

QP980 高强度钢制造的汽车地板纵梁拉延件的回弹分析

刘贞伟¹, 吴彦骏¹, 莫云²

(1.宝山钢铁股份有限公司中央研究院, 上海 200941;

2.奇瑞汽车股份有限公司, 安徽 芜湖 241009)

摘要: **目的** 研究采用超高强度钢 QP980 牌号的典型汽车梁类件在使用拉延工艺时的回弹特点, 分析零件结构对实际回弹的影响过程与特点。**方法** 先通过理论与仿真分析预测回弹, 然后使用补偿后的模面开模进行试制, 并搜集实际回弹数据, 进行分析与对比。**结果** 仿真分析可以准确预测零件一侧法兰的回弹, 但对于另一侧法兰的预测精度相对较差。**结论** 零件弯曲内侧侧壁存在局部剧烈弧形回弹是两侧法兰回弹存在差异的主要原因, 而拉延序触料时与凹模圆角接触的材料部位对应弧形最大的位置, 合模过程中凹模圆角与材料接触会导致料片的弧形弯曲, 这种弯曲尤其在 x 向存在压应力的侧壁位置回弹显著, 从而导致对应位置的法兰回弹尺寸超标。

关键词: 回弹; 超高强度钢; 仿真; 回弹补偿

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.013

中图分类号: TG386.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)06-0062-06

Springback Control of Floor Rail Member Made of AHSS QP980

LIU Zhen-wei¹, WU Yan-jun¹, MO Yun²

(1. Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 200941, China;

2. Chery Automobile Co., Ltd., Wuhu 241009, China)

ABSTRACT: This article aims to study characteristics of springback formed in drawing of a typical car floor rail member made of steel 980QP and analyze influencing process and features of component structure on actual springback. The springback was analyzed and predicted with theory and simulation firstly. Then the die after compensation was opened to have trial production. Comparison between simulation results and actual results was done afterwards. Simulation analysis could predict springback of flange on one side of parts accurately, compared with the other side which was of poor prediction accuracy. It was caused by residual stress difference between two sides. Local severe arc springback from inner wall of parts bending is the main cause of springback difference. Sidewall curl formed at the moment when die radius touches steel and tries to restore after die opened. The sidewall curl is obvious particularly if there is press stress in direction x . As a result, the springback dimension of flange of corresponding position exceeds the standard.

KEY WORDS: springback; advanced high strength steel; simulation; springback compensation

近年来节能减排的要求日趋严格, 车身轻量化 成为研究热点, 采用超高强度钢是目前实现车身轻量

收稿日期: 2017-10-10

作者简介: 刘贞伟 (1982—), 男, 工程师, 主要研究方向为高强度钢的成型。

化最有效的路径之一。宝钢全球首发的 QP980 钢种抗拉强度为 1000 MPa，伸长率大于 20%，能满足复杂结构件强度和成形性要求，应用前景十分广泛，是目前超高强钢研究的热点。回弹是制约超高强钢应用的重要因素之一，通过对工艺参数中的压边力、筋、摩擦因数等进行优化来控制回弹是常用的方法^[1]。在模面上进行对应的回弹补偿也是回弹控制中一种非常常用的方法，但是涉及到不同形状的零件，各种不同的影响因素互相耦合，导致无论是软件还是理论分析的精度都难以达到令人满意的效果。为了尽量简化相关因素之间的关系，文中选择一种相对简单的地板纵梁零件进行仿真分析及合理补偿，研究此类零件的回弹特性并寻找最优的分析和回弹控制方法。

1 超高强钢回弹的分类及形成原理

现在的超高强钢主要应用在汽车重要结构件，碰撞性能敏感零件上，对于这些形状相对简单的零件尤其是下车体零件，高强钢回弹种类主要可以分为角度回弹、侧壁弧形回弹、扭曲回弹^[2]。

1.1 角回弹

角回弹是在成形以后，产品型面偏离凸模圆角，与之形成夹角的一种回弹方式，角回弹示意图 1。

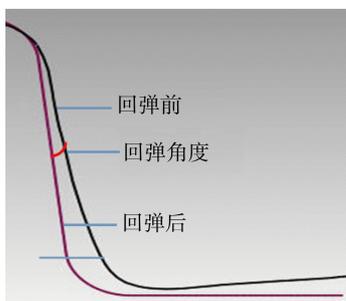


图 1 角回弹
Fig.1 Angular springback

坯料经过凸模圆角时，经过了弯曲和拉伸的过程，在板料的外侧产生拉应力，在内侧产生压应力，这两种应力在卸载后的释放导致了角度变大。

1.2 侧壁弧形回弹

零件侧壁位置的材料都是在拉伸过程中经过凹模圆角进入模腔的，这种折弯拉伸的过程在坯料的厚度方向产生不平衡的、渐进分布的应力，卸载后的应力释放导致了最终的法兰尺寸偏差过大，这对于一些梁类、或通道类零件的装配过程来说是非常不利的，甚至导致无法装配，经过凹模 R 角后导致的侧壁弧形回弹见图 2。

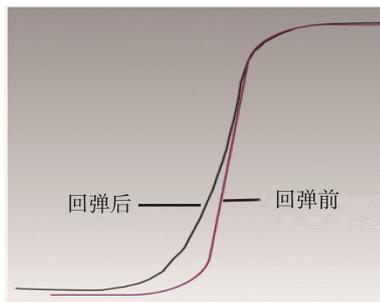


图 2 经过凹模 R 角后导致的侧壁弧形回弹
Fig.2 Sidewall curl formed passing Die R

侧壁回弹的大小与坯料厚度方向的弹性恢复能力差异密切相关，坯料的强度越高，这种差异越明显，而且这种差异不仅与名义上的屈服强度相关，也与其硬化过程曲线相关。

1.3 扭曲回弹

对于梁类件而言，成形过程在梁长度方向上的不一致会导致扭曲，而导致这些不一致的因素很多，包括了零件的结构设计、模面设计、工艺过程参数、材料性能等。扭曲回弹示意图 3。

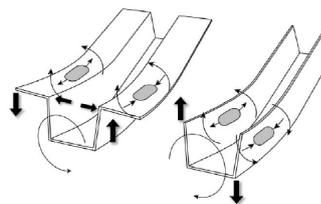


图 3 扭曲回弹
Fig.3 Twist springback

2 地板纵梁的回弹特点分析

地板纵梁是整车零件中比较典型的几型结构件，在使用高强钢进行成形时，往往会选择折弯整形的方式，但对于一些存在弯曲或在 R 角位置有特征的零件，也可以采用拉延的方式，此处选择拉延方式来论述对应的回弹分析及控制过程。此处选择的例子是某地板纵梁（简化见图 4）。

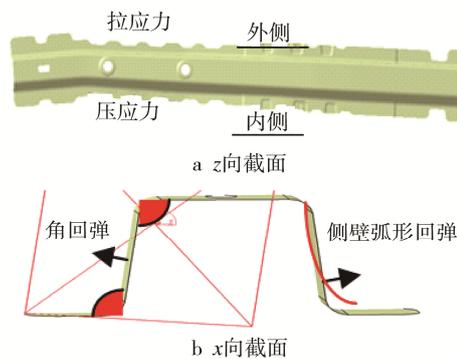


图 4 地板纵梁
Fig.4 Floor rail member

根据超高强钢零件特点,该地板纵梁的工序设计为4序,分别是拉延、修边冲孔、侧整、侧修边冲孔。材料选用宝钢的超高强钢 HC600/980QP-EL,厚度为1.4 mm。

从零件的形状来看,在凸模圆角位置和凹模圆角位置会存在角回弹,在模具卸载后其角度都会有一定程度的放大^[3],因为凹模圆角处在拉延过程中存在一定的拉应力,故其厚度方向的应力分布相对凸模圆角要较均匀,故角回弹以凸模圆角处为主。在拉延过程中部分侧壁的材料是经过凹模圆角流入,从而导致了在厚度方向的应力分布不均,存在类似图4b所示的侧壁弧形回弹,从而最终导致安装面法兰的尺寸超差。此零件在x向有弯曲,在零件发生花盆回弹时会受到侧壁的制约,从而在弯曲位置产生不均匀的应力(见图4),从而导致x向存在“弯曲拉直”的回弹,同时这种回弹会影响到法兰回弹,导致两侧的回弹出现差异,影响到回弹补偿的精度。

2.1 地板纵梁回弹特点的仿真分析

2.1.1 仿真过程设置

材料文件制作。采用 AUTOFORMR5.2 软件对从拉延到整形的全工序进行了仿真模拟,QP980 是新钢种^[4],为了保证仿真结果的精度,此处利用 AUTOFORM 软件材料文件制作功能,根据采用钢种的实际性能制作材料文件,通过软件与实际的多次比对,在数据拟合上选择了最优拟合方式,硬化曲线部分采用 APROXIMATION^[5],屈服面采用 BARLAT^[6],成形极限 FLD 采用实测的曲线输入,通过 AUTOFORM 的材料卡片展示材料性能见图5,其中 σ_0 为屈服强度, σ_m 为抗拉强度, n 为加工硬化系数, A_G 为均匀伸长率, r_m 为塑性应变比, ϵ_{10} 为平面应变状态的最大主应变。

工艺过程设置此处的工艺设置采用拉延+修边冲孔+侧整+侧修边冲孔的方式,因此零件侧壁部分回弹

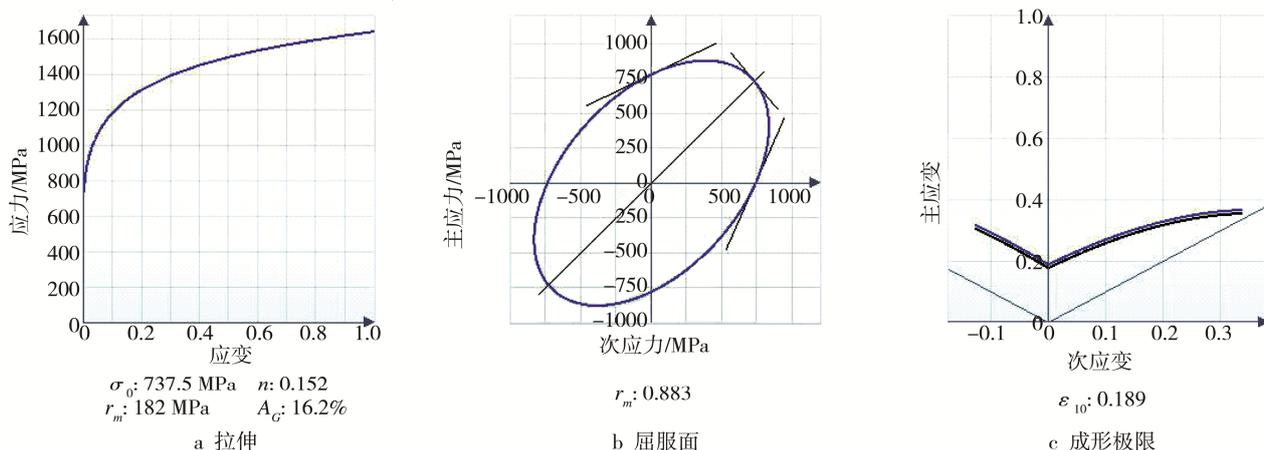


图5 HC600/980QP 材料性能
Fig.5 Material property of HC600/980QP

需要的补偿量会导致在拉延序出现负角,故增加侧整工序进行回弹的控制。在软件中的 PLAN 中的 PROCESS PLAN 中进行设置^[7],具体见图6—7。

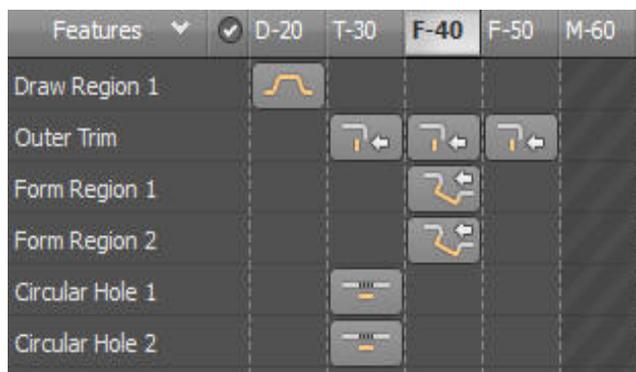


图6 工序设置
Fig.6 Process design

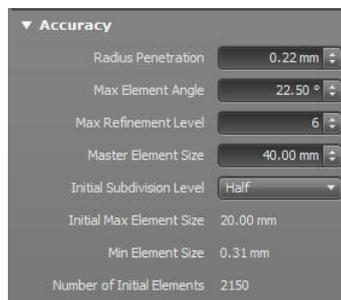


图7 网格计算精度
Fig.7 Accuracy setup

因为最终的实际零件的回弹状态通过白光扫描设备进行检测,而检测的时候零件是处于自由回弹状态,故此关于回弹的类型选择也是自由回弹,在进行材料有限元网格划分的过程中,单元格的大小自动选定为0.31~40 mm,最大角度为22.5°。

2.1.2 仿真结果分析

针对这个零件,采用 AUTOFORM 软件进行第一轮的仿真分析^[8],得到在自由回弹前提下的回弹仿真数据。从结果来看,凸模 R 角位置的回弹造成尺寸偏差是回弹的主要原因,同时在两端处于相对自由位置的部分回弹相对严重(见图 8 圈内部分)。因为此零件的安装面主要是法兰边的焊点位置,为了保持回弹尺寸计算规则在仿真计算和实际测量中的一致性,文中以回弹前后法兰边部分测量点的 z 向距离作为评判回弹程度的衡量标准。仿真的具体数据见图 8,仿真回弹截面见图 9。

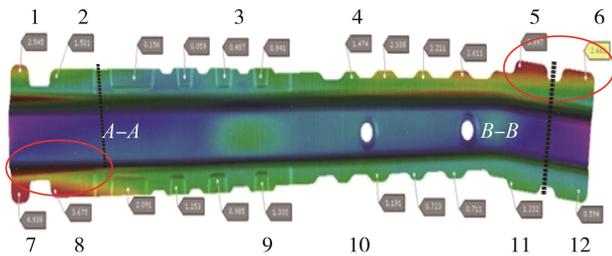


图 8 整体回弹仿真结果
Fig.8 Results of overall FEM springback

仿真回弹的情况来看,主要回弹形式主要是圆角位置的角回弹,侧壁的弧形回弹在仿真结果上并不明显。因为 x 向弯曲的关系,导致该方向上回弹后的零件两端略有弯曲^[9],同时两端 240 mm 以内的回弹较大(图 8 圈内部分)。两端在 x 向略有扭曲。

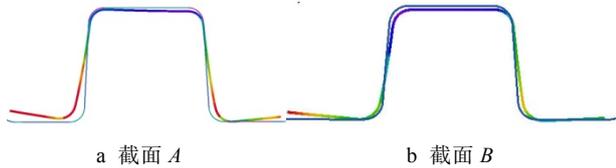


图 9 仿真回弹截面
Fig.9 Section of FEM springback

因为扭曲回弹的补偿较为复杂,为避免补偿过程互相影响,此处先对角回弹进行补偿,待角回弹得到有效控制后,再对扭曲回弹进行补偿^[10]。补偿策略以凸模 R 角原点为轴线,对侧壁进行旋转 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 之间(具体数值在长度方向上根据回弹值进行近似 1:1 的补偿,同时在长度方向的补偿比例系数略不同,两侧 240 mm 范围内的补偿系数采用 2:1 比例进行补偿),补偿的量分别在 OP10 的拉延和 OP30 的侧整进行。补偿中模面的修改与调整可以在 AUTOFORM 中的 DIEFACE 模块的 MODIFY 中实现,调整之后的模面直接参与计算。通过直接使用补偿后的模面再次进行仿真,分析回弹,补偿之后重新进行计算得出的回弹见图 10,从云图来看,尺寸超差的红色部分的面积主要集中在两端位置^[11]。如此进行 3 轮的优化^[12],最终的尺寸偏差达到了目标公差范围,则按照此工艺

模面为基础进行模面设计与制造^[13]。

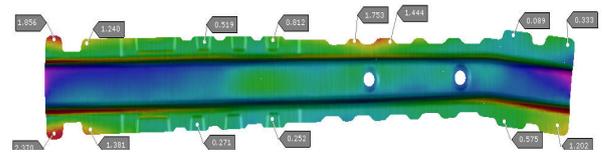


图 10 补偿后的回弹
Fig.10 Springback after compensation

从回弹补偿后所取得的效果来看,端部 4 个点的补偿效果不明显,甚至出现恶化,但中间部位的测量点补偿效果较好,补偿前, $P_1\text{—}P_{12}$ 的回弹值分别为 2.5, 1.5, 0.8, 1.4, 3.8, 2.7, 4.9, 3.6, 1.3, 1.2, 1.2, 0.6 mm,合格率为 0;补偿后, $P_1\text{—}P_{12}$ 的回弹值分别为 1.8, 1.2, 0.8, 1.7, 0.1, 0.3, 2.3, 1.3, 0.3, 0.3, 0.5, 1.2 mm,合格率为 50%,最大偏差为 0.5 mm。

2.2 实际零件的回弹分析

按照设计的工序,进行了零件的实际生产,此处采用白光扫描的方法获取零件的实际尺寸与回弹大小,并在 GEOMAIC 软件中进行实际回弹大小的测量。比较产品与实际零件的尺寸偏差,操作过程主要分为定位与测量两部分。

2.2.1 定位

在检具测量时,通过定位孔的定位,确保了顶部面与检具的充分贴合,定位完成后的效果见图 11。为还原检具测量情况,使用 GEOMAGIC 软件中的 N 点对齐进行,其中在定位孔附近选择 2 个点,以保证此处的贴合。

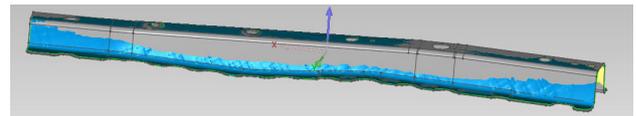


图 11 定位完成后的效果
Fig.11 Relocation results

2.2.2 测量

定位完成以后,结合剖面于具体的回弹值确认定位的情况,确保定位孔和面的充分贴合。首先对整个 x 方向的回弹情况进行全面分析与比较,发现此零件补偿后的回弹主要是单侧壁的弧形回弹,这种情况在长度方向有弯曲的零件较为多见。偏差在典型的截面形状见图 12,零件在检具的状态见图 13。



图 12 实际回弹的典型截面
Fig.12 Typical section of actual springback

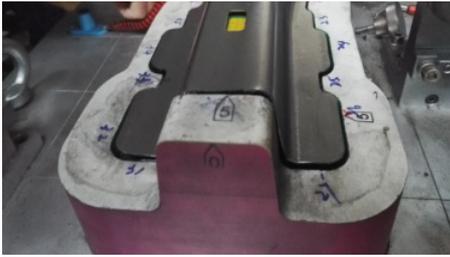


图 13 零件在检具的状态
Fig.13 Component on checking fixture

从图 12 的截面来看, 无论是凸模圆角或者凹模圆角处的角回弹还是侧壁的弧形回弹都比较可控。按照图 8 中所示的测量点位置的的回弹值进行测量, 具体见图 14 (此与仿真件为对称件, 回弹数据一致)。

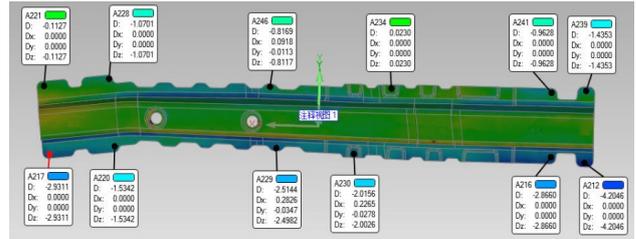


图 14 侧壁的回弹分布
Fig.14 Springback distribution of sidewall

2.3 仿真与实际回弹结果的对比分析

为了确保仿真阶段和实际白光扫描得出的回弹结果之间的可比性, 文中以同样的测量点在仿真分析和实际白光扫描中进行对比。具体结果见图 15。

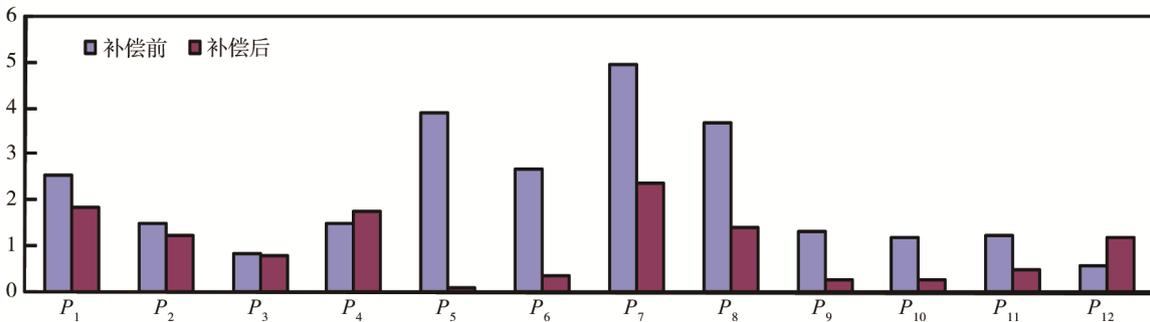


图 15 仿真回弹与实际回弹的对比
Fig.15 Comparison of between FEM springback and actual springback

根据前文的分析及图 4a 所示, 受到弯曲位置引起的应力变化, 内侧外侧的会有回弹不同。这一点在仿真阶段并没有准确地预测到, 但实际冲压出来后差异则显现出来, 与理论分析一致。“内侧”的回弹较“外侧”的大, 因为仿真时并未算出, 故也无法补偿阶段做控制, 最终在零件上体现出来, 需要进一步地调整和控制。仿真计算出的“外侧”回弹预测精度相对较高, 尤其是除了两段之外的中间应力相对稳定位置。为弄清产品、仿真、实际三者之间在 x 向弯曲位置之间的差异, 将三者在中后进行分析, 其剖面见图 16。

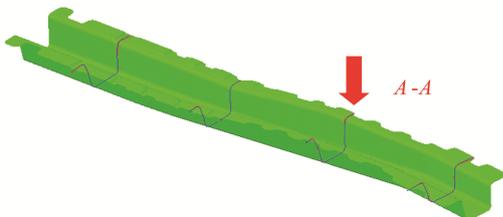


图 16 剖面
Fig.16 Profile

A 截面见图 17, 其中绿线代表产品, 蓝线代表实际, 红线代表仿真, 可以看出, 在弯曲点附近的 A 截面上红圈处存在弧形弯曲。在软件中可测量处此位置

距离法兰圆角的距离大概为 45 mm。这个距离有可能是此处材料在拉伸工序的流料距离。为了验证这一点, 在仿真软件中对流入量进行测量, 发现此位置的流入量在 49 mm, 与红圈内到圆角的距离近似, 故可认为在拉伸合模时凹模圆角接触到的材料, 流入到凹模内部侧壁上之后会有弧形弯曲, 导致对应法兰位置的回弹变大, 尤其是在零件 x 向弯曲“内侧”位置^[15]。拉伸工序流入量见图 18。

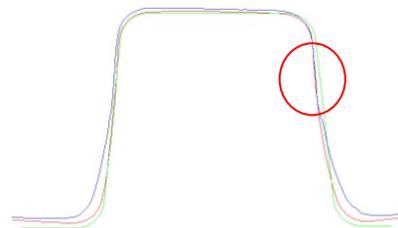


图 17 A 截面
Fig.17 Section A

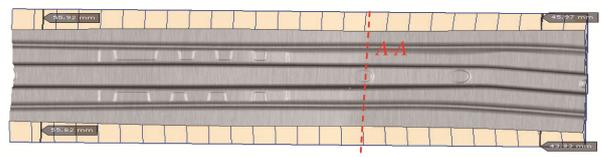


图 18 拉伸工序流入量
Fig.18 Inflow volume of drawing

3 结论

结合宝钢牌号 QP980-EL 的具体情况, 通过在 AUTOFORM 合理地搭建模型, 仿真分析能够预测到地板纵梁零件弯曲外侧的回弹情况, 精度在 ± 0.5 mm 左右, 但内侧的回弹预测精度相对较差。

对于存在长度方向弯曲的地板纵梁零件, 通过理论分析和样件试制, 发现其弯曲会导致法兰的 z 向回弹在弯曲内侧大外侧小。内侧的回弹为外侧回弹的 3 倍左右, 同时零件两端的回弹较大, 为中间法兰区域回弹的 2 倍左右。这种差别的主要原因是合模过程中凹模圆角与材料接触时导致料片的弧形弯曲, 这种弯曲尤其在 x 向存在压应力的侧壁位置回弹很显著, 从而导致对应位置的法兰回弹尺寸超标。

参考文献:

- [1] 刘伟, 刘红生, 刑忠文, 等. 高强钢板冲压成形回弹规律与工艺参数研究[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(6): 758—761.
LIU Wei, LIU Hong-sheng, XING Zhong-wen, et al. Study on Process Parameters and Springback Rule for Stamping of High Strength Steel Sheet[J]. Materials Science & Technology, 2010, 18(6): 758—761.
- [2] International Iron & Steel Institute Committee on Automotive. Advanced High Strength Steel(AHSS) Application Guideline[R]. 2006, 9: 2—45.
- [3] 蒋浩民, 陈新平, 石磊, 等. 先进高强度钢板的成形特性及其应用[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 183—186.
JIANG Hao-min, CHEN Xin-ping, SHI Lei, et al. Forming Characteristics and Application of Advanced High Strength Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(4): 183—186.
- [4] 孙继军, 王才, 张卫峰. 高强钢制件回弹控制方法[J]. 汽车工程师, 2013(5): 56—59.
SUN Ji-jun, WANG Cai, ZHANG Wei-feng. Control Method on High Strength Steel Part Resilience[J]. Auto Engineer, 2013(5): 56—59.
- [5] 蒋浩民, 徐伟力, 吴磊, 等. 高强钢板冲压位移回弹补偿技术研究与应用[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(5): 72—77.
JIANG Hao-min, XU Wei-li, WU Lei, et al. Research on Springback Compensation Based on Fully Cycle Simulation of High Strength Steel[J]. Materials Science & Technology, 2012, 19(5): 72—77.
- [6] 刁可山, 蒋浩民, 陈新平, 等. 1000MPa 级双相钢弯曲性能实验[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(6): 79—83.
DIAO Ke-shan, JIANG Hao-min, CHEN Xin-ping, et al. Experimental Study on Bending Properties of 1000MPa DP Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(6): 79—83.
- [7] 李双一, 赵磊, 王光, 等. 第三代高强钢在汽车应用中冲压特性及回弹研究[J]. 汽车零件, 2016(11): 21—25.
LI Shuang-yi, ZHAO Lei, WANG Guang, et al. Research on Stamping Characteristic and Springback of the Third Generation High Strength Steel[J]. Automobile Parts, 2016(11): 21—25.
- [8] 王梦寒, 岳宗敏, 王根田. 考虑包辛格效应的高强钢 U 型件冲压回弹规律分析[J]. 锻压技术, 2016, 41(2): 58—63.
WANG Meng-han, YUE Zong-min, WANG Gen-tian. Study on the Springback Law of High Strength Steel U-shaped Part Considering Bauschinger Effect[J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(2): 58—63.
- [9] 王连轩, 张龙柱, 任虎, 等. 汽车板用高强钢冲压回弹的数值模拟与研究[J]. 河北冶金, 2017(2): 20—24.
WANG Lian-xuan, ZHANG Long-zhu, REN Hu, et al. Numerical Simulation and Research for Stamping Spring Back of High-Strength Steel for Automobile Plate[J]. Hebei Metallurgy, 2017(2): 20—24.
- [10] 刁可山, 蒋浩民, 谢坚强. 1000 MPa 级 DP 钢的成形特性实验[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(4): 95—96.
DIAO Ke-shan, JIANG Hao-min, XIE Jian-qiang. Experimental Research on Mechanical Properties and Formability of 1000 MPa DP Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(4): 95—96.
- [11] 郑钢, 魏良庆. 高强度钢汽车纵梁的冲压成形模拟和回弹补偿[J]. 锻压技术, 2016, 41(2): 64—67.
ZHENG Gang, WEI Liang-qing. Stamping Simulation and Springback Compensation for Automobile Rail of High Strength Steel[J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(2): 64—67.
- [12] 丁磊, 林建平, 庞政, 等. 考虑 TRIP 效应的高强钢多相本构模型[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(4): 23—26.
DING Lei, LIN Jian-ping, PANG Zheng, et al. Multi-phase Constitutive Model of Ultra-High Strength Steel QP980 Coupling with Trip Effect[J]. Journal of Plastic Engineering, 2013, 20(4): 23—26.
- [13] 郑德兵, 柳一凡, 吴纯明, 等. 第 3 代高强钢 QP980 冲压稳定性研究[J]. 模具工业, 2015, 41(2): 16—19.
ZHENG De-bing, LIU Yi-fan, WU Chun-ming, et al. Research on Stamping Stability of the Third Generation High Strength Steel QP980[J]. Mold Industry, 2015, 41(2): 16—19.
- [14] 徐祥和. 基于模具补偿的高强钢冲压回弹控制方法研究[J]. 上海汽车, 2013(12): 42—44.
XU Xiang-he. Study of Springback Compensation Method Based on Mold Compensatory[J]. Shanghai Auto, 2013(12): 42—44.
- [15] 蒋浩民, 汪晨. 基于胀弯成形的高强度钢板回弹特性实验与分析[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(2): 33—38.
JIANG Hao-min, WANG Chen. Study on Springback Characters of HSS Steels Based on Stretch Bending Forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(2): 33—38.