

# 钛合金薄壁环件制造过程残余应力与加工变形模拟与优化

王天乐<sup>1,2</sup>, 邓加东<sup>1,2,3\*</sup>, 钱东升<sup>1,2,3</sup>, 丁佐军<sup>4</sup>, 刘超<sup>4</sup>

(1. 武汉理工大学高温轻合金及应用技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 3. 武汉理工大学湖北省材料绿色精密成形工程技术研究中心, 湖北 武汉 430070; 4. 无锡派克新材料科技股份有限公司, 江苏 无锡 214000)

**摘要:** 钛合金薄壁环件是航空航天等领域的关键构件, 其机加工变形严重制约精度与可靠性。以钛合金矩形薄壁环件为对象, 建立了轧制、冷却、加热、胀形及热处理全流程有限元模型, 系统研究了成形过程残余应力演变规律及其对机加工变形的影响。通过分析不同胀形量与胀形温度下的应力分布特征, 揭示了胀形工艺对应力场的调控机制, 在此基础上, 构建了残余应力与加工变形之间的理论分析模型, 并进行了仿真与试验验证。结果表明, 环件残余应力主要产生于首次冷却阶段, 后续胀形及热处理工序可显著降低应力幅值并改善分布均匀性; 合理的胀形工艺可有效改善残余应力分布, 其中胀形量约 4%、胀形温度 800 °C 时应力水平最低且分布最为均匀; 机加工仿真结果与理论模型计算结果吻合良好, 最大误差为 20.37%。进一步将优化工艺与理论模型应用于异形环件, 并通过试验验证其有效性与工程适用性。研究结果可为钛合金薄壁环件残余应力调控及加工变形控制提供理论依据和工艺指导。

**关键词:** 钛合金环件; 胀形工艺; 残余应力; 机加工变形; 有限元模拟

中图分类号: TF823, TG146.2 文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)02-0009-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.02.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Simulation analysis and process optimization of residual stress and machining deformation in the manufacturing of thin-walled titanium alloy rings

WANG Tianle<sup>1,2</sup>, DENG Jiadong<sup>1,2,3\*</sup>, QIAN Dongsheng<sup>1,2,3</sup>, DING Zuojun<sup>4</sup>, LIU Chao<sup>4</sup>

(1. National Key Laboratory of High Temperature Light Alloys and Application Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. Hubei Key Laboratory of Modern Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 3. Hubei Engineering Technology Research Center for Green Precision Material Forming, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 4. Wuxi Paikexin Materials Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, Jiangsu, China)

**Abstract:** Thin-walled titanium alloy rings are critical aerospace components, whose machining deformation severely restricts their dimensional accuracy and service reliability. A full-process finite ele-

收稿日期: 2025-12-31; 修回日期: 2026-01-22; 接受日期: 2026-02-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFB3714200); 国家自然科学基金资助项目(52475397); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B17034); 教育部创新团队发展计划项目(No. IRT\_17R83)。

作者简介: 王天乐, 2001 年出生, 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要研究方向为钛合金成形制造, E-mail: 1634482910@qq.com; \*通信作者: 邓加东, 1988 年出生, 男, 湖北武汉, 副教授, 博士, 主要研究方向为环类零件成形制造理论与技术, E-mail: dengjd@whut.edu.cn。

ment model covering rolling, cooling, heating, bulging and heat treatment was established for rectangular thin-walled titanium alloy rings, to systematically investigate residual stress evolution during forming and its effect on machining deformation. The regulation mechanism of bulging on the stress field was revealed by analyzing stress distribution under different bulging parameters, and a theoretical model correlating residual stress and machining deformation was constructed and verified via simulation and experiments. Results show that residual stress mainly originates from the initial cooling stage, and subsequent bulging and heat treatment can significantly reduce stress amplitude and improve distribution uniformity. The optimal residual stress state is achieved at a bulging ratio of 4% and a bulging temperature of 800 °C. Simulation results are in good agreement with theoretical calculations, with a maximum error of 20.37%. The optimized process and model were validated effective for special-shaped rings, providing a theoretical basis and process guidance for residual stress regulation and deformation control of titanium alloy thin-walled rings.

**Key words:** titanium alloy ring; bulging process; residual stress; machining deformation; finite element simulation

## 0 引言

钛合金凭借高强度、优良耐腐蚀性及高温力学性能,在航空航天、船舶海洋等领域的薄壁环件关键构件制造中占据核心地位<sup>[1]</sup>。这类环件作为传动、连接或支撑部件,对尺寸精度与形位公差要求极高,机加工变形已成为制约其性能达标及服役可靠性的关键瓶颈。轧制是环件成形的核心工序,该过程中材料经复杂热力耦合作用,会不可避免地产生残余应力<sup>[2]</sup>。

残余应力作为内部约束载荷,会在后续机加工中因材料去除引发应力重分布,导致构件变形,严重时造成零件超差报废。因此,阐明环件残余应力调控方法和应力分布对机加工变形的影响,是实现钛合金薄壁环件高精度制造的关键科学问题。

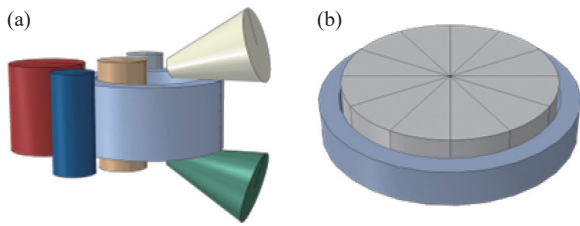
国内外学者在环件残余应力调控与机加工变形控制领域已取得诸多进展。曹青山等<sup>[3]</sup>提出脉冲电磁力与强磁场复合方法,通过驱动铝合金环件微小塑性变形实现应力释放。杨艳慧等<sup>[4]</sup>在淬火和人工时效间引入冷胀形工艺,使淬火残余应力降低超85%,何珞玉<sup>[5]</sup>进一步明确7085铝合金筒形件的最优胀形量为2.5%~3.5%。针对TC4钛合金环件,LÜ等<sup>[6-7]</sup>将胀形工艺引入环件全流程制造环节,实现了环件残余应力的均匀化调控与应力场的精准预测。机加工变形方面,ZHANG等<sup>[8]</sup>指出高温高压高应变率是钛合金等难加工材料残余应力的主要诱因。FUH和WU<sup>[9]</sup>通过试验建立了切削参数影响的经验模型。廖凯等<sup>[10]</sup>证实铝合金加工总变形中90%源于初始残余应力。BAI等<sup>[11]</sup>通过多道次轧制、淬火、去应力退火及翻转车削,获得了厚度方向对称分布的低幅值残余应力,实现对加工变形的控制。XUE等<sup>[12]</sup>建立的2219铝合金环形件有限元模

型,其材料去除量与加工变形的模拟结果与试验高度吻合。

现有研究多集中于单一工艺环节,忽略了环件制造全流程中的应力演化耦合效应,难以完全呈现残余应力的累积特性,且残余应力与机加工变形的定量关联尚未明确,相关调控研究也多局限于简单矩形环件,对复杂异形环件覆盖不足,工程应用场景受限。为此,笔者以TC4钛合金矩形薄壁环件为对象,系统研究其轧制、冷却、加热、胀形、热处理全流程中残余应力的演变规律,重点揭示胀形量与胀形温度对应力分布的调控机制。通过建立残余应力与加工变形之间的定量模型,明确了残余应力分布对加工变形的影响;进一步将该模型与优化工艺推广应用于异形环件,并经过仿真与试验验证了其通用性与工程适用性。

## 1 TC4钛合金薄壁环件制造多工序仿真建模

以钛合金薄壁环件为研究对象,基于Abaqus有限元分析软件建立轧制、冷却、加热、胀形以及热处理的全过程数值模型,如图1所示。轧制阶段采用主辊驱动环件旋转、芯辊径向进给的工艺方案,通过辊系协同作用实现环件壁厚减薄与直径增大。轧制结束后,对环件进行空冷仿真,使其自然冷却至室温。随后,将冷却后的环件重新加热至轧制温度并保温1h,以确保温度分布均匀。胀形阶段的初始状态直接继承加热保温后环件的多物理场参数,包括残余应力、温度分布及累积应变。热处理工序采用退火工艺,设定退火温度为705 °C,保温时长3h,最终经空气冷却至室温,各工序关键工艺参数如表1所示。设计五组试验研究胀形工艺参数对环件残余应力的影响规律,如表2所示。



(a) 轧制模型; (b) 胀形模型  
图 1 轧制和胀形有限元模型

Fig. 1 Rolling and bulging finite element model

在继承环件热处理残余应力基础上, 采用逐层材料去除的机加工仿真以评估加工变形。采用简化模型, 聚焦于初始残余应力释放所导致的变形机理。

因此, 在分析中忽略了切削热及机加工过程中产生的表面残余应力。材料去除采用生死单元技术。具体流程如下: ①导入热处理结束时的环件结果文件, 创建孤立网格部件; ②通过 Abaqus 插件将孤立网格部件转换为可编辑实体部件; ③对部件进行几何切分并网格化, 区分保留区与去除区; 将去除区设置为可失活单元, 并通过多个分析步实现逐层去除; ④采用场变量映射将旧网格上的位移、应力与温度等物理场准确映射至新网格。上述方法能够直接表征残余应力引起的环件加工变形演化规律, 如图 2 所示, 图 2 中 P1~P8 为测量位置示意。

表 1 TC4 钛合金环件轧制工艺参数

Table 1 Process parameters of TC4 titanium alloy ring component

| Size of ring blank/mm | Size of rolled ring/mm | Speed of driving roll/(rad·s <sup>-1</sup> ) | Speed of the mandrel/(mm·s <sup>-1</sup> ) | Initial temperature of roll/°C | Bulging speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) | Coulomb friction factor | Ambient temperature/°C | Initial temperature of blank/°C |
|-----------------------|------------------------|--|--|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------|
| Ø72×Ø45×15            | Ø106×Ø90×15            | 0.8  | 0.5  | 300                            | 1                                   | 0.6                     | 25                     | 950                             |

表 2 TC4 钛合金环件胀形参数

Table 2 Expansion parameters of TC4 titanium alloy ring component

| Number | Bulging ratio/% | Temperature/°C |
|--------|-----------------|----------------|
| A-3    | 2               | 800            |
| B-3    | 4               | 800            |
| C-3    | 6               | 800            |
| C-2    | 6               | 700            |
| C-1    | 6               | 600            |

为检验仿真结果的可信度, 在保持几何尺寸、材料本构参数与边界条件一致的前提下, 对文献 [7] 的模型进行数值复现, 将仿真所得数据与文献中的试验数据进行对比分析, 测量位置选取为环件上端面、内壁及外壁中间部位, 沿周向均匀分布的 8 个位置处(P1~P8)的周向残余应力。结果如图 3 所示, 模型的应力幅值与分布形态与文献数据吻合良好, 误差在 20% 以内。

面、内壁及外壁中间部位, 沿周向均匀分布的 8 个位置处(P1~P8)的周向残余应力。结果如图 3 所示, 模型的应力幅值与分布形态与文献数据吻合良好, 误差在 20% 以内。

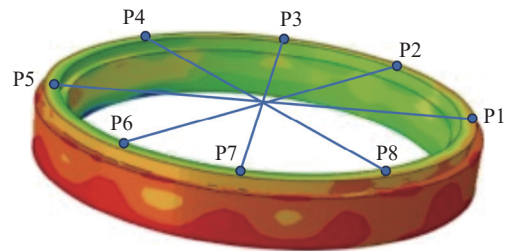
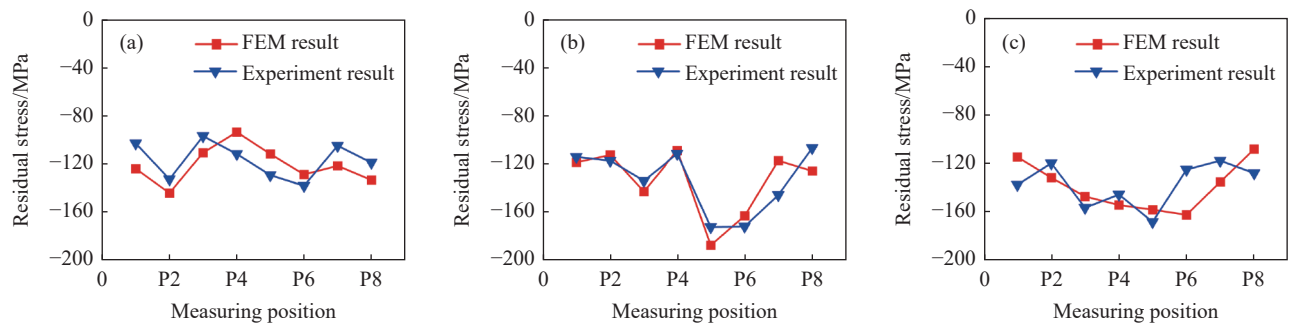


图 2 机加工有限元模型

Fig. 2 Machining finite element model



(a) 上端面; (b) 内壁; (c) 外壁

图 3 机加工模拟与试验结果对比

Fig. 3 Comparison of machining simulation and experimental results

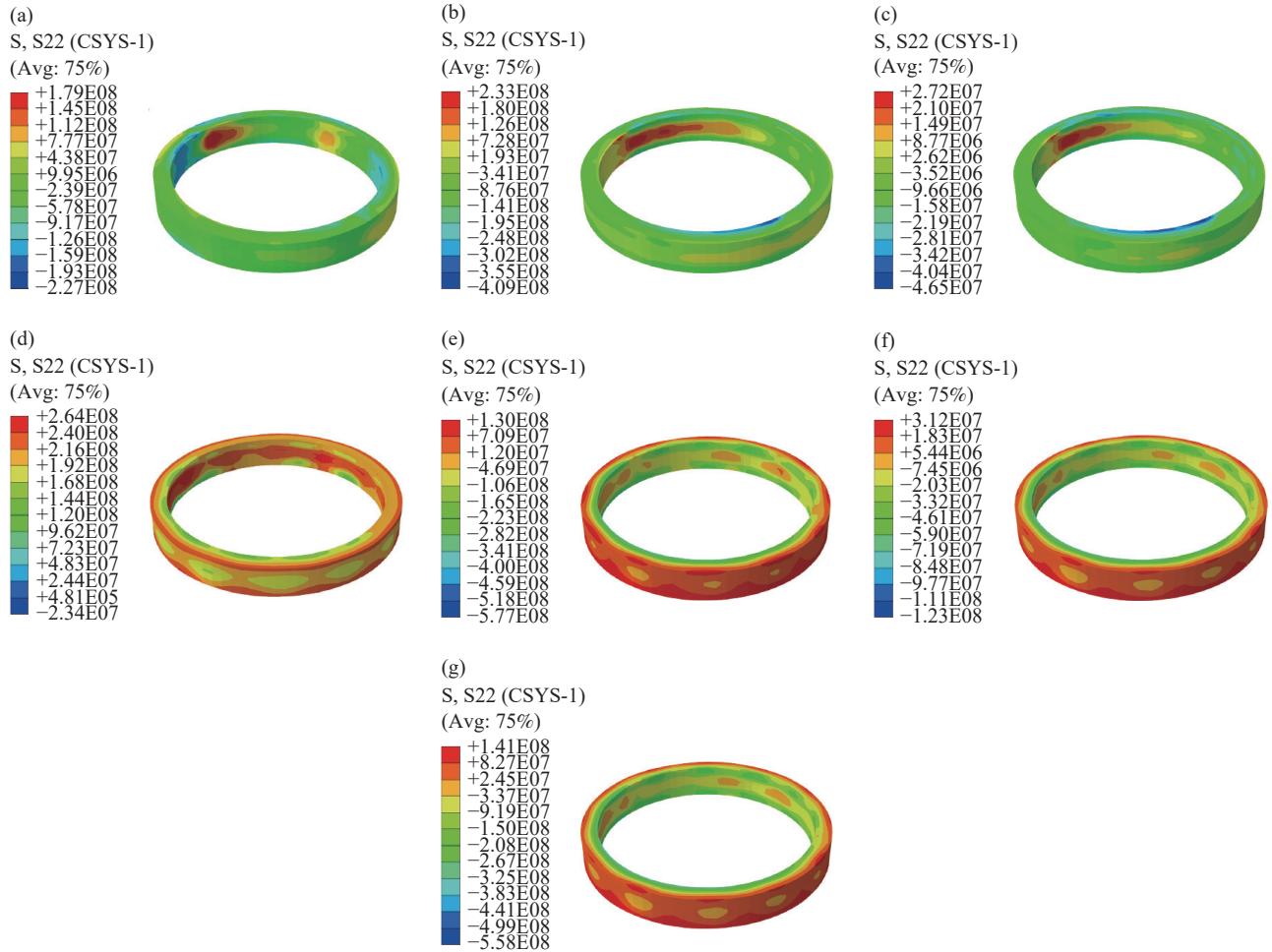
## 2 成形-热处理过程环件残余应力演化规律

环件的最终再平衡残余应力由环件成形过程中塑性变形引起的变形应力与温度梯度诱发的热应力两部分叠加而成<sup>[13]</sup>。在薄壁环件的应力场中, 周向

应力通常占据主导地位<sup>[14]</sup>。因此, 将研究聚焦于各关键工序阶段周向应力场的演化行为。图 4 给出了轧制、冷却、加热、胀形、热处理全流程的应力演化云图, 从图 4(a)~(c) 可以看出, 环件周向残余应力的整体幅值呈逐步降低趋势, 高应力集中区的

覆盖范围持续收缩,至图4(c)时,最大应力幅值较图4(a)降低约86.7%;图4(d)为胀形阶段,应力出现显著波动,最终经过热处理后,应力幅值进一步降

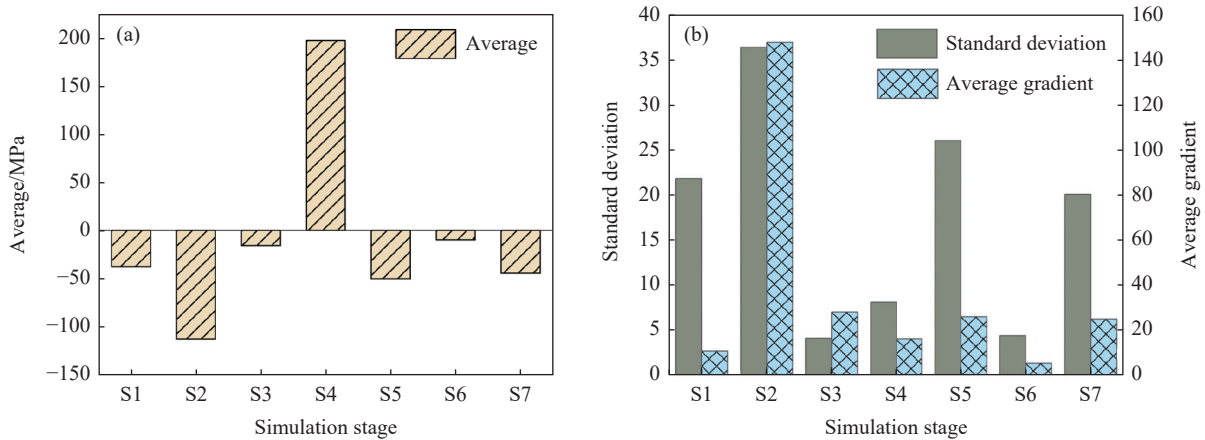
低,环件应力均匀性得到提高。图5是对应阶段测得的残余应力均值、标准差以及沿壁厚方向的平均应力梯度,其中平均应力梯度公式如式(1)所示。



(a) 轧制; (b) 冷却; (c) 加热; (d) 胀形; (e) 卸载冷却; (f) 热处理; (g) 冷却

图4 制造关键工序中环件应力演化规律

Fig. 4 Stress evolution law of ring-shaped components in key manufacturing processes



(a) 均值; (b) 标准差和梯度

图5 环件各工序周向残余应力评价指标

Fig. 5 Evaluation indices of circumferential residual stress

$$G = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} |\sigma_{i+1} - \sigma_i| \quad (1)$$

式中  $G$  是环件沿壁厚方向的平均残余应力梯度, MPa;  $n$  是环件壁厚方向上的残余应力测点总数;  $i$  是壁厚方向的测点序号;  $\sigma_i$  是环件壁厚方向上第  $i$  个测点的残余应力值, MPa。

图 5 给出了环件全流程仿真过程中残余应力评价指标, 横坐标为图 4 所示的七个阶段, 环件在不同工序阶段的周向残余应力呈现出明显差异。高温轧制阶段整体应力均值较小, 但局部区域仍存在一定程度的应力集中。首次冷却(S2)至室温后, 周向残余压应力的平均值迅速增至约  $-113$  MPa, 同时应力标准差和壁厚方向梯度达到最大值, 应力分布非均匀性最为显著。随后加热至高温(S3), 应力集中现象得到明显释放, 应力标准差及梯度均显著降低。胀形后冷却阶段(S5)残余应力均值降至约  $-50.4$  MPa, 较首次冷却阶段(S2)下降约 55.4%, 应力分布进一步趋于均匀。经热处理及后续冷却后(S7), 残余应力均值进一步降低至  $-44.7$  MPa, 相比首次冷却阶段总体下降约 60.4%, 应力标准差小幅降低、梯度保持稳定, 表明环件残余应力场逐步趋于稳态。

综上, 环向压应力峰值主要形成于冷却阶段, 这是残余应力的主要来源。后续的加热、胀形和热处理过程则通过引入塑性变形有效降低了平

均应力并改善了其分布均匀性。最终, 构件内部形成以较低压应力和可控梯度为特征的残余应力场, 从而为后续机加工提供了更利于变形控制的初始条件。

### 3 胀形工艺对环件残余应力的调控作用

#### 3.1 胀形量对残余应力的影响

胀形的目的是利用径向塑性变形释放或抵消掉部分轧制残余应力, 实现环件整体残余应力峰值降低与分布均匀化, 其应力调控过程可概括为三阶段<sup>[15-17]</sup>: 一是应力叠加抵消, 内壁周向拉应力与轧后周向压应力相互作用, 快速降低局部应力; 二是塑性释放与再分配, 外载超屈服后形成由内向外递减的塑性变形梯度, 抵消轧后不均匀性, 使应力分布平缓; 三是回弹重构, 卸载时弹性恢复与未释放塑性应变叠加, 形成新的残余应力场。

图 6 显示了环件不同部位残余应力的均值与标准差。随着胀形量的增大, 塑性变形逐渐增强, 如图 6(a) 所示, 上端面压应力相应减小, 应力场整体趋于均匀。由图 6(c) 可以看出外壁应力状态由压应力转变为拉应力, 且拉应力水平随胀形量增加而上升。在内壁区域, 当胀形量为 4% 时压应力达到最低, 分布均匀性最好; 继续增至 6% 时, 因塑性变形过度与回弹加剧, 压应力出现回升, 均匀性也有所下降。

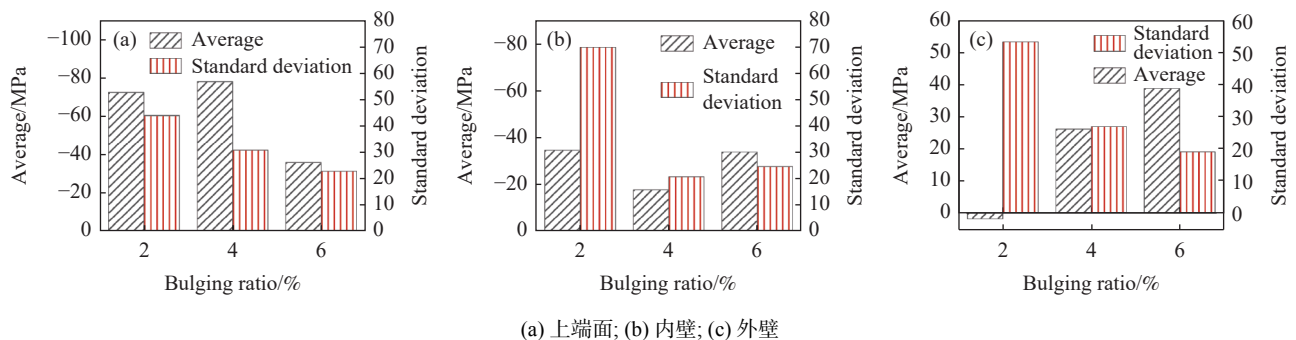


图 6 不同胀形量下胀形后环件各位置的应力评价指标  
Fig. 6 Stress indices of bulged ring at different bulging ratio

胀形量存在一个优化区间, 可在降低残余应力峰值的同时改善其周向均匀性, 一旦超出该区间, 过度的塑性变形反而会削弱均匀化效果。仿真结果表明, 将胀形量控制在 4% 左右可获得最佳的残余应力分布, 该结果将通过后续试验与仿真对比进一步验证。

#### 3.2 胀形温度对残余应力的影响

温度通过影响材料的屈服强度与弹性模量, 进而改变材料塑性变形的难易程度以及卸载回弹的幅度。具体而言, 随着温度升高, 材料屈服强度下降、弹性模量减小, 这有利于促进塑性重分配并抑制回弹; 反之, 温度降低则会使材料更难发生塑性变形,

并加剧回弹效应<sup>[18]</sup>。胀形温度的影响分为三类:低温胀形时材料屈服强度与弹性模量偏高,需较大外载才能触发塑性变形,且回弹显著,残余应力峰值较高;中温胀形可实现充分塑性变形,同时减少回弹,残余应力峰值显著下降且分布平缓;高温胀形虽进一步降低整体应力水平,但易引发过度塑性变形与局部变形不均匀。

图7展示了不同胀形温度下环件各位置残余应力的仿真评价指标。结果表明,在其他工艺参

数不变的条件下,胀形温度越低,环件变形抗力越大,周向残余应力峰值相应升高;同时,各位置残余应力整体水平也随温度降低而增加。残余应力的标准差随温度变化幅度较小,表明温度主要影响应力的大小,而对分布均匀性的作用相对有限。仿真分析表明,将胀形温度控制在800℃左右,既能实现充分的塑性变形以有效降低应力峰值,又能因材料在该温度下回弹较小,从而维持卸载后应力状态的稳定。

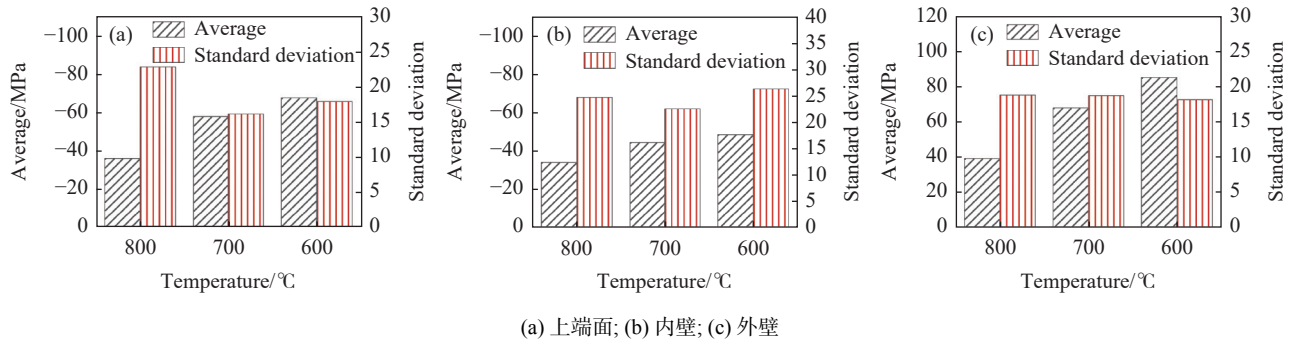


图7 不同胀形温度下胀形后环件各位置的应力评价指标  
Fig. 7 Stress indices of bulged ring at different bulging temperatures

#### 4 环件应力分布与机加工变形的关系模型

环件制造会引入自平衡的残余应力,加工时材料去除使应力释放、平衡打破,导致变形。通过建立等效分析模型,旨在预测初始残余应力所引发的加工变形。为了简化分析模型做出如下假设:①环向应力沿厚度方向线性分布,忽略剪切变形;②不考虑环件沿轴向的应力变化,简化为平面应力状态;③由于是薄壁环件,其周向应力远远大于径向,所以忽略径向残余应力;④Kirchhoff直法线假设:变形前垂直于中面的法线,变形后仍保持直线且垂直于变形后中面。

基于以上假设,对环件几何参数与坐标系作出明确定义:建立圆柱坐标系 $(r, \theta, z)$ ,其中 $r$ 为径向坐标, $\theta$ 为周向角坐标, $z$ 为轴向坐标;设环件机加工前初始内半径 $r_0$ ,外半径 $R_0$ ,环件中面平均半径 $R=(r_0+R_0)/2$ ,壁厚 $h=R_0-r_0$ ,其单位均为mm,满足 $h \ll R$ ,此时仅需考虑沿壁厚方向分布的周向残余应力 $\sigma_\theta(r)$ ,其中 $r \in [r_0, R_0]$ , $\theta \in [0, 2\pi]$ ,该应力函数可通过测量壁厚方向的残余应力值拟合得到。残余应力沿径向非均匀分布,存在梯度,

薄壁环件总变形以径向变形主导,由薄膜变形和弯曲变形耦合而成<sup>[19]</sup>。

任意位置处的周向应变由薄膜应变 $\varepsilon_\theta^m$ 和弯曲应变 $\varepsilon_\theta^b$ 组成,则周向应变如式(2)所示。

$$\varepsilon_\theta(r) = \varepsilon_\theta^m + \varepsilon_\theta^b = \frac{u_0}{R} + y\Delta\kappa \quad (2)$$

$u_0$ 是变形后中面径向位移,mm; $y$ 是任意点到中面的距离,mm,其中 $y = r - R$ , $r$ 是沿壁厚方向任意点处的半径,mm; $\Delta\kappa$ 为曲率变化量, $\text{mm}^{-1}$ ,计算公式见式(3)。

$$\Delta\kappa = \kappa' - \kappa_0 = \frac{1}{R+u_0} - \frac{1}{R} = -\frac{u_0}{R(R+u_0)} \quad (3)$$

$\kappa'$ 和 $\kappa_0$ 分别是变形后和初始的曲率, $\text{mm}^{-1}$ 。

周向应力简化如式(4)所示。

$$\sigma_\theta(r) = \frac{E}{1-\nu^2} (1-\nu^2) \varepsilon_\theta(r) = E\varepsilon_\theta(r) \quad (4)$$

式中 $E$ 为弹性模量,MPa; $\nu$ 是泊松比。

材料去除后,原外圆区域对剩余区域的约束消失,等效于在剩余区域的新外边施加反向周向残余应力,驱动环件变形。材料去除区域为 $r \in [R_1, R_0]$ ,去除后,在剩余部分的外边界 $r = R_1$ 上,等效释放载荷如式(5)所示。

$$\Delta\sigma_{\theta}(r) = -\sigma_{\theta}(r) \quad (5)$$

$\sigma_{\theta}(r)$  是半径在  $r$  处的应力值, MPa。  
等效薄膜力如式(6)所示, 单位 N。

$$N_{\theta}^{\text{rel}} = \int_{R_1}^{R_0} \Delta\sigma_{\theta}(r) dr \quad (6)$$

等效弯曲力矩如式(7)所示, 单位 N·mm。

$$M_{\theta}^{\text{rel}} = \int_{R_1}^{R_0} \Delta\sigma_{\theta}(r) y dr \quad (7)$$

对于薄壁环, 材料去除后的变形由等效薄膜力和等效弯曲力矩驱动, 对于小变形, 忽略几何非线性项, 由经典壳体理论<sup>[19]</sup>进行如下计算。

薄膜刚度如式(8)所示, 单位 N/mm<sup>2</sup>。

$$K_m = \frac{Eh'}{R(1-\nu^2)} \quad (8)$$

$h' = h - (R_0 - R_1)$ ,  $h'$  为机加工后的壁厚, mm。

弯曲刚度如式(9)所示, 单位 N/mm<sup>2</sup>。

$$K_b = \frac{Eh'^3}{12R^3(1-\nu^2)} \quad (9)$$

等效径向载荷如式(10)所示, 单位 N。

$$F_{\text{eq}} = N_{\theta}^{\text{rel}} - \frac{M_{\theta}^{\text{rel}}}{R} \quad (10)$$

平衡方程如式(11)所示。

$$(K_m + K_b)u_0 = F_{\text{eq}} \quad (11)$$

根据力平衡原理, 变形产生的内力与外部等效载荷平衡, 解得薄壁环件径向变形, 如式(12)所示。

$$u_0 = \frac{R}{Eh'} \left[ \int_{R_1}^{R_0} \sigma_{\theta}(r) dr - \frac{1}{R} \int_{R_1}^{R_0} \sigma_{\theta}(r)(r-R) dr \right] \cdot \frac{1-\nu^2}{1 + \frac{h'^2}{12R^2}} \quad (12)$$

$u_0$  是环件沿径向的变形, mm。

由于环件不同区域拟合得到的周向残余应力函数存在分布差异, 其径向变形也表现出不均匀性。为此, 在环件周向均匀选取四组直径对应的特征位置, 分别拟合各位置的周向残余应力函数; 再通过式(12)计算每个位置对应的径向变形量, 最终取这些变形量的最大值与最小值的差值, 即可得到该环件的椭圆度。

## 5 环件机加工变形仿真与工程应用

### 5.1 矩形环件机加工变形仿真

完成残余应力分布仿真后, 进一步开展机加工过程的数值模拟。仿真采用逐层去除材料的方法, 计算由残余应力释放所引发的工件变形。机加工模拟结束后, 沿周向每隔 45° 选取一个测量点, 共采集四组直径数据, 以直径最大值与最小值的差值表征工件的椭圆度。基于表 2 所列的胀形工艺方案, 将仿真计算结果与所建理论模型的求解结果进行对比, 如图 8 所示。两者变化趋势具有良好的一致性, 这不仅验证了胀形参数对机加工变形量的调控作用, 同时也证明所构建的加工变形理论模型的有效性。

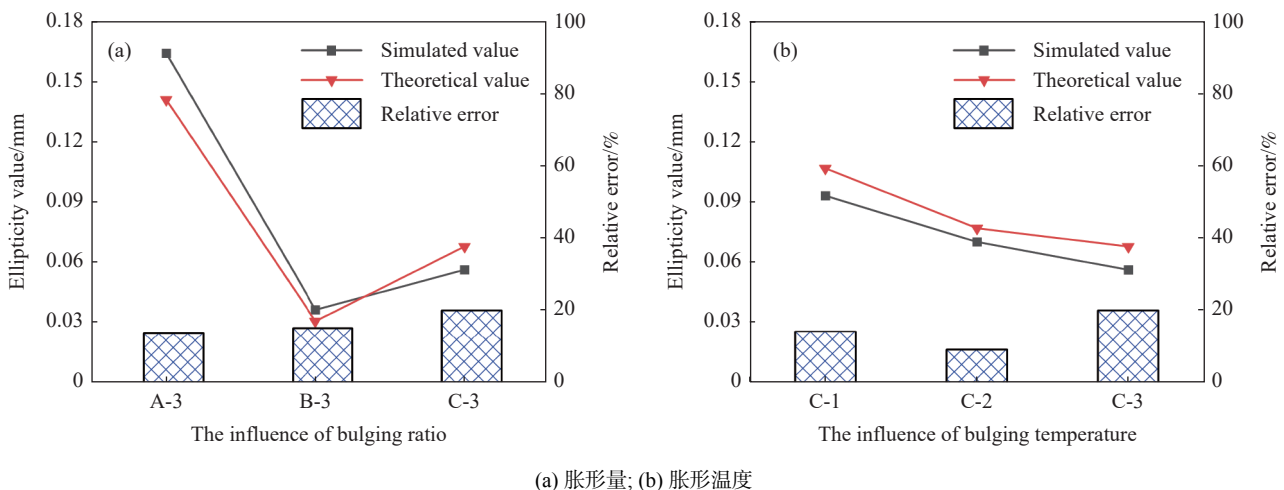


图 8 胀形工艺参数对仿真和理论计算的椭圆度影响  
Fig. 8 Simulation and theoretical calculation of machining deformation

### 5.2 异形环件仿真模拟工程应用

实际应用的环件多为带凸台、变壁厚的异形结构, 其尺寸如图 9 所示。为了验证前文基于矩形环

建立的应力调控机制及机加工变形理论模型在异形环中的适用性与准确性, 验证时保证与矩形环全流程工艺路线一致, 并采用最优胀形参数, 异形环件经

过胀形后仿真与试验结果如图 10 所示,使用三坐标测量机测椭圆度、XRD 法测量周向应力。结果表明:异形环试验测得椭圆度为 0.06 mm,仿真计算值为 0.052 mm,理论模型计算值为 0.067 mm;各关键部位的残余应力仿真值与试验测量结果高度吻合,如图 11 所示,并且其应力水平与机加工变形量均处于较低范围,与矩形环的控制效果保持一致。上述结果证实,前文建立的理论模型与优化工艺可有效适配异形环的复杂几何特征,具备可靠的工程通用性。

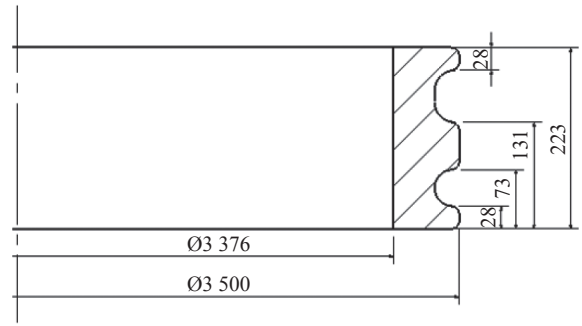
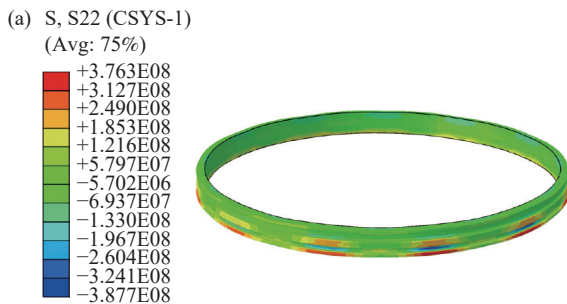


图 9 异形环件尺寸(单位:mm)

Fig. 9 Dimensions of the special-shaped ring component



(a) 仿真; (b) 试验

图 10 异形环件胀形后模拟和试验结果

Fig. 10 Simulation and experimental results of special-shaped ring components

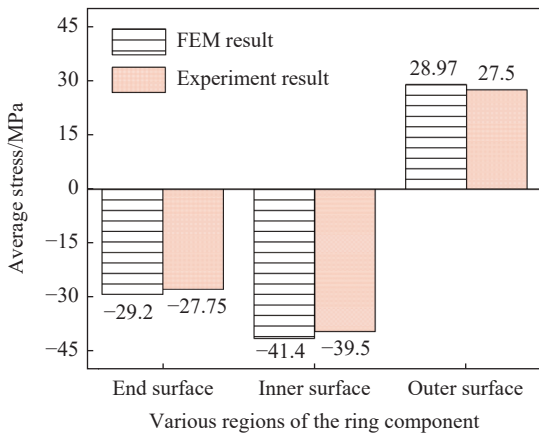


图 11 胀形后环件不同部位残余应力结果

Fig. 11 Post-bulging residual stress results at different positions of ring components

### 6 结论

1) 通过全流程仿真揭示了 TC4 钛合金薄壁环件残余应力的演变规律:冷却阶段是残余应力产生的主要环节,而胀形及热处理过程能够显著降低应力幅值并改善其均匀性。

2) 胀形工艺可有效调控残余应力分布。随着胀形量由 2% 增至 6%,残余应力峰值由 236.5 MPa 降至 131.7 MPa,降幅约 44.3%;当胀形量约为 4% 时,应力均值与标准差同时达到最小。胀形温度升高可降低残余应力水平,其中 800 °C 为较优胀形温度。

3) 建立了薄壁环件机加工变形理论模型,其计算结果与有限元仿真结果具有良好一致性。将优化工艺与模型应用于异形环件,机加工椭圆度试验值为 0.06 mm,与仿真及理论计算结果的误差≤13.3%。

### 参考文献

[ 1 ] WEI S, YIN Z W, GAO P, *et al.* Direct-reverse SPF process for TC4 semi-annular part[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(S1): 139-144.  
(微石, 阴中炜, 高鹏, 等. TC4 半环超塑正反胀形工艺研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(S1): 139-144.)

[ 2 ] WEI Z J, LI J S, LÜ N, *et al.* Effect of bulging process on residual stress and its distribution of TC4 alloy ring forgings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(8): 2537-2543.  
(魏志坚, 李金山, 吕楠, 等. 胀形对 TC4 合金冷轧环锻件残余应力及分布的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(8):

2537-2543.)

- [ 3 ] CAO Q S. Research on residual stress elimination method of aluminum alloy ring based on electromagnetic forming technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.  
(曹青山. 基于电磁胀形技术的铝合金环件残余应力消除方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.)
- [ 4 ] YANG Y H, XIONG S C, DENG Y F, *et al.* Reducing quenching residual stress of 2219 aluminum alloy ring by cold bulging process[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(10): 3355-3362.  
(杨艳慧, 熊思灿, 邓云飞, 等. 采用冷胀形工艺降低 2219 铝合金环的淬火残余应力[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(10): 3355-3362.)
- [ 5 ] HE L Y. Research on forging forming and quenching residual stress reduction process of large 7085 aluminum alloy cylindrical part[D]. Chongqing: Chongqing University, 2023.  
(何珞玉. 大型 7085 铝合金筒形件锻造成形及淬火残余应力消减工艺研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023.)
- [ 6 ] LÜ N, LIU D, HU Y, *et al.* Research on the evolution of residual stresses in the manufacturing process of TC4 alloy profile rolled ring[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 137: 106269.
- [ 7 ] LÜ N, LIU D, WANG J G, *et al.* Residual stresses evolution and process route optimization of TC4 profiled rolled rings incorporating thermal bulging[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2023, 23(3): 200.
- [ 8 ] ZHANG Z, ZHANG D, WU B, *et al.* Milling distortion prediction for thin-walled component based on the average MIRS in specimen machining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(1): 1-18.
- [ 9 ] FUH K H, WU C F. A residual-stress model for the milling of aluminum-alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, 51(1): 87-105.
- [ 10 ] LIAO K, ZHANG X D, CHE X F, *et al.* Construction and analysis of mechanical model for machining deformation of aluminum alloy thin-walled components[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(5): 166-172.  
(廖凯, 张箫笛, 车兴飞, 等. 铝合金薄壁件加工变形的力学模型构建与分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(5): 166-172.)
- [ 11 ] BAI Q, ZHANG J H, LI M Z, *et al.* A novel method to control stress distribution and machining-induced deformation for thin-walled metallic parts[J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2022, 41(1): 702-712.
- [ 12 ] XUE N P, WU Q, YANG R S, *et al.* Research on machining deformation of aluminum alloy rolled ring induced by residual stress[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(11): 5669-5680.
- [ 13 ] SONG J L, DOWSON A L, JACOBS M H, *et al.* Coupled thermo-mechanical finite-element modelling of hot ring rolling process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 121(2-3): 332-340.
- [ 14 ] JONES A B, MILLER C D, CHEN E F, *et al.* High-velocity fragmentation of titanium alloy rings and cylinders produced using field-assisted sintering technology[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2026, 150: 104892-104905.
- [ 15 ] SONG H C, GAO H J, ZHANG Q D, *et al.* Long-term stress relaxation behaviors and mechanisms of 2219 Al-Cu alloy under various temperatures and initial stresses[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 180: 174-192.
- [ 16 ] GUO W F, YI Y P, HUANG S Q, *et al.* Effects of deformation temperature on the evolution of second-phase and mechanical properties of large 2219 Al-Cu alloy rings[J]. *Materials Characterization*, 2020, 160: 110094.
- [ 17 ] WU Q, WU J, ZHANG Y D, *et al.* Analysis and homogenization of residual stress in aerospace ring rolling process of 2219 aluminum alloy using thermal stress relief method[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 157-158: 111-118.
- [ 18 ] HE H L, YI Y P, HUANG S Q, *et al.* Effects of deformation temperature on second-phase particles and mechanical properties of 2219 Al-Cu alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 712: 414-423.
- [ 19 ] WU L Y. *Theory of Plates and Shells*[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1989: 199-206.  
(吴连元. 板壳理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989: 199-206.)