

X形管内高压成形过程的加载路径优化

冯莹莹¹, 刘照松¹, 张宏阁², 骆宗安¹

(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 一汽轿车股份有限公司, 吉林 长春 130012)

摘要: 加载路径对X形管内高压成形质量至关重要, 只有加载路径的各参数匹配得当, 才能获得合格的成形件。利用DYNAFORM软件模拟不同加载路径下X形管的成形性能。并基于Box-Behnken Design试验设计和响应面法, 以内压力、轴向进给量、背向位移量以及摩擦系数为试验因素, 分别建立以最小壁厚、支管高度和极限圆角半径为目标的响应面模型。通过方差分析和回归方程分析, 对X形管内高压成形过程的加载路径进行设计和优化, 有效地改善了壁厚分布、减小了极限圆角半径、提高了支管高度。采用软件的数值优化功能筛选出最优的加载路径, 并在此加载路径下对X形管内高压成形模拟结果和试验结果进行对比, 发现误差在5%以内, 并且壁厚分布具有一致性, 说明了该加载路径优化方法具有较高的准确性和较好的可行性。

关键词: 加载路径; X形管; 内高压成形; 最小壁厚; 支管高度; 极限圆角半径

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.019

中图分类号: TG394 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 05-0121-07

Optimization on loading path in hydroforming process for X-type tube

Feng Yingying¹, Liu Zhaosong¹, Zhang Hongge², Luo Zong'an¹

(1. The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. FAW CAR Co., Ltd., Changchun 130012, China)

Abstract: The loading path is very important to the hydroforming quality of X-type tube. Only when the various parameters of the loading path are properly matched, the qualified formed parts can be obtained. Therefore, the formability of X-type tube under different loading paths was simulated by software DYNAFORM. Then, based on the test design of Box-Behnken Design and response surface method, taking the internal pressure, axial feeding amount, back displacement and friction coefficient as the main test factors and the minimum wall thickness, branch pipe height and ultimate fillet radius as the objectives, the response surface model was established, and the loading path of X-type tube hydroforming process was designed and optimized by the analysis of variance and regression equation, which improved the wall thickness distribution, reduced the ultimate fillet radius and increased the branch pipe height. Furthermore, the optimal loading path was selected by the numerical optimization function of software, and under this loading path, the simulation results of X-type tube hydroforming were compared with the test results. The result shows that the error is less than 5%, and the wall thickness distribution is consistent, which indicates that the loading path optimization method has high accuracy and good feasibility.

Key words: loading path; X-type tube; hydroforming; minimum wall thickness; branch pipe height; ultimate fillet radius

X形管可用于改变液体、气体等介质的流动方向, 被广泛应用于航空、交通等领域^[1-3]。管材内高压成形作为一种近净成形的现代塑性加工技术, 正逐步成为X形管的主要生产方式, 但X形管内高压成形过程的复杂性严重阻碍了该项技术的发展^[4-6]。

随着科技进步以及有限元软件的不断改进, 采用数值模拟技术研究X形管内高压成形过程受到了越来越多的重视^[7-9]。X形管内高压成形过程主要受加载路径(轴向进给量、内压力、背向位移量)、摩擦条件、模具结构和材料性能等因素的影响, 其中, 影响加载路径的各主要因素之间的相互作用对成形性能的影响尤为重要^[10-13]。因此, 研究X形管内高压成形加载路径的控制方法, 探索X形管内高压成形加载路径的优化规律具有十分重要的研究意义。

本文利用DYNAFORM软件模拟不同加载路径

收稿日期: 2021-04-13; 修订日期: 2021-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52105322)

作者简介: 冯莹莹(1982-), 女, 博士, 副研究员

E-mail: fengy@ral.neu.edu.cn

组合条件下 X 形管的成形性能, 为管坯成形性能参数提供模拟值, 并采用响应面法对不同加载路径组合条件下得到的参数模拟值进行优化分析, 根据优化评估标准, 对轴向进给量、内压力、背向位移量等主要因素进行协调优化, 确定最优加载路径。最后, 按照最优加载路径进行有限元数值模拟和内高压成形试验。

1 有限元模型的建立

本文利用 UG 软件构建几何模型, 并以 IGES 格式导入 DYNIFORM 软件。有限元模型包括 6 个部分: 管坯、模具、左冲头、右冲头、上背向冲头和下背向冲头。其中, 管坯的尺寸为: 长度为 200 mm、外径为 $\Phi 42$ mm、壁厚为 1.4 mm。管坯定义为变形体, 模具及冲头定义为刚体。材料选用 304 奥氏体不锈钢, 模拟时间设定为 0.01 s。图 1 为 X 形管的有限元分析模型。表 1 为材料的性能参数。采用四边形网格划分单元体, 表 2 为模型的单元类型。

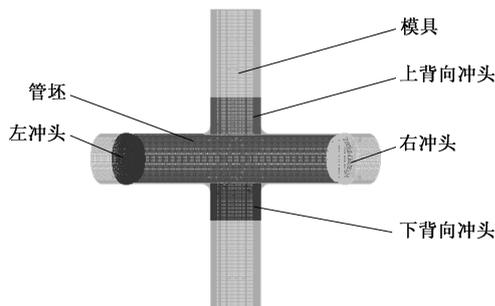


图 1 X 形管有限元模型

Fig. 1 Finite element model of X-type tube

表 1 材料性能参数

Table 1 Performance parameters of material

| 材料 | 屈服强度/ MPa | 抗拉强度/ MPa | 伸长率/ % | 材料厚向 系数 |
|-------|--------------|--------------|-----------|------------|
| SS304 | 356.60 | 638.74 | 51.00 | 1.02 |

表 2 模型的单元类型

Table 2 Component types of model

| 组件名称 | 网格类型 | 单元类型与数量 |
|-------|--------|------------|
| 管坯 | 可变形壳体 | 四边形, 11438 |
| 左、右冲头 | 刚体-壳单元 | 四边形, 1152 |
| 上背向冲头 | 刚体-壳单元 | 四边形, 2400 |
| 下背向冲头 | 刚体-壳单元 | 四边形, 2400 |
| 模具 | 刚体-壳单元 | 四边形, 21075 |

2 响应面分析法

2.1 加载路径的设计

管材内高压成形一般分为填充、胀形、整形 3 个阶段, 根据 3 个阶段的工艺特点, 将加载路径按照 3 个阶段设置, 如图 2 所示。节点 1 和节点 3 的数值由经验公式和试错法获得^[8], 节点 2 与节点 3 的差值设置为固定值, 节点 3 的数值随响应面法的设定而变。加载路径中的轴向进给量、内压力、背向位移量的各阶段加载数值在不同的响应面法试验设计方案中选取不同的值。

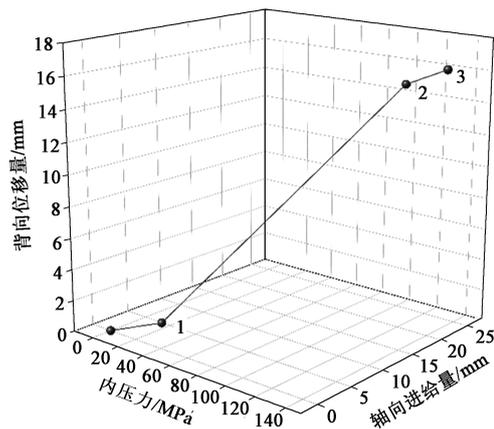


图 2 加载路径的设定

Fig. 2 Setting of loading path

2.2 响应面法的设计与分析

结合实践经验与试错法确定各影响因素范围, 通过 Box-Behnken Design 试验设计方法进行试验因素与水平设计, 确定试验因素为内压力 A 、轴向进给量 B 、背向位移量 C 、摩擦因数 D , 并根据确定的试验因素水平以最小壁厚 Y_1 、支管高度 Y_2 和极限圆角半径 Y_3 作为响应值。借助 Design-Expert 软件进行试验优化设计, 最后, 按照响应面法给出的方案进行有限元数值模拟, 共进行 29 次模拟试验。表 3 为试验因素水平表, 表 4 为响应面法试验设计及模拟结果。摩擦因数由大量的模拟和试验数据对比后获得^[14]。

表 5、表 6 和表 7 分别为以最小壁厚、支管高度和极限圆角半径作为响应值得到的二次方差模型。3 个响应值的回归方程模型 P 值均小于 0.001 (P 值 < 0.001 为极显著; P 值 < 0.010 为高度显著; P 值 < 0.050 为显著), 说明其回归模型是极显著的。对表 5、表 6 和表 7 的试验设计结果进行多元回归统

表 3 试验因素水平表

Table 3 Factors and levels of test

| 水平 | 因素 | | | |
|----|-------|------|------|-------|
| | A/MPa | B/mm | C/mm | D |
| -1 | 110 | 20 | 12 | 0.050 |
| 0 | 130 | 25 | 16 | 0.125 |
| +1 | 150 | 30 | 20 | 0.200 |

表 4 试验设计及模拟结果

Table 4 Test design and simulation results

| 序 号 | 因素 | | | | 响应值 | | |
|--------|-------|------|------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | A/MPa | B/mm | C/mm | D | Y ₁ /mm | Y ₂ /mm | Y ₃ /mm |
| 1 | 130 | 20 | 16 | 0.200 | 0.612 | 15.994 | 10.274 |
| 2 | 130 | 25 | 20 | 0.050 | 1.097 | 20.854 | 8.832 |
| 3 | 110 | 20 | 16 | 0.125 | 1.040 | 15.861 | 12.361 |
| 4 | 130 | 30 | 16 | 0.200 | 0.944 | 16.189 | 10.297 |
| 5 | 150 | 25 | 16 | 0.200 | 0.606 | 16.238 | 8.686 |
| 6 | 130 | 30 | 20 | 0.125 | 1.082 | 20.606 | 9.294 |
| 7 | 130 | 25 | 16 | 0.125 | 1.090 | 16.725 | 8.165 |
| 8 | 150 | 25 | 20 | 0.125 | 0.751 | 20.468 | 8.820 |
| 9 | 130 | 25 | 16 | 0.125 | 1.090 | 16.725 | 8.165 |
| 10 | 130 | 25 | 16 | 0.125 | 1.090 | 16.725 | 8.165 |
| 11 | 130 | 20 | 16 | 0.050 | 0.936 | 16.952 | 7.648 |
| 12 | 130 | 30 | 12 | 0.125 | 1.176 | 13.718 | 3.620 |
| 13 | 150 | 20 | 16 | 0.125 | 0.778 | 16.589 | 8.498 |
| 14 | 130 | 25 | 16 | 0.125 | 1.090 | 16.725 | 8.165 |
| 15 | 110 | 25 | 16 | 0.200 | 1.107 | 15.725 | 12.882 |
| 16 | 130 | 25 | 16 | 0.125 | 1.090 | 16.725 | 8.165 |
| 17 | 130 | 25 | 12 | 0.050 | 1.197 | 13.950 | 3.205 |
| 18 | 150 | 25 | 12 | 0.125 | 1.107 | 13.590 | 3.907 |
| 19 | 110 | 25 | 20 | 0.125 | 1.035 | 19.674 | 13.036 |
| 20 | 130 | 30 | 16 | 0.050 | 1.188 | 17.884 | 3.553 |
| 21 | 130 | 25 | 12 | 0.200 | 0.964 | 12.256 | 9.883 |
| 22 | 150 | 30 | 16 | 0.125 | 1.104 | 17.412 | 5.090 |
| 23 | 110 | 25 | 16 | 0.050 | 1.167 | 17.068 | 5.648 |
| 24 | 150 | 25 | 16 | 0.050 | 1.131 | 17.855 | 4.751 |
| 25 | 130 | 25 | 20 | 0.200 | 0.552 | 20.025 | 9.953 |
| 26 | 110 | 30 | 16 | 0.125 | 1.159 | 16.881 | 5.884 |
| 27 | 110 | 25 | 12 | 0.125 | 1.168 | 13.033 | 4.392 |
| 28 | 130 | 20 | 12 | 0.125 | 1.087 | 12.814 | 6.674 |
| 29 | 130 | 20 | 20 | 0.125 | 0.648 | 19.979 | 10.313 |

表 5 关于最小壁厚的二次方差模型

Table 5 Quadratic variance model for minimum wall thickness

| 方差来源 | 平均平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | P 值 |
|----------------|--------|-----|---------|--------|---------|
| 模型 | 1.0300 | 14 | 0.07300 | 43.02 | <0.0001 |
| A | 0.1200 | 1 | 0.12000 | 70.25 | <0.0001 |
| B | 0.2100 | 1 | 0.21000 | 125.41 | <0.0001 |
| C | 0.2000 | 1 | 0.20000 | 114.99 | <0.0001 |
| D | 0.2900 | 1 | 0.29000 | 172.90 | <0.0001 |
| AB | 0.0110 | 1 | 0.01100 | 6.28 | 0.0252 |
| AC | 0.0120 | 1 | 0.01200 | 7.29 | 0.0173 |
| AD | 0.0540 | 1 | 0.05400 | 31.70 | <0.0001 |
| BC | 0.0300 | 1 | 0.03000 | 17.45 | 0.0009 |
| BD | 0.0042 | 1 | 0.00423 | 2.48 | 0.1378 |
| CD | 0.0240 | 1 | 0.02400 | 14.27 | 0.0020 |
| A ² | 0.0011 | 1 | 0.00106 | 0.62 | 0.4433 |
| B ² | 0.0210 | 1 | 0.02100 | 12.11 | 0.0037 |
| C ² | 0.0160 | 1 | 0.01600 | 9.10 | 0.0092 |
| D ² | 0.0500 | 1 | 0.05000 | 29.48 | <0.0001 |
| 残差 | 0.0240 | 14 | 0.00171 | | |
| 失拟项 | 0.0240 | 10 | 0.00238 | | |
| 纯误差 | 0.0000 | 4 | 0.00000 | | |
| 总值 | 1.0500 | 28 | | | |

表 6 关于支管高度的二次方差模型

Table 6 Quadratic variance model for branch pipe height

| 方差来源 | 平均平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | P 值 |
|------|--------|-----|---------|---------|---------|
| 模型 | 157.57 | 6 | 26.250 | 1640.05 | <0.0001 |
| A | 1.29 | 1 | 1.270 | 79.60 | <0.0001 |
| B | 1.69 | 1 | 1.690 | 105.48 | <0.0001 |
| C | 148.72 | 1 | 148.720 | 9290.48 | <0.0001 |
| D | 5.49 | 1 | 5.520 | 344.60 | <0.0001 |
| BD | 0.14 | 1 | 0.140 | 8.48 | 0.0093 |
| CD | 0.19 | 1 | 0.190 | 11.69 | 0.0030 |
| 残差 | 0.29 | 22 | 0.016 | | |
| 失拟项 | 0.29 | 18 | 0.020 | | |
| 纯误差 | 0.00 | 4 | 0.000 | | |
| 总值 | 157.85 | 28 | | | |

计分析,通过对响应值的回归方程进行显著性检验,结果表明方程对试验的拟合效果较好。得到的4个试

验因素对最小壁厚、支管高度和极限圆角半径的回归方程为:

表 7 关于极限圆角半径的二次方差模型

Table 7 Quadratic variance model for ultimate fillet radius

| 方差来源 | 平均平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | P 值 |
|------|--------|-----|-------|-------|---------|
| 模型 | 202.40 | 10 | 20.24 | 21.74 | <0.0001 |
| A | 17.89 | 1 | 17.89 | 19.21 | 0.0004 |
| B | 27.21 | 1 | 27.21 | 29.23 | <0.0001 |
| C | 68.01 | 1 | 68.01 | 73.04 | <0.0001 |
| D | 68.06 | 1 | 68.06 | 73.10 | <0.0001 |
| AB | 2.42 | 1 | 2.42 | 2.60 | 0.1246 |
| AC | 3.48 | 1 | 3.48 | 3.74 | 0.0691 |
| AD | 2.34 | 1 | 2.34 | 2.51 | 0.1305 |
| BC | 1.04 | 1 | 1.04 | 1.11 | 0.3056 |
| BD | 4.24 | 1 | 4.24 | 4.55 | 0.0469 |
| CD | 7.72 | 1 | 7.72 | 8.29 | 0.0100 |
| 残差 | 16.76 | 18 | 0.93 | | |
| 失拟项 | 16.76 | 14 | 1.20 | | |
| 纯误差 | 0.00 | 4 | 0.00 | | |
| 总值 | 219.16 | 28 | | | |

$$Y_1 = 1.09 - 0.10A + 0.13B - 0.13C - 0.16D + 0.052AB - 0.056AC - 0.12AD + 0.086BC + 0.033BD - 0.078CD - 0.013A^2 - 0.056B^2 - 0.049C^2 - 0.088D^2$$

$$Y_2 = 16.73 + 0.33A + 0.38B + 3.52C - 0.68D - 0.18BD + 0.22CD$$

$$Y_3 = -7.87 - 1.20A - 1.50B + 2.38C + 2.36D + 0.77AB - 0.93AC - 0.82AD + 0.51BC + 1.03BD - 1.39CD \quad (1)$$

图 3、图 4 和图 5 分别为最小壁厚、支管高度和极限圆角半径的实际值与预测值的散点图。可以看出，残差倾向于接近对角线，每个响应的预测残差很小，说明预测结果与实际结果一致。

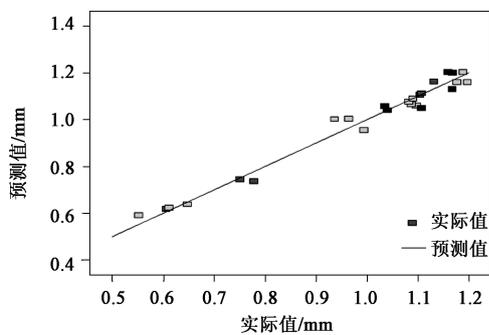


图 3 最小壁厚散点图

Fig. 3 Scatter diagram of minimum wall thickness

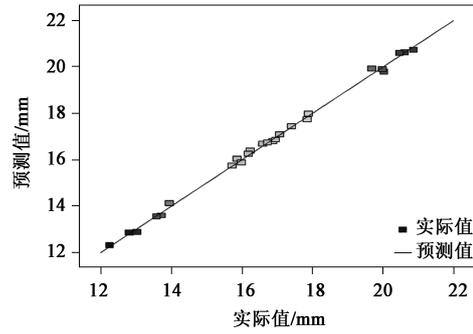


图 4 支管高度散点图

Fig. 4 Scatter diagram of branch pipe height

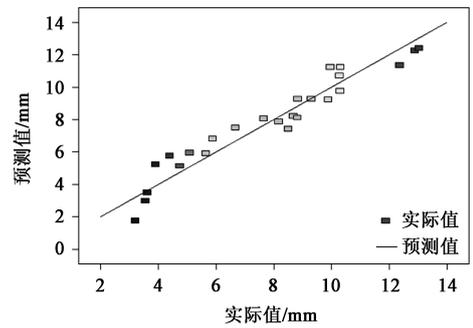


图 5 极限圆角半径散点图

Fig. 5 Scatter diagram of ultimate fillet radius

验证完最小壁厚、支管高度和极限圆角半径的响应面拟合模型后，需要对该模型进行优化。根据得到的各试验因素对不同试验指标的相互作用来综合分析不同因素对响应值的影响，选择出最优的加载路径和摩擦因数。可以采用软件优化功能，或者利用二次方程模型分别对参数求导得到最佳试验条件。响应值应根据实际情况考虑选择最大值或最小值，以此来寻求响应值的最佳条件。本试验采用该软件的数值优化功能，在试验因素取值范围内选择出最优值，结果如表 8 所示。

表 8 优化前后的结果比较

Table 8 Comparison of results before and after optimization

| 参数 | 因素 | | | | 响应值 | | |
|-----|-------|------|------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | A/MPa | B/mm | C/mm | D | Y ₁ /mm | Y ₂ /mm | Y ₃ /mm |
| 优化后 | 150 | 30 | 19 | 0.050 | 1.158 | 19.027 | 3.745 |
| 优化前 | 130 | 25 | 16 | 0.125 | 1.090 | 16.725 | 8.165 |

3 模拟结果与分析

按表 8 中优化后的加载路径进行内高压成形数值模拟，得到 X 形管的成形极限图（图 6）。可以看出，优化后的加载路径使管坯成形更多地处于安全

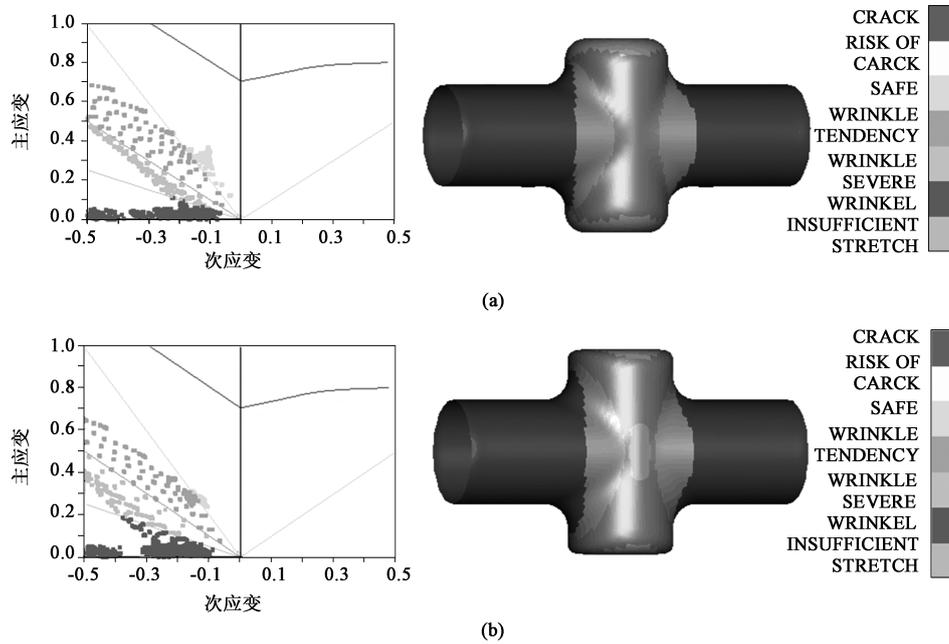


图 6 加载路径优化前后的 X 形管成形极限图
(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 6 Forming limit diagrams of X-type tube before and after loading path optimization
(a) Before optimization (b) After optimization

区域，成形趋势更加理想，成形过程中未有起皱、屈曲和胀破等缺陷的产生。图 7 为加载路径优化前后的 X 形管壁厚分布图，优化后的加载路径使管坯的壁厚分布更加均匀，最大减薄率从 22% 降低为 17%。图 8 为加载路径优化前后的 X 形管主应变分布图，加载路径优化后的主应变分布状态得到了明

显改善，最大主应变从 0.968 提高至 1.323，管坯整体的应变分布更加均匀。图 9 为加载路径优化前后内高压成形后 X 形管支管圆角的剖面图，优化后的极限圆角半径从 8.165 mm 减小至 3.745 mm，支管高度得到了较好调整，从 16.725 mm 提高至 19.027 mm。

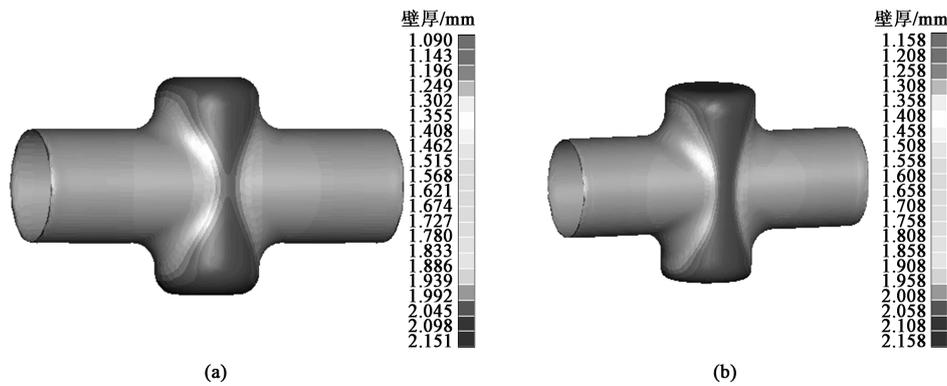


图 7 加载路径优化前后的 X 形管壁厚分布图
(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 7 Distribution diagrams of wall thickness for X-type tube before and after loading path optimization
(a) Before optimization (b) After optimization

4 试验验证

采用优化后的加载路径，在内高压成形机上进

行 X 形管的内高压成形试验。试验材料为 304 不锈钢管材，管坯尺寸为：直径为 $\Phi 42$ mm、壁厚为 1.4 mm、管长为 200 mm。如图 10 所示，试验结果与优化后的模拟结果一致，X 形管变形协调、未

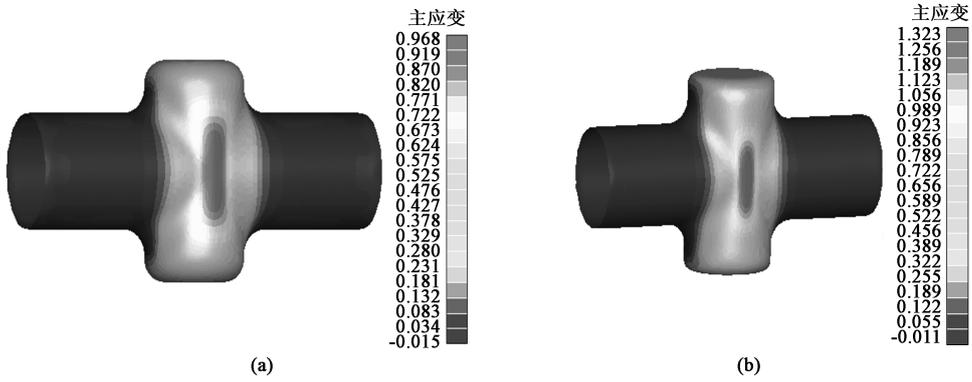


图 8 加载路径优化前后的 X 形管主应变图

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 8 Diagrams of principal strain for X-type tube before and after loading path optimization

(a) Before optimization (b) After optimization

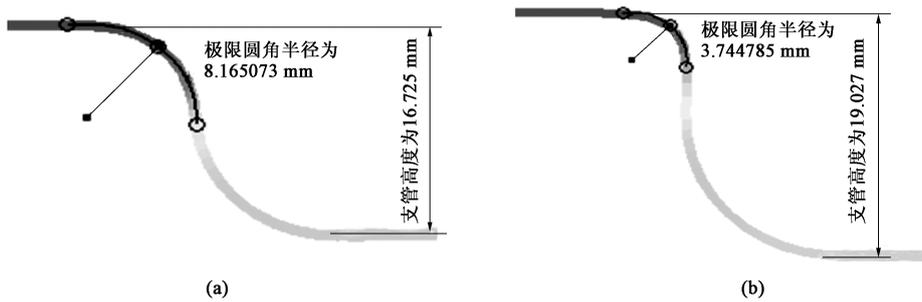


图 9 加载路径优化前后的 X 形管支管圆角剖面

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 9 Profiles of branch pipe fillet for X-type tube before and after loading path optimization

(a) Before optimization (b) After optimization

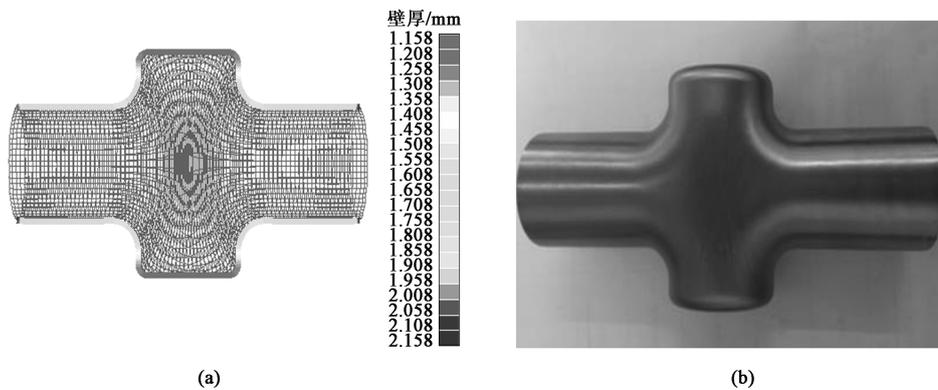


图 10 有限元数值模拟截面壁厚分布 (a) 和试验试样 (b)

Fig. 10 Wall thickness distribution of section by finite element simulation (a) and experimental sample (b)

发生褶皱和破裂等缺陷，且截面壁厚分布均匀。如图 11 所示，在 X 形管相同位置取 10 个点用于比较模拟结果与试验结果之间的壁厚值差异，表 9 为所取位置壁厚的模拟值与试验值。结果表明，试验结果与模拟结果具有一致的壁厚分布规律，

两者误差小于 5%，模拟 X 形管的支管高度为 19.027 mm，试验 X 形管支管高度为 18.680 mm，说明采用响应面法进行 X 形管加载路径的优化可以有效地减少模拟与试验的工作量，具有较好的准确性和较高的可行性。

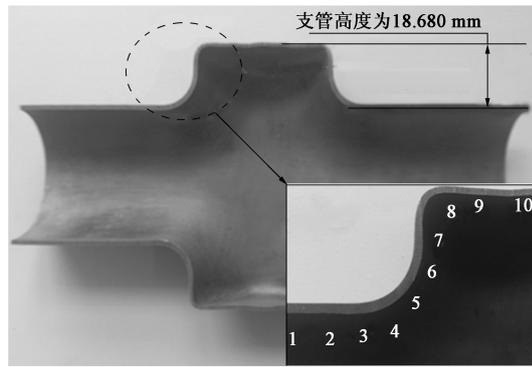


图 11 X形管截面剖切图

Fig. 11 Sectional view of X-type tube

5 结论

(1) 通过响应面法分析了轴向进给量、内压力、背向位移量以及摩擦因数对 X 形管内高压成形的影响, 以此筛选出最优加载路径, 有效地改善了壁厚分布、减小了极限圆角半径、提高了支管高度。

(2) 采用优化后的加载路径进行 X 形管内高压成形试验, 模拟结果和试验结果误差在 5% 以内, 并且壁厚分布具有一致性, 说明该加载路径优化方法具有较高的准确性和较好的可行性。

表 9 模拟和试验的壁厚值

Table 9 Thickness values of simulation and test

| 取点位置 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 壁厚模拟值/mm | 1.678 | 1.819 | 1.759 | 1.627 | 1.489 | 1.347 | 1.252 | 1.158 | 1.167 | 1.173 |
| 壁厚试验值/mm | 1.603 | 1.748 | 1.684 | 1.598 | 1.461 | 1.281 | 1.163 | 1.064 | 1.088 | 1.125 |

参考文献:

- [1] Chen M T, Xiao X T, Tong J H, et al. Optimization of loading path in hydroforming of parallel double branched tube through response surface methodology [J]. *Advances in Engineering Software*, 2018, 115: 429-438.
- [2] Zhang Z C, Kang Y J, Furushima T, et al. Deformation behaviour of metal micro tube during hydroforming process [J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 50: 328-331.
- [3] Bell C, Corney J, Zuelli N, et al. A state of the art review of hydroforming technology: Its applications, research areas, history, and future in manufacturing [J]. *International Journal of Material Forming*, 2020, 13 (5): 789-828.
- [4] Chen M T, Xiao X T, Guo H, et al. Deformation behavior, microstructure and mechanical properties of pure copper subjected to tube hydroforming [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 731: 331-343.
- [5] 陈名涛, 肖小亭, 周富强. 单侧并列双支管内高压成形应力与应变分析及金属流动研究 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (4): 106-110.
Chen M T, Xiao X T, Zhou F Q. Research on stress, strain and metal flow in hydroforming for unilateral parallel double branch tube [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (4): 106-110.
- [6] Alaswad A, Benyounis K Y, Olabi A G. Tube hydroforming process: A reference guide [J]. *Materials & Design*, 2012, 33: 328-339.
- [7] 徐勇, 夏亮亮, 李明, 等. 管材液力成形技术的研究进展 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (4): 29-35.
Xu Y, Xia L L, Li M, et al. Research progress on hydro-mechanical forming technology for tube [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (4): 29-35.
- [8] 苑世剑. 现代液压成形技术 [M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2016.
Yuan S J. *Modern Hydroforming Technology* [M]. 2nd Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [9] Ren N, Zhan M, Yang H, et al. Constraining effects of weld and heat-affected zone on deformation behaviors of welded tubes in numerical control bending process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212 (5): 1106-1115.
- [10] 苑世剑, 何祝斌, 刘钢, 等. 内高压成形理论与技术的新进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21 (10): 2523-2533.
Yuan S J, He Z B, Liu G, et al. New developments in theory and processes of internal high pressure forming [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21 (10): 2523-2533.
- [11] Ma Y, Xu Y, Zhang S H, et al. The effect of tube bending, heat treatment and loading paths on process responses of hydroforming for automobile intercooler pipe: numerical and experimental investigations [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91 (5-8): 2369-2381.
- [12] Kadkhodayan M, Moghadam A E. Optimization of load paths in X- and Y-shaped hydroforming [J]. *International Journal of Material Forming*, 2013, 6 (1): 75-91.
- [13] Cai Y, Liu Q, Wang X S, et al. Thickness distribution and size deviation of 6063 alloy irregular tubular parts prepared by hydroforming [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25 (9): 2372-2380.
- [14] Fiorentino A, Ceretti E, Giardini C. Tube hydroforming compression test for friction estimation-numerical inverse method, application, and analysis [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64 (5-8): 695-705.