21

# 冲压件成形仿真及其预成形模具方案设计

邓劲松<sup>1</sup>,陈辛波<sup>1</sup>,魏宪波<sup>2</sup>,丁华<sup>2</sup>,冯擎峰<sup>2</sup>

(1. 同济大学, 上海 201804; 2. 吉利汽车研究院, 杭州 311228)

**摘要:目的** 预测高强度钢板的冲压成形性。方法 对使用高强度材料的左前地板2号横梁进行 了数字仿真模拟,设计了一种提高板料抗破裂性能的带氮气弹簧的预成形模具。先根据仿真结 果,在采用调整工艺参数的常规手段未果的情况下,分析了破裂原因,再根据成形模拟软件的使用 要求,对氮气弹簧的技术特性进行了处理,保证能代入成形软件。结果 再次成形模拟证明,采用 氮气弹簧的预成形模具,能改善模具受力状态,使成形件不致破裂。结论 预成形模具结构有助 于改善特定形状冲压件的成形性。

关键词: 预成形; 氮气弹簧; 模具结构

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.01.004

中图分类号: TG385.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2014)01-0021-06

### Sheet Panel Forming Simulation and Scheme Design of Pre-forming Die

DENG Jin-song<sup>1</sup>, CHEN Xin-bo<sup>1</sup>, WEI Xian-bo<sup>2</sup>, DING Hua<sup>2</sup>, FENG Qing-feng<sup>2</sup>

(1. Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Geely Automobile Research Institute, Hangzhou 311228, China)

**ABSTRACT**: **Objective** To predict the forming ability of high-strength steel. **Methods** Formability of panel C/MBR\_FRT \_FLOOR\_No. 2\_LH, which adopted HSS, was analyzed in this paper. Pre-forming die with gas spring was designed to improve the anti-split ability of the blank. Firstly, according to the simulation result, the split reasons were analyzed, under the condition that the changing of process parameters by general method was not effective. Secondly, in order to use the parameter of gas spring, the technical characteristic of which was specially treated based on the using requirement of simulation software. **Results** The second simulation result showed that the stress state of die could be improved after adopting pre -forming die structure, and that cracks problems could be avoided. **Conclusion** The results also showed that pre-forming die structure is helpful to improve the forming ability of parts with specific shape.

KEY WORDS: pre-forming; gas spring; die structure

某车型左前地板2号横梁,如图1所示。厚度 为1.8 mm,材质为B340/590DP。产品尺寸:长497 mm,宽129 mm,高45 mm。该零件为汽车车身上典 型的梁形结构件,且为高强度钢板,其形状、材质都 具有一定的代表性。

产品形状特征为:产品顶部局部有安装面,且

与产品顶部呈一定倾斜角度,在图1主视图中虚 线范围内(即顶部斜平面上)具有局部凹陷的结 构,如图1中A-A截面所示。该类凹陷形状在冲 压模具工艺中,属于反向成形,即凹陷方向与成形 方向相反。

收稿日期:2013-08-10;修订日期:2013-11-16

作者简介:邓劲松(1975—),男,重庆人,工程师,主要从事冲压模具成形工艺、钣金试制工艺的研究。



Fig. 1 C/MBR\_FRT\_FLOOR\_No. 2\_LH

# 1 CAE 成形模拟分析及结果<sup>[1]</sup>

采用 AutoForm 进行 CAE 成形仿真分析。单元 类型为弹塑性壳单元 EPS-11,网格划分精度控制参数:初始单元尺寸为 20 mm;最大单元角为 22.5°; 圆角穿透系数为 0.22 mm(即网格单元相比标准边 界,误差距离超过 0.22 mm 时,软件自行重新划 分);网格细化等级为 6 级。

成形参数:压边力为 464.9 kN;摩擦因数为 0.15。

拉延筋形式:等效拉延筋(区别于实际拉延筋 的一种阻力等效模型,即为提高运算效率,对拉延筋 阻力采用无量纲的阻力因子或单位长度上的阻力进 行表示)。

CAE 分析结果如图 2 所示。左图点云中每一 个点,都与右图中的一个网格相对应。点云中点的 位置,表明了该网格的应变状态。点云中实、虚线内 点云和右图中实、虚线内的网格相对应。

判断产品是否开裂,需要结合 FLD 图<sup>[2-3]</sup> 和变 薄率 2 个方面进行判定。从图 2 中 FLD 及成形云 图可知,产品在局部反向成形部位产生了破裂现象; 变薄率方面,根据相关资料,对于普通材料钢板,变 薄率应控制在 25% 以内<sup>[4]</sup>;对于高强度板,变薄率 应控制在 20% 以内<sup>[5]</sup>。从图 3 模拟结果图中可知, 最大减薄率为 31.4%,远高于所能接受的变薄要求



图 2 FLD 图(左)和成形云图(右) Fig. 2 FLD(left) and forming cloud diagram(right)

范围,因此可得出结论,产品在局部反向成形区域发 生了破裂。



图 3 仿真结果:局部易破裂区及局部放大(右) Fig. 3 Simulation result: Crack and local amplification (right)

# 2 破裂原因分析

从图 2 中 FLD 图可知,破裂区应变为平面应 变。平面应变状态,即板料的次应变为 0 的状态。 从成形极限曲线的形状也可看出,在该状态下,板料 破裂时主应变值相比其他状态最低,即板料在该状 态下最容易发生破裂。因此在拉延成形中,平面应 变状态是一种成形状态差的应变状态,应当尽力避 免。

由图 4 中仿真结果的 FLD 图可知,改变 A 点材 料的平面应变状态,可从 3 方面入手。(1)降低主 应变方向上的应变值,使目标点下移,脱离易开裂区 或临界区(a 方向)。(2)正向增大次应变(b 方向) 或反向增大次应变(c 方向),使目标点的应变状态 在 FLD 图中向左下移进入拉-压应变状态或右下移

22

进入拉-拉应变状态,从而进入安全区。欲使目标 点左移,则应该减小次应变方向的进料阻力,可通过 减小该方向上板料尺寸,降低拉延筋阻力,放大凹模 圆角,改善润滑条件等手段加以实现。欲使目标点 右移,则应增加次应变方向上的进料阻力,可通过增 加该方向上的板料尺寸,提高拉延筋阻力,减小凹模 圆角等手段实现。(3)以上两方面同时进行(d 方 向,e 方向)。





因产品破裂部位靠近中部,其主应变方向为产 品横向,次应变方向为产品纵向。由于破裂区在纵 向离产品边界太远,通过调节产品纵向进料阻力影 响次应变,使产品脱离平面应变区难以实现。多次 模拟的结果也验证了这种方案不可行。

再尝试采用降低主应变值,使破裂区应变状态 下移到安全区。模拟结果表明,减小板料宽度尺寸、 降低左右侧拉延筋阻力、放大凹模圆角、降低摩擦因 数等手段,只能使图 5 中所示 A,C 区域进料速度加 快,导致该区域成形性能变差,对于 B 区域的抗破 裂性能却无法得到改善,即无法使 FLD 图中的主应 变值降低。



图 5 易破裂部位初始接触状态 Fig. 5 Initial contacting status of the split area

分析图 5 中易破裂部位初始接触状态可知,顶 部的板料此时在压边圈和产品顶部两侧 R 角的作 用下,已充分绷紧,模拟分析也表明,在此后的反向 成形中,板料无法从产品两侧进入反向成形区,即反 向成形区要完全依靠顶部区域的材料,通过其自身 延展达到,这是采用上面方法无法提高其抗破裂性 能的原因。

23

整张板料作为一个整体,在压边力、凸模、凹模 综合作用下,引起平面变形。在平面上,所受的外力 主要由以下几部分形成,如图 6 所示:两侧板料受压 边力产生的阻力  $F_1$  和  $F_6$ ;两侧凹模口 R 产生的阻 力  $F_2$  和  $F_5$ ;凸模顶部两侧 R 产生的摩擦阻力。需 要说明的是,由于产品形状复杂多变,不同的行程下 板料形状变化不同,且各力对同一区域的成形影响 也有大有小、不断变化,因此难以通过简单的受力分 析进行板料成形计算。



图 6 板料受力分析 Fig. 6 Sheet stress analysis

对于顶部易破裂区,压边圈阻力  $F_1$ ,  $F_6$  以及凹 模 R 阻力  $F_2$ ,  $F_5$  距离较远,因此对其影响较小,而 最接近的力为  $F_3$  与  $F_4$ ,如能减少  $F_3$ ,  $F_4$ ,则参与变 形的材料会大大增加,利于反向成形。

 $F_3$ ,  $F_4$ 的产生, 是由于在凹模向下运动过程 中, 提供压力使板料变形包住凸模 R角, 凸模 R角 产生法向反作用力(接触力), 该接触力产生板料 位移的摩擦力, 是阻碍反向成形时板料流入的最 直接外力。因此, 可以通过成形时减少阻力  $F_3$ ,  $F_4$ 的原理来减小板料流入难度。可以确定的是, 随 着拉伸的进行, 板料形状越接近最终产品形状, 板 料包住 R角的区域也不断扩大, 导致流动阻力不 断增加; 可以从模具结构上考虑, 提前进行板料在 顶部的反向成形, 使板料在较为平整的状态下局 部反向成形。

# 3 解决方案及验证

### 3.1 顶部反向成形拉延模具结构设计

顶部反向成形拉延模具结构如图 7 所示。与普 通拉延模具结构相比,在凹模内增加一个反向成形 滑块,并在弹簧作用下伸出凹模型腔一定行程。当 压料器压住板料向下开始成形时,反向成形滑块型 面先接触到板料,并在强力弹簧的作用下开始成形。 此时由于板料状态较为平缓(板料截面形状见图 6),进料阻力小,可以有更多的板料参与局部反向 成形滑块上部与凹模模具顶部相接触镦死,二者结 合为一整体,与普通拉延模具一样继续拉延成形直 至结束。顶部反向成形结束后,由于凸模顶部圆角 阻力增大,板料在成形图 5 中 A,C 区域形状时,顶 部反向成形区域的板料并不参与 A,C 区域的成形, 使反向成形区域板料不易拉伸破裂。



图 7 拉延预压料成形模具结构 Fig. 7 Structure of pre-forming die

## 3.2 弹力源选择

欲实现上述模具结构,关键在于弹力源选择。 由于普通螺旋弹簧的压力较小,且初始力为0,无法 在成形初始就提供反向成形所需的较大的成形力。 另外,模具结构为单动结构,反向成形结构在上模 (凹模)内,因此也不能应用压力机的气垫力。经综 合考虑,选择氮气弹簧<sup>[6]</sup>。

氦气弹簧用氮气作为工作介质,将其高压密封 在缸体内,外力通过柱杆压缩氮气,利用高压氮气压 缩后的弹复性能获得弹性力,因此它的工作可以近 似认为是等温膨胀压缩过程,遵循物理学上的波义 耳-马略特气体状态方程:

$$\frac{PV}{T} = C$$
$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

成形压料力计算过程如下所述。

因板料厚度大,且为高强度钢板,因此成形力相 对较大,故采用紧凑型氮气弹簧,直径为63 mm,初 始负载为30 kN,最大行程为25 mm,最大负载为 46.2 kN。经分析冲压件数据,反向成形行程为18 mm,因此模具中成形滑块行程可取20 mm,占氮气 弹簧总行程的80%。经查弹簧负载特性图可知,该 处行程负载力约为42.5 kN。

先采用6只氮气弹簧模拟成形结果。

因成形模拟软件中仅允许输入线性力,暂无法 输入曲线函数表示的复杂力,并且没有氮气弹簧的 弹力-行程曲线资料,因此可将氮气弹簧近似视为 线性力。每只刚度 k 近似为:

$$k = \frac{42\ 500 - 30\ 000}{20} = 625\ (\text{N/mm}) \tag{1}$$

初始负荷为 180 000 N,6 只弹簧刚度为 3750 N/mm,用直线方程拟合后为:

F = 3.75L + 180 (2)

式中:F为负载(kN);L为行程(mm)。

氮气弹簧负载特性图如图 8 中黑色虚线所示 (图示为 6 只弹簧并联使用)。

直线拟合后的氮气弹簧负载特性见图 8 中粗实 线所示(6 只弹簧并联使用)。从图 8 可知,模拟简



### 图 8 氮气弹簧负载特性



化后与实际负载特性之间有较大误差,因此处需拉 延开始时能提供足够大的成形力满足反向成形即 可,一旦反向成形完成,后续力的状态实际并不影响 成形结果。

# 3.3 新结构仿真结果

将以上条件代入 AutoForm 软件模拟成形,结果 如图 9 所示。分析 FLD 图、成形性云图可知,与图 2、图 3 相比,抗破裂性能大大提高;从减薄率方面分 析,优化前为 31.4%,优化后为 23.4%。板料变薄 情况已大大好转。因此可得出结论:越在行程早期 进行反向成形,越有利于反向成形区抗破裂性能的 提高。





b 成形性云图



c 减薄率云图

图 9 第一次优化结果 Fig. 9 Result of the first optimization

根据以上分析,重新调整氮气弹簧数量,采用9 只氮气弹簧,负载-行程用直线方程拟合后方程为:

F=5.625L+270 (3)
采用9只氮气弹簧后,成形模拟结果如图10
所示。从图10可看出,由于预先反向成形,使更
多材料参与成形,产品在反向成形顶部成形结果
良好,没有发生破裂情况(FLD图显示,局部区域

虽处于临界区,但靠近安全区)。考虑到 CAE 模 拟与实际情况之间的误差,以及线性模拟氮气弹 簧弹力-行程与实际情况的误差,实际生产时,可 预留 10~11 只氮气弹簧的安装位置,通过试模确 定最终数量。



图 10 局部成形结果及其 FLD Fig. 10 Local formation result and its FLD

## 3.4 新结构验证

根据以上思路,设计了模具结构,经泡沫实型铸造、加工、装配、调试后,得到最终产品如图 11 所示,可知产品外观良好,无破裂缺陷发生,表明这种预成 形模具设计方案是可行的。



图 11 最终产品 Fig. 11 Final part

## 4 结论

以左前地板2号横梁为例,进行了成形性仿真 分析,提出了顶部反向成形拉延模具结构,并对此模 具结构进行了成形性分析,结果表明该结构提高了 抗破裂性能。

### 参考文献:

[1] 张胜华,李玉强,董剑安,等. 尾门内板成形工艺的研究与探讨[J]. 模具技术,2012(4):38—42.
ZHANG Sheng-hua, LI Yu-qiang, DONG Jian-an, et al. Research of the Forming Process of Liftgate Inner

Panel[J]. Die and Mould Technology, 2012(4):38-42.

- [2] 林中钦,李淑慧,于忠奇,等. 车身覆盖件冲压成形仿 真[M].北京:机械工业出版社,2004:275.
  LIN Zhong-qin, LI Shu-hui, YU Zhong-qi, et al. Simulation of Autobody Covering Parts [M]. Beijing: China Machine Press,2004:275.
- [3] 刘细芬,胡义华,黄华艳.数值模拟技术在汽车覆盖件 拉延模具设计中的应用[J].热加工工艺,2011,40 (13):178.

LIU Xi-fen, HU Yi-hua, HUANG Hua-yan. Application of Numerical Simulation Technology in Design of Drawing Die for Auto Panel[J]. Hot Working Technology,2011,40(13):178.

 [4] 傅乐荣,文顺,袁创. 基于 Autoform 的汽车覆盖件冲压 模具设计[J]. 江汉大学学报(自然科学版),2011,40 (13):43-46.

> FU Le-rong, WEN Shun, YUAN Chuang. Stamping Die Design for Automobile Panel Based on Autoform [J]. Journal of Jianghan University (Nat Sci Ed), 2011, 40 (13):43-46.

[5] 张静,陈靖芯.基于 AutoForm 的汽车覆盖件冲压成形
 中关键技术研究[J].拖拉机与农用运输车,2011,38
 (6):83-85.

ZHANG Jing, CHEN Jing-xin. Research on Key Technologies for Automobile Panels Forming Based on AutoForm [J]. Tractor & Farm Transporter, 2011, 38(6):83-85.

- [6] 李飞舟. 基于 Autoform 的汽车覆盖件成形有限元分析
  [J]. 热加工工艺,2010,39 (15):111—113.
  LI Fei-zhou. Analysis of Forming Simulation for Automotive Panel Based on Autoform[J]. Hot Working Technology, 2010,39(15):111—113.
- [7] 吴玉娟. 基于 Autoform 的冷冲压成形模拟研究[D]. 长春:吉林大学,2012.
   WU Yu-juan. Simulation of Stamping Forming Based on

Autoform [D]. Changchun: Jilin University, 2012.

[8] 向小汉. 基于 AutoForm 的顶盖冲压成形仿真分析[J]. 制造技术与机床,2013(5):124-128.

XIANG Xiao - han. Stamping Form Simulation of Roof Cover Based on AutoForm[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2013(5):124-128.

[9] 徐迎强,薛克敏,曹婷婷,等.汽车门槛内板零件冲压 数值模拟及参数优化[J].精密成形工程,2000,2(3): 36—37.

> XU Ying-qiang, XUE Ke-min, CAO Ting-ting, et al. Numerical Simulating and Parameter Optimizing of the Stamping Forming Process of Auto Doorsill's Inner Panels[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2000, 2 (3): 36—37.

 [10] 王东. 板料应力成形极限研究[D]. 南京:南京航空航 天大学,2005.
 WANG Dong. Research on Sheet Metal Forming Limit Stress Diagram[D]. Nanjing: Nanjing University of Aero-

Stress Diagram [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.

- [11] 葛旋. 左/右中立柱里板成形数值模拟及回弹分析
  [D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
  GE Xuan. Forming Simulation and Springback Analysis for Car's Left and Right B-pillar[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2011.
- [12] 曲智.汽车板材应用现状及冲压成形模拟分析[D].长春:吉林大学,2009.
  QU Zhi. The Application Situation and Simulation Analysis of Stamping of Automobile Sheet Metal[D]. Changchun: Jilin University,2009.
- [13] 李立军,沈成武. 平面应变用于评定薄钢板成形性能的研究[J]. 钢铁研究,2003(6):35—38.
  LI Li-jun,SHEN Cheng-wu. Study on Plain Strain in E-valuating the Formability of Sheet[J]. Research on Iron & Steel,2003(6):35—38.
- [14] 高锦张,陈文琳,贾俐俐. 塑性成形工艺与模具设计
  [M].北京:机械工业出版社,2006:229—246.
  GAO Jin-zhang, CHEN Wen-lin, JIA Li-li. The Plastic Forming Process and Die Designing [M]. Beijing: China Machine Press,2006(5):229—246.
- [15] 王玉峰,施雄飞,田前程.冲压模氮气弹簧选用原则
  [J].模具制造,2012(12):35—38.
  WANG Yu-feng, SHI Xiong-fei, TIAN Qian-cheng. Selection Principle of the Nitrogen Gas Spring for the Stamping Die [J]. Die & Mould Manufacture, 2012(12): 35—38.

26