

板料拉延成形的数值模拟与网格试验法

项辉宇¹, 冷崇杰¹, 钟约先², 王海涛¹

(1. 北京工商大学 机械自动化学院, 北京 100037; 2. 清华大学 机械系, 北京 100084)

摘 要: 为了对板料拉延进行缺陷预测, 在分析板料成形数值模拟和网格试验技术的基础上, 采用数值模拟进行拉延成形分析, 以及网格试验法进行成形缺陷成因判断, 并将两者综合应用进行拉延成形缺陷预测和工艺优化的实例中。

关键词: 数值模拟; 有限元方法; 板料成形; 网格试验法

中图分类号: TG 386

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2009)04-0443-04

板金属拉延成形过程中板料上各点的应力-应变分布不均匀; 由于模具设计或工艺不合理导致冲压过程中各种各样的成形缺陷(如起皱、破裂、回弹超差等)。数值模拟是解决覆盖件成形问题的有效手段^[1-3], 得到制造业的广泛应用^[4], 美国通用、福特, 德国大众、奔驰, 日本丰田, 以及国内主要汽车企业都已开始应用该技术指导汽车覆盖件的开发和生产。分析板料成形问题主要有外形观察法、分段冲压法、切口分离法、网格试验法等^[5]。网格试验法便于对局部区域的应变分布进行测量, 研究变形条件、成形工艺、模具结构等方面的合理性与可靠性, 是解决覆盖件冲压成形质量问题的有效办法。本文采用数值模拟与网格试验相结合的方法研究了板类拉延成形方法。

1 板料成形数值模拟法与网格试验法

1.1 板料成形数值模拟的动力显式算法

建立板料冲压成形有限元方程的途径有2种, 即 T.L 法^[6]和 U.L 法^[7]。以板料为研究对象, 在经过有限元离散化之后建立的坯料运动方程

$$Mu(t) + Cu(t) + f_i = f_e \quad (1)$$

式中, M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; u 为节点位移矢量; f_i 为等效内力矢量; f_e 为等效节点力矢量。

采用适当的处理方法, M 和 C 可以化为对角阵。考虑 t 时刻的运动方程, 由中心差分算法可得 $t + \Delta t$ 时刻的节点位移

$$u^{t+\Delta t} = \left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right)^{-1} \left[f_e - f_i + \frac{M}{\Delta t^2} (2u^{\Delta t} - u^{t-\Delta t}) + \frac{C}{2\Delta t} u^{t-\Delta t} \right] \quad (2)$$

动力显式格式(dynamic explicit algorithm, 简称 DE), 每个自由度的位移由式(2)独立求出。由于中心差分算法是条件稳定的积分算法, 为保证式(2)的计算稳定性, 时间步长 Δt 不能超过系统的临界时间步长 Δt_{cr} , 即 $\Delta t \leq \Delta t_{cr}$, 一般可令 $\Delta t = \alpha \Delta t_{cr}$, α 取 0.5~0.8。实践证明, 显式积分方法所允许的时间步长恰好与精确描述材料本构关系所要求的时间步长是同阶的。

1.2 网格试验法

在冲压变形之前, 在毛坯表面欲测定区域印制一定形状的网格, 一般为圆形或正方形网格。在冲压过

收稿日期: 2007-10-29。

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3083018); 教委科技发展计划面上资助项目(KM200610011009); 北京市优秀人才培养资助项目(20061D0500300138)。

作者简介: 项辉宇(1966-), 男, 山东青岛人, 教授。

程中,由于毛坯塑性变形,引起网格的形状和尺寸发生变化.通过对变形后网格尺寸变化的测量,获得有关变形和应变等信息,从而研究毛坯测量区域的变形状态、应变路径以及破坏时的极限应变等.目前视觉测量和图像处理技术已经成功应用于网格试验法主应变测量.

2 车体后门盖成形数值模拟与网格试验分析

2.1 成形过程数值模拟

图1为汽车后门盖局部图,图中的凹槽角部(圆圈标记处)位置,在冲压成形后或经过使用后出现微裂纹现象.该零件采用厚度为0.8 mm的08Al磷化钢板冲制,分3道冲压工序成形.首先正向拉伸成形,主表面及反向拉伸后门牌凹陷和后盖窗框;然后切边、冲孔,切除窗口和周边废料;最后框周弯曲和小孔侧冲.由于后2个工序对角部变形几乎没有影响,因此主要考察第1工序(拉伸工序)的应力-应变分布情况.板料有关参数包括初始坯料尺寸、板料厚度和板材性能参数;模具有关的参数包括模具几何参数、凸模速度、压边力和摩擦润滑条件等.

采用专用板料成形仿真模拟软件Dynaform,研究覆盖件成形时变形材料的流动规律及各种参数对成形的影响.数值模拟时,板料采用弹塑性材料模型,考虑板料的面内各向异性,选用Ls-dyna材料库中的MAT-3-PARAMETER-BARLET模型,泊松比 $\nu=0.3$,屈服应力 $\sigma_s=237$ MPa, Lankford系数 $r_0=1.87$, $r_{45}=1.27$, $r_{90}=2.17$,硬化指数 $n=0.227$.Dynaform中模具与坯料的几何模型都是曲面模型,由于后门盖的几何结构沿YOZ平面对称,为简化计算取1/2网格模型计算.有限元网格确定以后,进行成形过程数值模拟时,可以改变的参数主要是压边力,等效拉伸筋阻力和接触摩擦系数等.由于成形过程的特点,进行覆盖件成形仿真时,一般采用定常压边力进行计算.根据经验,一般取单位面积压边力为2.5 MPa,接触面的摩擦系数取0.11.由于该零件的主要缺陷是角部裂纹,进行数值模拟结果分析评价时,关键在于成形过程中材料的流动和局部变薄分布情况.

数值模拟的优势在于可以观察成形过程中每一瞬时、应力-应变分布情况,而采用试验方法通常很难获得这些中间过程参数.将整个拉伸成形过程的模拟结果分成20个工作步,分析其中几个典型步的相应结果,就可以对整个成形过程的规律有整体认识.拉伸初始和成形结束时材料厚度方向变形分布情况如图2所示.在工艺补充部分和后门盖牌照区左右上角部位厚向应变较大,成形结束时材料变薄明显.由于残余应力的存在和变形不均匀,这些部位在拉伸成形过程中或经过一段时间的使用后出现裂纹现象是可能的.

由模拟结果可以看出,出现局部裂纹的主要原因是角部应变较大,说明在现有工艺条件下圆角半径不

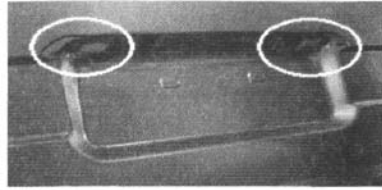


图1 汽车覆盖件缺陷区域照片

Fig.1 Area photograph of the workpiece with defects

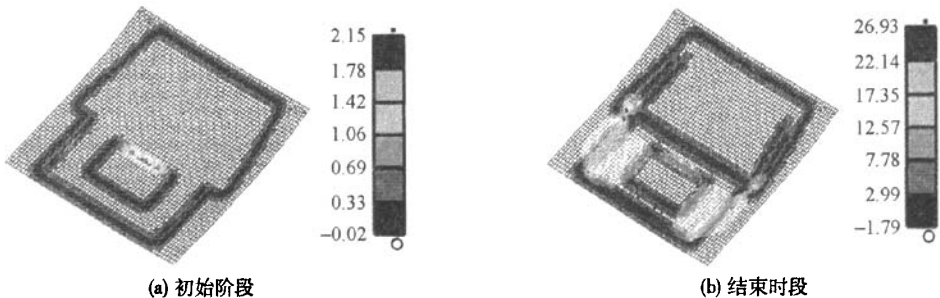


图2 拉伸板厚阶段变薄分布图

Fig.2 Thinning distribution at the early drawing

合理, 需要适当增大.

2.2 成形缺陷区域网格试验法应变分析

为了测得角部缺陷区域的应变分布, 弄清裂纹的形成原因, 采用网格试验法进行应变测量^[8]. 该零件为对称结构, 只取其中一个角部位置及相邻区域进行分析. 首先在平板毛坯上该部位印制网格, 依次经过 3 个冲压工序后最终成形, 取出样件. 为防止局部变形, 采用激光切割法将测量区域的样板切下, 根据网格变形进行应变分析. 图 3 为完成所有冲压工序后零件测量区位置网格的变形形状. 网格节点变形后的位置测量和主应变的分析计算采用 ASAME 完成.

成形极限图是一种对特定冲压工艺和材料进行缺陷诊断的工具, 其纵轴为最大主应变的百分值, 水平轴为最小主应变百分值. 工件的应变状态可以根据其最大、最小主应变在 FLD 中的位置进行判断. 将工件各部位的最大、最小应变值在图中绘出, FLC 以下的点被认为是安全的, 而 FLC 以上的点意味着工件破裂. 图 4 为测量区域的 FLD 图, 从应变分布可以看出, 整个测量区域都处在安全区, 有部分位置的应变值接近 FLC 曲线. 图 5 为厚向主应变的分布图, 在角部位置厚向应变值较大, 最大变薄量为 23.6%, 而在附近区域的最小变薄量仅为 4.2%, 说明在冲压过程中角部位置变薄量较大, 而且该区域的应变分布很不均匀, 因而该零件在冲压成形后出现裂纹或使用一段时间之后, 出现疲劳破坏的直接原因是局部变薄量较大和不均匀变形.

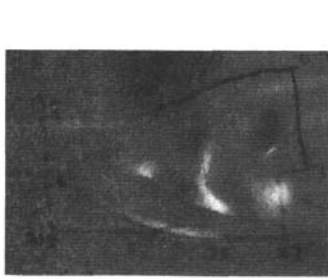


图 3 成形后网格形状
Fig. 3 Photograph of grid pattern
at local area

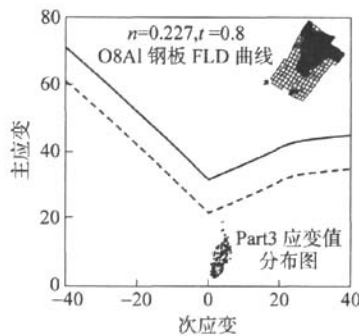


图 4 成形极限图
Fig. 4 Forming limit diagram

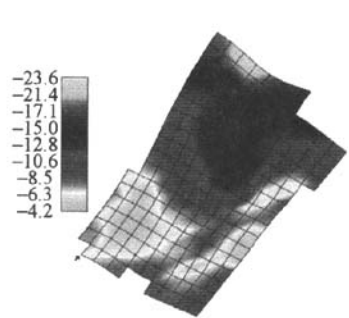


图 5 厚向应变分布(百分比)
Fig. 5 Thickness strain distribution

结合本例中裂纹部位的应变特点, 测量区域的最大、最小应变均为正值, 属于胀形状态. 减小长轴应变和增大短轴应变来有效地减少裂纹的发生. 基于这种考虑, 在对原冲压工艺和模具进行改进时, 提出改进方案为: 1) 适当调整压边力, 从总体上减小最大应变值; 2) 对与破裂部位应变长轴垂直的凹模圆角和拉延筋进行适当打磨, 减小该方向的拉延阻力, 从而减小长轴应变值. 在实际生产中, 对冲压工艺和模具相应部件进行了局部调整, 使得冲压件变形相对均匀, 同时由于降低了最大变形量, 从而减少了裂纹的出现, 稳定了产品质量.

3 结束语

用数值模拟和试验技术相结合的方法, 分析了板料成形缺陷的成因和解决方案. 研究表明, 采用数值模拟技术, 能从总体上把握成形过程的规律, 可分步研究成形过程, 找出缺陷的成因, 并可进行工艺方案优化. 网格试验方法可以直接对局部缺陷位置进行定量测量分析, 获得成形后局部位置的塑性主应变分布, 结果比较准确、可靠. 将数值模拟和网格试验技术结合起来, 是解决大型覆盖件成形质量问题的有效方法.

参考文献:

- [1] ROJEK J, ZIENKIEWICZ O C. Advances in FE explicit formulation for simulation of metal forming process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 119(1): 41-47.
- [2] DONG Hong-zhi, LIN Zhong-qin. Investigation of sheet metal forming by numerical and experiment[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 103(3): 404-410.
- [3] TISZA M. Numerical modeling and simulation in sheet metal forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 151(2): 58-62.
- [4] TEKKAYA E A. State-of-the-art of simulation of sheet metal forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 103(1): 14-22.
- [5] 杨玉英. 大型薄板成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 17-22.
- [6] HIBBITT H D, MARCAL P V. A finite element formulation for problem of large strain and large displacement[J]. *International Journal of Solids Structures*, 1970, 6(8): 1069-1087.
- [7] MCMEEKING R M, RICE J R. Finite-element formulations for problems of large elastic-plastic deformation [J]. *International Journal of Solids Structures*, 1975, 11(5): 601-616.
- [8] 项辉宇, 钟约先. 大型覆盖件应变分布测量与缺陷分析[J]. *机械科学与技术*, 2005, 24(2): 127-130.
XIANG Hui-yu, ZHONG Yue-xian. Strain measurement and defects analysis for auto-body panel parts[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2005, 24(2): 127-130.

Sheet Metal Forming Analysis With Numerical Simulation and Grid Experimental Method

XIANG Hui-yu¹, LENG Chong-jie¹, ZHONG Yue-xian², WANG Hai-tao¹

(1. School of Mechanical Automation, Beijing Technology & Business University, Beijing 100037, China;

2. Mechanical Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To perform forming defect analysis and prediction of sheet metal parts, based on the study of numerical simulation and experimental method of sheet metal forming, a new approach which combined numerical simulation with grid experiment is proposed. The method to carry out sheet metal forming analysis with numerical simulation, and to perform forming defect analysis for specific local area with grid method is discussed in detail. By means of a practical case study, the approach for forming defect prediction and process optimization by utilizing numerical simulation method combined with experimental method is introduced. The result shows that it is an effective way to solve sheet metal forming defect problems by synthesizing numerical with experimental methods.

Key words: numerical simulation; finite element method; sheet metal forming; grid experiment

(责任编辑 张士璞)