

引用格式: 郑超, 胡生双, 朱知寿, 等. 新型 TB17 钛合金高温变形微观组织及本构模型[J]. 航空材料学报, 2026, 46(3): 28-36.
ZHENG Chao, HU Shengshuang, ZHU Zhishou, et al. Microstructure and constitutive model of high-temperature deformation in new-type TB17 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(3): 28-36.

新型 TB17 钛合金高温变形微观组织及本构模型

郑超¹, 胡生双¹, 朱知寿², 王新南², 李明兵², 朱彬³,
崔霞³, 欧阳德来^{3*}

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089; 2. 中国航发北京航空材料研究院 先进钛合金航空科技重点实验室, 北京 100095; 3. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063)

摘要: 采用 Gleeble-3500 型热模拟试验机在变形温度为 795~895 °C 且应变速率为 0.001~1.0 s⁻¹ 条件下对新型超
高强韧 TB17 钛合金进行热模拟压缩实验, 研究合金高温变形微观组织和塑性流动行为, 建立流动应力本构模型。
结果表明, 合金流动应力随应变增加先快速增加, 后轻微降低, 最终趋于平稳。合金发生部分动态再结晶, 以动态
回复为主, 流动应力出现轻微下降与合金部分动态再结晶有关。合金动态再结晶体积分数不高于 40%, 动态再结
晶机制以弓弯机制为主。构建以 Arrhenius 方程为基础的本构模型, 得到合金在变形温度为 795~895 °C、应变速
率为 0.001~1.0 s⁻¹ 条件下平均变形激活能 Q 值为 205.48 kJ/mol, 预测精度较高, 平均相对误差 δ_{avg} 为 3.987%, 相
关系数 R 为 0.9972。该模型构建为 TB17 钛合金热变形过程流动应力提供准确预测, 也为其他合金高精度本构模
型构建提供参考。

关键词: TB17 钛合金; 高温变形; 微观组织; 变形机制; 本构模型

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000167

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2024.000167

中图分类号: TG146.1; V252.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)03-0028-09

Microstructure and constitutive model of high-temperature deformation in new-type TB17 titanium alloy

ZHENG Chao¹, HU Shengshuang¹, ZHU Zhishou², WANG Xinnan², LI Mingbing²,
ZHU Bin³, CUI Xia³, OUYANG Delai^{3*}

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Xi'an 710089, China; 2. Key Laboratory of Advanced Titanium Alloys, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Thermal simulation compression tests are conducted on a new type of ultra-high strength and toughness TB17 titanium alloy using Gleeble-3500 thermal simulation testing machine under the conditions of deformation temperature ranging from 795 °C to 895 °C and strain rate of 0.001 s⁻¹ to 1.0 s⁻¹. The microstructure and plastic flow behavior of the alloy during hot deformation are analyzed, and a constitutive model of flow stress is established. The results show that the flow stress of the alloy increases rapidly with the increase of strain, then decreases slightly, and finally tends to be stable. Partial dynamic recrystallization occurs in the alloy, dominated by dynamic recovery, and the slight decrease in flow stress is related to the partial dynamic recrystallization of the alloy. Dynamic recrystallization volume fraction of the alloy is not higher than 40%, and the dynamic recrystallization mechanism is mainly dominated by the bowing mechanism. A constitutive model based on the Arrhenius equation is constructed, and the deformation activation energy Q value of the alloy at the temperature of 795-895 °C is obtained as 205.48 kJ/mol. The model has high prediction accuracy, with average error δ_{avg} of 3.987% and correlation coefficient R of 0.9972. The construction of this model provides an accurate prediction for the flow stress of TB17 titanium alloy during hot deformation and also offers a reference for the

establishment of high-precision constitutive models for other alloys.

Key words: TB17 titanium alloy; high-temperature deformation; microstructure; deformation mechanism; constitutive model

TB17(Ti-6.5Mo-2.5Cr-2Nb-1Sn-1Zr-4Al) 钛合金是我国新一代航空用近 β 型超强韧钛合金^[1-3]。该钛合金固溶时效处理后可获得优良的强度和韧性,用于制造强度要求较高的承力构件^[4-5]。一般来说,热加工是制造航空钛合金零件的主要成形方法^[6-7]。一方面,TB17 钛合金热变形后微观组织显著影响合金固溶时效组织演变和力学性能,因此热加工过程中合金热变形行为对该合金零件成形质量具有关键影响^[4,8];另一方面,材料本构方程是描述材料热变形过程中塑性流动的重要方式^[9],因而建立其高温变形流动应力本构模型,对钛合金的热加工工艺优化具有重要意义,也是钛合金零件成形过程有限元数值模拟的基础^[10-12]。目前,对于新型超强韧 TB17 钛合金,研究主要关注热处理对其组织和性能影响方面。信云鹏等^[13]研究 TB17 钛合金在 $\alpha+\beta$ 两相区固溶处理后的等温时效析出行为,结果表明,TB17 钛合金在 350 °C 等温时效时发生 $\beta\rightarrow\omega$ 相变, ω 相呈椭圆状,尺寸在 3~5 nm;在 450 °C 和 550 °C 等温时效过程中,主要发生 $\beta\rightarrow\alpha$ 相变。朱鸿昌等^[14]认为 TB17 钛合金在 β 相变形时发生动态回复(dynamic recovery, DRV)与动态再结晶(dynamic recrystallization, DRX)。对钛合金本构关系的研究,王俊等^[11]研究 TA5 钛合金基于 Z 参数修正的 Arrhenius 本构模型,其相关系数 R 为 0.993,平均绝对相对误差(average absolute relative error, AARE)为 4.43%,建立的本构模型较为精确。余传森等^[12]在传统双曲正弦函数型 Arrhenius 方程的基础上提出一种考虑应变速率、温度和应变耦合修正的双曲正弦本构方程,能够较准确地预测 Ti-6Al-4V 钛合金的流动应

力。张宇航等^[15]提出一种基于 AJSA-BP 神经网络的本构关系预测 TC4 钛合金高温流动应力,平均相对误差为 3.83%。然而,目前关于 TB17 钛合金高温变形组织演变和流动应力本构方程的研究仍十分有限,因此需要开展合金热变形组织演变研究并建立能够较精确反映合金高温塑性流动行为的本构模型。

本工作采用 Gleeble-3500 型热模拟试验机对新型超强韧 TB17 钛合金在变形温度 795~895 °C、应变速率 $10^{-3}\sim 1.0\text{ s}^{-1}$ 条件下进行热模拟压缩实验,分析合金高温变形组织演变及其塑性流动行为,建立合金流动应力本构模型,为 TB17 钛合金热加工工艺优化和有限元数值模拟提供参考和依据。

1 实验材料与方法

实验用原材料为经两相区锻造的 TB17 钛合金棒材,其化学成分如表 1 所示,微观组织如图 1(a)所示。合金 α/β 相转变温度约为 848 °C^[3]。将合金棒材进行固溶处理,热处理制度为 890 °C/30 min、水冷,热处理后微观组织如图 1(b)所示。可以看出,合金组织主要由等轴 β 晶粒组成。

将经固溶处理棒料切削加工成标准圆柱体试样,尺寸为 $\phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 。为获取合金高温变形

表 1 TB17 钛合金化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of TB17 titanium alloy (mass fraction/%)

Mo	Cr	V	Nb	Sn	Zr	Al	Ti
6.0-6.6	2.0-2.6	1.5-2.0	1.5-2.0	0.8-1.2	0.8-1.2	4.5-5.5	Bal.

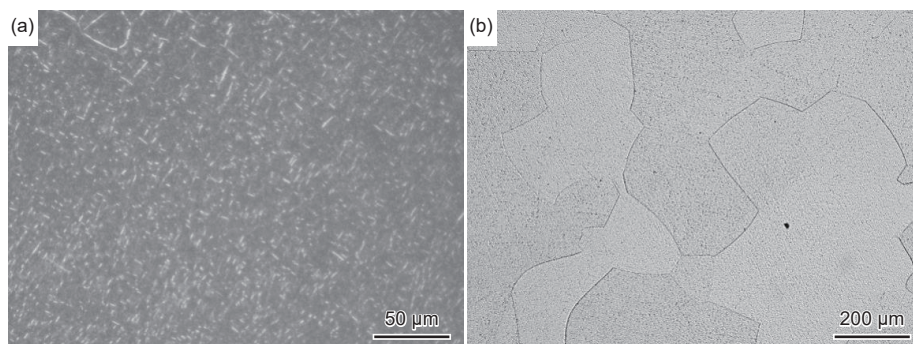


图 1 TB17 钛合金原始(a)和热处理后(b)微观组织

Fig. 1 Microstructures of TB17 titanium alloy in as-received (a) and heat-treated (b) conditions

流动应力和应变数据,将标准圆柱体试样进行不同变形温度和应变速率下的等温热模拟压缩实验。工程上, TB17 钛合金一般采取两种锻造温度: (1) 在 β 相变温度以上约 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 锻造, 后续时效过程析出大量次生 α 相, 可以获得超高强度力学性能; (2) 在 β 相变温度以下约 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 锻造, 获得一定数量初生 α 相, 结合后续时效析出次生 α 相, 可以保持高强度的同时, 增加塑性。因此, 本工作热压缩温度范围与通常工程上锻造温度范围一致, 为 $795\sim 895\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 $0.001\sim 1.0\text{ s}^{-1}$, 最大变形量为 $30\%\sim 70\%$ 。实验采用真空感应加热, 升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 保温时间为 150 s 。为了观察分析热变形组织, 将热变形后的试样沿中心纵向切开, 经镶嵌、打磨、抛光及腐蚀, 试样在 5% (体积分数, 下同) $\text{HF}+15\%\text{HNO}_3+80\%\text{H}_2\text{O}$ 混合溶液中进行腐蚀处理, 制成金相试样。采用 XJP-6A 光学显微分析系统观察合金变形组织。

2 实验结果与分析

2.1 热变形行为

图 2 为合金在不同热变形参数下真应力-真应

变曲线。可以看出, 热变形初期 (应变在较小区域), 随着应变增大, 流动应力快速达到峰值。继续变形, 应力缓慢降低, 最终趋于平稳, 在其他钛合金中也存在此类现象。金属材料在热变形过程中可发生动态回复和动态再结晶。动态回复对合金软化效果有限, 动态再结晶则可对合金进行有效软化。从应力-应变曲线形状特征来看, 变形后期流动应力随应变增加而轻微降低, 这说明合金热变形机制为部分动态再结晶, 以动态回复为主^[16-20]。从图 3 合金变形组织可以看出, 合金微观组织主要由原始变形晶粒和周围细小动态再结晶晶粒组成, 这进一步说明合金热变形过程中内部发生部分动态再结晶。

为了进一步分析合金热变形行为, 变形温度为 $895\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率为 0.001 s^{-1} 条件下合金变形至不同应变量的微观组织, 如图 4 所示。可以看出, 合金发生不完全动态再结晶。未变形时, 合金组织由等轴 β 晶粒组成, 晶界平直 (图 4(a))。当变形至应变为 0.36 时, 初始晶界变为锯齿状和弓弯。在晶界处可以看到少量微小的 DRX 晶粒 (图 4(b))。当应变增加到 0.51 时, 观察到更多新 DRX 晶粒, 初始晶界出现新的弓弯 (图 4(c))。这表明弓弯机

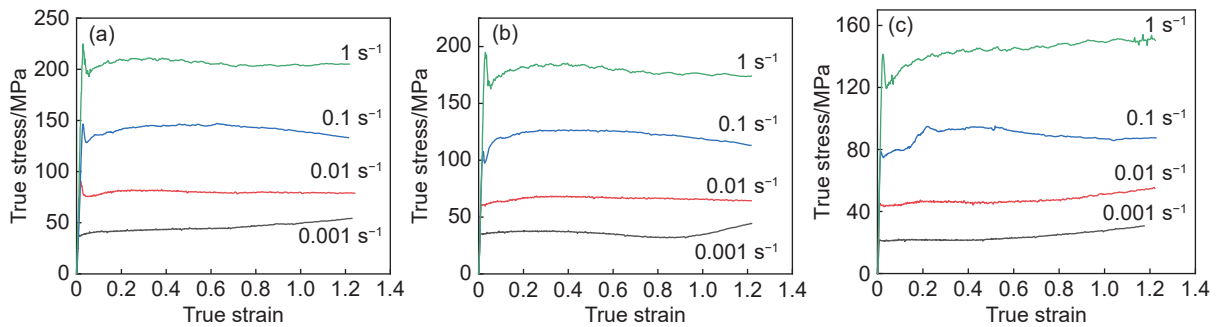


图 2 不同热变形温度下合金不同应变速率的真应力-真应变曲线 (a) $795\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $820\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $895\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 True stress-true strain curves of the alloy at different strain rates under various thermal deformation temperatures (a) $795\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $820\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $895\text{ }^{\circ}\text{C}$

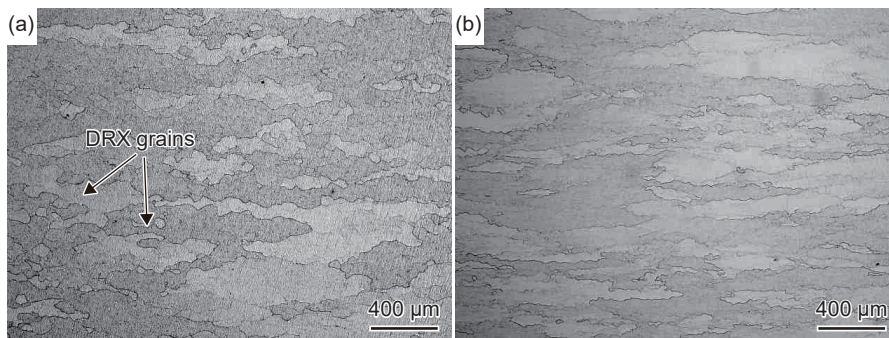


图 3 TB17 钛合金在热变形温度 $895\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率分别为 0.001 s^{-1} (a) 和 0.01 s^{-1} (b) 条件下微观组织

Fig. 3 Microstructures of TB17 titanium alloy at thermal deformation temperature of $895\text{ }^{\circ}\text{C}$ with strain rates of 0.001 s^{-1} (a) and 0.01 s^{-1} (b)

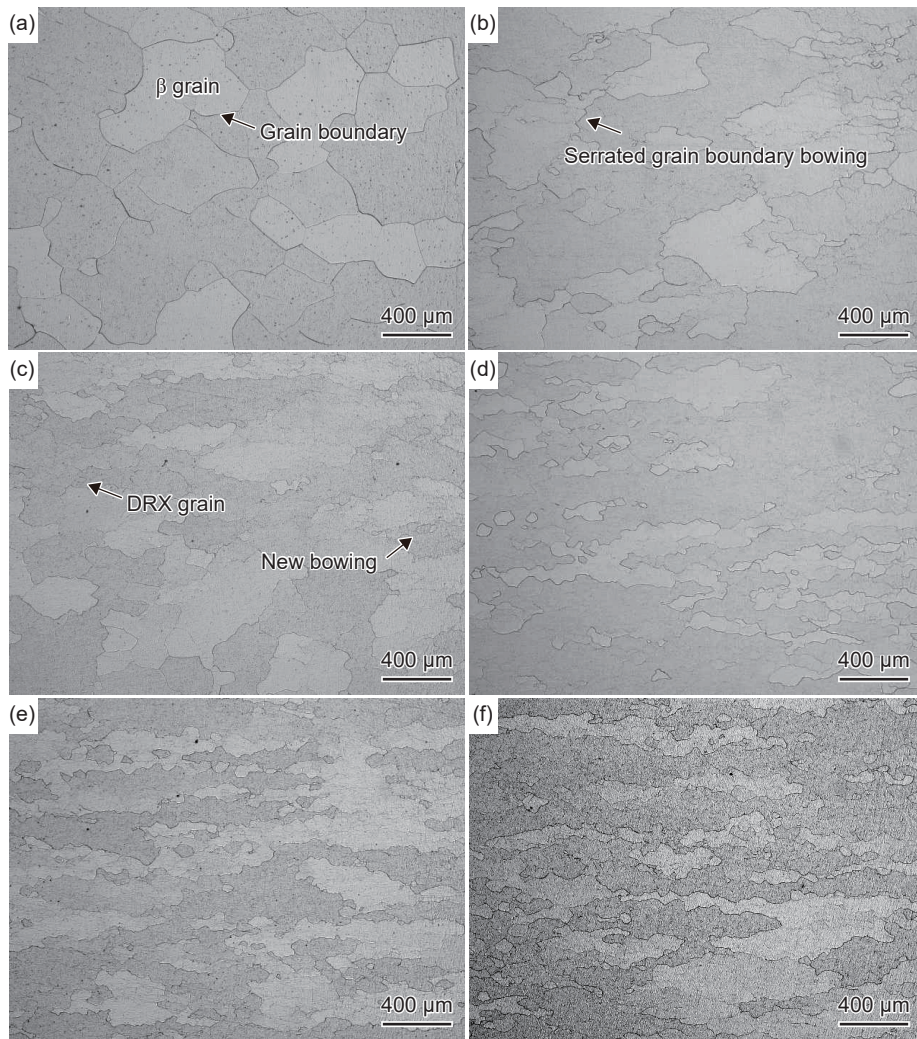


图4 变形温度为 895 °C、应变速率为 0.001 s⁻¹ 条件下合金变形至应变量为 0(a)、0.36(b)、0.51(c)、0.69(d)、0.92(e)和 1.2(f)的微观组织

Fig. 4 Microstructures of the alloy deformed to strains of 0 (a), 0.36 (b), 0.51 (c), 0.69 (d), 0.92 (e), and 1.2 (f) under the condition of deformation temperature of 895 °C and strain rate of 0.001 s⁻¹

制在新 DRX 晶粒的形成中起着重要作用^[21-22]。进一步增加应变至 0.92, 动态再结晶晶粒变得更加明显, 原始 β 晶界被新 DRX 晶粒代替, 从而形成“项链”状结构(图 4(e))。值得注意的是, 即使合金应变达到 1.2, DRX 体积分数仍然很小, DRX 体积分数不高于 40%。

2.2 本构模型构建

2.2.1 构建方法及参数确定

流动应力与变形温度、应变速率及应变变量密切相关。金属热变形是热激活过程, 因此 Sellars 等^[23] 提出包含变形激活能 Q 和温度 T 的 Arrhenius 本构方程, 表示为:

$$\dot{\epsilon} = A_1 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中: A_1 和 α 为与温度无关的常数; n 为应力指数; R 为气体常数, 其值为 8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹。当流动

应力较低($\alpha\sigma < 0.8$)时, 式(1)简化为:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

当流动应力较高($\alpha\sigma > 1.2$)时, 式(1)简化为:

$$\dot{\epsilon} = A_3 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

式中: n_1 、 A_2 、 A_3 和 β 均为与温度无关的常数, 且 $\beta = n_1\alpha$ 。Zener 和 Hollomon 提出包含变形温度 T 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的热加工参数 Z ^[23]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

结合式(1)和式(4)可得:

$$Z = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (5)$$

式中: A 为与温度无关的常数。对式(5)进行变换, 得到式(6):

$$\sigma = \ln \left\{ (Z/A)^{1/n} + [(Z/A)^{2/n} + 1]^{1/2} \right\} / \alpha \quad (6)$$

确定出材料参数 Z 、 A 、 n 和 α 后, 可以估算出相应的流动应力。

以应变 0.6 为例, 说明材料参数 Z 、 A 、 n 和 α 的确定过程。对式(2)和式(3)两边同时取对数并整理得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 - Q/RT + n_1 \ln \sigma \quad (7)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_3 - Q/RT + \beta \sigma \quad (8)$$

绘制出应变为 0.6 时 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 关系曲线, 分别如图 5(a)、(b) 所示。对 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 曲线进行线性拟合, 确定相应斜率, 从而得到 n_1 和 β 。可以看出, $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 均呈现出较好的线性关系。 n_1 和 β 的平均值分别为 4.0556 和 0.0474。根据关系式 $\beta = n_1 \alpha$, 确定相应的 α 值, 得到 β 、 n_1 和 α 值如表 2 所示。此时, β 、 n_1 和 α 平均值分别为 0.0474、4.0556 和 0.0118。

进一步对式(5)两边同时取对数得到:

$$Q/RT = \ln A - \ln \dot{\epsilon} + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] \quad (9)$$

绘制 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 关系曲线, 并进行线性拟合, 如图 5(c) 所示。可以看出, $\ln \dot{\epsilon}$ 与 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 呈现较好线性相关性。拟合直线斜率即为 n 值, n 的平均值为 2.9727。对式(9)求偏导并整理, 得到 Q 的表达式为:

$$Q = nR \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_{\dot{\epsilon}} \quad (10)$$

式中: $\left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_{\dot{\epsilon}} = M$, 得到:

$$Q = nRM \quad (11)$$

绘制应变 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \frac{1000}{T}$ 关系曲线 (图 5(d)), 并进行线性拟合, 即可确定出 M 。此时, M 的平均值为 8.3138。从而计算出变形激活能 Q , Q 值为 205.48 kJ/mol。对式(5)两边同时取对数, 得到:

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] \quad (12)$$

绘制 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 关系曲线, 并进行线性拟合, 如图 6 所示。线性拟合直线截距即为 $\ln A$ 。此时, $\ln A$ 值为 18.1422。

2.2.2 基于 Arrhenius 方程的本构模型构建

以上所述, α 、 n 、 Q 和 $\ln A$ 值确定后, 可以估算出合金应变为 0.6 时流动应力。但要估算全应变下流动应力, 需要确定其他应变下 α 、 n 、 Q 和 $\ln A$ 值。根据以上方法, 进一步确定应变在 0.05~1.2 范围内 α 、 n 、 Q 和 $\ln A$ 值, 如图 7 所示。为确定 α 、 n 、

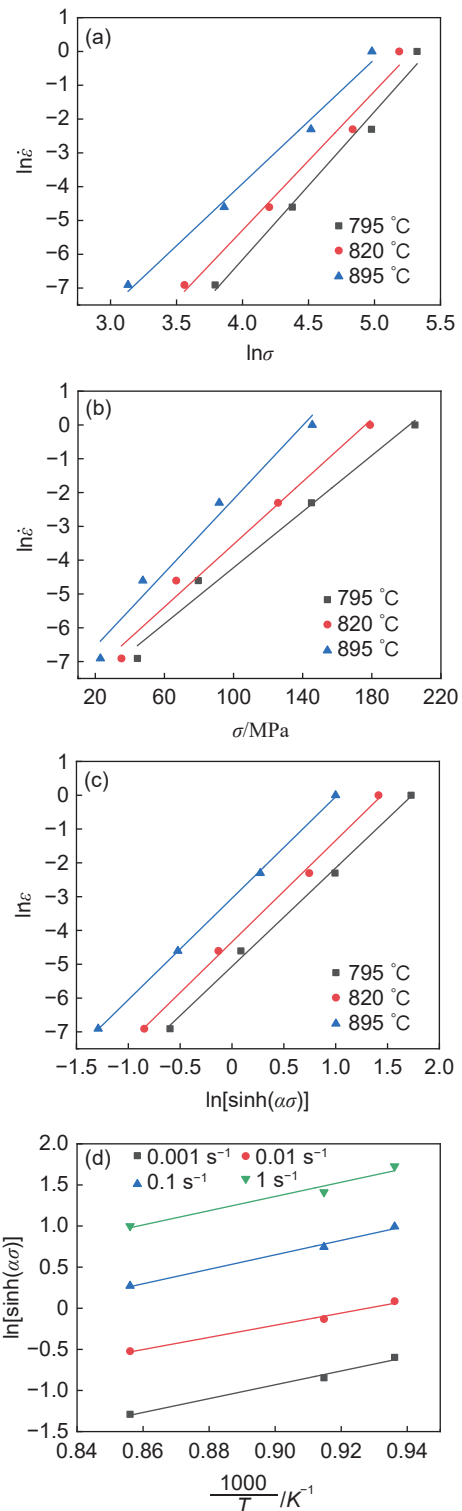


图 5 不同变形温度下 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ (a)、 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ (b) 和 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ (c) 以及不同应变速率下 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \frac{1000}{T}$ (d) 的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ (a), $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ (b), and $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ (c) at different deformation temperatures as well as $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \frac{1000}{T}$ (d) at different strain rates

Q 和 $\ln A$ 值与应变的函数关系, 对图 7 中 $\alpha - \epsilon$ 、 $n - \epsilon$ 、 $Q - \epsilon$ 、 $\ln A - \epsilon$ 进行非线性拟合, 获得相应的拟合方程,

表2 不同变形温度下 β 、 n_1 和 α 值
Table 2 Value of β , n_1 , and α at different deformation temperatures

$T/^\circ\text{C}$	β	n_1	α
795	0.0415	4.3778	0.0095
820	0.0463	4.1105	0.0113
895	0.0545	3.6786	0.0148

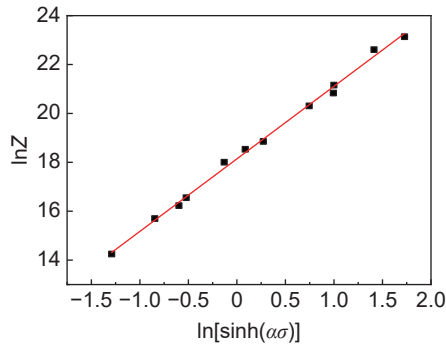


图6 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

分别如式(13)~(16)所示。

$$a = B_0 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 + B_4\varepsilon^4 + B_5\varepsilon^5 \quad (13)$$

$$n = C_0 + C_1\varepsilon + C_2\varepsilon^2 + C_3\varepsilon^3 + C_4\varepsilon^4 + C_5\varepsilon^5 \quad (14)$$

$$Q = D_0 + D_1\varepsilon + D_2\varepsilon^2 + D_3\varepsilon^3 + D_4\varepsilon^4 + D_5\varepsilon^5 \quad (15)$$

$$\ln A = E_0 + E_1\varepsilon + E_2\varepsilon^2 + E_3\varepsilon^3 + E_4\varepsilon^4 + E_5\varepsilon^5 \quad (16)$$

式中: $B_0 \sim B_5$ 、 $C_0 \sim C_5$ 、 $D_0 \sim D_5$ 和 $E_0 \sim E_5$ 均为拟合参数。结合式(6), 可以获得考虑全应变下 TB17 钛合金在变形温度为 795~895 $^\circ\text{C}$ 且应变速率为 0.001~1.0 s^{-1} 时高温变形本构模型, 如式(17)所示:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= \ln\left\{ (Z/A)^{1/n} + [(Z/A)^{2/n} + 1]^{1/2} \right\} / \alpha \\ \alpha &= 0.01345 - 0.01337\varepsilon + 0.03996\varepsilon^2 - 0.05230\varepsilon^3 + \\ &\quad 0.03012\varepsilon^4 - 0.00664\varepsilon^5 \\ n &= 3.1429 - 1.7165\varepsilon + 5.2443\varepsilon^2 - 7.7243\varepsilon^3 + \\ &\quad 5.6615\varepsilon^4 - 1.4034\varepsilon^5 \\ Q &= 251.27 - 214.28\varepsilon + 548.78\varepsilon^2 - 841.77\varepsilon^3 + \\ &\quad 625.78\varepsilon^4 - 172.19\varepsilon^5 \\ \ln A &= 23.131 - 23.352\varepsilon + 59.395\varepsilon^2 - 91.425\varepsilon^3 + \\ &\quad 69.075\varepsilon^4 - 19.338\varepsilon^5 \end{aligned} \right. \quad (17)$$

2.2.3 本构模型误差检验

根据式(17), 计算 TB17 钛合金在变形温度为 795~895 $^\circ\text{C}$ 且应变速率为 0.001~1.0 s^{-1} 条件下流动应力, 并与流动应力实验值对比, 如图8所示。可以看出, 流动应力模型计算值分布在实验值附近, 说明采用构建的本构模型对预测合金流动应力具有较高精度。

采用平均相对误差和相关系数分析构建的本构模型精度。平均相对误差 δ_{avg} 和相关系数 R 分别表示为^[24-25]:

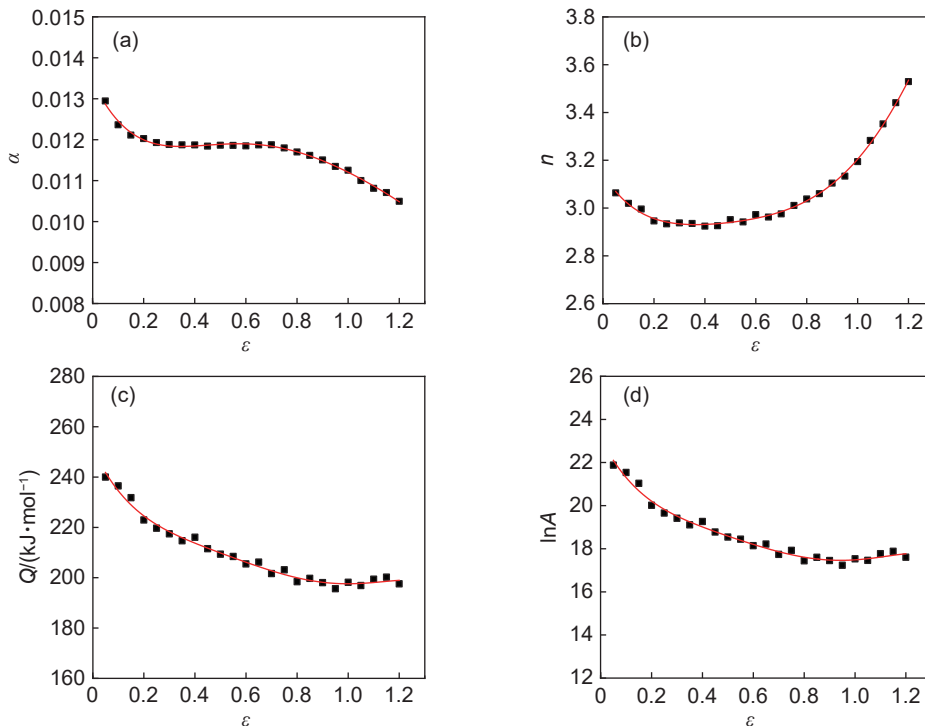


图7 ε 为 0.05~1.2 范围内 $\alpha-\varepsilon$ (a)、 $n-\varepsilon$ (b)、 $Q-\varepsilon$ (c) 和 $\ln A-\varepsilon$ (d) 拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of $\alpha-\varepsilon$ (a), $n-\varepsilon$ (b), $Q-\varepsilon$ (c), and $\ln A-\varepsilon$ (d) in the range of ε from 0.05 to 1.2

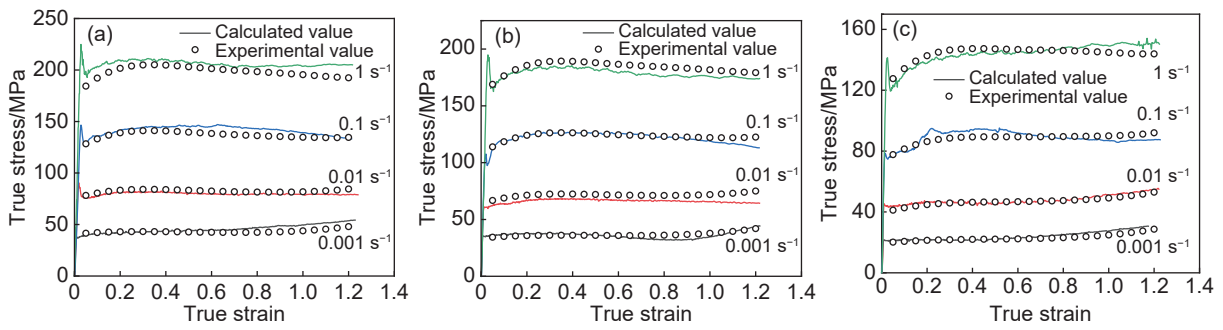


图 8 不同变形温度下流动应力计算值与实验值对比 (a)795 °C; (b)820 °C; (c)895 °C

Fig. 8 Comparison of calculated and experimental flow stress values at different deformation temperatures (a) 795 °C; (b) 820 °C; (c) 895 °C

$$\delta_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \quad (18)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (19)$$

式中: E_i 为实验值; P_i 为预测值; n 为样本个数; \bar{E} 、 \bar{P} 分别为 E_i 、 P_i 的平均值。图 9 为本构模型预测值与实验值的误差分析结果。可以看出, 大部分数据点都在 10% 偏差范围内, 占有数据点的 93.8%。平均相对误差 δ_{avg} 和相关系数 R 分别为 3.987% 和 0.9972, 这说明基于 Arrhenius 方程构建的本构模型可以很好地反映 TB17 合金高温变形过程中应力应变关系, 准确预测高温流动应力。

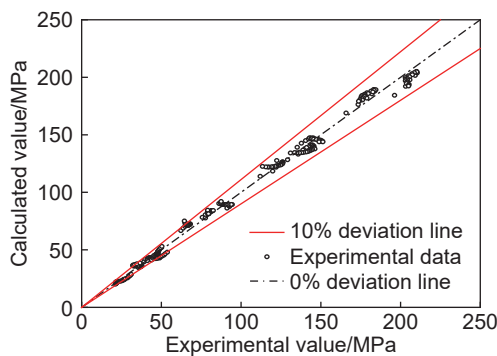


图 9 流动应力预测值与实验值的相关性

Fig. 9 Correlation between predicted and experimental flow stress values

进一步验证构建的本构模型预测流动应力的准确性, 采用式(17)计算变形温度 860 °C 且应变速率 0.1 s⁻¹ 条件下流动应力(本构模型构建参数确定未涉及该条件), 并与实验流动应力进行对比, 结果如图 10 所示。可以看出, 该条件下流动应力实验值与预测值相差较小, 这说明构建的本构模型预

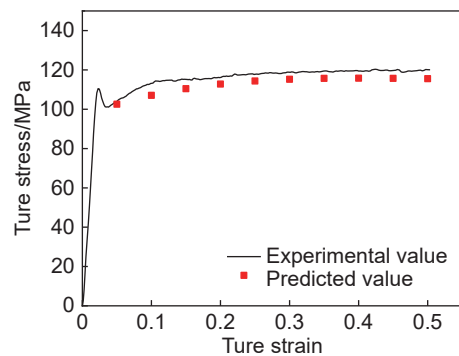


图 10 在变形温度 860 °C 且应变速率 0.1 s⁻¹ 条件下流动应力实验值与预测值对比

Fig. 10 Comparison of experimental and predicted flow stress values at deformation temperature of 860 °C and strain rate of 0.1 s⁻¹

测流动应力具有较高准确性。

3 结论

(1) 通过合金在不同热变形参数下真应力-真应变曲线, 可以看出, 合金流动应力随应变增加先快速增加, 后轻微降低, 最终趋于平稳。

(2) 研究变形温度为 895 °C、应变速率为 0.001 s⁻¹ 条件下合金变形至不同应变量的微观组织, 分析可知, 合金发生不完全动态再结晶, 弓弯机制对动态再结晶晶粒形成起着重要作用。

(3) 构建合金本构模型, 在变形温度为 795~895 °C, 应变速率为 0.001~1.0 s⁻¹ 条件下预测平均变形激活能为 205.48 kJ/mol。

(4) 构建的高温变形流动应力本构模型预测精度较高, 平均相对误差 δ_{avg} 和相关系数 R 分别为 3.987% 和 0.9972。

参考文献:

[1] 商国强, 张晓泳, 王新南, 等. 冷却速率对 TB17 钛合金

- 显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(6): 1758-1768.
- SHANG G Q, ZHANG X Y, WANG X N, et al. Effect of cooling rate on microstructure and properties of TB17 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(6): 1758-1768.
- [2] 商国强, 张晓泳, 王新南, 等. 显微组织对 TB17 钛合金高周疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(2): 529-536.
- SHANG G Q, ZHANG X Y, WANG X N, et al. Influence of microstructures on high cycle fatigue properties of TB17 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(2): 529-536.
- [3] 商国强, 张晓泳, 王新南, 等. 显微组织类型对 TB17 钛合金力学性能的影响[J]. 稀有金属, 2024, 48(2): 153-163.
- SHANG G Q, ZHANG X Y, WANG X N, et al. Mechanical properties of TB17 titanium alloy with different microstructures types[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2024, 48(2): 153-163.
- [4] 欧阳德来, 谢有美, 胡圣伟, 等. α 固溶对 TB17 钛合金初生 α 相、元素重分布及时效析出的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(2): 710-718.
- OUYANG D L, XIE Y M, HU S W, et al. Effect of subcritical β solution treatment on the primary α phase, element partitioning and aging precipitation of TB17 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(2): 710-718.
- [5] 信云鹏, 朱知寿, 王新南, 等. 应变率对 TB17 钛合金亚稳 β 晶粒变形机制的影响[J]. 材料工程, 2020, 48(12): 141-147.
- XIN Y P, ZHU Z S, WANG X N, et al. Effect of strain rate on deformation mechanism of metastable β grains in TB17 titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(12): 141-147.
- [6] 温飞娟, 温奇飞, 龙樟, 等. TC17 钛合金热变形行为及本构模型[J]. 机械工程材料, 2023, 47(8): 86-92.
- WEN F J, WEN Q F, LONG Z, et al. Hot deformation behavior and constitutive model of TC17 titanium alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47(8): 86-92.
- [7] 周璇, 王克鲁, 鲁世强, 等. Ti-22Al-26Nb-2Ta-0.5Y 合金热变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(10): 2295-2305.
- ZHOU X, WANG K L, LU S Q, et al. Hot deformation behavior of Ti-22Al-26Nb-2Ta-0.5Y alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(10): 2295-2305.
- [8] 罗军明, 朱鸿昌, 朱知寿, 等. TB17 钛合金在等温时效过程中的相析出行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(11): 3862-3870.
- LUO J M, ZHU H C, ZHU Z S, et al. Phase precipitation behavior of TB17 titanium alloy during isothermal aging process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(11): 3862-3870.
- [9] 孙岑花, 施文鹏, 王津, 等. 基于 Arrhenius 与机器学习的 TC21 钛合金本构模型研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(8): 102-110.
- SUN C H, SHI W P, WANG J, et al. Constitutive model of TC21 titanium alloy based on Arrhenius equation and machine learning[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(8): 102-110.
- [10] 李聪, 丁智力, 陈荐, 等. Ti-10V-2Cr-3Al 钛合金的高温压缩变形行为及本构关系[J]. 机械工程材料, 2022, 46(9): 96-105.
- LI C, DING Z L, CHEN J, et al. High temperature compression deformation behavior and constitutive relationship of Ti-10V-2Cr-3Al titanium alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46(9): 96-105.
- [11] 王俊, 王克鲁, 鲁世强, 等. TA5 钛合金热变形行为及本构模型[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(5): 153-160.
- WANG J, WANG K L, LU S Q, et al. Hot deformation behavior and constitutive model of TA5 titanium alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(5): 153-160.
- [12] 余传森, 刘晓波. Ti-6Al-4V 热变形行为及利用多项耦合进行本构关系修正[J]. 失效分析与预防, 2022, 17(2): 102-108.
- YU C S, LIU X B. Hot deformation behavior and constitutive relations of titanium alloy Ti-6Al-4V and modified by multinomial coupling[J]. Failure Analysis and Prevention, 2022, 17(2): 102-108.
- [13] 信云鹏, 朱知寿, 王新南, 等. TB17 钛合金两相区等温时效析出行为研究[J]. 钛工业进展, 2020, 37(3): 10-14.
- XIN Y P, ZHU Z S, WANG X N, et al. Study on isothermal aging precipitation behavior of TB17 titanium alloy in $\alpha+\beta$ region[J]. Titanium Industry Progress, 2020, 37(3): 10-14.
- [14] 朱鸿昌, 罗军明, 朱知寿. TB17 钛合金 β 相区动态再结晶行为及转变机理[J]. 材料工程, 2020, 48(2): 108-113.
- ZHU H C, LUO J M, ZHU Z S. Dynamic recrystallization behavior and transformation mechanism in β -phase region of TB17 titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(2): 108-113.
- [15] 张宇航, 帅美荣, 周路. 基于 AJSA-BP 修正神经网络的 TC4 钛合金本构关系构建[J]. 重型机械, 2023(5): 45-52.
- ZHANG Y H, SHUAI M R, ZHOU L. A constitutive

- relationship based on AJSA-BP modified neural networks for TC4 alloy[J]. *Heavy Machinery*, 2023(5): 45-52.
- [16] 周晓锋, 付文, 利成宁, 等. 热变形参数对 Ti80 钛合金 $\alpha+\beta$ 两相组织演变的影响[J]. *热加工工艺*, 2023, 52(19): 77-81.
ZHOU X F, FU W, LI C N, et al. Effect of hot deformation parameters on evolution of $\alpha+\beta$ two-phase structure of Ti80 titanium alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2023, 52(19): 77-81.
- [17] 周珍妮, 艾宇浩, 刘会群, 等. 一种石油钻杆用 TC4S 钛合金热变形组织演变规律研究[J]. *石油管材与仪器*, 2023, 9(4): 27-31.
ZHOU Z N, AI Y H, LIU H Q, et al. Microstructure evolution of TC4S titanium alloy used for oil drill pipe during hot deformation[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2023, 9(4): 27-31.
- [18] 刘凯华, 唐斌, 刘运玺, 等. Ti-575 钛合金热变形行为及微观组织演变[J]. *铸造技术*, 2023, 44(10): 909-916.
LIU K H, TANG B, LIU Y X, et al. Thermal deformation behavior and microstructure evolution of Ti-575 titanium alloy[J]. *Foundry Technology*, 2023, 44(10): 909-916.
- [19] 尹宝琴, 徐帅, 肖纳敏, 等. Ti60 近 α 钛合金的热变形行为和组织演化[J]. *塑性工程学报*, 2022, 29(8): 193-202.
YIN B Q, XU S, XIAO N M, et al. Thermal deformation behavior and microstructure evolution of near α Ti60 titanium alloy[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2022, 29(8): 193-202.
- [20] 刘莹莹, 李嘉懿, 郭文虎, 等. 细晶 TC4 钛合金的动态再结晶行为及数值模拟[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(11): 4137-4145.
LIU Y Y, LI J Y, GUO W H, et al. Dynamic recrystallization behavior and numerical simulation of fine grain TC4 titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(11): 4137-4145.
- [21] OUYANG D L, WANG K L, CUI X. Dynamic recrystallization of Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V in β forging process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(4): 761-767.
- [22] 欧阳德来, 鲁世强, 崔霞, 等. TA15 钛合金 β 热变形中的动态再结晶形核[J]. *材料热处理学报*, 2009, 30(6): 116-120.
OUYANG D L, LU S Q, CUI X, et al. Nucleation of dynamic recrystallization of titanium alloy TA15 during hot deformation process in β field[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2009, 30(6): 116-120.
- [23] SELLARS C M, MCTEGART W J. On the mechanism of hot deformation[J]. *Acta Metallurgica*, 1966, 14(9): 1136-1138.
- [24] 全泽鑫, 王朝辉, 杜文博, 等. B30 铜镍合金的高温热变形行为及加工图[J]. *材料工程*, 2023, 51(7): 215-226.
QUAN Z X, WANG Z H, DU W B, et al. Hot deformation behavior and processing map of B30 copper-nickel alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(7): 215-226.
- [25] 张浩强, 蔡柳, 姜炳春, 等. 考虑应变的 GH4065 高温合金变参数本构模型构建[J]. *航空材料学报*, 2025, 45(6): 118-126.
ZHANG H Q, CAI L, JIANG B C, et al. Variable-parameter constitutive model construction of GH4065 superalloy by considering strain[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2025, 45(6): 118-126.

收稿日期: 2024-11-06; 录用日期: 2024-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52561013); 江西省自然科学基金项目(20242BAB25216)

通讯作者: 欧阳德来(1977—), 男, 博士, 教授, 研究方向为航空钛合金组织性能调控, 联系地址: 江西省南昌市南昌航空大学前湖校区材料科学与工程学院(330063), E-mail: ouyangdelai@163.com

(本文责编: 陈 卉)