

涡扇发动机异形曲面壳体零件整体成形工艺*

高铁军¹, 王忠金¹, 高洪波², 王君平²

(1 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2 北京动力机械研究所, 北京 100074)

摘 要: 涡扇发动机异形曲面壳体零件单位长度直径变化较大, 传统的制造方法是采用分体成形、组合焊接工艺, 所需工序多、质量控制环节多、使用可靠性差, 采用粘性介质压力整体成形方法则可以较好地解决这一问题。通过有限元模拟和试验方法, 分析了成形工步、粘性介质粘性附着应力对板材流动及壁厚变化的影响。研究结果表明, 粘性介质压力成形可以控制变形区板材的流动, 提高成形试件壁厚分布的均匀性, 使直径比为 1.38 零件的壁厚减薄率控制在 12%, 适合于涡扇发动机异形曲面壳体零件的整体成形。

关键词: 涡轮风扇发动机; 异形曲面壳体零件⁺; 粘性介质压力成形⁺; 整体结构工艺

中图分类号: V231.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2007) 04-0437-04

Integral forming for special-shaped curved surface shell parts of turbofan engine

GAO Tie-jun¹, WANG Zhong-jin¹, GAO Hong-bo², WANG Jun-ping²

(1 School of Materials Science and Engineering Harbin Inst. of Technology Harbin 150001, China

2 Beijing Power Machinery Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract The special-shaped curved surface shell parts of turbofan engine, which vary greatly in diameter, are usually manufactured by forming decomposed parts and then assembling them through welding. The traditional forming technology has some disadvantages, such as requirement of multi-forming-step, high cost and low accuracy, which can be overcome by viscous pressure integral forming process. Through numerical simulation and experiments, the effects of forming steps and the tangent adhesive stress of viscous medium on the material flow and wall thickness variation are analyzed. Research results show that the deformed sheet metal flow can be controlled efficiently and the homogeneity of wall thickness of formed part is improved through viscous pressure forming (VPF). The wall thickness thinning is less than 12% for the parts with 1.38 diameter ratio. So VPF is very suitable for integral forming of the special-shaped curved surface shell parts of turbofan engine.

Key words Turbofan engine; Special-shaped curved surface shell parts⁺; Viscous pressure forming⁺; Integral structure manufacturing process

1 引 言

涡扇发动机是航天、航空飞行器典型的动力推进装置。发动机主要热结构承载零件一般为异形曲面壳体结构, 型面较为复杂, 单位长度直径变化较大, 局部具有小半径曲面。传统的制造方法是采用分体成形组合焊接, 结构件为分体组焊结构, 该结构所需工序较多, 多件成形和对接组焊等因素导致质量控制环节多, 使用性能和可靠性能受到限制, 如果采用整体

结构代替分体组焊结构, 可以减少成形制造工序和焊缝条数、减少质量控制环节, 提高结构件的质量可靠性和使用性能, 满足发动机性能不断提高的要求。

粘性介质压力成形 (VPF, Viscous pressure forming) 是近十年发展起来的板材软模成形新技术, 采用半固态、可流动并具有一定粘度和应变速率敏感性的物质作为软模材料, 与聚氨酯成形相比粘性介质在一定的压力条件下具有很好流动性, 容易实现对零件的合理包络, 适合落差较大、型面复杂板材零件成形; 与

* 收稿日期: 2006-08-10 修订日期: 2007-01-15.

作者简介: 高铁军 (1977—), 男, 博士生, 研究领域为板材成形新技术。E-mail: tga@hit.edu.cn

液压成形相比,粘性介质容易实现成形所需高压问题;适合于异形曲面壳体结构件的整体成形。粘性介质压力成形在高温合金超薄壁波纹板热结构件、铝合金阶梯形零件等方面得到了较好的应用^[1~7]。

本文通过试验和有限元模拟结果,分析了异形曲面壳体结构零件整体粘性介质压力成形特点和变形规律。

2 试验件与试验方案

2.1 试验用原材料与试验件

试验件形状与尺寸如图 1 所示,试件曲面变化较大,沿轴线方向单位长度直径变化比最大为 1.73,最大直径与最小直径比为 38%,曲面最小半径为 2.5 mm,壁厚为 1.0 mm,材料选用太原钢铁集团有限公司生产的 1Cr18Ni9Ti 板材力学性能见表 1。

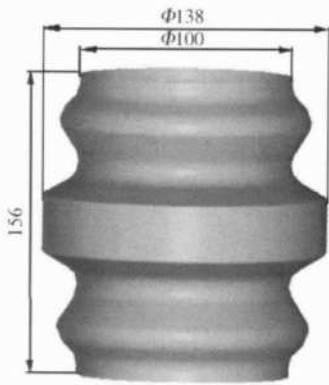


Fig 1 Special-shape curved surface shell part

Table 1 Mechanical properties of 1Cr18Ni9Ti sheet metal

σ_s /MPa	σ_b /MPa	E /GPa	δ /%	n
206	539	200	40	0.347

2.2 试验方案

试验选择直径为 $\Phi 100$ mm 的圆筒作为成形坯

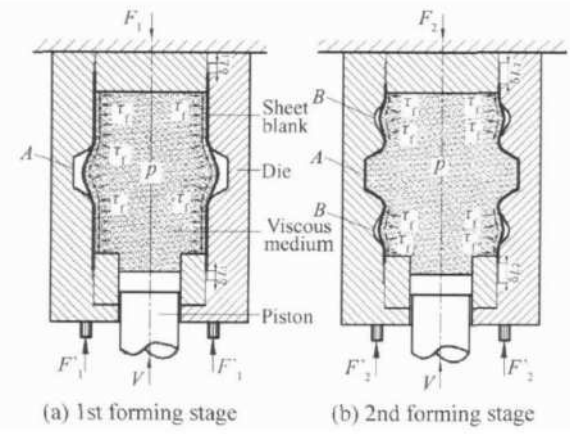


Fig 2 Schematic diagram of two-step forming

料,通过在圆筒内加压方式成形所需要的形状。由圆筒形状变形到试验件的曲面形状,坯料的变形量较大,如果直径的增加仅仅由壁厚的减薄来实现是无法达到的,为使直径增大区域的壁厚减薄量小,必须使相邻区域的材料向该区域流动,因此成形分为二步工序,试验装置简图如图 2 所示,首先成形出中间变形较大的区域 (A 区),而在第二步成形两端区域 (B 区),使材料在粘性介质正向压力和切向粘性附着力作用下充分流入型腔,控制壁厚的减薄。试验是在哈尔滨工业大学自行研制的 4 000 kN 粘性介质压力成形设备上进行的。

3 结果与讨论

在成形尺寸符合要求的情况下,壁厚的减薄量越小越好,这是整体成形需要解决的问题。与传统的软模成形工艺相比,粘性介质成形过程除对板材施加正向压应力外,还在板材表面形成切向粘性附着应力作用,促进材料流入型腔,这一特点使异形曲面件成形过程壁厚的减薄可以控制在一定的范围,为了比较分析粘性介质压力成形过程粘性附着应力和成形工步对材料流动规律和壁厚变化的影响,采用有限元模拟方法预测了不同粘性附着应力影响因子条件下一步成形 (即只是采用两步成形的第二步工序)与两步成形板材的变形过程。

3.1 变形过程分析

由于粘性介质压力成形过程体积变形特点,选用商业有限元软件 DEFORM™对板材的变形过程进行分析,两步成形有限元模拟模型如图 3 所示,板材与刚性凹模之间的界面摩擦为库伦摩擦,摩擦系数 μ 取为 0.1,粘性介质粘性附着应力影响因子 m 分别取 0.1、0.2、0.3、0.4,柱塞移动速度 $V=7.5$ mm/s。

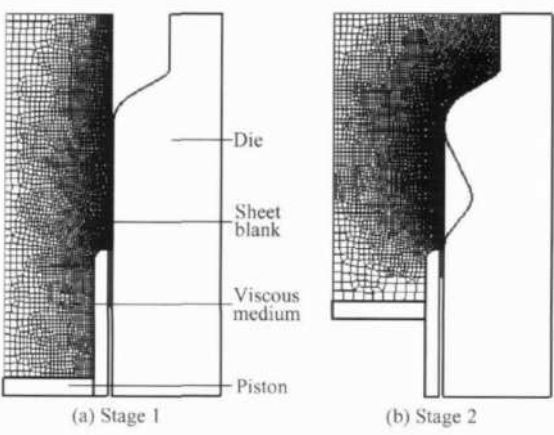


Fig 3 Finite element model for two-step forming

粘性附着应力影响因子 $m = 0.2$ 时, 一步成形和两步成形的板材变形过程分别如图 4 图 5 所示, 对于一步成形, A 区和 B 区同时变形, B 区的变形限制了板料向 A 区的流入, 端部坯料最大移动量较小为 11.2 mm; 对于两步成形, A 区与 B 区先后变形, 使得各变形区在成形过程中能够很好的得到板料补充, 端部坯料最大移动量较大为 13.9 mm。

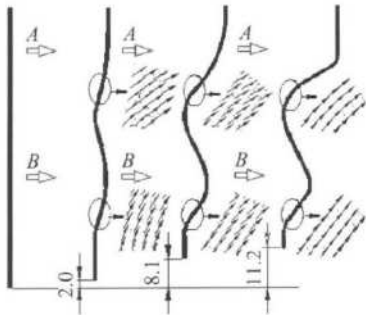


Fig 4 Sheet deformation process for one-step forming

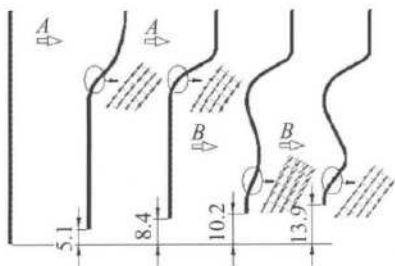


Fig 5 Sheet deformation process for two-step forming

粘性附着应力影响因子对端部坯料最大移动量和壁厚最大减薄率的影响分别如图 6 图 7 所示, 随着切向粘性附着影响因子的提高, 一步成形试件的端部坯料最大移动量由 10.8 mm 提高到 11.2 mm, 提高幅度较小, 对壁厚最大减薄量的影响不明显; 而两步成形试件的端部坯料最大移动量由 13.2 mm 提高到 14.8 mm, 壁厚最大减薄则由 12.3% 降低到 10.4%,

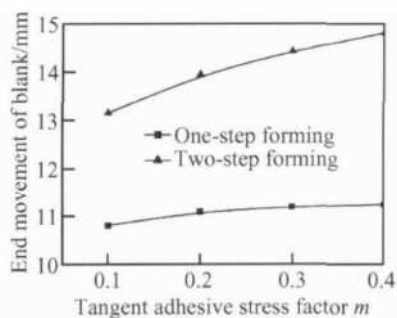


Fig 7 Influence of tangent adhesive stress factor m on maximum thickness reduction

因此选择具有较高粘性附着应力影响因子的粘性介质和合适的成形工步是获得满足零件尺寸要求的关键。

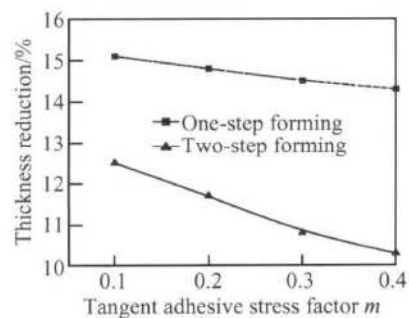


Fig 6 Influence of tangent adhesive stress factor m on maximum end movement of blank

3.2 试验结果分析

试验采用粘性介质的粘度为 $17 \text{ kPa} \cdot \text{s}$ 两步成形如图 8 所示, 第一步成形端部坯料移动量为 8.6 mm, 第二步成形端部坯料移动量达到了 13.7 mm, 壁厚最大减薄率为 12%, 试件的尺寸及精度达到使用要求; 一步成形试件剖面如图 9 所示, 端部坯料移动量为 11 mm, 壁厚最大减薄率为 15%。试验结果与粘性附着应力影响因子 $m = 0.2$ 的有限元模拟结果相接近, 如果提高粘性介质的粘度, 两步成形方法还可以进一步提高端部坯料移动量, 控制试件壁厚最大减薄率。

通过应变网格法测量及有限元模拟结果得到一步成形和两步成形试件的应变分布规律如图 10 所示, 测量结果与有限元模拟结果吻合较好。从图中可以看出, B 区受成形工步影响较小, 一步成形与两步成形应变分布规律相似; A 区受成形工步影响较大, 两步成形试件环向应变和轴向应变小于一步成形环向应变和轴向应变, 因此两步成形试件的壁厚分布均匀性好。

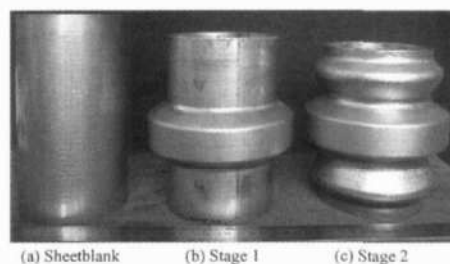


Fig 8 Specimens by two-step forming

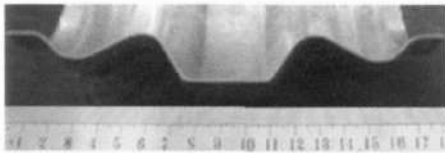


Fig. 9 Section diagram of specimen by one-step forming

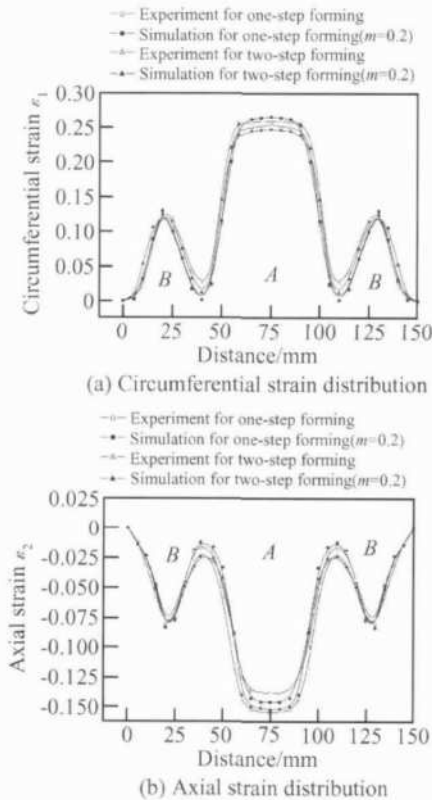


Fig. 10 Strain distribution curves of the VPF specimens by experiment and simulation

4 结 论

(1) 采用粘性介质压力成形方法进行形状复杂异形曲面壳体零件整体结构成形是可行的。

(2) 合适的成形工步可以控制变形区坯料的移动,有利于提高成形试件壁厚分布的均匀性。

(3) 切向粘性附着应力影响因子是异形曲面壳体零件整体成形的关键,采用较高粘度的粘性介质有利于获得壁厚分布均匀性好的零件。

参考文献:

- [1] 王忠金,王仲仁,王君平,等. 冲压发动机超薄壁波纹形件粘性介质压力成形 [J]. 推进技术, 2002, 23 (1). (WANG Zhong-jing WANG Zhong-ren, WANG Jun-ping, et al Viscous pressure forming of super-alloy super-thin wall corrugated parts applied to ram jet engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*. 2002, 23(1).)
- [2] 王忠金,王新云,王仲仁. 阶梯形件粘性介质压力成形的试验研究 [J]. 锻压技术. 2001, (4).
- [3] Junhua Li, Bert Westhoff M. A. Ahmetoglu, Taylan Altan. Application of viscous pressure forming (VPF) to low volume stamping of difficult-to-form alloys results of preliminary FEM simulations [J]. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, (53).
- [4] Shulkin L. B., Posteraro R. A., Ahmetoglu M. A., et al. Blank holder force (BHF) control in viscous pressure forming (VPF) of sheet metal [J]. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000, (98).
- [5] 刘建光,王忠金,王仲仁,等. 涡扇发动机铝合金碗形件的粘性介质压力成形 [J]. 推进技术, 2002, 24 (6). (LIU Jian-guang WANG Zhong-jin, WANG Zhong-ren, et al Viscous pressure forming for aluminum alloy bowl-type parts of turbofan engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24 (6).)
- [6] 王忠金,王新云,王仲仁. 粘性介质压力成形中的应用研究 [J]. 航空学报. 2003, 24(1).
- [7] 高铁军,王忠金,宋 辉. 1Cr18Ni9Ti薄壁曲面件粘性介质内、外压力成形 [J]. 塑性工程学报, 2006, 13 (3).

(编辑: 刘萝威)