

文章编号:1006-2467(2019)01-0105-06

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.01.015

# 法兰约束条件下铝合金杯形件的旋压成形性能

刘若凡<sup>1</sup>, 于忠奇<sup>1</sup>, 赵亦希<sup>1</sup>, EVSYUKOV S A<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室, 上海 200240;

2. 莫斯科国立鲍曼技术大学 MT6 系, 莫斯科 105005)

**摘要:** 为了提高铝合金 2024-O 的旋压成形性能,通过试验研究了 2 种法兰约束(单边和双边)条件下杯形件的极限旋压比,并通过数值模拟研究了单边和双边法兰约束旋压成形中工艺参数对构件厚度的影响。结果表明:相对于传统的自由边旋压成形工艺,法兰约束旋压成形工艺可以提高极限旋压比,并且双边法兰约束比单边法兰约束的效果更佳;在相同的工艺条件下,双边法兰约束的构件壁厚比单边法兰约束的构件壁厚更均匀;在法兰约束的旋压成形中,板料与托辊(或旋轮端面)间的摩擦系数对构件壁厚几乎没有影响;随着旋轮端面与托辊的约束界面间隙增加,双边法兰约束的构件壁厚先减小,而后增大并趋于稳定。

**关键词:** 铝合金; 旋压; 法兰约束; 杯形件; 成形性能

**中图分类号:** TG 386.3 **文献标志码:** A

## Formability of Flange Constraint Spinning for Aluminum Cup Part

LIU Ruofan<sup>1</sup>, YU Zhongqi<sup>1</sup>, ZHAO Yixi<sup>1</sup>, EVSYUKOV S A<sup>2</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Digital Manufacturing for Thin-Walled Structure, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Faculty MT6, Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia)

**Abstract:** In order to improve the spin-ability of AA2024-O, the limiting spinning ratios under the two different flange constraints (the single-side, the double-side) in a cup-shaped spinning were experimentally studied. In addition, the influence of the process parameters on the thickness of the spun part in single-side and double-side flange constraint spinning processes was analyzed by numerical simulation. The results show that the flange constraint method can increase the limiting spinning ratio compared with conventional spinning, and the double-side flange constraint method can increase more than the single-side flange constraint method; the thickness uniformity of the spun part in the double-side flange constraint forming is better than that in the single-side flange constraint spinning under the same conditions. At the same time, the friction coefficient at the blank-roller interfaces has little effect on thickness in the flange constraint methods, and the thickness first decreases and then stabilizes with increasing of the gap value between the blank and rollers in the double-side flange constraint spinning.

**Key words:** aluminum alloy; metal spinning; flange constraint; cup part; formability

收稿日期:2017-07-23

基金项目:国家自然科学基金(51675333,51790175),国家重点基础研究发展规划(973)课题(2014CB046601)资助项目

作者简介:刘若凡(1993-),男,内蒙古赤峰市人,硕士生,主要从事铝合金旋压性能与工艺研究。

通信作者:于忠奇,男,副教授,电话(Tel.):021-34206785;E-mail:yuzhq@sjtu.edu.cn.

旋压成形是一种连续的局部塑性成形方法,具有成形力小、成形精度和生产效率高等优点,已被广泛用于航空航天领域的轴对称薄壁构件制造中。但是,这类构件具有较大径厚比(构件直径与壁厚的比值)的特点,在拉深旋压加工过程中容易出现法兰起皱现象,从而导致加工精度降低甚至无法成形合格零件。其主要原因是拉深旋压法兰产生了周向压应力,而且周向压应力的大小与成形工艺参数密切相关。文献[1-2]中通过试验研究了杯形件旋压成形中的法兰起皱缺陷以及缺陷出现的位置;文献[3-5]中利用数值模拟方法对大型铝合金壳体旋压缺陷的成因进行了分析;文献[6-8]中利用模拟和试验的手段研究了多道次轨迹设计与旋压法兰起皱的关系;本课题组前期也开展了拉深旋压法兰起皱的理论预测,并分析了进给比对球面铝合金构件起皱的影响[9]。

另外,旋压成形法兰起皱的发生不仅与周向压应力有关,而且受到法兰自身结构刚度的影响,增加法兰结构刚度可以降低起皱倾向,减少旋压成形的道次。基于此,史敏等[10]提出一种带挡板的单边法兰约束的旋压成形方法,以降低铝合金旋压成形中法兰起皱倾向;Ahmed 等[11]利用一种借助旋轮的双边法兰约束的旋压成形方法来抑制铝合金旋压成形中法兰起皱的发生;詹梅等[12]基于模拟方法研究了大型复杂壳体多道次旋压成形过程中的壁厚分布及工艺参数的影响规律;Long 等[13]对多道次杯形件在拉深旋压过程中的减薄区域进行模拟分析;Auer 等[14]将旋轮轨迹参数作为影响因素,利用主成分分析方法优化了锥形件旋压壁厚的均匀性。然而,所提及的单边、双边法兰约束方法对构件厚度分布的影响还不清楚,为此,本文在传统的旋压成形机上建立了上述 2 种法兰约束的旋压成形工艺,利用试验方法研究铝合金杯形件的极限旋压比,对比分析了 2 种法兰约束的旋压成形性能,并利用数值模拟方法分析了法兰约束参数对旋压构件厚度分布的影响,以为法兰约束的旋压成形工艺的实际应用提供依据。

## 1 试验方法与材料

本文以铝合金杯形件为例研究法兰约束条件对杯形件的旋压比和厚度分布的影响。旋压试验装置如图 1 所示。其中,铝板坯被夹持在转速可控的芯模上,旋轮和托辊装置沿芯模直壁按照给定的进给比向前运动,以完成旋压加工。如果将旋轮安装角  $\alpha$  设置在传统的位置(如  $40^\circ$ ),则变形材料的法兰仅与托辊相接触,称为单边约束旋压,如图 2(a)所示,

这种方法能够降低文献[10]中法兰滑动摩擦的不利因素;如果将  $\alpha$  调整到  $0^\circ$ ,则旋压板坯不仅与托辊相接触,而且受到来自于旋轮端面的法向约束,称为双边约束旋压,如图 2(b)所示,这种方法不仅避免了文献[11]中方法的约束界面间隙不可调的缺陷,而且降低了约束界面的滑动摩擦。

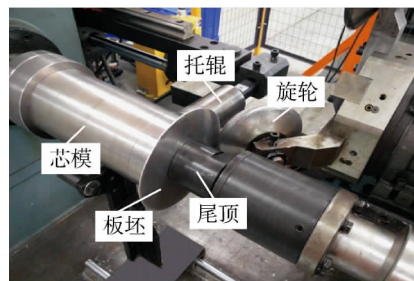


图 1 法兰约束的旋压装置

Fig. 1 Flange constraint spinning setup

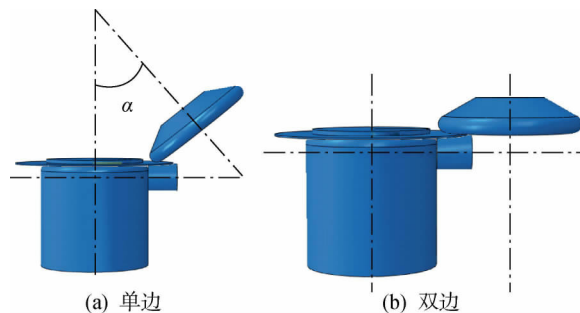


图 2 2 种法兰约束形式

Fig. 2 Two types of flange constraint

试验板料为 AA2024-O 铝合金,初始板料厚度为 1.8 mm。利用 Zwick 材料试验机测试 AA2024-O 铝合金的单向拉伸性能,所得铝合金的屈服强度为 66.7 MPa,抗拉强度 390 MPa,延伸率 24%。旋压成形试验所用芯模直径为 150 mm,旋轮圆角半径  $R=10$  mm,进给比为 0.5 mm/r,旋轮与托辊的约束间隙为 2 mm。

## 2 数值模拟及验证

### 2.1 模型建立

为了降低旋压成形试验数据的分散性,采用数值模拟方法分析铝合金杯形件的壁厚分布规律。基于 Abaqus/Explicit 软件建立了铝合金杯形件旋压过程的数值模型,如图 3(a)所示。其中,芯模、尾顶和旋轮为解析刚体,变形板坯为弹塑性材料。为能够真实地模拟杯形件的旋压变形行为,采用八节点六面体的 SC8R 单元离散板坯,其单元尺寸为  $0.1R$ ,厚度方向至少有 5 个积分点,如图 3(b)所示。在模

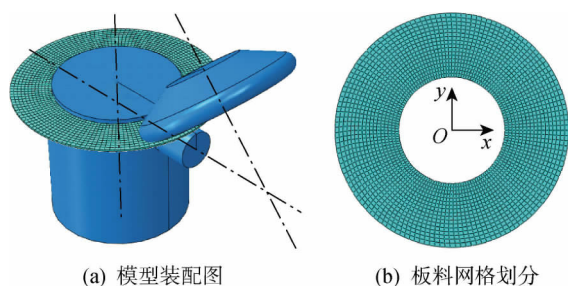


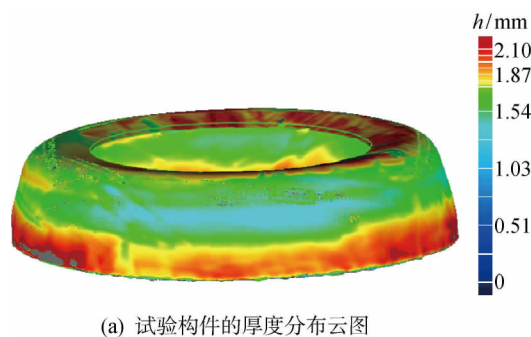
图3 旋压成形过程的有限元模型

Fig. 3 FE model of spinning

拟过程中,旋压运动方式与实际的成形工况相符,通过控制参考点的坐标变换来得到旋轮运动轨迹.摩擦条件:板料与芯模的摩擦系数为 0.2,板料与尾顶的摩擦系数为 0.5,板料与旋轮、托辊的摩擦系数均为 0.02<sup>[15]</sup>.

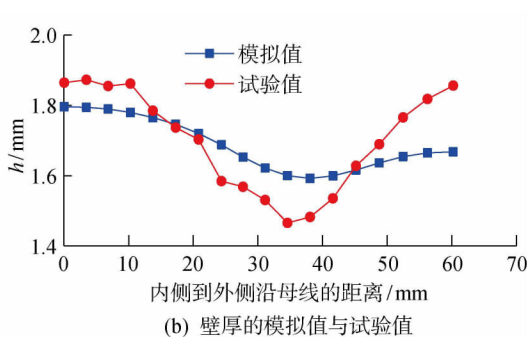
## 2.2 模型的可靠性验证

为了验证所建数值模型的可靠性,采用同样的



(a) 试验构件的厚度分布云图

旋轮轨迹和工艺参数,分别利用模拟和试验的方法完成了直径  $d=220$  mm、厚度  $h=1.8$  mm 铝合金 AA2024-O 板料的双边法兰约束旋压成形.借助于三维激光扫描测量臂对构件内外表面进行扫描,所得构件的壁厚分布云图如图 4(a)所示.提取扫描构件 4 条母线(周向间隔  $90^\circ$ )上的壁厚,并计算其平均值,图 4(b)所示为壁厚的模拟结果与试验值对比.由图 4(b)可以看出,构件的壁厚均呈现出中间薄、两端厚的分布特征,并且最大减薄位置相同,均处于距离边缘 35 mm 附近.随着旋轮从内侧向法兰外侧运动,外侧法兰材料的自身约束能力由强变弱,使得材料的变形阻力逐渐减小;同时,在旋压初期,变形材料包覆旋轮圆角逐渐增加,使得流经圆角的阻力逐渐增大.在两者的共同作用下产生了这种中间薄、两端厚的分布现象.经对比,模拟与试验的壁厚最大偏差为 7.9%,结果较为吻合,从而验证了所建杯形件法兰约束的旋压数值模型的可靠性.



(b) 壁厚的模拟值与试验值

图4 构件厚度的模拟值与试验值对比

Fig. 4 Comparison of thickness between simulation and experiment

## 3 法兰约束的旋压成形性能

利用图 1 中的试验装置,以  $h=1.8$  mm 的铝合金 AA2024-O 为研究对象,基于单道次旋压成形试验评估 2 种法兰约束条件下的极限旋压成形性能.本文将板料直径与柱面芯模直径之比定义为旋压比,并以此来评价成形性能.试验中,分别旋压不同直径的板坯,板坯直径相差 5 mm.如果板料出现开裂或起皱,则停止试验.表 1 列出了试验所获 2 种法兰约束旋压方式下的最大板坯直径和极限旋压比,并与传统的自由边旋压成形工艺的结果进行对比.可见,在本文的试验条件下,传统的自由边旋压成形的极限旋压比为 1.3,单边法兰约束条件下的极限旋压比增加到 1.5,双边法兰约束条件下的极限旋压比增加到 1.6.另外,与传统的自由边旋压成形工艺相比,单边法兰约束的杯形件出现了轻微起皱,这主要是由于单边约束只有一侧存在刚体支撑,另一

侧与旋轮之间存在空隙,使得法兰产生了皱纹,并且皱纹逐渐加剧;而在双边法兰约束条件下,由于法兰两侧都存在约束,所以抑制了皱纹的发生.在单边法兰约束条件下,杯形件旋压失效的原因是法兰区产生了皱纹并逐渐扩展到成形件侧壁上,甚至引起开裂;在双边法兰约束下,虽然产生了轻微皱纹,但双边约束限制了皱纹的进一步扩展,其失效形式为开裂.由此可见,法兰约束的旋压成形工艺可以通过增加法兰刚度来提高极限旋压比,而且双边法兰约束

表1 最大板坯直径及其旋压比

Tab. 1 Maximal diameter of the blank and its limiting spinning ration

工 艺	最大板坯直径/mm	极限旋压比
传统的自由边旋压	195	1.3
单边法兰约束旋压	225	1.5
双边法兰约束旋压	240	1.6

比单边法兰约束的效果更佳.

#### 4 工艺参数对旋压厚度的影响

为了分析工艺参数对旋压成形质量的影响,本文利用数值模拟方法对比分析单边和双边法兰约束条件下的铝合金杯形件厚度.所用对比参数主要包括约束界面摩擦系数 $\mu$ 、约束界面间隙以及进给比 $\eta$ 和旋轮圆角半径 $R$ ,其中前 2 个参数是法兰约束旋

压成形特有的工艺参数,后 2 个参数是拉深旋压过程的重要工艺参数.

为了便于对比,选用板坯直径 $d=220\text{ mm}$ ,2 种法兰约束的旋压方式下均可完整成形出杯形件,且除对比参数外其他工艺参数均相同.在旋压成形的模拟结果中,沿成形前板坯径向(从中心到外缘)选取一系列节点,如图 5 所示,分别提取成形后旋压件 4 个母线(周向间隔 $90^\circ$ )的壁厚,并计算平均壁厚.

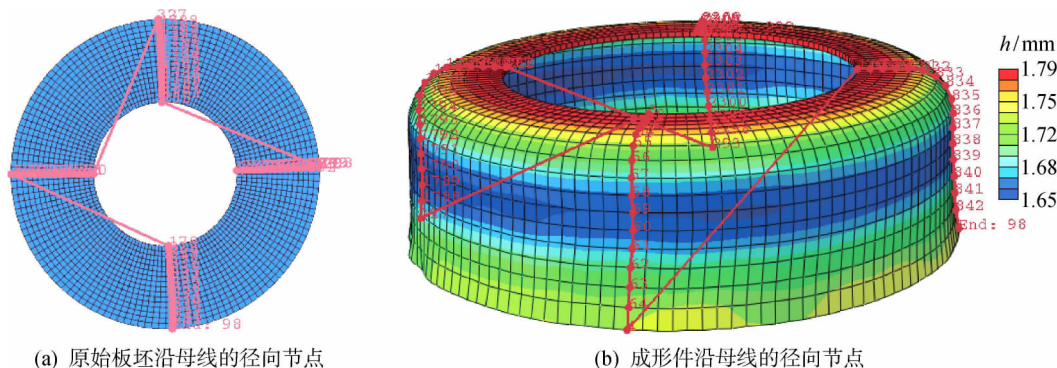


图 5 沿母线选取径向节点

Fig. 5 Picked nodes along generatrix

##### 4.1 摩擦系数

双边法兰约束是通过旋轮平直部分来实现板坯上侧约束的,其接触面积较大,因此有必要通过数值模拟的方法分析旋轮与板坯间的摩擦条件对成形件厚度的影响.当其他工艺参数相同时,在单边和双边法兰约束模拟中,选用旋轮与板坯的摩擦系数 $\mu=0.02, 0.10, 0.20$ 进行计算,所得旋压成形件的厚度分布如图 6 所示.其中:在单边法兰约束时, $\mu=0.02, 0.10, 0.20$ 下的最大减薄率分别为 10.29%、10.25%、10.23%;在双边法兰约束时, $\mu=0.02, 0.10, 0.20$ 下的最大减薄率分别为 8.58%、8.33%、8.33%.由图 6 可见,摩擦系数对 2 种旋压成形工艺中构件厚度的影响较小.其中,双边法兰约束的旋压成形工艺能够明显降低最大减薄率,改善壁厚分布的均匀性,这是由于在法兰约束的旋压成形工艺中,旋轮与托辊的约束界面间隙大于板坯初始厚度,其主要作用是限制起皱的发生,而对变形板料的界面压力较小,所以摩擦系数对成形件厚度的影响较小.单边法兰约束的旋压成形中的减薄率较大,这是由于成形中板坯在旋轮作用下将在旋轮侧产生一定的弯曲变形,使得材料更难经过旋轮圆角流入成形区,而双边约束成形中的板坯法兰部分一直保持平直状态,材料流入阻力较小.此外,不同的 $\mu$ 条件下单边法兰约束的旋压壁厚减薄率较高,这也说明了其率先达到极限而发生拉裂.

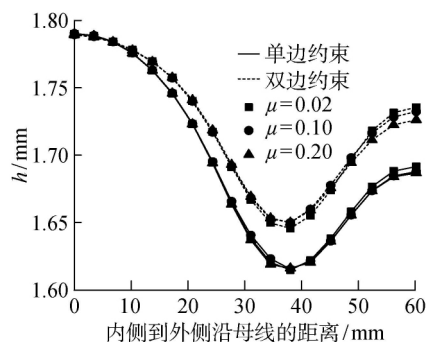


图 6 摩擦系数对构件厚度的影响

Fig. 6 Effect of friction coefficient on part thickness

##### 4.2 约束界面间隙

在 2 种法兰约束的旋压成形中,旋轮与托辊之间的约束界面间隙对成形质量具有影响.本文针对 2 种约束的旋压成形工艺的可成形范围,选用约束界面间隙分别为 $1.1h$ 、 $1.3h$ 和 $1.5h$ 进行旋压成形过程的数值模拟,所得构件的厚度分布如图 7 所示.其中:单边法兰约束中, $1.1h$ 、 $1.3h$ 和 $1.5h$ 下的最大减薄率分别为 10.29%、10.36%和 10.30%;双边法兰约束中, $1.1h$ 、 $1.3h$ 和 $1.5h$ 下的最大减薄率分别为 8.58%、10.98%和 11.24%.可见:在可成形范围内,单边法兰约束的旋压构件的成形厚度对约束界面间隙并不敏感;而双边法兰约束的旋压构件的成形厚度随着约束界面间隙增大先急剧减小,而后增大并趋于稳定.由于在单边法兰约束的旋

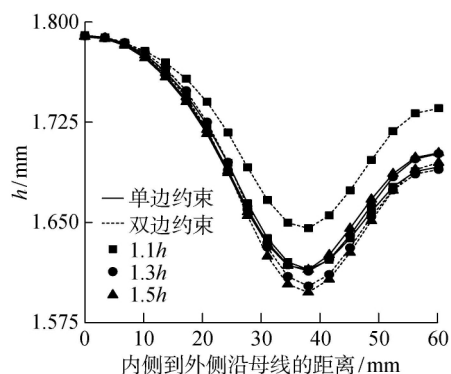


图7 约束界面间隙对构件厚度的影响

Fig. 7 Effect of constraint gap on part thickness

压成形中约束界面间隙只对变形区产生影响,成形区通常不会出现起皱缺陷,所以约束界面间隙对材料流入无明显影响;而在双边法兰约束的旋压成形中,随着约束界面间隙增大,法兰区材料产生的波纹更明显,使得材料更难流入,从而导致壁厚减薄率增大。

#### 4.3 进给比

在2种法兰约束的旋压成形过程的数值模拟中,选用进给比分别为0.5、1.0和1.5 mm/r进行计算,所得成形件的壁厚如图8所示。其中:单边法兰约束时0.5、1.0和1.5 mm/r下的最大减薄率分别为10.67%、10.29%和10.23%;双边法兰约束时相应的最大减薄率分别为10.17%、8.58%和7.50%。可见,在2种旋压成形过程均出现随着进给比变大而旋轮对板坯的拉薄作用变弱、构件厚度增加的现象,这与传统的自由边旋压成形工艺相一致。

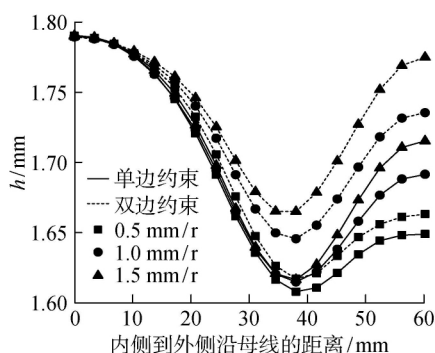


图8 进给比对构件厚度的影响

Fig. 8 Effect of feed ratio on part thickness

#### 4.4 旋轮圆角半径

当其他工艺参数相同时,在单边和双边法兰约束的旋压成形中,分别选用 $R=5, 10, 15$  mm进行数值模拟,所得构件的厚度分布如图9所示。其中:单边法兰约束中, $R=5$  mm时,由于起皱严重无法成

形, $R=10, 15$  mm时的最大减薄率分别为10.29%和7.89%;双边法兰约束中 $R=5, 10, 15$  mm下的最大减薄率分别为13.17%、8.58%和6.65%。由图9可见:随着 $R$ 减小,壁厚的均匀性变差,并且对单边法兰约束的旋压成形更加困难。这是由于 $R$ 的减小,使得坯料流经旋轮圆角时产生的接触压力变大<sup>[16]</sup>,流动阻力增大,壁厚减薄率增加,法兰区的周向压应力明显增大,从而导致 $R$ 较小时单边法兰约束的旋压出现严重起皱而无法成形。

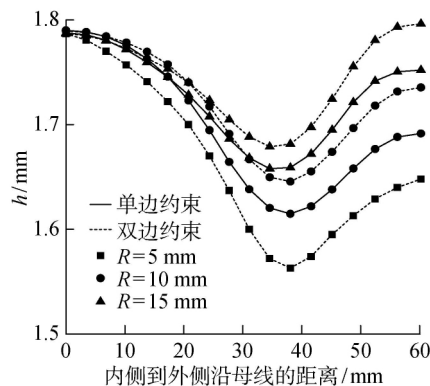


图9 旋轮圆角半径对构件厚度的影响

Fig. 9 Effect of roller radius on part thickness

## 5 结论

(1) 在本文的试验条件下,相比于传统的自由边旋压成形工艺,单边法兰约束的旋压成形工艺可使极限旋压比从1.3提高到1.5,双边法兰约束的旋压成形的极限旋压比可达1.6。

(2) 当旋轮端面与托辊的约束界面间隙较小时,相同工艺条件下双边法兰约束的构件壁厚比单边约束的构件壁厚更均匀;在2种成形工艺中,板料与托辊(或旋轮端面)间的摩擦系数对构件壁厚几乎没有影响;随着旋轮端面与托辊的约束界面间隙增大,双边法兰约束的构件壁厚先减小,而后增大并趋于稳定,而其约束界面间隙对单边法兰约束的构件几乎没有影响。

#### 参考文献:

- [1] XIA Q, SHIMA S, KOTERA H, *et al.* A study of the one-path deep drawing spinning of cups [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 159 (3): 397-400.
- [2] XIA Q X, ZHANG S B, XIAO-YU W U, *et al.* Numerical simulation and experimental investigation on one-path deep drawing spinning of conical part [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2010, 35(1): 44-

- 48.
- [3] 杨合, 詹梅, 李甜, 等. 铝合金大型复杂薄壁壳体旋压研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2534-2550.
- YANG He, ZHAN Mei, LI Tian, *et al.* Advances in spinning of aluminum alloy large-sized complicated thin-walled shells [J]. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 2011, 21(10): 2534-2550.
- [4] 吴统超, 詹梅, 蒋华兵, 等. 旋压间隙对大型复杂薄壁壳体多道次旋压中第二道次成形质量的影响[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(1): 74-81.
- WU Tongchao, ZHAN Mei, JIANG Huabing, *et al.* Influence of clearance for forming quality of second pass for large complicated thin-walled shells in multi-pass spinning [J]. **Journal of Northwestern Polytechnical University**, 2011, 29(1): 74-81.
- [5] 宋晓飞, 詹梅, 蒋华兵, 等. 铝合金大型复杂薄壁壳体多道次旋压缺陷形成机理[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(1): 31-36.
- SONG Xiaofei, ZHAN Mei, JIANG Huabing, *et al.* Forming mechanism of defects in spinning of large complicated thin-walled aluminum alloy shells [J]. **Journal of Plasticity Engineering**, 2013, 20(1): 31-36.
- [6] WANG L, LONG H. Investigation of material deformation in multi-pass conventional metal spinning [J]. **Materials & Design**, 2011, 32(5): 2891-2899.
- [7] WANG L, LONG H. A study of effects of roller path profiles on tool forces and part wall thickness variation in conventional metal spinning[J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2011, 211(12): 2140-2151.
- [8] WANG L. Analysis of material deformation and wrinkling failure in conventional metal spinning process [D]. England: Durham University, 2012.
- [9] KONG Q S, YU Z Q, ZHAO Y X, *et al.* Theoretical prediction of flange wrinkling in first-pass conventional spinning of hemispherical part[J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2016, 246: 56-68.
- [10] 史敏, 赵亦希, 孔庆帅, 等. 薄壁铝合金封头挡板辅助旋压成形方法[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(10): 1497-1503.
- SHI Min, ZHAO Yixi, KONG Qingshuai, *et al.* Baffle-assisted new spinning process for thin-walled aluminum alloy vessel head [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2015, 49(10): 1497-1503.
- [11] AHMED K I, GADALA M S, EL-SEBAIE M G. Deep spinning of sheet metals [J]. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2015, 97: 72-85.
- [12] 詹梅, 李虎, 杨合, 等. 大型复杂薄壁壳体多道次旋压过程中的壁厚变化[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(2): 115-121.
- ZHAN Mei, LI Hu, YANG He, *et al.* Thickness variation in Multi-pass spinning process of large-sized complicated thin-walled shells [J]. **Journal of Plasticity Engineering**, 2008, 15(2): 115-121.
- [13] LONG H, HAMILTON S. Simulation of effects of material deformation on thickness variation in conventional spinning [C] // **International Conference on Technology of Plasticity**. South Korea: ICTP, 2008.
- [14] AUER C, ERDBRÜGGE M, GÖBEL R. Comparison of multivariate methods for robust parameter design in sheet metal spinning [J]. **Applied Stochastic Models in Business and Industry**, 2004, 20(3): 201-218.
- [15] RAZAVI H, BIGLARI F R, TORABKHANI A. Study of strains distribution in spinning process using FE simulation and experimental work [C] // **Tehran International Congress on Manufacturing Engineering**. Tehran, Iran: TICME, 2005.
- [16] 高晶, 刘克素, 于忠奇, 等. 双相钢板成形界面压力数值仿真及对板料表面损伤影响[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(5): 770-774.
- GAO Jing, LIU Kesu, YU Zhongqi, *et al.* Numerical analysis for contact pressure and surface damage in dual-phase steel sheet stamping [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2013, 47(5): 770-774.