

# 三通管液压成形加载路径模糊控制优化

周 林,程晓民

(宁波工程学院 机械工程学院,浙江 宁波 315016)

**摘 要:** 为准确高效地获得优化的管材液压成形加载路径,提出一种结合模糊控制与自适应模拟的实时反馈优化方法,建立缺陷控制规则,通过模糊控制器在有限元模拟过程中实时侦测缺陷的发展趋势并反馈至模拟程序以调整工艺参数,以避免起皱及破裂缺陷的发生,最终获得优化的成形加载路径。通过对典型液压成形件——三通管零件的研究表明:优化加载路径后零件成形质量有了明显改善,模糊控制实现了预期的控制目标。

**关键词:** 管材液压成形;加载路径;优化;模糊控制

**中图分类号:** TG394

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2009)03-0182-04

## Fuzzy logical controlled loading path optimization for T-shaped tube hydroforming

ZHOU Lin, CHENG Xiao-min

(School of Mechanical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China)

**Abstract:** In order to overcome the disadvantages of conventional optimization methods, a feedback optimization method consisting of fuzzy logic control algorithm and adaptive simulation is proposed. By failure control rule constituted, failure indicators obtained from the simulation results are used as the input of the fuzzy logical control, and the output sets of the fuzzy logical control are used for adjusting the loading path. In this way, a reasonable loading path for hydroforming parts can be obtained. Its validity is verified by the optimization results of T-shaped tube.

**Key words:** tube hydroforming; loading path; optimization; fuzzy logical control

管材液压成形过程中所施加的加载路径,即内压力及轴向进给与时间的关系曲线,对成形结果有很大影响,不当的加载路径会使成形过程中出现破裂、起皱和失稳等缺陷<sup>[1]</sup>。因此,近年来国内外众多学者对管材液压成形加载路径优化方法进行了研

究。箫铭元<sup>[2]</sup>以 T 形管为研究对象,采用共轭梯度法结合有限元仿真进行液压成形加载路径优化研究。N. Abedrabbo 等<sup>[3]</sup>利用优化软件 Heeds 结合有限元软件 LS-Dyan 对管件在方形模腔内胀形进行参数优化研究。F. C. Lin 等<sup>[4]</sup>采用全因素试验设计法

收稿日期: 2009-06-10

基金项目: 浙江省教育厅科研项目(Y200805385);宁波市自然科学基金资助项目(2006A610028)

作者简介: 周 林(1980— ),男,江苏扬州人,讲师,博士,主要从事塑性成形工艺及 CAE 的教学与研究。

与数值模拟相结合来确定加载路径对成形的影响规律,并选择合理的加载路径。A. Aydemir 等<sup>[5]</sup>采用自适应仿真的方法,运用 Abaqus 软件与模糊控制理论来优化 T 形管的加载路径。杨兵等<sup>[6]</sup>也提出一种结合 LS-Dyan 仿真与模糊逻辑控制的方法,对加载路径进行了优化。邱建新等<sup>[7]</sup>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。

由于液压成形的加载路径很难用显函数形式表达,而传统数值模拟及多目标优化方法需要大量仿真工作,耗费人力物力,并且不能实现对加载路径的全程控制,往往只是对极限值的优化。笔者提出一种结合模糊控制与自适应模拟的实时反馈优化方法,建立缺陷控制规则,通过模糊控制器在有限元模拟过程中实时侦测缺陷的发展趋势并反馈至模拟程序以调整工艺参数,以避免起皱及破裂缺陷的发生,最终获得优化的成形加载路径。

1 基于模糊控制的自适应模拟

本研究借助 Matlab 软件中模糊控制工具箱及 Dynaform 有限元模拟软件进行管材液压成形加载路径的优化。模糊控制子程序作为控制程序分析各成形阶段模拟结果,输出载荷增量  $\Delta p$  和  $\Delta f$ , 提供给有限元模拟程序进行下一步运算。运用 Dynaform 软件,既可方便地从后处理器中获得成形结果,又可以方便地中断计算进程、调整载荷大小并重新提交继续计算。整个工作的流程如图 1 所示。

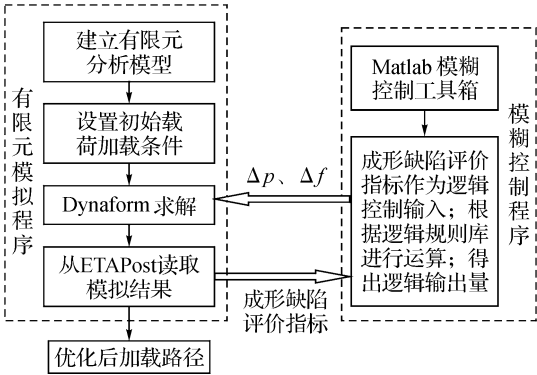


图 1 基于模糊控制的自适应模拟流程  
Fig. 1 Adaptive simulation approach based on fuzzy logic control

2 三通管液压成形加载路径的模糊控制优化

三通管类零件液压成形过程工艺控制复杂,需

要内压与轴向进给的合理配合才能确保成形合格的零件。如果内压力过大而轴向进给过慢,易使管材过度变薄而发生破裂缺陷;而内压力太小且轴向进给过快时,管材无法有效地贴紧模具内壁,容易导致起皱缺陷。现以三通管自由胀形为例,探讨加载路径的模糊控制方法,以期防止成形过程中成形缺陷的产生,并获得合格的几何尺寸及均匀的壁厚分布。

2.1 有限元模型建立

本研究采用四节点 BT 壳单元对管材进行网格划分。图 2 所示为三通管有限元模型,由于具有对称的几何外形,为节省模拟计算时间,故可将其简化为原模型的 1/2。完整的模型包括管坯、模具及左右推杆,研究选用的管坯为 LF21 (3A21、AA3003) 防锈铝挤出型材。

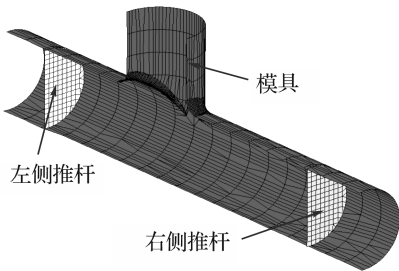


图 2 三通管液压成形有限元模型  
Fig. 2 FEM model of T-shaped tube hydroforming

2.2 模糊控制策略

针对三通管液压成形特点,采用模糊语言来描述管坯胀形过程中可能发生的成形缺陷,用模糊逻辑规则描述成形缺陷与控制缺陷所需要的载荷变化关系。对于支权管类零件自由胀形过程,相同减薄率情况下,极限压力的增大并不有利于支管的生长,而决定支管高度及壁厚分布的主要因素是轴向进给,因此这里选择轴向进给作为模糊控制的输出量,而内压加载路径保持不变。对于三通管自由胀形,支管部分以胀形为主,因此厚度会较初始管材厚度减薄,其中支管顶端中心点处更是厚度变薄最严重的地方,模糊控制时选择该点作为参考点,如图 3 所示。以参考点最小厚度值作为输入的归属函数,同时以该节点厚度的变化率作为另一输入归属函数,以轴向进给增量  $\Delta f$  作为输出变量的归属函数。

由输入归属函数将输入变量  $t_{min}$  和  $\Delta t$  分为小、中、大 3 个档次,同样输出变量  $\Delta f$  值也被分为小、中、大 3 个档次,小、中、大分别用 S、M、B 表示。根据成形机理分析,可以推论出 9 条规则来判断相应

的输出变量  $\Delta f$  值的大小,如表 1 所示。

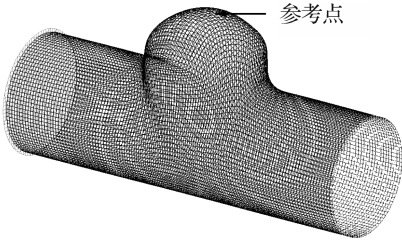


图3 参考点位置示意图

Fig.3 The inspect point position

表1 三通管液压成形模糊控制规则库

轴向进给增量 $\Delta f$		归属函数 $\varphi_1$		
		S	M	B
归属函数 $\varphi_2$	S	B	S	S
	M	B	M	S
	B	B	B	M

2.3 结果与讨论

模拟过程分 20 步进行,每步模拟结束后,根据模拟结果获得输入变量,输入模糊控制系统,经过输入参数模糊化、模糊推理和解模糊化,得到相应输出变量  $\Delta f$ ,再反馈至有限元软件,调整下一步加载路径设置,重新提交任务继续运算,如此反复直至最终得到优化的轴向进给加载路径。为了便于比较加载路径优化效果,在相同条件下进行未优化的线性轴向进给加载路径的模拟,使轴向进给分别为 30 mm 和 50 mm。各组模拟中采用的内压加载路径均为线性增大至 60 MPa,获得的内压与轴向进给加载路径如图 4 所示。图 5 所示为不同加载路径下最终成形的三通管厚度分布云图。

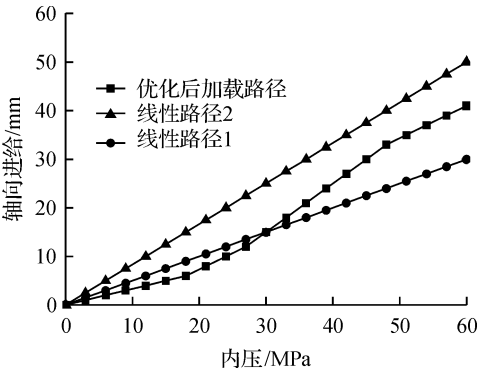


图4 内压与轴向进给加载路径

Fig.4 Loading path of pressure and axial feeding

从图 4 可以看出,经模糊控制优化后的加载路径为曲线加载路径。在成形前期,轴向进给增加较缓,而相对的内压增大较快;而成形中后期,轴向进给

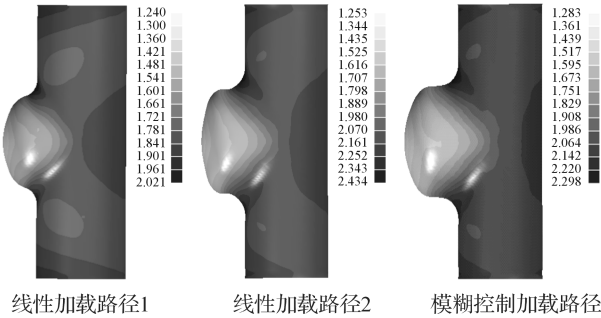


图5 不同加载路径下三通管壁厚(mm)分布的比较

Fig.5 Contrast of thickness distribution under different loading paths

增加较快,内压增大趋缓。比较图 5 可以看出,线性加载路径 1 下三通管壁厚减薄最严重,最小壁厚为 1.24 mm;线性加载路径 2 下增大轴向进给量,则壁厚变薄较路径 1 下得到改善,最小壁厚为 1.253 mm,但同时管坯局部增厚却较路径 1 下严重,最大壁厚为 2.434 mm,此时支管高度为 16.2 mm;经模糊控制优化加载路径后,三通管壁厚减薄与增厚均得到明显改善,最小和最大壁厚分别为 1.283 mm 和 2.298 mm,同时路径优化后的成形件支管高度为 19.6 mm,也大大好于线性路径时的情况。

为进一步分析不同加载路径下管坯厚度变化的情况,沿三通管对称面剖切,分析对比截面上管坯厚度的分布,如图 6 所示。对比 3 种加载路径下截面厚度变化可以发现,优化加载路径后的三通管截面处管坯厚度分布最均匀,在最易发生破裂的支管顶端部位管坯厚度减薄得到了较好的控制,而最易增厚的区域即圆角过渡区,壁厚增厚较线性路径也无明显变化。可见,加载路径经优化后的管坯厚度分布较线性路径时有了很大改善,模糊控制实现了预期的控制目标。

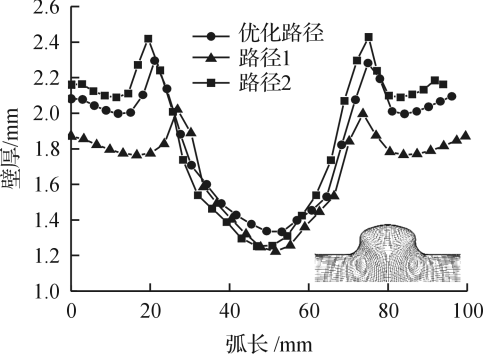


图6 三通管对称截面厚度分布比较

Fig.6 Thickness distribution contrast of T-shaped tube cross-section

### 3 结 语

管材液压成形是一种先进的柔性制造技术,加载路径对管材成形质量有着显著影响。针对三通管液压成形特点,选择轴向进给作为模糊控制的输出量,以支管顶端中心点作为参考点,以参考点最小厚度值及厚度变化率作为输入量,建立模糊控制规则库,将模糊控制与数值模拟相结合,获得优化的加载路径。研究表明,内压加载路径经模糊控制优化后的三通管成形质量得到提高,模糊控制实现了预期的控制目标,优化后内压加载路径可作为工艺方案设计及工艺试验的指导。

#### 参考文献:

- [1] HARTL C. Research and advances in fundamentals and industrial applications of Hydroforming [J]. J Mater Process Technol, 2005 (167): 383-392.
- [2] 箫铭元. 管液压成形负载条件之最佳化研究[D]. 台湾: 台湾中山大学, 2002.

(上接第164页)

### 4 结 语

采用三正两反拉深工艺达到了产品的壁厚要求,该正反拉深级进模结构设计合理,定位准确,操作简单。工艺设计过程中充分运用 Dynaform 软件辅助设计、校核,减少了试模、修模次数,节约了成本,提高了效率。经实际生产验证,生产的零件完全达到了图纸要求,且模具寿命长,能够高效、高质地连续生产。

湾:台湾中山大学,2002.

- [3] ABEDRABBO N, ZAFAR N, AVERILL R, et al. Optimization of a Tube Hydroforming Process [R]. USA, Ohio State University, 2004.
- [4] 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.
- [5] AYDEMIR A, DE VREE J H P, BREKELMANS W A M. An adaptive simulation approach designed for tube hydroforming processes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159 (2): 303-310.
- [6] 杨兵, 张卫刚, 林忠钦. 一种管件液压成形加载路径的设计方法 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40 (6): 893-897.
- [7] 邱建新, 张士宏, 李国禄, 等. 均匀设计法、神经网络和遗传算法结合在内高压成形工艺参数优化中的应用 [J]. 塑性工程学报, 2005, 12 (4): 76-79.

#### 参考文献:

- [1] 中国机械工程学会. 中国模具设计大典 [M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2003.
- [2] 王孝培. 冲压手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 王秀凤, 郎利辉. 板料成形 CAE 设计及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [4] 印书范, 吴澍守, 张荣清. 散热片自动叠片级进模设计 [J]. 模具工业, 2009, 35 (3): 5-18.
- [5] 罗国志. 静簧片级进模设计 [J]. 模具技术, 2009 (2): 18-20.