

# 钛合金多向锻造数值模拟

龚龙清, 许川, 袁宝国

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** **目的** 研究 TC4 钛合金在多向锻造过程中的变形行为。**方法** 基于 Deform-3D 模拟软件平台, 对钛合金的多向锻造变形过程进行有限元模拟分析, 研究不同工艺参数(锻造温度、锻造速度、锻造工步)下合金最大主应力、等效应变和载荷最大值的变化规律。**结果** 多向锻造的每工步锻造为典型的镦粗过程, 坯料中心部位一直受压应力作用, 鼓肚处则出现最大拉应力。随着锻造温度的升高和锻造速度的减小, 最大压应力和拉应力均减小, 多工步锻造之后合金主应力场分布更加均匀。随着锻造工步的增加, 坯料等效应变增大且中心大变形区域体积分数增加。最大载荷随锻造温度的升高和锻造速度的降低而减小, 相同参数下不同锻造工步的载荷最大值变化不大。**结论** 锻造温度、锻造速度、锻造工步对 TC4 钛合金多向锻造变形行为有显著的影响, 适当选择多向锻造工艺参数, 可以降低载荷并获得均匀性较好的坯料。

**关键词:** 数值模拟; TC4 钛合金; 多向锻造

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.06.010

**中图分类号:** TG316 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457 (2016)06-0054-06

## Numerical Simulation Study of Multi-directional Forging of Titanium Alloy

GONG Long-qing, XU Chuan, YUAN Bao-guo

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**ABSTRACT:** The aim of this study was to investigate the deformation behavior of TC4 titanium alloy during multi-directional forging. Based on Deform-3D simulation software platform, the deformation process of titanium alloy during multi-directional forging was analyzed, and maximum principal stress, equivalent strain and the maximum load under different parameters (forging temperature, forging speed, forging steps) were studied. Each step of forging is a typical upsetting process, the central portion of the blank exhibits compressive stress while the bulging area presents maximum tensile stress. The maximum compressive stress and tensile stress decrease with the increase of forging temperature and decrease of forging speed, and maximum principal stress distributes more uniformly after multi-steps of forging. The equivalent strain and the volume fraction of large deformation central region increase with the increase of the forging step. The maximum load decreases with the increase of forging temperature and decrease of forging speed, the maximum load has not change much with the increase of forging step under the same parameters. According to the simulation result, forging temperature, forging speed and forging step have a significant impact on the deformation of TC4 titanium alloy during multi-directional forging. The load could be reduced and the uniformity could be improved if the forging process parameters are appropriate.

**KEY WORDS:** numerical simulation; TC4 titanium alloy; multi-directional forging

钛及钛合金是理想的金属结构材料, 具有比强度高、高温性能好、耐蚀性能和生物相容性好等优

点, 在航空航天、舰船、汽车、生物医学等领域有着广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。TC4 钛合金属于  $\alpha+\beta$  型两相钛

收稿日期: 2016-10-10

作者简介: 龚龙清 (1992—), 男, 安徽人, 硕士研究生, 主要研究方向为材料塑性成形。

通讯作者: 袁宝国 (1979—), 男, 山东人, 博士, 副教授, 主要研究方向为轻质材料精密成形。

合金, 该合金的使用量占到全部钛合金的一半以上。材料的性能和其组织状态紧密相关, 利用大塑性变形的可以改善合金的组织结构。多向锻造技术 (Multi-directional forging, MDF) 作为大塑性变形的一种代表性工艺, 与其他大塑性变形方法相比, 具有工艺简单、成本低等优点<sup>[6-7]</sup>, 使用现有工业设备就能完成。多向锻造技术最早是由 Salishchev G A<sup>[8]</sup>等人提出, 于 20 世纪 60 年代发展起来, 其实质是在多次镦粗和拔长的自由锻过程中, 锻造方向不断的发生变化。多向锻造技术已经运用于钛合金<sup>[9]</sup>、铝合金<sup>[10-11]</sup>、镁合金<sup>[12-13]</sup>和不锈钢<sup>[14]</sup>等材料组织性能的改善过程。有限元数值模拟分析的方法已经广泛应用于分析合金的加工变形中<sup>[15-16]</sup>。文章通过计算机数值模拟的方法, 通过 Deform-3D 软件对钛合金多向锻造过程进行分析, 研究不同工艺参数(锻造温度、锻造速度、锻造工步)下钛合金的变形规律, 为实际钛合金的多向锻造实验提供参考依据。

## 1 有限元模型的建立

采用 Deform-3D 有限元数值模拟软件对钛合金多向锻造过程进行模拟分析, 利用 UG 三维造型软件对坯料和模具进行三维实体造型。坯料和模具三维实体模型的截面见图 1, 坯料为尺寸为 10 mm×10 mm×15 mm 的块体, 模具为上下两个平砧。将三维模型保存为 STL 格式文件并导入到 Deform-3D 软件中, 模拟过程中将坯料视为塑性体, 上砧和下砧视为刚性体, 选择软件数据库中的 TC4 为坯料材料, 摩擦因数选为 0.3, 将坯料划分为 20 000 个网格。设置不同的锻造温度、锻造速度和锻造工步进行模拟, 模拟过程中每工步的压下量为 40%, 锻造温度区间选择为 500~800 °C, 锻

造速度分别为 0.015, 0.15, 1.5 mm/s, 分析不同条件下坯料的变形规律。

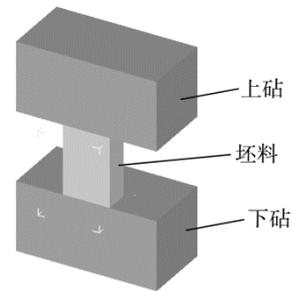


图 1 TC4 钛合金多向锻造有限元模拟三维实体模型截面  
Fig.1 Sectional view of three-dimensional finite element solid model of multi-directional forging of TC4 titanium alloy

## 2 模拟结果分析与讨论

### 2.1 TC4 钛合金多向锻造过程中金属运动状态分析

坯料在多向锻造过程中从开始到结束的变形状态轴向剖视图 2, 变形过程中金属流动不均匀, 坯料靠近上砧的区域由于上砧的下压作用, 金属流动较快, 而靠近下砧的区域金属流动则相对较慢。变形前期主要是镦粗的过程, 坯料的变形主要为在正压力作用下与压下方向同向的轴向压缩, 图 2a 中存在大量平行于压下方向的箭头。达到一定的变形量之后, 坯料的正压力在材料下部转化为横向的拉应力, 坯料在变形后半段发生了拉伸变形, 特别是坯料的下半段, 表现出向横向运动的状态, 图 2c 中存在大量横向的箭头。

### 2.2 TC4 钛合金多向锻造过程中最大主应力场的变化

多向锻造过程中, 坯料和上下砧之间的摩擦力

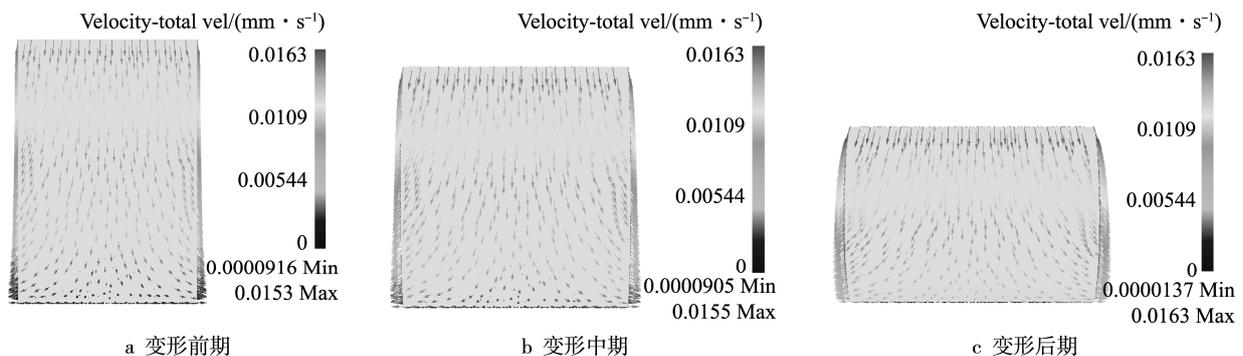


图 2 TC4 钛合金多向锻造过程中坯料变形状态轴向剖视图

Fig.2 Axial cross-sectional view of deformation state of the blank during multi-directional forging process of TC4 titanium alloy

导致坯料内部各处变形不均匀,在某些条件下会存在拉应力,当最大主应力为负值时,说明该质点受到的是压应力的作用,而当最大主应力为正值时,说明该质点受到的是拉应力的作用,当拉应力足够大时,可能会导致锻件开裂。

锻造速度为 0.015 mm/s 时,温度对合金最大主应力场分布的影响见图 3。随着温度的增加,坯料的最大压应力和最大拉应力均逐渐减小。锻造温度为 700 °C 时,锻造速度对合金最大主应力场分布的影响见图 4。随着锻造速度的增加,坯料的最大压应力和最大拉应力均显著增加,且增加幅度较大,锻造速度对钛合金

的变形有显著的影响。坯料的中心部位受到三向压应力的作用,鼓肚处出现最大拉应力,变形中鼓肚处较容易出现开裂现象。锻造速度越大越容易导致坯料开裂,不利于成形过程,因此,在 TC4 钛合金多向锻造过程中宜选择较小的锻造速度。锻造温度为 700 °C、锻造速度为 0.015 mm/s 时,不同锻造工步下 TC4 钛合金多向锻造过程中合金最大主应力场分布轴向剖视见图 5。随着锻造工步的增加,主应力场的分布变得更加均匀,除与上下砧接触部分的压应力较大外,大部分坯料所受的压应力相对较小,随着加载方向的不断变化,坯料各处得到均匀的变形。

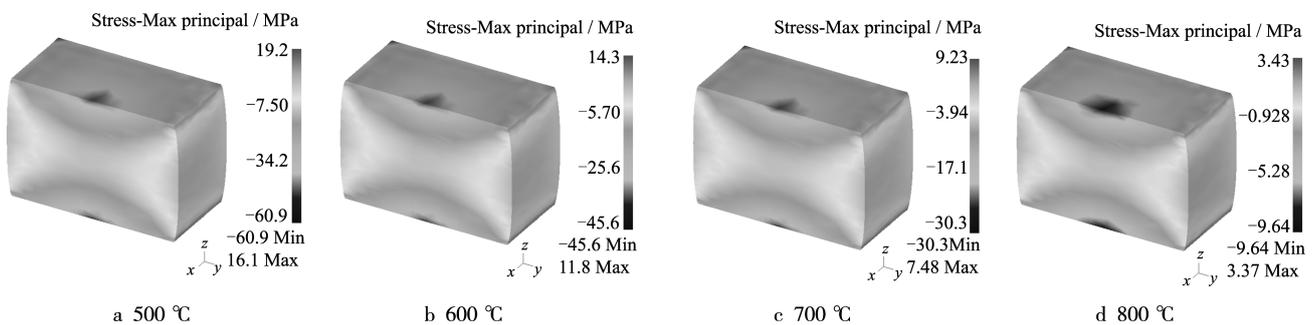


图 3 不同温度下 TC4 钛合金多向锻造过程中最大主应力场分布轴向剖视图

Fig.3 Axial cross-sectional view of the maximum principal stress of TC4 titanium alloy during multi-directional forging under different temperatures

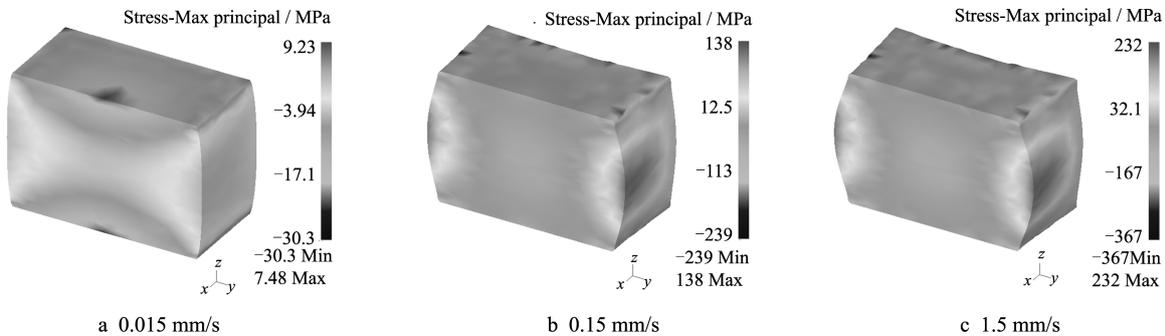


图 4 不同锻造速度下 TC4 钛合金多向锻造过程中最大主应力场分布轴向剖视图

Fig.4 Axial cross-sectional view of the maximum principal stress of TC4 titanium alloy during multi-directional forging under different forging speeds

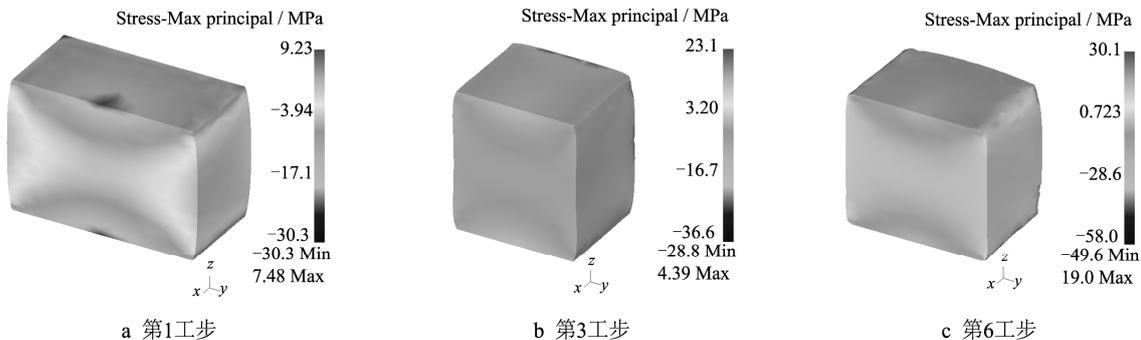


图 5 不同锻造工步下 TC4 钛合金多向锻造过程中最大主应力场分布轴向剖视图

Fig.5 Axial cross-sectional view of the maximum principal stress of TC4 titanium alloy during multi-directional forging under different forging steps

### 2.3 TC4 钛合金多向锻造过程中等效应变的变化

TC4 钛合金经过不同工步多向锻造后等效应变分布的轴向剖视图见图 6。等效应变的分布可以反应坯料的变形规律, 坯料中心部位为易变形区, 每工步结束后中心区域的应变值较大。与模具接触的上下端部区域为难变形区, 应变值较小。在锻造温度为 700 °C 和锻造速度为 0.15 mm/s 的条件下, 经过第 1 工步锻造后, 易变形区的应变值在 0.75 左

右, 难变形区的变形量接近为 0。镦粗时坯料会出现双鼓型, 鼓肚所在部位为中间变形区, 其应变值介于易变形区和难变形区之间。各工步的锻造过程都相当于一次镦粗过程, 随着锻造工步的增加, 坯料沿着 3 个轴向不断的进行镦粗, 原来的难变形区域在后续的工步中处于中间变形区, 最后合金各部分的等效应变均逐渐增大, 6 工步之后合金中心区域变形量较大, 且中心大变形区域体积分数增大, 中心区域的等效应变值达到 4 左右, 周边为 2.8 左右。另外, 各工步锻造后等效应变的最大值出现在坯料与模具接触的边缘棱角部位。

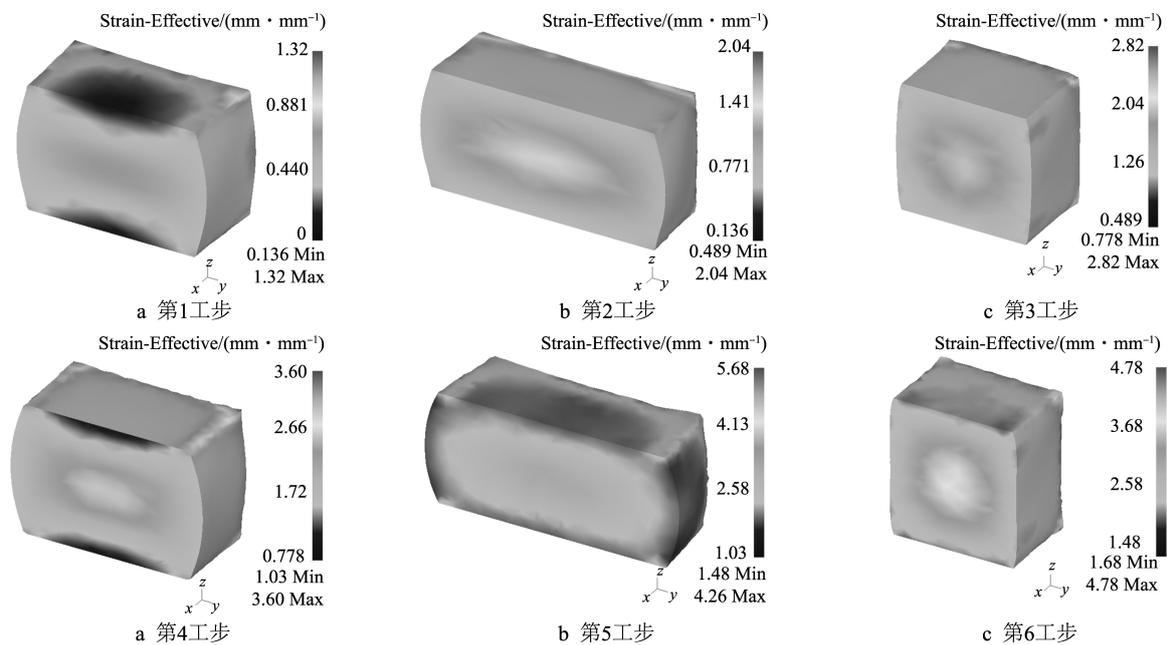


图 6 不同工步多向锻造后 TC4 钛合金等效应变分布轴向剖视图

Fig.6 Axial cross-sectional view of equivalent strain of TC4 titanium alloy after different steps of multi-directional forging

### 2.4 TC4 钛合金多向锻造过程中载荷最大值的变化

TC4 钛合金在不同多向锻造工艺参数下, 上砧载荷最大值的变化见图 7。TC4 钛合金多向锻造变形时的载荷最大值变化对锻造温度较为敏感, 在给定的锻造速度下, 变形温度的上升会导致载荷的下降。这是由于当变形温度升高时, 合金中原子的活性较高, 原子间的临界剪切应力减小, 导致变形抗力减小。温度升高也会使热激活作用增强, 螺型位错的交滑移和刃型位错的攀移会比较容易进行, 促进了合金的动态回复, 造成位错密度的下降, 宏观上表现为变形载荷降低<sup>[17-18]</sup>。变形温度对载荷最大值的影响也和锻造速度有关, 当锻造速度较大

时, 随着温度的升高载荷最大值显著减小; 当锻造速度较小时, 载荷最大值随着温度的增加缓慢减小。当锻造速度较大时, 加工硬化严重, 提高锻造温度可以促进合金的动态回复过程, 使合金变形时的载荷显著下降; 当锻造速度较小时, 完成变形所需的时间较长, 足够完成动态回复过程, 载荷最大值随着温度的增加缓慢减小。

TC4 钛合金多向锻造变形时的载荷最大值变化对锻造速度也具有较大的敏感性。在给定温度下, 锻造速度减小会导致载荷下降, 载荷最大值也随之减小。锻造速度较大时, 单位应变所需的时间较短, 晶格畸变加剧, 位错增殖速率增大且位错运动速度较大, 位错间相互交割的几率也增大, 最终导致位错密度增大, 变形载荷显著增大。而在较小的锻造

速度下,位错的运动速度较慢,低速下完成锻造过程所需的时间较长,位错有足够的时间发生异号位错之间的相互抵消,导致位错密度降低,变形载荷降低。

在 600 °C 下进行第 1 工步锻造时,当锻造速度从 0.15 mm/s 减小到 0.015 mm/s 时,载荷最大值从 62.55 kN 减小到 12.99 kN,减小了约 79.23%;而当锻造速度从 0.15 mm/s 增大到 1.5 mm/s 时,载荷最大值从 62.55 kN 增加到 65.63 kN,只增加了约 4.92%。锻造速度对载荷最大值的影响和温度有关,当温度低于 600 °C 时,锻造速度较小时,载荷最大值显著减小,当锻造速度增加到一定程度后

对载荷最大值变化影响不大;当温度高于 600 °C 时,合金中动态回复过程能起到较大作用,模拟实验锻造速度范围内,锻造速度对载荷最大值有较大影响。相同变形参数下,合金变形时的载荷最大值在各工步锻造时基本保持恒定。第 2 工步中载荷最大值比第 1 工步略有增加,可能是由于第 2 工步中坯料和上下砧的接触面积增大,导致变形载荷有一定程度的上升。在后续锻造工步中,锻造温度和锻造速度对载荷最大值有相同的影响规律,载荷最大值在相同的锻造条件下基本相等。

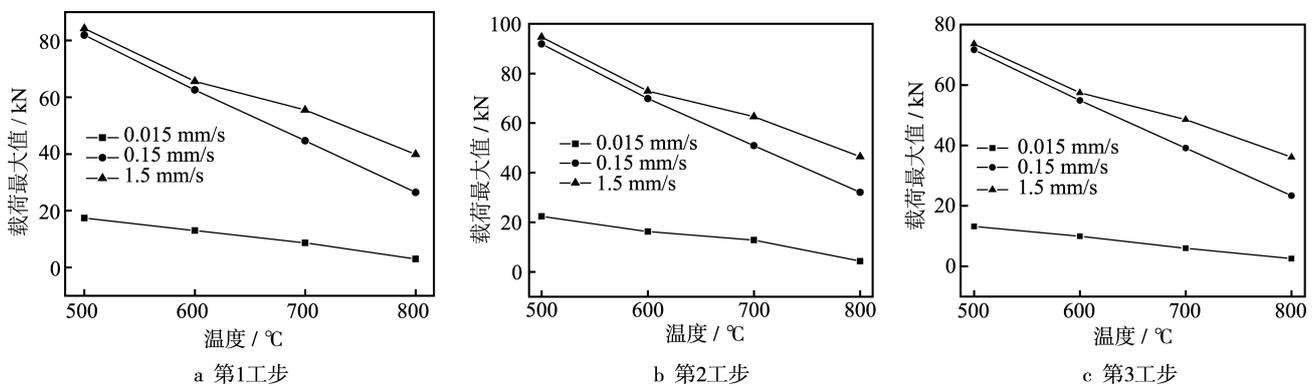


图 7 不同多向锻造条件下 TC4 钛合金多向锻造过程中最大载荷变化曲线

Fig.7 The change of maximum load during multi-directional forging of TC4 titanium alloy under different conditions

### 3 结论

1) 多向锻造过程中 TC4 钛合金变形不均匀,变形初期主要为镦粗过程,在变形后半段坯料的下半部分发生了大量的拉伸变形。

2) 由于坯料和上下砧之间摩擦力的作用,合金内主应力场分布不均匀,中心部位受三向压应力的作用,鼓肚处出现最大拉应力,容易出现开裂现象。随着锻造温度的升高和锻造速度的降低,合金最大压应力和最大拉应力均逐渐降低。

3) 多向锻造变形过程中 TC4 钛合金各区域变形程度不同,随着锻造工步的增加,合金各部分的等效应变值逐渐增加,中心区域变形程度较大,且中心大变形区域的体积分数增大。

4) 载荷最大值随着锻造温度的升高和锻造速度的降低而降低。变形温度对载荷最大值的影响和锻造速度有关,当锻造速度较大时,温度升高,载荷最大值显著降低;当锻造速度较小时,温度升高,载荷最大值缓慢降低。锻造速度对载荷最大值的影

响和温度有关,当温度低于 600 °C,锻造速度较大时,载荷最大值显著降低,锻造速度增加到一定程度后对载荷最大值变化影响不大;当增加温度高于 600 °C 时,锻造速度在实验范围内对载荷最大值均有较大影响。

#### 参考文献:

- [1] 周利,周炜璐,杜正勇,等. 钛及钛合金搅拌摩擦焊研究进展[J]. 精密成形工程, 2015, 7(5): 46—51.  
ZHOU Li, ZHOU Wei-lu, DU Zheng-yong, et al. Research Progress in Friction Stir Welding of Titanium and Titanium Alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(5): 46—51.
- [2] 万亚昌,李鑫,鲁世强,等. 变形参数对 TC21 钛合金片层组织球化行为的影响[J]. 精密成形工程, 2016, 8(1): 79—83.  
WAN Ya-chang, LI Xin, LU Shi-qiang, et al. Effect of Deformation Parameters on Globularization Behavior of TC21 Titanium Alloy with Lamellar Microstructure[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(1): 79—83.
- [3] JACKSON M, DRING K A. Review of Advances in Processing and Metallurgy of Titanium Alloys[J]. Materials

- Science & Technology, 2006, 22(8): 881—887.
- [4] 李梁, 孙健科, 孟祥军. 钛合金的应用现状及发展前景[J]. 钛工业进展, 2004, 21(5): 19—24.  
LI Liang, SUN Jian-ke, MENG Xiang-jun. Application State and Prospects for Titanium Alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2004, 21(5): 19—24.
- [5] 赵树萍, 吕双坤. 钛合金在航空航天领域中的应用[J]. 钛工业进展, 2002(6): 18—21.  
ZHAO Shu-ping, LYU Shuang-kun. Applications of Titanium Alloys in the Field of Aerospace[J]. Titanium Industry Progress, 2002(6): 18—21.
- [6] 郭强, 严红革, 陈振华, 等. 多向锻造技术研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(2): 106—108.  
GUO Qiang, YAN Hong-Ge, CHEN Zhen-Hua, et al. Research Progress in Multiple Forging Process[J]. Materials Review, 2007, 21(2): 106—108.
- [7] XIA Xiang-sheng, CHEN Ming, LU Yong-jin, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Isothermal Multi-axial Forging Formed AZ61 Mg Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013(11): 3186—3192.
- [8] SALISHCHEV G A, VALIAKHMETOV O R, GALEYEV R M. Formation of Submicrocrystalline Structure in the Titanium Alloy VT8 and Its Influence on Mechanical Properties[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(11): 2898—2902.
- [9] 陈卓. Ti<sub>2</sub>AlNb 基金合金多向等温锻造组织与力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
CHEN Zhuo. Research on Microstructure and Mechanical Properties of Ti<sub>2</sub>AlNb-Based Alloy Fabricated by Multiple Isothermal Forging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [10] SITDIKOV O, SAKAI T, GOLOBORODKO A, et al. Grain Fragmentation in a Coarse-grained 7475 Al Alloy during Hot Deformation[J]. Scripta Material, 2004, 51(2): 175—179.
- [11] 王亮. 新型高强铝合金锻造工艺实验与模拟研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2010.  
WANG Liang. Simulation and Experiment Study of the Forging of New High Strength Aluminum Alloy[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2010.
- [12] 尹雪雁, 于建民, 张治民. Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 镁合金多向锻造组织和性能研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6(6): 68—71.  
YIN Xue-yan, YU Jian-min, ZHANG Zhi-min. Microstructure and Performance of Mg-13Gd-4Y-0.5Zr Magnesium Alloy under Multi-directional Forging[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(6): 68—71.
- [13] 简炜炜, 康志新, 李元元. 多向锻造 ME20M 镁合金的组织演化与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2008(6): 1005—1011.  
JIAN Wei-wei, KANG Zhi-xin, LI Yuan-yuan. Microstructural Evolution and Mechanical Property of ME20M Magnesium Alloy Processed by Multi-directional Forging[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008(6): 1005—1011.
- [14] NAKAO Y, MIURA H. Nano-grain Evolution in Austenitic Stainless Steel during Multi-directional Forging[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528(3): 1310—1317.
- [15] 李治华, 牛昌安, 佗劲红, 等. 利用圆环墩粗与有限元法测定 TC4 钛合金高温变形的摩擦系数[J]. 精密成形工程, 2013, 5(2): 11—15.  
LI Zhi-hua, NIU Chang-an, TUO Jin-hong, et al. On the Measurement of Friction Coefficient of TC4 Titanium Alloy Using Ring Compression Experiments and FEM Simulation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(2): 11—15.
- [16] 董蔚霞, 王晓溪, 夏华明, 等. 新型等径角挤压工艺下的 5052 铝合金变形行为的有限元模拟[J]. 精密成形工程, 2015, 7(3): 43—47.  
DONG Wei-xia, WANG Xiao-xi, XIA Hua-ming, et al. Finite Element Simulation of 5052 Aluminum Alloy Deformation Behavior in a New Type of Equal Channel Angular Pressing Process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(3): 43—47.
- [17] 贾乐. 7085 铝合金单向压缩与多向自由锻变形过程实验及仿真研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
JIA Le. Simulation and Experiment of 7085 Aluminum Alloy under Process of Undirectional and Multi-directional Compression Deformation of Free Forging[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [18] 罗皎, 李淼泉, 李宏, 等. TC4 钛合金高温变形行为及其流动应力模型[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(8): 1395—1401.  
LUO Jiao, LI Miao-quan, LI Hong, et al. High Temperature Deformation Behavior of TC4 Titanium Alloy and Its Flow Stress Model[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(8): 1395—1401.