

特种成形

## 薄壁叉形环轴向辗压成形塑性变形规律

曾凡飞, 庄武豪, 王梓熙

(武汉理工大学 汽车工程学院 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 研究了薄壁叉形环轴向辗压成形过程中等效应力、等效应变等变形场量与成形载荷的分布与演变规律。基于 Deform-3D 软件平台建立了薄壁叉形环轴向辗压成形的有限元仿真模型, 提取了成形过程中的等效应力、等效应变等变形场量与成形载荷数据。结果表明, 在薄壁叉形环轴向辗压成形过程中, 随着变形量的增加, 等效应力值与等效应变值逐渐增加, 上筋与侧筋的等效应力值明显比下筋大, 变形程度更高, 锥模主要承受 $z$ 向载荷, 且随着变形量的增加逐渐增大, 最大值为 134 kN。通过揭示薄壁叉形环轴向辗压成形过程中的塑性变形规律, 为实现薄壁叉形环轴向辗压成形提供了理论依据。

**关键词:** 薄壁叉形环; 轴向辗压; 等效应力; 等效应变; 成形载荷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.019

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0147-07

## Plastic deformation law for axial rolling-forging of thin-walled forked ring

Zeng Fanfei, Zhuang Wuhao, Wang Zixi

(Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, School of Automotive Engineering,  
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The distributions and evolution laws of the deformation field quantities such as equivalent stress and equivalent strain as well as the forming load during the axial rolling-forging of thin-walled forked ring were studied. Then, a finite element simulation model of the axial rolling-forging for thin-walled forked ring was established based on software Deform-3D platform, and the deformation field quantities such as equivalent stress and equivalent strain and the forming load data during the forming process were extracted. The results show that during the axial rolling-forging process of thin-walled forked ring, with the increasing of deformation amount, the equivalent stress and equivalent strain values gradually increase, and the equivalent stress values of upper and side ribs are significantly larger than those of lower rib, with a higher degree of deformation. The conical die mainly bears the  $z$ -direction load, which gradually increases with the increasing of deformation amount, with a maximum value of 134 kN. Thus, by revealing the plastic deformation law during the axial rolling-forging process of thin-walled forked ring, a theoretical basis is provided for realizing the axial rolling-forging of thin-walled forked ring.

**Key words:** thin-walled forked ring; axial rolling-forging; equivalent stress; equivalent strain; forming load

薄壁叉形环是运载火箭燃料贮箱的重要承载构件<sup>[1-3]</sup>, 其性能直接影响运载火箭的发射成功率和运载能力<sup>[4-6]</sup>。目前, 运载火箭薄壁叉形环主要采用焊接工艺制造<sup>[7-8]</sup>, 即将型材弯曲或锻造所得的分段环体焊接为整体, 从而获得拼接式薄壁叉形环。在焊接薄壁叉形环中, 焊缝的存在严重削弱了薄壁叉形环的力学性能, 增大了薄壁叉形环失效的风

险<sup>[9-10]</sup>。因此, 焊接工艺难以满足我国新一代重型运载火箭对薄壁叉形环更高性能的需求, 迫切需要发展运载火箭薄壁叉形环高效优质制造的新技术。塑性成形工艺具有材料利用率与制造效率高、成形力小等特点<sup>[11]</sup>, 而且能够细化晶粒组织<sup>[12-13]</sup>, 提高构件的力学性能, 发展薄壁叉形环塑性成形技术, 取代现有焊接制造技术, 是实现薄壁叉形环高效优质制造的重要途径。轴向辗压成形工艺是一种先进的局部塑性成形工艺, 其成形过程中模具与坯料局部接触, 坯料发生连续局部塑性变形, 最终实现构件整体塑性成形。本文基于 Deform-3D 软件平台, 建立了薄壁叉形环轴向辗压成形有限元仿真模型, 揭示了薄壁叉形环轴向辗压成形过程中的塑性变形规律, 为实现薄壁叉形环轴向辗压成形提供了理论依据。

收稿日期: 2023-06-19; 修订日期: 2023-09-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (52005375);

中国博士后科学基金面上项目 (2020M672429)

作者简介: 曾凡飞 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: zffemail@whut.edu.cn

通信作者: 庄武豪 (1989-), 男, 博士, 副研究员

E-mail: zhuangwuhao@whut.edu.cn

# 1 薄壁叉形环轴向辗压成形工艺原理

薄壁叉形环结构主要由上筋、下筋和侧筋组成,其半径为 $r$ ,筋高为 $h$ ,壁厚为 $t$ ,上筋与侧筋的夹角为 $\theta$ ,如图 1 所示。薄壁叉形环轴向辗压成形装置主要包括 3 个部分,分别为锥模、凹模与坯料,如图 2 所示。薄壁叉形环轴向辗压成形的基本原理为:将坯料置入凹模中,坯料在凹模的约束与带动下绕自身轴线作旋转运动;锥模绕自身轴线作旋转运动,同时沿竖直方向作进给运动,对坯料的上端面进行轴向辗压变形;在锥模的辗压作用和凹模的约束作用下,坯料产生连续局部塑性变形,金属发生多向流动,逐渐填充薄壁叉形环高筋型腔,从而实现薄壁叉形环整体塑性成形。坯料为带有下筋的简单截面环坯,其形状及尺寸如图 3 所示,其中, $H$ 为预制坯高度, $T$ 为预制坯厚度, $R$ 为预制坯外径(其值与 $r$ 相同)。

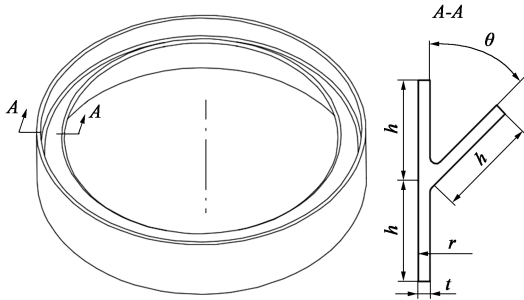


图 1 薄壁叉形环结构示意图  
Fig. 1 Structure schematic diagram of thin-walled forked ring

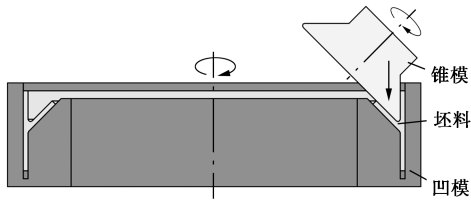


图 2 薄壁叉形环轴向辗压成形工艺原理  
Fig. 2 Process principle for axial rolling-forging of thin-walled forked ring

## 2 薄壁叉形环轴向辗压成形有限元仿真模型

**2.1 薄壁叉形环轴向辗压成形有限元仿真模型建立**  
本文基于 Deform-3D 软件平台,建立了薄壁叉形环轴向辗压成形有限元仿真模型,如图 4 所示,

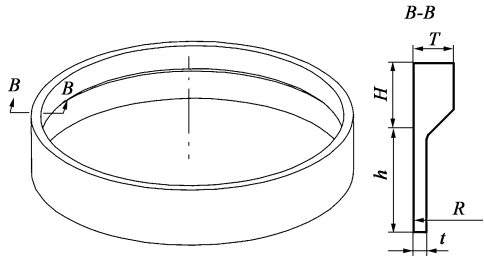


图 3 坯料结构示意图  
Fig. 3 Structure schematic diagram of blank

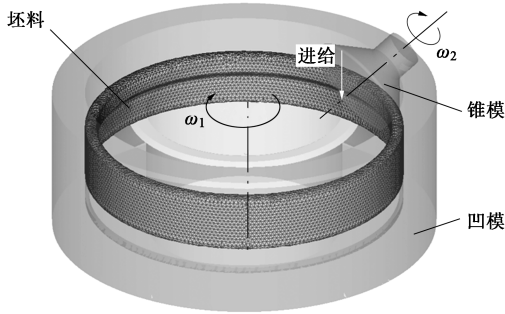


图 4 薄壁叉形环轴向辗压成形有限元仿真模型  
Fig. 4 Finite element simulation model for axial rolling-forging of thin-walled forked ring

其中, $\omega_1$ 为锥模公转速度, $\omega_2$ 为锥模自转速度,主要工艺参数如表 1 所示。在 Deform-3D 软件中,塑性体的旋转运动会造成有限元仿真计算时间延长和仿真结果不收敛。为了提高有限元仿真计算的效率,确保仿真结果的准确性及收敛性,本研究对模具的运动进行了等效替换,即将凹模和坯料设为固定不动,凹模的自转运动等效为锥模绕凹模轴线作公转运动,同时锥模沿轴向作进给运动,锥模的公转运动和轴向进给运动使锥模与坯料之间产生较大

表 1 薄壁叉形环轴向辗压成形工艺有限元仿真主要参数  
Table 1 Main parameters of finite element simulation for axial rolling-forging process of thin-walled forked ring

参数	数值
薄壁叉形环筋高 $h/\text{mm}$	25
薄壁叉形环壁厚 $t/\text{mm}$	3
薄壁叉形环半径 $r/\text{mm}$	120
锥模公转速度 $\omega_1/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$2\pi$
锥模轴向进给速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	2
预制坯高度 $H/\text{mm}$	20.88
预制坯厚度 $T/\text{mm}$	6.96
网格数量	250000
摩擦因数	0.3
锥模轴向进给量/ $\text{mm}$	16

的摩擦力,锥模在摩擦力的作用下绕自身轴线进行被动自转,从而实现薄壁叉形环轴向辗压成形。本模型中, $\omega_1$ 为 $2\pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , $v$ 为 $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此外,模具设为刚体,坯料设为塑性体,材料为2024铝合金。网格为四面体网格,数量为250000,摩擦类型设置为Constant,摩擦因数为0.3。

图5展示了薄壁叉形环轴向辗压成形的过程。

由图5可以看出,随着锥模的轴向进给,坯料发生塑性变形,金属朝各筋的型腔流动,逐渐填充薄壁叉形环的高筋型腔,最终实现薄壁叉形环整体塑性成形。所成形出的薄壁叉形环的上筋高度为23.75 mm,下筋高度为26.17 mm,侧筋高度为23.91 mm,误差范围均在 $\pm 10\%$ 以内,证明了提出的薄壁叉形环轴向辗压成形工艺是可行的。

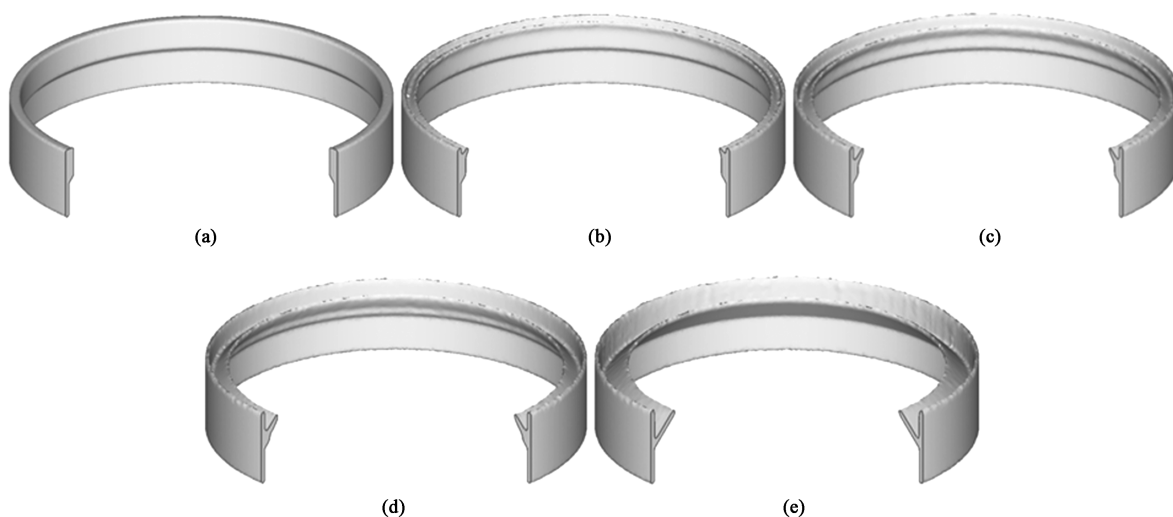


图5 薄壁叉形环轴向辗压成形过程

(a) 0 s (b) 2 s (c) 4 s (d) 6 s (e) 8 s

Fig. 5 Axial rolling-forging process of thin-walled forked ring

## 2.2 薄壁叉形环轴向辗压成形实验验证

为了验证所建立的有限元仿真模型的可靠性,本文开展了薄壁叉形环轴向辗压工艺实验,其工艺参数与有限元仿真模型工艺参数一致,最终成形出的薄壁叉形环如图6所示。对实验所成形的薄壁叉形环的筋高进行统计,并与仿真结果进行

对比,其结果如图7所示。从图7中可以看出,实验结果与仿真结果基本吻合,同时薄壁叉形环未出现拉缩、失稳、开裂等缺陷,成形质量较好。上述结果表明,本文所建立的有限元仿真模型是可靠的,提出的薄壁叉形环轴向辗压成形工艺是可行的。

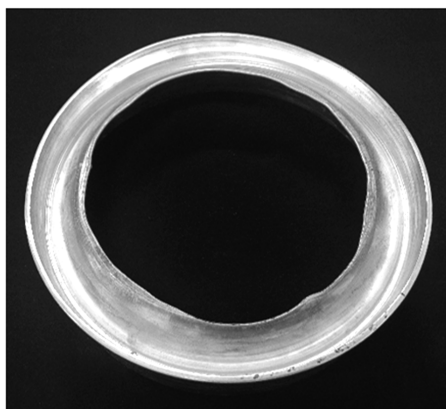


图6 薄壁叉形环轴向辗压成形实验结果

Fig. 6 Experiment result for axial rolling-forging of thin-walled forked ring

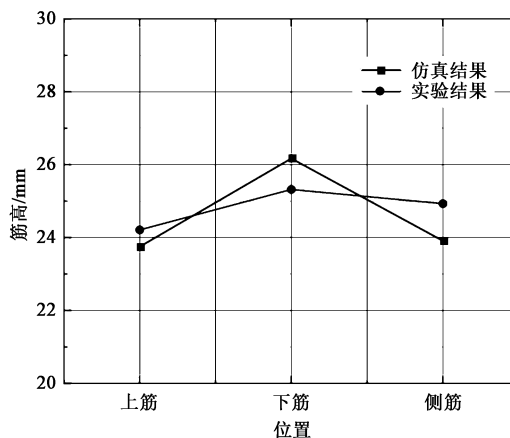


图7 仿真结果与实验结果筋高对比图

Fig. 7 Comparison diagram between simulation and experimental results of rib heights

### 3 薄壁叉形环轴向辗压成形塑性变形规律

#### 3.1 等效应力分布与演变规律

图 8 展示了薄壁叉形环轴向辗压成形过程中不同时刻下等效应力的分布规律与演变过程。从图 8 中可以看出,在薄壁叉形环轴向辗压成形初期,由

于锥模做轴向进给运动,首先与坯料上端面发生接触,所以上筋与侧筋的等效应力值较大,而下筋的等效应力值较小。在整个成形过程当中,坯料与轴向辗压成形模具之间仅发生局部接触,接触区域内的等效应力值明显偏大。随着变形量的增加,坯料表面逐渐与模具贴合,接触区域在不断增大,等效应力值也有明显的增加。到成形后期时,上筋与侧筋的等效应力值明显比下筋的等效应力值大。

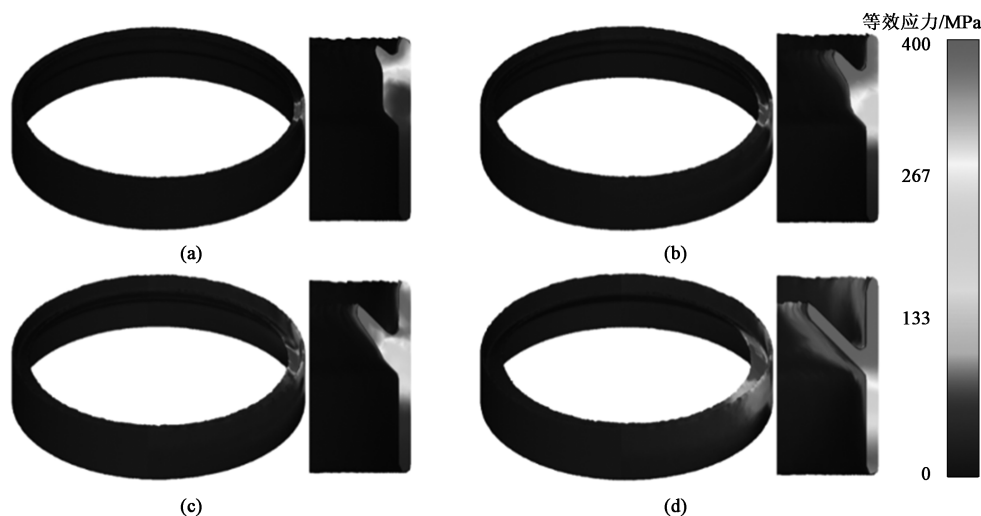


图 8 薄壁叉形环轴向辗压成形不同时刻等效应力分布云图

(a) 2 s (b) 4 s (c) 6 s (d) 8 s

Fig. 8 Equivalent stress distribution nephograms for axial rolling-forging of thin-walled forked ring at different time

#### 3.2 等效应变分布与演变规律

图 9 展示了薄壁叉形环轴向辗压成形过程中不同时刻下等效应变的分布规律与演变过程。从图 9 中可以看出,在薄壁叉形环轴向辗压成形初期,锥

模与坯料上端面的接触面积较小,仅坯料上端面附近区域内发生塑性变形,其余区域内的金属由于几

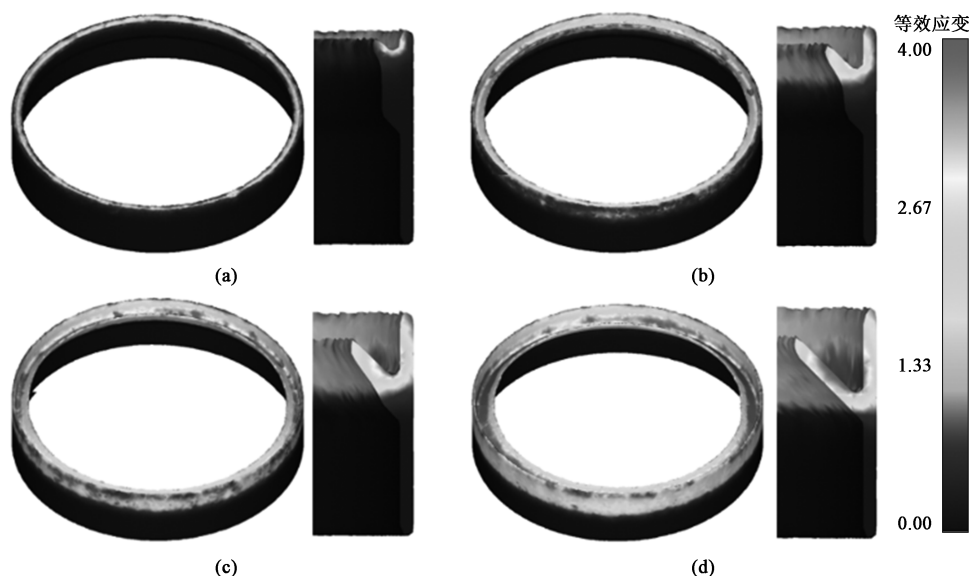


图 9 薄壁叉形环轴向辗压成形不同时刻等效应变分布云图

(a) 2 s (b) 4 s (c) 6 s (d) 8 s

Fig. 9 Equivalent strain distribution nephograms for axial rolling-forging of thin-walled forked ring at different time



乎未承受模具的辗压作用,等效应变值明显小于坯料上端面附近区域。随着锥模的轴向进给,塑性变形逐渐积累,等效应变值逐渐增大。在最终成形出的薄壁叉形环上,上筋内壁与侧筋外壁的等效应变值最大,特别是侧筋型腔内的金属,在受到锥模和凹模的挤压作用后,金属流动最剧烈,发生更大程度的塑性变形。

为了更加详细地分析各筋的等效应变分布规律,分别在各筋的外壁、中间层、内壁上沿各筋生长方向取点,提取了成形结束时各筋外壁、中间层、内壁的等效应变值,取点方式如图10所示。

成形结束时各筋外壁、中间层、内壁上沿各筋生长方向的等效应变如图11所示。为方便比较各筋等效应变值的大小,对各筋外壁、中间层、内壁的等效应变相加然后取平均值,结果如图12所示。从图11和图12中可以看出,上筋与侧筋的等效应变值沿筋高生长方向呈现先增大后减小的趋势,而下

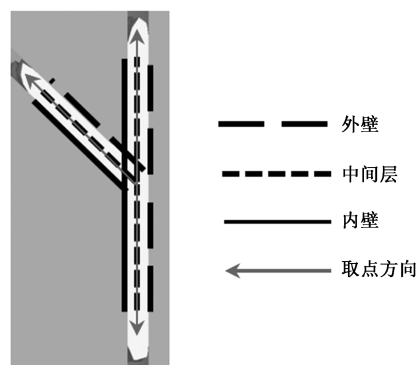


图10 各筋外壁、中间层、内壁取点方式示意图

Fig. 10 Schematic diagram of point selection method on outer wall, middle layer and inner wall of each rib

筋的等效应变值沿筋高生长方向一直降低。从各筋的等效应变平均值来看,下筋的等效应变平均值与上筋和侧筋的差距较大,上筋与侧筋在靠近三筋交汇区处的等效应变平均值的差距很小,在远离三筋

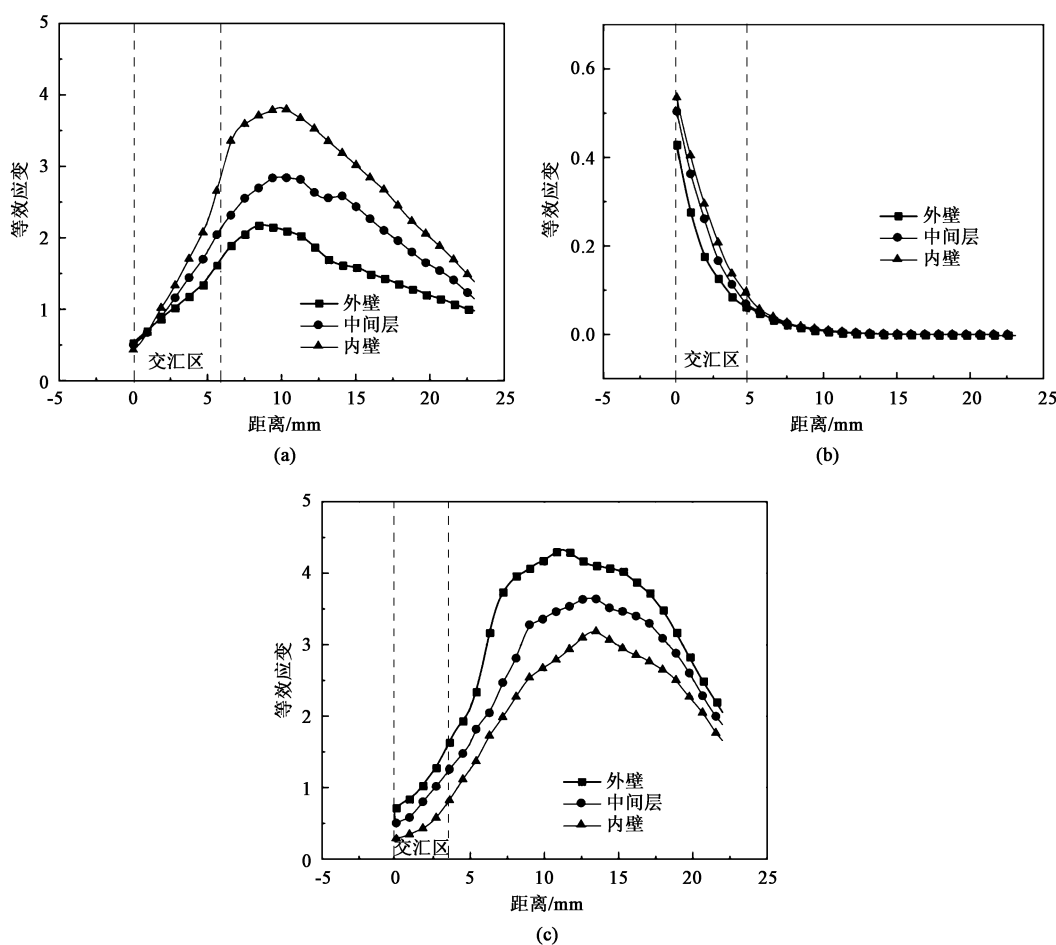


图11 成形结束时各筋外壁、中间层、内壁等效应变分布图

(a) 上筋 (b) 下筋 (c) 侧筋

Fig. 11 Distribution diagrams of equivalent strain on outer wall, middle layer and inner wall of each rib at end of forming

(a) Upper rib (b) Lower rib (c) Side rib

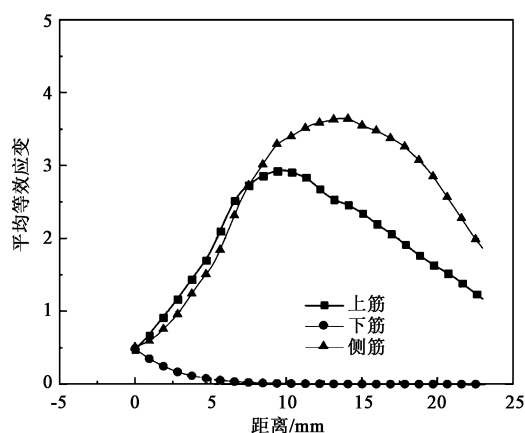


图 12 各筋等效应变平均值示意图

Fig. 12 Schematic diagram of average values of equivalent strain for each rib

交汇区处，侧筋的等效应变平均值比上筋大。这是因为：锥模主要辗压的是靠近交汇区的区域，特别是侧筋型腔内靠近交汇区的金属，这些区域内的金属受到锥模多道次的辗压作用，发生剧烈的塑性变形，产生多向流动，因此等效应变值更大，上筋与侧筋顶端的金属由于在成形前中期就流入各自型腔内，受到的辗压道次较少，金属被锥模辗压的时间较短，变形程度较小，累积的塑性变形较小，因此等效应变值也较小，而下筋内的金属几乎不受锥模的辗压作用，未发生明显的塑性变形，等效应变值明显小于上筋和侧筋。其次，上筋与下筋内壁的等效应变值最大，中间层次之，外壁上最小；侧筋外壁的等效应变值最大，中间层次之，内壁上最小；下筋外壁、中间层和内壁的等效应变值差别较小。这是因为：上筋内壁和侧筋外壁与锥模直接接触，最开始发生塑性变形，且塑性变形从上筋内壁和侧筋外壁传递到上筋外壁和侧筋内壁的过程中会逐渐削弱，因此等效应变值逐渐变小，下筋内的金属由于发生塑性变形的程度较小，因此外壁、中间层和内壁上的等效应变差值也较小。

### 3.3 成形载荷演变规律

为了展示薄壁叉形环件在轴向辗压成形过程中模具成形载荷的变化规律，提取了从成形开始到成形结束过程中锥模在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  这 3 个方向上的载荷数据，获得载荷-时间曲线，其结果如图 13 和图 14 所示，其中图 13 为整个成形过程中锥模在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  这 3 个方向上的载荷变化曲线，图 14 为锥模绕凹模轴线作公转运动一周内（即锥模绕凹模周旋一周）在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  这 3 个方向上的载荷变化曲线。

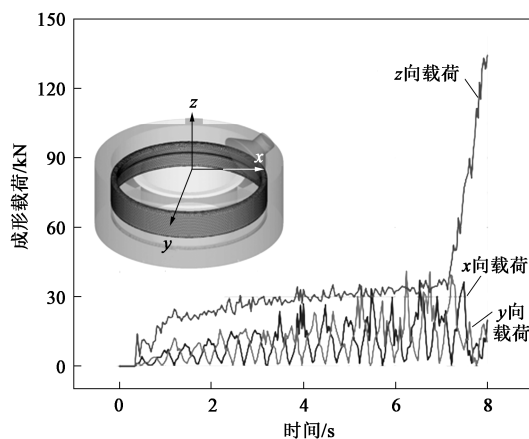


图 13 锥模三向载荷成形过程中的变化曲线

Fig. 13 Variation curves of loads in three directions of conical die during forming process

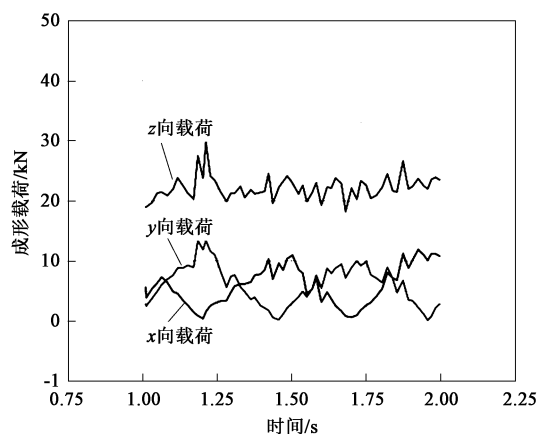


图 14 锥模三向载荷一周内变化曲线

Fig. 14 Variation curves of loads in three directions of conical die during one cycle

从图 13 和图 14 可以看出，锥模在  $x$ 、 $y$  方向上的载荷呈现周期性增大和减小趋势，且峰值在不断增大，最大值为 41 kN；在  $z$  方向上的载荷在成形开始后，呈现缓慢增加的趋势，到成形后期，载荷开始剧烈增加，最大值为 134 kN。锥模绕薄壁叉形环轴线做公转运动，且周期为 1 s，在这一周期内，锥模在  $x$ 、 $y$  方向上的载荷峰值交替出现了两次，呈现正弦函数式变化趋势。此外，锥模做轴向进给运动，但由于成形前中期时，坯料未完全与凹模内壁贴合，此时金属还未发生较大程度的塑性变形，因此成形载荷增加缓慢，而到成形后期，凹模与锥模对侧筋型腔内的金属进行挤压，金属开始发生剧烈塑性变形，且塑性变形逐渐积累，变形抗力不断增大，因此载荷开始剧烈增加。从大小上来看，锥模在  $z$  方向上的载荷比在  $x$ 、 $y$  方向上的载荷大，特别是成形后期差距更大，这是因为：金属在径向上未

减薄,塑性变形不明显,变形抗力无太大的增加,而在轴向上发生了剧烈的塑性变形,因此成形载荷更大。

## 4 结论

(1) 提出了薄壁叉形环轴向辗压成形工艺,建立了薄壁叉形环轴向辗压成形有限元仿真模型,开展了工艺验证实验,验证了所提出的薄壁叉形环轴向辗压成形工艺的可行性与有限元仿真模型的可靠性。

(2) 薄壁叉形环轴向辗压成形过程中,坯料与轴向辗压成形模具之间仅发生局部接触,接触区域内的等效应力值较大,随着变形量的增加,等效应力值明显增加。此外上筋与侧筋的等效应力值明显比下筋的等效应力值大。

(3) 薄壁叉形环轴向辗压成形过程中,上筋和侧筋产生更大程度的塑性变形,等效应变值沿高筋生长方向呈现先增大后减小的趋势,下筋由于未受到锥模的辗压,变形程度较低。

(4) 薄壁叉形环轴向辗压成形过程中,锥模主要承受 $z$ 向载荷,且随着变形量的增加逐渐增大,最大值为134 kN。 $x$ 、 $y$ 方向上的载荷较小,呈现正弦函数式变化趋势且峰值逐渐增大。

### 参考文献:

- [1] 林奔,黄超,马云龙,等. 重型运载火箭结构材料选材方案研究与启示 [J]. 轻合金加工技术, 2020, 48 (6): 14-18.  
Lin B, Huang C, Ma Y L, et al. Research and enlightenment of structural materials choice for the heavy launch vehicle [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2020, 48 (6): 14-18.
- [2] 安俊虎. 空间燃料站贮箱结构优化设计 [D]. 大连: 大连交通大学, 2018.  
An J H. Optimum Structural Design for Tank of Space Fuel Station [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2018.
- [3] 王正华. 异形燃料贮箱稳定性分析及优化设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.  
Wang Z H. Stability Analysis and Optimization Design of Special-shaped Fuel Tank [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [4] 朱平萍,刘宪力. 大型贮箱结构及工艺性研究 [J]. 航天制造技术, 2011, 167 (3): 42-45, 58.  
Zhu P P, Liu X L. Structural and technological research on large tank [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011, 167 (3): 42-45, 58.
- [5] 孙世烜,毕煌圣,杜宪策,等. 连接环结构对重型火箭部段

装配焊接的影响 [J]. 电焊机, 2018, 48 (4): 1-8.

Sun S H, Bi H S, Du X C, et al. Influence of connecting ring structure on assembly welding of heavy launch [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48 (4): 1-8.

- [6] 金恩沛. 火箭2219铝合金燃料贮箱封头旋压成形工艺优化与试验 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.  
Jin E P. Optimization and Experiment of Spinning Forming Process of Rocket 2219 Aluminum Alloy Fuel Tank Head [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2022.
- [7] 姚君山,蔡益飞,李程刚. 运载火箭箭体结构制造技术发展与应用 [J]. 航空制造技术, 2007, (10): 36-40, 42.  
Yao J S, Cai Y F, Li C G. Development and application of manufacturing technology for rocket body structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, (10): 36-40, 42.
- [8] 倪江涛,周庆军,衣凤,等. 激光增材制造技术发展及在航天领域的应用进展 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (10): 1365-1382.  
Ni J T, Zhou Q J, Yi F, et al. Development of laser additive manufacturing technology and its application progress in aerospace field [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (10): 1365-1382.
- [9] 王相龙. 火箭发动机复合材料燃料贮箱结构设计及缠绕成型工艺研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.  
Wang X L. Study on Structure Design and Winding Process of Composite Fuel Tank for Rocket Engine [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.
- [10] 秦芳诚,齐会萍,李永堂,等. 铝合金环形零件形/性一体化制造技术 [J]. 材料导报, 2021, 35 (9): 9049-9058.  
Qin F C, Qi H P, Li Y T, et al. Technology of integrated manufacturing in forming and modification of aluminum alloy rings [J]. Materials Reports, 2021, 35 (9): 9049-9058.
- [11] 李勇,李东升,李小强. 大型复杂壁板构件塑性成形技术研究与应用进展 [J]. 航空制造技术, 2020, 63 (21): 36-45, 53.  
Li Y, Li D S, Li X Q. A review of plastic forming technologies and applications for large and complex-shaped panels [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63 (21): 36-45, 53.
- [12] 李伟,陈文琳,吴跃,等. 两种连续局部塑性成形工艺对锻件微观组织的影响 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (1): 6-11.  
Li W, Chen W L, Wu Y, et al. Effects of two successively and locally plastic forming processes on microstructure [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (1): 6-11.
- [13] 韩冠军,杨合,樊晓光,等. TA15合金大型筋板件等温局部加载晶粒尺寸演化研究 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (5): 112-117.  
Han G J, Yang H, Fan X G, et al. Numerical simulation of microstructure evolution of TA15 alloy large-scale rib-web parts during isothermal local loading process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16 (5): 112-117.