

外壁带凸台锥形截面环件轧制成形规律

万斯哲^{1,2}, 兰 箭^{1,2}

(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: 介绍了一种外壁带凸台锥形截面环件的一体成形轧制工艺, 该工艺降低了外壁带凸台锥形截面环件的材料消耗, 提高了环件的整体质量。通过 ABAQUS 软件建立了该环件轧制成形的有限元模型, 并对轧制成形工艺进行了分析, 研究了轧制过程中 Mises 应力、内壁位移和等效应变的变化规律。结果表明: 在环轧开始阶段, 由于应力分布不均匀, 应力呈周期性变化, 在 4.5 s 后, 环件的应力分布逐渐均匀; 在材料填充凸台过程中, 远离凸台孔处的材料堆积并高于凸台孔; 凸台两侧的应变存在差异, 且当进给量为 4.5 mm 时更加明显。实验结果与模拟结果相近, 验证了该成形工艺的可行性。

关键词: 锥形截面; 环件轧制; 凸台成形; Mises 应力; 内壁位移; 等效应变

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.020

中图分类号: TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 10-0134-05

Rolling forming law of ring with convex cone section on outer wall

Wan Sizhe^{1,2}, Lan Jian^{1,2}

(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: An integral forming rolling process of the ring with convex cone section on outer wall was introduced, which reduced the material consumption of the ring with convex cone section on outer wall and improved the overall quality of the ring. Then, the finite element model of the ring rolling forming was established by software ABAQUS, the rolling forming process were analyzed, and change laws of the Mises stress, inner wall displacement and equivalent strain during rolling process were studied. The results show that at the beginning of ring rolling, due to the uneven stress distribution, the stress changes periodically. After the ring is rolled for 5 s, the stress distribution gradually becomes uniform. During the process of filling the boss with material, the material far away from the boss hole accumulates and becomes higher than the boss hole. There is a difference in strain on both sides of the boss, and it becomes more obvious when the feeding amount is 4.5 mm. The experimental results are close to the simulation results, which verifies the feasibility of the forming process.

Key words: cone section; ring rolling; convex forming; Mises stress; inner wall displacement; equivalent strain

随着科技的发展, 航空零部件对材料、精度和性能等方面的要求不断提高^[1-2]。作为机匣的一部分, 外壁带凸台锥形截面环件是航空发动机上的重要承力部件之一。许多学者均对环件轧制成形工艺过程进行了大量的研究, 主要有成形理论^[3-6]和工艺参数优化^[7-9]等方面。传统的加工方法是通过辗环设备加工包络零件的环件, 然后再使用加工中心加工凸台。然而, 由于机匣零件通常采用高硬度、高强

度、耐腐蚀和耐高温的材料, 加工硬化现象严重, 切削困难, 加工效率低, 刀具磨损严重^[10-12]。切削加工会破坏金属流线, 降低零件质量, 同时还会导致大量的材料浪费。因此, 本文基于外壁带凸台矩形截面环件^[13], 提出了一种更为复杂的外壁带凸台锥形截面环件的成形方法。外壁带凸台锥形截面环件轧制工艺能够将环件轧制和凸台成形合为一次成形, 不仅能减少凸台的机加工余量, 提高加工效率, 同时减少了金属流线的破坏, 提高了环件质量。

1 外壁带凸台锥形截面环件轧制成形原理

外壁带凸台锥形截面环件轧制成形原理如图 1 所示, 其由 4 部分组成: 驱动辊、成形瓣模、毛坯

收稿日期: 2023-02-27; 修订日期: 2023-05-26

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

作者简介: 万斯哲 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 747420221@qq.com

通信作者: 兰 箭 (1972-), 男, 博士, 教授

E-mail: jlan@whut.edu.cn

和芯辊。为了防止轧制过程中对销钉的过度挤压，瓣模与上、下模板的直径差应大于凹槽的深度。图 1 中， v 为芯辊进给速度， ω 为驱动辊速度。

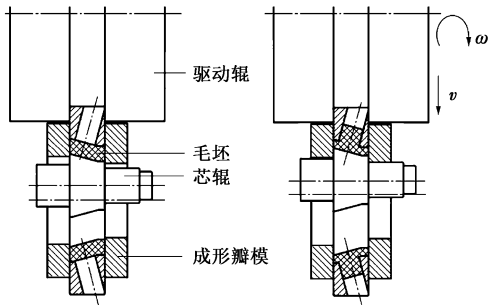


图 1 外壁带凸台锥形截面环件轧制成形原理图
Fig. 1 Principle diagram of rolling forming for ring with convex cone section on outer wall

首先，毛坯被装入成形瓣模并装配在芯辊上；然后，驱动辊咬住成形瓣模，以恒定的角速度旋转，成形瓣模在与驱动辊的摩擦下以相同的速度从动旋转，同时以恒定的速度向芯辊方向进给；随着驱动辊的进给，环件壁厚逐渐减少，内径增大，外径由于成形瓣模的约束而保持不变，材料从 4 个成形孔中流出，在环件的外壁上形成 4 个凸台。

2 外壁带凸台锥形截面环件轧制有限元模型

环件毛坯尺寸如图 2 所示，材料选用 2219 铝合金，杨氏模量为 70 GPa，初始屈服应力为 324 MPa，泊松比为 0.33，密度为 $2.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，目标环件外壁上有截面尺寸为 $\Phi 2$ 、 $\Phi 25$ 、 $\Phi 30$ 和 $\Phi 35 \text{ mm}$ 的 4 种圆形凸台。与矩形截面环件^[15]不同，锥形截面环件有一个 30° 的锥度，造成锥形截面环件倾斜，导致坯料在装配过程中相对于芯辊发生滑动。为解决该问题，在锥形截面环件的两端增加了与芯辊轴线平行的附加部分。

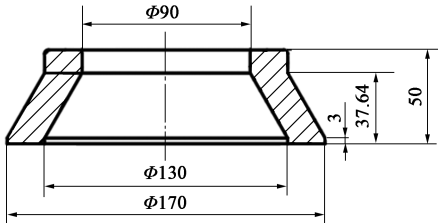


图 2 环件毛坯的几何尺寸示意图
Fig. 2 Schematic diagram of geometry sizes for ring blank

外壁带凸台锥形截面环件轧制的有限元模型如

图 3 所示。为了简化模拟过程，取消驱动辊的设置，将运动替代为成形瓣模绕自身轴线做匀速旋转，同时芯辊以远离成形瓣模轴线方向匀速进给。轧制过程中，主要存在成形瓣模与环件之间的摩擦和芯辊与环件之间的摩擦，因此，外壁带凸台环件轧制过程中主要设置两个接触对，分别为成形瓣模与环件的摩擦、芯辊和环件之间的摩擦，摩擦类型均为库伦摩擦。相关模拟参数如表 1 所示。

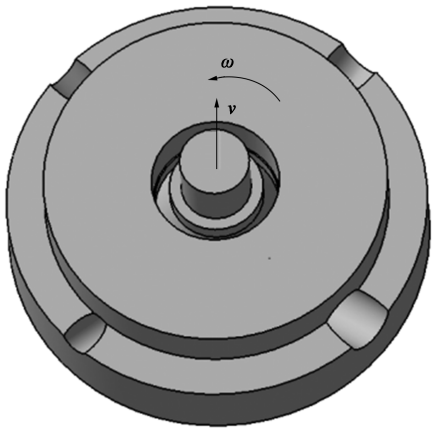


图 3 外壁带凸台锥形截面环件轧制有限元模型
Fig. 3 Finite element model for ring of with convex cone section on outer wall

表 1 有限元模拟参数
Table 1 Finite element simulation parameters

参数	数值
进给速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	1
成形瓣模转速/($\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.69
芯辊直径/mm	$\Phi 80$
芯辊与环件摩擦因数	0.1
成形瓣模与环件摩擦因数	0.3
坯温度/ $^\circ\text{C}$	470
模具温度/ $^\circ\text{C}$	200
热交换系数/($\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	20

3 模拟结果分析

3.1 Mises 应力分析

图 4 为环件轧制成形过程中的 Mises 应力分布图。在 2.1~2.8 s 过程中，环件平均 Mises 应力表现为从小到大再到小的波动趋势，在 2.1 s 时为最平均应力。应力分布的不均匀性在 2.1 和 2.8 s 时最为明显。为了进一步研究环件平均 Mises 应力与

时间的相关性,提取并分析了环件的平均 Mises 应力,如图 5 所示。随着环件轧制的进行,平均 Mises 应力迅速上升至约 11 MPa,随后产生周期性变化,

在 4.5 s 之后稳定在约 13 MPa。这表明在轧制过程中,应力分布在 4.5 s 之后趋向于均匀,有利于提高零件的质量。

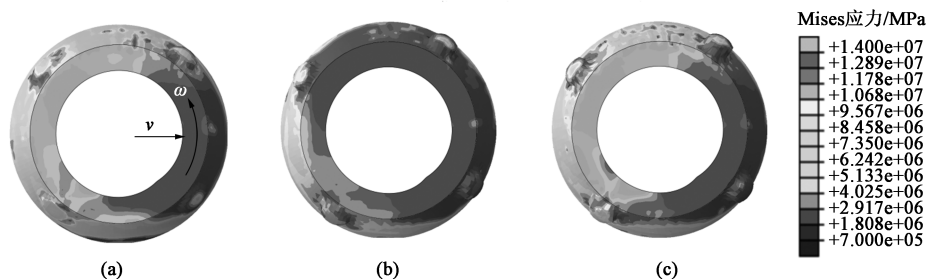


图 4 环件成形过程不同时间的 Mises 应力分布图

(a) 2.10 s (b) 2.65 s (c) 2.80 s

Fig. 4 Mises stress distribution diagrams at different time during forming process of ring

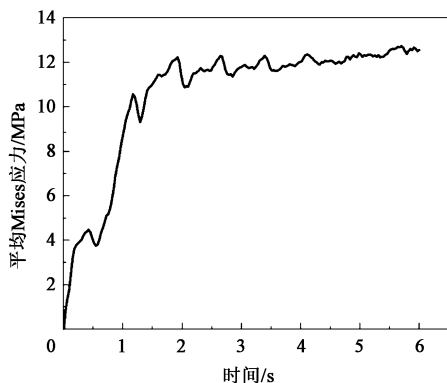


图 5 平均 Mises 应力随时间的变化曲线

Fig. 5 Changing curve of average Mises stress with time

3.2 内壁位移分析

环件靠近凸台孔处的内壁质量是环件质量研究的重点之一,为了研究此处塑性应变的变化规律,在毛坯内壁均匀选取 3 个点,点 3 到点 1 逐渐远离凸台孔,提取了不同孔径下 3 条路径在轧制结束时的塑性应变变化情况,如图 6 所示。

位移增量随时间的变化曲线表明,每圈轧制过程中均存在 3 次明显的内径变化:第 1 次内径减小为材料堆积过程,此过程发生在接近芯辊前的一段时间,随着模具旋转与芯辊进给,芯辊前端的材料受到挤压而发生堆积,从而产生内径减小的现象;第 2 次内径增加发生在接触芯辊时,堆积的材料经过芯辊发生内径扩大,直到与芯辊脱离接触;第 3 次内径减少发生在与芯辊脱离接触的过程,由于芯辊继续进给,前端材料受到挤压,导致后端材料受到影响发生反向流动,内径减小,远离芯辊之后这种影响逐渐减小。

对比不同位置的 3 个点,轧制开始时,3 个点的半径增加量趋于一致;随着时间的增加,由于上

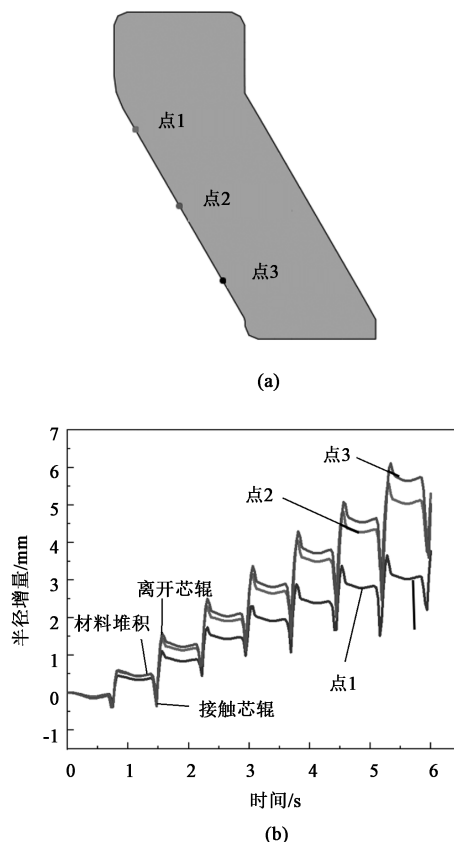


图 6 内壁不同部位半径增量随时间的变化

(a) 环件内壁选取点 (b) 半径增量随时间的变化曲线

Fig. 6 Change of radius increment in different parts of inner wall with time

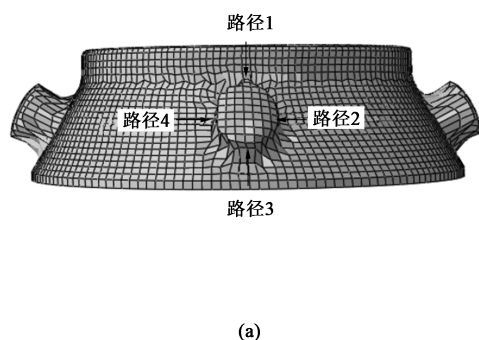
(a) Selected points on inner wall of ring

(b) Changing curves of radius increment with time

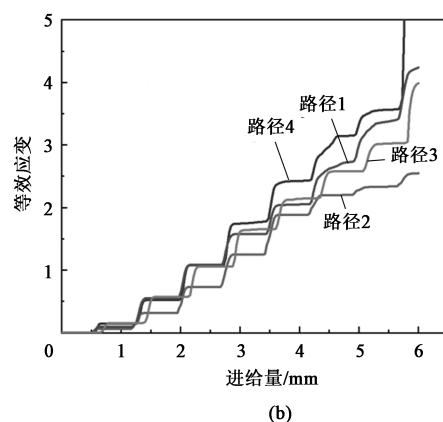
端点远离凸台孔,靠近上端点处的材料堆积量与半径扩大量均明显大于下端点,在填充过程中向凸台孔转化的效率远远小于靠近凸台孔处的材料,导致材料进一步累积,越远离凸台孔处,堆积的材料越多。

3.3 等效应变分析

凸台的成形质量是环件质量研究的重点之一, 为了研究此处塑性应变的变化规律, 选取孔径为 $\Phi 25$ mm 凸台的四周侧面作为等效应变提取路径, 提取了四周在轧制过程中等效应变随进给量的变化



(a)



(b)

图 7 等效应变随进给量的变化

(a) 环件外壁选取路径 (b) 等效应变随进给量的变化曲线

Fig. 7 Change of equivalent strain with feed amount

(a) Selected paths on outer wall of ring (b) Changing curves of equivalent strain with feed amount

3.4 实验验证

常温下的铅和高温下的铝合金, 其流动性能相似, 因此, 在常温条件下利用铅材料来模拟高温下铝合金环件轧制过程的流动性能是可靠的^[1]。为了验证凸台成形的可行性, 同时降低实验难度, 以铅质毛坯常温下的轧制代替铝合金热轧, 设置轧制时间为 4 s。实验结果如图 8 所示, 结果显示凸台均成功轧出, 环件质量良好。图 9 为凸台的高度对比情况, 结果显示模拟结果略高于实验结果, 两者存在的误差不高于 10%, 说明有限元模拟的环件流动情况基本符合实际情况。

4 结论

(1) 环件轧制前期的应力存在周期性变化, 同时存在应力分布不均的问题, 4.5 s 后应力周期性减弱, 应力分布逐渐均匀。因此, 时间小于 4.5 s 的轧制需要通过整圆等其他方法使环件应力分布均匀, 提高环件质量。

(2) 轧制过程中内壁材料堆积和填充情况不同, 填充时远离凸台孔处的材料向孔内的转换率小, 因此, 在设计毛坯时需要注意凸台孔与环件高度之间的比例。

(3) 凸台左右两侧发生的等效应变存在明显差异, 当进给量大于 4.5 mm 之后, 这种差别显著增

情况, 如图 7 所示。研究发现, 路径 1 和路径 3 的等效应变差别较小, 路径 2 和路径 4 的等效应变差别较大, 当进给量大于 4.5 mm 之后, 这种差别进一步增大, 导致凸台左右两侧的生长速度不同, 凸台向等效应变小的一侧弯曲。



图 8 轧制成品

Fig. 8 Finished product after rolling

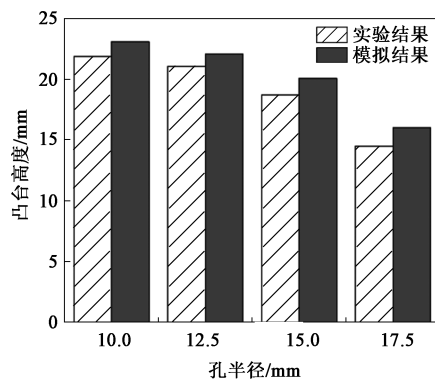


图 9 凸台高度对比

Fig. 9 Comparison of convex height

加, 从宏观上导致两侧凸台高度不一致, 降低凸台成形质量。

(4) 最终实验成功轧制出目标形状环件, 验证了所提出的工艺是可行的。

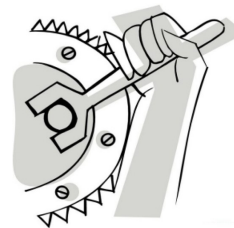
参考文献:

- [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] 齐会萍, 李永堂, 华林. 环形零件辗扩成形工艺研究现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (14): 81-86.
Qi H P, Li Y T, Hua L, et al. Research status and developing trends on the rolling forming process of ring part [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (14): 81-86.
- [3] 黄天佑. 材料加工工艺 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Huang T Y. Material Processing Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [4] Mamalis A G, Hawkyard J B, Johnson W. Spread and flow patterns in ring rolling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1976, 18 (1): 11-16.
- [5] Mamalis A G, Johnson W, Hawkyard J B. On the pressure distribution between stock and rolls in ring rolling [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1976, 18 (4): 184-195.
- [6] 陈永红, 周存龙. WHZ-200 型环件轧制实验装置的研制 [J]. 山西机械, 1996, (2): 20-22.
Chen Y H, Zhou C L. Development of WHZ-200 ring rolling experimental device [J]. Shanxi Machinery, 1996, (2): 20-22.
- [7] Hawkyard J B, Johnson W, Kirkland J, et al. Analyses for roll force and torque in ring rolling, with some supporting experiments [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1973, 15 (11): 873-893.
- [8] Yang D Y, Kim K H. Rigid-plastic finite element analysis of plane strain ring rolling [J]. International Journal of Mechanical Science, 1988, 30 (8): 571-580.
- [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] 杨智皓, 路晓辉, 兰箭, 等. 环件轧制多尺度数值模拟研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (3): 1-12.
Yang Z H, Lu X H, Lan J, et al. Research progress in multi-scale numerical simulation of ring rolling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 29 (3): 1-12.
- [11] Han X, Hua L, Zhou G, et al. FE simulation and experimental research on cylindrical ring rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 1245-58.
- [12] Han X, Hua L, Zhou G, et al. An innovative eccentric ring rolling method for fabricating eccentric rings [J]. International Journal of Mechanical Sciences 2017, 120: 120-35.
- [13] 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): 135-143.
Ma J H, Wu Y X, Gong H, et al. Analysis and optimization on macroscopic forming defect for profiled section ring rolling based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 135-143.

《电加工与模具》征订启事

《电加工与模具》是我国特种加工和模具制造领域国内外公开发行的专业性技术刊物, 以促进特种加工和模具制造领域科研、生产、教学的发展, 推动行业的技术进步, 提高广大读者的理论和业务水平为宗旨。

《电加工与模具》主要报道内容为: 特种加工 (包括电火花加工、电化学/电解加工、超声加工、激光与高能束流加工、增材制造) 和模具制造领域的设计研究成果、工艺应用技术、使用维修经验、产品开发信息和行业发展动态。



本刊信息广泛丰富、内容先进实用、文字准确清晰、广告真实可靠、装帧美观大方, 是广大读者的忠实朋友, 是专家学者交流学术成果的园地, 是科技人员展示新技术、新工艺的舞台, 是企业宣传产品、拓展市场、提高知名度的窗口。

欢迎特种加工和模具行业的广大科技人员、管理干部、技术工人和院校师生订阅, 欢迎广大作者赐稿, 欢迎企事业单位刊登广告。

全国各地邮局均可订阅, 也可直接向编辑部订阅。每期定价10元, 全年70元。
编辑部地址: 江苏省苏州高新区金山路180号 邮编: 215011
电话: 0512-67274541 <http://www.djgu.cbpt.cnki.net> E-mail: djgymj66@163.com

邮发代号: 28-36

双月刊 1966年创刊

中国标准连续出版物号

ISSN 1009-279X

CN 32-1589/TH

- ☆ 中国科技论文统计源期刊
- ☆ 中国科学引文数据库来源期刊
- ☆ 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊
- ☆ 中国核心期刊 (遴选) 数据库收录期刊
- ☆ 中国期刊全文数据库、中国学术期刊 (光盘版)、中国知网、万方数据、维普网全文收录期刊