

TC4 半环超塑正反胀形工艺研究

微 石, 阴中炜, 高 鹏, 张绪虎

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

摘 要: 对钛合金半环的超塑成形技术进行了工艺研究。采用正反胀形方法来控制成形后半环的壁厚, 并通过数值模拟手段, 对壁厚控制的关键即正反胀形模具型面进行了优化设计, 同时进行了试验验证。结果表明数值模拟数据较好的预测了超塑成形后的半环壁厚分布, 利用优化后的正反胀形模具实现了半环试验件的壁厚均匀化。该方法能够明显提高材料利用率和后续车加工效率, 并降低制造成本。

关键词: TC4; 半环; 正反胀形

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)S1-139-06

随着航空航天工业的发展, 钛、钛合金及其金属间化合物等材料, 由于其轻质、高强、耐高温的特点, 越来越多的在一些弹体、箭体的重要承载结构上得到了实际应用。传统成形工艺由于其加工手段落后, 成形精度差, 效率低下, 已经难以完全满足钛合金材料的制造工艺需求。而超塑成形技术作为一种先进塑性加工手段, 其优势巨大, 特别适合于加工具有复杂结构特点的钛合金结构件, 迎合了未来航空航天产品的制造需求。采用该工艺制造的钛合金翼舵面、舵段、贮箱、气瓶等在航空航天领域已经得到初步应用^[1-3]。

钛合金板材在超塑成形时, 为了保证密封性, 一般板材的压边区域是固定不动的, 因此板材在胀形过程中不同于传统冲压工艺, 其压边区域一般不存在流动, 板材在变形时面积的增大会对其厚度造成明显的减薄, 由于胀形过程板材自身各处应力状态不一致, 与模具接触的状态也不一致, 因此其壁厚减薄率差异也较大, 局部可能会存在厚度偏低的情况, 无法满足后续工艺要求。为了控制板材超塑胀形后的壁厚分布状态, 可以采用很多方法, 例如预加工法、动凸模法、正反胀法等^[4]。其中正反胀工艺应用最为广泛。

钛合金环形气瓶是弹体上常用的压力容器, 它一般由上下半环以及管嘴组焊而成, 其中上下半环属于双曲面结构, 采用传统工艺成形困难且精度低。国内有单位对 TC4 半环的超塑成形技术进行过研究, 但采取的是单向胀形方法, 没有对壁厚采取有效的控制措施^[5]。会造成材料利用率及生产效率的降低, 增加制造成本。

1 试验方案

1.1 零件结构特点

某 TC4 钛合金半环如图 1 所示, 该半环属于双曲面薄壳结构, 壳体各处壁厚要求 $4^{+0.3}$ mm, 外缘直径 651.3 mm, 内缘直径 388.7 mm, 回转圆直径 131.2 mm。

1.2 反胀型面设计

超塑正反胀形的实质是在反胀时, 通过反胀模具 (一般是上模具) 的特殊结构, 来控制板材各个部位与模具接触的时间、面积, 并依靠两者之间的摩擦力来抑制其在超塑过程中的变形, 使板材的壁厚预先达到一个合理的状态, 再进行正胀, 从而来改善最终零件各处的壁厚分布的一种方法^[6,7]。因此, 正反胀形的模具设计, 尤其是反胀模具设计是保证壁厚控制效果的关键。

这里采用了数值模拟的手段进行模具设计及优化, 在设计反胀模具前, 需要了解板材在一般单向胀形后, 所得到的零件壁厚分布状态, 并以此作为依据, 来设计反胀模具。根据半环尺寸建模后, 进行单向胀

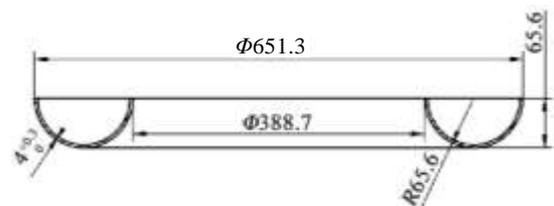


图 1 TC4 半环零件外形尺寸

Fig.1 Boundary dimension of the TC4 semi-annular part

收稿日期: 2016-12-18

作者简介: 微 石, 男, 1984 年生, 硕士, 高级工程师, 航天材料及工艺研究所, 北京 100076, 电话: 010-68383316

形的数值模拟，模拟参数设置如表 1，原始毛坯半径 $\Phi 350$ mm。完成的模拟结果如图 2。

由图 2 可知，原始板材经超塑变形后，最薄处出现在成形区内环附近，最厚处为压边外沿及圆台区芯部。对于该零件，其厚度减薄主要集中在半环成形区，并且成形区内环处应力最大、变形最剧烈，因此减薄最明显。而在圆台区，由于材料受到成形区的应力牵引，也会发生一定的径向流动，越靠近成形区，流动越大，变形越多，因此圆台区的壁厚由中心向边缘逐渐减薄。

从材料中心到边缘，壁厚的变化趋势如图 3 所示。圆台区的壁厚较厚均在 7 mm 以上，且变化较小；由圆台区向成形区过渡时，在过渡的圆角处有一个壁厚的陡降，从 7 mm 降至 4.2 mm 左右；成形区内环最小壁厚约 4.2 mm，随着向外环过渡，壁厚先是快速上升至 5 mm 左右，然后缓慢上升至 5.2 mm，最后又快速上升至 6.4 mm 左右。整个成形区壁厚差异约 2.2 mm。

由于半环在超塑后，要经过精车加工以保证最终的表面质量和壁厚精度，因此对于图 1 要求的半环尺寸，显然内环处壁厚余量不足。要满足后续精车加工的工艺需求，要求超塑后半环毛坯最小壁厚要 ≥ 5 mm，以保证内外精加工余量充足，因此单向胀形方法不能满足工艺要求。虽然可以通过增加原始板厚（经

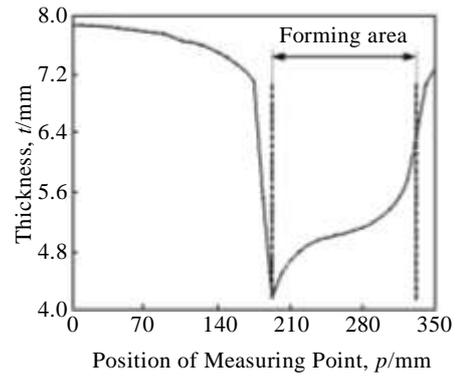


图 3 单向成形仿真壁厚分布曲线

Fig.3 Thickness distribution curve of direct SPF simulation

过计算，至少增加到 10 mm) 的方法来补偿成形后的内环壁厚，但会造成材料的浪费，增加材料成本、降低后续加工效率。

为了提高壁厚的均匀性，并增加内环壁厚，需采用正反胀形工艺来改善半环的壁厚分布。反胀模具一般的设计原则是将板材单向胀形较厚处对应的材料预先拉薄，根据图 2，板坯单向胀形后芯部和外环较厚，因此主要在该两处进行反向预成形。

图 2 中心区域虽然最厚，但其离成形区过远，对其进行反向预成形不会明显影响成形区的壁厚分布。因此只在离成形区较近的圆台区域，设计反胀型面，如图 4 所示 A 区。将该处拉薄后正胀时，由于表面积增大，变形抗力减少，会明显提高圆台区 B 处的材料向成形区的流动性，从而对内环处壁厚的增加会有明显的改善作用。但要注意 B 的宽度不宜过窄，否则会造成被拉薄的圆台区材料直接流入成形区，适得其反。C 处为成形区对应的材料位置，因此不对其进行反胀减薄。D 处对应成形区的外环，由图 2 可知，该处较厚，因此对该处进行反胀，同样有利于正胀时内环壁厚的提升。

反胀型面的具体尺寸优化要经过反复的有限元计算后才能确定，本文通过大量的有限元计算，最终确定了反胀型面的尺寸，反胀后的仿真计算结果如图 5 所示。由图 5 可知，反胀后 A 处所对应板坯壁厚被拉

表 1 数值模拟参数

Table 1 Numerical simulation parameters

Thickness/mm	Element types	M	Target strain rate	Friction coefficient
8	Four node shell	0.61	0.0005	0.3

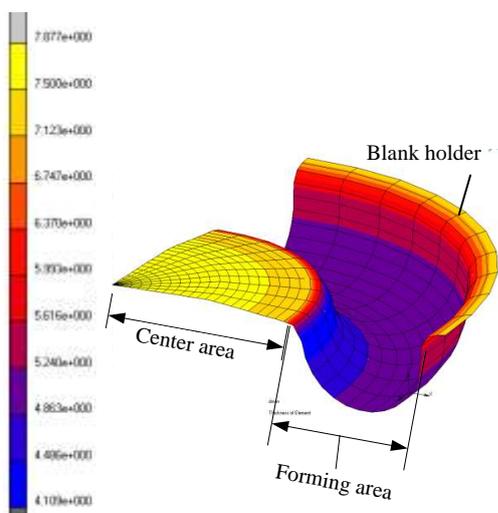


图 2 单向成形仿真壁厚分布结果

Fig.2 Thickness distribution result of direct SPF simulation

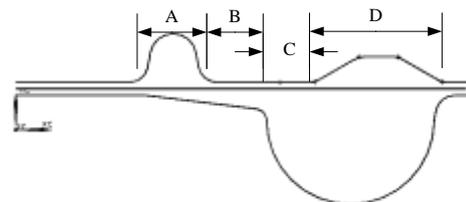


图 4 反胀型面曲线结构设计

Fig.4 Design of the reverse die surface curve structure

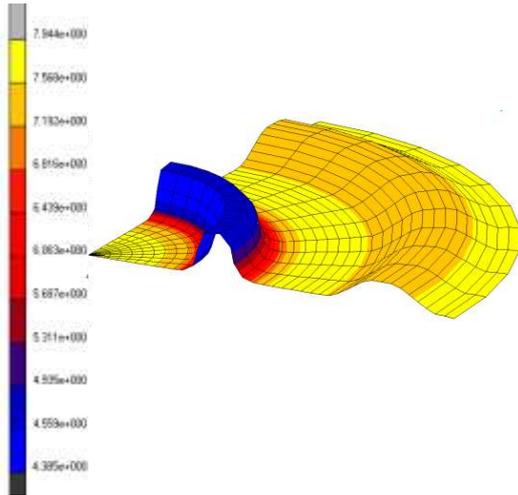


图 5 反胀成形后壁厚分布结果

Fig.5 Thickness distribution simulation result of reverse SPF

薄至 4.1 mm 左右, D 处对应板坯壁厚降低至 7 mm 左右。其余位置由于没有设计反胀型面, 因此基本壁厚没有降低。反胀后正胀的壁厚分布结果见图 6。由图可知, 由于圆台区材料的有效流动补偿以及外环处被减薄后变形量的增加, 使得成形区内环处壁厚有明显提升, 且整个成形区壁厚更加均匀。圆台区靠近成形区的位置, 由于反向拉伸和对成形区内环的大量流动补偿, 使得该处壁厚有明显的减薄。外环相对于单向胀形也有一定程度的减薄, 但这种减薄提高了均匀性, 是对产品的后期加工有利的。

正反胀形后板坯径向壁厚分布曲线见图 7。由图可知, 正反胀形后, 圆台区芯部壁厚由于没有经过反

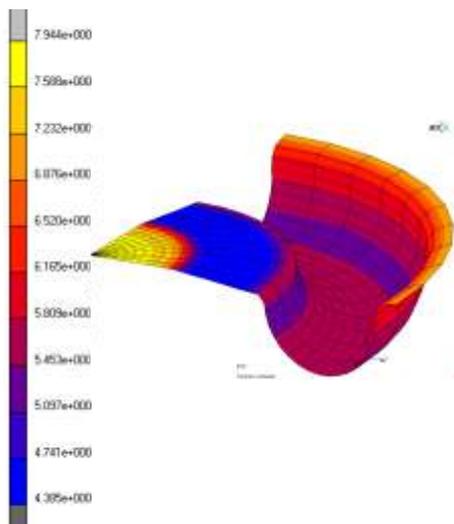


图 6 反胀后正胀成形壁厚分布结果

Fig.6 Thickness distribution simulation result of direct SPF after reverse SPF

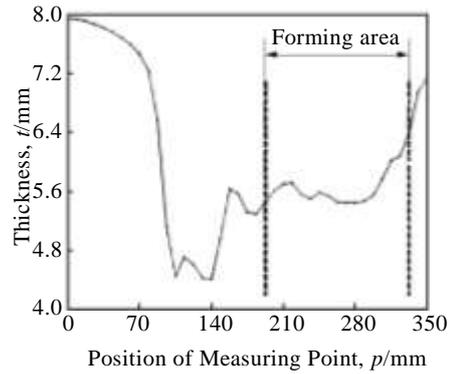


图 7 正反胀形仿真壁厚分布曲线

Fig.7 Thickness distribution curve of direct-reverse SPF simulation

胀, 仍然较厚, 为 7 mm 以上, 但在靠近成形区的位置, 由于反胀的作用, 壁厚有一个陡降, 壁厚为 4.4 mm 左右, 在过渡圆角处, 壁厚突然上升至 5 mm 左右。整个成形区, 壁厚得到明显改善, 最小壁厚在内环处约 5.3 mm, 成形区外环壁厚仍然有一个较明显的上升, 最大约 6.4 mm, 成形区壁厚差异缩小至 1 mm 左右。壁厚均匀性有了显著提升。

综上可知, 采用正反胀形方法, 使用优化后的反胀型面, 能够很好的改善产品的壁厚分布, 后续试验将以该反胀型面为基础设计反胀模具。

1.3 成形压力曲线设计

超塑成形压力曲线是保证成形质量的关键, 一方面要保证板材变形时处于理想的超塑应变速率区间 (一般在 $10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), 使材料在成形时能够达到足够的延伸率; 另一方面还要尽量降低成形时间, 防止晶粒过于粗大, 影响材料成形后的机械性能。

成形压力曲线可以以模拟结果为基础进行优化, 本试验采用优化后的正反胀形方法作为最终方案, 其中压力曲线的模拟结果如图 8a 所示。

由图 8a 可知, 反胀过程中压力要大于正胀, 这是因为反胀型面深宽比较大, 且已经使材料发生了足够的延展变形量, 材料翻转后正胀时, 只需较小的成形压力即可完成与模具的贴合。反胀最大压力约 4 MPa, 正胀最大压力约 3 MPa, 在正反胀达到最大压力时, 均有 10 min 左右的保压时间。

根据模拟曲线设计的设计气压曲线如图 8b 所示, 由于实际在进气时, 设备测压点在进气口处, 气体在流动时, 模具内部的压力往往会相对于进气口处较小, 测量值比实际压力偏大, 因此在进气时, 压力曲线相对于模拟结果平均值较高, 进气速度较快。而保压时由于气体基本不流动, 各处压力一致, 因此保压最大

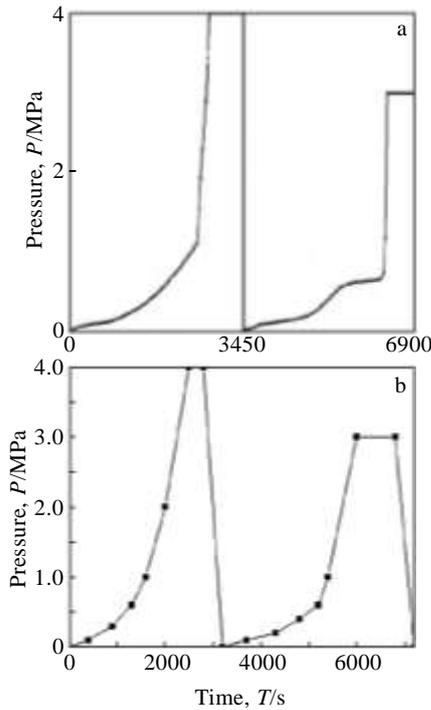


图 8 气压曲线设计

Fig.8 Pressure curves design: (a) simulation curve and (b) actual curve

压力与模拟结果设定一致。此外，反胀对贴膜精度要求不高，而正胀要求较高，因此实际曲线增大了正胀保压时间，降低了反胀保压时间。

2 实验

2.1 试验材料及设备

试验采用的材料是厚度为 8.0 mm 的 TC4 钛合金板材，其名义成分为 Ti-6Al-4V，化学成分如表 2 所示。

TC4 属于 $\alpha+\beta$ 的等轴马氏体双相合金，显微组织如图 9 所示，平均晶粒尺寸不大于 15 μm ，满足钛合金超塑成形的组织条件。

试验模具材料为耐高温铸钢，以仿真模型为依据设计模具，上模具为反胀模具，下模具为终成形模具。试验设备为 703 所的 FSP-800 型超塑成形机。最高成形温度 1000 $^{\circ}\text{C}$ ，平台尺寸 2100 mm \times 2300 mm \times 1000 mm（长 \times 宽 \times 高），高温时温控精度可达 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，具有 4 条可编程气路，最大气压 4 MPa，控压精度 0.01 MPa，最大成形吨位 800 t。

表 2 TC4 试验材料化学成分 ($\omega/\%$)

Table 2 Chemical composition of TC4 experiment material							
Al	V	C	N	H	O	Fe	Ti
6.22	4.49	0.05	0.006	0.0013	0.18	0.22	Bal.

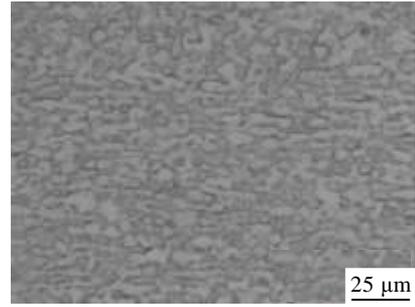


图 9 TC4 试验材料原始显微组织

Fig.9 Original microscopic structure of TC4 experiment material

试验使用两条成形气路，一条正胀，一条反胀。设定执行程序的温度为 910 $^{\circ}\text{C}$ ，升温速率 60 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，在入炉前需要在上下模具型面涂覆止焊剂，一方面有利于最终产品脱模，另一方面能够在一定程度上保护模具。升温过程中在板坯与模具形成的上下空腔内部持续打入 0.01 MPa 的氩气，以形成保护气氛，有利于板坯和模具的防护。

2.2 试验结果分析

TC4 半环正反超塑成形试验结果如图 10 所示，从外观看试验件成形良好，半环成形区成形饱满，无局部不贴膜现象。采用超声测厚仪对产品壁厚进行了测量，成形区环向壁厚差异在 $\pm 0.2\text{ mm}$ 左右。

成形区径向的壁厚分布数值见图 11。由图可知，试验结果与模拟结果的壁厚分布趋势基本吻合，但试验件的反胀效果更明显，成形区壁厚偏大。初步分析，一方面是由于实际成形时在板坯与模具发生相对滑动的位置处，止焊剂会局部脱落，造成该处随着滑动的进行摩擦系数不断增加，流动性变差，使得反胀时壁厚减薄更明显。另一方面可能是由于板坯本身壁厚存在误差，8 mm 的板材一般厚度均为上差，因此板坯的各处壁厚一般大于 8 mm。但从整体看，这种偏差有利

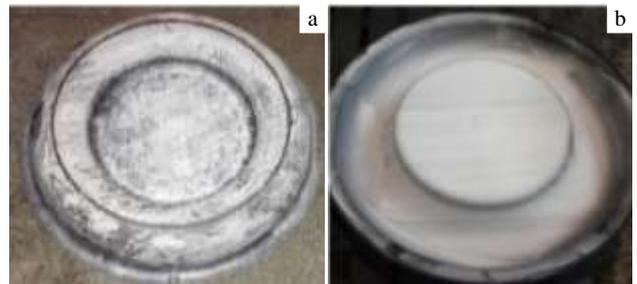


图 10 正反胀形得到的半环毛坯件

Fig.10 Semi-annular blank part after forming by direct-reverse SPF process: (a) convex side and (b) concave side

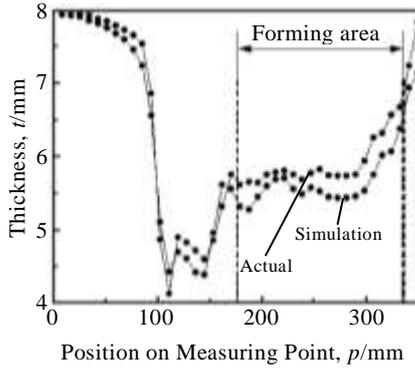


图 11 实际壁厚分布与模拟结果对比

Fig.11 Thickness comparison of actual curve and simulation curve

于最终产品的加工, 成形达到了试验目的, 实现了对产品壁厚的有效控制。

超塑后的材料显微组织见图 12, 晶粒有明显长大, 但仍然为等轴晶, 满足 TC4 组织要求。本实验对超塑后的材料性能也进行了性能测试(表 3), 数据同样满足 TC4 标准要求, 力学性能损失得到了有效控制。

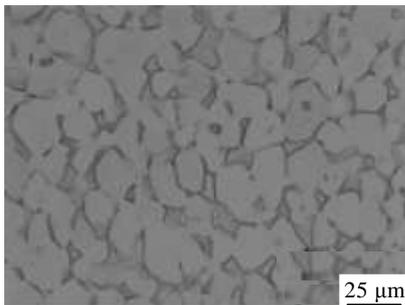


图 12 超塑后材料显微组织

Fig.12 Microscopic structure of TC4 material after SPF

表 3 超塑后 TC4 力学性能(圆台区)

Table 3 TC4 mechanical properties after SPF(center area)			
Mechanical properties	No.1	No.2	No.3
R_m /MPa	956	967	944
$R_{p0.2}$ /MPa	877	866	876
A /%	13.7	15.5	14.0

2.3 应用实例

采用该方法进行了某型号 TC4 环形气瓶产品半环零件的研制(图 13), 所研制的超塑半环毛坯在壁厚环向控制误差达到 ± 0.2 mm、径向控制误差达到 ± 0.3 mm, 保证了后续加工时各处余量稳定、分布合理。该产品已经成功通过各项考核试验, 得到了型号正式批量化应用。



图 13 采用正反胀形方法制造的 TC4 半环及环形气瓶产品
Fig.13 TC4 semi-annular part and annular gas tank developed by direct-reverse SPF process

除半环产品, 正反胀形方法还可以推广到钛合金半球壳体等其它钛合金薄壁壳体件的制造。例如 703 所采用正反胀形工艺研制成功的大尺寸钛合金贮箱半球壳体(图 14)也已经得到型号批量应用。

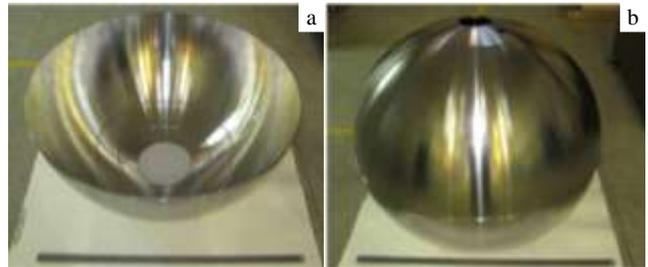


图 14 采用正反胀形研制的大尺寸钛合金球形贮箱
Fig.14 TC4 large size spherical tank developed by direct-reverse SPF process

3 结 论

1) 对 TC4 钛合金半环单向胀形过程进行了数值模拟, 预测了成形后的壁厚分布。单向胀形壁厚差异较大, 且内环壁厚过薄, 不适宜采用该工艺直接制造钛合金半环毛坯;

2) 对 TC4 钛合金半环正反胀形过程进行了数值模拟, 并对反胀模具型面、气压参数曲线进行了优化设计。正反胀形得到的壁厚分布明显优于单向胀形;

3) 以模拟为基础进行了半环产品的正反胀形成形试验, 所成形的半环毛坯满足工艺要求, 验证了计算结果的正确性和工艺参数的可行性, 并采用该工艺, 进行了某型号环形气瓶产品的研制, 进一步验证了工艺可靠性, 并推广到了某型号大尺寸半球的制造。

参考文献 References

[1] Hou Hongliang(侯红亮), Wang Yaoqi(王耀奇), Li Xiaohua(李

- 晓华) *et al. Machinist Metal Forming*(金属加工: 热加工)[J], 2008, (13): 22
- [2] Li Zhiqiang(李志强), Guo Heping(郭和平). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2010 (8): 32
- [3] Ding Xinling(丁新玲), An Mengchang(安孟长). *Aerospace Manufacturing Technology*(航天制造技术)[J], 2009, 2(1): 3
- [4] Zhang Kaifeng(张凯峰), Wang Guofeng(王国峰). *Advanced Material SPF Technology*(先进材料超塑成形技术)[M]. Beijing: Science Press, 2012
- [5] Wang Mingkun(王明坤), Zhang Shuo(张朔), Ding Quan(丁泉) *et al. Aerospace Manufacturing Technology*(航天制造技术)[J], 2002, 2(1): 34
- [6] Zhang K F, Wang G F, Wu D Z *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 151(1/3): 54
- [7] Wang Zhongyang(王中阳), Wang Guofeng(王国峰), Lai Xiaoming(赖小明) *et al. Material Science and Technology*(材料科学与工艺)[J], 2004, 12(3): 279

Direct-Reverse SPF Process for TC4 Semi-Annular Part

Wei Shi, Yin Zhongwei, Gao Peng, Zhang Xuhu

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: SPF process for titanium semi-annular part was researched. A direct-reverse SPF process was used for controlling the thickness of the semi-annular part after forming, and the SPF forming die as the key for the thickness control was designed and optimized by a numerical simulation method. Verification experiment was conducted for a TC4 semi-annular part. The result show that the actual thickness distribution of the part can be well predicted by the numerical simulation, and the thickness of the part is homogenized by the optimized SPF forming die. This process can improve material utilizing rate and efficiency of subsequent turning operation obviously, and reduce total manufacturing costs.

Key words: TC4; semi-annular part; direct-reverse SPF

Corresponding author: Wei Shi, Senior Engineer, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, P. R. China, Tel: 0086-10-68383316, E-mail: 15010320811@163.com