup>[20-21]</sup>发现, 采用超声辅助渐进成形, 可以改善薄板渐进成形中材料的流动特性, 增加晶粒尺寸, 减小成形零件的错位角, 从而提高材料的成形性能。同时, 将超声波振动引入到 NCISF 中, 可以有效地提高和控制零件的径向精度, 降低残余应力, 进而抑制回弹缺陷。未来, 超声波辅助渐进成形将是一种有潜力的金属钣金零件柔性渐进成形制造手段<sup>[22-23]</sup>。

## 2 渐进成形加工质量控制

### 2.1 成形精度的控制

零件的加工成形精度包括尺寸精度、形状精度和位置精度, 对于渐进成形工艺加工的零件而言, 成形精度主要包括尺寸精度和形状精度两种, 在渐进成形工艺中常被统称为几何精度。英国剑桥大学 Allwood J M 等<sup>[24]</sup>对国外市场进行的调查研究表明, 成形精度的局限是这种技术取得商业突破的主要障碍, 如何提高渐进成形的成形精度一直是该工艺的重要研究内容。

Micari F 等<sup>[25]</sup>研究发现, 由于零件在进行单点渐进负成形过程中, 板料四周被夹具加紧而板料变形区下方没有承载物体, 所以, 在局部变形区域成形载荷与夹具加持作用的影响下, 夹具开口区域易产生弯曲变形现象; 除此之外, 板材回弹与成形件底部的“枕头效应”同样是 SPIF 过程中容易出现缺陷, 如图 1 所示<sup>[25]</sup>。

针对 SPIF 过程中的板材回弹缺陷, 华中科技大学龚攀<sup>[26]</sup>引入反馈控制理念, 采用基于快速傅里叶

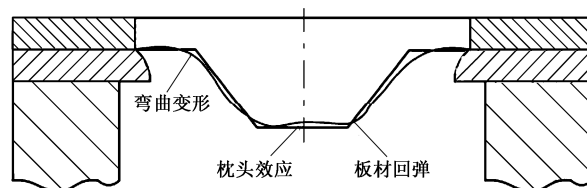


图 1 单点渐进成形工艺中的几何误差分类

Fig. 1 Classification of geometrical errors during SPIF process

变换的闭环控制算法对预测加工轨迹进行修正, 提高了三维曲面的成形精度。Sbayti M 等<sup>[27]</sup>在单点渐进成形金属义齿架过程中, 采用 GA 遗传算法、GODLIKE 优化算法以及蚱蜢优化算法对零件的弯曲变形区、板料回弹区及底部“枕头效应”区进行了误差优化, 研究表明, 采用的几种优化算法均可以有效地提高成形件的几何精度。

通过加热处理改善板料的塑性加工性能, 进而改善零件的回弹问题也是近年来一些学者研究的新方向。宾夕法尼亚州立大学 Neveux T C 等<sup>[28]</sup>运用电加热方式消除了渐进成形中残余应力造成的整体回弹问题, 并研究了在电流影响下, 温度在零件长度方向和宽度方向的分布情况。巴西学者 Pacheco P A P 等<sup>[29]</sup>采用预热电加热渐进成形技术来提高成形精度, 研究表明, 这种方法使得成形精度平均提高了 4.7%, 成形载荷也小于传统的自阻电加热渐进成形。南京航空航天大学李正芳等<sup>[30]</sup>通过电加热将 1060 铝加热至 150~200 °C, 有效地提高了零件的几何精度。此外, 英国诺丁汉大学 Behera A K 等<sup>[31]</sup>研究发现, 对成形后的零件进行热处理退火, 可以消除已成形件中因残余应力释放所引起的回弹误差。

双面渐进成形 (DSIF) 技术引入从属工具头, 使其在待成形板料的下方来支撑板料, 在提高成形精度方面显现出巨大的优势。上海交通大学 Wang H Y 等<sup>[32]</sup>对比了 DSIF 的两种常用成形策略——反向弯曲策略和挤压策略对提高零件成形精度的效果。其中, 反向弯曲策略通过从属工具头与主工具头之间形成的反向弯曲引入一个反向应力, 对变形区域的应力进行中和, 从而改善变形区的应力分布进而减小回弹。而挤压策略通过从属工具头与主工具头的挤压引入背压, 背压分量削弱了变形区的拉应力, 使得弹性变形区减小, 提高了成形精度, 其原理如图 2 所示<sup>[32]</sup>。其中,  $\alpha$  为成形角度,  $\beta$  为旋转角度,  $F_{\phi}$  为接触力,  $F_{bp}$  为背压,  $d$  为主、从工具头的中心距。对比发现, 相比挤压策略, 反向弯曲策略对回弹的抑制效果更好, 且回弹随着反向弯曲角的增大而减小。



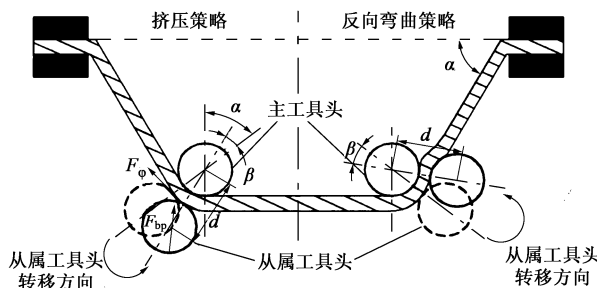
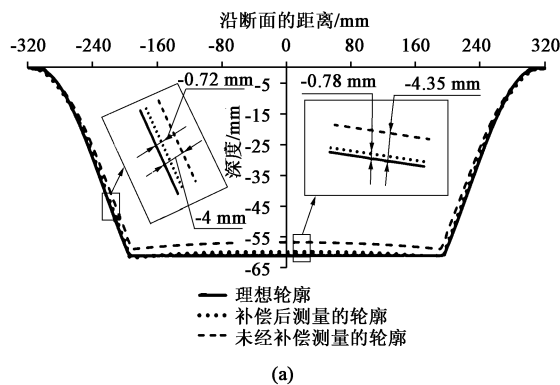


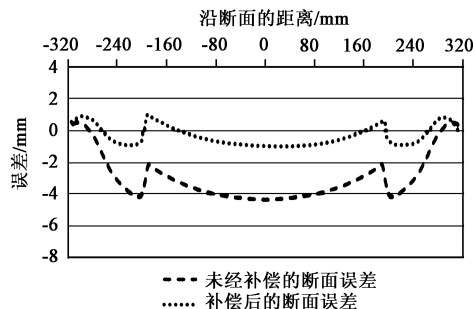
图 2 两种策略的对比示意图

Fig. 2 Schematic diagram for comparison of two strategies

但是,从属工具头的引入带来了新的问题,板料加工过程中,随着变形区域的不断变化与变形量的不断累加,板料与从属刀具头之间容易出现接触不良现象,进而影响 DSIF 零件的成形精度。针对新出现的这一问题,印度理工学院 Praveen K 等<sup>[33]</sup>将



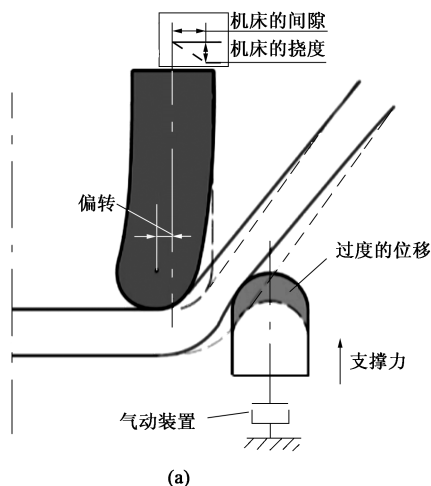
(a)



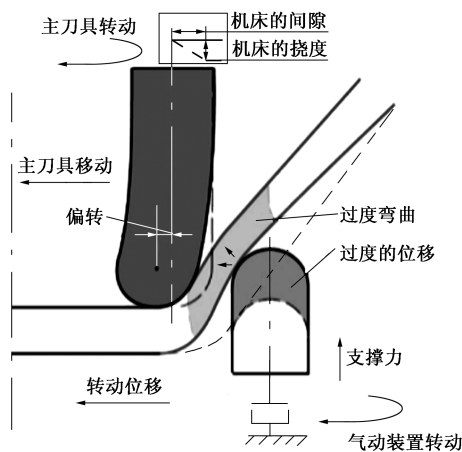
(b)

图 3 不同补偿方式下成形件的断面轮廓对比 (a) 和断面误差对比 (b)

Fig. 3 Comparison of cross-section profiles (a) and cross-section errors (b) for formed parts under different compensation modes



(a)



(b)

图 4 主刀具偏转导致支撑工具的过度补偿 (a) 和从工具向锥体中心移动引起的“过度弯曲” (b)

Fig. 4 Excessive compensation of support tool due to master tool deflection (a) and “over-bending” caused by slave tool movement towards cone center (b)

## 2.2 成形表面质量的改善

表面质量是零件加工质量的重要指标,零件的表面质量通常指零件在机械加工后被加工面的微观

不平度,即粗糙度。零件的工作性能如耐磨性、抗蚀性及强度等,在很大程度上受其表面质量的影响。通过调整工艺参数优化零件成形表面质量是当

小挠度理论和薄膜理论结合,通过分析板材的弹性变形来预测和补偿板的偏转,最后进行轨迹修正而得到补偿轨迹。试验成功将回弹误差与底部的枕头效应降低了 82%,优化效果如图 3 所示<sup>[33]</sup>,同时确保了支撑工具在整个成形过程中与部件保持接触。

在保证从属刀具的持续支撑与接触作用时,同样要防止加工过程中出现板料的过度弯曲而影响几何精度的情况,这种现象易出现在具有大壁角的零件的 DSIF 过程中,通常是由刀具和机器的刚度不足导致成形工具偏转变形而引起的,如图 4 所示<sup>[34]</sup>。上海交通大学 Peng W X 等<sup>[34]</sup>针对双面渐进成形大壁角零件时出现的过度弯曲几何误差,采用气动支撑工具来辅助 DSIF 过程,以防止板料和工具之间的接触损失,有效地提高了零件的几何精度。

下学者们最常用的研究手段。2021 年, 波兰学者 Trzepieciński T 等<sup>[35]</sup>以铝合金板料为研究对象, 利用人工神经网络确定了工艺参数对平均粗糙度的影响, 研究发现, 表面粗糙度随着层间距和工具头转速的增大而增大。上海交通大学 Wang Z W 等<sup>[36]</sup>发现摩擦搅拌辅助渐进成形过程中常出现切割痕和鱼鳞纹两种表面质量问题。针对这一问题, 其团队通过工具头转速和层间距的合理组合避免了切割痕的产生, 而将进给速度与工具头转速之比控制在 2 mm 以内则有效地避免了鱼鳞纹现象。

成形件表面质量通常受摩擦影响, 过大的摩擦甚至会使成形件过早发生破裂, 在内表面产生严重的沟痕、撕裂现象等。目前, 国内外学者对于金属板料渐进成形的摩擦问题进行了多角度的研究。

一些学者从最根本的摩擦机理方面入手, 探究其对表面质量的影响。西安理工大学徐青<sup>[37]</sup>分析了板料所受作用力与摩擦因数的相互关系, 阐明了摩擦因数对成形过程中等效应力、等效塑性应变、板料扭转及板厚减薄的影响规律。意大利那不勒斯大学 Durante M 等<sup>[38]</sup>采用两种类型的工具头成形 AA7075 铝合金板料, 通过改变摩擦接触状态研究了接触条件对成形件表面质量、成形载荷及成形性

能的影响。上海交通大学宋修成<sup>[39]</sup>建立了渐进成形中工具-板料摩擦次数与残余波峰高度、成形壁角和刀具半径的数学模型。通过该模型能够预测不同预设残余波峰高度和成形工具半径下工具与板料的摩擦次数, 进而对表面质量进行改善。

从润滑角度分析, 以提高成形表面质量, 是相关学者的另一个切入点。葡萄牙学者 Azevedo N G 等<sup>[40]</sup>对 AA1050 铝板及 DP780 钢板进行了摩擦润滑研究, 发现选择合适的润滑剂能够有效地提高成形件的表面质量并降低成形载荷。南京航空航天大学李正芳等<sup>[41]</sup>采用了一种新的石墨润滑脂/油润滑方式, 降低了渐进成形过程中润滑的复杂度和成本, 改善了试样成形表面质量。

通过对零件预先进行表面加工处理, 进而改善成形过程中的润滑状态也是一些学者提出的新观点。南京航空航天大学高霖团队研究表明<sup>[42-43]</sup>, 铝合金板料进行微弧氧化处理后润滑条件得到了明显改善, 对钛合金板料进行微弧氧化或电镀镍基  $\text{MoS}_2$  处理可以增大润滑剂与板料之间的接触, 从而改善表面质量, 而以 0Cr18Ni9 为代表的不锈钢板料则适合对其表面进行草化处理, 草化处理后渐进成形加工的零件表面形貌如图 5 所示<sup>[43]</sup>。

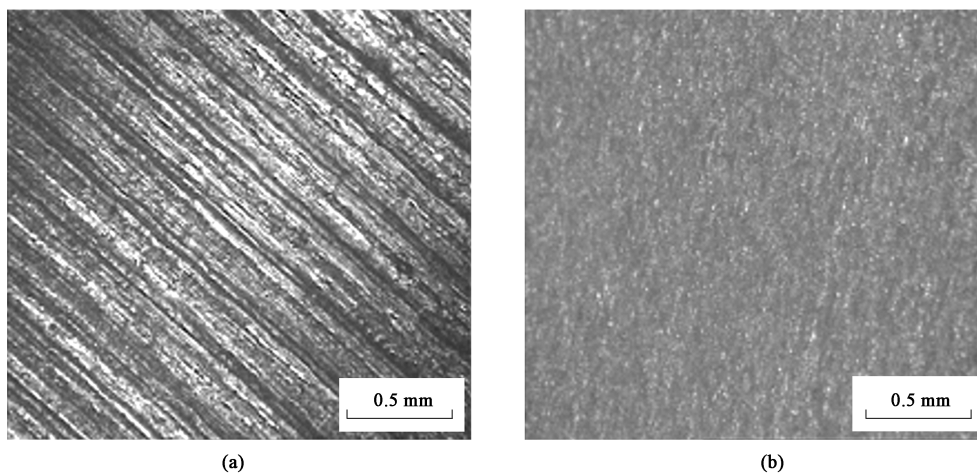


图 5 不同表面处理方式下的零件表面形貌

(a) 磷化后的零件表面形貌 (b) 草化后的零件表面形貌

Fig. 5 Surface morphologies of parts under different surface treatment methods

(a) Surface morphology of part after phosphating

(b) Surface morphology of part after grassing

### 3 成形工艺优化方法

合理规划成形工艺可以多方面提高渐进成形工艺水平, 而工艺参数优化组合和成形轨迹优化是渐进成形技术研究的两大手段。

#### 3.1 工艺参数优化组合

工艺参数是渐进成形过程中的重要组成部分, 对于传统单点渐进成形 (SPIF) 工艺而言, 工艺参数主要包括刀具直径、刀具形状、层间距、进给速度等。德国多特蒙德工业大学 Maaß F 等<sup>[44]</sup>通过对比不同层间距与刀具直径的比值组合, 优化了成形

过程中的残余应力分布,如图 6 所示<sup>[44]</sup>。

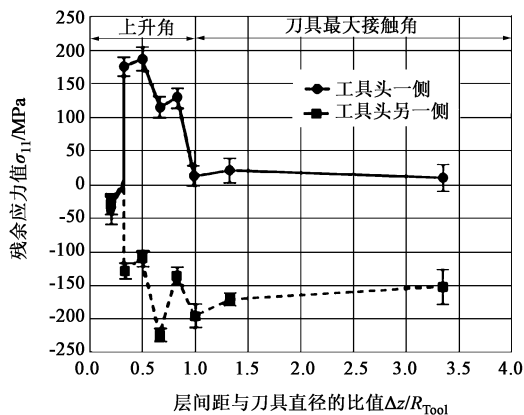


图 6 不同层间距与刀具直径比对应的残余应力趋势图

Fig. 6 Residual stress trend diagram corresponding to different ratios of layer spacing to tool diameter

但是,采用单一要素的对照组试验方法往往导致试验次数多、工作量大且优化工艺参数效果受限,因此,部分学者开始寻找更为合适的试验设计与优化手段。南京航空航天大学光凯惠等<sup>[45]</sup>通过正交试验法研究了工艺参数对 TC4 钛合金板电磁加热渐进成形的成形极限角的影响,成功得出了各因素对板料成形极限影响的显著性顺序。响应面法同样是应用比较广泛的试验设计方法之一,因其能够直观反映参数的最优化区域和交互性而受到研究者的广泛应用。印度国家工程学院 Ajay C V<sup>[46]</sup>采用响应面法研究发现,层间距是影响 TC4 钛合金板料 SPIF 过程中成形载荷大小最重要的参数,而成形角和层间距对 AA2024 铝合金材料的成形性能的影响最大。在正交试验或响应面试验方法的基础上,引入优化算法,可以得到某一目标量的最佳工艺参数组合。韩国庆北国立大学 Xiao X 等<sup>[47]</sup>利用响应面法、反向传播神经网络与遗传算法进行 AA5052 铝合金的最大成形角和最小厚度减薄量优化,优化结果显示,刀具的直径和层间距对成形角度和厚度减薄率的影响最大,并得出了基于 GA 遗传算法的 Pareto 最优解。

对于电热辅助渐进成形(EAIF)而言,电流幅值成为了一个新的工艺参数。南京航空航天大学鲁世红团队<sup>[48]</sup>进行了钛合金板料电热辅助渐进成形中各工艺参数对成形温度的显著性水平研究,发现电流幅值是影响自阻电加热渐进成形的成形温度的最重要因素。上海交通大学 Gao L T 等<sup>[8]</sup>研究了脉冲电流对 DSIF 成形性能的影响,研究发现:脉冲电流和压缩区域支撑工具的压缩效果导致应力三轴性降

低,延长了断裂的临界值,提高了材料的成形深度、增大了成形壁角;且电流密度对材料的成形性能影响显著,成形性能与电流密度的关系成正比。

对于搅拌摩擦辅助渐进成形而言,主轴转速成为一个新的工艺参数。印度曼格拉姆大学 Kumar A 等<sup>[49]</sup>研究了工艺参数对 AA2024 铝合金成形性能的影响,发现随着主轴转速的提高,材料的成形性能得到了一定幅度的提升。Baharudin B T H T 等<sup>[50]</sup>基于田口分析方法研究了搅拌摩擦辅助渐进成形过程中,工具头转速、进给量、进给速度等工艺参数对成形力的影响,发现工艺参数对成形力的影响程度从高至低依次为转速、层间距、进给速度和刀具直径。

### 3.2 成形轨迹的优化

成形轨迹往往影响着材料的流动,单点渐进成形工艺中,一般形状规则的对称类零件多使用等高线加工轨迹。这种轨迹使用方便,且控制参数容易确定,但是其往往导致层与层的进刀处产生点压痕迹,而且由于压点集中,在下压过程中局部减薄严重,容易破裂。如何提高变形的均匀性、减缓板料的变薄程度,已成为当前深腔类钣金件和具有复杂形状特征类钣金件渐进成形的核心问题<sup>[51]</sup>。

针对这一问题,国内外学者进行了大量关于成形轨迹优化的工作,从传统的逐层下压轨迹发展到正逆相交轨迹再到螺旋形轨迹,不断改进。事实证明,正逆相交轨迹有利于金属的流动,降低了侧壁减薄率,使得侧壁不规则形状零件的壁厚均匀性得到了提高;而螺旋形轨迹可以避免进刀点的重复性,还有消除表面进刀痕、提高表面质量的效果<sup>[52]</sup>。沈阳航空航天大学朱虎等<sup>[53]</sup>则对基于等高线轨迹、下压点分散的等高线轨迹、等螺距螺旋线轨迹和不等螺距螺旋线轨迹 4 种轨迹的数控渐进成形过程进行了综合分析,结果表明,基于不等螺距螺旋线轨迹成形的板材,材料底部堆积较少,板材厚度减薄幅度也比较小,外观表面质量最好。针对单点渐进正成形方面, Li X Q 等<sup>[54]</sup>对比了多道次正成形的 3 种路径策略——平行线策略、变角策略与拉伸弯曲辅助策略对厚度分布的影响,结果表明,变角策略与拉伸弯曲辅助策略在降低材料减薄方面存在优势,如图 7 所示<sup>[54]</sup>。

双面渐进成形多用来成形具有复杂形状特征的零件,当零件具有复杂且多个曲面特征时,双面渐进成形的路径规划变得格外重要。优化刀具路径可以改善工具头与板料之间的接触状况,而板料与工



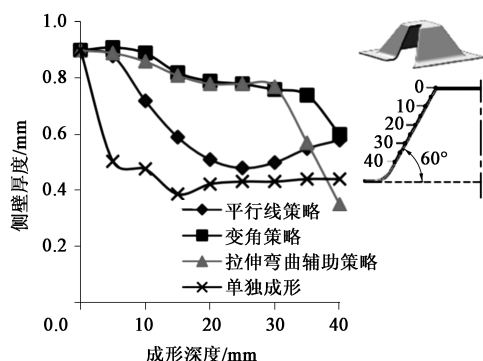


图 7 不同路径策略下的壁厚对比

Fig. 7 Comparison of wall thickness under different path strategies

具头的接触状态对双面渐进成形精度和成形性能的影响显著。印度理工学院 Lingam R 等<sup>[55]</sup>开发了一种能够识别单个/多个曲面组件特征的模型, 利用此模型使用水平、倾斜或偏移策略对已识别的特征进行切片, 实现了双面渐进成形过程的最佳成形顺序选择, 其效果可以将几何偏差控制在  $400\ \mu\text{m}$  之内。美国西北大学 Moser N 等<sup>[56]</sup>进一步考虑了双面渐进成形过程中, 所成形零件的内曲率和刀具方向对成形性能的影响, 提出了一种新的包含成形高度、平面内曲率和刀具运动方向的刀具路径校正算法, 能够有效地消除成形过程中的接触损失, 改善板材厚度的分布。与传统 SPIF 工艺相比, DSIF 工艺引入了从属工具头, 其位置的变化使得刀具路径千变万化, 进而对成形过程造成影响。上海交通大学 Xu D K 等<sup>[57]</sup>提出了一种混合双面渐进成形刀具路径策略:

在初始阶段, 从属工具头不动, 只起类似于背板的作用, 使得圆角的弯曲效果最小, 减少相应的形状误差; 形成圆角后, 两个刀具再同时向下移动, 这种刀具路径可以减少 DSIF 过程中由弯曲效应引起的几何偏差, 同时保留了挤压效应的优势, 如图 8 所示<sup>[57]</sup>。其中,  $Z_1 \sim Z_4$  为各成形过程截止时刻的  $Z$  轴坐标。上海交通大学张欢<sup>[58]</sup>为了改善具有深腔特征的钣金件的厚度分布均匀性, 提出了一种反复由外向内、再由内向外的“之”字形多道次加工轨迹, 提高了变形的均匀性, 如图 9 所示<sup>[58]</sup>。

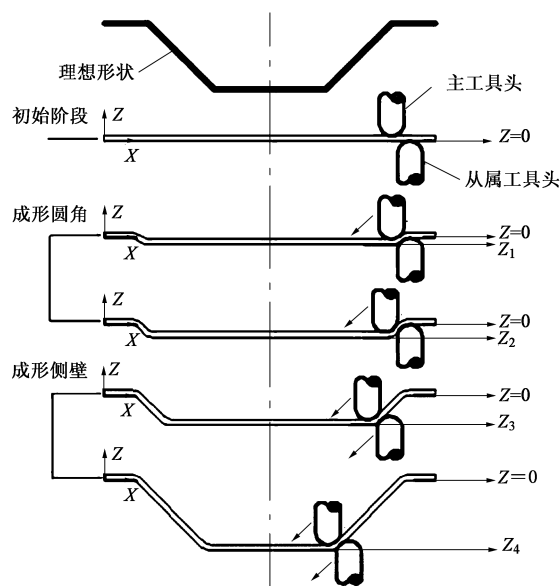
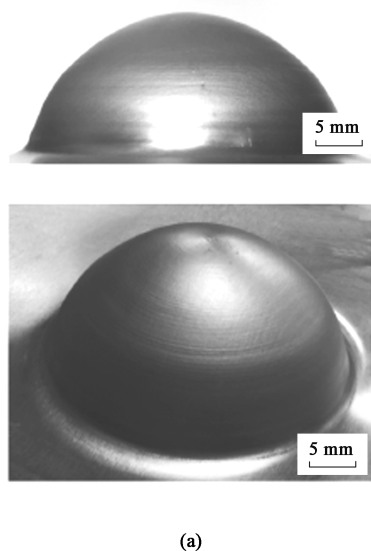
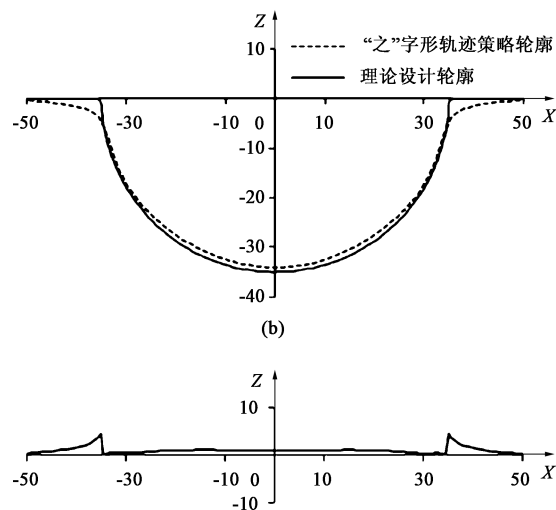


图 8 混合 DSIF 刀具路径策略示意图

Fig. 8 Schematic diagram of hybrid DSIF tool path strategy



(a)



(b)

(c)

图 9 贝壳高度控制的“之”字形轨迹策略试验结果

(a) 采用“之”字形轨迹策略成形的零件 (b) “之”字形轨迹策略成形件轮廓 (c) “之”字形轨迹策略成形件的  $Z$  向误差

Fig. 9 Experiment results of “zig-zag” strategy with scallop height control

(a) Parts formed by “zig-zag” trajectory strategy (b) Profile of part formed by “zig-zag” trajectory strategy

(c)  $Z$ -direction error of part formed by “zig-zag” trajectory strategy

## 4 辅助装置研究进展

作为数控渐进成形技术的支撑平台, 数控渐进成形设备的研发具有重要地位。在早期关于成形设备的研究中, 芬兰学者 Lamminen L<sup>[59]</sup>、比利时学者 Duflou J R 等<sup>[60]</sup>、德国学者 Meie H 等<sup>[61]</sup>将工业机器人引入至渐进成形设备中; 相比传统渐进成形机床, 工业机器人的动作更加灵活, 拓展了渐进成形技术的实现方式。国内, 华中科技大学莫健华团队<sup>[62]</sup>研制了国内首台金属板料数控渐进成形机床、开发了相关的控制系统, 并成功地在汽车覆盖件上进行了应用, 在国内渐进成形领域具有重大意义。上海交通大学学者 Lu B 等<sup>[14]</sup>研制出图 10 所示的机械手辅助双面渐进成形设备, 并基于此平台开展了一系列有关双面渐进成形工艺的研究。

关于成形工具方面, 上海交通大学刘润泽等<sup>[63]</sup>对比了传统工具头、内部水冷式工具头、内部水冷滚珠工具头及内部水冷滚轮工具头对成形表面质量的影响, 发现兼具水冷与滚珠的工具头可以降低加



图 10 双面渐进成形设备

Fig. 10 Double-sided incremental forming equipment

工过程的摩擦阻力, 减小表面粗糙度和成形载荷, 获得更高的成形性能。罗马尼亚学者 Nasulea D 等<sup>[64]</sup>则开发了一种基于圆周锤击原理工作的半球形扁平状成形工具, 如图 11 所示。这种扁平工具头的平行表面可以消除工具头表面和板料表面之间的径向接触, 使得刀具与板料的接触仅发生在刀具前表面, 从而改善了成形条件, 提高了零件侧壁的尺寸精度。

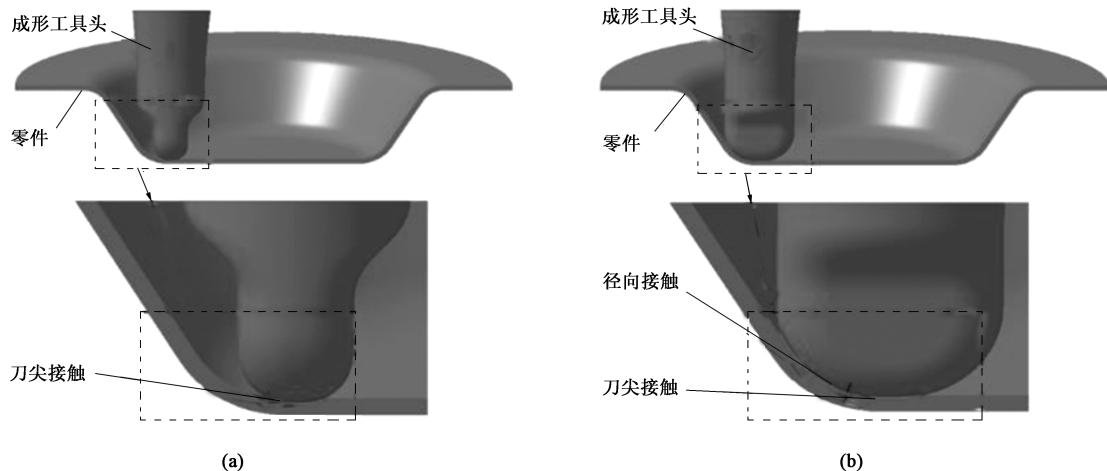


图 11 工具头在  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $360^\circ$  位置处的接触状态 (a) 和工具头在  $90^\circ$  和  $270^\circ$  处的接触状态 (b)

Fig. 11 Contact state of tool head at  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  and  $360^\circ$  (a) and contact state of tool head at  $90^\circ$  and  $270^\circ$  (b)

渐进成形相关软件的开发方面同样是一个重要板块, 且目前相关研究并不多见。南京航空航天大学张春<sup>[65]</sup>针对电辅助渐进成形过程中温度难以控制这一弊端, 研究并开发出一套温度实时监控系统。沈阳航空航天大学李华溢<sup>[66]</sup>运用 C++ 语言算法开发了一种应用于数控渐进成形技术智能分区与轨迹生成的 CAD/CAM 系统。崔超<sup>[67]</sup>将一种实时前瞻控制进给速度的方法应用至渐进成形数控系统中, 使得加工轨迹能够实现随进给速度自适应变化, 解决了

机床加工复杂轨迹时因工具头速度较高导致的加速度冲击问题。

## 5 结语与展望

(1) 随着渐进成形技术的进一步发展, 一些结合电、热、磁的新型板料数控渐进成形技术被提出并进一步得到了应用; 另一方面, 双面渐进成形技术作为最具潜力的无模成形技术也得到了大量研究。



相较于传统单点渐进成形技术, 以电热、电磁及超声波等能源结合渐进成形技术构成的新型板料数控渐进成形工艺, 有着成形性能更高、加工质量更好、更易实现复杂形状零件成形等优点。

随着新型板料数控渐进成形技术的出现, 相应的多物理场耦合数值模拟、成形机理、工艺参数优化等方面的内容将作为未来的热点研究内容。另一方面, 灵活性更高的双面渐进成形结合电热及超声振动的成形技术也将作为提升成形性能和成形质量的有效手段而得到进一步研究和发展。

(2) 得益于 NCISF 工艺的灵活成形能力与相关无模成形的优势, 近年来渐进成形在许多领域得到了应用, 但成形件的加工质量不足仍然是制约该技术广泛工业化应用的主要因素。通过加热处理、添加支撑(从属工具头)及轨迹补偿的方式可以实现加工精度的控制和提升。而工艺参数优化和改善表面润滑条件则是目前提升成形表面质量的主要手段。

未来, 为推动 NCISF 工艺的工业化应用, 综合提高渐进成形加工质量将持续作为渐进成形技术研究的核心目标, 而相应的轨迹补偿和支撑方式的改进也将作为主要手段得到进一步发展。同时, 渐进成形技术将不断提高其智能化与高效化水平, 而协调加工质量与成形效率之间的矛盾关系则是未来 NCISF 工艺领域的一项攻艰内容。

(3) 基于以往文献分析, 目前对渐进成形技术的研究多集中于宏观变化上, 对于渐进成形过程中材料的微观组织演化与成形过程之间的联系还欠缺深入、细致的研究。同时, 在综合提高渐进成形加工质量的前提下, 有关 NCISF 工艺生产零件的适用性、工艺对材料结构损伤的可预测性以及零件成形后的服役性能测试等方面仍是有待研究的问题。

#### 参考文献:

- [1] 莫健华, 叶春生, 黄树槐, 等. 金属板料数控渐进成形技术[J]. 航空制造技术, 2002, (12): 25-27.  
Mo J H, Ye C S, Huang S H, et al. Sheet metal CNC incremental forming [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002, (12): 25-27.
- [2] 松原茂夫. 数值控制逐次成形法[J]. プラスチック加工, 1994, 35 (406): 1258-1263.  
Matsubara Shigeo. Numerically controlled successive forming method [J]. Plasticity and Processing, 1994, 35 (406): 1258-1263.
- [3] Ambrogio G, Napoli L D, Filice L, et al. Application of incremental forming process for high customised medical product manufacturing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162-163: 156-162.
- [4] 范国强, 高霖, 刘鹏, 等. TC4 板料电辅助加热数控渐进成形工艺分析及优化 [J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42 (2): 238-243.  
Fan G Q, Gao L, Liu P, et al. Technology analysis and optimization for electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V sheet [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42 (2): 238-243.
- [5] Valoppi B, Ghiotti A, Bruschi S. Elevated temperature behaviour of Ti6Al4V sheets with thermo-electro-chemical modified surfaces for biomedical applications [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2017, 231 (6): 523-533.
- [6] Li X F, Wang S, Zhao S J, et al. Effect of pulse current on the tensile deformation of SUS304 stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24 (12): 5065-5070.
- [7] 敖冬威. Ti-6Al-4V 钛合金板料电脉冲辅助单点渐进成形研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.  
Ao D W. Research on Electropulsing Assisted Single Incremental Forming of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Sheet [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [8] Gao L T, Zhao Y X, Yu Z Q, et al. Formability analysis of electrically assisted double-side multi-point incremental sheet forming [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108 (11-12): 3405-3417.
- [9] Cao J J, Huang Y, Reddy N V, et al. Incremental sheet metal forming: Advances and challenges [A]. Proceedings of 9th International Conference on Technology of Plasticity [C]. Gyeongju, 2018.
- [10] Xu D K, Lu B, Cao T T, et al. Enhancement of process capabilities in electrically-assisted double sided incremental forming [J]. Materials & Design, 2016, 92: 268-280.
- [11] Meier H, Smukala V, Dewald O, et al. Two point incremental forming with two moving forming tools [J]. Key Engineering Materials, 2007, 344: 599-605.
- [12] Vihtonen L, Puzik A, Katajarinne T. Comparing two robot assisted incremental forming methods: Incremental forming by pressing and incremental hammering [J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1 (1): 1207-1210.
- [13] Belchior J, Guillo M, Courteille E, et al. Offline compensation of the tool path deviations on robotic machining: Application to incremental sheet forming [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29 (4): 58-69.
- [14] Lu B, Fang Y, Xu D K, et al. Investigation of material deformation mechanism in double side incremental sheet forming [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 93: 37-48.
- [15] Okoye C N, Jiang J H, Hu Z D. Application of electromagnetic-assisted stamping (EMAS) technique in incremental sheet metal forming [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46 (11): 1248-1252.
- [16] Fang J X, Mo J H, Li J J. Microstructure difference of 5052 aluminum alloys under conventional drawing and electromagnetic pulse assisted incremental drawing [J]. Materials Characterization, 2017, 129: 88-97.
- [17] Fang J X, Mo J H, Cui X H, et al. Electromagnetic pulse-assisted incremental drawing of aluminum cylindrical cup [J]. Journal of

- Materials Processing Technology, 2016, 238: 395–408.
- [18] Cui X H, Mo J H, Li J J, et al. Electromagnetic incremental forming (EMIF): A novel aluminum alloy sheet and tube forming technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (2): 409–427.
- [19] 赵升吨, 李泳峰, 范淑琴. 超声振动塑性加工技术的现状分析 [J]. 中国机械工程, 2013, 24 (6): 835–840.
- Zhao S D, Li Y Y, Fan S Q. Status analysis of plastic processing technology with ultrasonic vibration [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24 (6): 835–840.
- [20] Li Y L, Zhai W D, Wang Z J, et al. Investigation on the material flow and deformation behavior during ultrasonic-assisted incremental forming of straight grooves [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (1): 433–454.
- [21] 翟维东. 铝合金薄板超声辅助渐进成形表面质量及表面材料流动特性探究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- Zhai W D. Study on the Surface Quality and Surface Material Flow Behavior During Ultrasonic-assisted Incremental Sheet Forming of Aluminum Alloy Sheets [D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [22] Yang M S, Bai L, Lin Y B, et al. Research on the radial accuracy of ultrasonic vibration-assisted single point incremental forming parts [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2019, (3): 1–9.
- [23] 李燕乐, 陈晓晓, 李方义, 等. 金属板料数控渐进成形工艺的研究进展 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (1): 1–9.
- Li Y L, Chen X X, Li F Y, et al. Research development on incremental sheet metal forming process [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9 (1): 1–9.
- [24] Allwood J M, King G P F, Duffou J R. A structured search for applications of the incremental sheet forming process by product segmentation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 219 (2): 239–244.
- [25] Micari F, Ambrogio G, Filice L. Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: State of the art and future trends [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191 (1–3): 390–395.
- [26] 龚攀. 基于闭环控制的板料数控渐进成形回弹补偿 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- Gong P. Springback Compensation Strategy of Sheet Metal CNC Incremental Forming Based on Closed-loop Control [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [27] Shayti M, Bahloul R, Belhadjsalah H. Efficiency of optimization algorithms on the adjustment of process parameters for geometric accuracy enhancement of denture plate in single point incremental sheet forming [J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32 (13): 8829–8846.
- [28] Neveux T C, Roth J T, Ragai I. Springback induced in single point incrementally formed 2024-T3 aluminum of various thicknesses [A]. The 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference [C]. Virginia: ASME, 2016.
- [29] Pacheco P A P, Silveira M E. Numerical simulation of electric hot incremental sheet forming of 1050 aluminum with and without preheating [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94 (9–12): 3097–3108.
- [30] Li Z F, Lu S H, Zhang T, et al. 1060 Al electric hot incremental sheet forming process: Analysis of dimensional accuracy and temperature [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71 (4): 961–970.
- [31] Behera A K, Ou H G. Effect of stress relieving heat treatment on surface topography and dimensional accuracy of incrementally formed grade titanium sheet parts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87 (9–12): 3233–3248.
- [32] Wang H Y, Zhang R F, Zhang H, et al. Novel strategies to reduce the springback for double-sided incremental forming [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96 (1–4): 973–979.
- [33] Praveen K, Lingam R, Venkata Reddy N. Tool path design system to enhance accuracy during double sided incremental forming: An analytical model to predict compensations for small/large components [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 510–523.
- [34] Peng W X, Li M, Lu B, et al. Experimental and finite element investigation of over-bending phenomenon in double-sided incremental forming (DSIF) of aluminium sheets [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 29: 59–66.
- [35] Trzepieciński T, Kubit A, Dzierwa A, et al. Surface finish analysis in single point incremental sheet forming of rib-stiffened 2024-T3 and 7075-T6 alclad aluminium alloy panels [J]. Materials, 2021, 14 (7): 1640.
- [36] Wang Z W, Cai S, Chen J. Experimental investigations on friction stir assisted single point incremental forming of low-ductility aluminum alloy sheet for higher formability with reasonable surface quality [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 277: 116488.
- [37] 徐青. 金属板料单点增量成形的摩擦机理及影响研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- Xu Q. Research on the Friction Mechanism and Influence of Single Point Incremental Forming of Sheet Metal [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [38] Durante M, Formisano A, Boccarusso L, et al. Influence of cold-rolling on incremental sheet forming of polycarbonate [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2020, 35 (3): 328–336.
- [39] 宋修成. 板料数控渐进成形件的表面质量控制技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- Song X C. Research on Surface Quality Control in Incremental Sheet Forming [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [40] Azevedo N G, Farias J S, Bastos R P, et al. Lubrication aspects during single point incremental forming for steel and aluminum materials [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16 (3): 589–595.
- [41] Li Z F, Lu S H, Zhang T, et al. A simple and low-cost lubrication method for improvement in the surface quality of incremental sheet metal forming [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71 (7): 1715–1719.
- [42] 范国强, 高霖, 李万军, 等. TC4 板料电辅助加热数控渐进成形时摩擦和润滑的研究 [J]. 机械科学与技术, 2010, 29 (2): 201–205.
- Fan G Q, Gao L, Li W J, et al. A study of the friction and lubri-

- cation in electric hot incremental forming of TC4 sheet [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29 (2): 201-205.
- [43] 卢仁伟, 高霖, 史晓帆. 0Cr18Ni9 板料数控渐进成形润滑技术研究 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31 (4): 597-599.
- Lu R W, Gao L, Shi X F. A lubrication technology for incremental forming of 0Cr18Ni9 stainless steel [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31 (4): 597-599.
- [44] Maaß F, Hahn M, Tekkaya A E. Interaction of process parameters, forming mechanisms, and residual stresses in single point incremental forming [J]. Metals, 2020, 10 (5): 656.
- [45] 光凯惠, 姚运飞, 吴田莉, 等. TC4 钛合金板电磁感应加热渐进成形的成形极限研究 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (5): 86-89.
- Guang K H, Yao Y F, Wu T L, et al. Study on forming limit of incremental forming of TC4 titanium alloy sheet by electromagnetic induction heating [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (5): 86-89.
- [46] Ajay C V. Prediction of forming force in incremental forming of Ti-6Al-4V alloy material [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 39: 1594-1599.
- [47] Xiao X, Kim J J, Hong M P, et al. RSM and BPNN modeling in incremental sheet forming process for AA5052 sheet: Multi-objective optimization using genetic algorithm [J]. Metals, 2020, 10 (8): 1003.
- [48] 毛志翔, 鲁世红, 李正芳, 等. 电加热渐进成形工艺参数优化及成形温度预测 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (19): 100-103.
- Mao Z X, Lu S H, Li Z F, et al. Optimization of process parameters and prediction of forming temperature for electro-heating incremental forming [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (19): 100-103.
- [49] Kumar A, Gulati V, Kumar P, et al. Parametric effects on formability of AA2024-O aluminum alloy sheets in single point incremental forming [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8 (1): 1461-1469.
- [50] Baharudin B T H T, Azpen Q M, Sulaima S, et al. Experimental investigation of forming forces in frictional stir incremental forming of aluminum alloy AA6061-T6 [J]. Metals, 2017, 7 (11): 484.
- [51] Ou L, An Z G, Gao Z Y, et al. Effects of process parameters on the thickness uniformity in two-point incremental forming (TPIF) with a positive die for an irregular stepped part [J]. Materials, 2020, 13 (11): 2634.
- [52] Attanasio A, Ceretti E, Giardini C. Optimization of tool path in two points incremental forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177 (1-3): 409-412.
- [53] 朱虎, 敖成. 成形轨迹对数控渐进成形质量的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 64-69.
- Zhu H, Ao C. Influence of forming track on CNC progressive forming quality [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 64-69.
- [54] Li X Q, Han K, Xu P, et al. Experimental and theoretical analysis of the thickness distribution in multistage two point incremental sheet forming [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107 (1-2): 191-203.
- [55] Lingam R, Prakash O, Belk J H, et al. Automatic feature recognition and tool path strategies for enhancing accuracy in double sided incremental forming [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88 (5): 1639-1655.
- [56] Moser N, Zhang Z X, Ren H Q, et al. Effective forming strategy for double-sided incremental forming considering in-plane curvature and tool direction [J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2016, 65 (1): 265-268.
- [57] Xu D K, Lu B, Cao T T, et al. Enhancement of process capabilities in electrically-assisted double sided incremental forming [J]. Materials & Design, 2016, 92: 268-280.
- [58] 张欢. 面向工艺特征的铝合金钣金件渐进成形技术与变形特性分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- Zhang H. Process Development and Deformation Characteristics Analysis on Feature-oriented Incremental Sheet Metal Forming of Aluminium Alloy [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [59] Lamminen L. Incremental sheet forming with an industrial robot-forming limits and their effect on component design [J]. Advanced Materials Research, 2005, 6: 457-464.
- [60] Dufflou J R, Callebaut B, Verbert J, et al. Laser assisted incremental forming: Formability and accuracy improvement [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56 (1): 273-276.
- [61] Meier H, Zhu J, Buff B, et al. CAX process chain for two robots based incremental sheet metal forming [J]. Procedia CIRP, 2012, 3: 37-42.
- [62] 毛锋, 莫健华, 黄树槐. 金属板材数控无模成形机及其应用程序开发 [J]. 锻压机械, 2002, (2): 38-41.
- Mao F, Mo J H, Huang S H. CNC sheet forming machine without die&development of its application program [J]. Metalforming Machinery, 2002, (2): 38-41.
- [63] Liu R Z, Lu B, Xu D K, et al. Development of novel tools for electricity-assisted incremental sheet forming of titanium alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85 (5-8): 1137-1144.
- [64] Nasulea D, Oancea G. Achieving accuracy improvements for single-point incremental forming process using a circumferential hammering tool [J]. Metals, 2021, 11 (3): 482.
- [65] 张春. 自阻电加热渐进成形温度控制系统的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- Zhang C. Research on Temperature Control System of Self-resistance Electrical Heating Incremental Forming [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [66] 李华溢. 基于可成形性的数控渐进成形轨迹生成与规划 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
- Li H Y. NC Incremental Forming Path Generation And Planning Based on Form-ability [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016.
- [67] 崔超. 基于 PMAC 的渐进成形数控系统研究与开发 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- Cui C. Research and Development of CNC System for Incremental Forming based on PMAC [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.