

文章编号:1000-582X(2011)01-077-05

# 超高强度钢防撞梁热成形改冷冲压工艺设计及优化

张旭, 周杰

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**安装在车门内的防撞梁是提高轿车侧碰撞安全性的关键部件, 国外高安全性轿车都采用超高强度钢板制造防撞梁, 但超高强度钢板成形困难, 普遍采用成本高的加热成形方法。笔者介绍了采用有限元分析软件 Dynaform 对某高级进口型轿车超高强度钢防撞梁热成形改冷冲压工艺过程进行模拟仿真, 并优化成形工艺, 主要研究了温度对超高强度板内部组织变化起的作用。通过模拟和实际对比研究工艺补充面对零件成形及回弹的影响, 并设置凸顶得到了优化的工艺型面, 为同类相关高强度钢零件的生产起到了指导作用。

**关键词:**超高强度钢; 保险杠; 数值模拟; 工艺优化; 热成形; 回弹控制

**中图分类号:** TH133.3; TP395.02

**文献标志码:** A

## Optimization and springback control of ultra-high strength steel anti-collision side beam forming process

ZHANG Xu, ZHOU Jie

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** The anti-collision side beam inside the car doors is a key component to improve the safety. Foreign automobile companies use ultra-high strength steel plate to manufacture it. However, it is very difficult to form at room temperature, so usually it is made by hot stamping but the cost is high. The use of FEM software Dynaform in simulating and optimizing the forming process at room temperature is described, and the influence of temperature on internal organizational changes of the ultra-high strength sheet is mainly studied. By comparing the simulation result and real sample, the effect of addendum on stamping and springback is researched and convex roofs in the addendum is added to optimize the surface. It is helpful for manufacturing the relative high strength steel parts.

**Key words:** ultra-high strength steel; anti-collision side beam; numerical simulation; optimization; hot stamping; springback control

随着人们对能源、环境以及对驾乘人员安全等问题的日益重视, 节能和提高安全性能已经成为汽车工业领域中的重大课题<sup>[1-3]</sup>。因此出现了对汽车车身部件两种相互矛盾的需求<sup>[4]</sup>: 一是为降低燃料消耗而要求轻量化; 二是为提高撞击安全性和行驶

稳定性而要求高强度化。高强度钢板及超强度钢板则是解决此类问题的有效选择。

但钢板高强度化易引起塑性下降, 成形性变差, 而屈服强度的提高则容易引起面畸变和显著的回弹效应, 增加形状不稳定性。同时材料强度升高后, 残

收稿日期: 2010-07-25

基金项目: 科技部技术创新项目(07C26215110824); 重庆大学研究生科技创新基金重点资助项目(200811B1B0130302)

作者简介: 张旭(1980-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事板料成形的研究。

周杰(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail) a65105410@cta.cq.cn。

余应力增大,易产生变形后弹性回复引起的形状不良和尺寸精度不良等缺陷,回弹则是高强度钢冲压成形中最为严重的问题<sup>[5-10]</sup>。

笔者采用板料成形数值模拟软件 Dynaform 对某型进口轿车的超高强度钢防撞梁成形过程进行了模拟仿真,在国外生产该防撞梁时采用加热成形方法以增加塑性变形<sup>[11-16]</sup>,但对成形设备要求非常高。国产化时为了克服设备要求高这一难题采用冷冲压试制,首先对零件所采用钢板进行单向拉伸实验得到材料性能参数,然后进行数值模拟分析并将结果用于指导工艺设计,最终得到满意结果。在数值模拟优化过程中研究了工艺补充面形状变化及回弹补偿对成形性能的影响,为同类相关零件的生产起到了指导作用。

## 1 零件的工艺性及其有限元模型

### 1.1 零件工艺性分析

该零件形面如图 1 所示,为保证乘员安全性,该防撞梁采用瑞典 SAAB 公司 Docol1200M 型超高强度钢板,屈服强度达到 1 150~1 270 MPa,抗拉强度大于等于 1 400 MPa。国产时,由于前期未采用数值模拟分析,在采用传统冷冲压试制过程中发现零件尾部发生破裂(如图 2 所示),而且声音巨大。由此可知,该超高强度钢板在常温下塑性变形区较小,延伸性差,成形困难。为克服这一困难,首先对该超高强度钢板进行拉伸试验,并对比材料在加热前后材料的成形性能,以确定工艺参数。图 3 是该材料在各温度梯度下的应力-应变曲线,从图上可以看出,但材料在常温时即使发生较小应变,其应力增加迅速,而且容易断裂,但随着温度的升高其屈服强度下降明显,当温度达到 1 000 °C 时其屈服强度下降为 720 MPa,而应变相应增加,能有效提高材料的塑性变形能力。通过图 4 的微观组织照片可以看出当温度升高到 1 000 °C 时内部的马氏体(明亮部分)组织变小,促使材料的塑性变形能力得到改善,此过程如同淬火工艺能有效提升钢板强度一样。



图 1 保险杠零件三维模型

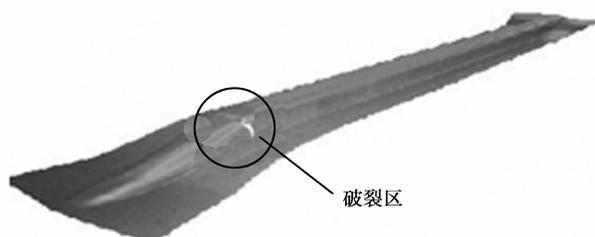


图 2 冷冲压成形过程中产生破裂

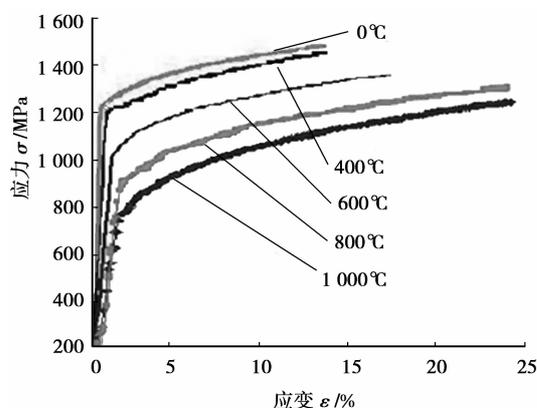


图 3 各温度下材料的应力-应变曲线

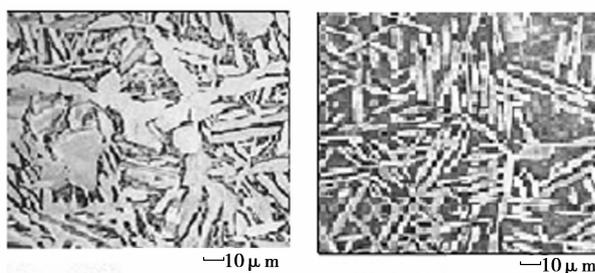


图 4 加热前后内部微观组织变化

### 1.2 各参数设定及有限元模型

1) 材料屈服模型。笔者采用 Barlat 屈服模型进行模拟。在平面应力状态下,Barlat 屈服准则可表示为:

$$f = a |K_1 - K_2|^M + a |K_1 + K_2|^M + c |2K_2|^M - 2\sigma^{-M} = 0. \quad (1)$$

式中:  $K_1 = \frac{1}{2}(\sigma_{11} + h\sigma_{22})$ ;

$$K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - h\sigma_y}{2}\right)^2 + p^2 \sigma_{12}^2};$$

$$h = \sqrt{\frac{r_0(1+r_{90})}{[(1+r_0)r_{90}]}};$$

$$a = 2 - c = 2 - \sqrt{\frac{r_0 r_{90}}{(1+r_0)(1+r_{90})}};$$

$$p = \frac{\sigma_p}{\sigma_b} = \left( \frac{\bar{\sigma}}{\tau_{s1}} \right) \left[ \frac{2}{(2a + 2M_c)} \right]^{\frac{1}{M}}$$

其中:  $\sigma_p$  为双拉状态的 Cauchy 主应力  $\sigma_1$ ;  $\sigma_b$  为单向拉伸状态的 Cauchy 主应力  $\sigma_1$ ;  $\tau_{s1}$  为纯剪切变形时屈服剪应力;  $M$  为非二次屈服函数指数;  $r_0$  和  $r_{90}$  为两个各向异性主轴的各向异性参数;  $p$  为通过单拉实验测得的  $r_0, r_{45}, r_{90}$  求出。

2) 材料力学性能见表 1。

表 1 材料性能参数

材料牌号	屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\mu$	$R_0$	$R_{90}$
Docol 1200M	1 150~ 1 270	207	0.28	0.79	0.87
料厚/mm	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	硬化 指数 $n$	Barlet 指数	$R_{45}$	厚向异性 系数 $R$
2	$\geq 1\ 400$	0.122	6	0.83	0.97

3) 其他参数。

a. 凸凹模间隙  $C = 1.1t$ ,  $t$  为材料厚度;

b. 毛坯与模具各部件间的静摩擦系数  $f_s = 0.12$ , 动摩擦系数  $f_d = 0.12$ ;

c. 压边速度  $v_1 = 2\ 000$  mm/s;

d. 成形速度  $v_2 = 5\ 000$  mm/s。

4) 有限元模型。如图 5 所示, 模具结构采用倒装式结构, 板坯采用等向指数强化模型, 应力应变关系数学表达式为:

$$\sigma_y = K(\epsilon_{yp} + \bar{\epsilon}_p)^n \quad (2)$$

式中:  $n, K$  为材料常数,  $K > 0$ ;  $n$  为硬化指数。

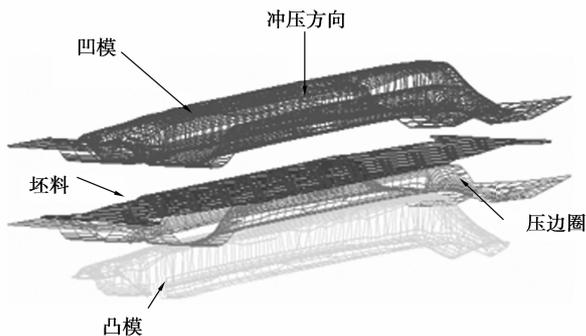


图 5 防撞梁成形有限元模型

分析中采用 Belytschko-Tsay 薄壳元理论, 网格进行自适应划分, 将实验得到的材料参数导入软件。

## 2 模拟结果分析及优化

按照首次国产试制时的工艺形面(见图 6)进行分析, 将压边力设置为 100 t, 得到如图 7 的结果, 发现尾部破裂与图 2 显示的结果一致。通过分析发现即使降低压边力也不能消除破裂缺陷, 同时头部和尾部的起皱缺陷也需要通过改变工艺补充面来改善。破裂缺陷通过将首次拉延高度降低, 然后通过整形来改善; 而起皱缺陷通过在相应部位设置拉延筋来解决。通过多次模拟发现将首次拉延高度降低 6 mm, 并将凸凹模圆角从 R6 增大到 R10, 然后通过整形得到如图 8 的模拟结果, 开裂得到解决, 且头部和尾部设置的拉延筋减小了起皱区域。但模拟中也发现首次拉延高度降低太多会增加整形工序时零件的变形抗力, 而整形工序成形力较拉延工序小, 所以选择首次拉延高度时应首先考虑解决开裂缺陷, 同时要减小零件在后续整形工序时的加工难度。



图 6 两种工艺补充面模拟结果对比

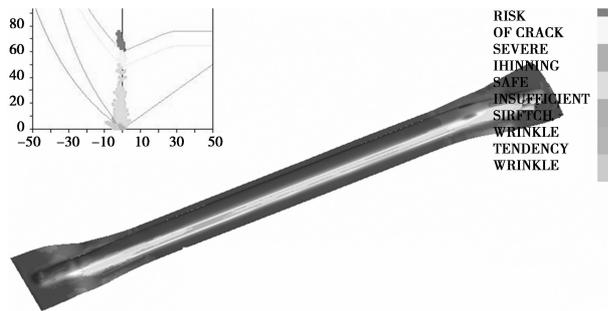


图 7 尾部破裂缺陷

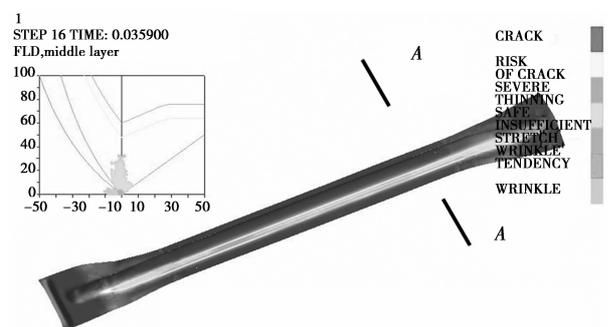


图 8 修改工艺面后的模拟

但是通过继续模拟后工序的翻边时发现零件的回弹较大,图9显示的是A—A截面的回弹,B点和C点的回弹值均超过型面回弹小于1 mm的产品要求。通过实验发现增大压边力对减小回弹的作用甚微,故仍需进一步修改工艺补充面。

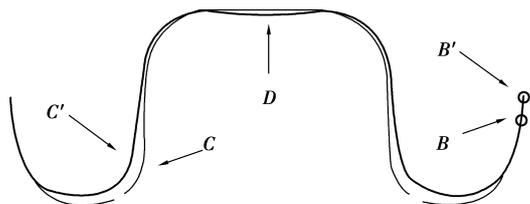


图9 A—A 截面上的回弹

注: B'、C' 分别是 B 点和 C 点回弹后的位置。

表2 B、C点模拟与实测回弹值比较 mm

比较	模拟值	实际值
B点	3.967	3.65
C点	2.896	2.47

由于零件的拔模斜度较小,只是采用模面补偿法不能完全解决回弹,从图9可以发现在零件顶部D点回弹呈现一个凹陷部位,回弹量0.874 mm,因此修改时将两次拉延工艺补充面顶部都提高1 mm,同时将首次拉延时凸凹模的宽度分别增加3 mm(如图10左图),增加宽度是为了在整形工序通过凹模对加宽的部分进行挤压,使零件侧壁向内收缩以减小回弹,并且通过整形模上较小的圆角增加塑性变形;另外在拉延及整形工序的型面顶部以及翻边工序的翻边底部设置局部凸顶,其原理是不改变模具闭合高度的情况下,减小凸顶部分的模具间隙,使凸模强制挤压材料,增加塑性变形如图如图10右图所示。最终得到的回弹如图11所示,回弹值如表3所示。

表3 修改后 B、C点模拟与实测回弹值比较 mm

比较	模拟值	实际值
B点	0.978	0.79
C点	0.926	0.68

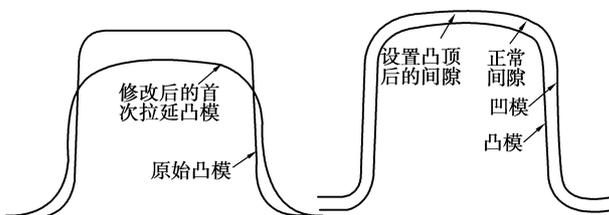


图10 修改后的拉延及整形工艺型面

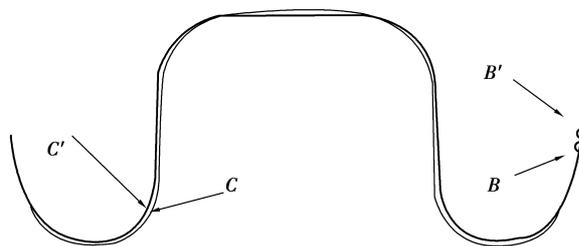


图11 修改后 A—A 截面上的回弹

### 3 实际生产结果

根据上述结果,最终确定工艺方案时将D处升高1 mm并重构型面,凸模型面上设置2 mm局部凸顶,并将首次拉延工序凸凹模的宽度分别增加3 mm,压边力设为100 t,工序采用“落料—拉延—整形、冲定位孔—修边—翻边、整形”,最终的零件如图12所示。



图12 实际生产的样件

### 4 三点弯曲实验

三点弯曲是测试防撞梁在受到一定载荷状况下抗疲劳失效的性能,是保证轿车安全性重要的一环,如图13的三点弯曲实验示意图,是将防撞梁两头自由度进行约束,右端完全固定,左端仅能在载荷作用下水平移动,然后在中段施加载荷测试防撞梁在多大载荷作用下发生疲劳失效。图14是从进口热成形件以及国产零件的三点弯曲报告上扫描的“载荷—位移曲线”。曲线1是进口的热成形件,曲线2是国产样件,表4显示的国产件最大载荷虽然比进口热成形件低6.1%左右,但仍比产品要求的1.7 t高出约7.1%,达到并超过产品要求,试制成功。另一方面虽然进口热加工成形件在承载方面胜过国产件,但成本方面,国产零件由于少了热成形必需的复杂设备和苛刻的成形要求,效率方面热成形件约3 min生产1件,而国产冷冲压1 min可生产5件,因此综合考虑,国产件成本仅为进口热成形件的57%左右,大大节省了成本。



图 13 三点弯曲示意图

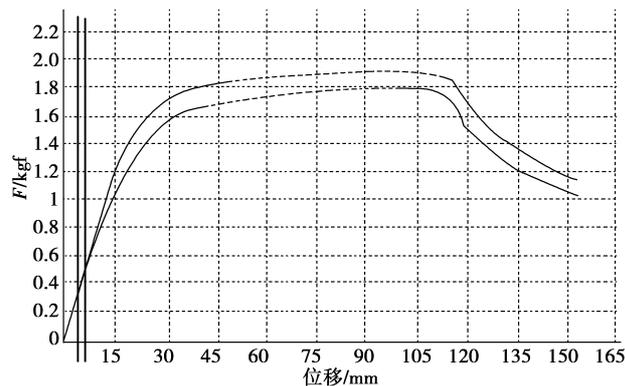


图 14 位移载荷曲线

表 4 进口件与国产件三点弯曲实验数据比较

实验速度 (50mm · min <sup>-1</sup> )	最大载荷 T <sub>i</sub> /t	弯曲应力 /(kgf · mm <sup>-2</sup> )	失效点位移 /mm
进口件	1.94	275.88	107.86
国产件	1.82	257.56	106.75
产品要求	1.70		

## 5 结 论

通过对超高强度防撞梁热成形改冷冲压的工艺改造过程的数值模拟及实验、加工的验证,可得如下结论:

1)在加工超高强度板件时应首先考虑解决由于材料本身塑性变形区较小而造成开裂,尤其是厚度较大的板料,以及超高的屈服强度造成的变形抗力大而形成的回弹缺陷,因此要尽量增加零件的塑性变形,降低首次拉伸高度,增大圆角然后通过整形达到产品要求。

2)采用高度在 0.5~1.5 倍料厚的局部凸顶可以增加 5%~10%塑性变形,有效减小回弹。

3)热成形可以有效降低金属板料的屈服强度,有效提高材料的塑性变形能力。主要是当升高到一定温度时金属板料内部的金相组织发生变化,主要是马氏体组织变小促使材料的塑性变形能力得到改善。热成形是解决超高强度钢板成形的一种选择,只是在降低成本方面仍需作进一步研究。

## 参考文献:

[1] 王利. 汽车用高强度 IF 薄钢板[J]. 宝钢技术, 1997(1):58-61.  
WANG LI. High tensile strength IF steel sheet for automotive applications [J]. Bao Steel Technology,

1997(1):58-61.  
[2] MAKI S, HARADA Y, MORI K. Sinter-joining of different metal powder compacts using resistance heating [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003,143-144(20): 561-566.  
[3] YUKIHISA K, MANABU T, HIROSHI O. Trend of car weight reduction using high-strength steel [J]. Journal of JSAE,2001,55(4):51-57.  
[4] STANDER N, ROUX W, EGGLESTON T, et al. LS-OPT user's manual :a design optimization and probabilistic analysis tool for the engineering analyst [M]. Livemore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2006.  
[5] 姚兴,陈军,石晓祥,等. 覆盖件拉伸模工艺补充面及压料面参数化设计研究[J]. 模具技术,2002(4):6-9.  
YAO-XING, CHEN JUN, SHI XIAO-XIANG, et al. Addendum and binder surface parametric design for automotive panel drawing die [J]. Die and Mould Technology,2002(4):6-9.  
[6] YUE S. Mathematical modelling of hot rolling of steels [M]. Montreal, PQ: The Metallurgical Society of CIM ,1990:34-43.  
[7] SIEGERT K, J AGER S, VULCAN M. Pneumatic bulging of magnesium AZ 31 sheet metals at elevated temperatures [J].C IRP Annals-Manufacturing Technology, 2003,52(1):241-244.  
[8] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva, Switzerland: Climate assessment report of the United Nations, 2007.  
[9] SHIOMI MASANORI, ONISHI H, OSAKADA K. Mushy state forging of aluminum alloy using electric resistance heating[J]. Steel Grips, 2000(8): 711-716.  
[10] DOEGE E, KURZ G. Development of a formulation to describe the work softening behaviour of magnesium sheets for heated deep drawing processes[J]. Annals of the CIRP, 2001,50(1): 177-180.  
[11] BURKHARDT L. Simulation des Warmumformprozesses auf Basis der Identifikation einflussreicher Parameter[ D]. ETH Zürich ,2008.  
[12] BURKHARDT L. Simulation des warmumformprozesses auf basis der identifikation einflussreicher paramter[D]. ETH zurich, 2008.  
[13] KERAUSCH M, SCHONBACH. FE-basierte Prozessaus-legung mit AutoForm-HotForming [C]// Erlanger Workshop Warmblechumformung, Erlangen, Germany, 2007:59-72.  
[14] SIKORA S, LENZE F J. Hot-Forming-Process Important Parameters for the Production of High-Strength BIW Parts[C/OL]// IDDRG 2006, Porto, June 19-21, 2006, [http://www.iddrg.com/pub/iddrg/central/conferences/past\\_conf/conf2006.html](http://www.iddrg.com/pub/iddrg/central/conferences/past_conf/conf2006.html).  
[15] KLEINER M, GEIGER M, KLAUS A. Manufacturing of lightweight components by metal forming [J] . CIRP Annals-Manufacturing Technology, 52(2): 521-542.  
[16] ABEDRABBO N, POURBOGHRAT F, CARSLY J. Forming of aluminum alloys at elevated temperatures-part 1: material characterization [J]. International Journal of Plasticity, 2006, 22 (2): 314-341.

(编辑 王维朗)