

基于 Simufact 模拟的复杂异形截面环件辗扩变形

裴蒙蒙¹, 齐会萍²

(1. 晋中信息学院 智能工程学院, 山西 晋中 030800; 2. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 基于 Simufact 模拟建立了大型复杂异形截面环件的两步辗扩有限元模型, 分析了两步辗扩过程中环形构件的等效应变和温度分布规律。结果表明: 环件的等效塑性应变和温度分布极不均匀, 内轮廓辗扩过程中环件的等效应变由内外表面到中部区域逐渐变小, 温度由环件表面向心部区域逐渐升高, 最低温度达 762.512 °C; 在环件外台阶辗扩过程中, 环件等效塑性应变由端面 4 个棱角区向环件下半部分心部逐渐变小, 其温度分布情况与环件内轮廓辗扩温度分布规律大致相同, 最低温度达 818.441 °C。采用两步辗扩获得了整体充满效果较好、辗扩过程稳定且符合设计要求的大型复杂异形截面环件, 证实了模拟结果可为大型复杂异形截面环件两步辗扩成形工艺的实际生产提供理论依据。

关键词: 环形构件; 辗扩; Simufact; 塑性变形; 温度分布

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.09.012

中图分类号: TG335

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 09-0092-07

Ring rolling deformation of complex irregular section ring based on Simufact simulation

Pei Mengmeng¹, Qi Huiping²

(1. School of Intelligent Engineering, Jinzhong College of Information, Jinzhong 030800, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on Simufact simulation, a finite element model of two-step ring rolling for large complex irregular section ring was established, and the equivalent strain and temperature distribution laws of ring component in the two-step ring rolling process were analyzed. The results show that the distributions of equivalent plastic strain and temperature of ring is extremely uneven. The equivalent plastic strain of ring gradually decreases from the inner and outer surfaces to the middle region during the inner profile ring rolling process, and the temperature of ring gradually increases from the surface of ring to the center region. The lowest temperature is 762.512 °C. However, in the process of outer step ring rolling, the equivalent plastic strain of ring gradually decreases from the four corners of end surface to the center of lower part for ring, and its temperature distribution is roughly the same as that of the inner profile rolling of ring, with the lowest temperature of 818.441 °C. A large complex irregular section ring with good overall filling effect, stable rolling process and meeting the design requirements is obtained by two-step ring rolling, which confirms that the simulation results can provide theoretical basis for the actual production of the two-step ring rolling process for large complex irregular section ring.

Key words: ring component; ring rolling; Simufact; plastic deformation; temperature distribution

近年来面对国外关键技术的封锁及国内制造业的飞速发展, 常见的矩形截面环形构件越来越难满足工业中高端领域的需求, 导致对异形截面的环形构件的需求日益迫切。通过环件辗扩技术成形的异

形截面环件, 具备节能高效、材料利用率高、加工工序少和组织性能优异等优势, 使得环件辗扩技术成为制造异形截面环形构件的最佳选择。然而, 由于异形截面环件比矩形截面环件的辗扩成形规律更为复杂, 且国内缺乏相应的理论研究, 导致异形截面环件的成形质量难以保证, 因此, 异形截面环件辗扩成形工艺必将是今后研究最具吸引力的领域和发展方向^[1-2]。

关于异形截面环件辗扩成形的研究, 国外的 Kim K H 等^[3]基于 MSC SuperForm 软件对大型合金钢异形环件进行了有限元模拟, 通过模拟结果分析

收稿日期: 2024-01-19; 修订日期: 2024-04-15

基金项目: 山西省重点研发计划 (202202150401007)

作者简介: 裴蒙蒙 (1994-), 男, 硕士, 助理工程师

E-mail: 1195257720@qq.com

通信作者: 齐会萍 (1974-), 女, 博士, 教授, 博士生导师

E-mail: qhp9974@tyust.edu.cn

预测了实际辗扩过程中环件的变形情况；Li L Y 等^[4]基于 ABAQUS 软件对 T 型环件辗扩过程进行了数值模拟，指出辗扩比越大，越有利于环件成形和变形的均匀性，但会导致辗扩力增大和充型不满等缺陷的产生；Lee Y S 等^[5]对内 L 型环件辗扩过程进行有限元模拟，获得了辗扩过程中环件的变形和温度分布规律，以及力学性能参数的变化规律。国内的边卓等^[6]基于 ABAQUS 软件采用多种辗扩方式对大型环件辗扩过程进行了有限元模拟，获得了在不同辗扩方式下的变形规律，并优化了辗扩工艺；钱东升等^[7]对大型风电轴承套圈辗扩过程进行了有限元模拟和实验，提出了主要工艺参数设计方法，为其他大型异形环件制造提供了理论指导；袁海伦等^[8]基于 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了径轴向辗环机的三维仿真模型并对 L 型截面环件进行有限元模拟，实现了毛坯和工艺优化；万斯哲等^[9]利用 ABAQUS 软件得出应力在环轧初始阶段呈周期性变化并逐渐均匀。以上大多是针对台阶类、L 型、T 型或者接近矩形截面的异形环件辗扩成形方面的研究，而针对截面复杂的异形环形构件的辗扩成形和实际生产应用研究较少，这方面还需开展深入的研究。

本文研究的对象是某厂根据客户需求设计的一种大型复杂异形截面环件。考虑到若通过反复多次实验来确定该环形构件辗扩工艺，不仅工序繁多、耗时耗力和效率低下，还增加产品的研究成本，不符合国家所提倡的“五位一体”的新发展理念。然而，通过有限元模拟方法分析可以实现对整个环形构件辗扩过程的实时监测，从而不断地调整工艺参数，确定最终辗扩工艺参数，为该大型复杂异形截面环件实际生产提供重要参考依据，从而避免前述

实验的弊端。因此，本文基于 Simufact 软件对大型复杂异形环件辗扩成形工艺进行了研究。

1 大型异形环件辗扩工艺制定及环坯设计

1.1 辗扩工艺制定

图 1 为该大型复杂异形截面环件的锻件图。从图 1 中可以看出，该环形构件的截面极为复杂，内表面存在两个直径不同的凸台，外表面存在 1 个台阶，对于这种内外径均为异形轮廓的锻件，难以直接一步辗扩成形，且辗扩过程不平稳，易导致环形构件报废，故该大型复杂异形截面环件的工艺采用两副径向孔型模具，分两步辗扩成形。图 2 为该环形构件两步辗扩成形过程示意图，第 1 步利用矩形截面环坯辗扩成形该环件的内轮廓，第 2 步更换驱动辊，在第 1 步成形的环件的基础上辗扩成形该环件的外台阶。通过两步辗扩的变形积累从而获得满

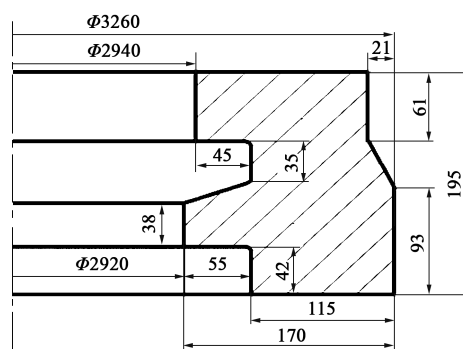


图 1 大型复杂异形截面环件锻件图

Fig. 1 Forging drawing of large and complex irregular section ring

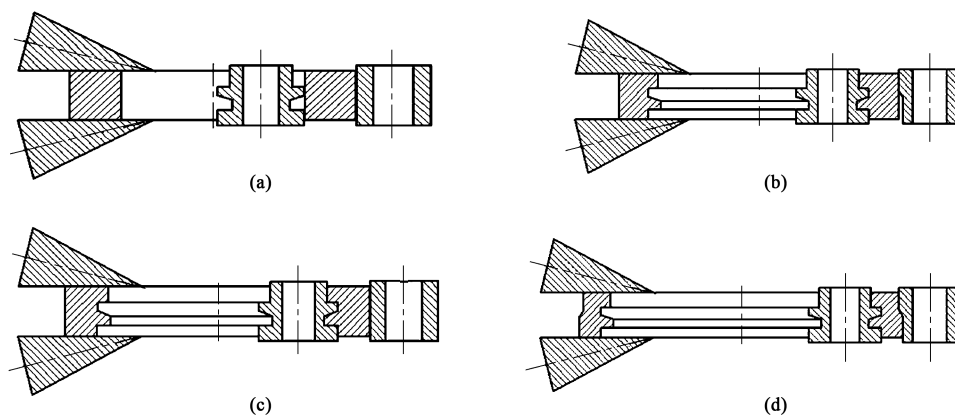


图 2 大型复杂异形截面环件两步辗扩成形示意图

(a) 内轮廓，辗扩前 (b) 内轮廓，辗扩后 (c) 外台阶，辗扩前 (d) 外台阶，辗扩后

Fig. 2 Schematic diagrams of two-step ring rolling for large and complex irregular section ring

(a) Inner profile, before ring rolling (b) Inner profile, after ring rolling (c) Outer step, before ring rolling (d) Outer step, after ring rolling

足设计要求的大型复杂异形截面环件,这种成形工艺可以简化环件的工艺流程,有效提升产品合格率及材料利用率。

1.2 环坯设计

本次设计的是与锻件轴向高度相等的矩形截面环坯。首先,根据文献[10]和文献[11]并结合生产经验,确定该环件的当量辗扩比 k 取值为2.28,并利用式(1)计算环坯内径 d_0 ,再根据辗扩前后体积不变的原则,利用式(2)计算环坯外径 D_0 ,环坯具体尺寸如图3所示。

$$k = \frac{d}{d_0} \quad (1)$$

$$D_0 = \sqrt{\frac{4V}{\pi H_0} + d_0^2} \quad (2)$$

式中: d 为环件的内径; V 为环件的体积; H_0 为环坯的轴向高度。

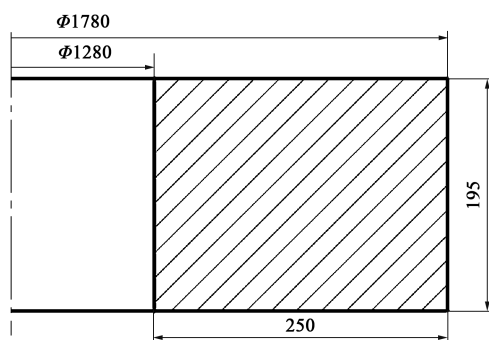


图3 环坯截面尺寸

Fig. 3 Section sizes of ring blank

2 大型复杂异形截面环件辗扩有限元模型建立

2.1 两步辗扩有限元模型建立

根据D53K-4000卧式辗环机的工作原理,在Simufact有限元模拟软件中建立了大型复杂异形截面环件的两步辗扩有限元模型。图4为第1步环件内轮廓辗扩模型,图5为第2步环件外台阶辗扩模型。该环件材质采用Q345E钢,其材料模型参考文献[12]。此外,模型建立过程中涉及以下关键技术问题:(1)考虑到轧辊与环件相比产生的变形和温度变化很小,故设置为恒温刚体,这样有利于减少模拟计算量,环坯设置为变形体,并采用Ringmesh网格对环坯进行网格划分,生成3D六面体单元;(2)考虑到环件与轧辊的接触摩擦较大且分布情

况不明确,故采用剪切摩擦条件;(3)考虑了辗扩过程中环件与轧辊的热传导、环件与外界环境的热对流和热辐射,以及塑性变形热对环件温度分布的影响。

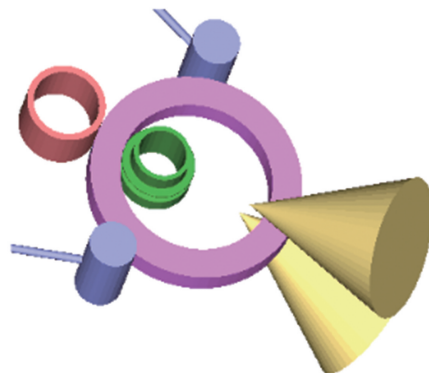


图4 第1步环件内轮廓辗扩模型

Fig. 4 Ring rolling model of inner profile at the first step

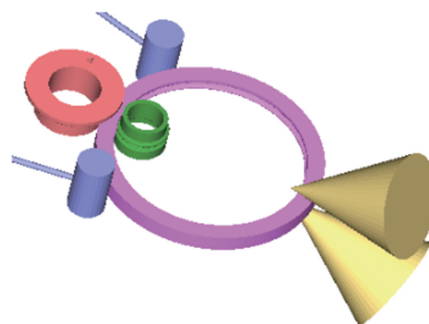


图5 第2步环件外台阶辗扩模型

Fig. 5 Ring rolling model of outer step at the second step

2.2 辗扩工艺参数的设计

在环形构件径-轴向轧制过程中,驱动辊在电机带动下做主动旋转运动,芯辊做径向直线进给运动,端面轧辊做旋转端面轧制运动和轴向进给运动。根据辗环理论,芯辊在恒定进给速度下,随着环件直径长大,环件转速降低,每转变形量增大,从而加快环件长大速率。但是,在大型环件辗扩过程中,如果环件长大速度过快,容易产生严重的晃动和振荡等不稳定现象,导致缺陷的产生。此外,复杂异形环件辗扩过程中容易出现卡辊现象,因此,两步辗扩过程中在满足环件锻透条件和咬入条件^[8]下,均采用分级降速进给策略来保证环件顺利平稳辗扩成形。端面辊在辗扩过程中不做轴向进给运动,只起维持环件轴向高度不变和端面平整的作用。导向辊可通过Simufact软件中的RAW系统实现自动精准控制,从而起到定心和维持环件圆度的作用。详细的工艺参数如表1所示。

表 1 环件两步辗扩成形工艺参数
Table 1 Process parameters of two-step ring rolling

参数	数值
第 1 步辗扩芯辊进给速度/(mm · s ⁻¹)	0.6、0.4、0.3、0.2 (4 个不同进给速度)
第 1 步辗扩驱动辊转速/(r · min ⁻¹)	13
第 1 步辗扩芯辊进给量/mm	95
第 2 步辗扩芯辊进给速度/(mm · s ⁻¹)	0.8、0.5、0.2 (3 个不同进给速度)
第 2 步辗扩驱动辊转速/(r · min ⁻¹)	9.77
第 2 步辗扩芯辊进给量/mm	61
驱动辊摩擦因数	0.85
其他轧辊摩擦因数	0.3
坯料初始温度/℃	1200
环境温度/℃	50
轧辊初始温度/℃	150
轧辊对工件热传导系数/ (W · (m ² · K) ⁻¹)	20000 ^[10]
对环境热传导系数/(W · (m ² · K) ⁻¹)	50 ^[10]
对环境热辐射率	0.25 ^[10]

3 有限元模拟结果分析

3.1 环件内轮廓辗扩成形结果分析

图 6 为内轮廓辗扩过程中不同时刻环件等效塑性应变分布云图，环件截面取自径向孔型变形区（同下）， t 为辗扩过程的时间。在图 6a 中，辗扩初期，与芯辊和驱动辊工作面接触的环件内径凹槽区和外径表面区域最先产生塑性应变。随着芯辊的进给，在图 6b 中，环件内轮廓完全充型，此时环件内外径表面基本均产生了塑性应变，并且随着壁厚的减薄，等效塑性应变不断地向环件中部区域扩展，环件端面由于金属轴向流动形成宽展，宽展在轴向孔型作用下，产生塑性变形，与轧辊接触的环件内孔、外圆端面处宽展明显，等效塑性应变较大，而端面中径处宽展较小，等效塑性应变较小。图 6c 显示了环件塑性应变区进一步向环件中部扩展。图 6d 显示了辗扩结束后环件的等效塑性应变分布情况，可见等效塑性应变分布极不均匀，由内外径表面到中部区域等效塑性应变逐渐变小，其中，内径的两个棱角区域的等效塑性应变最大，而心部区域的等效塑性应变始终最小。

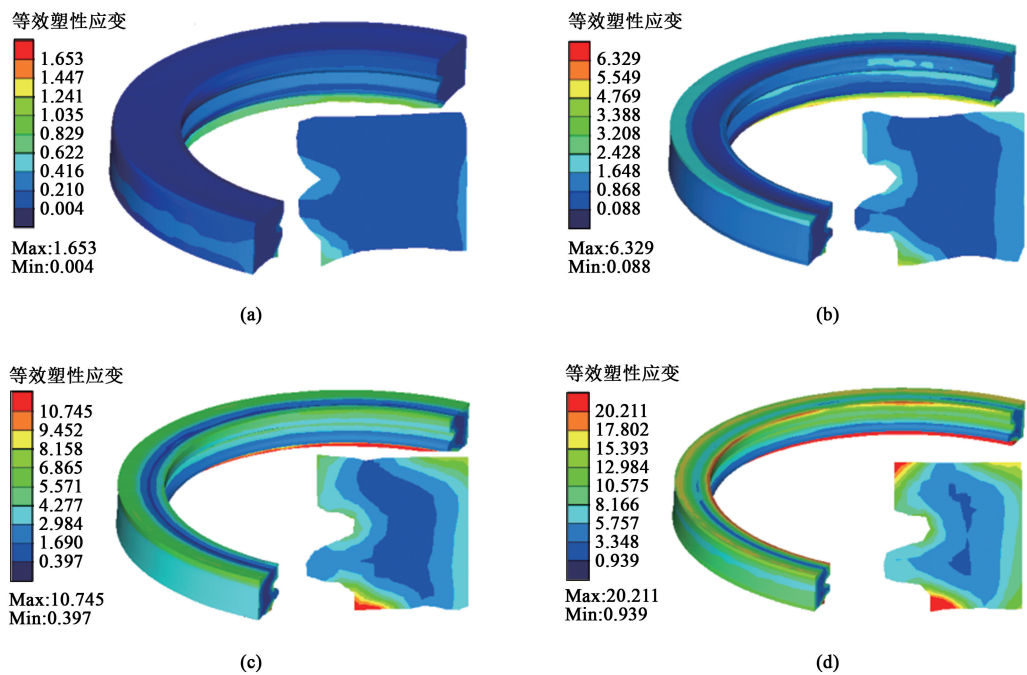


图 6 内轮廓辗扩过程中不同时刻下环件等效塑性应变分布云图
(a) $t=20\text{ s}$ (b) $t=100\text{ s}$ (c) $t=180\text{ s}$ (d) $t=300\text{ s}$

Fig. 6 Equivalent plastic strain distribution nephograms of ring during inner profile ring rolling process at different time

图 7 为内轮廓辗扩过程中不同时刻环件温度分布云图。从图 7 中可以看出，尽管环件塑性变形、摩擦做功产成热量，但是由于环件表面积较大，对轧辊热

传递及周围环境的热对流和热辐射损失的热量更多，因此，环件的整体温度不断下降，辗扩结束时最低温度达 762.512 ℃。图 7a 和图 7b 中，在辗扩初期，

由于环件表面区域与轧辊和外界环境形成较大温差导致热量损失严重,温度最先下降且下降最快,而环件内部区域不与外界直接接触,故热量损失较少,温度基本不变;甚至由于塑性变形热使心部局部区域的温度略有升高。随着辗扩的进行,图 7c 中,环件内部区域高温区的温度出现不同程度下降,主要是由于环件自身的温差促使内部高温区的热量不断

向表面低温区传导,导致环件内部温度出现下降;而环件表面区域由于塑性变形热和从内部高温区吸收的传导热量,温度下降速度相对较缓。辗扩结束后,如图 7d 所示,环件温度最终形成了由环件表面向环件心部逐渐升高的分布形式,其中比表面积较大的环件 4 个棱角区域和内径两个凸台区域损失的热量较多,温度较低,而心部区域的热量损失最少,温度最高。

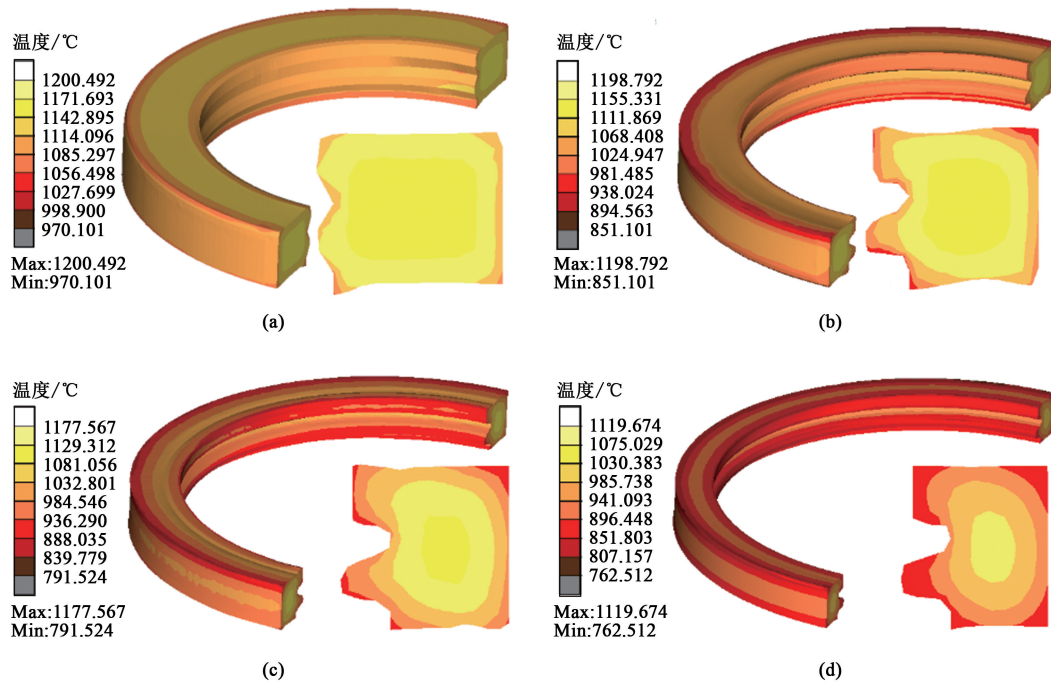


图 7 内轮廓辗扩过程中不同时刻下环件温度分布云图

(a) $t=20\text{ s}$ (b) $t=100\text{ s}$ (c) $t=180\text{ s}$ (d) $t=300\text{ s}$

Fig. 7 Temperature distribution nephograms of ring during inner profile ring rolling process at different time

3.2 环件外台阶辗扩成形结果分析

图 8 为外台阶辗扩过程中不同时刻下环件等效塑性应变分布云图。如图 8a 所示,在辗扩初期,环件塑性变形区主要集中在环件上半部分内外径表面和下半部分内表面,并向环件中部扩展,而环件下半部分外台阶由于还未与驱动辊接触,处于悬空状态,所以未产生塑性变形。从图 8b 和图 8c 中可以看出,随着辗扩的进行,环件外台阶逐渐充满,开始产生塑性变形,并向环件中部缓慢扩展。辗扩结束后,如图 8d 所示,最终环件等效塑性应变呈端面 4 个棱角区向环件下半部分心部逐渐变小的分布,其中,环件上半部分的整体变形大于环件下半部分,而上端面棱角区和下端面内棱角区的等效塑性应变较大,其次为外台阶拐角处和内表面凹槽区域,最小等效塑性应变区位于环件下半部分心部区域。

图 9 为外台阶辗扩过程中不同时刻下环件温度分布云图。外台阶辗扩过程中环件温度分布规律与

内轮廓辗扩过程中环件温度分布规律大致相同,环件温度不断下降且分布越来越不均匀。初始环坯温度为 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$,表面区域温度最先下降,其中比表面积较大的棱角区和内径凸台的温度下降较快,而环件心部区域的温度下降最慢;辗扩结束后,环件最低温度达 $818.441\text{ }^{\circ}\text{C}$,位于环件内径端面棱角区,最高温度达 $1146.901\text{ }^{\circ}\text{C}$,位于环件心部区域,形成了由端面 4 个棱角区和内径凸台区域到心部区域逐渐升高的温度分布形式。

4 实验验证

为验证上述模拟结果,某厂利用表 1 中的辗扩工艺参数在 D53K-4000 卧式辗环机上进行了辗扩实验,如图 10 所示。通过有限元模拟的最佳工艺参数进行实验,发现辗扩过程中环件未出现明显长大过快和卡辊等不稳定现象,成形环件经测量,

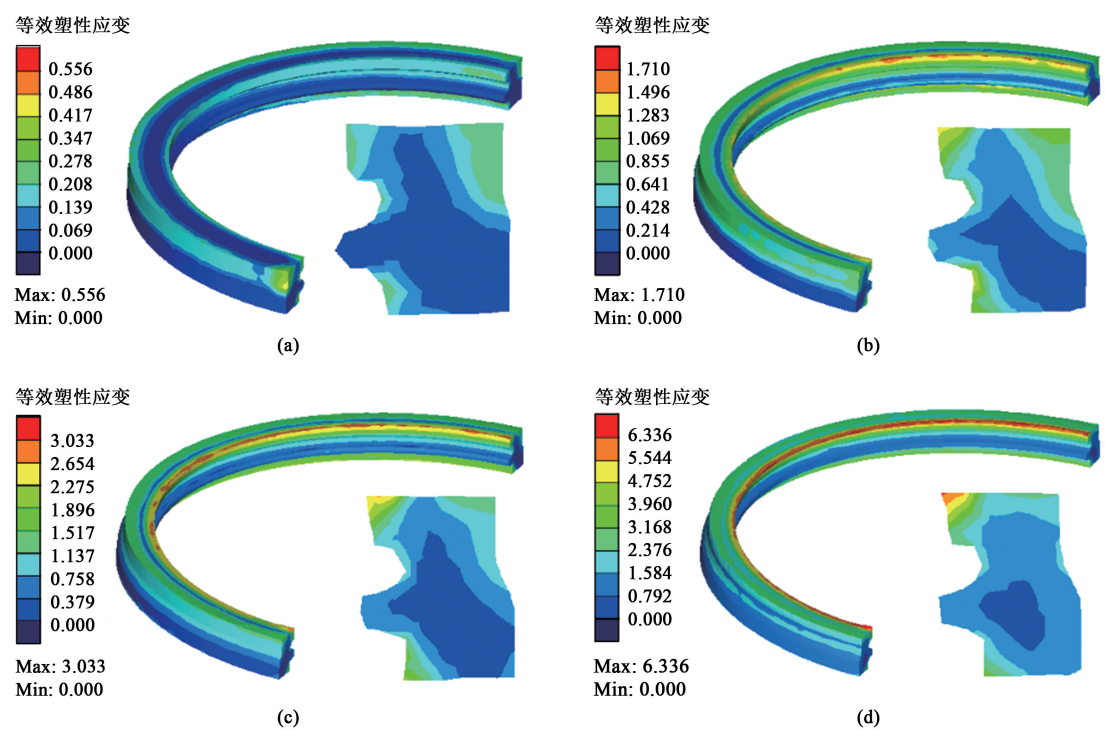


图 8 外台阶辗扩过程中不同时刻下环件等效塑性应变分布云图
(a) $t=30\text{ s}$ (b) $t=80\text{ s}$ (c) $t=120\text{ s}$ (d) $t=208\text{ s}$

Fig. 8 Equivalent plastic strain distribution nephograms of ring during outer step ring rolling process at different time

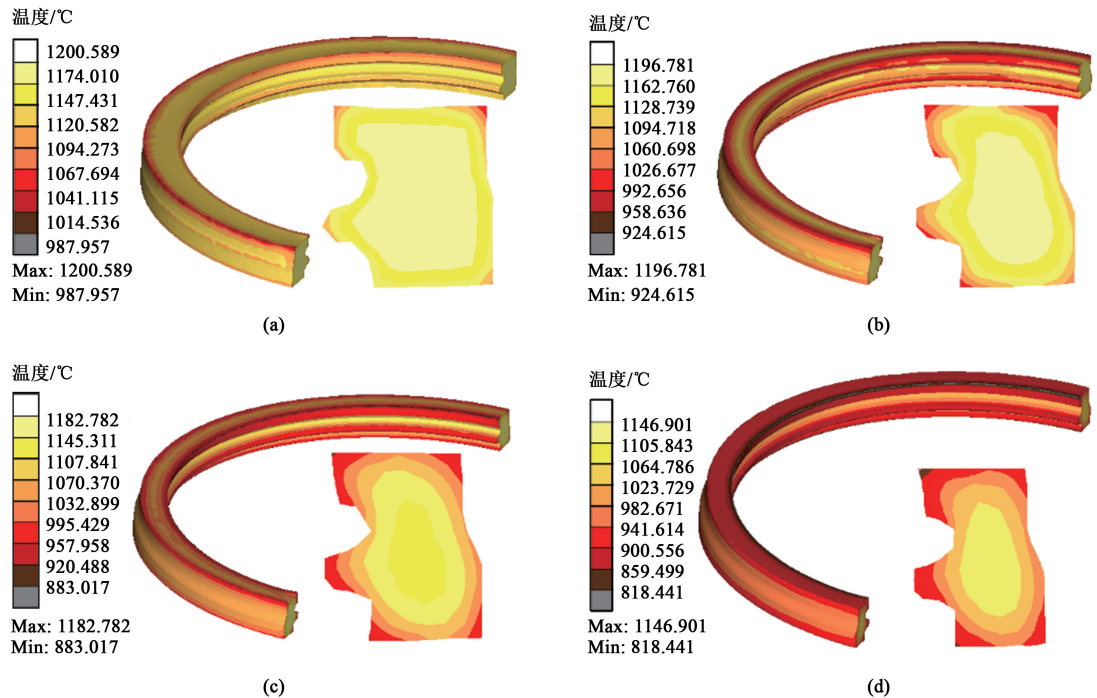


图 9 外台阶辗扩过程中不同时刻下环件温度分布云图
(a) $t=30\text{ s}$ (b) $t=80\text{ s}$ (c) $t=120\text{ s}$ (d) $t=208\text{ s}$

Fig. 9 Temperature distribution nephograms of ring during outer step ring rolling process at different time

尺寸、精度均达到设计要求，从而证明了该模拟结果的准确性。综上所述，有限元模拟方法能够为该大型复杂异形环件实际生产提供重要参考依据。



图 10 辗环实验

Fig. 10 Ring rolling experiment

5 结论

(1) 本文根据大型复杂异形截面环件的特点,通过数值仿真模拟真实反映了辗环的实际过程,制定了两步辗扩成形工艺,合理设计了矩形环坯的尺寸,确定了辗扩工艺参数,大幅度提高了生产效率并节约生产成本。

(2) 在环件内轮廓辗扩过程中,环件等效应变由内外径表面到中部区域逐渐变小,其温度形成了由环件表面向环件心部逐渐升高的分布形式,最低温度达 $762.512\text{ }^{\circ}\text{C}$;在环件外台阶辗扩过程中,环件等效塑性应变由端面 4 个棱角区向环件下半部分心部逐渐变小,其温度分布情况与环件内轮廓辗扩温度分布规律大致相同,最低温度达 $818.441\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 根据模拟结果,采用两步辗扩获得了整体充满效果较好、辗扩过程稳定且符合设计要求的大型复杂异形截面环件,证明了有限元模拟结果的可靠性,能够较好地指导环件的实际生产。

参考文献:

- [1] 王志军,付建华,齐会萍. 异形环件多步辗扩模拟 [J]. 精密成形工程, 2016, 8 (6): 15-20.
Wang Z J, Fu J H, Qi H P. Multi-step simulation of expanding exhibition profiled ring [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8 (6): 15-20.
- [2] 王恒星,秦芳诚,齐会萍,等. 双金属层状构件界面结合的模拟与实验研究进展 [J]. 材料导报, 2023, 37 (14): 206-217.
Wang H X, Qin F C, Qi H P, et al. Advances in simulation and experimental study on interface bonding of bimetallic layered components [J]. Materials Reports, 2023, 37 (14): 206-217.
- [3] Kim K H, Suk H G, Huh M Y. Development of the profile ring rolling process for large slewing rings of alloy steels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187 (12): 730-733.
- [4] Li L Y, Yang H, Guo L G, et al. Research on interactive influences of parameters on T-shaped cold ring rolling by 3D-FE numerical simulation [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2007, 21 (10): 1541-1547.
- [5] Lee Y S, Lee M W, Park S S, et al. Process design by FEM simulation for shape ring rolling of large-sized ring [J]. Proceedings of the AIP Conference Proceedings, 2010, 1252 (1): 964-971.
- [6] 边卓,熊波,令狐冰冰,等. 不同轧辊尺寸下 40Cr/Q345 双金属环件成形过程有限元分析 [J]. 精密成形工程, 2023, 15 (3): 128-137.
Bian Z, Xiong B, Linghu B B, et al. Finite element analysis of forming process of 40Cr/Q345 bimetallic ring parts [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15 (3): 128-137.
- [7] 钱东升,时大方,华林,等. 大型风电轴承套圈滚道轧制数值模拟与实验 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20 (2): 51-56.
Qian D S, Shi D F, Hua L, et al. Numerical simulation and experimental study on raceway rolling of large wind power bearing ring [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20 (2): 51-56.
- [8] 袁海伦,王泽武,曾青,等. 异形截面环件虚拟轧制及其工艺优化 [J]. 塑性工程报, 2006, 13 (6): 15-18.
Yuan H L, Wang Z W, Zeng Q, et al. Virtual ring rolling and process optimization of profile ring [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13 (6): 15-18.
- [9] 万斯哲,兰箭. 外壁带凸台锥形截面环件轧制成形规律 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (10): 134-138.
Wan S Z, Lan J. Rolling forming law of ring with convex cone section on outer wall [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (10): 134-138.
- [10] 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. Theory and Technology of Ring Rolling [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [11] 刘宇峰. 环件轧制 CAD/CAPP 及报价系统研究 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2008.
Liu Y F. Research on Ring Rolling CAD/CAPP and Quotation System [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [12] 郑继荣,兰箭,周黎,等. 铝合金异形截面环件轧制及其拉缩缺陷分析 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (10): 129-133.
Zheng J R, Lan J, Zhou L, et al. Analysis on rolling and shrinkage defects for aluminum alloy irregular cross-section ring [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (10): 129-133.