

冲压发动机超薄壁波纹形件的 粘性介质压力成形^{*}

王忠金¹, 王仲仁¹, 王君平², 卢玉红²

(1. 哈尔滨工业大学 材料工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 航天科工集团公司 31 所, 北京 100074)

摘 要: 粘性介质压力成形是一种采用具有高粘度并且可流动的半固态介质作为软凸模的成形方法。采用试验和数值模拟方法, 研究了高温合金超薄壁波纹形件成形过程坯料形状、应变分布、厚度分布的变化和界面摩擦对板料成形的影响, 研究结果表明: 成形件尺寸精度高、表面质量好、厚度均匀; 与钢凸模成形相比较, 可以避免局部较小半径曲面之间的严重颈缩; 对于具有局部较小半径曲面的复杂形状薄壁件, 粘性介质压力成形显示出其优越性。

关键词: 冲压喷气发动机导弹; 高温合金; 超薄壁件; 波纹成形; 粘性介质

中图分类号: V231.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2002) 01-0084-05

Viscous pressure forming of super-alloy super-thin wall corrugated parts applied to ramjet engine

WANG Zhong-jin¹, WANG Zhong-ren¹, WANG Jun-ping², LU Yu-hong²

(1. Dept. of Materials Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China;

2. The 31st Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract: The super-alloy super-thin wall corrugated parts (with thickness of 0.3mm) applied to missile ramjet engine, made of a lot of corrugations with smaller radius surface and non-uniform height, is complicate shape component. The qualified product could not be obtained with conventional metal punch forming. In this paper, research results of Viscous Pressure Forming (VPF) of the corrugated component mentioned above are reported. VPF is a recently developed process using a highly viscous but flowable semi-solid medium as soft punch. The experimental and numerical simulative methods are used to evaluate the shape, strain distribution, thickness distribution of the blank and the effect pattern of interface friction on the formability of specimens during VPF. The experimental and numerical simulation results show that VPF specimens have a lot of advantages, such as high dimensional accuracy, good surface fineness, small wall-thickness reduction. Compared with simulation results with metal punch forming, the necking and wall-thickness reduction on smaller radius surface can be avoided or decreased with VPF. The later has an advantage over metal punch forming as respect to super-alloy super-thin wall corrugated parts with smaller radius surface.

Key words: Ramjet engine missile; High temperature alloy; Super-thin wall part; Corrugating; Viscous medium

1 引 言

随着航天技术的发展, 对发动机板料件材料性能的要求不断提高, 大量采用高强度难变形材料(如高温合金等), 对板料件厚度、尺寸和表面精度的要求也越来越高。适应于弹用发动机性能的提高, 对板料件

形状也提出了新的要求, 特殊的型面导致复杂形状, 如具有不均匀、非圆端、局部较小半径曲面的板料件等。对高强度难变形材料复杂形状板料件, 刚模成形容易产生严重局部变薄开裂; 橡胶等软模成形时软模材料耐高压性差、小角度曲面模性差, 形状及尺寸误差大。适应板料件成形的新发展, 提出了粘性介质压

^{*} 收稿日期: 2001-05-30; 修订日期: 2001-10-15。基金项目: 国防基础研究资助项目 (Z0400C001-2)。

作者简介: 王忠金 (1962—), 男, 博士, 教授, 研究领域为材料加工新工艺及过程仿真。

力成形技术^[1,2],为难变形材料板料件提供了先进制造技术。该成形技术与钢凸模、聚氨酯软凸模或液体等成形方法的主要区别在于:采用半固态、可流动和具有一定粘度的介质(称作粘性介质)作为成形凸模材料,使其具有独特的优点:充填性好、能承受高压、易于密封,因而具有成形精度高、成形质量好等优点。目前,粘性介质压力成形的研究多见于板料(铝合金等)成形性能的试验与模拟^[1,4-6],以及工艺模拟研究(如 Inconel718SPF 喷嘴内壁板成形)^[3],应用研究还未见报道。本文针对发动机具有局部较小半径曲面的超薄壁不等高波纹形件,进行了高温合金粘性介质压力成形技术的试验研究,测量并分析了成形件应变和厚度分布,采用数值模拟方法研究了成形过程坯料形状、应变分布、厚度分布的变化和界面摩擦对坯料拉深成形的影响,并与钢凸模成形进行了对比分析,研究结果表明了难变形材料板料件粘性介质压力成形技术的先进性。

2 粘性介质压力成形原理

粘性介质压力成形原理如图 1 所示,通过粘性介质注入和压边力控制,对板料施加压力成形。由于选用的粘性介质对板料表面无任何副作用,在成形压力下具有较好的流动性,成形过程充填性好,使成形件贴模性好、表面质量近于毛坯表面质量。

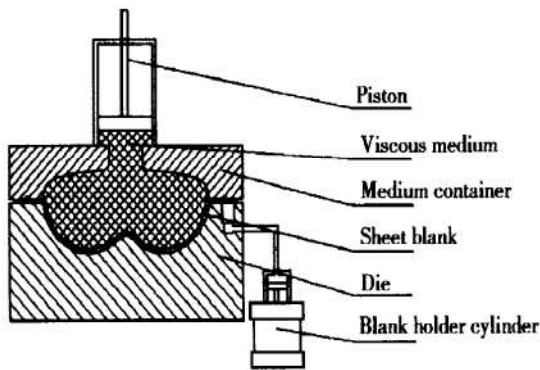


Fig. 1 Principal diagram of viscous pressure forming

3 试验结果与分析

3.1 零件尺寸与材料性能、试验装置、粘性介质性能

成形零件为具有局部较小半径($r = 2.3 \text{ mm}$)曲面的超薄壁不等高波纹形件,形状和尺寸如图 2 所示,材料为高温合金(材料室温力学性能如图 3 所示),厚度为 0.3 mm (实际厚度在 $0.29 \text{ mm} \sim 0.33 \text{ mm}$ 之间),材料室温强度较高,塑性较差。

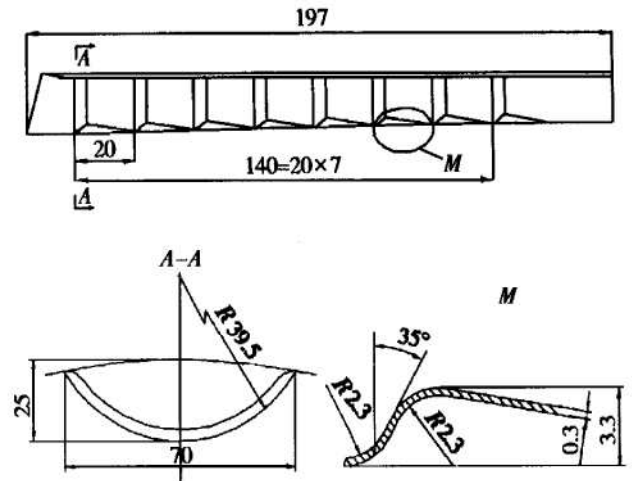


Fig. 2 Super-thin wall corrugated shape part

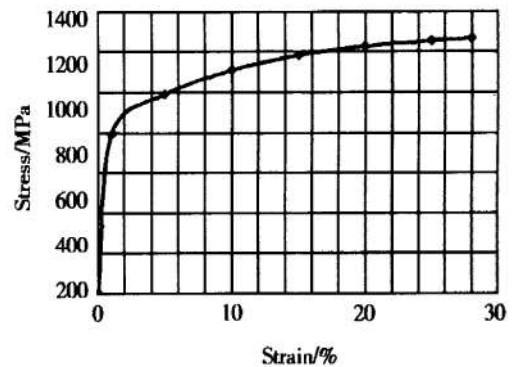


Fig. 3 Flow stress vs. strain curve of super-alloy used for specimens

粘性介质的选择应具备采用半固态、可流动和具有一定粘度的特点,如粘度过低接近液体、粘度过高接近固体,本文选择的粘性介质具有的室温力学性能如图 4 所示。

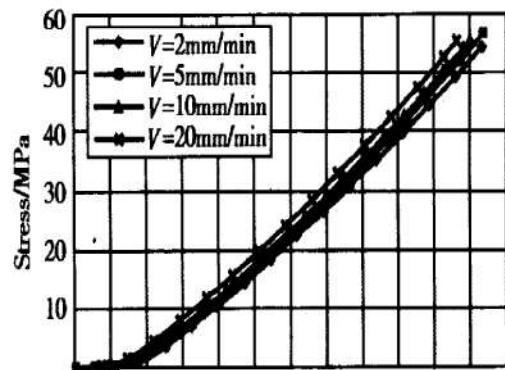


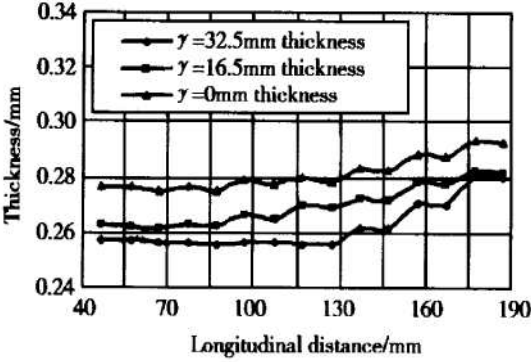
Fig. 4 Flow stress vs. strain curve of the viscous media used for VPF

波纹形件粘性介质压力成形装置安装在 400 t 油压机上,粘性介质由下顶出缸通过活塞注入。

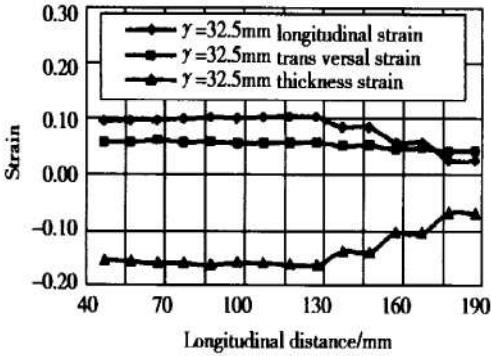
3.2 试验结果与分析

粘性介质压力成形试验件具有高的尺寸精度和很好的表面质量,成形过程粘性介质对板料表面起到

保护作用。采用网格法测量和计算了试验件长度方向、宽度方向不同典型截面应变分布。长度、宽度方向不同典型截面的厚度和应变分布如图 5, 6 所示, 纵向与横向厚度最大减薄处厚度大于 0.25 mm, 最大减薄率为 0.15%, 最大应变为 0.15。



(a)



(b)

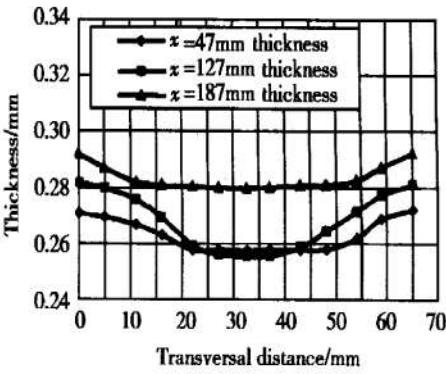
Fig. 5 Longitudinal thickness

(a) and strain (b) distribution of the specimen

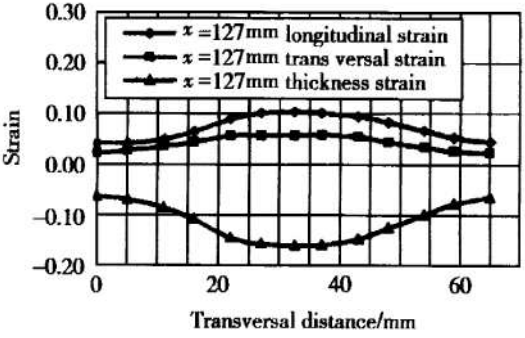
4 数值模拟结果与分析

采用有限元数值模拟方法对粘性介质压力成形与钢凸模成形进行了对比研究, 使用压力成形专用商业软件 DEFORM, 模拟了波纹形高温合金超薄壁件粘性介质压力成形与钢凸模成形过程, 有限元数值模拟模型如图 7 所示。模拟条件为 $V=1\text{ mm/s}$, 钢凸模成形界面摩擦为库仑摩擦条件, 库仑摩擦系数 μ 分别为 0.01, 0.2 和 0.3。粘性介质压力成形板料与钢凹模之间界面摩擦为库仑摩擦条件, 库仑摩擦系数为 $\mu = 0.1$, 板料与粘性介质之间界面摩擦为常摩擦条件, 常摩擦系数为 0.09, 0.1 和 0.4。

粘性介质压力成形过程如图 8 所示, 在 $r=2.3\text{ mm}$ 的圆弧面处钢凸成形出现严重颈缩、减薄, 而粘性介质压力成形则避免了这种情况的产生, 该处主应变、厚度随凸模行程的变化以及摩擦条件的影响如图



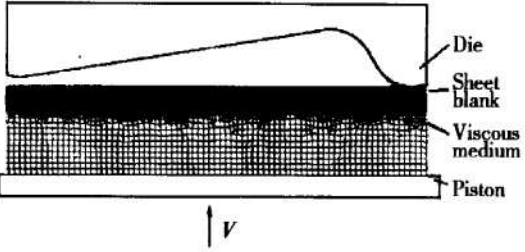
(a)



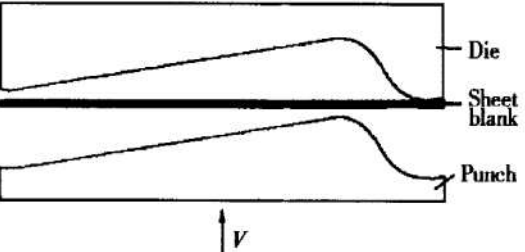
(b)

Fig. 6 Transversal thickness

(a) and strain (b) distribution of the specimen



(a) VPF



(b) Metal punch forming

Fig. 7 Finite element simulation model of

(a) VPF and (b) metal punch forming

9, 10 所示, 钢凸模成形时界面库仑摩擦系数越小, 主应变越小、厚度减薄率减小, 但在库仑摩擦系数很小

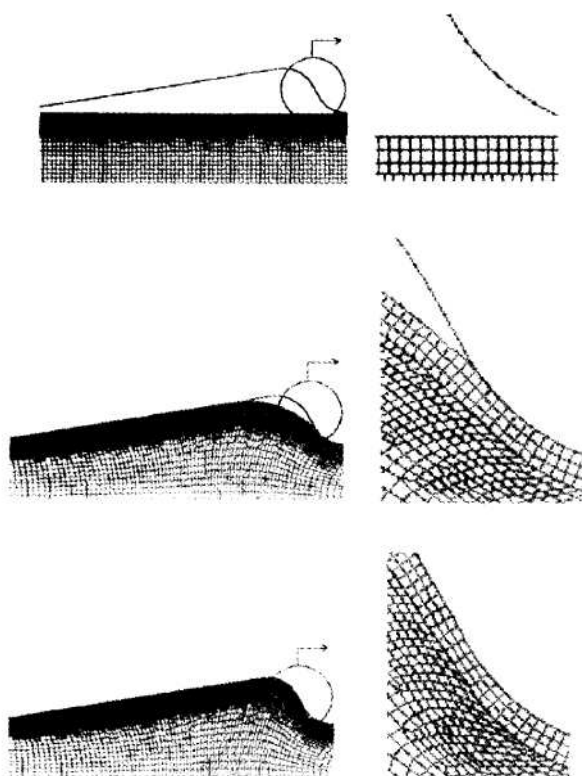


Fig. 8 Simulation meshes during deformation of the corrugated specimen with VPF

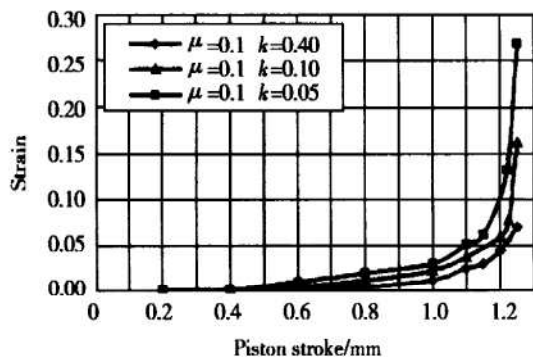


Fig. 9 Maximum principle strain of the corrugated sheet specimen vs. piston stroke during VPF

($\mu = 0.01$) 条件下, 仍然有明显的厚度减薄, 对于具有局部较小半径曲面的超薄壁波纹形件, 钢凸模方法难以成形。对于粘性介质压力成形, 在板料与钢凹模之间界面库仑摩擦条件一定的条件下 ($\mu = 0.1$), 板料与粘性介质之间界面常摩擦条件为 $k = 0.4$ 时, 主应变、厚度减薄明显降低, 见图 11, 12。说明粘性介质对板料表面的作用影响着板料成形, 粘性介质的选择是十分重要的, 粘性介质选择不当, 成形结果与钢凸模成形相似。

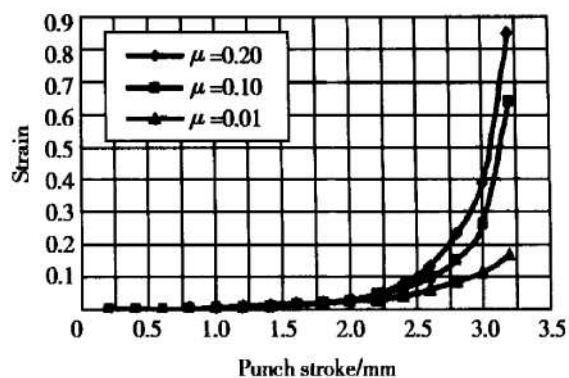


Fig. 10 Maximum principle strain of the corrugated specimen vs. punch stroke during punch forming

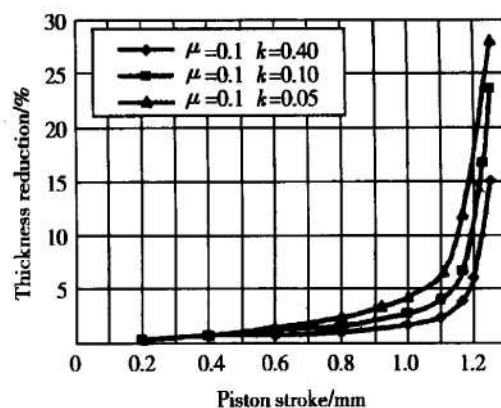


Fig. 11 Maximum thickness reduction of the corrugated specimen vs. piston stroke during VPF

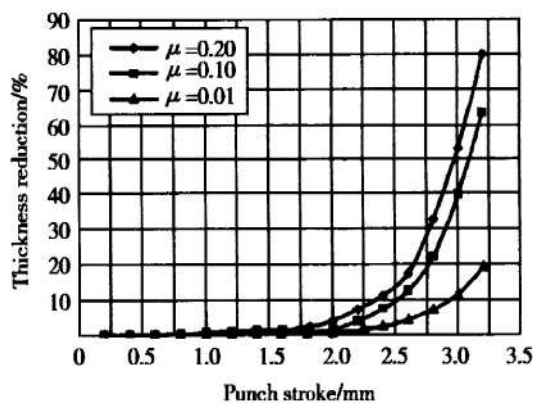


Fig. 12 Maximum thickness reduction of the corrugated specimen vs. punch stroke during metal punch forming

5 结 论

(1) 粘性介质压力成形适合于难变形材料特别是对高温合金具有局部较小半径圆弧面的超薄壁件制造, 可以避免刚凸模成形产生的局部厚度严重变薄、

开裂,成形件厚度具有较好的均匀性和较小的减薄率。

(2) 对于波纹形的薄壁高温合金件,采用半固态的粘性介质作为软凸模较采用钢凸模形成模具制造、产品精度等方面都有无可比拟的优越性。

(3) 成形过程粘性介质与板料之件的界面摩擦对板料成形影响较大,选择合适性能粘性介质有利于板料成形。

参考文献:

- [1] Liu J, Westhoff B, Ahmetogla M, et al. Application of viscous pressure forming (VPF) to low volume stamping of difficult-to-forming alloys—results of preliminary FEM simulations [J]. *J Mater. Process. Technol.* 1996, 53(1): 49~ 58
- [2] Roades et al. Method and apparatus for die forming sheet metal

materials [P]. *United States Patent NO.* 5085058, Feb 4, 1992: 12~ 26.

- [3] Leonid B. Shulkin, Ronald A. Posteraro, Mustafa A. Ahmetoglu et al. Blank Holder Force (BHF) Control in Viscous Pressure Forming (VPF) of sheet metal [J]. *J Mater Process Technol* 2000, 98: 7~ 16.
- [4] Liu J, Ahmetogla M, Altan T. Evaluation of sheet metal formability, Viscous Pressure Forming (VPF) Dome Test [J]. *J Mater. Process. Technol.* 2000, 98: 1~ 6.
- [5] 王忠金, 王仲仁. 板料粘性介质胀形过程应变速率的模拟研究 [J]. *塑性工程学报*, 1999, 6(3): 46~ 48.
- [6] 王忠金, 王仲仁, 杨海峰. 非均匀压力板料粘性介质拉深成形的试验研究 [J]. *塑性工程学报*, 1999, 6(2): 50~ 52.

(编辑: 盛汉泉)

简 讯

中国航天第三专业信息网第 23 届技术信息交流会征文通知

中国航天第三专业信息网第 23 届技术信息交流会拟于 2002 年 9 月中旬在兰州召开, 此次会议由中国航天科技集团属陕西动力机械设计研究所主办, 主题为“航天推进技术的创新与发展”。征文范围:

- (1) 液体火箭发动机、固体火箭发动机、冲压发动机性能与结构研究的技术创新和发展趋势;
- (2) 固液火箭发动机预先研究进展和成果;
- (3) 电推进技术研究及新进展;
- (4) 新型火箭发动机, 暨推进技术新进展和趋势;
- (5) 发动机(或部件)设计计算新方法和应用;
- (6) 发动机流场分析(含温度场计算分析)、强度计算、结构动特性计算等数值计算方法与应用;
- (7) 发动机试验技术与测试技术, 发动机的健康诊断方法、故障分析方法、系统动特性分析等;
- (8) 发动机生产工艺创新和攻关成果。

征文要求: (1) 观点明确, 数据准确, 文字简练, 图表清晰, 未曾在公开刊物或全国性学术会议上发表过; (2) 每篇论文(含图表和参考文献)不超过 7000 字, 并附带 200 字左右的摘要; (3) 请附 3.5 吋软盘, 或通过 Email 发至 @majie@shxi.cetin.net.cn; (4) 稿件上请注明作者姓名、职务、单位及详细通信地址和联系电话。

征文请于 2002 年 5 月 30 日前寄至: 陕西省西安市十五号信箱十一分箱, 邮编: 710100, 信封上请注明“会议征文”字样。联系人: 何泽夏, 电话: 029- 5207406, 传真: 029- 5207401。

(本刊通讯员)