

考虑冲压成形历史的轿车前纵梁总成碰撞仿真

余海燕, 孙 喆

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 以轿车前纵梁总成为对象, 将冲压成形引起的板料厚度减薄、残余应力和等效塑性应变映射到碰撞仿真模型中, 详细分析这些因素对零件碰撞过程中能量吸收和碰撞力的影响规律, 并从兼顾计算精度和计算效率的角度对影响仿真精度的主要因素进行了分析. 结果表明: 与忽略冲压成形历史的碰撞仿真结果相比, 引入冲压成形历史的碰撞仿真所得内能增大, 碰撞力峰值增大及峰值出现时间延后; 厚度变化对零件的吸能特性影响显著, 残余应力和塑性应变对碰撞力的影响显著.

关键词: 冲压成形历史; 碰撞仿真; 纵梁; 映射

中图分类号: U 461.91

文献标识码: A

Crashworthiness Simulation of Automobile Front Rail Assembly with Consideration of Sheet Forming History

YU Haiyan, SUN Zhe

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The thickness thinning, residual stress and effective plastic strain resulted from sheet metal forming process were introduced into the crashworthiness simulation of a front side rail assembly in this work. Influences of these forming effects on the energy absorption and reaction force were analyzed in detail. The main factors determining the calculation precision and its efficiency were discussed. Results show that the internal energy with a consideration of the forming history is larger than that neglecting the forming history. And the peak force is larger and late. Among the thickness, the residual stress and the effective plastic strain, the thickness is the most significant factor for the energy absorption and the residual stress and effective plastic strain are important factors for the reaction force.

Key words: sheet forming history; crashworthiness simulation; front rail; mapping

由钢板制成冲压件需要经过落料、拉深、翻边、冲孔等多道塑性变形工序. 塑性变形带来零件部分区域板厚减薄以及残余应力和塑性应变等. 碰撞是一个涉及材料非线性、几何非线性和接触非线性的复杂动态响应过程, 高度非线性的变形过程对其初始的应力应变状态非常敏感, 成形过程中产生的零件板厚变化、残余应力和塑性应变都对碰撞分析结果的准确性和精度有直接影响^[1-6]. 而目前碰撞仿真中所采用的有限元模型是根据结构理想几何模型而建立, 各零件的截面尺寸、板厚分布和材料性能均是设计值, 未考虑冲压和焊接等制造工艺对零件厚度、几何形状及材料性能的改变. 因此, 将冲压成形历史引入碰撞仿真中对提高碰撞仿真精度和准确性有着极其重要的意义.

轿车前纵梁是轿车的主要吸能部件. 本文以轿车前纵梁总成为对象, 分析各组成零件的冲压成形引起的厚度变化、模具卸载后的残余应力和塑性应变对碰撞仿真结果的影响规律, 并从兼顾计算精度和计算效率的角度对影响因素进行分析, 为进一步提高碰撞仿真结果精度提供参考.

1 仿真方法

如图1所示, 前纵梁总成由2件纵梁外板(外板A和外板B)、轮罩加强件及其内板、纵梁内板及其加强板组成. 这些部件经冲压焊接为纵梁总成. 材料为热镀锌低碳合金钢板, 板厚为1.6~2.4 mm. 为兼顾计算精度和计算效率, 设计如图2

收稿日期: 2010-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(50705067); 上海市数字化汽车车身工程重点实验室开放基金(2008005)

第一作者: 余海燕(1976—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为车身制造工艺. E-mail: yuhaiyan@tongji.edu.cn

所示的技术路线.首先对已经清理好的几何模型进行网格划分.冲压成形仿真需关注圆角、凸台等细小局部特征.如图3所示为外板波纹处,此处基本形状为半圆形凹槽,要保证这些区域成形质量,网格尺寸要非常小,此处网格最小尺寸可能小于1 mm.如果用这样的模型进行碰撞仿真就会导致不必要的计算时间过长,引起计算效率的降低,因此需要按照碰撞仿真要求划分碰撞仿真用网格.表1列出了冲压成形仿真和碰撞仿真所用模型网格的数量及最小尺寸.可见,冲压成形仿真用模型网格数量接近碰撞所用网格数量的3倍,且最小尺寸也远小于碰撞仿真用网格.如果直接用冲压仿真网格模型进行碰撞仿真,计算时间要增加2个数量级.

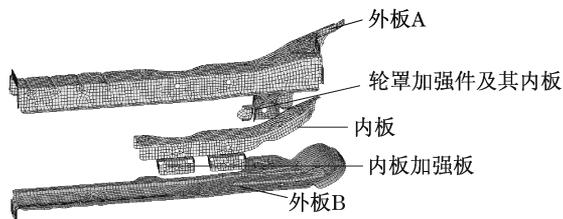


图1 前纵梁总成组成
Fig.1 Members of front side rail

表1 冲压成形仿真与碰撞仿真模型单元数

Tab.1 Elements number of forming simulation model and crash simulation model

部件	单元数目/个						单元总数/个	单元最小尺寸/mm
	外板 A	外板 B	内板	轮罩加强板	轮罩加强板内板	内板加强板		
冲压	10 215	9 217	1 613	1 024	628	236	22 933	0.14
碰撞	3 446	2 505	1 300	518	379	92	8 240	5.75

2 冲压成形仿真

各部件的材料信息如表2所示.采用LS-DYNA软件进行冲压成形仿真.仿真选用三参数Barlat'1989材料模型,单元类型用BT壳单元,选用Forming_one_way_surface_to_surface接触算法,摩擦系数0.12.为提高计算效率,采用一步成形法进行成形模拟.

图4所示为冲压成形仿真获得的零件厚度分布.各部件厚度减薄率均在-30%~20%内,满足质量要求.对图4a所示的外板最大减薄在波纹槽圆角处,而最大增厚在纵梁拐弯处.由于此处总体趋势是受压,导致材料受压失稳,表现为材料多余而发生增厚.外板(图4b)最大减薄处也在波纹槽圆角处,增厚

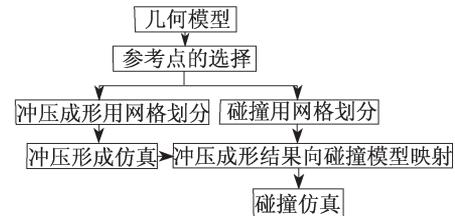


图2 引入冲压成形历史的碰撞仿真方法

Fig.2 Method illustration of introducing the sheet metal forming history into crash simulation

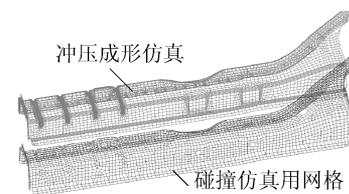


图3 冲压成形仿真和碰撞仿真模型网格

Fig.3 Grids used in forming and crash simulation models

有了网格,进行材料、板厚、模具运动、边界条件等的设置后就可以进行冲压成形仿真,仿真获得包含有厚度、应力和应变的dynain结果文件.然后将这些结果向碰撞模型进行映射,进行必要的模型检查和验证就可以进行碰撞仿真.

最大的在端部翻边弯曲处.与外板相比,纵梁内板曲面复杂程度相对较低,拉深深度降低,故成形性也有显著改善,成形后厚度范围可以达到-10%~10%,成形性较好.

表2 各部件材料及厚度信息

Tab.2 Material type and thickness of the constituent parts

零件	材料	厚度/mm
外板 A	B280P	2.4
外板 B	B280P	2.1
内板	BIF340	1.3
内板加强板	B180	1.6
轮罩加强板	BIF340	2.0
轮罩加强板内板	BIF340	1.8

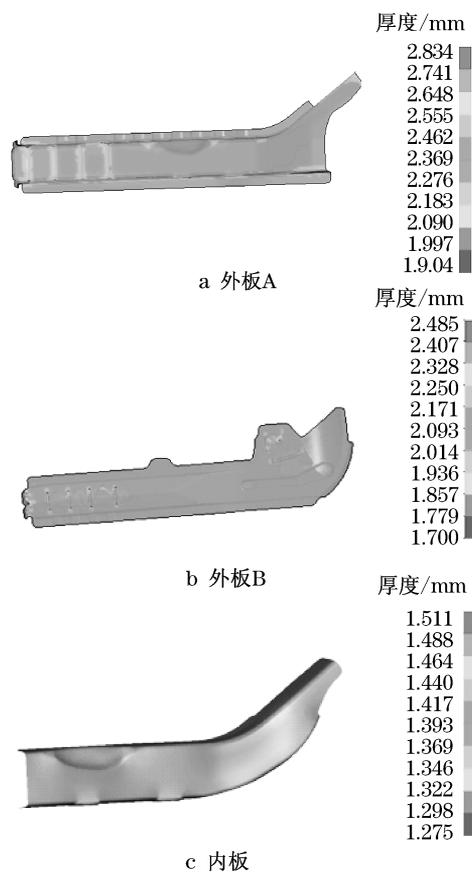


图 4 冲压成形仿真厚度

Fig.4 Thickness obtained in forming simulation

图 5 和图 6 分别为 VonMises 等效应力和等效塑性应变分布. 最大等效应力为 239 MPa, 最大塑性应变超过 0.2. 这说明冲压成形后材料残余应力和塑性应变不仅数值较大, 而且分布不均匀. 如果在碰撞仿真中不考虑这些因素将极大影响碰撞仿真结果的精度.

图 7a 所示为冲压成形后的厚度分布, 图 7b 为通过映射法将成形仿真所得厚度向碰撞仿真模型映射所得厚度分布. 可见, 映射后厚度分布规律与成形后相同, 但数值范围发生了变化, 成形后厚度范围为 1.275~1.511 mm, 而映射法所得厚度范围为 1.287~1.493 mm. 映射过程产生的误差主要有两方面: ①局部坐标系建立引起的误差. 在数据映射时需要建立映射与被映射模型的局部坐标系, 如均选择同一基准孔的圆心为坐标原点, 另取两特征点确定坐标轴. 这样就要求成形仿真用模型与碰撞仿真模型在这些特征点上均布置有节点, 否则映射时两者的坐标系就会不一致. 坐标系不一致就会导致本该是 A 节点的结果而映射到 B 节点上, 最终产生结果的偏差. ②碰撞用网格大小. 为了提高碰撞计算效

率, 碰撞计算用网格尺寸比成形仿真网格尺寸大很多, 当 2 个模型节点位置不一致时, 按照插值近似法获得该节点的数值, 由此产生误差.

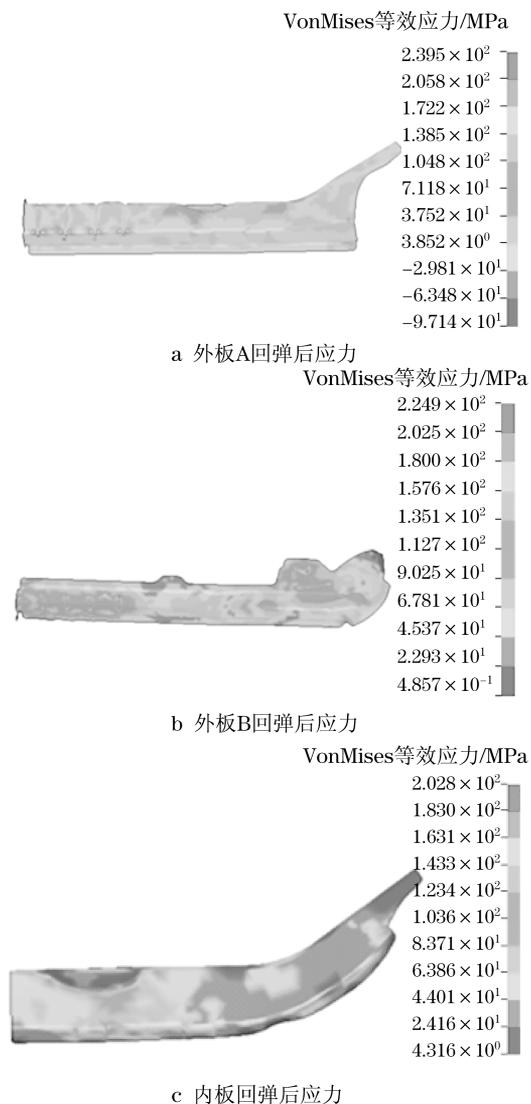


图 5 冲压成形仿真零件回弹后的 VonMises 等效应力

Fig.5 VonMises effective stress obtained in forming simulation

3 碰撞仿真

图 8 所示为碰撞仿真模型, 梁前端与无限大刚性墙相碰. 考虑结构特点, 在梁截面增大处施加固定约束以减小附加弯矩的作用. 刚性墙初始速度 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 质量 300 kg. 碰撞时间 30 ms. 焊点采用如图 9 所示的六面体单元模拟^[7]. 碰撞仿真采用 Cowper-Symonds 模型, 该模型考虑了应变速率的影响, 适合于碰撞这种高应变速率行为的模拟^[8]. 采用

BT壳单元,刚性墙与纵梁的接触以及纵梁自身的接触均选用自动单面接触.

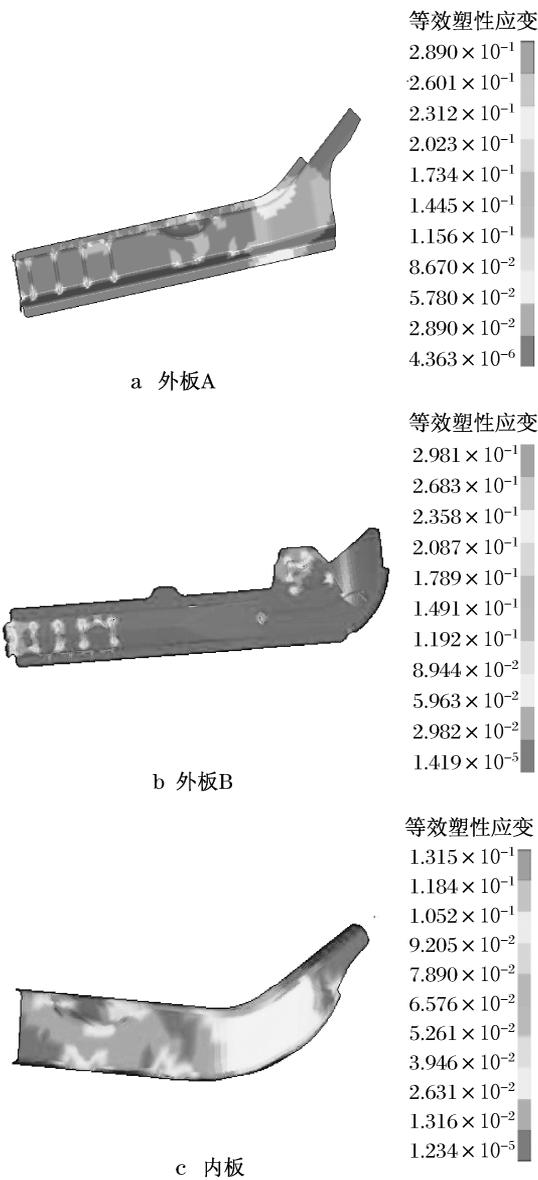


图6 冲压成形仿真

Fig.6 The effective plastic strain obtained in forming simulation

4 结果分析

图10a~c所示分别为忽略冲压成形历史、只考虑厚度变化和考虑厚度变化、残余应力和塑性应变情况下碰撞仿真所得的纵梁总成形状.比较各图可得,忽略冲压成形历史的纵梁总成碰撞发生的褶皱相对均匀,如图10a所示,自前向后各波纹槽依次发生变形而吸能,其他部位变形较小.而图10b,c所示的2种情况褶皱部位及形状与图10a明显不同.

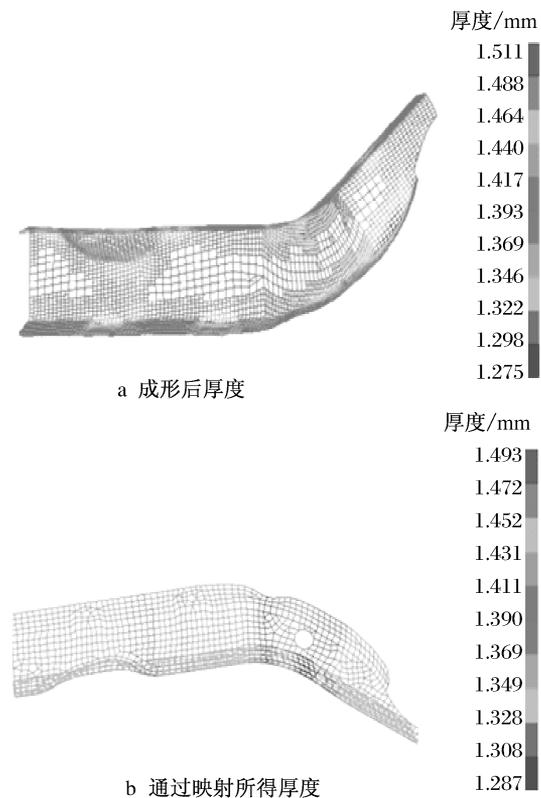


图7 冲压成型结果向碰撞模型的映射

Fig.7 Mapping from forming simulation results to crash simulation model

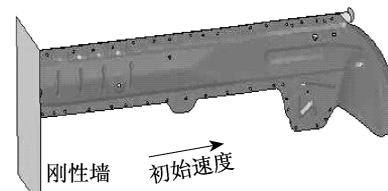


图8 碰撞仿真模型

Fig.8 Crashworthiness simulation model

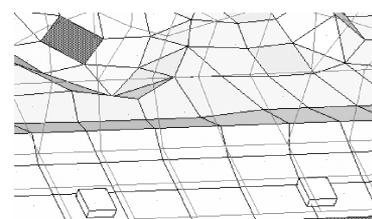


图9 焊点的模拟

Fig.9 Spot weld model

在同一时间下,考虑厚度变化的褶皱变形比不考虑冲压成形历史的变形大,但褶皱部位靠前,这是由于冲压成形引起材料厚度减薄,而厚度减薄会显著降低零件的吸能特性,所以在吸收同样的碰撞能量下厚度薄的零件变形就会增大.褶皱部位靠前是

因为在冲击力作用下厚度减薄使这些区域刚度降低,从而先于其他部位变形.图 10c 与其他 2 种情况相差均较大,发生褶皱变形部位靠后而且变形较小,这可能有两方面原因.一方面是因为冲压成形使得零件中存在残余拉应力,这个拉应力可以抵消一部分碰撞产生的压应力,从而对零件起到了强化作用,从而不易发生变形.另一方面,根据应力波的传递规律^[1],预应力的存在干扰了碰撞力的传递,预应力与碰撞产生的应力波沿着传播方向会发生相互叠加和消减的现象,相互叠加的部位就会发生较大变形,而相减的部位变形较小.

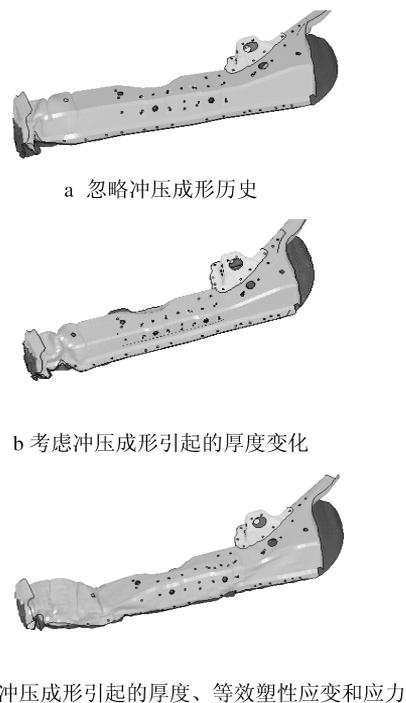


图 10 碰撞仿真 10ms 时变形形状

Fig. 10 Deformed shape of the front side rail at 10ms

碰撞力曲线直接反映了碰撞对象的轴向刚度.如图 11 所示,考虑冲压成形历史的碰撞力在碰撞初期比未考虑冲压成形历史的高,这说明考虑冲压成形历史使零件轴向刚度增加,预应变的存在增加了材料的变形抗力,冲压成形产生的拉应力使得材料承受碰撞压应力的能力增加,故要发生相同的变形所需的外力要显著加大.随着波纹槽压溃变形的开始,是否考虑冲压成形历史 2 种情况所获碰撞力基本一致.而在碰撞后期,考虑所有冲压成形历史低于忽略冲压成形历史情况,这是因为抗弯刚度与厚度成反比,碰撞后期因冲压成形引起的厚度减薄使得零件抗弯能力下降,因而碰撞力下降.另一方面,考虑冲压成形历史的碰撞力峰值时间推后,碰撞力峰

值时间的差异给碰撞能量吸收及衰减提供的时间余量不同,峰值的大小与出现时间共同决定了碰撞瞬间乘员伤害程度,这些对被动安全性分析有着不可忽视的影响.

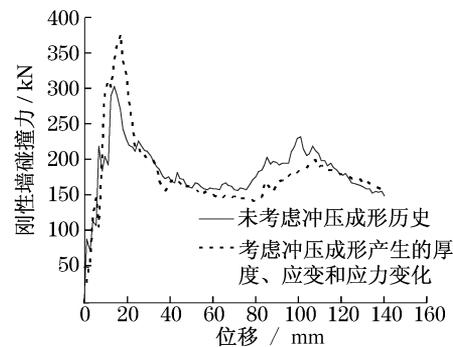


图 11 碰撞力

Fig. 11 Reaction force

图 12 所示曲线为考虑和不考虑冲压成形历史仿真所得的内能变化曲线.只考虑厚度变化情况下内能比忽略冲压成形历史所计算内能小,这是因为厚度减薄降低零件的能量吸收能力.而考虑所有冲压成形历史的内能显著高于其他 2 种情况,且这个差异随碰撞的进行而加大,在 10 ms 时差值达到 2 800 J,比值达到 14%.这说明考虑冲压过程中产生的残余应力和等效塑性应变使得零件吸能能力增强,而冲压成形引起的板厚减薄会降低零件吸能能力.

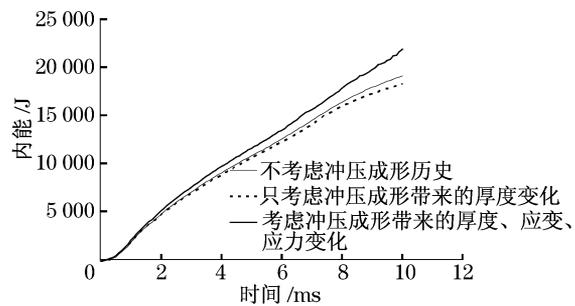


图 12 碰撞过程中吸收的内能

Fig. 12 Internal energy absorbed during the crash

5 计算精度影响因素分析

上述考虑冲压成形历史的碰撞仿真方法不仅涉及到冲压成形分析和碰撞分析 2 种高度非线性过程,还涉及到如何将冲压成形计算的结果向碰撞仿真模型的传递过程,影响这 3 个过程的因素均会对最终的碰撞仿真精度产生影响.下面仅从兼顾计算精度和计算效率方面讨论对本方法影响较大的几个方面,以供参考.

5.1 单元尺寸的选择

冲压成形仿真是单件进行的,而且圆角、凸台等细小的局部特征丰富的部位是冲压成形仿真需要关注的部位,因此冲压成形仿真用单元尺寸较小.碰撞仿真常按整车进行,每个部件的网格数目要控制在一定范围内,否则会造成计算模型规模超大,带来计算效率问题.因此,碰撞仿真单元尺寸可以稍大,以确保仿真精度和计算效率的兼顾.

冲压成形仿真圆角区域不少于5个单元.对于大型覆盖件如果统一采用较小单元会带来计算时间的问题,建议采用由模具网格向毛坯映射的方法获取毛坯的网格.

5.2 冲压成形仿真结果向碰撞仿真模型的映射

在冲压成形仿真结果向碰撞模型的映射过程中首先要建立局部坐标系即参考点.局部坐标系的误差比冲压成形仿真本身的误差还要大,因此建立准确可靠的局部坐标系是据影响整个计算精度的一个非常重要环节.

在冲压成形仿真和碰撞仿真建模之前,需要选择3个关键点,如关键孔的位置、对称面的位置或其他关键部位.冲压成形和碰撞仿真中这些关键部位网格划分保证一致,这样能显著减小结果映射带来的误差.

5.3 采用基于灵敏度的方法

由于整个车身一般有400~500个冲压件,这些冲压件尤其是四门两盖等大型冲压件的冲压成形仿真结果数据量非常大,将所有这些结果均引入到碰撞仿真会带来碰撞计算时间的延长,降低计算效率.为此,可以采用灵敏度分析方法找出对碰撞评价指标相对较灵敏的部件,在碰撞分析时只考虑这些部件的冲压成形历史,这样既能保证碰撞仿真结果的精度又能兼顾效率.

5.4 一步成形法与增量成形法相结合

采用一步成形与增量成形相结合的方法可减少试算的次数.一步成形仿真是基于全量塑性理论的算法,其特点是计算速度快,但精度相对增量理论较低.一般用于估算毛坯形状、成形工艺参数、检查网格质量等.增量算法的特点是精度高但耗时较多,因此常用于精确计算.整个车身一般有400~500个冲压件,这些冲压件尤其是四门两盖等大型冲压件的冲压成形仿真工作非常繁重,采用两者相结合的方法

法可在获得较好精度的前提下提高计算效率.

6 结论

(1) 考虑零件的冲压成形历史可以提高碰撞分析精度.考虑成形历史计算内能增大、碰撞力的峰值增大和峰值出现时间延后.

(2) 冲压成形过程中产生零件厚度、残余应力以及塑性应变变化,厚度变化对零件的吸能特性影响最显著,残余应力和塑性应变的存在与否对碰撞力的影响最显著.

(3) 影响这种方法推广应用的主要问题在于如何协调好计算精度和计算效率.研究有效的从冲压成形仿真向碰撞仿真的数据映射方法是急需解决的问题.

参考文献:

- [1] Rusinek A, Zaera R, Forquin P, et al. Effect of plastic deformation and boundary conditions combined with elastic wave propagation on the collapse site of a crash box[J]. *Thin-walled Structures*, 2008, 46: 1143.
- [2] Durrenberger L, Even D, Molinari A, et al. Influence of the strain path on crash-properties of a crash-box structure by experimental and numerical approaches[J]. *J Phys IV*, 2006, 134: 1287.
- [3] Karagiozova D, Jones N. Dynamic elastic-plastic buckling of circular cylindrical shells under axial impact[J]. *Int J Solid Struct*, 2000, 37: 2005.
- [4] Grolleau V, Galpin B, Penin A, et al. Modelling the effect of forming history in impact simulations: evaluation of the effect of thickness change and strain hardening based on experiments[J]. *Int J Crashworthiness*, 2008, 13(4): 363.
- [5] Chung K H, Kim J, Lee W, et al. Crash performance evaluation of hydroformed-DP-steel tubes considering welding heat effects, formability and spring-back[C]//10th ESAFORM Conference on Material Forming. Zaragoza; Springer erwirbt BioMed Central Group, 2007, 907: 424 - 429.
- [6] Huh H, Song J H, Kim K P, et al. Crashworthiness assessment of front side members in an auto-body considering the fabrication histories [J]. *Int J Mechanical Science*, 2003, 45(10): 1645.
- [7] Matteo P, Michael I F, John E M, et al. Finite element models of spot welds in structural dynamics: review and updating [J]. *Computers and Structures*, 2005, 83: 648.
- [8] Recep G, Sami K. The influences of the residual forming data on the quasi-static axial crash response of a top-hat section[J]. *Int J Mech Sci*, 2009, 51: 350.