

# Ti-811 合金棒材热连轧过程有限元数值模拟及验证

王田<sup>1</sup>, 南迎飞<sup>2</sup>, 王伟<sup>3</sup>, 岳旭<sup>1</sup>, 乔恩利<sup>1</sup>, 叶红川<sup>1</sup>

(1. 新疆湘润新材料科技有限公司, 新疆 哈密 839100)

(2. 中航富士达科技股份有限公司, 陕西 西安 710065)

(3. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 采用有限元法对 Ti-811 合金棒材热连轧过程进行数值模拟, 分析变形过程中轧件应力场、应变场和温度场的数值以及分布规律, 并基于数值模拟结果进行轧制验证, 为制定 Ti-811 合金棒材轧制工艺提供指导。结果表明: 模拟连续轧制过程中轧件的最大应力位于与轧辊接触的表面, 且由边部到心部逐渐降低; 随着轧制道次的增加, 应力值逐渐下降、应变变量逐渐增大; 轧件在各道次的变形过程中表层和心部存在差异, 心部变形量大于边部变形量; 轧件与轧辊接触的表面层有明显温降, 当轧件脱离轧辊后表面层温度逐渐回升, 轧制结束后表面层温度回升至初始温度, 但心部因变形热积聚温度略有升高, 最大升温值达到 14 °C。基于数值模拟结果在热连轧机组上进行轧制验证, 所轧制的 Ti-811 合金棒材外形尺寸良好, 且组织与力学性能满足 GJB 9567—2018《叶片用 TA11 和 TC6 钛合金棒材规范》要求。

**关键词:** Ti-811 合金; 热连轧; 有限元模拟

中图分类号: TG337.6; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)04-026-09

## Finite Element Numerical Simulation and Verification of Hot Continuous Rolling Process of Ti-811 Alloy Bar

Wang Tian<sup>1</sup>, Nan Yingfei<sup>2</sup>, Wang Wei<sup>3</sup>, Yue Xu<sup>1</sup>, Qiao Enli<sup>1</sup>, Ye Hongchuan<sup>1</sup>

(1. Xinjiang Xiangrun New Material Technology Co., Ltd., Hami 839100, China)

(2. AVIC Forstar S&T Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

(3. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The finite element method was used to analysis the numerical value and distribution rules of hot continuous rolling process of Ti-811 alloy bar, which include stress field, strain field and temperature field. The results show that the maximum stress of rolling bar during rolling process is located at the surface which contact with the rolls, the stress distribution gradually decreases from the edge to the center; with the increase of rolling, the stress value gradually decreases, and the strain variable increases; there is difference between the surface and heart of the rolling bar in the deformation process of each pass, and the deformation amount at the center is greater than the edge; the temperature of the surface layer which contact with rolls has obvious cooling, when the rolling bar removed from the roll, the surface layer temperature rises gradually, and when the rolling is over, the surface layer temperature rises to the initial temperature, but the center temperature of rolling bar rises slightly duo to the accumulation deformation heat, the maximum temperature appreciation reaches 14 °C. Based on the numerical simulation results, rolling test was conducted on the hot continuous rolling mill. The rolled bars have good overall dimension, the microstructure and mechanical properties meet the requirements of GJB 9567—2018 “Specification for TA11 and TC6 titanium alloy bars for blade and vane”.

**Keywords:** Ti-811 alloy; hot continuous rolling; finite element simulation

收稿日期: 2023-06-28

基金项目: 新疆科技厅重点研发专项资助项目 (2022B01029)

通信作者: 王田 (1983—), 男, 高级工程师。

Ti-811 (名义成分为 Ti-8Al-1Mo-1V) 合金是美国于 20 世纪 80 年代研制的一种近  $\alpha$  型耐热钛合金, 其特点是密度低、弹性模量高, 在 400~450 °C 的蠕变、

持久性能优越，并具有较高的震动阻尼性能，已作为航空发动机压气机叶片（使用温度 400~450 °C）应用于多种型号的发动机上<sup>[1-2]</sup>。20 世纪 90 年代，我国针对 Ti-811 合金开展了大量研究工作，在此基础上开发了 TA11 钛合金，并对其合金化学成分、显微组织、锻造加工工艺、热处理工艺等进行了研究，实现了工业化生产<sup>[3-7]</sup>。

然而，目前关于 Ti-811 合金棒材的研究工作大都基于锻造棒材开展的<sup>[8-11]</sup>，对其轧制棒材的相关研究鲜有报道，特别是缺乏关于该合金连续轧制生产可行性和轧制孔型匹配性、连续轧制过程中的变形行为、变形特点和轧制参数对合金组织性能的影响等研究，致使在制定轧制工艺参数时尚无可参考依据。

有限元数值模拟技术能够定量、直观、全面地了解金属热加工成形过程<sup>[12-15]</sup>，从而获得热变形过程的成形规律，为热加工工艺的制订和优化提供理论依据。为此，本研究使用 Deform-3D 数值模拟软件对 Ti-811 合金棒材热连轧过程进行仿真，获得连续轧制变形过程中轧件应力场、应变场和温度场的数据，分析各道次轧制过程中应力、应变和温度的分布规律，并基于数值模拟结果在热连轧机组上进行轧制试验，以验证采用热连轧生产方式轧制 Ti-811 合金棒材的可行性和轧制参数的

合理性，为制定 Ti-811 合金棒材轧制工艺提供指导。

## 1 有限元模拟

### 1.1 建立几何模型和材料模型

采用 Deform-3D 软件对 Ti-811 合金从  $\phi 75$  mm 棒坯轧制为  $\phi 45$  mm 棒材的 4 道次热连轧过程进行数值模拟。由于轧制孔型为椭圆-圆孔型系统，其上辊与下辊几何形状相同且左右对称，初始坯料也为对称结构，因此可选取四分之一进行建模。采用 Pro/E 三维制图软件对轧辊进行建模，如图 1 所示。不同轧制道次孔型结构如图 2 所示。

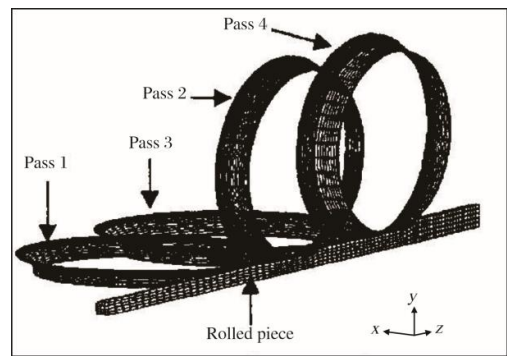


图 1 轧辊模型

Fig.1 Model of roll

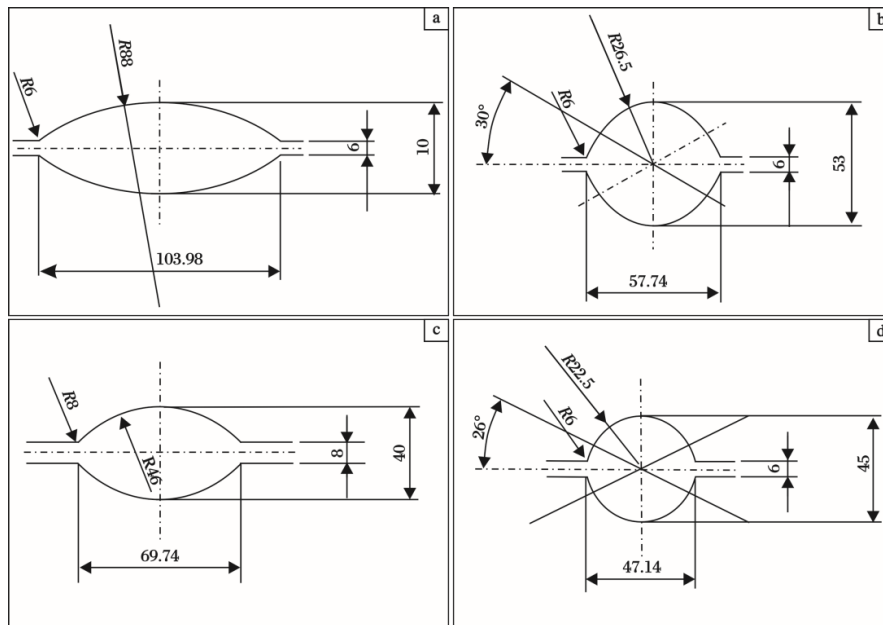


图 2 不同轧制道次的孔型结构示意图

Fig.2 Schematic diagrams of pass structure for different rolling passes: (a) the first pass; (b) the second pass; (c) the third pass; (d) the fourth pass

在 Deform-3D 软件材料库中选取相应的 Ti-811 合金材料作为轧件材质，其化学成分、物理性能、力学性能等基本数据如表 1、表 2、表 3 所示<sup>[1]</sup>。

### 1.2 初始条件设定

#### 1.2.1 网格划分

采用绝对网格划分方法对轧件进行网格划分。取

表 1 Ti-811 合金化学成分(w/%)

Table 1 Chemical composition of Ti-811 alloy

Main chemical components				Impurity content					
Ti	Al	Mo	V	Fe	C	N	H	O	Y
Bal.	7.3~8.3	0.7~1.2	0.7~1.2	≤0.30	≤0.08	≤0.05	≤0.015	≤0.12	≤0.005

表 2 Ti-811 合金物理性能

Table 2 Physical properties of Ti-811 alloy

Density/g m <sup>-3</sup>	Phase transition temperature/°C	Melting point/°C	Coefficient of linear expansion/10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	Heat conductivity/W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
4.35	1025~1045	1570~1650	8.53	5.44

表 3 Ti-811 合金棒材室温力学性能

Table 3 Room temperature mechanical properties of Ti-811 alloy bar

Elastic modulus/GPa	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Reduction of area/%
118	930	880	20	42

最小单元尺寸 2.5 mm, 比率为 4, 定义轧辊为刚性体、轧件为塑性体、推块为刚性体进行模拟分析计算, 划分后的轧件网格如图 3 所示。

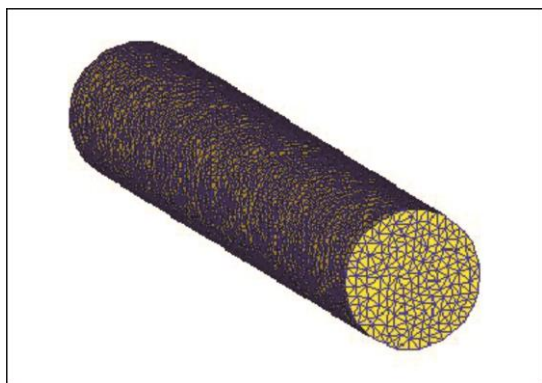


图 3 轧件网格模型

Fig.3 Network model of rolled piece

### 1.2.2 边界参数设定

根据轧件材料属性和轧机孔型特征, 设置模拟轧制的边界条件参数如表 4 所示。

### 1.2.3 摩擦条件设定

Ti-811 合金棒材模拟轧制温度为 960 °C, 在此温度轧制时, 轧件与轧辊间的压力较大, 易于发生粘合, 因此模拟中对于接触摩擦问题采用剪切摩擦模型:

$$f = mA\tau \quad (1)$$

式中:  $f$  为摩擦力, N;  $m$  为摩擦因子, 取值范围 0~1;  $A$  为轧件与轧辊接触面积, mm<sup>2</sup>;  $\tau$  为剪切摩擦应力, MPa。

表 4 模拟轧制边界参数

Table 4 Boundary parameters of simulation rolling

Boundary parameter	Value
Rolling temperature/°C	960
Ambient temperature/°C	20
Temperature of roll/°C	20
Roll speed/m s <sup>-1</sup>	$V_1=0.17, V_2=0.22$ $V_3=0.26, V_4=0.31$
Rolling displacement/mm	200
Thermal conductivity coefficient between rolled piece and roll/W (m <sup>2</sup> ·°C) <sup>-1</sup>	15.28
Heat exchange coefficient between rolled piece and air/W (m <sup>2</sup> ·°C) <sup>-1</sup>	0.02
Emissivity of rolled piece	0.9

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 轧制过程应力分析

Ti-811 合金棒材轧制过程中, 不同轧制道次下轧件的应力分布如图 4 所示。从图 4 可以看出,  $\phi 75$  mm Ti-811 合金圆形棒坯经过第一道次椭圆孔型轧制后, 轧件最大应力位于与轧辊接触部位, 为 326 MPa; 应力分布由边部到心部逐渐降低, 轧件前端离开轧制变形区

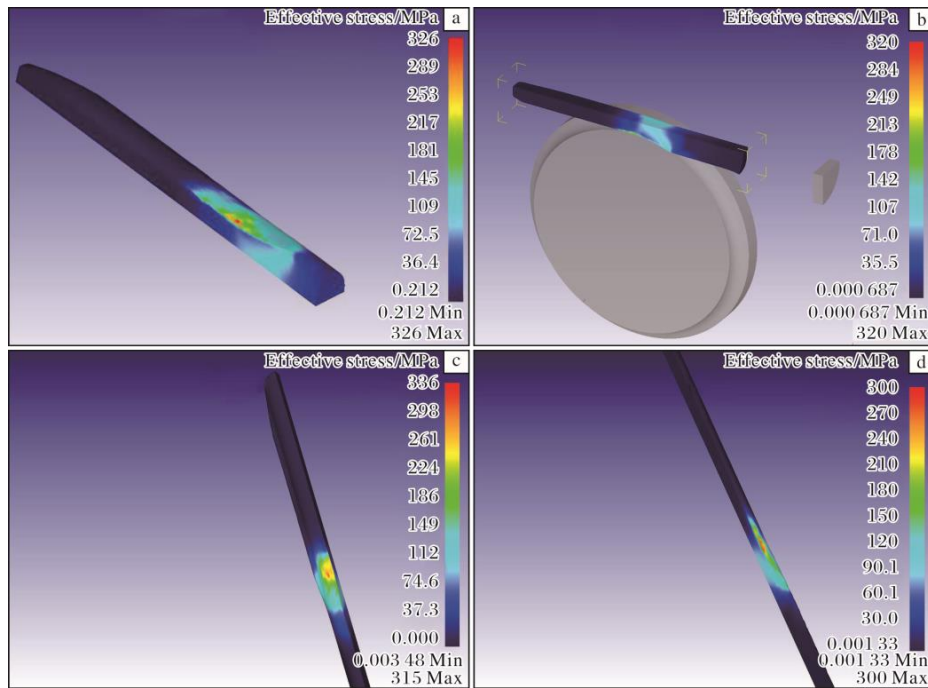


图 4 不同轧制道次下轧件的应力分布云图

Fig.4 Stress distribution nephograms of rolled piece at different passes: (a) the first pass; (b) the second pass; (c) the third pass; (d) the fourth pass

后, 应力得到释放。椭圆轧件经过第二道次圆孔型轧制后, 得到  $\phi 53$  mm 的圆棒, 应力最高点仍处于与轧辊接触部位, 为 320 MPa, 其他部位应力值低于 200 MPa。在第三道次圆轧椭圆和第四道次椭圆轧圆过程中, 轧件应力分布规律与第一道次和第二道次类似, 最大应力集中在与轧辊接触部位, 分别为 315、300 MPa。轧制完毕后, 轧件应力得到释放。

从分析结果可知, 轧件第一道次应力值最高, 随着轧制道次的进行, 应力值逐渐下降。每一道次轧制过程中, 轧件最大应力均集中在与轧辊接触部位, 应力分布由边部到心部逐渐降低, 当轧件前端离开轧制变形区后, 应力得到释放。

### 2.2 轧制过程应变分析

Ti-811 合金棒材轧制过程中, 不同轧制道次下轧件的应变分布如图 5 所示。从图 5 可以看出,  $\phi 75$  mm Ti-811 合金圆形棒坯经过第一道次椭圆孔型轧制后, 轧件心部和边部均发生变形, 其应变值处于 0.4~0.7 之间, 表明该道次椭圆孔型可以使轧件的变形较为均匀。椭圆轧件经过第二道次圆孔型轧制后, 轧件心部应变值大于边部, 约为 1.1~1.3, 边部应变值达到了 0.7~0.9。经过第三道次椭圆孔型轧制后, 轧件长度明显增加, 表面应变值达到 1.6, 中心部位应变值达到 2.0 左右。经过第四道次圆孔型轧制后, 轧件整体应变值增大, 表面应变

量达到 1.9, 中心部位应变值达到 3.0 左右。

从上述分析结果可知, 第一道次轧制时轧件的应变值最低, 随着轧制道次的进行, 应变值逐渐升高。各道次轧制过程中, 轧件边部的应变值均小于心部, 说明 Ti-811 合金棒材在椭圆-圆孔型连续轧制变形过程中, 其边部与心部变形存在一定差异, 心部变形大于边部。这是由于轧制过程采用椭圆-圆孔型轧制, 轧件各道次的最大变形程度与平均变形程度差别很大, 轧件与轧辊接触区域的摩擦系数较大, 表面横向变形受到轧辊孔型摩擦力的强烈限制, 会迅速压向心部金属, 迫使心部金属向纵向剧烈变形<sup>[16-17]</sup>。

### 2.3 轧制过程温度分析

对轧制过程中各道次不同阶段轧件的温度分布规律进行分析。其中, 第一道次轧制时轧件较短, 分析咬入轧制和轧制完成阶段温度场; 第二道次轧制时, 轧件变形延长, 分析咬入轧制、稳定轧制和轧制完成阶段温度场; 第三、第四道次则分析稳定轧制和轧制完成阶段温度场。

图 6 为  $\phi 75$  mm Ti-811 合金棒坯进入第一道次椭圆孔型轧制过程中轧件的温度分布云图。从图 6 可以看出, 轧件与轧辊接触部位有明显的温降, 最低温度为 709 °C, 但轧件心部温度仍然较高。当轧件不再与轧辊接触时, 由于轧件内部温度较高, 逐渐向边部传

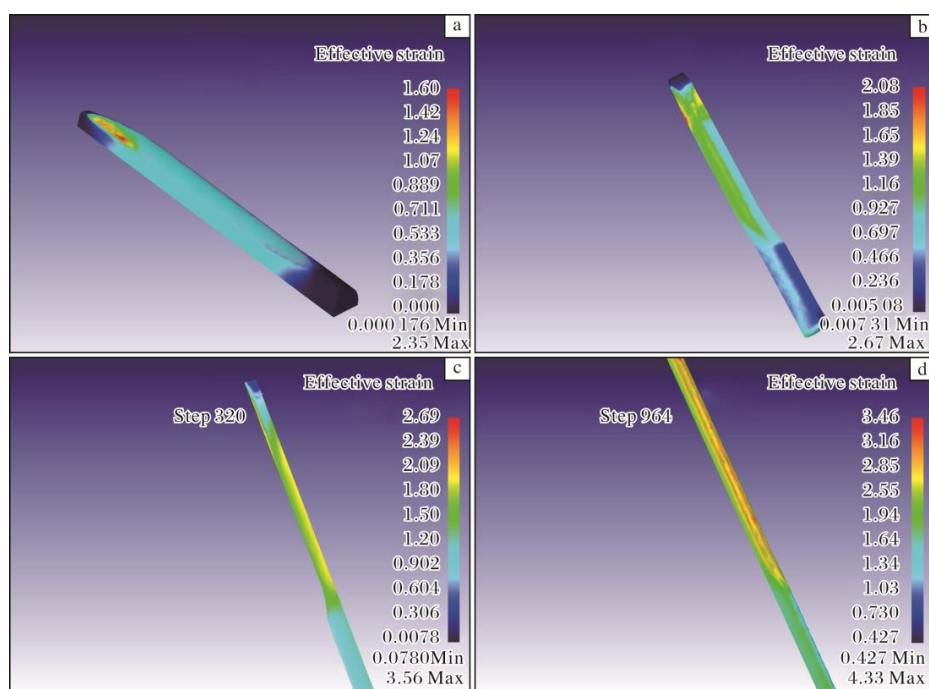


图5 不同轧制道次下轧件的应变分布云图

Fig.5 Strain distribution nephograms of rolled piece at different passes: (a) the first pass;(b) the second pass; (c) the third pass; (d) the fourth pass

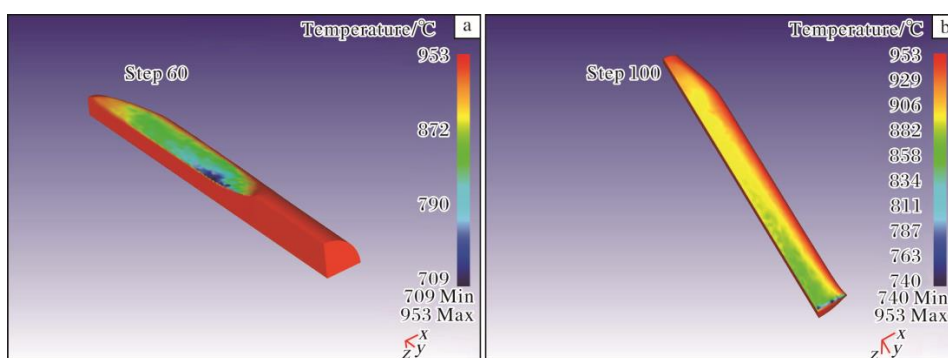


图6 轧件第一道次轧制过程中不同阶段的温度分布云图

Fig.6 Temperature distribution nephograms of rolled piece at different stages of the first pass: (a) nip rolling; (b) rolling finished

导传热，从而使得坯料边部温度逐渐上升。轧制结束后，轧件表面温度又回升至 800 °C 以上。轧件从温降到温度重新上升到 800 °C 所需时间约为 2 s。

图 7 为椭圆轧件进入第二道次圆孔型轧制过程中轧件的温度分布云图。从图 7 可以看出，在第二道次轧制过程的初始阶段，轧件与轧辊接触表面出现了明显的温降，最低温度达到 657 °C。随着轧制过程的进行，脱离轧辊的轧件表面温度逐渐上升，且轧件中心部位温度仍然在 950 °C 左右。第二道次轧制结束时，轧件表面大部分部位的温度又上升至 900 °C 以上，温升所需时间约为 2 s。

图 8 为  $\phi 53$  mm 圆棒进入第三道次椭圆孔型轧制

过程中轧件的温度分布云图。从图 8 可以看出，与第一道次和第二道次类似，第三道次轧制过程中，最大温降部位仍然位于轧件与轧辊接触的表面，其最低温度低于 700 °C。由于轧件中心部位的传导传热作用，轧件前端表面温度逐渐上升，最高达到 900 °C，其中心部位的温度大于 900 °C，最高达到 974 °C，较初始轧制温度升高 14 °C，温升时间为 2~3 s。第三道次轧制结束时，轧件表面大部分部位的温度又回升至 850 °C 以上，中心温度最高达到 972 °C。这是由于轧制过程中采用的椭圆-圆孔型轧制使轧件各部位变形程度不同，心部应变大于边部应变。轧件与轧辊接触区域的摩擦系数较大，轧件的表面横向变形受到轧辊孔型摩擦力的强烈限制，横向变

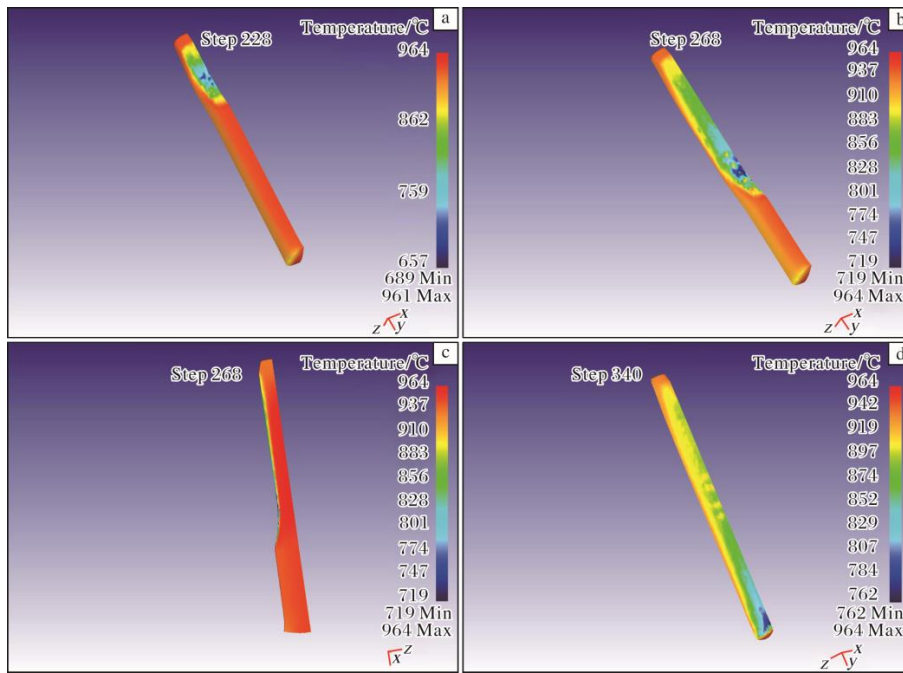


图 7 轧件第二道次轧制过程中不同阶段的温度分布云图

Fig.7 Temperature distribution nephograms of rolled piece at different stages of the second pass: (a) nip rolling; (b) stable rolling (surface); (c) stable rolling (longitudinal section); (d) rolling finished

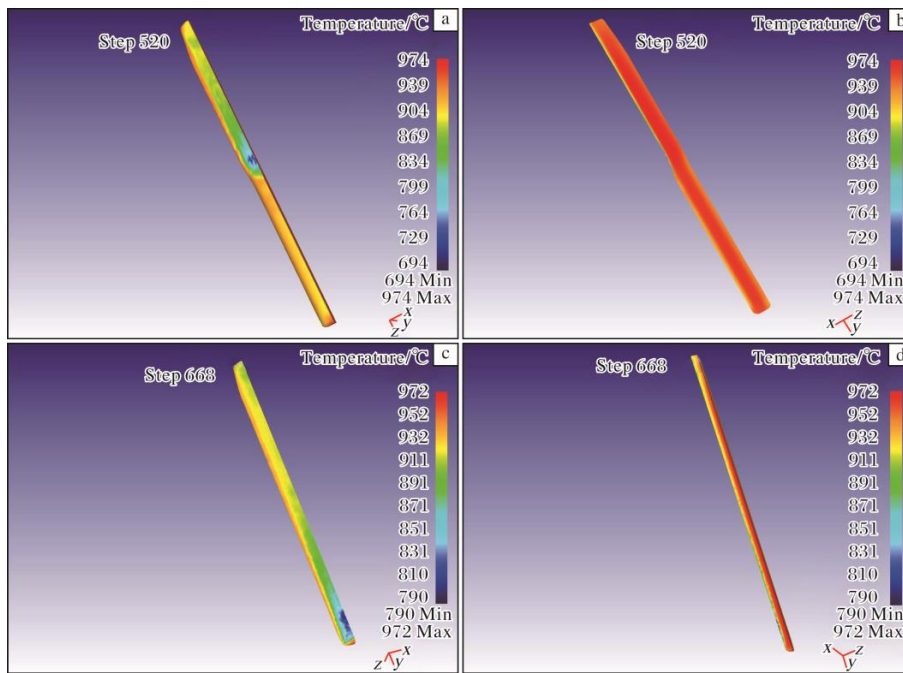


图 8 轧件第三道次轧制过程中不同阶段的温度分布云图

Fig.8 Temperature distribution nephograms of rolled piece at different stages of the third pass: (a) stable rolling (surface); (b) stable rolling (longitudinal section); (c) rolling finished (surface); (d) rolling finished (longitudinal section)

形会迅速压向心部金属，迫使心部金属向纵向剧烈变形，从而使中心区域变形热剧增<sup>[16-17]</sup>。

图 9 为椭圆轧件进入第四道次圆孔型轧制过程中轧件的温度分布云图。从图 9 可以看出，轧件的温度

分布与前三道次类似。轧制结束时，轧件绝大部分表面温度高于 850 ℃，中心温度为 964 ℃，高于初始温度，这是由于轧件心部变形大于边部，变形产生的热量积聚导致了温度上升。

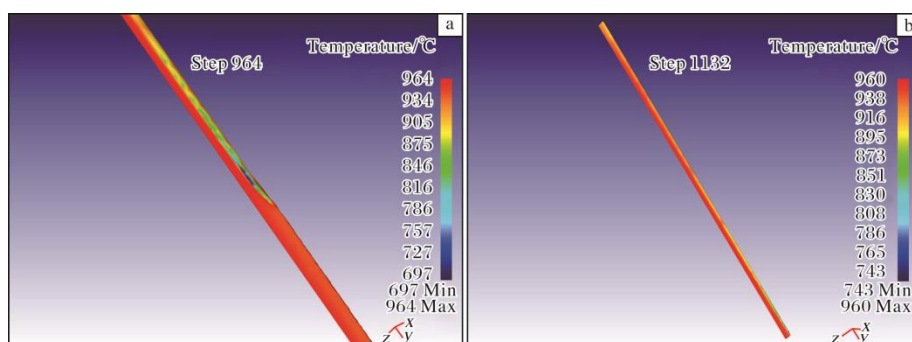


图9 轧件第四道次轧制过程中不同阶段的温度分布云图

Fig.9 Temperature distribution nephograms of rolled piece at different stages of the fourth pass:

(a) stable rolling; (b) rolling finished

### 3 轧制验证

#### 3.1 轧制试验

基于数值模拟结果,采用热连轧机组进行轧制试验,以验证 Ti-811 合金棒材热连轧生产的可行性和轧制工艺参数的合理性。

所用材料为  $\phi 75$  mm Ti-811 合金精锻棒坯,化学成分(w%)为: Al 7.83, Mo 1.08, V 1.02, Fe 0.03, O 0.08, H 0.004, C 0.01, N 0.007, 其余为 Ti。Ti-811 合金棒坯相变点为  $(1040 \pm 5)$  °C, 显微组织如图 10 所示。

轧制试验所采用的轧制孔型、开轧温度、各轧制道次线速度等工艺参数均与模拟过程保持一致。将  $\phi 75$  mm Ti-811 合金棒坯加热至 960 °C 后,经 4 道次椭圆-圆孔型连续轧制,得到  $\phi 45$  mm 棒材,总轧制变形量为 64%。

按照 GJB 9567—2018《叶片用 TA11 和 TC6 钛合金棒材规范》要求,从  $\phi 45$  mm Ti-811 合金棒材上切取金相试样、拉伸试样及蠕变试样,使用 ZEISS Axio Vert 200MAT 型光学显微镜、INSTRON 5885 型电子式万能拉伸试验机、RC0950 型高温持久蠕变试验机等设备进行金相组织和力学性能检测。

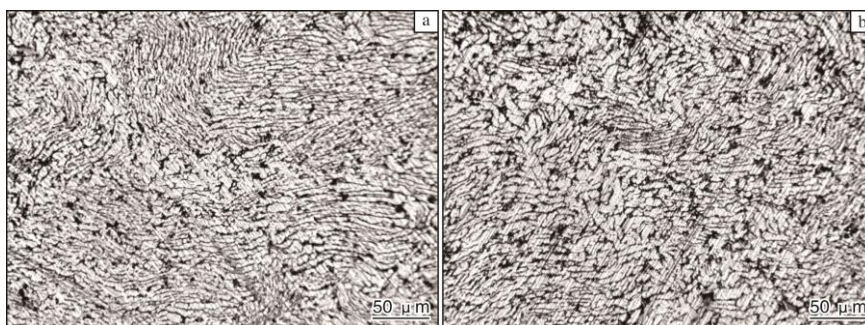


图 10 Ti-811 合金精锻棒坯不同部位的显微组织

Fig.10 Microstructures of Ti-811 alloy precision rolling bar in different positions: (a) edge; (b) center

#### 3.2 验证结果

##### 3.2.1 外观及组织

轧制所得  $\phi 45$  mm Ti-811 合金棒材外形尺寸良好。图 11 为  $\phi 45$  mm Ti-811 合金棒材头部与尾部的低倍组织。从图 11 可以看出, Ti-811 合金棒材低倍组织中无裂纹、气孔、夹杂、偏析、缩尾等目视可见的冶金缺陷。图 12 为  $\phi 45$  mm Ti-811 合金棒材边部与心部的金相照片。从图 12 可知,棒材组织由近等轴初生  $\alpha$  相、少量细小片状的次生  $\alpha$  相、少量残留  $\beta$

相组成。Ti-811 合金棒材低倍和高倍组织均满足 GJB 9567—2018《叶片用 TA11 和 TC6 钛合金棒材规范》要求。轧制过程中会发生以回复、形核、晶粒长大为主的动态再结晶和以位错运动为主的塑性变形,从而使合金的显微组织和力学性能发生变化<sup>[18-19]</sup>。从图 12 还可以看出, Ti-811 合金棒材心部的初生  $\alpha$  相尺寸较边部更加细小,说明在轧制变形过程中棒材心部变形大于边部,心部的动态再结晶行为也更加充分,这与心部因变形热积聚产生的升温有关。

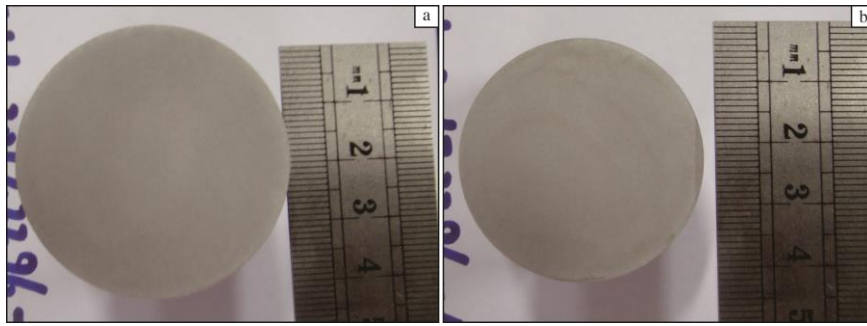


图 11 φ45 mm Ti-811 合金棒材不同部位的低倍组织

Fig.11 Macrostructures of φ45 mm Ti-811 alloy bar in different positions: (a) head; (b) tail

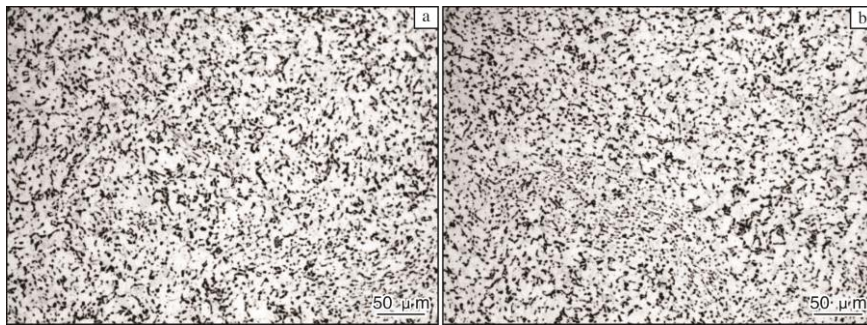


图 12 φ45 mm Ti-811 合金棒材不同部位的显微组织

Fig.12 Microstructures of φ45 mm Ti-811 alloy bar in different positions: (a) edge; (b) center

3.2.2 力学性能

对轧制得到的 φ45 mm Ti-811 合金棒材室温拉伸、室温缺口拉伸、高温拉伸、热稳定性和高温蠕

变性能进行测试, 结果见表 5 和表 6。从表 5 和表 6 可以看出, 热连轧制备的 Ti-811 合金棒材力学性能均满足 GJB 9567—2018 要求。

表 5 φ45 mm Ti-811 合金棒材的室温力学性能

Table 5 Room temperature mechanical properties of φ45 mm Ti-811 alloy bar

No.	Room temperature tensile properties				Notched tensile property (895 MPa)/h
	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	
1#	934	874	21.0	44	>6
2#	935	873	20.0	44	>6
GJB 9567—2018	≥895	≥825	≥10	≥20	≥5

表 6 φ45 mm Ti-811 合金棒材的高温力学性能

Table 6 High temperature mechanical properties of φ45 mm Ti-811 alloy bar

No.	Elevated temperature tensile properties (425 °C)				Thermal stability (425 °C/100 h)				High temperature creep elongation (425 °C/410 MPa/100 h)/%
	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	
1#	645	505	22.5	63.5	937	888	20.5	42	0.113
2#	640	505	25	61.0	939	891	20.0	44	0.125
GJB 9567—2018	≥620	≥485	≥10	≥25	≥895	≥825	≥9	≥18	≤0.2



## 4 结 论

(1) 采用有限元法对 Ti-811 合金棒材连续轧制过程进行数值模拟, 轧件的最大应力处于与轧辊接触表面部位, 应力分布由边部到心部逐渐降低, 当轧件前端离开轧制变形区后, 应力逐渐得到释放。第一道次椭圆孔型轧制时应力值最高, 随着轧制道次的进行, 应力值逐渐下降。

(2) 模拟 Ti-811 合金棒材连续轧制过程中, 随着轧制道次的进行, 轧件应变量逐渐增大, 在各道次轧制中轧件表层和心部的变形量存在差异, 心部变形量大于边部。

(3) 模拟 Ti-811 合金棒材连续轧制过程中, 轧件与轧辊接触的表面层有明显温降, 但心部未出现明显温降; 当轧件脱离轧辊后表面层温度逐渐上升; 轧制结束后轧件表面温度又上升至初始温度左右, 但心部因变形热积聚导致温度略微升高, 其中第三道次轧制时心部温升最大, 温升值达到 14 °C。

(4) 基于数值模拟结果在热连轧机组上进行轧制验证, 结果表明 Ti-811 合金棒材可以通过热连轧方式进行生产。采用椭圆-圆孔型轧制, 开轧温度设定为 960 °C, 经总变形量为 64% 的四道次连续轧制变形后, 所得  $\phi 45$  mm Ti-811 合金棒材外形尺寸良好, 组织与力学性能均能满足 GJB 9567—2018《叶片用 TA11 和 TC6 钛合金棒材规范》要求。

### 参考文献 References

[1] 邹武装, 郭晓光, 谢湘云, 等. 钛手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

[2] 赵永庆. Ti-8Al-1Mo-1V 合金[J]. 钛工业进展, 1994, 11(6): 11-12.

[3] 赵永庆, 刘炳南. 合金成分对 Ti-811 合金棒材性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 1994, 23(3): 59-64.

[4] 王非, 王梅改. Ti811 合金的高温氧化行为[J]. 铸造技术, 2011, 32(4): 507-510.

[5] 齐广霞, 于广义, 陈晓峰. TA11 钛合金亚动态再结晶行为研究[J]. 锻压技术, 2011, 36(2): 111-115.

[6] 赵永庆, 朱康英, 李佐臣, 等. 热暴露温度和氢对 Ti-811 合金热盐应力腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 1996, 25(6): 23-26.

[7] 赵永庆, 朱康英, 李佐臣, 等. Ti-811 合金棒材的热稳定性和蠕变性能[J]. 材料开发与应用, 1995, 10(2): 16-20.

[8] 王田, 王伟, 李笑, 等. 变形方式对 Ti-811 钛合金棒材组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 186-188.

[9] 廖毅, 庞玉华, 杨艳慧, 等. TA11 钛合金热变形本构方程[J]. 热加工工艺, 2018, 47(10): 46-49.

[10] 王田, 李笑, 陶海林, 等. 固溶时效对 Ti-811 合金连轧棒材组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(7): 92-94.

[11] 郑念庆, 张永强, 和永岗, 等. 显微组织对 TA11 钛合金棒材力学性能的影响[J]. 锻压技术, 2017, 42(8): 146-151.

[12] 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.

[13] 齐广霞, 党淼, 史丽坤. TA11 合金叶片挤杆过程中微观组织的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2010, 39(17): 129-132.

[14] 李志尚, 熊智豪, 杨平, 等. 大型 TA19 钛合金棒材形变及相变织构模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(10): 3785-3792.

[15] 孙花梅, 刘伟, 戚运莲, 等. Ti-B25 钛合金管材挤压成形数值模拟及实验研究[J]. 钛工业进展, 2021, 38(1): 25-29.

[16] 帅习元, 黄静, 吴超, 等. 高线轧机特高轧制速度下轧件变形行为研究[J]. 中国冶金, 2012(10): 18-22.

[17] 李曼云, 孙本荣. 钢的控制轧制和控制冷却技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.

[18] 费跃, 常峰, 唐斌, 等. 热轧变形对 TB-13 合金组织和织构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 6-10.

[19] Li Y X, Wang L, An R, et al. Deformation behavior of Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo titanium alloy at low temperatures and high strain rates[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(12): 4369-4375.

### 专利信息

## 一种高组织均匀性 Ti17 钛合金大规格棒材锻造方法

申请号: CN202211279989.5

申请日: 2022-10-19

公开(公告)日: 2023-07-14

公开(公告)号: CN115595521B

申请(专利权)人: 湖南湘投金天钛业科技股份有限公司

摘要: 本发明涉及钛合金锻造技术领域, 公开了一种高组织均匀性的 Ti17 钛合金大规格棒材的锻造方法。其锻造工艺路线: 第一次高温均匀化处理 + 开坯锻造 → 第二次高温均匀化处理 + 相变点以上锻造 → 首次  $\alpha + \beta$  相区锻造 → 相变点以上热处理 + 锻造 → 第二次  $\alpha + \beta$  相区锻造 →  $\alpha + \beta$  相区拔长锻造 →  $\alpha + \beta$  相区成品锻造。