

摩擦对高温合金复杂截面薄壁圆环多道次 滚压成形不均匀变形作用

赵刚要^{1,3}, 张冉阳^{1,2}, 郭正华¹, 郭伟¹, 杨胜金¹, 郭凯云¹

(1. 南昌航空大学, 江西 南昌 330063)

(2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

(3. The University of Sheffield, Sheffield S1 3JD, UK)

摘要: 以有限元仿真为主并结合实验和理论方法, 对高温合金 GH4169 薄壁 W 形圆环多道次滚压成形进行了系统的分析; 进而提出了不均匀变形度的表征方法, 研究获得了摩擦对高温合金复杂截面薄壁圆环多道次滚压成形不均匀变形的影响规律。结果表明: 随着滚压成形的进行等效应力极值逐渐增大, 且从动辊进给时环件弯曲部分材料变形量较大; 随着驱动、从动辊与环件之间摩擦系数的增加, 不均匀变形程度先减小, 后逐渐增大; 导向辊与环件之间的摩擦对不均匀变形度的影响不大。

关键词: 高温合金; 复杂截面圆环; 多道次滚压成形; 不均匀塑性变形; 有限元分析

中图分类号: TG386

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)12-3761-07

高温合金薄壁圆环由于具有耐高温、质量轻、结构简单以及良好的震动追随性等特点广泛地应用于航空航天、兵器和石油化工等领域。特别是以增加有效载荷为目的的高强度、薄壁轻量化的技术性能要求^[1], 使得此类薄壁件的需求越来越大。因此, 发展此类薄壁件精确成形及技术已成为航空航天、核工业和石油化工(如航空发动机封严环、机匣和压气机锥体等)发展的迫切需求。

多道次滚压成形技术^[2]是一种无切屑, 连续渐进成形的加工方式, 可以满足薄壁件对高精度、高效率、绿色成形和数字化制造要求, 在航空航天、核工业和石油化工等领域中已占据了重要地位并展示了广阔的应用前景。高温合金薄壁复杂截面环件的成形工艺, 一般是由薄板先卷焊成圆环毛坯, 再滚压成所需的零件, 成形工步多、成形过程复杂, 导致该成形过程中塑性变形非常不均匀, 极易产生胀径、开裂、椭圆、回弹、起皱、尺寸和形状精度不到位等缺陷。而这种不均匀塑性变形很大程度上取决于环件与辊轮接触的摩擦作用。因此, 研究辊轮与环件的摩擦对该成形过程的不均匀变形的作用对于提高高温合金薄壁环件的成形精度具有重要意义。

目前国内外学者对薄壁件滚压成形进行了大量研

究^[3-5], 但针对高温合金复杂截面圆环滚压成形的研究较少, 至于不同辊轮与环件的摩擦对高温合金薄壁圆环多道次滚压成形不均匀变形影响的研究更是鲜有报道。Tehrani 等^[6]研究获得了辊弯成形边波的产生机理, 发现边波的产生主要是由板料翼缘边部在经过多道次辊压后的纵向应变反复变化引起的, 同时也受各道的弯曲角等因素影响。肖大志^[7]等基于有限元法对紫铜薄壁环形零件滚压成形进行了有限元分析, 得到了零件成形区的应力应变分布及零件槽部高度与宽度的变化等。李明和庞胜欣^[8]对阶梯环形钣金零件滚压成形工艺进行了研究, 设计出了满足滚压需要的辊轮, 解决了滚压成形工艺型面扭曲、材料变形不确定的难题。文献^[9]基于 ABAQUS 软件建立了复杂截面圆环滚压成形三维有限元模型, 分析获得了该成形过程中的等效应变分布规律。然而上述研究要么针对于简单的滚压成形过程, 要么针对于简单的滚压问题, 而对于摩擦对高温合金复杂截面圆环多道次滚压成形不均匀变形作用的研究罕见报道。为此, 本研究以有限元数值模拟为主, 并结合实验与理论法, 系统地分析并获得摩擦对高温合金复杂截面薄壁圆环多道次滚压成形不均匀变形的影响规律, 提出摩擦的控制措施, 从而为实现高温合金薄壁复杂截面圆环多道次精确成形提供指导。

收稿日期: 2018-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(51665041, 51165037); 国家留学基金委项目(201708360119)

作者简介: 赵刚要, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, 电话: 0791-83863028, E-mail: gangyaozhao@126.com

1 W 环滚压成形工艺分析

1.1 环件的几何尺寸及特征分析

W 形截面圆环的基本尺寸如图 1 所示。由图可知，该零件具有形状复杂、材料强度高、直径大而截面尺寸小等显著特点。其中最小截面尺寸半径仅为 0.25 mm，壁厚为 0.5 mm。

1.2 W 圆环滚压成形工艺分析

由 W 环的外形特征可知，若仅靠一次滚压成形 W 环，其变形极其不均匀，极易导致壁厚严重减薄，甚至出现失稳破裂等现象。为了控制该成行过程中不均匀塑性变形，实现 W 形截面圆环滚压精确成形。本研究采用多道次连续渐进的塑性变形工艺方法，把整个成形过程分为 5 个道次，各道次成形轨迹如图 2 所示。

2 有限元模型

2.1 有限元建模关键技术处理

2.1.1 材料模型的建立

本研究所用材料为高温合金 GH4169，通过单拉实验，获得了其基本力学性能参数，如表 1 所示。

GH4169 薄板真实应力应变曲线如图 3 所示。由图可知，弹性变形段近似直线，塑性变形部分近似为幂指数曲线，所以采用幂指数型弹塑性硬化模型来表

表 1 GH4169 材料力学性能参数
Table 1 Mechanical properties of GH4169 sheet

Tensile strength, σ_b /MPa	Yield strength, σ_s /MPa	Young's modulus, E /GPa	Poisson's ratio, ν
844.2	308.2	203.1	0.3

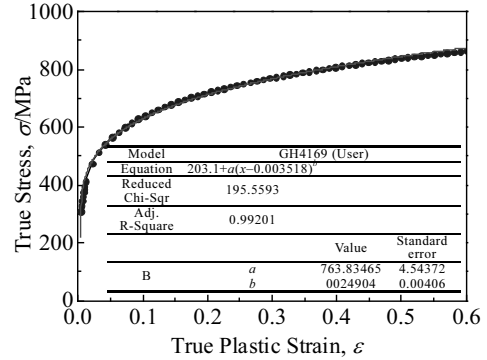


图 3 GH4169 薄板真实应力/塑性应变曲线

Fig.3 True stress/true plastic strain of GH4169 sheet

征 GH4169 复杂截面圆环滚压过程中材料的真实应力应变关系，如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} \bar{\sigma} = 203.1 \times 10^3 \varepsilon & (0 \leq \varepsilon < 0.00152) \\ \bar{\sigma} = \sigma_{0.2} & (0.00152 \leq \varepsilon < 0.00352) \\ \bar{\sigma} = 308.2 + 763.835(\varepsilon - 0.00352)^{0.249} & (0.00352 \leq \varepsilon) \end{cases} \quad (1)$$

2.1.2 几何模型建立

本研究设计订做的驱动辊轮半径 $R=70$ mm，从动辊轮半径 $R=70$ mm，导向辊轮 $R=50$ mm。在滚压成形过程中，对于驱动辊、从动辊和导向辊等刚性模具对环件施加力的几何曲面定义为解析刚体；圆环定义为变形体。

2.1.3 加载及接触边界条件处理

由于 W 环件为薄壁件，在多道次滚压加工时为减小辊轮转动启动的动态影响，第 1 道次采用光滑加载曲线，驱动辊旋转加载如图 4 所示。

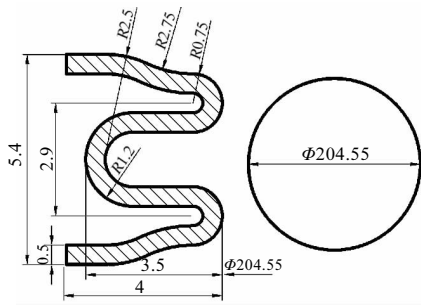


图 1 W 形截面圆环的基本尺寸

Fig.1 Dimension of the ring with W section

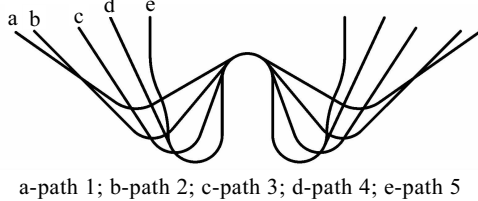


图 2 W 环多道次滚压成形轨迹

Fig.2 Forming contour of the ring with W section in multi-path rolling

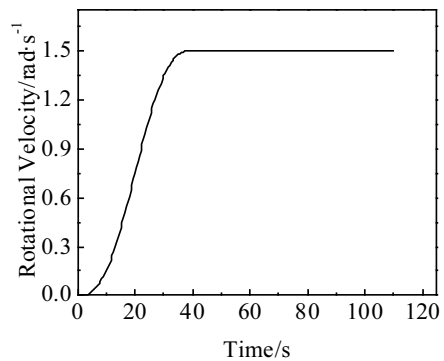


图 4 驱动辊加载曲线

Fig.4 Loading curve of drive roller

从动辊进给过程采用“位移/旋转”边界条件来精确控制。使用“面-面接触”定义辊轮与环件的接触，接触的力学控制全部采用有限滑移的罚函数接触。采用经典库仑摩擦模型^[10]来描述辊轮与环件之间的摩擦接触状态，如式（2）所示。

$$\begin{cases} \sigma_f = \mu |\sigma_n| & \sigma_f < k_s \\ \sigma_f = k_s & \sigma_f \geq k_s \end{cases} \quad (2)$$

式中： σ_f 为摩擦应力； μ 为摩擦系数； σ_n 为接触正压应力； k_s 为剪切强度。

2.1.4 网格划分

对于滚压成形过程中产生大位移、大变形的薄壁圆环，采用四边形壳单元 S4R 对其进行网格划分，该单元具有有限膜应变、增强沙漏控制和缩减积分的特点；根据零件外形特征，对环件塑性变形较大的区域进行了网格细化，如图 5 所示；整个环件模型节点数为 5920 个，单元数为 5760 个。而对于解析类型的刚性辊轮不需要对其进行网格划分。

2.1.5 三维有限元模型

基于几何模型、材料本构、加载边界、接触处理及网格划分等关键技术的解决，建立了 W 环多道次滚压成形有限元模型，如图 6 所示。

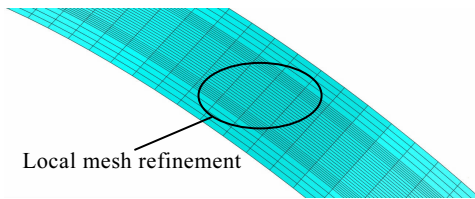


图 5 环件网格划分

Fig.5 Meshing of the ring blank

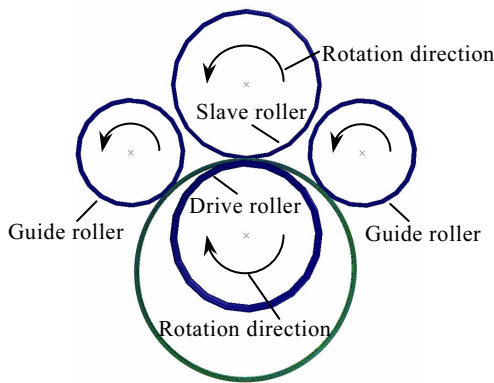


图 6 W 截面圆环多道次滚压成形有限元模型

Fig.6 FE model of the ring with W section in multi-pass roll forming

2.2 模型可靠性验证

2.2.1 理论评估

图 7 为 GH4169 高温薄壁圆环多道次滚压成形过程中动能与内能的比值曲线图。由图可知，圆环滚压成形稳定阶段工件的动能与内能的比值基本不发生变化且始终小于 0.05，即动能只占内能的很小一部分，因此符合准静态过程^[11]，从而可以初步判定本研究所建立的 W 环滚压成形的三维有限元模型是可靠的。

2.2.2 试验验证

为了进一步验证所建的 GH4169 高温合金 W 截面薄壁圆环多道次滚压成形有限元模型的可靠性。对该滚压成形进行了验证性实验研究。模拟和实验保持一致。即，坯料尺寸为 16 mm×0.5 mm 条料焊接成 $\Phi 211$ mm 的环件，材料为 GH4169，其余条件见表 2。

图 8 为基于上述条件下，高温合金薄壁圆环多道次滚压成形数值模拟结果与实验结果对比图。由图可知，模拟与实验所得的 W 环的外形基本一致，有限元数值模拟结果和试验结果吻合良好。这说明本研究所建立的 W 环滚压成形有限元模型是可靠的，采用本有限元模型得到的数值结果是可信的。

滚压完成后，实验和仿真得到环件相对壁厚沿环件截面的分布如图 9 所示。由图可知，实验得到环件相对壁厚与模拟结果的变化趋于一致，且其最大误差为 7%，进一步定量地验证了本研究所建的有限元模型的可靠性。

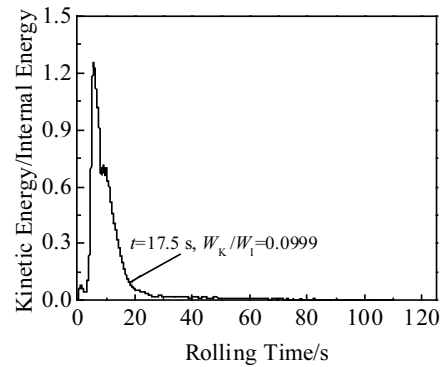


图 7 动能与内能比值曲线

Fig.7 Curve of kinetic energy to internal energy

表 2 仿真过程中的主要工艺参数

Table 2 Main parameters of the simulation process	
Parameter	Value
Feed speed of slave roller/mm·s ⁻¹	0.3
Revolution of drive roller/r·s ⁻¹	1.5
Friction coefficient of driver roller	0.3
Friction coefficient of slave roller	0.3
Friction coefficient of guide roller	0.2

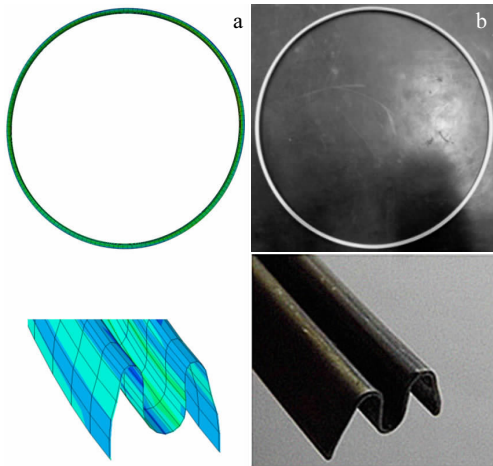


图 8 W 环滚压模拟结果与实验结果对比

Fig.8 Comparison between simulation result (a) and experiment result (b) of the ring with W section after roll forming

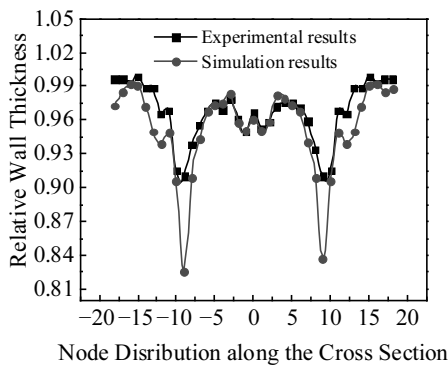


图 9 仿真与实验环件相对壁厚的对比

Fig.9 Comparison of relative wall thickness between simulation and experimental results

3 结果与讨论

3.1 不均匀变形度表征

为了定量地研究 GH4169 高温合金 W 截面薄壁圆环多道次滚压成形过程中的不均匀变形特征，提出在滚压变形过程，以 W 形截面展开（如图 9 所示）的最大厚度不均匀性来表征不均匀变形度 η ，如式 3 所示。

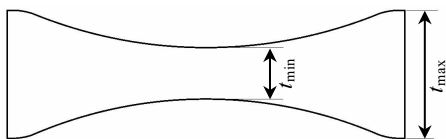


图 10 不均匀变形量的定义

Fig.10 Definition of the uneven deformation

$$\eta = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\max}} \quad (3)$$

式中： t_{\max} 为壁厚极大值； t_{\min} 为壁厚极小值。

3.2 GH4169 薄壁圆环滚压成形应力应变演变特征

3.2.1 应力场演变特征

图 11 为不同道次 GH4169 高温合金圆环滚压成形过程的等效应力分布云图。从图 11 中可知，圆环坯料经过第 1 道次滚压工序后，其最大等效应力增加迅速，最大等效应力为 720.9 MPa，且等效应力较大的区域主要分布在环件的边缘，即边缘部分变形较大。在随后的各道次滚压过程中，从动辊轮进给成形时弯曲部分材料变形量较大。这主要是因为，第 1 道次弯曲变形程度小于环件外缘的拉伸变形；而剩下其余道次变形主要集中在弯曲部分区域；在后阶段的滚形过程中，应力基本保持不变。

3.2.2 等效应变的演变特征

图 12 为 GH4169 薄壁圆环多道次滚压成形过程中不同道次下环件等效应变沿环件截面的分布曲线。由图可知，在多道次成形中，随着从动辊轮加载下压，环件的等效应变分布呈现环件中间先减后增再减规律。这主要是在从动辊加载下压过程中，由于辊轮与环件间摩擦使环件弯曲部分底部呈拉应力状态。以上分析表明，在环件滚压成形时，应变的改变主要集中在弯角处。这要求在针对沟槽深以及孔离成形线太近的情况时，必须合理分配变形量，以保证圆环的成形质量。

3.3 摩擦对 GH4169 薄壁 W 圆环滚压不均匀变形度的影响

3.3.1 驱动辊与 W 环摩擦对不均匀变形度的影响

计算条件：为了研究驱动辊与 W 间的摩擦对不均匀变形的影响，参考文献[12]的研究结果，取驱动辊与环件间摩擦系数分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5；其余参数保持不变，见表 2。

GH4169 薄壁 W 形圆环多道次滚压成形驱动辊与环件的摩擦对不均匀变形度的影响曲线如图 13 所示。由图可知：除第 1 道次驱动辊摩擦对不均匀度的影响较小外，随着驱动辊与环件间摩擦系数的增大，不均匀度先稍微减小，然后逐渐增大，且增大趋势越来越明显。这主要是因为过大的摩擦力会不利于环件弯曲段的金属充分变形和规则流动。

3.3.2 从动辊与 W 环摩擦对不均匀变形度的影响

计算条件：参考文献[12]的研究结果，取从动辊轮与圆环的摩擦系数分别为 0.1，0.2，0.3，0.4 和 0.5；其余参数保持不变，见表 2。

图 14 为从动辊与 W 形圆环之间的摩擦对其多道

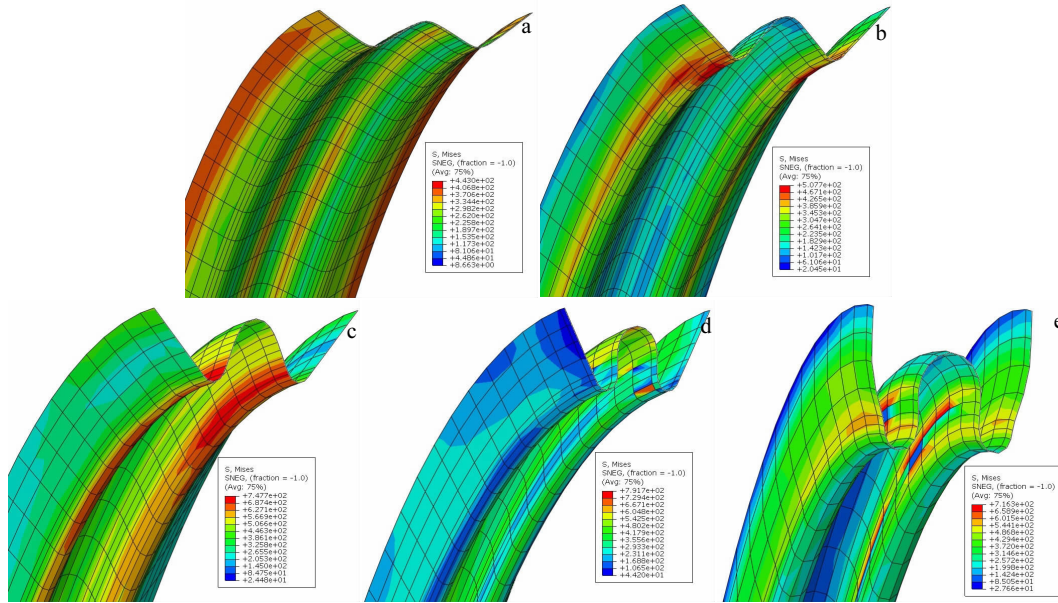


图 11 环件成形过程中等效应力分布云图

Fig.11 Distribution of the Misses stress of the ring: (a) the first path, (b) the second path, (c) the third path, (d) the fourth path, and (e) the fifth path

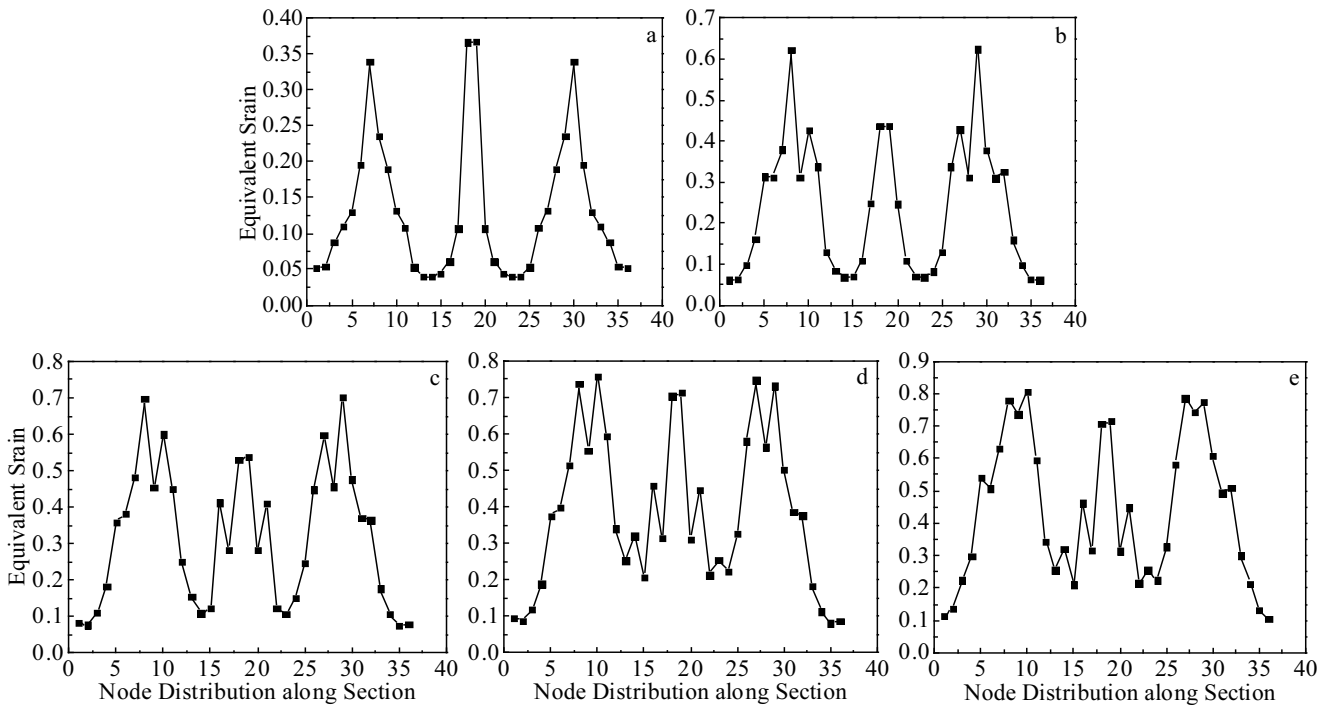


图 12 环件成形过程中等效应变分布曲线

Fig.12 Distribution of the equivalent strain along section of the ring: (a) the first path, (b) the second path, (c) the third path, (d) the fourth path, and (e) the fifth path

次滚压成形不均匀变形度的影响曲线。由图可知，前3道次滚压成形过程中，随着从动辊与W环间摩擦系数增加，环件的不均匀变形度逐渐增加；而后两道次

却呈现为先减小后增大趋势。这是因为在前3道次中较大摩擦系数会增加环件材料向辊轮型槽流动的阻力，使得不均匀变形程度加剧。而后2道次滚压时W

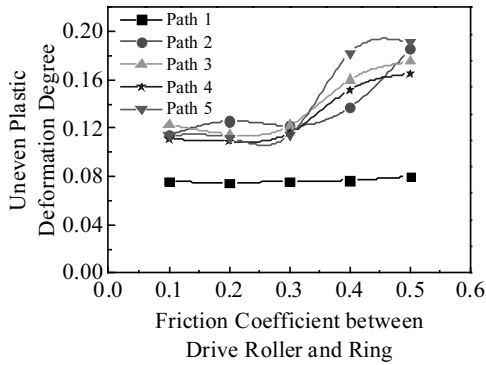


图 13 驱动辊与环件的摩擦对不均匀度的影响

Fig.13 Effect of the friction coefficient between drive roller and ring on the uneven deformation

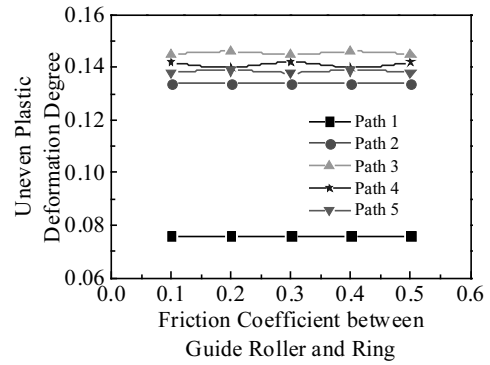


图 15 导向辊与环件的摩擦对不均匀度的影响

Fig.15 Effect of the friction coefficient between guide roller and ring on the uneven deformation

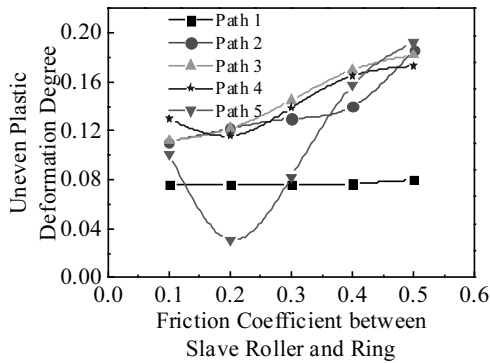


图 14 从动辊与环件的摩擦对不均匀度的影响

Fig.14 Effect of the friction coefficient between slave roller and ring on the uneven deformation

截面具有一定抗变形刚度，增大摩擦系数可以提高金属的流动性，因而不均匀变形度逐渐减小；当从动辊与环件的摩擦系数大于 0.2 以后，过大的摩擦阻力又致使环件材料出现了局部堆积，因此不均匀度又逐渐增大。

3.3.3 导向辊与 W 环摩擦对不均匀变形度的影响

计算条件：参考文献[12]的研究结果，取导向辊与环件间摩擦系数分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5；其余参数保持不变，见表 2。

导向辊与环件的摩擦对其多道次滚压成形不均匀变形度的影响曲线如图 15 所示。由图可知：随着导向辊与环件间摩擦系数的增大，塑性变形不均匀度稍微增加。这是因为导向辊在多道次滚压成形中对环件主要起支撑和导向作用，所以对环件的成形质量影响不大。

3.3.4 基于不均匀变形度的摩擦系数的选择原则

综合以上研究分析可知，辊轮与 GH4169 薄壁 W 形圆环间的摩擦对该成形过程中不均匀变形的影响效

表 3 摩擦对不均匀变形的影响规律
Table 3 Effect of friction coefficient on uneven deformation

Parameter	Influence regularity	Minimum point of uneven deformation
Friction coefficient of driver roller	↑↑	0.2
Friction coefficient of slave roller	↓↑	0.2
Friction coefficient of guide roller	↑↑	/

Note: ↑↑-increase greatly; ↑-increase slightly; ↓-decrease slightly; /- no obvious minimum point

果出现了明显的差异性。驱动辊、从动辊与环件的摩擦对不均匀变形的影响较大，导向辊与环件的摩擦影响可以忽略，如表 3 所示。

基于上述分析，提出了不均匀变形的高温合金 W 薄壁圆环多道次滚压成形摩擦的控制原则：即，驱动辊与环件间的摩擦控制在 0.2 左右，从动辊与环件间的摩擦系数控制在 0.2 左右，导向辊为干摩擦。

4 结 论

1) 解决了高温合金 GH4169 薄壁 W 环多道次滚压成形有限元建模关键技术，建立了该成形过程的三维有限元模型。

2) 提出了 W 形薄壁圆环多道次滚压成形不均匀变形的定量描述方法。

3) 随着驱动辊与环件间摩擦系数的增大，不均匀度先基本不变，然后逐渐增大，且增大趋势越来越明显；前 3 道次滚压成形过程中，随着从动辊与 W 环间摩擦系数增加，环件的不均匀变形度逐渐增加；而后 2 道次却呈现为先减小后增大趋势；导向辊对不均匀度的影响不大。

参考文献 References

- [1] Yang He(杨 合), Zhan Mei(詹 梅), Li Tian(李 甜) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2011, 21(10): 2534
- [2] Nifussi G, Gilormini P. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 1993, 35(10): 867
- [3] Kasaei M M, Naeini H M, Abbaszadeh B *et al.* *Procedia Engineering*[J], 2014, 81: 245
- [4] Paralikas J, Salonitis K, Chryssolouris G. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 66(9-12): 1271
- [5] Cai Zhongyi, Wang Mi, Li Mingzhe. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(9): 1820
- [6] Tehrani M S, Hartley P, Naeini H M *et al.* *Thin-Walled Structures*[J], 2006, 44(2): 184
- [7] Xiao Dazhi(肖大志), Fan Xinghua(樊兴华), Yang Chenglin(杨成林). *Materials Science & Technology*(材料科学与工艺)[J], 2006, 14(8): 1555
- [8] Li Ming(李 明), Pang Shengxin(庞胜欣). *The 6th Youth Science and Technology Forum of Chinese Society of Aeronautics and Astronautics*(中国航空学会青年科技论坛)[C]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014: 680
- [9] Zhao Gangyao, Zhang Ranyang, Guo Zhenghua *et al.* *Advanced Materials Research*[J], 2012, 538-541: 788
- [10] Gearing B P, Moon H S, Anand L. *International Journal of Plasticity*[J], 2001, 17(2): 237
- [11] Hibbit K, Karlsson B, Sorensen P. *ABAQUS Analysis User's Manual*[M]. Pawtucket: Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc: 2010
- [12] Li Heng(李 恒). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007

Effect of Friction on Nonuniform Deformation Behavior of Thin-Walled Superalloy Ring with Complex Section in Multi-pass Rolling

Zhao Gangyao^{1,3}, Zhang Ranyang^{1,2}, Guo Zhenghua¹, Guo Wei¹, Yang Shengjin¹, Guo Kaiyun¹

(1. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(3. The University of Sheffield, Sheffield S1 3JD, UK)

Abstract: To predict and control the nonuniform plastic deformation of the thin-walled superalloy (GH4169) ring with complex section in multi-pass rolling, a 3D FE model of the process was built under the ABAQUS/Explicit environment. And the representation method of the nonuniform deformation was proposed. Then the nonuniform deformation behavior in the process was analyzed systematically using FE method combined with experiment and theory. The results show that the maximum value of the equivalent stress increases gradually with the progress of the multi-pass rolling process. And the deformation degree slightly decreases firstly, and then increases gradually with the increase of the friction coefficients between the thin-walled ring and slave roller, drive roller. While the effect of the friction coefficient between guide roller and the ring on the deformation degree can be neglected.

Key words: superalloy; ring with complex section; multi-pass rolling; nonuniform plastic deformation; FE analysis

Corresponding author: Zhao Gangyao, Ph. D., Associate Professor, School of Aeronautic Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83863028, E-mail: gangyaozhao@126.com