

# TC4 钛合金杯形件等温挤压数值模拟研究

## Finite Element Simulation of Isothermal Extrusion Process of TC4 Alloy Cup-Shaped Workpiece

中国工程物理研究院机械制造工艺研究所 杨文华 吉 卫 周朝辉 郝爱国

**[摘要]** 为了能够在实际生产中提高材料利用率和生产效率,借助 DEFORM-3D 有限元法模拟了 TC4 钛合金杯形件等温挤压成形过程,分析了不同的挤压速度对变形材料等效应力,应变分布的影响。结果表明:挤压速度为 3mm/s 时,等效应变数值较小,杯形件变形相对均匀。内壁圆弧过渡区域的应力、应变较大,容易出现开裂。

**关键词:** 等温挤压 数值模拟 TC4 钛合金

**[ABSTRACT]** In order to improve the material utilization and production efficiency in the actual production, isothermal extrusion process of TC4 titanium cup-shaped workpiece is simulated with the DEFORM-3D finite element method. The effect of different extrusion speeds on the distribution of equivalent stress and strain of the workpiece is analysed. The results show that: when extruded at the speed of 3mm/s, the value of equivalent strain is small, and uniform deformation is achieved. The values of stress and strain are relatively high at inner arc transition zone, so cracking might occur.

**Keywords:** Isothermal-extrusion Numerical simulation TC4 alloy

TC4 (Ti-6Al-4V) 合金为典型的  $\alpha + \beta$  两相钛合金。该合金具有优异的综合性能,利用其良好的工艺塑性和超塑性,可成形各类零部件,广泛用于航空航天工业、医疗器材、武器装备等领域<sup>[1-5]</sup>。但 TC4 钛合金也存在变形抗力对温度敏感的特性<sup>[6-7]</sup>,导致钛合金深筒形件生产难度大,成形过程容易出现开裂的现象。等温挤压是近几年发展起来的一种新进成形技术,是将模具加热至变形温度,毛坯在变形过程中保持恒温,这样就极大地减小了变形抗力和变形功<sup>[8-9]</sup>。挤压时零件内外温度分布均匀、变形均匀,从而导致生产出的零件组织性能均匀<sup>[7]</sup>。

图 1 所示为杯形工件示意图,过去采用 TC4 棒材进行机械加工量产该零件,加工困难且工时长,材料利用率低、生产效率低和生产成本高。因此,期望获得一种能缩短加工工时,提高材料利用率和生产效率的成形工艺,实现低成本成形该零件的目的。本文借助

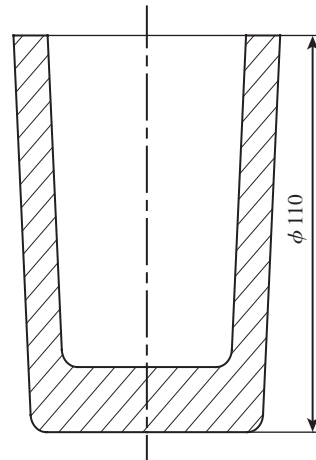


图1 挤压工件示意图

Fig.1 Shape of extrusion workpiece

DEFORM-3D 模拟软件,对 TC4 钛合金杯形件等温挤压成形过程进行了模拟分析,观察成形过程变形材料应力应变分布情况及金属流动规律,从而更好地指导实际生产过程中该零件等温挤压工艺的制定。

### 1 有限元模型的建立

基于本模型是轴对称的,可选取实际几何模型的 1/2。图 2 所示为挤压有限元几何模型,采用四面体网格

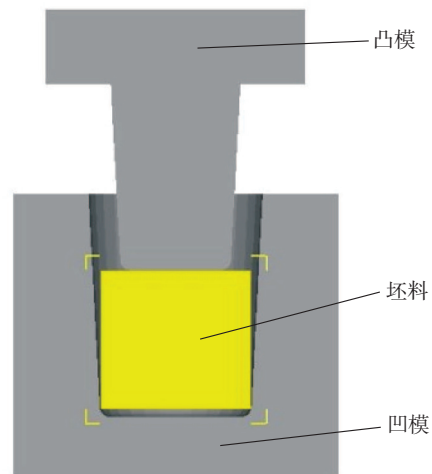


图2 挤压有限元模型

Fig.2 Finite element mode of extrusion

对坯料进行网格划分,网格单元数为 24000 个。选用剪切摩擦方式,摩擦因数设定为 0.3。TC4 相变点 1000℃ 左右,为挤压过程采用等温挤压,一般在相变点下 30~50℃ 进行,故模具和坯料的初始温度均为 950℃。实际生产在低速下进行,挤压速度分别取 1mm/s、3mm/s、5mm/s,以研究挤压速度对挤压过程的影响。

## 2 模拟结果及分析

### 2.1 挤压基本过程及分析

图 3 所示为不同增步下反挤成形示意图,可以看出:随着凸模的下压,坯料金属沿着空腔不断向上流动。凸模与坯料的接触面积不断增加,摩擦力不断增大,也使得变形越来越困难。这可以从图 4 中清晰地看出,随着挤压行程不断增加,载荷几乎呈线性增大,直至挤压过程结束。

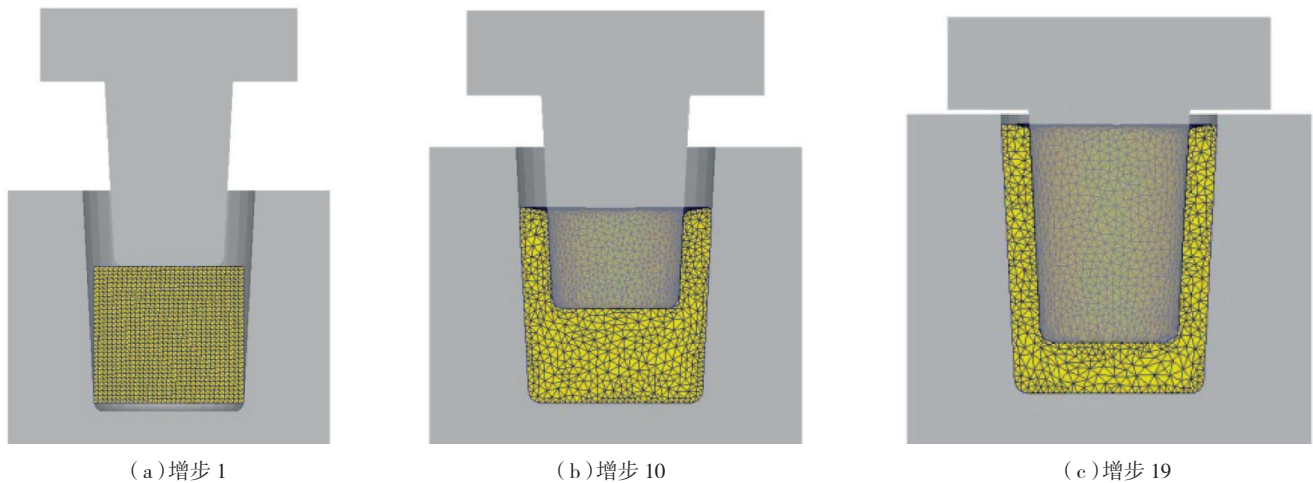


图3 不同增步下反挤成形示意图

Fig.3 Different increment steps of anti-extrusion

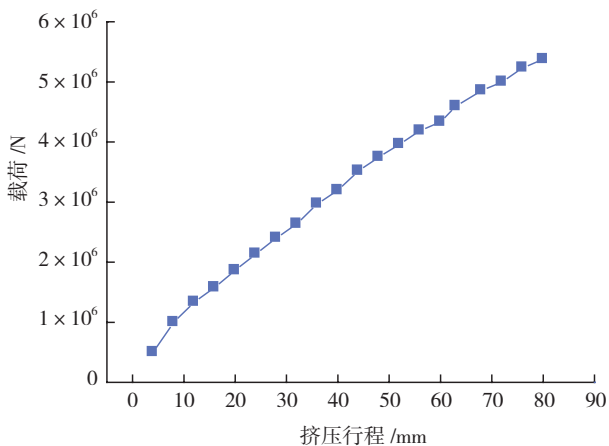


图4 挤压行程-载荷曲线

Fig.4 Curve of extrusion stroke-load

### 2.2 中间挤压阶段等效应力、应变分布

挤压速度是挤压的重要参数,会对变形体的受力状态和变形情况产生显著地影响。图 5 所示为中间阶段时不同挤压速度下工件的等效应力分布图,可以看出等效应力分布规律大体一致,坯料上部分应力分布均匀,数值基本相等。坯料下半部分应力分布呈鱼尾状,中间部位应力较大,底部两端的应力最小。随着挤压速度的增加,最大等效应力的数值不断增加。当挤压速度为 5mm/s 时,最大等效应力出现工件内壁圆弧过渡区域,最高达 93.8MPa。

图 6 为中间阶段时不同挤压速度下工件的等效应变分布图,可以观察到工件等效应变分布不均匀,最大等效应力分布在内壁,而外壁和下端部等效应变则较小。当挤压速度为 1mm/s 时,等效应变数值最大,达到了 8.3mm/mm。当挤压速度为 3mm/s 时,等效应变数值

较小,表明在这个条件下变形更为均匀。

### 2.3 挤压结束时等效应力、应变分布

图 7 为挤压结束时不同挤压速度下工件的等效应力分布图,可以看出等效应力分布规律大体一致,工件薄壁区域应力分布均匀。工件薄壁上端的等效应力最小,这是由于这个区域变形基本完成,只做刚性平移,受到凸模作用比较小。工件下端部的应力值最大,这是因为受到凸模的挤压,力穿透了下端部。随着挤压速度的增加,最大等效应力的数值不断增加。当凸模挤压速度为 5mm/s 时,最大等效应力出现工件内壁圆弧过渡区域,最高达 95.2MPa。

图 8 为挤压结束时不同挤压速度下工件的等效应变分布图,可以观察到工件等效应变分布与中间挤压阶段一致,分布不均匀。内壁的等效应变要大于外壁和下

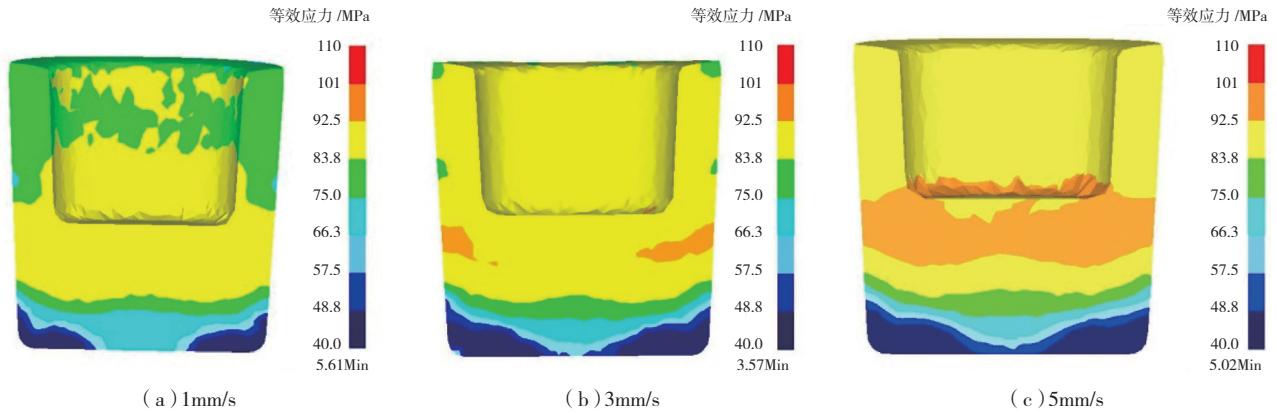


图5 不同挤压速度下中间阶段工件等效应力分布图

Fig.5 Equivalent stress distribution of workpiece at different extrusion speed at intermediate stage

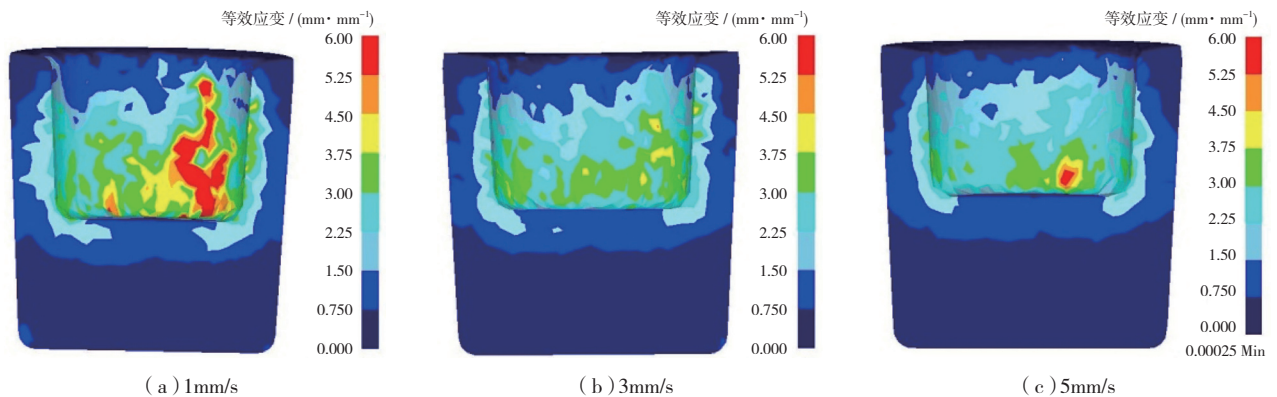


图6 不同挤压速度下中间阶段工件等效应变分布图

Fig.6 Equivalent strain distribution of workpiece at different extrusion speed at intermediate stage

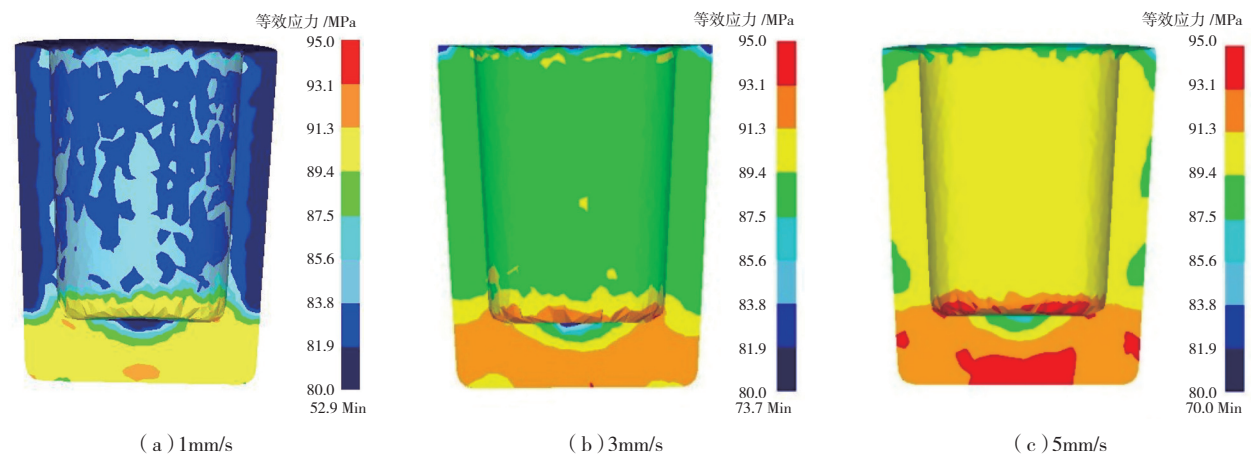


图7 不同挤压速度下挤压结束时等效应力分布图

Fig.7 Equivalent stress distribution of workpiece at different extrusion speed at the end of stage

端部的等效应变,这说明挤压过程内外变形不均匀,容易出现开裂现象。凸模挤压速度为 1mm/s 时,等效应变数值最大,达到了 10.6mm/mm。主要分布于内壁圆弧过

渡区域和内壁中部区域。与中间挤压阶段一样,凸模挤压速度为 3mm/s 时,等效应变数值较小,变形相对均匀。

#### 2.4 挤压速度对载荷的影响

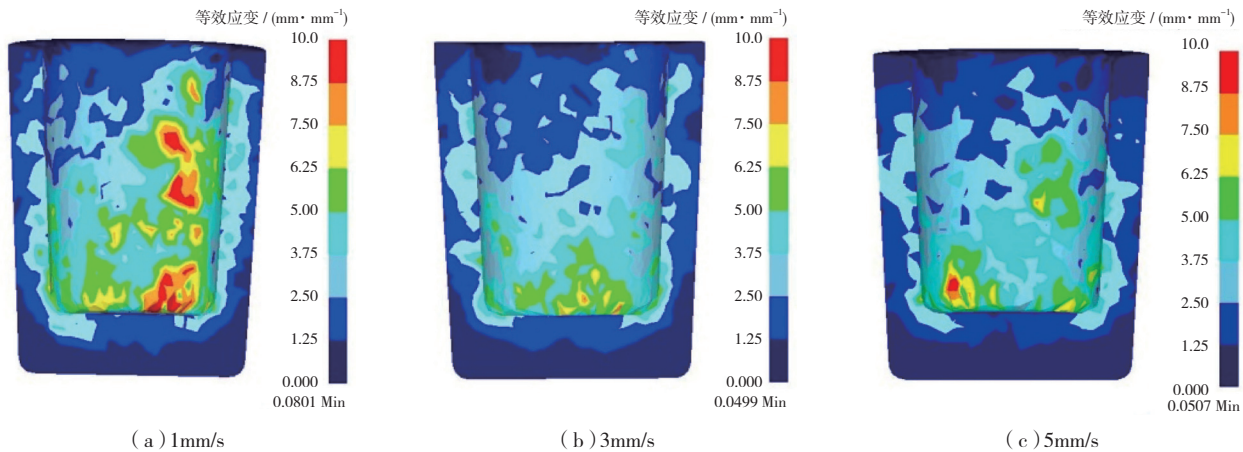


图8 不同挤压速度下挤压结束时等效应变分布图

Fig.8 Equivalent strain distribution of workpiece at different extrusion speed at the end of stage

在挤压速度为 1mm/s、3mm/s、5mm/s 3 种条件下挤压模拟,可以得到挤压行程—载荷曲线,如图 9 所示。

从图 9 中可以看出,不同挤压速度时曲线的变化趋势都有相同的规律:载荷随着挤压行程的增大不断上升,呈线性关系,直至挤压过程结束。挤压速度的变化引起载荷的变化不大,三个不同速度对应的载荷基本一致,尤其是在挤压后面阶段,数值相吻合。其原因在于:一方面,挤压速度的增大会使得更多的金属同时变形,使得挤压力升高;另一方面,挤压速度的提高会使大量的塑性变形功所产生的热量来不及向周围介质传递,而使工件的温度升高,工件的抗剪强度  $\tau_b$  值和抗拉强度  $\sigma_b$  值降低,从而挤压力降低。所以,可认为挤压速度的大小对载荷的影响不大<sup>[10]</sup>。

综合以上分析,可以得出随着挤压速度的增大,工件的最大等效应力不断增加;而等效应变的数值在速度为 3mm/s 时最小,说明此条件下工件变形较均匀。可以得出挤压速度为 3mm/s 时的工件变形比较稳定,应力应

变分布较为均匀,此速度为最优挤压速度。

### 3 结论

(1) 基于 DEFORM-3D 对 TC4 钛合金杯形件等温挤压成形过程进行了模拟,得出了变形材料的应变、应力最大值出现在内壁圆弧过渡区域,容易出现裂纹和缺陷。

(2) 通过对比不同挤压速度对变形材料应力应变的影响,可以发现挤压速度为 3mm/s 时,杯形件的等效应变数值较小,变形较为均匀,这为实际生产提供了理论指导。

### 参考文献

- [1] 张永强,冯永琦,李渭清,等. TC4 合金管材挤压成型工艺研究. 稀有金属快报,2006,25(10): 27-29.
- [2] 陈建维. TC4 钛合金深筒形件的超塑成形及其精度控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士论文,2007.
- [3] 李瑞婷,郭伟,朱颖,等. TC4 钛合金超塑成形研究现状及其发展展望. 航空制造技术,2012(15): 91-94.
- [4] 杨慧丽,李晓维,羊玉兰,等. Bti62 钛合金锻造工艺. 中国有色金属学报,2010,20(1): 815-818.
- [5] 颜苏. Ti-6Al-4V 合金热挤压管材工艺研究. 航空制造技术,2010(20):73-74.
- [6] 杨宝付,张治民,王强,等. TC4 合金等温挤压过程的有限元数值模拟. 热加工工艺,2004(1): 34-36.
- [7] 郭鸿镇,姚泽坤,魏迎光,等. 等温精密锻造技术的研究进展. 中国有色金属学报,2010,20(1): 570-576.
- [8] 龙丽,李晓丽,李森泉,等. TA15 合金等温挤压过程的热力耦合模拟. 中国机械工程,2006,17(2): 212-215.
- [9] 张慧芳,张治民. ZTC4 钛合金筒形件等温挤压工艺分析及模具设计. 新技术新工艺,2009(2): 102-104.
- [10] 刘琼. 温挤压模具早期失效影响因素分析 [D]. 南宁: 广西大学硕士论文,2008.

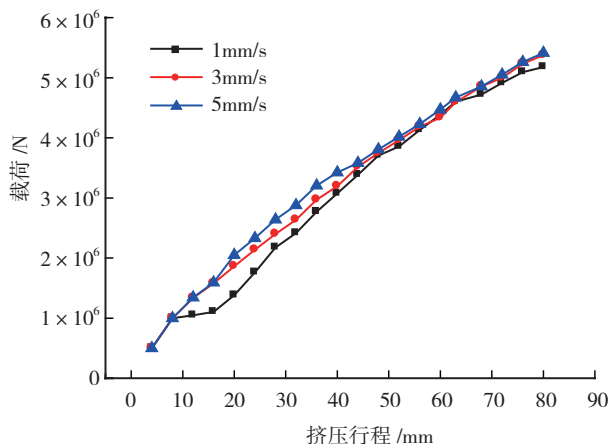


图9 不同挤压速度下挤压行程—载荷曲线

Fig.9 Curve of extrusion stroke-load at different extrusion speed

(责编 深蓝)