

## 多道次加载下 TC6 钛合金作动筒等温锻造成形规律

何国云<sup>1</sup>, 徐勇<sup>2</sup>, 魏科<sup>1,3</sup>, 朱琳<sup>1</sup>, 王高潮<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063; 2. 南昌航空大学 通航学院, 江西 南昌 330063;  
3. 首尔国立大学 材料科学与工程系 & RIAM, 韩国 首尔 151-742)

**摘要:** 对 TC6 钛合金作动筒锻件进行单/双/三道次加载成形路径分析, 以单道次加载成形中的载荷剧增处为转变点, 并在该处改变凸模加载速度, 采用双道次和三道次对作动筒进行加载成形规律研究。通过平均成形载荷与成形时间之比来表征成形效率, 并对比得出较好的加载成形路径, 研究该加载路径下的成形载荷大小与材料流动规律, 结果表明: 通过对比成形效率得出平均载荷较小、成形效率较高的 3 种多道次加载路径。从材料流动角度分析了单道次压下量为 13% 时载荷剧增是由于凸模顶端的水平面与工件开始接触, 材料流动变慢导致的; 而在压下量为 72% 时载荷增加是因为工件已经和凹模底部开始接触, 大量材料继续向侧向实心凸起处流动, 少量材料向上反挤成形作动筒的上端。最后, 通过实验与模拟验证表明, 作动筒锻件在双道次加载路径下的筒体成形良好, 底部实心凸起处充填饱满。多道次加载能够发挥钛合金的超塑性能, 提高成形效率, 精确塑性成形。  
**关键词:** 等温锻造; TC6 钛合金; 作动筒; 多道次加载; 加载速度; 成形效率; 成形载荷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.003

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0023-09

## Isothermal forging laws on TC6 titanium alloy actuator cylinder under multi-pass loading

He Guoyun<sup>1</sup>, Xu Yong<sup>2</sup>, Wei Ke<sup>1,3</sup>, Zhu Lin<sup>1</sup>, Wang Gaochao<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;  
2. School of Navigation, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;  
3. Department of Materials Science and Engineering & RIAM, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

**Abstract:** The forming paths of single/double/three-pass loading for TC6 titanium alloy actuator cylinder forgings were analyzed. Taking the sharp increase point of load during the forming process of single-pass loading as the transition point, the punch loading speed was changed at this point, and the loading forming rules of the actuator cylinder was studied by double passes and three passes. Furthermore, the forming efficiency was characterized by the ratio of average forming load to forming time, and a better forming path of loading was obtained through comparison to research the forming load value and the material flow law under this loading path. The results show that three paths of multi-pass loading with smaller average forming load and higher forming efficiency are obtained by comparing the forming efficiency. From the perspective of material flow, it is analyzed that when the single pass reduction amount is 13%, the load increases sharply because the horizontal plane at the top of punch begins to contact with the workpiece and the material flow slows down. When the reduction amount is 72%, the load increases because the workpiece begins to contact the bottom of die, a large amount of material continues to flow to the lateral solid bulge, and a small amount of material is back-extruded upward to form the upper end of actuator. Finally, the experimental and simulation verification show that the actuator cylinder forgings is well formed under the double-pass loading path, and the solid bulge at the bottom is fully filled. It is confirmed that the multi-pass loading can exert the superplastic properties of titanium alloy, improve the forming efficiency, and better achieve the precise plastic forming.

**Key words:** isothermal forging; TC6 titanium alloy; actuator cylinder; multi-pass loading; loading speed; forming efficiency; forming load

钛合金因高强度重量比、优良的耐腐蚀性及低

弹性模量等特性, 已成为航空航天领域应用的首选材料之一<sup>[1-3]</sup>。其中, TC6 钛合金是一种综合性能良好的  $\alpha+\beta$  双相钛合金, 能在 400 °C 环境下长时间工作, 主要用于制造航空发动机叶片、作动筒等关键零件<sup>[4-5]</sup>, 但是, TC6 钛合金锻造时的变形抗力较大, 对温度和应变速率敏感, 为难成形材料。TC6 钛合金作动筒是航空发动机尾喷口上的关键传动部件<sup>[6]</sup>, 其主体结构为深筒, 而头部为实心柱

收稿日期: 2023-07-17; 修订日期: 2023-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52005241); 江西省自然科学基金资助项目 (20232BAB204050); 国家留学基金委 (No. 202208360107)

作者简介: 何国云 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 2430561321@qq.com

通信作者: 魏科 (1986-), 男, 博士, 副教授

E-mail: weike@nchu.edu.cn

体, 结构复杂且整体难成形, 易导致成形载荷过大, 对模具强度也提出了更高的要求。然而, 常规模锻成形 TC6 钛合金作动筒只能通过径向分模锻造出实心外形, 再通过机械加工成形筒腔。该方式制造的作动筒的材料利用率较低, 且工件的变形量小, 对组织改善作用不明显; 而机械加工方式会破坏金属流线, 易导致成品零件的性能不达标<sup>[7-8]</sup>。超塑性等温锻造具有变形抗力小、易成形等优势, 成为钛合金复杂构件精确成形的一种重要工艺方式<sup>[9]</sup>。该方法是将模具与坯料加热至相同温度, 然后以较低的应变速率进行模锻成形, 有效地克服了因坯料表面激冷而导致的变形抗力剧增, 工件变形也更加均匀, 为成形钛合金作动筒提供了一种可行方法<sup>[10-11]</sup>。然而, 钛合金在超塑变形时, 应变速率一般保持在较低水平, 以致其生产效率低, 因此在材料塑性满足要求的前提下, 应适当提高变形速率, 以满足高效生产的需求。

采用多道次加载成形可以实现分阶段下模具下压速度的变化, 因此对作动筒锻件进行多道次加载, 能够在改善材料超塑性的同时提高成形效率, 是降低成形载荷、改善不均匀变形, 并获得成形精度较高的钛合金复杂锻件的有效方法。徐勇等<sup>[12]</sup>通过对多道次温轧 TC4 钛合金板材进行超塑性拉伸实验, 得出多道次温轧形成的细小晶粒、破碎弥散分布的  $\beta$  相以及变形过程的动态再结晶有利于提高合金的超塑性的结论。Zheng J 等<sup>[13]</sup>提出了一种多道次滚挤工艺制造带纵向肋的薄壁方管, 通过有限元模拟揭示了金属的纵向变形行为和等效应变分布, 研究

了不同变形工艺参数对成形力和损伤值的影响。徐凯华等<sup>[14]</sup>对热等静压态 TC4 钛合金进行多道次热压缩实验, 研究了多道次热变形对 TC4 钛合金组织演变的影响, 不同道次变形后, 试样中的组织相继发生改变。丁凯伦等<sup>[15]</sup>观察了 Ti62A 钛合金多道次降温条件下材料的变形及微观组织演化行为, 研究了随压缩道次增加和变形温度降低, 次生  $\alpha$  相组织的变化规律。上述研究证实了钛合金多道次成形是提高塑性、降低成形载荷、改善组织性能的重要方法, 然而, 有关 TC6 钛合金复杂筒体锻件多道次成形方面的研究还相对较少, 因此有必要进一步开展相关研究。

有限元模拟技术可以了解金属在高温下的流动行为, 已成为探究材料成形特征的一种有效途径, 也是本文用于 TC6 钛合金作动筒锻件成形分析的主要方法<sup>[16-17]</sup>。以 TC6 钛合金作动筒为研究对象, 首先, 基于刚粘塑性有限元理论建立多道次等温锻造成形有限元模型, 通过改变不同道次的加载速度对各加载路径下的载荷及成形效率进行综合评判。其次, 探究较好的成形路径, 并研究该加载路径下的载荷大小、成形效率和材料流动等成形规律, 为提升钛合金超塑性的成形效率提供理论依据。最后, 采用多道次等温锻造实验进行验证。

## 1 有限元建模及思路

通过 UG 软件绘制 TC6 钛合金作动筒锻件的三维模型及二维工程图, 如图 1 所示; 刚塑性有限元模型如图 2 所示。为获得可靠的模拟结果, 必须依

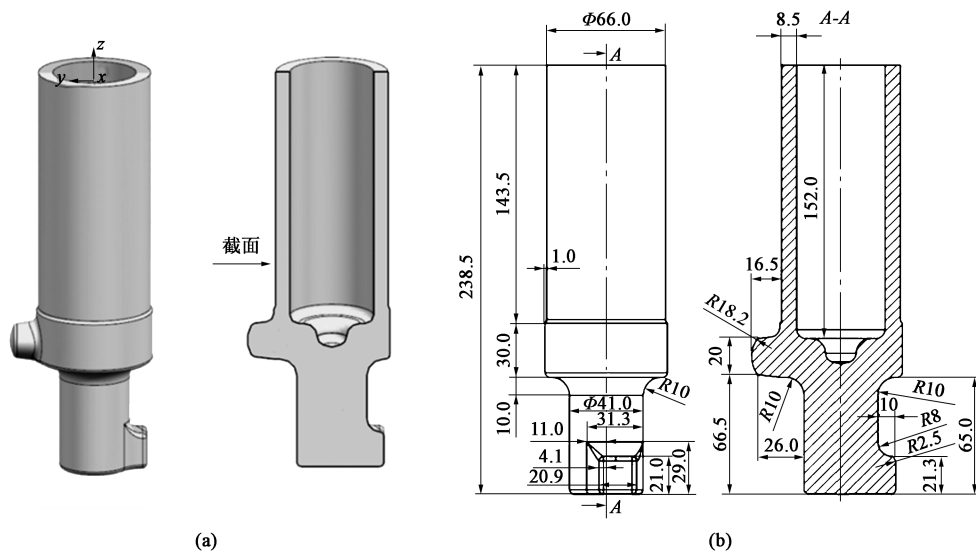


图 1 TC6 钛合金作动筒锻件三维图 (a) 与二维图 (b)

Fig. 1 Three-dimensional drawing (a) and two-dimensional drawing (b) of TC6 titanium alloy actuator cylinder forgings

托能够真实反映材料特性的实验数据，为此，在变形温度为 900~945 ℃，应变速率分别为 0.1、0.01 和 0.005 s<sup>-1</sup> 时对 TC6 钛合金进行压缩实验<sup>[4]</sup>。随后，将不同变形温度及应变速率条件下的流变应力导入至有限元模拟软件 DEFORM，以实现不同加载条件下的材料热变形响应。

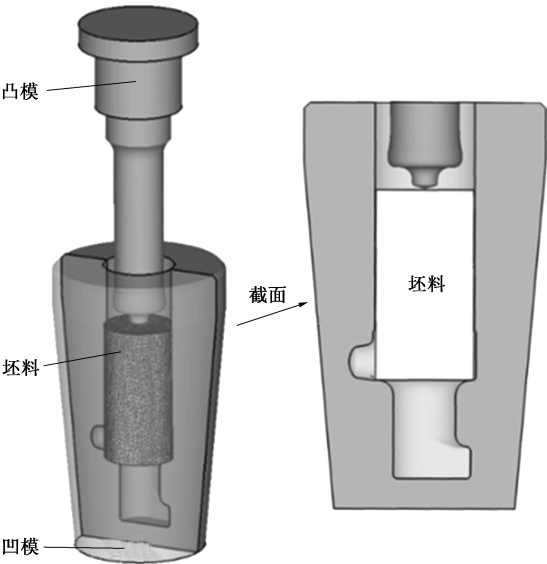


图 2 有限元模型  
Fig. 2 Finite element model

采用刚粘塑性有限元法进行建模，其中凸凹模设为刚体，圆柱形坯料设为变形体并采用四面体单元，以此离散并逼近目标几何形状<sup>[18]</sup>，适用于研究复杂筒体锻件大塑性变形过程。与钛合金相比，模具材料的比热容和导热系数较大，故模具温度不变，以简化计算。首先采用单道次成形方式，将凸模的加载速度分别设定为 0.10、0.05、0.01 和 0.005 mm·s<sup>-1</sup>，而多道次下的加载速度则依照载荷突变情况加以更改；其他前处理参数设置如表 1 所示。

表 1 有限元关键参数  
Table 1 Key parameters of finite element

参数	数值
工件加热温度 $T_1/^\circ\text{C}$	930
模具温度 $T_2/^\circ\text{C}$	850
网格单元总数	60000
摩擦因数 $m$	0.3
模拟总步长	1000
坯料直径/mm	$\Phi 65$
坯料高度/mm	135
工件材料	TC6 钛合金

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 单道次加载成形

对 TC6 钛合金作动筒锻件的成形过程进行模拟分析，图 3 为单道次、不同加载速度下的成形载荷变化曲线。通过压下量分析可知，不同加载速度下的载荷变化趋势一致，随着压下量的增加，载荷出现逐步增大的趋势。此外，从图 3 中还可以看出，在相同压下量下，加载速度越快对应的成形载荷也越大。因此，在 TC6 钛合金作动筒锻件成形时，降低凸模的加载速度能够有效降低成形载荷。通过观察单道次加载成形时的载荷，可将 TC6 钛合金作动筒成形过程分为 3 个阶段：阶段 1，由凸模接触到坯料至压下量达到 13%，载荷缓慢上升；阶段 2，载荷急剧上升后保持稳定至压下量达到 72%；阶段 3，载荷随压下量增加而逐渐增大直至成形结束。

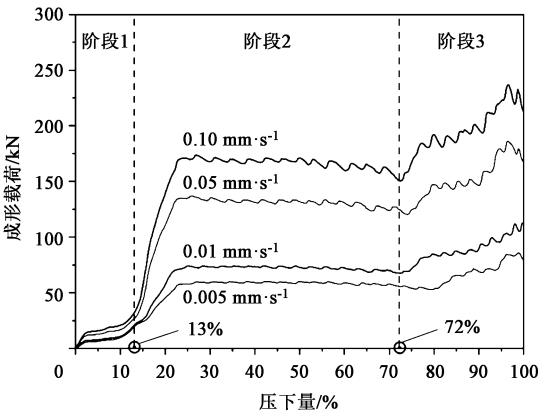


图 3 单道次不同加载速度下的成形载荷变化曲线

Fig. 3 Forming load changing curves at different loading speeds in single pass

在 TC6 钛合金作动筒锻件多道次加载中，通过对比研究多道次加载不同加载速度下的平均成形载荷与成形时间，将二者之比作为成形效率  $\eta$ 。凸模在不同加载速度下，其成形效率的计算公式如下：

$$\eta = f/s \tag{1}$$

式中： $\eta$  为成形效率； $f$  为平均成形载荷； $s$  为成形时间。

表 2 为不同加载路径下成形效率的对比，由表 2 单道次不同加载速度下的成形效率可知，当凸模加载速度增大时，锻件的平均成形载荷也会增大；而保持凸模压下量一定时，凸模加载速度增大则成形时间必然会减少，因此作动筒锻件的成形效率随之增大。在实际生产制造中，成形效率越高，说明平均成形载荷在一定范围内时的成形时间越少，模

表 2 不同加载路径下成形效率对比

Table 2 Comparison of forming efficiency under different loading paths

加载路径	加载速度/ (mm · s <sup>-1</sup> )	平均成形 载荷 <i>f</i> /kN	成形时间 <i>s</i> /h	成形效率 <i>η</i>
单道次	0.10	148.4	0.32	461.9
	0.05	116.2	0.64	180.8
	0.01	65.4	3.21	20.3
	0.005	51.6	6.43	8.0
双道次 - 13%	0.10-0.005	52.8	5.64	9.4
	0.05-0.005	52.3	5.68	9.2
	0.01-0.005	52.2	6.01	8.7
双道次 - 72%	0.10-0.005	114.0	2.02	56.4
	0.05-0.005	93.7	2.25	41.6
	0.01-0.005	60.2	4.11	14.6
三道次	0.10-0.05-0.005	94.6	2.14	44.3
	0.10-0.01-0.005	61.3	3.69	16.6

具所承受载荷的时间越少，增加模具寿命，提高生产效率，减少能源消耗，从而降低生产成本，并达到节能减排的目的。

然而，成形效率的提升势必带来成形载荷的增加，对于某些中小型企业在不具备大型压力机的条件下，无法满足载荷过大的需求，难以实现此类锻件的实际生产。为解决这一难题，本文提出多道次加载成形的思路，由此厘清成形效率及成形载荷之间的关系，为企业满足钛合金复杂构件的成形效率及设备吨位的需求提供选取依据，为实现高效超塑性奠定基础。

2.2 多道次加载成形思路及分析

2.2.1 多道次加载不同路径思路

根据图 3 中的作动筒锻件单道次成形过程中载荷的变化趋势，选择在载荷急剧增加处，即凸模压下量为 13% 和 72% 时改变凸模加载速度，本文研究的多道次分为双道次和三道次两种加载方式。对于双道次加载成形，选择在压下量为 13% 和 72% 时降低模具加载速度，包含两类加载路径，即第 1 道次压下量为 0~13%，第 2 道次压下量为 13%~100%；第 1 道次压下量为 0~72%，第 2 道次压下量为 72%~100%。对于三道次加载成形，选择在压下量为 13% 和 72% 时降低模具加载速度，即第 1 道次压下量为 0~13%，第 2 道次压下量为 13%~72%，第 3 道次压下量为 72%~100%。

为了在降低成形载荷的同时提高成形效率，先以较快的加载速度提高成形效率，后以较慢的加载速度降低载荷。所以双道次加载的加载速度选择为第 1 道次的模具加载速度分别为 0.10、0.05 和 0.01 mm · s<sup>-1</sup>，第 2 道次的模具加载速度统一为 0.005 mm · s<sup>-1</sup>。采用三道次加载时，由于第 2 道次与第 3 道次的成形载荷显著增加，因此第 1 道次的加载速度均设定为 0.10 mm · s<sup>-1</sup>，第 2 道次的加载速度分别降低至 0.05 和 0.01 mm · s<sup>-1</sup>，第 3 道次的加载速度统一降低至 0.005 mm · s<sup>-1</sup>。

按照上述分阶段下不同加载速度对作动筒锻件进行多道次加载的思路，通过有限元模拟对 TC6 钛合金作动筒锻件进行多道次加载，作动筒锻件在不同压下量下的形状变化如图 4 所示，不同加载路径下的成形效率 *η* 的结果如表 2 所示。可以看出，不同道次间加载速度的差值越大时，平均成形载荷越大，而成形效率越高。

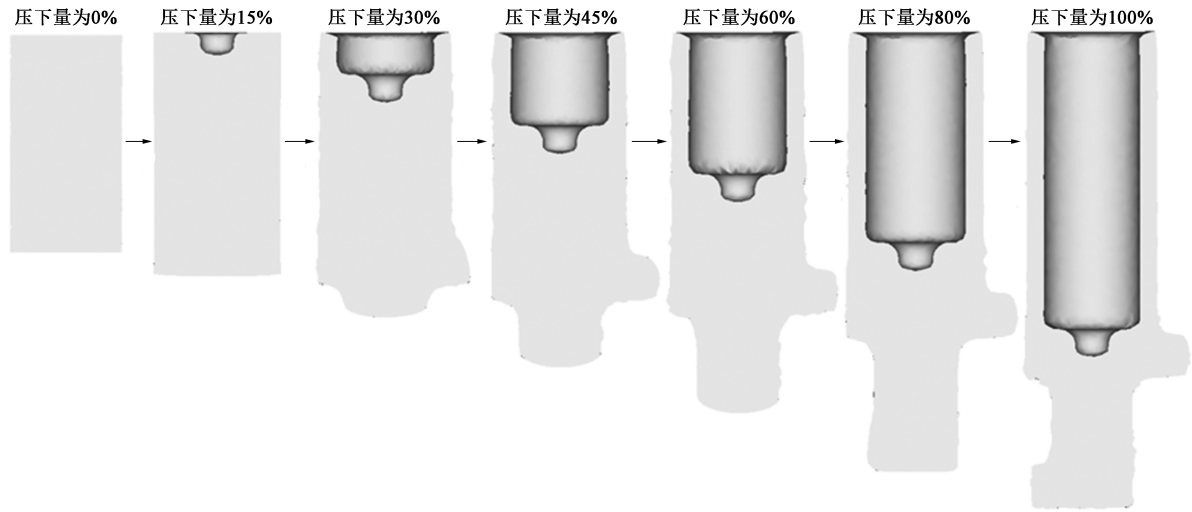


图 4 作动筒锻件的成形过程

Fig. 4 Forming process of actuator cylinder forgings



### 2.2.2 双道次加载成形过程

图 5a 给出了凸模压下量为 13% 时改变加载速度的双道次成形载荷变化曲线, 由图 5a 可知, 在压下量为 13% 时改变加载速度可以较大程度地减小成形载荷。如单道次  $0.10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  加载速度下阶段 2 的平均载荷由 170 kN 减小至 60 kN, 而行程末端的最大载荷约为 80 kN。由表 2 可知, 压下量为 13% 时  $0.10-0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  双道次加载成形的平均载荷只

有 52.8 kN, 成形效率为 9.4, 此路径下的双道次成形载荷得到了有效降低。图 5b 为在凸模压下量为 72% 时改变加载速度的双道次加载过程, 由图 5b 可知, 在压下量为 72% 时改变加载速度也可使行程末端的载荷降低至 80 kN, 但前两组路径下的平均成形载荷较大, 最小平均成形载荷由  $0.01-0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  双道次加载成形得到, 为 60.2 kN, 相应的成形效率  $\eta$  为 14.6。

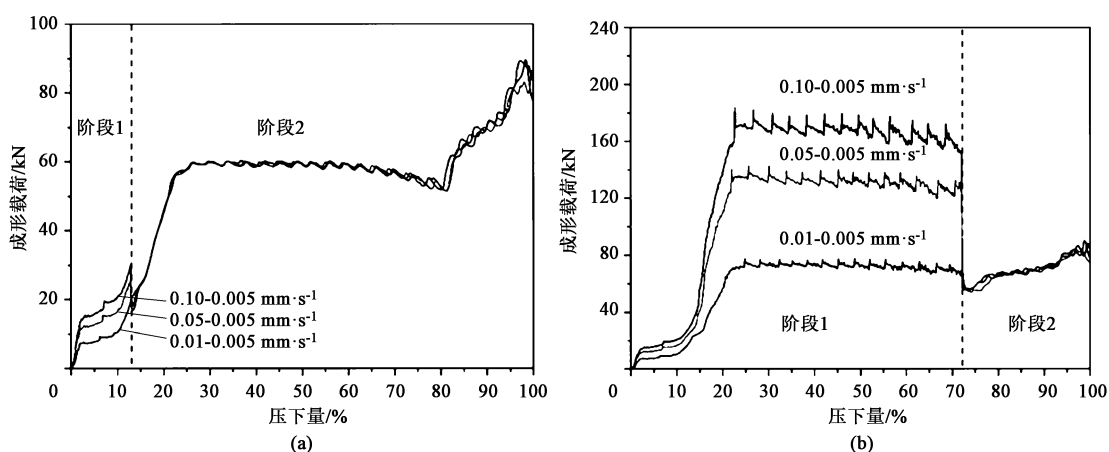


图 5 不同压下量时改变加载速度的双道次成形载荷变化曲线

(a) 压下量为 13% (b) 压下量为 72%

Fig. 5 Double pass forming load changing curves with varying loading speeds at different reduction amounts

(a) Reduction amount of 13% (b) Reduction amount of 72%

### 2.2.3 三道次加载成形过程

图 6 为三道次加载成形下的成形载荷变化曲线, 从图 6 中可以看出, 在  $0.10-0.01-0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  路径下的三道次加载成形中, 成形载荷得到有效降低, 且三道次加载成形的平均载荷为 61.3 kN, 成形效率为 16.6。因此, 在该路径下的三道次加载方式更有利于锻件成形。

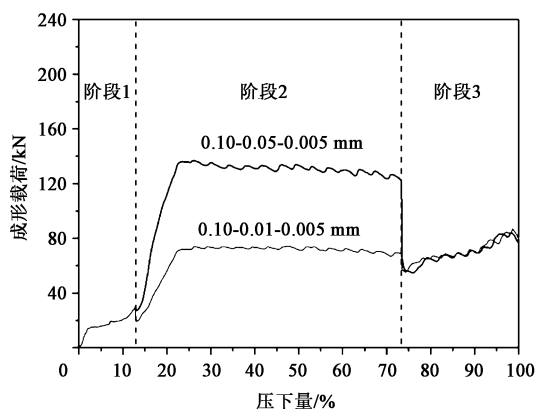


图 6 不同三道次加载路径下的成形载荷变化曲线

Fig. 6 Forming load changing curves under different three-pass loading paths

### 2.3 成形载荷及成形效率分析

通过对比单道次、双道次和三道次加载成形的成形效率可知, 单道次加载能够获得成形效率高、载荷较大或载荷较低、成形效率偏低的加载路径。为此, 提出了多道次加载成形思路, 成形载荷对比结果如图 7a 所示。载荷的变化趋势基本一致, 阶段 2 的成形载荷均在 60 kN 左右, 阶段 3 末期的成形载荷均为 80 kN 左右; 3 组多道次加载路径下的平均成形载荷为 58.1 kN, 较单道次、 $0.10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  加载速度下的成形载荷降低了 60.8%。成形效率对比结果如图 7b 所示, 双、三道次加载得到的成形效率的差异不大, 对应的成形载荷相对较低; 3 组多道次对应的平均成形效率为 13.5, 较单道次、 $0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  加载速度下的成形效率提高了 68.8%。综上所述, TC6 钛合金作动筒的双、三道次加载成形中较好的加载路径为:

(1) 加载路径 1:  $0.10-0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  路径下的双道次-13%加载成形;

(2) 加载路径 2:  $0.01-0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  路径下的双道次-72%加载成形;

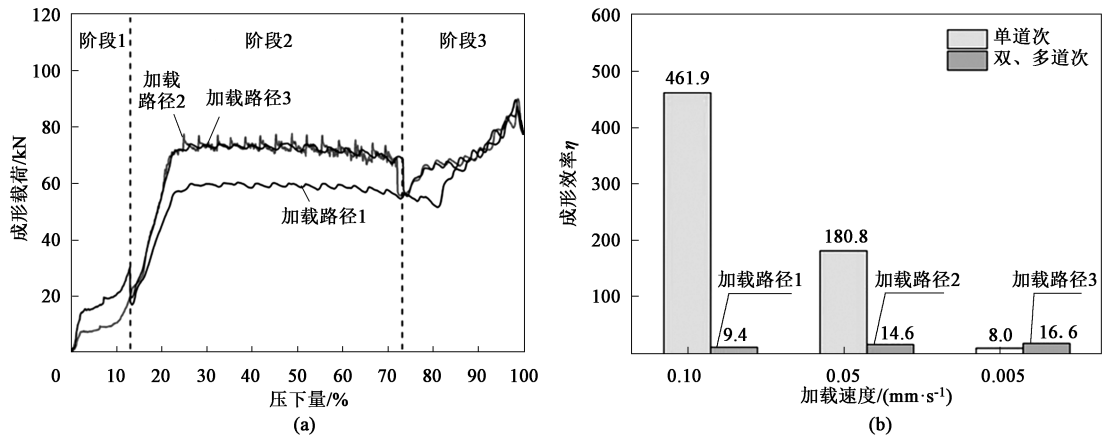


图 7 多道次成形载荷 (a) 及成形效率 (b) 对比

Fig. 7 Comparison of multi-pass forming load (a) and forming efficiency (b)

(3) 加载路径 3:  $0.10-0.01-0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  路径下的三道次加载成形。

2.4 材料流动分析

有限元模拟中的速度矢量图可以反映材料在不同时刻的流动方向, 采用该方法分析作动筒在等温锻造中的材料流动。根据作动筒成形时型腔填充顺

序及其伴随着的载荷变化, 将成形过程按图 3 划分的 3 个阶段进行分析。在凸模压下量达到 13% 的过程中, 采用  $0.10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的加载速度, 材料流动如图 8a 所示, 凸模定径带顶端的水平面与坯料开始接触, 随着凸模和坯料的接触面积不断增大, 成形载荷增幅明显; 此后, 采用  $0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的加载速

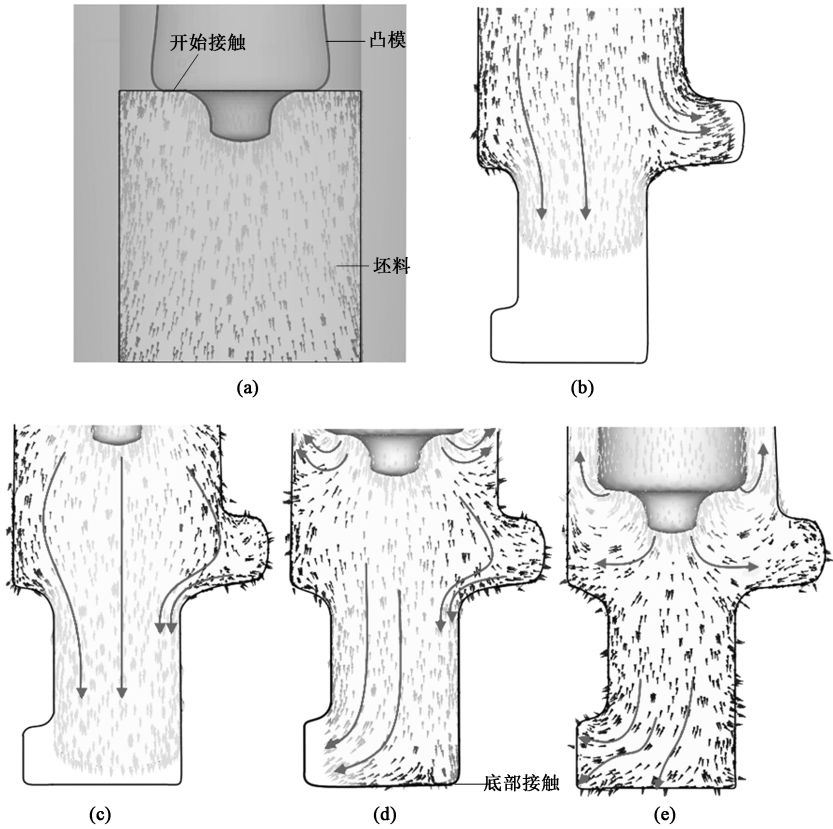


图 8 加载路径 1 下的材料流动情况

(a) 压下量为 13% (b) 压下量为 50% (c) 压下量为 65% (d) 压下量为 72% (e) 压下量为 100%

Fig. 8 Material flow conditions under loading path 1

(a) Reduction amount of 13% (b) Reduction amount of 50% (c) Reduction amount of 65%  
(d) Reduction amount of 72% (e) Reduction amount of 100%

度,凸模压下量为 50%~72%时的材料流动如图 8b~图 8d 所示,材料向下流动的同时,一部分材料流向了中间侧向实心凸起处,待此凸起处材料充满后,即压下量为 65%时,材料进一步向下流动;在凸模压下量到达 72%时,材料与凹模底部接触后,材料开始向底部的实心凸起处流动,而该凸起处也是整个作动筒成形的关键,为难成形部位,这也是该时刻载荷激增的原因。在大量材料向底部实心凸起部分流动时,其中一部分材料是由侧向实心凸起处流下;还有少量材料向上流动,反挤成形作动筒的上端,致使后续阶段的成形载荷增大,直至压下量达到 100%时充填完整,如图 8e 所示。

### 3 实验验证

为开展 TC6 钛合金作动筒的多道次成形实验,在 400 t 压力机上搭建了等温实验装置,如图 9 所

示。依据上述模拟结果,选取  $0.10\sim0.005\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  路径的双道次-13%加载和加载速度为  $0.005\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  的单道次加载进行实验验证。实验过程中,模具随炉加热至  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,坯料加热至  $930\text{ }^{\circ}\text{C}$  入炉锻造;单道次以  $0.005\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  加载速度一次成形,而双道次加载则在凸模压下量为 13%时改变加载速度。观察两者在压下量为 100%时的成形情况,模拟和实验对比结果如图 10 所示。通过双道次加载得到的锻件充填完整,成形完好,锻件表面未出现裂纹、夹伤、折叠、凹坑等缺陷,而单道次加载得到的锻件未充满,实验与模拟结果相符。通过测量作动筒表面的尺寸得知,由双道次加载得到的锻件尺寸与实际要求的尺寸基本一致,满足尺寸精度及成形质量要求,结果如图 11 所示。因此,通过多道次加载成形的作动筒锻件,在降低成形载荷、提高成形效率的同时,能够较好地满足锻件的成形要求,模具使用寿命也会因此得到提高。

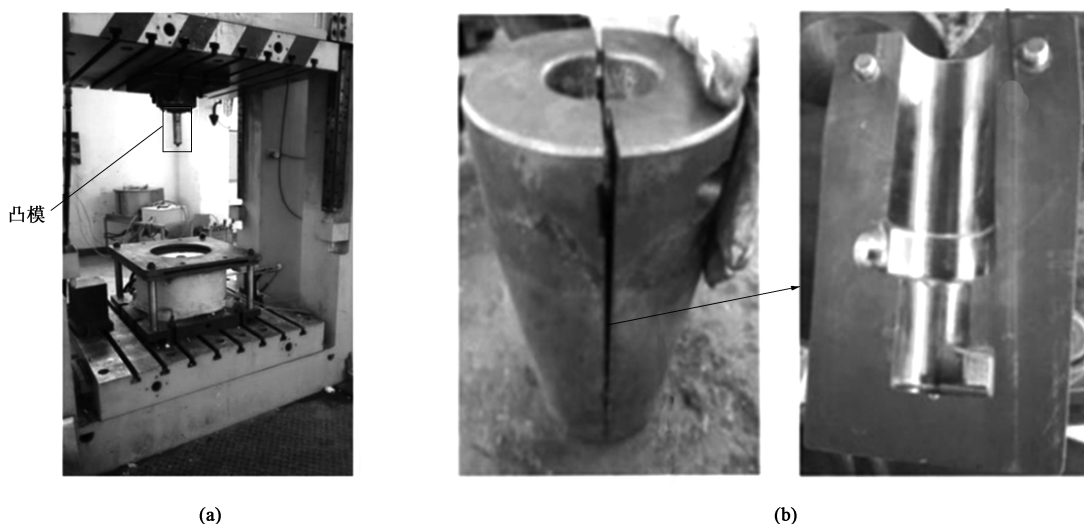


图 9 实验设备 (a) 与凹模 (b)

Fig. 9 Experimental equipment (a) and die (b)

### 4 结论

(1) 采用有限元模拟对 TC6 钛合金作动筒锻件进行单道次成形研究,依据成形载荷变化设计出双、三道次加载路径。通过引入成形效率,厘清了成形时间与成形载荷间的关系;得出较好的双、三道次加载路径: $0.10\sim0.005\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  路径下的双道次-13%加载; $0.01\sim0.005\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  路径下的双道次-72%加载; $0.10\sim0.01\sim0.005\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  路径下的三道次加载。

(2) 从材料流动分析得出,单道次压下量为 13%时载荷剧增是由于凸模定径带顶端的水平面与坯料开始接触,材料流动变慢导致的;而在压下量为 72%时载荷增加是因为坯料已与凹模的底部接触,大量材料继续向侧向实心凸起处流动,少量材料向上流动,并反挤成形作动筒的上端。

(3) 选取  $0.10\sim0.005\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  路径下的双道次-13%加载和加载速度为  $0.005\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  的单道次加载进行实验验证。压下量为 100%时,双道次加载得到的锻件充填完整,而单道次加载未充满,实验与模拟结果相符。且作动筒锻件表面未出现裂纹、

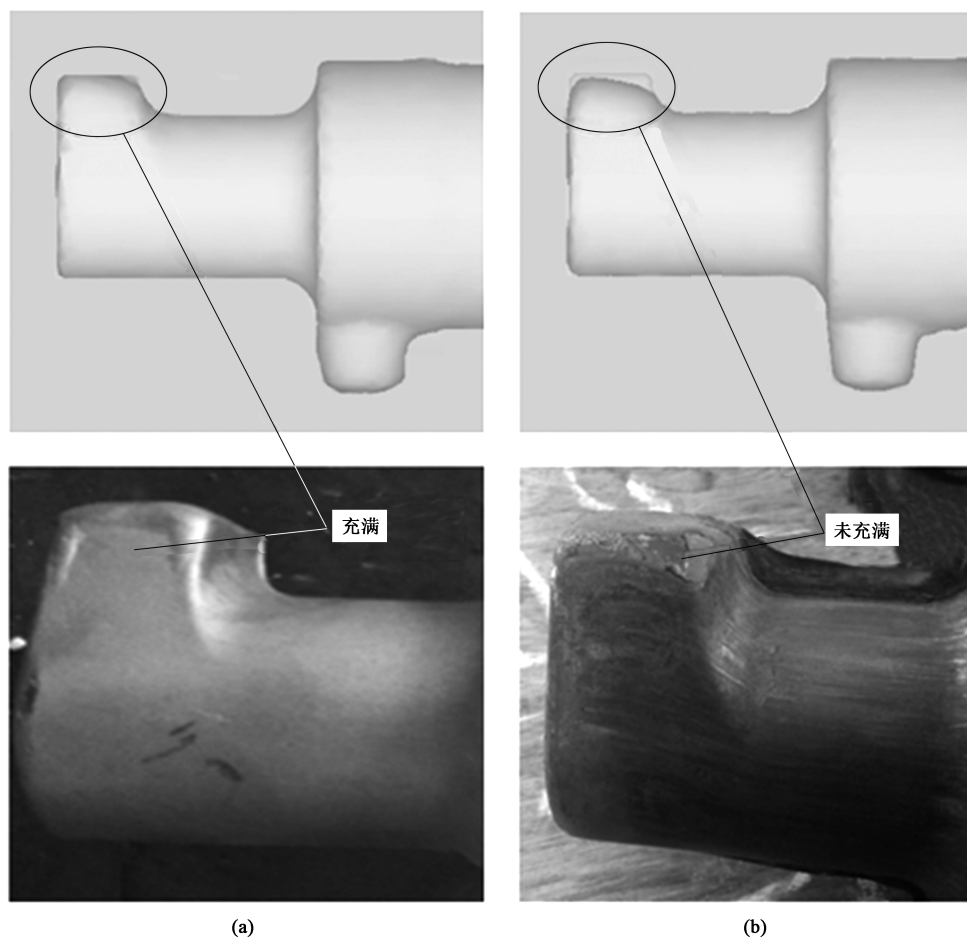


图 10 模拟和实验对比图

(a) 加载路径 1 (b) 加载速度为  $0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 单道次

Fig. 10 Comparison diagrams of simulation and experiment

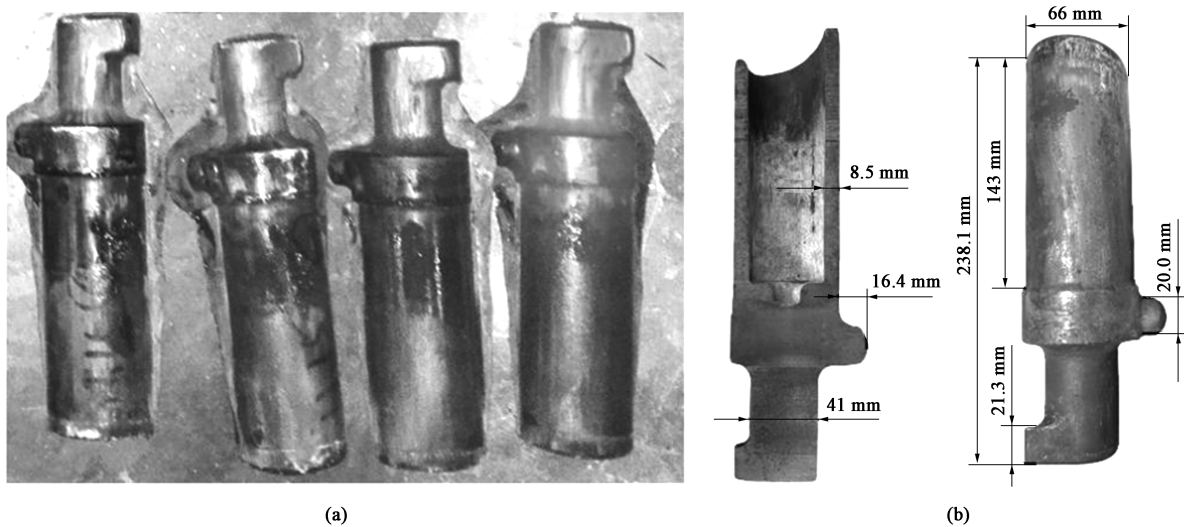
(a) Loading path 1 (b) Loading speed of  $0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , single pass

图 11 作动筒锻件实物 (a) 与尺寸图 (b)

Fig. 11 Real products (a) and dimensional drawing (b) of actuator cylinder forgings



夹伤、折叠、凹坑等缺陷,由双道次加载得到的锻件尺寸与实际要求的尺寸基本一致,满足尺寸精度及成形质量要求。

#### 参考文献:

- [1] Mosleh A O, Mikhaylovskaya A V, Kotov A D, et al. Experimental, modelling and simulation of an approach for optimizing the superplastic forming of Ti-6%Al-4%V titanium alloy [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45 (9): 262-272.
- [2] 李毅,赵永庆,曾卫东.航空钛合金的应用及发展趋势[J].*材料导报*, 2020, 34 (S1): 280-282.
- Li Y, Zhao Y Q, Zeng W D. Application and development trend of aviation titanium alloy [J]. *Materials Reports*, 2020, 34 (S1): 280-282.
- [3] 王维,张钟月,赵朔,等. LDM 连接及 SLM 成形 TC4 合金的组织与性能[J].*稀有金属*, 2022, 46 (8): 998-1005.
- Wang W, Zhang Z Y, Zhao S, et al. Microstructure and properties of LDM connecting and SLM forming TC4 alloy [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2022, 46 (8): 998-1005.
- [4] Shen Z N, Wu R D, Yuan C L, et al. Comparative study of metamodeling methods for modeling the constitutive relationships of the TC6 titanium alloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, (10): 188-204.
- [5] 朱琳,徐勇,陈乐平,等. TC6 钛合金高温低应变速率变形行为研究[J].*特种铸造及有色合金*, 2022, 42 (2): 226-229.
- Zhu L, Xu Y, Chen L P, et al. Study on deformation behavior of TC6 titanium alloy at high temperature and low strain rate [J]. *Special Casting and Non-Ferrous Alloys*, 2022, 42 (2): 226-229.
- [6] 迟艳,郭旭,刘玫,等.某航空发动机作动筒液压试验台设计研究[J].*液压气动与密封*, 2012, 32 (4): 34-36.
- Chi Y, Guo X, Liu M, et al. Design and research of an aero-engine actuator cylinder hydraulic test bed [J]. *Hydraulics Pneumatics and Seals*, 2012, 32 (4): 34-36.
- [7] 马庆,魏科,徐勇,等. TC6 钛合金作动筒等温锻造成形的模拟与实验研究[J].*热加工工艺*, 2023, 52 (7): 89-93.
- Ma Q, Wei K, Xu Y, et al. Simulation and experimental study on isothermal forging of TC6 titanium alloy actuator cylinder [J]. *Hot Working Technology*, 2023, 52 (7): 89-93.
- [8] Zhang Y Q, Shan D B, Xu F C. Flow lines control of disk structure with complex shape in isothermal precision forging [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209 (2): 745-753.
- [9] Sun Q J, Zhou J W, Peng J H, et al. Superplasticity study of TA15 alloy based on variable  $m$  value method [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51 (3): 843-849.
- [10] 王高潮,曹春晓,董洪波,等. TC11 合金最大  $m$  值超塑变形机理[J].*航空学报*, 2009, 30 (2): 357-361.
- Wang G C, Cao C X, Dong H B, et al. Superplastic deformation mechanism of TC11 alloy with maximum  $m$  value [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30 (2): 357-361.
- [11] Mulyukov R R, Nazarov A A, Imayev R M. Current achievements on superplasticity and related phenomena at the Institute for metals superplasticity problems [J]. *Letters on Materials*, 2018, 8 (4): 510-516.
- [12] 徐勇,杨湘杰,乐伟.多道次温轧 TC4 钛合金超塑性变形行为与断裂机制[J].*特种铸造及有色合金*, 2018, 38 (5): 470-475.
- Xu Y, Yang X J, Yue W. Superplastic deformation behavior and fracture mechanism of TC4 titanium alloy in multi-pass warm rolling [J]. *Special Casting and Non-Ferrous Alloys*, 2018, 38 (5): 470-475.
- [13] Zheng J, Liu L, Zhang Z, et al. Multi-pass rolling-extrusion of large-scale thin-walled square tube with longitudinal inner ribs [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 124 (7): 2335-2349.
- [14] 徐凯华,刘海军,闫江鹏,等.热等静压 TC4 钛合金在多道次热压缩变形中的组织演变[J].*塑性工程学报*, 2021, 28 (7): 150-156.
- Xu K H, Liu H J, Yan J P, et al. Microstructure evolution of hot isostatic pressed TC4 titanium alloy during multi-pass hot compression deformation [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28 (7): 150-156.
- [15] 丁凯伦,王敬忠,杨西荣,等. Ti-62A 钛合金多道次降温热变形行为研究[J].*稀有金属*, 2021, 45 (8): 921-927.
- Ding K L, Wang J Z, Yang X R, et al. Study on thermal deformation behavior of Ti-62A titanium alloy at multi-pass cooling [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2021, 45 (8): 921-927.
- [16] 童晋方,冯治国,江玉莲,等. TB9 钛合金芯杆冷锻成形模拟及实验研究[J].*锻压技术*, 2023, 48 (8): 32-40.
- Tong J F, Feng Z G, Jiang Y L, et al. Simulation and experimental study on cold heading forming of TB9 titanium alloy core bar [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (8): 32-40.
- [17] 朱恩锐,崔霞,郭陆陆,等. TB6 钛合金筒形件强力旋压成形工艺模拟[J].*锻压技术*, 2023, 48 (2): 126-134.
- Zhu E R, Cui X, Guo L L, et al. Simulation of strong spinning forming process for TB6 titanium alloy cylindrical parts [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (2): 126-134.
- [18] 李亚智,赵美英,万小朋.有限元法基础与程序设计[M].北京:科学出版社,2004.
- Li Y Z, Zhao M Y, Wan X P. *Finite Element Method Foundation and Program Design* [M]. Beijing: Science Press, 2004.