

控制厚度分布的变摩擦正反向超塑成形

蒋少松¹, 张凯锋¹, 吴海峰², 许沂², 雷鹄², 王斌²

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001, jiangss600_2005@163.com;

2. 航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074)

摘要: 为研究摩擦力在超塑成形中对工件厚度分布的影响规律, 以正反向超塑成形侧壁厚均匀的 TC4 深筒形件为背景, 采用 MARC 有限元数值模拟分析了预成形模和终成形模的表面摩擦系数在正反向超塑成形时对成形件壁厚分布的影响. 结果表明: 合理地增大预成形模的表面摩擦力能显著增加预成形的局部减薄作用, 对于提高零件最终壁厚分布均匀性有利. 同时, 终成形模摩擦力的减小, 可以使板料趋于整体变形, 壁厚分布趋于均匀. 根据数值模拟结果进行了变摩擦正反向超塑成形试验, 制得了厚度分布在 1.50 ~ 1.78 mm 范围内的航天用 TC4 钛合金深筒形件, 比普通正反向超塑成形件厚度分布 (1.18 ~ 2.24 mm) 有了很大改善.

关键词: TC4 钛合金; 正反向超塑成形; 厚度分布; 摩擦; 有限元模拟

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)02-0249-05

Friction changing of direct-reverse superplastic forming to control the thickness distribution

JIANG Shao-song¹, ZHANG Kai-feng¹, WU Hai-feng², XU Yi², LEI Kun², WANG Bin²

(1. School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, jiangss600_2005@163.com; 2. Institute of Aerospace Special Material and Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to study the influence of friction on the thickness distribution of workpiece in superplastic forming, based on a TC4 deep cylinder with uniform side wall thickness achieved by direct-reverse superplastic forming, the influence of surface friction of preforming die and final forming die on thickness distribution was analyzed with MSC. MARC. Results show that increasing the friction coefficient of preforming die can efficiently reduce the thickness of the regions which need to be thinned, resulting in the final uniform thickness distribution along the component. Decreasing the friction coefficient of forming die can make the sheet tend to be integral formation, also resulting in uniform thickness distribution. According to the simulation results, the experiment on friction changing of direct-reverse superplastic forming was performed. The aerospace TC4 deep cylinder with uniform thickness of 1.50 – 1.78 mm was fabricated successfully. Compared to the thickness distribution of 1.18 – 2.24 mm of common direct-reverse superplastic forming, the thickness of friction changing is more uniform.

Key words: TC4 titanium alloy; direct-reverse superplastic forming; thickness distribution; friction; FEM

超塑成形在生产形状复杂、质轻、强度高的薄壁件方面具有很大的优势, 已成为一种推动现代航空航天结构设计发展的先进制造技术. 不仅能生产出复杂结构的工件, 而且使工序大为减少, 降

低加工费用^[1]. 尤其对于钛合金, 其优异的超塑性使其常被加工为大变形的、形状复杂的航空航天结构件^[2], 与传统的加工工艺相比, 成本可降低 30% ~ 40%, 构件重量可减轻约 40% ~ 50%. 但是, 在超塑成形中, 板坯法兰部位被模具压紧不参与变形, 材料得不到外部的补充, 因此制件会不可避免的产生厚度减薄、分布不均匀的情

收稿日期: 2008-05-15.

作者简介: 蒋少松 (1978—), 男, 博士;

张凯锋 (1951—), 男, 教授, 博士生导师.

况.壁厚分布均匀性是板材超塑性成形技术研究的一个重要方面,尤其是应用于航空、航天、卫星上的零件对壁厚分布均匀性的要求非常高.正反向超塑成形利用反向胀形预先对板料进行预成形,分散变形,然后再正向加压胀成凹模形状,从而起到使板料不同部位变形均匀的作用,是改善成形零件厚度分布的一种有效的工艺方法^[3-6].本文采用 MSC. MARC 有限元分析软件,以正反向超塑成形 TC4 钛合金深筒形件为背景,分别研究了预成形模具和终成形模具的不同摩擦条件对成形件壁厚分布的影响规律.根据模拟结果对模具表面进行加工、处理以改变其摩擦力,并通过正反向超塑成形实验对模拟结果进行了验证.

1 有限元模拟

有限元数值模拟在超塑成形中应用广泛,它不仅节约费用,而且能提供直接的信息和工艺引导,从而达到减少实验的次数目的,有时甚至能省略试探性的实验^[7-9].本文采用 MSC. MARC 有限元分析软件对超塑成形后工件的厚度分布进行分析预测.TC4 筒形件要求侧壁厚度分布在 1.6 ± 0.2 mm 之间,且原材料为厚度 3.3 mm,直径

600 mm 的圆形板料.根据计算可知其侧壁体积约占变形区板料体积的 90%,由于法兰部分及底部最终需要切除,因此可以通过大量减薄底部板料从而增加侧壁板料体积.鉴于此,正反向超塑成形 TC4 深筒形件的预成形模和终成形模的有限元模型设计如图 1 所示.采用 MARC 有限元分析软件中的超塑性成形模式建立模型,所用的材料特性和原始参数如表 1 所示.为了节省计算量,取模型的 1/4 进行计算.板料模型为 1/4 圆形,半径 300 mm,采用四节点厚壳单元.与其它类型壳单元相比,该类单元稳定性好,精度较高,计算量适中.板料共划分为 1 434 个单元,变形量较大的地方进行了单元加密.

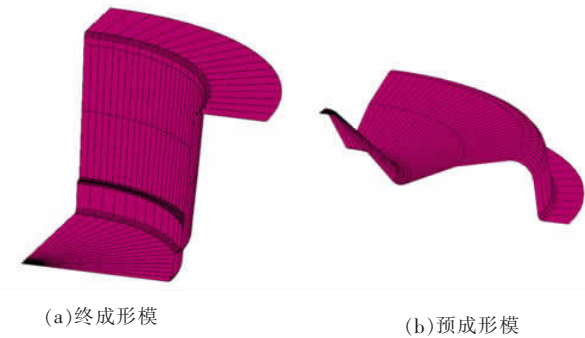


图 1 有限元模型

表 1 材料特性和有限元模拟参数

材料	本构关系	目标应变速度/s ⁻¹	摩擦模型	成形压力极限/MPa	原始板料直径/mm	目标厚度分布/mm
TC4 钛合金	$\sigma_f = 1030 \varepsilon_{eq}^{0.61}$	5×10^{-4}	双线性库仑模型	1.0	600/3.3	1.6 ± 0.2

正反向超塑成形时板料的变形过程如图 2 所示,首先进行预成形(①-③),即反方向加压,板料向预成形模方向运动.预成形结束后开始终成形(④-⑥),即正向加压,板料向终成形模运动,

贴模后即得到所需形状工件.
1.1 预成形模具摩擦系数对工件厚度分布的影响
为了研究预成形模具的摩擦力对厚度分布的影响规律,分别采用不同的摩擦条件进行超塑成

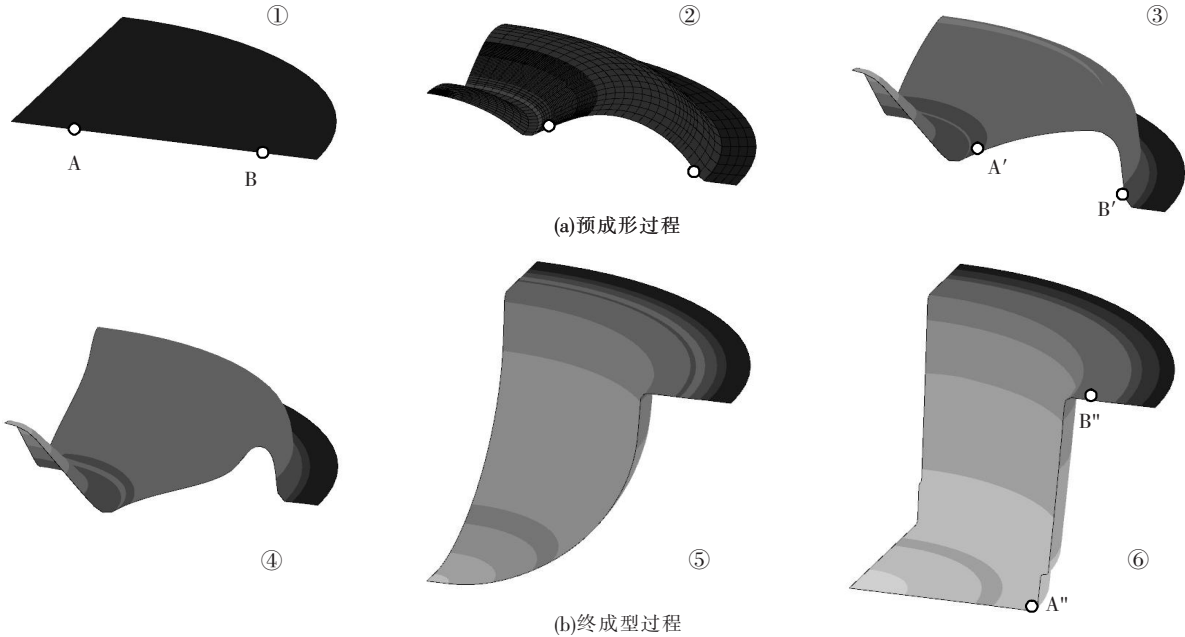


图 2 有限元模拟正反向超塑成形过程

形的有限元模拟,然后将成形工件的最终厚度分布相比较.在图2中,①原始板料上的A-B区域预成形后变为③中的A'-B'区域,终成形后变为⑥中的A''-B''区域,即侧壁区域.由于文中的深筒形件要求侧壁厚度分布为 1.6 ± 0.2 mm,因此侧重研究这一区域的厚度分布变化.

将终成形模具的摩擦系数固定为0.1,预成形模的摩擦系数分别取0(自由滑动),0.1,0.3,0.577(典型摩擦)和粘附摩擦状态,有限元数值模拟后,不同摩擦条件下的A'-B'区域和A''-B''区域的节点厚度分布结果如图3所示.

预成形模具表面摩擦系数 $\mu = 0$ 时,成形件侧壁厚度从上到下基本呈线性递减状态,厚度变化快,且侧壁最薄处(0.952 mm)与最厚处(2.453 mm)差距较大,厚度变化起伏剧烈.这是因为板料在反胀时呈自由滑动状态,变形是通过板料整体的减薄来增

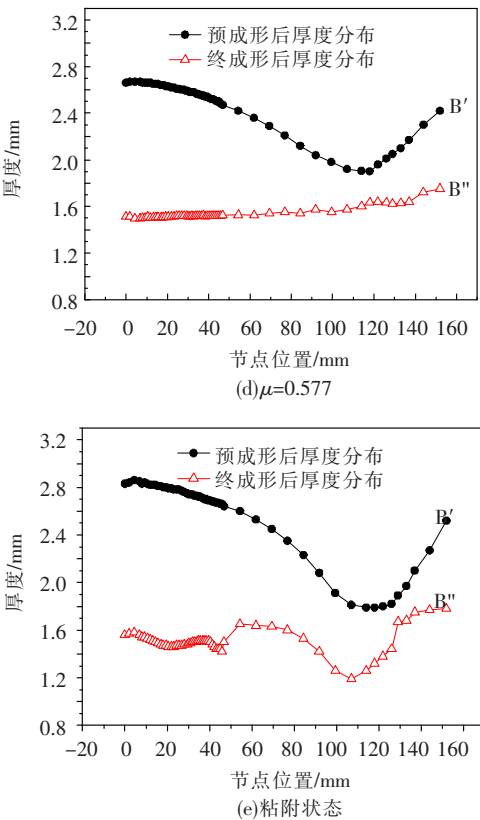
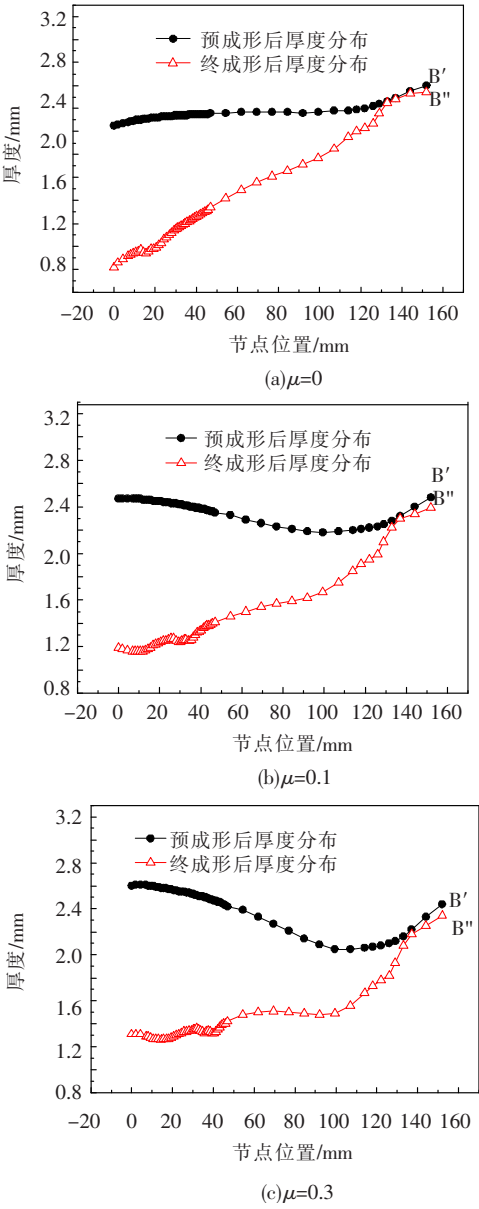


图3 预成形模摩擦系数对最终成形厚度分布的影响

大面积的,因此预成形后板料厚度变化不大(2.25 ~ 2.6 mm),需要减薄的区域减薄程度很低,预成形效果不明显.当摩擦系数 $\mu = 0.1$ 时,相对于 $\mu = 0$ 时,预成形后板料厚度变化有了些许改进,最薄处与最厚处差距增大(2.18 ~ 2.47 mm),厚度区间变小,最薄处(1.19 mm)与最厚处(2.39 mm)厚度差距也变小. $\mu = 0.3$ 时,预成形后板料厚度分布呈现一定的梯度变化(2.05 ~ 2.6 mm),比 $\mu = 0.1$ 时有了较大的改善,侧壁最薄处(1.16 mm)与最厚处(2.22 mm)厚度差距变小,且整体厚度变化起伏有所缓和.当表面摩擦系数增加到 $\mu = 0.577$ 时,预成形后板料的厚度分布梯度变得更大(1.9 ~ 2.66 mm),需要减薄的区域的板料得到了合理的减薄.终成形后侧壁厚度分布整体均匀,且侧壁最薄处(1.498 mm)和最厚处(1.753 mm)差距很小.当预成形模具表面为粘附摩擦状态时,板料贴膜后即不再产生滑动,这就使得预成形后板料厚度分布梯度过大,导致侧壁某些部分预减薄过度.因此在终成形过程中,由于这些区域变形抗力小,大部分的变形发生在该区域,因此最终导致侧壁从上到下忽厚忽薄,厚度分布更加不均匀.

1.2 终成形模具摩擦系数对工件壁厚分布的影响

为研究终成形模具表面摩擦力对厚度分布的影响,将预成形模具表面摩擦系数设定为0.577,

终成形模具的摩擦系数分别取 $\mu = 0, 0.3, 0.577$, 进行正反向超塑成形的有限数值模拟后, 厚度分布曲线如图 4 所示. 由图 4 可知, 终成形件侧壁最厚处 (1.525 mm) 与最薄处 (1.703 mm) 差距很小, 厚度基本均匀. 这是因为由于终成形模具表面摩擦系数 $\mu = 0$, 因此板料在终成形时与模具接触后处于自由滑动状态, 贴模后依然会产生流动, 从而发生整体变形, 不会产生局部减薄. $\mu = 0.3$ 时, 由于摩擦力的增大, 板料在终成形时与模具接触后只产生很小的流动, 变形主要是通过未贴模处的减薄来获得, 这就导致侧壁下端发生减薄, 分布不均匀.

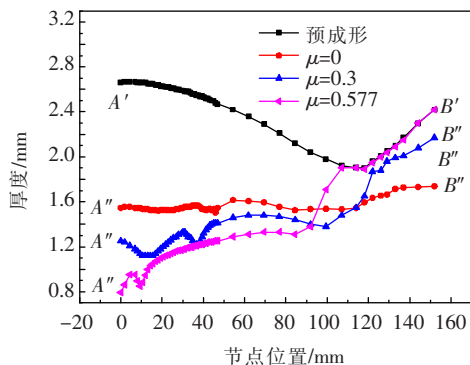


图 4 终成形模摩擦系数对厚度分布的影响

$\mu = 0.577$ 时, 由于摩擦力的进一步增大, 板料贴模后不再发生流动, 因此后贴模的局部减薄更加严重, 造成侧壁下端厚度变小. 通过对比可明显看到, 小的终成形模摩擦力有利于 TC4 深筒形件侧壁厚度分布的均匀化. 这是因为终成形模具摩擦力小, 可以使终成形过程中板料贴模后依然产生一定的流动, 从而导致板料变形趋向于整体变形, 侧壁厚度趋向于均匀.

2 变摩擦正反向超塑成形 TC4 深筒形件实验

根据有限元模拟结果可知, 合理地增大预成形模具表面摩擦系数, 减小终成形模具表面摩擦系数, 有利于深筒形件的侧壁厚度均匀化. 以正反向超塑成形厚度均匀的 TC4 钛合金深筒形件为背景, 对有限元模拟结果进行了验证. 通过机械加工方法在预成形模具表面上加工一系列微小的凹槽来增加摩擦, 以使预成形局部预减薄更有效. 通过在终成形模具的表面喷涂 BN 陶瓷粉的方法减小摩擦, 以使整体变形更均匀. 变摩擦正反向超塑成形示意图如图 5 所示, 以 $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率加热至 $925\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温 60 min 后开始成形, 并进行预成形, 即在下模型腔内加压, 使得板材向上模的方向变形, 确定完全贴模后保压 30 min . 卸掉下模

型腔压力后, 开始进行终成形, 即在上模型腔加压, 使得板材向下模方向变形, 贴模后零件的形状尺寸为所需尺寸. 确定完全贴模后试验结束, 工件随炉冷却至室温.

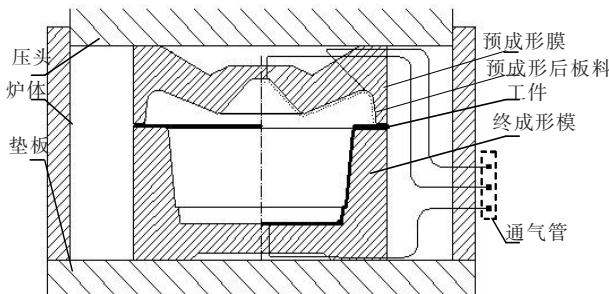


图 5 变摩擦正反向超塑成形示意图

正反向超塑成形的 TC4 深筒形件如图 6 所示, 为了解工件侧壁厚度分布情况, 将其侧壁切开后进行测量, 并与普通正反向超塑成形的工件切面厚度分布 (图 7) 进行比较. 可知, 变摩擦正反向超塑成形深筒形件的厚度分布在 $1.50 \sim 1.78\text{ mm}$ 之间, 基本均匀, 与预成形模 $\mu = 0.577$, 终成形模 $\mu = 0.1$ 时的有限元模拟结果 ($1.498 \sim 1.753\text{ mm}$) 接近. 普通正反向超塑成形工件的厚度在 $1.18 \sim 2.24\text{ mm}$ 之间, 很不均匀, 与预成形模具表面摩擦系数 $\mu = 0.1$, 终成形模 $\mu = 0.1$ 时的模拟结果 ($1.19 \sim 2.39\text{ mm}$) 接近. 根据区域①-⑩的厚度分布可知, 变摩擦正反向成形工件的厚度分布基本趋于均匀, 而普通正反向成形工件的厚度分布不均匀. 在区域①-⑥部分, 前者的厚度均小于后者的厚度. 而在区域⑥-⑩部分, 前者的厚度大于后者. 这是因为在增大预成形模具表面摩擦系数后, 贴模较早的部分 (①-⑥) 在预成形后得到了极大的预减薄, 因此其厚度小于普通正反向成形. 而终成形时由于该部分由于变形抗力小, 且模具表面摩擦力减小, 因此趋于整体变形. 这就使得原本在终成形过程中不断减薄的区域 (⑥-⑩) 的减薄量变小, 因此最终壁厚基本均匀. 图 8 为去除法兰及底部后的 TC4 钛合金深筒形航天用件.



图 6 带法兰及底部的 TC4 深筒形件

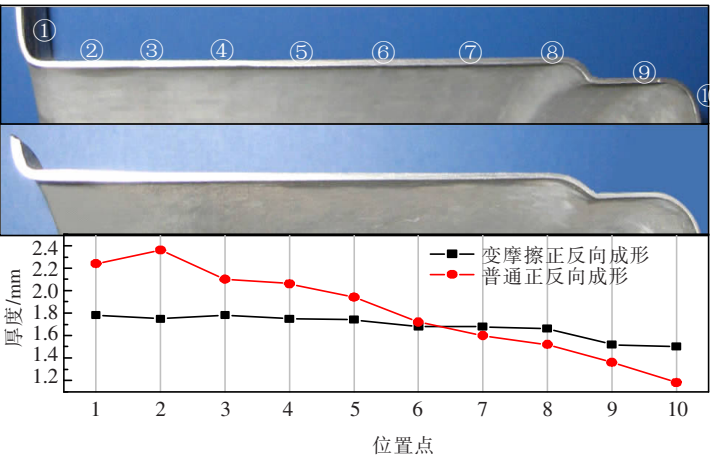


图 7 变摩擦正反向与普通正反向超塑成形的 TC4 深筒形件切面厚度比较

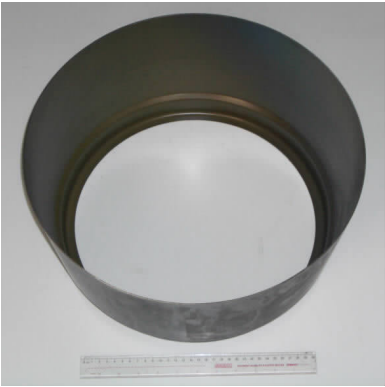


图 8 厚度均匀的航天用 TC4 深筒形件

3 结 论

1)合理地增大预成形模具表面摩擦系数,预成形后板料厚度分布呈现明显的梯度变化,预减薄区域局部减薄效果显著.终成形后深筒形件侧壁最薄处和最厚处差距很小,且整体厚度起伏不大,分布趋于均匀.

2)减小终成形模具表面摩擦力,可以使终成形过程中板料贴模后依然产生一定的流动,从而导致板料变形趋向于整体变形.因此终成形结束后深筒形件侧壁厚度基本呈均匀状态.

3)根据变摩擦正反向超塑成形实验可知,与普通正反向超塑成形工件的厚度分布(1.18 ~ 2.24 mm)相比,变摩擦正反向超塑成形的 TC4 深筒形件厚度分布更加均匀,达到了 1.50 ~ 1.78 mm 的范围,完全符合 1.6 ± 0.2 mm 的精度要求.

参考文献:

[1] BONET J, GIL A, WOOD R, *et al.* Simulating superplastic forming[J]. *Computer Methods Applied Mechanics and Engineering*, 2006, 195 (48/49): 6580 – 6603.

[2] WANG G C, FU M W. Maximum m superplasticity deformation for Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 192 – 193: 555 – 560.

[3] ZHANG K F, WANG G F, WU D Z, *et al.* Research on the controlling of the thickness distribution in superplastic forming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 151 (1/3): 54 – 57.

[4] XING H L, ZHANG K F, WANG Z R. A preform design method for sheet superplastic bulging with finite element modeling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 151 (1/3): 284 – 288.

[5] 王中阳,王国峰,赖小明,等. 控制厚度分布的正反向超塑成形的有限元分析[J]. *材料科学与工艺*, 2004, 12(3): 279 – 282.

[6] 芮玉龙,张益华,陈明和,等. 半球形 Al-Mg-Sc 合金超塑成形壁厚分布的有限元分析[J]. *模具工业*, 2006, 32(9): 20 – 23.

[7] TAO J, KEAVEY M A. Finite element simulation for superplastic forming using a non-Newtonian viscous thick section element [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 147(1): 111 – 120.

[8] CHEN Y, KIBBLE K, HALL R, *et al.* Numerical analysis of superplastic blow forming of Ti – 6Al – 4V alloys [J]. *Materials and Design*, 2001, 22 (8): 679 – 685.

[9] LI GY, TAN M J, LIEW K M. Three-dimensional modeling and simulation of superplastic forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 150(1/3): 76 – 83.

(编辑 张 红)