

板料成形

## 盘形件两工步对称增厚旋压工艺

刘发美, 金俊松, 李 斌, 高 畅, 张 蕾, 王新云

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 对称增厚旋压是一种针对薄辐板厚轮缘类盘形件的特种旋压技术, 利用有限元模拟研究了两工步对称增厚旋压过程中坯料的变形规律、成形特点和缺陷的产生, 以及各工艺参数对成形的影响。结果表明: 摩擦因数 $\mu$ 、旋轮进给速度 $v$ 以及坯料旋转速度 $\omega$ 对成形过程影响较小。在第1工步中, 旋轮槽底宽度 $h$ 、旋轮凹槽倾角 $\alpha$ 以及坯料长厚比 $\gamma$ 对成形影响显著, 随着旋轮槽底宽度 $h$ 和旋轮凹槽倾角 $\alpha$ 的增大以及坯料长厚比 $\gamma$ 越大, 坯料越容易失稳形成缺陷; 在第2工步中, 旋轮槽底宽度 $h$ 以及坯料的初始形状对成形影响显著, 旋轮槽底圆角半径 $R$ 能够改善坯料外边缘的应力状态, 且 $R$ 越大改善效果越明显。

**关键词:** 盘形件; 对称增厚旋压; 旋轮槽底宽度; 旋轮凹槽倾角; 圆角半径

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.006

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 03-0043-11

## A two-step symmetrical thickening spinning process for disk-shaped part

Liu Famei, Jin Junsong, Li Bin, Gao Chang, Zhang Lei, Wang Xinyun

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Symmetrical thickening spinning is a special spinning process for disc-shaped parts with thin spoke and thick rim. Therefore, the deformation laws and forming characteristics of blank, the cause of defects and the influences of process parameters on forming in the two-step symmetrical thickening spinning process were studied by finite element simulation. The results show that friction coefficient  $\mu$ , feeding speed  $v$  of the roller and rotation speed  $\omega$  of blank have little effect on the forming process, while groove bottom width of roller  $h$ , inclination angle  $\alpha$  of roller groove and length to thickness ratio  $\gamma$  of blank have significant effect on the forming in the first step. With the increasing of groove bottom width of roller  $h$  and inclination angle  $\alpha$  of roller as well as length to thickness ratio  $\gamma$  of blank, the blank is more prone to lose stability and form defects. Furthermore, in the second step, the groove bottom width  $h$  of roller and the initial shape of blank have significant effect on the forming. Meantime, the fillet radius  $R$  at the bottom of roller groove can improve the stress state of the outer edge of blank, and the larger the  $R$  is, the more obvious the improvement effect is.

**Key words:** disc-shaped part; symmetrical thickening spinning; groove bottom width of roller; inclination angle of roller groove; fillet radius

旋压成形作为一种渐进成形技术, 具有工艺柔性好、产品尺寸精度高、表面光洁度好、设备吨位要求低等诸多优点, 现代旋压技术被广泛用于军工、航天、航空等领域<sup>[1-2]</sup>。传统的旋压工艺主要分为普通旋压和变薄旋压两大类, 相比于其他成形工艺, 二者对于薄壁圆截面中空类零件具有明显优势<sup>[3]</sup>。近年来, 国内外学者纷纷提出各种特种旋压工艺, 而非传

统地通过改变薄板形状或减小坯料厚度来成形零件, 如多楔带轮旋压<sup>[4]</sup>、内筋旋压<sup>[5]</sup>、对称分形旋压<sup>[6]</sup>、楔入旋压<sup>[7]</sup>、凹槽旋压<sup>[8]</sup>, 以及增厚旋压等。

圆形板料增厚旋压工艺是通过旋轮对板料进行体积成形, 对大直径薄辐板厚轮缘类盘形件的成形尤为适合<sup>[9]</sup>。根据变形特点可以将增厚旋压分为单侧增厚和对称增厚。

Kim Y J等<sup>[10]</sup>提出采用流动旋压来使汽车的飞轮外边缘单侧增厚, 并通过实验验证了有限元模拟及工艺的合理性, 同时分析了成形过程中的应力分布。Jin J S等<sup>[11]</sup>设计了带有内凹槽的环形旋轮, 采用4工步单侧增厚旋压工艺成形出具有厚轮缘的盘形件, 并利用实验和模拟相结合的方法详细介绍了

收稿日期: 2022-05-20; 修订日期: 2022-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175319)

作者简介: 刘发美 (1994-), 男, 博士研究生

E-mail: dliufamei@hust.edu.cn

通信作者: 金俊松 (1980-), 男, 博士, 教授

E-mail: jsjin@hust.edu.cn

增厚旋压的成形机理,推导出旋轮载荷公式。Wang X Y 等<sup>[9, 12-13]</sup>提出了另一种单侧增厚旋压方案,带有外凹槽的圆形旋轮沿着坯料的径向方向进行进给,从而使得坯料外边缘发生增厚,并分析了各参数对成形质量的影响,获得了成形工艺窗口。Jin J S 等<sup>[14]</sup>提出采用多工步进行单侧增厚旋压,分析了各参数对每一工步材料流动的影响,设计并优化了每一工步的旋轮尺寸和工艺参数。Xue K M 等<sup>[15]</sup>研究了单侧增厚旋压时旋轮凹槽与坯料间隙对成形质量的影响,并建立了间隙与成形质量之间的唯象关系模型。

而对于对称增厚旋压,王伟<sup>[16]</sup>和吴文魁<sup>[17]</sup>分别介绍了常温和高温下对称增厚旋压的工艺过程和失效形式,发现单步成形质量不稳定,容易发生屈曲甚至折叠缺陷。

本文提出采用两工步对圆形板料进行对称增厚旋压,并利用有限元模拟与实验相结合的方法,系统地对两工步对称增厚旋压工艺的成形机理、成形缺陷的产生、成形参数对成形过程的影响进行了研究,最后进行了实验验证,两工步对称增厚旋压工艺能够明显增大增厚比。

## 1 对称增厚旋压有限元模型建立

### 1.1 工艺原理与有限元模型

盘形件对称增厚旋压成形的成形过程为:圆形坯料夹持在上、下压盘之间,与圆盘一起以角速度 $\omega$ 旋转,旋轮凹槽和坯料的轴向中心对齐,旋轮以速度 $v$ 径向运动,坯料外缘局部径向压缩,使得坯料外径减小而厚度增加,直至旋轮与压盘接触,坯料充满凹槽型腔,成形过程完成,得到薄辐板厚轮缘的盘形零件。成形过程如图 1 所示。

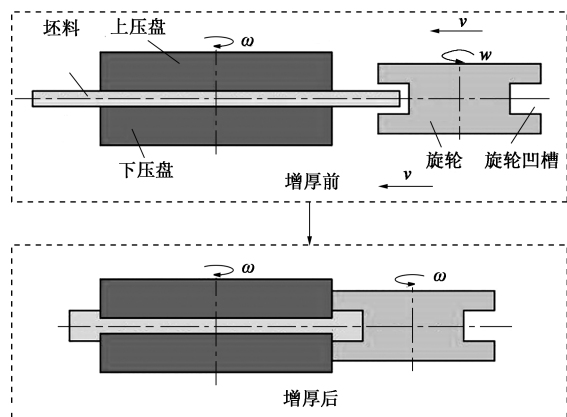


图 1 对称增厚旋压成形工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of symmetrical thickening spinning process

在 Simufact Forming 上进行有限元模拟,建立的有限元三维模型如图 2a 所示。为了降低计算成本,对模型进行了合理简化。在实验中,坯料被压盘压住部分几乎不发生变形,因此,将盘形件内部进行“挖空”处理得到环形件,如图 2b 所示。将坯料设置为弹塑性变形体,将旋轮和压盘设置为刚体。

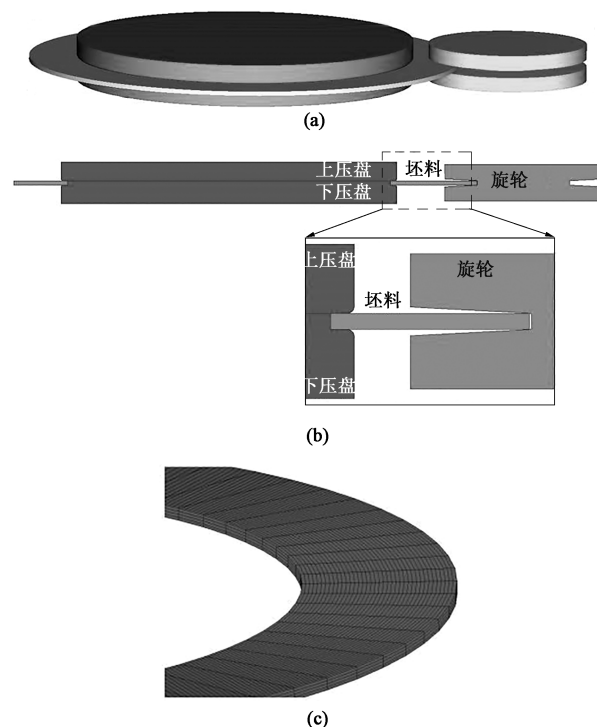


图 2 有限元模型

(a) 三维有限元模型 (b) 模型的纵剖面图 (c) 坯料网格图

Fig. 2 Finite element model

(a) 3D finite element model (b) Longitudinal profile diagram of model (c) Grid diagram of blank

坯料采用 AISI 1045 钢,旋轮及坯料温度均为室温且用润滑油进行润滑和冷却,因此,忽略变形过程中的温度变化。材料的塑性本构采用 J-C 模型,如式 (1) 所示,材料参数<sup>[18]</sup>如表 1 所示。

$$\sigma = (R_{eL} + B\epsilon^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \quad (1)$$

式中:  $R_{eL}$  为材料在指定应变速率下的屈服强度;  $B$  和  $n$  为强化系数;  $C$  为应变速率敏感系数;  $\dot{\epsilon}$  为应变速率;  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变速率;  $\sigma$  和  $\epsilon$  分别为应力和应变。

### 1.2 网格划分及边界条件设置

Simufact Forming 提供了多种网格划分方式,本文采用 Ringmesh 网格划分模式,所得到的六面体网格对旋压这类回转成形尤为适合。对于金属板料的体积成形,在厚度方向上采用 4 层网格能够在保证

表 1 AISI 1045 钢的材料参数  
Table 1 Material parameters of AISI 1045 steel

参数	数值
弹性模量/GPa	210
泊松比	0.33
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7850
R <sub>eL</sub> /MPa	714
B/MPa	563
n	0.518
C	0.037
$\dot{\varepsilon}_0/s^{-1}$	0.000833

精度的前提下降低计算成本<sup>[19]</sup>。径向网格尺寸为厚度方向的 1~2 倍，切向网格尺寸为厚度方向的 8~14 倍，网格总数保持在 9000~15000，网格划分如图 2c 所示。

压盘与坯料的接触关系通过 Simufact Forming 的接触表设置为 Glued，以实现坯料在压盘的带动下做旋转运动，旋轮与坯料的接触关系设置为 Touching，模具之间不设置任何接触关系。旋轮与坯料之间的摩擦行为采用剪切摩擦模型。

2 模拟结果与讨论

在成形过程中，影响成形结果的因素很多，本文运用 Simufact Forming 软件对成形工艺参数进行研究，所研究的参数包括：坯料旋转速度  $\omega$ 、坯料与旋轮之间的摩擦因数  $\mu$ 、旋轮进给速度  $v$ 、旋轮凹槽倾角  $\alpha$ 、旋轮槽底宽度  $h$ ，如图 3 所示。定义坯料外

缘至压盘边缘之间的距离为悬臂长  $\Delta l = \frac{(D-d)}{2}$ ，定义坯料变形部分的长厚比  $\gamma = \frac{\Delta l}{t} = \frac{(D-d)}{2t}$ ，其中， $D$  为坯料外径， $d$  为压盘直径， $t$  为坯料厚度。

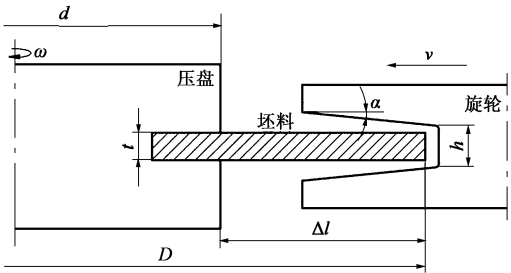


图 3 对称增厚旋压成形参数示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of symmetrical thickening spinning parameters

2.1 工艺因素的确定

图 4 为不同摩擦因数  $\mu$ 、旋轮进给速度  $v$  和坯料旋转速度  $\omega$  时，在同一套旋轮参数下坯料成形后的等效塑性应力、等效塑性应变分布对比。模拟结果表明：在不同  $\mu$ 、 $v$  和  $\omega$  下，坯料的等效塑性应变分布或等效应力分布大致相同，因此，对称增厚旋压时摩擦因数  $\mu$ 、旋轮进给速度  $v$  和坯料旋转速度  $\omega$  对成形过程的影响很小，故本文不作研究。

2.2 第 1 工步对称增厚旋压模拟结果与讨论

2.2.1 模拟参数设置

取固定参数  $\omega = 250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ， $\mu = 0.1$ ， $v = 1.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本文将对不同长厚比  $\gamma$  的坯料，采用

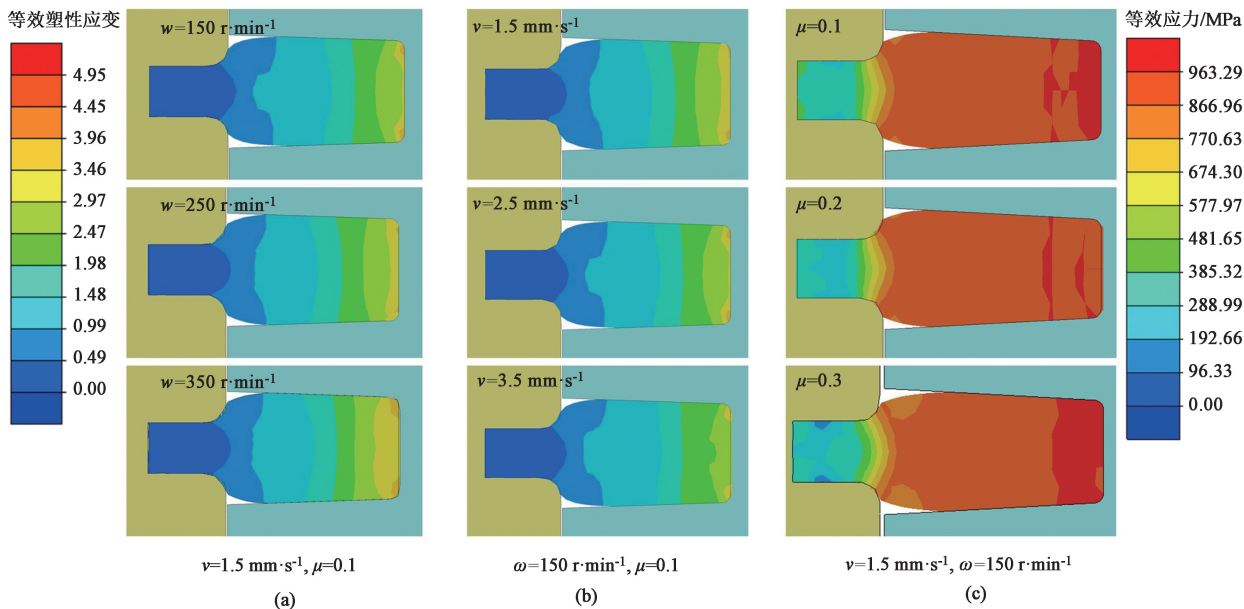


图 4 同一时刻不同坯料旋转速度（a）、旋轮进给速度（b）、摩擦因数（c）时的成形对比图  
Fig. 4 Comparison diagrams of forming at different rotation speeds of blank (a), feeding speeds of roller (b) and friction coefficients (c) at the same time

不同形状的旋轮进行对称增厚旋压时所表现出的变形特征进行研究。采用组合模拟试验，坯料长厚比取值分别为  $\gamma=7$ 、 $\gamma=11$  和  $\gamma=15$ 。坯料及旋轮的详细参数如表 2 和表 3 所示，参数值的选取是基于设备限制和参考单工步对称增厚旋压的经验值。

表 2 坯料的形状参数

Table 2 Shape parameters of blank

组别	坯料厚度 $t/\text{mm}$	坯料外径 $D/\text{mm}$	压盘外径 $d/\text{mm}$	长厚比 $\gamma$
1	3	$\Phi 276$	$\Phi 234$	7
2	3	$\Phi 300$	$\Phi 234$	11
3	3	$\Phi 324$	$\Phi 234$	15

表 3 旋轮的形状参数

Table 3 Shape parameters of rollers

参数	取值
旋轮凹槽倾角 $\alpha/(\circ)$	2, 3, 4, 5, 6
旋轮槽底宽度 $h/\text{mm}$	3, 5, 7, 9

2. 2. 2 对称增厚旋压成形过程

根据预分析，对称增厚旋压成形过程中不同的旋轮凹槽形状以及不同的长厚比  $\gamma$  均会对坯料的变形过程产生影响。根据零件的成形结果将对称增厚旋压成形分为以下几类。

(1) 在整个成形过程中坯料不发生失稳、呈均匀“墩粗”式成形，此类成形称为稳定增厚成形，其典型成形过程如图 5 所示。坯料边缘与旋轮凹槽底面接触，受凹槽底面的接触压力逐渐对称增厚 (3.20 s)；坯料边缘增厚至指定厚度，充满凹槽底部 (4.61 s)；旋轮继续进给，坯料悬臂由外到内逐步增厚至与凹槽上、下内壁接触 (6.30 s)；旋轮进给至与压盘接触，此时整个悬臂完全增厚充满旋轮凹槽，增厚成形完成 (7.34 s)。整个成形过程中，坯料悬臂稳定对称增厚，未出现明显的弯曲或折叠缺陷。等效应力从坯料边缘至未变形区域逐渐减小，且基本上下对称分布。

(2) 在成形过程中虽然发生失稳，坯料出现明显弯曲，但是最终可以充填完整且整个过程中并无缺陷产生，此类成形被称为无缺陷产生的非稳定增厚成形，其典型的成形过程如图 6 所示。成形初期坯料基本呈现对称增厚，等效应力分布较为对称，由边缘至未变形区呈现较均匀的梯度分布 (4.28 s)；随着旋轮的进给，由于长厚比偏大，凹槽内部分坯料出现弯曲，偏向凹槽一侧，形状和等效应力分布的对

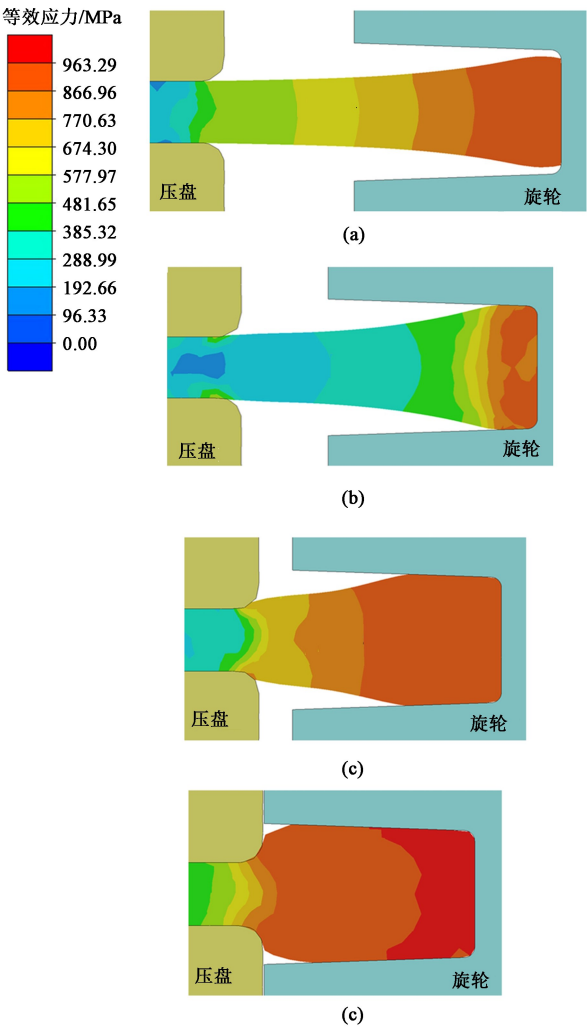


图 5 稳定增厚成形过程图

(a) 3.20 s (b) 4.61 s (c) 6.30 s (d) 7.34 s

Fig. 5 Diagrams of stable thickening process

称性被打破 (5.54 s)；坯料虽然发生弯曲，但是始终受到凹槽侧壁的限制，在保持小幅度弯曲的情况下逐渐增厚 (6.80 s)，两次弯曲方向不同是因为坯料始终在旋转，两次剖面位置不同，坯料不同位置的弯曲方向可能有所不同；当旋轮进给至与压盘接触，坯料始终未发生过大的弯曲或材料溢出，最后完成整体增厚 (9.45 s)。

(3) 在成形过程中出现过度弯曲并导致飞边和折叠等缺陷，这一类成形被称为带有缺陷产生的非稳定增厚成形，其典型成形过程如图 7 所示。成形初期仍是均匀的对称增厚，等效应力对称均匀梯度分布 (3.68 s)；由于坯料的长厚比过大而较早出现弯曲，弯曲开始并不明显，而且是在凹槽内部 (5.37 s)；随着旋轮的进给，弯曲幅度增大，甚至出现二次弯曲，使得部分凹槽外坯料完全偏出凹槽内壁 (9.20 s)；旋



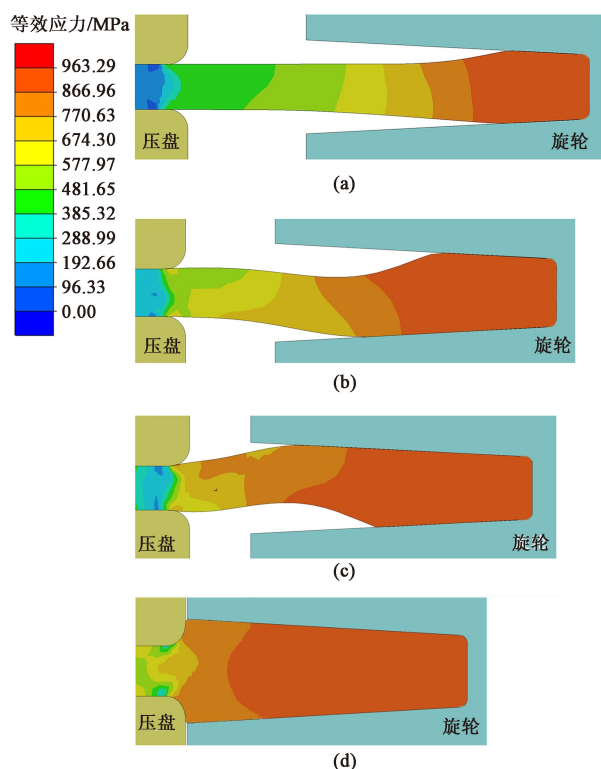


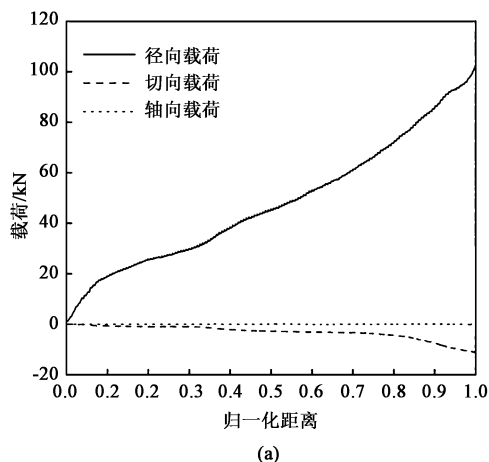
图6 无缺陷产生的非稳定增厚成形过程图

(a) 4.28 s (b) 5.54 s (c) 6.80 s (d) 9.45 s

Fig. 6 Diagrams of instable thickening process without defects

轮继续进给, 坯料继续被压缩, 由于凹槽内坯料弯曲过大, 容易发生折叠, 凹槽外材料偏出容易产生飞边 (9.51 s)。

对称增厚旋压成形过程中, 稳定增厚与非稳定增厚均是径向载荷远大于切向载荷与轴向载荷, 且随着旋轮进给逐渐增加。而稳定增厚成形时, 切向载荷较小, 并随旋轮进给逐渐增加, 而轴向载荷始



(a)

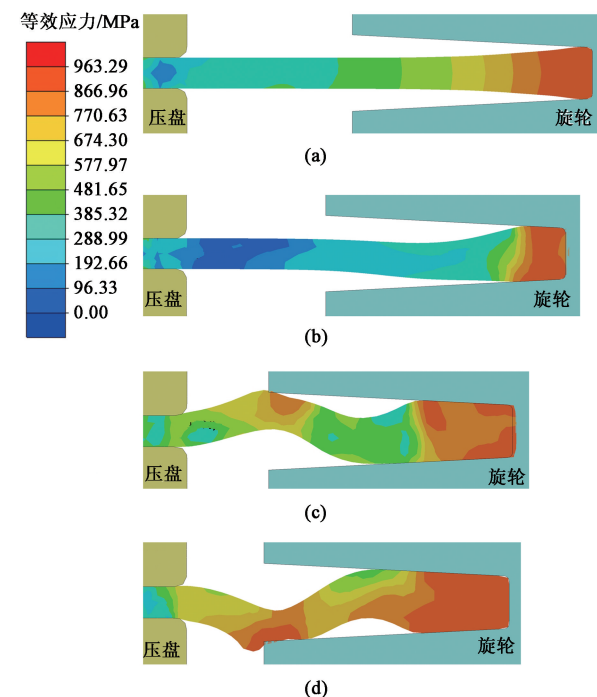


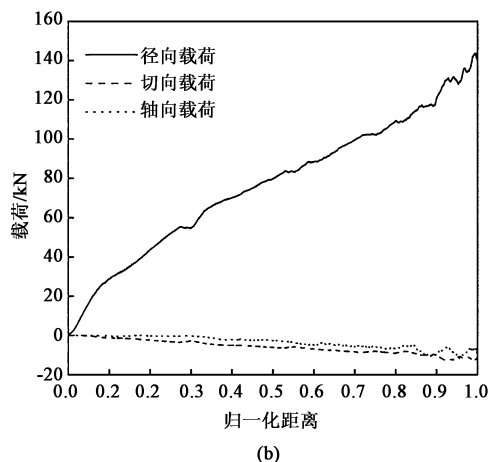
图7 带有缺陷产生的非稳定增厚成形过程图

(a) 3.68 s (b) 5.37 s (c) 9.20 s (d) 9.51 s

Fig. 7 Diagrams of instable thickening process with defects

终几乎为零, 如图 8a 所示; 无缺陷产生的非稳定增厚时, 轴向和切向载荷均较小, 持续增加且均不等于零, 如图 8b 所示。图 8 中的归一化距离为旋轮进给位移与总位移的比值。

在对称增厚旋压过程中, 旋轮沿径向进给运动, 坯料在旋轮的作用下沿径向被压缩, 旋轮受到较大的反向作用力, 且随着旋轮的进给, 参与变形的材料逐渐增加, 变形抗力逐渐增加, 径向载荷随之增加。而旋轮是由坯料与旋轮之间的摩擦力带动自传,



(b)

图8 不同增厚形式的载荷比较图

(a) 稳定增厚 (b) 无缺陷产生的非稳定增厚

Fig. 8 Comparison diagrams of load in different thickening modes

(a) Stable thickening (b) Instable thickening without defects

切向力较小,随着旋轮的进给,旋轮表面与坯料的接触面积增大,摩擦力增大,切向载荷逐渐增大。轴向载荷主要来自于材料对旋轮凹槽上、下内壁的作用。稳定增厚时,由图 5 可知,坯料基本是上下对称增厚,等效应力也是上下对称,因此,坯料对于凹槽上下内壁的作用力几乎相等,但方向相反,相互抵消,因此基本保持为零;非稳定增厚时,由图 6 可知,坯料并不是完全对称增厚,坯料与凹槽上下内壁的接触面积并不相同,上下载荷不相等,且随着参与变形的材料增加,上下载荷差别有所增加,因此轴向载荷不再是零,且随着旋轮进给逐渐增大。

### 2.2.3 成形分区图

对 2.2.1 节所设定的实验组合进行模拟,模拟结果发现:坯料长厚比  $\gamma=7$  ( $t=3$  mm、 $D=\Phi 276$  mm、 $d=\Phi 234$  mm)、旋轮凹槽倾角  $\alpha<5^\circ$ 、旋轮槽底宽度  $h<9$  mm 时,坯料均以稳定增厚方式完成成形;当旋轮凹槽倾角  $\alpha$  和旋轮槽底宽度  $h$  均较大时,才会出现轻微失稳,但最终均能够稳定成形。这说明在没有凹槽的限制下,坯料长厚比为 7 时仍会失稳,但凹槽的作用限制了材料流动,能够有效降低失稳的概率。坯料长厚比  $\gamma=15$  ( $t=3$  mm、 $D=\Phi 324$  mm、 $d=\Phi 234$  mm) 时,几乎所有的旋轮参数下,坯料均出现带有缺陷产生的非稳定增厚成形。当坯料长厚比  $\gamma$  过大时,坯料悬臂部分的失稳程度过大,凹槽的限制无法避免缺陷的产生。综合来说,与镦粗成形类似,坯料长厚比(镦粗成形中的高径比)越大,坯料越容易失稳,越容易产生折叠缺陷。

当坯料长厚比  $\gamma$  较小时 ( $\gamma=7$ ),坯料虽然在旋压过程中会稳定增厚成形,但是较小的坯料长厚比  $\gamma$  意味着悬臂长  $\Delta l$  较小,坯料用于外边缘增厚的材料过少。而当坯料长厚比  $\gamma$  较大时 ( $\gamma=15$ ),悬臂长度  $\Delta l$  虽较大,但难以成形出无缺陷的零件。

为稳定增厚较多的材料,本文选择了一个适中的坯料长厚比  $\gamma=11$  来研究对称增厚旋压成形过程中坯料的成形规律,并选出合适的成形后坯料作为第 2 工步对称增厚旋压的初始坯料。因此,设计第 1 工步的组合模拟实验,如表 4 所示。

表 4 坯料长厚比  $\gamma=11$  时所采用的旋轮的几何参数

Table 4 Geometric parameters for rollers at length to thickness ratio of blank  $\gamma=11$

参数	取值
凹槽倾角 $\alpha/(^\circ)$	2, 3, 4, 5, 6
旋轮槽底宽度 $h/\text{mm}$	3.00, 3.25, 3.50, 3.75, 4.00, 4.25, 4.50

根据表 4 进行模拟组合实验,得到了第 1 工步的成形分区图,如图 9 所示。由图 9 可知,不同的旋轮凹槽倾角  $\alpha$  以及旋轮槽底宽度  $h$  对坯料的成形方式是不同的。

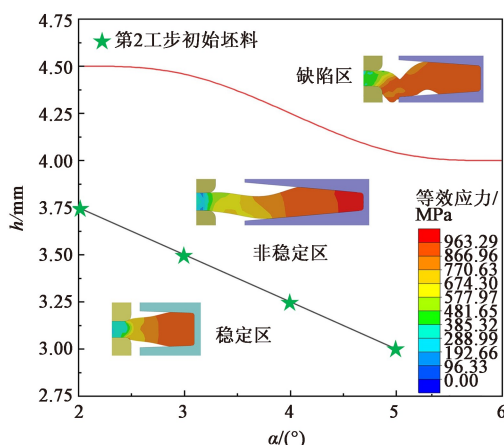


图 9  $\gamma=11$  时坯料成形分区图

Fig. 9 Forming classification diagram of blank at  $\gamma=11$

随着旋轮槽底宽度  $h$  的增加,坯料的成形模式会逐渐由稳定增厚变为非稳定增厚乃至出现成形缺陷,且其影响是显著的。 $h$  的增加延迟了凹槽上、下内壁对坯料的约束。当  $h$  较小时,旋轮凹槽会在成形早期约束坯料的轴向流动,使得坯料的整体轴向变形量较小,对悬臂部分产生的轴向扰动较小,因此,坯料能够稳定成形;当  $h$  较大时,坯料外缘增厚至一定厚度时仍未受到凹槽上、下内壁的约束,由于整体轴向变形量增大,扰动增加,悬臂容易发生弯曲,但弯曲后就受到上、下内壁的轴向约束,避免了过大的弯曲,在随后的成形过程中完成增厚,所以,最终仍然能够不发生缺陷地完成成形;而当  $h$  过大时,由于凹槽的径向深度减小,悬臂的弯曲容易发生在凹槽之外,导致飞边缺陷的产生,或者凹槽范围内悬臂的弯曲程度过大而无法回复,也会导致折叠缺陷的产生。

随着旋轮凹槽倾角  $\alpha$  的增加,坯料的成形模式可能会从稳定成形转变为无缺陷非稳定成形,或者从无缺陷非稳定成形转变为带有缺陷的非稳定成形,但是影响并不显著。 $\alpha$  的增加同样会延迟凹槽内壁的约束,但是其影响并未直接显著改变  $h$ ,这是因为:当  $h$  不变时,增加  $\alpha$ ,靠近凹槽底部的上、下内壁的距离变化不明显,靠近凹槽外上、下内壁的距离增大,而首先与坯料接触的是靠近凹槽底部的内壁,后期随着旋轮的进给,坯料的悬臂部分有一定的增厚和缩短,抗弯曲能力增强。因此,  $\alpha$  对成形模式的影响并不显著。

## 2.2.4 旋轮凹槽倾角 $\alpha$ 、旋轮槽底宽度 $h$ 对径向载荷的影响

同一旋轮凹槽倾角  $\alpha$  下, 最大径向载荷随旋轮槽底宽度  $h$  的增大而增大, 如图 10 所示。这是因为: 旋轮槽底宽度增大意味着坯料增厚量增多, 同等体积下坯料的径向收缩量增大, 因此, 最终的径向载荷增大。图 10 中,  $h3.0-\alpha4$  表示第 1 工步的参数组合, 即旋轮槽底宽度  $h=3.0$  mm、旋轮凹槽倾角  $\alpha=4^\circ$ , 其余同理。

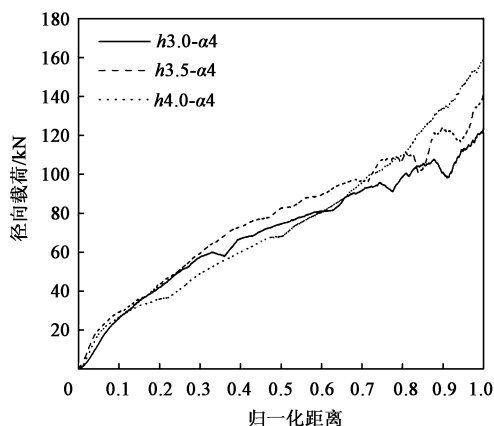


图 10 同一旋轮凹槽倾角  $\alpha$ 、不同旋轮槽底宽度  $h$  下径向载荷对比  
Fig. 10 Comparison of radial load at the same inclination angle of roller groove  $\alpha$  and different groove bottom widths of roller  $h$

同一旋轮槽底宽度  $h$  下, 径向载荷随旋轮凹槽倾角  $\alpha$  的增大而增大, 如图 11 所示。当旋轮槽底宽度相同时, 相同体积下, 旋轮凹槽倾角  $\alpha$  越大, 凹槽的径向深度越小, 即坯料的径向压缩量越大, 导致径向载荷越大。

## 2.3 第 2 工步对称增厚旋压模拟结果与讨论

### 2.3.1 模拟参数设置

图 9 表明: 不同的旋轮形状对坯料的成形方式是

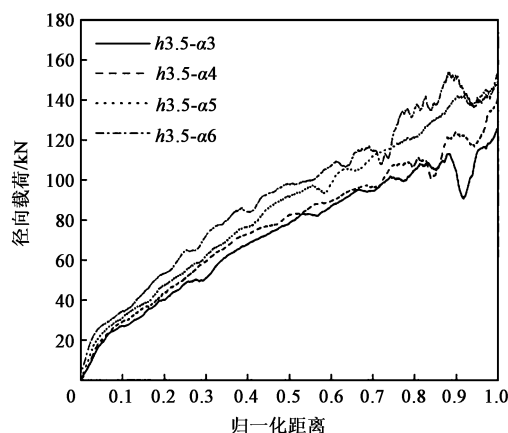


图 11 同一旋轮槽底宽度  $h$ 、不同旋轮凹槽倾角  $\alpha$  下径向载荷对比  
Fig. 11 Comparison of radial load at the same groove bottom width of roller  $h$  and different groove inclination angles  $\alpha$  of roller

不同的, 随着旋轮凹槽倾角  $\alpha$  的增加或随着旋轮槽底宽度  $h$  的增加, 坯料在成形过程中会逐渐发生失稳直至出现缺陷, 第 1 工步的增厚程度有限。为了进一步增大增厚程度, 有必要进行第 2 工步对称增厚旋压, 并研究第 2 工步的旋轮参数对增厚成形的影响, 选择了图 9 中稳定增厚区和无缺陷产生的非稳定增厚区的临界区域上的第 1 工步成形后的坯料作为第 2 工步增厚旋压成形的初始坯料 (如图 9 中的五角星所示)。不选择非稳定成形的试样是为了避免非稳定成形试样上残余的不对称应力分布对第 2 工步产生的影响, 降低第 2 工步成形过程中出现弯曲的概率。第 2 工步旋压的初始坯料形状参数如图 12 所示。

由 2.1 节可知, 在对称增厚旋压成形过程中, 旋轮与坯料之间的摩擦因数  $\mu$ 、旋轮进给速度  $v$  以及坯料旋转速度  $\omega$  对成形的影响较小, 因此, 在第 2 工步成形过程中同样固定以上参数:  $\mu=0.1$ 、 $v=1.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\omega=250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。从上述缺陷分析中

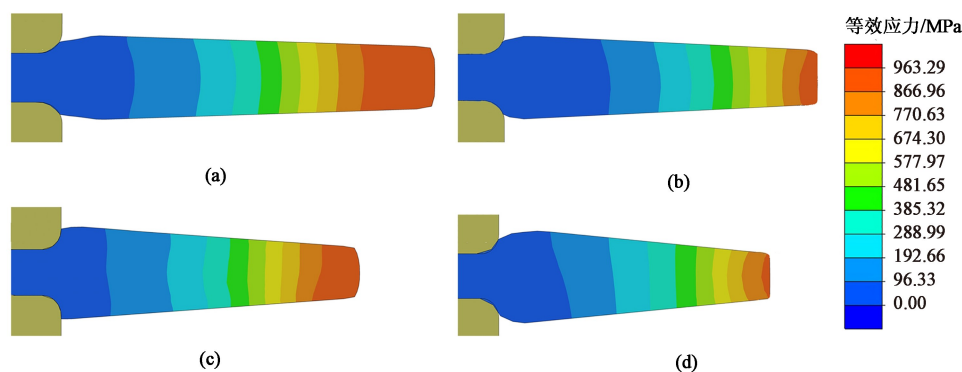


图 12 第 2 工步的初始坯料形状参数  
(a)  $\alpha=2^\circ$ ,  $h=3.75$  mm (b)  $\alpha=3^\circ$ ,  $h=3.5$  mm (c)  $\alpha=4^\circ$ ,  $h=3.25$  mm (d)  $\alpha=5^\circ$ ,  $h=3$  mm

Fig. 12 Shape parameters of initial blanks in step 2

可知，第 2 工步成形中旋轮槽底宽度对成形影响很大，能够完成增厚的槽底宽度决定了增厚的极限增厚比  $X_m$ （第 2 工步可成形的最大旋轮槽底宽度与坯料初始厚度的比值）。同时，旋轮槽底部位往往是应力集中区域，因此，通过调整槽底尺寸改善旋轮槽底部位的应力状态对防止旋轮的破裂很有必要。第 2 工步的旋轮凹槽倾角固定为  $2^\circ$ ，旋轮槽底宽度  $h$  和圆角半径  $R$  取值如表 5 所示。

2.3.2 成形过程分析

第 2 工步对称增厚成形过程如图 13 示。成形初期（1.51 s），坯料边缘先成形，坯料和旋轮接触的边缘厚度在旋轮的径向进给作用下不断增大，坯料

表 5 第 2 工步对称增厚旋压所用的旋轮几何参数

Table 5 Geometric parameters for rollers used in step 2 of symmetrical thickening spinning

参数	取值
旋轮槽底宽度 $h/\text{mm}$	5, 6, 7, 8
旋轮圆角半径 $R/\text{mm}$	1, 2, 3

在第 1 工步增厚后有一定的斜度，与未成形区域的倾角形成凹陷。随着旋轮的进给，成形区域厚度继续增加填充凹槽底部（3.49 s），增厚区域逐渐径向扩展，凹陷区域逐渐鼓起（4.21 s），直至充满旋轮凹槽（5.23 s），完成增厚旋压成形过程。

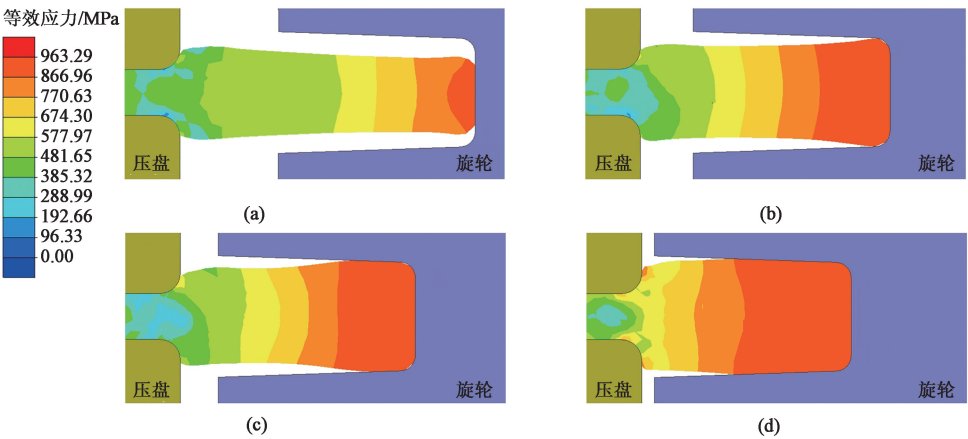


图 13 第 2 工步增厚成形过程图  
(a) 1.51 s (b) 3.49 s (c) 4.12 s (d) 5.23 s  
Fig. 13 Diagram of thickening forming process in step 2

2.3.3 第 2 工步初始坯料尺寸对成形的影响

在第 2 工步对称增厚旋压成形中，当旋轮槽底宽度较大时，开始变形阶段凹槽上、下内壁对坯料并没有约束作用，此时坯料在增厚过程中可能会发生大幅度弯曲而不会恢复，弯曲程度越来越大，直至发生折叠，如图 14 示。其中， $h8-R1$  表示第 2 工步的参数组合，即旋轮槽底宽度  $h=8\text{ mm}$ ，圆角半

径  $R=1\text{ m}$ ，其余同理。这与第 1 工步的缺陷类似。不发生折叠缺陷的旋轮槽底宽度与坯料初始厚度的比值称为增厚比  $X$ ，下面展开第 2 工步初始坯料，即第 1 工步旋轮凹槽尺寸对极限增厚比  $X_m$  的讨论。

由于体积相等，试样的悬臂长度、边缘宽度与倾角之间存在一定的几何关系。2.2 节研究表明，

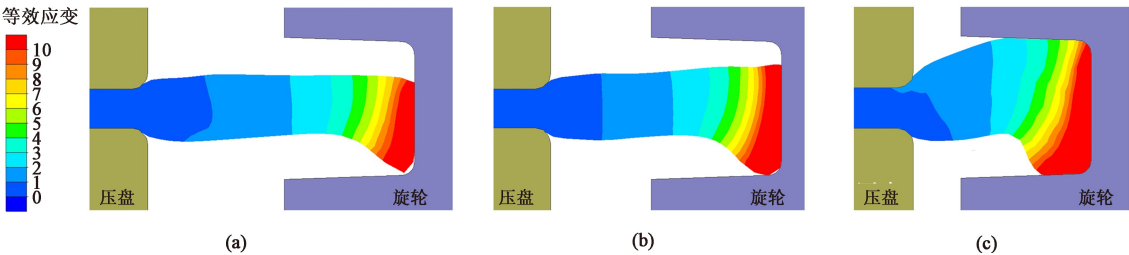


图 14 第 2 工步坯料产生弯曲引发的折叠缺陷（初始坯料为  $h3.75-\alpha2$ ，第 2 工步参数为  $h8-R1$ ）  
(a) 3.66 s (b) 5.37 s (c) 8.54 s  
Fig. 14 Fold defects caused by blank bending during step 2 (Initial blank of  $h3.75-\alpha2$ , step 2 parametens of  $h8-R1$ )



坯料长厚比直接影响成形质量, 因此, 定义第2工步初始坯料的等效长厚比  $\gamma_2$  为悬臂长  $\Delta l$  与悬臂平均厚度的比值, 其中, 悬臂平均厚度近似取值为最大厚度与旋轮槽底宽度的平均值, 即  $\gamma_2 = \frac{2\Delta l}{t_m + h}$ , 其中  $t_m$  为试样悬臂板部分最大厚度, 参数示意图如图15所示。

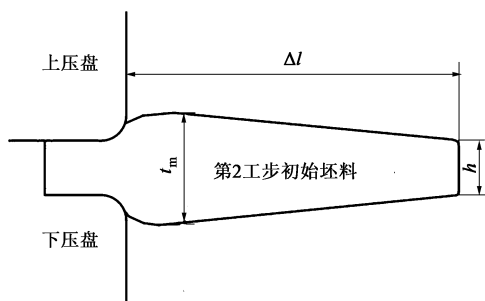


图15 等效长厚比的相关参数示意图

Fig. 15 Schematic diagram of related parameters for equivalent length to thickness ratio

图16为4个试样不同旋轮槽底宽度下的增厚结果。结果显示, 极限增厚比  $X_m$  随  $\gamma_2$  的减小而增大, 这与第1工步的结果一致。 $\alpha$  增加时,  $t_m$  随之增大, 在相同体积下,  $\Delta l$  必然减小, 从而减小  $\gamma_2$ , 试样整体显得更短而厚, 坯料在增厚过程中更不易发生弯曲导致折叠, 从而提高第2工步的极限增厚比  $X_m$ ;  $h$  的增加可以使得悬臂部分整体增厚, 即  $t_m$  随之增大, 同时, 相同体积下,  $\Delta l$  减小,  $\gamma_2$  减小, 悬臂变得更短而厚, 提高了第2工步的极限增厚比  $X_m$ 。因此, 第1工步在保证能够稳定成形条件下, 旋轮的凹槽倾角和槽底宽度均应尽可能最大, 得到最小的等效长厚比, 这样才能增厚更多的材料, 得到更大的增厚比。

#### 2.3.4 旋轮圆角半径 $R$ 对坯料应力状态的影响

当坯料尺寸相同时, 在同一旋轮槽底宽度  $h$  下, 成形载荷前期接近, 后期随着旋轮圆角半径  $R$  的增大而减小, 如图17所示。相同尺寸凹槽的旋轮圆角半径越大, 凹槽截面积越小, 为保证成形相同体积的材料, 需要增加凹槽深度来补偿, 因此, 旋轮的圆角半径越大, 凹槽深度越大, 即坯料径向减小量越小, 最终的径向载荷也越小。

由图17可知, 同一旋轮槽底宽度  $h$  下, 旋轮圆角半径  $R$  越大, 径向成形载荷越小。圆角不仅可以减少旋压过程中的径向载荷从而改善旋轮槽底部位的应力集中, 而且还能够改善工件外边缘所受的径向压应力状态, 如图18所示。图18分别为相同的

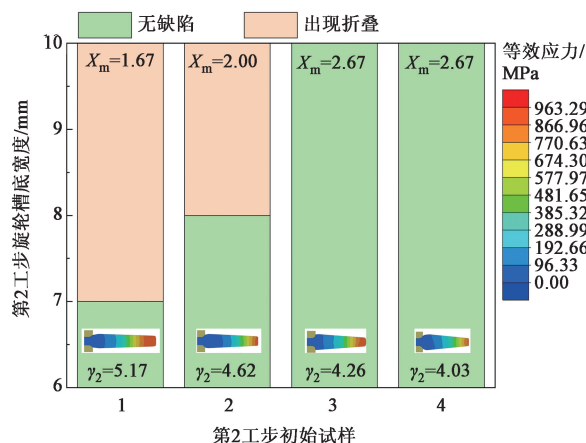


图16 4个试样的第2工步增厚成形结果

Fig. 16 Thickening forming results of step 2 for four samples

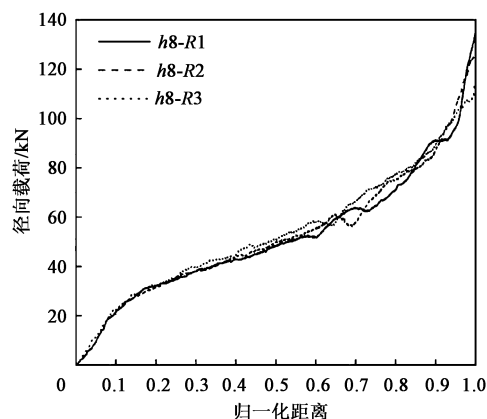


图17 第2工步同一旋轮槽底宽度  $h$  下不同旋轮圆角半径  $R$  的径向载荷对比

Fig. 17 Comparison of radial loads at the same groove bottom width of roller  $h$  and different fillet radiuses of roller  $R$  during step 2

旋轮槽底宽度 ( $h = 8 \text{ mm}$ )、不同旋轮圆角半径 ( $R = 1, 2, 3 \text{ mm}$ ) 对同一个初始坯料进行增厚旋压的径向等效应力云图。可以看到, 当旋轮圆角半径  $R$  从  $1 \text{ mm}$  增加至  $3 \text{ mm}$  时, 坯料外缘的压应力明显减小并更加均匀, 这说明增加圆角半径能够改善工件外边缘所受的径向压应力状态, 且圆角半径越大改善效果越明显。

从图18还可知, 圆角处径向压应力要比非圆角处的小, 在坯料的外边缘取一系列点, 分别测出各点的径向应力值和接触压力值, 如图19所示。从图19可以看出, 坯料外边缘的径向应力值和接触压力值大体呈对称分布, 坯料圆角部位各节点 (节点序号1、2、3、11、12、13) 的径向压应力值要比非圆角部位小, 同时圆角部位的接触压力值也要比非圆角部位小。

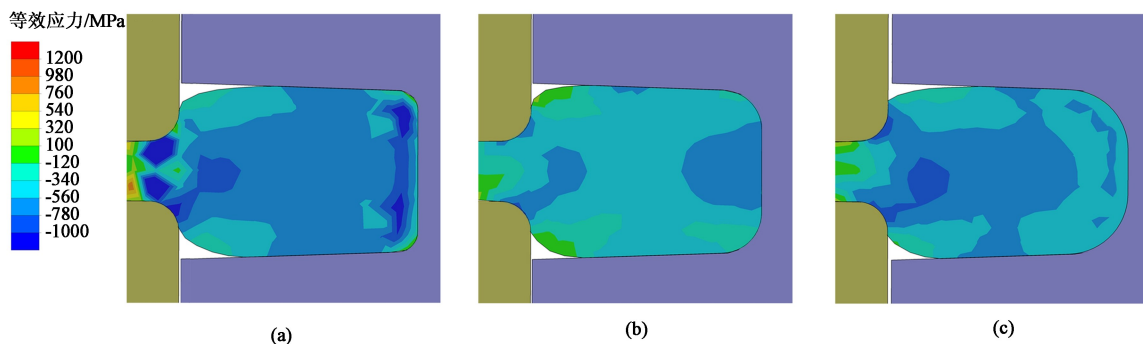
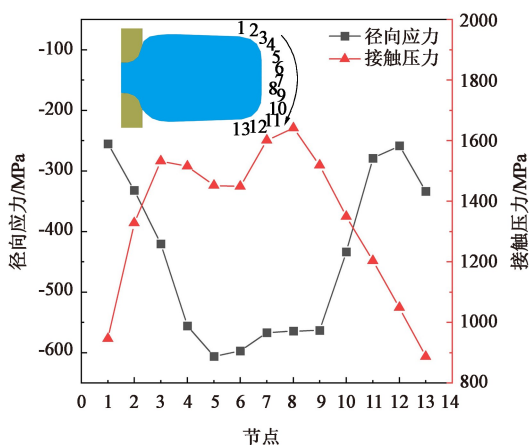
图 18 第 2 工步中旋轮圆角半径  $R$  对坯料径向等效应力的影响(a)  $h8-R1$  (b)  $h8-R2$  (c)  $h8-R3$ Fig. 18 Influence of different fillet radii of roller  $R$  on radial equivalent stress of blank during step 2

图 19 第 2 工步中坯料外边缘的径向应力及接触压力分布图

Fig. 19 Radial stress and contact pressure distribution diagrams of blank outer edge during step 2

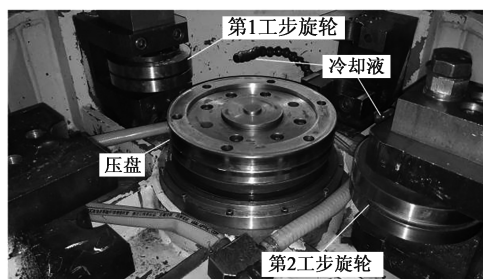


图 20 实验设备

Fig. 20 Experimental equipment

### 3 工艺实验验证

#### 3.1 实验设备

对称增厚旋压成形实验装置如图 20 所示。旋压机主轴夹紧力为 200 kN，周向均布 4 个液压驱动的旋轮，最大径向力为 200 kN，主轴、模具及刀架均满足实验载荷要求，实验过程中未出现任何打滑、偏载等不稳定现象。旋轮的进给以及主轴的旋转均由可编程逻辑控制器控制，实验过程中采用石墨乳液进行冷却润滑，旋轮型槽在加工过程中留有余量，经气体碳氮共渗热处理使表面硬度达到 58~62 HRC 后研磨至指定加工参数，并抛光处理，使表面粗糙度为  $0.8 \mu\text{m}$ ，以保证成形件的表面质量。

#### 3.2 实验结果

实验获得的成形件的增厚部位截面与有限元结果对比如图 21 所示。图 21 中的模拟和实验参数相同，第 1 工步的旋轮参数为  $h3.5-\alpha3$ ，第 2 工步的旋

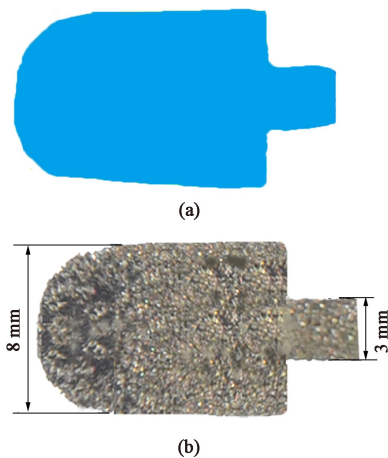


图 21 成形件径向截面的有限元模拟 (a) 与实验 (b) 结果对比图

Fig. 21 Comparison diagrams for radial cross-sections of formed parts between finite element simulation (a) and experiment (b) results

轮参数为  $h8-R1$ ，其他固定的工艺参数与坯料如前文模拟所述。

从图 21 可知，有限元模拟结果均与实验结果高度吻合，经过两工步增厚旋压，板料边缘由 3 mm 增厚至 8 mm，增厚比达到 2.67，远高于室温下的单工步增厚比 ( $3/2.5 = 1.2$ )<sup>[16]</sup>。这说明采用两工

步对称增厚旋压工艺能够显著提高增厚极限。

## 4 结论

(1) 对称增厚旋压成形过程中, 旋轮与坯料之间的摩擦因数、旋轮进给速度以及坯料旋转速度对增厚过程影响较小。

(2) 成形过程中, 旋轮的径向载荷远大于切向载荷与轴向载荷, 当坯料稳定增厚时, 轴向载荷始终几乎为零, 而当坯料非稳定增厚时, 切向载荷和轴向载荷均不为零且随旋轮进给略有增加。

(3) 第1工步成形过程中旋轮的凹槽倾角和槽底宽度对成形过程有一定影响, 随着旋轮凹槽倾角和槽底宽度的增大, 坯料逐渐由稳定成形变为无缺陷产生的非稳定成形, 直至变为有缺陷产生的非稳定成形。

(4) 第2工步坯料的等效长厚比显著影响极限增厚比, 旋轮圆角半径增大能够改善坯料外边缘所受的径向应力分布。

### 参考文献:

- [1] 侯红亮, 余肖放, 王耀奇. 国内旋压设备及其相关技术的发展与现状 [J]. 锻压装备与制造技术, 2009, 44 (4): 16-19.  
Hou H L, Yu X F, Wang Y Q. Development of spinning equipment and its related technology in China [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2009, 44 (4): 16-19.
- [2] Wong C C, Dean T A, Lin J. A review of spinning, shear forming and flow forming processes [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43 (14): 1419-1435.
- [3] 刘建华, 杨合, 李玉强. 旋压技术基本原理的研究现状与发展趋势 [J]. 重型机械, 2002, (3): 1-4.  
Liu J H, Yang H, Li Y Q. State of the art and trend of metal spinning technique [J]. Heavy Machinery, 2002, (3): 1-4.
- [4] 夏琴香, 王映品, 王甲子, 等. 多楔带轮旋压成形预成形工艺参数对腰鼓成形的影响 [J]. 模具工业, 2010, 36 (1): 26-31.  
Xia Q X, Wang Y P, Wang J Z, et al. Influence of preforming parameters on the drumming in multi-wedge belt pulley spinning [J]. Die & Mould Industry, 2010, 36 (1): 26-31.
- [5] Xu W C, Zhao X K, Shan D B, et al. Numerical simulation and experimental study on multi-pass stagger spinning of internally toothed gear using plate blank [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 450-466.
- [6] 黄亮, 杨合, 詹梅. 分形旋压成形技术研究进展 [J]. 材料科学与工艺, 2008, 16 (4): 476-480.  
Huang L, Yang H, Zhan M. Development of the research on splitting spinning [J]. Materials Science & Technology, 2008, 16 (4): 476-480.
- [7] 刘发美, 金俊松, 王新云, 等. 带底部法兰筒形件切旋成形工艺研究 [J]. 航空制造技术, 2019, 62 (13): 30-37.  
Liu F M, Jin J S, Wang X Y, et al. Study on dividing spinning process of cylindrical parts with bottom flange [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62 (13): 30-37.
- [8] Liu F M, Jin J S, Rao W, et al. Study of dieless radial spinning for thick-walled cylindrical parts with external grooves [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117 (3-4): 1163-1178.
- [9] Jin J J, Wang X Y, Li L. A sheet blank rotary forging process for disk-like parts with thickened rims [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30 (6): 2723-2729.
- [10] Kim Y J, Park J S, Cho C. Study on edge thickening flow forming using the finite elements analysis [A]. AIP Conference Proceedings [C]. American Institute of Physics, 2011.
- [11] Jin J S, Deng L, Wang X Y, et al. A new rotary forming process for rim thickening of a disc-like sheet metal part [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (11): 2247-2254.
- [12] Wang X Y, Li L, Deng L, et al. Effect of forming parameters on sheet metal stability during a rotary forming process for rim thickening [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 223: 262-273.
- [13] Wang X Y, Jin J S, Hu Y Z, et al. Study on the rotary forming process of a rim-thickened disc-like part using a local heating method [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 131-132: 252-264.
- [14] Jin J S, Wang S L, Tang X F, et al. Research on a multi-step spinning process for manufacturing disc-like part with thickened rim [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2022, 22 (1): 1-14.
- [15] Xue K M, Yang W Z, Yan S L, et al. Forming defect control and optimization of multi-step spinning thickening process considering the variation of spinning gap [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101 (518): 1183-1196.
- [16] 王伟. 单工步盘形件旋压对称增厚工艺的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.  
Wang W. Research on a Single-step Spinning Process for Symmetrical Thickening of Disk-like Parts [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [17] 吴文魁. 盘形件轮缘热旋压对称增厚成形研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.  
Wu W K. Study of a Rotary Forming Process for Symmetric Rim Thickening of Disc-like Parts under Heating Condition [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [18] 魏刚, 张伟, 邓云飞. 基于J-C模型的45钢本构参数识别及验证 [J]. 振动与冲击, 2019, 38 (5): 173-178.  
Wei G, Zhang W, Deng Y F. Identification and validation of constitutive parameters of 45 steel based on J-C model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38 (5): 173-178.
- [19] Taherizadeh A, Ghaei A, Green D E, et al. Finite element simulation of springback for a channel draw process with drawbead using different hardening models [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2009, 51 (4): 314-325.