

# TC4 钛合金鼓筒锻件锻造模拟及组织预测

朱旭晖<sup>1</sup>, 朱崇伟<sup>1</sup>, 欧文超<sup>1</sup>, 邓雨亭<sup>2</sup>, 刘东<sup>3</sup>

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015)

(2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

(3. 西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 采用刚塑性有限元方法和 DEFORM-2D 软件对 TC4 钛合金鼓筒锻件锻造过程和等轴初生  $\alpha$  相的分布情况进行数值模拟, 比较对击锤锻造和液压机锻造 2 种工艺下的温度场及应变分布情况。模拟结果表明: 对击锤锻造易产生类似切削的缺陷, 通过设计合适的坯料内侧倾角可以显著改善缺陷形成; 液压机锻造成形后的锻件温度分布、应变分布和组织均较为均匀, 不易产生锻造缺陷, 是 TC4 钛合金鼓筒锻件成形的较优方式。液压机锻造的 TC4 钛合金锻件中轴初生  $\alpha$  相含量由心部到边缘逐渐增大, 经组织验证, 其等轴初生  $\alpha$  相分布基本符合模拟云图。

**关键词:** TC4 钛合金; 鼓筒锻件; 锻造模拟; 组织预测

中图分类号: TG316; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2024)02-001-05

## Forging Simulation and Microstructure Prediction for Spool Forging of TC4 Titanium Alloy

Zhu Xuhui<sup>1</sup>, Zhu Chongwei<sup>1</sup>, Ou Wenchao<sup>1</sup>, Deng Yuting<sup>2</sup>, Liu Dong<sup>3</sup>

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

(2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(3. School of Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Rigid-plastic finite element method and DEFORM-2D software were employed to simulate the forging process and distribution of primary equiaxial  $\alpha$  phase of TC4 titanium alloy spool forging. The distribution of temperature field and the strain under two forging processes of hammer forging and press forging were compared. The simulation results show that it is easy to produce defects similar to cutting by hammer forging which can be solved through setting appropriate medial inclination of billet. The press forging is the better process of spool forging because of the relatively uniform distribution of temperature, effective strain, microstructure and the low risk of forging defects. The content of primary equiaxial  $\alpha$  phase increases from edge to core of TC4 titanium alloy forging and the distribution basically conforms to the simulation by verification of microstructure.

**Key words:** TC4 titanium alloy; spool forging; forging simulation; microstructure prediction

TC4 钛合金 (名义成分 Ti-6Al-4V) 属于  $\alpha+\beta$  型两相钛合金, 具有优异的综合力学性能、良好的焊接性能, 长期使用温度可达 400 °C, 因而在航空航天、舰船和海洋工程等领域得到广泛的应用, 如用作叶片、盘、梁和紧固件等<sup>[1-4]</sup>。由于 TC4 钛合金的变形性能对工艺参数较为敏感, 成形难度较大, 热加工工艺参数设计不合理

易导致在实际锻造过程中出现各种各样的缺陷, 如开裂、折叠和流线失稳等<sup>[5-6]</sup>。传统锻造工艺的制定主要是建立在经验基础上, 通过不断调整工艺参数和修改模具等方法得到较佳的工艺路线, 不仅研发周期长, 而且锻件的质量难以保证。随着数值模拟技术的发展, 可以采用模拟技术对金属成形过程进行分析, 掌握变形过程中各种场量的变化情况, 并对变形过程中工件的充型能力、内部缺陷进行预测, 为锻造工艺的制定提供重要的参考<sup>[7-8]</sup>。

收稿日期: 2023-10-29

基金项目: 国家重大专项资助项目 (JPEC-F203110)

通信作者: 朱崇伟 (1985—), 男, 高级工程师。

前期众多学者<sup>[9-12]</sup>利用有限元软件对 TC4 钛合金锻件的锻造过程进行了数值模拟,对锻造缺陷的成因进行了分析,模拟结果可为生产工艺的制定提供参考。大型鼓筒锻件具有结构复杂、腔深壁薄等特点,不但成形难度大,而且存在组织粗化及超声检测杂波增高的现象,因此成形设备和热加工工艺参数的选择是研制的难点。为了节约工艺验证的成本,本研究中对大型鼓筒锻件进行了不同锻造方式的模拟和组织预测,以期优化其热变形工艺提供数据支撑。

## 1 锻造过程模拟和组织预测方法

采用 DEFORM-2D 软件对 TC4 钛合金鼓筒锻件的对击锤锻造和液压机锻造过程进行数值模拟。锻造用坯料取自 TC4 钛合金棒坯,模具材料为 5CrNiMo 合金。模拟边界条件:环境温度为 20 °C,坯料与模具的换热系数为 4000 W/(m<sup>2</sup> K),坯料与周围环境的换热系数为 400 W/(m<sup>2</sup> K),接触面摩擦因子取 0.2。对击锤锻造模拟的初始条件:坯料温度为 950 °C,运料时间为 30 s,对击锤打击能量为 1 MJ,气压为 0.8~0.9 MPa,锤击间隔为 5 s,模具预热温度为 300 °C,坯料形状为环形,外径为 840 mm,内径为 470 mm,高度为 450 mm,筒体朝上方式成形;液压机锻造模拟的初始条件:坯料温度为 945 °C,运料时间为 30 s,变形速度为 5~10 mm/s,模具预热温度为 350 °C,坯料形状为实心圆形,外径为 384 mm,高度为 240 mm,筒体朝下方式成形。依据对击锤、液压机的设备能力以及锻件尺寸,设计了对击锤锻造和液

压机锻造 2 种工艺的锻件毛坯图,如图 1 所示。图 1 中虚线部分为锻件交付图。

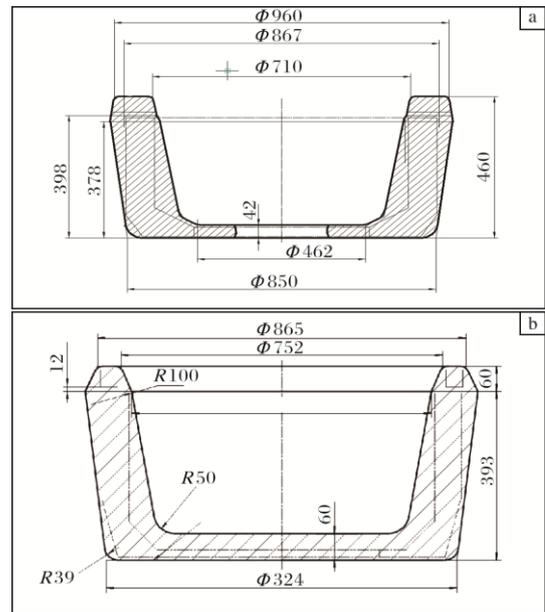


图 1 TC4 钛合金锻件毛坯尺寸图

Fig.1 Billet size drawings of TC4 titanium alloy forgings:  
(a) hammer forging; (b) press forging

为了预测锻件微观组织演变,分别在  $\beta$  相变点以下 100、60、40、20 °C 对 TC4 钛合金坯料进行固溶处理。对 DEFORM-2D 软件的子程序进行扩展,观察不同温度固溶处理的坯料经锻造后所得 TC4 钛合金锻件的微观组织,如图 2 所示。按 GB/T 5168—2020 标准中图 E 对

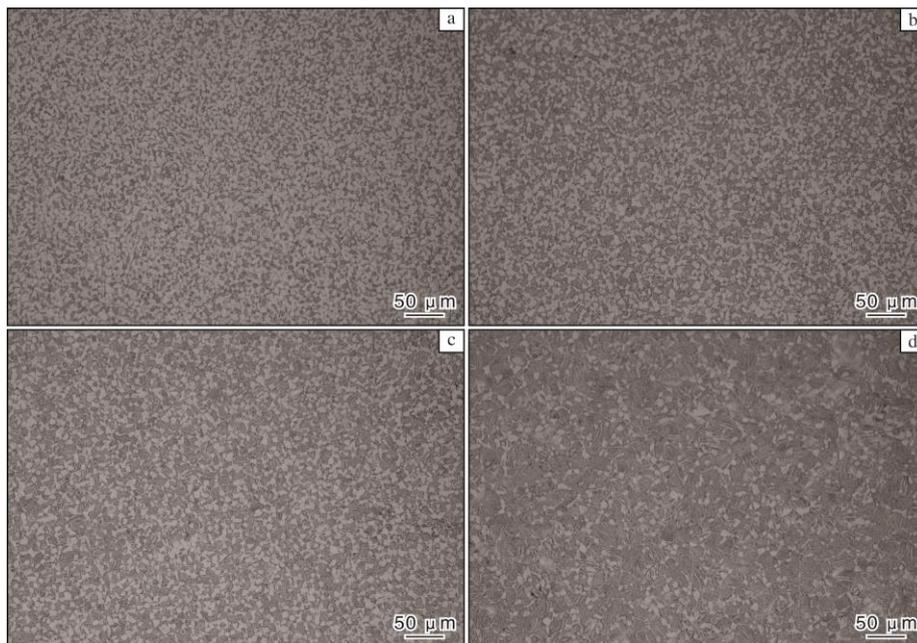


图 2 不同温度固溶处理的坯料经锻造后所得 TC4 钛合金锻件的微观组织

Fig.2 Microstructures of TC4 titanium alloy forgings obtained from billets solution treated at different temperatures:  
(a)  $T_{\beta}$ -100 °C; (b)  $T_{\beta}$ -60 °C; (c)  $T_{\beta}$ -40 °C; (d)  $T_{\beta}$ -20 °C

TC4 钛合金锻件进行初生  $\alpha$  相统计, 建立等轴初生  $\alpha$  相含量与固溶温度的关系曲线, 如图 3 所示。将等轴  $\alpha$  相含量与固溶温度的关系编译到软件的子程序中。根据锻件温度场和锻件截面形状对初生  $\alpha$  相含量进行模拟, 并选取锻件边缘和心部 2 个特殊点进行组织验证。组织验证用 TC4 钛合金锻件的相变点为 995 °C, 锻件边缘和心部的金相试样首先经过粗磨、精磨和机械抛光后, 用 Kroll 腐蚀液 (HF、HNO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O 体积比为 1:2:17) 进行腐蚀, 采用 Leica DMI 3000M 型卧式金相显微镜进行组织观察。

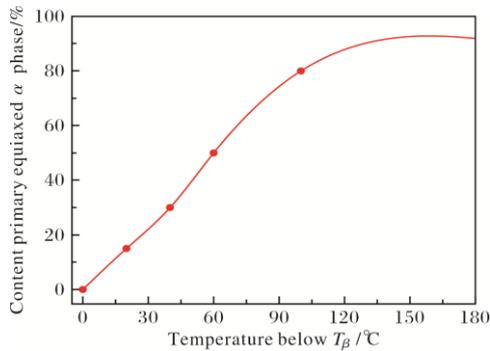


图 3 TC4 钛合金锻件等轴初生  $\alpha$  相含量与固溶温度的关系曲线  
Fig.3 Relation curve between solution temperature and primary equiaxed  $\alpha$  phase content of TC4 titanium alloy forgings

## 2 模拟结果与讨论

### 2.1 液压机锻造过程的数值模拟

图 4a 为建立的坯料模型。第一火锻造完成后, 锻件

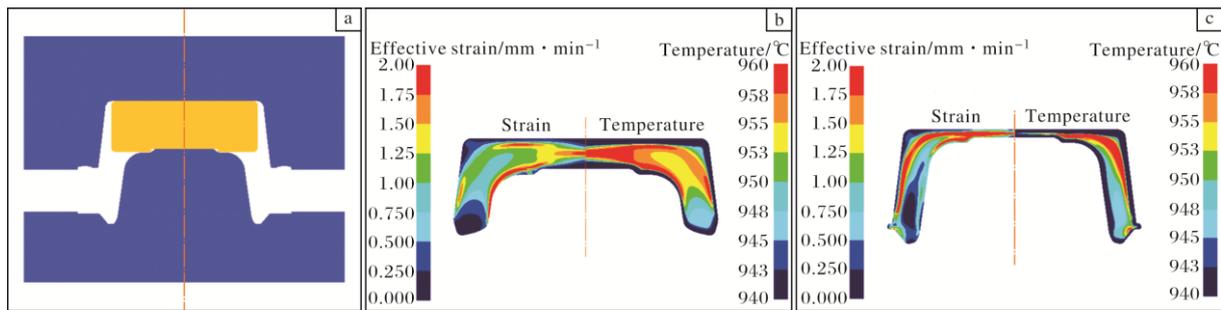


图 4 液压机锻造 TC4 钛合金锻件的数值模拟图

Fig.4 Numerical simulation diagrams of TC4 titanium alloy forging for press forging: (a) billet model; (b) effective strain and temperature fields after the first forging; (c) effective strain and temperature fields after the second forging

### 2.2 对击锤锻造过程的数值模拟

图 5a 为建立的坯料模型, 图 5b~5d 为不同坯料内侧倾角下的锻造数值模拟图。从图 5b、5c 可知, 坯料从成形的开始阶段即产生了类似切削的缺陷, 其原因是变形开始阶段主要是坯料外扩的过程, 此时与坯料内侧对应的模具上模倾角与坯料内侧倾角相差较大时 (图 5b 内侧倾角为 0°; 图 5c 内侧倾角为 15°), 坯料外扩后, 内侧有较多

的等效应变和温度分布如图 4b 所示。从图 4b 左侧部分的等效应变分布情况可以看出, 锻件心部等效应变最大, 基本在 1.25~1.75 范围内, 这是因为锻造初始阶段, 坯料发生墩粗变形, 心部变形最大。锻件两侧由于受到模具的约束, 能够产生较大的塑性变形, 其等效应变基本在 0.75~1.25 范围内, 锻件两侧的下端为自由变形端, 等效应变最小, 基本在 0~0.5 范围内。从图 4b 右侧部分的温度分布情况可以看出, 锻件的温度分布情况与等效应变的分布情况相对应, 即等效应变越大的部位, 温度越高。锻件心部的温度最高, 基本在 955~960 °C 范围内, 锻件两侧的温度较低, 基本在 945~955 °C 范围内, 工件的整体温升在 0~15 °C 范围内, 整体温升较小, 温度分布较为均匀。

第二火锻造完成后, 锻件的等效应变和温度分布如图 4c 所示。从图 4c 左侧部分的等效应变分布情况可以看出, 锻件心部的轴向高度降低明显, 产生了很大的塑性变形, 其等效应变最大, 基本在 1.5~2.0 范围内。锻件两侧同样产生了较大的变形, 可以看成是一个反挤压的过程, 锻件两侧靠近上模部位的等效应变较大, 主要在 1.0~2.0 范围内, 两侧靠近下模部位的等效应变较小, 主要在 0.25~1.0 范围内, 整体分布较为均匀。图 4c 右侧部分的温度分布情况与等效应变的分布情况相对应, 等效应变较大的部位温升在 10~15 °C 范围内, 其余等效应变较小的部位温升在 0~10 °C 范围内。由于第二火锻造完成后的等效应变分布没有第一火锻造完成后的等效应变均匀, 因而其整体温度分布存在一定的梯度, 但是两火累加的等效应变分布相对均匀。

多余的金属无法通过挤压变形向加载方向流动, 随着变形的进行, 此部分多余的金属在对击锤的高速冲击作用下产生了类似切削的缺陷。如图 5d 所示, 当坯料内侧倾角为 10° 时, 坯料内侧对应的模具上模倾角与坯料内侧倾角相差不大, 坯料的切削效应明显改善, 整个成形过程较为流畅。

图 6 为对击锤锻造的应变场和温度场云图。从图 6 可知, 对击锤锻造温差变化较大, 温度最高点位于锻件

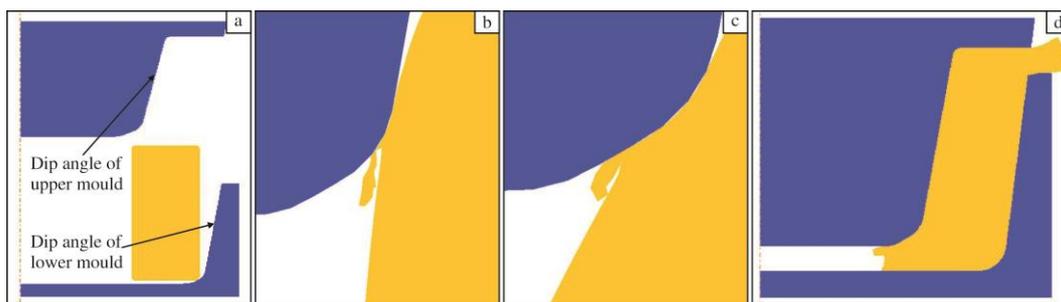


图 5 对击锤锻造 TC4 钛合金锻件的坯料模型和不同坯料内侧倾角下的模拟图

Fig.5 Billet model and simulation diagrams of TC4 titanium alloy forging for hammer forging under different medial inclinations: (a) billet model; (b) medial inclination of billet is 0°; (c) medial inclination of billet is 15°; (d) medial inclination of billet is 10°

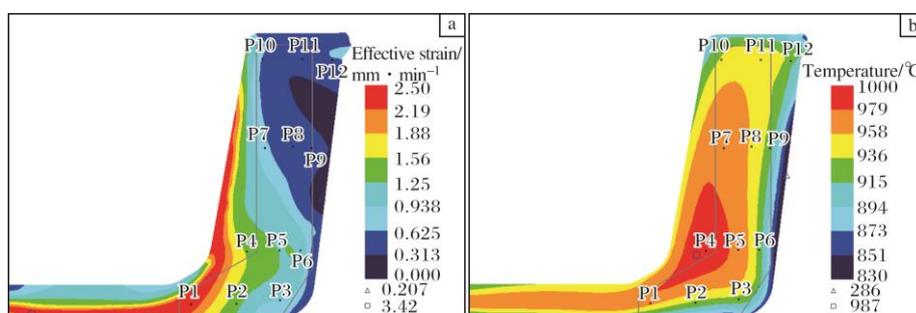


图 6 对击锤锻造 TC4 钛合金锻件的数值模拟图

Fig.6 Numerical simulation diagrams of TC4 titanium alloy forging for hammer forging: (a) effective strain field; (b) temperature field

心部，仅低于相变点 14 °C；锻件心部终锻温度均低于相变点 30 °C 左右，其余点均低于相变点 60 °C 左右。锻件心部等效应变最大，达到 1.5 以上。对比对击锤锻造和液压机锻造的模拟成形过程，TC4 钛合金鼓筒锻件均能很好地充填型腔。采用对击锤锻造，需经过 30~40 锤锻造，打击能量充足，变形速率大，多锤次变形累加的应变量相对较大，成形后锻件的应变分布主要在 0.6~1.5 范围内。相对而言，液压机锻造的等效应变和温度分布适中，应变分布主要在 0.5~1.25 范围内，锻件两火次成形，工序简单，生产效率高，不易产生锻造缺陷。

### 2.3 等轴初生 $\alpha$ 相含量预测和组织验证

在  $\alpha + \beta$  两相区塑性变形后的钛合金，其显微组织中

等轴初生  $\alpha$  相和  $\beta$  相的比例决定着合金的机械性能<sup>[13-15]</sup>。从模拟结果看，2 种方案终锻温度均在相变点以下，然而相变点与终锻温度之差在锻件内分布有很大差别。液压机锻造方案中锻件心部容易获得双态组织，边缘容易获得等轴组织；而对击锤锻造方案温差变化较大，温度最高点位置等效应变达到 1.5，变形量比较充分，有得到网篮组织的风险。在整个变形过程中，锻件外缘温度逐渐降低，而锻件内部温度先升高后下降，选取锻造过程中的最高温度区间进行初生  $\alpha$  相含量预测，依据等轴初生  $\alpha$  相含量与温度的关系（图 3），模拟出锻件内等轴初生  $\alpha$  相含量的分布云图，如图 7 所示。由图 7a 可知，液压机锻造得到的锻件整体组织均匀性较好，由内到外

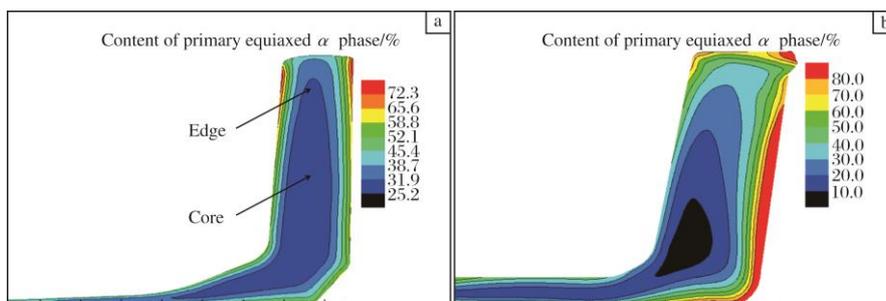


图 7 不同工艺下 TC4 钛合金锻件中等轴初生  $\alpha$  相含量云图

Fig.7 Nephograms of content distribution of primary equiaxed  $\alpha$  phase in TC4 titanium alloy forging by different processes: (a) press forging; (b) hammer forging

等轴初生  $\alpha$  相含量逐渐增大, 心部整体等轴初生  $\alpha$  相含量在 30% 左右, 锻件边缘等轴初生  $\alpha$  相含量在 45%~60% 之间, 在锻件自由端边缘处达到 70% 左右。由图 7b 可知, 对击锤得到的锻件整体组织均匀性偏低, 心部下半段初生  $\alpha$  相含量为 20% 左右, 随着锻件由内到外温度的降低, 变形量也在降低, 上半段等轴初生  $\alpha$  相含量在 40%~60% 之间, 边缘达到 80% 左右。

对液压机锻造制备的 TC4 钛合金锻件心部和边缘的组织进行验证, 结果如图 8 所示。从图 8 可知, 锻件心部和边缘均为由等轴初生  $\alpha$  相和  $\beta$  转变组织组成的双态组织, 心部和边缘的等轴初生  $\alpha$  相含量分别约为 30% 和 70%, 基本符合模拟结果。

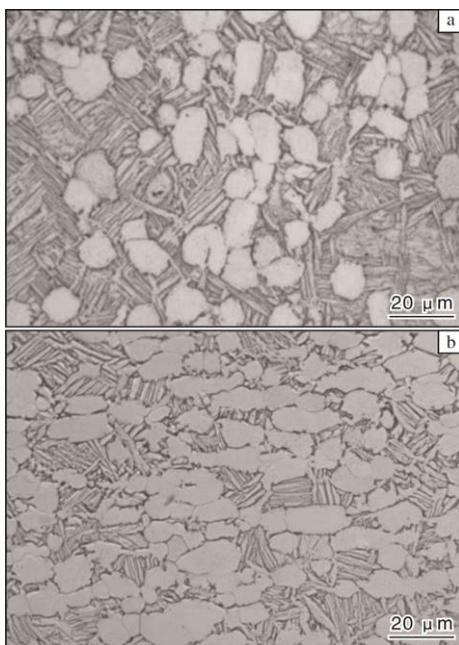


图 8 液压机锻造 TC4 钛合金锻件不同位置的显微组织

Fig.8 Microstructures of TC4 titanium alloy forging in different positions by press forging: (a) core; (b) edge

### 3 结 论

(1) 采用对击锤锻造, 当 TC4 钛合金坯料内侧对应的模具上模倾角与坯料内侧倾角相差较大时, 坯料外扩后易产生类似切削的锻造缺陷。修改坯料内侧倾角后缺陷可以得到改善。

(2) 对击锤锻造和液压机锻造 2 种锻造方式得到的锻件由内到外等轴初生  $\alpha$  相含量逐渐增大, 并对液压机锻造制备的锻件进行了组织验证, 基本符合模拟结果。

(3) 对击锤锻造成形后 TC4 钛合金锻件的应变分布主要在 0.6~1.5 范围内, 而液压机锻造成形后应变分布

主要在 0.5~1.25 范围内, 温度、应变分布和组织均较为均匀, 产生锻造缺陷的可能性较小。对比发现液压机锻造为 TC4 钛合金鼓筒锻件成形的较优方式。

### 参考文献 References

- [1] 周廉. 美国、日本和中国钛工业发展评述[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(8): 577-584.
- [2] Yang W B, Huo Y M, He T, et al. Microstructure evolution of TC16 titanium alloy for producing aerospace fasteners during cold compression[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(2): 386-391.
- [3] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213(1): 103-104.
- [4] 朱培亮, 辛社伟, 毛小南, 等. 高温钛合金的热稳定性研究进展[J]. 钛工业进展, 2023, 40(1): 42-48.
- [5] 武小娟, 杨川, 张志强, 等. TA15 钛合金不等厚 L 型材热轧有限元模拟[J]. 钛工业进展, 2022, 39(1): 1-5.
- [6] 程建霞, 张立斌, 蔡伟. TC4 叶片超塑成形有限元模拟及其变形分析[J]. 锻压技术, 2005(2): 56-59.
- [7] 张李骊. 钛合金盘件等温成形工艺优化与过程控制[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [8] Luce R, Wolske M, Kopp R, et al. Application of a dislocation model for FE-process simulation[J]. Computational Material Science, 2001, 21(1): 1-8.
- [9] 聂蕾, 李付国, 方勇. TC4 合金等温成形过程模拟与组织预测[J]. 宇航材料工艺, 2002 (5): 45-49.
- [10] 吕成, 张立文, 牟正君, 等. TC4 钛合金锻件锻造过程三维热力耦合有限元模拟[J]. 锻压技术, 2007, 32(1): 28-31.
- [11] 赵鹏, 吴为, 付雪松, 等. TC4 钛合金 L 型材高温弯曲蠕变的数值模拟研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(1): 211-216.
- [12] 贺子健, 李淼泉, 于卫新. TC4 合金筋板结构件锻造过程的三维数值模拟[J]. 热加工工艺, 2010, 39(11): 106-109.
- [13] Weiss I, Semiatin S L. Thermomechanical processing of alpha titanium alloys—an overview[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 263(2): 243-256.
- [14] Li L, Li M Q. Evolution characterization of  $\alpha$  lamellae during isothermal compression of TC17 alloy with colony- $\alpha$  microstructure[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 712: 637-644.
- [15] 莱茵斯 C, 皮特尔斯 M. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005.