

预应变对 TA2 力学性能的影响及 本构模型的建立

李一帆, 代巧*, 郭成, 冯立斌

(江苏理工学院机械工程学院, 江苏 常州 213001)

摘要:为研究预应变对 TA2 力学性能的影响,对原始材料和预应变量为 10%、20% 和 30% 的 TA2 进行室温拉伸试验;根据预应变对 TA2 力学性能的影响规律,引入预应变变量对 Hollomon 模型、Ludwik 模型和 Swift 模型进行修正,以预测预应变 TA2 的力学行为。结果表明,随预应变量的增加,TA2 的屈服强度显著增大、抗拉强度小幅增大,而断后伸长率、强塑积和应变硬化指数减小。预应变通过消耗塑性性能来提升 TA2 的强度,TA2 塑性应变能密度和断裂应变能密度随预应变量的增加而明显减小。各修正模型预测结果与试验值相关性系数的平均值分别为 0.986 2、0.999 4、0.974 4,最大预测误差为 6.34%、8.33%、16.42%,其中 Hollomon 模型结构精简且具有良好的预测精度,是描述预应变对 TA2 力学行为影响的最佳选择。

关键词:TA2; 预应变; 力学性能; 本构模型

中图分类号:TF823,TG146.2

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2024)05-0083-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.05.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



与作者互动
听语音
聊科研

Influence of pre strain on the mechanical properties of TA2 and the establishment of constitutive model

Li Yifan, Dai Qiao*, Guo Cheng, Feng Libin

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, Jiangsu, China)

Abstract: To investigate the effect of prestrain on the mechanical properties of TA2, room temperature tensile tests were conducted on the TA2 original material and specimens with the prestrains of 10%, 20%, and 30%. Based on the influence of prestrain on the mechanical properties of TA2, prestrain variables were introduced to modify the Hollomon model, Ludwik model, and Swift model to predict the mechanical behavior of prestrained TA2. The results show that with the increase of prestrain, the yield strength of TA2 increases significantly, the tensile strength slightly increases, and the elongation after fracture, strength plastic product, and strain hardening indexes decrease. Prestrain enhances the strength of TA2 by consuming plastic properties, and the plastic strain energy density and fracture strain energy density of TA2 decrease significantly with the increase of prestrain. The average correlation coefficients between the predicted results of each modified model and the experimental values are 0.986 2, 0.999 4, and 0.974 4, with the maximum prediction errors of 6.34%, 8.33%, and 16.42%, respectively. Among them, the Hollomon model has a simplified structure and good prediction accuracy, making it the best

收稿日期:2024-03-01

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划项目(XSJCX22_21)。

作者简介:李一帆, 1998 年出生, 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向:工业纯钛 TA2 疲劳裂纹扩展行为, E-mail: 823936266@qq.com; *通讯作者:代巧, 1986 年出生, 女, 四川资中人, 博士, 副教授, 研究方向:机械结构优化设计与强度评定、可靠性分析与寿命预测, E-mail: daiqiao@126.com。

choice to describe the effect of prestrain on the mechanical behavior of TA2.

Key words: TA2, pre-strain, mechanical properties, constitutive model

0 引言

钛及其合金材料凭借自身良好的耐腐蚀性、生物相容性和强度,广泛应用于化工设备和机械装备,更是多种压力容器必不可少的原材料^[1-2]。然而该类金属屈强比偏低,并且恶劣的工作条件和极长的服役时间对钛制设备安全运行影响较大。随着科学研究的不断深入,研究人员发现多种材料强化方式,其中预应变是改善金属性能的重要方法^[3]。其本质为消耗材料塑性性能以获取较高的屈服强度和抗拉强度^[4],与此同时还将对其余力学性能造成影响。因此,对预应变后的 TA2 性能进行研究显得极具意义。

国内外研究人员关于预应变对材料力学性能的影响开展了许多研究。Xu 等^[5]对不同预应变量的试样进行拉伸试验,发现预应变能够显著提高奥氏体 301 不锈钢的抗拉强度、屈服强度和表面显微硬度。Chang 等^[6]发现 CP-Ti 的屈服强度和抗拉强度会随预应变量的增加而增加,伸长率和均匀应变则随预应变量的降低而线性降低。Peng 等^[7]发现预应变材料的力学性能与位错密度的增加和预应变机械孪晶相关,应变率敏感性、温度敏感性和应变硬化率均随着预应变量的增加而减弱。Zulfi F R 等^[8]研究预应变对 304 不锈钢在拉伸变形下力学性能和变形诱发相变的影响,发现马氏体体积分数随变形百分比的增加而增大,导致材料强度和硬度的增加。Saravanan K 等^[9]发现钛合金 Ti-6Al-4V 的应变硬化指数、加工硬化速率和最大加工硬化随预应变的增大而减小。胡汉江等^[10]对 TRIP690 钢研究发现,随拉伸预应变增大,残留奥氏体持续地转变为马氏体,使 TRIP690 钢的加工硬化能力明显减弱。因此对 TA2 在不同预应变下的力学性能和力学行为开展研究有重要意义。

上述研究均发现预应变后材料的力学性能会发生明显变化,但如 Hollomon 模型、Ludwigson 模型和 Johnson Cook 模型等常见的本构模型^[11]均未考虑预应变量的影响,因此需要构建考虑预应变影响的本构模型以预测预应变后 TA2 的力学行为。其中, Peng 等^[12]提出了以断裂能密度作为预应变材料损伤参数的能量耗散变量,基于能量耗散变量建立了一种考虑预应变损伤的改进 Hollomon 模型来预

测预应变 316L 奥氏体不锈钢的力学性能,预测精度良好。赵青等^[13]对工业纯钛 TA2 焊接接头开展预应变后的室温拉伸力学性能测试,根据 Hollomon 本构方程研究了预应变后应变速率敏感性指数及应变强化指数的变化,确定了预应变试样的拉伸本构方程。而笔者对工业纯钛 TA2 进行预应变处理,在室温下对原始材料和预应变量为 10%、20% 和 30% 的试样分别进行拉伸试验,获取并分析预应变后 TA2 力学性能。通过应力-应变曲线计算各试样在拉伸过程中的塑性应变能密度、弹性应变能密度及断裂应变能密度,构建了基于断裂应变能密度的能量耗散变量。接着基于 Hollomon 模型、Ludwik 模型和 Swift 模型拟合获得 TA2 的应变硬化指数,通过引入预应变改进上述本构模型。最后分析 3 种改进模型在不同预应变下的预测结果与试验数据的相关性系数和最大误差。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为工业纯钛 TA2,表 1 所示为其主要化学成分。设计拉伸试样如图 1 所示,其厚度为 5 mm,平线段长与宽分别为 50 mm 和 6 mm。试样以线切割方式加工成型,对试样表面采用砂纸打磨抛光以达到标准要求。

表 1 TA2 化学成分
Table 1 Main chemical composition of TA2 %

Ti	O	Fe	C	N	H
>99	0.13	0.08	0.02	0.01	0.001

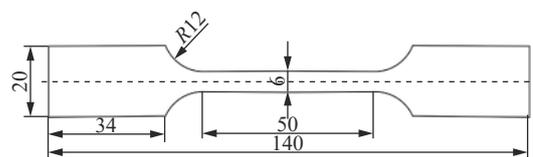


图 1 TA2 拉伸试样尺寸(单位:mm)
Fig. 1 Geometry of TA2 tensile specimen

1.2 试验方法

首先在 MTS 810 试验机上进行预应变拉伸试验,以获取不同预应变(10%、20%和30%)的 TA2 预处理试样。试验采用位移控制加载速率,位

移速率为 1.5 mm/min, 相应的应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 当试样变形量达到预定处理量时停止试验。试样预应变变量 P 表示为:

$$P = \frac{L_{\text{pre}} - L_0}{L_0} \times 100(\%) \quad (1)$$

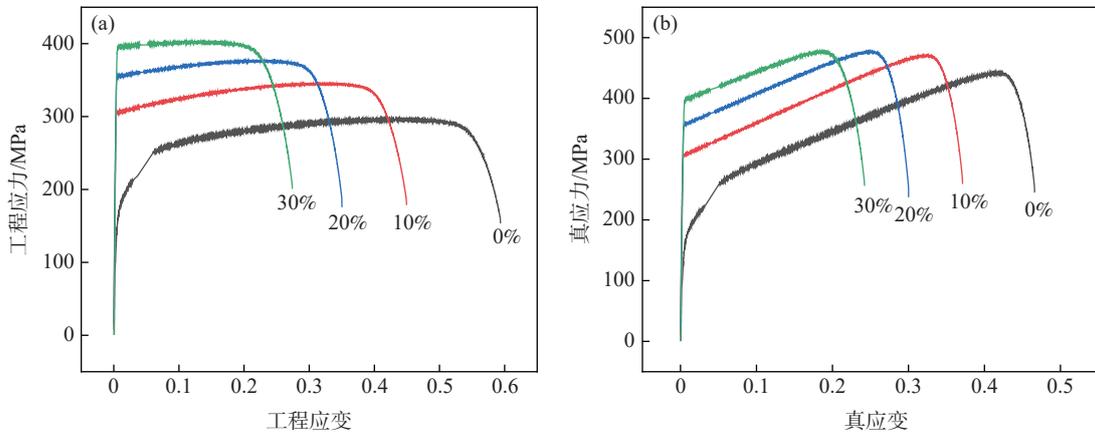
其中, L_0 为原始标距长度, L_{pre} 为预应变拉伸处理后标距长度, 用标距变化量来表示预应变变量。

随后对原始材料和不同预应变量的 TA2 进行拉伸试验, 加载初始阶段采用引伸计测量加载过程中试样产生的应变, 由于引伸计的量程有限, 当应变达到 0.4% 后移除引伸计, 由试验机记录的位移来计算应变值。整个试验通过位移控制加载

速率, 且与预应变拉伸速率一致, 在试样断裂后停止试验。

2 结果与讨论

原始材料及预应变处理后 TA2 的拉伸应力-应变曲线如图 2 所示, 分别给出了工程应力应变曲线和真实应力应变关系曲线。TA2 应力应变曲线可以被划分为弹性、加工硬化和断裂三个阶段。随着预应变量的增加, 弹性阶段明显增长, 加工硬化阶段明显缩短, TA2 的屈服强度及抗拉强度均有一定的增加。当应力达到抗拉强度后, 试样从颈部开始断裂, 断裂时所对应的应变值随预应变的增大而减小。



(a) 工程应力应变曲线; (b) 真实应力应变曲线

图 2 不同预应变变量下的 TA2 应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of TA2 under different prestrain variables

2.1 预应变对力学性能的影响

图 3 为 TA2 的屈服强度、抗拉强度和断后伸长率随预应变量的变化规律, 屈服强度和抗拉强度随预应变量的增加而增大, 而断后伸长率则随预应变量的增加而减小。屈服强度受预应变影响十分明显, 并且随预应变的变化幅度大于抗拉强度。当预应变变量从 0 增加到 10% 时, 屈服强度迅速从 132.78 MPa 增加到 307.09 MPa, 其增幅为 131.28%; 当预应变变量从 10% 增加到 30%, 屈服强度的增长趋于平稳; 当预应变变量达到 30% 后屈服强度增加至 395.84 MPa, 相比于 0 的预应变变量增长了 198.12%。与屈服强度相比, 抗拉强度增幅平缓, 当预应变变量由 0 增加到 30% 时, 抗拉强度从 442.14 MPa 增长到 476.75 MPa, 增幅仅为 7.83%。预应变对 TA2 断后伸长率也有显著影响, 当预应变变量从 0 增加到 30% 时, 断后伸长率从 62.69% 下降到 24.12%, 降幅为 61.52%。由此证明, 预应变通过 TA2 塑性的降低来实现强度的提升。

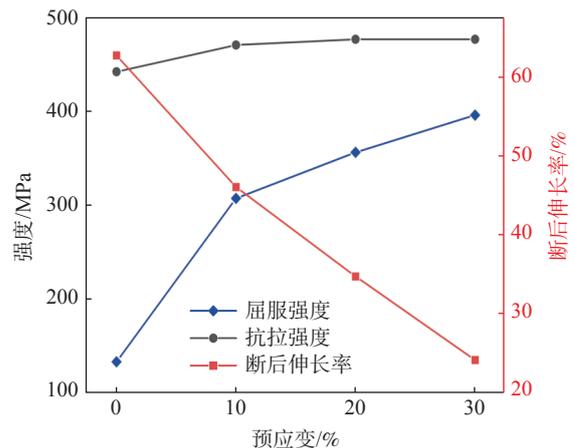


图 3 屈服强度、抗拉强度和断后伸长率随预应变的变化

Fig. 3 The variation of yield strength, tensile strength, and elongation after fracture with prestrain

屈强比是屈服强度与抗拉强度的比值, 屈强比低表示材料的塑性较好, 屈强比高表示材料抗变形能力较强, 表明其不易发生塑性变形^[14]。强塑性积是抗拉强度与断后伸长率的乘积, 用来总体表征材料

的强韧性。图4为TA2的屈强比和强塑积随预应变的变化曲线,当预应变从0提高到30%时,TA2屈强比先迅速从0.3增加到0.653,然后稳定增加到0.830,表明预应变后TA2塑性性能降低且抗变形能力提高;强塑积随预应变量的增加而降低,预应变从0增加到30%,强塑积从27 717.76 MPa·%降低到11 499.21 MPa·%,降幅为58.51%。

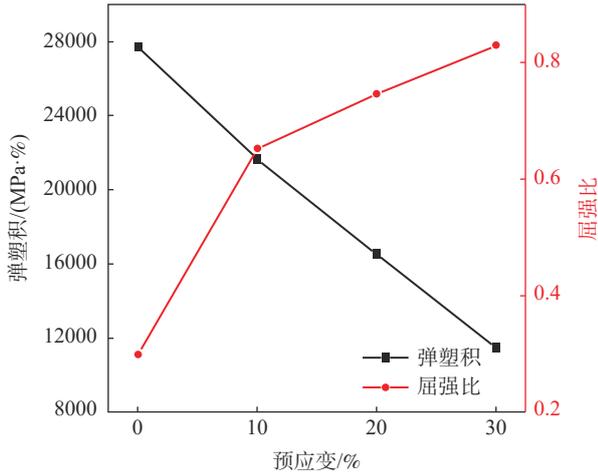
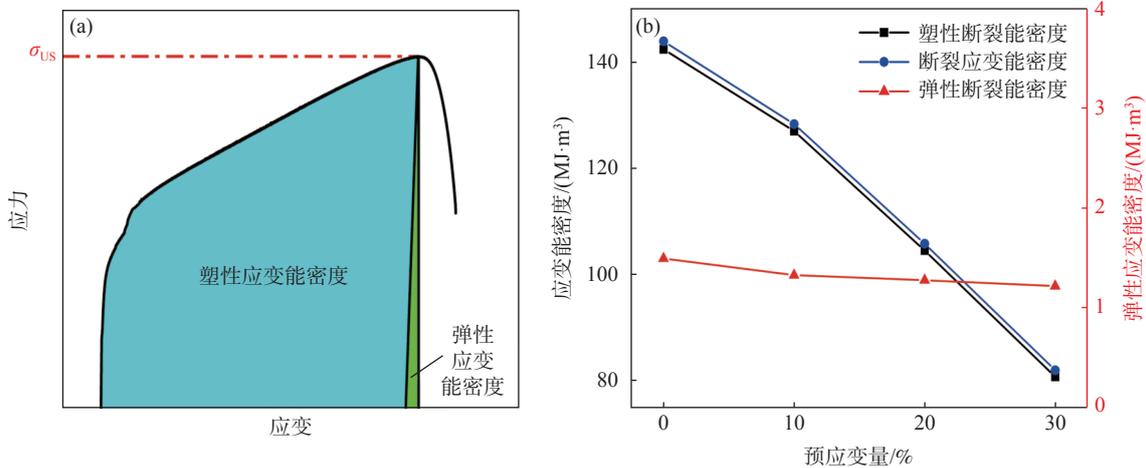


图4 强塑积及屈强比随预应变的变化

Fig. 4 The variation of strength plastic product and yield strength ratio with prestrain

2.2 预应变对能量密度的影响

为定量分析预应变对TA2性能的影响,可以从能量角度出发表征预应变试样在拉伸过程中塑性和弹性的变化。Peng等^[12]定义拉伸试验时的应变能密度等于316L不锈钢应力-应变曲线所围的面积,高毅等^[15]采用面积法计算得到022Cr17Ni12Mo2不锈钢不同应变强化量下的弹性应变能密度和塑性应变能密度。图5(a)为拉伸弹性应变能密度、塑性应变能密度和断裂应变能密度的表示方法,弹性应变能密度表示材料的弹性变形能力,塑性应变能密度表示材料的塑性变形能力,断裂应变能密度表示材料的总变形能力。断裂应变能密度对应抗拉强度 σ_{US} 所围曲线面积^[12],以弹性模量为斜率过抗拉强度对应点做一条直线,将应力-应变曲线与坐标轴所围面积一分为二,左侧面积较大部分为塑性应变能密度,右侧面积较小部分为弹性应变能密度^[15]。图5(b)所示为TA2弹性应变能密度、塑性应变能密度和断裂应变能密度随预应变量的变化曲线,该图表明预应变不断增加后,TA2在拉伸过程中的断裂应变能密度和塑性应变能密度逐渐减小,但弹性应变能密度却基本未发生变化,说明预应变降低了TA2总变形能力和塑性变形能力。由此可知,预应变能够消耗TA2的塑性应变能力,并且以此提高其抗变形性能,进而提升TA2的强度。



(a) 拉伸应变能密度; (b) TA2 拉伸应变能密度随预应变量的变化

图5 TA2 拉伸应变

Fig. 5 The tensile strain of TA2

预应变拉伸导致TA2发生塑性变形从而产生塑性损伤,由于金属材料在损伤后弹性模量会下降,传统获取塑性损伤的方法是测量损伤后的弹性模量。因此,可以通过预应变试样的弹性模量变化来计算损伤变量 D ^[7]:

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E} \tag{2}$$

其中, \bar{E} 为损伤后的弹性模量, E 为损伤前的弹性模量。但试验中很难实现对弹性模量的精准测量,同时基于应力-应变曲线弹性阶段测定的弹性模量也会存在人为因素误差。断裂应变能密度表征了材料

的变形能力, 因此可以采用断裂应变能密度代替弹性模量来间接描述 TA2 的损伤演化过程。由此定义能量耗散变量 D_U ^[16] 如下:

$$D_U = 1 - \frac{U_{\text{fed.pre}}}{U_{\text{fed.0}}} \quad (3)$$

其中, $U_{\text{fed.pre}}$ 为预应变试样的断裂应变能密度, $U_{\text{fed.0}}$ 是原始试样的断裂应变能密度。 $D_U=0$, 表示材料处于未损伤状态; $D_U=1$, 表示材料完全损坏。图 6 是 TA2 能量耗散变量 D_U 随预应变的变化情况。随着预应变的增加, TA2 的位错密度和孪晶增加^[13], 塑性损伤进一步加剧, 导致能量耗散变量 D_U 增大。

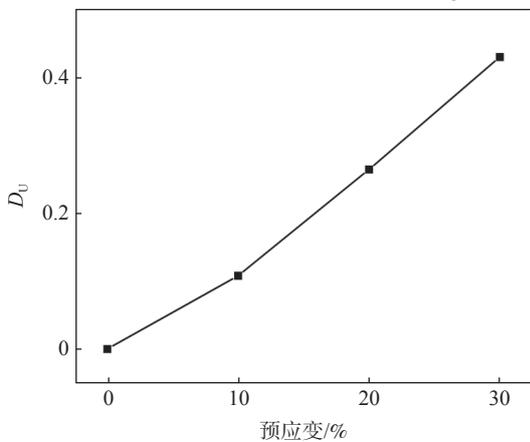


图 6 能量耗散变量 D_U 随预应变的变化

Fig. 6 The variation of energy dissipation D_U with prestrain

2.3 预应变对应变硬化指数的影响

应变硬化指数是材料力学性能的重要参数, 主要反映金属材料抵抗均匀塑性变形的能力。该指数一般用字母 n 表示, $n=0$ 代表金属材料不具备应变硬化能力; $n=1$ 代表材料具备理想的弹性, 应力与应变呈线性关系。常用的本构模型中都存在应变硬化指数来描述材料的应变硬化能力。

Hollomon 模型常用于定量分析材料的应变硬化性能, 其具体表达式为^[17]:

$$\sigma = K_H \varepsilon^{n_H} \quad (4)$$

式中, K_H 为材料常数, n_H 为应变硬化指数。

Ludwik 模型相较于 Hollomon 模型的优势在于考虑到材料的屈服应力, 其具体表达式为^[17]:

$$\sigma = \sigma_s + K_L \varepsilon^{n_L} \quad (5)$$

式中, K_L 为材料常数, n_L 为应变硬化指数。

Swift 模型主要考虑到屈服应变的影响, 其具体

表达式为^[17]:

$$\sigma = K_S (\varepsilon_0 + \varepsilon)^{n_S} \quad (6)$$

式中, ε_0 为到达屈服点的应变, K_S 为材料常数, n_S 为应变硬化指数。

本文在这里基于 Hollomon、Ludwik 和 Swift 模型分别对 TA2 应力-应变曲线中的加工硬化阶段进行拟合, 得到 TA2 在 3 种本构模型下的应变硬化指数和其他参数如表 2 所示。3 种模型应变硬化指数皆随预应变的增加而降低, 其中 n_H 与 n_S 与预应变减小的趋势接近, n_H 偏高且变化幅度相比于其他 2 种模型缓慢但同样呈现降低趋势。因此, 预应变导致 TA2 的应变硬化指数不断降低, 进而弱化其变形和硬化性能。

表 2 各本构模型参数
Table 2 Parameters of each constitutive model

应变/%	Hollomon模型		Ludwik模型			Swift模型		
	K_H	n_H	K_L	σ_s	n_L	K_S	ε_0	n_S
0	556	0.276 13	402.49	250.52	0.839 04	495.97	0.04	0.173 16
10	552	0.175 15	413.49	308.75	0.816 99	523.58	0.015 94	0.131 23
20	543	0.113 25	363.73	388.45	0.798 63	522.85	0.012 36	0.088 34
30	525	0.068 53	278.48	400.09	0.746 08	514.37	0.003 82	0.057 58

2.4 构建考虑预应变的本构模型

在预应变的作用下 TA2 的力学性能发生了显著变化, 为合理表征预应变材料的力学行为, 在本构模型中考虑预应变量的影响显得十分必要。应变硬化指数和本构模型中的其他参量均与预应变存在较大关联, 因此可以分别建立本构模型参量与预应变量的关系式^[18], 通过引进预应变量的方法对 Hollomon 模型、Ludwik 模型和 Swift 模型进行修正。

根据 2.3 节获得的各模型参数值, 即表 2 中数据, 分别建立模型参数与预应变量的关联。图 7 为 Hollomon 本构模型中材料常数 K_H 、硬化指数 n_H 随预应变 P 的变化关系, 从中观察发现材料常数 K_H 和 P 近似成线性关系, 而硬化指数 n_H 和 P 呈指数关系, 因此分别将预应变 P 与 K_H 、 n_H 进行线性关系拟合、指数关系拟合, 得到结果如图 7 所示。

因此考虑预应变的 Hollomon 模型如下:

$$\sigma = (-1.02P + 559.3) \cdot \varepsilon^{0.276 - 0.294 \left(1 - e^{-\frac{P}{24.555}} \right)} \quad (7)$$

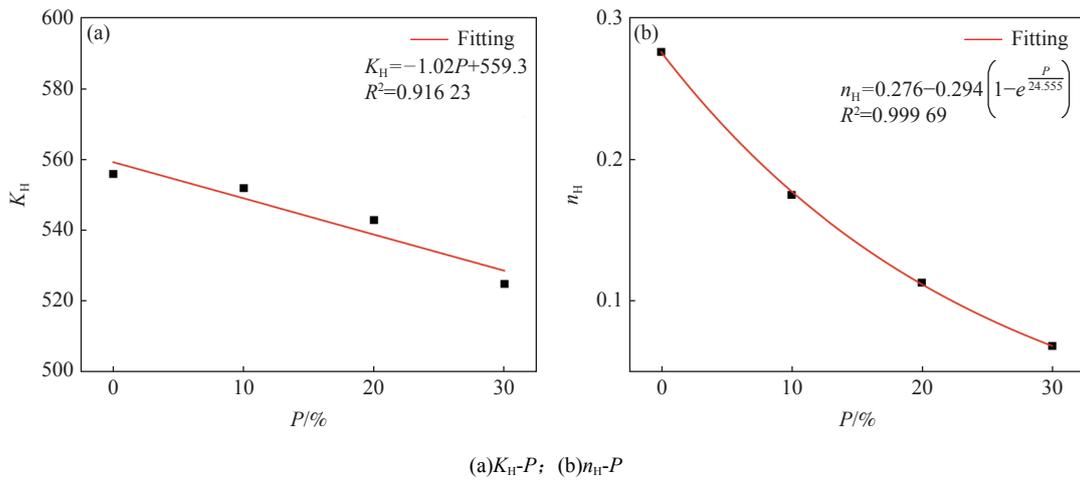


图 7 Hollomon 模型参数与预应变变量关联

Fig. 7 Correlation between Hollomon model parameters and prestrain

图 8 为 Ludwik 本构模型中材料常数 K_L 、屈服应力 σ_s 、硬化指数 n_L 随预应变变量 P 的变化关系, 从中观察发现材料常数 K_L 、屈服应力 σ_s 和 P 近似成

抛物线关系, 而硬化指数 n_L 和 P 呈线性关系, 因此分别将预应变变量 P 与 K_L 、 σ_s 和 n_L 进行抛物线关系拟合和线性关系拟合, 得到结果如图 8 所示。

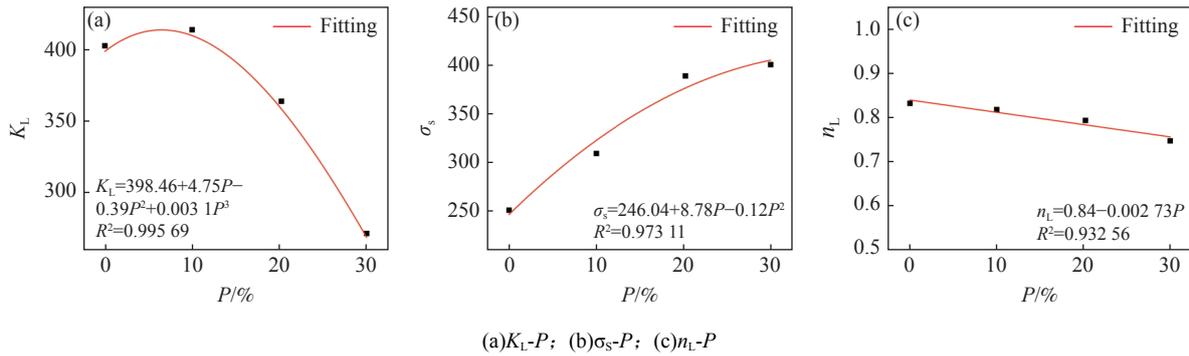


图 8 Ludwik 模型参数与预应变变量关联

Fig. 8 Correlation between Ludwik model parameters and prestrain

因此考虑预应变的 Ludwik 模型如下

$$\sigma = (246.04 + 8.78P - 0.12P^2) + (398.46 + 4.75P - 0.39P^2 + 0.003 1P^3) \varepsilon^{0.84 - 0.002 73P} \quad (8)$$

变 ε_0 、硬化指数 n_s 随预应变变量 P 的变化关系, 从中观察发现材料常数 K_s 、屈服应变 ε_0 和 P 近似成指数关系, 而硬化指数 n_s 和 P 呈线性关系, 因此分别将预应变变量 P 与 K_s 、 ε_0 和 n_s 进行指数关系拟合和线性关系拟合, 得到结果如图 9 所示。

图 9 为 Swift 本构模型中材料常数 K_s 、屈服应

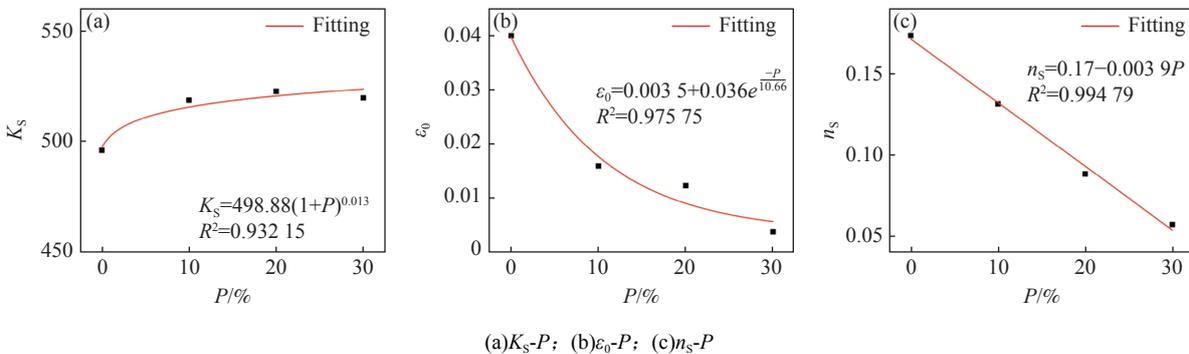


图 9 Swift 模型参数与预应变变量关联

Fig. 9 Correlation between Swift model parameters and prestrain: (a) K_s - P ; (b) ε_0 - P ; (c) n_s - P

因此考虑预应变的 Swift 模型如下

$$\sigma = 498.88(1 + P)^{0.013} \left[\varepsilon + (0.0035 + 0.036 \cdot e^{\frac{-P}{10.66}}) \right]^{0.17 - 0.0039P} \quad (9)$$

为了检验预应变修正后本构模型预测结果的准确性, 现将各修正模型的预测结果与试验值进行对比, 其结果如图 10 所示。由图 10 中观察发现, 修正的 Hollomon 模型在不同预应变量下的预测曲线与试验结果高度吻合, 修正的 Ludwik 模型和 Swift 模型预测曲线与试验结果的偏差大于修正的 Hollomon 模型。表 3 为各修正模型预测结果的相关性对比, 表中数据显示修正后 3 种模型预测结果与试

验数据的相关性系数 R 均在较高水平, 各模型预测结果与试验值相关性系数的平均值 \bar{R} 分别为 0.986 2、0.999 4、0.974 4, 其中 Ludwik 模型预测结果与试验值相关性最高, Swift 模型相关性偏低, Hollomon 模型相关性略低于 Ludwik 模型。3 种改进模型在各预应变量下的最大预测误差 δ_{max} 分别为 6.34%、8.33% 和 16.42%, 且对预应变试样的预测误差基本小于对原始试样的预测误差。而修正后的 Hollomon 模型在各预应变量下的 δ_{max} 均小于其他 2 种修正模型, 且 Hollomon 模型结构简单、参数偏少, 因此修正的 Hollomon 模型用来描述预应变后 TA2 的应力-应变行为效果最佳。

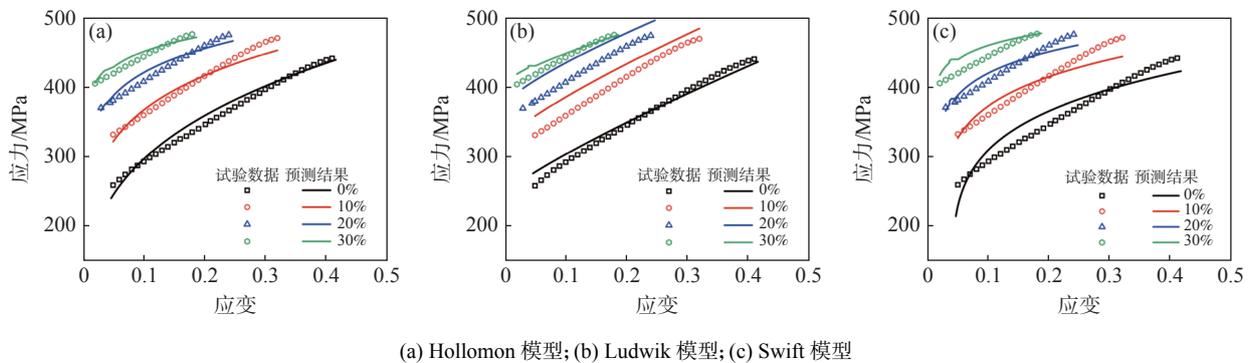


图 10 修正的本构模型预测结果与试验数据对比

Fig. 10 Comparison between the improved constitutive models prediction results and experimental data: (a) Hollomon model; (b) Ludwik model; (c) Swift model

表 3 各修正模型预测结果的相关性系数和最大误差

Table 3 The correlation coefficients and maximum errors of the predicted results of each modified model

	P=0%		P=10%		P=20%		P=30%	
	R	$\delta_{max}/\%$	R	$\delta_{max}/\%$	R	$\delta_{max}/\%$	R	$\delta_{max}/\%$
Hollomon 模型	0.991 3	6.34	0.987 0	3.89	0.982 3	3.36	0.984 1	2.63
Ludwik 模型	0.999 6	8.25	0.999 6	8.33	0.999 4	8.03	0.999 1	4.14
Swift 模型	0.964 3	16.42	0.978 8	5.80	0.975 8	3.61	0.978 6	6.11

3 结论

1) 通过对原始材料和预应变 TA2 的拉伸试验得到了预应变对 TA2 力学性能的影响规律, 当预应变变量由 0 增加到 30%, 屈服强度随预应变量的增加而明显增大, 增幅为 198.12%; 抗拉强度小幅增大, 增幅为 7.83%; 断后伸长率和强塑积随预应变量的增加而降低, 降幅分别为 61.52% 和 58.51%。

2) TA2 拉伸过程中断裂应变能密度和塑性应变能密度均随预应变量的增加而降低, 预应变通过

消耗塑性性能能来提高 TA2 的强度; 基于断裂应变能密度定义的能量耗散变量随预应变量的增加而增大。

3) 预应变会导致 TA2 硬化能力减弱, 硬化指数降低; 考虑预应变影响对 Hollomon 模型、Ludwik 模型和 Swift 模型进行修正, 各模型预测结果与试验值相关性系数的平均值为 0.986 2、0.999 4、0.974 4, 最大误差分别为 6.34%、8.33%、16.42%, 修正后的 Hollomon 模型在各预应变量下的预测误差均最小, 预测结果与试验值吻合度最高。

参考文献

- [1] Liu G, Sun H, Wang E, *et al.* Effect of deformation on the microstructure of cold-rolled TA2 alloy after low-temperature nitriding[J]. *Coatings*, 2021, 11(8): 1011.
- [2] Tian Xiaodan. Key points for manufacturing supervision and inspection of titanium pressure vessels[J]. *Chemical Equipment Technology*, 2020, 41(4): 52-54.
(田小丹. 钛制压力容器制造监检要点 [J]. *化工装备技术*, 2020, 41(4): 52-54.)
- [3] Liu P, Wen Z, Wang Z, *et al.* Effect of pre-strain on microstructure and stamping ability of TA2 titanium alloy and H260 low-alloy steel[C]. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2023, 2483(1): 012064.
- [4] Li Kaishang, Peng Jian, Peng Jian. The influence of pre strain on the mechanical behavior of austenitic stainless steel and the construction of a constitutive model[J]. *Materials Engineering*, 2018, 46(11): 148-154.
(李凯尚, 彭剑, 彭健. 预应变对奥氏体不锈钢力学行为的影响及本构模型的构建 [J]. *材料工程*, 2018, 46(11): 148-154.)
- [5] Xu Jingsheng, Wang Manfu. Effect of tensile pre-strain on mechanical properties of austenitic 301 stainless steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19 Octobe2023: 1-8.
- [6] Chang Le, Zhou Changyu, He Xiaohua. The effects of prestrain and subsequent annealing on tensile properties of CP-Ti[J]. *Metals*, 2017, 7(3): 99.
- [7] Peng Jian, Li Kaishang, Pei Junfeng, *et al.* The effect of pre-strain on tensile behaviour of 316L austenitic stainless steel[J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 34(5): 547-560.
- [8] Zulfi F R, Korda A A. Effect of pre-strain on mechanical properties and deformation induced transformation of 304 stainless steel[C]. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2016, 739(1): 012039.
- [9] Saravanan K, Manikandan P, Jalaja K, *et al.* Effect of uniaxial pre-strain on tensile, work hardening, fracture toughness, and fatigue crack growth rate of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2023, 54(9): 3603-3619.
- [10] Hu Hanjiang, Zhao Aimin, Yin Zhukai, *et al.* The effect of pre strain on the mechanical properties and hardening behavior of TRIP steel[J]. *Journal of Materials Heat Treatment*, 2016, 37(5): 128-132.
(胡汉江, 赵爱民, 印珠凯, 等. 预应变对 TRIP 钢力学性能及硬化行为的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2016, 37(5): 128-132.)
- [11] Xue Zhichao, Peng Jian, Wang Linhai, *et al.* Comparative study on the effect of strain strengthening on the mechanical properties of S30403 and S30408 stainless steel[J]. *Hot Working Process*, 2022, 51(6): 26-31.
(薛智超, 彭剑, 汪林海, 等. 应变强化对 S30403 与 S30408 不锈钢力学性能影响的对比研究 [J]. *热加工工艺*, 2022, 51(6): 26-31.)
- [12] Peng Jian, Li Kaishang, Dai Qiao. Mechanical properties of pre-strained austenitic stainless steel from the view of energy density[J]. *Results in Physics*, 2018, 10: 187-193.
- [13] Zhao Qing, Chang Le, Zhou Changyu, *et al.* The effect of pre strain on the tensile mechanical properties of industrial pure titanium TA2 welded joints[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2023, 44(3): 68-74.
(赵青, 常乐, 周昌玉, 等. 预应变对工业纯钛 TA2 焊接接头拉伸力学性能的影响 [J]. *钢铁钒钛*, 2023, 44(3): 68-74.)
- [14] Gao Huilin. Analysis and review of bending strength ratio of pipeline steel[J]. *Welded Pipe*, 2010, 33(6): 10-14.
(高惠临. 管线钢屈强比分析与评述 [J]. *焊管*, 2010, 33(6): 10-14.)
- [15] Gao Yi, Peng Jian, Dai Qiao, *et al.* The effect of strain strengthening on the fatigue behavior of 022Cr17Ni12Mo2 stainless steel[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2020, 51(1): 23-32.
(高毅, 彭剑, 代巧, 等. 应变强化对 022Cr17Ni12Mo2 不锈钢疲劳行为的影响 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(1): 23-32.)
- [16] Jin Fengnian, Jiang Meirong, Gao Xiaoling. Method for defining damage variables based on energy dissipation[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004(12): 1976-1980.
(金丰年, 蒋美蓉, 高小玲. 基于能量耗散定义损伤变量的方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004(12): 1976-1980.)
- [17] Wang Zhen. Research on mechanical properties and forming limit of aluminum lithium alloy sheets[D]. Tangshan: North China University of Technology, 2020.
(王震. 铝锂合金板材的力学特性和成形极限研究 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.)
- [18] Lei Yu. Study on plastic deformation behavior of typical high-strength steel under high strain rate of pre strain[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
(雷雨. 预应变高应变速率下典型高强钢的塑性变形行为研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.)