

双金属板渐进成形底部鼓包和侧壁鼓凸研究

秦 勤^{1,2}, 李 程², 何 流¹, 臧 勇¹

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

(2. 北京科技大学顺德研究生院, 广东 佛山 520300)

摘 要: 为了从工艺上提高双金属板成形精度, 通过实验结合有限元分析的方法探究了不同工艺参数对成形精度的影响, 研究表明: 成形角度和成形深度分别是影响底部精度和侧壁精度的最关键因素, 当成形角度由 30°增大至 60°时, 底部鼓包高度降低 29%, 侧壁鼓凸量增加 18.5%; 当工具头直径由 10 mm 增大至 20 mm 时, 底部鼓包高度下降 13%, 侧壁鼓凸量下降 16%; 当下压量由 0.5 mm 减小至 0.2 mm 时, 底部鼓包高度下降 24%, 侧壁鼓凸量增加 18.3%; 最后优选了合理的工艺参数, 使得底面鼓包高度下降 49%, 侧壁鼓凸量下降 41%。

关键词: 单点渐进成形; 铜铝复合板; 成形精度; 工艺参数

中图法分类号: TG306; TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)09-3270-10

双金属复合板能够发挥组元材料各自的优势, 实现各组元材料的最优配置, 它具有传统单种金属材料不可比拟的物理性能和机械性能的优点^[1]。已经被广泛应用于航空航天、化工、汽车制造、医疗、环境保护等各个行业, 体现出了很好的经济效益和社会效益。为了更好地适应其多品种、小批量生产的特点, 具有柔性无模成形技术特点的渐进成形技术也开始逐渐被广泛采用^[2,3]。但是在实际应用过程中, 成形件精度不高也成为阻碍该技术发展的关键问题。底部鼓包和侧壁鼓凸缺陷主要是由于在成形过程中板料上下表面应力状态差异、应力分布不均和残余应力释放等因素产生^[4]。这种缺陷不但在加工过程中会使工具头发生弯曲变形, 增加损坏的风险, 也是影响成形零件精度的主要问题^[5]。

随着学者对渐进成形研究的深入, 在成形机理、成形质量、回弹研究与控制等方面已经取得了丰硕成果^[6-9]。为了提高板材渐进成形精度, 许多学者利用实验方法进行了不同研究, Micari 等^[10]针对渐进成形中存在的回弹和底部的鼓包问题进行了研究, 分析实验现象, 总结规律, 提出了可以优化的成形工艺方法。Malhotra 等^[11]提出使用两工具头, 采用双面成形技术来控制版面局部变形及金属流动, 来提高板料成形精度。Bambach 等^[12]采用轨迹优化方式, 通过多次成形逐渐达到最终形状的方法, 提高成形精度。徐佳晖^[13]对小成形角零件易产生的鼓包和边缘翘曲现象进行了分

析, 得出了造成零件鼓包和边缘翘曲现象的原因, 分析了成形角对成形缺陷的影响。并且通过对小曲率球面零件的试验, 优化了成形参数。目前学者对成形精度的控制研究还主要集中在单板材料上。成形精度由多种工艺参数共同影响, 引入数学分析方法可以很好地解决参数影响的灵敏度问题, 所以实验结合数学分析的方法被许多学者使用。Hussain^[14]通过实验分析了铝板渐进成形中底部鼓包的形成现象, 并讨论了各工艺参数对鼓包缺陷的影响, 通过数学分析方法提出了一种参数优化模型。崔震、Radu 等^[5,15]针对渐进成形过程中的鼓包问题, 分析了该现象的形成原因, 利用简单试验法分析了部分成形参数对鼓包高度问题的影响, 并通过方差分析分析了不同参数对鼓包高度影响的灵敏度大小, 提出通过优化成形工艺参数可以减小鼓包高度。史晓帆^[16]针对方锥形渐进成形制件的侧壁鼓凸问题, 提出了一种变形求解方法, 根据构建的侧壁形面模型, 建立了方锥形渐进成形制件的补偿工艺。试验证明, 该工艺可以显著提高方锥形渐进成形制件的尺寸精度。Dejardin^[9], Ambrogio 等^[17]提出了一种通过规划刀具路径来改善单金属板渐进成形精度和鼓包高度的方法, 并通过实验法验证了该方法的可靠性。为研究成形缺陷形成的机理, 许多学者利用有限元法分析板材成形过程中应力变化规律, 并对成形缺陷进行预测和控制。Ambrogio^[18]等通过建立简化的二维有限元计算模型计算出回弹结果, 然后根据回弹结果产

收稿日期: 2020-09-03

基金项目: 北京科技大学顺德研究生院科技创新专项资金项目(BK19BE009); 广东省基础与应用研究基金(2019B1515120070)

作者简介: 秦 勤, 男, 1970 年生, 博士, 教授, 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083, E-mail: qinqin@me.ustb.edu.cn

生修形信息, 直接修改有限元模型中工具头运动型线的结点坐标, 再进行有限元计算, 修正过程反复进行, 直到回弹误差达到要求。史晓帆^[4]对板料渐进成形过程中出现的回弹和鼓包机理进行研究, 提出通过局部热处理改善平面侧壁鼓包和牵连变形, 使用平头形工具头, 以及构建回弹模型进行回弹补偿等方式来提高渐进成形的精度。韩飞^[19]揭示了板材数控渐进成形的回弹机理, 建立 PSO-ANN 神经网络模型, 并建立组合模型对其进行优化, 大大提高了回弹的预测精度和稳定性, 并提出了基于傅里叶和小波变换结合的数控渐进成形轨迹型面闭环修正算法。朱虎^[20]等人针对渐进成形中鼓包的问题, 采用有限元法研究了4种运动轨迹对成形精度的影响。结果表明, 采用各等高层由内向外全扫描的轨迹时能有效减小鼓包。目前针对渐进成形加工精度的研究主要集中在单一板材上, 对于金属复合板材的研究十分少, 金属复合板材由于具有优良的综合性能, 越来越受到人们重视, 在各个领域都有广泛的应用, 成形精度相对较低同样是影响渐进成形技术推广的主要问题之一, 但目前很少有学者对金属复合板的精度问题进行研究。

目前, 对双金属复合板渐进成形研究大多集中在成形机理、成形性能等方面, 对成形精度的研究较少。Honarpisheh 等人^[21]通过有限元法探讨了铜铝双金属复合板渐进成形中工艺参数对成形力和壁厚的影响, 并提出合理的工艺方案以提高成形性能。Gheysarian 等^[22]通过实验方法研究了工具头直径、刀具轨迹等工艺参数对铜铝复合板渐进成形中成形力、厚度变化、成形质量等的影响, 没有研究板料的成形精度问题。在双金属复合板成形中, 其结合面对复合板材成形性能有至关重要的作用, 同时成形过程中的界面开裂现象是需要考虑的问题之一^[23], 而在目前的双金属复合板渐进成形数值模拟研究中, 复合板结合界面作为评价结合性能的关键因素被部分学者忽略, 此种模拟方法存在局限性。

本研究以铜铝双金属爆炸复合板为研究对象, 首先通过正交实验对底部鼓包和侧壁鼓凸的影响因素的显著性进行了分析, 并初步研究了成形精度的变化规律。然后通过建立双金属板渐进成形模型讨论了不同工艺参数对成形精度的影响规律, 从理论层面验证了实验结论。最后通过优化工艺参数提出了一种有效提高双金属复合板底部和侧壁精度的方法。

1 双金属复合板渐进成形精度的实验研究

本工作首先对渐进成形实验加工过程中的实验设备, 加工轨迹设定以及成形精度测量方法进行了介绍,

然后通过正交实验的方法定量地分析了各工艺参数对底部鼓包和侧壁鼓凸的显著性, 并依据实验结果针对不同形状的成形件初步探究了成形角度和加工深度等因素对成形精度的影响。通过实验研究, 能够更加直观地掌握双金属板渐进成形精度的变化规律。

1.1 实验加工过程

实验所选用的机床是 HKT-1105B 数控成形机床。采用专用夹具夹持板料, 板料尺寸为 350 mm×350 mm, 成形件的理论形状由不同工况下的加工轨迹确定, 加工类型为等高线加工, 每层进给量有 0.2、0.35 和 0.5 mm 3 种, 进给速度为 1000 mm/min。

1.1.1 实验材料

本次使用 T2Cu-AA1050 双金属爆炸复合板来研究渐进成形过程中各因素对成形精度的影响, 实验板料有 1、1.5、2 mm 3 种厚度, 数控成形机床工具头材料为 Cr12MoV, 直径有 10、15 和 20 mm 3 种规格, 实验过程中所使用的润滑油为机床专用 68#导轨油。AA1050 和 T2Cu 的化学成分组成如表 1 和表 2 所示, 材料性能参数如表 3 所示^[21]。

1.1.2 实验加工轨迹的设定

本工作重点研究渐进成形精度中的底部鼓包和侧壁鼓凸缺陷, 通过查阅文献, 不同形状制件的主要缺陷类型有所差异, 例如方锥件相比于圆锥件更容易发生侧壁鼓凸缺陷^[4]。因此, 将设定圆锥形和方锥形 2 种实验加工轨迹, 对成形件侧壁和底部精度进行研究。

表 1 AA1050 化学成分组成

Table 1 Chemical composition of AA1050 (ω/%)

Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Ti	Al
0.0486	0.392	0.237	0.378	0.0421	0.0496	0.027	Bal.

表 2 T2 铜化学成分组成

Table 2 Chemical composition of T2Cu (ω/%)

Pb	Zn	Fe	P	Ni	As	Al	Cu
0.0001	0.00015	0.0044	0.0016	0.0026	0.00036	0.0007	Bal.

表 3 AA105 和 T2Cu 材料性能参数

Table 3 Property parameters of AA1050 and T2Cu^[21]

Parameter	AA1050	T2Cu
Density/kg m ⁻³	2700	8940
Young's modulus/GPa	70	115
Poison ratio	0.33	0.35
Yield stress/MPa	122	306
Hardening exponent	0.12	0.11

图 1 分别为圆锥形轨迹和方锥形轨迹加工下的成形件轮廓的 CAD 图，利用 UG 的 CAM 模块即可生成沿内壁的加工轨迹。根据实验台和夹具尺寸，设置圆锥台件的上表面固定直径为 310 mm，方锥台成形件的上表面对角线长度为 310 mm，2 种成形件的成形深度和成形角度根据不同的实验工况进行调整。

1.2 渐进成形精度的正交实验设计

影响渐进成形精度的因素有很多，例如：下压量、成形角度、工具头直径等等。由于最终成形件精度是各因素共同作用的结果，不同因素对成形精度的影响程度不同，对于这种多因素问题，如果一个一个因素进行试验，将会造成实验次数多、实验周期长和实验成本高的问题。因此，接下来将采用正交实验的方法对成形精度影响因素的显著性进行分析。

1.2.1 正交实验方案设计

为了更加全面地探究各因素对渐进成形精度的影响规律，本次实验考虑单层下压量、加工轨迹、加工深度、板料初始厚度、工具头直径以及成形角 6 个 3 水平影响因素。实验的工艺参数设置如表 4 所示，根据以上因素水平设计 L18 (3⁷) 正交实验。

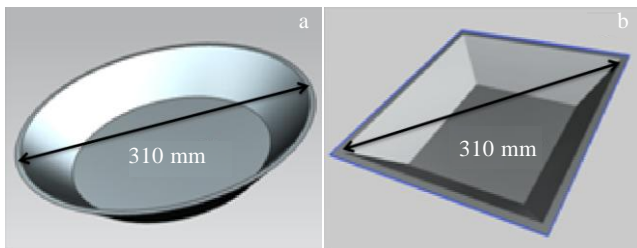


图 1 成形件轮廓设计图

Fig.1 Design of forming part: (a) cone shaped part and (b) square cone shaped part

表 4 因素水平表

Table 4 Factor level

Factor	Level		
	1	2	3
Step down size/mm	0.2	0.35	0.5
Processing track	Cone (unidirectional)	Cone (alternating direction)	Square cone
Forming depth/mm	20	30	40
Thickness/mm	1	1.5	2
Tool diameter/mm	10	15	20
Forming angle/(°)	30	45	60

1.2.2 影响因素显著性分析

(1) 实验过程

渐进成形精度测量常通过获取三维轮廓线数据实现^[4]，由于非接触式测量方法具有精度高、速度快、对工件无磨损等优点。因此，本研究采用手持式激光扫描仪来获取物体的三维轮廓数据。

在成形加工结束后卸载，对成形件表面使用三维扫描仪进行表面形状成像处理，经过 Geomagic Qualify 软件处理得到其表面形状三维立体图，如图 2 所示，沿 ab 将截面切开，取出 ab 轮廓上的板材形状数据导入到 CAD 中，通过与理想轮廓曲线的对比获得不同位置的精度数据^[24]。

(2) 结果与分析

底部鼓包产生的原因主要是由于成形件底部上下表面应力状态不同，上下表面应力差异的大小直接决定了底部鼓包高度大小。将成形件底部凸起的最大高度记为底部最大鼓包高度，如图 3 所示。

应用上述测量方法统计出 18 组正交实验的底部最大鼓包高度，通过正交分析发现，成形角对底部鼓包高度的影响极差最大达到了 0.95，工具头直径对底部鼓包高度的影响极差最小为 0.07。由正交实验分析可知各因素对底部最大鼓包高度的影响显著性从大到小依次为：成形角>单层进给量>加工轨迹>加工深度>板厚>工具头直径。

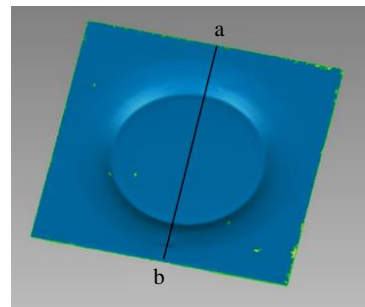


图 2 成形件扫描图

Fig.2 3D scan of forming part

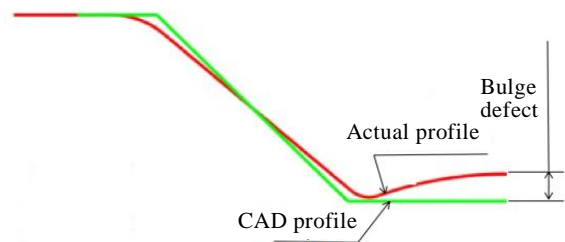


图 3 底部鼓包示意图

Fig.3 Schematic diagram of the bottom bulge

在渐进成形过程中，工具头与板材接触的地方会产生较大的厚向压应力，使得该处的材料会向四周进行扩展，由于制件内部的应力沿厚度方向不是均匀分布的，该延展作用会沿壁厚方向逐渐减弱，导致上下表面处材料的延伸率出现差异，这是残余应力产生的最主要原因，成形后制件侧壁会在残余应力的作用下向内鼓凸，侧壁最大鼓凸高度如图4所示。

统计出18组正交实验的侧壁最大鼓凸高度，通过正交分析发现，加工深度对侧壁最大鼓凸高度的影响极差最大达到了3.48，工具头直径对侧壁最大鼓凸高度的影响极差最小达到了0.61。由正交实验分析可知，各工艺参数对侧壁最大鼓凸高度的影响显著性从大到小依次为：加工深度>加工轨迹>成形角>单层进给量>板厚>工具头直径。

1.3 渐进成形精度变化规律的研究

从正交实验结果分析中可以发现，底部鼓包高度和侧壁鼓凸量随着影响因素的变化呈现出一定的规律性，为了更加直观，接下来将正交实验结果按照圆锥成形件和方锥成形件分别进行讨论。

1.3.1 圆锥成形件成形精度规律

根据正交实验结果，影响底部鼓包最显著的因素是成形角度。将成形件底部最大鼓包高度与成形深度的比值记为最大底部鼓包高度百分数，分别计算出成形角度为30°、45°和60°时圆锥成形件的最大底部鼓包高度百分数的平均值，绘制在图5中。正交实验结果是多因素共同作用的，但从图5中可以看出，随着成形角度由30°增加到60°，圆锥制件的平均底部鼓包高度百分数降低了4.5%，成形角度对底部鼓包的影响十分显著。

正交分析中，影响侧壁鼓凸最显著的因素是成形深度，为探究成形深度对侧壁鼓凸缺陷的影响，设置一组加工参数：成形角度60°，工具头直径15mm，

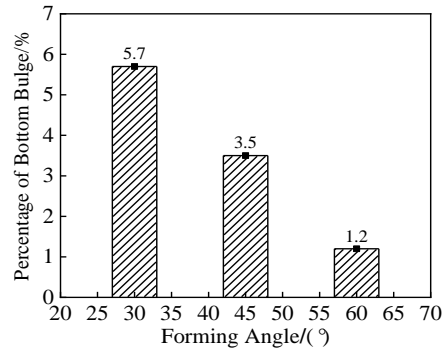


图5 不同成形角度下的平均底部鼓包高度百分数
Fig.5 Percentage of average bottom bulge under different forming angles

层进给量0.35mm，选取1.5mm板厚的铜铝复合板，按照顺时针的加工方向，最终加工成一个40mm深的圆台，分别测量出成形深度为10、15、20、25、30、35和40mm时的侧壁最大鼓凸量，记录下来并绘制出变化曲线，如图6所示，随着成形深度由20mm增加到40mm，圆锥成形件侧壁鼓凸量增加了65%，侧壁鼓凸量与成形深度成正相关。这是由于随着成形深度的增加，侧壁处上下表面材料延展率差异越来越大，导致残余应力越来越大，则向内鼓凸量越来越大。

1.3.2 方锥成形件成形精度规律

在正交实验中，方锥成形实验一共进行了6组，每种影响因素水平下对应2组实验结果，通过比较不同成形角度下最大底部高度百分数的平均值（图7所示），随着成形角度由30°增加到60°，方锥制件的平均底部鼓包高度百分数降低了2.5%，可以发现，成形角度对于圆锥成形件和方锥成形件底部鼓包的影响规律具有一致性。

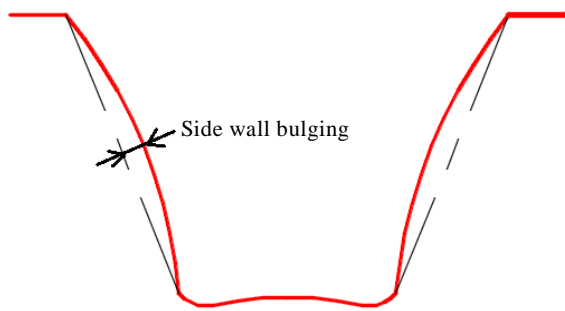


图4 侧壁鼓凸示意图

Fig.4 Schematic diagram of side wall bulge

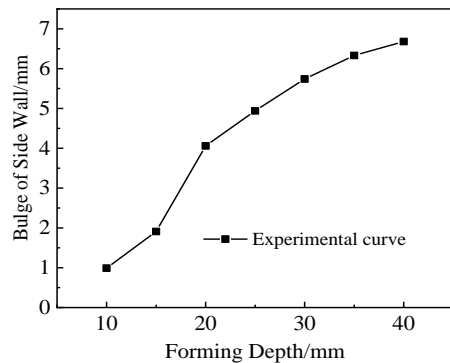


图6 不同成形深度下的侧壁鼓凸量

Fig.6 Bulge of side wall under different forming depths

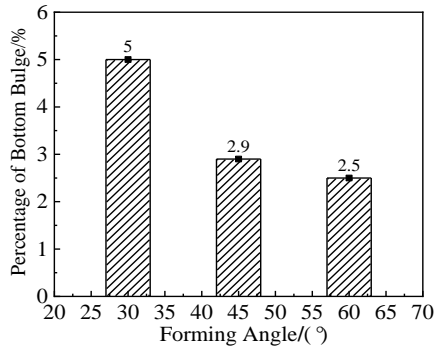


图 7 不同成形角度下的平均底部鼓包高度百分比

Fig.7 Percentage of average bottom bulge under different forming angles

通过观察方锥成形件的侧壁鼓凸量,根据正交实验极差法分析,成形深度是影响侧壁鼓凸缺陷的最显著因素,以正交实验第 9 组为例,记录加工过程中,成形深度为 10、15、20、25、30、35 和 40 mm 时侧壁最大鼓凸量,绘制其变化曲线,如图 8 所示。从图 8 中可以看出,侧壁最大鼓凸量与成形深度呈正相关,随着成形深度由 20 mm 增加到 40 mm,方锥成形件的平均侧壁鼓凸量增加了 146%。这与圆锥件成形规律相同。

除此之外,根据正交实验结果,方锥成形件平均侧壁鼓凸量为 6.88 mm,圆锥成形件平均侧壁鼓凸量为 3.63 mm。因此,方锥成形件平均侧部鼓凸量要高于圆锥成形件,这是由于圆锥台制件结构刚度好,残余应力不会对成形精度带来较大的影响,但对于方锥件等结构刚度较差的制件,残余应力对精度的影响是非常显著的^[4]。

通过正交实验定量地分析了各因素对成形精度影响的显著性。工艺参数是影响加工精度的重要因素,由于工艺参数的可调性,选择合适的工艺参数对提高双金属板渐进成形精度具有重要的意义。在选择合理

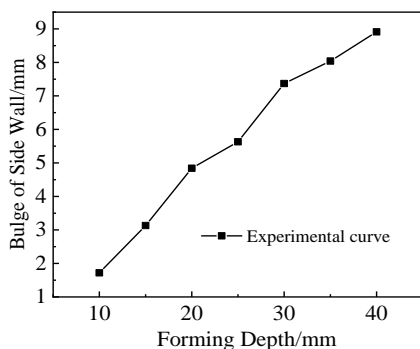


图 8 不同成形深度下的平均侧壁最大鼓凸量

Fig.8 Bulge of side wall under different forming depths

参数前,首先要掌握各参数的影响规律,接下来将通过有限元仿真研究这一问题。

2 双金属板渐进成形模型的建立与验证

本工作将依据实验所选用的铜铝双金属复合板的尺寸和性能参数建立渐进成形仿真模型,探究不同工艺参数对成形精度的影响。

2.1 渐进成形有限元模型的建立

参照实验,本次研究建立直径 310 mm,厚度 2 mm 的圆形复合板。上下两部分分别为铝层和铜层,铝层厚度 1.65 mm,铜层厚度 0.25 mm,由于渐进成形过程中需要考虑界面层的影响,因此铜铝层采用实体单元 C3DR8,中间为界面层厚度 0.1 mm,采用 cohesive 单元 COH3D8。同时将渐进成形的工具头简化为直径为 10 mm 的半球,由于工具头刚度很大,在成形过程中变形极小可忽略不计,所以将工具头设置为刚体。

2.1.1 双金属复合板有限元模型界面层属性

内聚力模型已经被广泛用于界面裂纹产生和扩展方面的数值模拟研究中,本此研究的内聚力模型采用双线性本构关系,如图 9 所示。

在外载荷的作用下,内聚力单元出现损伤前,内聚力单元裂纹张力随张开位移 Δ 成线性增长,此时材料处于弹性状态。当位移继续增加到 Δ^c ,张力达到最大 T 时,界面开始出现损伤。随着位移的继续增加,损伤出现扩展,材料出现刚度退化,界面张力值也成线性下降,所能承受的外载荷也逐渐减小。当位移达到 Δ^{fail} 时,材料刚度完全退化,界面裂纹完全拓展,材料失效。

通过仿真 T 型剥离与文献中的剥离试验应力-应变曲线对比拟合,并结合粘接试验进行试凑,来获得铜铝双金属复合板界面参数值为:界面强度为 180 MPa,断裂能为 1.8 mJ/mm²,弹性模量 70 GPa^[25]。

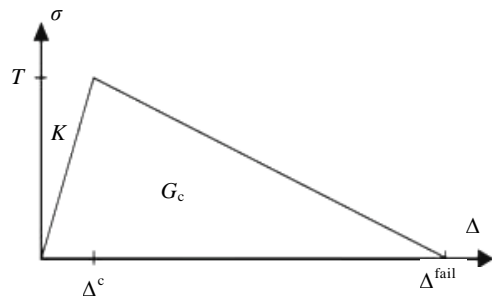


图 9 内聚力单元的双线性本构关系

Fig.9 Bilinear traction-separation response of the cohesive element

2.1.2 边界和接触条件

本次模拟使用 ABAQUS/Explicit 显示算法，工具头与金属板之间为面面接触，设置初始摩擦系数为 0.05。在实际渐进成形过程中，板料四周为压边圈固定，在建立有限元模型中，为减少计算量，将之简化为在金属板周围施加全约束，约束 6 个方向自由度来代替压边圈，如图 10 所示。

本次研究以成形圆锥台制件为例，加工方式上采取等高线加工，工具头运动路径满足以下方程：

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= r_{n+1} \cos n\omega t \\ y_{n+1} &= r_{n+1} \sin n\omega t \\ z_{n+1} &= (n+1)\Delta \end{aligned} \tag{1}$$

式中， x_{n+1} 、 y_{n+1} 、 z_{n+1} 分别为第 $n+1$ 圈时的 x 、 y 、 z 轴坐标； r_{n+1} 为第 $n+1$ 圈时的轨迹半径； Δ 为每步的下压量。

2.2 有限元模型的验证

为了验证本研究所建立的有限元模型是否能准确的应用于渐进成形精度的研究，首先在同一工况下进行渐进成形仿真实验，从最大成形深度的角度与文献中实验结果进行比较，在渐进成形过程中，板料不断受到拉应力出现减薄，当板料上局部区域出现严重的减薄就会产生破裂，界面损伤开裂。然后利用现有的实验设备，在同一工艺参数下比较实验和仿真成形件轮廓曲线，通过测量底部最大鼓包和侧壁最大鼓凸对比精度误差。

依据文献[21]，以圆锥台为例，设置每步下压量为 0.75 mm，工具头直径为 10 mm，成形角度为 45°，建立有限元模型，发现当渐进成形深度到达 30 mm 时，内聚力单元在图 11 中位置出现损伤裂纹，这与文中实验中成形件加工开始出现裂纹的位置相同，文献中裂纹出现的深度为 32.59 mm，有限元模拟结果与实验相差 7.9%，该误差在工程上可以接受[26]。

接下来将利用现有设备从成形精度角度验证有限元模型的可靠性。首先根据实验材料规格建立仿真模

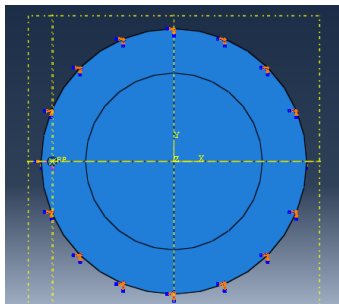


图 10 模型边界条件

Fig.10 Boundary conditions of model

型，设置圆形复合板的直径为 310 mm，厚度为 2 mm，工具头直径为 10 mm，每步下压量为 1 mm。同时在数控成形机床上进行板材加工。

仿真计算结束后，提取成形件仿真轮廓曲线，同时依据成形精度测量方法提取实验轮廓曲线，将两轮廓曲线放在同一坐标系下，如图 12 所示。

从图 12 中可以看出，整体上实验曲线与仿真曲线拟合情况较好，通过比较发现，有限元法仿真得到成形件底部最大鼓包高度为 2.19 mm，实验获得底部最大鼓包高度为 2.09 mm，实验与仿真的误差为 4.6%；有限元仿真得到成形件侧壁最大鼓凸高度为 2.45 mm，实验获得侧壁最大鼓凸高度为 2.62 mm，实验与仿真的误差为 6.9%。因此，实验和仿真结果在双金属板底部和侧壁精度上具有较好的一致性，同时也证明本研究建立的有限元模型可以进行双金属板渐进成形精度的研究。

3 渐进成形精度的影响因素研究

本工作介绍了利用有限元模型分析成形角度、工具头直径和层进给量对底部鼓包高度和侧壁鼓凸量的影响，根据成形轮廓曲线获取底部最大鼓包高度和侧壁最

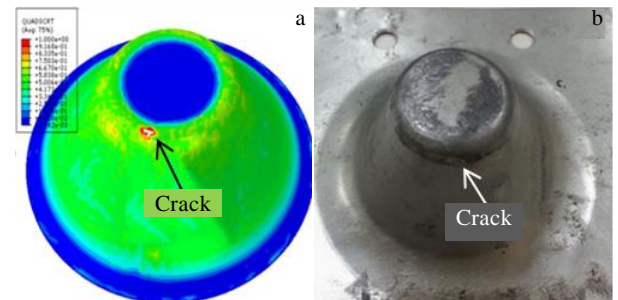


图 11 双金属板损伤情况

Fig.11 Damage to the bimetal: (a) simulated result and (b) experimental result^[21]

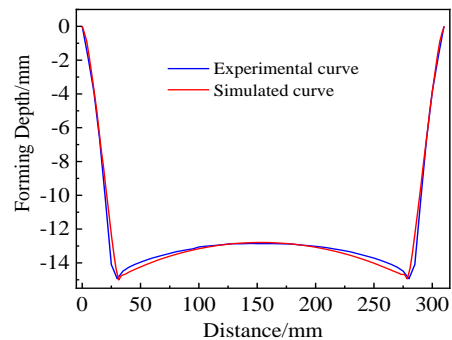


图 12 实验和仿真轮廓曲线

Fig.12 Experimental and simulated contour curves

大鼓凸量来分析各参数变化带来的影响,总结铜铝双金属复合板渐进成形底部和侧壁精度的变化规律。

3.1 成形角度对渐进成形精度的影响

成形角度是影响成形精度的重要因素,为了研究成形角度对成形精度的影响,以 15 mm 圆锥台制件为例,选取成形角为 30°、45°、60°时圆锥制件截面轮廓,如图 13 所示。随着成形角 30°增加为 60°,板料底部的鼓包高度有减小的趋势。在成形角为 30°时,对应的底部鼓包高度为 3.6 mm;在成形角度为 45°时,底部鼓包高度为 3.3 mm,在成形角为 60°时,底部鼓包高度为 2.54 mm。底部鼓包高度和成形角度的关系如图 14a 所示成负相关,这是由于当每层进给量相同的前提下,当成形角较小时,工具头在水平方向上的移动量较大,这将导致水平方向的阻力的增加,从而对未成形区域板料会产生较大的内部压应力,加大了底部鼓包产生的可能性,大的成形角有利于降低底部鼓包。

如图 14b 所示,侧壁鼓凸量随成形深度的增加而增加,在成形角为 30°时,对应的侧壁鼓凸量为 2.48 mm;在成形角度为 45°时,侧壁鼓凸量为 2.73 mm,在成形角为 60°时,侧壁鼓凸量为 2.94 mm,侧壁鼓凸高度和成形角度的成正相关。成形角越大,板料在成形过程中的变形就会越大,进而导致成形所需要的变形力加大。变形力的增加无疑会增强成形工具头对板料上表面材料的碾压作用,使该区域材料产生更加严重的延展,造成上、下表面材料的延伸率出现更大的差异。

3.2 工具头直径对渐进成形精度的影响

渐进成形工艺中,工具头的直径越大成本越高,需根据成形需要选择合适的工具头直径,在达到加工需求的同时减少成本。为了研究工具头直径对成形精度的影响,以 15 mm 深度圆锥台制件为例,选取工具头直径为 10、15、20 mm 时圆锥制件截面轮廓,如图 15 所示。随着工具头直径从 10 mm 增加为 20 mm,板料底部的

鼓包高度有减小的趋势。在工具头直径为 10 mm 时,对应的底部鼓包高度为 3.30 mm;在工具头直径为 15 mm 时,底部鼓包高度为 3.19 mm,在工具头直径为 20 mm 时,底部鼓包高度为 2.84 mm,底部鼓包高度和工具头直径的关系如图 16a 所示成负相关。

如图 16b 所示,侧壁鼓凸量随工具头直径的增加而减小,以 15 mm 成形深度为例,在工具头直径为 10 mm 时,对应的侧壁鼓凸量为 2.73 mm;在工具头直径为 15 mm 时,侧壁鼓凸量为 2.49 mm,在工具头直径为 20 mm 时,侧壁鼓凸量为 2.34 mm,侧壁鼓凸高度和工具头直径的成负相关。因此,大的工具头直径均有利于底部和侧壁精度的提高,这是由于选取直径较大工具头可增加加工过程中工具头与板料的接触面

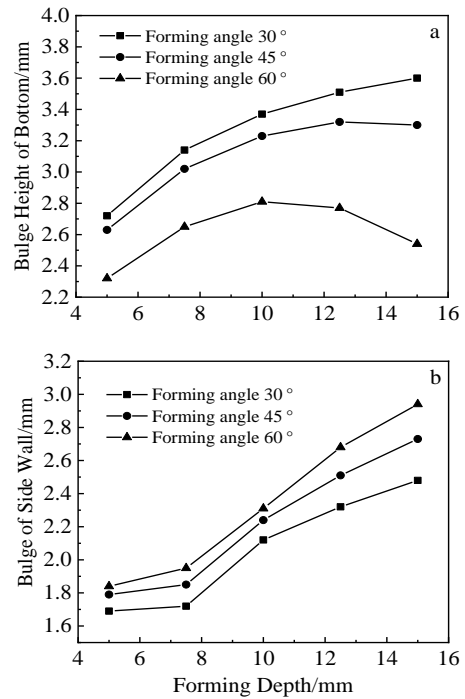


图 14 成形角度对成形精度的影响

Fig.14 Influence of forming angle on forming accuracy: (a) bulge height of bottom and (b) bulge of side wall

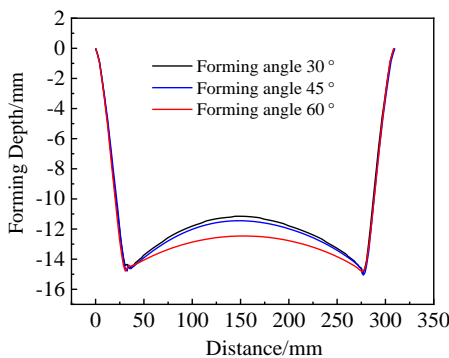


图 13 不同成形角下成形件轮廓

Fig.13 Contours of forming parts under different forming angles

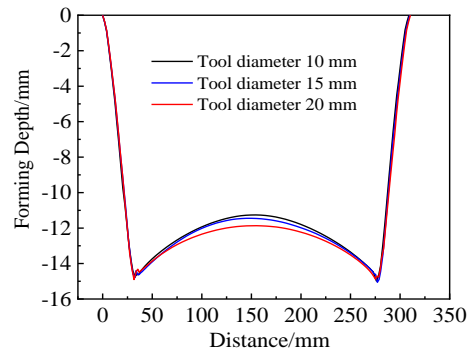


图 15 不同工具头直径下成形件轮廓

Fig.15 Contours of forming parts with different tool diameters

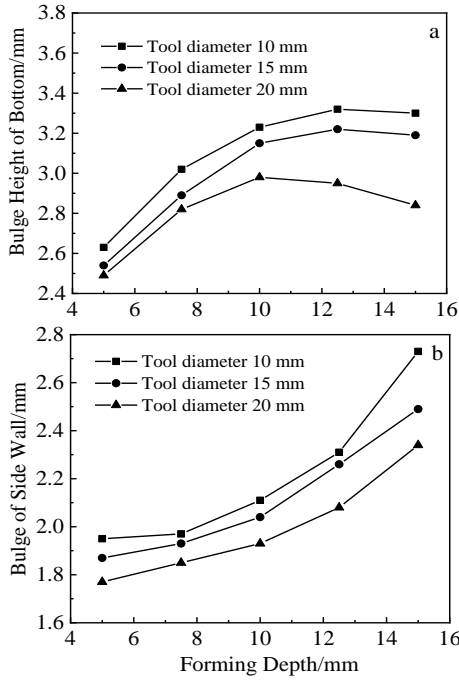


图 16 工具头直径对成形精度的影响

Fig.16 Influence of tool diameter on forming accuracy: (a) bulge height of bottom and (b) bulge of side wall

积，使板料局部变形减小，降低制件上表面材料在压应力下的延展，从而阻止鼓包的形成。当工具头直径过小时，加工过程中会在接触部分产生严重的应力集中，可能导致板料加工质量差。

3.3 下压量对渐进成形精度的影响

下压量是影响渐进成形工艺效率的关键因素，一般来说下压量较大时加工效率高，但是较大的下压量会带来成形质量差甚至刀具崩断等问题。在渐进成形过程中，成形工具头下压板料，使板料上表面受到压应力，下表面受到拉应力，此为典型的弯曲应力状态。由于板料四周被约束，当板料局部出现上述应力状态时，相邻区域会出现相反的应力状态，这种应力状态导致底部鼓包的产生。如图 17 所示。随着下压量从 0.2 mm 增加为 0.5 mm，板料底部的鼓包高度有增加的趋势。在层进给量为 0.2 mm 时，对应的底部鼓包高度为 2.49 mm；在层进给量为 0.35 mm 时，底部鼓包高度为 2.78 mm，在层进给量为 0.5 mm 时，底部鼓包高度为 3.33 mm，底部鼓包高度和下压量的关系如图 18a 所示成正相关。当下压量过大时，会导致相邻两道次之间的金属堆积增多，从而影响板料的表面质量。较小的每步下压量会让板料在局部区域内经历多次塑性变形，使金属流动更加充分均匀，从而形成较小的底部鼓包高度。

如图 18b 所示，侧壁鼓凸量随下压量的增加而减小，当层进给量为 0.2 mm 时，对应的侧壁鼓凸量为 2.97 mm；在层进给量为 0.35 mm 时，侧壁鼓凸量为 2.75 mm，在层进给量为 0.5 mm 时，侧壁鼓凸量为 2.51 mm，侧壁鼓凸高度和下压量的成负相关。

4 工艺参数的合理选取

在实际加工过程中，合理选取工艺参数可以有效地提高成形精度。通过对成形角度、工具头直径和下压量对成形精度的有限元分析可以看出，同一工艺参数对不同的精度问题影响规律不一致，因此找出一套合理的加工参数，提高整体成形精度十分关键。同时，在保证成形精度的前提下，成形效率和成形质量也是需要考虑的问题。

通过分析以上的各工艺参数对渐进成形过程中鼓包高度和侧壁鼓凸量的影响可以发现：随着成形角度由 30°增大到 60°，鼓包高度减少 29%，侧壁鼓凸量增加 18.5%，当成形角度过大会在加工过程中产生较大的成形力，当成形力达到了板材的强度极限时会发生板材局部断裂现象；当工具头直径从 10 mm 增加至 20 mm 时，底部鼓包高度减少 13%，侧壁鼓凸量减少 16%，直径增大使得工具头与板料接触面积增加，板料上下面应力差减小，从而抑制鼓包形成。小直径的工具头在加工过程中应力集中现象较明显，影响加工质量，同时工具头刚度差，会产生变形影响加工精度，但是使用直径较大的工具头可能会与制件发生干涉并且增加成本；随着下压量由 0.5 mm 减小至 0.2 mm，底面鼓包高度减少 24%，侧壁鼓凸量增加 18.3%，但如果一味减小每步下压量，会导致成形效率显著下降，下压量由 0.5 mm 减至 0.2 mm 时，成形时间增加 150%。板料厚度也是影响成形精度的参数之一，但是在工程应用中影响板料厚度的因素有很多，例如板料强度要求、加工深度要求等，所以板料厚度一般不作为降低鼓包高度的工艺方法。

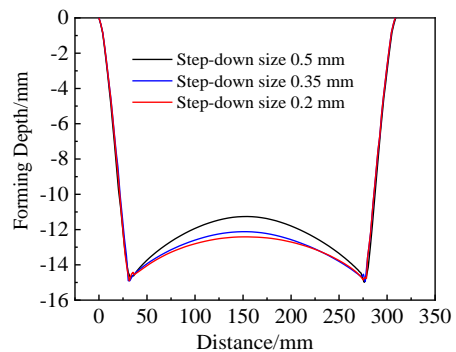


图 17 不同下压量下成形件轮廓

Fig.17 Contours of forming parts under different step-down size

综合考虑成形过程中的底部精度和侧壁精度，同时取各工艺参数时应考虑加工工艺的可操作性和对成形效率、质量的影响。基于上述考虑，以加工成形深度为 20 mm 的圆锥台制件为例（图 19），本研究最终提出了一组较合理的参数组合为：成形角度 45°，工具头直径 15 mm，下压量 0.35 mm。如图 20 所示，经测量得到底部鼓包高度为 0.91 mm，侧壁鼓凸量为 2.74 mm，其中底部鼓包高度比正交实验中最大情况(成形角度 30°，下压量 0.35 mm，工具头直径 20 mm)下降 49%，侧壁鼓凸量比正交实验中最大情况下降 41%，成形效率比最小情况参数组合快 75%。综上所述，优选后的工艺参数是一套比较有效的工艺参数组合，既大幅减小了鼓包缺陷的产生，也一定程度降低了侧壁鼓凸高度，为实际加工提供了一定指导意义。

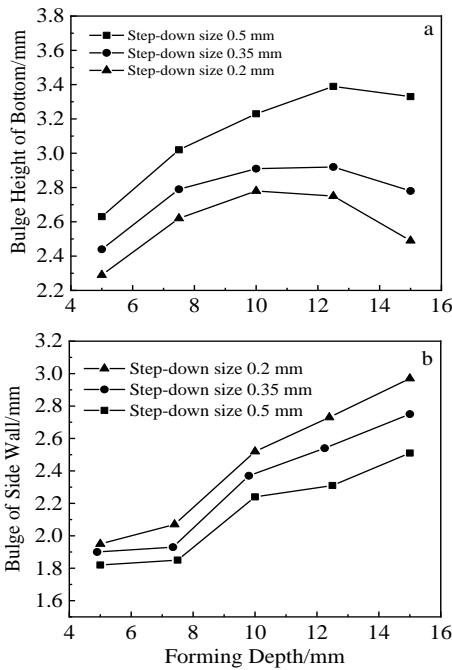


图 18 下压量对成形精度的影响

Fig.18 Influence of step-down size on forming accuracy: (a) bulge height of bottom and (b) bulge of side wall

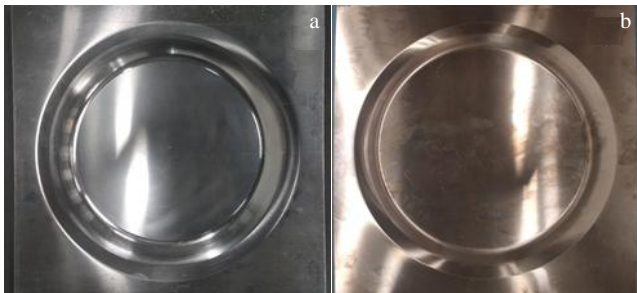


图 19 成形件实物图

Fig.19 Physical images of the formed part: (a) the surface of aluminum and (b) the surface of copper

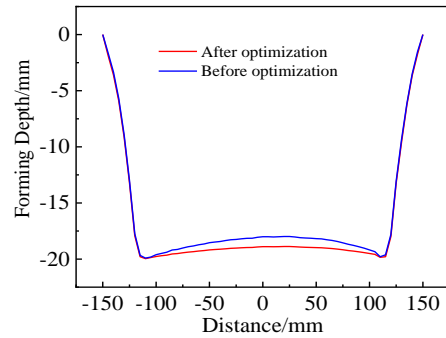


图 20 实验轮廓曲线

Fig.20 Experimental profile

5 结 论

1) 成形角度变化对底部鼓包高度最为敏感，极差值达 0.95，单层进给量次之，工具头直径灵敏度最低；成形深度变化对侧部鼓凸量最为敏感极差值达 3.48，成形轨迹次之，工具头直径灵敏度最低；随着成形角度由 30°增加到 60°，圆锥制件和方锥制件平均底部鼓包高度与成形深度的比值分别降低了 4.5%和 2.5%，随着成形深度由 20 mm 增加到 40 mm，圆锥成形件侧壁鼓凸量增加了 65%，方锥成形件的平均侧壁鼓凸量增加了 146%。

2) 建立了双金属复合板渐进成形有限元模型，该模型中采用 cohesive 单元来模拟界面层，通过有限元模型分析了成形角度、工具头直径和下压量 3 个参数对底部鼓包高度和侧壁鼓凸量的影响。成形角度由 30°增大至 60°，底部鼓包高度降低 29%，侧壁鼓凸量增加 18.5%；工具头直径由 10 mm 增大至 20 mm，底部鼓包高度下降 13%，侧壁鼓凸量下降 16%；下压量由 0.5 mm 减小至 0.2 mm，底部鼓包高度下降 24%，侧壁鼓凸量增加 18.3%。

3) 综合分析工艺参数对底部鼓包高度和侧壁鼓凸量的不同影响，结合加工效率，加工质量要求等多方位考虑，提出一组合理的加工参数：成形角度 45°、工具头直径 15 mm、下压量 0.35 mm，使底部鼓包高度下降 49%，侧壁鼓凸量下降 41%，是一套能明显改善双金属复合板渐进成形整体成形精度的工艺参数。

参考文献 References

[1] Li Zhonghua(李仲华). *Defence Industry Conversion in China(中国军转民)*[J], 2013(4): 74
 [2] Wen Tao(温涛), Zhang Xuhu(张绪虎), Yin Zhongwei(阴中炜) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2019, 48(12): 4074

- [3] Hussain G, Al-ghamdi K A, Khalatbari H *et al.* *Materials and Manufacturing Processes*[J], 2014, 29(4): 454
- [4] Shi Xiaofan(史晓帆). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013
- [5] Cui Zhen(崔震), Gao Lin(高霖), Xu Yan(徐岩). *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*(机械科学与技术)[J], 2018, 27(12): 1581
- [6] Zhao Bin(赵彬). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Jilin: Jilin University, 2007
- [7] Song Xiucheng(宋修成). [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013
- [8] Xu Dongkai, Wu Weichao, Chen Jun *et al.* *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2013, 73: 37
- [9] Dejardin S, Thibaud S, Gelin J C *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2010, 210(2): 363
- [10] Micari F, Ambrogio G, Filice L. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 191(1-3): 390
- [11] Malhotra R, Cao J, Ren F *et al.* *Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 2011, 133(6): 603
- [12] Bambach M, Araghi B T, Hirt G. *Production Engineering*[J], 2009, 3(2): 145
- [13] Xu Jiahui(徐佳晖). *Thesis for Doctorate*(博士论文) [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014
- [14] Hussain G, Gao L, Hayat N. *Materials and Manufacturing Processes*[J], 2011, 26(12): 1546
- [15] Radu M C, Cristea I. *Materials and Manufacturing Processes*[J], 2013, 28(3): 287
- [16] Shi Xiaofan(史晓帆). *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2012, 23(18): 2248
- [17] Ambrogio G, Filice L, Muzzupappa M *et al.* *Journal of Engineering Manufacture*[J], 2005, 219(11): 823
- [18] Ambrogio G, Costantino I, Denapoli L *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 153-154(32): 501
- [19] Han Fei(韩飞), Mo Jianhua(莫建华), Gong Pan(龚攀). *Journal of Huazhong University of Science and Technology, Natural Science Edition*(华中科技大学学报, 自然科学版)[J], 2008, 36(1): 121
- [20] Zhu Hu(朱虎), Ju Jin(鞠晋), Zhang Wei(张伟). *Forging and Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2015, 40(5): 15
- [21] Honarpisheh M, Mohammadi Jobedar M, Alinaghian I. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2018, 96(9-12): 3069
- [22] Gheysarian A, Honarpisheh M. *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*[J], 2017, 7(1): 73
- [23] Al-Ghamdi K A, Hussain G. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 87(1-4): 267
- [24] Huang Shujing(黄书经). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Xi'an: Shanxi University of Science and Technology, 2016
- [25] Su C, Wei Y J, Anand L. *International Journal of Plasticity*[J], 2004, 20(12): 2063
- [26] Maa F, Hahn M, Tekkaya A E. *Metals-Open Access Metallurgy Journal*[J], 2020, 10(5): 656

Research on Bottom Bulge and Sidewall Bulge of Bimetal Plate in Incremental Forming

Qin Qin^{1,2}, Li Cheng², He Liu¹, Zang Yong¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Shunde Graduate School of University of Science and Technology Beijing, Foshan 520300, China)

Abstract: The variations of forming accuracy of the single point incremental forming were analyzed by a combination of experiment method and finite element method. The results show that the bottom bulge height and the side wall bulging are most affected by the forming angle and forming depth, respectively. These results indicate that the height of the bottom bulge is reduced by 29% and the side wall bulging is increased by 18.5% when the forming angle increases from 30° to 60°. The bulge height of the bottom is decreased by 13% and the side wall bulging is decreased by 16% when the tool head diameter is increased from 10 mm to 20 mm. The height of the bottom bulge is decreased by 24% and the side wall bulging is increased by 18.3% when the step down size decreases from 0.5 mm to 0.2 mm. Finally, reasonable process parameters were optimized, so that the bottom bulge height decreases by 49%, and the side wall bulge decreases by 41%.

Key words: single point incremental forming; Cu-Al bimetal; forming accuracy; process parameters

Corresponding author: Qin Qin, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, E-mail: qinqin@me.ustb.edu.cn