

基于正交试验的储罐封头成形数值模拟及工艺参数优化

舒致航^{1,2}, 黄本生^{1,2}, 李天宁^{1,2}, 刘俊琦^{1,2}, 郑建能³

(1. 西南石油大学 新能源与材料学院, 四川 成都 610500;

2. 西南石油大学 能源装备研究院, 四川 成都 610500;

3. 二重(德阳)重型装备有限公司, 四川 德阳 618099)

摘要: 为了探究储罐封头冲压成形的最优工艺参数组合, 提高效率、节约时间, 使用 Dynaform 有限元软件进行数值模拟。选取冲压速度、压边力和摩擦因数 3 个因素作为优化变量, 以封头最大减薄率、最大增厚率和最大回弹量为成形指标, 设计正交试验方案, 通过极差分析和方差分析, 确定最优工艺参数组合, 即冲压速度为 $4000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、压边力为 590 kN 和摩擦因数为 0.08。最后, 根据最优工艺参数组合进行实际生产试验, 将封头端口椭圆度作为验证标准。结果表明, 模拟结果与实际生产结果一致, 并且封头的最终成形质量符合要求。

关键词: 封头; 塑性成形; 减薄率; 增厚率; 回弹量

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.012

中图分类号: TG386.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 09-0075-08

Numerical simulation and process parameter optimization on tank head forming based on orthogonal test

Shu Zhihang^{1,2}, Huang Bensheng^{1,2}, Li Tianning^{1,2}, Liu Junqi^{1,2}, Zheng Jianneng³

(1. School of New Energy and Materials, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Energy Equipment Institute, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. Erzhong (Deyang) Heavy Equipment Co., Ltd., Deyang 618099, China)

Abstract: In order to explore the optimal combination of process parameters for the tank head stamping, improve efficiency and save time, the Dynaform finite element software was used for numerical simulation. Then, the three factors of punching speed, blank holder force and friction coefficient were selected as optimization variables, and the maximum thinning rate, the maximum thickening rate and the maximum springback amount of head were used as forming indicators. Furthermore, the orthogonal test scheme was designed, and the optimal combination of process parameters with the punching speed of $4000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, the blank holder force of 590 kN and the friction coefficient of 0.08 was determined by range analysis and variance analysis. Finally, the actual production test was carried out according to the optimal combination of process parameters, and the ovality of head port was used as the verification standard. The results show that the simulation results are consistent with the actual production results, and the final forming quality of head meets the requirements.

Key words: head; plastic forming; thinning rate; thickening rate; springback amount

常压储罐和压力容器在石油化工^[1]、动力锅炉^[2]、铁路运输^[3]和核电核岛^[4]等领域的应用越来越广泛, 对其质量安全的要求也随之提高。封头作为储罐和容器的主要零部件, 具有加工精度高、制造工艺难度大(特别是一次成形)、工艺

复杂及生产周期长等特点^[5], 而封头的成形一直以来都是储罐制造的难点和重点。史敏等^[6]针对薄壁铝合金封头提出了一种挡板辅助旋压成形工艺, 研究了进给率、旋轮圆角半径和旋轮安装角对成形质量的影响, 发现该工艺较一般旋压工艺能够有效减少工序道次, 提高壁厚均匀性。万晋^[7]对比了冷旋压和冷冲压成形的封头厚度均匀度, 并通过试验计算得到了有关厚度与封头顶部距离的关系式, 研究了封头强度与壁厚减薄之间的规律。王珂^[8]以奥氏体不锈钢标准椭圆形封头为研究对象, 结合数值仿真和试验验证, 发现多

收稿日期: 2021-08-18; 修订日期: 2021-11-20

基金项目: 四川省科技厅国际合作项目(2020YFH0151)

作者简介: 舒致航(1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: zhihangshu@163.com

通信作者: 黄本生(1969-), 男, 博士, 教授

E-mail: hbslxp@163.com

次成形和材料本构对封头塑性变形的影响不大,而模具拐角越大,塑性变形越小,直径越小的封头所受的影响越明显。

在有限元模拟和工艺优化方面,国内外许多学者进行了大量研究。Wu P 等^[9]使用 Dynaform 软件,借助正交试验、田口法和方差分析法,基于压边力、模具间隙、摩擦因数和凹模拐角半径因素,对汽车翼子板冲压工艺参数进行了优化。封头冲压成形过程中容易产生起皱、减薄超标、鼓包、回弹变形等质量问题,因此,本文针对某 Q345R 低合金钢石油储罐封头冲压成形过程中出现的质量问题,使用 Dynaform 有限元软件,进一步对冲压成形过程进行数值模拟,并通过设计正交试验,研究冲压速度、压边力和摩擦因数对最大减薄率、最大增厚率和最大回弹量的影响,寻找最优工艺参数组合,并通过数值模拟和实际生产验证了该方案的可行性,为相关类型的储罐封头成形工艺优化提供一定的理论依据。

1 成形工艺分析及有限元建模

1.1 成形工艺分析

某储罐封头为碟形封头,由 Q345R 低合金钢板制成,其化学成分如表 1 所示^[3]。因在 Q345 低合金钢的基础上降低了硫和磷的含量,提高了其综合力学性能和工艺性能,使得 Q345R 低合金钢被广泛用于石油、化工、气体分离和储运容器设备的制造中,为压力容器专用钢板^[10]。根据 GB/T 25198—2010^[11],规定该直径封头的最大厚度减薄率为 13%,即封头最薄区域的壁厚不能低于 5.2 mm,名义厚度为 5.5 mm,内径为 $\Phi 1000$ mm,直边段长度为 25 mm,其形状和尺寸如图 1 所示。此外,该封头表面不应有较大面积划痕、擦伤等明显损失封头表面的缺陷,且表面粗糙度为 $6.3 \mu\text{m}$,冲压成形后不进行热处理,去除端口毛刺飞边和氧化皮,未标注的长度公差尺寸的极限偏差应符合 GB/T 1804—2000^[12]的要求。

表 1 Q345R 低合金钢的化学成分(%,质量分数)

Table 1 Chemical compositions of Q345R low-alloy steel (%, mass fraction)

| C | S | Si | Mn | P | Ti | Fe |
|------|------|------|------|-------|-------|----|
| 0.19 | 0.01 | 0.32 | 1.46 | 0.017 | 0.028 | 余量 |

1.2 材料模型

根据 GB/T 228.1—2021^[13]设计比例试样,试

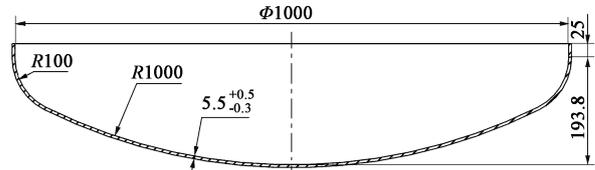


图 1 储罐封头尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tank head dimensions

样尺寸如图 2 所示,厚度为 5 mm。为获得 Q345R 低合金钢在不同方向上的力学性能,分别在轧制方向呈 0° 、 45° 和 90° 这 3 个方向取样各 3 根,依次使用 200、400、600 和 800 # 的金相砂纸对初始态试样表面进行打磨,浸入丙酮溶液中超声清洗 10 min 并干燥。在室温下,使用 MTS-809.25 电液伺服拉扭疲劳机进行准静态单向拉伸试验,拉伸速率为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,测定 Q345R 低合金钢基本机械性能参数的平均值。

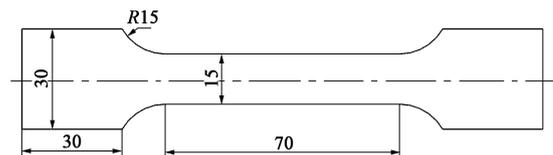


图 2 单向拉伸试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of uniaxial tensile specimen

将工程应力-工程应变曲线转化为真实应力-真实应变曲线,如图 3 所示,再使用 Krupskowsky 函数拟合 Q345R 低合金钢的均匀塑性变形阶段的真应力-真应变曲线,该数学表达式为:

$$S = K(e_0 + e)^n \quad (1)$$

式中: S 为真应力; K 为硬化系数; e_0 为均匀塑性变形的初始真应变; e 为真应变; n 为应变硬化指数。

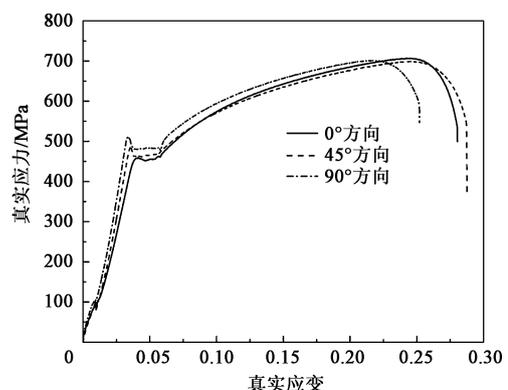


图 3 不同取样方向下 Q345R 低合金钢的真实应力-真实应变曲线

Fig. 3 True stress-true strain curves of Q345R low-alloy steel under different sampling directions

Q345R 低合金钢沿 3 个方向的力学性能参数如表 2 所示，从表 2 中可知该材料具有各向异性，而三参数 Barlat (1989) 屈服准则能更好地描述板料成形面内的各向异性^[14]，因此，选择三参数 Barlat 材料模型。Q345R 低合金钢的材料密度、杨氏模量和泊松比均设定为恒定值，分别为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、200 GPa 和 0.3。

表 2 Q345R 低合金钢板的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Q345R low-alloy steel plate

| 与轧制方向 夹角/(°) | 硬化系数 K/MPa | 应变硬化 指数 <i>n</i> | 塑性应变比 <i>r</i> | 断后伸长率/ % |
|-----------------|---------------|---------------------|-------------------|-------------|
| 0 | 919.14 | 0.158 | 1.787 | 28.89 |
| 45 | 893.36 | 0.151 | 1.144 | 32.72 |
| 90 | 897.89 | 0.137 | 1.493 | 25.63 |
| 平均值 | 903.46 | 0.149 | 1.475 | 29.08 |

1.3 有限元模型

封头板料的厚度为 6 mm，直径为 $\Phi 1178 \text{ mm}$ 。借助 UX 12.0 三维建模软件建立板料、压边圈、凸模和凹模的片体模型，以 IGES 的格式从 UX 12.0 导出，并导入到 Dynaform 有限元软件中。网格划分时选择自适应网格划分，板料单元类型为四节点四边形壳单元，单元尺寸为 5 mm，压边圈、凸模和凹模为刚体模型，网格单元最大尺寸为 10 mm，最小尺寸为 0.5 mm。边界接触和摩擦分别处理为单向面-面接触和 Coulomb 摩擦。板料、压边圈、凸模和凹模在网格划分、定位后的有限元模型如图 4 所示。压边圈的闭合速度为 $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，单边模具间隙为 1.1 倍板厚（即 6.6 mm），板料、压边圈、凹凸模之间的摩擦因数为 0.08~0.14。拉深过程中，压边圈的压力为 470~590 kN，凸模的冲压速度为 $2000 \sim 5000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



图 4 储罐封头成形有限元模型

Fig. 4 Finite element model of tank head forming

2 正交试验

2.1 正交试验设计

本文借助正交试验设计方法^[15]，选择储罐封头

拉深成形的 3 个主要影响工艺参数作为试验因素：凸模冲压速度 *A*、压边力 *B*、摩擦因数 *C*，对各工艺参数组合进行优化。选取最大减薄率、最大增厚率和最大回弹量作为评价指标。各因素的水平参数如表 3 所示。假设本正交试验各因素之间互不影响，选取 $L_{16}(4^3)$ 正交表，得到的方案和结果如表 4 所示。

表 3 正交试验各因素与水平

Table 3 Factors and levels of orthogonal test

| 水平 | 因素 | | |
|----|-------------------------------------------------|------------------|---------------|
| | 冲压速度 <i>A</i> / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ | 压边力 <i>B</i> /kN | 摩擦因数 <i>C</i> |
| 1 | 2000 | 470 | 0.08 |
| 2 | 3000 | 510 | 0.10 |
| 3 | 4000 | 550 | 0.12 |
| 4 | 5000 | 590 | 0.14 |

2.2 正交试验结果分析

用于正交试验结果分析的方法主要有极差分析法和方差分析法^[16]。极差分析法具有计算结果直观、操作方便的特点，而方差分析法能够确定因素对试验结果影响的显著性。因此，本文综合使用极差分析法和方差分析法，以找到最优的各因素水平组合。如表 4 所示，16 组方案组合中最大减薄率均未超出规定最大减薄率 13%，而最大增厚率和最大回弹量这两个指标值均较大，这会一定程度上影响封头表面的光滑平整度。

表 4 储罐封头正交试验方案和结果

Table 4 Orthogonal test schemes and results of tank head

| 试验 序号 | 因素 | | | 结果 | | |
|----------|--------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------|-------------|--------------|
| | 冲压速度 <i>A</i> / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 压边力 <i>B</i> /kN | 摩擦因 数 <i>C</i> | 最大减薄 率/% | 最大增厚 率/% | 最大回弹 量/mm |
| 1 | 2000 | 470 | 0.08 | 1.54 | 17.66 | 6.98 |
| 2 | 2000 | 510 | 0.12 | 1.66 | 17.43 | 6.75 |
| 3 | 2000 | 550 | 0.14 | 1.47 | 16.39 | 6.15 |
| 4 | 2000 | 590 | 0.10 | 1.56 | 17.71 | 6.73 |
| 5 | 3000 | 470 | 0.10 | 1.56 | 17.35 | 6.72 |
| 6 | 3000 | 510 | 0.14 | 1.66 | 17.05 | 6.49 |
| 7 | 3000 | 550 | 0.12 | 1.58 | 17.50 | 6.65 |
| 8 | 3000 | 590 | 0.08 | 1.58 | 17.91 | 6.86 |
| 9 | 4000 | 470 | 0.12 | 1.54 | 17.10 | 6.72 |
| 10 | 4000 | 510 | 0.08 | 1.57 | 17.79 | 6.77 |
| 11 | 4000 | 550 | 0.10 | 1.55 | 17.93 | 6.67 |
| 12 | 4000 | 590 | 0.14 | 1.57 | 17.36 | 6.47 |
| 13 | 5000 | 470 | 0.14 | 1.59 | 16.81 | 6.54 |
| 14 | 5000 | 510 | 0.10 | 1.67 | 17.72 | 6.47 |
| 15 | 5000 | 550 | 0.08 | 1.67 | 17.87 | 6.50 |
| 16 | 5000 | 590 | 0.12 | 1.67 | 17.62 | 6.44 |

2.2.1 极差分析

根据表 4 的数据结果, 计算并比较各因素的极差 R 值。各因素对 3 个评价指标的影响结果分别如表 5、表 6 和表 7 所示, 其中, $K1 \sim K4$ 为各因素不同水平所对应的目标值之和, $k1 \sim k4$ 为各因素不同水平所对应的目标值的平均值。从表 5 可知, 影响最大减薄率的各因素的主次关系为冲压速度 $A >$ 压边力 $B >$ 摩擦因数 C , 最优工艺参数组合为 $A4B3C3$ 。从表 6 可知, 影响最大增厚率的各因素的主次关系为摩擦因数 $C >$ 压边力 $B >$ 冲压速度 A , 最优工艺参数组合为 $A3B4C1$ 。从表 7 可知, 影响最大回弹量的各因素的主次关系为摩擦因数 $C >$ 压边力 $B >$ 冲压速度 A , 最优工艺组合为 $A2B1C1$ 。

表 5 各因素对最大减薄率影响的极差分析结果 (%)

Table 5 Range analysis results for influence of various factors on maximum thinning rate (%)

| 因素 | 冲压速度 A | 压边力 B | 摩擦因数 C |
|----------|--------|--------|--------|
| K1 | 6.23 | 6.23 | 6.36 |
| K2 | 6.38 | 6.56 | 6.34 |
| K3 | 6.23 | 6.27 | 6.45 |
| K4 | 6.60 | 6.38 | 6.29 |
| $k1$ | 1.5575 | 1.5575 | 1.5900 |
| $k2$ | 1.5950 | 1.6400 | 1.5850 |
| $k3$ | 1.5575 | 1.5675 | 1.6125 |
| $k4$ | 1.6500 | 1.5950 | 1.5725 |
| 极差 R | 0.0925 | 0.0825 | 0.0400 |
| 最优工艺参数组合 | A4B3C3 | | |

表 6 各因素对最大增厚率影响的极差分析结果 (%)

Table 6 Range analysis results for influence of various factors on maximum thickening rate (%)

| 因素 | 冲压速度 A | 压边力 B | 摩擦因数 C |
|----------|---------|---------|---------|
| K1 | 69.19 | 68.926 | 71.23 |
| K2 | 69.81 | 69.650 | 70.71 |
| K3 | 70.18 | 69.690 | 69.65 |
| K4 | 70.02 | 70.600 | 67.61 |
| $k1$ | 17.2975 | 17.2315 | 17.8075 |
| $k2$ | 17.4525 | 17.4125 | 17.6775 |
| $k3$ | 17.5450 | 17.4225 | 17.4125 |
| $k4$ | 17.5050 | 17.6500 | 16.9025 |
| 极差 R | 0.2475 | 0.4185 | 0.9050 |
| 最优工艺参数组合 | A3B4C1 | | |

表 7 各因素对最大回弹量影响的极差分析结果 (mm)

Table 7 Range analysis results for influence of various factors on maximum springback amount (mm)

| 因素 | 冲压速度 A | 压边力 B | 摩擦因数 C |
|----------|--------|--------|--------|
| K1 | 26.61 | 26.96 | 27.11 |
| K2 | 26.72 | 26.48 | 26.59 |
| K3 | 26.63 | 25.97 | 26.56 |
| K4 | 25.95 | 26.50 | 25.65 |
| $k1$ | 6.6525 | 6.7400 | 6.7750 |
| $k2$ | 6.6800 | 6.6200 | 6.6475 |
| $k3$ | 6.6575 | 6.4925 | 6.6400 |
| $k4$ | 6.4875 | 6.6250 | 6.4125 |
| 极差 R | 0.1925 | 0.2475 | 0.3625 |
| 最优工艺参数组合 | A2B1C1 | | |

针对最大减薄率指标来说, 各工艺组合的影响并不是很大, 且均能保证在规定最大减薄率以内。从表 6 和 7 可知, 对最大增厚率和最大回弹量两个指标来说, 冲压速度 A 均为最次影响因素, 而摩擦因数 C 为最主要影响因素, 且均以 $C1$ 为最优水平。冲压速度 A 对最大厚度和最大回弹量的影响分别如图 5 和 6 所示, 从图 5 可以看出, 冲压速度 A 取水平 2 时, 封头最大厚度较取水平 3 时更小; 如图 6 所示, 取冲压速度 A 取水平 3 时, 最大回弹量明显下降, 对于该类型大尺寸薄壁储罐封头, 回弹量会对封头的几何精度和公差造成更大的影响^[17-18], 故优先考虑更小回弹量, 冲压速度 A 选择水平 3。压边力 B 对最大厚度和最大回弹量的影响分别如图 7 和图 8 所示, 从图 7 可以看出, 压边力 B 取水平 1 时, 封头的最大厚度较取水平 4 时更小, 而由图 8 可知, 压边力 B 取水平 4 时, 最大回弹量明显减小, 所以, 压边力 B 优选水平 4。综上所述, 最优工艺参数组合为 $A3B4C1$ 。

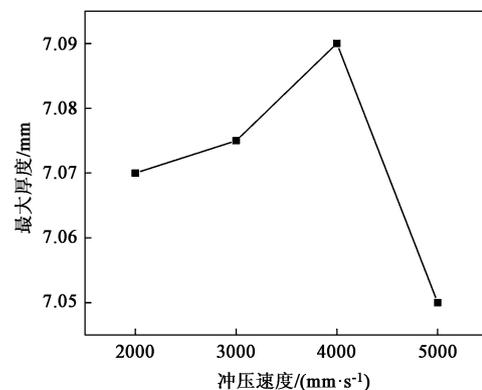


图 5 冲压速度对最大厚度的影响

Fig. 5 Influence of stamping speed on maximum thickness

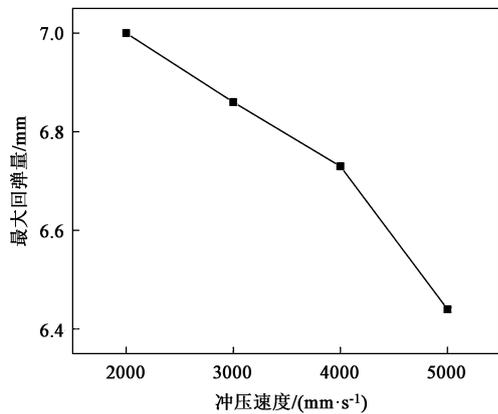


图 6 冲压速度对最大回弹量的影响

Fig. 6 Influence of stamping speed on maximum springback amount

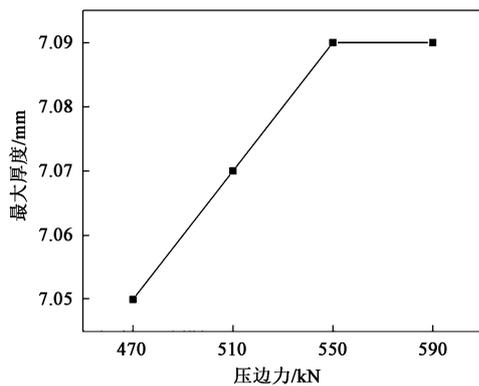


图 7 压边力对最大厚度的影响

Fig. 7 Influence of blank holder force on maximum thickness

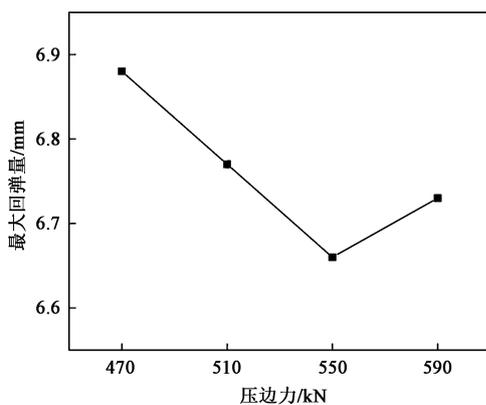


图 8 压边力对最大回弹量的影响

Fig. 8 Influence of blank holder force on maximum springback amount

2. 2. 2 方差分析

根据 2. 2. 1 节可得影响评价指标因素的主次顺序，然而因素的主次顺序并不能完全反映影响的显著性，即主要影响因素不一定为显著性的因素^[19]。因此，根据表 4 分别研究影响最大减薄率、最大增厚率和最大回弹量各因素的显著性和估计误差大小，

3 个评价指标的方差分析结果分别如表 8、表 9 和表 10 所示。

表 8 各因素对最大减薄率显著性影响的方差分析结果
Table 8 Variance analysis results for significant influence of various factors on maximum thinning rate

| 差异来源 | 自由度 | 平方和 | 均方偏差 | F 值 | 临界值 $F_{0.05}$ | 显著性 |
|------|-----|---------|---------|-------|-----------------------|-----|
| A | 3 | 0.02295 | 0.00765 | 4.527 | $F_{0.05}(3,15)=3.29$ | 显著 |
| B | 3 | 0.01635 | 0.00545 | 3.225 | | 不显著 |
| C | 3 | 0.00335 | 0.00112 | 0.663 | | 不显著 |
| 误差 | 6 | 0.01015 | 0.00169 | | | |

表 9 各因素对最大增厚率显著性影响的方差分析结果
Table 9 Variance analysis results for significant influence of various factors on maximum thickness rate

| 差异来源 | 自由度 | 平方和 | 均方偏差 | F 值 | 临界值 $F_{0.05}$ | 显著性 |
|------|-----|---------|---------|-------|-----------------------|-----|
| A | 3 | 0.14125 | 0.04708 | 0.784 | $F_{0.05}(3,15)=3.29$ | 不显著 |
| B | 3 | 0.35962 | 0.11987 | 1.996 | | 不显著 |
| C | 3 | 1.92290 | 0.64097 | 10.67 | | 显著 |
| 误差 | 6 | 0.36043 | 0.06007 | | | |

表 10 各因素对最大回弹量显著性影响的方差分析结果
Table 10 Variance analysis results for significant influence of various factors on maximum springback amount

| 差异来源 | 自由度 | 平方和 | 均方偏差 | F 值 | 临界值 $F_{0.05}$ | 显著性 |
|------|-----|---------|---------|-------|-----------------------|-----|
| A | 3 | 0.09447 | 0.03149 | 1.749 | $F_{0.05}(3,15)=3.29$ | 不显著 |
| B | 3 | 0.12272 | 0.04091 | 2.273 | | 不显著 |
| C | 3 | 0.27293 | 0.09098 | 5.050 | | 显著 |
| 误差 | 6 | 0.10798 | 0.018 | | | |

本文 3 个评价指标的分析 F 检验的标准是对比各因素的 F 值是否大于临界值 $F_{0.05}$ ，若比临界值 $F_{0.05}$ 大，则该因素对该评价指标具有显著性的影响，表 8、表 9 和表 10 中的临界值 $F_{0.05}$ 由 F 分布上侧分位数表^[20]查得，置信度为 95%。从表 8 中可知，冲压速度 A 相较于其他因素对最大减薄率的影响更明显，贡献率为 43.47%；压边力 B 次之，贡献率为 30.97%；而摩擦因数 C 的影响程度最弱，贡献率仅为 6.34%，相较冲压速度 A 和压边力 B ，其显著性可忽略不计。从表 9 中可知，影响最大增厚率的最显著因素为摩擦因数 C ，贡献率达到 64.44%，超过了总离差平方和的一半，这表明模具和板料之间的润滑对封头的起皱问题非常重要；其次为压边力 B ，贡献率为 12.92%；最弱的为冲压速度 A ，贡献率仅

为 5.07%，同理也可忽略其对最大增厚率的影响。而从表 10 中同样发现摩擦因数 C 也是影响最大回弹量的最显著因素，贡献率为 45.63%；压边力 B 次之，贡献率为 20.52%；影响程度最小的为冲压速度 A ，贡献率为 15.8%。综上所述，3 个评价指标的方差分析结果与极差分析结果一致，即因素的主次顺序为显著性程度顺序。最优工艺参数组合方案为 $A3B4C1$ 。

2.2.3 最优工艺参数组合

观察已进行的正交试验方案发现，最优工艺参数组合方案 $A3B4C1$ 并未在内，因此，需将该方案的参数输入到 Dynaform 软件中，设置储罐封头的工艺参数为：冲压速度为 $4000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、压边力为 590 kN、摩擦因数为 0.08 和单边模具间隙为 6.6 mm，进行再次模拟并求解。最优工艺参数组合的厚度分布云图如图 9 所示，图 9 中各点对应的厚度值如表 11 所示。结合图 9 和表 11 可知，封头的最小厚度位于点 2 封头椭圆底部处，为 5.91 mm，而封头圆弧点 1 处为最大厚度处，为 7.09 mm。从点 3、点 4 和点 5 可知，封头椭圆部分的厚度分布较为均匀，材料流动性好；而在点 6 和点 7 处的厚度相差较大，说明在一定压力下，因 Q345R 低合金钢具有各向异性，导致圆弧过渡处材料流动不均匀。点 6 处材料受径向拉应力较小，而受切向压应力较大，发生塑性失稳^[21]，受到附近晶体的阻力相对较大^[22]，从而出现不同程度的增厚。通过观察点 8、点 9 和点 10 的厚度值可知，封头边缘的厚度分布较为均匀，增厚程度相差不大。由此可知，封头的起皱并不是随着拉深开始即出现的，而是当拉深深度达到一定程度时才出现。

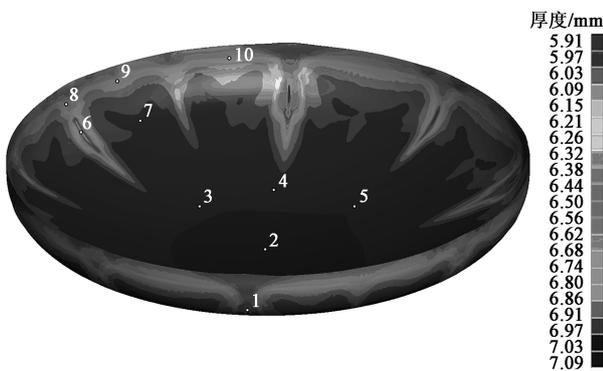


图 9 封头厚度分布云图

Fig. 9 Distribution cloud map of thickness for head

图 10 为储罐封头的回弹量分布云图，结合表 12 可知，封头的最大回弹量为 6.73 mm，位于边缘

表 11 封头各点对应厚度 (mm)

Table 11 Corresponding thicknesses of each point for head (mm)

| 序号 | 厚度 |
|----|------|
| 1 | 7.09 |
| 2 | 5.91 |
| 3 | 5.99 |
| 4 | 6.00 |
| 5 | 5.98 |
| 6 | 6.72 |
| 7 | 6.01 |
| 8 | 6.30 |
| 9 | 6.21 |
| 10 | 6.22 |



图 10 封头回弹量分布云图

Fig. 10 Distribution cloud map of springback amounts for head

表 12 封头各点对应回弹量 (mm)

Table 12 Corresponding springback amounts of each point for head (mm)

| 序号 | 回弹量 |
|----|------|
| 1 | 6.73 |
| 2 | 2.64 |
| 3 | 0.00 |
| 4 | 0.63 |
| 5 | 0.32 |
| 6 | 1.83 |
| 7 | 1.75 |
| 8 | 2.07 |

端口点 1 处，向外回弹可能会导致实际直径比设计尺寸更大；同处于封头边缘端口的点 6、点 7 和点 8 处的平均回弹量仅有 1.88 mm 左右，可知端口点 1 处的塑性成形比较不充分，受到较大的底部拉应力的影响^[23]。封头的最小回弹量为 0.00 mm，位于椭圆圆弧点 3 处，点 4 和点 5 处的回弹量均较小且分

布均匀，封头椭圆底部点 2 处的回弹量为 2.64 mm。

为了能够直观地观察和分析封头在卸载脱模后回弹的变化情况，沿 y 轴对封头截面剖切，选择回弹前截面作为对照面，回弹后截面作为观察面，如图 11 所示。从图 11 可以更加直观地观察到最大回弹出现在左侧圆弧过渡的位置，其余封头各部分的回弹量较小，这是因为底部椭圆成形时的弯曲半径远远小于圆弧过渡处的弯曲半径，弯曲半径越大，回弹量越大^[24]。

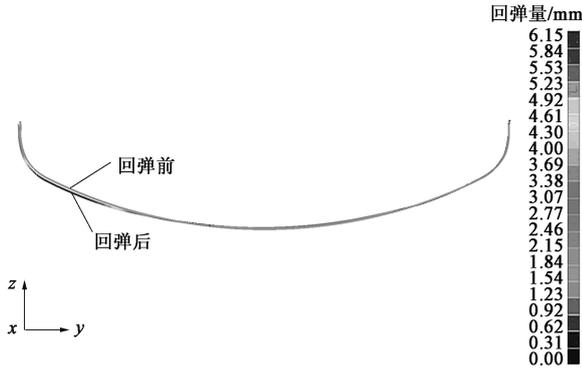


图 11 封头回弹前后截面对比云图

Fig. 11 Comparison cloud map of cross-sections before and after springback for head

3 试验与模拟结果对比

根据实际生产条件，成形设备选择 SHP24-1400/2000 型油压机，拉深力和压边力分别由内外滑块控制。采用正交试验优化得到的最优工艺参数组合 A3B4C1，即实际冲压速度为 $4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、压边力为 590 kN 和摩擦因数为 0.08 进行实际生产试验，得到如图 12 所示的封头成形件，封头表面无明显起皱、裂纹、鼓包等缺陷。为验证实际生产和数值模拟结果的一致性，选择封头椭圆度作为评价指标。将封头端口平分 8 等分，如图 13 所示，分别测量



图 12 储罐封头实物图

Fig. 12 Physical map of tank head

4 条内直径的长度，计算出最大和最小直径之差，即为该封头的椭圆度，实际和模拟封头的内直径如表 13 所示。观察表 13 可知，实际和模拟得到的椭圆度均未超过 5 mm，符合质量要求，且模拟椭圆度与实际椭圆度的误差为 3.47%，其结果基本一致，验证了基于正交试验的模拟的可行性。

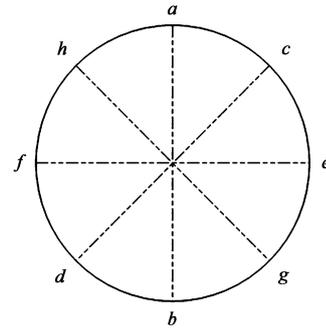


图 13 椭圆度测量示意图

Fig. 13 Schematic diagram of ovality measurement

表 13 实际和模拟的内直径值及椭圆度 (mm)

Table 13 Actual and simulated inner diameter values and ovalities (mm)

| 来源 | 内直径 | | | | 椭圆度 |
|-----|---------|----------|---------|---------|------|
| | ab | cd | ef | gh | |
| 实际值 | Φ999.73 | Φ1002.34 | Φ997.73 | Φ998.26 | 4.61 |
| 模拟值 | Φ998.95 | Φ995.420 | Φ996.90 | Φ995.50 | 4.45 |

4 结论

(1) 利用准静态单向拉伸试验，获得了 Q345R 低合金压力容器钢与轧制方向呈 0° 、 45° 和 90° 这三个方向的力学性能参数，并借助 Krupskowsky 函数对其真实应力-真实应变进行拟合，建立 Q345R 低合金钢的材料本构模型。

(2) 针对储罐封头成形质量问题，设计正交试验，使用 Dynaform 有限元软件进行冲压模拟。以最大减薄率、最大增厚率和最大回弹量作为评价指标，结合极差分析和方差分析，得到的最优工艺参数组合为：冲压速度为 $4000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、压边力为 590 kN 和摩擦因数为 0.08。

(3) 按照最优工艺参数组合进行实际生产试验，采用封头端口椭圆度来检验实际和模拟结果的一致性，结果表明，该工艺参数组合下生产的封头符合质量要求，且模拟和实际结果基本一致，验证了基于正交试验优化封头冲压成形工艺参数方案的可行性。

参考文献:

- [1] He J X, Yang L L, Ma Y, et al. Simulation and application of a detecting rapid response model for the leakage of flammable liquid storage tank [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 141: 390-401.
- [2] 郑罡, 孙培栋, 彭翊, 等. 微压供热压力容器结构设计与力学分析 [J]. *装备环境工程*, 2019, 16 (2): 1-6.
Zheng G, Sun P D, Peng Y, et al. Pressure vessel design and analysis of heating-reactor of advanced low-pressurized and passive safety system [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16 (2): 1-6.
- [3] 罗征志, 曾京, 黄烈兵, 等. 铁路罐车封头冲压成形研究 [J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48 (4): 745-749, 768.
Luo Z Z, Zeng J, Huang L B, et al. Stamp-forming of heads of railway tank cars [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48 (4): 745-749, 768.
- [4] 卢嘉炜, 郭子方, 吴志豪, 等. 日本高放废液玻璃固化技术 [J]. *辐射防护*, 2020, 40 (1): 67-77.
Lu J W, Guo Z F, Wu Z H, et al. Vitrification technologies of high level radioactive liquid waste in Japan [J]. *Radiation Protection*, 2020, 40 (1): 67-77.
- [5] 丁志杨, 陈梁玉, 赵坤民, 等. 一种大型薄壁碟形封头成形工艺优化 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2017, 52 (2): 62-65.
Ding Z Y, Cheng L Y, Zhao K M, et al. Optimization of forming process for one kind of large thin-wall dished head [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2017, 52 (2): 62-65.
- [6] 史敏, 赵亦希, 孔庆帅, 等. 薄壁铝合金封头挡板辅助旋压成形方法 [J]. *上海交通大学学报*, 2015, 49 (10): 1497-1503.
Shi M, Zhao Y X, Kong Q S, et al. Baffle-assistant spinning method for thin-walled aluminum alloy seal head [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2015, 49 (10): 1497-1503.
- [7] 万晋. 加工减薄后的椭圆封头强度数值分析 [J]. *石油化工设备*, 2006, (1): 41-43.
Wan J. Strength numerical analysis of elliptical heads due to machining thickness reduction [J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2006, (1): 41-43.
- [8] 王珂. 椭圆形封头冷冲压成形残余影响及其表征方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Wang K. Research on Residual Effects of Cold Stamping on Elliptical Head and Its Characterization Method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [9] Wu P, Wang Y M, Wan P. Study on simulation of stamping process and optimization of process parameters of fender [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019.
- [10] 杨全毅, 张朝阳, 刘猛, 等. 焊接工艺对 Q345R 的硫化物应力腐蚀敏感性的影响 [J]. *材料保护*, 2021, 54 (4): 22-26.
Yang Q Y, Zhang Z Y, Liu M, et al. Effect of welding process on the sulfide stress corrosion susceptibility of Q345R [J]. *Material Protection*, 2021, 54 (4): 22-26.
- [11] GB/T 25198—2010, 压力容器封头 [S].
GB/T 25198—2010, Heads for pressure vessels [S].
- [12] GB/T 1804—2000, 一般公差 未标注公差的线性角度尺寸的公差 [S].
GB/T 1804—2000, General tolerances—Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications [S].
- [13] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [14] Wang W R, Huang L, Tao K H, et al. Formability and numerical simulation of AZ31B magnesium alloy sheet in warm stamping process [J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 835-844.
- [15] 徐仲安, 王天保, 李常英, 等. 正交试验设计法简介 [J]. *科技情报开发与经济*, 2002, 12 (5): 148-150.
Xu Z A, Wang T B, Li C Y, et al. Brief introduction to the orthogonal test design [J]. *Journal of Library and Information Science*, 2002, 12 (5): 148-150.
- [16] 张成军. 试验设计与数据处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
Zhang C J. *Experimental Design and Data Processing* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [17] Tekaslan Ö, Gerger N, Şeker U. Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in “V” bending dies [J]. *Materials & Design*, 2008, 29: 1043-1050.
- [18] Trzepieciniski T, Malinowski T, Pieja T. Experimental and numerical analysis of industrial warm forming of stainless steel sheet [J]. *Journal of Manufacturing Process*, 2017, 30: 532-540.
- [19] 李健. 镀镍薄板冲压成形过程中的回弹研究及稳健设计 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
Li J. The Research on Springback in Stamping Forming Process of Nickel Plate and Robust Design [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- [20] 汪荣鑫. 数理统计 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
Wang R X. *Mathematical Statistics* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986.
- [21] 张源, 李静媛, 方智, 等. 基于 Dynaform 模拟冲压工艺对 17%Cr 超纯铁素体不锈钢表面起皱的影响 [J]. *材料导报*, 2017, 31 (8): 156-161.
Zang Y, Li J Y, Fang Z, et al. Influence of stamping process by Dynaform simulation on the surface ridging of 17%Cr ultra-pure ferritic stainless steel [J]. *Materials Reports*, 2017, 31 (8): 156-161.
- [22] 魏子豪, 朱春东, 郑淇文, 等. 基于 Dynaform 的 Strenx960 高强度钢折弯工艺影响因素分析 [J]. *锻压技术*, 2020, 45 (12): 78-84.
Wei Z H, Zhu C D, Zheng Q W, et al. Analysis on influencing factors of bending process for Strenx960 high-strength steel based on Dynaform [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45 (12): 78-84.
- [23] 高嵩, 吴宇航, 李奇涵, 等. 铝型材三维拉弯成形回弹预测的理论解析与数值模拟 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (4): 143-149.
Gao S, Wu Y H, Li Q H, et al. Theoretical analysis and numerical simulation on springback prediction for 3D stretch bending of aluminum profile [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (4): 143-149.
- [24] Verma R K, Haldar A. Effect of normal anisotropy on springback [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 190: 300-304.