

# 复杂形状钛合金整体叶片盘热流变成形数值模拟研究

罗迎社, 余敏, 殷水平

(中南林业科技大学流变力学与材料工程研究所, 长沙 410004)

**摘要:** 采用几何造型软件 UG NX3 对复杂形状 TC11 钛合金二级整体叶片盘的坯料和模具进行实体造型, 运用体积分析软件 DEFORM 3D 对 3 种不同应变速率下的叶片盘等温热流变成形过程进行数值模拟, 研究了工件在成形过程中的温度场和等效应变场的分布情况, 以及凸模和凹模的载荷-行程曲线, 为优化工艺参数提供了重要依据。

**关键词:** TC11 钛合金; 热流变成形; 应变速率; 三维造型; 数值模拟; DEFORM 3D

**中图分类号:** V261.3

## Numerical Simulation Research on Thermo-rheological Forming of the Titanium Alloy Vane Disk with Complex Shape

LUO Yingshe, YU Min, YIN Shuiping

(Institute of Rheological Mechanics and Material Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004)

**Abstract:** The blank and the dies of rheological forming were 3D-modeled based on the software named UG NX3. The numerical simulation research on thermo-rheological forming of the TC11 titanium alloy vane disk with complex shape has been conducted by DEFORM 3D. Under a certain temperature and three kind of different strain rates, the distribution of equivalent strain field, temperature field and load-stroke curves of punch and concave die during the thermo-rheological forming procedure of the TC11 titanium alloy were analyzed, so that its thermo-rheological forming process and parameters were optimized.

**Key words:** TC11 titanium alloy; thermo-rheological forming; strain rate; 3D modeling; numerical simulation; DEFORM 3D

## 0 引言

提高航空发动机的推重比, 对飞机的飞行速度和灵活性具有重要意义, 这不仅依靠先进的气动设计和结构设计, 而且还要靠大量新材料和先进工艺的支撑<sup>[1]</sup>。钛合金比强度高, 具有抗疲劳性、耐腐蚀及可减轻结构重量特点, 能在 500℃左右使用, 常温下化学稳定性良好, 因而广泛应用于航天、航空领域, 据统计, 钛在航空航天上的应用约占钛总产量的 70%, 包括军用飞机、民用飞机、航空发动机、航天器等。但其机械加工性能差, 属于难加工材料, 因此钛合金零件的加工一直是飞机生产的技术难题。而等温热流变成形这种新工艺方法则具有明显的先进性和挑战性。TC11 钛合金作为一种新型的航空、航天材料, 主要用于制造飞机上重要的零部件, 如涡轮发动机的压气机盘和叶片盘等。文献[2-5]采用等温近净热流变成形的新工艺, 成功地生产了 TC11 钛合金压气机盘和钛合金整流内罩。结果表明, 用此方法

**基金项目:** 高等学校博士学科点专项科研基金课题 (200805380004); 国家人力资源与社会保障部留学回国人员科技活动择优资助项目 (林才培字[2010]30 号)。

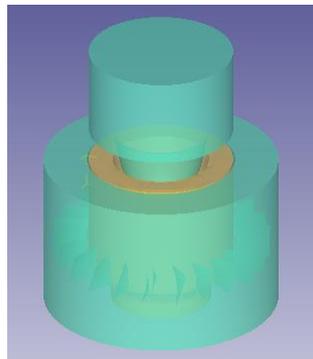
**作者简介:** 罗迎社, 男, 1954 年生, 教授, 博导, 国防科技大学固体力学专业博士毕业, 湖南省优秀留学回国人员, 国际流变学学会唯一中国籍理事。主要研究方向: 固体力学, 流变热力学和材料加工工程。E-mail: lys0258@sina.com

40 生产的零件，其内部组织结构有很大改善，力学性能指标有较大幅度的提高。文献[6]对正齿轮的冷精锻技术进行了数值模拟和实验研究；文献[7]对聚丙烯的流变性能进行了数值模拟和实验研究。实践证明，数值模拟是一种节省时间和经费的行之有效的工艺实验方法。

本文的主要工作是对流变成形的模具进行简化，利用 UG NX3 对成形模具及坯料造型，以 TC11 钛合金第二级整体叶片盘为研究对象，并用 DEFORM 3D 对成形温度许可的某一设定温度 920℃ 和在 3 种不同变形速率 0.008/s, 0.005/s, 0.001/s 下进行等温热流变成形数值模拟，探讨不同变形速率对叶片盘成形的影响，得到了其影响规律，其模拟结果为实际生产提供了重要依据和参考。

## 1 模型的建立

50 图片标注在本研究采用几何造型软件 UG NX3 对 TC11 钛合金第二级叶片盘的坯料和模具进行实体造型。将生成的 STL 文件调入 DEFORM-3D 前处理模块，用 MESH WINDOW 将毛坯划分成 102, 822 个网格单元。再将网格比率改为 3，用于后续的网络重划分。将模具视为刚体，流变成形过程中模具不会破坏，且模拟中不考虑毛坯与模具及环境间的热传递，其他模拟参数如表 1 所示。坯料和模具的初始装配见图 1。



55 图 1 模具与毛坯的初始装配

Fig.1 The original assemblage of dies and billet

表 1 模拟参数称

Tab. 1 Parameters in simulation

材料	TC11 钛合金
温度 (°C)	920
滑块速度 ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.65
摩擦系数	0.3

## 60 2 数值模拟结果与分析

### 2.1 温度场

图 2 为初始成形温度 920℃，变形速率分别为 0.008/s、0.005/s、0.001/s 时，工件在流变成形终了时刻的温度分布云图。从图 2 中可以看到，流变成形过程中，由塑性变形功及摩擦功引起的温度上升明显，整个工件的温度均高于坯料初始成形温度（920℃），其温度变化范围分别为 923℃~938℃、922℃~931℃、920℃~924℃，温差分别为 15℃、9℃、4℃。由于成形速率不同，坯料温度的上升幅度也不相同，分别为 18℃、11℃、4℃。成形速度越快，变形越剧烈，热量在短时间内来不及释放，从而导致变形体温度升幅越大。同时，由于成形速率的不同，工件的内部温差也不同，且成形速率越慢，温差越小。变形体内部温差越

大, 表明变形量和内部质量越不均匀, 因此, 应当尽量减小和避免温差过大的情况<sup>[2, 5, 7]</sup>。

70 由数值模拟温度场可以看出, 金属坯料在流变成形过程中的温升较高、温差较大, 因此  
在实际生产中要注意特别精确地控温, 这对确保成形件的内部质量非常重要, 否则将有可能  
造成工件过热过烧而报废。

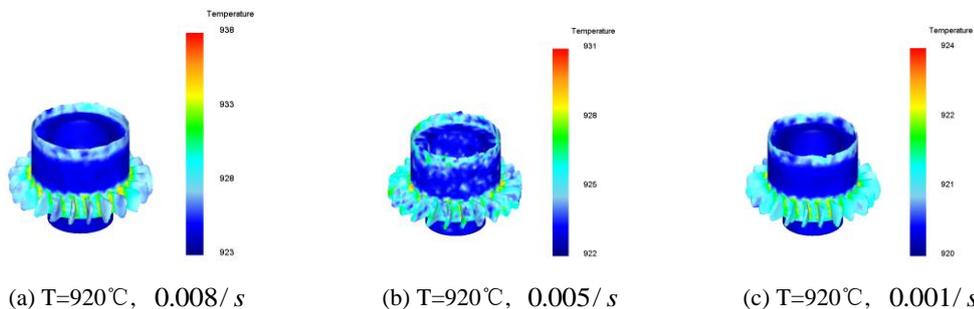


图 2 工件温度场

Fig.2 Temperature distribution of workpiece

### 2.2 等效应变场

图 3 为同一初始成形温度、不同应变速率下, 流变成形终止时刻工件的等效应变场分布  
云图和等值线图。

80 不难看出, 工件的变形属于不可逆大变形, 且变形体内部的变形是不均匀的。凹模型腔  
小径入口处附近变形体的等效应变值最大, 其余部位的等效应变值很小。从图 3 中还可以看到,  
在 3 种不同应变速率下, 等效应变的最大值不同。应变速率愈低, 工件的等效应变最大  
85 值愈小, 变形体各个部位之间的等效应变差值分别为 2.586, 1.797, 1.127。可见, 在低应变  
速率下, 流变成形的变形分布较均匀, 有利于获取均匀的内部组织。因此, 降低应变速率对  
保证产品的尺寸精度是行之有效的方法。

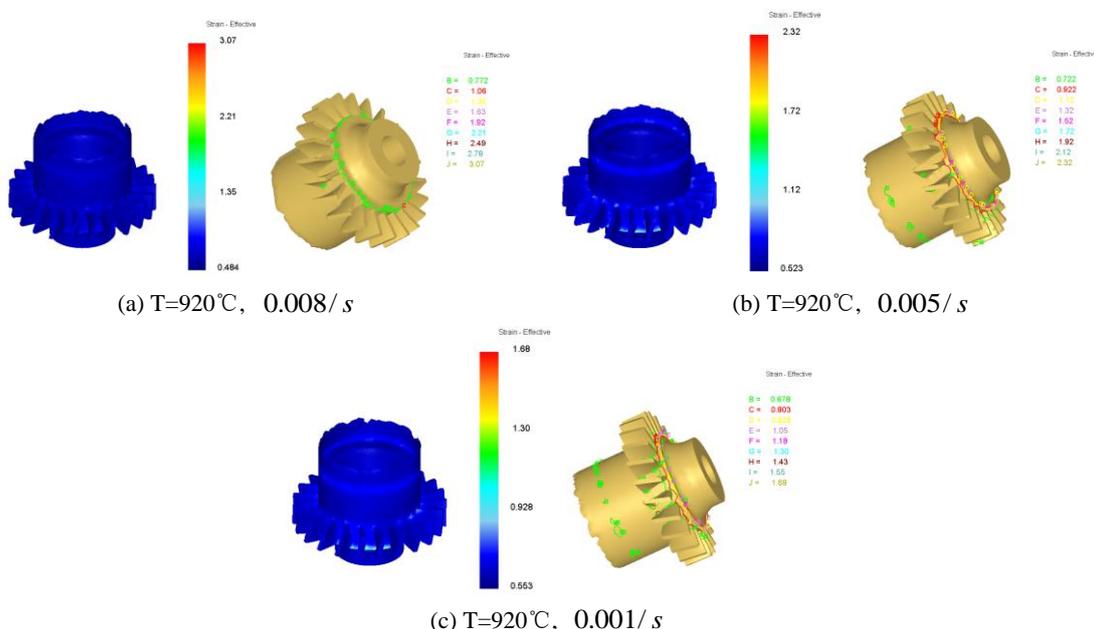


图 3 工件的等效应变场

Fig.3 Equivalent strain distribution of workpiece

### 2.3 载荷-行程曲线

图 4 为 3 种应变速率在同一温度(920°C)时, 流变成形过程凸模和凹模的载荷-行程曲线。

比较图 4(a)~图 4(c)可以看出, 模具所承受的载荷(变形抗力)随凸模行程而变, 且对应变速率非常敏感。变形速率越快, 其变形抗力越大。这是因为金属的流变过程是以一定的速率进行的, 变形速率愈大, 流变过程愈来不及充分进行, 因此随变形速率的提高, 变形抗力增大。较低的应变速率不仅可以减小模具的弹性变形, 提高产品的尺寸精度, 有利于产品零件的均匀变形, 而且变形过程中流变应力降低, 可以改善模具的受力状况, 使模具趋于安全, 因此, 在实际应用中可以选择吨位较小的压力机来生产第二级叶轮件。

运用载荷—行程曲线估算成形载荷、选择设备吨位。根据模拟结果, 当应变率为一较小值(0.001/s)时, 变形抗力为 3732kN, 因此在实际生产中, 采用 400 吨的压力机

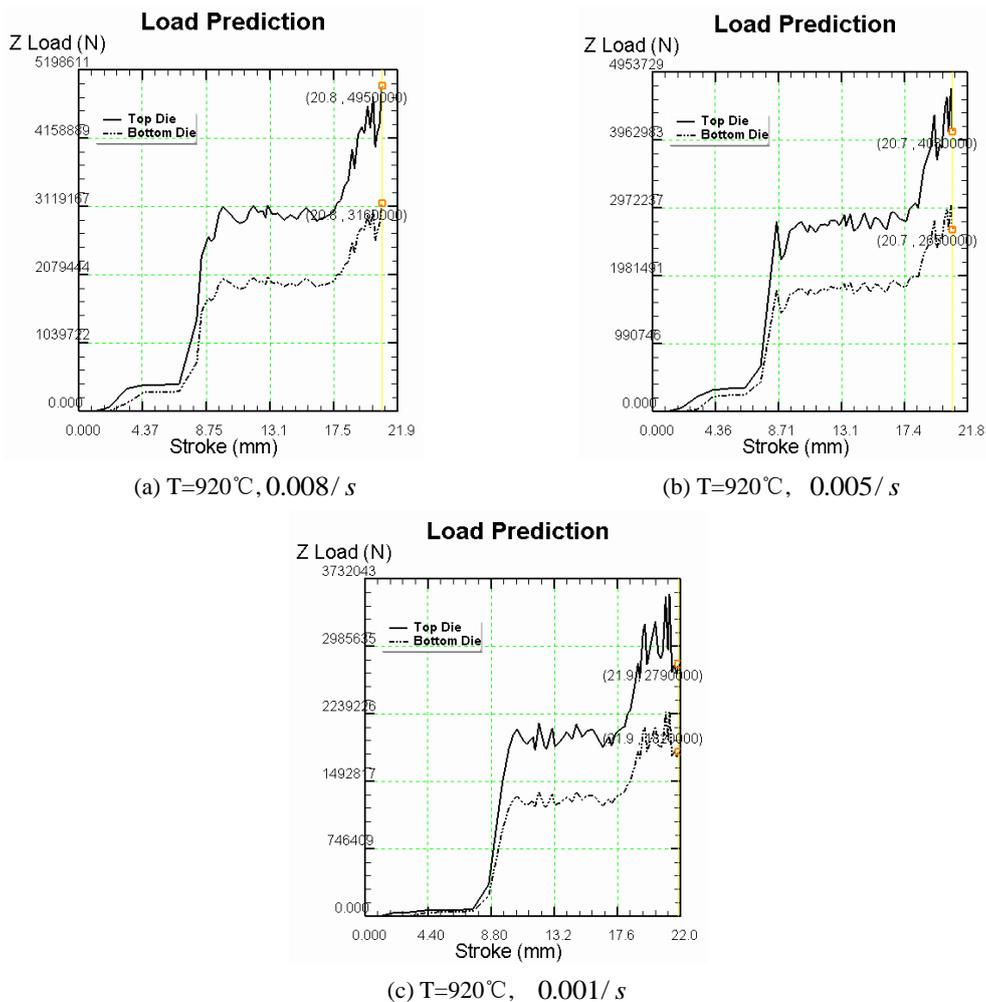


图 4 载荷—行程曲线

Fig.4 Curves of load vs. stroke

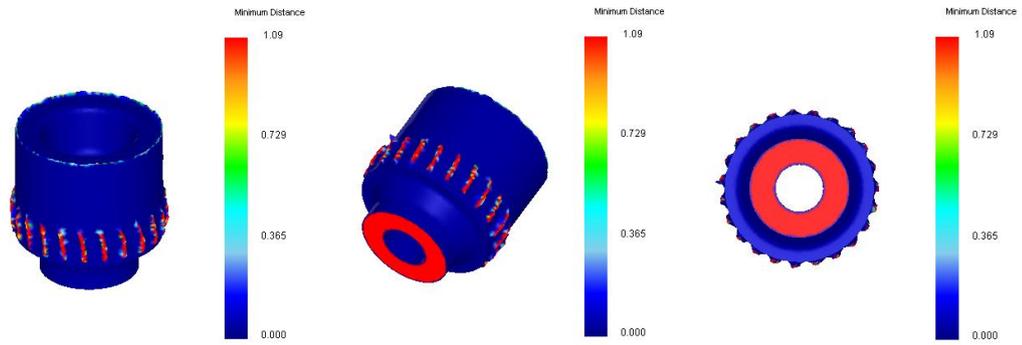
### 3 工件的成形效果及金属流动特点

#### 3.1 成形效果

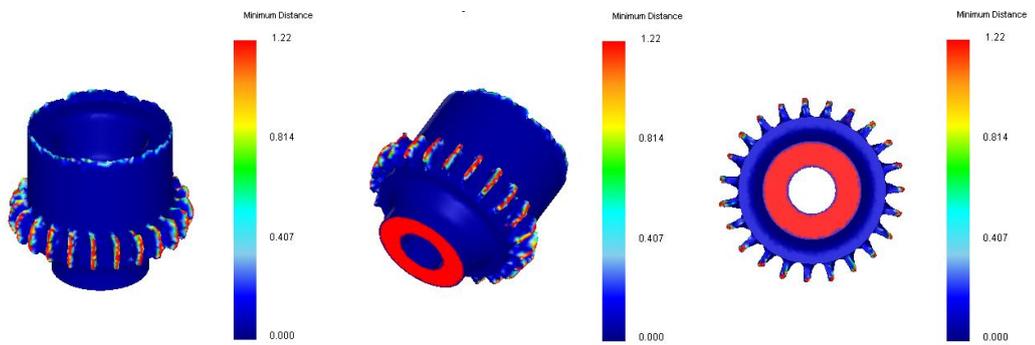
由上述分析可知, 选用较小的应变速率成形可以得到令人满意的效果。因此, 采用初始成形温度为 T=920°C, 应变速率  $\dot{\epsilon}=0.001/s$  这一模拟方案, 并对成形效果、金属流动的特点以及点迹追踪图进行了分析。

图 5a~ 图 5e 为最小间隙效果, 分别显示了第 20 步、40 步、60 步、80 步和第 100 步工件与模具的接触情况。在 DEFORM 3D 中, 当最小间隙值大于 0.2mm 时, 便认为工件脱模。

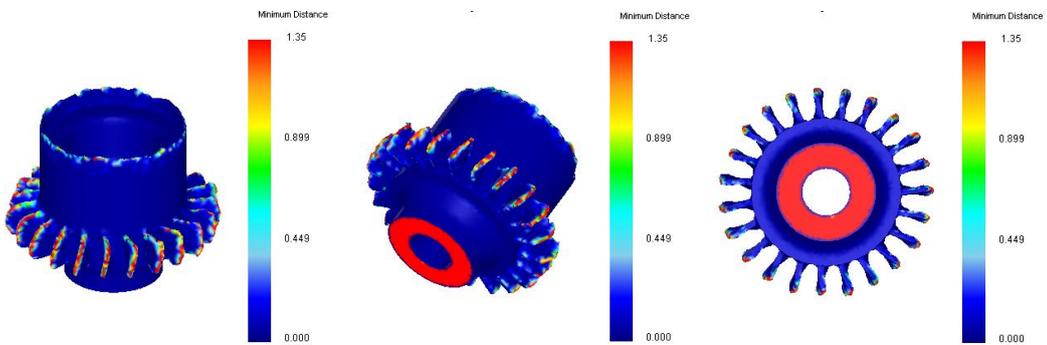
115 图 5e 为最终成形时工件与模具的接触情况，可以看到，工件的上端形成一圈飞边，这与通常的实际生产成形时情况吻合，金属充满凹模内的镶块，S 形叶片成形很好。



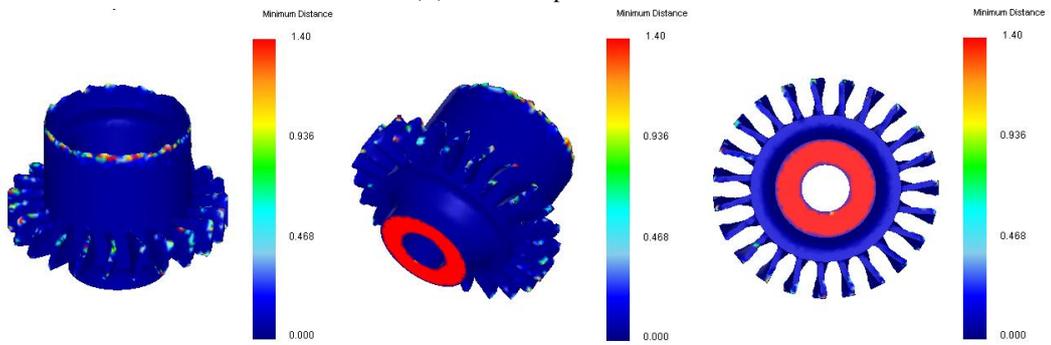
(a) time step 20



(b) time step 40



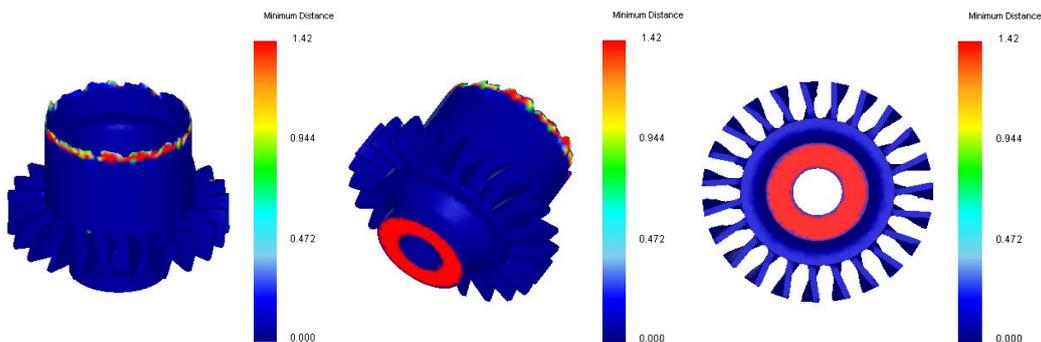
(c) time step 60



(d) time step 80

120

125



(e) time step 100  
图5 工件触模情况

Fig.5 Status of mold-contacted

130 由图 6 可以清楚地看到当凸模行程分别为 0mm、9.3mm、16.8mm 和 21.9mm 时 TC11 钛合金坯料在模腔中的流变成形状况。结果表明，采用等温热流变成形的方法加工第二级叶片盘可以达到工艺要求，金属充型较好，工件基本成形。

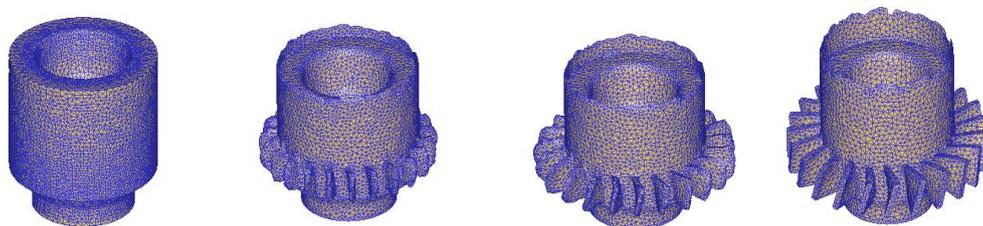


图 6 凸模不同行程时工件流变成形过程的网格变化图

135 Fig.6 Deformed meshes of rheological forming process on difference stroke of the punch

### 3.2 点迹追踪图

DEFORM 3D 具有显示事先指定点的特征变量从模拟过程到结束过程中的轨迹功能，不仅能追踪点的位置，而且能追踪那些位置的状态变量。

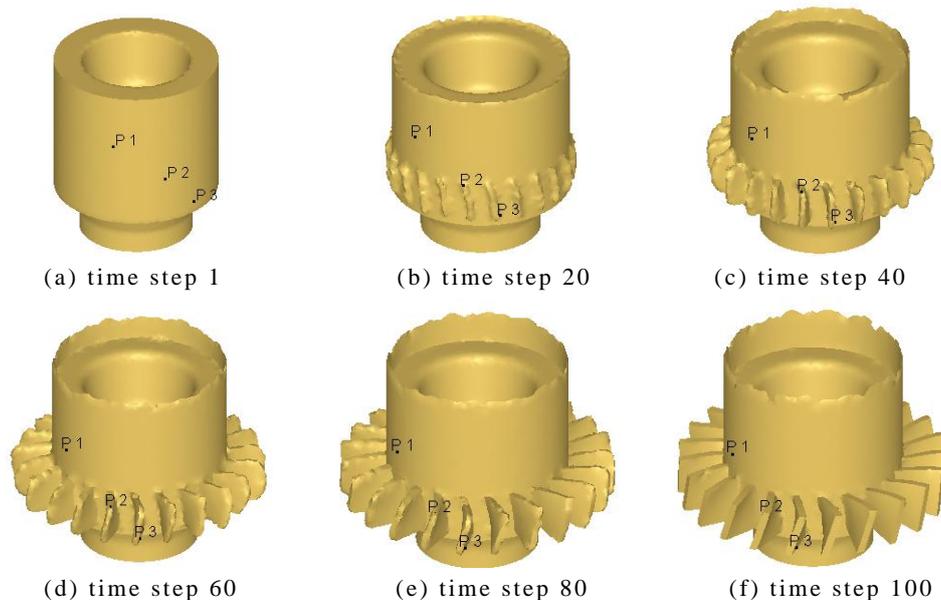


图 7 质点运动轨迹图

Fig.7 Sketch of particles' moving track

145

在工件上取 3 个有代表性的点 P1、P2 和 P3。图 7 为工件上这 3 个点的运动轨迹图。从图中可清楚的了解质点的位置变化以及叶片的形成过程。图 8 为 3 个质点的应变轨迹图。

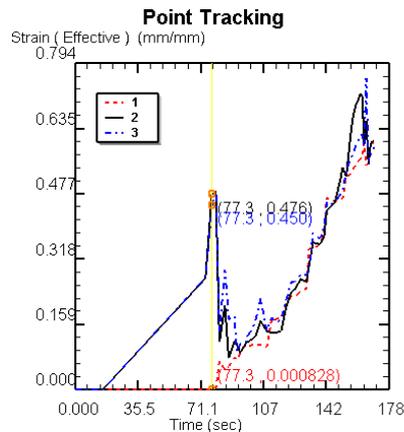


图 8 质点应变轨迹图

Fig.8 Sketch of particles' strain track

#### 4 结论

1) 通过钛合金第二级整体叶片盘等温热流变成形工艺过程的模拟，对工件的温度场、应变场以及载荷-行程曲线进行了分析，为实际生产提供了重要依据，从而节省了大量的工艺试验材料和费用，缩短了工艺周期。

2) TC11 钛合金对应变速率较为敏感，较低的应变速率有利于产品的均匀成形，有利于提高产品的尺寸精度，有利于降低成形件的变形抗力和所需的压力机吨位。

3) 通过计算机模拟可以很直观的看到金属的流动情况，看其有无折叠产生，金属能否充满整个模具型腔。判断是否有缺陷的产生，并可以通过多次模拟寻求消除缺陷的方法，进而判断所选用的工艺参数、模具参数是否合理。这种有限元数值模拟的逆向应用，能够提供优化的工艺设计及模具设计方案，从而提高材料的利用率。

#### [参考文献] (References)

[1] 王文新.推重比 10 一级发动机的材料和工艺分析[J]. 航空工艺技术, 1996, (4): 39.

[2] 李苏洋, 罗迎社, 李颂文, 许小虎, 周建罗. TC11 钛合金盘等温流变成形的数值模拟及其生产应用[J]. 热加工工艺, 2001 (1): 22-25.

[3] LUO Y S. The survey in researching and prospect on metal processing rheology[C].Proc. of X Ⅲth international congress of rheology, Cambridge, UK, 2000 (3), 406-408.

[4] LUO Y S, DOHDA K, WANG Z. Experimental Solution for Viscosity Coefficient of Solid Alloy Material[J].Int. J. of Applied Mechanics and Engineering, 2003,(8): 271-276.

[5] LUO Y S, LIU F, YANG L,et al. The Numerical Simulation and Mechanics Analysis for Deep-Draw Thermal-rheological Forming of One Ti Alloy Rectification Internal Hood[J]. Key Engineering Material, 2004. (274-276): 721-726.

[6] WANG G C, ZHAO G Q, XIE S S, LUAN Y G. Numerical and experimental study on new cold precision forging technique of spur gears[J].Trans. Nonferrous Met. Soc., 2003.13(4): 798-802.

[7] YU M, LUO Y S, LUO W B, PENG X H. Numerical Simulation and Experimental Study on Rheological Properties of Polypropylene[J].Journal of Central South University of Technology, 2007.14(s1):151-153.