

工艺优化设计

不锈钢/铝/不锈钢复合板拉深工艺及有限元数值模拟

夏琴香¹, 熊盛勇¹, 潘兴毅², 方铭², 陈丕立²

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641; 2. 广东凌丰集团股份有限公司, 广东 云浮 527400)

摘要: **目的** 研究各工艺参数对复合板拉深成形工艺的影响,以指导实际生产。**方法** 以不锈钢/铝/不锈钢三层复合板为研究对象,探究了复合板拉深工艺数值模拟的关键技术;结合有限元数值模拟和试验验证,预测了复合板在拉深成形中的缺陷,研究了凹模圆角半径、凸凹模间隙、压边力、拉深速度对最大减薄率的影响规律,并利用正交试验对这4种工艺参数进行了优化。**结果** 有限元模拟中,分层复合板模型比整体模型准确度高。最大减薄率随凹模圆角半径的增大而减小,随着凸凹模间隙的增大而先减小后增大,随拉深速度的增大而增大,随着压边力的增大而增大。各成形工艺参数影响最大减薄率的主次顺序是:凹模圆角半径>压边力>模具间隙>拉深速度。**结论** 有利于减小最大减薄率的工艺参数优化组合为:凹模圆角半径为21 mm,模具间隙为3.2 mm,压边力为50 kN,拉深速度为10 mm/s。

关键词: 复合板; 拉深成形; 工艺参数; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.02.008

中图分类号: TG386.41

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2016)02-0037-06

Deep-drawing Process and Finite Element Numerical Simulation for Stainless Steel/Aluminum/Stainless Steel Composite Sheet

XIA Qin-xiang¹, XIONG Sheng-yong¹, PAN Xing-yi², FANG Ming², CHEN Pi-li²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Guangzhou LINK FAIR group Co., Ltd., Yunfu 527400, China)

ABSTRACT: In order to research the effect of process parameters on the forming process of composite plate and give a guidance on the practical production, the three layers composite sheet, stainless steel / aluminum / stainless steel, was taken as the research object. The key techniques of the numerical simulation aimed at its deep-drawing process were studied at first. Combined with numerical simulation and experiments, the defects of composite sheet in the deep-drawing were forecasted, and the effects of die radius, die gap, deep-drawing speed and blank holder force on the process results were researched. The process parameters were optimized by the orthogonal test. The results show that the composite model is more accurate than the whole model. The maximum thinning rate rate decreases with the increase of the die radius, firstly decreases and then increases with the increase of die gap, increases with the increase of the deep-drawing speed and the blank holder forces. The influence sequence of the maximum thinning rate was obtained: the radius of die > the blank hold force > the die gap > the deep-drawing speed. The optimized parameters as follows: the die radius is 21 mm, the die gap is 3.2 mm, the blank holder force is 50 kN, the deep-drawing speed is 10 mm/s.

KEY WORDS: composite sheet; deep-drawing process; process parameter; numerical simulation

收稿日期: 2016-01-04

作者简介: 夏琴香(1964—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为塑性加工及模具计算机技术。

金属复合板结合了组元金属的不同性能,具有良好的综合性能。随着科学技术的不断发展,广泛应用于餐厨具、航天航空等行业^[1-6]。复合板在生产中特别是拉深工艺中,由于缺乏理论和经验指导,会面临着一些成形缺陷问题,如单层破裂、整层破裂、起皱等。复合板拉深成形受很多因素的影响,如凹模圆角半径、凸凹模间隙、压边力、拉深速度等,选取合理的工艺参数能获得较好的成形质量,提高模具使用寿命,提高企业经济效益。

针对复合板的拉深成形工艺,国内外不少学者进行了研究。华南理工大学的时丰兵^[7]等人基于数值模拟,研究了双层金属板同步拉深成形过程,揭示了压边力对拉深成形过程的影响,得到了保护罩内外层板的壁厚减薄与增厚在不同压边力下的分布规律。宁爱林等人^[8]对不锈钢/铝(合金)/不锈钢三层和五层复合板的拉深成形过程进行了模拟,得到了各组元的变形规律、等效应力和应变云图,并指出五层复合板的综合性能优于三层复合板。邹东平等人^[9]采用ANSYS有限元软件,对不锈钢/铝双金属板的拉深成形过程进行了模拟,研究了不同压边条件、组元金属厚度比等因素对成形结果的影响。模拟了不同压边力和压边间隙下的成形过程,对比了3组(3:1, 1:1, 1:3)厚度比的拉深极限、厚向应变及最大拉深力的结果。复合板是一种新型材料,拉深工艺参数对其成形结果影响的研究较少。本文主要探究不锈钢/铝/不锈钢三层复合板在拉深数值模拟中的关键技术问题,并基于数值模拟,以 $\Phi 14\text{ cm} \times 9\text{ cm}$ 煲为对象,研究凹模圆角半径、凸凹模间隙、压边力、拉深速度对复合板最大减薄率的影响规律,并利用正交试验对这4个工艺参数进行优选,为工厂实际生产提供参考。

1 复合板拉深数值模拟关键技术

1.1 复合板层与层的连接处理

所研究的三层复合板三层材料及厚度分别为:430 不锈钢(0.6 mm)+1050 铝(1.8 mm)+304 不锈钢(0.4 mm),总厚度为2.8 mm。430 不锈钢具有导磁性,作为零件的外层,可以用于电磁炉加热;430 不锈钢具有良好的抗腐蚀性能,作为零件内层;芯层 1050 铝具有良好的导热性能。在复合板的数值模拟中,复合板层与层的连接是数值模拟的关键。

在 Abaqus/CAE 中,有专门的复合板建模设计模

块 Composites Layup,对于每个铺层,可以选择铺层运用的区域、使用的材料、角度、厚度等;后处理模块中,可以显示每个铺成厚度方向上的应力、位移等云图,也可以显示复合板厚度方向上变量的变化曲线^[10],所以采用 Layup 铺层连接方式处理不锈钢/铝/不锈钢的三层复合板的连接。在设置时,先建立一个壳单元层,再利用 Layup 模块设置需要的层数,并赋予各层材料属性。

1.2 复合板的建模方式比较

从宏观角度,可以把复合板当作是一个整体,从微观角度,可将其视为具有不同材料属性的层与层的叠加,因此,三层复合板的建模有两种模型:一种是整体模型,另一种是复合板模型。

整体模型是将三层复合板等效为同一材质材料,建模时将其视为单层板,并赋予整体的力学性能参数。复合板模型中,建立单层壳单元,然后在材料模块中按照铺层的顺序依次输入各层结构的材料特性参数。

采用上述两种方法分别建模并进行数值模拟,以厚度为评定指标,对模拟结果进行对比,根据实验结果判断两种模型的准确性。图1所示为模拟结果的厚度云图,两种模型的模拟结果均显示:最小厚度位于筒形件底部的圆角处,最大厚度位于凸缘部位,这与图2所示的实物情况相符。

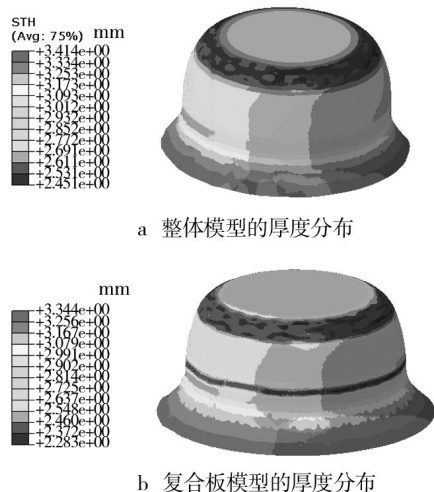


图1 厚度分布

Fig.1 Thickness distribution

表1所示为模拟结果和实验结果的对比情况。可见采用整体模型会产生较大的误差,因此以下将采用复合板模型进行有限元建模。



图2 试验零件
Fig.2 Part of experiment

表1 模拟值与实验值厚度对比

Table1 Comparison of thickness between simulation and experiment

	最小厚度 值/mm	最小厚度 偏值/%	最大厚度 值/mm	最小厚度 偏值/%
整体模型	2.45	9.87	3.41	4.28
复合板模型	2.28	2.24	3.34	2.14
实验值	2.23	—	3.27	—

2 有限元模型的建立

产品零件图见图3,材料为前述不锈钢/铝/不锈钢三层复合板。有限元模型由凸模、凹模、压边圈和坯料构成,由于模型及载荷具有对称结构,所以建模时采用1/4模型。模具设置为刚体,坯料设置为变形体,采用的单元为S4R壳单元。装配后的几何模型见图4。各层的材料参数见表2。

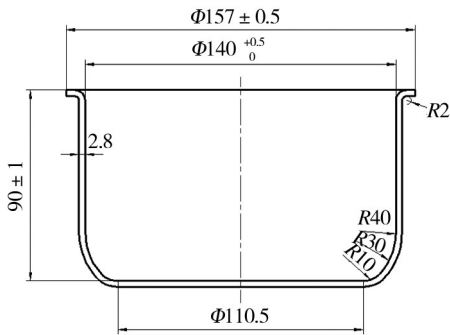


图3 产品零件图
Fig.3 Diagram of product

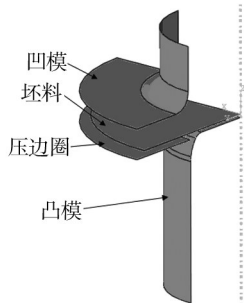


图4 有限元模型
Fig.4 Finite element simulation model

表2 各组元力学性能参数

Table 2 Mechanical properties of each layer of composite sheet

材料	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	弹性模 量/GPa	泊松 比	硬化 指数 n
304 不锈钢	741.8	250.7	200	0.3	0.491
430 不锈钢	462.8	262.8	220	0.3	0.274
1050 铝	68.2	22.5	70	0.33	0.392

3 拉深成形工艺参数优化

由于拉深成形中,产品质量是各个工艺参数综合影响的结果,各工艺参数对成形结果的影响程度各不相同,因此采用正交实验的方法确定各工艺参数对成形质量影响的程度,以及适合本文研究对象即 $\Phi 14\text{ cm} \times 9\text{ cm}$ 煲的最佳工艺参数。

3.1 正交实验方案确定

正交实验以冲压速度、压边力、凹模圆角半径、凸凹模间隙4个工艺参数作为优化变量,以最大减薄率为优化目标。采用四因素四水平进行数值模拟并分析,并根据单因素模拟分析结果确定各因素水平,凹模圆角半径 r : 12, 15, 18, 21 mm; 凸凹模间隙 Z : 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 mm; 压边力 F : 50, 83, 116, 149 kN; 拉深速度 v : 10, 20, 30, 40 mm/s。

3.2 正交实验结果及分析

四因素四水平 16 组正交实验结果的最大减薄率如表3所示。

3.2.1 方差分析

由于各种因素影响,研究的数据存在波动性,造成波动的原因可能是不可控的随机因素,也可能是研究中施加的对结果形成影响的可控因素^[11]。为了探究前文的结果是由随机误差引起,还是成形参数变化引起,以及哪些参数对成形结果有显著影响,现在对正交试验结果进行方差分析。表4所示为最大减薄率的方差分析表。

依据文献^[11],对比表4中的均方MS和误差的均方 e , 可知各因素的均方MS均大于误差的均方 e , 说明正交试验数据的差异主要是由各因素变化引起;而对比 F 值与 F 临界值,如果 F 值大于临界值,说明该因素对成形结果影响显著,否则,对成形结果不显著。由表4可知,凹模圆角半径和压边力对最大减薄率的影响显著。另外,对比各工艺参数对应的 F 值可知,各工艺参数对最大减薄率影响的主次顺序是:凹模圆角半径>压

边力>凸凹模间隙>拉深速度。

表3 正交试验数据结果表

Table 3 Results of orthogonal experiment

试验号	凹模圆角 半径 r/mm	凸凹模间隙 Z/mm	压边力 F/kN	拉深速 度 $v/$ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	最大减 薄率/%
1	12	3.2	50	10	15.54
2	12	3.3	83	20	19.86
3	12	3.4	116	30	22.50
4	12	3.5	149	40	24.18
5	15	3.2	83	30	17.32
6	15	3.3	50	40	15.00
7	15	3.4	149	10	18.96
8	15	3.5	116	20	18.32
9	18	3.2	116	40	16.71
10	18	3.3	149	30	17.18
11	18	3.4	50	20	15.32
12	18	3.5	83	10	15.00
13	21	3.2	149	20	15.96
14	21	3.3	116	10	15.29
15	21	3.4	83	40	15.25
16	21	3.5	50	30	14.93

表4 最大减薄率方差分析

Table 4 ANOVA of maximum thinning rate

方差来源	凹模圆角 半径	凸凹模 间隙	压边 力	拉深 速度	误差 e	总离差平 方和
自由度	3	3	3	3	3	
离差平方和SS	62.76	8.84	34.30	7.68	4.75	118.33
均方MS	20.92	2.95	11.43	2.56	1.58	
F	13.24	1.86	7.21	1.61		
显著性	显著	不显著	显著	不显著		
F 临界值		$F_{0.1}(3,3)=5.39$				

3.2.2 极差分析

方差分析确定了不同因素对试验指标的影响程度,但是没有确定工艺参数的最优组合,为此,需要对试验指标进行极差分析。极差越大,表示相应因素的水平改变时对试验指标的影响越大。表5所示为最大减薄率的极差分析表。

对最大减薄率而言,极差均值 Y_{ij} 越小,表示 j 因素 i 水平下的最大减薄率越小,成形结果越好。由极差分析表5可知,有利于降低最大减薄率的成形参数组合为:凹模圆角半径为21 mm,凸凹模间隙为3.2 mm,压边力为50 kN,拉深速度为10 mm/s。

表5 最大减薄率极差分析

Table 5 Range analysis of maximum thinning rate

极差	凹模圆角 半径 r/mm	凸凹模间隙 Z/mm	压边力 F/kN
Y_{1j}	82.07	65.53	60.79
Y_{2j}	69.61	67.33	67.43
Y_{3j}	64.21	72.03	72.82
Y_{4j}	61.43	72.43	76.28
$\bar{Y}_{1j}$	20.52	16.38	15.20
$\bar{Y}_{2j}$	17.40	16.83	16.86
$\bar{Y}_{3j}$	16.05	18.01	18.21
$\bar{Y}_{4j}$	15.36	18.11	19.07
R_j	5.16	1.73	3.87

4 实验验证

为验证模拟结果的可靠性,采用与上述模拟过程相同的工艺参数进行实验验证。主要通过两种方法对比:一种是观察法,主要对比拉深后零件成形结果和模拟结果云图;另一种是定量法,即对比最大减薄率的模拟值和实验值。

4.1 观察对比

图5所示为凹模圆角半径为8 mm时的成形结果,零件出现单层破裂缺陷。由图5a可知,破裂主要发生在430不锈钢表层靠近凸缘的筒壁处,图5b中的零件在筒壁外层430不锈钢局部出现裂缝。图7所示

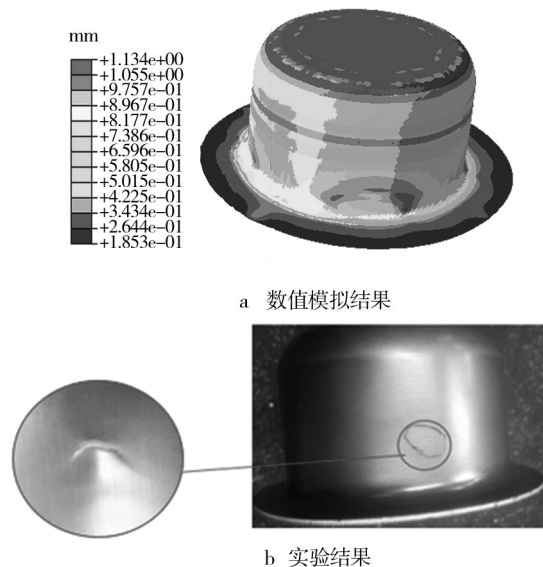


图5 表层破裂现象对比

Fig.5 Comparison of crack in surface layer between simulation and experiment

为凹模圆角半径为 25 mm 时的成形结果,零件出现起皱现象,由图 6a 可知,内层 304 不锈钢在凸缘区域的等效塑性应变不均匀,图 6b 中零件凸缘出现起皱现象。图 7 所示为采用正交优化后的工艺参数获得的成形结果,成形质量良好,其最小厚度为 2.46 mm,最大减薄率为 12.14%,证明了正交实验优化的有效性。

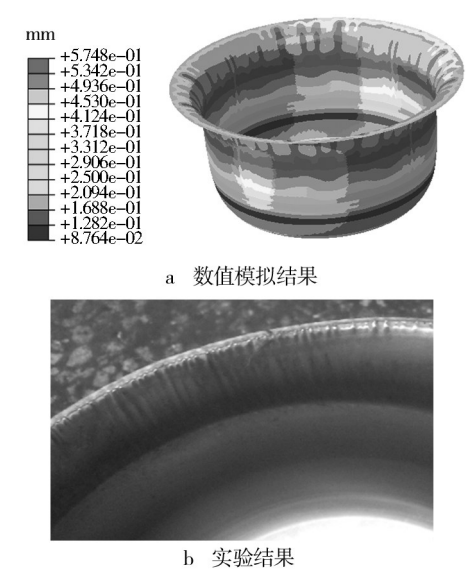


图6 起皱现象对比

Fig.6 Comparison of wrinkle between simulation and experiment

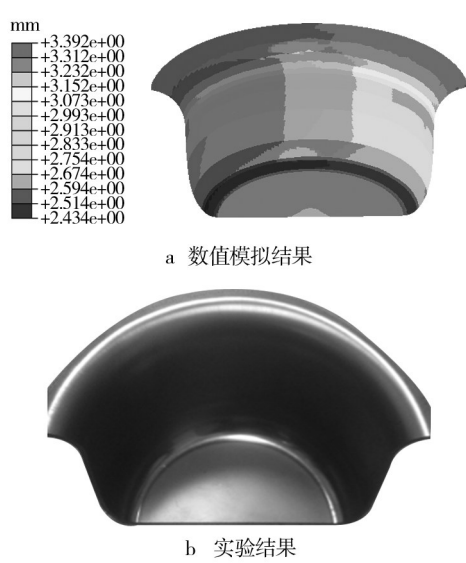


图7 正交优化结果对比

Fig.7 Comparison of orthogonal optimization results

4.2 工艺参数对最大减薄率的影响结果对比

为了定量对比数值模拟结果和实验结果,针对最大减薄率进行对比。图 8 所示为工艺参数对最大减薄率的影响结果的对比情况。

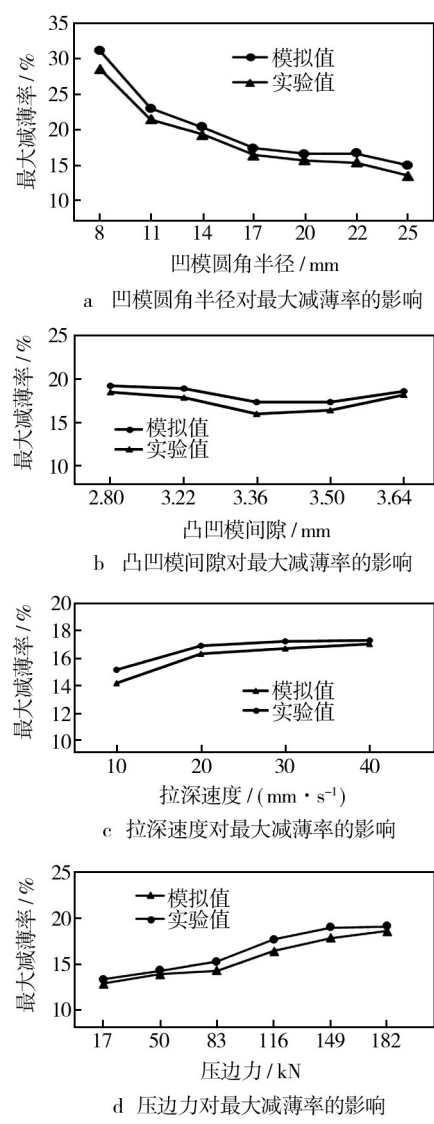


图8 工艺参数对最大减薄率的影响结果对比

Fig.8 Comparison of maximum thinning rate between simulation and experiment

- 1) 最大减薄率随凹模半径增大而减小。这主要是因为凹模圆角影响材料流动,当凹模圆角半径过小($r=8$ mm)时,材料流动性差,拉深件侧壁所受的拉应力增大,当超过 430 不锈钢的抗拉强度时便发生破裂;当凹模圆角半径过大($r=25$ mm)时,材料过早脱离压边圈,材料受切向压应力作用而容易产生起皱。
- 2) 最大减薄率随凸凹模间隙的增大,先减小后增大。这主要是因为当间隙过小时,摩擦阻力较大,材料流动性较差;当间隙过大时,拉深件出现锥度,在凸模圆角处的材料受到有益的摩擦减小,材料受到的拉应力增大,导致材料厚度变薄加剧。
- 3) 最大减薄率随拉深速度的增大而增大。这是因为随着拉深速度增大,变形材料来不及转移,局部变形更为突出,导致零件减薄率增大。

4) 最大减薄率随着压边力的增大而增大。这主要是因为随着压边力增大,凸缘区板料和模具的摩擦增大,板料的流动性变差,引起减薄率增加。

由图9可知,最大减薄率的模拟值和实验值之间的最大相对误差仅为8.37%,模拟值和实验值的总体的趋势一致,证明了有限元模拟的可靠性。另外,最大减薄率的模拟值均略高于实验值,说明数值模拟具有一定的安全裕度,能够为实际生产提供指导作用。

5 结论

1) 复合板的数值模拟值中,复合板采用分层建模(即复合板模型)比整体建模(即整体模型)更准确。

2) 最大减薄率随凹模圆角半径的增大而减小;随着凸凹模间隙的增大,先减小后增大;随拉深速度的增大而增大;随着压边力的增大而增大。

3) 正交试验结果表明:凹模圆角半径和压边力对最大减薄率的影响显著程度大于凸凹模间隙和拉深速度。各成形工艺参数中,影响最大减薄率的主次顺序是:凹模圆角半径>压边力>凸凹模间隙>拉深速度。有利于减小最大减薄率的工艺参数优化组合为:凹模圆角半径为21 mm,凸凹模间隙为3.2 mm,压边力为50 kN,拉深速度为10 mm/s。

4) 凹模圆角半径、凸凹模间隙、拉深速度、压边力对壁厚减薄率的实验结果和数值模拟结果接近,其影响规律与数值模拟的分析规律相一致,证明了有限元模拟的可靠性,能够为实际生产提供指导作用。

参考文献:

- [1] 张沪,彭星魁,文洁,等.耐深冲不锈钢/铝/不锈钢复合材料研究[J].矿冶工厂,1992,12(2):56—60.
ZHANG Hu, PENG Xing-kui, WEN Jie, et al. Studies on the Deep-drawing Performance of Stainless Steel/Aluminium/Stainless Steel Composites[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1992, 12(2): 56—60.
- [2] 王勇.夹层钢板冲压的成形机理与缺陷分析[J].塑性工程学报,2006,13(4):49—53.
WANG Yong. Analysis of the Forming Mechanism and Defect during Sandwich Sheet Metal Stamping[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13(4): 49—53.
- [3] KIM K J, KIM D, CHOI S H, et al. Formability of AA5182/Polypropylene/AA5182 Sandwich Sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139(s1—3): 1—7.
- [4] 赵玉涛,戴起勋,陈刚.金属基复合材料[M].北京:机械工业出版社,2007.
ZHAO Yu-tao, DAI Qi-xun, CHEN Gang. Metal Matrix Composite[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [5] YANAGIMOTO J, OYA T, KAWANISHI S, et al. Enhancement of Bending Formability of Brittle Sheet Metal in Multi-layer Metallic Sheets[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 287—290.
- [6] 季晓鹏.多层不锈钢/铝(合金)复合板热轧工艺有限元模拟研究[D].西安:西安建筑科技大学,2008.
JI Xiao-peng. FEM Simulation of Hot-rolling Process for Multi-layer Stainless Steel/Aluminum (Aluminum Alloy) Plates[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2008.
- [7] 时丰兵,赵学智,夏琴香,等.数值模拟的双层金属板拉深成形工艺研究[J].现代制造工程,2012(2):99—104.
SHI Feng-bing, ZHAO Xue-zhi, XIA Qin-xiang, et al. Research on Drawing Process of Two Layer Sheet Steel Based on Numerical Simulation[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012(2): 99—104.
- [8] 宁爱林,朱旭霞,彭大暑.三层复合板的r值研究[J].金属成形工艺,2001,19(5):25—27.
NING Ai-lin, ZHU Xu-xia, PENG Da-shu. Study on Lankford (r) of Three-Layer Composite[J]. Metal Forming Technology, 2001, 19(5): 25—27.
- [9] 邹东平,刘勇.双金属板拉深性能影响因素的模拟及分析[J].锻压技术,2008,33(2):120—123.
ZOU Dong-ping, LIU Yong. Numerical Simulation and Analysis of Effect Factors on Deep-drawing Property for Bimetal-laminated Sheet[J]. Forging & Stamping Technology, 2008, 33(2): 120—123.
- [10] 曹金凤,石亦平. ABAQUS有限元分析常见问题解答[M].北京:机械工业出版社,2009.
CAO Jin-feng, SHI Yi-ping. ABAQUS Finite Element Analysis Common Problem Solutions[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [11] 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,2008.
LI Yun-yan, HU Chuan-rong. Experimental Design and Data Processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.