

高应变速率下 TA1 纯钛薄板的 J-C 本构及失效模型研究

黄艺帆^{1,2}, 董芃欣^{1,2}, 吴泽霖^{1,2}, 曹全梁^{1,2}, 谌 祺^{1,2}, 韩小涛^{1,2}

(1. 华中科技大学 国家脉冲强磁场科学中心, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为探究 TA1 纯钛的动态力学性能, 对 0.5 mm 厚度的 TA1 纯钛薄板试样进行了准静态以及不同应变速率下的动态拉伸实验, 建立了能够真实反映 TA1 纯钛在高应变速率和较大应变范围内的塑性变形特征的 Johnson-Cook (J-C) 本构模型, 并对原始模型进行了修正; 同时, 对不同缺口半径的 TA1 纯钛拉伸试样进行了准静态拉伸实验, 建立了基于应力三轴度的失效模型。将建立的 J-C 本构与失效模型应用于 LS-Dyna 中进行仿真模拟, 并与实验数据对比, 验证了模型的有效性 with 实用性。

关键词: TA1 纯钛; 动态力学性能; 本构模型; 失效模型; 应力三轴度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.033

中图分类号: TG146 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 03-0236-08

Research on J-C constitutive and failure models for TA1 pure titanium sheet under high strain rate

Huang Yifan^{1,2}, Dong Pengxin^{1,2}, Wu Zelin^{1,2}, Cao Quanliang^{1,2}, Chen Qi^{1,2}, Han Xiaotao^{1,2}

(1. National Pulsed High Magnetic Field Science Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory of High Power Electromagnetic Engineering and New Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to explore the dynamic mechanical properties of TA1 pure titanium, the quasi-static and dynamic tensile experiments of TA1 pure titanium sheet samples with the thickness of 0.5 mm under different strain rates were carried out, the Johnson-Cook (J-C) constitutive model truly reflecting the plastic deformation characteristics of TA1 pure titanium in high strain rate and large strain range was established, and the original model was modified. Meanwhile, the quasi-static tensile experiments were carried out on TA1 pure titanium tensile samples with different notch radii, and the failure model based on stress triaxiality was established. The established J-C constitutive and failure models were applied to LS-Dyna for simulation, and the validity and practicability of the model were verified by comparing with the experimental data.

Key words: TA1 pure titanium; dynamic mechanical properties; constitutive model; failure model; stress triaxiality

钛及钛合金具有强度高、耐高温好、耐腐蚀性强等特性, 在电力、化学装备、生物工程、航空航天等领域均被广泛使用^[1-7], 尤其是薄壁钛合金板在制备燃料电池双极板中具有重要应用^[8-9]。而在室温下纯钛具有严重的各向异性, 不利于成形, 而高温退火可有效改善其各向异性^[10]。退火后的钛呈现出高屈服强度、低弹性模量的特征, 这使其具有较

大的回弹量, 且易断裂、塑性变形范围较窄, 致使零件的贴模性能较差。同时, 力卸载后制件的形状通常会明显改变, 从而导致几何精度受到很大影响。为解决上述问题, 在生产制造中可采用高速成形工艺, 如爆炸成形、电液成形、电磁成形等, 这些成形工艺可显著提升金属材料的成形极限, 并且可有效抑制回弹。研究表明, 钛合金在高应变速率下的力学性能和失效行为与其在准静态下有较大区别, 且其流动应力、失效应变与材料所受的应力状态以及应变速率有极大的相关性^[11]。因此, 有必要研究在高应变速率下钛合金的动态力学性能和失效行为, 用以指导钛合金的电磁成形工艺。

建立准确的本构模型与失效模型是研究金属材料塑性变形行为和失效行为的重要手段。在本构模

收稿日期: 2022-04-27; 修订日期: 2022-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52077092); 湖北省重点研发项目 (2021BAA174)

作者简介: 黄艺帆 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: cris@hust.edu.cn

通信作者: 韩小涛 (1974-), 男, 博士, 教授

E-mail: xthan@mail.hust.edu.cn

型方面,目前使用较多的一般有 Johnson-Cook (J-C) 模型^[12]、Steinberg-Cochran-Guinan (S-C-G) 模型^[13]、Cowper-Symonds (C-S) 模型^[14]等,以及在上述模型的基础上进行修正的模型。如邓将华等^[15]通过准静态压缩实验和分离式 Hopkinson 压杆实验,获得不同应变速率和特定温度环境下 TA1 纯钛的应力-应变曲线,并以此拟合得到了 J-C 本构模型参数。该研究工作虽然考虑了应变速率以及温度对 TA1 纯钛试样变形过程的影响,但是该实验采用的是毫米级圆柱压缩试样,对于亚毫米级与微米级的薄板金属材料,其自身变形与失效行为受尺寸效应的影响较大,所以,其拟合得到的模型对于该类材料而言会有较大误差。苏娟华等^[16]使用 Gleeble-1500D 热模拟实验机对 TA1 纯钛试样在变形温度分别为 700、800、900 和 950 °C 和应变速率分别为 0.01、0.1、1 和 5 s⁻¹ 条件下的流动应力进行研究,并由此建立了可以描述应力与应变、应变速率以及变形温度之间关系的 Arrhenius 本构方程。但该研究考虑的应变速率范围较小,不能准确反映高应变速率下 TA1 纯钛的变形过程;同时,该实验采用压缩试样来分析 TA1 纯钛的动态力学性能,由于包辛格效应的存在,所构建的本构模型无法应用于冲压、拉拔等工艺过程。

在失效模型方面,很多研究者均以应力三轴度、温度、应变速率等参数作为主要研究内容,分析他们对材料失效行为的影响。如陈刚等^[17]研究了应力三轴度、温度和应变速率对 45 钢失效应变的影响,结果表明,应力三轴度的影响最大,且失效应变随应力三轴度的增加而降低。朱浩等^[18]深入研究了应力三轴度和应变速率对 6063 铝合金力学特性和失效过程的影响,实验表明,应力三轴度的减小将使失效应变增加。Lou Y S 等^[19]考虑到材料空洞的成核、生长和剪切聚合所引起的损伤积累,提出了一种考虑应力三轴度和罗德参数的失效模型,该模型对于韧性断裂的金属材料的失效行为具有较好预测性。目前,关于 TA1 纯钛失效行为的研究较少,也没有学者提出较为准确有效的失效模型,因此,有必要对其进行补充和完善。

鉴于此,针对氢燃料电池金属双极板用钛合金材料动态特性研究的需要,本文以 0.5 mm 厚度的 TA1 纯钛薄板为研究对象,通过准静态及一系列高速拉伸实验来研究 TA1 纯钛薄板的动态力学性能并建立 J-C 本构模型;其次,基于上述本构模型,结合有限元模拟方法,研究 TA1 纯钛薄板的失效应

变与应力三轴度的关系,拟合得到 J-C 失效模型参数,从而建立 TA1 纯钛薄板的失效应变与应力三轴度、应变速率的关系模型;最后,将仿真得到的拉伸试样位移-轴向力曲线与实验曲线进行对比,以验证建立的本构与失效模型的有效性与实用性。

1 TA1 纯钛的力学性能

1.1 拉伸试样的制备

准静态与动态拉伸实验所用的 TA1 纯钛薄板试样形状依据 ISO 6892-1:2016^[20]以及实验设备的相关参数设计,并对试样进行 600 °C × 120 min 的高温退火热处理。TA1 纯钛薄板的拉伸试样如图 1 所示,试样厚度为 0.5 mm,主要化学成分如表 1 所示。

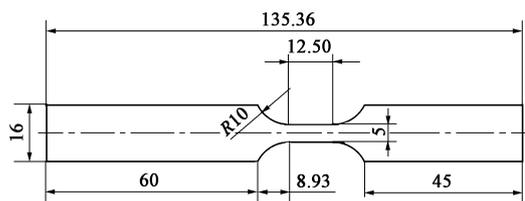


图1 室温拉伸实验试样图

Fig. 1 Sample diagram of tensile experiment at room temperature

表1 实验用 TA1 纯钛薄板的主要化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Main chemical compositions of TA1 pure titanium sheet used in experiment (% , mass fraction)

Fe	O	N	C	H	Ti
0.25	0.20	0.03	0.1	0.005	余量

1.2 准静态及动态拉伸实验及结果

为了在较宽的应变速率范围内研究 TA1 纯钛薄板的静态力学特性,本实验将试样拉伸的应变速率预设为 0.001、1、10、100 和 1000 s⁻¹ 共 5 个等级,并对每种应变速率进行 3 组平行重复实验。

名义应变速率 $\dot{\epsilon}_p$ 的计算公式为:

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{v}{l} \quad (1)$$

式中: v 为拉伸机拉伸速率; l 为试样平行区的长度。

根据式 (1) 可得,试样平行区的长度为 12.5 mm,故试样预设拉伸速率分别为 0.0125、12.5、125、1250 和 12500 mm · s⁻¹。在加载过程中,由于受夹持端间距、平行区长度、过渡弧半径

等试样形状以及材料本构特性的影响,变形过程中试样的实际应变速率会小于名义应变速率。借助数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)技术,测量出试样的平行区域在变形过程中的平均拉伸速率如表 2 所示。由于应变速率与拉伸速率呈线性关系,因此,通过对拉伸机预设的拉伸速率进行线性调整即可使试样的实际应变速率更加接近名义应变速率^[21]。调整拉伸速率后得到的真实应力-真实应变曲线如图 2 所示。

表 2 试样的预设拉伸速率与实测拉伸速率

Table 2 Preset and measured tensile velocities of specimens

预设应变速率/s ⁻¹	预设拉伸速率/(mm·s ⁻¹)	实测平均拉伸速率/(mm·s ⁻¹)	预设拉伸速率与实测平均拉伸速率之比
0.001	0.0125	0.0113	1.10
1	12.5	9.84	1.27
10	125	96.15	1.30
100	1250	860	1.45
1000	12500	11900	1.05

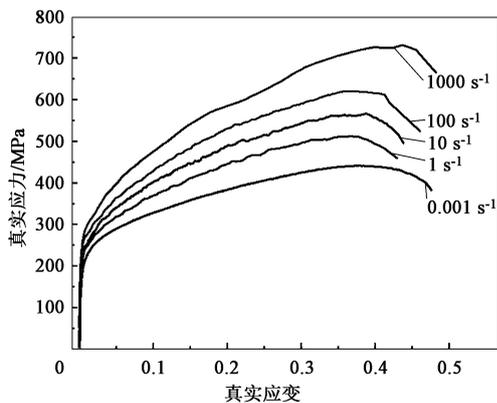


图 2 TA1 纯钛薄板在不同应变速率下的真实应力-真实应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves of TA1 pure titanium sheet at different strain rates

从图 2 中可以发现,TA1 纯钛薄板的屈服阶段并不明显,因此,屈服强度基于 0.2% 塑性应变来确定具体数值,准静态下 TA1 纯钛薄板的屈服强度大约为 180 MPa。随着真实应变的增加,材料表现出明显的应变硬化效应,流动应力的上升幅度明显,且具有较低的屈强比。此外,TA1 纯钛薄板对应变速率变化比较敏感,随着应变速率的增加,流动应力显著提升,应变速率为 1000 s⁻¹ 时的抗拉强度相较于准静态可提高约 82.5%。同时,应变速率的增加也使 TA1 纯钛薄板的屈强比进一步降低,塑性增强,这有利于材料深成形。在动态拉伸曲线中还可

以发现,曲线在过抗拉强度后有略微倾斜向下的趋势,说明材料的应变硬化效应达到极限后开始降低。这很可能是由于材料在高速拉伸过程中,局部塑性变形集中并产生大量热量,导致材料热软化。最后,通过对比准静态与动态拉伸曲线可以直观地看出,TA1 纯钛薄板在拉伸过程中有较为明显的颈缩现象,且随应变速率的增加,颈缩现象逐渐变得不再明显。

2 TA1 纯钛薄板本构模型的构建

2.1 J-C 本构模型表征

J-C 本构模型是基于工程经验提出的,它分别考虑了材料的应变率强化效应、应变硬化效应和热软化效应,且其具有参数较少、形式简单的特点,因此,被广泛嵌入各类有限元仿真软件中,其在室温下简化的数学模型表达式为:

$$\sigma = [R_{el} + B\varepsilon^n] \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (2)$$

式中: σ 为真实应力; ε 为真实应变; R_{el} 为材料准静态下的屈服强度; B 为强化系数; n 为材料变形阶段的硬化指数; C 为材料对应变速率的敏感系数; $\dot{\varepsilon}$ 为材料实际塑性应变速率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率,本文中取 $\dot{\varepsilon}_0 = 0.001 \text{ s}^{-1}$ 。

模型中应变和应变速率这两个影响变量相互解耦,单独改变其中任一变量得到的数据即可用于拟合与另一变量相关的参数。参数 R_{el} 、 B 和 n 是通过准静态下的真实应力-真实应变曲线拟合得到的,而参数 C 则需要通过动态拉伸实验的数据拟合得到。

2.2 J-C 本构模型及修正

从图 2 中可以确定 TA1 纯钛薄板的屈服强度 R_{el} 为 182.55 MPa。为了更准确地拟合出参数 B 和 n 的值,首先去除真实应力-真实应变曲线中弹性部分的数据,再将其导入 Origin 软件中进行线性拟合,得到的拟合结果如图 3 所示。拟合得到的 B 值为 441.12 MPa, n 值为 0.5343。

当参数 R_{el} 、 B 、 n 确定后,在室温条件下,式 (2) 可简化为:

$$\sigma = \sigma_e (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (3)$$

式中: σ_e 为室温时准静态下不同应变对应的真实应力; $\dot{\varepsilon}^*$ 为 $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 的简写形式。

由 TA1 纯钛薄板的拉伸实验结果可知,应变速率对于 TA1 纯钛薄板的流动应力有较大的影响,说明 TA1 纯钛薄板具有较强的应变率敏感性。为了保

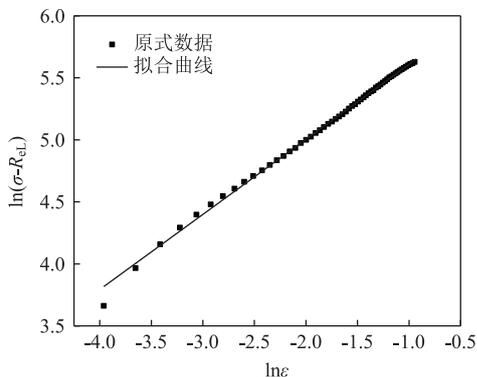


图 3 J-C 本构模型中参数 B 、 n 的拟合结果

Fig. 3 Fitting results of parameters B 、 n in J-C constitutive model

证模型参数适用于较宽的应变范围，选取了塑性应变分别为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 时的应力数据来进行拟合。在应变速率的范围为 $0.001 \sim 1000 \text{ s}^{-1}$ 、塑性应变为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 时的真实应力增幅分别为 47.97%、58.81%、59.70% 和 58.60%。但是由上面分析可知，对数应变速率与材料流动应力之间为非线性关系，因此，有必要对原始模型中的应变速率项进行修正。Huh H 等^[22]针对传统 J-C 本构模型的应变速率项提出了如下修正形式：

$$SRDF = 1 + C_1(\ln \dot{\epsilon}^*) + C_2(\ln \dot{\epsilon}^*)^2 \quad (4)$$

式中： $SRDF$ 为应变速率动态系数； C_1 、 C_2 为应变速率敏感系数。

修正前后的模型参数拟合结果如表 3 所示。

表 3 J-C 本构模型中应变速率项拟合结果
Table 3 Fitting results of strain rate terms in J-C constitutive model

拟合类型	拟合参数	等效塑性应变				平均值
		0.1	0.2	0.3	0.4	
标准模型	C	0.0402	0.0446	0.0448	0.0498	0.0449
修正模型	C_1	0.0292	0.0357	0.0387	0.0336	0.0343
	C_2	0.0016	0.0023	0.0021	0.0031	0.0023

图 4 给出了标准模型和修正模型的 $SRDF$ 曲线以及实验数据点的对比。由图 4 可见，修正模型相较于标准模型能更好地反映出应变速率对 TA1 纯钛薄板的流动应力的提高效应，因此，该模型也更为准确。最后将上述参数 R_{el} 、 B 、 n 代入，可以得到修正 J-C 本构模型的所有参数，即室温条件下 TA1 纯钛薄板的本构方程为：

$$\sigma = (182.55 + 441.12\epsilon^{0.5343}) [1 + 0.0343(\ln \dot{\epsilon}^*) + 0.0023(\ln \dot{\epsilon}^*)^2] \quad (5)$$

该本构模型的构建将为后面拉伸试样应力三轴

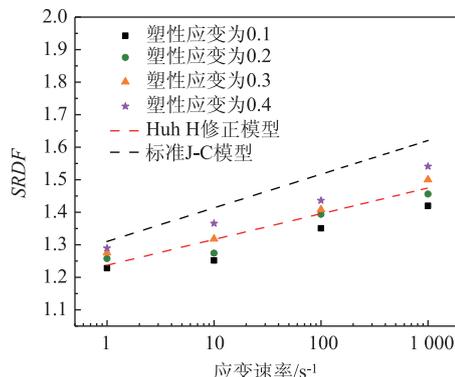


图 4 应变速率修正项的拟合对比

Fig. 4 Fitting comparison of strain rate correction terms

度的提取奠定基础。

3 TA1 纯钛薄板失效模型的构建

3.1 J-C 失效模型表征

加载过程中，有多种因素会对材料的失效过程产生影响，Johnson G R 等^[23]充分考虑了应力三轴度、应变速率效应及温度对材料失效行为的影响，建立了基于金属韧性断裂的 J-C 失效模型。该模型采用累积损伤准则，同时定义损伤参数 D ，表达式为：

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_{eq}}{\epsilon_f} \quad (6)$$

式中： $\Delta \epsilon_{eq}$ 为一个计算步迭代后的等效塑性应变增量； ϵ_f 为在当前的应力、应变速率和温度下材料的失效应变。

当损伤参数 $D=1$ 时，即认为材料失效，删除仿真中对应的材料单元^[24]。室温下 J-C 失效应变的表达形式如下：

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (7)$$

式中： D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 为材料参数； σ^* 为应力三轴度，是一个关于等效塑性应变的函数。

与 J-C 本构模型类似，式 (7) 中的两项分别代表应力状态与应变速率对材料失效应变的影响，在准静态条件下通过获取不同应力状态的拉伸试样的失效应变即可拟合得到参数 D_1 、 D_2 和 D_3 ；再利用上述不同应变速率下的标准拉伸试样的失效应变，即可拟合得到参数 D_4 。

3.2 应力三轴度与失效应变的确定

标准试样拉伸实验所对应的应力状态为单轴拉伸状态，为了得到其他代表不同应力状态的试样，

在平板试样边缘切出不同半径的半圆形缺口。本文选用的缺口试样缺口半径分别为 10.0、7.5、6.5 和 5.0 mm，如图 5 所示。

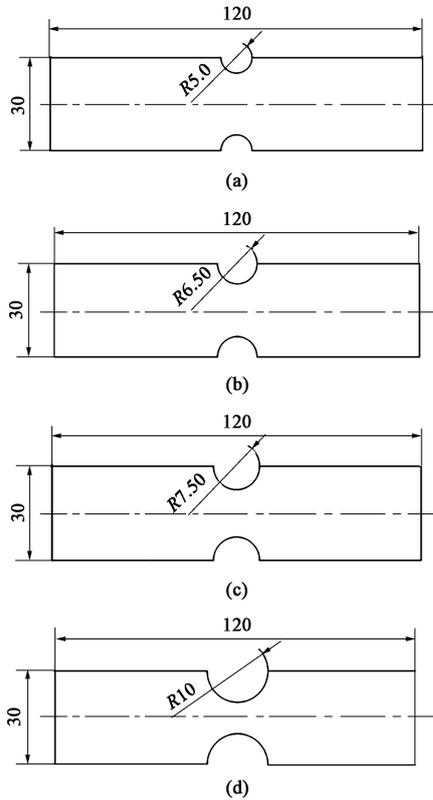


图 5 不同缺口半径的缺口拉伸试样
(a) 5.0 mm (b) 6.5 mm (c) 7.5 mm (d) 10.0 mm
Fig. 5 Notch tensile samples with different notch radii

与棒状拉伸件不同，平板件的应力三轴度无法通过公式直接计算得出，因此，本文采用有限元计算的方法，利用前面得到的 J-C 本构模型，通过仿真得到不同缺口半径的试样从开始加载至断裂的应力三轴度。在变形过程中，试样形状的改变会不断影响试样所受的应力状态，因此， σ^* 的值会不断变化。为便于定量建立失效准则，Bao Y 等^[25]提出了平均应力三轴度的概念来计算试样在拉伸过程中的应力三轴度值，以考虑试样应变的积累效应。平均应力三轴度 $\bar{\sigma}^*$ 的计算公式如下：

$$\bar{\sigma}^* = \frac{1}{\varepsilon_f} \int_0^{\varepsilon_f} \sigma^* d\varepsilon \quad (8)$$

将试样的位移-轴向力曲线出现骤降的时刻作为断裂时刻，再从有限元计算结果中提取对应时刻拉伸试样断裂截面中心点处的等效塑性应变，以此作为试样的失效应变值^[26-27]。按上述方法得到的试样的失效应变以及应力三轴度的数据如表 4 所示。

表 4 各试样对应的应力三轴度和失效应变

Table 4 Stress triaxialities and failure strains of each sample

参数	标准 试样	缺口试样			
		R10.0 mm	R7.5 mm	R6.5 mm	R5.0 mm
平均应力三轴度 $\bar{\sigma}^*$	0.33	0.43	0.48	0.5	0.53
失效应变 ε_f	0.48	0.62	0.71	0.87	0.98

3.3 失效参数的拟合

在缺口试样拉伸实验中，失效应变与应力三轴度的关系如图 6 所示。在准静态和室温条件下，J-C 失效模型可简化为：

$$\varepsilon_f = D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*) \quad (9)$$

通过 J-C 失效模型对图 6 中的数据进行拟合，得到失效参数 $D_1=0.4127$ ， $D_2=0.0021$ ， $D_3=10.6854$ 。

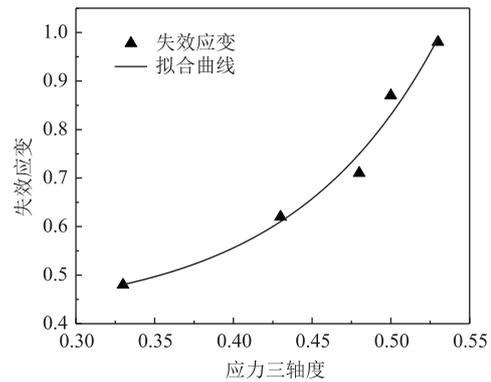


图 6 失效应变与应力三轴度的关系

Fig. 6 Relationship between fracture strain and stress triaxiality

同样，将标准试样的位移-轴向力曲线出现骤降的时刻作为断裂时刻，并读取对应的等效塑性应变作为失效应变，以 $\dot{\varepsilon}_0=0.001 \text{ s}^{-1}$ 作为参考应变速率，失效应变随无量纲应变速率的对数的变化如图 7 所示。可以看到，TA1 纯钛薄板的失效应变随应变速率的增加呈现先减小再增加的趋势，而 J-C 本构模型认为材料失效应变是应变速率的单调函数，因此，本文采用应变速率为 $0.001 \sim 1000 \text{ s}^{-1}$ 这个范围内的标准试样的失效应变数据进行拟合。当失效参数 D_1 、 D_2 、 D_3 以及 σ^* 确定后（由表 4 可知标准试样的 σ^* 为 0.33），室温下 J-C 失效模型可简化为：

$$\varepsilon_f = K(1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (10)$$

式中： K 为待定常数，本式中取 $K=0.4867$ 。

通过式 (10) 对图 7 中的数据进行拟合，得到的应变速率项失效参数 $D_4=0.0183$ 。因此，在不考

考虑温度影响时，TA1 纯钛薄板在室温条件下的失效模型为：

$$\varepsilon_f = (0.4127 + 0.0021e^{10.6854\sigma^*}) (1 + 0.0183\ln\dot{\varepsilon}^*) \quad (11)$$

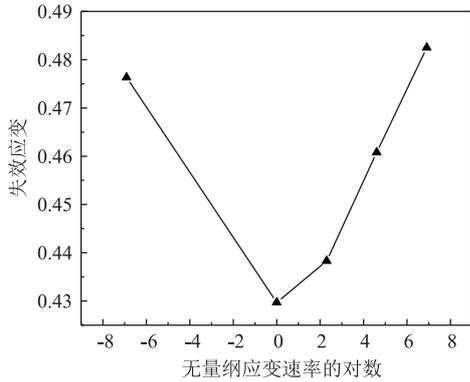


图7 失效应变与应变速率的关系

Fig.7 Relationship between fracture strain and strain rate

4 J-C 本构及失效模型的验证

为了验证本文建立的本构及失效模型的准确性，利用 LS-DYNA 软件开展了有限元分析，将仿真中拉伸试样断裂截面中心点处的位移-轴向力曲线与拉伸机测量得到的数据进行对比。图 8 为试样在不同应变速率下的实验曲线与修正前后的 J-C 本构模型位移-轴向力曲线的对比结果。结果表明，在载荷达到最大值，即试样应力达到其抗拉强度之前，修正后的 J-C 本构模型和失效模型可以更好地描述 TA1 纯钛在动态加载下的塑性变形特征。材料发生颈缩后，逐渐产生裂纹直至断裂，此时试样的平行拉伸区域的变形不再均匀，试样不再处于单轴应力状态，而是复杂的三向应力状态，因此，不能再使用常规的公式转换得到材料的真实应力、真实应变，需要借助数值模拟的方法获取材料颈缩后的真实应变。

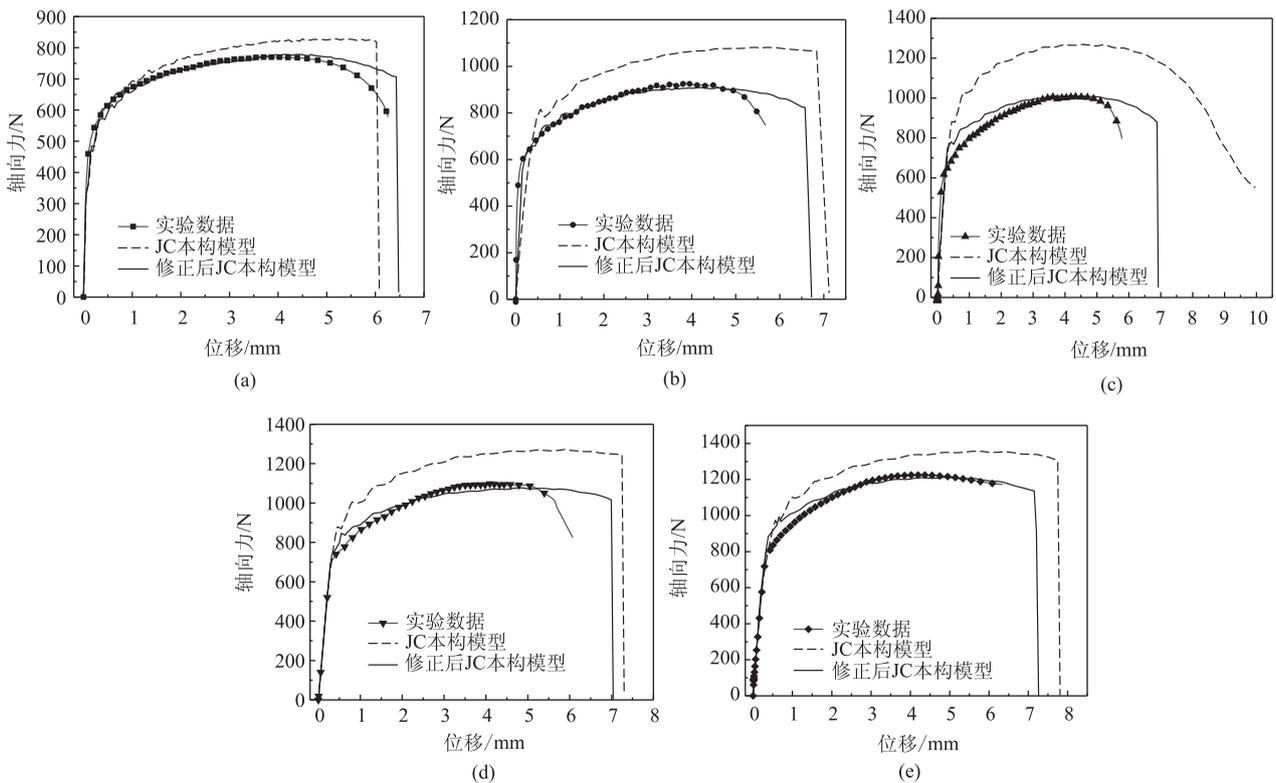


图8 在不同应变速率下实验与修正前后 J-C 本构模型的位移-轴向力曲线对比结果

(a) $\dot{\varepsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\varepsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\varepsilon} = 100 \text{ s}^{-1}$ (e) $\dot{\varepsilon} = 1000 \text{ s}^{-1}$

Fig.8 Comparison results of displacement-axial force curves for experiment and J-C constitutive models before and after correction at different strain rates

5 结论

(1) 通过准静态与动态平面拉伸实验分析了

TA1 纯钛薄板的静动态力学性能，结果表明 TA1 纯钛薄板在室温下的屈服强度较高，屈强比低，是一种性能优异的金属材料；同时，TA1 纯钛薄板对应变速率有较强的敏感性，高应变速率下材料的流

动应力显著提升,且随着应变速率的增加,颈缩现象逐渐不明显,材料屈强比进一步降低。说明高速成形方法可显著提升 TA1 纯钛薄板的塑性,有利于材料的深成形。

(2) 基于准静态与动态拉伸实验数据,建立了能够体现 TA1 纯钛薄板在较大应变以及高应变速率范围内的 J-C 本构模型;基于缺口试样准静态拉伸实验,结合有限元仿真研究了 TA1 纯钛薄板的失效应变与应力三轴度之间的关系,结果表明 TA1 纯钛薄板的失效应变随着应力三轴度的增加而增加。同时建立了 TA1 纯钛薄板在室温条件下的 J-C 失效模型,最后通过实验数据和有限元仿真对比验证了该模型的有效性与实用性,说明该模型可以用来描述 TA1 纯钛薄板在不同应变速率下的塑性变形和失效行为。

参考文献:

- [1] Qiu Z, Tetsuhide Shimizu, Tomomi Shiratori, et al. Tensile properties and constitutive model of ultrathin pure titanium foils at elevated temperatures in microforming assisted by resistance heating method [J]. *Materials & Design*, 2014, 63: 389-397.
- [2] 苏娟华,周铁柱,任凤章,等. 纯钛高温拉伸性能及断口形貌 [J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25 (6): 1471-1479.
Su J H, Zhou T Z, Ren F Z, et al. High-temperature tensile properties and fracture morphology of industrial pure titanium [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25 (6): 1471-1478.
- [3] Zhang Z Y, Yang H, Li H, et al. Quasi-static tensile behavior and constitutive modeling of large diameter thin-walled commercial pure titanium tube [J]. *Materials Science and Engineering*, 2013, 569: 96-105.
- [4] 韩言,赵飞,万明攀,等. TC17 钛合金热流变行为及组织演变机制研究 [J]. *稀有金属*, 2020, 44 (3): 234-241.
Han Y, Zhao F, Wan M P, et al. Thermal flow behaviors and microstructure evolution of TC17 alloy [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2020, 44 (3): 234-241.
- [5] 罗铜,许磊,刘建华,等. 微波烧结制备钛铝合金研究 [J]. *稀有金属*, 2020, 44 (5): 469-475.
Luo T, Xu L, Liu J H, et al. Study on preparation of titanium aluminum alloy by microwave sintering [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2020, 44 (5): 469-475.
- [6] 韩秀峰,王伦,朱明亮,等. TA19 钛合金电子束焊接头微观组织与性能研究 [J]. *稀有金属*, 2021, 45 (7): 778-785.
Han X F, Wang L, Zhu M L, et al. Microstructures and mechanical properties research of electron beam welding joint of TA19 titanium alloy [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2021, 45 (7): 778-785.
- [7] 刘大海,陈劲东,李波,等. TA18 中强钛合金管数控弯曲成形工艺与结构参数显著性分析 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (4): 156-165.
- [8] Liu D H, Chen J D, Li B, et al. NC bending process and significance analysis on structural parameters of TA18 medium strength titanium alloy tube [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (4): 156-165.
- [9] Wu Z L, Cao Q L, Fu J Y, et al. An inner-field uniform pressure actuator with high performance and its application to titanium bipolar plate forming [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 155: 103570.
- [10] Dong P X, Li Z Z, Feng S, et al. Fabrication of titanium bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells by uniform pressure electromagnetic forming [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46 (78): 38768-38781.
- [11] 张贵华,江海涛,吴波,等. 退火温度对纯钛 TA1 织构及各向异性的影响 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2019, 50 (4): 806-813.
Zhang G H, Jiang H T, Wu B, et al. Effects of the annealing temperature on the texture and anisotropy of pure titanium TA1 [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2019, 50 (4): 806-813.
- [12] 丁凌,王志录,孙前江,等. TC6 钛合金超塑性变形 [J]. *航空材料学报*, 2016, 36 (6): 23-28.
Ding L, Wang Z L, Sun Q J, et al. TC6 titanium alloy superplastic deformation [J]. *Journal of Aviation Materials*, 2016, 36 (6): 23-28.
- [13] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [A]. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistic* [C]. Hague, 1983.
- [14] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate [J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51 (3): 1498-1504.
- [15] Chen J L, Li J W, Li Z X, et al. Experiment research on rate-dependent constitutive model of Q420 steel [J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 153: 816-823.
- [16] 邓将华,唐超,李春峰,等. TA1 本构模型的确定 [J]. *塑性工程学报*, 2012, 19 (6): 114-117.
Deng J H, Tang C, Li C F, et al. Determination of TA1 constitutive model [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2012, 19 (6): 114-117.
- [17] 苏娟华,韩亚玮,任凤章,等. 纯钛 TA1 热压缩变形行为及本构方程 [J]. *材料热处理学报*, 2014, 35 (5): 196-200.
Su J H, Han Y W, Ren F Z, et al. Industrial pure titanium TA1 thermal compression deformation behavior and constitutive equation [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35 (5): 196-200.
- [18] 陈刚,陈忠富,徐伟芳,等. 45 钢的 J-C 损伤失效参量研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27 (2): 131-135.

- Chen G, Chen Z F, Xu W F, et al. 45 steel J-C injury failure parameter study [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27 (2): 131-135.
- [18] 朱浩, 朱亮, 陈剑虹. 应力三轴度和应变速率对 6063 铝合金力学性能的影响及材料表征 [J]. *材料科学与工程学报*, 2007, 27 (3): 358-362.
- Zhu H, Zhu L, Chen J H. Influence of stress triaxial degree and strain rate on the mechanical properties of 6063 aluminum alloy and material characterization [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2007, 27 (3): 358-362.
- [19] Lou Y S, Huh H. Extension of a shear-controlled ductile fracture model considering the stress triaxiality and the Lode parameter [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2013, 50 (2): 447-455.
- [20] ISO 6892-1: 2016, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [21] 毛云飞. AA5052 铝合金高速下本构及断裂模型研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- Mao Y F. Study on Constitutive and Fracture Model of AA5052 Aluminum Alloy [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [22] Huh H, Kang W J, Han S S. A tension split Hopkinson bar for investigating the dynamic behavior of sheet metal [J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42 (1): 8-17.
- [23] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21 (1): 31-48.
- [24] 门建兵, 卢易浩, 蒋建伟, 等. 杆式 EFP 用钨钼合金 JC 失效模型参数 [J]. *高压物理学报*, 2020, 34 (6): 136-143.
- Men J B, Lu Y H, Jiang J W, et al. JC failure model parameters of tantalum-tungsten alloy for rod EFP [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34 (6): 136-143.
- [25] Bao Y, Wierzbicki T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46 (1): 81-98.
- [26] 肖新科. 双层金属靶的抗侵彻性能和 Taylor 杆的变形与断裂 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- Xiao X K. The Ballistic Resistance of Double-layered Metallic Target and the Deformation & Fracture of Taylor Rod [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [27] 衣海娇, 甄莹, 曹宇光, 等. 6061-T6 铝合金断裂应变与应力三轴度关系研究 [J]. *机械强度*, 2020, 42 (3): 551-558.
- Yi H J, Zhen Y, Cao Y G, et al. Study on the relationship between fracture strain and stress of 6061-T6 aluminum alloy [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2020, 42 (3): 551-558.

《锻压技术》杂志敬告新老广告客户

2023 年广告征集工作火热进行中。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件 (旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧) 等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

(1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

(2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。

愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst_linyutong@163.com

电话: 010-62920652 Http: //www.fstjournal.net

