

三通管内高压成形载荷路径试验优化设计

宋学伟^{1,2},吴永飞¹,沈传亮¹,陈书明¹

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室,长春 130022;2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙 410082)

摘要:采用 DYNAFORM 有限元软件对三通管内高压成形过程进行了数值模拟研究,采用正交试验优化设计方法进行载荷路径参数优化,找出了 T型管内高压成形的内压力、轴向进给力、背压力三参数的最优组合,采用该最优组合参数的试验结果与数值模拟结果相吻合。

关键词:车辆工程;内高压成形管;参数优化;试验优化设计

中图分类号:U462.2,TH122 文献标志码:A 文章编号:1671-5497(2012)Sup. 1-0057-05

Test optimum design in three-way pipe hydroforming load path optimization

SONG Xue-wei^{1,2}, WU Yong-fei¹, SHEN Chuan-liang¹, CHEN Shu-ming¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Changsha 410082, China)

Abstract: The numerical simulation analysis on a three-way pipe hydroforming was performed through FEM software DYNAFORM, and load path parameter was optimized based on orthogonal test design theory. The optimum parameter combination among internal pressure, axial feed and back pressure during T-shape tube hydroforming load path optimization process was obtained, and the test results with the optimum parameter combination are in good agreement with simulation results.

Key words: vehicle engineering; hydroforming tube; parameter optimization; test optimization design

内高压成形过程与很多因素有关,载荷路径的优化尤为重要,在内高压成形技术中,不当的加载路径会使成形过程中出现破裂、起皱、失稳等缺陷,如何找出两者对成形性能的影响规律并对两者的匹配关系进行优化是内高压成形面临的重要课题。在内高压成形技术中,建立适当的成形加载路径是十分必要的,近年来国内外众多学者使用不同的方法对管材内高压成形加载路径优化方法进行了研究。Rimkus 等^[1]通过理论分析和有限元模拟,建立一种通过零件几何形状估算成形

压力及轴向进给大小的方法。方法适用于许多不同形状的零件,再加上很容易输入所需的参数,因此可方便快捷地用来大略估计整个成形过程所需的加载路径,最后可利用仿真或实验优化加载路径。Yang 等^[2]结合管件内高压成形理论和 SQP 优化运算法则,以管件成形后的厚度均匀性为目标函数,成形过程中各阶段的内部压力值与轴向进给量为设计变量,进行优化运算后以三次方的样条曲线(B-spline)将优化后所得的设计变量形成一条最优的加载路径曲线,以优化后的加载路

收稿日期:2012-04-09.

基金项目:国家自然科学基金项目(51175218);吉林大学基本科研业务费项目(450060323237);汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金项目(31115004).

作者简介:宋学伟(1972-),男,副教授,博士.研究方向:汽车轻量化设计与工艺,汽车碰撞安全性.

E-mail:sxwjl@163.com

通信作者:陈书明(1980-),男,讲师.研究方向:汽车系统动力学. E-mail:shumingchen@yahoo.cn

径对汽车结构件内高压成形进行有限元仿真,结果管件内高压成形质量得到改善。台湾中山大学的箫镝元^[3]以 T 型管为研究对象,采用共轭梯度法结合有限元仿真进行管件内高压成形加载路径优化研究,并以成形过程中所需加载的压力与轴向进给为设计变量,建立针对 T 型管内高压成形加载路径优化的程序模块,以成形管件的厚度均匀性和几何精度误差作为优化中的目标函数,分别进行优化以获得最优成形质量时的成形加载曲线。文献[4]中也提出一种结合 LS-DYNA 仿真与模糊逻辑控制的方法,对管材液压成形加载路径进行了优化。文献[5]中提出一种将均匀设计法、神经网络和遗传算法相结合进行管材内高压成形工艺参数优化的方法。

管材内高压成形过程与很多因素有关,诸如模具的圆角、管件与模具间的摩擦、管件的几何尺寸、管件的材料特性、施加在管件内部的压力与轴向压力之间的匹配关系等,对于 T 型管、Y 型管等带有分支的异型管的成型还要加上背压力。其中施加在管件内部的高压液体压力与轴向压力之间的匹配关系是最重要的,它直接影响截面的形状、厚度分布和最终的成形尺寸^[6]。许多复杂工程优化问题,都是非线性问题,且变量之间的关系很难用显函数形式来表达。传统的优化方法应用于复杂的优化问题存在以下困难:①优化中靠经验调整的参数较多,掌握困难;②优化计算效率较低。优化时需要大量的有限元模拟计算,计算耗时过多,且结果往往不尽人意;③难以保证求得全局最优,往往陷入局部最优^[7]。为此,作者尝试引入实验优化设计方法并进行了实验验证。

1 有限元模型和优化设计正交表的选择

1.1 有限元模型

图 1 是内高压成形三通管工艺原理图。原理是管状坯料在内压力 p 、轴向进给力 F_1 、 F_2 和背压力 F 的共同作用下发生塑性变形,并随内压力和轴向力的不断增加,变形程度越来越大,直至最终贴模成形。

图 2 是 DYNAFORM 有限元软件建立的三通管有限元模型,其中壁厚 1 mm,管长 200 mm,直径 50 mm。

管坯材料定义:管坯选用 DYNAFORM 软件材料库中的铝合金 AA6009,选用 36 号材料,其

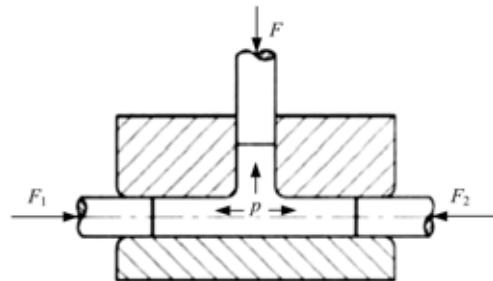


图 1 内高压成形工艺原理示意图

Fig. 1 Principle map of hydroforming

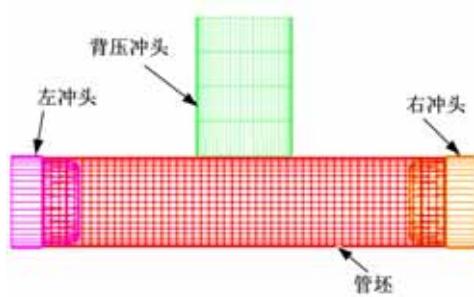


图 2 三通管有限元模型

Fig. 2 Finite element model of three-way pipe

力学性能试验得到其应力应变曲线如图 3 所示,其材料力学性能参数如下:密度为 2.7 g/cm³;杨氏模量为 69 GPa;泊松比为 0.33;强度系数为 170 MPa;硬化指数为 0.32 n。

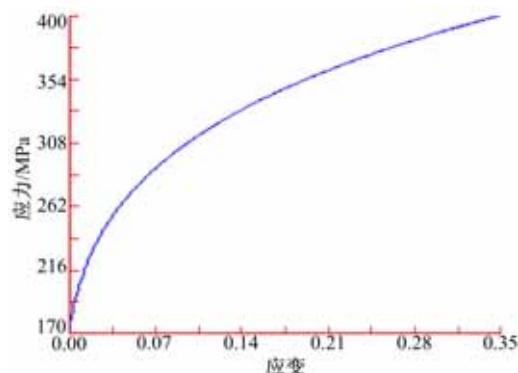


图 3 AA6009 应力应变曲线

Fig. 3 Stress strain curve of AA6009

1.2 优化设计正交表选择

本文考虑影响三通管成形的三个主要因素:内压、轴向进给和背压。首先分析单个因素的影响,通过数值模拟分析可以得出结论:

(1) 随着轴向力的增加,最小壁厚和最大壁厚增加,壁厚差在不断加大,支管高度也在增加,足够的轴向进给力可提供足够多的材料进给量,它是取得一定支管高度的一个前提,但是过大的

轴向进给力也会造成壁厚的严重增加, 甚至会产生折叠、塌陷现象。

(2) 内压对成形结果的影响也主要体现在最小壁厚与支管高度上, 其影响与背压力相反。当内压过大时, 支管顶部会出现过度减薄甚至是破裂, 而当内压过小时, 背压就显得过大, 支管高度太小。

(3) 背压力对成形结果的影响主要体现在支管高度及最小壁厚上。随着背压力的减小, 支管高度增大, 支管顶部变形量增大导致壁厚减小。严重时破裂。

3个因素同时考虑时, 本文通过实验优化设计的方法来选择最优参数组合, 选取3因素3水平的进行试验, 三因素分别为内压力、轴向进给力和背压力。内压力的三个水平分别选取18、20和22 MPa; 轴向进给量的3个水平分别选取25、30和35 mm; 背压力3个水平分别选取0.8 t、1.0 t和1.2 t, 因素水平表如表1所示。

表1 因素水平表

Table 1 Factors level table

因素	水平		
	1	2	3
内压力 A/MPa	18	20	22
轴向进给 B/mm	25	30	35
背压力 C/ 10^4 N	0.8	1.0	1.2

3因素3水平的全面试验水平组合数为 $3^3=27$, 3个因素的选优区可以用一个立方体表示(见图3), 3个因素各取3个水平, 把立方体划分成27个格点, 反映在图4就是立方体内的27个“.”。

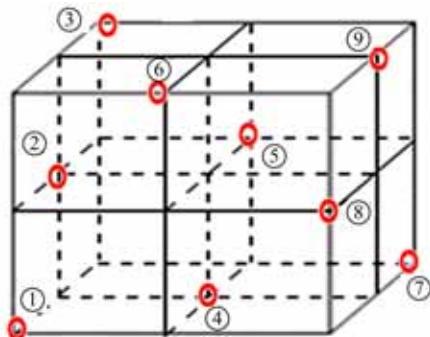


图4 3因素3水平试验的均衡分散立体图

Fig. 4 Scattered stereogram of test

选择适当的正交表, 正交表的选择原则是在能够安排下试验因素和交互作用的前提下, 尽可能选用较小的正交表, 以减少试验次数。本文采

用 $L_9(3^4)$ 正交表。这里“L”表示正交表, 9表示总共要做9次试验, “3”表示每个因素都有3个水平, “4”表示这个表有4列, 最多可以安排4个因素。正交设计就是从选优区全面试验点(水平组合)中挑选出有代表性的部分试验点(水平组合)来进行试验。图3标有试验号的9个“(·)”, 就是利用正交表 $L_9(3^4)$ 从27个试验点中挑选出来的9个试验点。9组试验参数分别为①A₁B₁C₁; ②A₂B₁C₂; ③A₃B₁C₃; ④A₁B₂C₂; ⑤A₂B₂C₃; ⑥A₃B₂C₁; ⑦A₁B₃C₃; ⑧A₂B₃C₁; ⑨A₃B₃C₂。

如图3所示, 9个试验点均衡地分布于整个立方体内, 有很强的代表性, 能够比较全面地反映选优区内的基本情况。

2 数值模拟结果分析

利用所建立的有限元模型和选取的工艺参数, 对变形过程进行了9组数值模拟试验, 分析了在不同的参数匹配下对三通管成形性能的影响, 得到了不同工艺参数条件下零件的应变场、厚度分布等计算结果, 通过比较找出最优的一组水平参数。比较结果发现, 三通管的主管中部壁厚增加最严重, 是起皱的危险区, 而支管顶部及过渡部位是拉伸失稳的危险区, 在此处容易发生破裂。每组参数之间成形性能变化比较大, 有的出现了严重的破裂或者褶皱。图5所示为三通管的数值模拟的成形极限图和壁厚分布图。

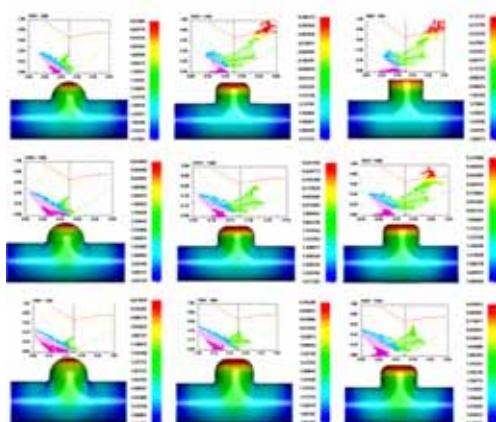


图5 9组试验的数值模拟结果图

Fig. 5 Results of numerical simulation

分别对选择的9组参数进行三通管的模拟分析, 选取成形结果中的三个输出结果(最大支管高度H, 最小厚度D_{min}, 最大厚度D_{max})作为目标函数。并把结果填入极差分析表中(见表3), 计算

平均值和极差 R 。

用极差值分析每个参数对每一个目标函数的影响值,某个参数的在同一个目标函数下的极差值的大小反应的是该参数对这个目标影响的大小。同时,根据单个参数对单个目标函数的平均值 k_i 的大小,判断出单个参数的最优值,进而得到所有参数的优组合。

定义选定的正交表中其中一个因素在某一相同水平 i 下的所有测得的实验指标结果分别为:

$$K_{i1}, K_{i2}, \dots, K_{in} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: n 代表该水平下的实验次数; i 代表该因素所有的水平数。

则可根据式(1)计算出该因素 i 在该水平下的平均值:

$$K_i = \sum K_{ij} (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

因素 i 的单值平均数值为

$$k_i = K_i / n (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

再计算因素 i 的极差值,即是在该因素所有不同水平下所对应的平均值中,最大平均值与最小平均值的差值。即:

$$R = \max(K_i) - \min(K_i) \quad (4)$$

根据公式计算出三因素的极差值:

$$K_1 = 29.401 + 31.81 + 34.523 = 95.734$$

$$K_2 = 35.311 + 35.178 + 35.061 = 105.55$$

$$K_3 = 35.277 + 35.205 + 35.112 = 105$$

然后计算各因素同一水平的平均值:

$$k_1 = 95.734 / 3 = 31.911$$

$$k_2 = 105.55 / 3 = 35.183$$

$$k_3 = 105.594 / 3 = 35.198$$

再计算每个参数的极差值 R :

$$R = \max(K_i) - \min(K_i) =$$

$$35.198 - 31.911 = 3.287$$

通过这种计算方法计算出因素在各自水平下的极差值,结果如表 2、3 所示,根据极差大小,判断影响每个目标函数的因素的主次顺序。

3 个输出中要求支管高度越高越好,最小壁厚越大越好,最大壁厚越小越好,根据极差大小,排列出参数影响的主次为: 支管高度:BAC; 最小壁厚:ACB; 最大壁厚:BCA。

第一步根据各目标函数下不同水平的平均值确定各个目标下的最优组合为: 支管高度: $A_3 B_3 C_3$; 最小壁厚: $A_1 B_3 C_1$; 最大壁厚: $A_1 B_1 C_1$ 。

可以看出每个目标函数下的最优组合并不是都一样,接下来要综合分析各个参数的影响,来确

定最后的最优组合。对于内压力(因素 A),它对支管高度大小排第二位,此时取 A_2 ; 其对最小壁厚影响排第一位,取 A_3 ; 而其对最大壁厚影响排第三位,为次要因素,因此 A 可取 A_2 或 A_3 ,但取 A_3 时,支管高度比取 A_3 明显高,而最小壁厚和最大壁厚差别不明显,故 A 因素取 A_2 。同理可分析 B 取 B_3 ,C 取 C_2 , 优组合为 $A_2 B_3 C_2$ 。这个结论与模拟结果相吻合。

表 2 试验结果

Table 2 Test result

试验号	试验因素			输出/mm		
	A	B	C	支管高度	最小厚度	最大厚度
1	1	1	1	29.401	0.823	1.476
2	2	1	2	35.311	0.506	1.577
3	3	1	3	35.277	0.112	1.660
4	1	2	2	31.810	0.855	1.555
5	2	2	3	35.178	0.553	1.611
6	3	2	1	35.205	0.674	1.698
7	1	3	3	34.523	0.873	1.622
8	2	3	1	35.061	0.785	1.666
9	3	3	2	35.112	0.616	1.736

表 3 试验结果极差分析表

Table 3 Analysis of test result

类别	实验因素	内压力/MPa 轴向进给/mm 背压/(10 ⁴ N)		
		K ₁	K ₂	K ₃
支管高度	K ₁	95.734	99.989	99.667
	K ₂	105.55	102.195	102.233
	K ₃	105.594	104.696	104.978
	k_1	31.911	33.33	33.222
	k_2	35.183	34.065	34.078
	k_3	35.198	34.899	34.992
厚度	极差 R	3.274	1.569	1.77
	K ₁	2.551	1.441	2.282
	K ₂	1.844	2.082	1.977
	K ₃	1.402	2.274	1.538
	k_1	0.850	0.480	0.760
	k_2	0.615	0.694	0.659
度	k_3	0.467	0.758	0.513
	极差 R	0.383	0.278	0.247
	K ₁	4.653	4.713	4.840
	K ₂	4.854	4.864	4.868
	K ₃	5.094	5.024	4.893
	k_1	1.551	1.571	1.613
大	k_2	1.618	1.621	1.623
	k_3	1.698	1.675	1.631
	极差 R	0.347	0.104	0.180

3 优化结果和实验对比

把正交试验设计得到的最优解的参数进行试验,并和数值模拟结果相对比,图 6(a)所示为文献[8]实验中的实际成形结果,内压为 20 MPa,左右两端轴向进给量都为 35 mm,背压力为 1.0 ×

10^4 N。可以看出实验和模拟结果吻合,在支管高度,壁厚分布两个评价指标上都相同,说明通过优化设计数值模拟能快速找出三通管内高压成形的最优参数加载路径。

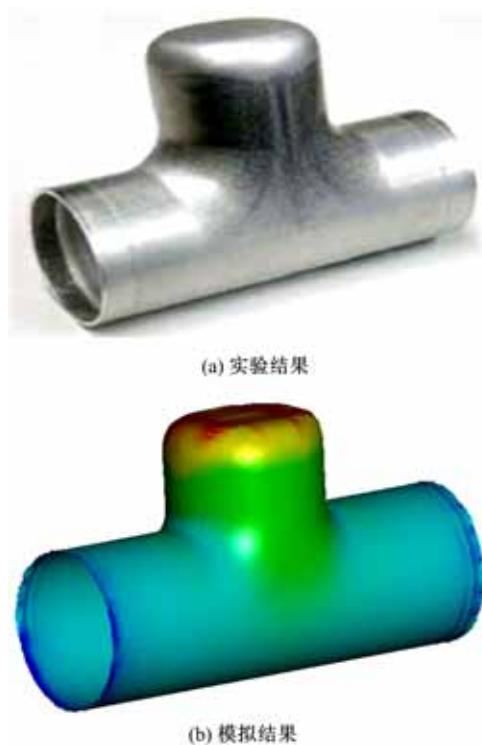


图 6 实验结果和数值模拟结果

Fig. 6 Results of test and numerical simulation

4 结束语

借助实验优化正交设计的方法,建立了 T 型管内高压成形的内压力、轴向进给力、背压力三因素三水平的正交表模型,对具有代表性的 9 组参数进行试验,找到最优组合参数。结果表明:正交试验是用部分试验来代替全面试验的,它不可能像全面试验那样对各因素效应、交互作用一一分析;当交互作用存在时,有可能出现交互作用的混杂。虽然正交试验设计有上述不足,但它能通过部分试验找到最优水平组合,可以解决内高压成形中的工艺参数优化问题。最后通过试验验证了优化结果的可行性,提高工作效率并节约了试验原材料。

参考文献:

- [1] Rimkus W, Bauer H, Mihsein M J A. Design of load curve for hydro-forming application[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 108:97-105.
- [2] Yang J B, Jeon B H. Design sensitivity analysis and optimization of the hydro-forming process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113: 666-673.
- [3] 箫榕元. 管液压试验条件之最佳化研究[D]. 台中: 国立中兴大学, 2002.
- Hsiao Pou-yuan. A study on optimization of the loading conditions for tube hydroforming [D]. Taichung: National Chung Hsing University, 2002.
- [4] Abedrabbo N, Averill Zafar. Optimization of a tube hydro-forming process[C]// SAE Paper 980449.
- [5] Dohmann F, Hartl Ch. Hydro forming-applications of coherent FE-simulations to the development of products and processes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 150:18-24.
- [6] Abe H. The state of the art in tube hydro forming technology in Japan[C]// Proceedings of the TUBE-HYDRO, Aichi, Japan, 2003:42-43.
- [7] 杨兵, 张卫刚, 林忠钦. 一种管件液压试验加载路径的设计方法[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(6): 893-897.
- Yang Bing, Zhang Wei-gang, Lin Zhong-qin. A method to design the loading path for tube hydro-forming process[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(6): 893-897.
- [8] Manabe Ken-ichi, Suetake Masamitsu. Hydroforming process optimization of aluminum alloy tube using intelligent control technique [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46: 1207-1211.