拼焊板结构件拉弯成形工艺参数的正交试验研究

夏琴香[1]，钟国锋[1]，沈亚静[1]，吴锋[2]
（1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院，广州 510640；
2. 敏实集团 广州敏惠汽车零部件有限公司，广州 511356）

摘要：工艺参数对拼焊板拉弯成形结构件的外形精度有着重要的影响，针对所研究的拼焊板零件的结构形式，其外侧线轮廓、内侧线轮廓、筋部面轮廓等都是评价成形质量的重要指标。通过正交试验，研究了拉弯成形过程中的夹头各阶段的旋转角 $\alpha_1 \sim \alpha_4$，以及夹头沿坯料轴线方向的引伸力 F 等工艺参数，对构件外侧线轮廓、内侧线轮廓、筋部面轮廓、外侧面轮廓及内侧面轮廓等外形精度的影响，获得了影响拼焊板拉弯件成形外形精度的影响因素的主次顺序。研究结果表明，影响外侧线轮廓与筋部面轮廓因素的主次顺序为：引伸力 F、旋转角 α_4、旋转角 α_3、旋转角 α_2、旋转角 α_1；内侧线轮廓各个影响因素的极差值均很小，且测量值均匀，可认为内侧线轮廓基本不受工艺参数影响；影响外侧面轮廓与内侧面轮廓因素的主次顺序为：旋转角 α_3、旋转角 α_4、旋转角 α_2、旋转角 α_1、引伸力 F。

关键词：拼焊板结构件；拉弯成形；外形精度；正交试验
DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2014.06.012
中图分类号：TG306 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-6457(2014)06-0078-06

Orthogonal Experimental Study on Process Parameters of Stretch Bending Forming for TWB Structural Part

XIA Qin-xiang[1], *ZHONG Guo-feng*[1], *SHEN Ya-jing*[1], *WU Feng*[2]
(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Minhui Auto Parts Co. Ltd., MINTH Group, Guangzhou 511356, China)

ABSTRACT: The precision of profile of TWB stretch bending parts is affected significantly by process parameters. According to the structural shape of the researched TWB part, its profile of outer line, inner line, the reinforced surface, etc. are the important items to evaluate the precision of outline of the part. The effect of parameters, such as rotation angle $\alpha_1 \sim \alpha_4$ of collet on different stage of stretch bending and extension force F supplied by the collet along the axial direction of blank, on the precision of profile, such as the profile of outline, inner line, the reinforced surface, the inner and outer surface, was investigated by orthogonal experimental. The influencing sequence of the process parameters on the forming quality was obtained. The result shows that the influence sequence of the profile of outer line and the reinforced surface is that: extension force F, the rotation angle α_4, the rotation angle α_3, the rotation angle α_2, the rotation angle α_1; the influence of the process parameters on the profile of inner line are all small, so the profile of inner line is almost unaffected; the in-

收稿日期：2014-10-15
基金项目：广州市科技计划项目(12A32081585)
作者简介：夏琴香(1964—)，女，教授，博士生导师，主要研究方向为材料塑性加工及模具计算机技术。

fluence sequence of the profile of inner and outer surface is that: the rotation angle α_3, the rotation angle α_4, the rotation angle α_2, the rotation angle α_1, the extension force F.

KEY WORDS: TWB structural part; stretch bending forming; precision of outline; orthogonal experimental

拼焊板(Tailor Welded Blanks,TWB)具有提高生产效率、降低生产成本、节约能源、适应环保、增加安全性等优势[1],在汽车制造业中受到越来越多的重视。型材拉弯成形工艺是指型材在夹头的拉动下弯曲并实现完全贴模,同时由于受到切向拉力的作用,从而改善毛料截面内的应力[2],是型材弯曲成形的重要方法,具有成形精度高、零件贴膜度好、表面质量高等优点,被广泛地应用于汽车领域。近几年来,随着汽车制造业的不断发展,对拼焊板结构件拉弯成形工艺的研究已成为一个热点。

国内学者对拉弯成形的研究主要集中于二维拉弯成形,研究表明:增大引伸力可显著减小回弹,但当引伸力增大到一定值时,增大引伸力减小回弹的作用不再明显[3—5]。周苗苗、王红建、贺尔铭等人[6]对某汽车门框用复杂截面型材的拉弯成形进行了数值模拟分析,验证了所提出的建模方式的有效性。Clausen A H 等人[7—8]对空心长方形截面型材进行了拉弯成形研究,得到了材料性能以及加载方式等参数对拉弯成形回弹的影响。陈亚兵等人研究了拼焊板型材拉弯时,预拉力及摩擦因数对构件截面畸变程度的影响[9]。文中主要探索引伸力、旋转角 α_1、旋转角 α_2、旋转角 α_3 等工艺参数对拼焊板拉弯件的外侧线轮廓、内侧线轮廓、筋部面轮廓、外侧面轮廓及内侧面轮廓的影响规律,为深入研究拼焊板结构件的拉弯工艺和成形质量控制提供实践依据。

1　实验条件

1.1　零件简介

文中研究的拼焊板拉弯件的外形及其截面如图 1 所示。拼焊板拉弯件外形在三维空间弯曲,并且具有曲率分布不均匀的特征,其零件截面形状复杂、结构不对称,存在层叠现象。拼焊板拉弯件的 2 种材料分别为 SPCD 和 B250P1 拼焊板,板厚均为 0.8 mm,总板宽为 153.8 mm,其中材料 SPCD 宽度为 78 mm,材料 B250P1 宽度为 75.8 mm。拼焊板焊接后的总体屈服强度 σ_s=282 MPa,抗拉强度为 σ_b=451 MPa。

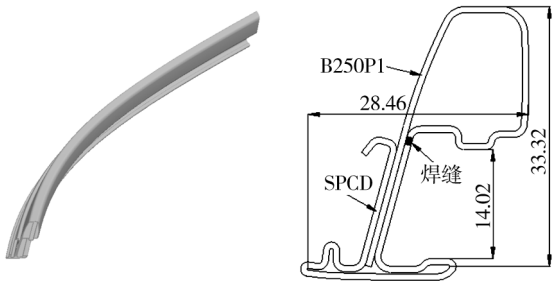


图 1　拼焊板拉弯件及其截面示意图

Fig. 1 TWB stretch bending part and its cross section

1.2　拉弯设备拉弯成形过程

图 2 所示为拼焊板结构件拉弯工艺试验的设备,主要由拉弯模具、冲孔模块、夹紧切断模块、固定支架模块等组成。在拼焊板结构件的拉弯成形过程中,拉弯设备的一般工作过程如下[10]:安放坯料,左、右旋转夹头将坯料夹紧,在弯曲臂、升降臂、旋转夹头的共同作用下,通过夹头对坯料施加引伸力,使坯料贴膜,实现拉弯成形;冲孔装置动作冲圆孔;切断装置动作切断;取下拉弯件。

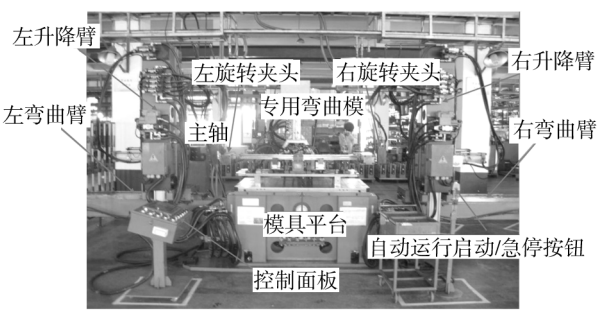


图 2　拉弯成形设备

Fig. 2 Stretch bending forming equipment

2　拉弯试验

2.1　工艺参数的选择

2.1.1　引伸力 F 的确定

引伸力是由夹头施加给型材的,在引伸力作用

下型材沿轴向进行拉伸,发生塑性变形。拼焊板结构件到达屈服状态所需的引伸力 $F_{屈}$ 由式(1)求得:

$$F_{屈}=\sigma_s A=35\ \text{kN} \quad (1)$$

实验中将引伸力 F 定为 $F_{屈}$ 的 1.0 ~ 1.3 倍[11],计算可获得引伸力 F 变化范围为 35 ~ 45.5 kN。

2.1.2 夹头旋转角 α 的确定

拼焊板拉弯件在成形过程中,夹头不仅对拉弯件施加引伸力,还带动拉弯件绕其轴向旋转一定角度,以实现零件贴模。旋转角的大小将影响拉弯成形的贴模精度及成形质量。

旋转角的大小根据拉弯件的结构特征而定,旋转角 α 的大小等于未入模型材的主受力面与拉弯模具型面主受力面之间的法向夹角,如图 3 所示。整个零件的旋转角分为 4 段,通过测量拉弯件与模具型面的数字模型,获得相应的旋转角 $\alpha_1=4.4°$,旋转角 $\alpha_2=11.6°$,旋转角 $\alpha_3=17.5°$,旋转角 $\alpha_4=22.3°$。由于拼焊板拉弯旋转贴模后存在一定的回弹,实际应使旋转角略大于测量值。为研究各旋转角对成形质量的影响,将 α_1 定为 4° ~ 7°,α_2 定为 11° ~ 14°,α_3 定为 17° ~ 20°,α_4 定为 22° ~ 25°。

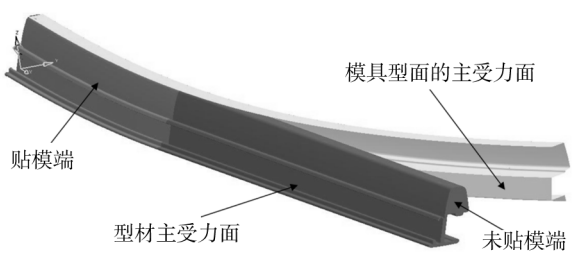


图 3 旋转角的测量

Fig. 3 The measurement of rotation angle

2.2 正交试验设计

选择旋转角 α_1 ~ α_4 及引伸力 F 为正交试验因素,各确定 4 个水平,设计了 5 因素 4 水平的正交试验方案,各因素水平的组合如表 1 所示。

2.3 试验数据测量

对于拼焊板拉弯件而言,其外侧线轮廓间隙 L_1、内侧线轮廓间隙 L_2、筋部面轮廓间隙 L_3、外侧面轮廓间隙 L_4 以及内侧面轮廓间隙 L_5 是其成形质量的重要指标,标准间隙值均设计为 3 mm,如图 4 所示。测量工具包括检具体、锥形塞尺及卡板,通过测量图 4 中的各个偏差参数,可大致评价拼焊板拉弯件的外形质量,实际间隙值与标准间隙值相差越大,则外形偏差越大。

表 1 正交试验方案设计

Table 1 Project design of orthogonal experiment

实验组	旋转角/(°)				引伸力
	α_1	α_2	α_3	α_4	F / kN
1	4(1)	11(1)	17(1)	22(1)	35(1)
2	4(1)	12(2)	18(2)	23(2)	38.5(2)
3	4(1)	13(3)	19(3)	24(3)	42(3)
4	4(1)	14(4)	20(4)	25(4)	45.5(4)
5	5(2)	11(1)	18(2)	24(3)	45.5(4)
6	5(2)	12(2)	17(1)	25(4)	42(3)
7	5(2)	13(3)	20(4)	22(1)	38.5(2)
8	5(2)	14(4)	19(3)	23(2)	35(1)
9	6(3)	11(1)	19(3)	25(4)	38.5(2)
10	6(3)	12(2)	20(4)	24(3)	35(1)
11	6(3)	13(3)	17(1)	23(2)	45.5(4)
12	6(3)	14(4)	18(2)	22(1)	42(3)
13	7(4)	11(1)	20(4)	23(2)	42(3)
14	7(4)	12(2)	19(3)	22(1)	45.5(4)
15	7(4)	13(3)	18(2)	25(4)	35(1)
16	7(4)	14(4)	17(1)	24(3)	38.5(2)

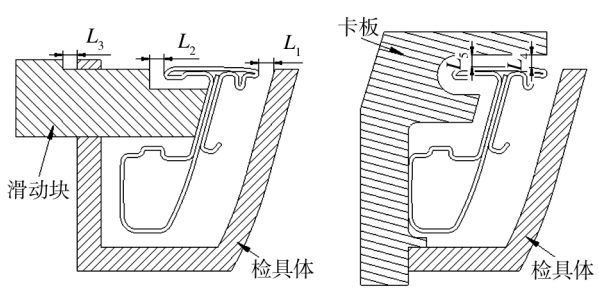


图 4 成形质量测量参数示意图

Fig. 4 The measurement parameters of forming quality

3 试验结果与分析

对获得的试验数据进行极差分析,得到的数据结果如表 2—4 所示。其中:$\overline{Y}_{ij}$ 表示第 j 列因素中第 i 水平的效应,$\overline{Y}_{ij}=Y_{ij}$/第 j 列中第 i 水平出现次数;R_j 表示极差,$R_j=(\overline{Y}_{ij})_{\max}-(\overline{Y}_{ij})_{\min}$(极差值越大说明因素对目标的影响越大)。

表 2　外侧线轮廓间隙 L_1 与筋部面轮廓间隙 L_3 的极差

Table 2 Variance analysis of the profile gap of outer line L_1 and the reinforced surface L_3

因素 目标	旋转角 α_1	旋转角 α_2	旋转角 α_3	旋转角 α_4	引伸力 F
外侧线轮廓间隙 L_1					
$\overline{Y}_{1j}$	3.055	2.982	2.980	2.925	2.615
$\overline{Y}_{2j}$	3.070	3.105	3.087	3.095	3.045
$\overline{Y}_{3j}$	3.095	3.100	3.125	3.120	3.243
$\overline{Y}_{4j}$	3.0	3.130	3.180	3.180	3.415
R_j	0.043	0.148	0.177	0.255	0.800
筋部面轮廓间隙 L_3					
$\overline{Y}_{1j}$	3.197	3.230	3.157	3.147	2.833
$\overline{Y}_{2j}$	3.282	3.257	3.205	3.290	3.215
$\overline{Y}_{3j}$	3.283	3.240	3.322	3.282	3.422
$\overline{Y}_{4j}$	3.272	3.308	3.350	3.315	3.565
R_j	0.086	0.078	0.193	0.168	0.732

表 3　内侧线轮廓间隙 L_2 的极差

Table 3 Variance analysis of the profile of inner line

因素 目标	旋转角 α_1	旋转角 α_2	旋转角 α_3	旋转角 α_4	引伸力 F
$\overline{Y}_{1j}$	3.183	3.225	3.232	3.217	3.180
$\overline{Y}_{2j}$	3.218	3.185	3.235	3.175	3.200
$\overline{Y}_{3j}$	3.215	3.215	3.183	3.200	3.228
$\overline{Y}_{4j}$	3.192	3.183	3.158	3.215	3.200
R_j	0.035	0.042	0.077	0.042	0.048

表 4　外侧面轮廓间隙 L_4 与内侧面轮廓间隙 L_5 的极差

Table 4 Variance analysis of the profile gap of outer surface and inner surface

因素 目标	旋转角 α_1	旋转角 α_2	旋转角 α_3	旋转角 α_4	引伸力 F
外侧面轮廓间隙 L_4					
$\overline{Y}_{1j}$	2.925	2.940	2.960	2.965	2.835
$\overline{Y}_{2j}$	2.865	2.885	2.900	2.895	2.860
$\overline{Y}_{3j}$	2.810	2.805	2.815	2.805	2.835
$\overline{Y}_{4j}$	2.765	2.735	2.690	2.700	2.835
R_j	0.160	0.205	0.270	0.265	0.025
内侧面轮廓间隙 L_5					
$\overline{Y}_{1j}$	3.132	3.090	3.058	3.093	3.192
$\overline{Y}_{2j}$	3.175	3.140	3.135	3.160	3.168
$\overline{Y}_{3j}$	3.208	3.242	3.215	3.197	3.207
$\overline{Y}_{4j}$	3.250	3.292	3.357	3.315	3.197
R_j	0.118	0.202	0.299	0.222	0.039

3.1　工艺参数对外侧线轮廓间隙 L_1 和筋部面轮廓间隙 L_3 的影响

通过比较表 2 中外侧线轮廓 L_1 与筋部面轮廓 L_3 的极差值 R_j 可知,影响外侧线轮廓与筋部面轮廓因素的主次顺序为:引伸力 F、旋转角 α_4、旋转角 α_3、旋转角 α_2、旋转角 α_1。

图 5 所示为各工艺参数对拼焊板拉弯件的外侧线轮廓间隙 L_1 和筋部面轮廓间隙 L_3 的影响趋势图。由图 5 可知,各工艺参数对外侧线轮廓间隙 L_1 和筋部面轮廓间隙 L_3 的影响规律相似,这是由于二者尺寸相互关联。由图 4 可知,当外侧线轮廓间隙 L_1 增大时,滑动块向左移动,筋部面轮廓间隙 L_3 也随之增大。

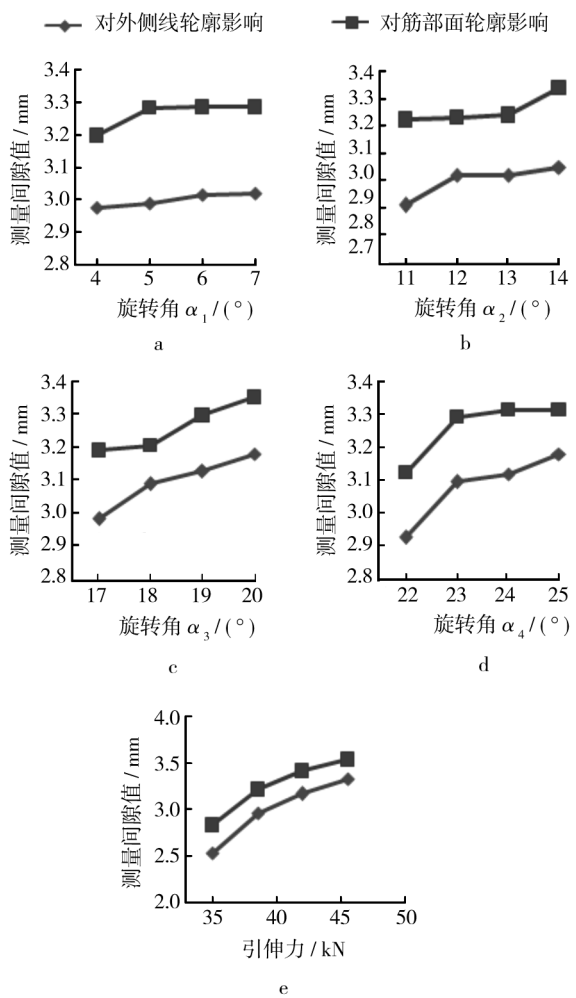


图 5　工艺参数对外侧线轮廓与筋部面轮廓的影响

Fig. 5 Influence of the process parameters on the profile of outer line and the reinforced surface

由图 5 可见,随着各工艺参数的增大,外侧线轮廓间隙 L_1 与筋部面轮廓间隙 L_3 也随之增大。但在 4 个旋转角的变化区间内均从小于 3 mm 增加到大于 3 mm,即出现外侧线轮廓 L_1 为 3 mm 的标准间隙,引伸力在变化区间内也出现外侧线轮廓 L_1 和筋部面轮廓 L_3 为 3 mm 的标准间隙。

3.2 工艺参数对内侧线轮廓间隙 L_2 的影响

通过比较表 3 中内侧线轮廓间隙 L_2 的极差值 R_j 可知,内侧线轮廓各个因素的极差值均较小,其中旋转角 α_1 的极差值最小为 0.035,旋转角 α_3 的极差值最大为 0.077。各参数的极差值较小,极差与均值的比值约为 1% ~2%,可认为内侧线轮廓基本不受工艺参数的影响。

图 6 所示为内侧线轮廓的几何关系图,图 6 中内侧线轮廓是拉弯件内侧线与滑动块侧面 a 之间的距离 L_2,假设滑动块面 a 到拉弯件内侧面的距离为 K,内侧线到拉弯件内侧面的距离为 K_1,则有:

$$K_2 = K - K_1 \tag{2}$$

然而,K 不仅是滑动块面 a 与拉弯件中侧面的距离,还是滑动块的固有尺寸;K_1 表示内侧线与拉弯件中侧面的距离,属于设计尺寸,仅当内侧线发生塌边时 K_1 值才会发生变化,即内侧线轮廓 L_2 才随之发生变化。在试验过程中,拼焊板拉弯件的内侧线始终没有发生塌边现象,因此,内侧线轮廓极差值均较小。然而拼焊板拉弯件的试验过程中,不可避免地存在测量误差,所以内侧线轮廓的测量值尽管均匀,但也有波动。

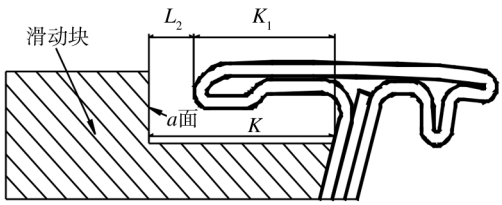


图 6 内侧线轮廓几何关系

Fig. 6 The geometrical relationship for the profile of outer line

3.3 工艺参数对内、外侧面轮廓间隙的影响

通过比较表 4 中外侧面轮廓间隙 L_4 与内侧面轮廓间隙 L_5 的极差值 R_j 可知,影响外侧面轮廓与内侧面轮廓因素的主次顺序为:旋转角 α_3、旋转角 α_4、旋转角 α_2、旋转角 α_1、引伸力 F。

引伸力 F 对拼焊板拉弯件外侧面轮廓和内侧面轮廓的影响很小,这里主要讨论旋转角 α 的影响。图 7 所示为旋转角 α 对外侧面轮廓间隙 L_4 和内侧面轮廓间隙 L_5 的影响趋势。由图 7 可知,随着旋转角 α 的增加,工件顶面逆时针方向偏转(如图 4 所示),从而外侧面轮廓间隙 L_4 逐渐减小,而内侧面轮廓间隙 L_5 逐渐增大。

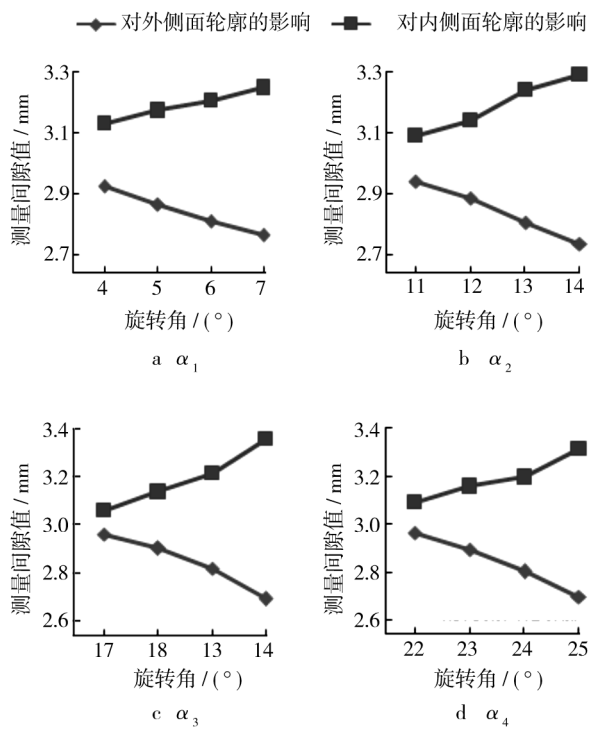


图 7 工艺参数对内外侧面轮廓的影响

Fig. 7 Influence of process parameter on the profile gap of inner and outer surface

3.4 试验结果

综合对比可以发现,在表 2 所示的正交表中,第 2 组参数所获得的拼焊板拉弯件成形质量最好,其工艺参数组合:旋转角 α_1 为 4°,α_2 为 12°,α_3 为 18°,α_4 为 23°,引伸力 F 为 38.5 kN,其外侧线轮廓间隙 L_1 为 3.04 mm,内侧线轮廓间隙 L_2 为 3.17 mm,筋部面轮廓间隙 L_3 为 3.13 mm,外侧面轮廓间隙 L_4 为 2.82 mm,内侧面轮廓间隙 L_5 为 3.23 mm,图 8 所示为采用这一组参数进行拉弯成形的拼焊板结构件放置在检验夹具上的照片。

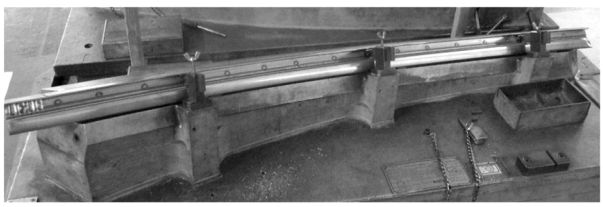


图 8　正交实验表第 2 组拼焊板拉弯件

Fig. 8 No. 2 TWB stretch bending part in the orthogonal experiment table

4　结论

1）在拼焊板拉弯件成形试验中,外侧线轮廓和筋部面轮廓主要受引伸力 F 的影响,受旋转角 α 的影响较小;内侧线轮廓受各工艺参数影响均很小;外侧面轮廓与内侧面轮廓主要受旋转角 α 的影响,引伸力 F 对其影响很小。

2）工艺参数对外侧线轮廓和筋部面轮廓的影响规律相似:随着各工艺参数的增大,外侧线轮廓间隙与筋部面轮廓间隙由小于标准间隙增加到大于标准间隙;而随着旋转角的增加,外侧面轮廓间隙减小,内侧线轮廓间隙增大。

3）在所进行的正交试验中,当旋转角 α_1 为 4°,α_2 为 12°,α_3 为 18°,α_4 为 23°,引伸力 F 为 38.5 kN 时,获得的拼焊板拉弯件成形质量最好。

参考文献:

[1] 谭善锟,张亚峰,柴震,等. 高强度冷轧钢板在奇瑞轿车上的应用研究[J]. 汽车工艺与材料,2003(6):10—14.
TAN Shan-hun,ZHANG Ya-feng,CHAI Zhen,et al. Application of High Strength Cold-rolled Sheet Steel in Chery Cars[J]. Automobile Technology & Material,2003(6):10—14.

[2] 夏琴香,袁宁. 模具设计及计算机应用[M]. 广州:华南理工大学出版社,2008.

[3] 刁可山,周贤宾,李晓星,等. 矩形截面型材拉弯成形[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(2):134—137.
DIAO Ke-shan,ZHOU Xian-bin,LI Xiao-xing,et al. Stretch Bending of Aluminum Extrusion[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2005,31(2):134—137.

[4] 周欢,贺尔铭,王红建,等. 复杂截面型材二维拉弯回弹数值模拟研究[J]. 科学技术与工程,2010,10(14):3475—3478.
ZHOU Huan,HE Er-ming,WANG Hong-jian,et al. Numerical Simulation Study on Springback in 2D Stretch Bending Process for Complicated Section Profile[J]. Science Technology and Engineering,2010,10(14):3475—3478.

[5] 孙惠学,胡金华,李春科,等. 奥迪车门竖框拉弯成形弹复分析[J]. 塑性工程学报,1998,5(3):32—35.
SUN Hui-xue,HU Jin-hua,LI Chun-ke,et al. [J]. Journal of Plasticity Engineering,1998,5(3):32—35.

[6] 周苗苗,王红建,贺尔铭,等. 复杂截面型材 3D 拉弯数值模拟建模技术研究[J]. 机械科学与技术,2012(6):888—892.
ZHOU Miao-miao,WANG Hong-jian,HE Er-ming,et al. Investigation of Numerical Modeling Techniques of 3D Stretch Bending for Complex Cross Section[J]. Mechanical Science and Technology,2012(6):888—892.

[7] CLAUSEN A H,HOPPERSTAD O S,LANGSETH M. Stretch Bending of Aluminum Extrusions: Effect of Tensile Sequence[J]. Journal of Engineering Mechanics,1999(125):521—529.

[8] CLAUSEN A H,HOPPERSTAD O S,LANGSETH M. Stretch Bending of Aluminum Extrusions:Effect of Geometry and Alloy[J]. Journal of Engineering Mechanics,1999(125):392—400.

[9] 陈亚兵,夏琴香,沈亚静,等. 汽车门框上条件拉弯成形过程的数值模拟研究[J]. 机电工程技术,2014,43(7):47—50.
CHEN Ya-bing,XIA Qin-xiang,SHEN Ya-jing,et al. Numerical Simulation of Stretch Bending of the Upper Strip Used for Automobile Doorframe[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology,2014,43(7):47—50.

[10] 沈亚静,徐仲祥,夏琴香,等. 汽车门框上条制件拉弯成形模具设计[J]. 模具制造,2014,14(1):29—34.
SHEN Ya-jing,XU Zhong-xiang,XIA Qin-xiang,et al. Design of Drawing-Bending Die for Upper Strip Workpiece of Automobile Doorframe[J]. Die & Mould Manufacture,2014,14(1):29—34.

[11] 鱼二强,贺尔铭,王红建. 非对称型材拉弯成形的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程,2011,11(15):3476—3480.
YU Er-qiang,HE Er-ming,WANG Hong-jian. Numerical Simulation Study in Stretch Bending Process for Symmetrical Section Profile[J]. Science Technology and Engineering,2011,11(15):3476—3480.