

# 先进高强度双相钢弯扭复合回弹评价与试验研究

冯阳阳, 李洪周, 张文广, 彭联胜

(湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** **目的** 针对先进高强度双相钢冲压成形后回弹量大且多种回弹形式相互作用的问题, 提出弯曲-扭曲复合回弹试验评价指标与测试方法, 研究双相钢强度级别和试验条件对弯扭回弹的影响规律。**方法** 建立板料回弹前后的几何关系, 提出弯扭复合回弹评价指标, 通过改变三点弯曲试验上压杆的偏转角度, 开展弯扭复合回弹试验。**结果** 基于合理的几何关系假设提出的评价指标适用于弯扭复合回弹试验结果分析。当上压杆偏转角度为  $0^\circ$  时, 强度越高, 板料弯曲回弹越明显, 回弹后横截面顶点距离和 2 条对角线长度变化越小; 随着上压杆偏转角度的增加, 当上压杆偏转  $0^\circ \sim 15^\circ$  时, 不同强度的 3 种试件 (DP600、DP780、DP980) 的横截面顶点距离和 2 条对角线长度增大, 其中 DP600 试件的横截面顶点距离变化最小; 当上压杆偏转  $15^\circ \sim 45^\circ$  时, 3 种试件共同表现出横截面顶点距离减小、一条对角线长度减小、另一条对角线长度增加, 其中 DP980 试件的对角线长度之差最小。**结论** 试验数据与分析结果表明, 调整三点弯曲试验中上压杆的偏转角度可以诱发不同的扭曲回弹量, 进而有效控制弯曲回弹与扭曲回弹的复合程度。分别利用板料横截面顶点距离变化及 2 条对角线长度变化评价弯曲回弹和扭曲回弹程度, 利用二者综合评价弯扭复合回弹程度。板料的扭曲回弹受板料强度制约进而影响弯曲回弹程度。

**关键词:** 双相钢; 弯扭复合回弹; 评价指标; 三点弯曲试验

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.05.010

**中图分类号:** TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)05-0079-09

## Evaluation and Test for Bending-twist Compound Springback of Advanced High-strength Dual Phase Steel

FENG Yang-yang, LI Hong-zhou, ZHANG Wen-guang, PENG Lian-sheng

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Hunan Xiangtan 411201, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose an evaluation index and test method for bending-twist compound springback and study the effect of material strength and test conditions of dual phase steel on bending-twist compound springback, so as to solve the

收稿日期: 2022-10-12

Received: 2022-10-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51605158); 湖南省教育厅科学研究重点项目 (21A0300)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China (51605158); Key Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department (21A0300)

作者简介: 冯阳阳 (1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为先进制造技术。

**Biography:** FENG Yang-yang(1998-), Male, Postgraduate, Research focus: advanced manufacturing technology.

通讯作者: 李洪周 (1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为车身先进材料与制造。

**Corresponding author:** LI Hong-zhou(1984-), Male, Doctor, Associated Professor, Research focus: advanced materials and manufacturing for vehicle body.

引文格式: 冯阳阳, 李洪周, 张文广, 等. 先进高强度双相钢弯扭复合回弹评价与试验研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 79-87.

FENG Yang-yang, LI Hong-zhou, ZHANG Wen-guang, et al. Evaluation and Test for Bending-twist Compound Springback of Advanced High-strength Dual Phase Steel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 79-87.

issue of large springback amount and the interaction of various springback forms in forming of advanced high-strength dual phase steel. The geometric relationship between pre-springback and post-springback of sheet metal was established, and the index evaluation of bending-twist compound springback was put forward. Then the bending-twist compound springback test was carried out by deflecting the upper press bar with a certain angle in the three-point bending test. The evaluation index proposed based on the geometric model under reasonable assumption was suitable for data analysis of the bending-twist compound springback test. When the deflection angle of the upper press bar was  $0^\circ$ , the higher the strength, the more obvious the bending springback of the sheet metal, and the smaller the distance between the vertexes of the cross section line and the two diagonal lengths after springback. For three specimens with different material strength (DP600, DP780, DP980), the distance between the vertexes of the cross section line and the two diagonal lines lengths increased with the increase of the deflection angle of the upper press bar from  $0^\circ$  to  $15^\circ$ , among which the change of distance between the vertexes of the cross section line for DP600 was the least. As the upper press bar deflected from  $15^\circ$  to  $45^\circ$  for three different material strength specimens test, the distance between cross section vertices decreased. The length of one diagonal decreased and the length of the other diagonal increased, among which the length difference between specimen diagonals for DP980 was the smallest. The test data and analysis results show that adjusting the deflection angle of the upper press bar in the three-point bending test could induce different amount of twist springback, thus effectively control the degree of combination of bending springback and twist springback. The amount of bending springback and twist springback are evaluated by the changes of the distance between the vertexes of cross section and the lengths of two diagonals, respectively, and the compound degree of bending and twist springback is comprehensively evaluated. The twist springback of sheet metal is limited by the material strength of sheet metal and then affect the degree of bending springback.

**KEY WORDS:** dual phase steel; bending-twist compound springback; evaluation index; three-point bending test

在汽车轻量化解决方案中,先进高强度钢(Advanced High-strength Steel, AHSS)作为兼具性价比和安全性的轻量化结构材料,得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。AHSS板料在成形时具有较高的流动应力,板料塑性变形后出现的屈服和硬化现象导致成形件具有更大的弹性应力<sup>[2]</sup>,因此板料回弹量变大。此外,多种回弹形式的相互作用显著影响了成形零件的精度和质量,给回弹预测、补偿和控制带来了极大挑战。

如何便捷地测试、合理地评价和精确地预测回弹一直是塑性成形领域学术界和工业界共同关注的重要研究议题<sup>[3]</sup>。对此,国内外学者开展了大量的理论分析、数值模拟和试验测试研究工作。魏波等<sup>[4]</sup>对马鞍形板料成形过程中的加载路径和回弹进行了理论分析,并采用渐进弯曲的方法进行了成形试验。Wang等<sup>[5]</sup>对螺旋管进行了有限元分析和弯曲试验,验证了螺旋管回弹预测的理论模型,并分析了应变速率和相对扭转角对回弹的影响。韩飞等<sup>[6]</sup>测试了弯曲试验条件下 DP980 板料弯曲与回弹的弯矩-曲率,将弯矩-曲率转化为应力-应变后与拉伸应力-应变曲线对比,结果发现,弯曲变形屈服强度高于轴向拉伸屈服强度。宋起峰等<sup>[7]</sup>在普通拉伸试验机上弯曲试样,将试样自由弯曲角度减去模具张开角度后,得到了一种板材回弹角的评价量。Zhai等<sup>[8]</sup>提出了比例随动强化模型,建立了预拉伸和后弯曲加载路径下的拉弯力学模型,推导出了加载后应变中性层曲率半径和弯矩的解析表达式。滕菲等<sup>[9]</sup>对不

同预拉伸量的矩形变曲率铝材进行了拉弯成形有限元模拟,结果表明,预拉伸量对大曲率弧段的影响较大。董国疆等<sup>[10]</sup>以高强铝合金为研究对象,通过板材单向拉伸和三点弯曲试验获得了弹塑性本构模型硬化参数和环向应变参数,并得到了试样弯曲角、应力中性层曲率半径和壁厚值。Mertin等<sup>[11]</sup>结合三点弯曲试验与数值模拟确定了高强度弹簧钢(X10CrNi18-8)的弹塑性本构模型参数,并研究了弯曲试验结束时的应力卸载对弹性材料参数的影响。Saito等<sup>[12]</sup>对 980 MPa 级高强度钢板进行了 V 形和 U 形弯曲回弹试验研究,并通过 V 形弯曲试验和黏塑性应力分析,讨论了应力松弛对回弹的影响。Song等<sup>[13]</sup>研制了电流脉冲发生器与弯曲装置,对 1 180 MPa 级钢板进行了脉冲电流 V 形弯曲试验,结果表明,随着电流密度和持续时间的增加,回弹角减小。Li等<sup>[14]</sup>开发了扭曲梁模具,并对扭曲回弹进行了材料和工艺参数的敏感性分析。

He等<sup>[15]</sup>开发了一种检测旋转拉伸弯曲回弹的在线测量技术。Wang等<sup>[16]</sup>提出了一种考虑截面畸变的数值近似回弹预测和补偿方法。Xu等<sup>[17]</sup>在考虑几何和工艺参数的条件下提出了一种基于 BP 神经网络的回弹预测模型。Chen等<sup>[18]</sup>基于弹塑性弯曲线性硬化材料本构关系建立了回弹预测模型,并分析了板厚、成形角度等对回弹的影响。谢延敏等<sup>[19]</sup>提出了一种评价高强度钢 TRIP780 双 C 形件扭曲回弹的指标。基于三维空间两异面直线夹角,Uemori等<sup>[20]</sup>提出了一

种基于最大载荷准则的显式理论分析方法,该方法利用板材的极限壁长、初始壁长和弯曲半径可以简单快速地预测高强度钢板的破裂缺陷和回弹。Yang 等<sup>[21]</sup>开发了一个预测先进高强度钢弯曲回弹的分析模型。

赵月伟等<sup>[22]</sup>利用有限元数值模拟研究了各关键成形参数对 316L 奥氏体不锈钢板材弯曲卸载回弹的影响规律并构建了回弹曲线方程。段晋昌等<sup>[23]</sup>通过有限元数值模拟和试验研究,总结了各种屈服准则对弯曲时自由曲面所产生回弹量的影响规律。Meng 等<sup>[24]</sup>研究了不同硬化模型、变弹性模量等对回弹的影响规律。现有研究工作多对开口弯曲、侧壁卷曲和扭曲回弹中的某一种回弹表现形式开展理论分析、试验测试、评价、预测、补偿和控制研究,较少考虑 2 种或多种回弹表现形式间的内在联系或相互作用,多种表现形式并存的高强度钢板料的成形回弹现象仅靠单一指标进行评价往往难以表征其复杂程度。

文中以先进高强度双相钢为研究对象,通过改变三点弯曲试验中上压杆的偏转角度,诱发试样产生弯扭复合回弹变形,结合点云数据提出了一种弯曲回弹和扭曲回弹试验测试方法和综合评价指标;通过此指标计算弯扭复合回弹量,获得双相钢材料强度级别和上压杆偏转角度对弯扭复合回弹的影响规律。

## 1 弯扭复合回弹及其评价指标

### 1.1 弯扭复合回弹机理

成形件在发生弯曲变形后,厚度方向上横截面不

同层的拉伸应力不同。残余应力释放时形成的弯矩使成形后的零件横截面与设计形状之间存在偏差,因此产生弯曲回弹和侧壁卷曲。如图 1a 所示,弯曲回弹是零件弯曲线与模具型面线之间的偏差,回弹后零件侧壁若不发生卷曲,则其侧壁在横截面上的回弹角度是一致的。卷曲是由板料在截面厚度方向上的应力差异引起的,这个差异是由板料在各位置点的弯曲、反弯曲变形所产生的,消除或减小截面厚度方向上的弯曲力矩则可以消除或减少弯曲回弹<sup>[2]</sup>。

如图 1b 所示,扭曲回弹表现为板料的 2 个横截面绕相同轴发生相反方向扭转。在成形结束后,法兰面上或侧壁平面内残余应力不平衡导致零件内部生成一对力偶矩。零件局部扭转刚度的差异造成这些部位的相邻部位发生不同程度的变形,即使局部的扭转刚度相同,若零件各个部位的扭转力矩不同,各个部位依然会发生不同程度的变形,因此得到扭曲的零件。可见,扭曲回弹量与冲压后的应力和局部扭转刚度密切相关,减少产生扭曲力矩的残余应力和增加零件的扭转刚度可减小扭曲回弹变形。

在实际成形过程中,金属板料内部应力状态复杂。在拉伸、弯曲和扭转的共同作用下,板料中易同时产生拉应力、弯矩和扭矩,残余应力宏观上在成形件横截面内和垂向上形成了弯曲力矩和扭转力矩,卸载后,弹性恢复和这些力矩的共同作用导致成形件发生弯曲和扭曲变形。成形阶段结束后,经常出现 2 种回弹形式并存(弯扭复合回弹)的情况,其表现形式如图 2 所示。

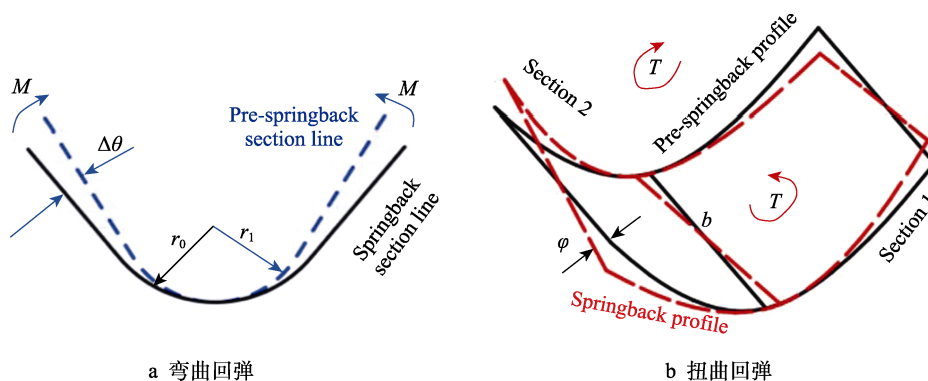


图 1 板料回弹变形示意图

Fig.1 Schematic diagram of springback deformation: a) bending springback; b) twist springback

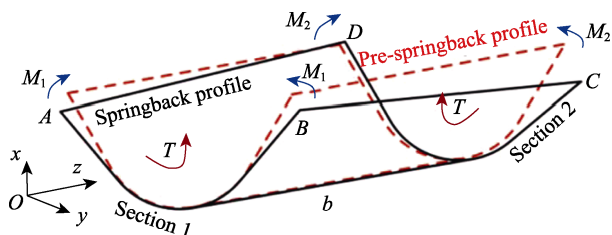


图 2 弯扭复合回弹

Fig.2 Bending-twist compound springback

### 1.2 弯扭复合回弹评价指标

为定量描述弯扭复合回弹量,分别定义弯曲和扭曲回弹的评价指标并加以耦合。

弯曲回弹前后横截面线变化如图 3 所示。在板料弯曲回弹过程中,不妨假设横截面线主要由弯曲段和直线段组成、回弹前后横截面线关于弯曲段中点左右对称、回弹前后弯曲段的横截面线弧长不变,则有:

$$\theta_0 r_0 = \theta_1 r_1 \quad (1)$$

式中： $r_0$ 、 $r_1$  分别为回弹前、后弯曲段曲率半径； $\theta_0$ 、 $\theta_1$  分别为回弹前、后弯曲段对应的圆心角。回弹前后弯曲角变化  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$ 。

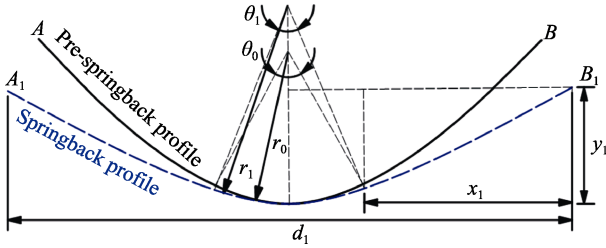


图3 弯曲回弹前后横截面线变化

Fig.3 Schematic diagram of cross section line variation in bending springback

如图3所示,回弹后板料截面直线段投影长度为 $x_1$ ,同侧直线段终点距弯曲段终点高度差为 $y_1$ ,直线段与弯曲段终点到圆心的连线垂直,由三角形相似定理得:

$$x_1 = \left[ y_1 - r_1 \left( 1 - \cos \frac{\theta_1}{2} \right) \right] / \tan \frac{\theta_1}{2} \quad (2)$$

则弯曲回弹后横截面顶点 $A_1$ 、 $B_1$ 之间的距离 $d_1$ 为:

$$d_1 = 2 \left( x_1 + r_1 \sin \frac{\theta_1}{2} \right) \quad (3)$$

同理,弯曲回弹前横截面顶点 $A$ 、 $B$ 之间的距离 $d_0$ 为:

$$d_0 = 2 \left( x_0 + r_0 \sin \frac{\theta_0}{2} \right) \quad (4)$$

因此,弯曲回弹前、后横截面顶点距离的变化为:

$$\Delta d_1 = d_1 - d_0 \quad (5)$$

对于宽度为 $b$ 的矩形板料,弯曲回弹前后板料顶点对角线长度变化为:

$$\Delta L_W = L_{W1} - L_{W0} = \sqrt{d_1^2 + b^2} - \sqrt{d_0^2 + b^2} \quad (6)$$

式中: $L_{W0}$ 、 $L_{W1}$  分别为矩形板料弯曲回弹前、后对角线长度。

由式(5) — (6)可知,板料弯曲回弹前后横截面顶点距离变化与对角线长度变化主要与圆心角、曲率半径、横截面顶点距弯曲段终点高度差及板料宽度有关,其中圆心角、曲率半径、高度差主要受板料材料特性影响。在弯曲回弹测试与评价中可通过板料回弹前后横截面顶点距离变化或顶点对角线长度变化来反映零件弯曲回弹程度。

如图4所示,在板料扭曲回弹过程中,不妨假定横截面1逆时针扭转、横截面2顺时针扭转,回弹后横截面顶点连线 $A_2B_2$ 与回弹前同横截面顶点连线 $AB$ 交于点 $P$ ,距离 $AB$ 中点 $O$ 的距离为 $PO$ ,且 $A_2B_2$ 与 $AB$ 夹角记为 $\omega$ ,纵向顶点所在直线 $BC$ 与回弹后直线 $B_2C_2$ 的扭转角度记为 $\varphi$ 。

作 $Bp$ 垂直 $A_2B_2$ 于 $p$ , $Aq$ 垂直 $A_2B_2$ 于 $q$ ,由板料宽度不变、扭曲回弹前后横截面纵向位置不变可得:

$$AA_2 = BB_2 = b \sin \frac{\varphi}{2} \quad (7)$$

$$|B_2p| = \sqrt{BB_2^2 - \left( \frac{d_0}{2} - PO \right)^2 \sin^2 \omega} \quad (8)$$

$$|A_2q| = \sqrt{AA_2^2 - \left( \frac{d_0}{2} + PO \right)^2 \sin^2 \omega} \quad (9)$$

因此,板料扭曲回弹后横截面顶点 $A_2$ 、 $B_2$ 之间的距离 $d_2$ 为:

$$d_2 = d_0 \cos \omega + |B_2p| - |A_2q| \quad (10)$$

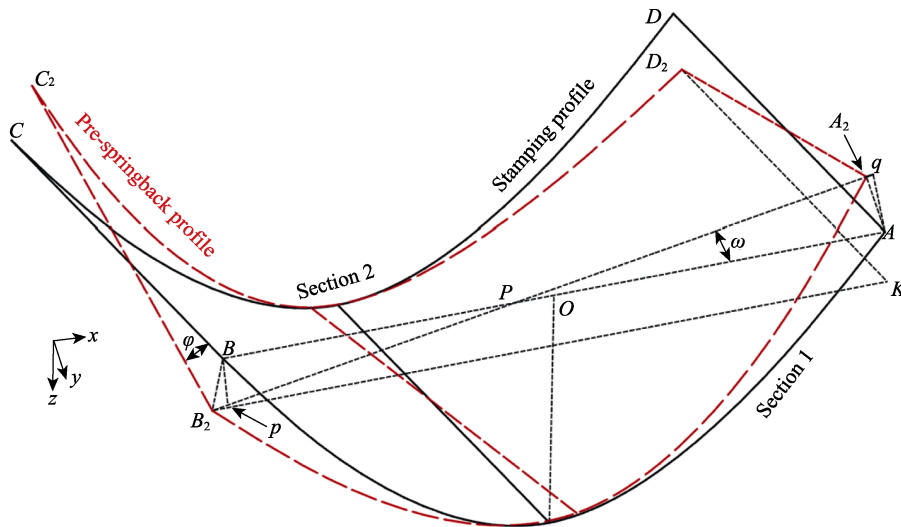


图4 扭曲回弹示意图

Fig.4 Schematic diagram of twist springback

扭曲回弹前后横截面顶点距离变化  $\Delta d_2 = d_2 - d_0$ ,  $PO$ 、 $\omega$ 、 $\varphi$  均受板料强度影响。

对于只发生扭曲回弹的板料, 其两横截面内横截面顶点距离相等, 对角顶点处于同一水平面, 同侧顶点处于不同水平面, 2 条对角线长度不相等。做  $B_2K$  平行于线段  $AB$ , 且  $B_2K$  与  $D_2K$  垂直, 则有:

$$|B_2K| = d_2 \cos \omega + \frac{1}{2} \sqrt{(2AA_2)^2 - d_2^2 \sin^2 \omega} \quad (11)$$

$$L_{N-B_2D_2} = \sqrt{|B_2K|^2 + b^2} \quad (12)$$

式中:  $d_2 \cos \omega$  为  $A_2B_2$  在  $B_2K$  上的投影;  $L_{N-B_2D_2}$  为板料扭曲回弹后顶点  $B_2$ 、 $D_2$  之间的对角线长度。

同理, 做  $C_2J$  平行于  $CD$ , 且  $C_2J$  垂直于  $A_2J$ , 则有:

$$|C_2J| = d_2 \cos \omega - \frac{1}{2} \sqrt{(2AA_2)^2 - d_2^2 \sin^2 \omega} \quad (13)$$

$$L_{N-A_2C_2} = \sqrt{|C_2J|^2 + b^2} \quad (14)$$

式中:  $L_{N-A_2C_2}$  为板料扭曲回弹后顶点  $A_2$ 、 $C_2$  之间的对角线长度。

扭曲回弹后板料对角线长度之差为:

$$\Delta L_N = L_{N-B_2D_2} - L_{N-A_2C_2} \quad (15)$$

在扭曲回弹过程中, 同一横截面上顶点间距离不变, 不同横截面上顶点间对角线长度变化, 较低顶点间对角线长度大于较高顶点间的对角线长度, 对角线长度差可以反映板料扭曲回弹程度。

对于弯扭复合回弹, 若设板料发生弯扭复合回弹后横截面顶点距离变化为  $\Delta d_F$ , 对角线长度之差为  $\Delta L_F$ , 则

$$\Delta d_F = d_F - d_0 \quad (16)$$

$$\Delta L_F = L_{F-B_3D_3} - L_{F-A_3C_3} \quad (17)$$

式中:  $d_F$  为板料弯扭复合回弹后横截面顶点距离;  $L_{F-B_3D_3}$  为板料弯扭复合回弹后顶点  $B_3$ 、 $D_3$  之间的对角线长度;  $L_{F-A_3C_3}$  为板料弯扭复合回弹后顶点  $A_3$ 、 $C_3$  之间的对角线长度。

## 2 弯扭复合回弹试验与测试方法

### 2.1 试验测试方法

三点弯曲试验是测量材料弯曲性能常用的测试方法, 然而, 由于轴对称性, 标准三点弯曲试验试件只承受弯矩并无扭矩作用。通过偏转上压杆轴向角度 (见图 5a) 可以诱发弯扭复合回弹, 板料在横向上承受弯矩作用的同时在纵向上承受由于上压杆对板料压力不对称而产生的扭矩作用, 卸载后板料产生非对称的弯扭复合回弹变形。本文测试方法在只改变标准三点弯曲试验中上压杆轴向偏转角度而不改变其他设置的情况下即可简便地完成板料的弯扭复合回弹试验测试。当上压杆偏转角度为  $0^\circ$  时即为标准三点弯曲试验, 板料以上压杆轴线为中心产生对称的弯曲回弹。

弯扭复合回弹试验装置如图 5b 所示, 测试时将板料放置在水平支撑杆上, 支撑杆通过支撑块和支撑底座与液压顶杆连接, 且支撑杆相对于液压顶杆对称布置, 在液压力作用下沿竖向运动。上压杆通过上压块和连接杆与力传感器连接, 且上压杆与支撑杆轴间的偏转角度可通过连接杆调整, 在成形回弹过程中上压杆与板料间的接触作用力通过力传感器测量。

将上述试验装置安装在 INSTRON 8801 电液伺服疲劳测试试验系统上, 对 3 种不同强度级别的双相钢板料在 4 种上压杆偏转角度 ( $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ ) 条件下进行弯扭复合回弹测试, 从液压顶杆与试件接触开始计算下压距离, 到止点的行程为 20 mm。

试验前根据上压杆偏转角度标记偏转标线, 以保证上压杆在试验中处于正确位置。在试验过程中, 支撑杆随液压顶杆上行, 试件与上压杆接触并发生弹塑性变形, 达到止点位置后卸载产生弯扭复合回弹变形 (见图 5c)。利用三维激光扫描仪扫描回弹后的试件得到相应点云数据, 在 Geomagic Design X 中

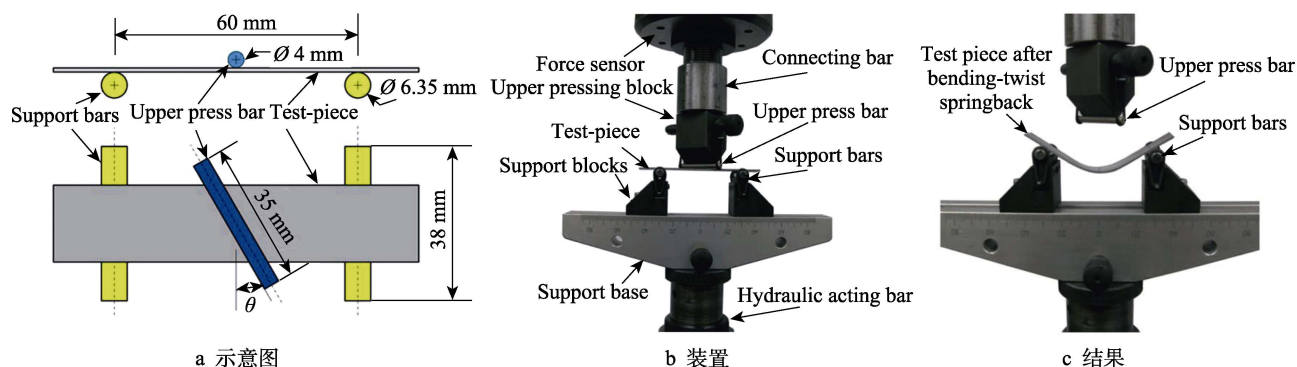


图 5 弯扭复合回弹试验

Fig.5 Bending-twist compound springback test: a) schematic diagram; b) apparatus; c) result

通过点云数据处理、逆向曲面建模得到试件几何数模,按照 1.2 节所述弯扭复合回弹评价指标值分别进行测量。

## 2.2 试验材料

以宝武集团提供的厚度 1.0 mm 的双相钢为试验材料,开展弯扭复合回弹测试,选择尺寸如图 6a 所示的试样,用以验证弯扭复合回弹评价指标对先进高强度钢回弹性能评价的适用性。

采用 3 种强度级别的双相钢 (DP600、DP780、DP980) 试件进行弯扭复合回弹测试,相应的材料特性参数如表 1 所示,成形回弹后的一组试样如图 6b 所示。

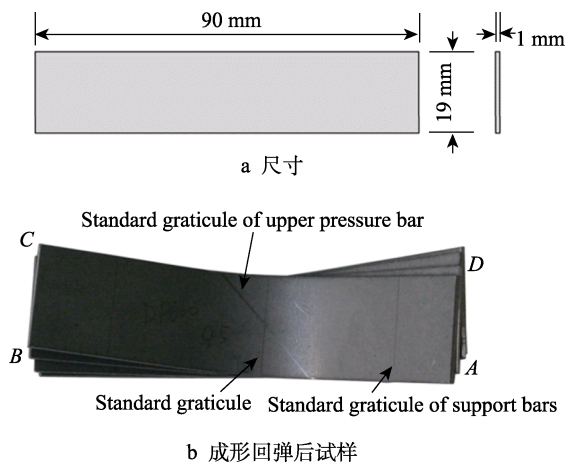


图 6 弯扭复合回弹试样

Fig.6 Specimen of bending-twist compound springback test: a) size; b) specimen after springback

## 3 结果与分析

根据弯扭复合回弹测试方法,测量并计算得到了不同材料强度级别和上压杆偏转角度的双相钢弯扭复合回弹评价指标值。

当上压杆偏转角为  $0^\circ$  时,横截面顶点距离和对角线长度随材料强度的变化情况如图 7 所示。

由图 7 可知,当上压杆偏转角为  $0^\circ$  时,3 种板料仅表现出弯曲回弹变形,此时板料两对角线长度保持一致,验证了式 (5) 的合理性;  $L_{W-AC}$  为弯曲回弹后矩形板料 A、C 两顶点之间的对角线长度,  $L_{W-BD}$  为

弯曲回弹后矩形板料 B、D 两顶点之间的对角线长度,且  $L_{W-AC}=L_{W-BD}=L_{W1}$ ;板料横截面顶点距离  $d_1$  小于对角线长度  $L_{W1}$ ,且随着材料强度的提高,横截面顶点距离和对角线长度均明显增加,对应的弯曲回弹量增加。当上压杆偏转  $45^\circ$  时,3 种材料横截面顶点距离和对角线长度的变化情况如图 8 所示。

由图 8 可知,当板料产生弯扭复合回弹后,横截面顶点距离  $d_F$  仍小于对角线长度。与图 7 对比发

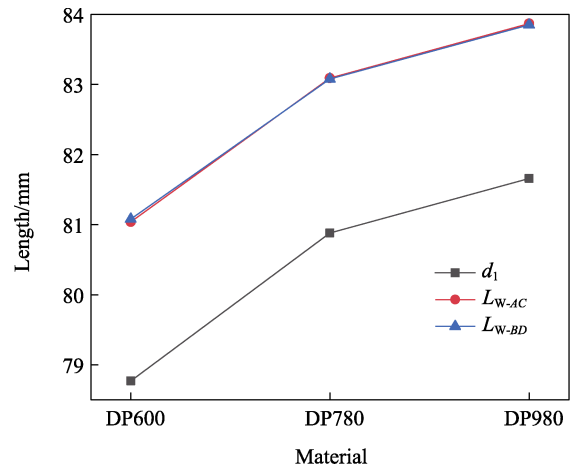


图 7 上压杆偏转  $0^\circ$  时横截面顶点距离和对角线长度变化

Fig.7 Variation of cross section vertex distance and diagonal length as the deflection angle of the upper press bar is  $0^\circ$

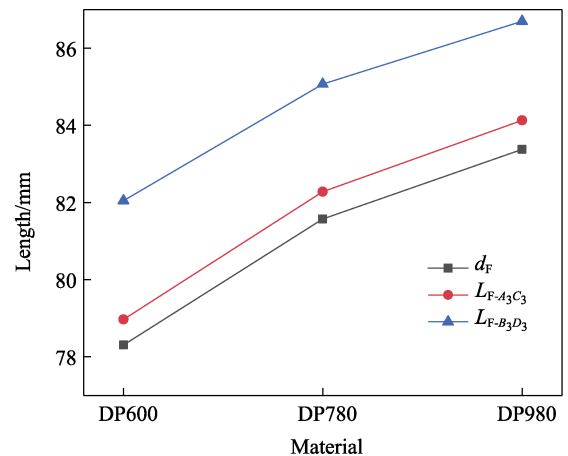


图 8 上压杆偏转  $45^\circ$  时横截面顶点距离和对角线长度变化

Fig.8 Variation of cross section vertex distance and diagonal length as the deflection angle of the upper press bar is  $45^\circ$

表 1 先进高强度双相钢材料参数

Tab.1 Material parameters of advanced high-strength dual phase steel

| Material | Young's modulus/GPa | Poisson's ratio | Yield strength/MPa | Tensile strength/MPa |
|----------|---------------------|-----------------|--------------------|----------------------|
| DP600    | 210                 | 0.3             | 408                | 680                  |
| DP780    | 210                 | 0.3             | 517                | 916                  |
| DP980    | 210                 | 0.3             | 707                | 1 002                |

现,在此情况下的板料保持着  $d_F$ 、 $L_{F-A_3C_3}$  和  $L_{F-B_3D_3}$  随材料强度级别提高而增加且增加量基本相等的弯曲回弹变化规律,与 1.1 节所述弯扭复合回弹包含弯曲回弹的结论一致。此外,DP600 材料横截面顶点距离  $d_F < d_1$ , DP780、DP980 材料横截面顶点距离  $d_F > d_1$ , 由对角线长度  $L_{F-B_3D_3} > L_{W-AC} = L_{W-BD} > L_{F-A_3C_3}$  可知: DP600 板料中扭曲回弹的存在在一定程度上抑制了弯曲回弹量; DP780、DP980 板料中的扭曲回弹扩大了弯曲回弹量,因此,材料强度会严重影响同一板料间弯曲回弹与扭曲回弹的程度。对角线长度之差  $\Delta L_F$  可以用来表现弯扭复合回弹中的扭曲回弹程度,横截面 1 顺时针扭转、横截面 2 逆时针扭转的板料在弯扭复合回弹后有  $L_{F-B_3D_3} > L_{F-A_3C_3}$ , 这一结论验证了式 (15) 反映板料扭曲回弹程度的适用性。上压杆偏转角度对 3 种板料横截面顶点距离的影响如图 9 所示。

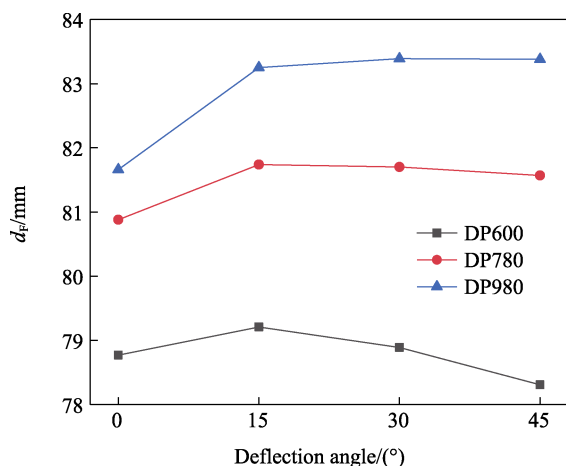


图 9 上压杆偏转角度对横截面顶点距离的影响

Fig.9 Effect of deflection angle of the upper press bar on the distance of cross section vertexes

由图 9 可知,3 种板料横截面顶点距离随上压杆偏转角度的变化而变化,当偏转角度为  $0^\circ \sim 15^\circ$  时,随偏转角度的增大而增加,且增加量随板料强度的提高而增大;当上压杆偏转角度为  $15^\circ \sim 45^\circ$  时,DP780 和 DP600 板料横截面顶点距离随偏转角度的增大而减少,DP980 板料则呈现先上升后下降的趋势,但变化幅度很小,在所测试的 3 种强度级别双相钢中,DP980 板料在上压杆偏转角度为  $15^\circ \sim 45^\circ$  时横截面顶点距离变化相对最小,在上压杆偏转角度为  $0^\circ \sim 15^\circ$  时横截面顶点距离变化相对最大,而 DP600 板料在上压杆偏转角度为  $15^\circ \sim 45^\circ$  时横截面顶点距离变化相对最大,在上压杆偏转角度为  $0^\circ \sim 15^\circ$  时横截面顶点距离变化相对最小。图 9 表明,上压杆偏转角度对双相钢成形回弹影响显著,且强度级别越高的板料在上压杆偏转角度为  $0^\circ \sim 15^\circ$  时横截面顶点距离变化越剧烈,在

$15^\circ \sim 45^\circ$  时变化越平稳。3 种板料弯扭复合回弹后对角线长度随上压杆偏转角度的变化情况如图 10 所示。

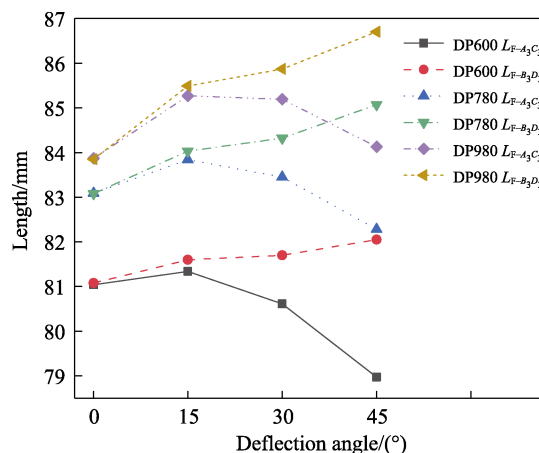


图 10 上压杆偏转角度对对角线长度的影响

Fig.10 Effect of deflection angle of the upper press bar on the diagonal length

由图 10 可知,随着上压杆偏转角度的增大,弯扭复合回弹后的对角线长度变化趋势如下:3 种板料的对角线长度  $L_{F-A_3C_3}$  随上压杆偏转角度的增大而增加,对角线长度  $L_{F-B_3D_3}$  在上压杆偏转角度为  $0^\circ \sim 15^\circ$  时随偏转角度的增大而增加,在  $15^\circ \sim 45^\circ$  时随偏转角度的增大而减少;随着板料材料强度级别的提高,对角线长度  $L_{F-A_3C_3}$  变化增加,对角线长度  $L_{F-B_3D_3}$  在上压杆偏转角度为  $0^\circ \sim 15^\circ$  时变化较大,在  $15^\circ \sim 45^\circ$  时变化较小;DP980 板料在弯扭复合回弹试验中相对其他 2 种板料对角线长度差异总体较小。图 9 和 10 表明,金属板料成形后的弯扭复合回弹程度可以通过横截面顶点距离变化和对角线长度之差进行较好的表征。此外,利用弯扭复合回弹后的 2 条对角线长度均值和偏差值也可以比较直观地反映上压杆偏转角度对弯扭复合回弹量的影响,如图 11 所示。

由图 11 可知,3 种板料弯扭复合回弹后,2 条对

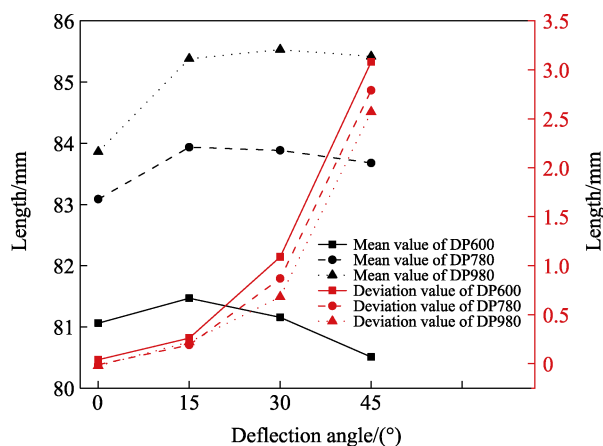


图 11 2 条对角线长度均值及偏差值变化

Fig.11 Mean and deviation value of two diagonals

角线长度的均值变化为先增大后减小,其偏差值随上压杆偏转角度的增加而增大,且随着板料强度的提高偏差值减小,这表明上压杆偏转角度是诱发板料发生扭曲回弹的关键因素,材料强度级别是影响零件扭曲回弹量的重要因素。

## 4 结论

1) 基于金属板料成形回弹的理想几何构型变化,提出了弯扭复合回弹的评价指标及测试方法:通过回弹前后横截面顶点距离差值表征弯曲回弹程度;通过回弹前后板料对角线长度之差表征板料扭曲回弹程度;改变上压杆偏转角度可以诱发板料发生扭曲回弹,随上压杆偏转角度的改变,板料横截面顶点距离及对角线长度发生变化且2条对角线长度不再相等。因此,同时利用回弹前后横截面顶点距离变化及对角线长度之差表征弯扭复合回弹程度。

2) 开展了DP600、DP780和DP980的弯扭复合回弹试验测试,分析了材料强度级别和上压杆偏转角度对弯扭复合回弹的影响,发现当上压杆偏转角度为 $0^{\circ}$ 时,弯曲回弹量随板料强度级别的提高而增大;3种板料弯曲回弹程度随上压杆偏转角度的增加先增加后减小,扭曲回弹程度则逐渐增大。

3) 板料中扭曲回弹对弯曲回弹造成的影响受板料强度约束。在一定范围内,板料扭曲回弹对弯曲回弹程度起抑制作用;针对强度较高的板料,其扭曲回弹会增加弯曲回弹量,因此,在实际成形工艺中可通过控制扭曲回弹进而控制弯曲回弹程度。

## 参考文献:

- [1] 朱敏慧. 先进高强度钢性价比和安全性高的汽车轻量化基础材料[J]. 汽车与配件, 2014(19): 56-57.  
ZHU Min-hui. Advanced Lightweight Basic Materials of High-strength Steel with High Performance Price Ratio and High Safety[J]. Automobile and Accessories, 2014(19): 56-57.
- [2] 李洪周. 先进高强度钢扭曲回弹研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009: 6-9.  
LI Hong-zhou. A Study on Twist Springback of Advance High Strength Steel[D]. Changsha: Hunan University, 2009: 6-9.
- [3] 谌勇志. 大应变本构模型及其在扭曲回弹中的应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2011: 1-10.  
CHEN Yong-zhi. A Constitutive Model of Large Strain and Its Application to Twist Springback Simulation[D]. Changsha: Hunan University, 2011: 1-10.
- [4] 魏波, 何浩然, 丘永亮, 等. 基于渐进弯曲成形双曲马鞍形金属板工艺研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(7): 116-123.  
WEI Bo, HE Hao-ran, QIU Yong-liang, et al. Forming Complex Curved Saddle Shaped Plate Based on Incremental Bending[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(7): 116-123.
- [5] WANG L, WANG Z L, ZHANG S Y, et al. Spiral Metal Tube Multi-Roller Bending Springback Prediction Model Based on Dynamic Deformation Enhancement Analysis[J]. International Journal of Solids and Structures, 2022: 254-255.
- [6] 韩飞, 张帅, 王洪亮, 等. 基于弯曲实验的 DP980 力学性能研究[J]. 精密成形工程, 2021, 13(5): 127-132.  
HAN Fei, ZHANG Shuai, WANG Hong-liang, et al. Study on Mechanical Properties of DP980 Based on Bending Test[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(5): 127-132.
- [7] 宋起峰, 王鹏, 曹广祥, 等. 一种板材弯曲回弹特性的测试装置及其测试方法: CN112345379A[P]. 2021-02-09.  
SONG Qi-feng, WANG Peng, CAO Guang-xiang, et al. A Test Device for Bending and Rebounding Characteristics of Plate and Its Test Method: CN112345379A[P]. 2021-02-09.
- [8] ZHAI R X, ZHAO Z K, YANG J H, et al. Analytical Prediction of Stretch-Bending Springback Based on the Proportional Kinematic Hardening Model[J]. Symmetry, 2021, 13(12): 2389.
- [9] 滕菲, 李睿, 李义, 等. 铝型材构件多点变曲率拉弯制件回弹研究[J]. 精密成形工程, 2020, 12(6): 93-98.  
TENG Fei, LI Rui, LI Yi, et al. Springback of Multi-Point Variable Curvature Stretch Bending Components of Aluminum Profile[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(6): 93-98.
- [10] 董国疆, 杨卓云, 孙宇飞, 等. 一种高强铝合金板材弯曲回弹参数的确定方法及试验装置: CN1098703-67B[P]. 2020-04-03.  
DONG Guo-jiang, YANG Zhuo-yun, SUN Yu-fei, et al. Determination Method and Test Device for Bending Rebound Parameters of High-Strength Aluminum Alloy Plate: CN109870367B[P]. 2020-04-03.
- [11] MERTIN C, STELLMACHER T, SCHMITZ R, et al. Enhanced Springback Prediction for Bending of High-Strength Spring Steel Using Material Data From an Inverse Modelling Approach[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 29: 153-160.
- [12] SAITO N, FUKAHORI M, HISANO D, et al. Effects of Temperature, Forming Speed and Stress Relaxation on Springback in Warm Forming of High Strength Steel Sheet[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 2394-2398.
- [13] SONG J, JANG I, GWAK S, et al. Effect of Pulsed Currents on the Springback Reduction of Ultra-High Strength Steels[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 359-364.
- [14] LI H Z, SUN G Y, LI G Y, et al. On Twist Springback in Advanced High-Strength Steels[J]. Materials & Design, 2011, 32(6): 3272-3279.
- [15] HE X, MA J, TRONVOLL S A, et al. In-Process Moni-

- oring of Springback in Industrial Bending Using a Laser Sensor-Based Method[J]. Key Engineering Materials, 2022, 6392: 2266-2274.
- [16] WANG Z L, LIN Y C, QIU L M, et al. Spatial Variable Curvature Metallic Tube Bending Springback Numerical Approximation Prediction and Compensation Method Considering Cross-section Distortion Defect[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021: 1-17.
- [17] XU B J, LI L, WANG Z, et al. Prediction of Springback in Local Bending of Hull Plates Using an Optimized Backpropagation Neural Network[J]. Mechanical Sciences, 2021, 12(2): 777-789.
- [18] CHEN C, GONG J J, CHEN Y D, et al. A Prediction Model for Bending Springback of AZM120 Sheet Metal and Mechanical Compensation of CNC Automatic Panel Bender[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(9/10): 3325-3337.
- [19] 谢延敏, 张飞, 王子豪, 等. 基于渐变凹模圆角半径的高强钢扭曲回弹补偿[J]. 机械工程学报, 2019, 55(2): 91-97.
- XIE Yan-min, ZHANG Fei, WANG Zi-hao, et al. Compensation of Twist Springback in High-strength Steel Based on Gradient Die Radius[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(2): 91-97.
- [20] UEMORI T, NAKA T, TADA N, et al. Theoretical Predictions of Fracture and Springback for High Tensile Strength Steel Sheets under Stretch Bending[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 207: 1594-1598.
- [21] YANG X, CHOI C, SEVER N, et al. Prediction of Springback in Air-Bending of Advanced High Strength Steel (DP780) Considering Young's Modulus Variation and with a Piecewise Hardening Function[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 105: 266-272.
- [22] 赵月伟, 帅美荣, 楚志兵, 等. 焊管冷弯回弹曲线方程构建及工艺优化[J]. 精密成形工程, 2022, 14(7): 98-105.
- ZHAO Yue-wei, SHUAI Mei-rong, CHU Zhi-bing, et al. Construction of Springback Curve Equation and Process Optimization of Welded Pipe during Cold Bending [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(7): 98-105.
- [23] 段晋昌, 梁卫抗, 马立安, 等. SUS430 不锈钢自由曲面弯曲回弹的预测和试验研究[J]. 锻压技术, 2022, 47(2): 220-228.
- DUAN Jin-chang, LIANG Wei-kang, MA Li-an, et al. Prediction and Experimental Research on Bending Springback for Free-form Surface of SUS430 Stainless Steel[J]. Forging Technology, 2022, 47(2): 220-228.
- [24] MENG Q D, ZHAO J, MU Z K, et al. Springback Prediction of Multiple Reciprocating Bending Based on Different Hardening Models[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 76: 251-263.

责任编辑: 蒋红晨