

## 300M 钢起落架作动筒挤压成形数值模拟

李 波<sup>1</sup>, 韩 文<sup>1</sup>, 韩 顺<sup>2</sup>, 刘 男<sup>3</sup>, 王建国<sup>3</sup>, 厉 勇<sup>2</sup>, 王春旭<sup>2</sup>, 张新全<sup>1</sup>

(1. 航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089; 2. 钢铁研究总院有限公司 特殊钢研究院, 北京 100081;

3. 西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 针对飞机起落架传统制造工艺中成形载荷大、材料利用率低、生产周期长等问题, 提出利用反挤压工艺制造 300M 钢起落架作动筒件, 设计了反挤压模具及坯料形状, 并使用 Deform-3D 进行有限元模拟, 分析了挤压温度为 1050~1150 ℃、挤压速率为 30~120 mm·s<sup>-1</sup> 时挤压过程中温度、等效应变、挤压力的变化规律。结果表明: 随着挤压温度或挤压速率的上升, 锻件温度均呈上升趋势, 但温度分布规律基本不变; 锻件挤压前期的挤压力随挤压温度的上升而降低, 后期挤压力差异不显著; 高挤压速率下初始挤压载荷较大, 但曲线更加平稳, 挤压温度为 1050 ℃、挤压速率为 120 mm·s<sup>-1</sup> 时挤压载荷基本稳定在 6.0×10<sup>6</sup> N; 不同挤压温度和挤压速率下的平均应变差分别为 4.55% 和 3.41%, 其等效应变比例和分布规律差别很小。综合分析, 最佳工艺参数组合为挤压温度为 1130 ℃、挤压速率为 30~50 mm·s<sup>-1</sup>。

**关键词:** 起落架作动筒; 300M 钢; 反挤压; 挤压温度; 挤压速率

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.020

**中图分类号:** TG376.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 05-0165-08

## Numerical simulation of extrusion forming for 300M steel landing gear actuator

Li Bo<sup>1</sup>, Han Wen<sup>1</sup>, Han Shun<sup>2</sup>, Liu Nan<sup>3</sup>, Wang Jianguo<sup>3</sup>, Li Yong<sup>2</sup>, Wang Chunxu<sup>2</sup>, Zhang Xinquan<sup>1</sup>

(1. AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China;

2. Institute of Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** For the problems of large forming load, low material utilization rate and long production cycle in the traditional manufacturing process of aircraft landing gear, the backward extrusion process was proposed to manufacture 300M steel landing gear actuator, and the backward extrusion die and blank shape were designed. Then, the finite element simulation was carried out by Deform-3D, and the change laws of temperature, equivalent strain and extrusion force during the extrusion process were analyzed at the extrusion temperature of 1050~1150 ℃ and the extrusion rate of 30~120 mm·s<sup>-1</sup>. The results show that with the increasing of extrusion temperature or extrusion rate, the temperature of forgings shows an upward trend, but the temperature distribution law remains basically unchanged. The extrusion force in the early stage of forgings extrusion decreases with the increasing of extrusion temperature, and the difference of extrusion force in the later stage is not significant. The initial extrusion load at high extrusion rate is larger, but the curve is more stable. When the extrusion temperature is 1050 ℃ and the extrusion rate is 120 mm·s<sup>-1</sup>, the extrusion load is basically stable at 6.0×10<sup>6</sup> N. The average strain differences under different extrusion temperatures and extrusion rates are 4.55% and 3.41%, respectively, and the differences in the proportion and distribution law of equivalent strain amounts are very small. Comprehensive analysis shows that the best process parameters combination obtained is the extrusion temperature of 1130 ℃ and the extrusion rate of 30~50 mm·s<sup>-1</sup>.

**Key words:** landing gear actuator; 300M steel; backward extrusion; extrusion temperature; extrusion rate

起落架在地面作业中主要起支撑作用, 在飞机着陆及滑行过程中要吸收和承载与地面形成的冲击

载荷, 因此, 起落架需具有足够的刚度、强度以及良好的韧性<sup>[1-3]</sup>。300M 钢为低合金超高强度钢, 因其强度高、韧性好、抗疲劳性优良并具备一定的抗应力腐蚀能力等优点, 成为应用最广泛的起落架材料<sup>[4-5]</sup>。起落架中的细长筒形件 (外筒、活塞杆、轮轴等) 通常是先通过模锻得到锻件毛坯, 再对毛坯进行数控加工, 期间还需要进行热处理以改善和获得高性能组织, 最终得到形状复杂、表面精度高的零件<sup>[6-7]</sup>。然而, 传统模锻加工方式的成形载荷

收稿日期: 2024-11-24; 修订日期: 2025-03-12

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3705200)

作者简介: 李 波 (1981-), 女, 硕士, 高级工程师

E-mail: 372707201@qq.com

通信作者: 韩 顺 (1987-), 男, 博士, 正高级工程师

E-mail: hanshunfa@126.com

过大、材料流动差；深孔机加工工艺制造筒形件时，实心锻件存在材料利用率低、金属流线被破坏、深孔机加工刀具寿命低、刀杆刚度不足、生产周期长等问题<sup>[8-13]</sup>。

基于目前航空起落架生产现状，为缩短生产周期、提高材料利用率，本文创新性地提出了反挤压工艺制造起落架锻件，在反挤压加工过程中，模具所承受的载荷大大降低，最终成形的锻件为深盲孔筒形件，提高了材料利用率，且反挤压可保证锻件流线随形，使零件获得更高的综合力学性能。设计了反挤压模具及坯料形状，并采用 Deform-3D 对成形过程进行有限元分析，以探讨方案的可行性并优选出最佳工艺参数，为航空起落架挤压成形提供理论分析和数据支撑。

1 有限元模型与实验方法

1.1 材料模型

起落架材料为 300M 钢，其热物性参数和本构关系模型来自于文献 [4] 和文献 [5]，模具材料为 H13 钢。模拟过程中坯料设置为塑性体，模具为刚体。

1.2 几何模型

飞机起落架结构中作动筒的主体结构为筒形件，筒底部与实心杆连接形成 T 形结构，该处的最终零件形状复杂，因此，在本次模拟中将坯料设计为 T 字形形状，方便 T 字的横杆部位后续机加工为各种复杂形状。依据坯料形状设计出反挤压模具，反挤压模具与坯料装配后如图 1 所示。图 1a 中标注了各组件名称、凸模挤压方向以及材料流动方向。采用相对网格法划分坯料网格，将设计好的模具及坯料分别导出为 STL 格式，再导入 Deform-3D 软件中，并定义他们的位置关系，如图 1b 所示。

1.3 模拟方案

实验中的主要参数设置如表 1 所示，分别研究了挤压温度、挤压速率对挤压过程及最终锻件成形质量的影响。其中，挤压温度范围为 1050 ~ 1150 ℃，挤压速率为 30 ~ 120 mm · s<sup>-1</sup>。其余的主要参数包括：室温为 20 ℃，模具温度为 300 ℃，坯料与模具间的热传导率为 2 N · (s · mm · C)<sup>-1</sup>，坯料与空气间的热传导率为 0.02 N · (s · mm · C)<sup>-1</sup>，模具与坯料之间的摩擦因数为 0.25，模拟步数为 260，每步凸模进给为 3 mm。

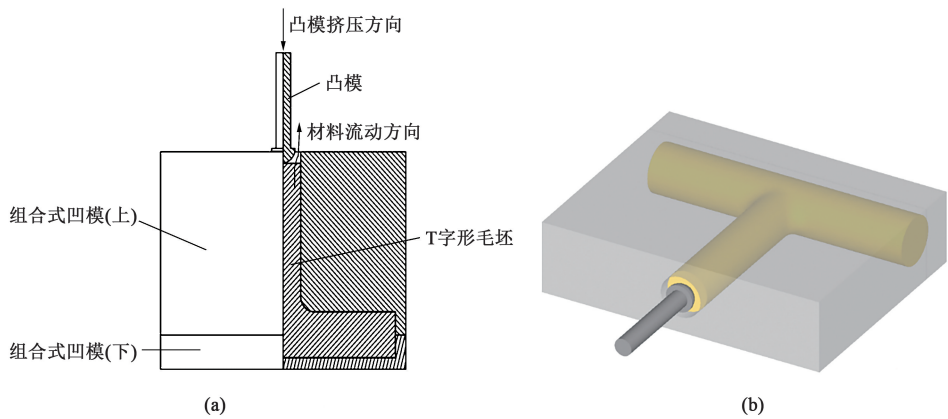


图 1 300M 钢起落架作动筒的二维装配图 (a) 和有限元模型 (b)

Fig. 1 2D assembly drawing (a) and finite element model (b) of 300M steel landing gear actuator

表 1 模拟实验参数设定

Table 1 Parameter setting for simulation experiment

模拟 序号	挤压温度/ ℃	挤压速率/ (mm · s <sup>-1</sup> )	模拟 序号	挤压温度/ ℃	挤压速率/ (mm · s <sup>-1</sup> )
1-1	1050	30	2-1	1130	50
1-2	1080	30	2-2	1130	80
1-3	1100	30	2-3	1130	100
1-4	1130	30	2-4	1130	120
1-5	1150	30	—	—	—

2 挤压过程模拟结果及分析

2.1 挤压过程温度场、等效应变场和挤压力变化规律

2.1.1 温度场

为分析锻件温度场的变化情况，将作动筒划分为筒件的筒口、筒中、筒底以及实心杆共 4 个部分。图 2 为挤压温度  $T_0 = 1050$  ℃、挤压速率  $v = 30$  mm · s<sup>-1</sup> 时锻件的温度变化，锻件几何形状对称，在锻件剖面上的 4 个区域取 9 个点 (P1 ~ P9) 进行分析，结

果如图 2a 所示。在 I ~ III 区域中各取 2 点（分别于筒件内壁及其对应的外壁处各取一点）、在 IV 区域共取 3 点（于实心杆轴线上取 2 点，分别为位于筒底正下方的 P7 点与远离筒底处的 P8 点，于 P8 点所对应的实心杆外缘处取一点即 P9 点）进行分析，图 2b 为这 9 个点的温度随时间的变化情况。由图 2a 可以看出：挤压结束后从 I 区至 III 区筒件的温度逐渐降低，且外壁的温度降低梯度均大于内壁，位于内壁侧的 P2 点、P4 点和 P6 点的温度变化趋势均为

降温过程中有短暂的升温，升温的范围均小于  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，并且 P2 点温升的峰值  $1063\text{ }^{\circ}\text{C}$  也是所取特征点中温升变化的最大值；位于外壁侧的 P1 点和 P3 点的温度变化趋势均为先降温再平缓地升温，后期温升小于  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而 P5 点仅有降温阶段，降温速度均在  $12.5\sim 13.5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  范围内；并且内壁的温升时间段与外壁的温度曲线转折的时间段几乎重合；IV 区由心部至外缘温度逐渐降低，P7 点、P8 点和 P9 点的温变趋势均为仅降温。

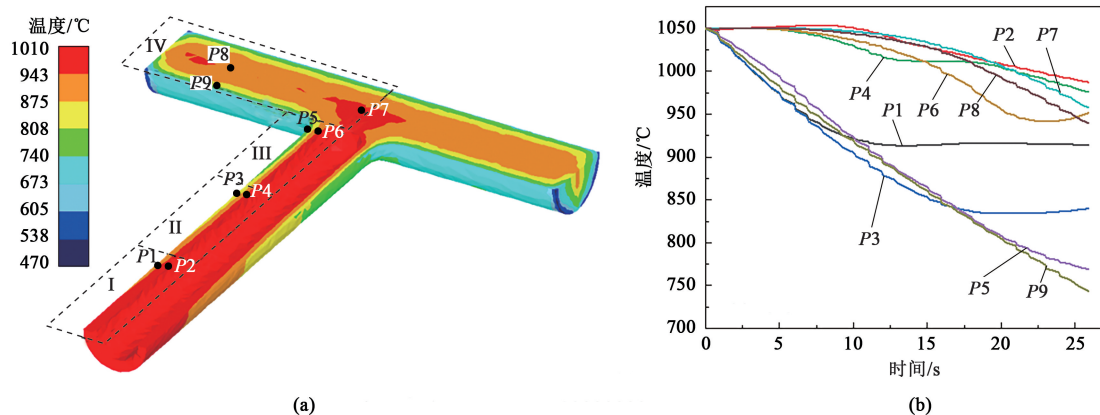


图 2  $T_0 = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $v = 30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  时锻件的温度变化

(a) 挤压结束温度分布云图 (b) 挤压过程中 P1~P9 点的温度随时间的变化

Fig. 2 Temperature variation of forgings at  $T_0 = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $v = 30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

(a) Temperature distribution contour plot at end of extrusion (b) Temperature variation with time at points P1~P9 during extrusion process

上述现象主要涉及了坯料的产热与散热过程。先成形的部分（如 I 区）因率先变形会产生大量的变形热，且内壁变形量大于外壁，成形后会与空气直接接触，散热速度小于与模具直接接触的外壁。伴随着凸模的下行，已成形的部分（如 I 区）逐渐被挤出模具，在此过程中外壁与模具摩擦做功所产生的热量、高温区域所传递来的热量，可平衡甚至高于锻件与凹模直接接触的散热，因此外壁（如 P1 点）降温后才趋于平缓地升温。后成形的部分（如 II 区）发生变形的时间靠后，外壁（如 P3 点）降温时间长，与模具摩擦做功产生的热量少，尤其是 III 区的 P5 点处于挤压阶段的末期，其温变曲线仅有降温阶段；内壁降温速度较为缓慢且变形所释放的变形热较多，因此，外壁从 I 区至 III 区温度逐渐降低，与外壁相比，整个内壁的温度相对较高且均匀。在整个挤压过程中，实心杆部分未参与变形，一直处于散热状态，外缘处与模具直接接触，降温速度与筒件外壁近似，芯部降温速度与筒件内壁近似，且 P7 点的降温速度较慢。通过对比 P2 点、P4 点和 P7 点的后半程温变曲线可以发现，实心杆芯部降温速度大于

筒件内壁与空气直接接触时的降温速度。

### 2.1.2 等效应变场

$T_0 = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $v = 30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  时，挤压过程中等效应变随时间的变化情况（由于 T 字结构横杆部位几乎不参与变形，此处及后续省略对其的分析）如图 3 和图 4 所示。图 3 中的 Step 260 为最终成形的结果，可以观察到由筒件内壁至筒件外壁等效应变逐层下降，最终成形的筒件内壁等效应变大部分在  $1.50\sim 1.88$  之间，部分位置的应变较大，在  $1.88\sim 3.00$  之间，外壁表层的应变较小，约为  $0.375$  左右。图 3 中的 Step 90、Step 180 和 Step 260 的等效应变分布图，分别对应图 4 中 P2 点、P4 点和 P6 点的应变快速升高至第 1 台阶的位置点。位于筒件内壁的 P2 点、P4 点和 P6 点与外壁的 P1 点、P3 点和 P5 点，他们两两几乎是同时达到等效应变的第 1 个台阶，并且是对应凸模通过 P1 点、P3 点和 P5 点的时刻。当凸模远离这些点后，随着凸模继续运行，这些位置受到其他位置变形的影响，等效应变也会小幅度地增加。可以发现，等效应变急速攀升的时间段与内壁侧温升时间段一致，证实了温升是由于

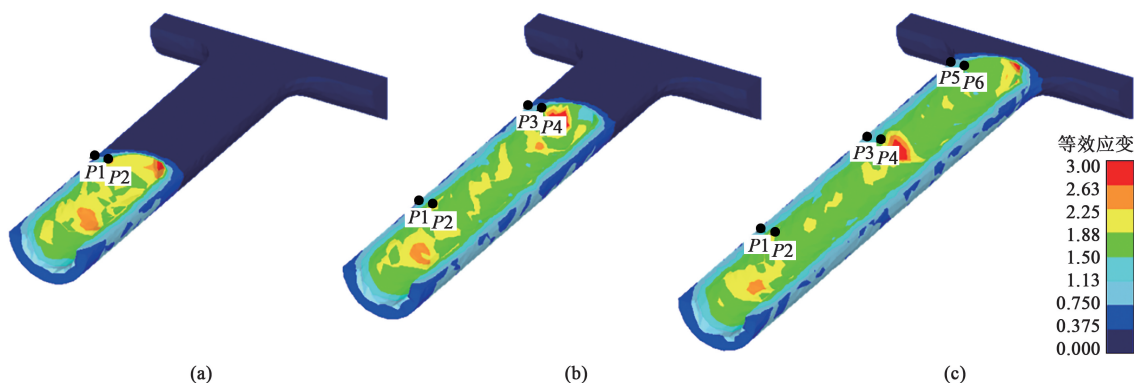


图 3  $T_0 = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,  $v = 30\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时挤压各个阶段锻件的等效应变分布云图

(a) Step 90 (b) Step 180 (c) Step 260

Fig. 3 Equivalent strain distribution contour plots of forgings in each stage at  $T_0 = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $v = 30\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

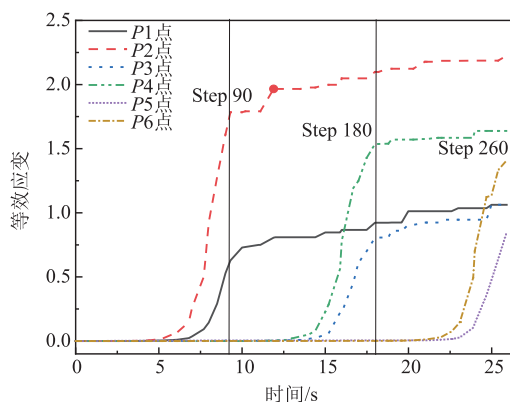


图 4 挤压过程中 P1~P6 点等效应变随时间的变化

Fig. 4 Equivalent strain variation with time at points P1~P6 during extrusion process

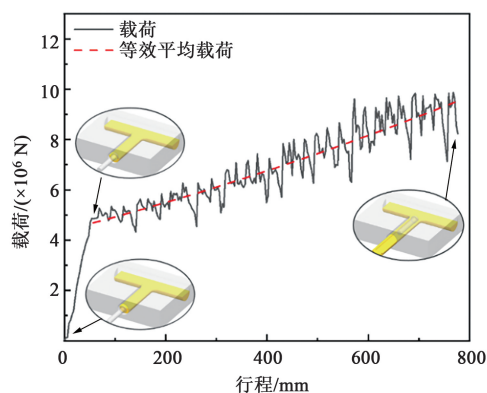


图 5  $T_0 = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,  $v = 30\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时的行程-载荷曲线

Fig. 5 Stroke-load curve at  $T_0 = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $v = 30\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

变形所产生的变形热所致。

### 2.1.3 挤压力

挤压开始至末期的载荷随着凸模的下行始终处于上升的趋势。图 5 为  $T_0 = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  、 $v = 30\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时挤压过程中挤压力（载荷）的变化，根据上升趋势的不同可划分为两个阶段：第 1 段为挤压初期，凸模下行逐渐与材料完全接触阶段，随着材料与模具的接触面积逐渐增大，金属流动受阻，挤压力急剧增大；第 2 段为凸模完全接触后持续下行的阶段，其斜率明显小于第 1 段曲线。

载荷上升的原因主要有两个：（1）金属变形时发生位错增殖，导致位错密度上升，发生加工硬化；（2）变形后期挤压温度逐渐降低，造成流变应力的升高<sup>[4,14]</sup>。图 2a 中Ⅲ区筒件外壁的温度处于  $740 \sim 808\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间（300M 钢的奥氏体转变温度  $A_{c1} = 760\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，铁素体转变温度  $A_{c3} = 804\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[15]</sup>），已有部分坯料温度低于奥氏体转变为铁素体的相变点温度，

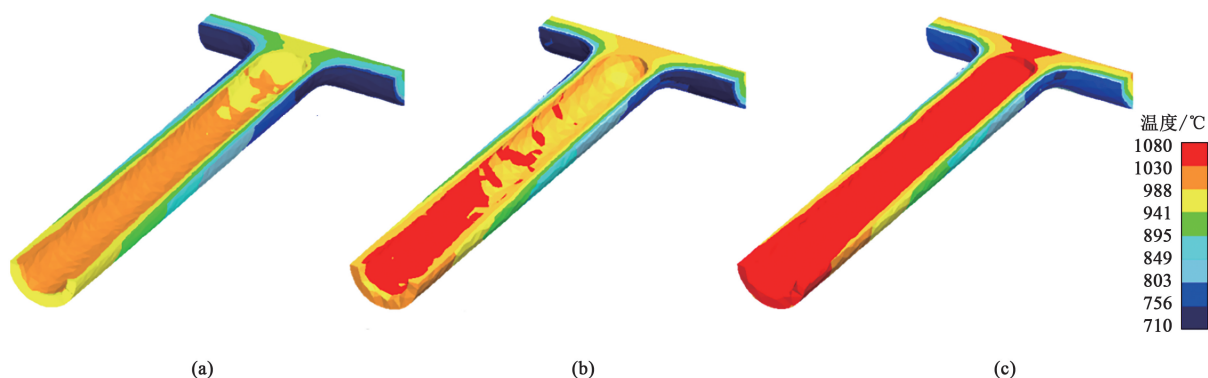
体心立方的铁素体与面心立方的奥氏体相比，难以发生动态再结晶、滑移系少，故变形抗力较大<sup>[16]</sup>。但随着变形的进行，储存能积累到一定程度，300M 钢开始发生动态回复与动态再结晶，在发生动态软化的过程中逐渐消耗位错，位错密度逐渐降低，挤压过程中挤压力便开始缓慢地增加。因此，挤压温度以及挤压速率均会对行程-载荷曲线产生影响。

### 2.2 挤压温度的影响

随着锻件初始挤压温度的升高，锻件挤压后温度的最大值和最小值总体呈现上升趋势，且高温区域也逐渐增多，但锻件挤压后温度分布规律基本一致，如图 6 和图 7 所示。在挤压速率  $v = 30\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时，随着挤压温度的升高，锻件变形位置的整体温度趋于一致，由于 T 字结构横杆部位不变形，锻件挤压后温度最小值偏低，即使挤压温度  $T_0$  升高至  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，仍有靠近筒底外壁处局部位置的温度低于相变点温度。

挤压温度对载荷的影响如图 8 所示，在挤压前



图6  $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  时不同挤压温度下锻件挤压后的温度分布

(a) 1050 °C (b) 1100 °C (c) 1150 °C

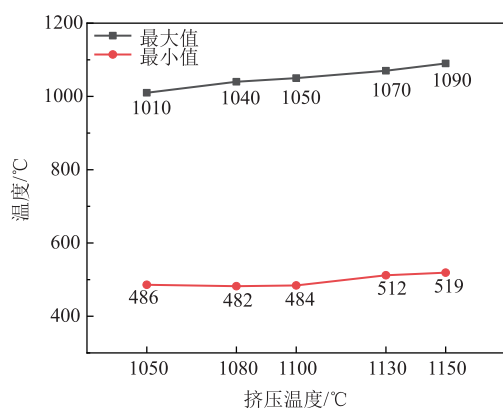
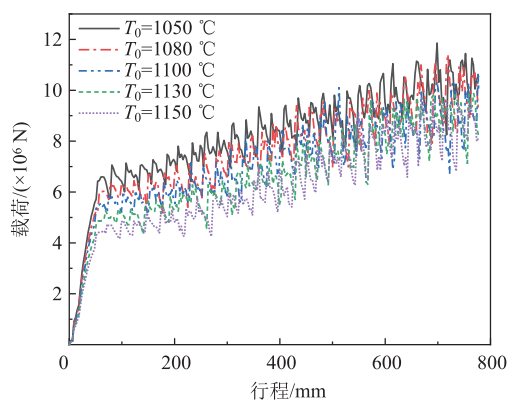
Fig. 6 Temperature distribution of forgings after extrusion at different extrusion temperatures when  $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 

图7 挤压温度对锻件挤压后温度最大值和最小值的影响

Fig. 7 Effect of extrusion temperature on maximum and minimum values of temperature of forgings after extrusion

图8  $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  时挤压温度对载荷的影响Fig. 8 Influence of extrusion temperature on load at  $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 

期,随着坯料初始温度上升,挤压力呈现下降趋势;但随着凸模行程的增加,由于挤压温度升高,金属的变形抗力降低,各挤压温度之间挤压力的差别越来越不明显。图9为挤压速率 $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时等效应变与挤压温度间的关系,可以看出在不同挤压温度下,

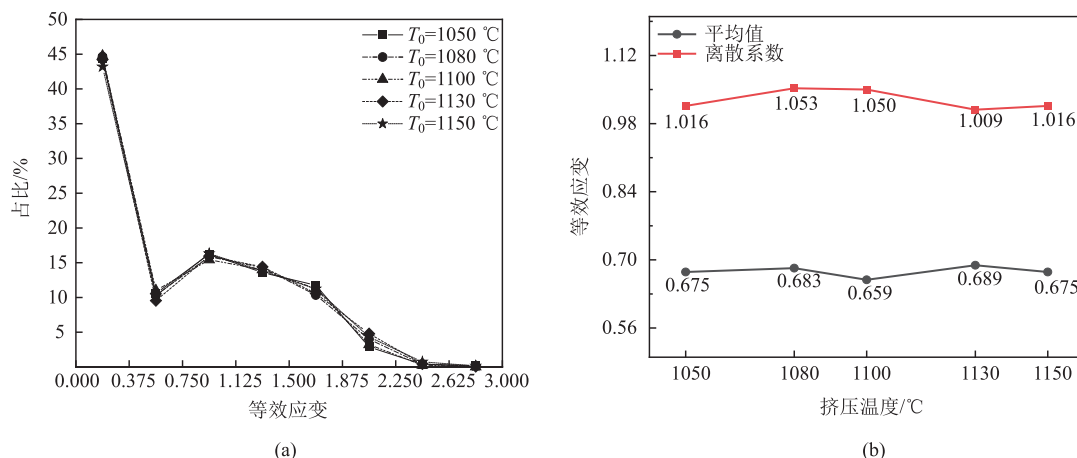
不同等效应变所占的比例、分布规律的差别很小,挤压温度为1050~1150 °C时,等效应变的平均值的最大值(0.689)和最小值(0.659)仅差4.55%,离散系数(标准差与平均值之比)在1.009~1.053范围内,挤压温度对等效应变几乎无影响。

选择变形温度时,应考虑到过高的热变形温度会引起组织粗化,甚至造成后续热处理得到粗大的马氏体,而温度太低又会使材料的塑性变形能力变差、流变应力变高,锻件可能出现微观损伤<sup>[17]</sup>。文献[17]中基于动态材料模型建立了不同应变下300M钢的热加工图,最终认为300M钢的安全加工工艺参数为:挤压温度为1000~1150 °C,应变速率为 $0.4\sim3\text{ s}^{-1}$ 。

当挤压速率为 $30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,不同挤压温度下的应变速率均在 $1\sim3\text{ s}^{-1}$ 之间,5个挤压温度对最终应变几乎没有影响,挤压温度为1130和1150 °C则能有效保证锻后温度;同时,不同的挤压温度下锻件的温度变化规律一致,但较高的挤压温度会导致挤压后温升较高,造成组织粗大等缺陷,挤压温度为1130 °C时,挤压过程中温度及挤压力等控制较好。

### 2.3 挤压速率的影响

挤压温度 $T_0=1050\text{ °C}$ 时,锻件挤压后温度与挤压速率的关系如图10和图11所示。图10中可以看出,随着挤压速率的增大,高温区域逐渐增多,锻件挤压后温度总体呈现上升趋势,但不同挤压速率下锻件挤压后的温度分布规律基本一致,筒底外壁的温度均高于800 °C。图11中取挤压前期内壁的P2点与挤压后期外壁的P5点作为特征点,P2点可代表变形区域挤压过程中的高温情况,P5点则代表低温情况,可以看出不同挤压速率下的温度变化趋势基本一致。随着挤压速率的增大,邻近挤压速率

图 9  $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时等效应变与挤压温度的关系

(a) 挤压温度对等效应变分布的影响 (b) 等效应变相关参数与挤压温度的关系

Fig. 9 Relationship between equivalent strain and extrusion temperature at  $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 

(a) Influence of extrusion temperature on equivalent strain distribution

(b) Relationship between parameters related to equivalent strain and extrusion temperature

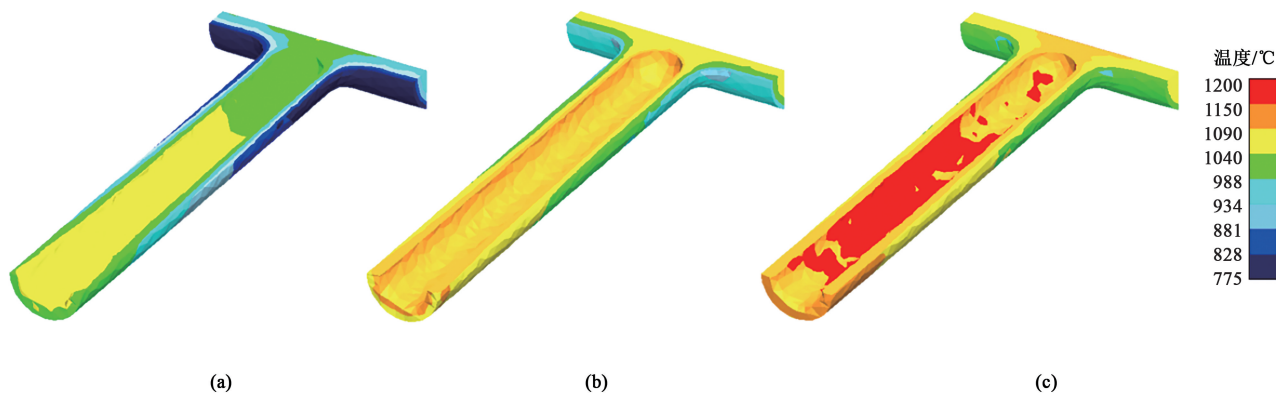
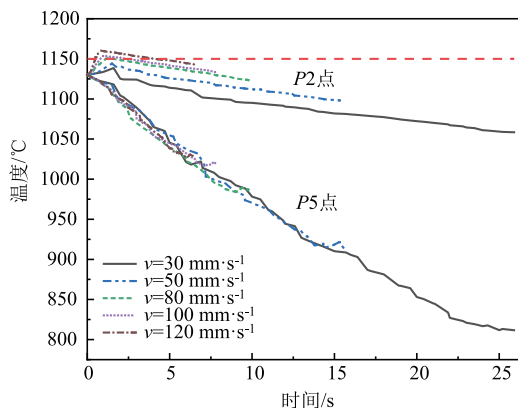
图 10  $T_0 = 1050 \text{ °C}$  时不同挤压速率下锻件挤压后的温度分布(a)  $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  (b)  $v = 80 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  (c)  $v = 120 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ Fig. 10 Temperature distribution of forgings after extrusion at different extrusion rates when  $T_0 = 1050 \text{ °C}$ 

图 11 特征点的温度变化

Fig. 11 Temperature changes of characteristic points

的终了温差越来越小, 温度分布的均匀性有所提高;  $P2$  点在发生变形时有一定程度的温升, 并且当  $v = 120 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 有将近一半的变形时间的温度大于  $1150 \text{ °C}$ ; 挤压速率越大, 成形时间越短, 其  $P5$  点的散热时间缩短。

挤压前期, 载荷随挤压速率增大而增大, 挤压后期, 挤压速率越高, 平均载荷反而越低, 与低挤压速率相比, 高挤压速率的载荷曲线更趋向于平稳, 挤压力更低, 如图 12 所示。这是由于挤压前期, 挤压速率越高, 加工硬化程度也就越高, 坯料变形抗力越大, 挤压载荷越高。但随着挤压过程的进行, 高挤压速率会带来更高的温升, 动态软化所消耗的位错逐渐与挤压硬化产生的位错相平衡, 因此, 高

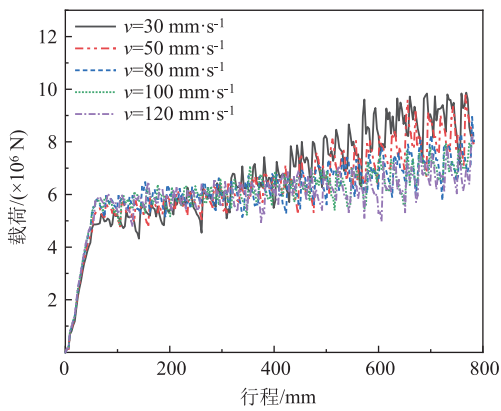


图 12  $T_0=1050^{\circ}\text{C}$  时挤压速率对载荷的影响

Fig. 12 Influence of extrusion rate on load at  $T_0=1050^{\circ}\text{C}$

挤压速率下的载荷曲线更加平稳。

图 13 为  $T_0=1050^{\circ}\text{C}$  时等效应变与挤压速率的关系。不同的挤压速率下等效应变的比例、分布规

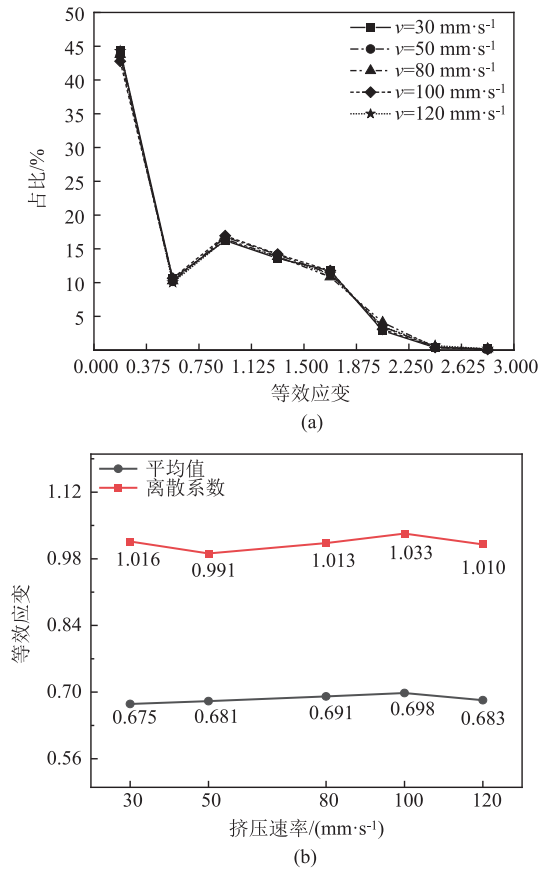


图 13  $T_0=1050^{\circ}\text{C}$  时等效应变与挤压速率的关系

(a) 挤压速率对等效应变分布的影响

(b) 等效应变相关参数与挤压速率的关系

Fig. 13 Relationship between equivalent strain and extrusion rate at  $T_0=1050^{\circ}\text{C}$

(a) Influence of extrusion rate on equivalent strain distribution

(b) Relationship between parameters related to equivalent strain and extrusion rate

律的差别很小，可见等效应变与挤压速率的关系较小。表 2 为挤压速率与应变速率的关系，可观察到随着挤压速率的增加，应变速率也相应变大。挤压速率主要影响变形温度与应变速率，随挤压速率的增大，变形温度、应变速率均变大， $v$  值应取  $30\sim50\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  之间。

表 2 应变速率与挤压速率的关系

Table 2 Relationship between strain rate and extrusion rate

挤压速率/ ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	30	50	80	100	120
应变速率/ $\text{s}^{-1}$	1.24~ 2.3	1.97~ 4.66	3.06~ 6.97	3.65~ 7.02	4.72~ 8.43

3 结论

- (1) 起落架作动筒锻件的温度受挤压温度、挤压速率的影响较为明显，挤压温度和挤压速率的上升均会使锻件挤压后的温度升高。
- (2) 载荷受挤压温度、挤压速率的影响较为明显，挤压温度下降，载荷变大；随挤压速率增加，前期载荷逐渐上升，后期载荷逐渐下降。
- (3) 等效应变受摩擦因数、挤压温度、挤压速率的影响较小，且没有明显的影响规律。
- (4) 作动筒锻件的最佳挤压工艺参数为：挤压温度为  $1130^{\circ}\text{C}$ 、挤压速率为  $30\sim50\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

参考文献：

[1] 陈永新. 飞机起落架系统简介 [J]. 大众科技, 2014, 16 (6): 127-128, 130.

Chen Y X. Introduction to aircraft landing gear system [J]. Popular Science & Technology, 2014, 16 (6): 127-128, 130.

[2] Armaan A, Keshav S, Srinivas G. A step towards safety: Material failure analysis of landing gear [J]. Materials Today: Proceedings, 2020.

[3] 赵博, 许广兴, 贺飞, 等. 飞机起落架用超高强度钢应用现状及展望 [J]. 航空材料学报, 2017, 37 (6): 1-6.

Zhao B, Xu G X, He F, et al. Present status and prospect of ultra high strength steel applied to aircraft landing gear [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37 (6): 1-6.

[4] 杨欢. 300M 钢高温变形行为及模锻成形工艺研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.

- Yang H. Study on High Temperature Deformation Behavior and Die Forging Process of 300M Steel [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [5] 黄顺喆, 厉勇, 王春旭, 等. 300M 钢的热变形行为研究 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (20): 25-28.
- Huang S Z, Li Y, Wang C X, et al. Investigation on hot deformation behavior of 300M steel [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (20): 25-28.
- [6] 张海成, 吕春艳, 曾德涛, 等. 基于摩擦修正的单真空 300M 超高强度钢本构模型 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (6): 245-252.
- Zhang H C, Chang C Y, Zeng D T, et al. Constitutive model on single vacuum 300M ultra-high strength steel based on friction correction [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (6): 245-252.
- [7] 杨昭明, 罗小安. 先进工艺在飞机起落架制造中的应用 [J]. 航空制造技术, 2005 (6): 100-103.
- Yang Z M, Luo X A. Application of advanced manufacturing technology in aircraft undercarriage production [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005 (6): 100-103.
- [8] 曾凡昌. 锻压先进制造技术及在航空工业领域的应用 [J]. 航空制造技术, 2009 (6): 26-29.
- Zeng F C. Advanced forging manufacturing technology and its application in aviation industry [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009 (6): 26-29.
- [9] 李春刚, 孟清河. 起落架大型结构件深孔加工技术研究 [J]. 机械制造与自动化, 2015, 44 (2): 68-70, 89.
- Li C G, Meng Q H. Study of deep hole machining technology for landing gear large structural parts [J]. Machine Building & Automation, 2015, 44 (2): 68-70, 89.
- [10] 李铭. 大型飞机起落架制造技术 [J]. 航空制造技术, 2008 (21): 68-71.
- Li M. Manufacturing technology for large aircraft undercarriage [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008 (21): 68-71.
- [11] 孙艳坤, 张威. 民机起落架用材料的发展与研究现状 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (20): 22-24, 29.
- Sun Y K, Zhang W. Development and research status of materials used for landing gear of civil aircraft [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (20): 22-24, 29.
- [12] 张慧萍, 王崇勋, 杜煦. 飞机起落架用 300M 超高强度钢发展及研究现状 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16 (6): 73-76.
- Zhang H P, Wang C X, Du X. Aircraft landing gear with the development of 300M ultra high strength steel and research [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16 (6): 73-76.
- [13] 赵明杰, 邓磊, 孙朝远, 等. 300M 高强度大型构件全流程锻造变形机理及工艺研究进展 [J]. 科学通报, 2022, 67 (11): 1036-1053.
- Zhao M J, Deng L, Sun C Y, et al. Advances on the deformation mechanism and forging technology of 300M high-strength steel heavy components in the whole forging process [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67 (11): 1036-1053.
- [14] 祁荣胜, 景阳端, 刘鑫刚, 等. 300M 高强度钢热变形行为及其热加工图 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (2): 130-135.
- Qi R S, Jing Y R, Liu X G, et al. Hot deformation behavior and hot processing map for 300M high strength steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (2): 130-135.
- [15] 唐华. 超高强度钢 40CrNi2Si2MoVA 强韧化工艺研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- Tang H. The Study on Process of Improving Strength and Toughness of 40CrNi2Si2MoVA Steel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [16] 许忠智, 韩顺, 韩文, 等. 铸态 300M 钢双锥试样热压缩行为 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (11): 232-237.
- Xu Z Z, Han S, Han W, et al. Thermal compression behaviors of as-cast 300M steel biconical specimen [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (11): 232-237.
- [17] 郭鹏. 300M 钢热变形和热处理过程中微观组织演化和力学性能优化研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- Guo P. Research on Microstructure Evolution and Mechanical Properties Optimization of 300M Steel During Hot Deformation and Heat Treatment [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- +++++
- ### 《锻压技术》读者信息反馈卡声明
- 《锻压技术》杂志自 2008 年起设立“读者信息反馈卡”, 旨在加强刊物与读者的交流, 促进刊物质量的提高, 并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求: 内容填写完整、没有遗漏, 提供的信息准确、详细, 字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整, 字迹不清、无法辨认, 通讯地址模糊、不详细等, 编辑部将不予邮寄杂志, 特此声明。
- “读者信息反馈卡” 1~12 期刊登, 位置在正文后, 请读者注意查看, 以免遗漏。
- 《锻压技术》编辑部