

文章编号:1673-9981(2022)02-0282-04

# 汽车车架用高强度钢板最小弯曲半径及 冲压回弹规律研究

李炳新<sup>1</sup>, 伍卫凯<sup>1</sup>, 张道达<sup>2</sup>, 陈汪林<sup>1\*</sup>

(1. 广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006; 2. 江西省机械科学研究所, 江西 南昌 330002)

**摘要:**为解决QP-700新型高强度钢板在车架冲压成型过程中极易产生回弹而影响成型精度的问题,对比研究了在冲压成型过程中不同厚度的高强度钢板回弹和失效的情况。研究表明,QP-700新型高强度钢板回弹量随板材的厚度增加而减小,随弯曲半径的增加而增大。推导出QP-700高强度钢板最小弯曲半径的经验公式 $r_{\min}=1.7t+4.6$ ,该钢板最小相对弯曲半径为2.2。综上所述,通过冲裁试验可为高强度钢板的冲压成型提供理论指导。

**关键词:** 高强度钢板; 弯曲半径; 回弹; 冲压; 失效

**中图分类号:** TG142.41

**文献标志码:** A

**引文格式:**李炳新,伍卫凯,张道达,等. 汽车车架用高强度钢板最小弯曲半径及冲压回弹规律研究[J]. 材料研究与应用, 2022,16(2):282-285.

LI Bingxin, WU Weikai, ZHANG Daoda, et al. Research on Minimum Bending Radius and Stamping Springback Law of High Strength Steel Plate for Automobile Frame[J]. Materials Research and Application, 2022,16(2):282-285.

随着汽车轻量化发展,高强度钢板在汽车上的应用倍受青睐<sup>[1-3]</sup>。为此,欧美国家纷纷组织国内顶尖科研机构对高强度钢板在汽车上的应用进行研究。截止2009年,已通过高强度钢板组合应用的轻量化技术,从而实现减重37%<sup>[4-6]</sup>。与此同时,针对高强度钢板在汽车轻量化应用方面,钢铁公司也独立开展了研究,如ABC(Arcelor Body Concept)和NSC(New Steel Concept)公司制定了通过高强度钢板的大量应用而实现了20%~40%的减重效果的目标<sup>[7]</sup>。此外,包括宝钢、鞍钢在内的16家国内钢铁公司,针对钢制车身结构制定了车身减重35%的2020年度目标,以便进一步提升和稳固钢铁材料在汽车制造业中的优势地位<sup>[8-9]</sup>。然而在发掘高强度钢板在车身上的应用潜力的同时,也发现高强度钢板在冲压成型过程中存在回弹的问题,其对成型件

的尺寸精度有较大影响<sup>[10-15]</sup>。因此,对高强度钢板的回弹规律进行研究,对合理使用高强度钢板及控制企业成本和提高生产效率都有重要意义。

某公司在轻量化研究进程中,使用新型QP-700型号的高强度钢板冲压成型车架,在成型过程中发现钢板的回弹角度较大,使车架尺寸精度难以保证,且钢板的最小弯曲半径无经验数据指导<sup>[16]</sup>。因此,拟对上述型号的高强度钢板的回弹规律进行研究,以确定QP-700钢板的最小弯曲半径,并研究板材厚度及抗拉强度对回弹的影响规律,以便为工业生产提供有效指导。

## 1 实验部分

以QP-700高强度钢板为研究对象,分别取厚度

收稿日期:2021-04-17

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2020B010185001);江西省科技厅重点研发技术项目(20212BBE53044);江西省科技厅计划项目(20202BBEL53025);南昌市模具表面处理与加工制造技术重点实验室项目(2021-NCZDSY-003);江西省教育厅科学技术项目(GJJ161465)

作者简介:李炳新(1996-),男,广东佛山人,硕士研究生,主要研究方向为刀具涂层设计与制备,E-mail:libx2018@qq.com。

通信作者:陈汪林(1982-),男,湖北人,副教授,博士,主要研究方向为刀具及模具PVD涂层设计及制备,E-mail:chenlin1038@163.com。

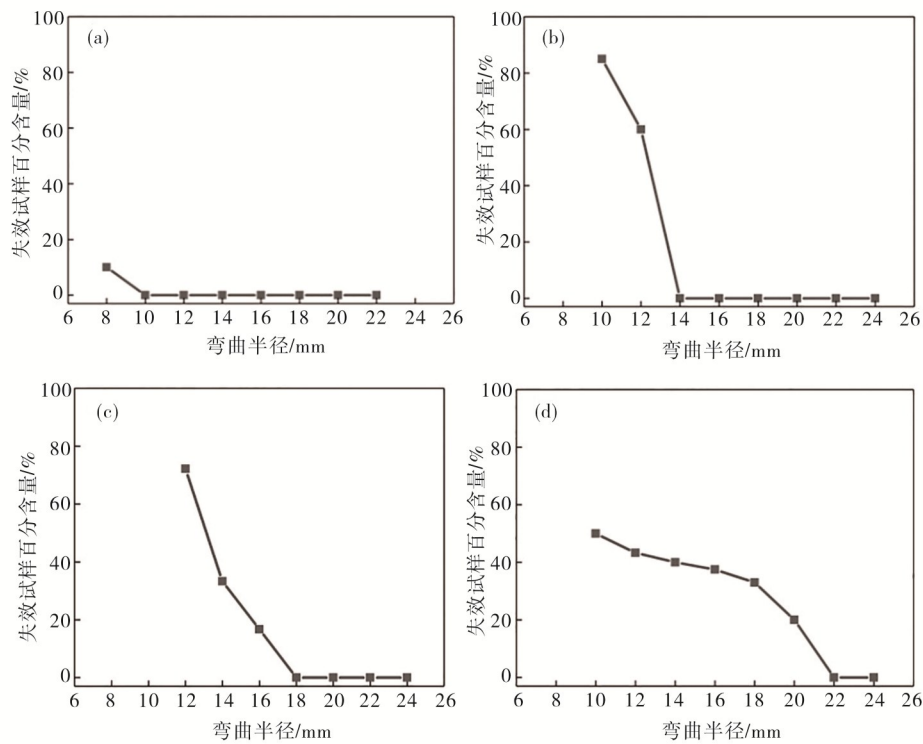
为 4, 6, 8 和 10 mm 的试样进行研究。采用大量实验法, 设计与大型车架成型模具结构相近的简易 V 型弯曲模具以完成高强度钢板的冲裁实验, 待冲裁结束后记录试样的失效情况, 并统计失效试样百分比, 同时利用游标万能角度尺对试样成型后角度进行测量, 以便测定样品的回弹量。

模具的初始模角半径为 10 mm, 折弯角度为  $90^\circ$ , 第一次冲裁结束后对模具修模, 使模具圆角逐渐增大, 依次进行后续冲裁试验。通过大量实验确定不同厚度的高强度钢板对应的最小弯曲半径, 并通过数据处理分析得出最小相对弯曲半径的经验公式, 探明高强度钢板回弹与板材厚度和抗拉强度的关系。为保证实验的准确性, 每种实验条件下取 5 块样品进行实验, 分别记录失效及回弹情况, 以便统计试样失效的百分含量及回弹量, 其中回弹量取 5 块试样回弹的平均值。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 最小弯曲半径测定及分析

板材在弯曲过程中外表面的切向拉应力最大, 产生的切向变形也最大。当变形超过极限变形程度时, 板料将会沿着折弯线方向发生破裂。因此, 最小弯曲半径是产品冲压成型过程中的一个比较重要的参数<sup>[17-18]</sup>。图 1 为不同厚度  $t$  的失效试样(试样断裂或有裂纹的试样)的百分比与冲压模具圆角的关系曲线。从图 1(a)可见, 当弯曲半径为 12 mm 时, 厚度为 4 mm 的 QP700 钢板试样没有失效, 说明该试样的最小弯曲半径为  $r_{\min}$  为 12 mm。从图 1(b)至图 1(d)可见, 当厚度为 8、10 和 12 mm 时, 高强度钢板的最小弯曲半径分别为 14、18 和 22 mm。



(a) 厚度 4 mm; (b) 厚度 6 mm; (c) 厚度为 8 mm; (d) 厚度 10 mm。

(a) thickness of 4 mm; (b) thickness of 6 mm; (c) thickness of 8 mm; (d) thickness of 10 mm.

图 1 不同厚度失效样品的百分含量与弯曲半径的关系曲线

Fig. 1 The relationship between the percentage content and the bending radius of the failure samples with different thickness

在 origin 软件中采用最小二乘法绘制板材厚度  $t$  与最小弯曲半径  $r_{\min}$  的关系曲线, 如图 2 所示。从图 2 的拟合结果可见: 该拟合直线的方程为  $r_{\min} = 1.7t + 4.6$ ; 同时, 发现  $r_{\min}$  与  $t$  之间的关系图的回归率达到了 0.97, 误差极小为 0.17。表明, 该直线能够较好的描述 QP700 高强度钢板的最小弯曲半径

与厚度之间的关系, 可以将该关系式作为除上述四种厚度以外的其他厚度的钢板最小弯曲半径的参考公式。

板材的极限变形程度经常用最小相对弯曲半径  $r_{\min}/t$  来表示。因此, 利用 origin 软件将四种厚度的 QP700 板材的相对弯曲半径  $r/t$  与板材失效百分含

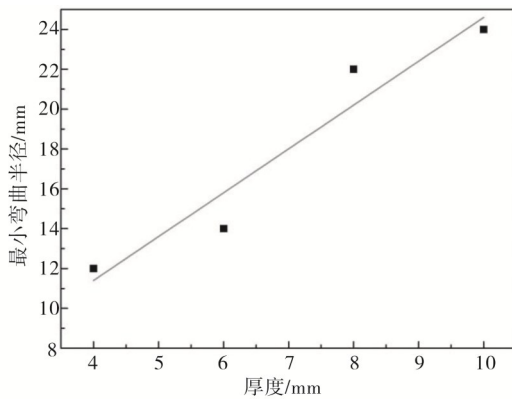


图2 钢板最小弯曲半径  $r_{\min}$  与钢板厚度  $t$  的关系图  
Fig. 2 The relationship between the minimum bending radius  $r_{\min}$  and the thickness  $t$  of steel plate

量之间的关系绘制成柱状图,如图3所示。从图3可以看出:随着相对弯曲半径  $r/t$  的比值逐渐增大,板材失效的百分含量总体呈递减趋势;当  $r/t \geq 2.2$  时,QP700 板材的失效试样百分含量为零。由此可以推断,QP700 高强度钢板的最小相对弯曲半径  $r_{\min}/t = 2.5$ ,该值亦可为其它厚度的高强度钢板最小弯曲半径的确定提供理论指导。

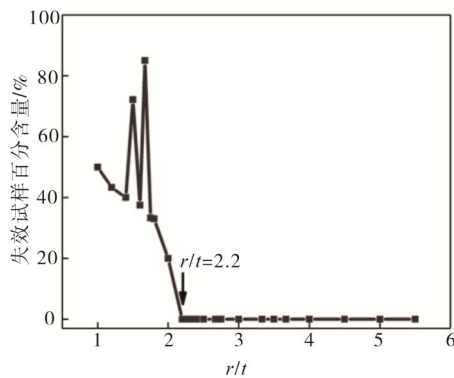


图3 试样失效百分含量与相对弯曲半径 ( $r/t$ ) 的关系图  
Fig. 3 The relationship between the failure percentage of the sample and the relative bending radius ( $r/t$ )

## 2.2 冲压回弹规律研究

研究板料的冲压回弹,一般采用解析及有限元模拟方法,或者通过大量试验进行预测<sup>[4]</sup>。考虑到试验法能通过相同或近似的模具结构获得在近似的载荷及工况下的回弹数据,进而整理成公式或图表,供生产设计时参考。因此,本研究采用大量试验法,观察QP700 高强度钢板冲压回弹规律,并推导出该类型钢板的回弹量的计算公式。将厚度为4、6、8和10 mm 的板材,在弯曲半径为10~24 mm 时的回弹

情况记录下来,利用origin软件做出不同厚度的钢板回弹角度与弯曲半径的关系图,如图4所示。从图4可以看出,回弹量随着板厚的增加逐渐减小,而随着弯曲半径的增加逐渐增大。

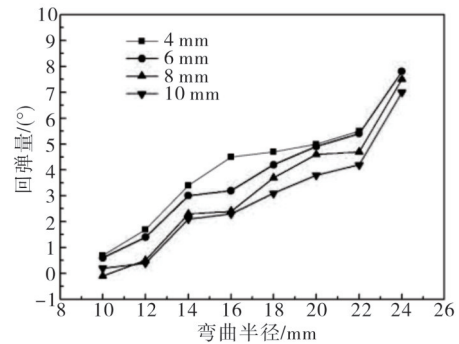


图4 不同厚度下的钢板回弹角度与弯曲半径的关系图  
Fig. 4 The relationship between springback angle and bending radius of steel plate with different thickness

由上述分析可知,回弹与板厚和弯曲半径之间有密切的联系。为了得出它们的确切关系,利用origin软件采用最小二乘法画出回弹量与  $r/t$  之间的关系图(图5),通过计算得出其直线方程为  $y = 0.85r/t + 0.81$ 。从图5可见,各点均匀的散落在直线两旁,且回归误差较小为0.19。结果表明,该直线方程能够很好的描述QP700 高强度钢板的回弹量,可依据此公式为后续高强钢板冲压回弹的预防和设计提供理论指导。

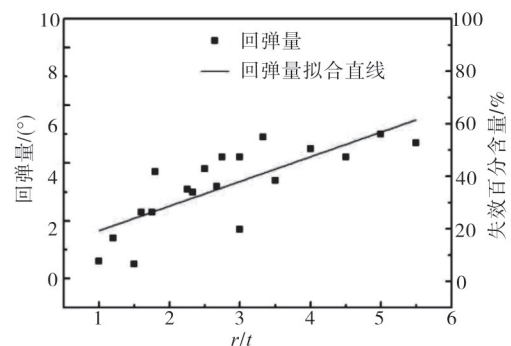


图5 回弹量与相对弯曲半径之间的关系图  
Fig. 5 The relationship between the amount of springback and the relative bending radius

## 3 结论

通过大量试验及试验数据分析整理,可得出以下结论,进而为QP700 高强度钢板的冲压回弹提高

理论指导。

(1)QP700 高强度钢板的最小弯曲半径可用公式  $r_{\min}=1.7t+4.6$  表示,其相对最小弯曲半径  $r_{\min}/t=2.2$ 。

(2)QP700 高强度钢板的回弹量随钢板厚度的增加而减小,随弯曲半径的增大而增大。

(3)QP700 高强度钢板的回弹量可用公式  $y=0.85r/t+0.81$  表示。

#### 参考文献:

- [1] 羊军,叶永亮,汪侃磊. 车身轻量化系数的决定因素及其优化[J]. 汽车技术,2010(2):28-32.
- [2] 孙永飞,景作军. 汽车轻量化技术及其应用[J]. 汽车与配件,2010(23):32-35.
- [3] 应善强,张义和,曹广祥. 汽车轻量化与高强度钢板的应用[J]. 汽车工艺与材料,2012(10):11-23.
- [4] 康永林,朱国明. 中国汽车发展趋势及汽车用钢面临的机遇与挑战[J]. 钢铁,2014(12):1-7.
- [5] 唐荻,米振莉,赵爱民,等. 国内冷轧汽车用钢的研发历史,现状及发展趋势[C]. 2009年汽车用钢生产及应用技术国际研讨会论文集,2009:91-96.
- [6] 李军,孙希庆,陈云霞,等. 国内乘用车轻量化现状与高强度钢板的应用进展[J]. 新材料产业,2015(11):47-53.
- [7] 单体坤,李淑惠,陈关龙. 变压边力下高强度钢板的回弹研究[J]. 塑性工程学报,2005,12(6):56-58,93.
- [8] 王利,杨雄飞,陆匠心. 汽车轻量化用高强度钢板的发展[J]. 钢铁,2006,41(9):1-8.
- [9] 陆匠心,王利,应白桦,等. 高强度汽车钢板的特性及应用[J]. 汽车工艺与材料,2004(6):13-15.
- [10] 吴磊,李光耀,蒋浩民,等. 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.
- [11] 官英平,李洪波,王凤琴. 板材弯曲最小相对弯曲半径计算方法探讨[J]. 金属成形工艺,2003,21(5):52-53.
- [12] 吴义江,赵耀. 高强度钢厚板冷弯成型及回弹分析[J]. 中国造船,2014(4):33-47.
- [13] 石磊,肖华,陈军,等. 先进高强度钢板弯曲类回弹特性的试验研究[J]. 材料科学与工艺,2009,17(5):671-674.
- [14] 周泽军,万敏. 凸模圆角半径对不同高强钢板弯曲回弹的影响[J]. 机械工程与自动化,2016(6):45-46.
- [15] 朱阳春,吴向东,万敏,等. 超高强钢板V形弯曲回弹影响因素有限元分析[J]. 锻压技术,2012,37(5):31-34.
- [16] KOMGRIT L, HAMASAKI H, HINO R, et al. Elimination of springback of high-strength steel sheet by using additional bending with counter punch [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229:199-206.
- [17] LEUD, ZHUANG Z. Springback prediction of the vee bending process for high-strength steel sheets [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30:1077-1084.
- [18] LEUD. A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 66(1-3):9-17.

## Research on Minimum Bending Radius and Stamping Springback Law of High Strength Steel Plate for Automobile Frame

LI Bingxin<sup>1</sup>, WU Weikai<sup>1</sup>, ZHANG Daoda<sup>2</sup>, CHEN Wanglin<sup>1\*</sup>

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Jiangxi Academy of Mechanical Science, Nanchang 330002, China)

**Abstract:** The QP-700 high-strength steel plate is prone to rebound during the stamping and forming process of the frame, which affects the forming accuracy. In order to solve the problem, a large number of experimental methods were used to stamp and form high-strength steel plates with different thicknesses, the rebound and failure of the samples were analyzed. The study shows that the rebound of QP-700 new high-strength steel plate decreases with the increase of plate thickness and increases with the increase of bending radius; the empirical formula for the minimum bending radius of QP-700 high-strength steel plate is derived as  $r_{\min}=1.7t+4.6$ , the minimum relative bending radius of the steel plate is 2.2. It is shown that the stamping forming of high-strength steel plate provides theoretical guidance.

**Key words:** high strength steel plate; bending radius; rebound; stamping; failure

(学术编辑:黎小辉)