

轧制

铝合金异形截面环件轧制及其拉缩缺陷分析

郑继荣^{1,2}, 兰 箭^{1,2}, 周 黎¹, 韩 振¹

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070;

2. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 以外径为 $\Phi 350$ mm 的内凹形截面铝合金环件为研究对象, 设计了两种不同的环件毛坯, 采用 ABAQUS 有限元软件对环件轧制过程进行数值模拟。通过模拟计算分析了内凹型截面铝合金环件轧制过程中拉缩缺陷的形成过程和形成机理, 发现环件内侧的径向拉缩随着环坯与芯辊的逐渐贴合呈现先增大后消失的现象, 底部的轴向拉缩越靠近内侧, 其尺寸越大。轧制过程中, 最大塑性等效应变位于环件外表面中部位置; 轧制结束时, 环件中部的塑性变形较大, 下部区域的等效应变较小。此外, 对两种环件毛坯的填充效果、轧制力和等效应变进行了对比分析, 结果表明, 采用异形毛坯具有更好的填充效果和更小的轴向偏载。根据模拟结果对异形毛坯进行了轧制实验, 轧制出合格的目标环件。

关键词: 异形截面; 环件轧制; 拉缩缺陷; 铝合金环件; 异形毛坯

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.019

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 10-0129-05

Analysis on rolling and shrinkage defects for aluminum alloy irregular cross-section ring

Zheng Jirong^{1,2}, Lan Jian^{1,2}, Zhou Li¹, Han Zhen¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Key Laboratory of Modern Auto Parts Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: For an concave cross-section aluminum alloy ring with an outer diameter of $\Phi 350$ mm, two different ring blanks were designed, and the ring rolling process was numerically simulated by finite element software ABAQUS. Then, the formation process and formation mechanism of shrinkage defects during the rolling process of aluminum alloy rings with concave cross-sections were analyzed by simulation calculations. The results show that the radial shrinkage on the inside of the rings first increases as the ring blank and the mandrel rollers gradually fits together, and then gradually disappears, and the closer the axial shrinkage at the bottom is to the inside, the larger its size is. During the rolling process, the maximum plastic equivalent strain is located in the middle position of the outer surface of the ring, and at the end of the rolling, the plastic deformation is larger in the middle section of the ring, while the equivalent strain in the lower area is smaller. Furthermore, the filling effect, rolling force, and equivalent strain of the two ring blanks were comparatively analyzed. The results show that using the irregular blanks, the parts have better filling effect and smaller axial offset load. Based on the simulation results, rolling experiments are conducted on irregular blanks, and qualified target ring parts are rolled.

Key words: irregular cross-section; ring rolling; shrinkage defects; aluminium alloy ring; irregular blank

铝合金环件是运载火箭的重要组成部分, 在航空航天领域具有广泛的应用。运载火箭燃料储箱上的连

接环和短壳结构件通常采用焊接的方式连接, 连接环与短壳结构件在圆度和周长尺寸相差较大的情况下, 焊接过程中的稳定性难以得到保证。因此, 实现连接环与短壳结构件的整体锻造成形, 可大大提高结构件的整体质量。环件轧制技术是生产无缝环件最有效的方法之一, 具有效率高、材料利用率高、精度高、噪音低等优势^[1-3]。目前, 对异形环件轧制的研究主要集中在小型环件轧制理论^[4-6]、工艺参数设计^[7-9]与毛坯设计优化^[10-13], 研究大型环形锻件的主

收稿日期: 2023-02-27; 修订日期: 2023-05-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3705500); 国家自然科学基金资助项目 (51975439)

作者简介: 郑继荣 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 798535440@qq.com

通信作者: 兰 箭 (1972-), 男, 博士, 教授

E-mail: jlan@whut.edu.cn

要方法是通过现场轧制实验，这涉及到反复实验和排错来确定合适的工艺参数。然而，这种方法往往会导致大量的材料、时间和资源的浪费。所以，可以先对目标环件的缩比环件的轧制过程进行探究并开展数学建模、数值模拟和轧制成形规律研究，这对异形截面环件轧制具有重要的理论和实践意义。

1 目标环锻件及其毛坯

目标缩比环件的锻件图如图 1a 所示。该内凹形

环件运用热轧制成形工艺，基于环锻件的截面轮廓形状，设计了图 1b 和图 1c 所示的两种轧制毛坯。矩形截面毛坯的几何尺寸是根据环件体积不变原则和轧制比来确定的。异形截面毛坯是在矩形截面毛坯的基础上，利用截面相似原理设计了一个凹槽，凹槽深度为 5 mm、高度为 45 mm。根据目标缩比锻件尺寸，对模具进行设计。关于芯辊部分的设计，为了使轧制得到的环件能与目标锻件具有一致的形状，芯辊在轧制区的形状应与目标锻件保持一致。

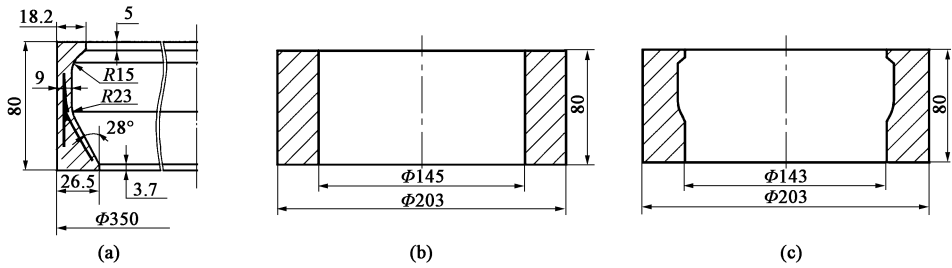


图 1 目标环件的锻件图及毛坯图
(a) 目标锻件 (b) 矩形毛坯 (c) 异形毛坯

Fig. 1 Drawings of target ring forgings and blank
(a) Target forgings (b) Rectangular blank (c) Irregular blank

2 建立有限元模型

基于 ABAQUS/Explicit 有限元软件建立目标缩比环件轧制过程的热力耦合有限元模型，如图 2 所示。目标缩比环件的毛坯几何尺寸如图 1 所示。环件设置为三维可变形体，模具设置为解析刚体。环件材料为 2219 铝合金，环件初始温度为 470 ℃。驱动辊的进给速度如图 3 所示，为保证每转进给量保持稳定，矩形毛坯的驱动辊进给速度随轧制过程逐级下降，在 2.1 s 停止进给，并整圆至 2.5 s。异形毛坯的驱动辊进给速度与矩形相似，在 2.5 s 停止，并整圆至 3 s，其余参数如表 1 所示。

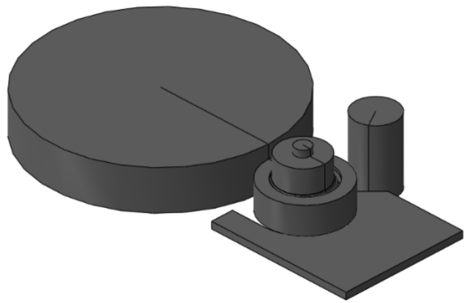


图 2 异形截面环件轧制有限元模型

Fig. 2 Finite element model of ring rolling with irregular cross-section

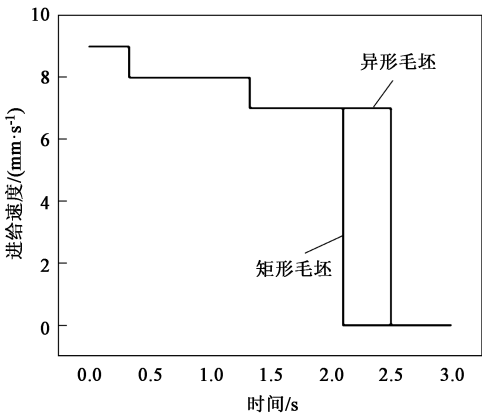


图 3 驱动辊进给速度曲线

Fig. 3 Feeding speed curves of driving roller

表 1 异形截面环件的轧制成形参数

Table 1 Rolling parameters of ring with irregular cross-section

参数	数值	参数	数值
驱动辊转速/(r · s ⁻¹)	61	热传递系数/(N · (s · mm · K) ⁻¹)	10
驱动辊直径/mm	Φ600	热对流系数/(N · (s · mm · K) ⁻¹)	0.02
芯辊上部直径/mm	Φ122	热辐射系数/(N · (s · mm) ⁻¹ · K ⁻⁴)	0.7
芯辊中部直径/mm	Φ140	环件与芯辊摩擦因数	0.1
芯辊下部直径/mm	Φ105	环件与驱动辊摩擦因数	0.4

3 有限元模拟结果分析

3.1 轧制过程中环件截面的变形情况

图 4 为每转结束时刻环件的轴向截面变形过程。由图 4 可知，随着目标环件轧制的进行，环件下端的径向拉缩尺寸越来越大，在轧制完成时，异形毛坯环件下端外侧端点 b 的径向拉缩尺寸为 3.68 mm（点 a 与点 b 的径向距离）。在环件下端外侧发生径向拉缩的同时，内侧也有拉缩现象的产生，拉缩尺寸如表 2 所示。随着轧制的进行，环件内测的拉缩

先逐渐变大，当拉缩的倾斜角度增大至芯辊角度时，环坯与芯辊完全贴合，该处径向拉缩转化为填充部分，缺陷消失。在轴向方向上，观察点 c 的位置变化情况可以发现，环件下端面会产生轴向拉缩现象。随着轧制的进行，轴向拉缩初始时逐渐变大，当环件内侧与芯辊贴合后，其增长趋势变小至零并随着金属填充开始减小。轴向拉缩出现在环件下端内侧的原因为：该部分还未与芯辊贴合，需要金属流入来填充，所以，环件下端边 bc 越靠近点 c ，需要填充的金属越多，轴向拉缩越大。

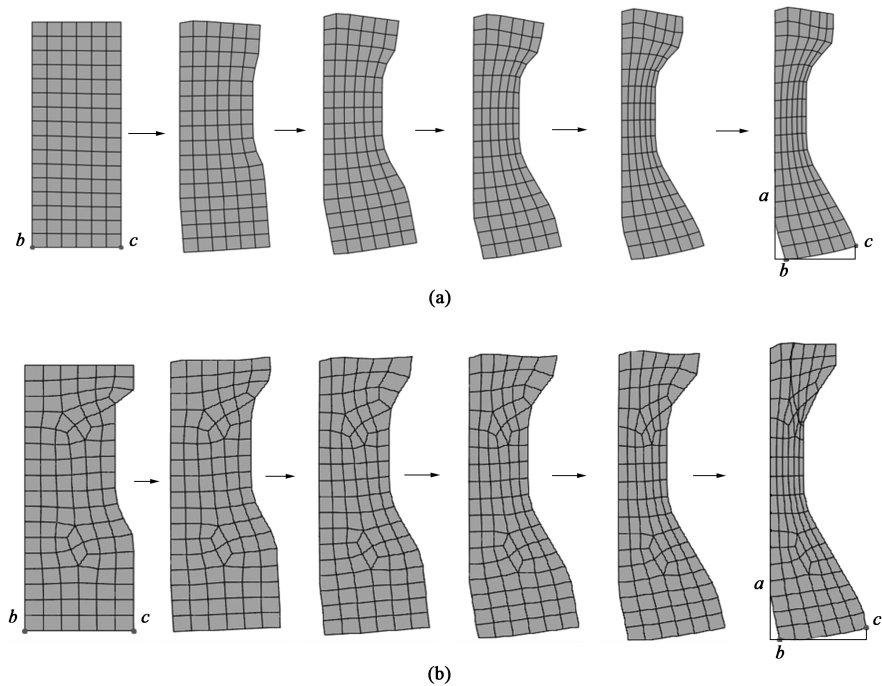


图 4 每转结束时刻环件的轴向截面变形过程
(a) 矩形毛坯 (b) 异形毛坯

Fig. 4 Deformation process of axial cross-section for ring at end of each revolution
(a) Rectangular blank (b) Irregular blank

表 2 异形截面环件最终轧制尺寸 (mm)

Table 2 Final rolled dimensions for rings with irregular cross-section (mm)				
方案	径向尺寸	轴向高度	径向拉缩	轴向拉缩
矩形毛坯	311	92	3.72	4.83
异形毛坯	321	89	3.68	3.58

3.2 轧制力与偏载对比

图 5a 为矩形毛坯和异形毛坯的径向轧制力随时间的变化图。由图 5a 可知，在轧制初期，径向轧制力迅速从零增长至某一值，这是因为驱动辊在直线进给过程中快速咬入孔型。之后进入一段逐渐上升

的阶段，这时处于金属填充状态。在轧制即将结束时，由于设置了一段整圆的时间，驱动辊停止进给，所以，径向轧制力迅速下降。对比两种毛坯的径向轧制力变化情况可知，矩形毛坯在轧制前中期的径向轧制力比异形毛坯稍小。导致这一现象的原因是：在轧制初期，矩形毛坯与芯辊的接触面积较小，仅有芯辊中部的区域，而异形毛坯由于凹槽的存在，具有更大的接触面积，在轧制过程中发生主动变形的区域更多，金属变形部分更大，所以有更大的径向轧制力。

图 5b 为矩形毛坯和异形毛坯的轴向偏载随时间的变化图。从图 5b 可知，异形毛坯的轴向偏载在轧

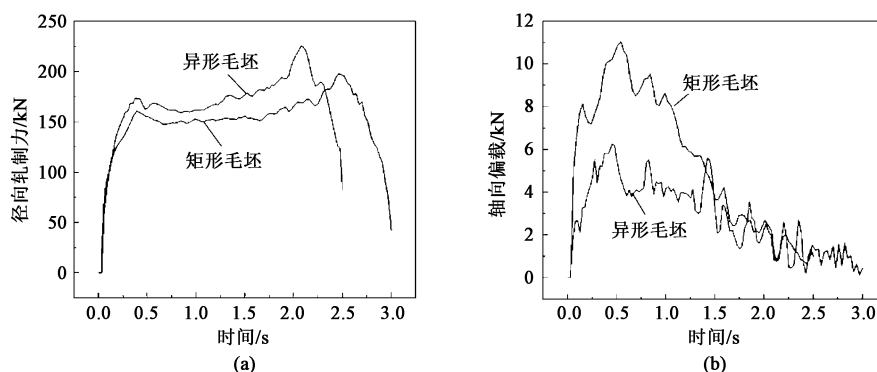


图 5 异形截面环件径向轧制力 (a) 和轴向偏载 (b) 变化曲线

Fig. 5 Variation curves of radial rolling forces (a) and axial unbalance loading (b) for ring with irregular cross-section

制前中期比矩形毛坯小, 峰值相差 5000 N。这是因为异形毛坯在轧制初期便已经和芯辊的斜面发生接触, 具有了内凹的形状。内凹的形状可以有效减少毛坯在轴向的晃动, 从而减小轴向方向上的轧制力。随着轧制进行, 毛坯与芯辊斜面的接触面积越来越大, 轴向偏载也越来越小。

3.3 等效应变分布

图 6 为环件轧制结束时矩形毛坯和异形毛坯的等效应变分布图。由图 6 可知, 矩形毛坯和异形毛坯

的等效应变分布相似, 在轧制结束时, 环件中部区域的外侧是最大等效应变所在部位。环件上、下部分的等效应变值相似。中部区域为变形最为剧烈的部位, 这是因为中部区域在轧制过程中壁厚减小量最大, 并且该区域从最初便与两辊同时贴合, 充分受到了驱动辊与芯辊提供的轧制力。而环件下端应是大变形区, 但结果显示该区域的等效应变较小, 仅有 0.5 左右, 不利于异形截面缩比目标环件的强化。

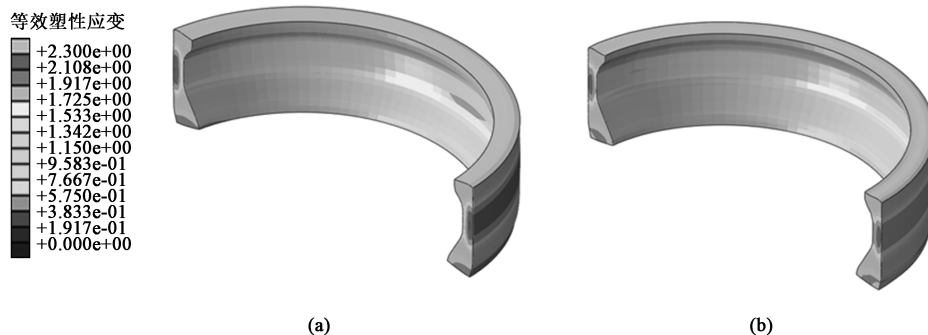


图 6 环件轧制结束时矩形毛坯 (a) 和异形毛坯 (b) 的等效塑性应变分布图

Fig. 6 Equivalent plastic strain distribution diagrams of rectangular blank (a) and irregular blank (b) for ring at end of rolling

4 异形毛坯环件轧制实验

根据上述模拟结果, 选择填充效果更好的异形毛坯作为实验毛坯, 对异形截面缩比目标环件进行轧制实验验证, 轧制模具实际装配图如图 7a 所示。轧制结束得到的环件如图 7c 和图 7d 所示, 实验轧制环件的径向尺寸为 $\Phi 334$ mm、轴向尺寸为 87 mm, 内外表面光滑, 仅在环件的下端外壁有少量毛边。与模拟结果对比, 径向尺寸误差仅为 3.9%, 证明了有限元模拟分析的可靠性。实验环件的轴向流动较少, 金属流动更多地作用在周向流动

上, 使得实验环件的径向尺寸比模拟稍大。此外, 实际轧制时的金属拉缩现象与模拟结果接近。

5 结论

(1) 异形毛坯和矩形毛坯对比, 异形毛坯在轧制过程中具有更小的轴向偏载, 峰值相差 5 kN, 轧制过程中晃动相对较少, 更为稳定。轧制结束时, 异形毛坯的拉缩尺寸更小, 轴向拉缩有效降低了 25.8%, 具有较好的填充率。根据模拟结果选择填充效果更好的异形毛坯, 采用 2219 铝合金在轧环机上进行轧制实验, 轧制出合格的目标缩比环件。对

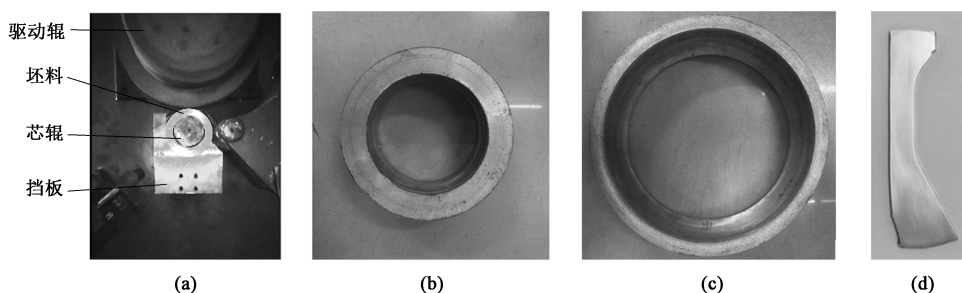


图 7 实际异形截面环件图

(a) 实验模具装配 (b) 实验毛坯 (c) 实验环件 (d) 环件截面

Fig. 7 Actual ring diagrams with irregular cross-section

(a) Experimental mould assembly (b) Experimental blank (c) Experimental ring (d) Ring cross-section

比实验与模拟结果, 径向尺寸误差仅为 3.9%, 证明了有限元模拟分析的可靠性。

(2) 轧制过程中, 最大等效应变位于环件外表面中部位置, 最大值为 2.1。轧制结束时, 环件中部的塑性变形较大, 下部区域的等效应变较小。

(3) 通过三维有限元模拟分析, 揭示了内凹型环件拉缩缺陷的产生机理。环件内侧的径向拉缩随着与芯辊的逐渐贴合而消失, 底部的轴向拉缩越靠近内侧越大。

参考文献:

- [1] 华林, 黄兴高, 朱春东. 环件轧制理论和技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
Hua L, Huang X G, Zhu C D. Ring Rolling Theory and Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [2] Hua L, Deng J D, Qian D S. Recent development of ring rolling theory and technique [J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2017, 54 (1): 65-87.
- [3] 王志慧. 环件轧制技术现状和发展 [J]. 机械制造, 2003, (9): 31-33.
Wang Z H. Status and development of ring rolling technology [J]. Machinery Manufacturing, 2003, (9): 31-33.
- [4] Cleaver C J, Lohmar J, Tamimi S. Limits to making L-shape ring profiles without ring growth [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 292 (1): 117062.
- [5] 任东超, 邱娟, 杨涛, 等. 2219 铝合金热加工及组织演化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 211-216.
Ren D C, Qiu J, Yang T, et al. Thermal working and microstructure evolution for 2219 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 211-216.
- [6] 李爽, 吴运新, 龚海, 等. 2219 铝合金异形截面环件轧制的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (19): 78-82.
Li S, Wu Y X, Gong H, et al. Numerical simulation of 2219 aluminum alloy ring rolling with abnormality section [J]. Thermal Processing Technology, 2021, 50 (19): 78-82.
- [7] 马君慧, 吴运新, 龚海, 等. 基于响应面法的异形截面环件轧制宏观成形缺陷的分析与优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47

(9): 135-144.

Ma J H, Wu Y X, Gong H, et al. Analysis and optimization on macrosopic forming defect for profiled section ring rolling based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 135-144.

- [8] 韩星会, 华林, 兰箭, 等. 内台阶锥形环件轧制三维有限元模拟和工艺优化设计 [J]. 中国机械工程, 2007, 232 (16): 1979-1983.

Han X H, Hua L, Lan J, et al. 3D FEM simulation and optimization design of rolling process of conical ring with inner steps [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 232 (16): 1979-1983.

- [9] 于华民, 董方, 吴运新, 等. 大型铝合金 C 形截面环轧制过程数值模拟和轧制区成形规律分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 197-206.

Yu H M, Dong F, Wu Y X, et al. Numerical simulation on rolling process and analysis on rolling zone forming law for large aluminum alloy C-shaped cross-section ring [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 197-206.

- [10] Oh I Y, Hwang T W, Woo Y Y, et al. Analysis of defects in L-section profile ring rolling [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 81-88.

- [11] 胡志力, 芦俊杰, 华林. 铝合金热冲压技术研究进展 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 1-11.

Hu Z L, Lu J J, Hua L. Review of hot stamping technology for aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 1-11.

- [12] Zhu X, Liu D, Yang Y, et al. Effects of blank dimension on forming characteristics during conical-section ring rolling of Inco718 alloy [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84 (9-12): 2707-2718.

- [13] 卞进良, 赵云路, 刘煜, 等. 铝合金液压机自由锻造的基本工序及生产工艺 [A]. 中国有色金属加工工业协会. 2019 年中国铝加工产业年度大会暨中国 (邹平) 铝加工产业发展高峰论坛论文集 [C]. 邹平, 2019.

Bian J L, Zhao Y L, Liu Y, et al. Basic process and production technology of free forging of aluminum alloy hydraulic press [A]. China Nonferrous Metal Processing Industry Association. Proceedings of the Annual Conference of China Aluminium Processing Industry and China (Zouping) Aluminium Processing Industry Development Summit Forum [C]. Zouping, 2019.