力-位移分控多点成形新工艺及其回弹控制机理

郑楠, 贾彬彬, 王卫卫

(哈尔滨工业大学(威海),山东 威海 264209)

摘要:目的 对比研究力-位移分控多点弯曲成形的受力和变形特点,揭示力-位移分控多点成形技术改善成 形质量的机理。方法 首先设计制造出采用力-位移分控多点成形原理成形的实验装置,并进行圆柱面的实际 成形,比较不同成形模式下所获得成形制件的差异,然后采用理论分析和数值模拟等手段,分析对比不同 成形模式的受力与变形条件,探讨不同成形模式下的变形特点与规律。结果 从理论上给出了力-位移分控多 点成形能有效减小回弹、消除"直边效应"的力学原理,指出了力-位移分控多点成形技术减小回弹的根本 原因在于法向约束力的作用,且回弹减小量与法向约束力的大小成正比,并通过数值模拟,从应力和应变 分布、支反力变化等方面予以了验证。结论 力-位移分控多点成形从本质上改变了板材的受力和变形条件, 能有效提升成形质量。

关键词:力-位移分控;多点成形;板材成形;回弹 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.04.004 中图分类号:TG386 文献标识码:A 文章编号:1674-6457(2017)04-0025-06

A Novel Forming Technology for Multi-point Forming with Individually Controlled Force-displacement and the Mechanism of Controlling Springback

ZHENG Nan, JIA Bin-bin, WANG Wei-wei

(Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

ABSTRACT: The paper aims to make a comparative study on stress and deformation characteristics of multi-point forming with individually controlled force-displacement (MPF-ICFD) and reveal the mechanism of the improvement of forming quality in MPF-ICFD. The experimental device of MPF-ICFD was designed and manufactured firstly and the actual forming of cylinder surface was conducted. The differences between the forming parts under different forming modes were compared and then the stress and deformation conditions were analyzed and compared respectively by means of theoretical analysis and numerical simulation. In addition, the deformation characteristics and regulars of different forming modes were discussed so as to reveal the mechanism of the improvement of forming quality in MPF-ICFD. The mechanics principles of effective decrease of springback and elimination of the "straight edge effect" in MPF-ICFD was the effect of the normal constrained force and that the fundamental reason for the decrease of springback in MPF-ICFD was the effect of the normal constrained force and that the amount of springback was proportional to the magnitude of the normal constrained force. The results were verified in aspects of the stress and strain distribution as well as the variation of reaction force by numerical simulation. MPF-ICFD are changes the stress and deformation condition of the sheet essentially and can improve the forming quality effectively.

KEY WORDS: individually controlled force-displacement; multi-point forming; sheet forming; springback

收稿日期: 2016-05-08

基金项目:国家自然科学基金(51175109,51505103)

作者简介:郑楠(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向为板材柔性成形新技术。

通讯作者:王卫卫(1958-),男,硕士,教授,主要研究方向为塑性成形新技术与装备。

曲面板件在航空航天、轮船舰艇、风力发电装置 等行业中广泛应用^[1-3]。这类零件一般都有复杂的三 维曲面造型,具有批量少、型号多、曲率小、尺寸大 的特点,采用传统冲压工艺生产往往会有周期长、成 本高等缺点,难以满足产品多样化、定制化的需求, 迫切需要探索新的成形技术,以提高生产效率、降低 生产成本。为此,发展出了很多新的柔性成形方法与 技术,这些技术大体上可分为2类:一类是无模成形 技术,如喷丸成形^[4]、单点渐进成形^[5]等;另一类是 模具可重构成形,如多点成形。

多点成形技术^[6-7]具有模具可重构、工艺周期 短、平均制造成本低等特点,适合于生产批量少、型 号多、曲率小的复杂三维曲面板材零件。与传统冲压 工艺类似,回弹是多点成形工艺中不可避免的现象。 针对多点成形中的缺陷控制问题,国内外科研工作者 进行了大量有效工作,但这些方法也存在各自的不 足,难以完全满足生产的需求。为克服这一问题,国 内外学者进行了多种方式的探索和研究,并提出了很 多解决方法,如采用回弹补偿^[8-9]、多点拉形^[10-11]、 逐步弯曲逼近^[12]等,但从应用效果来看,这些方法都 存在着不同程度的不足。回弹补偿需要准确掌握回弹 的大小与分布,这往往需要进行多次试验才能得到, 且往往随着材料的变化而变化;多点拉形需要采用拉 形设备,材料利用率很低;逐步逼近需要增加成形工 序,这会导致生产成本提高,生产效率降低。

文中介绍了"力-位移分控多点成形"这一新的多 点成形工艺^[13-15],该工艺通过将板材成形所需的位 移和作用力分离并分别控制,在同样具有模具可重构 柔性特点的基础上,实现了在板材成形的全过程中, 对板料的全部表面施加法向约束力,使板材获得全新 的受力模式,板材的变形过程由传统的局部约束、整 体变形,改变为整体约束、局部变形,大幅度强化了 变形过程的控制能力,有效减小了回弹、抑制了常规 多点成形中的"直边效应",可显著改善成形质量。文 中采用不同成形工艺进行了圆柱面的成形实验,给出 了成形结果,分别从板材受力分析、数值模拟等方面 探讨了该工艺的成形特点,揭示了力-位移分控多点 成形技术抑制回弹、控制"直边效应"的机理。

1 成形原理

力-位移分控多点成形的工作原理见图 1。成形装置由高度可调的上基本体群和由液压缸支撑的下基本体群构成,板料被夹持在上、下基本体之间,通过液压缸控制作用在板料上的法向力,每个基本体的头部都安装有可自由摆动的半球较压头,成形前,按照拟成形曲面,调节上部调节螺栓的高度,使调节螺栓构成的曲面为拟成形曲面的对称面,液压缸充液使下

基本体向板料加压,将板料夹紧在上、下基本体之间, 其状态见图 1a。开始成形后,压板下行,首先推动 外侧最高点的上基本体向下运动,板料由此开始变 形,对应的下基本体被推动下移,随着压板继续下行, 相邻基本体逐次向下运动,直到压板运动到限位螺栓 的位置,完成成形,见图 1b。



a 初始状态



b 成形终了



在该方法中,通过调整上部基本体的相对高度, 控制每个基本体的位移量,可构成任意三维曲面,因 此,具备良好的模具重构和柔性成形能力;成形时作 用在板料上的作用力由下部液压缸控制,可在成形的 不同阶段对板料施加不同的成形力,以适应成形要 求;可转动半球铰式冲头将对成形力分摊到板料表 面,并在成形的全过程中对板料的全面积施加法向约 束,因此,该方法将板料成形所需的运动和对板料的 作用力进行分离并分别控制,且控制方式简单可靠, 能对板料产生可调可控的全过程、全面积的法向约

第9卷 第4期

束,大幅度强化对板料的约束,提高成形能力。

2 实验

依据前述成形原理,自行设计制造的试验装置见 图 2,该装置由液压站、控制柜、多点模具 3 大部分 组成,多点模具主要包括调节螺栓、基本体、液压缸 及辅助机构,成形面尺寸为 200 mm×200 mm,液压 缸和上下基本体数量均为 100,液压缸活塞和调节螺 栓行程为 0~50 mm,每个液压缸可调节的压力为 0~2800 N,半球铰压头半径为 9 mm。

实验材料为 Q295 钢板,其屈服强度为 346.85 MPa,弹性模量为 196.17 GPa, 泊松比为 0.28,硬化 指数为 0.18。分别采用常规多点成形和力-位移分控 多点成形进行曲面的成形,坯料尺寸为 200 mm×200 mm,成形目标半径为 200 mm 的曲面。



图 2 力-位移分控多点成形实验装置 Fig.2 Experimental setup of MPF-ICFD

3 结果与讨论

3.1 圆柱面的成形效果

不同成形方式的成形效果显著不同。圆柱面是最 典型的弯曲成形曲面之一,其成形缺陷主要是由于成 形后的回弹导致板件曲面精度不足。力-位移分控多 点成形与常规多点成形的圆柱面曲面件对比见图 3, 材料为 Q295 钢板,板厚为 2 mm。由图 3 可见,采 用力-位移分控多点成形,无论是心部优先成形还是 边部优先成形,其成形效果都要优于常规多点成形。

力-位移分控多点成形能有效减小回弹。采用传统的回弹量表示方法,回弹量计算见图 4,采集回弹后曲面中心线上的点,将其与目标曲面中心线绘制在同一坐标系中,过 n 点作垂直于 x 轴的垂线,分别与目标曲面和回弹后曲面相交,两交点纵坐标差值 *Δy*_n=y_n'-y_n,即为 n 点的回弹量。



图 3 圆柱面成形结果 Fig.3 The experimental results of cylinder surface



图 4 回弹量计算 Fig.4 The schematic diagram of springback calculation

2种不同成形方式下的回弹位移曲线见图 5,可以 看到,相同成形力条件下,力-位移分控多点成形获得 的曲面制件的回弹量明显小于常规多点成形曲面的回 弹量,最大回弹位移减小量达到 76%,这说明力-位移 分控的成形方式能够较好地减小和抑制回弹。同时, 对比 2条回弹曲线还可看到,在常规多点成形中,其 回弹位移随着距板料对称中心位置的增加而显著增 大,证实了常规多点成形中存在的"直边效应",即弯 曲件中心部位的曲率半径小,距中心越远,曲率半径 越大,而力-位移分控多点成形中,曲面的回弹相比更 加均衡,在板材的最外侧回弹位移量基本不变,表明 力-位移分控多点成形能有效消除"直边效应"。





3.2 力-位移分控多点成形的受力特点分析

法向压力的作用会导致力-位移分控多点成形的

回弹减小。由塑性力学可知,板材的弯曲回弹可通过 其回弹前后的曲率变化计算,见式(1),可知,回弹的 大小与弯曲力矩成正比。

$$\Delta k = \frac{1}{R} - \frac{1}{R'} = \frac{2M}{EWt} \tag{1}$$

式中: *R* 与 *R* '分别为回弹前、后板材的曲率半径; *E* 为材料弹性模量; *M* 为板材弯曲时所承受的弯曲力 矩; *W* 为板材的抗弯模量, *W=Bt*²/6; *B* 和 *t* 分别为板 料宽度和厚度。

常规多点成形或常规冲压条件下的弯曲力矩可 用式(2)计算(忽略材料的变形硬化)。

$$M_0 = W\sigma_s \left(\frac{3}{2} - \frac{2\sigma_s^2 R^2}{E^2 t^2}\right)$$
(2)

在力-位移分控多点成形条件下,板料的全面积 全程都受法向约束力作用,可近似认为法向约束力均 匀作用在板料表面,形成法向约束压强 *p*。此压强(或 力)的作用导致板材受到的弯曲力矩发生了改变,由 法向约束力所引起的弯矩改变量 Δ*M*₁的计算见式(3)。

$$\Delta M_{1} = -Wp \left[\frac{3}{2} - \frac{6\sigma_{s}^{2}R^{2}}{E^{2}t^{2}} + \frac{R^{2}p(3\sigma_{s} - p)}{E^{2}t^{2}} \right]$$
(3)

由式(3)可以看到, ΔM₁使弯曲力矩发生了减小, 且此减小量基本与法向约束压强 p 成正比,即法向约 束力越大,板料成形后的回弹越小。另一方面,板材 在弯曲成形时会发生向内的收缩,从而在法向约束力 和摩擦的作用下,在板料的表面形成与板料滑动方向 相反的摩擦力,此作用力在板料内部形成附加拉力, 若设基本体与板料表面间的摩擦因数为 μ,则可近似 求得,在距板材弯曲中心线 x 处,此附加拉力见式(4)。

$$\Delta T = 2\mu p B \left(\frac{L}{2} - x\right) \tag{4}$$

在此附加拉力的作用下,弯曲力矩也会发生变 化,其变化量 Δ*M*₂ 见式(5)。

$$\Delta M_2 = -\frac{\sigma_{\rm s} R^2 \Delta T^2}{B t^2 E^2} \tag{5}$$

式中: L 为板料长度; x 为距板料中心的距离。 由式(5)可以看到, ΔM₂也使弯曲力矩减小,即使回弹 减小,且此减小量与附加拉力的平方成正比,由于附 加拉力正比于法向约束压强 p 和板料与基本体之间 的摩擦因数 μ,故法向约束压强 p 越大、摩擦因数 μ 越大,由附加拉力引起的弯曲力矩(即回弹)的减小 量也越大。因此,力-位移分控多点成形能有效减小 回弹,其减小作用是由法向约束力作用所产生的,且 与法向约束力成正比、与附加拉力的平方成正比。

力-位移分控多点成形消除了常规多点成形中的 "直边效应"。在常规多点成形(见图 6)中,模具的 成形面是固定的,成形过程类似于常规冲压成形,虽 然板材是整体弯曲,但板材只有局部范围能被模具成 形面约束,只有到了成形最终位置才能被全部约束, 因此,板材的变形是局部约束条件下的整体变形,由 于受力条件的限制,板材的边部弯曲力矩小,难以获 得足够的塑性变形,导致所成形的柱面件中心部位成 形较好,但越靠近边部有效塑性变形越小、成形越差, 而产生所谓的"直边效应"。



图 6 常规多点成形原理 Fig.6 The schematic diagram of multi-point forming

在力-位移分控多点成形条件下,板材的受力和 变形过程有很大的不同,由图 1 的成形原理可以看 到,板材从变形开始到变形结束,始终处于上、下基 本体的夹持约束之下,而板材的变形则是在法向全约 束的条件下逐次进行,板材的受力和变形更加均匀, 因而板材获得的塑性变形量大而回弹小。

数值模拟所得不同位置的基本体与板材间的支 反力在不同变形时刻的分布见图 7,可以看到,常规 多点成形无论是在板材的边部还是心部,在绝大多数 时刻,基本体对板料的作用力都很小,只有在接近于 最终成形的行程终点才有较大的作用力,且此作用力 明显存在着中心大、边部小的分布特点,必然导致板 材的中心区域作用有较大的弯曲力矩,并能获得较大 的塑性变形,而在板材的边部只能产生很小的弯曲力 矩,故难以获得大的塑性变形而回弹较大。对于力-位移分控多点成形,无论是在板材的边部还是心部, 在变形的全过程中基本体都对板料施加有较大的作 用力,这就保证了板材在变形中承受了较为均匀的变 形弯矩,进而获得均匀的变形,实际上消除了产生"直 边效应"的力学条件。

力-位移分控多点成形的板材可获得更大、更均 匀的有效塑性变形。数值模拟的板材弯曲到终点回弹 前的 Mises 应力分布见图 8,对比分析常规多点成形 和力-位移分控多点成形的应力分布可以看到,常规 多点成形中最大 Mises 应力为 337 MPa,集中分布在 板材两侧的条状区域,但其他区域应力值都很低,并 且应力分布显著不均匀;在力-位移分控多点成形中, 高应力区的范围明显扩大且分布更加均匀,最大 Mises 应力达到了 422 MPa,较常规多点成形提高了 25%,说明在力-位移分控多点成形条件下,板材的受







力状态获得了显著的改善,更多的区间进入塑性变形,能获得更大的变形量而减小了回弹。

弯曲成形回弹后板材内的等效塑性应变分布见

图 9,可以看到,在常规多点成形中,塑性变形总量 偏小,主要分布在板材的中间部位,而两侧的区域获 得的塑性应变小且不均匀,从而导致了"直边效应"。 在力-位移分控多点成形中,塑性变形总量有显著增 大,最大等效塑性变形量增加了1倍以上,且板材中 心线的两侧的变形量更大,这直接导致板材远离中心 的部位能获得更大的变形,因而消除了"直边效应"。





4 结论

 采用力-位移分控多点成形模式成形圆柱面, 能获得远优于常规多点成形的成形效果,板材的变形 量更大、回弹更小,最大回弹位移减小量达到了76%, 且消除了常规多点成形中的"直边效应",显著提高了 曲面的成形质量。

2) 在力-位移分控多点成形中,板材的受力和变形过程与常规多点成形有很大的不同,从变形开始到变形结束板材始终处于上、下基本体的夹持约束之下,板材的变形由常规多点成形(或模具成形)的局部约束整体变形,改变为在法向全约束的条件下整体约束局部变形。

3) 力学分析表明,力-位移分控多点成形在抑制 回弹方面具有本质的优势,即成形时在板料上全面积 全过程作用的法向约束力和由此产生的附加拉力是 减小回弹的根本原因,且回弹减小量与法向约束力的 大小成正比、与附加拉力的平方成正比。

4) 与常规多点成形相比,采用力-位移分控多点 成形时,由于板材全面积上始终受到基本体法向约束 的作用,保证了板料各部位的受力均匀和稳定,使板 料内部产生了更大的应力,最大 Mises 应力提高了 25%,板料所获得的变形更大、更均匀。

参考文献:

- 曾元松. 先进航空板材成形技术应用现状与发展趋势
 [J]. 航空科学技术, 2012(1): 1-4.
 ZENG Yuan-song. Application and Development Trend of Advanced Sheet Metal Forming Technology[J]. Aeronautical Science and Technology, 2012(1): 1-4.
- [2] 苏绍娟, 胡勇, 王呈方. 船体三维曲面外板成形工艺方法研究进展[J]. 中国造船, 2012, 53(2): 211—216.
 SU Shao-juan, HU Yong, WANG Cheng-fang. Research Progress of Three-Dimensional Plate Forming Methods for Ship Hull[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(2): 211—216.
- [3] 张昊晗,殷文齐,张忠顺,等.船用钢板多点成形试验研究[J].一重技术,2014(6):6—8.
 ZHANG Hao-han, YING Wen-qi, ZHANG Zhong-shun, et al. Multi-point Forming Test on Marine Steel Plates[J]. CFHI Technology, 2014(6):6—8.
- [4] 刘峰,鲁世红,张伟.超声波喷丸技术的研究进展[J]. 航空制造技术,2016(14):24—28.
 LIU Feng, LU Shi-hong, ZHANG Wei. Research Progress of Ultrasonic Shot Peening Technology[J].
 Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(14): 24—28.
- [5] 王华毕,桑文刚,魏目青. 金属板料单点渐进成形性能的研究[J]. 机械设计与制造, 2017(1): 108—111. WANG Hua-bi, SANG Wen-gang, WEI Mu-qing. Research of Sheet Metal Based on Single Point Incremental Formability[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(1): 108—111.
- [6] LI M Z, CAI Z Y, SUI Z, et al. Multi-Point Forming Technology for Sheet Metal[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(S1): 333–338.
- [7] 李明哲,崔相吉,邓玉山,等. 多点成形技术的现状与 发展趋势[J]. 锻压装备与制造技术, 2007, 42(5): 15— 18.

LI Ming-zhe, CUI Xiang-ji, DENG Yu-shan, et al. The

Current Status and Developing Tendency of Multi-point Forming Technique[J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2007, 42(5): 15–18.

- [8] ZHANG Q F, CAI Z Y, ZHANG Y, et al. Springback Compensation Method for Doubly Curved Plate in Multipoint Forming[J]. Materials & Design, 2013, 47(9): 377–385.
- [9] 张庆芳. 板料多点成形回弹补偿方法及其数值模拟与 实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014. ZHANG Qing-fang. Compensation Algorithm for Springback in Multi-point Forming and Its Validation by Numerical Simulation and Experimental Methods[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [10] WANG Y, LI M, LIU H, et al. Finite Element Simulation of Multi-gripper Flexible Stretch Forming[J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 2445—2450.
- [11] WANG Y, LI M Z. Research on Three-dimensional Surface Parts in Multi-gripper Flexible Stretch Forming[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(9): 1701–1707.
- [12] LI L, SEO Y H, HEO S C, et al. Numerical Simulations on Reducing the Unloading Springback with Multi-step Multi-point Forming Technology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(1): 45—61.
- [13] 崔爱爱,王卫卫,陈泽,等. 圆柱面力-位移分控多点成形的数值模拟研究[J]. 锻压装备与制造技术,2011(5):91—95.
 CUI Ai-ai, WANG Wei-wei, CHEN Ze, et al. Numerical Simulation on the Cylinder Surface in the Multipoint Forming with Individually Controlled Force-displacementl[J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2011(5):91—95.
- [14] 王卫卫,李颖,贾彬彬. 鞍面力-位移分控多点成形起 皱的数值模拟研究[J]. 锻压技术, 2015, 40(5): 22-27.
 WANG Wei-wei, LI Ying, JIA Bin-bin. Numerical Simulation on Wrinkle of Saddle Surface in the Multi-point Forming with Individually Controlled Force-displacement [J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(5): 22-27.
- [15] JIA Bin-bin, WANG Wei-wei. New Process of Multi-point Forming with Individually Controlled Force- displacement and Mechanism of Inhibiting Springback[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016: 1—10.