文章编号:1674-2974(2025)05-0028-13 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025045

基于响应面法的多拱度铝合金节点板冲压回弹预测与补偿

郭小农[1†],李根[1],曾强[2],钟芬达[3]
(1. 同济大学 土木工程学院,上海 200092;
2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116;
3. 利基控股有限公司,香港 999077)

摘 要:自由曲面铝合金单层网壳中的构件通常使用板式节点进行连接.为了满足板式节点的装配需求,需要将板式节点的节点板冲压成具有多个拱度的复杂形状.然而,回弹现象降低了板件的成形精度,且会造成节点装配困难.为了提高节点板的成形精度,有必要对节点板的冲压回弹进行准确预测和有效补偿.首先,对6组多拱度铝合金节点板试件进行了冲压成形试验,通过3D扫描测量了板件的残余拱度,并计算得到板件的回弹量.其次,采用显式动力算法与隐式静力算法结合的混合算法对板件的冲压回弹过程进行有限元分析,分析得到的板件回弹量与试验值的相对误差平均值仅有4.31%.再次,基于1 500组节点板冲压回弹有限元分析结果,建立了回弹预测的响应面模型,该模型的决定系数达到了0.988,表明该模型具有较高精度.最后,基于回弹预测响应面模型,提出了多拱度铝合金节点板的回弹补偿方法.使用该方法对20组具有不同几何参数和拱度组合的节点板进行试设计,结果表明该方法能够对板件的回弹进行有效补偿.

关键词:铝合金;板式节点;回弹预测;回弹补偿;响应面法
中图分类号:TU395 **文献标志码**:A

Springback Prediction and Compensation of Multi-camber Aluminum Alloy Gusset Joint Plates Using Response Surface Method

GUO Xiaonong[1†], LI Gen[1], ZENG Qiang[2], TRIVANA Vanda[3]
(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3. Build King Construction Limited, Hongkong, 999077, China)

Abstract: In free-form aluminum alloy single-layer latticed shells, the members rely on the gusset joints to connect. To meet these assembly requirement of the gusset joint, the joint plates need to be stamped into complex shapes with multiple cambers. However, the springback phenomenon reduces the forming accuracy and may cause difficulty in joint assembly. To improve the forming accuracy of the joint plates, it is crucial to predict and

* **收稿日期**:2024-04-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478335),National Natural Science Foundation of China(51478335)
作者简介:郭小农(1974—),男,四川金堂人,同济大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

compensate for the springback. Firstly, forming experiments were conducted on 6 joint plate specimens, the residual cambers were scanned with a 3D scanner, and the springback values were calculated. Secondly, a mixed algorithm of explicit dynamic and implicit static algorithm was used for the simulation of the springback process on the joint plates. Compared with the experiment springback values, the simulated values only had a mean relative error of 4.31%. Subsequently, response surface models for springback prediction were constructed based on 1 500 numerical simulation results, and the coefficient of determination of the model was 0.988, indicating a high accuracy. Finally, based on the springback prediction response surface model, a springback compensation method for multi-camber aluminum alloy gusset joint plates was proposed and validated with 20 numerical examples. The method was used to design 20 groups of joint plates with different geometric parameters and camber combinations. The results show that the method can effectively compensate the springback of the plates.

Key words: aluminum alloy; gusset joint; springback prediction; springback compensation; response surface method

自由曲面铝合金单层网壳凭借其外形美观、轻质高强以及耐腐蚀等优良特性,在大跨度空间结构中得以广泛应用[1]. 铝合金单层网壳中的构件通常采用板式节点来进行连接. 板式节点由铝合金构件、环槽锚栓和节点板组成. 在自由曲面铝合金单层网壳中,杆件的轴线通常不在同一平面内. 为了满足节点装配需要,需要将节点板冲压成具有多个拱度的复杂形状. 由于铝合金材料具有较低的弹性模量和较高的屈服强度,弹性变形在冲压过程中的占比较大,这使得铝合金节点板在冲压后往往会出现较为严重的回弹现象[2]. 回弹现象降低了板件成形精度,也给节点装配工作造成了不便. 为提高节点板的成形精度,加工时往往需要对节点板进行反复冲压和测量,从而显著增加了加工的时间与经济成本[3].

对回弹进行补偿是提高成形精度的有效手段,而准确的回弹预测则是进行回弹补偿的前提. 目前已有许多学者通过理论分析、试验研究和数值模拟的方法对金属板件的冲压回弹预测问题进行了深入研究. Yu 等[4]针对半球形模具冲压的圆形低碳钢薄板展开了试验研究和理论分析,推导了板件的冲压荷载与回弹后曲率半径的计算公式. Chou 等[2]通过数值分析对 U 形弯曲加工中常用的回弹补偿方法进行了评估,并建立了工艺参数优化程序. Xue 等[5-6]基于旋转壳薄膜理论与能量方法,推导了圆板与方板在单曲率和双曲率模具冲压下的回弹量的计算公式. Gomes 等[7]对各向异性高强钢板进行了冲压成形试验,并采用多种材料模型进行有限元分析,研究了不同材料模型在板件回弹预测上的差异,以及材料各向异性对于板件回弹特性的影响. 王鹏等[8]通过有限元模拟分析了 U 型件成形过程参数对于板件回弹量的影响,并运用 NSGA-Ⅱ算法对工艺参数进行了优化设计. 周驰等[9]基于能量法提出了一种回转体零件冲压回弹量的计算方法,并在此基础上提出了模具型面的补偿方法. 廖娟等[10]研究了高强度钢板在双向等曲率模具中的冲压成形回弹预测问题,基于塑性膜理论与 Khan-Huan 本构模型提出了具有较高精度的回弹量理论计算公式. 聂昕等[11]基于大规模数值模拟,构建了汽车梁类件回弹预测的深度神经网络模型,经验证,该模型具有较高的预测精度与较强的鲁棒性. 郭小农等[12-13]针对单一拱度的弧面铝合金节点板的冲压回弹行为,通过试验研究和数值模拟探究了弧面节点板的冲压回弹特性,并通过理论推导建立了回弹量的计算公式.

现有研究主要通过理论推导与数值分析两种方法对不同金属板件的冲压回弹预测问题进行研究. 但这两种方法在处理多拱度铝合金节点板的回弹预测问题上均存在一定限制. 理论推导方法只能处理较为简单的冲压回弹问题. 而多拱度铝合金节点板的几何形状较为复杂,难以通过理论推导建立板件回弹量的计算公式. 数值分析方法的适用范围较广,但其时间成本较高[14]. 在自由曲面铝合金单层网壳中,尺寸、拱度组合不同的节点板数量众多. 若对每

一种板件逐一进行数值分析,则会带来难以接受的时间成本.总而言之,解决多拱度铝合金节点板的冲压回弹预测问题,仍然需要寻找更为合适的方法.

响应面法最早由 Box 等[15]提出,它是一种用多项式函数近似表达结构响应与控制参数之间的数学关系的法[16].结构的响应面模型可以通过对一定数量的试验或数值模拟的结果进行回归获得.通过运用响应面模型,结构的响应可以由简单的数学运算得到,从而降低了结构分析与优化过程中所需要的时间与经济成本.目前响应面法已被广泛应用于结构可靠度分析[17-18]与结构优化[19-20]等方面的研究中.

本文对多拱度铝合金节点板的冲压回弹预测与补偿问题开展研究.首先,对6块多拱度铝合金节点板试件进行了冲压回弹试验,用三维扫描仪测量了板件的残余拱度,并计算得到板件的回弹量.其次,对板件的冲压回弹过程进行了精细的有限元分析,并将分析结果与试验结果进行了对比.再次,通过进行大量的有限元分析,建立了响应面回归的数据集.采用二次多项式模型对数据集进行回归,获得了节点板冲压回弹预测的响应面模型.最后,基于该响应面模型,提出了多拱度铝合金节点板冲压回弹补偿方法,并用若干数值算例对该方法进行了验证.

1 多拱度铝合金节点板冲压成形试验

1.1 试验试件

在自由曲面铝合金单层网壳中,节点通常与6根构件相连.如图1所示,节点板的形状可以由板件边缘的6个控制点处的拱度确定.对6块多拱度铝合金节点板试件进行了冲压成形试验,试件的材料牌号均为6061-T6.图1(b)中,C_{Si}、C_{Ri}与S_{Ei}分别为控制点i处的冲压拱度、残余拱度和回弹量.试件的几何参数如表1所示,其中,r为节点板半径,t为节点板厚度,d_b为节点板螺栓孔直径,C_{S1}~C_{S6}分别为控制点1~6处的冲压拱度.

1.2 材性试验

为了确定试件的材料参数,根据规范《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)[21],对如图2所示的3组材性试件进行了拉伸试验.试验结果显示,材性试件的平均弹性模量为70 940 MPa,平均屈服强度为256.8 MPa,平均极限抗拉强度为313.4 MPa.

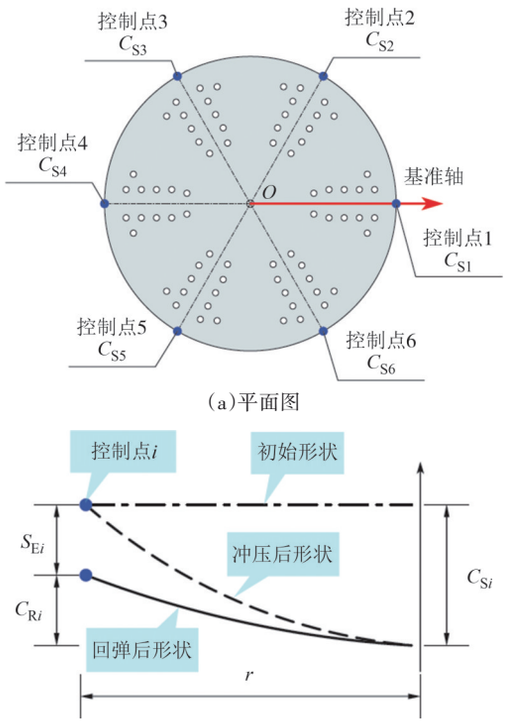


图1 节点板拱度示意图

Fig.1 Schematic diagram of joint plate camber

表1 试件几何尺寸

Tab.1 Dimensions of the specimens mm

试件	r	t	d_b	C_{S1}	C_{S2}	C_{S3}	C_{S4}	C_{S5}	C_{S6}
P-1	230	16	10.5	20.82	27.32	27.32	20.82	27.32	27.32
P-2	240	16	10.5	17.97	17.97	14.38	17.97	17.97	14.38
P-3	240	16	10.5	17.97	23.92	17.97	17.97	23.92	17.97
P-4	255	16	10.5	20.28	32.34	20.28	20.28	32.34	20.28
P-5	255	16	10.5	20.28	20.28	32.34	20.28	20.28	32.34
P-6	267	16	10.5	23.70	23.70	19.77	23.70	23.70	19.77

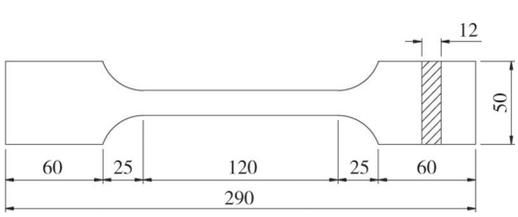


图2 材性试件尺寸(单位:mm)

Fig.2 Dimensions of the tensile test specimens(unit: mm)

1.3 冲压成形设备与流程

铝合金节点板的冲压成形设备如图3所示,该设备由上下模具和液压千斤顶组成.由于多拱度铝合金节点板在各控制点处的拱度各不相同,因此冲压设备采用了如图3(b)(c)所示的分块模具.各分块模具的表面均为球扇形面,其圆心角均为60°,曲率半径为500~2 000 mm不等.

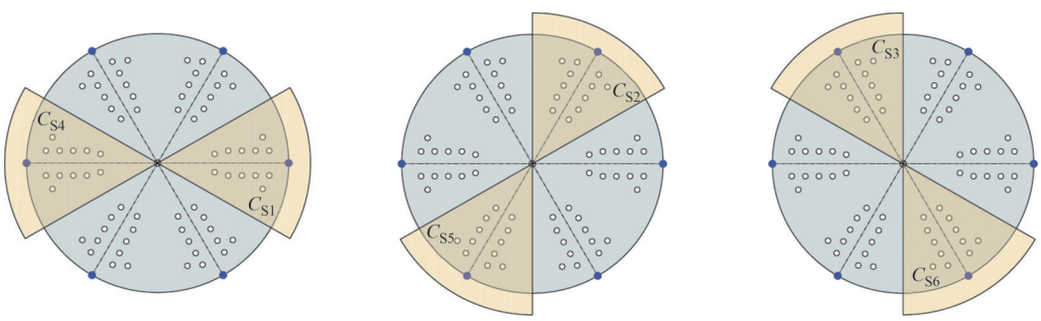


(a)装配图　　(b)上模具　　(c)下模具

图 3　节点板冲压设备

Fig.3　The forming equipment of the joint plates

多拱度铝合金节点板的冲压过程分为 3 个步骤,在各步骤中,节点板相对的两个扇区受到冲压(如图 4 所示).在每个冲压步骤中,冲压机的下模具固定不动,上模具向下运动并与板件接触,板件在模具的作用下发生变形.在达到预定的冲压拱度后,上模具向上运动,回到初始位置.与此同时,节点板发生回弹.在板件的 6 个扇区都受到冲压后,冲压过程结束.



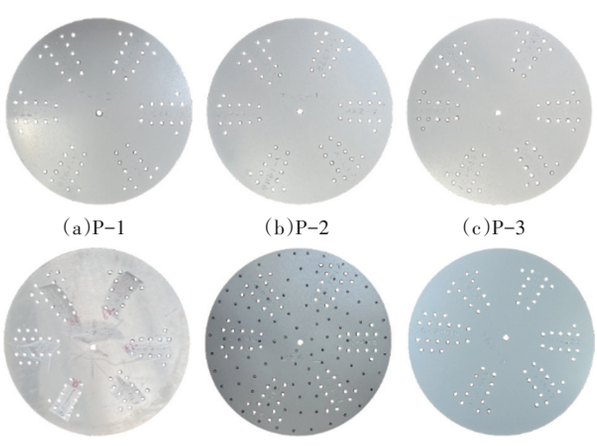
(a)第 1 次冲压区域　　(b)第 2 次冲压区域　　(c)第 3 次冲压区域

图 4　节点板冲压过程示意图

Fig.4　Stamping forming process schematic diagram

1.4　试验结果

图 5 为各试件完成冲压后的照片.为了确定节点板的残余拱度与回弹量,使用如图 6 所示的 3D 扫描仪对各试件进行扫描.在 Geomagic Studio 12 和 Rhino Grasshopper 软件中对扫描得到的点云文件进行处理,得到了如图 7 所示的板件残余拱度云图.



(a)P-1　(b)P-2　(c)P-3

(d)P-4　(e)P-5　(f)P-6

图 5　冲压完成后的试件

Fig.5　Specimens after stamping



图 6　三维扫描仪

Fig.6　3D scanner

6 组试件在各控制点处的残余拱度和回弹量如表 2 所示.由表 2 可以看出,控制点 i 处的残余拱度不仅与该处的冲压拱度相关,还与所有控制点处的拱度组合相关.以试件 P-2 与 P-3 为例,两块板件在控制点 1 处的冲压拱度均为 17.97 mm,但由于两块板件的拱度组合不同,两块试件在控制点 1 处的残余拱度也不相同.这反映了多拱度铝合金节点板冲压回弹过程的复杂性.

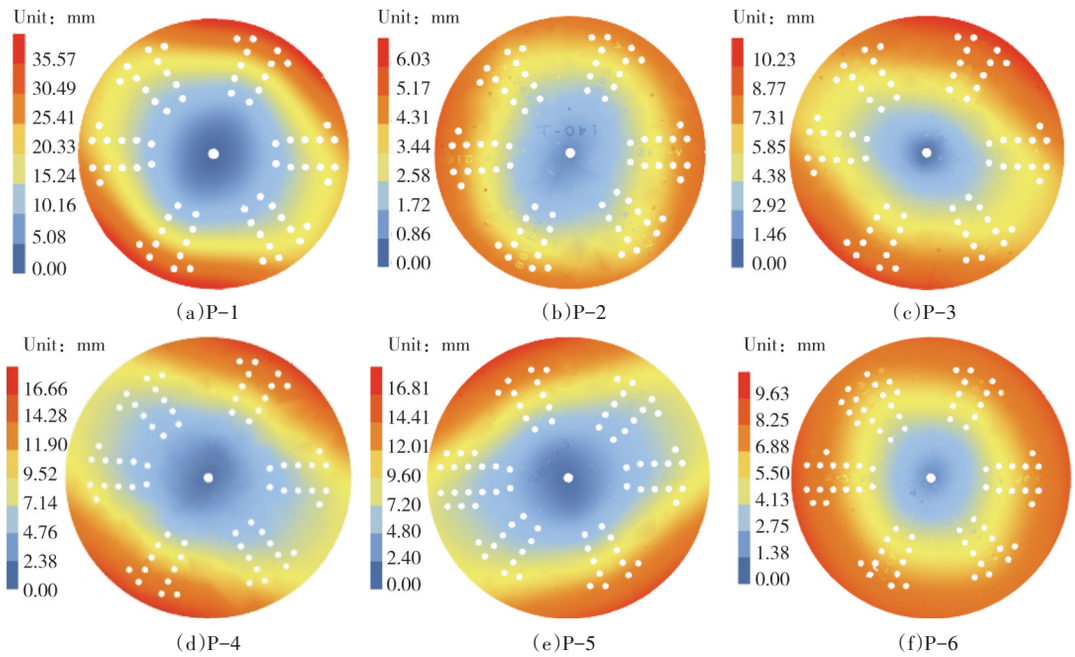


图 7 残余拱度云图

Fig.7 Contour of the residual cambers

表 2 试验结果汇总

Tab.2 Experiment results

试件	i	C_{S_i}/mm	C_{R_i}/mm	S_{E_i}/mm	试件	i	C_{S_i}/mm	C_{R_i}/mm	S_{E_i}/mm
P-1	1	20.82	10.27	10.55	P-4	1	20.28	7.95	12.33
	2	27.32	14.35	12.97		2	32.34	14.51	17.83
	3	27.32	14.73	12.59		3	20.28	7.25	13.02
	4	20.82	10.43	10.39		4	20.28	7.89	12.39
	5	27.32	14.12	13.20		5	32.34	14.43	17.91
	6	27.32	14.79	12.53		6	20.28	8.26	12.02
P-2	1	17.97	4.23	13.74	P-5	1	20.28	7.90	12.37
	2	17.97	3.91	14.06		2	20.28	7.64	12.64
	3	14.38	3.60	10.78		3	32.34	14.98	17.36
	4	17.97	4.43	13.53		4	20.28	7.38	12.90
	5	17.97	3.98	13.98		5	20.28	8.06	12.22
	6	14.38	3.37	11.01		6	32.34	14.17	18.17
P-3	1	17.97	6.26	11.70	P-6	1	23.70	6.98	16.72
	2	23.92	9.28	14.64		2	23.70	6.99	16.71
	3	17.97	6.33	11.63		3	19.77	5.84	13.93
	4	17.97	5.95	12.02		4	23.70	7.25	16.45
	5	23.92	8.82	15.10		5	23.70	6.93	16.77
	6	17.97	6.34	11.62		6	19.77	6.01	13.76

2 有限元分析

2.1 有限元模型的建立

在 Abaqus CAE 2020 软件中建立了 6 组多拱度铝合金节点板的有限元模型. 模型中铝合金节点板、上模具和下模具的几何尺寸与试验完全相同. 在有限元模型中,采用 Ramberg-Osgood 模型[22]描述铝合金材料的本构关系. 根据拉伸试验结果,将材料参数确定为 E=70 940 MPa, $f_{0.2}$=256.8 MPa. 同时按照 SteinHardt 建议[23]得到硬化指数 n=25.68. 基于这些参数,得到了铝合金材料的名义应力应变关系,并将

其转化为如图 8 所示的真实应力-应变关系在有限元模型中使用.

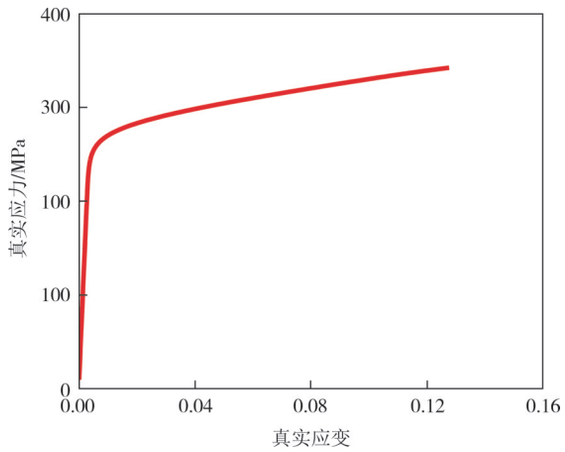


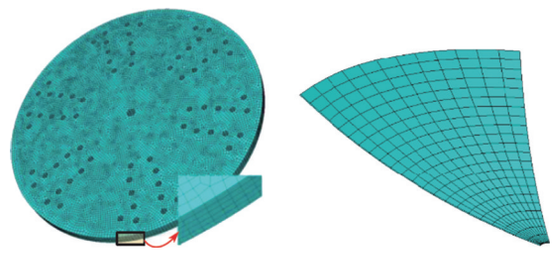
图 8　真实应力-应变关系

Fig.8　True constitutive relationship

铝合金节点板的成形过程包括冲压阶段与回弹阶段. 冲压阶段存在较为复杂的接触关系,且板件会发生较为显著的塑性变形,因此,冲压阶段的分析收敛难度较大. 显式动力算法能够有效处理具有复杂接触与大变形的分析问题,且能够保证分析过程的收敛性. 因此,采用显式动力算法进行冲压阶段的分析. 在回弹阶段,板件与上模具分离并发生回弹. 这一过程较为简单且不存在收敛困难的问题,因此采用隐式静力算法对板件的回弹阶段进行分析.

铝合金板件是有限元分析的重点,因此板件的单元类型为 C3D8R 实体单元. 经试算,板件的单元尺寸被确定为 5 mm×5 mm,同时沿厚度方向划分 5 层网格. 网格划分技术为扫掠技术. 铝合金板件的网格划分结果如图 9(a)所示. 上模具与下模具的作用是与板件接触,并使板件发生变形. 在建立有限元模型时,将上下模具简化为球扇形面. 上下模具的单元类型为 S4R 单元,网格尺寸稍大于板件的网格尺寸,取为 8 mm×8 mm,网格划分技术为扫掠技术. 由于模具的弹性模量远高于板件,为提高计算效率,上下模具在进行分析时被简化为了离散刚体. 上下模具的网格如图 9(b)所示.

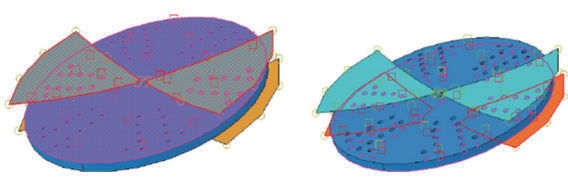
在冲压阶段,板件与模具之间存在着接触关系. 在有限元模型中建立了二者之间的接触关系如图 10 所示. 由于模具的刚度远大于板件的刚度,因此将模具的表面选为主表面,而将板件的表面选为从表面. 接触关系的法向行为定义为硬接触,切向行为确定为罚方法,摩擦系数确定为 0.1.



(a)节点板　　(b)模具

图 9　有限元模型网格划分

Fig.9　Mesh generation of the finite element model

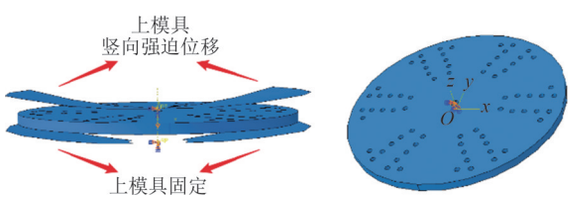


(a)板件与上模具　　(b)板件与下模具

图 10　板件与模具之间的接触关系

Fig.10　The contact between the plate and the dies

为了准确地模拟铝合金板件的成形过程,有限元模型中的加载过程与试验完全一致,即进行 3 次冲压分析,每次冲压分析后进行一次回弹分析. 冲压阶段的边界条件如图 11(a)所示. 对下模具施加完全固定边界条件. 对上模具施加向下的强制位移,加载速度与实际情况相同,取为 0.1 m/s;上模具其他方向的位移幅值设为 0,以限制上模具的移动. 在回弹阶段,采用无模法进行分析,即忽略上下模具的作用,将回弹过程简化为板件的自由回弹. 将冲压阶段板件的应力状态与最终的形状作为回弹阶段板件的初始状态. 为了消除板件的刚体位移并尽可能保证板件的自由回弹,在板件中心孔的中性面位置的 4 个节点施加了完全固定约束. 回弹阶段板件的边界条件如图 11(b)所示.



(a)冲压阶段　　(b)回弹阶段

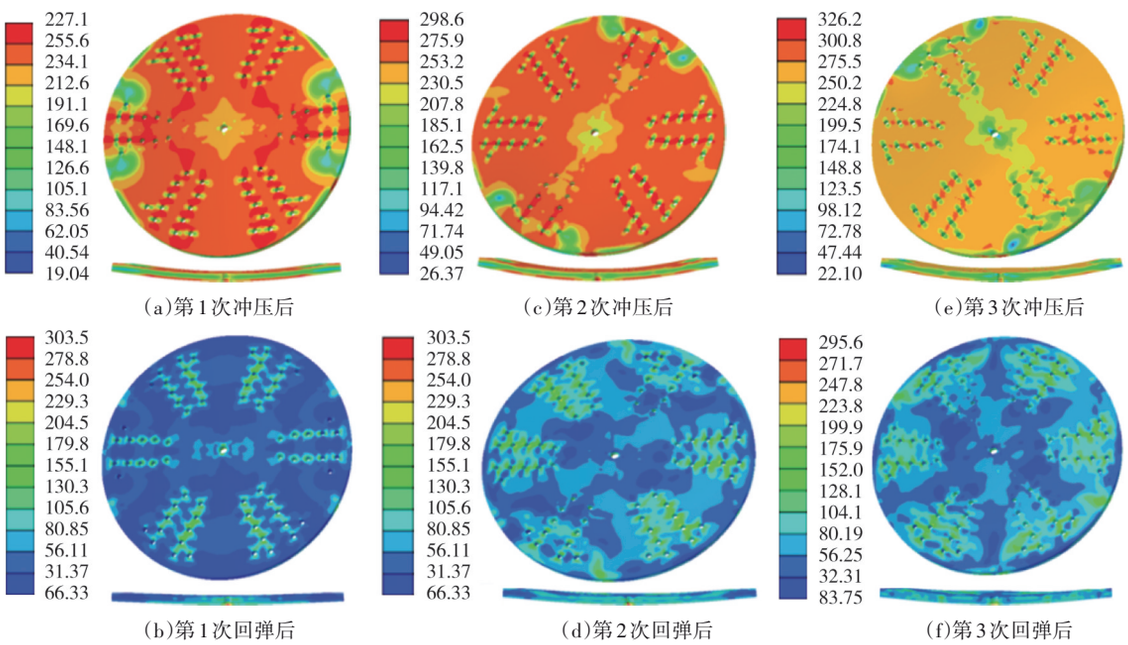
图 11　有限元模型边界条件

Fig.11　Boundary conditions in the finite element models

2.2　分析结果

各试件的分析结果具有一定的相似性,在此仅以试件 P-1 为例,展示有限元分析结果.

图 12 为试件 P-1 在历次冲压与回弹后的 Mises 应力云图. 由图 12 可以观察到,在各次冲压完成后,板件上下表面的大部分区域均进入了塑性状态,而板件中性层附近则仍处于弹性状态. 在发生回弹后,板件表面的应力大幅度减小,仅在中心孔以及板件和模具接触的位置存在较大的残余应力(如图 13 所示). 图 14 为板件 P-1 在历次冲压及回弹过程后的竖向变形云图. 可以看出,板件在冲压后发生较大变形,且其拱度与冲压拱度基本一致. 在回弹后,板件的变形减小,仅残留有一部分的拱度. 图 15 展示了板件 P-1 的 O-CP1~O-CP6 截面(CPi 为控制点 i)在历次冲压及回弹后的形状. 图中,d 表示数据点到板件中心的距离,δ 表示此处的竖向变形. 同时,曲线 STi 表示第 i 次冲压后的变形形状,曲线 SPi 表示第 i 次回弹后的变形形状. 由图 15 可以看出,板件的各冲压区域间存在着显著的相互影响. 以 O-CP1 截面为例,该截面位于第 1 次冲压的区域,但该截面的形状在第 2 次和第 3 次的冲压与回弹过程中也发生了显著的变化. 这也反映了多拱度铝合金节点板冲压回弹过程的复杂性.



(a)第 1 次冲压后 (c)第 2 次冲压后 (e)第 3 次冲压后

(b)第 1 次回弹后 (d)第 2 次回弹后 (f)第 3 次回弹后

图 12 P-1 试件 Mises 应力云图

Fig.12 Mises stress contour of specimen P-1

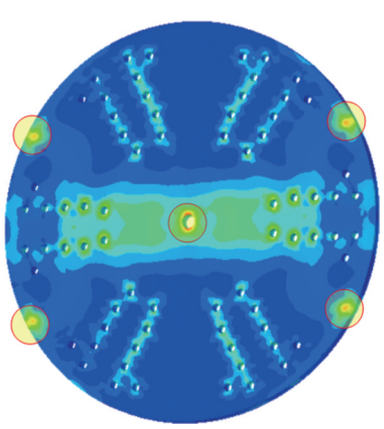


图 13 板件残余应力分布

Fig.13 Residual stress distribution of the plate

2.3 有限元模型的验证

为验证有限元模型的可靠性,将有限元分析的结果与试验结果进行对比,结果如表 3 所示. 表中,i 为控制点的序号,S_{Ei} 为试验中板件在控制点 i 处的回弹量,S_{FEi} 为有限元模型中板件在控制点处的回弹量,ΔS_i 为二者的差值,e_{ri} 为 S_{FEi} 对 S_{Ei} 的相对误差. 在表 3 中,有限元模型与试验的相对误差平均为 4.31%,最大值为 10.34%. 总体而言,误差位于可接受范围,可认为有限元模型具有较高的可靠性.

3 回弹预测响应面模型

尽管有限元分析可以准确地对多拱度铝合金节点板的冲压回弹量进行准确预测,但进行有限元分析需要消耗较长的时间,因此无法应用于实际的节点板设计过程. 为了实现快速的回弹预测,本文建立了多拱度铝合金节点板的回弹预测响应面模型. 响应面模型的建立包含 3 个步骤,即确定设计变量与响应面函数、进行试验设计、响应面拟合与回归结果评价.

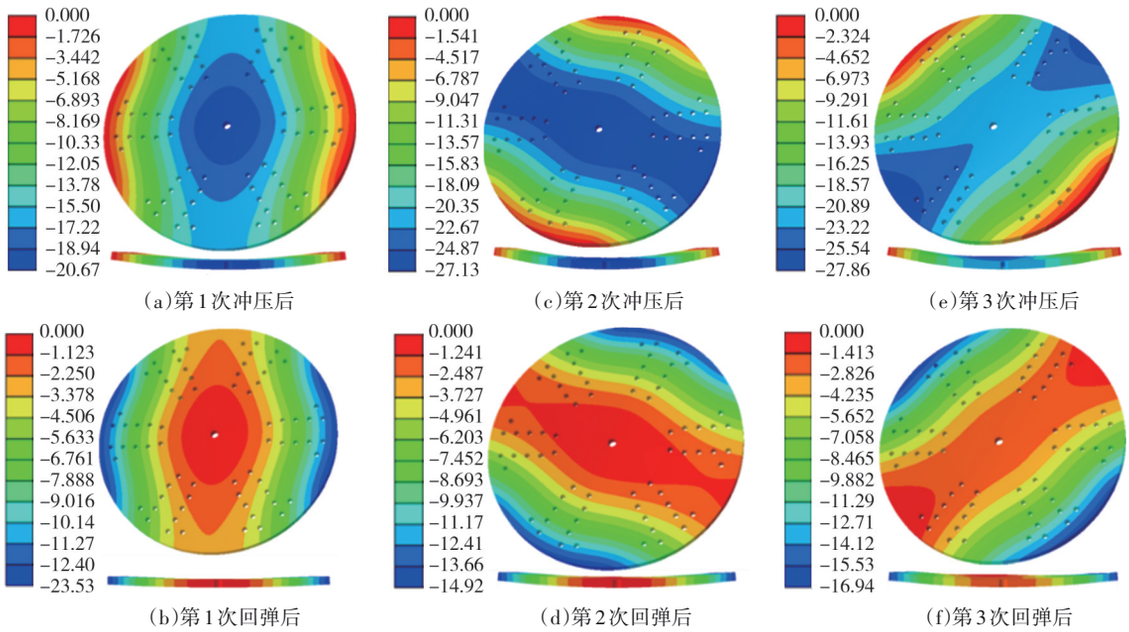


图 14　P−1 试件变形云图

Fig.14　Deformation contour of specimen P−1

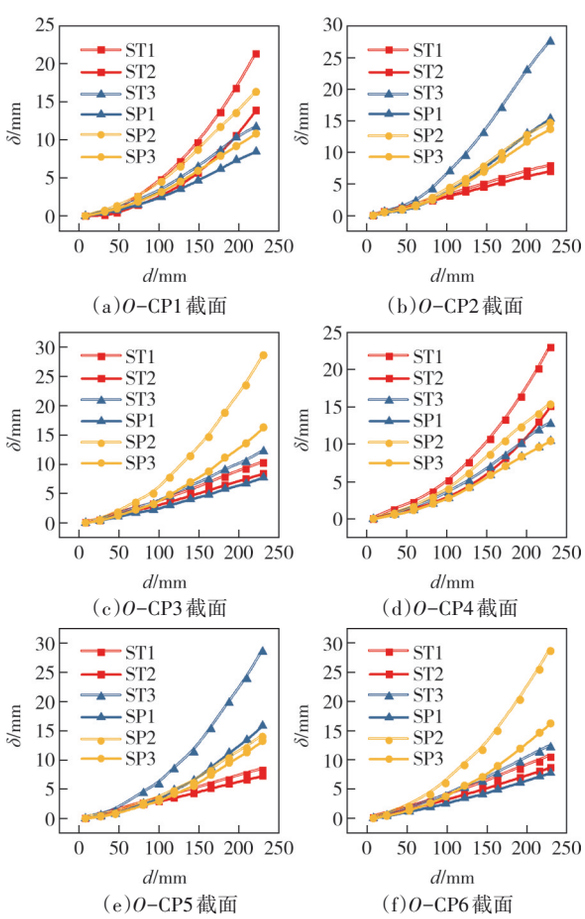


图 15　P−1 试件截面形状

Fig.15　Vertical shape of specimen P−1

3.1　设计变量与响应面函数的选择

影响多拱度铝合金节点板回弹量的几何参数包括板件半径 r、板件厚度 t、冲压拱度 C_{Si} 以及螺栓孔直径 d_b. 先前的研究表明,螺栓孔对板件回弹量的影响不超过 8%[11]. 为了减少设计变量的个数,本文仅将 r、t 和 C_{Si} 作为输入变量,而将 d_b 固定为 10.5 mm. 在实际的铝合金单层网壳中,节点板半径 r 通常在 210~270 mm 之间,板件的厚度 t 通常在 12~20 mm,冲压拱度 C_{Si} 则通常在 15~40 mm 之间. 以上参数的取值范围能够覆盖工程中常见的节点板的尺寸与冲压拱度.

一阶与二阶多项式是最为常用的响应面函数. 阶数更高的多项式由于计算上的困难往往很少使用[24]. 由于回弹预测问题具有一定的非线性,本文将二阶多项式作为响应面函数. 在回弹预测问题中,响应面函数可以表示为:

$$S_{Ei}=\beta_{i0}+\sum_{m=1}^{8}\beta_{im}x_m+\sum_{m=2}^{8}\sum_{n=1}^{m}\beta_{imn}x_m x_n+\sum_{m=1}^{8}\beta_{imm}x_m^2 \tag{1}$$

式中:S_{Ei} 为控制点 i(i=1,…,6)处的回弹量;x_m、x_n 和 x_m^2 代表响应面函数的输入变量,即 C_{S1}~C_{S6}、r 以及 t;β_{im}、β_{imn} 和 β_{imm} 均为待拟合参数.

3.2　试验设计

构造响应面模型,首先需要通过物理试验或数值模拟得到一定数量的样本数据,之后再对样本数据进行回归. 在进行物理试验或数值分析前,需要进行合理的试验设计. 常用的试验设计方法包括析因

表3 有限元分析与试验结果的对比

Tab.3 Comparison of finite element analysis and experiment results

试件	i	S_{Ei}/mm	S_{FEi}/mm	ΔS_i/mm	e_{ri}/%	试件	i	S_{Ei}/mm	S_{FEi}/mm	ΔS_i/mm	e_{ri}/%
P-1	1	10.55	10.47	−0.08	−0.74	P-4	1	12.33	13.42	1.09	8.87
	2	12.97	14.10	1.13	8.69		2	17.83	19.13	1.30	7.29
	3	12.59	13.01	0.42	3.34		3	13.02	12.55	−0.47	−3.60
	4	10.39	11.24	0.85	8.18		4	12.39	12.26	−0.13	−1.03
	5	13.20	14.57	1.37	10.34		5	17.91	18.10	0.19	1.09
	6	12.53	12.97	0.44	3.50		6	12.02	12.68	0.66	5.47
P-2	1	13.74	13.26	−0.48	−3.49	P-5	1	12.37	12.60	0.23	1.88
	2	14.06	13.75	−0.31	−2.20		2	12.64	12.83	0.19	1.53
	3	10.78	10.86	0.08	0.70		3	17.36	17.36	0.00	0.03
	4	13.53	13.17	−0.36	−2.67		4	12.90	12.51	−0.39	−2.99
	5	13.98	13.50	−0.48	−3.43		5	12.22	12.75	0.53	4.37
	6	11.01	10.69	−0.32	−2.87		6	18.17	17.44	−0.73	−4.01
P-3	1	11.70	11.95	0.25	2.12	P-6	1	16.72	17.43	0.71	4.25
	2	14.64	15.55	0.91	6.23		2	16.71	17.85	1.14	6.83
	3	11.63	12.17	0.54	4.61		3	13.93	14.98	1.05	7.52
	4	12.02	12.06	0.04	0.33		4	16.45	17.26	0.81	4.94
	5	15.10	15.76	0.66	4.39		5	16.77	17.80	1.03	6.16
	6	11.62	12.28	0.66	5.68		6	13.76	15.14	1.38	10.03

分析、中心复合设计和拉丁超立方采样等. 析因分析需要的样本规模较大,计算成本较高. 中心复合设计所需的样本数量相对较少,但无法有效地覆盖整个设计空间[16]. 拉丁超立方采样是一种分层采样方法,该方法能够用较少数量的样本覆盖整个设计空间,因而具有较高的效率[25]. 本文采用拉丁超立方采样进行试验设计. 使用拉丁超立方采样方法抽取n个k维样本的过程包含4个步骤:1)对于每一个维度,将其取值范围分为n个概率相等的区间;2)在n个区间内分别进行一次随机抽样;3)对于每一个维度的n个区间进行一次随机排列;4)根据随机排列的结果,将k个维度随机抽样的值进行组合,由此即可得到n个样本.

本文采用拉丁超立方采样方法抽取了1 500个样本,每个样本包含8个参数,即C_{S1}~C_{S6}、r和t,各参数的取值范围按照3.1节确定. 表4展示了抽取的部分样本. 平行坐标图是考察高维数据分布情况的常用手段. 为考察采集的样本的分布情况,确保采集的样本能够充分覆盖参数空间,绘制了所有样本的平行坐标图,如图16所示. 由图16可以看出,采集的样本对参数空间形成了较为有效的覆盖. 在完成抽样后,在Abaqus CAE中进行参数化建模与分析,获得了节点板的回弹值. 将抽样结果与分析结果进行汇总,形成了响应面回归的数据集.

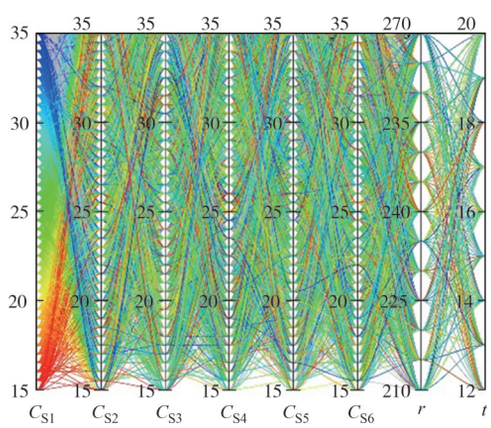


图16 1 500组样本的平行坐标图

Fig.16 Parallel coordinate plot of the 1 500 samples

表4 拉丁超立方采样结果

Tab.4 The result of Latin hypercube sampling

序号	C_{S1}	C_{S2}	C_{S3}	C_{S4}	C_{S5}	C_{S6}	r	t
1	33.0	25.0	33.5	16.0	23.5	23.5	220	15
2	18.0	29.0	38.5	30.5	27.0	32.5	255	13
3	28.5	32.5	20.0	28.0	23.5	19.5	255	19
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1 499	38.0	33.0	24.0	38.5	37.0	23.0	230	17
1 500	31.5	33.5	25.5	30.0	28.5	16.5	265	20

3.3 响应面拟合与回归

从1 500组样本中选取1 300组进行响应面的回归,剩余的200组样本则用于交叉验证. 在进行响应面的回归之前,对样本数据按式(2)进行归一化

处理:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{2}$$

式中:x'为参数归一化后的值,x为参数的原始值,$x_{\min}$与$x_{\max}$则分别为参数取值范围的下界与上界. 参数C_{Si}、r和t的取值范围已在3.1节说明. 回弹量为大于0且小于冲压拱度的参数,此处人为地将该参数的下界和上界分别取为0和40 mm.

最小二乘法是最为常用的响应面回归方法. 在Matlab软件中采用迭代最小二乘法对响应面进行回归,得到了式(1)中的各待拟合参数的拟合值. 表5展示了控制点1回弹预测响应面模型参数的拟合值,其余控制点的参数与之类似,篇幅所限,此处不再展示.

表5　控制点1响应面模型参数拟合

Tab.5　Fitting values of the response surface model at control point 1　　**×10⁻³**

参数	拟合值	参数	拟合值	参数	拟合值
β_{10}	307.93	β_{117}	40.03	β_{144}	−16.50
β_{11}	446.64	β_{118}	−30.76	β_{145}	13.40
β_{12}	−45.11	β_{122}	77.63	β_{146}	−2.68
β_{13}	−8.10	β_{123}	−19.91	β_{147}	13.09
β_{14}	8.26	β_{124}	33.52	β_{148}	−25.21
β_{15}	−75.24	β_{125}	−5.87	β_{155}	24.27
β_{16}	−126.60	β_{126}	48.31	β_{156}	54.55
β_{17}	91.96	β_{127}	−59.41	β_{157}	20.56
β_{18}	−166.15	β_{128}	25.97	β_{158}	−14.69
β_{111}	−74.41	β_{133}	40.10	β_{166}	52.43
β_{112}	37.44	β_{134}	47.59	β_{167}	−40.28
β_{113}	47.52	β_{135}	−26.38	β_{168}	−26.82
β_{114}	−130.82	β_{136}	−3.87	β_{177}	25.23
β_{115}	−27.56	β_{137}	−15.24	β_{178}	−22.31
β_{116}	68.53	β_{138}	6.50	β_{188}	93.17

在完成了响应面的回归后,还需要对回归结果进行评价. 决定系数R^2是最为常用的评价指标,可按照式(3)进行计算:

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \hat{y}_i\right)^2 / \sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2 \tag{3}$$

式中:y_i、$\hat{y}_i$和$\bar{y}$分别表示变量y的真实值、预测值和平均值. 决定系数R^2的取值范围为[0, 1],模型回归效果越好,R^2的值越接近于1. 均方根误差是评价回归效果的另一个指标,反映预测值与真实值的偏差程度,可按照式(4)进行计算:

$$E_{\mathrm{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \hat{y}_i\right)^2}{n}} \tag{4}$$

均方根误差反映了回归模型预测误差的绝对水平,而平均相对误差则可以反映预测误差的相对水平. 平均相对误差的计算公式如式(5):

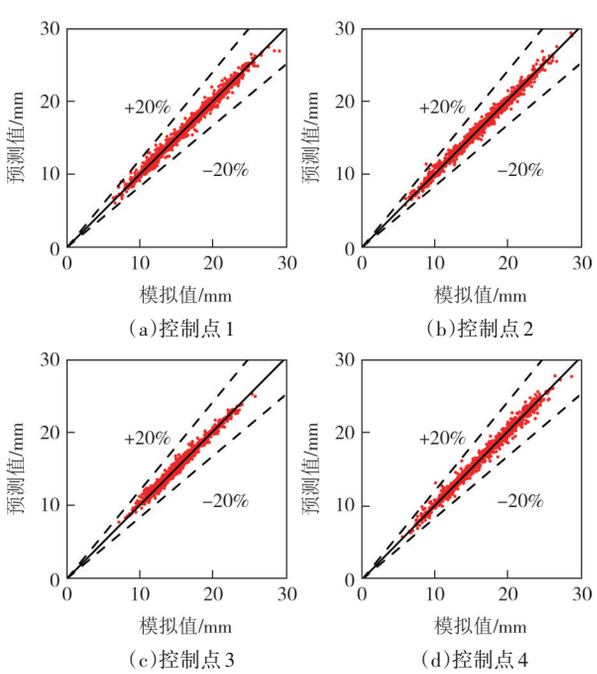
$$E_{\mathrm{MRE}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| \tag{5}$$

计算响应面模型在训练集上的决定系数、均方误差与平均相对误差,结果如表6所示. 由表6可以看出,响应面模型在各控制点处的决定系数均超过0.988,均方误差均未超过0.7,平均相对误差均小于3%. 图17对比了响应面模型的预测值与模拟值. 由图17可以看出,数据点聚集在直线$y=x$附近,且大多数点位于±20%的误差范围内. 表6与图17的结果表明响应面模型具有较好的回归效果.

表6　响应面模型评价指标(训练集)

Tab.6　Evaluation indicators of the response surface models (training set)

控制点	R^2	E_{RMSE}	E_{MRE}/%
1	0.995 6	0.682 4	2.43
2	0.997 1	0.503 7	2.35
3	0.988 3	0.420 6	2.10
4	0.988 5	0.538 3	2.37
5	0.988 4	0.537 0	2.60
6	0.993 7	0.418 8	2.91



(a)控制点1　(b)控制点2

(c)控制点3　(d)控制点4

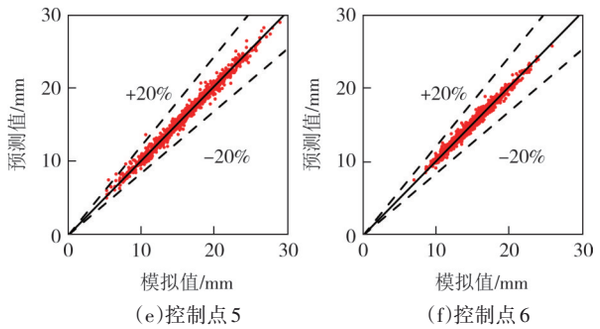


图 17 响应面模型预测值与模拟值的对比(训练集)

Fig.17 Comparison of the predicted values of the response surface model and the simulated values (training set)

为了全面地评价响应面模型的预测效果,还需要对其在测试集上的预测精度进行考察.使用响应面模型对测试集样本的回弹量进行预测.计算预测结果的均方误差与平均相对误差,结果如表7所示.表中,响应面模型在各控制点处的均方误差均未超过0.6,平均相对误差均未超过3%.图18对比了模型在测试集上的预测值和模拟值,图中,数据点同样集中在直线 $y=x$ 附近,并且所有数据点均位于±20%的误差范围内.这说明响应面模型在测试集上同样具有较高的精度.

表7 响应面模型评价指标(测试集)

Tab.7 Evaluation indicators of the response surface models (test set)

控制点	E_{RMSE}	E_{MRE}/%
1	0.577 6	2.41
2	0.595 6	2.63
3	0.403 1	2.00
4	0.556 9	2.51
5	0.573 1	2.79
6	0.502 9	2.48

4 回弹补偿方法

4.1 方法描述

基于多拱度铝合金节点板的回弹预测响应面模型,可对冲压拱度进行调整,使节点板的残余拱度与预期的设计拱度相同.设铝合金节点板的半径为 r;厚度为 t;节点板在控制点 i 处的设计拱度为 $C_{\mathrm{D}i}$,实际的冲压拱度为 $C_{\mathrm{S}i}$,回弹量为 $S_{\mathrm{E}i}$,回弹后的残余拱度为 $C_{\mathrm{R}i}$,则回弹补偿问题即是要选择合适的冲压拱度 $C_{\mathrm{S}i}$,使残余拱度与设计拱度相同,即:

$$C_{\mathrm{D}i}=C_{\mathrm{R}i} \tag{6}$$

同时,残余拱度可以表示为冲压拱度与回弹量的差值:

$$C_{\mathrm{R}i}=C_{\mathrm{S}i}-S_{\mathrm{E}i} \tag{7}$$

基于回弹预测响应面模型,板件的回弹值可以表示为:

$$S_{\mathrm{E}i}=f_i\left(C_{\mathrm{S}1},C_{\mathrm{S}2},C_{\mathrm{S}3},C_{\mathrm{S}4},C_{\mathrm{S}5},C_{\mathrm{S}6},r,t\right) \tag{8}$$

式中:f_i 为前面求解得到的响应面模型.联立式(6)~式(8)得到:

$$C_{\mathrm{S}i}-C_{\mathrm{D}i}-f_i(C_{\mathrm{S}1},C_{\mathrm{S}2},C_{\mathrm{S}3},C_{\mathrm{S}4},C_{\mathrm{S}5},C_{\mathrm{S}6},r,t)=0\quad(i=1,\cdots,6) \tag{9}$$

式中:$C_{\mathrm{D}i}$、r 和 t 均已知,$C_{\mathrm{S}i}$ 为待求解的变量.式(9)是有6个方程与6个未知数的非线性方程组,求解该方程组即可得到考虑回弹补偿的冲压拱度.

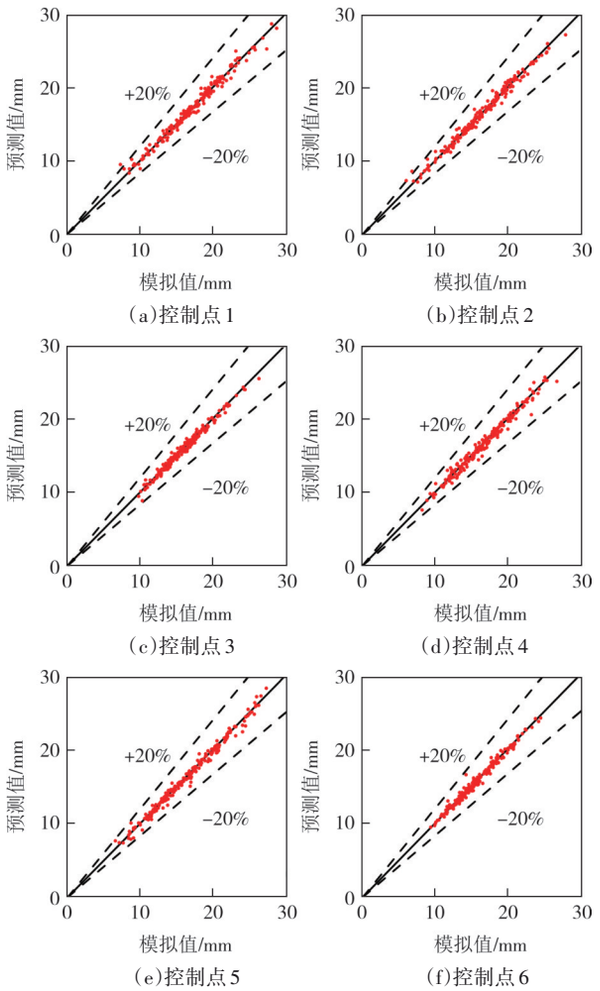


图 18 响应面模型预测值与模拟值的对比(测试集)

Fig.18 Comparison of the predicted values of the response surface model and the simulated values (test set)

4.2 算例验证

为了验证拱度补偿方法的有效性,对20组具有不同尺寸和拱度组合的多拱度铝合金节点板进行了试设计.根据各组板件的尺寸参数与设计拱度,在

Matlab 中建立了如式(9)所示的非线性方程组并进行求解,得到了考虑拱度补偿的冲压拱度. 基于计算得到的冲压拱度,建立了有限元模型并进行分析,得到了板件残余拱度的模拟值. 将板件的残余拱度与设计拱度进行对比,结果如图 19 所示. 图中,数据点集中于直线 $y=x$ 附近. 同时,残余拱度与设计拱度之间的相对误差平均值仅有 1.58%,最大值仅有 10.89%,表明二者较为接近. 这说明本文提出的方法能够有效地对板件的回弹进行补偿,从而提高多拱度铝合金节点板的成形精度.

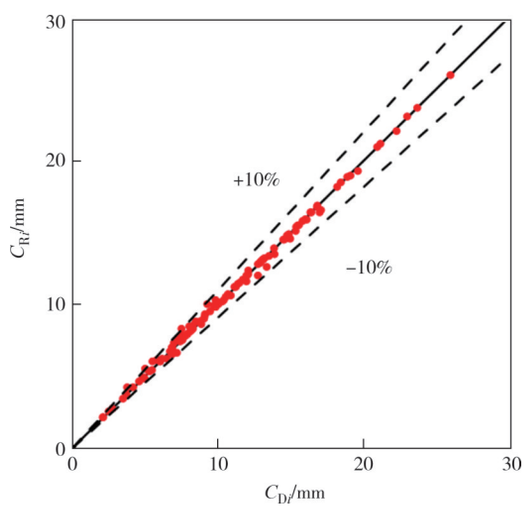


图 19　残余拱度与设计拱度的对比

Fig.19　Comparison of residual cambers and design cambers

5　结 论

本文通过试验与数值模拟方法对多拱度铝合金节点板的冲压回弹特性进行了研究,基于大量数值模拟结果建立了板件回弹预测的响应面模型,并以此为基础提出了有效的回弹补偿方法. 本文主要结论如下:

1)对 6 块多拱度铝合金节点板进行了冲压成形试验,使用 3D 扫描仪确定了板件的残余拱度,并计算得到板件的回弹量. 试验结果表明节点板在某控制点处的回弹量不仅与该处的冲压拱度相关,还受到所有控制点的拱度组合的影响.

2)采用显式动力算法与隐式静力算法结合的混合算法对多拱度铝合金节点板的冲压及回弹过程进行了有限元分析. 将有限元分析的结果与试验结果将进行对比,二者的相对误差平均值仅为 4.31%,最大值仅为 10.34%. 这表明了有限元模型的可靠性.

3)通过进行大规模的数值分析,建立了响应面回归的数据集. 采用最小二乘法对数据集进行回归,建立了多拱度铝合金节点板的回弹预测响应面模型. 该预测模型在训练集上的决定系数均超过 0.988,在训练集和测试集上的均方误差均不超过 0.70,平均相对误差均不超过 3%. 这表明预测模型具有较高的精度.

4)基于回弹预测的响应面模型,提出了多拱度铝合金节点板的冲压回弹补偿方法. 将该方法用于 20 组多拱度铝合金节点板的试设计,结果表明,按照该方法计算得到的冲压拱度对节点板进行冲压,可使板件的残余拱度与预期拱度较为接近,这表明了该回弹补偿方法的有效性.

5)由于 6061-T6 是铝合金节点板中最为常见的材料牌号,因此本文的研究主要集中于材料牌号为 6061-T6 的铝合金节点板. 在对其他材料牌号的节点板进行回弹预测与补偿时,应当对响应面模型进行重新拟合.

本文的研究对多拱度铝合金节点板的冲压回弹行为进行了深入研究,建立的回弹预测响应面模型可对板件的回弹量进行快速预测,提出的回弹补偿方法能够对板件的冲压回弹进行有效补偿. 为提高多拱度铝合金节点板的成形精度与生产效率提供参考.

参考文献

[1]　刘健, 周家伟, 汪儒灏, 等. 考虑板式节点刚度的大跨度铝合金单层网壳稳定承载力[J]. 建筑结构学报,2022,43(增刊1):10-19.
LIU J, ZHOU J W, WANG R H, et al. Stability bearing capacity of long-span aluminum alloy single-layer reticulated shells accounting for rigidity of gusset joints[J]. Journal of Building Structures,2022,43(Sup.1): 10-19.(in Chinese)

[2]　CHOU I N, HUNG C. Finite element analysis and optimization on springback reduction[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(3): 517-536.

[3]　MEINDERS T, BURCHITZ I A, BONTE M H A, et al. Numerical product design: springback prediction, compensation and optimization [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(5): 499-514.

[4]　YU T X, JOHNSON W, STRONGE W J. Stamping and springback of circular plates deformed in hemispherical dies[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1984, 26(2): 131-148.

[5]　XUE P, YU T X, CHU E. An energy approach for predicting springback of metal sheets after double-curvature forming, Part Ⅰ: axisymmetric stamping [J]. International Journal of

Mechanical Sciences, 2001, 43(8): 1893-1914.

[6] XUE P, YU T X, CHU E. An energy approach for predicting springback of metal sheets after double-curvature forming, Part Ⅱ: Unequal double-curvature forming [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(8): 1915-1924.

[7] GOMES C, ONIPEDE O, LOVELL M. Investigation of springback in high strength anisotropic steels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159(1): 91-98.

[8] 王鹏, 董湘怀. U型件冲压成形回弹过程的数值模拟及参数优化[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(10): 1590-1593.
WANG P, DONG X H. The numerical simulation of U-channel springback and optimization of forming parameters[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2007, 41(10): 1590-1593. (in Chinese)

[9] 周驰, 刘强, 阮锋. 一种基于能量法的冲压回弹预测补偿算法[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(2): 131-135.
ZHOU C, LIU Q, RUAN F. An energy approach for stamping springback prediction and compensation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(2): 131-135. (in Chinese)

[10] 廖娟, 周驰, 阮锋. 高强度钢板在双向等曲率模中的成形回弹研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(6): 1629-1635.
LIAO J, ZHOU C, RUAN F. Study on springback of high strength steels deformed in equal doubly-curved die[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(6): 1629-1635. (in Chinese)

[11] 聂昕, 谭天, 申丹凤. 基于深度学习的汽车梁类件冲压回弹研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(7): 838-846.
NIE X, TAN T, SHEN D F. Research on stamping springback of automobile beam parts based on deep learning [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(7): 838-846. (in Chinese)

[12] 郭小农, 保文通, 曾强, 等. 铝合金弧面节点板冲压成形回弹特性研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(10): 1433-1441.
GUO X N, BAO W T, ZENG Q, et al. Springback characteristics of arched aluminum alloy gusset plate in stamping forming[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(10): 1433-1441. (in Chinese)

[13] GUO X N, XU H, ZENG Q, et al. Springback characteristics of arched aluminum alloy gusset plate after stamping forming[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 159: 107294.

[14] FIRAT M, KARADENIZ E, YENICE M, et al. Improving the accuracy of stamping analyses including springback deformations [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(2): 332-337.

[15] BOX G E P, WILSON K B. On the experimental attainment of optimum conditions[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology, 1951, 13(1): 1-38.

[16] KHURI A I, MUKHOPADHYAY S. Response surface methodology[J]. WIREs Computational Statistics, 2010, 2(2): 128-149.

[17] 张国, 刘宇琛, 张笑闻, 等. 基于响应面法的复合材料气瓶含缺陷内胆屈曲可靠性分析[J]. 计算力学学报, 2023, 40(2): 175-180.
ZHANG G, LIU Y C, ZHANG X W, et al. Buckling reliability analysis of liner with initial defects on composite overwrapped pressure vessel based on response surface method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2023, 40(2): 175-180. (in Chinese)

[18] 尹平保, 王杰, 张建仁, 等. 基于随机响应面法的斜坡基桩水平承载可靠性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(7): 75-82.
YIN P B, WANG J, ZHANG J R, et al. Reliability analysis on horizontal bearing of pile foundation in sloping ground based on random response surface method[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(7): 75-82. (in Chinese)

[19] 王英鹏, 徐义华, 孙海俊, 等. 基于响应面法的火箭发动机喷管型面优化设计[J]. 航空动力学报, 2022, 37(1): 214-224.
WANG Y P, XU Y H, SUN H J, et al. Optimization design for nozzle contour of rocket engine based on response surface method [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(1): 214-224. (in Chinese)

[20] 刘超, 方宗德. 复杂机械装配体的响应面优化设计方法[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(9): 28-36.
LIU C, FANG Z D. Response surface method for complex mechanical assembly [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(9): 28-36. (in Chinese)

[21] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[22] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress-strain curves by three parameters[J]. National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note, 1943.

[23] STEINHARDT O. Aluminum constructions in civil engineering [J]. Aluminum, 1971, 47: 131-139.

[24] ZHENG Y, DAS P K. Improved response surface method and its application to stiffened plate reliability analysis[J]. Engineering Structures, 2000, 22(5): 544-551.

[25] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code[J]. Technometrics, 2000, 42(1): 55-61.