

## TA1 钛合金板材高温颗粒介质成形试验研究

## Experimental Research on Hot Granular Medium Forming of TA1 Titanium Alloy Sheet

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 郎利辉 刘康宁  
中航工业北京航空制造工程研究所 吴为 刘宝胜

**[摘要]** 利用高温介质成形工艺对 TA1 钛合金板材进行了筒形零件拉深过程仿真计算及试验验证, 模拟分析及高温条件下拉深试验结果表明, 高温介质成形工艺适用于钛合金板材, 并能显著提高钛合金薄壁零件的成形质量。

**关键词:** 钛合金板材 高温介质成形 数值模拟

**[ABSTRACT]** Deep drawing process of cylinder-shaped part of TA1 titanium alloy sheet is carried out by hot medium forming technology. Compare study is also conducted with numerical simulation. Results show that the hot granular medium forming process applies to titanium alloy sheet and can improve the forming quality of titanium alloy thin-walled parts.

**Keywords:** Titanium alloy sheet Hot granular medium forming Numerical simulation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.17.030

目前, 随着轻量化构件在航空、航天、汽车、能源等领域的广泛应用, 对轻质合金薄壁类零件的先进成形工艺提出了越来越高的要求。现有加工方法存在诸多局限性, 无法满足日益苛刻的加工需求, 为解决这一难题, 各国研究机构提出了多种工艺以提高轻量化零件的成形质量。

钛合金板材在室温条件下屈服比大, 弹性模量小, 延伸率及成形极限较低, 成形后零件易起皱、破裂, 加工难度大, 通常要在 550℃~750℃ 条件下成形<sup>[1]</sup>。传统钛合金板材成形方法主要有超塑成形及热冲压工艺等<sup>[2]</sup>, 但不可避免地带来了诸多问题, 如模具设计复杂、起皱减薄严重<sup>[3]</sup>、壁厚均匀性差、成形效率低等。

板材颗粒介质成形工艺是由燕山大学赵长财等<sup>[4-5]</sup>提出的一种柔性成形方法, 其利用耐高温非金属颗粒介质代替传统意义上刚性的凸模(或凹模)成形板材、管材类零件, 可加工铝合金、不锈钢及钛合金<sup>[1]</sup>等材料。国外纽伦堡大学等研究机构<sup>[6-7]</sup>对颗粒介质成形工艺进行了试验研究, 对高强钢等材料进行了高温条件下颗粒介质成形试验。计算仿真分析结果已证明<sup>[8]</sup>, 颗粒介质

成形工艺可有效降低钛合金锥形类零件的起皱趋势, 提高成形性。

本文在颗粒介质三轴围压试验及 TA1 钛合金高温单向拉伸试验基础上, 对钛合金筒形件进行了 500℃ 条件下的颗粒介质拉深试验及成形后零件壁厚、轮廓尺寸计算模拟分析, 验证了高温颗粒介质成形工艺对钛合金板材的适用性及高温颗粒介质成形规律计算分析准确性。结果表明, 高温颗粒介质成形工艺可以有效提高钛合金零件的成形质量。

## 1 材料性能试验

### 1.1 颗粒介质三轴围压试验

三轴压缩试验可以测定颗粒材料抗剪强度, 侧重于测量岩土、颗粒材料在三轴压应力条件下动态受压变形特征, 相比于直剪试验, 三轴围压试验中被测试材料的受力状态更贴近于主动式热介质成形中颗粒介质。因此, 为了测定颗粒材料 Mohr-Coulomb 摩擦模型参数, 选择三轴围压试验测定颗粒材料流动特性及压力传递规律。三轴围压试验结果绘制的强度包线如图 1 所示。

从图中可得, 本文所选的非金属颗粒材料 Mohr-Coulomb 摩擦模型粘聚力  $c=1.6255\text{kPa}$ , 内摩擦角  $\varphi=14.9352^\circ$ , 具有良好的流动性, 可对成形拉深力进行有效传递。

### 1.2 TA1 钛合金高温单向拉伸试验

为了获取 TA1 材料高温条件下拉伸性能, 利用 ZWICK 单向拉伸试验机, 对 1mm 厚 TA1 板材进行了

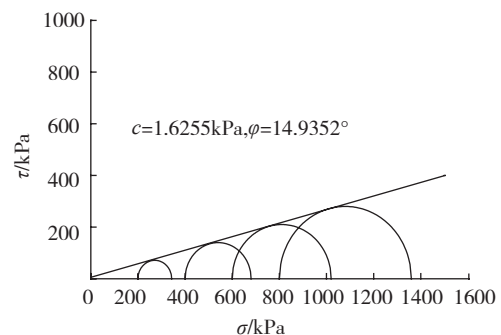


图1 三轴围压试验结果

Fig.1 Result of triaxial compression tests

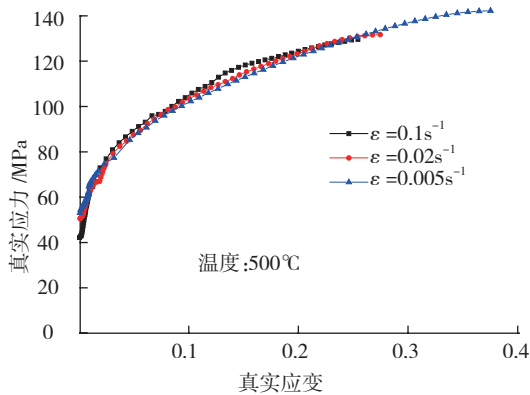


图2 TA1板材不同条件下真实应力-真实应变曲线  
Fig.2 True stress-strain curves of TA1 sheet under different conditions

500℃,不同应变速率条件下的真实应力-真实应变试验曲线,如图2所示。可以看到,在500℃条件下,应变速率越低,其最大延伸率越高;而不同应变速率对其材料的硬化曲线影响不显著。

## 2 TA1 钛合金筒形件高温颗粒介质试验

高温颗粒介质成形试验在北京航空航天大学自主研发的YRJ-50板材实验机上进行。压边圈盛料腔内径80mm,凹模内径85mm,TA1合金板材厚度1mm,压边间隙选用1.2mm,高温颗粒介质成形试验模具示意图如图3所示。在500℃条件下,对坯料直径为180mm,160mm的TA1板材进行了不用拉深深度的颗粒介质成形试验。

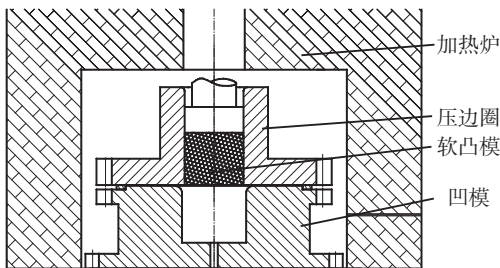


图3 高温颗粒介质成形试验模具示意图  
Fig.3 Diagram of experimental equipment for hot granular medium forming

在高温条件下,选用胶体石墨水剂作为润滑剂,涂抹在坯料表面,等晾干后备用。石墨水剂不仅起到润滑的作用,在高温条件下还能有效防止钛合金板材表面氧化现象。颗粒介质装料高度选为70mm,成形过程采用恒拉深速率控制,拉深速率选择为5mm/min。

成形后零件如图4所示,在软凸模作用下,坯料底部自由变形区呈大圆角特征。文献[8]分析指出,在厚度方向压应力作用下,自由变形区坯料处双向拉应力状

态,可有效防止不均匀变形导致的失稳,抑制起皱趋势。可以看到,高温颗粒介质成形出的零件具有较好的表面质量。



图4 500℃不同拉深深度钛合金零件  
Fig.4 TA1 parts by hot granular medium forming process at 500℃

## 3 高温介质成形数值仿真及对比

为了验证颗粒介质流动过程仿真计算准确性,利用ABAQUS软件对颗粒介质筒形件成形进行了仿真分析,成形过程采用轴对称模型,TA1板材厚度1mm,试验温度选择为500℃。利用高温单向拉伸试验获取的钛合金材料参数及三轴围压试验中获取颗粒介质传压参数,建立了如图5所示的仿真计算模型。计算分析结果如图6所示,可以看到,在热颗粒介质成形过程中,最小壁厚出现在通底部中央区域,壁厚值从该区域到零件边缘均匀增大,具有较好的壁厚均匀性。

对成形高度 $H=58.3\text{mm}$ 及 $H=81.5\text{mm}$ 的零件进行了外形尺寸三维坐标测量及剖开后零件壁厚分布测量,并与模拟结果进行了对比。相应成形条件下对比结果如图7所示。由图可知,模拟曲线与试验数据点吻合较好,反映出从三轴围压试验及高温单向拉深试验中获取的材料参数可以较为精确地表征高温条件下颗粒介质及TA1钛合金板材的流动变形规律。

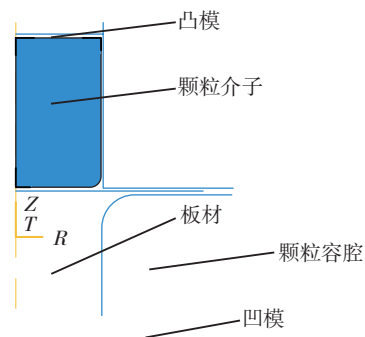


图5 高温颗粒介质成形计算模型  
Fig.5 Numerical model of hot granular medium forming process

## 4 结论

(1) 高温颗粒介质成形技术利用固体颗粒代替刚性模具可以实现钛合金零件的高温加工成形,成形温度可达500℃以上;

(下转第135页)

参考文献

[1] 关桥, 邵亦陈. 航空特种焊接/连接技术体系的形成和发展. 航空制造技术, 2012, 409(13): 34-39.

[2] Arrieta J, Striz A J. Optimal design of aircraft structures with damage tolerance requirements. Struct Multidiscip O, 2005, 30: 155-163.

[3] 王向明, 刘文斑. 飞机钛合金结构的设计与应用. 北京: 国防工业出版社, 2010.

[4] 史耀武. 焊接技术手册(上). 北京: 化学工业出版社, 2009.

[5] 李晓延, 巩水利, 关桥, 等. 大厚度钛合金结构电子束焊接制造基础研究. 焊接学报, 2010, 2(2): 107-112.

[6] 吴新强. TC4 钛合金电子束焊接数值模拟及接头组织与性能[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

[7] Sareesh N, Pillai M G, Mathewa J, et al. Investigations into the effects of electron beam welding on thick Ti-6Al-4V titanium alloy. J Mater Process Tech, 2007, 192-193: 83-88.

[8] Balasubramanian T S, Balakrishnan M, Balasubramanian V, et al. Effect of welding processes on joint characteristics of Ti-6Al-4V alloy. Sci Technol Weld and Joi, 2011, 16 (8): 702-708.

[9] LIU H, Nakata K, Yamamoto N, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties in laser beam welds of Ti6Al4V alloy. J Mater Sci, 2012, 47: 1460-70.

[10] LIU H, NAKATA K, ZHANG J X, et al. Microstructural evolution of fusion zone in laser beam welds of pure titanium. Mater Charact, 2012, 65: 1-7.

[11] LU W, SHI Y W, LI X Y, et al. Effect of electron beam welding on the microstructures and mechanical properties of thick TC4-DT alloy. Mater Design, 2012, 34: 509-15.

[12] 张翥, 王群骄, 莫畏. 钛的金属学和热处理. 北京: 冶金工业出版社, 2009. (责编 玲犀)

(上接第 123 页)

(2) 仿真计算及试验结果表明, 高温颗粒介质成形工艺成形出的钛合金筒形零件具有较好的壁厚均匀性;

(3) 在厚度方向压应力作用下, 钛合金零件成形过程起皱趋势被有效抑制, 成形质量得到提高。

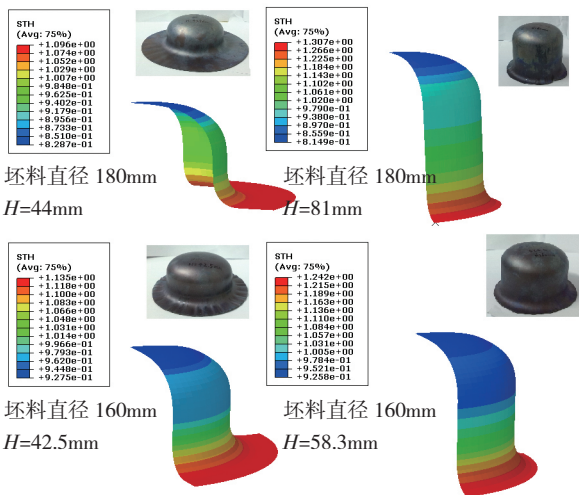
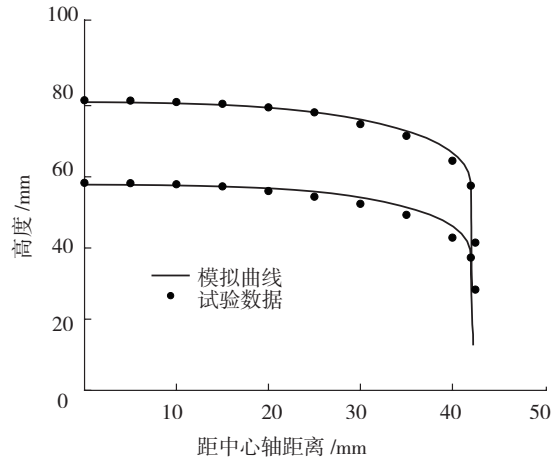
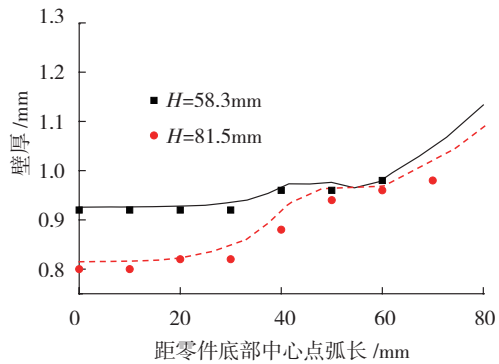


图6 仿真计算结果  
Fig.6 Results of numerical simulation



(a) 外形尺寸模拟及试验结果对比



(b) 壁厚分布模拟及试验结果对比

图7 外形尺寸壁厚对比图

Fig.7 Comparison of shape dimension and thickness distribution between numerical simulation and experimental results

参考文献

[1] 李鹏亮, 张志, 曾元松. 钛合金机头罩固体颗粒介质成形工艺研究. 锻压技术, 2012, 37(5): 286-287.

[2] 郎利辉, 刘宝胜, 曾元松. 钛合金板材成形技术及其在航空领域的应用. 航空制造技术, 2009, (10): 28-31.

[3] 刘斐, 罗迎社, 杨柳, 等. 数值模拟方法在 TC1 钛合金整流内罩深拉热流变成形质量控制中的初步应用. 湘潭大学自然科学学报, 2004, 26(2): 52-55.

[4] 赵长财. 固体颗粒介质成形新工艺及其理论研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2005.

[5] 曹秒艳, 赵长财, 董国疆. 镁合金板材颗粒介质拉深工艺参数数值模拟. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 2992-2999.

[6] Gr ü n e r M, Merklein M. Numerical simulation of hydro forming at elevated temperatures with granular material used as medium compared to the real part geometry. International Journal of Material Forming, 2010, 3: 279-282.

[7] Gr ü n e r M, Merklein M. Influences on the Molding in Hydroforming Using Granular Material as a Medium. The and Th international Conference and Workshop, Seoul, 2011.

[8] 郎利辉, 刘康宁, 蔡高参, 等. TC4 钛合金复杂方锥形件热介质成形工艺仿真研究. 航空制造技术, 2013, (16): 109-112.

(责编 早春)