

文章编号:1000-582X(2010)09-104-05

高强度钢保险杠成形工艺及回弹控制的数值模拟优化

张旭,周杰

(重庆大学材料科学与工程学院,重庆400044)

摘要:采用高强度钢板制造的保险杠能大大提高乘员安全性,但高强度钢板成形非常困难,国内可供参考的成功案例非常有限,如果采用国外热成形技术又会显著增加成本且效率低。只能在现有水平下采用先进的数值模拟技术与调整冲压工艺相结合才能解决该问题。介绍了采用有限元分析软件Dynaform对某轿车高强度钢保险杠冷冲压成形过程进行模拟,发现回弹和破裂是其主要缺陷。通过研究工艺补充面对零件冲压成形以及回弹的影响,并总结出规律,然后对工艺补充部分进行调整,并设置凸顶得到了优化的工艺型面,最终一举取得成功,为同类相关高强度钢零件的生产起到了指导作用。

关键词:高强度钢;保险杠;有限元;数值模拟;工艺优化;回弹控制;工艺补充面

中图分类号:TG382

文献标志码:A

Numerical simulation and optimization of high strength steel bumper forming process and springback control

ZHANG Xu, ZHOU Jie

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

Abstract: Production of high strength steel bumper can greatly enhance the occupant safety. However, it is very hard to form high strength steel plate. There is rare domestic successful reference. The hot stamping technology aboard increases costs significantly, and the efficiency is low. Therefore, the only solution is combining advanced numerical simulation technology with current adjusting stamping process. The cold-forming process of a sedan's high strength steel bumper is simulated by FEM software Dynaform and the results show that springback and crack are the main defects. A law is summed up by researching the influence of different shapes of addendums on part forming and springback. Finally, the optimized shape of addendum is obtained by adjusting the addendum and adding convex roofs. It provides references for manufacturing similar high strength steel parts.

Key words: high strength steel; bumper; FEM; numerical simulation; optimization; springback control; addendum

严重的经济危机导致当前汽车制造企业面临惨烈的市场竞争,如何回应日益高涨的环保和安全呼声将是汽车制造企业能否生存、发展的关键。采用

高强度钢板制造车身则是解决这些问题的有效手段。有资料表明,使用高强度钢板,原厚度为1.0~1.2 mm的车身板可减薄至0.7~0.8 mm,车身整

收稿日期:2010-05-20

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(1977-),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。

体质量减少 15%~20%,节油 8%~15%^[1-5]。但是高强度钢板变形抗力大,对模具要求高,同时普遍存在较大回弹。

笔者介绍的某进口车型高强度钢保险杠采用的高强度钢板屈服强度达到 550 MPa,采用常规冲压工艺很难达到产品要求,主要问题是破裂和回弹^[6-10],而国内可供参考的成功经验也很少,如果采用国外热成形技术又会显著增加成本^[7-12],而且效率低下。由于没有攻克这个技术难题,国内很多汽车企业放弃高强度钢板制造保险杠而采用中强度钢板再增加料厚的办法,不仅增加成本而且造成车身重量加大,耗油量增加,环保性差;即使有汽车企业采用高强度钢保险杠,也是直接交由国外企业采用热成形制造,所以一直受限于国外企业的技术垄断^[13-15]。为了打破这一技术垄断,在国内现有工艺水平下采用先进的数值模拟技术与调整冲压工艺相结合最终成功攻克这一技术难关。

笔者采用板料成形数值模拟软件 Dynaform 对该型轿车的保险杠成形过程进行了模拟仿真,并通过实验及实际生产与仿真结果的对比研究了工艺补充部分形状变化及回弹补偿对保险杠成形性能的影响,最终得到优化的型面设计,顺利生产出制件,为同类相关高强度钢零件的生产起到了指导作用。

2 零件的工艺性及其有限元模型

2.1 零件工艺性分析

该保险杠形状如图 1 所示,从侧视图中可见其曲率较大,且纵向截面呈 U 形,如果工艺补充面设计不合理,将会导致回弹较大,进而影响后工序的产品质量和尺寸精度。

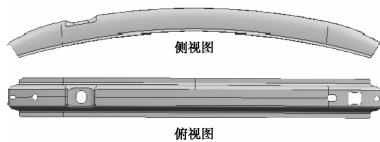


图 1 保险杠零件三维模型

为保证制件质量,需在工艺设计时尽量增加零件的塑性变形,故先将工艺补充面设计成盒形,如图 2 所示。

2.2 各参数设定及有限元模型

1) 材料屈服模型。笔者在对保险杠的成形模拟分析中,采用 Barlat 屈服模型。在平面应力状态下,Barlat 屈服准则可表示为:

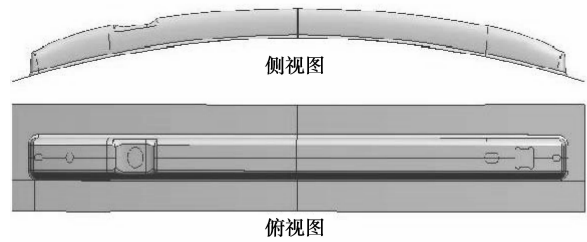


图 2 盒形凹模工艺补充面

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

式中:

$$K_1 = \frac{1}{2}(\sigma_{11} + h\sigma_{22}), K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - h\sigma_y}{2}\right)^2 + p^2\sigma_{12}^2};$$

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

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

$$p = \sigma_p / \sigma_b = (\bar{\sigma} / \tau_{sT}) [2 / (2a + 2M_c)]^{\frac{1}{M}};$$

式中: σ_p 为双拉状态的 Cauchy 主应力 σ_1 ; σ_b 为单向拉伸状态的 Cauchy 主应力 σ_1 ; τ_{sT} 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	DP800
材料厚度/mm	2
屈服强度 σ_s /MPa	550
抗拉强度 σ_b /MPa	800
弹性模量 E /GPa	207
硬化指数 n	0.112
泊松比 μ	0.3
Barlet 指数	6
r_0	0.85
r_{45}	0.87
r_{90}	0.93
厚向异性系数 R	1.02

3) 其他参数如下:

① 凸凹模间隙 $C=1.1t$, t 为材料厚度;

② 毛坯与模具各部件间的静摩擦系数 $f_s=0.12$, 动摩擦系数 $f_d=0.12$;

③压边速度 $v_1 = 2\ 000\ \text{mm/s}$;

④成形速度 $v_2 = 5\ 000\ \text{mm/s}$ 。

4)有限元模型如图 3 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。

分析中采用 Belytschko-Tsay 薄壳元理论,网格进行自适应划分。

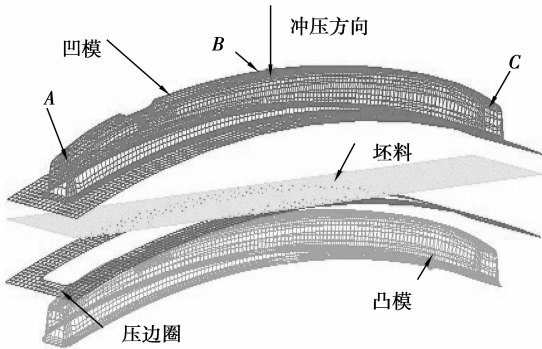


图 3 保险杠成形有限元模型

3 模拟结果分析及优化

经计算将压边力设置为 80 t,首次分析发现采用盒形工艺补充面在转角部分(图 3 中 A 处、C 处)材料发生破裂如图 4 所示。

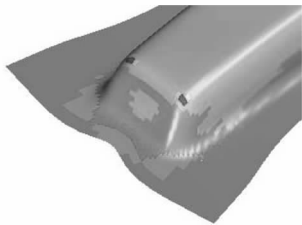


图 4 盒形工艺补充面造成的破裂缺陷

3.1 工艺补充面及缺陷分析

产生破裂是因为 A 处和 C 处的产品型面上分别有加强支耳,工艺补充面为盒形时,这两处圆角过小,加上 DP800 材料的流动性较差,所以造成破裂。故只能根据零件型面将工艺补充面设计成类似 U 形件。但 U 形工艺补充面的回弹较大,通过对比盒形和类似 U 形工艺补充面的模拟结果就可看出塑性变形量较小的 U 形工艺补充面其回弹较大,如图 5-6 所示。

表 2 是两种工艺补充面在 A、C 两处横向中性

截面回弹测量值、回弹角大小,回弹角以中点 B 点为回弹基准测量得出,并与实际生产的样件对比。其回弹值超出产品小于 2 mm 的要求。

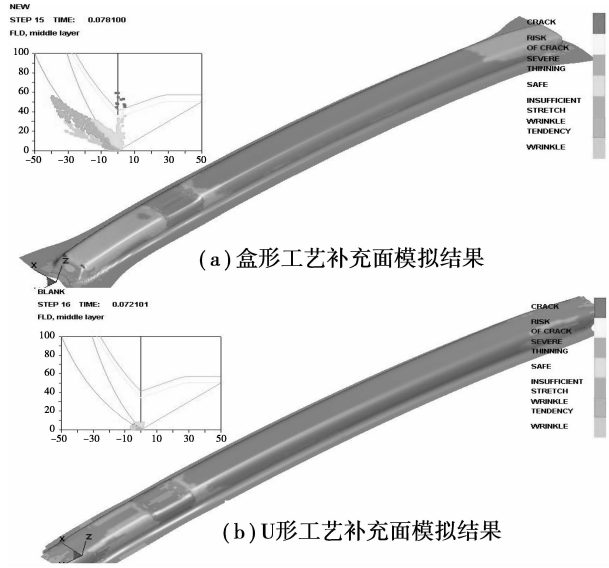


图 5 两种工艺补充面模拟结果对比

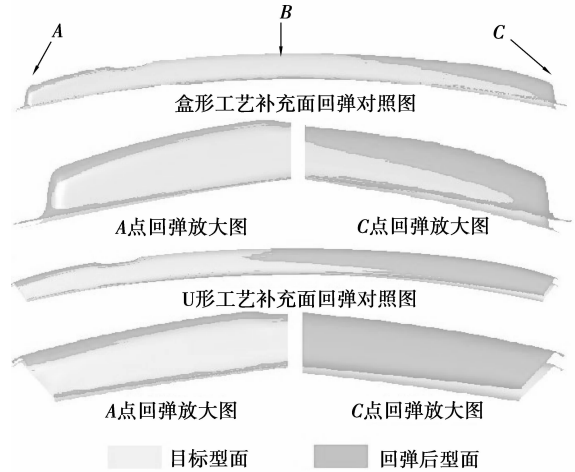


图 6 两种工艺补充面回弹量对比

表 2 两种工艺补充面回弹数值对比

压料面形式	盒形	U形	样件
缺陷	角部破裂	变形不足	
回弹值	A 点/mm	5.499	7.65
	C 点/mm	7.597	9.07
回弹角	A 点/(°)	0.70	0.80
	C 点/(°)	0.90	1.10

A 点回弹较小是因为靠近 A 处的产品型面上有一安装面使得塑性变形量加大,而盒形工艺补充

面较 U 形工艺补充面塑性变形量大,所以增大塑性变形量可以有效降低零件的回弹。通过测量 B 点处的纵向截面的回弹也可得到相同结论(见图 8 和表 3)。根据 U 形件的回弹角的定义,回弹分为两部分:侧壁回弹和法兰回弹,如图 7 所示。其中 θ_1 和 θ_2 分别是侧壁和法兰边的回弹角。

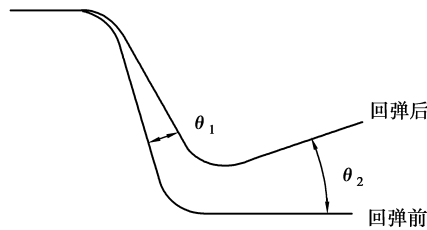


图 7 回弹角的定义



图 8 两种工艺补充面纵向截面回弹量对比

表 3 两种工艺补充面纵向截面回弹值对比

压料面形式	盒形	U形	样件
回弹值/mm	3.523	3.598	3.46
回弹角 θ_1 / (°)	2.10	3.10	2.80
回弹角 θ_2 / (°)	2.30	3.20	3.10

3.2 减小回弹的方法

为增加塑性变形、减小回弹,采用以下几种方法:

1)增加压边力。首先采用调整压边力的方法,如图 8 当压边力从 80 t 增大到 100 t 回弹角 θ_1 、 θ_2 的变化不大。

2)减小凸模圆角。凸模圆角减小虽然可以减小回弹角,但经过试验发现将凸模圆角从 R_9 减小到 R_6 会使凸模寿命缩短并且在产品侧壁上造成材料进料不均匀缺陷。

3)模面补偿法。根据回弹大小采用模面补偿法,将中间 B 处型面提升并重新构建模面,使其曲

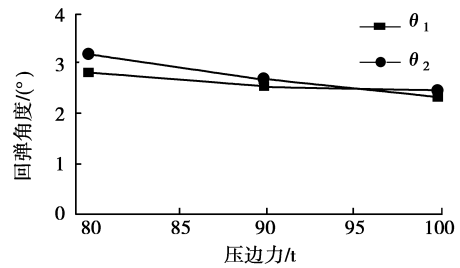


图 9 增大压边力对回弹角的影响

率半径减小,从而减小实际生产零件与目标型面的距离。图 10 显示采用模面补偿法虽然不能有效降低回弹数值但是可以使零件型面接近目标型面。但是当 B 处升高超过 6 mm 时把实际生产的样件安放在检具上发现靠近 A 处的安装面影响到模面补偿法的效果。另外,由于升高 B 处没有有效增加塑性变形,样件的回弹值变化较大。同样在纵向截面上,当中点升高超过也没有有效减小回弹。

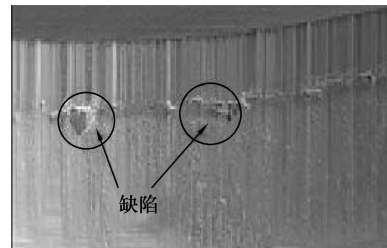
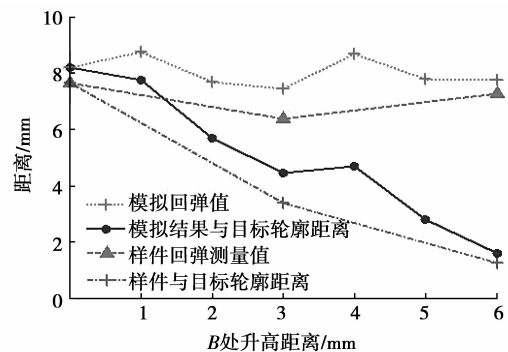


图 10 凸模圆角过小造成产品型面缺陷

4)在凸模局部型面上设置凸顶。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 11 所示。



(a) A处回弹与B处型面升高的关系

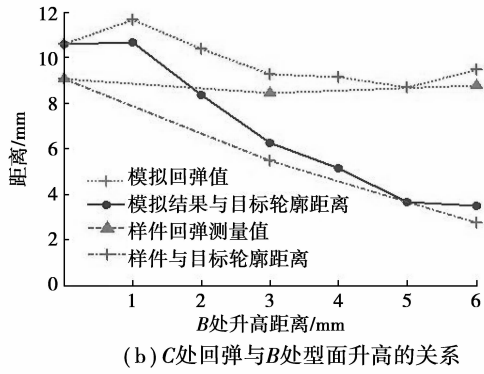


图 11 回弹变化曲线

通过模拟发现设置凸顶后材料的塑性变形增加,回弹减小,如图 12、13 所示。

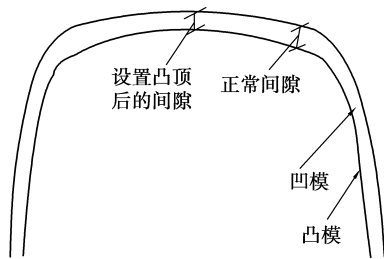


图 12 设置凸顶后的间隙示意图

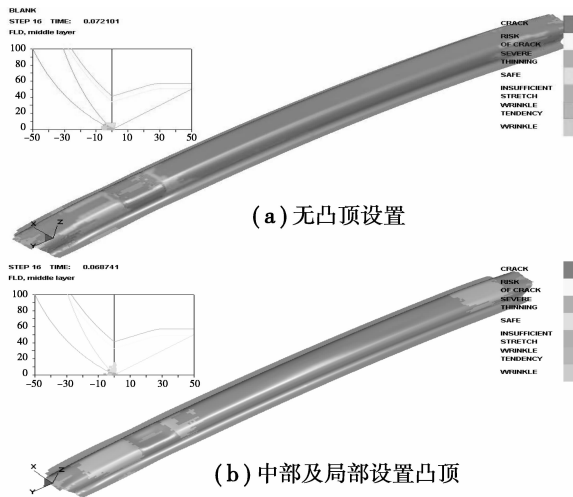


图 13 设置凸顶前后模拟结果对比

4 实验结果

根据上述模拟结果,将 B 处升高 6 mm 并重构型面,凸模型面上设置 2 mm 凸顶,压边力设为 100 t,板料外形是根据型面展开落料而成的,工序采用“落料、冲定位孔—拉延—修边—整形、冲孔”,经过实验得出满意的结果,如图 14 所示。



图 14 凸模型面及检具上的合格零件

表 4 最终型面模拟与实际样件对比

距离目标面/mm		B 处回弹角/(°)			
A 点	O 点	θ_1	θ_2		
模拟	实际	模拟	实际	模拟	实际
0.957	0.68	1.785	1.39	1.6	1.1
				1.9	1.7

5 结论

通过对高强度钢保险杠成形过程的数值模拟及实验、加工的验证,可得如下结论:

1)对回弹较大的高强度钢制件,除了采取模面补偿法外,还需在工艺补充时尽量增加其塑性变形,如减小凸模圆角,适当增加压边力,设置局部凸顶等。

2)设置高度为 0.5~1.5 倍料厚的凸顶可使金属板料塑性变形增加 5%~10%,从而有效减小回弹缺陷。但凸顶容易在零件上形成压痕,应尽量将其设置在工艺补充的非重要部位,如需切除的废料部分。

参考文献:

[1] JEANNEAU M, PICHANT P. The trends of steel products in the European automotive industry[J]. La Revue de Metallurgies-CIT, 2000(11):1399-1408.

[2] POWERS W F. Automotive materials and technologies for the 21st Century [J]. Advanced Materials & Processes, 2000(5):693-643.

[3] 王利. 汽车用高强度 IF 薄钢板[J]. 宝钢技术, 1997(1):58-61.

WANG LI. High strength IF thin steel sheet for automotive application[J]. Baosteel Technoloh, 1997(1):58-61.

(下转第 118 页)

- Journal of Multiphase Flow, 2008, 34(1):13-28.
- [5] ZHANG F, TANG D L. Study on the temperature distribution of heated falling liquid films[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2008, 237(7):867-872.
- [6] YANG L P, SHEN S Q. Experimental study of falling film evaporation heat transfer outside horizontal tubes [J]. Desalination, 2008, 220(1/3):654-660.
- [7] BEN JABRALLAH S, BELGHITH A, CORRIOU J P. Convective heat and mass transfer with evaporation of a falling film in a cavity[J]. International Journal of Thermal Science, 2006, 45(1): 16-28.
- [8] BEN JABRALLAH S, CHERIF A S. Experimental study of the evaporation of a falling film in a close cavity[J]. Desalination, 2005, 180(1/3): 180-195.
- [9] CHUN K R, SEBAN R A. Heat transfer to evaporating liquid film [J]. ASME Journal of Heat transfer, 1971:391-396.
- [10] STRUVE H. Heat Transfer to an evaporating falling refrigerant film[C]// 12th Congress of the International Institute of Refrigeration, August, 1967, Madrid, Spain. [S. l.]: IEEE, 1967:284-291.
- [11] FUJITA T, UEDA T. Heat transfer to falling liquid films and film breakdown[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1978, 21:109-118.
- [12] SHI C M, WANG Y, HU H L, et al. Mathematical simulation of lithium bromide solution laminar falling film evaporation in vertical tube [J]. Journal of Thermal Science, 2010,19(3):239-244.
- [13] ADOMEIT P, RENZ U. Hydrodynamics of three-dimensional waves in laminar falling films [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000 (26): 1183-1208.
- [14] UEDA T, TANAKA H. Measurements of velocity, temperature and velocity fluctuation distributions in falling liquid films [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1975(2):261-267.
- [15] 戴永庆. 溴化锂吸收式制冷技术及应用[M]. 北京:机械工业出版社,1996.

(编辑 王维朗)



(上接第108页)

- [4] SAKUMA Y, MATSUMURA Y, AKISUE O. Influence of Content and Annealing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of 400°C Transformed Steel Containing Retained Austenite[J]. ISIJ Internatinal,1991,31(11):1348-1353.
- [5] KURIYAMA Y, TAKAHASHI M, OHASHI H. Trend of car weight reduction using high-strength steel [J]. Automatics,2001,55(4):51-57.
- [6] STANDER N, ROUX W, EGGLESTON T, et al. A design optimization and probabilistic analysis Tool for the Engineering Analyst [M]. Livermore, USA: [s. n.], 2006.
- [7] MAJESKE K D, HAMMET P C. Identifying sources of variation in sheetmetal stamping[J]. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2003(15): 5-18.
- [8] JACQUES P J, LADRIERE J, DELANNSP F. On the influence of interactions between phases on the mechanical stability of retained austenite in transformation-induced plasticity multi-phase steels [J]. Metallurgical Materials Transactions, 2001, A32 (11):2759-2768.
- [9] IPCC: Climate Change 2007. The physical science basis intergovernmental panel on climate change [R]. Switzerland: Geneva, 2007.
- [10] STREICHER A M, SPEER J G, MATLOCK D K. Response of Retained Austenite in a C-Si-Mn High Strength TRIP Sheet Steel[J]. Steel Research, 2002, 73(6):287-293.
- [11] BURKHARDT L. Simulation des Warmumformprozesses auf Basis der Identification einflussreicher Parameter[D]. Germany: ETH Zürich,2008.
- [12] 王昶,何玉林,胡亚民,等. 轿车车身覆盖件冲压模具工艺补充面设计与应用[J]. 锻压技术, 2006, 31(5): 100-103.
- WANG CHANG, HE YU-LIN, HU YA-MIN, et al. Application and practice for addenda of stamp forming process of auto-body panel [J]. Forging & Stamping Technology,2006,31(5):100-103.
- [13] FISCHER F D, REISNER G, WERNER E, et al. A new view on transformation induced plasticity (TRIP) [J]. International Journal of Plasticity, 2000, 16 (7/8): 723-748
- [14] 王孝培. 冲压手册[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [15] 林忠钦. 车身覆盖件冲压成形仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

(编辑 王维朗)