

基于灰色理论的 T 形管内高压成形加载路径优化

唐 勇, 薛克敏, 李 萍, 曹婷婷
(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 以最大轴向进给力、支管背压力、内压力为因子, 建立正交试验设计方案, 进行有限元模拟, 获得不同加载路径下的质量目标函数值。利用灰色系统理论, 计算各个目标矢量与参考目标值之间的关联系数, 将多目标转化为以关联度为目标的单目标。进一步计算各成形工艺参数的平均关联度, 获得优化加载路径组合参数, 以此进行有限元模拟验证。结果表明, 通过该优化方法能获得综合质量较高的内高压成形的 T 形三通管。

关键词: 内高压成形; T 形三通管; 加载路径; 数值模拟; 灰色系统理论; 多目标优化

中图分类号: TG394 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-8798(2009)03-0266-04

Optimization for hydroforming loading paths of T-shaped tube based on grey system theory

TANG Yong, XUE Ke-min, LI Ping, CAO Ting-ting

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Orthogonal experiment was carried out by FEM, the maximum axial force, equilibrium force of branch punch and inner pressure were set as variances and the forming quality variances were obtained. Based on the grey theory, the relational generatings between object and reference were calculated and each multi-objective design can be converted into a single objective design by the grey rational grade. The analysis of variance for the grey relational grade of each level was implemented, and the optimum combination of the loading paths were obtained and was confirmed by FEM. It was showed that the forming quality can be improved in this method.

Key words: hydroforming; T-shaped tube; loading paths; simulation; grey system theory; multi-objective optimization

管内高压成形由于成本低、柔性高及成形产品强度高、重量轻等显著优点, 近年来在汽车工业中用于制造各类空心轻体构件^[1]。内高压生产的 T

形管主要用于汽车排气系统部件, 其质量要求满足多个指标, 如支管高度大、壁厚减薄小及壁厚分布均匀等, 因此需要考虑多个工艺因素, 其中加载路径,

收稿日期: 2009-06-11

基金项目: 安徽省“十一五”科技攻关项目(06012150C)

作者简介: 唐 勇(1984—), 男, 贵州贵阳人, 硕士研究生, 研究方向为精密塑性成形机模拟仿真。

通讯作者: 薛克敏, 教授, 博士生导师, 主要从事精密塑性成形工艺与仿真研究。

即轴向进给与内压(及背压)的匹配关系显得尤为重要。针对T形管内高压成形的加载路径优化,国内外学者开展了相关的研究工作。Fann等^[2]采用基于梯度搜索法,采用Ls-Dyna为数值模拟工具,通过探测成形件壁厚均匀性与成形零件的几何精度来确定加载路径的搜索方向。但是,由于管件液压成形的数值模拟速度仍不能满足优化迭代的要求,从而限制了该方法的应用;Manabe等,提出自适应仿真与模糊逻辑控制策略相结合的方法^[3,4],但是模糊控制规则的获取依赖于大量试验和经验。灰色系统理论具有建模和预测的作用^[5-7],能研究影响因素与目标结果的关联度大小,在多目标优化设计中得到应用。本研究在试验设计和数值模拟的基础上,利用灰色系统理论的关联度计算,对T形三通管的内高压成形加载路径参数进行优化,以寻求符合多个质量目标要求的最佳加载路径。

1 基于灰色系统理论的多目标优化步骤

在灰色系统中,关联度用来描述事件之间、因素之间动态发展态势的相似程度。关联度越大,事件之间的相似程度就越大。根据灰色系统理论,对于多影响因素的设计,不同的设计条件,具有不同的量纲和数量级,必须进行数据处理。设经过数据变换处理的目标矢量序列为 $X_i = \{x_i(k), k = 1, 2, \dots, n\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, m 为目标矢量个数;参考矢量序列 $X_0 = \{x_0(k), k = 1, 2, \dots, n\}$ 。则 X_i 对于 X_0 在第 k 点的灰色关联系数^[5]为:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_{j \in i} \min_k |X_0 - X_i(k)| + \rho \max_{j \in i} \max_k |X_0 - X_i(k)|}{|X_0 - X_i(k)| + \rho \max_{j \in i} \max_k |X_0 - X_i(k)|} \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为分辨系数,一般取 $\rho = 0.5$ 。

目标矢量序列 X_i 对于参考序列 X_0 的关联度^[5]:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \lambda_k \xi_i(k) \quad (2)$$

式(2)中: λ_k 为权重。

关联度 γ_i 越大,目标矢量 X_i 与参考序列 X_0 越相似,以此判断事物之间的相似性大小。基于灰色关联度的多目标优化设计步骤:首先对成形目标矢量序列进行数据规范化,然后求出每个单目标与试验工艺参数之间的关联系数,进一步考虑权重,通过关联度的公式求出目标矢量的关联度,分析灰色关联度序列相对大小,以灰色关联度最大值对应的工艺参数值为最优值^[7]。

2 优化模型确定

T形管内高压成形原理见图1。在内压和背压以一定关系增长的同时,左右2个轴向冲头逐渐往里进给补料直至最终成形。背压由反向冲头作用在支管顶部来提供,背压的作用是支撑支管,防止支管过度减薄甚至是早期破裂。

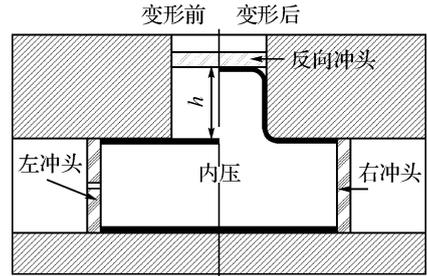


图1 T形管内高压成形原理

Fig. 1 Scheme for T-shaped tube hydroforming

2.1 优化变量的确定

管坯初始壁厚为1.6 mm,长度为116 mm,主管外径为 $\phi 32$ mm;模具圆角半径为5 mm,支管直径为 $\phi 32$ mm。材料为不锈钢SS304,材料性能参数:密度 ρ 为7 830 kg/m³;弹性模量 E 为207 000 GPa;泊松比 ν 为0.3;屈服强度 σ_s 为154.3 MPa;强度系数 K 为520.4 MPa;厚向异性系数 r_0 为1.73, r_{45} 为1.35, r_{90} 为2.18;硬化指数 n 为0.232。影响T形管内高压成形主要工艺参数有:管件与模具接触表面间的摩擦系数 μ 和加载路径。其中,摩擦系数在工程实际中始终处于变化状态,且不利于控制,因此这个因素不在考察之列,模拟试验中采用相同的摩擦条件,摩擦系数 $\mu = 0.1$;然而加载路径对成形质量影响显著,且在工程实际中可以方便地控制调节,因此,本研究采用力控制方式的线性加载路径进行研究,在获得最优解以后,通过数值模拟可以确定各个冲头运动曲线,再将其应用于实际中控制主管左右冲头轴向进给和支管反向冲头的运动^[8]。分别设最大支管背压力 x_1 、轴向进给力 x_2 和内压力 x_3 为优化设计变量。在理论计算和数值模拟基础上最终确定的设计变量取值范围:背压力 x_1 为35~45 kN,轴向进给力 x_2 为210~270 kN,内压力 x_3 为180~200 MPa。

2.2 目标函数的确定

T形管内高压成形的目标是在壁厚减薄、壁厚分布均匀的情况下,获得最大的支管高度。Lin等提出将支管高度和最小壁厚作为优化指标^[9],但是

没有考虑管料增厚对壁厚分布均匀性的影响。因此本研究选取 3 个优化指标: T 形管内高压成形支管高度 h , 越大越好; 最小壁厚 t_{\min} , 越大越好; 最大壁厚 t_{\max} , 越小越好。

3 试验方案及模拟结果

将上述 3 个设计变量作为正交试验因子, 每个变量在各自范围内取 3 个水平, 组成 $L_9(3^4)$ 正交表^[10]。

表 1 正交试验方案及模拟结果

Table 1 Orthogonal array and simulation results

试验 序号	加载路径参数			空列	模拟结果		
	背压力 x_1/kN	轴向进给力 x_2/kN	内压力 x_3/MPa		最小壁厚 t_{\min}/mm	最大壁厚 t_{\max}/mm	支管高度 h/mm
1	35	210	180		1.25	2.31	15.27
2	35	240	190		1.16	2.50	18.56
3	35	270	200		1.04	2.69	19.19
4	40	210	190		1.25	2.24	15.24
5	40	240	200		1.16	2.43	18.66
6	40	270	180		1.41	2.69	17.43
7	45	210	200		1.21	2.25	15.21
8	45	240	180		1.42	2.47	14.74
9	45	270	190		1.40	2.68	17.33

4 灰色系统理论多目标优化

4.1 计算目标函数灰色关联系数

按照灰色系统理论, 将 T 形三通管内高压成形模拟结果的原始数据进行规范化处理, 生成新序列数据。按照式(1)对 3 个目标函数分别进行关联系数计算, 获得灰色关联系数如表 2 所示。

表 2 目标函数的灰色关联系数及关联度

Table 2 Grey relational generating and relational grade for objective function

试验 序号	关联系数			关联度 γ_i
	ξ_1	ξ_2	ξ_3	
1	0.536 2	0.838 9	0.412 8	0.595 9
2	0.425 2	0.583 5	0.813 9	0.607 6
3	0.333 3	0.447 4	1	0.593 5
4	0.536 2	1	0.411 0	0.649 0
5	0.425 2	0.657 2	0.838 7	0.640 4
6	1	0.447 4	0.610 3	0.685 9
7	0.480 4	0.973 3	0.409 2	0.621 0
8	0.948 7	0.613 0	0.382 5	0.648 1
9	0.948 7	0.453 0	0.597 1	0.666 2

由于 LS-Dyan 擅长处理大变形、大位移等问题, 是目前业界公认的管材内高压成形模拟结果准确性最好的软件之一^[7], 所以本研究采用以 LS-Dyan 作为求解器的有限元分析软件 Dynaform5.5 进行仿真分析。基于 UG4.0 建立几何模型, 然后导入 Dyanform5.5 软件建立有限元模型, 对 9 组试验方案进行有限元数值模拟, 获得相应 T 形管内高压成形支管高度、最小壁厚及最大壁厚的模拟结果如表 1 所示。

表 1 正交试验方案及模拟结果

4.2 计算目标函数灰色关联度

内高压成形的 T 形管要求获得大的支管高度, 同时保证壁厚分布均匀, 没有过度减薄和增厚, 所以这 3 个目标函数的设计权重相等。考虑单目标函数的最大值为优化目标, 将获得的灰色关联系数数据代入式(2), 计算获得目标函数的关联度, 如表 2 所示。

4.3 多目标灰色关联度分析

计算各个因子各个水平的平均关联度, 如表 3 所示。由灰色系统理论可知, 关联度越大, 表明该因子的这个水平对多目标响应的影响越大, 则该水平为这个因子的最佳水平。各因子的水平关联度均值如图 2 所示, 由此可以得到各因子各水平对关联度的影响程度。由图 2 可以看出, 各因子所对应的最佳加载路径参数水平分别是: 背压力 x_1 为 45 kN, 轴向进给力 x_2 为 270 kN, 内压力 x_3 为 180 MPa。

表 3 各个因子各个水平的关联度值

Table 3 Average grey relational grade for each level of variance

x_1/kN	关联度	x_2/kN	关联度	x_3/MPa	关联度
35	0.599 0	210	0.622 0	180	0.643 3
40	0.665 84	240	0.632 0	190	0.640 9
45	0.645 10	270	0.648 5	200	0.618 3

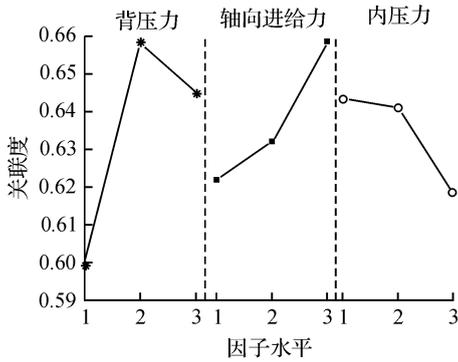


图2 各因子水平平均值图

Fig. 2 Average of level for each factor

4.4 仿真验证

用以上分析得到的优化成形加载路径参数组合进行模拟验证。优化的加载路径参数组合下的内高压成形的T形管壁厚分布云图如图3所示。最优化的结果是最小壁厚 t_{\min} 为1.44 mm,最大壁厚 t_{\max} 为2.68 mm,最大支管高度 h 为17.21 mm。由模拟结果分析可知,优化的加载路径参数组合模拟,内高压成形T形三通管支管高度较大,壁厚分布均匀。

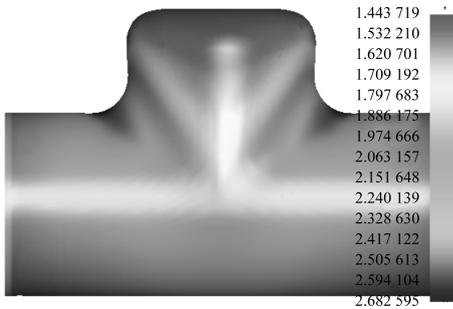


图3 优化方案下的模拟结果

Fig. 3 Optimal simulation result

5 结语

基于灰色系统理论,通过对多目标函数的关联系数、关联度计算及各个加载路径参数的平均关联度分析,可得到多目标优化的T形三通管内高压成形加载路径的最佳参数组合。

运用优化的加载路径参数组合进行仿真验证,获得满足多质量目标要求的内高压成形T形三通管,表明这种方法在内高压成形设计中具有应用前景。

参考文献:

- [1] HARTL C. Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167: 383-392.
- [2] FANN K J, HSIAO P Y. Optimization of loading conditions for tube hydroforming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140: 520-524.
- [3] MANABEA K, SUETAKEA M, KOYAMAB H, et al. Hydroforming process optimization of aluminum alloy tube using intelligent control technique [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 4(6): 1207-1211.
- [4] LI Shu-hui, YANG Bing. Loading path prediction for tube hydroforming process using a fuzzy control strategy [J]. Materials and Design, 2007(6): 1-8.
- [5] 邓聚龙. 灰色系统理论[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [6] 谢延敏, 于沪平, 陈军, 等. 基于灰色系统理论的方盒件拉深稳健设计[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 54-58.
- [7] 赵茂俞, 薛克敏, 李萍. 基于灰色系统理论的铝合金覆盖件成形优化模拟[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 207-210.
- [8] ABEDRABBO N, WORSWICK M, Mayer R, et al. Optimization methods for the tube hydroforming process applied to advanced high-strength steels with experimental verification [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 20(9): 110-123.
- [9] LIN F C, KWAN C T. Application of abductive network and FEM to predict an acceptable product on T-shape tube hydroforming process [J]. Computers and Structures, 2004, 82: 1189-1200.
- [10] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 72-136.