DOI: 10.12442/j.issn.1002-185X.20230068

超声振动对 W 形金属密封环滚压成形不均匀变形的影响

郭正华[1]，史明智[1]，赵刚要[1]，张冉阳[1]，吴庆捷[1]，吴新洲[2]，李神龙[2]

（1. 南昌航空大学 航空制造工程学院，江西 南昌 330063）

（2. 中国航发长江动力有限公司，湖南 岳阳 414000）

摘 要：为了提高 W 形金属密封环的成形质量，对 W 形金属密封环的超声振动滚压成形过程进行了研究。基于 ABAQUS/Explicit 有限元仿真软件，搭建了 W 形金属密封环超声振动辅助滚压成形三维有限元模型，研究了超声频率对环件不均匀变形的影响。结果表明：随着超声频率的增加，环件的应力不均匀度呈现先增后减的规律；环件的应变不均匀度呈现先略微减小，然后激增，再减小的规律；壁厚不均匀度呈现先减小，后增大，再减小的趋势。其中在超声频率为 30 与 40 kHz 时环件变形不均匀程度显著增大，这是由于环件产生了起皱现象造成的；通过对截面的应力、应变和壁厚不均匀分析，证明了波峰与波谷位置是成形过程中的关键部位。

关键词：超声振动；滚压成形；高温合金；壁厚减薄率；W 形密封环

中图法分类号：TG306；TG146.1+5 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-185X(2024)04-1103-08

W 形金属密封环是涡扇发动机中重要的部件之一（如图 1 所示），它具有优良的密封性能，如高强度，高耐磨性和震动追随性等，因此被广泛应用于航空航天、国防和军事领域。然而新一代航空发动机的发展，对于密封件的密封性能提出了更高的要求，因此为了进一步提高 W 形金属密封环的综合性能以及表面质量，有必要在传统的滚压加工中引入高能辅助成形工艺。

超声波辅助成形是一种典型的高能辅助成形，与传统的滚压成形相比，超声波辅助滚压成形不仅能够增强产品的性能还可以提升零件表面特性[1-2]。因此，为了提升 W 形金属密封环滚压成形质量，有必要在该成形过程中引入超声振动辅助工艺。

目前，国内外学者对超声参数对于零件加工的影响进行了大量研究。罗恒[3]等人探讨了超声振动切削过程中 7075 铝合金的最大应力分布规律，结果表明，随着超声振幅和超声频率的增大，7075 铝合金中的残余应力变形为先上升后下降的趋势。Wang[4]等人建立了超声轧制的三维有限元模拟模型，分析了在不同超声振幅与轧制时间下的残余应力分布。在其研究基础之上，Zhang[5]等人发现在超声轧制的过程中，材料的残余压应力随着超声振幅的增加呈现递增的趋势。Liu[6]等人设计了一个超声波划伤装置，并研究了超声波振幅对划伤力的影响。一些研究表明，滚动次数会影响零件的表面残余应力和耐磨性[7-10]。这可以归因于随着轧制时间的增加，细化的晶粒变得更加显著。王婷等人[11]探讨了超声波参数在切削过程中的影响，结果表明，如果参数选择得当，表面粗糙度可以控制在 0.2 μm 以下。苏豪[12]和席刚[13]等人发现，相对于传统轧制工艺，超声波振动能够使表面残余应力的分布得到优化。材料表面残余应力值随静压力升高而减小。Ren[14]等人指出，超声振动可以改善表面性能，并发现最佳的参数组合是静压力为 1000 N，振幅为 8 μm。

赵刚要[15]等人研究了摩擦对 W 形金属密封环不均匀度的影响规律，发现影响 W 形金属密封环不均匀度的主要影响因素为驱动辊和从动辊与环件之间的摩擦，而导辊与环件之间的摩擦对不均匀度影响并不显著。姜旸[16]等人考察了滚压成形各参数对 W 形金属密封环回弹性的影响规律，研究表明壁厚对 W 形金属密封的回弹性有一定影响。龚雪婷[17]对不同结构参数的 W 形金属密封环进行了轴向刚度测试，得到了密封性能受结构参数影响的变化规律。但是上述学者对 W 形金属密封成形过程仍然是基于传统滚压工艺之上，并没有与超声振幅辅助工艺相结合。

然而，目前对于金属 W 环超声振动辅助滚压加工的

收稿日期：2023-04-15

基金项目：国家自然科学基金（52165051）；江西省重点研发计划（20202BBEL53010）；江西省重大科技研发专项（20194ABC28001）

作者简介：郭正华，男，1972 年生，博士，教授，南昌航空大学航空制造工程学院，江西 南昌 330063，E-mail: 29015@nchu.edu.cn

研究罕见报道。因此，本工作主要采用仿真方法研究了超声频率对于 W 形金属密封环多道次滚压加工中的应力不均匀、应变不均匀和壁厚不均匀的影响。进而通过验证性实验研究，验证本研究的可靠性。

1　超声振动辅助滚压成形原理

图 2 为超声振动辅助滚压简图，超声振动辅助滚压成形系统主要由变幅杆、压电传感器、超声发生器和辊轮组成。在静力作用下，上模始终压在环件上并以一定转速旋转。在成形过程中，环件由上模驱动并围绕 Y 轴旋转。同时，下模沿 X 轴做进给运动，在接触到环件后，下模以固定的频率和振幅冲击环件。

在成形开始阶段，由于成形力较小，金属表面发生的变形可以得到恢复，这一阶段属于弹性变形。当滚压持续进行时，成形力会超过材料屈服强度，甚至撤除外力作用后其表面变形仍未完全恢复，此阶段为塑性变形。成形过程中环件处在塑性变形与弹性变形往复转换的复杂环境。

2　有限元模拟关键技术

2.1　零件几何参数

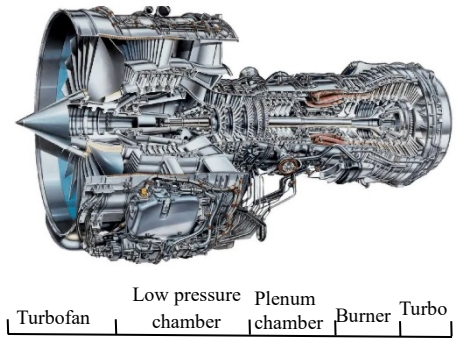

图 1　航空发动机结构图

Fig.1　Structure of turbofan engine

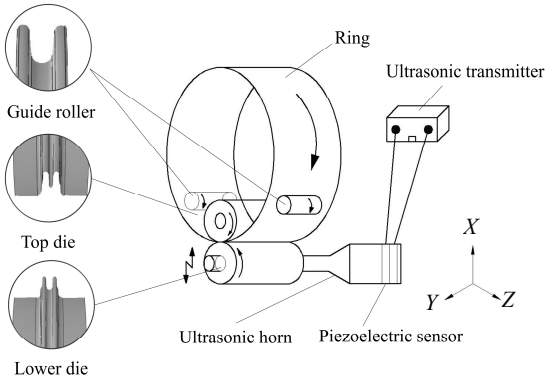

图 2　超声振动滚压简图

Fig.2　Diagram of ultrasonic vibration roll forming

本研究的 W 形金属密封环几何图形，如图 3 所示。环件主要参数为：直径（D）为 517 mm，宽度（B）为 18.34 mm，壁厚（T）为 0.3 mm，高度（H）为 6.2 mm。

2.2　仿真模型

为了研究超声频率对 W 形金属密封环成形的影响，本研究基于 ABAQUS/Explicit 有限元软件建立了多道次超声振动辅助滚压成形三维有限元模拟模型，如图 4 所示。在模型中，由于在模型中仅仅只有环件产生变形，因此将环件定义为可变形体；而上模与下模的变形几乎可以忽略不计，因此定义上模和下模为刚体；同时导向辊在整个成形过程中仅仅起到导向作用，因此也定义为刚体。在成形过程中，导向辊固定在相应位置，给上模施加位移与旋转，在下模上施加超声振动载荷。

环件与辊轮之间采用“面-面”接触，由于环件的变形较大，因此采用罚函数接触法，环件与上模下模之间的摩擦系数设置为 0.15，其余摩擦系数定义为 0.01。

在有限元建模过程中，用四节点的曲面薄壳减缩积分单元 S4R 来表征环件。环件的总节点数为 21 518，总单元数为 21 112。模具和导辊采用解析刚体，因此不需要对导辊和模具进行网格处理。最后，环件的材料为 GH4169 高温合金，基于单拉试验，建立了 GH4169 本构模型；应力-应变曲线如图 5 所示；材料参数如表 1 所示。环件每道次截面形状如图 6 所示。

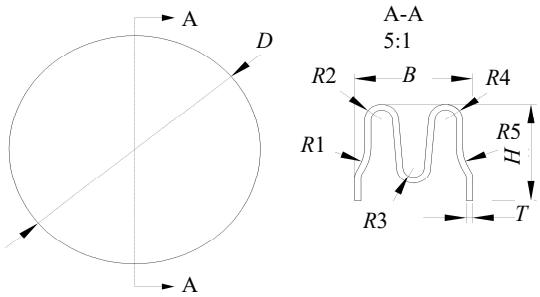

图 3　W 环参数示意图

Fig.3　Diagram of W-ring parameters

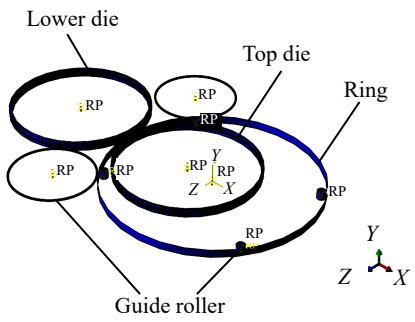

图 4　W 环超声振动辅助滚压有限元模型

Fig.4　Finite element model of W-ring ultrasonic vibration assisted roll forming

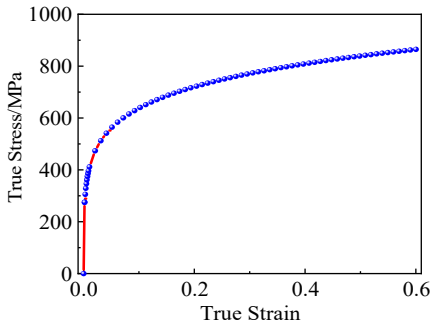

图 5　GH4169 的应力-应变曲线

Fig.5　True stress-strain curve of GH4169

表 1　GH4169 材料参数

Table 1　Material parameters of GH4169

Poisson's ratio	Modulus of elasticity, E/GPa	Density, ρ/g·cm^{-3}	Yield strength, σ_s/MPa	Tensile strength, σ_b/MPa
0.3	203	9.2	271	864.9

2.3　模型可靠性分析

滚压成形过程中动能（KE）与内能（IE）的比率，如图 7 所示。由图可以发现在整个超声振动辅助滚压加工过程中，KE/IE 的比值始终小于 7%，即动能占据内能的比例很小，符合准静态的过程，因此初步判断所建立的超声振动辅助滚压模型是可靠的。为了进一步验证有限元模型的可靠性，使用数控机床 GZ-800 对 W 形金属密封环成形进行了试验。仿真和实验结果如图 8 所示，从图中可以看出，模拟结果与仿真结果外径尺寸相接近，并且模拟截面形状与实际情况相符，因此验证了所建有限元模型的可靠性。

3　结果与讨论

3.1　应力不均匀变形分析

图 9 所示为 W 形金属密封环超声振动辅助滚压成形过程中的最大应力随滚压成形过程的变化曲线。由图可知：最大应力值在成形过程开始时急剧增加，这主要是

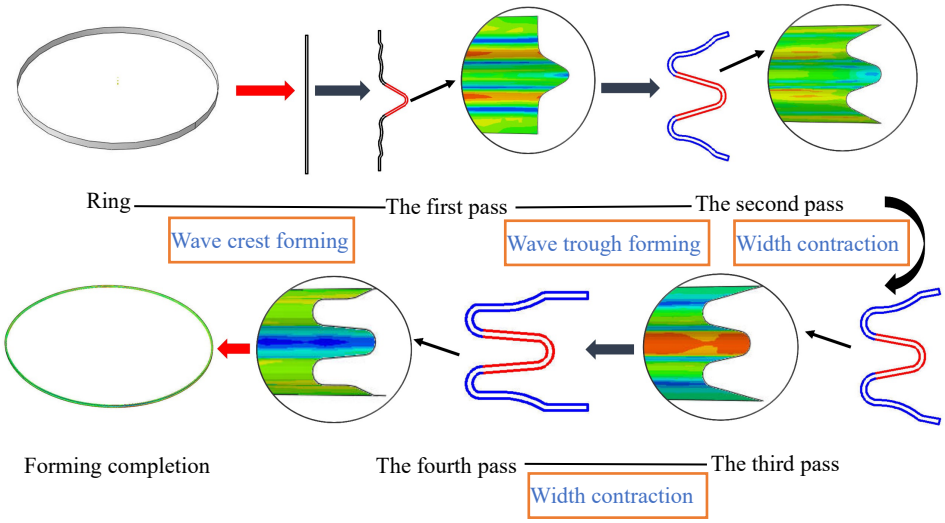

图 6　多道次滚压成形简图

Fig.6　Diagram of multi-pass ring roll forming process

因为，在成形过程开始时，系统仍处于加载状态，辊轮与环件的接触会导致应力增加，环件处于弹性变形阶段。随着加工的继续进行，最大应力值趋于稳定，环件成形逐渐过渡到稳定的塑性变形阶段。在每道工序结束时，环的最大应力值有明显的下降趋势，这是由于环件与辊轮的分离导致环件中的残余应力得以释放。随着超声频率的增加，最大应力呈现先增加后减少的趋势。

并且从图 9 中发现环件在 30 kHz 条件下，环件的最大应力值从第 2 道次初期显著增加，然后趋于稳定，这是由于环件在波谷位置出现了起皱现象，环件在起皱位置出现应力集中现象，同时作用面积急剧收缩，二者共同作用下导

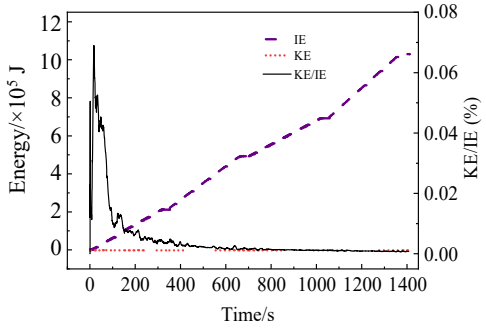

图 7　滚压加工中能量曲线

Fig.7　Energy curves of roll forming process

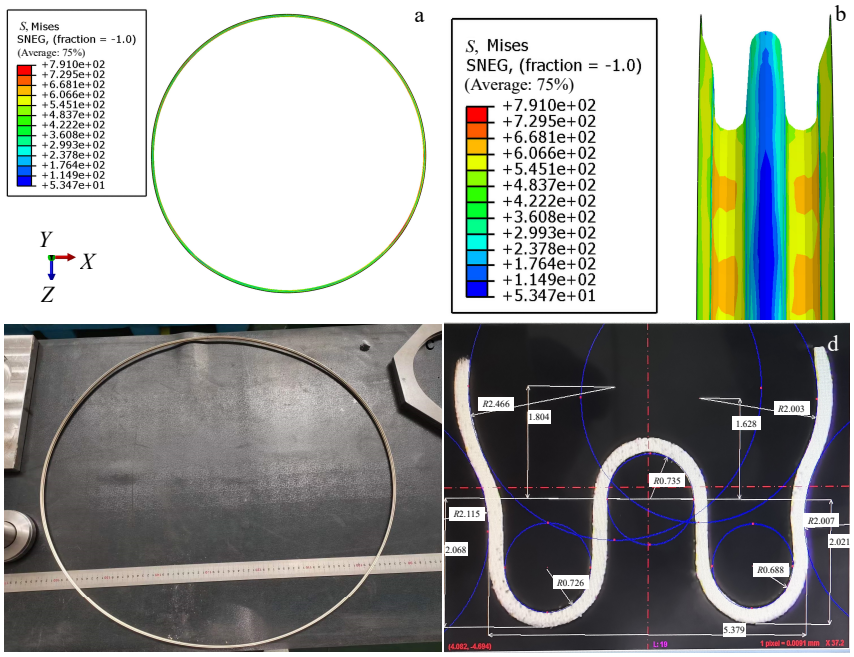

图 8　仿真与实验结果对比

Fig.8　Comparison of simulation (a, b) and experimental (c, d) results

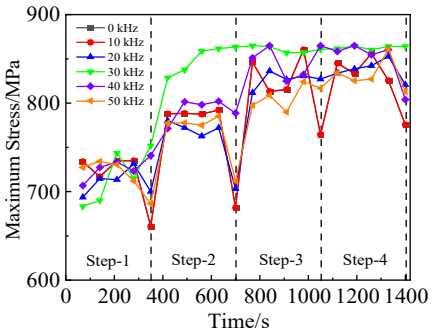

图 9　不同频率下最大应力曲线

Fig.9　Maximum stress curves at each frequency

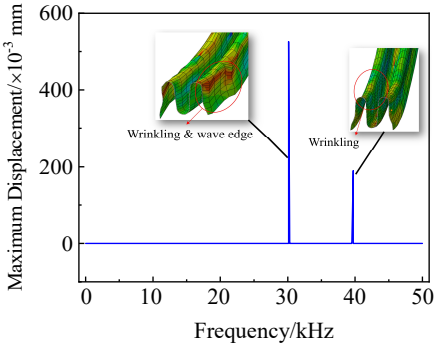

图 10　环件谐响应谱

Fig.10　Ring response spectrum curve

致应力显著增大。根据 Zheng 等人[18]的研究，绘制了环件的谐响应如图 10 所示，从图中可以看出环件在 30 与 40 kHz 条件下其振动位移激增，这是由于共振造成的，并且 30 kHz 的起皱现象要更加明显，起皱的部位会造成应力集中现象，导致应力值直接增大到抗拉极限（869.3 MPa）。

为了研究超声频率对于环件应力分布不均匀性的影响规律，在环件上沿宽度方向选取 3 条路径（如图 11 所示，后续路径相同），输出 3 条路径上的应力值再求平均值得到环件截面平均应力，同时以平均应力值的极差值ΔS对环件应力不均匀度进行表征，即：

$$\Delta S = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\text{ave}}} \tag{1}$$

其中，$S_{\max}$为平均应力值的最大值，$S_{\min}$为平均应力值的最小值，S_{ave}为路径应力平均值。若ΔS值越小，则表示环件应力分布越均匀；若ΔS值越大，则表示环件应力分布越不均匀。

图 12 为环件应力不均匀度曲线，从图中可以看出，超声频率在 10 kHz 左右时，环件的应力不均匀度与无振动组差别不大；而随着超声频率的增加，环件的应力不均匀度呈现增大的趋势，当超声频率达到 30 kHz 时，环件的应力不均匀度达到最大值 1.59，这是由于此时环件起皱现象严重，其最大应力值直接达到抗拉强度，造成应力不均匀度增加；而当超声频率超过 30 kHz 时，其不均匀度又呈现下降趋势，这是由于环件在 40 kHz 时起皱程度要小于 30 kHz，

因此应力不均匀度会下降。因此，环件的应力不均匀度随着超声频率的增加呈现先增加后减小的趋势。

为了进一步探究环件的应力分布状况，将施加不同超声频率下沿宽度方向 3 条路径上的截面应力绘制如图 13 所示，从图中可以看出，环件在无振动与 10 kHz 条件下，其应力分布基本相似，应力较大位置主要在 2 个波谷圆角处，而波峰位置应力值较小；频率达到 20 kHz 时，应力主要集中在波峰中心处，并且最大应力值呈现增大趋势。这是由于波峰是最先与模具接触的部位，随着频率的提高，模具对环件的冲击效应也不断增加，这会导致波峰位置的应力不断叠加，因此波峰位置的应力较大；而超声频率提升至 30 kHz 时，环件的最大应力值出现在波谷圆角外侧，这是环件在波谷处出现起皱造成应力集中现象造成的；到 40 kHz 时，最大应力点出现位置向左偏移了一定位置，这表明起皱位置由波谷外侧逐渐向环件边缘转移；当超声频率达到 50 kHz 时，环件应力分布规律又恢复至与 20 kHz 相似，这是由于此时频率已经超过环件共振频率，起皱现象得以缓解。因此，波峰与波谷处是应力变化较大的位置，在实际中需要重点关注，而施加超声振动则会造成波峰处应力值增加，若施加的频率接近材料

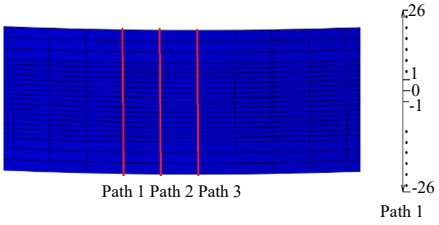

图 11　3 条路径定义

Fig.11　Definition of three paths

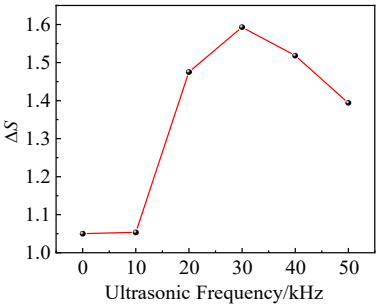

图 12　应力不均匀度曲线

Fig.12　Curves of stress unevenness

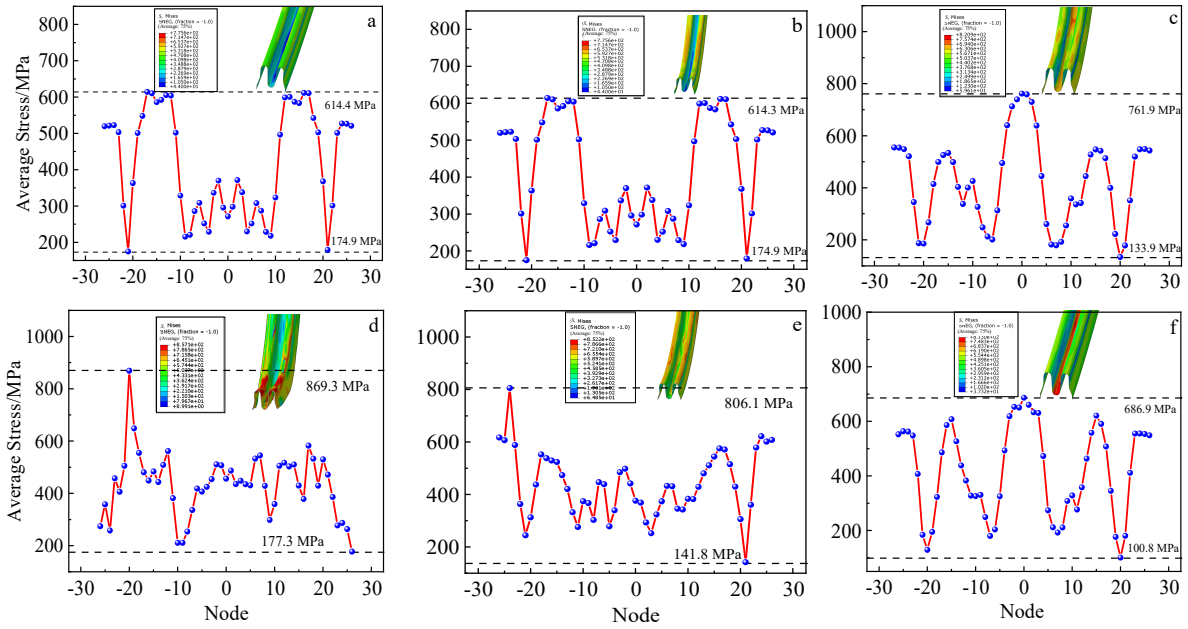

图 13　第 4 道次应力不均匀分布曲线

Fig.13　Stress uneven distribution curves of the fourth pass: (a) 0 kHz; (b) 10 kHz; (c) 20 kHz; (d) 30 kHz; (e) 40 kHz; (f) 50 kHz

固有频率甚至会引发起皱现象。

3.2　应变不均匀变形分析

图 14 为成形过程中最大应变的变化曲线，从图中可以看出，最大应变与时间成正比关系；随着超声频率的增大，环件的最大应变值呈现先增大后减小的趋势。然而，在超声频率为 30 与 40 kHz 的条件下，环件的最大应变值突然增大了约 294%和 180%，这是由于共振现象导致环件起皱造成的。

为了定量地研究环件应变不均匀程度，选取路径上平均应变的极差值ΔQ作为应变不均匀分布的评估指标，

其计算公式为：

$$\Delta Q = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\text{ave}}} \tag{2}$$

式中，$Q_{\max}$ 为平均应变的最大值，$Q_{\min}$ 为平均应变的最小值，Q_{ave} 为路径上应变的平均值。若 ΔQ 值越小，则表示环件应变分布越均匀；ΔQ 值越大，则表示环件应变分布越不均匀。

从图 15 中可以看出，在超声频率为 10 kHz 的情况下，环件的应变不均匀度与无振动组基本无差别；当超声频率增加到 20 kHz 时，环件的应变不均匀度略微下降，这是由于施加了超声载荷，环件与模具之间会在加工时间内反复接触、分离，这会造成环件回弹一部分，因此应变会有略微的减小；而超声频率达到 30 kHz 时，应变不均匀曲线急剧上升，这是由于共振导致环件起皱造成的变形程度显著增加现象；而 40 kHz 的起皱情况较轻，因此曲线开始有下降的趋势；当超声频率超过共振频率后，其应变不均匀度开始恢复至与低频规律相似。因此，随着超声频率的增大，环件的应变不均匀度呈现先略微减小，然后急剧增加，再至恢复的一个波浪形曲线。

为了探明环件应变在截面处分布状况，图 16 为各超声频率下环件截面应变分布曲线，从图中可以看出，各个频率下的应变分布较为相似，其都是在波峰与波谷处发生较大的变形，这是由截面形状决定的，随着超声频率的增加，环件的变形程度不断加大，其主要体现为波峰波谷处应变值增大；当超声频率达到 30 与 40 kHz 左右时，环件的应变分布出现与其他组明显的差别，这是由于环件起皱造成相应位置变形过大造成的现象，而渡过共振频率后，环件的应变分布又趋于正常。因此在实际中应当着重关注波峰波谷成形处应变大小。

3.3　壁厚不均匀变形分析

环件的壁厚值是直接影响密封环寿命的关键因素，若环件壁厚减薄太大则会影响使用时间，甚至在加工过

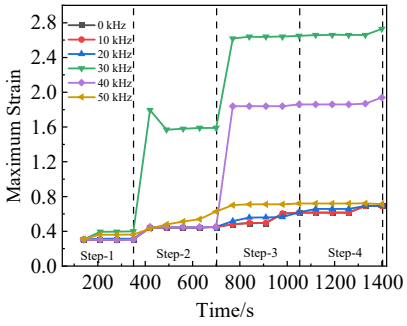

图 14　不同频率下最大应变曲线

Fig.14　Maximum strain curves at each frequency

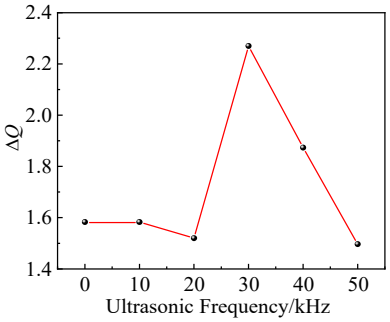

图 15　应变不均匀度曲线

Fig.15　Curve of strain unevenness

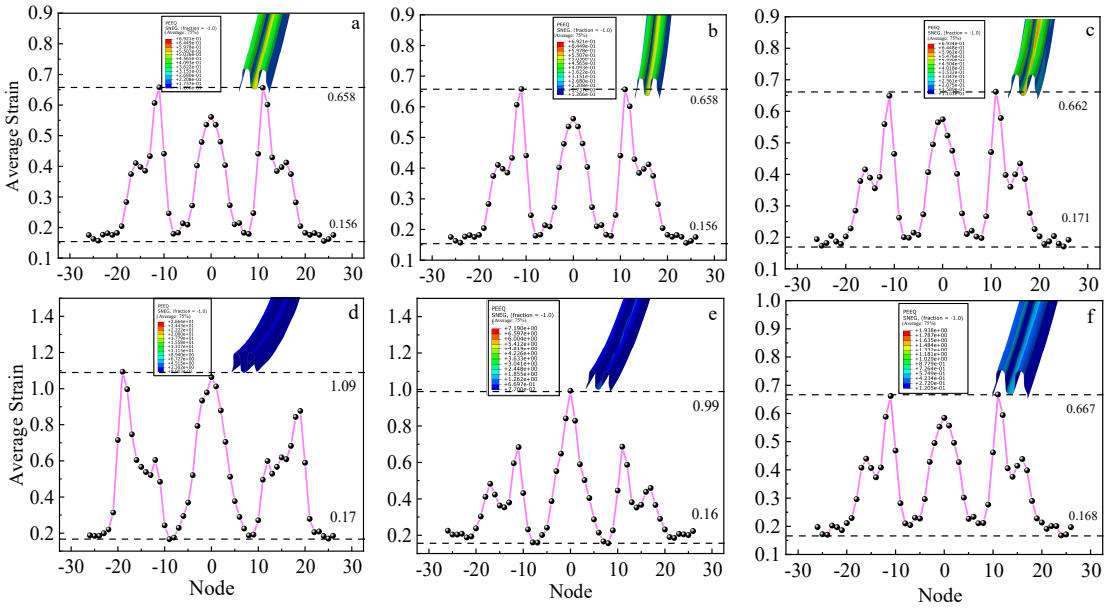

图 16　第 4 道次应变不均匀分布曲线

Fig.16　Strain uneven distribution curves of the fourth pass: (a) 0 kHz; (b) 10 kHz; (c) 20 kHz; (d) 30 kHz; (e) 40 kHz; (f) 50 kHz

程中出现开裂现象，因此对于加工中减薄位置需要着重关注，对于环件壁厚不均匀程度用壁厚减薄率δ进行表征，其计算公式为：

$$\delta=\frac{T-T_{\min}}{T}\times 100\% \tag{3}$$

式中，T为初始壁厚，其值为 0.3 mm。$T_{\min}$为壁厚最小值。δ值越小，代表环件壁厚分布越均匀、减薄现象越不明显；δ值越大，代表环件壁厚分布越不均匀、减薄现象越显著。从壁厚减薄率曲线图 17 中可以看出，环件的壁厚减薄率随着加工的持续进行呈现先增加后减少的趋势。随着超声频率的增加，环件的壁厚减薄率先增加后减少。这表明，一定程度的超声频率有利于降低环的壁厚变薄现象，同时使壁厚分布更加均匀。在超声频率为 30 kHz 的条件下，环件壁厚减薄率变化并不明显，这是由于波边现象导致环件边缘位置脱离模具限制。根据最小阻尼定律，金属流动方向总是朝向阻力小的方向进行，因此在起皱周围的局部壁厚会呈现增大的趋势，而定义的壁厚减薄率只能计算最小壁厚值，对于增厚的部分并不能表示，所以在图 17 中 30 kHz 的变化曲线变动基本不大。

为了进一步探明壁厚分布不均匀性，图 18 为各超声频率下第 4 道次沿宽度方向壁厚分布曲线。从图中可以看出，在低频的超声载荷下，环件在波峰圆角两侧出现了一定程度的减薄现象，而波谷圆角内侧有略微增厚的趋势，但是低频时刻壁厚分布与无振动基本没有差别；超声频率达到 20 kHz 时，波峰圆角减薄与波谷圆角内侧增厚现象加剧；而超声频率达到 30 kHz 时，环件已经出现了明显的起皱现象，在起皱部位壁厚值显著增大，而壁厚减薄较少，因此也解释了图 17 中 30 kHz 变化曲线；而 40 kHz 时发现在波峰处壁厚远高于其他位置，这也是由于起皱现象造成的。当频率超过环件固有频率后，其壁厚分布又趋于均匀。因此在 W 形金属密封环超声振动滚压成形过程中，波峰与波谷是成形过程的关键所在。

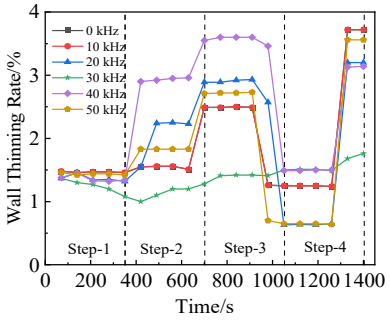

图 17　不同频率下环件壁厚减薄率

Fig.17　Wall thinning rate at each frequency

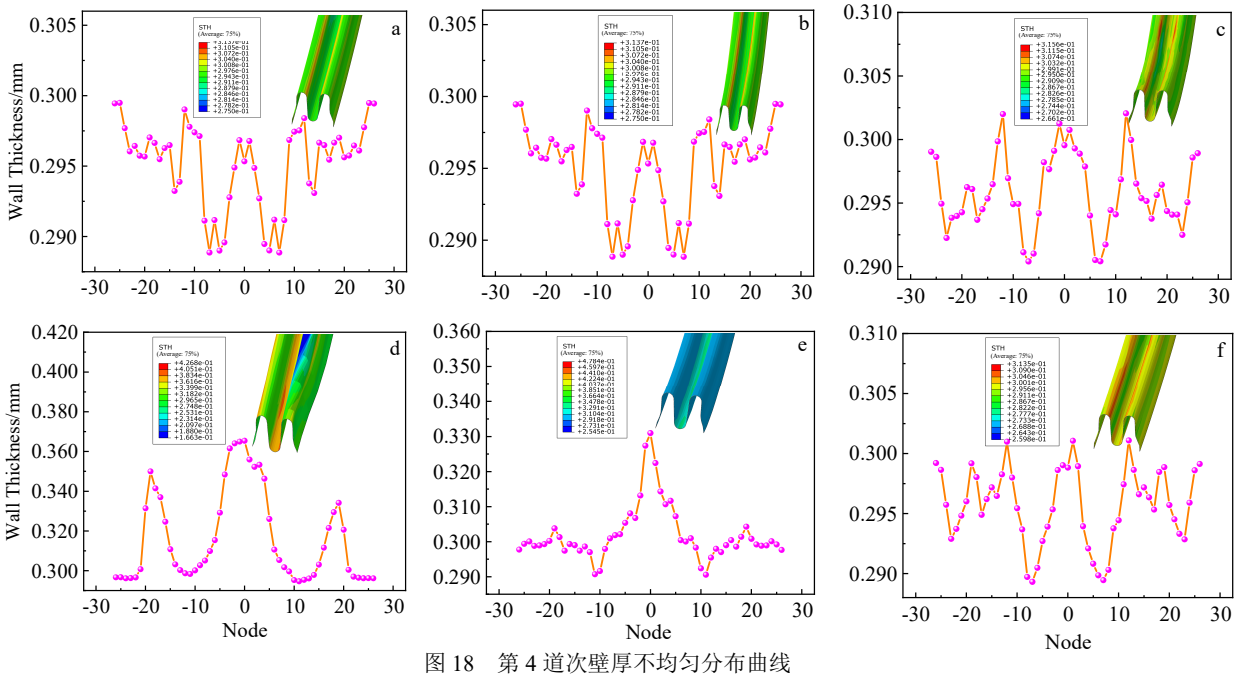

图 18　第 4 道次壁厚不均匀分布曲线

Fig.18　Wall thickness uneven distribution curves of the fourth pass: (a) 0 kHz; (b) 10 kHz; (c) 20 kHz; (d) 30 kHz; (e) 40 kHz; (f) 50 kHz

4　结　论

通过仿真与实验相结合的方法，探究了 W 形金属密封环超声振动滚压成形过程中超声频率对环件不均匀变形的影响规律，结论如下：

1）随着超声频率的增加，W 形金属密封环的最大应力值与应力分布不均匀程度呈现先增大后减小的趋势。通过应力不均匀分析找出了应力较大的区域为波谷圆角处。

2）随着超声频率的增大，W 形金属密封环的最

大应变呈现先增大后减小的趋势，而其应变不均匀分布呈现先减小后增大再减小的趋势。通过应变不均匀分析发现波峰与波谷处的变形要大于环件其他位置。

3）在整个成形过程中，W 形金属密封环的波峰圆角两侧壁厚出现明显的减薄现象。随着超声频率的增大，环件的壁厚减薄率呈现先增大后减小再增大的波形趋势。

参考文献 References

[1] Bozdana A T, Gindy N N Z, Li H. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2005, 45(6): 713

[2] Lv Yuan, Dong Mengen, Pan Xixiang *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2023, 52(5): 1633

[3] Luo Heng(罗 恒), Wang Youqiang(王优强), Zhang Ping(张平). *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2019, 42(5): 1

[4] Wang Feng, Men Xiuhua, Liu Yanjie *et al*. *Simulation Modelling Practice and Theory*[J], 2020, 104: 102121

[5] Zheng Jiaxin, Shang Yingju, Guo Yonglei *et al*. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2022, 80: 132

[6] Liu Gaofeng, Xiang Daohui, Peng Peicheng *et al*. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2022, 307: 117677

[7] Ye Han, Chen Aimin, Liu Senzhong *et al*. *Surface and Coatings Technology*[J], 2022, 433: 128126

[8] Pan Gaofeng(潘高峰), Zhu Lei(朱 磊), Yuan Zewei(苑泽伟) *et al*. *Modern Manufacturing Engineering*(现代制造工程)[J], 2022(1): 85

[9] Yao Chenglin(姚成霖), Tong Jinglin(童景琳), Jiao Feng(焦锋) *et al*. *Tool Engineering*(工具技术)[J], 2017, 51(8): 87

[10] Sun Qing, Yang Ming, Jiang Yun *et al*. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2022, 911: 165009

[11] Wang Ting(王 婷), Wang Dongpo(王东坡), Shen Yu(沈 煜) *et al*. *Journal of Tianjin University*(天津大学学报)[J], 2009, 42(2): 168

[12] Su Hao(苏 豪), Shen Xuehu(沈学会), Gong Xianhong(巩贤宏) *et al*. *Electromachining and Mould*(电加工与模具)[J], 2020(1): 55

[13] Xi Gang(席 刚), Liu Yuanming(刘元铭), Zhang Yuefei(张跃飞) *et al*. *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2020, 27(4): 61

[14] Ren Zhaohui, Li Zhuhong, Zhou Shihua *et al*. *Simulation Modelling Practice and Theory*[J], 2022, 121: 102643

[15] Zhao Gangyao(赵刚要), Zhang Ranyang(张冉阳), Guo Zhenghua(郭正华) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(12): 3761

[16] Jiang Yang(姜 旸), Suo Shuangfu(索双富). *Lubrication Engineering*(润滑与密封)[J], 2019, 44(1): 76

[17] Gong Xueting(龚雪婷). *Study on Characters of Metal W-Ring Sealing Used on Aircraft Engine*(航空发动机用 W 形金属密封环特性研究)[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011

[18] Zheng Jianxin, Shang Yingju, Guo Yonglei *et al*. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2022, 80: 132

Effect of Ultrasonic Vibration on Uneven Deformation of Large Diameter Thin-Walled Superalloy W-Ring During Rolling Forming

Guo Zhenghua[1], Shi Mingzhi[1], Zhao Gangyao[1], Zhang Ranyang[1], Wu Qingjie[1], Wu Xinzhou[2], Li Shenlong[2]

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. AECC Changjiang Engine Company Limited, Yueyang 414000, China)

Abstract: In order to improve the forming quality of W-ring, the ultrasonic vibration rolling process of W-ring was studied. Based on ABAQUS/Explicit finite element simulation software, a three-dimensional finite element model of W-ring with ultrasonic vibration assisted rolling was established, and the influence of ultrasonic frequency on the non-uniform deformation of the ring was studied. The results show that with the increase in ultrasonic frequency, the stress unevenness of the ring increases first and then decreases. The strain unevenness of the ring component decreases slightly first, then increases sharply, and then decreases again. The non-uniformity of wall thickness decreases first, then increases and then decreases. When the ultrasonic frequency is 30 and 40 kHz, the unevenness of the ring deformation increases significantly, which is caused by the wrinkle phenomenon of the ring. By analyzing the stress, strain and wall thickness of the section, it is proved that the position of wave crest and wave trough is the key position in the forming process.

Key words: ultrasonic vibration; roll forming; superalloy; wall thickness thinning rate; W-ring

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