

TC4钛合金电辅助拉伸行为及本构模型

李萍, 刘少枫, 虞仁海, 刘柏松, 刘乐, 薛克敏

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 对TC4钛合金进行了高温及电辅助拉伸实验, 其中变形温度为600~900 °C, 电流密度为14~22 A/mm²。探究了温度及电流密度对合金流动应力的影响规律。结果表明, 在热拉伸过程中材料的流动应力随着温度的升高而降低, 延伸率与温度呈正相关。当施加脉冲电流后材料流动应力下降, 延伸率随电流密度的升高表现为先升后降的变化趋势。最后基于拉伸真应力-真应变数据, 在初始Johnson-Cook模型框架的基础上, 构建了耦合热效应与非热效应的多物理场本构模型, 采用回归拟合的方法确定了本构模型参数, 并将实验值与预测值进行误差分析。结果表明, 本构模型的确定系数 $R^2 \geq 0.95$, 平均相对误差MRE<2.5%, 在宽域工艺参数范围内具有较好预测能力。本研究旨在为钛合金的电辅助成形提供理论依据, 并为优化成形工艺参数提供参考。

关键词: TC4钛合金; 脉冲电流; 电致塑性效应; 本构模型

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)11-2812-07

1 引言

TC4钛合金是一种典型的 $\alpha+\beta$ 双相钛合金, 具有高比强度、高比刚度、优异的耐腐蚀性能、长使用寿命和低密度等特性^[1-2]。其产量占钛合金总产量的50%以上, 在工业制造领域具有重要价值^[3-4]。在室温条件下, TC4钛合金的主导 α 相呈现密排六方结构(hcp), 其晶体结构中包含基面滑移系、棱柱滑移系和锥面滑移系。由于hcp结构的限制, TC4钛合金在常温下的塑性变形能力较差, 易发生回弹和开裂现象, 因此需要通过升温来改善其塑性。传统热加工方法存在表面质量不佳、制造周期冗长及生产效率低下等问题, 而基于电致塑性效应的电流辅助成形技术的提出为解决这些问题提供了新的途径^[5]。

电致塑性效应最早由Troitskii等^[6]学者发现, 是指材料在电场或外加电流的刺激下发生塑性提高、变形抗力下降的现象。瞬时高能的脉冲电流可以降低晶界能量, 加速晶界滑移, 促进位错运动, 从而显著降低合金的变形抗力, 提高材料的力学性能^[7]。这一效应在TC4钛合金加工领域也得到了实验验证。徐佳俊^[8]开展了TC4板材电辅助V形弯曲实验。结果表明, 随着有效电流密度的增加, V形件的回弹角和成形力逐渐减小。周岩^[9]研究了TC4钛合金电辅助拉拔变形行为。结果表明, 高能电流可以促进位错滑移, 降低拉拔力, 抑制拉拔过程中的加工硬化, 提高材料的变形能力。叶苏苏等^[10]进行了TC4钛

合金单向压缩试验。结果表明, 电流能够促进动态再结晶和相变, 进而降低流变应力, 提高材料塑性。

为了更好地研究脉冲电流对材料力学性能的影响, 进而分析其塑性变形行为及优化成形工艺参数, 需要联系脉冲电流与应力应变之间的关系, 建立宏观的数学模型。而电致塑性本构模型能够描述金属材料在温度场、电场和应力场三场耦合作用下应力-应变关系, 具有重要应用意义。Roh等^[11]提出单位时间、单位体积内输入的电能量, 即电能量密度的概念, 为评价电流效应提供了更合理的指标。Li等^[12]考虑预应变诱发位错增殖, 提出了电塑性能量密度概念, 揭示了在电加载条件下电致应力软化量与电塑性能量密度的线性关系, 为电辅助本构建模提供了新思路。彭书华^[13]基于电致塑性效应理论, 提出了H-V复合模型, 实现了对纯铝和纯钛在脉冲电流拉伸过程中应力-应变行为的精确模拟。刘斌等^[14]针对Ti6554钛合金材料, 建立了电辅助压缩的本构模型, 其最大相对误差小于7%, 能够准确预测材料在不同脉冲电流参数下的流动应力。

本工作系统地研究了脉冲电流对TC4钛合金力学性能的影响。通过开展高温及电辅助条件下的对比拉伸实验, 揭示了电流密度对材料流动应力的影响规律, 据此建立了耦合温度场与脉冲电流参数的电致塑性本构模型, 并通过实验数据验证了模型的可靠性。

收稿日期: 2025-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(U23B20100, 52375330)

作者简介: 李萍, 女, 1973年生, 博士, 教授, 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009, 电话: 0551-62901368, E-mail: li_ping@hfut.edu.cn

2 实验

实验采用的材料是西部钛业生产的热轧制 TC4 钛合金板材,板厚为 1 mm,其化学成分如表 1 所示。

高温拉伸实验在 Shimadzu 电子式 AGS-X 万能试验机上进行,拉伸实验变形温度为 600~900 ℃,实验装置的示意图如图 1a 所示,采用的试样尺寸如图 1b 所示。

电辅助拉伸实验中电源采用 10 kA/150 V 脉冲电源,在 WDW-100H 电子万能试验机上进行拉伸,变形电流密度为 14~22 A/mm²,实验装置示意图如图 2a 所示。设计的电辅助拉伸试样形状如图 2b 所示,试样标距段尺寸为 32 mm×6 mm,为了接入电极,在试样的两头设计了一个尺寸为 15 mm×15 mm 的电极夹持段。为了将电流约束在电极夹头和试样部分,在拉伸试验机和夹具中间设计了绝缘陶瓷,以保证拉伸过程中的绝缘性,实验过程中采用 Fluke TiX660 红外热成像仪对温度进行监测。实验中不考虑占空比以及频率大小的影响,因此固定占空比为 5%、固定频率 500 Hz,所有拉伸实验的应变速率为 0.01 s⁻¹。

图 3a 是不同电流密度下拉伸过程中试样的温度变化曲线。随着电流的输入,温度持续升高,直到电流产生的热量与材料向外界散失的热量达到了动态平衡;此时温度达到了一个稳定值,上下波动较小。图 3b 为电流密度为 16 A/mm² 的试样断裂前某刻温度分布图。由图 3b 可知,试样标距内的温度梯度很小,温度整体分布较为均匀。

3 结果与分析

图 4a 是 TC4 钛合金在高温拉伸条件下不同温度对应的真应力-真应变曲线。由图可知,TC4 钛合金的抗拉强度随着温度的升高而降低,材料的延伸率也与温度呈正相关。温度从 600 ℃ 升高至 750 ℃ 时,抗拉强度从

表 1 TC4 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy (wt%)						
Al	V	Fe	C	H	O	Ti
5.994	4.102	0.129	0.005	0.008	0.038	Bal.

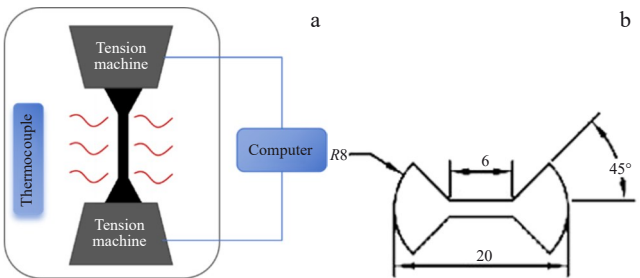


图 1 高温拉伸实验装置示意图及试样尺寸
Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup during the high temperature tensile (a); size of the specimen (b)

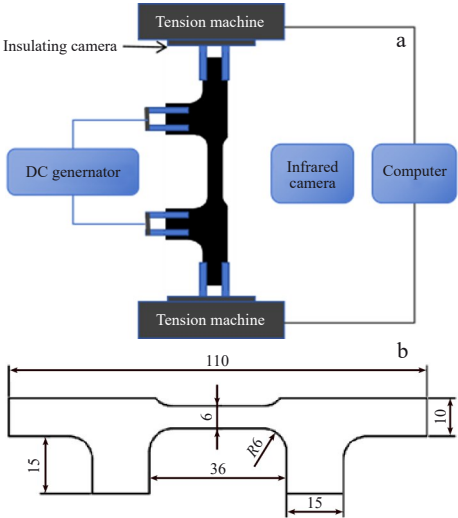


图 2 电辅助拉伸实验装置示意图及试样尺寸
Fig.2 Schematic diagram of the electro-assisted tensile experiment setup (a); size of the specimen (b)

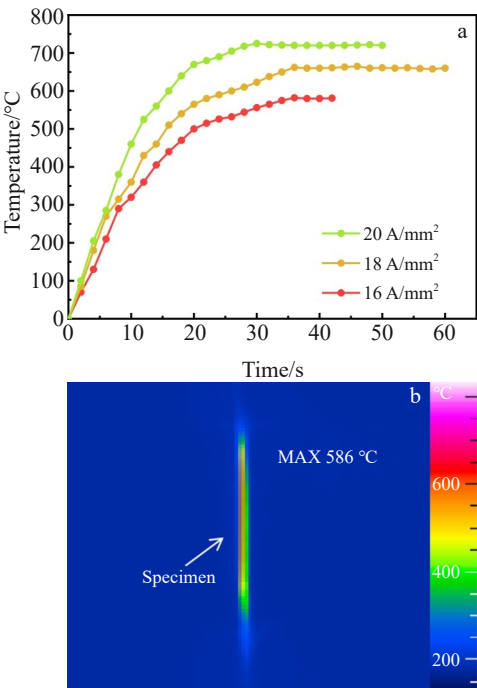


图 3 温度随时间变化曲线及试样温度分布
Fig.3 Variations of temperature with time (a); temperature distribution of the specimen (b)

542.4 MPa 降低至 204.6 MPa,降幅达 60.98%;延伸率由 23.7% 升高至 55.6%。图 4b 为 TC4 钛合金在恒定占空比、脉冲频率和应变速率条件下不同电流密度的真应力-真应变曲线。实验结果表明,材料的流动应力与电流密度呈显著负相关:当电流密度从 14 A/mm² 提升至 22 A/mm² 时,温度由 495 ℃ 升高至 775 ℃,抗拉强度由 788.6 MPa 降低至 67.7 MPa,较室温条件下分别降低了 25.5% 和 93.6%。值得注意的是,延伸率并非随电流密度的增大

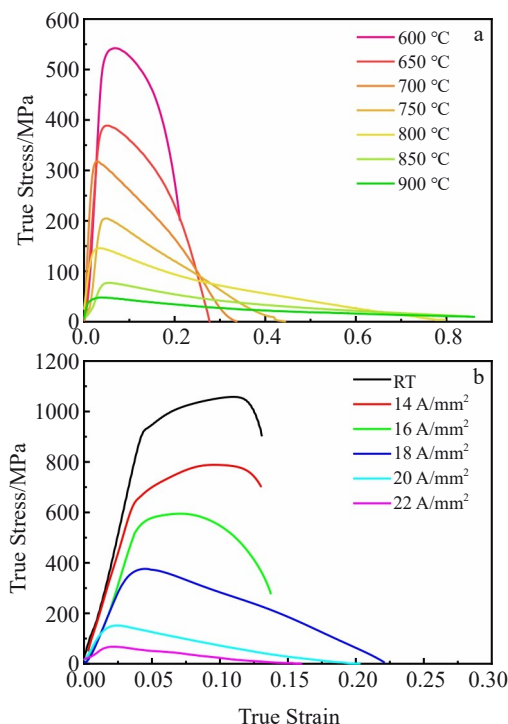


图4 不同实验条件TC4钛合金拉伸真应力-真应变曲线

Fig.4 True stress-true strain curves of TC4 titanium alloy during tension under different conditions: (a) temperature and (b) current density

而提升,具体表现为先升后降的变化趋势,并在电流密度为18 A/mm²时达到峰值24.5%。此外在Huang等^[15]的研究中也发现了类似现象,可能的原因是:随着电流密度的不断增大,焦耳热积累导致材料局部过热引发严重缩颈;使得局部电流过度集中加速了材料的失效进程,进而材料提前断裂,造成延伸率的下降。

图5是相同温度下电辅助及纯热拉伸真应力-真应变对比曲线。从图5中可以得到:在初始变形阶段,应力先随着应变的累积而迅速增加,在达到屈服点之后,应力开始缓慢增加。随着温度的提升,合金的流动应力明显

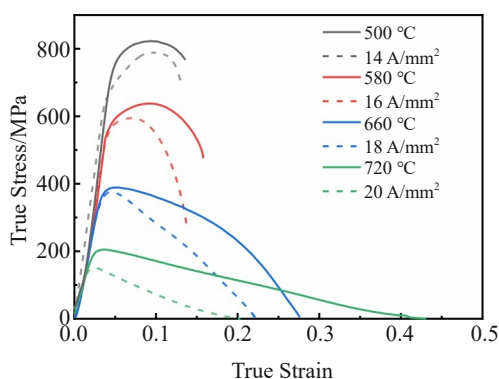


图5 相同温度下电辅助及纯热拉伸TC4钛合金真应力-真应变曲线
Fig.5 True stress-true strain curves of TC4 titanium alloy after electro-assisted tension and pure thermal tension at the same temperature

下降,并且在相同的温度条件下,电辅助拉伸试样相对纯热拉伸试样表现出了更低的流动应力,当电流密度由14 A/mm²增至20 A/mm²时,与相应500和720 °C下的抗拉强度相比分别降低4.3%、26.1%。这一现象说明,脉冲电流降低材料流动应力的作用机制主要源于2个物理效应:焦耳热效应引发的热软化效应和电致塑性效应^[16],随着电流密度的增大,电致塑性效应的作用效果也随之增强。

应变速率敏感指数 m 既代表应变速率变化时材料的强化倾向,也是衡量金属材料塑性变形能力的重要参数。为探究电流对应变速率敏感性的影响,在580 °C下,分别采用纯热及电辅助加热方式,进行了应变速率为0.001、0.01及0.1 s⁻¹的拉伸实验。结果如图6所示,ln σ -ln $\dot{\epsilon}$ 拟合直线的斜率即为 m 值。由图6可知,电辅助处理使合金的 m 值从0.101 65升高到0.123 36,增幅达21.4%,进一步证明了电致塑性效应对材料的软化作用。

图7是不同拉伸条件下的微观组织。如图7a所示,TC4钛合金的初始组织是由大部分等轴 α 相、少量长条状 α 相、以及分布 α 相晶界处的 β 相组成。如图7b所示,580 °C纯热拉伸的显微组织与初始组织相比变化不大,主要是由等轴和沿着拉伸方向被拉长的 α 相和 β 相组成。如图7c所示,16 A/mm²通电拉伸的显微组织中 α 晶界开始向其内部延伸,将初始组织中的长条状晶粒分割成大量细小晶粒, α 晶粒逐渐趋于等轴化,导致材料的变形抗力下降。

4 电致塑性本构模型的建立

基于高温及电辅助拉伸实验,根据焦耳热效应和电致塑性效应对材料力学性能的影响规律,建立唯象的电致塑性本构模型。该本构模型根据基础的Johnson-Cook (JC)模型加入热软化函数建立高温本构模型,再添加纯电致塑性影响函数来考虑电致塑性效应,可表示为:

$$\sigma^E = g(j, f, d) \cdot h(T) \cdot f(\epsilon_p) \quad (1)$$

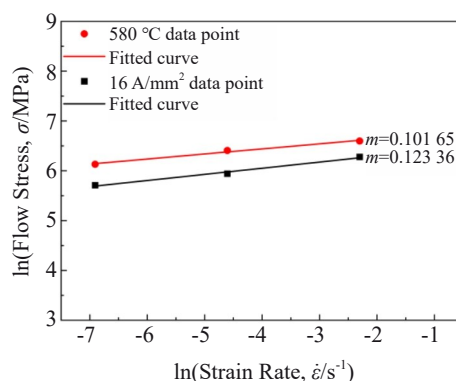


图6 温度580 °C、应变0.1时TC4钛合金流动应力与应变速率的关系
Fig.6 Relationships between flow stress and strain rate of TC4 titanium alloy at 580 °C under the strain of 0.1

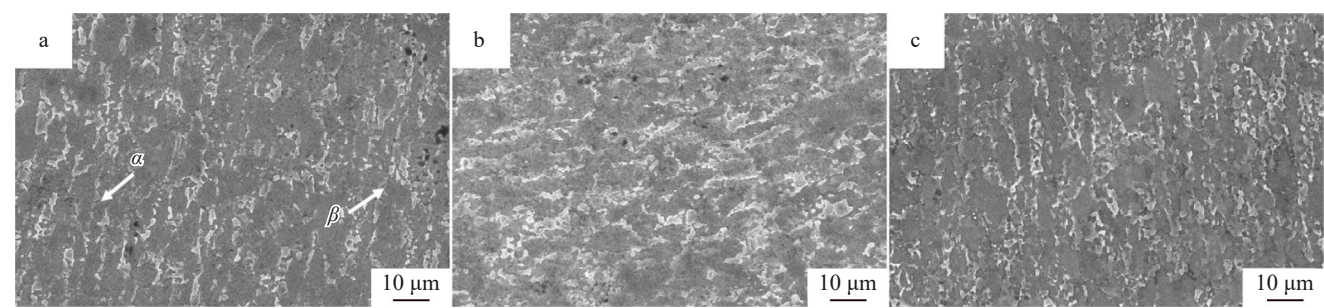


图7 不同拉伸条件下TC4钛合金的微观组织

Fig.7 Microstructures of TC4 titanium alloy under different tensile conditions: (a) as-received state; (b) pure thermal tension at 660 °C; (c) electro-assisted tension at the current density of 16 A/mm²

式中, σ^E 为通电拉伸条件下的流动应力(MPa), $g(j, f, d)$ 为纯电致塑性影响函数, j 为电流密度, f 为频率, d 为占空比, $h(T)$ 为热软化函数, T 为试样温度, $f(\epsilon_p)$ 为室温下材料本构模型, ϵ_p 为真塑性应变。

4.1 TC4钛合金高温本构建模

JC 模型是由 Johnson-Gordon 和 Cook-William 于 1983 年提出的经验本构模型^[17], 它考虑了应变、应变速率和温度对变形过程的影响, 具有工程适用性广、拟合扩展性高、参数易获取等优点, 被广泛应用于材料动态力学行为的描述。经典的 JC 模型表达如下:

$$\sigma = \left(A + B\epsilon_p^n \right) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right]^m \quad (2)$$

$$\dot{T} = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (3)$$

式中, A 、 B 、 n 、 C 、 m 为材料常数, σ 为材料的流动应力(MPa), A 为参考温度和应变速率下的初始屈服应力(MPa), B 为应变强化系数, n 为应变硬化指数; C 为材料的应变率强化系数, m 为材料的热软化指数, 一般通过逐步拟合获得, ϵ_p 为等效塑性应变(mm/mm), $\dot{\epsilon}$ 为应变速率(s^{-1}), $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变速率(s^{-1}), T 为试验温度($^{\circ}C$), T_r 为参考温度($^{\circ}C$), 取 25 $^{\circ}C$, T_m 为 TC4 钛合金的熔点温度, 取 1660 $^{\circ}C$ ^[18]。

由于本工作只研究了固定的应变速率(0.01 s^{-1})下 TC4 合金脉冲电流辅助拉伸行为, 因此 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0$ 。则式(2)可以写为式(4)的形式; 当等效塑性应变 $\epsilon_p = 0$ 时, 此时 JC 模型表达式为式(5); 对式(5)两侧取对数, 得到式(6)。

$$\sigma = \left(A + B\epsilon_p^n \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right]^m \quad (4)$$

$$\sigma = A \left(1 - \dot{T} \right) \quad (5)$$

表2 JC模型的拟合参数值

Table 2 Fitted parameter values of JC model

Parameter	A	B	m	n
Fitted value	890	618.8	0.4687	0.7562

$$\ln \left(1 - \frac{\sigma}{A} \right) = m \ln \dot{T} \quad (6)$$

结合对不同温度条件下的真应力-真应变曲线, 并利用软件进行拟合, 得到各参数值如表 2 所示。此时 JC 模型表达式如式(7):

$$\sigma = \left(890 + 618.8\epsilon_p^{0.4683} \right) \left(1 - \dot{T}^{0.7652} \right) \quad (7)$$

采用式(7)对 25~900 $^{\circ}C$ 的等温拉伸数据进行拟合, 结果表明仅 25 $^{\circ}C$ 的拟合结果与实际数据拟合效果较好, 需要对其进行进一步的修正以获得更准确的拟合结果。

Magargee 等^[19]在对纯钛板进行了单轴拉伸实验以解耦热-力和可能存在的电致塑性行为时, 给出了采用指数形式的热软化函数 $f(\dot{T})$ 的定义, 以充分表征在广泛的应力和温度范围内的塑性变形行为。 $f(\dot{T})$ 可表示为式(8):

$$f(\dot{T}) = \alpha \exp(\beta \dot{T}) \quad (8)$$

Gao^[20]等人提出了修改的 JC 模型, 精准预测了低应变速率下 TC4 合金板材的高温流动行为, 结合他们的研究成果, 对式(9)进行修正, 修正后的 JC 模型可写为式(10), 此时式(2)可改写为式(10):

$$\sigma = \left(A + B\epsilon_p^n \right) \cdot \alpha \exp(\beta \dot{T}) \quad (9)$$

$$\sigma = \left(A_1 + B_1\epsilon_p + C_1\epsilon_p^2 \right) \cdot \alpha \exp(\beta \dot{T}) \quad (10)$$

式中, A_1 、 B_1 、 C_1 、 α 和 β 为材料常数。

在室温时, $\dot{T} = 0$, 此时函数 $f(\dot{T}) = 1$, 因此可忽略温度软化效应的影响。通过式(10)进行拟合求得参数 A_1 、 B_1 、 C_1 的值, 从而得到室温下的本构模型。图 8 为拟合结果, 求得 $A_1=907.68$, $B_1=4827.92$, $C_1=-40\,041.43$ 。

通过拟合高温拉伸数据获得的 α 和 β 值分别为 0.014 05 和 5.68。综上, 构建的 TC4 钛合金高温本构模型为式(11), 其拟合结果如图 9 所示。

$$\sigma = \left(907.7 + 4827.9\epsilon_p - 40041.4\epsilon_p^2 \right) \cdot 0.01405 \exp \left(5.68 \times \frac{1660 - T}{1635} \right) \quad (11)$$

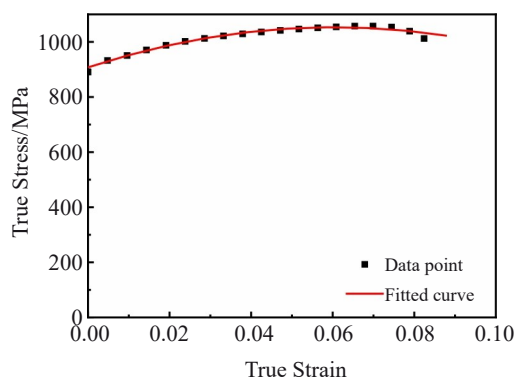


图8 室温曲线拟合结果

Fig.8 Fitted curve at room temperature

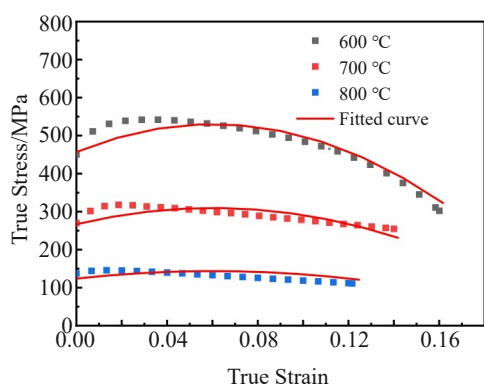


图9 高温本构模型拟合结果

Fig.9 Fitted results of high-temperature constitutive model

4.2 TC4钛合金电辅助本构建模

相关研究表明^[21-22],脉冲电流的占空比不对电致塑性效应产生影响,而本研究中电流的脉冲频率是固定的,因此纯电致塑性效应仅由脉冲电流的密度决定,影响函数 $g(j, f, d)$ 可表示为式(12):

$$g(j, f, d) = g(j) \quad (12)$$

Molotskii 等^[23]认为电致塑性效应的机制是:电流产生的磁场作用于自旋相关位错,促使其脱离顺磁性障碍。他们由此提出了电流密度对有效应力的影响规律,如式(13)所示:

$$\sigma(j) = \sigma(0) \cdot \left(1 - \frac{j^2}{j_0^2 + j^2}\right) \quad (13)$$

式中, $\sigma(j)$ 为施加电流时的有效应力(MPa), $\sigma(0)$ 为无电流时的有效应力(MPa), j 为电流密度(A/mm²), j_0 是与温度相关的材料参数,可写成 $j_0(T)$ 的形式,因此获得纯电致塑性效应影响函数 $g(j)$ 为:

$$g(j) = 1 - \frac{j^2}{j_0^2(T) + j^2} \quad (14)$$

表3为拟合电辅助拉伸数据获得的不同温度下 $j_0^2(T)$ 值。为探究温度对 $j_0^2(T)$ 的影响规律,需对 $j_0^2(T)-T$

表3 不同电流密度对应温度下的 $j_0^2(T)$ 值Table 3 Values of $j_0^2(T)$ at temperatures corresponding to different current densities

Current density/A·mm ⁻²	Temperature/°C	$j_0^2(T)$
14	500	10776.72
16	580	7936.23
18	660	2823.56
20	720	2112.12

再次进行拟合,其结果如图10所示。得到 $j_0^2(T)$ 的表达式如式(15):

$$j_0^2(T) = 61232.12 - 113.15T + 0.00944T^2 - 0.000594T^3 \quad (15)$$

此时,TC4钛合金电致塑性本构模型为:

$$\sigma = \left(A_1 + B_1 \varepsilon_p^{k_j} + C_1 \varepsilon_p^{2k_j} \right) \cdot \alpha \exp(\beta \dot{T}) \cdot \left(1 - \frac{j^2}{j_0^2(T) + j^2} \right) \quad (16)$$

式中, k_j 是与电流密度相关的材料参数,拟合得:

$$k_j = 1 - 0.1407j \quad (17)$$

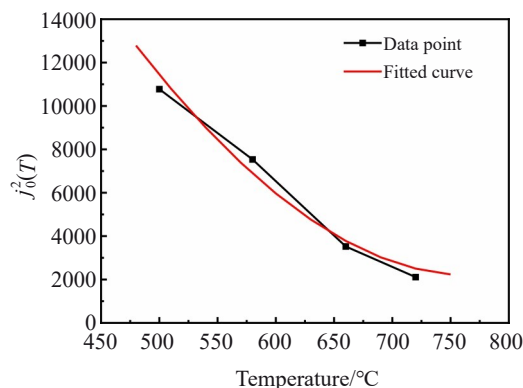
综上,电辅助条件下TC4钛合金的本构模型为:

$$\sigma = \left(907.7 + 4827.9 \varepsilon_p^{1-0.1407j} - 40041.4 \varepsilon_p^{2(1-0.1407j)} \right) \cdot 0.01405 \exp \left(5.68 \times \frac{1660 - T}{1635} \right) \cdot \left(1 - \frac{j^2}{61232.12 - 113.15T + 0.00944T^2 - 0.000594T^3 + j^2} \right) \quad (18)$$

4.3 本构模型误差分析

为检验本构模型的可靠性,开展了电流密度为17、19、21 A/mm²的3组电辅助拉伸实验,对应温度为605、685、755 °C,本构模型的拟合结果如图11所示。

本构模型的拟合误差通过确定系数(coefficient of determination, R^2)和平均相对误差(mean relative error, MRE)量化分析, R^2 越接近1、MRE越接近0,说明拟合误

图10 不同温度下 $j_0^2(T)$ 值的拟合结果Fig.10 Fitted results of $j_0^2(T)$ value at different temperatures

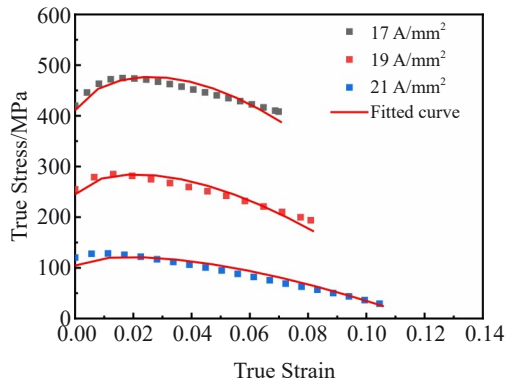


图 11 电辅助本构模型拟合结果

Fig.11 Fitted results of electro-assisted constitutive model

差越小。其计算公式如式(19)、式(20)：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_p^i - \sigma_e^i)^2}{\sum_{i=1}^n (\sigma_p^i - \bar{\sigma}_p)^2} \tag{19}$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\sigma_e^i - \sigma_p^i}{\sigma_e^i} \right| \tag{20}$$

式中， n 为样本数量， $\bar{\sigma}_p$ 为 n 个实际值的平均数， σ_e^i 为第 i 个预测值， σ_p^i 为第 i 个实际值。图 12 是高温及电辅助模型的 R^2 计算结果， R^2 大部分在 0.95 以上；随着温度的升高及电流密度的增大， R^2 呈减小的趋势，模型的拟合效果逐渐变差。在 Safari^[24]等的研究中也存在类似现象，这可能与金属材料在高温下的非线性流动行为有关。

在电流密度为 21 A/mm² 条件下， R^2 为 0.916，说明拟合结果较差，需要进一步分析其相对误差情况。如图 13 所示，随着应变的增大，相对误差曲线大致呈 U 形，先降低再升高。最大值接近 5%，其余大多都位置低于 3%，MRE 为 2.186%。上述分析结果说明该本构模型在一定的范围内能较为准确预测 TC4 钛合金的塑性变形行为。

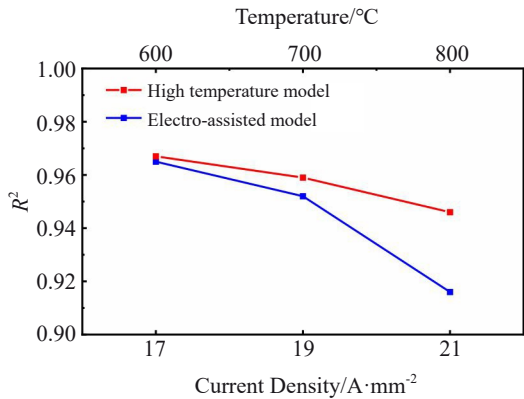


图 12 本构模型拟合确定系数 R^2 统计

Fig.12 Coefficient of determination R^2 fitted by constitutive model

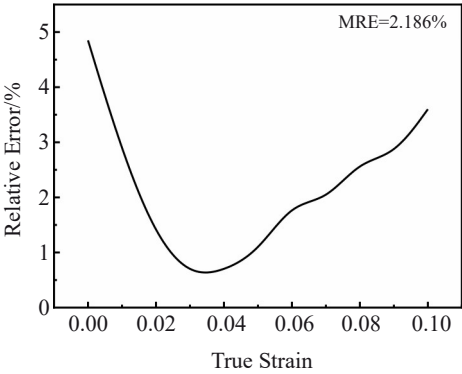


图 13 电流密度 21 A/mm² 时的相对误差曲线

Fig.13 Relative error curve at the current density of 21 A/mm²

5 结 论

- 1)通过高温及电辅助拉伸试验研究发现，随着温度及电流密度的升高，钛合金的流动应力不断降低，延伸率呈增大的趋势。但延伸率与电流密度的关系呈现非正比例特征，具体表现为先升后降的变化趋势，并在电流密度为 18 A/mm² 时达到峰值。
- 2)除焦耳热效应外，存在非热效应即电致塑性效应降低材料流动应力，随着脉冲电流密度的增大，电致塑性效应的作用效果也随之增强。
- 3)基于 Johnson-Cook 模型建立了 TC4 钛合金电致塑性效应本构模型。该模型拟合曲线的 $R^2 \geq 0.95$ ， $MRE < 2.5\%$ ，表现出较高的拟合精度。

参考文献 References

[1] Seshacharyulu T, Medeiros S, Frazier W *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2000, 284(1): 184

[2] Zhang Lei(张 磊), Guo Ping(郭 萍), Wang Huan(王 欢) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(12): 3422

[3] Bruschi S, Poggio S, Quadrini F *et al.* *Materials Letters*[J], 2004, 58(27–28): 3622

[4] Gao P P, Xie Z Y, Chun O Y *et al.* *Journal of Solid State Electrochemistry*[J], 2018, 22(7): 1971

[5] Troitskii O A. *Materials Science and Engineering*[J], 1985, 75(1–2): 37

[6] Troitskii O A, Likhtman V I. *Soviet Physics Doklady*[J], 1963, 8: 91

[7] Nguyen-Tran H, Oh H, Hong S *et al.* *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology*[J], 2015, 2(4): 365

[8] Xu Jiajun(徐佳俊). *Research on Electrically Assisted Stamping Forming of TC4 Titanium Alloy Thin-Walled Sheet Metal Parts* (TC4 钛合金薄壁钣金件电辅助冲压成形研究)[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2023

[9] Zhou Yan(周 岩). *Deformation Behavior and Mechanism of TC4*

- Titanium Alloy in Electroplastic Drawing*(TC4 钛合金电塑性拉拔变形行为及机理)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013
- [10] Ye Susu(叶苏苏), Zhao Dan(赵 旦), Yang Yi(杨 屹) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(6): 1572
- [11] Roh J, Seo J, Hong S *et al. International Journal of Plasticity*[J], 2014, 58: 84
- [12] Li H W, Yan S L, Zhan M *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 263: 423
- [13] Peng Shuhua(彭书华). *Journal of Plastic Engineering*(塑性工程学报)[J], 2018, 25 (2): 202
- [14] Liu Bin(刘 斌), Wu Chuan(武 川), Zhou Yujie(周宇杰). *Precision Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2022, 14(5): 27
- [15] Huang J K, Li Q, Yang F Q *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2022, 855: 143886
- [16] Zhao S T, Zhang R P, Chong Y *et al. Nature Materials*[J], 2020, 20(4): 468
- [17] Johnson G R, Cook W H A. *Engineering Fracture Mechanics*[J], 1983, 21: 541
- [18] Chen G, Ren C Z, Qin X D *et al. Materials & Design*[J], 2015, 83: 598
- [19] Magargee J, Morestin F, Gao J. *Journal of Engineering Materials and Technology*[J], 2013, 135(4): 041003
- [20] Gao S, Sang Y, Li Q H *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2022, 892: 162128
- [21] James M, Rong F, Jian C. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 2013, 135(6): 061022
- [22] Du Yin(杜 引), Zhao Yixi(赵亦希), Yu Zhongqi(于忠奇) *et al. Journal of Plastic Engineering*(塑性工程学报)[J], 2017, 24(1): 133
- [23] Molotskii I M. *Materials Science & Engineering A*[J], 2000, 287(2): 248
- [24] Safari A, Imran M, Weiss S. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2021, 30(3): 1

Electro-Assisted Tensile Behavior and Constitutive Model of TC4 Titanium Alloy

Li Ping, Liu Shaofeng, Yu Renhai, Liu Baisong, Liu Le, Xue Kemin

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

Abstract: High-temperature and electro-assisted tensile experiments were conducted on TC4 titanium alloy, with the deformation temperature of 600–900 °C and the current density of 14–22 A/mm². The effects of temperature and current density on the flow stress of the alloy were investigated. The experimental results show that during the hot tensile process, the flow stress of the material decreases with the increase in temperature, and the elongation is positively correlated with temperature. The flow stress of the material decreases after applying pulsed current, and the elongation first increases and then decreases with the increase in current density. Finally, based on the true stress-true strain data of tension, a multi-physical field constitutive model coupling thermal and athermal effects was constructed on the basis of the original Johnson-Cook model framework. The constitutive model parameters were determined by the regression fitting method, and error analysis was performed between the experimental and predicted values. The results show that the coefficient of determination R^2 of the constitutive model is more than 0.95, the mean relative error is less than 2.5%, which indicates that the model has relatively good predictive ability within a wide range of process parameters. The research aims to provide a theoretical basis for the electro-assisted forming of titanium alloys and a reference for optimizing forming process parameters.

Key words: TC4 titanium alloy; pulsed current; electro-plastic effect; constitutive model

Corresponding author: Li Ping, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P. R. China, Tel: 0086-551-62901368, E-mail: li_ping@hfut.edu.cn