

高速铁路承轨台模板拉深成形工艺优化研究

马瑞, 殷璟, 马丽霞, 赵军

(燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 通过 Dynaform 有限元模拟, 制定了高速铁路承轨台模板两次拉深成形工艺方案。采用均匀设计法, 选择出了预成形最佳压边力与坯料尺寸的组合。预成形实验结果与模拟结果符合较好, 法兰外边缘宽度方向尺寸最大相对误差为 1.22%, 长度方向尺寸最大相对误差为 4.86%。通过该拉深成形工艺方案获得了表面质量和尺寸均合格的高速铁路承轨台模板零件, 并进行了小批量生产, 已应用于工程实际。

关键词: 高速铁路承轨台模板; 压边力; 坯料尺寸

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2009)02-0023-07

The Research for Drawing Process Optimization of High-speed Railway's Track Template

MA Rui, YIN Jing, MA Li-xia, ZHAO Jun

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The track template is a crucial part of the high-speed railway's track constructing, and the manufacture experiences are still lacked in China. In this paper, the two-step drawing process scheme is established by FEA of Dynaform. The preforming is the key step of the whole process. The best combination of blank-hold force and blank size is obtained by uniform design method. The pre-formation's experimental results and simulation results are well coincided. The maximum relative error of width direction size reaches 1.22%, and the maximum relative error of length direction size is less than 4.86%. The eligible parts were formed by the drawing process and pilot production was carried out. The process has been applied to engineering practice.

Key words: high-speed railway's track template; blank-hold force; blank size

当今, 最先进的铁路技术体现为高速铁路。高速铁路是一个庞大而复杂的系统, 轮轨式高速铁路的一个重要组成部分是轨道, 现在国内研制生产的是博格板式无砟轨道。承轨台模板是生产博格板式无砟轨道之轨枕的基本工艺装备, 国外生产承轨台模板是分块成形后拼焊而成的, 生产周期长, 成本高, 需要的辅助设备多, 投资较大。国内普通铁路的

承轨台形状与博格板式无砟轨道承轨台完全不同, 之前并无生产博格板式无砟轨道承轨台的经验, 但综合各种因素考虑, 决定用板材拉深成形的方法生产承轨台模板。该工艺的实验成功, 大大推进了我国高速铁路的国产化进程。生产时所用的博格板式无砟轨道承轨台模板如图 1 所示, 铺设后的博格板式无砟轨道如图 2 所示。

收稿日期: 2009-07-31

作者简介: 马瑞(1978-), 男, 河北泊头人, 博士, 副教授, 主要研究方向为板材成形及其智能化控制等。



图 1 高速铁路承轨台模板

Fig. 1 High-speed railway's track template



图 2 高速铁路轨道

Fig. 2 High-speed railway's track

1 承轨台模板拉深成形特点分析

如图 3 所示,高速铁路承轨台模板属于复杂拉

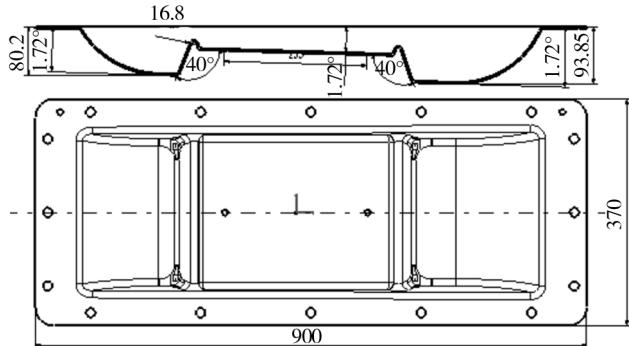


图 3 高速铁路承轨台模板零件

Fig. 3 Sketch of high-speed railway's track template

深件,有以下成形特点:高速铁路承轨台模板两侧的拉深深度深,且深度不均匀,圆角处曲率半径小,容易拉裂;中间平面的拉深深度较浅,与凸模接触面积大,应力小,易造成弹性回复或刚度不够等缺陷;中

间平面两侧的筋处于双向拉应力状态,且曲率半径很小,容易出现颈缩或破裂等缺陷,成形十分困难;该零件对法兰区的要求亦非常高,但坯料经拉深变形后法兰区易起皱或发生翘曲回弹,影响其表面质量和尺寸精度;由于零件要求的板料为3mm厚的钢板,所以需要的切边冲孔力较大,对成形设备的要求较高。另外,零件的尺寸公差等级要求高,且要求表面光洁度好,进一步加大了其成形难度。

文中研究用优质碳素冷轧板 08Al 拉深成形高速铁路承轨台模板的工艺,为研究其它复杂形状零件的成形提供一些依据和经验。

2 一次拉深成形数值模拟研究

通过 Dynaform 有限元模拟软件的 BSE (Blank Size Estimate) 功能计算得到坯料的轮廓形状, 如图 4 所示。图 4 中曲线 1 是 BSE 展开的坯料轮廓, 曲线 2

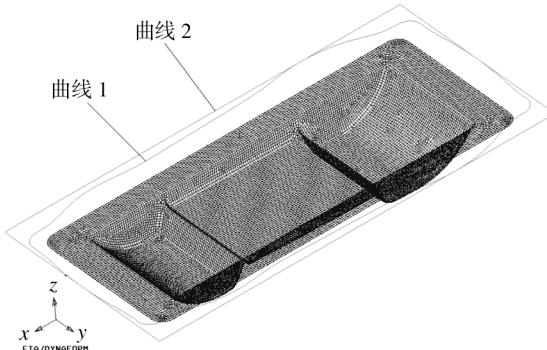


图 4 坯料轮廓展开

Fig. 4 Chart of the blank rough

是其坯料轮廓的矩形包络线。经测量矩形包络线长 1020.420 mm, 宽 476.753 mm。根据展开的坯料轮廓及其矩形包络线的形状和尺寸, 制定实验坯料尺寸, 对比其成形结果的优劣。实验坯料尺寸见表 1。

表 1 实验坯料尺寸

Table1 Size of experiment roughcast

序号	坯料形状	坯料尺寸/mm
1	矩形	长 990, 宽 490
2	梯形	上底 450, 下底 490, 高 1000
3	多边形	从矩形坯料四角各切去一个 两直角边长为 50 的三角形

压边力的大小对复杂拉深件的冲压成形过程有

重要影响,它是控制冲压件起皱的主要手段之一,也是控制拉裂现象的常用办法。利用压边力控制拉裂现象时有其独特的特点,即不论冲压条件如何,压边力都存在一个最优值,低于或高于此最优值,都会严重影响接触界面上摩擦力的大小与摩擦力历程的形态,进而影响冲压件的成形质量^[1]。因此,比较不同的压边力模拟成形结果对实验压边力的选取具有重要的影响。

图 5 给出了不同压边力下矩形坯料一次拉深成

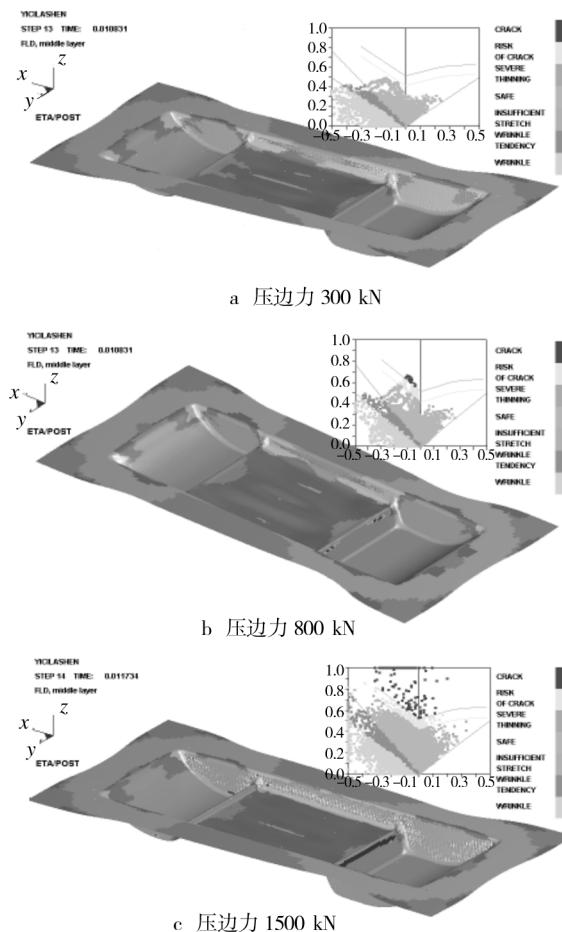


图 5 一次成形不同压边力模拟结果比较

Fig. 5 Simulation results comparing of different blank-hold force

形的模拟结果。由图 5 可见,当压边力较小,为 300 kN 时,工件虽不会破裂,但中间平面基本处于增厚区,并且能看到明显的鼓包,完全达不到要求的平面度,因此较小的压边力不能成形出合格的工件。增大压边力到 800 kN 时,大端斜壁筋部圆角处有破裂迹象,并且中间平面仍有明显的鼓包,说明压边力的增大使材料流动阻力也增大,局部应力超过了材料的

强度极限,因此有发生破裂的危险,但起皱仍没有得到明显的控制。当压边力增加到 1500 kN 时,大端斜壁筋部圆角处已发生严重破裂,小端的侧壁接近底部圆角处也有破裂的迹象,中间平面的平面度虽有所改善,但仍不理想,可见较大的压边力虽对起皱有一定的抑制作用,但使材料的流动阻力和流动方向都发生了变化,开裂现象更加严重。采用另外两种坯料形状也进行了以上模拟,所得结果与之相似。

通过模拟发现,在不同的压边力下,一次拉深成形均得不到理想的成形结果是由于工件成形时复杂的应力应变状态引起的,与工件的特殊结构形状有关。因此,要想成形出合格的工件应该考虑多次拉深成形,改变工件成形过程中的材料流动历程,使在适当的压边力下,起皱和开裂都得到良好的控制^[2]。

3 两次拉深成形方案

显然,从模拟一次成形的失败可知两次拉深成形是必要的,尤其是预成形的质量直接决定了最终产品的质量。因此,预成形模具形状和成形工艺的确定是两次成形方案中的关键。预成形的目的是先基本拉深出工件的两盒形端,坯料中部反拉深成形出法向为 z 轴正向的曲面,该曲面与两斜壁的上圆角相切,为终成形储备一些材料;终成形的目的是将预成形毛坯拉深到要求的形状和尺寸,主要包括工件的两盒形端达到要求的深度,拉深出中间平面,同时成形出中间平面两侧的筋^[3-4]。预成形和终成形的凹模型面如图 6 所示。

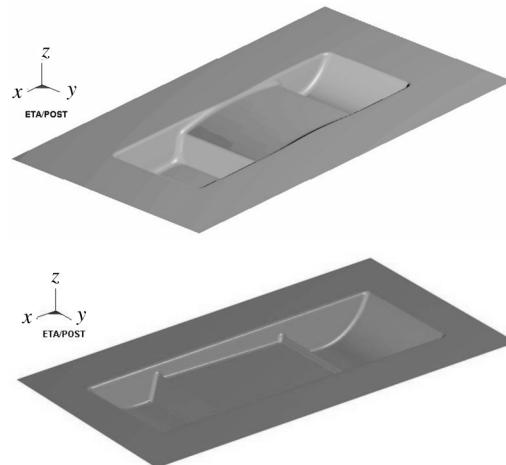


图 6 预成形和终成形的凹模型面

Fig. 6 Die face of preforming and end forming

4 预成形数值模拟与实验比较

4.1 不带拉深筋与带拉深筋模拟结果比较

分析预成形模具型面可知,坯料随凸模向凹模两盒形区进料较多,流动速度较快,拉深变形后坯料在该部位的减薄量较大;中间平面为反拉深,曲率半径较大,拉深变形相对较小,容易起皱。为了增加中间平面处坯料的变形,以相对较小的压边力防止坯料起皱^[5],在中间平面对应的法兰区两侧设置对称的两条拉深筋。图 7 是采用梯形坯料,压边力为

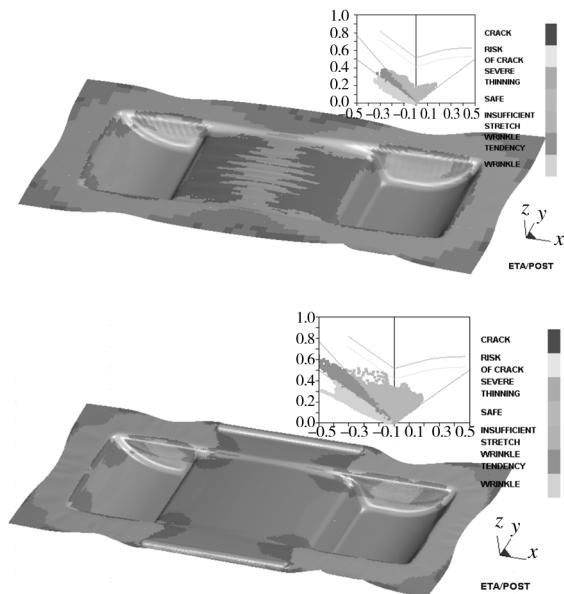


图 7 压边力为 600kN 无/有拉深筋的模拟结果比较

Fig. 7 Simulation results of blank-hold force 600kN with/without draw bead

600kN 时无拉深筋和带拉深筋的预成形模拟结果及成形极限图比较。从图 7 中可以看出,在无拉深筋时工件虽没有出现拉裂现象,但 600 kN 的压边力相对较小,中间曲面出现了明显的褶皱,成形结果不理想。而在带拉深筋的情况下,工件的重要部位都处于安全区,中间平面状态良好,适于在终成形继续拉深。可见拉深筋在此明显地改善了坯料的流动状况,提高了预成形件的质量。

4.2 不同压边力和坯料尺寸模拟结果比较

压边力和坯料尺寸都是影响成形质量的重要因

素,两者的最优组合能得到最好的成形结果。采用实验设计的方法^[6-7]来安排模拟,不但模拟的次数会大大减少,而且统计分析也将变得简单,更容易从中优选出最佳压边力和坯料尺寸的组合。将压边力设为因素 A,取 5 个水平;坯料形状和尺寸设为因素 B,取 3 个水平。通过比较,该模拟可采用均匀设计法中的混合拟水平均匀设计表 $U_{10}(5 \times 3)$ 来安排,如表 2。为了避免系统误差,在设定水平序列号时,不是简单地完全按因素水平数值由小到大或由大到小的顺序排列,这里采用了“随机化”的方法处理。将压边力水平 600 kN 定为 A_1 ,800 kN 定为 A_2 ,700 kN 定为 A_3 ,900 kN 定为 A_4 ,1000 kN 定为 A_5 ;矩形坯料定为 B_1 ,梯形坯料定为 B_2 ,多边形坯料定为 B_3 。

表 2 拟水平设计 $U_{10}(5 \times 3)$

Table 2 Dummy level design $U_{10}(5 \times 3)$

试 验 号	A (压边力)		B (坯料尺寸)		试 验 号	A (压边力)		B (坯料尺寸)	
	1	2	1	2		1	2	1	2
1	4	3	6	2	3	7	1	3	
2	3	3	8	5	1	9	3	2	
3	1	2	9	3	2	10	2	1	
4	5	2							
5	4	1							

采用带拉深筋的模具几何模型分别对表中的组合进行有限元模拟,模拟结果主要对成形裕度、最大增厚比、最大减薄比和 3 个关键区域的厚度变化率进行比较,比较的关键区域 A、B、C 如图 8 所示。为

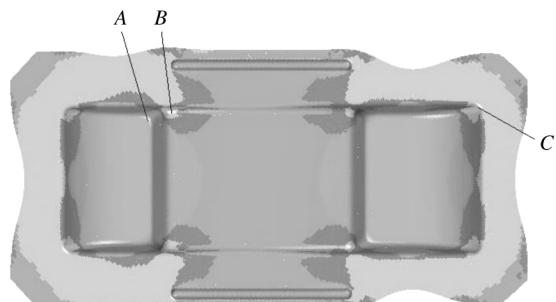


图 8 模拟结果对比的关键区域

Fig. 8 Key-area of simulation results

了减小测量误差,利用模拟软件的功能在每个区域选取了 46 个测量点,然后取平均值。表 3 是 10 次模拟结果的统计值。

表3 模拟结果统计(%)

Table 3 Statistics of simulation results

试验序号	成形裕度	最大增厚率	最大减薄率	厚度变化率		
				A区	B区	C区
1	16.5	13.63	43.33	42.33	5.20	10.84
2	17.2	15.48	42.80	41.76	5.49	11.69
3	12.3	18.66	34.65	31.47	5.53	11.98
4	11.0	17.88	34.82	32.85	4.73	12.01
5	11.7	12.48	43.05	42.37	5.56	11.55
6	16.8	14.39	43.00	42.32	5.28	11.97
7	17.5	17.00	42.63	40.72	3.80	12.73
8	10.5	12.39	43.53	41.70	5.17	11.19
9	11.5	18.90	34.68	32.69	4.51	11.11
10	12.0	12.64	42.81	41.72	5.43	11.51

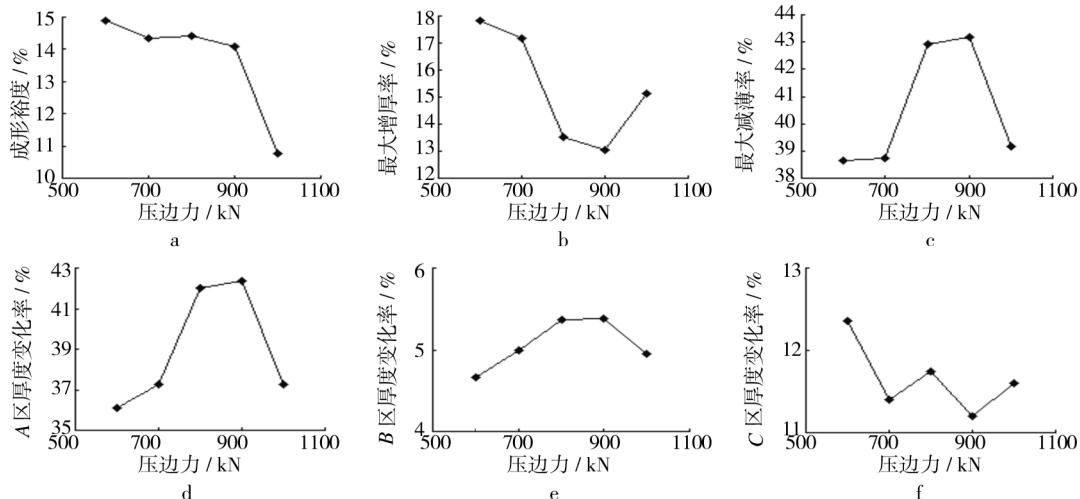


图9 压边力趋势

Fig. 9 Blank-hold force tendency chart

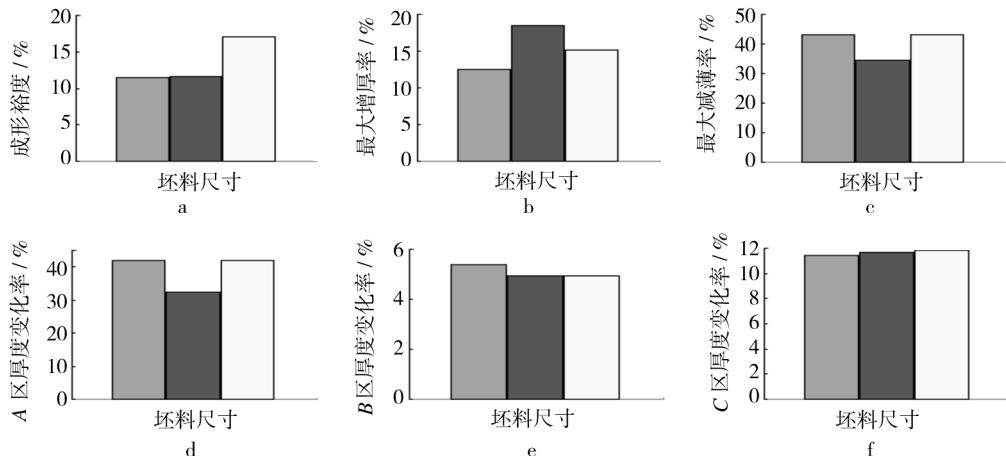


图10 坯料尺寸趋势

Fig. 10 Blank size tendency chart

该分析的数据处理是借鉴了多指标试验设计的直观分析法。即先对各指标分别进行直观分析,得出因素的主次和优方案,并且画出各因素与各指标的趋势图(图9为压边力趋势,图10为坯料尺寸趋势)。不同指标所对应的优方案也是不同的,通过综合平衡法可以得到综合的优方案。表4是10次模拟结果的分析值,各符号的意义分别为: K_i 表示任一列上水平号为*i*时所对应的模拟结果之和; $\bar{K}_i = K_i / s$,其中*s*为任一列上各水平出现的次数;*R*表示极差,在任一列上 $R = \{\bar{K}_i\}_{\max} - \{\bar{K}_i\}_{\min}$,极差最大的列是因素的水平对模拟结果影响最大的因素,即主要因素^[8]。

表4 模拟结果分析(%)
Table 4 Analysis sheet of simulation results

指标 因素	成形裕度		最大增厚率		最大减薄率		A区厚度变化率		B区厚度变化率		C区厚度变化率	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
K_1	29.8	34.2	35.66	37.51	77.28	129.39	72.19	125.79	9.33	16.16	24.71	34.25
K_2	28.8	34.8	27.03	55.44	85.81	104.15	84.04	97.01	10.71	14.77	23.48	35.10
K_3	28.7	68	34.38	60.50	77.48	171.76	74.45	167.13	10.00	19.77	22.80	47.23
K_4	28.2	/	26.11	/	86.38	/	84.70	/	10.76	/	22.39	/
K_5	21.5	/	30.27	/	78.35	/	74.55	/	9.90	/	23.20	/
\bar{K}_1	14.9	11.4	17.83	12.50	38.64	43.13	36.10	41.93	4.67	5.39	12.36	11.42
\bar{K}_2	14.4	11.6	13.52	18.48	42.91	34.72	42.02	32.34	5.36	4.92	11.74	11.70
\bar{K}_3	14.4	17	17.19	15.13	38.74	42.94	37.23	41.78	5.00	4.94	11.40	11.81
\bar{K}_4	14.1	/	13.06	/	43.19	/	42.35	/	5.38	/	11.20	/
\bar{K}_5	10.8	/	15.14	/	39.18	/	37.28	/	4.95	/	11.60	/
R	4.1	5.6	4.77	5.98	4.55	8.41	6.25	9.59	0.71	0.47	1.16	0.39

通过比较极差的大小发现:影响成形裕度、最大增厚率、最大减薄率和A区厚度变化率的主要因素是坯料尺寸;影响B,C区厚度变化率的主要因素是压边力。

按因素A,B相应水平的平均偏差量及因素与指标趋势图可确定各因素的最优水平组合。对成形裕度来说为 A_1B_3 ,对最大增厚率来说为 A_4B_1 ,对最大减薄率、A区厚度变化率、B区厚度变化率来说为 A_1B_2 ,对C区厚度变化率来说为 A_4B_1 。综合上述分析,优秀方案为 A_1B_2 ,即压边力为600 kN,梯形坯料。

4.3 预成形模拟与实验结果比较

如图11所示,由压边力为600 kN、梯形坯料的

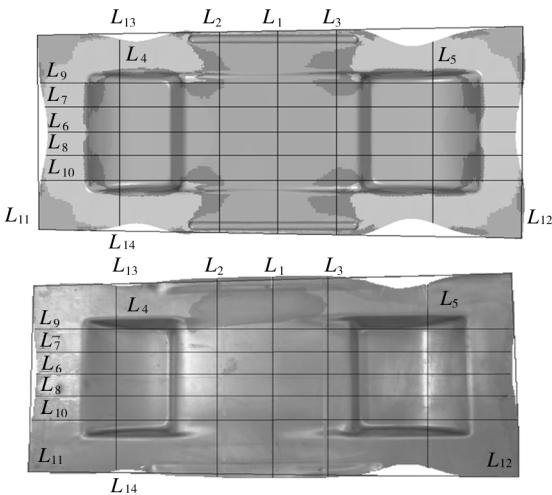


图11 压边力600 kN模拟结果与实验结果比较

Fig. 11 Simulation and experimental results of blank-hold force 600 kN

预成形模拟结果与实验结果的比较可知,模拟与实验结果均无明显缺陷,成形质量良好;从表5中可以看出,在所取的14个特征值中,预成形后法兰外边缘宽度方向尺寸最大相对误差为1.22%,长度方向尺寸最大相对误差为4.86%,可见模拟结果与实验结果的近似程度是很高的。因此,模拟结果有一定的准确性和参考价值,可为制定最终的工艺参数提供一些支持。

表5 预成形模拟结果和实验结果尺寸比较

Table 5 Measurement comparison of simulation and experiment

尺寸名称	模拟值 /mm	实验值 /mm	相对误差 /%
L_1	445	447	0.45
L_2	443	443	0
L_3	445	449	0.89
L_4	416	411	1.22
L_5	408	404	0.99
L_6	926	894	3.58
L_7	935	919	1.74
L_8	933	919	1.52
L_9	946	903	4.76
L_{10}	949	905	4.86
L_{11}	430	428	0.47
L_{12}	471	472	0.21
L_{13}	957	927	3.24
L_{14}	957	926	3.35

5 终成形及质量检查

成形质量良好的预成形件经过终成形拉深及切边、冲孔等工序的操作后,表面无缺陷,可进入最终

的质量检查,检查标准如下:中间平面两侧的筋顶部距法兰面的距离最大允许误差 $+0.2\text{ mm}$;中间平面上两定位孔(间距 250 mm)距法兰面的距离差 ΔH 代入公式 $250/[\Delta H+(0.5\% \times 250)]$ 计算,所得比例应为 $1:40$;两端斜面与中间平面的夹角最大允许误差 -0.05° ;中间平面两侧的筋曲率半径最大允许误差 -0.2 mm 。

采用美国新科公司 Series 3000i 型三坐标测试仪对高速铁路承轨台模板的关键尺寸进行测量,误差均在允许范围之内。图 12 为采用文中所述的两

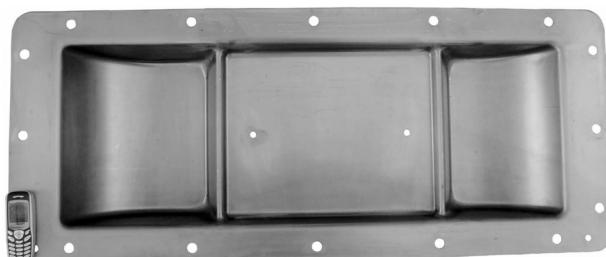


图 12 高速铁路承轨台模板实物照片

Fig. 12 Photo of high-speed railway's track template

次拉深工艺成形出的高速铁路承轨台模板的最终产品。

6 结语

通过 Dynaform 有限元模拟制定了高速铁路承

轨台模板两次拉深的成形方案,确定了较优的预成形模具形状;采用均匀实验法选择出了预成形最优压边力与坯料尺寸的组合为压边力 600 kN ,梯形坯料;预成形模拟与实验的近似度较高,法兰外边缘宽度方向尺寸最大相对误差为 1.22% ,长度方向尺寸最大相对误差为 4.86% ,模拟结果具有可参照性;采用最佳压边力与坯料尺寸组合试制出了表面质量与尺寸精度均达到要求的合格产品,并进行了小批量生产,产品已应用于京津高速铁路的铺设。

参考文献:

- [1] 林忠钦,李淑慧,于忠奇,等.车身覆盖件冲压成形仿真[M].北京:机械工业出版社,2004:114-341.
- [2] 王同海,孙胜,肖白白.实用冲压设计技术[M].北京:机械工业出版社,1995:120-130.
- [3] 刘伟强,贺业建.复杂曲面拉深及模具设计[J].机械工艺师,2001(8):37-38.
- [4] 陶本苞.几种复杂拉深零件工艺方法的选择[J].航空工艺技术,1993(5):43-46.
- [5] 崔令江.汽车覆盖件冲压成形技术[M].北京:机械工业出版社,2003:82-193.
- [6] 田胜元,肖日嵘.实验设计与数据处理[M].北京:中国建筑工业出版社,1988:154-166.
- [7] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2005:83-121.
- [8] 曾昭钧.均匀设计及其应用[M].北京:中国医药科技出版社,2005:1-26.

欢迎订阅《精密成形工程》

《精密成形工程》杂志前身为创办于 1983 年的中国科技核心期刊《金属成形工艺》。为了适应时代要求,扩大刊物影响力,2009 年经新闻出版总署批准,《金属成形工艺》杂志正式改版更名为《精密成形工程》杂志。

《精密成形工程》是由中国兵器工业第五九研究所、国防科技工业精密塑性成形技术研究应用中心主办的科技核心期刊,面向国内外公开发行,是目前唯一以“成形工程”命名的科技期刊。

《精密成形工程》目前已组建了由才鸿年(院士)、阮雪瑜(院士)、曾苏民(院士)、苑世剑、杨合、张士宏等 30 多位全国知名的院士、学者、专家组成的编委会。

主要报道内容:锻压、铸造、粉末成形、复合材料及其它相关专业领域具有创新性的研究成果及相关行业信息。

《精密成形工程》杂志为双月刊,国际刊号:ISSN 1674-6457,国内统一刊号:CN 50-1199/TB,大 16 开本,每期订价为 15 元,全年 90 元,全国各地邮局(所)均可订阅,逾期可随时与编辑部联系补订。

地址:重庆市九龙坡区石桥铺渝州路 33 号 59 所 邮编:400039

开户行:中国银行重庆市高新支行 户名:重庆五九期刊社 帐号:839939105788091001

电话:023-68792294 传真:023-68793154 电子信箱:jmcxgc@163.com