

Ti6Al4V 钛合金盒形件热拉深成形

郭文平¹, 施立军^{2,3}, 曹江⁴, 张邦¹, 孙桂川², 方刚³

(1. 贵州永红航空机械有限责任公司, 贵州 贵阳 550009; 2. 苏州伍玥航空科技有限公司, 江苏 太仓 215400;
3. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 4. 空装成都局驻贵阳地区第三军代室, 贵州 贵阳 550009)

摘要: 在分析 Ti6Al4V 钛合金板料热成形性能的影响因素的基础上, 通过有限元仿真指导钛合金板的实际热成形零件工艺开发。首先, 在钛合金板热单拉实验的基础上, 总结温度和平均应变速率对 Ti6Al4V 钛合金的流动应力、成形极限及板厚方向性系数的影响。然后, 根据盒形件的几何特征, 通过有限元仿真, 分析了影响盒形件成形的 3 个因素, 即成形温度、平均应变速率和板料方向, 并获取最佳成形参数。最后, 参考仿真得到的最佳成形参数, 并根据实际成形效果进行微调, 完成了盒形件的拉深成形。零件最终成形效果及零件减薄率与有限元仿真结果基本一致, 证明有限元仿真能较准确地反映零件的实际成形状态, 对确定盒形件热拉深的合理工艺条件具有显著的指导意义。

关键词: Ti6Al4V 钛合金; 热拉深; 盒形件; 减薄率; 成形性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.012

中图分类号: TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 12-0087-07

Hot drawing on Ti6Al4V titanium alloy box-shaped parts

Guo Wenping¹, Shi Lijun^{2,3}, Cao Jiang⁴, Zhang Bang¹, Sun Guichuan², Fang Gang³

(1. Guizhou Yonghong Aviation Machinery Co., Ltd., Guiyang 550009, China;

2. Suzhou Wuyue Aviation Technology Co., Ltd., Taicang 215400, China;

3. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. The Third Military Generation Office of Chengdu Bureau in Guiyang, Guiyang 550009, China)

Abstract: Based on the analysis of the factors affecting the hot forming performance of Ti6Al4V titanium alloy sheet, the process development of actual hot forming parts was guided by finite element simulation. Firstly, based on the hot uniaxial tensile experiment, the influences of temperature and average strain rate on flow stress, forming limit and thickness directivity coefficient of Ti6Al4V titanium alloy sheet were summarized. Then, according to the geometrical characteristics of box-shaped parts, the three factors affecting the forming of box-shaped parts, namely, forming temperature, average strain rate and sheet direction, were analyzed by finite element simulation, and the optimal forming parameters were obtained. Finally, referring to the optimal forming parameters obtained by the simulation, the fine-tuning was conducted according to the actual forming effect, and the deep drawing of box-shaped part was completed. The results show that the final forming effect and the thinning rate of part are basically consistent with the results of finite element simulation, which proves that the finite element simulation can reflect the actual forming state of part accurately. Thus, it is significant to determine the reasonable process conditions for the hot drawing of box-shaped parts.

Key words: Ti6Al4V titanium alloy; hot drawing; box-shaped parts; thinning rate; forming performance

在钛合金的应用中, 板料成形尤其是薄板成形一直是成形领域的难点。因为钛合金在室温下的成形性能较差, 为了提高材料的成形性能, 往往需要对钛合金板进行加热后再成形^[1-3]。相比常温成形, 热成形涉及更多成形参数的控制, 成形工艺的复杂

性高。钛合金热成形实验的成本较高、周期较长, 目前国内对钛合金热拉深成形的应用较少。盒形件在成形过程中变形不均匀, 影响零件成形的因素较多, 整体的成形难度大, 因此, 目前仍多采用分瓣成形-拼焊工艺, 很难满足日益增长的对钛合金板料成形件的质量、成本和周期等的要求^[4-6]。为解决这一问题, 本文针对 Ti6Al4V 钛合金薄壁盒形件的热拉深成形工艺进行研究。

邵威^[7]和丁嘉健等^[8]指出, 从室温到 300 °C 范围内, 温度对于 Ti6Al4V 钛合金成形性能的影响很

收稿日期: 2023-04-19; 修订日期: 2023-07-23

作者简介: 郭文平 (1987-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: 442623900@qq.com

通信作者: 施立军 (1988-), 男, 博士研究生, 高级工程师

E-mail: sit0202@163.com

小,零件的塑性极差,无法完成拉深工艺;在 300~500 °C 范围内,随着温度的升高,零件的极限拉深系数呈逐渐减小的趋势,但总体变化不大,仅能成形较浅的拉深件;在 850 °C 以上, Ti6Al4V 钛合金呈现典型的超塑性,不适用于拉深成形。因此,本文研究的 Ti6Al4V 钛合金薄壁盒形件的热拉深成形工艺的温度区间为 600~850 °C。

盒形件在拉深过程中容易出现过度减薄而破裂的现象,本文重点关注钛合金板热拉深成形过程中温度、应变速率和板料取向对盒形件减薄率的影响。为此,首先对 Ti6Al4V 钛合金板料的热成形性能进行了分析;然后,通过有限元仿真分析了盒形件的拉深成形,特别是关注了影响其减薄率的因素,确定

了合理的盒形件拉深工艺条件;最后,通过实验验证了有限元仿真结果和所确定的工艺条件的准确性。

1 盒形件

研究对象为 Ti6Al4V 钛合金薄壁盒形件,如图 1 所示。盒形件的壁厚为 1.2 mm,外形尺寸约为 380 mm×160 mm×91 mm,侧壁与法兰过渡处的圆角(凹模圆角)半径为 10 mm,侧壁过渡圆角半径为 20 mm,底部圆角(凸模圆角)半径为 8 mm,底部圆角过渡做平缓化处理。成形零件技术要求无成形失效情况,最大轮廓度公差为 0.5 mm,最大减薄率不超过 25%。

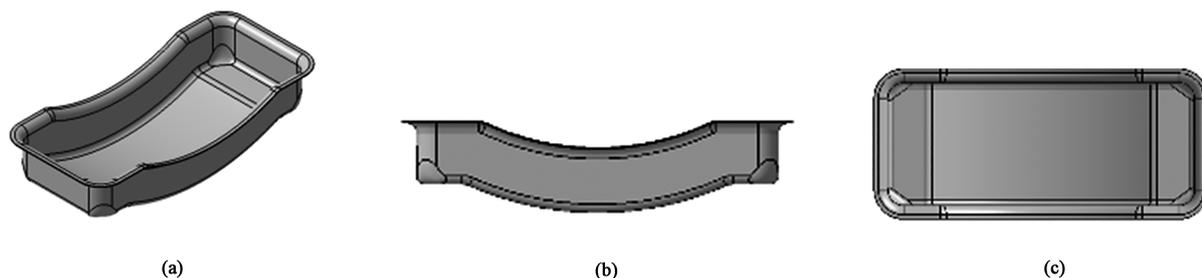


图 1 Ti6Al4V 钛合金薄壁盒形件
(a) 等轴侧图 (b) 正视图 (c) 俯视图

Fig. 1 Thin-walled box-shaped part of Ti6Al4V titanium alloy
(a) Equiaxed side view (b) Front view (c) Top view

2 Ti6Al4V 钛合金板的热成形性能

Ti6Al4V 是一种中等强度的 α - β 型两相钛合金,含有 6% 的 α 稳定元素 Al 和 4% 的 β 稳定元素 V。该合金具有优异的综合性能,在航空和航天工业中获得了广泛应用。材料常温下的抗拉强度较高,且屈强比大,因此,其塑性变形能力较差,所需成形力大,易开裂,回弹严重,成形困难。

2.1 热变形的流动应力

流动应力是材料在各种温度、速度和应变条件下的屈服应力,是反映材料成形性能的重要数据,也是变形过程中金属内部显微组织演变和性能变化的综合反映。选取 600、650、700、750、800 和 850 °C 这 6 组成形温度和 0.001、0.01 和 0.1 s^{-1} 这 3 组平均应变速率,按照 GB/T 228.2—2015^[9] 进行钛合金板的单向拉伸变形实验,测量各种条件下材料的流动应力,结果如图 2~图 4 所示。结果表明:在 600~850 °C 范围内,材料的流动应力随成形温度的升高而显著减低,同时材料的成形极限有显著的

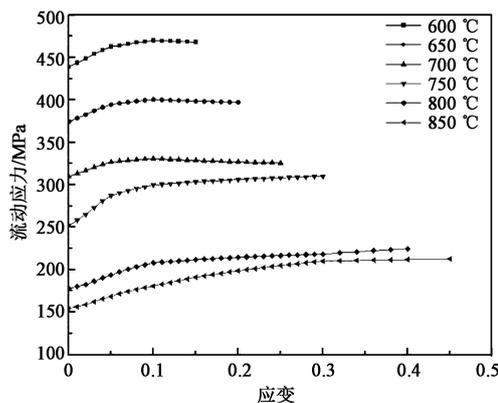


图 2 Ti6Al4V 钛合金板在平均应变速率为 0.1 s^{-1} 时不同成形温度下的流动应力

Fig. 2 Flow stresses of Ti6Al4V titanium alloy sheet under different forming temperatures at average strain rate of 0.1 s^{-1}

提高;在 0.001~0.1 s^{-1} 范围内,材料的流动应力随平均应变速率的降低而显著减低,同时材料的成形极限显著提高。

2.2 板厚方向性系数 (r 值)

板厚方向性系数 (r 值) 表征了板料在相同受

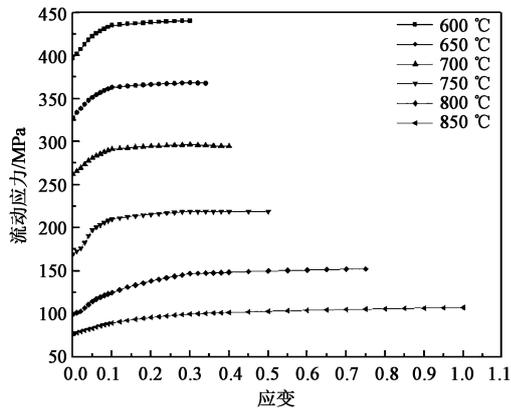


图 3 Ti6Al4V 钛合金板在平均应变速率为 0.01 s^{-1} 时不同成形温度下的流动应力

Fig. 3 Flow stresses of Ti6Al4V titanium alloy sheet under different forming temperatures at average strain rate of 0.01 s^{-1}

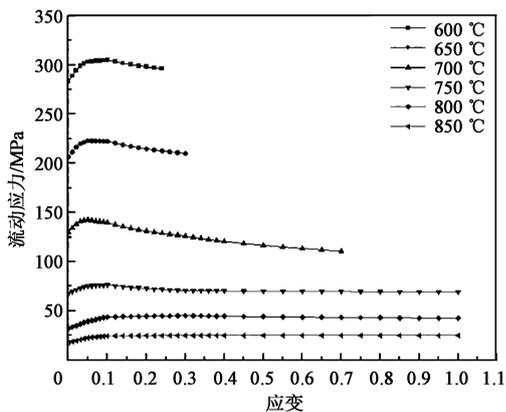


图 4 Ti6Al4V 钛合金板在平均应变速率为 0.001 s^{-1} 时不同成形温度下的流动应力

Fig. 4 Flow stresses of Ti6Al4V titanium alloy sheet under different forming temperatures at average strain rate of 0.001 s^{-1}

力条件下, 厚度方向上的变形性能和板平面方向上的差别。 r 值越大, 厚度方向的变形越困难, 零件的减薄率越小, 在板料平面内与应力垂直方向上的压缩变形越容易, 零件越不容易发生褶皱。实验表明, 轧制的板料具有明显的各向异性, 在不同方向上的 r 值是不同的, 为了表征平面内的各向异性, 一般采用与板料轧制方向呈 0° 、 45° 和 90° 这 3 个方向的试样进行拉伸变形测试, 并将拉伸试样在这 3 个方向的 r 值表示为 r_0 、 r_{45} 和 r_{90} [10]。

选取 600 、 650 、 700 、 750 、 800 和 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 这 6 组成形温度, 平均应变速率为 0.001 s^{-1} , 与板料轧制方向呈 0° 、 45° 和 90° 的 3 组试样, 按照 GB/T 228.2—2015 [9] 进行单向拉伸实验, 测得的 r 值结果如图 5 所示。结果表明: r 值随成形温度的升高显著

减低, r 值的方向性差异越不显著, 在 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上趋于统一; 在与轧制方向呈 45° 方向的试样的 r 值最大。

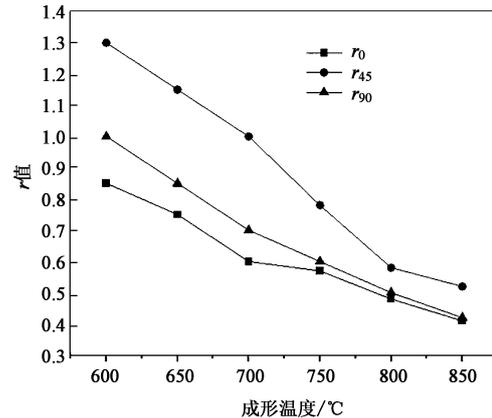


图 5 应变速率为 0.001 s^{-1} 时不同成形温度下的 Ti6Al4V 钛合金板的 r 值

Fig. 5 r values of Ti6Al4V titanium alloy sheet under different forming temperatures at strain rate of 0.001 s^{-1}

在成形温度为 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 、平均应变速率分别为 0.001 、 0.01 和 0.1 s^{-1} 时, 将与板料轧制方向呈 0° 、 45° 和 90° 的 3 组试样按照 GB/T 228.2—2015 [9] 进行单向拉伸实验, 测得 r 值结果如图 6 所示。结果表明, 在 $0.001 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 范围内, 材料的 r 值随平均应变速率的升高而增大, r 值的方向性差异随平均应变速率的升高而更加显著。

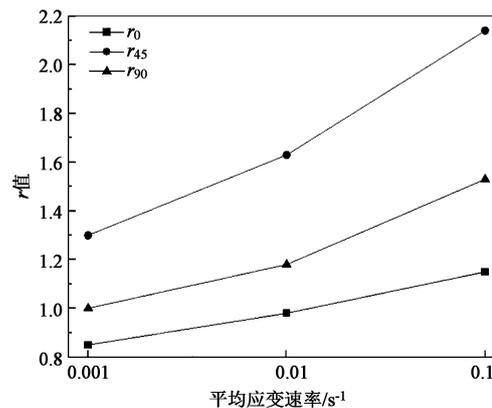


图 6 成形温度为 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时不同平均应变速率下 Ti6Al4V 钛合金板的 r 值

Fig. 6 r values of Ti6Al4V titanium alloy sheet under different average strain rates at forming temperature of $600 \text{ }^\circ\text{C}$

3 盒形件拉深成形过程有限元分析

3.1 有限元模型的建立

本文用采用 DynaForm5.9.4 有限元仿真软件,

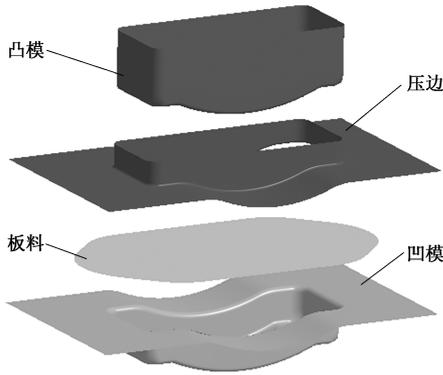


图 7 盒形件热拉深仿真模型

Fig. 7 Simulation model of hot drawing for box-shaped part

建立的有限元模型如图 7 所示，其基本成形参数如表 1 所示。

表 1 热拉深仿真成形参数

Table 1 Simulation forming parameters of hot drawing

参数	数值
板料网格尺寸/mm	1
压边间隙/mm	1.2
凸凹模间隙/mm	1.4
压边力/kN	2~5 (材料模型不同, 成形参数不同)
凹模摩擦因数	0.15 (经验数值)
压边摩擦因数	0.15 (经验数值)
凸模摩擦因数	0.4 (经验数值)

等温热拉深工艺可以忽略热传递和热辐射对成形的影响，因此选择 36#材料模型 (3 参数 Barlat 材料模型)，分别建立 8 种材料模型，其参数设置如表 2 所示。

表 2 材料模型参数

Table 2 Material model parameters

序号	成形温度/℃	平均应变速率/s ⁻¹	弹性模量/MPa	泊松比	r_0	r_{45}	r_{90}
1	600	0.001	67000	0.3	0.85	1.30	1.00
2	600	0.010	67000	0.3	0.98	1.63	1.18
3	600	0.100	67000	0.3	1.15	2.14	1.53
4	650	0.001	64000	0.3	0.75	1.15	0.85
5	700	0.001	60000	0.3	0.60	1.00	0.70
6	750	0.001	58000	0.3	0.57	0.78	0.60
7	800	0.001	57000	0.3	0.48	0.58	0.50
8	850	0.001	56000	0.3	0.41	0.52	0.42

3.2 成形温度对零件成形性的影响

对材料性能影响因素的分析表明，成形温度对

零件热拉深成形性有显著的影响：

(1) 随着成形温度的升高，材料成形极限提高，变形抗力降低，有利于拉深成形；

(2) 随着成形温度的升高，板料与模具之间的摩擦力增大，加工硬化现象减弱，拉深传力区的承载能力减弱，应力集中现象明显；同时 r 值减小，零件更趋于发生减薄，不利于拉深成形。

因此，需要确定以上影响因素的平衡点即零件的最佳成形温度。熊志卿等^[11]和郭天文^[12]分别对此进行了拉深性能实验。实验结果表明，零件的极限拉伸比 (Limiting Drawing Ratio, LDR) 随温度的升高呈现先升高后减低的趋势，最佳成形温度为 700~750 ℃。

针对本文研究对象，分别选取 600、650、700、750、800 和 850 ℃ 这 6 组成形温度，平均应变速率为 0.001 s⁻¹，对盒形件的拉深过程进行有限元仿真，结果如图 8 所示。

对比图 8 中不同温度下的结果，零件的最大减薄率随温度升高呈显著上升的趋势。在 750 ℃ 以上时，应力集中现象严重，局部发生剧烈减薄，不能满足零件的成形需求。与拉深性能实验的圆筒件拉深相比，盒形件拉深的应力分布是不均匀的，应力集中现象对板料成形性的影响更为明显，600 ℃ 时零件的成形性最佳。

3.3 变形速率对零件成形性的影响

分别选取 0.001、0.01 和 0.1 s⁻¹ 这 3 组平均应变速率，成形温度为 600 ℃，借助有限元分析软件进行仿真，结果如图 9 所示。零件的最大减薄率随平均应变速率的升高成逐渐上升的趋势，尤其在 0.001 s⁻¹ 低速率情况下零件的减薄率明显降低。因此，选取 0.001 s⁻¹ 的平均应变速率，此时零件的成形性最佳。

3.4 板料方向对零件成形性的影响

由于在成形温度为 600 ℃ 和平均应变速率为 0.001 s⁻¹ 的成形条件下，材料的 r 值存在明显的方向性差异，因此，本文分别选取板料长度方向与轧制方向呈 0°、45° 和 90° 的试样，进行盒形件拉深过程的有限元仿真，结果如图 10 所示。对比计算结果发现，板料长度方向与轧制方向间的角度对盒形件最大减薄率有显著影响，与轧制方向呈 0° 的板料成形零件的减薄率最低。

4 实验验证

4.1 拉深实验

零件试制用双动热成形压力机的部分参数如表

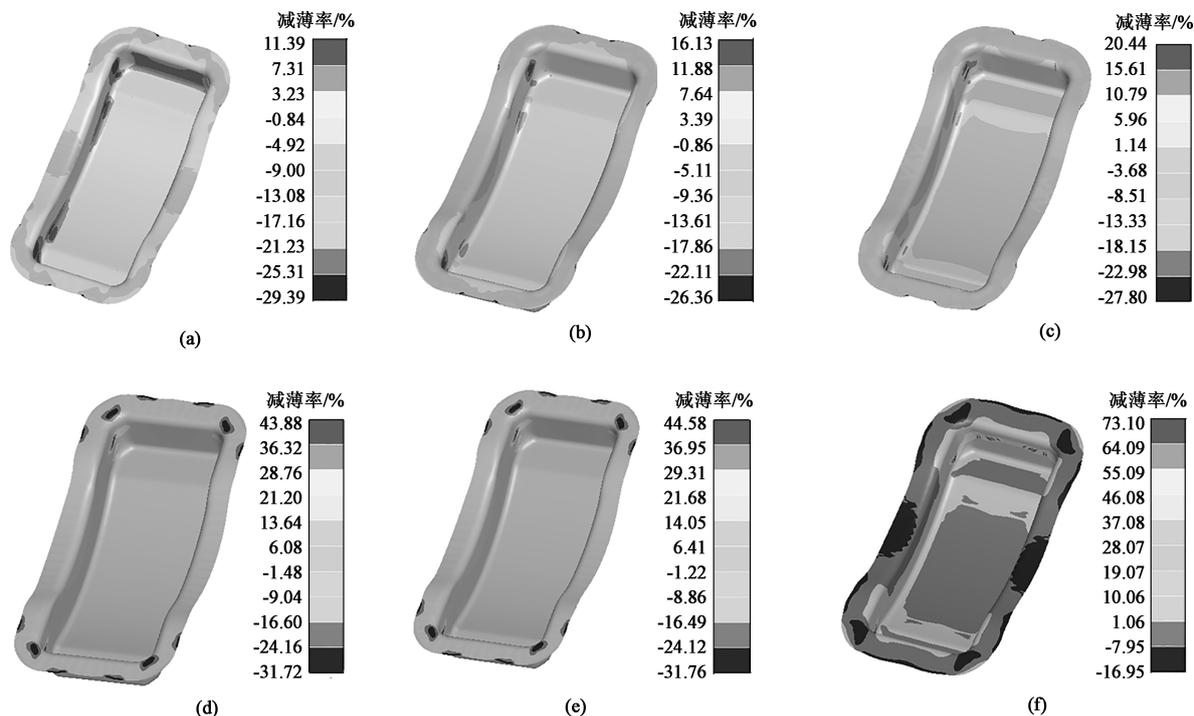


图 8 平均应变速率为 0.001 s^{-1} 时不同成形温度下盒形拉深件的减薄率分布
(a) 600 °C (b) 650 °C (c) 700 °C (d) 750 °C (e) 800 °C (f) 850 °C

Fig. 8 Thinning rate distributions of box-shaped drawing parts under different forming temperatures at average strain rate of 0.001 s^{-1}

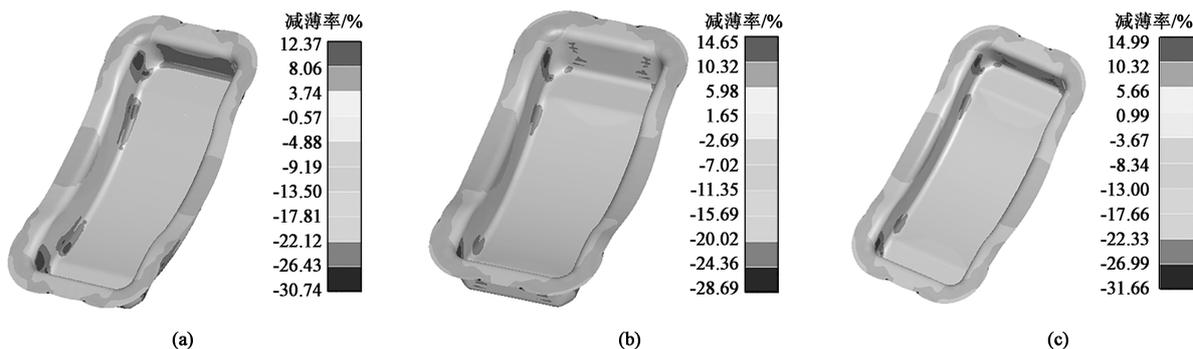


图 9 成形温度为 600 °C 时不同应变速率下盒形拉深件的减薄率分布
(a) 0.001 s^{-1} (b) 0.01 s^{-1} (c) 0.1 s^{-1}

Fig. 9 Thinning rate distributions of box-shaped drawing parts under different strain rates at forming temperatures of 600 °C

3 所示。

拉深实验过程及要点如下。

(1) 按板料长度方向与轧制方向一致切割板料。在板料上首先喷涂氮化硼喷剂(抗氧化剂及脱模剂),凹模及压边接触区域刷涂水基石墨涂料(润滑剂),有限元仿真选用的摩擦因数来源于上述润滑方式获得的经验数据。

(2) 压边控制。拉深成形一般采用定压边力及定压边间隙两种压边控制方式。热成形中对压边间隙的调整不易实现,因此,一般采用定压边力的方

式。该零件的仿真压边力参数为 50 kN ,热成形设备很难稳定提供较小的压边力。因此,热成形模具设计承压块分担压边压力,模具加热前首先通过承压块控制压边间隙为 $(1.2 \pm 0.03) \text{ mm}$ 。热成形试模中压边力部分作用于承压块上,以实现压边控制。通过调整压边力的方式,控制零件拉深过程中的材料流动。

(3) 在热成形模具型面、装夹面及导向面喷涂氮化硼喷剂(抗氧化剂及脱模剂)。

(4) 对热成形模具进行预热,模具配装热电

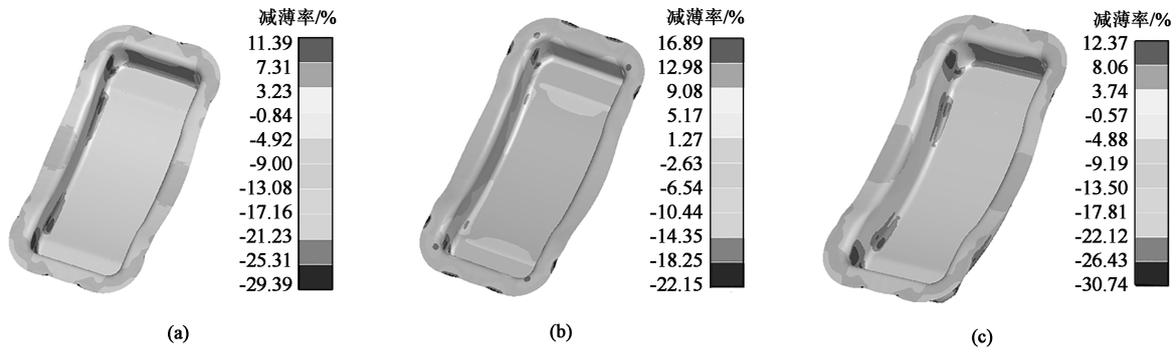


图 10 板料长度方向与轧制方向间的角度对盒形件减薄率的影响

(a) 0° (b) 45° (c) 90°

Fig. 10 Influence of angle between length direction and rolling direction of sheet on thinning rate of box-shaped part

表 3 热成形设备参数

Table 3 Hot forming equipment parameters

参数	数值
成形压力/kN	3150
下顶出缸顶出力/kN	500
压力控制精度	≤±1%
上平台压制速度/(mm·s ⁻¹)	0.1~50.0
工作台有效台面/(mm×mm)	1600×1200
最高加热温度/°C	900



图 11 最终成形零件

Fig. 11 Final formed part

偶, 通过温度反馈保证模具的实时温度为 (600±10) °C。

(5) 对板料进行预热, 预热温度为 (600±10) °C, 预热时间为 2~3 min, 在保证零件完全预热的同时, 避免长时间加热造成的严重氧化及过烧现象。

(6) 放置板料, 拉深成形。合模速度设置为 0.5 mm·s⁻¹ (平均应变速率为 0.001 s⁻¹)。

(7) 开模取件。

4.2 成形结果分析

成形过程中, 调整压边力至 300 kN, 零件法兰料的流动效果与仿真结果基本一致, 图 11 为最终拉深成形件, 拉深件的成形效果良好, 无破裂、褶皱等失效形式, 卡板检测其轮廓公差满足技术要求。分别在拉深件上取点 1~6, 测量其减薄率, 与有限元仿真的减薄率对比如表 4 所示。

表 4 显示有限元仿真基本反应了实际零件的减薄情况, 分析存在的误差来自实验中设备控制精度、定位精度、测量精度以及有限元仿真中材料性能参数的误差等。

表 4 有限元仿真与实验测量的拉深件减薄率对比 (%)

Table 4 Comparison of thinning rates between finite element simulation and experimental measurement for drawing parts (%)

测量点	有限元仿真	实验测量	误差
1	11.67	12.50	1.01
1	0.83	0.00	0.83
2	-15.00	-16.67	1.43
3	11.67	12.50	0.95
4	10.83	12.50	1.90
5	0.83	0.00	0.83

5 结论

(1) Ti6Al4V 钛合金的流动应力随成形温度的升高和平均应变速率的降低而显著减小, 升温和降温下的变形可以使材料的成形极限显著增高。

(2) Ti6Al4V 钛合金的 r 值随成形温度的降低

和平均应变速率的升高而增大, 其中 0° 和 90° 方向上 r 值的增大程度远低于 45° 方向。

(3) 有限元仿真表明, 盒形件拉深过程的减薄率受成形温度、变形速率和板料取向等多方面因素的影响。成形参数的选取需要综合各个因素进行评判。在目前所设定的变形条件范围内, 成形温度为 600°C 、平均应变速率为 0.001 s^{-1} 、盒形件的长度方向与板料 0° 方向一致时, 盒形件的减薄率最低。

(4) 拉深实验通过对仿真参数的合理匹配, 使法兰料的流动效果与仿真基本一致; 同时, 有限元仿真对盒形件减薄率的计算能较准确地反映零件的实际减薄。因此, 有限元仿真对确定盒形件拉深的合理工艺条件具有显著的指导意义。

参考文献:

- [1] 同晓乐, 张明玉, 于成泉, 等. 不同轧制厚度 TC4 钛合金板材的组织与性能 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 153-159.
Tong X L, Zhang M Y, Yu C Q, et al. Microstructure and properties of TC4 titanium alloy sheets with different rolling thicknesses [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 153-159.
- [2] 徐凯华, 刘海军, 闫江鹏, 等. 热等静压态 TC4 钛合金在多道次热压缩变形中的组织演变 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (7): 150-156.
Xu K H, Liu H J, Yan J P, et al. Microstructure evolution of hot isostatic TC4 titanium alloy during multi-pass hot compression deformation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (7): 150-156.
- [3] 刘清华, 惠松晓, 叶文君, 等. 不同组织状态 TC4 ELI 钛合金动态力学性能研究 [J]. 稀有金属, 2012, 36 (4): 517-522.
Liu Q H, Hui S X, Ye W J, et al. Dynamic mechanical properties of TC4 ELI titanium alloy with different microstructure [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012, 36 (4): 517-522.
- [4] 王勇胜. 热冲压成形工艺的发展及相关模具材料的研究进展 [J]. 模具制造, 2017, 17 (9): 1-5.
Wang Y S. The Development of hot stamping technology and re-
- search progress of relative die materials [J]. Die & Mould Manufacture, 2017, 17 (9): 1-5.
- [5] 周廉, 赵永庆, 王向东, 等. 中国钛合金材料及应用发展战略研究 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
Zhou L, Zhao Y Q, Wang X D, et al. Research on Titanium Alloy Materials and Application Development Strategy in China [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [6] 石瑾, 汶斌斌, 于振涛. 钛及钛合金壳形件冲压成形影响因素及其应用现状 [J]. 钛工业进展, 2016, 33 (5): 1-5.
Shi J, Wen B B, Yu Z T. Influencing factors of titanium and titanium alloys shell's stamp forming and its application status [J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33 (5): 1-5.
- [7] 邵威. TC4 高强钛合金板材热拉深性能研究 [D]. 上海: 上海工程技术大学, 2019.
Shao W. Research on Hot Forming Properties of TC4 High Strength Titanium Alloy Sheet [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Sciences, 2019.
- [8] 丁嘉健, 刘家河, 杨展铭, 等. TC4 钛合金板材高温热拉伸性能研究 [J]. 科技创新与应用, 2019, 11: 41-42, 45.
Ding J J, Liu J H, Yang Z M, et al. Research on hot forming properties of TC4 titanium alloy sheet [J]. Technology Innovation and Application, 2019, 11: 41-42, 45.
- [9] GB/T 228.2—2015, 金属材料 拉伸试验 第 2 部分: 高温试验方法 [S].
GB/T 228.2—2015, Metallic materials—Tensile testing—Part 2: Method of test at elevated temperature [S].
- [10] 肖景容, 姜奎华. 冲压工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
Xiao J R, Jiang K H. Stamping Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [11] 熊志卿, 林兆荣. 钛板热拉深成形性与工艺参数 [J]. 南京航空学院学报, 1985, 6: 18-21.
Xiong Z Q, Lin Z R. Hot drawing formability and process parameters of titanium sheet [J]. Journal of Nanjing Institute of Aeronautics, 1985, 6: 18-21.
- [12] 郭天文. TC4 钛合金板材热拉深成形数值仿真与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
Guo T W. Hot Drawing Numerical Simulation and Experimental Research of TC4 Titanium Alloy Sheet [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

请关注更加新颖的公众号

www.qctester.com

