

引文格式: 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 section/asymmetric blanks[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(10): 68-73.

非圆截面/非对称板坯旋压技术研究现状及展望

贾震^{1,2}, 王诗琪¹, 李运涛²

(1. 沈阳航空航天大学, 沈阳 110136;
2. 空军航空大学初训基地, 锦州 121000)

[摘要] 旋压技术凭借高精度加工特性、出色工艺柔性、易于实现自动化操作, 以及显著的材料节约优势, 在航空、航天、汽车等工业领域获得了广泛的应用。随着工业生产中复杂形状零件工艺需求的持续增加, 非圆截面、非轴对称回转体的旋压技术应运而生。为了契合成形目标形状的金属流动趋势, 对传统圆形板坯进行了非圆截面加工、偏心装夹等预处理。此外, 考虑到单板尺寸的限制, 同时为了实现材料的有效节约, 拼焊板坯旋压技术的研究也逐渐兴起。与传统圆形板坯旋压相比, 非圆板坯旋压在一定程度上能够使旋压工艺更加稳定, 不仅可以有效消除法兰, 还能改善壁厚分布不均匀等问题, 从而大幅提高了成形精度, 实现更为理想的成形效果。偏置板坯旋压技术适用于产品对壁厚均匀性和形状精度要求相对不高的情况, 偏置板坯旋压技术能够有效地节约材料, 显著提升生产效率。基于上述情况, 本文对上述两类预制板坯旋压技术的研究现状进行了系统综述, 并对预制孔板坯的旋压技术发展前景进行了展望。

关键词: 旋压; 非圆板坯 / 非对称板坯; 成形精度; 壁厚分布; 金属流动

中图分类号: V26; TG1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2025.10.068



贾震
教授, 博士, 研究方向为钣金件塑性成形。

旋压成形是实现薄壁回转体零件少/无切削加工的先进制造技术, 广泛应用于航空、航天、汽车等工业领域^[1]。同时, 作为一种经典的连续局部塑性成形技术, 旋压技术以产品精度高、工艺柔性好、易于实现机器自动化、节约材料等诸多优点, 成为精密塑性成形工艺的重要发展方向^[2]。例如, 飞机发动机机匣火焰筒、浆帽、头罩、鱼雷壳体、汽车尾管零件都采用了旋压技术。此外, 旋压技术是加工大直径薄壁无缝管材(特别是难变形材料)及超宽板材的有效方法之一^[3]。

起皱和破裂是破坏板坯旋压成形稳定性最为常见的两个问题, 诸多学者开展了相关研究。Hayama等^[4]认为, 起皱失稳的主要原因是旋压成

形过程中坯料所受到的切向压应力过大, 当外力作用引起变形区内的切向压应力超过了厚度方向上的失稳极限应力时, 材料就会在厚度方向上发生起皱现象。Watson等^[5]采用仿真及试验的方式, 对普通旋压成形法兰过程中的起皱现象展开研究, 发现当旋轮作用区与法兰边缘之间产生塑性铰时, 法兰产生起皱缺陷, 因此将变形区弹性应变能的振荡作为起皱发生的判据。引起被旋压工件破裂的原因有很多。仲听岳等^[6]指出, 轴向破裂是由于在旋压成形过程中, 坯料凸缘发生了起皱, 再进行旋压时, 起皱部分的材料发生了折叠, 进而引发了破裂现象。夏琴香等^[7]获得了适用于剪切旋压时的韧性断裂准则, 为金属剪切旋压成形破裂的

精确预测奠定了理论基础。

在实现旋压稳定成形的基础上,成形精度和壁厚均匀性问题是该技术关注的焦点。孙于晴等^[8]确定了7055 高强铝合金筒形件成形精度最佳的温度区间、旋轮圆角半径、进给率,并且实现了7055 高强铝合金筒形件8.0~1.6 mm 壁厚的多道次、大减薄量的精确旋压成形。Li 等^[9]提出了一种考虑固体介质中超声波能量衰减特性的超声波辅助旋压建模方法,建立了相应的仿真模型,探索了超声波振幅对内肋旋压成形精度的影响规律。赵琳瑜等^[10]发现,薄壁圆筒台阶宜采用一次旋压成形,并确定了其成形精度的最佳进给比、旋轮圆角等参数,实现了在不同减薄率下,圆筒模拟成形过程保持稳定状态。朱恩锐等^[11]建立了TB6 钛合金筒形件旋压成形工艺模型,分析了工件在旋压过程中的受力和变形特性,并研究了减薄率、变形温度、主轴转速和旋轮进给率等工艺参数对旋压过程中等效应力、等效应变的影响规律,最后选出了最佳的旋压工艺参数并实现精确成形。

旋压作为一项复杂的工艺,成形过程中金属的流动是影响成形稳定性、成形精度、壁厚均匀性等的关键因素。旋压成形的原理:旋轮进给过程中,在旋轮的挤压作用下,通过有效的金属流动实现工件的稳定成形,在此基础上实现更高精度及更均匀壁厚分布的精准成形。随着数控技术的发展,非圆截面与非轴对称锥台形状的旋压技术研究成为近年来的研究热点^[12-13]。为了契合旋压成形过程中目标形状的金属流动趋势,抑制起皱和破裂缺陷,研究人员对传统圆形板坯进行预加工或处理使其转变为相应的非圆或非轴对称形态^[14-15]。

综上,本文将对非圆、偏心放置及拼焊3类预制板坯旋压的稳定性工艺方法、成形精度与壁厚均匀性等

相关研究开展论述。

1 非圆板坯旋压

非圆截面锥台形薄壁件旋压以旋轮代替了传统压力拉深成形的凹模(无芯模旋压情况下,凸、凹模皆被代替),大幅提高了此类形状零件制造的柔性化程度,目前该工艺已得到广泛研究。当采用传统圆形板坯进行非圆截面旋压时,已成形成部分的形状与未成形法兰之间匹配程度较弱。因此,许多学者以相应形状的板坯替代圆形板坯进行旋压。

1.1 方形板坯

1.1.1 稳定旋压工艺方法

贾震等^[14]围绕非圆截面板坯(方形板坯)展开研究,并引入圆形截面板坯进行对比。将方形截面的单边(工件旋转90°)设为一层,采用边长逐层增加的方案解析方形截面无模

旋压路径,如图1所示。通过几何推导,获得了任意旋压深度的旋轮运动轨迹方程,并在PS-CNCXY600-5型五轴数控金属旋压机上分别进行了圆形板坯和方形板坯的试验,试验所得试件如图2所示。可以发现两种板坯都可成形“金字塔”形的方形截面零件,在旋压深度达到40 mm时,试件表面没有破裂现象,“金字塔”部分未见褶皱。在此旋压深度下,两板坯未参与变形的法兰部位产生了褶皱,并随着旋压深度增加,起皱程度也加剧,直至旋压条件失稳。

1.1.2 成形结果与分析

在获得方形截面旋压试件后,记录旋压深度达到40 mm时,采用圆形板坯与方形板坯两工况下试件法兰翘曲最严重处的3个褶皱高度值,褶皱高度值越小代表后续可旋压深度越大。试验发现,方形板坯的后续

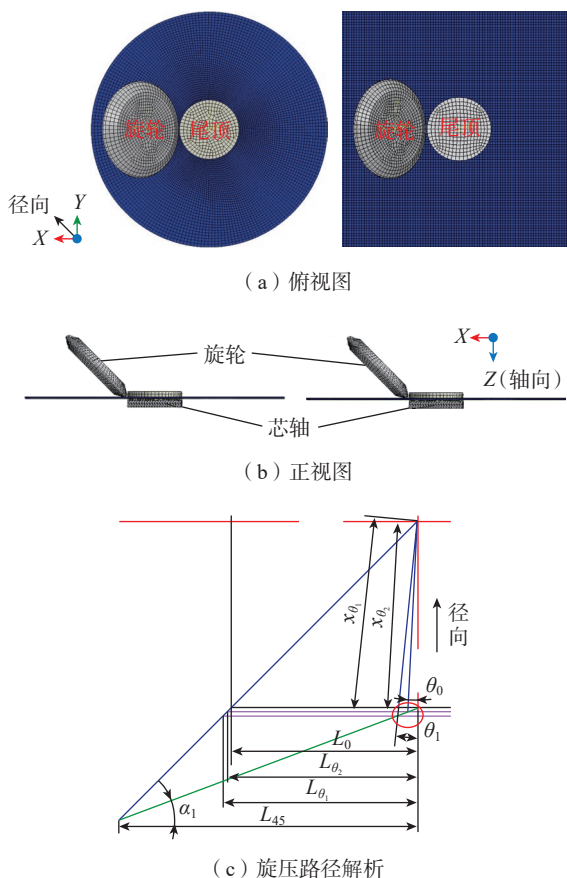
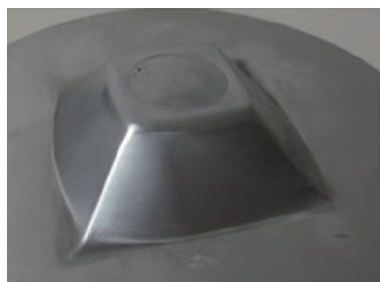


图1 方形截面无模旋压工艺装配示意图及旋压路径解析^[14]

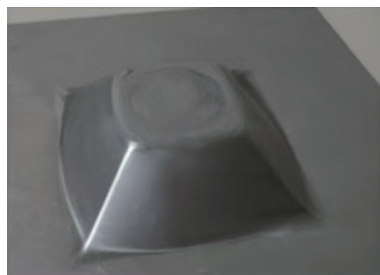
Fig.1 Diagram of square cross section die-less spinning assembly and roller path analysis^[14]

可旋压性能明显好于圆形板坯。在旋压试验的基础上,贾震等^[14]建立了圆形与方形板坯的方形截面无模旋压有限元模型,并对这两种板坯旋压试验及模拟所得结果中的顶面和底面8条棱边长度进行了对比。试验发现,试验和模拟所得结果相差不超过5%;验证了有限元模型的可信性后,利用模拟手段对两种板坯旋压的金属流动进行了对比分析,方形板坯工况可旋压性能较好,原因为旋压过程中剩余的方形法兰与方形截面旋压路径契合较好,有利于其金属的均匀分布。

因此成形过程中,径向金属更多的流向已变形部分,减少了在剩余法兰区域的堆积,从而得到壁厚分布更均匀的工件。对比相同旋压深度下法兰褶皱的大小,以此来评估方形截面无模旋压的可旋性,发现相较于传统圆形板坯,方形截面板坯在此工艺中更具优势。由此可见,在特殊的旋压工艺条件下,可对板坯进行适应性预处理,以此调控成形时的金属流动,从而获得较优的工艺条件和理想的成形结果。



(a) 圆形板坯



(b) 方形板坯

图2 方形截面无模旋压试件^[14]

Fig.2 Square section die-less spun workpieces^[14]

1.2 圆弧边三角形板坯

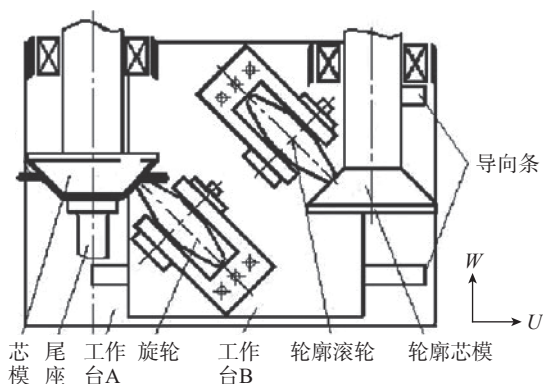
1.2.1 稳定旋压工艺方法

Xia等^[15]在基于轮廓驱动的非圆形旋压设备上进行了三角形截面空心件旋压试验,如图3所示。其中旋压芯模安装在主轴上,在旋压过程中与主轴一起旋转。轮廓芯模由一对齿轮驱动,并与旋压芯模同步旋转。旋压滚轮固定在工作台B上。滚轮的进给运动,是工作台A在伺服执行器的驱动下沿W轴方向运动,以及工作台B在轮廓芯模的驱动下沿导向条U轴方向运动共同作用的结

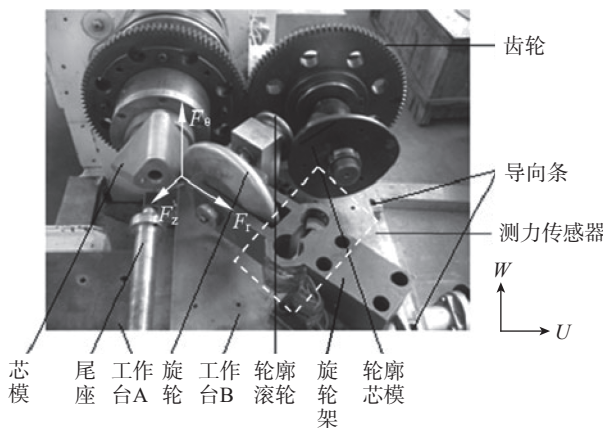
果。滚轮与旋压芯模之间的间隙由轮廓芯模精确控制,使其与旋压件的壁厚相同。在滚轮座内设计了一个弹性测量组件,该组件配备有4个八边形环式传感器,基于电测方法对旋压力进行测量。

1.2.2 成形结果与分析

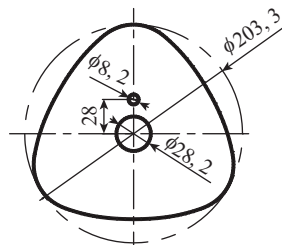
试验获得了如图4所示的去顶三角形锥台零件^[15]。可以看出,零件表面无褶皱或断裂缺陷,三角形截面的直边通过弧线相连,与板坯初始形状相吻合。试验发现,成形的3个旋压力分量中,轴向旋压力分量最大,



(a) 原理图



(b) 设备图



(c) 板坯形状和尺寸 (mm)

图3 圆弧边三角形板坯旋压工艺方法^[15]

Fig.3 Spinning process method for triangular slab with circular arc edges^[15]

切向力分量最小,且旋压力随芯模旋转角度(120°)周期性变化。最大旋压力随着旋轮进给速率的增加而增加,随着板坯厚度与直径比的增加而减少。

通过对三角形截面空心件的旋压力特性开展试验研究,分析旋轮进给速率、板坯厚度直径比和芯模转速等主要工艺参数对旋压力特性的影响,发现相较于传统圆形板坯,采用圆弧边三角形板坯可以减少起皱现象,有效消除法兰,显著提高成形精度,获得较好的成形效果。此外,三角形截面空心件的旋压工艺是对传统旋转工艺的一大突破。

1.3 八边形板坯

1.3.1 稳定旋压工艺方法

Keneshlou 等^[16]将八边形板坯装夹在传统车床的芯模与尾顶之间,采用手持工具杆的方式将旋转的板坯压靠在芯模上进行成形,如图5所示。板坯的材料为AL-1050铝合金,厚度分别选取1.1 mm、1.24 mm和1.6 mm 3种规格。为了降低起皱风险,并减少毛坯边缘对旋压工具的冲击,主轴转速设置较低(200 r/min以下)。此外,成形过程中还发现,大半径的旋压工具头利于吸收毛边冲击。

1.3.2 成形结果分析

Keneshlou 等^[16]用数值模拟方法仿真了旋压过程,研究了八边形板坯在旋压过程中的变形行为,如图6

所示。研究发现,壳单元能更好地预测回弹,而实体单元能更准确地预测应变。各向异性模型对小应变值的预测优于各向同性模型,但对大应变的预测不如各向同性模型准确。导致旋压件形状偏离理想形状的原因:边缘的特定物质流动和毛坯边缘几何形状产生的弯矩影响边缘应变的均匀性,在毛坯边缘不同位置产生不同的回弹值以及厚度分布的不均匀性。

将初始板坯从传统的圆形预制成八边形,随后进行旋压处理。通过这种方法,无需对旋压件进行额外的切削加工就可以获得波浪形的几何形状,并且该类零件的旋压工艺具有持续的稳定性,这对于提高“花边”回转体薄壁件的生产效率和降低成本具有重要意义。



图5 八边形板坯旋压试验装配和成形过程^[16]
Fig.5 Assembly diagram for octagonal blank spinning experiment and forming process^[16]



图4 去顶三角形锥台零件^[15]
Fig.4 Triangular frustum parts with the top removed^[15]



图6 八边形板坯旋压件^[16]
Fig.6 Octagonal blank spun workpieces^[16]

2 偏置板坯的非对称旋压

近年来,非对称旋压的相关研究逐渐成为热点。华南理工大学夏琴香等^[17-18]对三维非轴对称偏心类管件旋压成形时的变形力进行理论分析,利用有限元模型分析了非轴对称管件旋压的成形机理及缺陷产生的原因。此外,夏琴香等^[19]采用有限元模拟与试验相结合的方法,首次对非对称偏置管坯的多道次缩颈旋压做了相关研究。传统旋压的板坯置于芯轴/模的旋转中心,但随着同步旋压技术的发展,许多具有轴向非对称形状的产品也可通过旋压方法成形。

2.1 稳定旋压工艺方法

为了顺应金属流动趋势,Xiao 等^[20]提出了一种采用偏置板坯的同步多道次旋压方法来实现轴向非对称筒形件成形。旋压成形前,板坯中心与芯轴旋转中心之间设置偏移值 L 进行装夹,如图7(a)所示;采用PS-CNCXY600-5旋压机进行成形试验,该旋压机主轴的旋转和旋轮的轴向、径向运动全部由独立的伺服电机驱动,可实现主轴旋转角度与旋轮位移值的联动精确控制。利用公式 $\lambda=L/(R-r)$ 计算板坯的偏置率,其中, R 是板坯半径; r 是芯轴的半径。当 $\lambda=0$ 时,板坯中心与芯轴中心重合;当 $\lambda=1$ 时,板坯的边缘到达芯轴的边缘。随后,Xiao 等^[20]设计并解析了偏置板坯的旋压变形路径,如图7(b)所示,图中, f 为路径道次跨度。在此基础上,分别研究了不同板坯直径、厚度以及偏置率对成形精度与壁厚分布的影响规律。

2.2 成形结果分析

图8为不同偏置率下的旋压件,可以发现,旋压件一端为倾斜边缘,偏置率越大,倾斜角越大。试件壁厚在圆周方向上分布不均,短边处的壁厚值最小,长边处的壁厚值最大。由于材料的回弹,偏置率越大,筒形直径也越大。研究还发现,当 $\lambda>0$ 时,

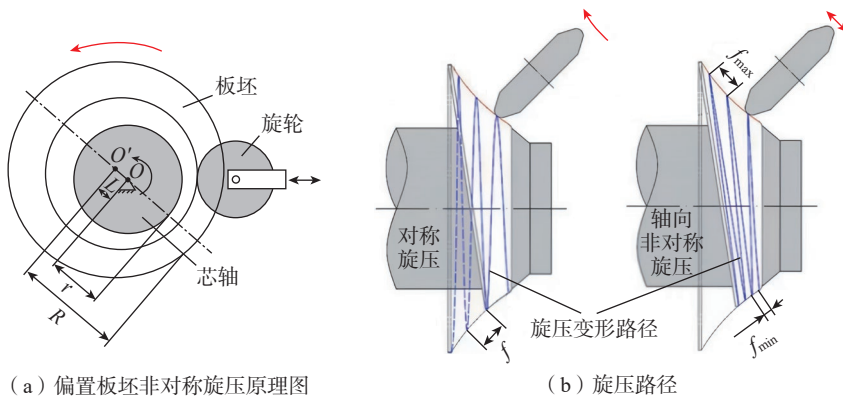


图7 偏置板坯非对称旋压原理图及旋压路径^[20]

Fig.7 Schematic diagram of asymmetric spinning of offset blank and spinning path^[20]

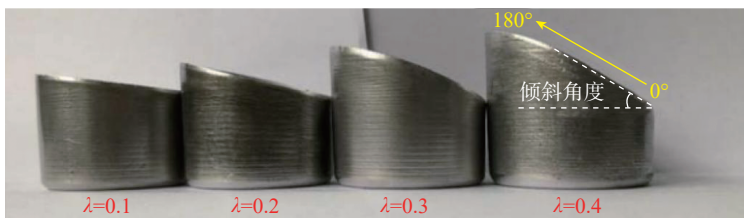


图8 轴向非对称筒形旋压件^[20]

Fig.8 Axially asymmetric cylindrical spun workpieces^[20]

壁厚从下端向上端增加,长、短边中间位置的筒壁壁厚轴向分布与 $\lambda=0$ 时(即筒形件多道次对称旋压)几乎一致。短边侧和长边侧壁厚分布差异随 λ 值增大而加剧。 λ 越大,筒形件的实测高度与预估值之间的偏差就越大。当使用较小的板坯厚度(t_0)时,旋压路径的道次数对成形极限的影响较大。随着 λ 和道次跨度 f 的增加,更容易发生起皱缺陷。当使用较大的 t_0 时,随着 λ 和 f 的增加,更容易发生断裂。因此与轴向非对称旋压相比,常规对称旋压由于路径道次分布均匀,产品两侧轴向厚度分布的差异较小,可获得较大的成形极限深度^[20]。

为了实现筒形件端部边缘倾斜的轴向非对称形状,在产品对壁厚均匀性和形状精度要求不高时,可采用偏置板坯的轴向非对称旋压方法,从而达到节材增效的效果。否则应采用常规旋压成形对称形状筒形件,然后再机械切削成轴向非对称筒形件的方法。

3 结论与展望

随着旋压技术的不断发展,方形截面旋压、非对称旋压等工艺方法应运而生。针对这些特殊目标形状,将传统的圆形板坯预制对应形状,可以使金属流动状态更好地契合旋压变形路径,进而提高旋压精度、壁厚分布均匀性、可旋压性能等。对于偏置板坯的轴向非对称旋压,偏置率越大,越不利于产品的成形精度和壁厚均匀性分布,但与先成形对称筒形件再切割的方法相比,具有节材增效的优势,实际生产中应进行权衡考虑。

如今,数字化技术蓬勃发展,有限元仿真模拟在预制板坯旋压工艺开发中发挥着日益关键的作用。通过建立精确的模型,能够直观地从应力-应变图中分析工件在旋压过程中内部受力的动态变化,进而针对性地调整工艺参数,如旋轮进给速度、板坯材质参数等,提前发现并解决潜在的破裂、起皱等问题,大幅提高生

产质量与效率。同时,借助互联网技术,实现对旋压设备的实时监控和全面数据采集,这些数据可用于深入分析生产过程,挖掘优化潜力,为生产流程的持续改进提供有力的数据支持。

参考文献

[1] XIA Q X, XIAO G F, LONG H, et al. A review of process advancement of novel metal spinning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 85: 100–121.

[2] MA F, YANG H, ZHAN M. Plastic deformation behaviors and their application in power spinning process of conical parts with transverse inner rib[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(1): 180–189.

[3] 侯红亮,王耀奇,李晓华,等.先进钣金成形技术在航空航天领域的应用(下)[J].金属加工(热加工),2008(15):50–51,74.

HOU Hongliang, WANG Yaoqi, LI Xiaohua, et al. Application of advanced sheet metal forming technology in the aerospace field (Part two)[J]. MW Metal Forming, 2008(15): 50–51, 74.

[4] HAYAMA M, MUROTA T, KUDO H. Deformation modes and wrinkling of flange on shear spinning[J]. Bulletin of JSME, 1966, 9(34): 423–433.

[5] WATSON M, LONG H. Wrinkling failure mechanics in metal spinning[J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 2391–2396.

[6] 仲昕岳,杜尚军,李志远,等.旋压成形过程缺陷控制方法及应用[J].精密成形工程,2020,12(6):169–174.

ZHONG Xinyue, DU Shangjun, LI Zhiyuan, et al. Defect control method and application of spinning forming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(6): 169–174.

[7] 夏琴香,周立奎,肖刚锋,等.金属剪切旋压成形时的韧性断裂准则[J].机械工程学报,2018,54(14):66–73.

XIA Qinxiang, ZHOU Likui, XIAO Gangfeng, et al. Ductile fracture criterion for metal shear spinning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 66–73.

[8] 孙于晴,贺永海,曹学文,等.7055高强度铝合金筒形件多道次旋压成形精度与缺陷控制[J].锻压技术,2023,48(10):177–181,199.

SUN Yuqing, HE Yonghai, CAO Xuewen, et al. Accuracy and defect control on multi-pass spinning for 7055 high-strength aluminum alloy cylindrical parts[J]. Forging & Stamping

Technology, 2023, 48(10): 177–181, 199.

[9] LI S L, ZHU Z W, ZHAO Y X, et al. Effect of ultrasonic attenuation characteristics on forming accuracy of ribbed cylindrical parts in ultrasonic-assisted spinning process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 134(1): 887–905.

[10] 赵琳瑜, 张锋, 写旭, 等. 带台阶圆筒旋压成形数值模拟及精度控制技术[J]. 金属加工(热加工), 2023(8): 119–123.

ZHAO Linyu, ZHANG Feng, XIE Xu, et al. Research on numerical simulation and precision control technology for spinning forming of cylinders with steps[J]. MW Metal Forming, 2023(8): 119–123.

[11] 朱恩锐, 崔霞, 郭陆陆, 等. TB6钛合金筒形件强力旋压成形工艺模拟[J]. 锻压技术, 2023, 48(2): 126–134.

ZHU Enrui, CUI Xia, GUO Lulu, et al. Simulation on power spinning process for TB6 titanium alloy cylindrical parts[J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(2): 126–134.

[12] 欧希斌. 多道次非圆横截面无芯模旋压技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.

OU Xibin. Research on multi-pass die-less spinning technology for non-circular cross-section[D]. Changchun: Jilin University, 2022.

[13] XUE K M, ZHOU J L, YAN S L, et al. Flow diversion mechanisms and control methodology in asymmetric spinning of special-shaped multi-wedge belt pulley[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(7): 5289–5302.

[14] 贾震, 李研, 韩志仁, 等. 板坯形状对方截面无模旋压轴向可旋深度的影响[J]. 中国机械工程, 2017, 28(18): 2262–2267.

JIA Zhen, LI Yan, HAN Zhiren, et al. Effects of sheet blank shapes on axial spinning depths of square section die-less spinning[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(18): 2262–2267.

[15] XIA Q X, LAI Z Y, LONG H, et al. A study of the spinning force of hollow parts with triangular cross sections[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9): 2461–2470.

[16] KENESHLOU M, BIGLARI F R, SHAFARIE M. A numerical and experimental analysis of noncircular blank spinning[J]. Journal

of Manufacturing Processes, 2023, 94: 159–182.

[17] 夏琴香, 张赛军, 梁佰祥, 等. 三维非轴对称偏心类管件旋压成形时的变形力分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(10): 200–204.

XIA Qinxiang, ZHANG Saijun, LIANG Baixiang, et al. Analysis on the spinning forces for 3D non-axisymmetrical thin-walled offset tubes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(10): 200–204.

[18] XIA Q X, CHENG X Q, LONG H, et al. Finite element analysis and experimental investigation on deformation mechanism of non-axisymmetric tube spinning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(1): 263–272.

[19] XIA Q X, XIE S W, HUO Y L, et al. Numerical simulation and experimental research on the multi-pass neck-spinning of non-axisymmetric offset tube[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206(1–3): 500–508.

[20] XIAO Y, HAN Z R, ZHOU S Y, et al. Asymmetric spinning for offset blanks[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(5): 2433–2448.

Research Status and Prospects of Spinning Technology for Non-Circular Section/Asymmetric Blanks

JIA Zhen¹, WANG Shiqi¹, LI Yuntao²

(1. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Air Force Aviation University Initial Training Base, Jinzhou 121000, China)

[ABSTRACT] The spinning technology, with its advantages of high precision, good process flexibility, ease of automation, and material savings, has been widely applied in industrial fields such as aerospace, aviation, and automotive. As the demand for processes continues to expand, spinning technology for non-circular cross-sections and non-axisymmetric rotational bodies has emerged. To adapt to the metal flow trends for forming target shapes, corresponding shapes such as non-circular cross-sections and eccentric clamping are used for pre-processing traditional circular blanks in spinning technology. Additionally, research on spinning technology for welded composite blanks, either for blank size or material-saving purposes, has also gained attention. Compared with traditional circular blanks, non-circular blank spinning can, to a certain extent, make the spinning process more stable. It can effectively eliminate flanges and reduce the uneven distribution of wall thickness, greatly improving the forming accuracy and achieving better-forming results. Offset blank spinning can be used when the product does not have high requirements for wall thickness uniformity and shape accuracy. It effectively saves materials and improves production efficiency. This paper reviews the current research status of two types of prefabricated blank spinning technologies and provides prospects for the spinning technology of prefabricated hole blanks.

Keywords: Spinning; Non-circular section/asymmetric blank; Forming accuracy; Wall thickness distribution; Metal flow

(责编 七七)