

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0308

# 金属材料在复杂应力状态下的 塑性流动特性及本构模型\*

秦彩芳, 许泽建, 窦 旺, 杜雨田, 黄风雷

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 工程应用中, 金属材料和结构往往处于复杂应力状态。材料的塑性行为会受到应力状态的影响, 要精确描述材料在复杂应力状态下的塑性流动行为, 必须在本构模型中考虑应力状态效应的影响。然而, 由于在动态加载下材料的应变率效应和应力状态效应相互耦合、难以分离, 给应力状态效应的研究和模型的建立造成很大困难。通过对 Ti-6Al-4V 钛合金材料开展不同加载条件下的力学性能测试, 提出了一个包含应力三轴度和罗德角参数影响的新型本构模型, 并通过 VUMAT 用户子程序嵌入 ABAQUS/Explicit 软件。分别采用新提出的塑性模型和 Johnson-Cook 模型对压剪复合试样的动态实验进行了数值模拟。结果表明, 新模型不仅在对材料本构曲线的拟合方面具有较强的优势, 而且由该模型所得到的透射脉冲和载荷-位移曲线均更加准确。因此, 该模型能够更精确地描述和预测金属材料在复杂应力状态下的塑性流变行为。

**关键词:** 应力状态效应; 应力三轴度; 罗德角参数; 本构模型

中图分类号: O347.3 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

## Plastic flow properties and constitutive model of metallic materials under complex stress states

QIN Caifang, XU Zejian, DOU Wang, DU Yutian, HUANG Fenglei

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Metallic materials are widely used in automotive, aerospace, energy, national defense, and other important fields due to their excellent mechanical properties. During service periods, metallic materials are generally subjected to complex stress states. Recent researches reveal that the plastic behavior of materials is affected by the stress state. Therefore, to accurately describe the plastic flow behavior of materials under complex stress states, the influence of the stress state must be considered in the constitutive model. Under dynamic loading, however, the effects of strain rate and stress state are coupled, which makes it difficult to study the effect of stress state and to establish a stress-state-dependent constitutive model. In this work, mechanical tests were performed under various loading conditions including uniaxial compression, uniaxial tension, and simple shear using the MTS universal testing machine and the split Hopkinson bars technique. The stress-strain curves of Ti-6Al-4V were obtained over a wide range of strain rates and temperatures. It is observed that stress states have an obvious effect on the plastic flow properties and work-hardening characteristics of the material. Based on the experimental results, a new constitutive model that incorporates the influence of the stress triaxiality and the Lode angle parameter was proposed. Under tensile or compressive loading conditions, the flow stress determined by the J-C model is significantly lower than the test results, while the present model can predict the flow stress accurately. To check the applicability of the proposed model, the

\* 收稿日期: 2021-07-20; 修回日期: 2021-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(11772062, 12072040)

第一作者: 秦彩芳(1996—), 女, 硕士研究生, 3025230852@qq.com

通信作者: 许泽建(1979—), 男, 博士, 副教授, xuzejian@bit.edu.cn

dynamic experiment of a specimen under the compression-shear combined load was simulated by both the J-C model and the proposed model implemented in the ABAQUS/Explicit software via the VUMAT user subroutine. The results show that the present model exhibits a higher accuracy in the prediction of the flow stress curves. Moreover, this model can predict both the transmitted pulse and the force-displacement curves more accurately. Therefore, the new model can describe the stress state effect successfully and predict the plastic behavior of the material under complex stress states more precisely.

**Keywords:** stress state effect; stress triaxiality; Lode angle parameter; constitutive model

金属材料因其优异的力学性能而被广泛应用于航空航天、交通运输、能源、国防等重要工业领域,因此研究金属材料在不同加载条件的力学行为具有重要意义。然而,要在数值模拟中准确预测材料的塑性变形和失效过程,就要对材料的塑性模型及屈服准则提出更高的要求。在塑性本构模型的研究中,研究者多采用与应变率和温度有关的塑性流动模型,其中包括经验型<sup>[1-2]</sup>以及基于物理意义的模型<sup>[3-5]</sup>。近年来,人们发现应力状态对金属材料的塑性变形也存在较大影响,因此要在工程计算中获得精确的结构响应,必须建立考虑应力状态效应的塑性本构模型。

有关应力状态对材料塑性的影响目前已有较多研究。Spitzig 等<sup>[6-7]</sup>在拉伸和压缩两种不同的应力状态下得到了两种调质钢在不同静水压力下的应力-应变曲线,发现材料的屈服应力和流动应力均对静水压力敏感,表明了材料的力学特性与静水压力的相关性。Hu 等<sup>[8]</sup>认为材料在拉伸和压缩下的强度差不仅仅是静水压力引起的,应力状态也是导致强度差的主要因素,从而提出了考虑应力状态影响的各向同性材料屈服准则并用金属和聚合物材料进行实验验证。Cazacu 等<sup>[9]</sup>发现用应力偏量的主值表示屈服函数可以很好地描述各向异性材料和拉压屈服不对称性材料的塑性行为。Driemeier 等<sup>[10]</sup>采用光滑和预制缺口的拉伸试样和剪切试样,研究了应力强度、应力三轴度和罗德参数对铝合金材料塑性和失效行为的影响。Brünig 等<sup>[11]</sup>采用实验和数值模拟相结合的方法,提出了一种基于应力三轴度和罗德参数的塑性模型和损伤准则,并讨论了应力三轴度对韧性金属损伤起始和演化的影响。Bai 等<sup>[12]</sup>提出了一种与静水压力和罗德角相关的非对称金属塑性模型的一般形式,并详细讨论了修正方法,而后通过铝 2024-T351 的实验结果对新模型的准确性进行了验证。Gao 等<sup>[13-14]</sup>注意到应力状态对铝 5083 合金的塑性响应和韧性断裂行为有明显的影 响,提出了与静水压力和应力偏量的第三不变量相关的塑性失效模型,并发现应力三轴度主要影响材料的韧性断裂应变,而罗德角对塑性的影响较大。

目前,考虑材料应力状态效应的塑性特性及本构模型的研究大多是在准静态条件下进行的,而在动态加载条件下的相关研究较少。这是因为在高应变率下,材料受到应变率效应和应力状态效应的耦合作用<sup>[15-16]</sup>,难以单独区分。此外,在进行不同加载条件的力学性能测试时,研究者们采用的试样类型和尺寸各异<sup>[17-20]</sup>,导致实验结果较为分散,这也给综合考虑应变率和应力状态效应的本构模型的建立带来了困难。针对以上问题,许泽建等<sup>[21-22]</sup>提出了一种新型双剪切试样,可以在准静态和动态加载下获得材料在接近纯剪切条件下的流动应力曲线,从而实现了应力状态效应的解耦。采用该试样对多种金属材料在广泛应变率下的塑性流动、失效行为以及材料的剪切本构特性<sup>[23-26]</sup>进行了研究,发现材料的流动应力水平和加工硬化效应明显受到应力状态的影响;同时发现剪切本构模型对剪切测试中应力波和流动应力曲线的预测更加精确<sup>[27-28]</sup>,因此在工程应用中确定本构模型时必须考虑材料所处的真实应力状态。

基于以上研究,本文中结合实验测试提出一个综合考虑应变率、温度和应力状态效应的塑性本构模型,并对其有效性进行验证,从而实现在复杂应力状态下准确预测金属材料和结构的塑性流变及动态响应行为。

## 1 应力状态表征

在主应力空间中,与 3 个主应力坐标轴夹角相同且过原点的直线称为等倾线,与等倾线垂直且过原点的平面称为  $\pi$  平面,如图 1 所示。在等倾线上,任意一点对应一个静水压力,其应力偏量为零,各个方向受到相同的压应力或拉应力。在  $\pi$  平面上只有应力偏量,其静水压力为零,主要与物体的塑性变形相关。

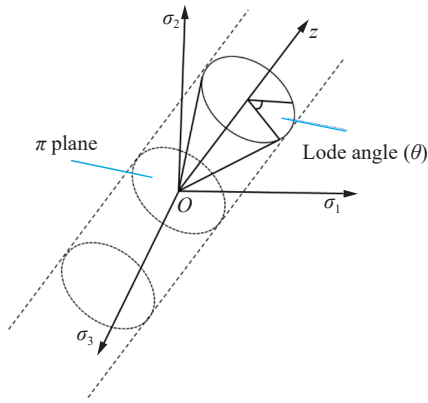


图 1 主应力空间几何表示

Fig. 1 Geometric representation of the principal stress space

表达式为:  $S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}$ , 其中  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 符号。应力偏张量的第二不变量  $J_2$  和第三不变量  $J_3$  分别定义为:

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = -(S_1 S_2 + S_2 S_3 + S_3 S_1) = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (4)$$

$$J_3 = \det(S_{ij}) = \frac{1}{3} S_{ij} S_{jk} S_{kl} = S_1 S_2 S_3 \quad (5)$$

式中:  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  为 3 个主应力偏量, 其中  $S_1$  为最大主应力偏量。

在主应力空间中, 应力状态矢量在  $\pi$  平面的投影与最大主应力偏量  $S_1$  的夹角定义为罗德角  $\theta$ , 其可以表示为应力偏张量的第三不变量的函数<sup>[29]</sup>:

$$r = \sqrt[3]{\frac{27}{2} J_3} \quad (6)$$

$$\xi = \left(\frac{r}{\sigma_e}\right)^3 = \cos(3\theta) \quad (7)$$

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{6}{\pi} \theta = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos \xi \quad (8)$$

本文中采用均一化的罗德角参数  $\bar{\theta}$ , 取值范围为  $[-1, 1]$ 。不同应力状态下, 应力三轴度和罗德角参数的值不同, 对单轴拉伸, 有  $\eta = \frac{1}{3}$ ,  $\bar{\theta} = 1$ ; 对单轴压缩, 有  $\eta = -\frac{1}{3}$ ,  $\bar{\theta} = -1$ ; 在纯剪切条件下, 则有  $\eta = \bar{\theta} = 0$ 。

## 2 实验方法及结果

实验材料为商用 Ti-6Al-4V 钛合金, 其原始微观组织形貌如图 2 所示。分别采用单轴拉伸、单轴压缩和剪切 3 种不同的加载条件进行实验, 获取材料在广泛应变率和温度下的力学特性。单轴拉伸、单轴压缩和剪切实验分别采用光滑圆棒试样、圆柱试样和新设计的双剪切试样<sup>[2]</sup>, 几何形状和尺寸如图 3 所示。其中, 准静态实验采用 MTS 万能试验机, 动态加载采用霍普金森压杆和拉杆, 详细实验装置参见文献 [25]。

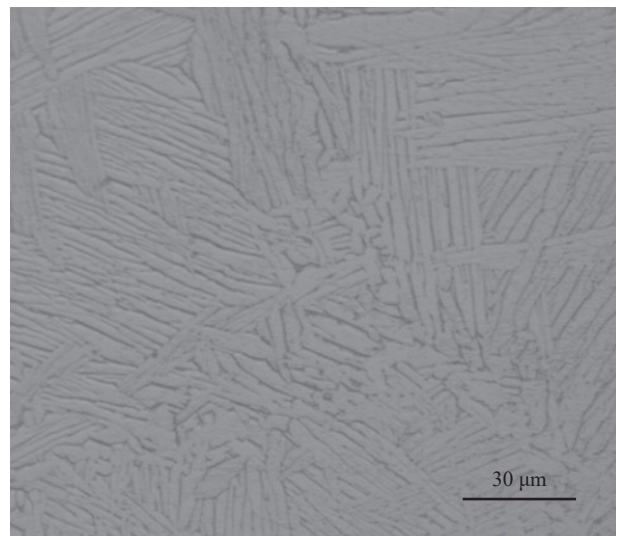


图 2 Ti-6Al-4V 材料的原始组织

Fig. 2 Microstructure of Ti-6Al-4V material

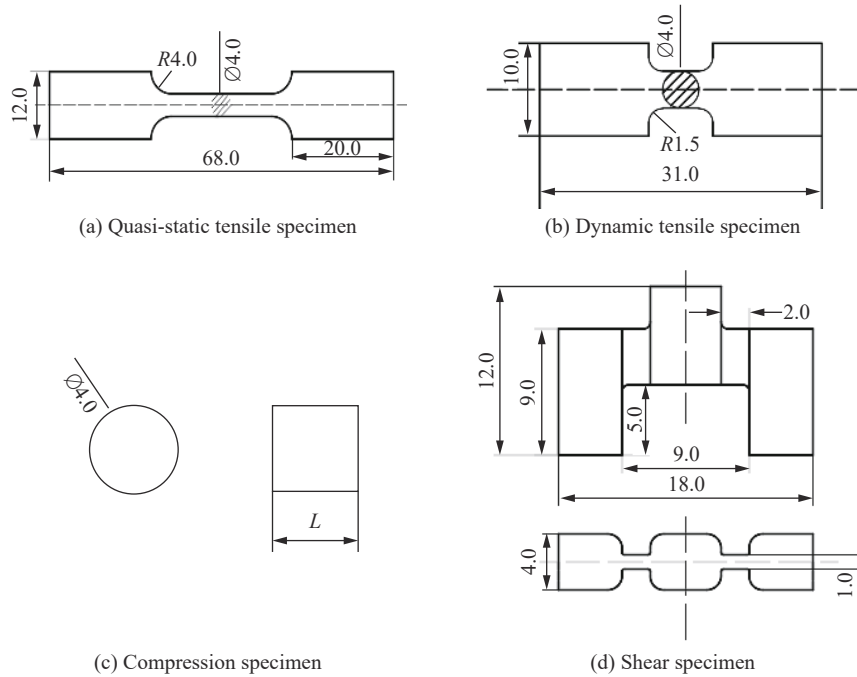


图 3 试样结构示意图(单位: mm)

Fig. 3 Schematic diagram of the test specimens(unit: mm)

图 4 为准静态和动态加载时材料在不同应力状态下的等效应力-等效应变曲线对比图。在剪切实验中,假设试样处于纯剪切应力状态,根据 von-Mises 假定,采用下式将剪应力  $\tau$  转化为等效应力:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3}\tau \tag{9}$$

对于大变形,采用下式将剪应变  $\gamma$  转化为等效应变<sup>[30]</sup>:

$$\varepsilon_{eq} = \ln \sqrt{1 + \gamma + \gamma^2/2} \tag{10}$$

由图 4 可知,在不同的加载条件下,材料的加工硬化效应有所差别。准静态加载时,Ti-6Al-4V 在拉伸、压缩和剪切状态下,随着塑性应变的增加,材料的流动应力水平明显增高,其加工硬化效应均较为明

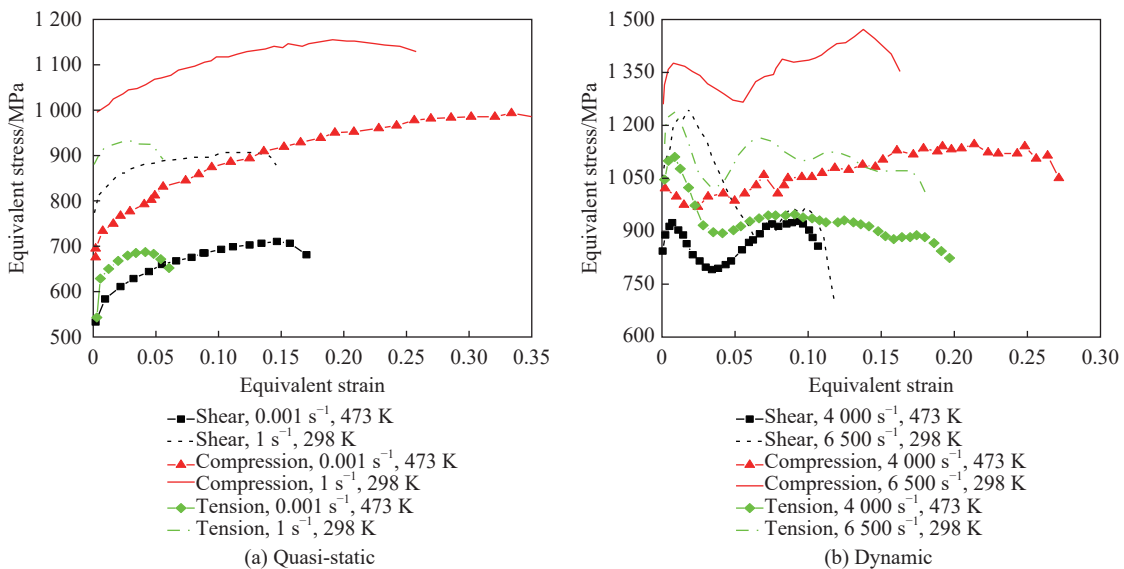


图 4 不同应力状态下的等效应力-等效应变曲线

Fig. 4 The equivalent stress-equivalent strain curves under different stress states

显。然而在动态加载下, 只在压缩状态下材料表现出明显的加工硬化效应, 可见材料的加工硬化效应与应力状态相关。此外, 无论准静态还是动态加载等效应力幅值均存在明显差别, 且在纯剪切状态下流动应力水平最低, 压缩状态下流动应力水平最高。Ti-6Al-4V 材料在拉伸和压缩情况下的不对称性与多种因素相关, 比如加工方式、晶粒尺寸和材料取向等。在本研究中, 所有试样均沿棒材轴向方向取材, 保证材料在拉伸、压缩和剪切条件下等效应力幅值差别是由应力状态引起的。因此, 为了更好地表征材料的本构行为, 应在塑性模型中考虑应力状态效应的影响。

### 3 基于应力状态的塑性本构模型

为了更准确地表征金属材料的塑性行为, 提出一种与材料应力状态相关的塑性本构模型, 即在基本塑性模型的基础上将应力三轴度和罗德角参数的影响考虑在内。该模型中, 材料的流动应力可表示为:

$$\bar{\sigma} = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) f(\eta) g(\bar{\theta}) \quad (11)$$

式中:  $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$  为任意一个包含应变、应变率和温度效应的塑性本构模型;  $f$  和  $g$  分别为应力三轴度和罗德角参数的函数, 用于反映应力状态的影响。根据获得的实验数据,  $f$  和  $g$  分别采用如下形式:

$$f(\eta) = 1 - c_\eta(\eta - \eta_0) \quad (12)$$

$$g(\bar{\theta}) = 1 + c_1 |\bar{\theta} - c_2| \quad (13)$$

式中:  $c_\eta$  和  $\eta_0$  为与应力三轴度相关的材料参数,  $c_1$  和  $c_2$  为与罗德角参数相关的材料参数。

由式(11)~(13)可知, 可以通过选取适当的模型参数使得  $\bar{\sigma}$  在  $\eta = \bar{\theta} = 0$  时接近于  $\bar{\sigma} = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ , 因此可以根据剪切实验结果确定本构模型  $\bar{\sigma} = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ 。工程中常用 Johnson-Cook(J-C)模型描述材料的应变率和温度效应, 因此在本工作中选用 J-C 模型描述  $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ 。J-C 模型的表达式为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (14)$$

$$T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r) \quad (15)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $C$ 、 $m$  为材料常数,  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$  为无量纲塑性应变率,  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变率,  $T_r$  为参考温度,  $T_m$  为熔点温度。在本工作中参考应变率为  $1 \text{ s}^{-1}$ , 熔点温度为  $1941 \text{ K}$ , 参考温度为  $93 \text{ K}$ 。

采用剪切实验数据确定 J-C 模型的材料参数后, 结合拉伸和压缩加载条件下的实验结果, 可确定模型的应力状态参数  $c_\eta$ 、 $\eta_0$ 、 $c_1$  和  $c_2$ 。在确定模型参数时, 使用回归分析和约束优化方法使模型的预测结果和实验数据的误差最小。在优化过程中, 考虑了材料的绝热温升。本文中所确定的塑性本构模型参数见表 1。

表 1 新模型材料常数

Table 1 Material constants of the new model

$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$C$	$m$	$c_\eta$	$\eta_0$	$c_1$	$c_2$
971.59	362.39	0.1298	0.0160	0.5839	0.0501	0	0.1692	0.4264

在主应力空间中, 该模型的屈服面以及在  $\pi$  平面上的屈服轨迹如图 5~6 所示, 其中图 6 同时给出了 Mises 和 Tresca 准则的屈服轨迹以方便比较。从屈服轨迹可以看出, 在该模型中, 当应力状态发生变化时, 屈服面也随之改变。

由表 1 可知, 在简单剪切状态下, 新提出的塑性本构模型与 J-C 模型基本一致。将实验得到的剪应力和剪应变曲线转化为等效应力和等效应变曲线, 并与模型计算结果进行比较, 如图 7 所示。由图可知, 在准静态加载条件下, 该模型与实验数据吻合较好。在动态加载下, 当应变率为  $1500 \text{ s}^{-1}$ 、温度为  $873 \text{ K}$  时, 模型计算结果稍高于实验曲线, 但误差仍较小。当应变率进一步提高至  $6500 \text{ s}^{-1}$  时, 由于应力波的传

播和惯性效应, 实验曲线在初始阶段出现较大的震荡, 但其流动应力与计算曲线较为接近。由以上分析可知, 该模型可以准确反映剪切条件下材料的塑性流动特性。

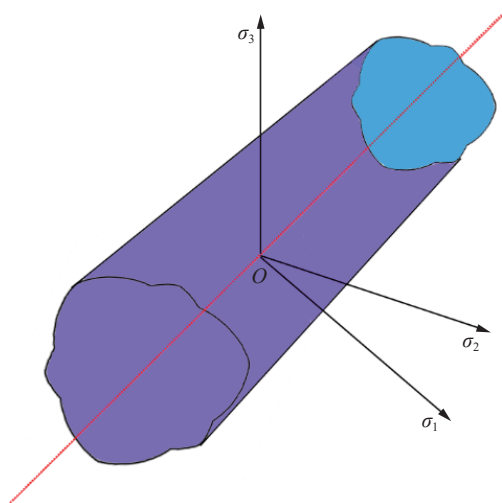


图 5 新模型屈服面

Fig. 5 The yield surface of the new model

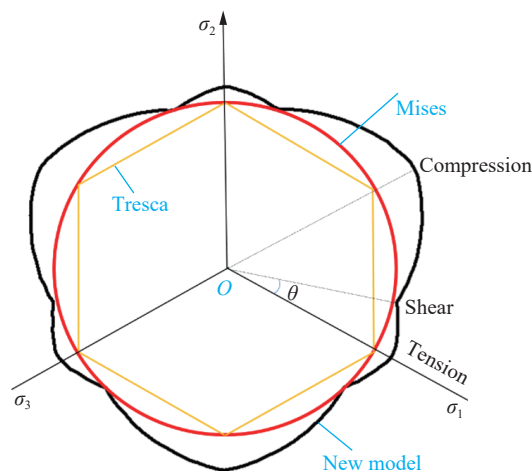


图 6 新模型屈服轨迹图

Fig. 6 The yield locus of the new model

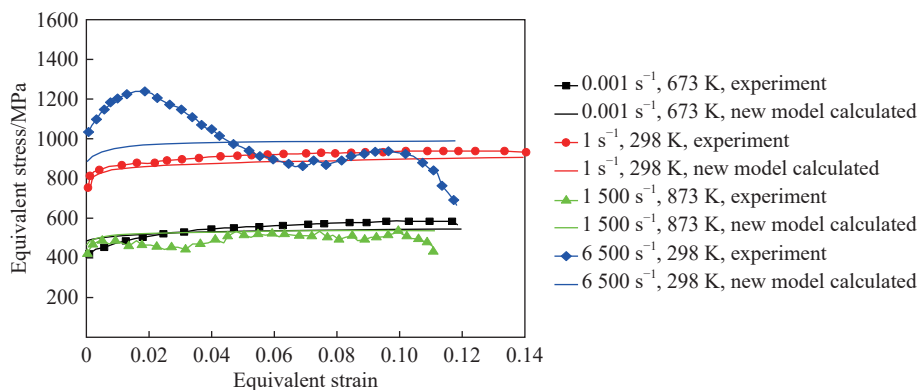


图 7 剪切试验结果与新模型对比

Fig. 7 Comparison of the shear test results with the new model

为了比较 J-C 模型和新模型的预测效果, 采用下式计算模型与实验的误差  $E_r$ :

$$E_r = \frac{1}{N} \sum_i \left| \frac{\sigma_{\text{exp}}^{(i)} - \sigma_{\text{model}}^{(i)}}{\sigma_{\text{exp}}^{(i)}} \right| \times 100\% \quad (16)$$

式中:  $\sigma_{\text{exp}}$  为实验测得的流动应力,  $\sigma_{\text{model}}$  为本构模型测得的流动应力。

图 8 为不同应变率和温度下获得的压缩实验曲线, 图中还同时给出了分别由剪切实验拟合的 J-C 本构模型和本文提出的模型所计算得到的应力-应变曲线。由剪切实验拟合的 J-C 模型得到的曲线在准静态和动态加载情况下均明显低于实验曲线, 模型与实验曲线的平均误差分别为 25.2% 和 21.1%, 这是由于 J-C 模型未能考虑应力状态效应对材料造成的影响, 因此不能准确反映材料在不同加载条件下的塑性行为; 在各应变率下, 由新模型得到的应力-应变曲线均接近于实验结果。在动态加载情况下, 实验曲线存在较大波动, 但由新模型给出的两条曲线均与实验数据的整体应力水平吻合较好。新模型与实验结果的平均误差分别为 3.7%、3.9%(见表 2)。因此, 应力状态对材料力学性能的影响不容忽视; 相比 J-C 模型而言, 新模型可以更准确地预测材料在不同应力状态下的等效应力-等效应变曲线。

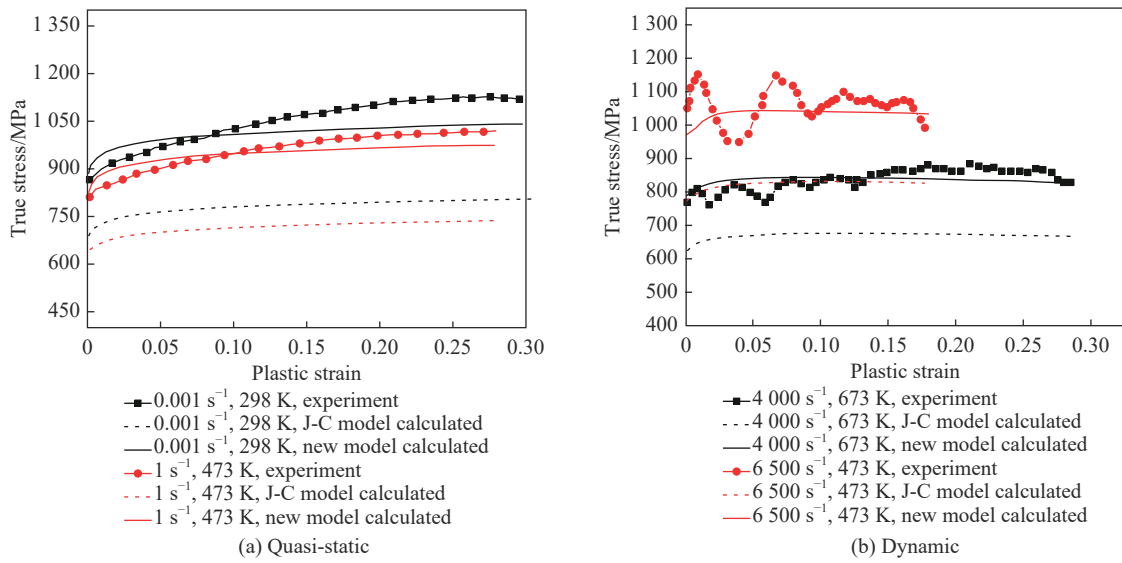


图 8 压缩试验结果与两种模型(J-C 模型和新模型)结果比较  
Fig. 8 Comparison of the compression test results with the J-C model and the new model

表 2 不同应力状态下新模型和 J-C 模型(根据剪切试验结果建立)与拉压试验结果的平均误差

Table 2 Average error of the new and J-C models under different stress states compared with the experimental results

应力状态	准静态加载误差/%		动态加载误差/%	
	J-C model	New model	J-C model	New model
单轴压缩	25.2	3.7	21.1	3.9
单轴拉伸	10.5	1.5	9.7	4.8

均误差见表 2。因此,在拉伸和压缩载荷作用下,使用新模型能够更加准确地预测材料的应力-应变曲线,说明该模型可以准确描述材料的应力状态效应对其塑性流动特性的影响。

图 9 为在单轴拉伸加载下,实验结果和两种模型计算所得应力-应变曲线的对比。在准静态加载下,由剪切实验得到的 J-C 模型的流动应力水平比实验值明显偏低,该现象与单轴压缩结果类似。在动态载荷下, J-C 模型曲线整体明显低于实验曲线;然而,随着应变量的增加,其流动应力逐渐趋于实验值。新模型无论在准静态还是动态加载下,均能较好地反映材料的加工硬化情况和流动应力水平。两种模型与实验数据的平均误差见表 2。

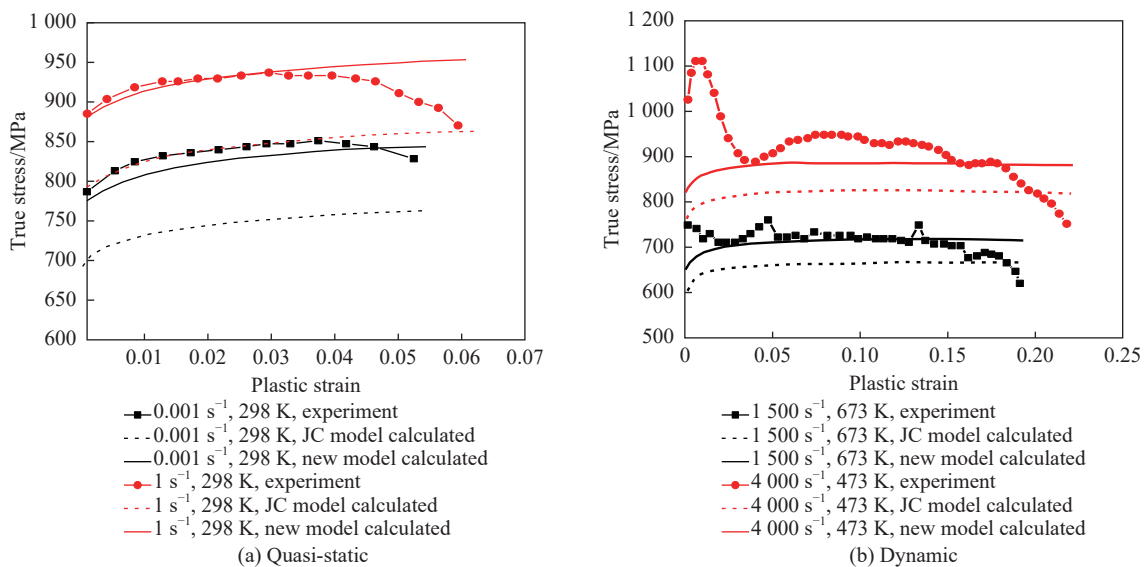


图 9 拉伸试验结果与两种模型(J-C 模型和新模型)结果比较  
Fig. 9 Comparison of the tension test results with the J-C model and new model

### 4 模型的验证

为了检验所提出的模型对于复杂应力状态下材料流动特性的预测精度, 设计了图 10 所示的压剪复合试样并开展动态测试。同时, 通过编写用户自定义子程序将新模型嵌入 ABAQUS 有限元软件, 并对压剪实验进行数值模拟。建模时, 对入射杆、试样和透射杆进行三维实体建模, 试样放置在入射杆与透射杆之间, 且其端面接触设置为“硬接触”, 不考虑各接触面的摩擦效应。入射杆与透射杆均采用 C3D8R 六面体缩减积分单元; 由于要考虑试样在加载过程中的绝热温升, 试样采用 C3D10MT 温度位移耦合单元。为了更好地模拟剪切区的应力应变场, 在试样剪切区进行局部加密。模型装配图如图 10(b) 所示, 模拟中各部分的材料和物理参数见表 3。

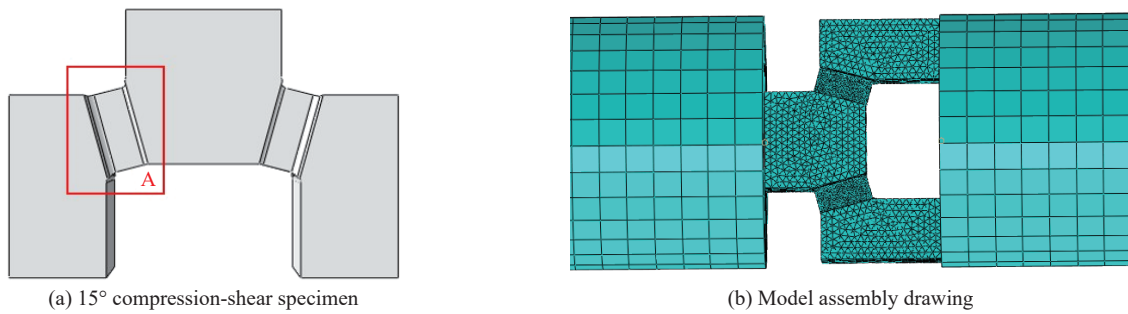


图 10 15°压剪试样和有限元模型示意图

Fig. 10 Schematic diagrams of a 15° compression-shear specimen and the finite element model

表 3 有限元分析中各部件的物理参数

Table 3 Physical parameters of each component in the finite element analysis

部位	材料	$\rho/$ ( $\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$ )	$E/$ GPa	$\mu$	$\lambda/$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}$ )	$c/$ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}$ )
入射杆/透射杆	18Ni钢	8.0	190	0.3	-	-
试样	Ti-6Al-4V	4.43	114	0.33	6.7	586

在数值模拟中分别采用 J-C 模型和新模型时, 所得到的透射应变脉冲及力-位移曲线与实验结果的对比如图 11 所示。从压剪试样的模拟与实验对比分析可知, 两种模型均能捕捉到应变波信号的变化趋势, 但 J-C 模型明显低估了实验数据(见图 11(a))。由图 11(b)可知, J-C 模型和新提出的模型在载荷-位移曲线的上升沿均与实验数据基本重合。随着位移的不断增加, 由 J-C 模型所预测的载荷-位移曲线与实验曲线出现明显偏差, 而新模型则始终与实验数据吻合较好。这说明新模型能够准确预测材料在复杂应力状态下的塑性变形行为。此外, 为了分别研究应力三轴度和罗德角参数对屈服应力的影响程度, 图 12 给出了新模型只考虑应力三轴度( $c_1 = 0$ )或罗德角参数( $c_\eta = 0$ )时

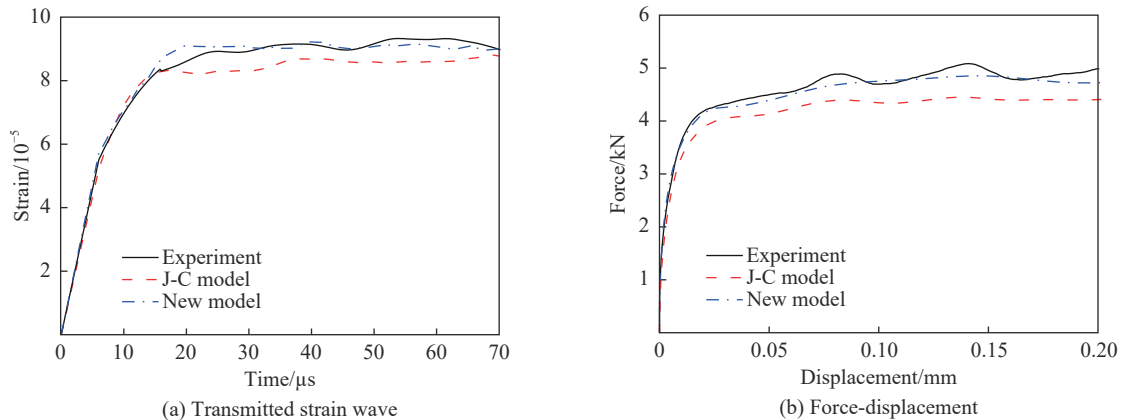


图 11 模拟结果(J-C 模型和新模型)与实验曲线对比

Fig. 11 Comparison of the experimental and simulation results (J-C model and new model)



的透射应变曲线和载荷-位移曲线。可以看到, 当新模型只考虑罗德角参数的影响时, 所得结果与新模型接近, 基本可以正确反映材料的流动特性; 当只考虑应力三轴度的影响时, 其载荷-位移曲线和透射应变信号与实验结果均相差较大。因此可以看出, 对于本文所设计的压剪试样, 材料的塑性流动特性主要受到罗德角参数的影响, 受应力三轴度的影响不明显。图 13 给出了新模型和 J-C 模型在 36、96、146  $\mu\text{s}$

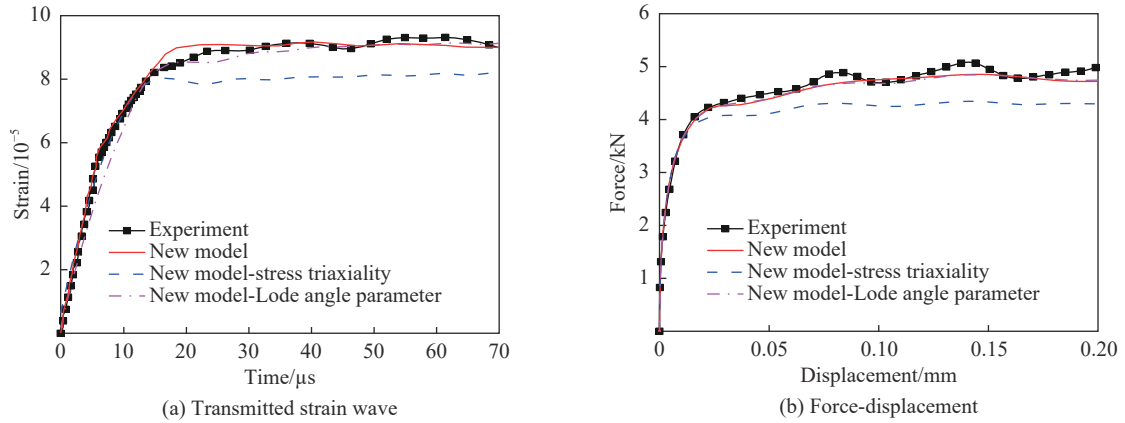


图 12 模拟结果与实验曲线对比

Fig. 12 Comparison of the experimental and simulation results

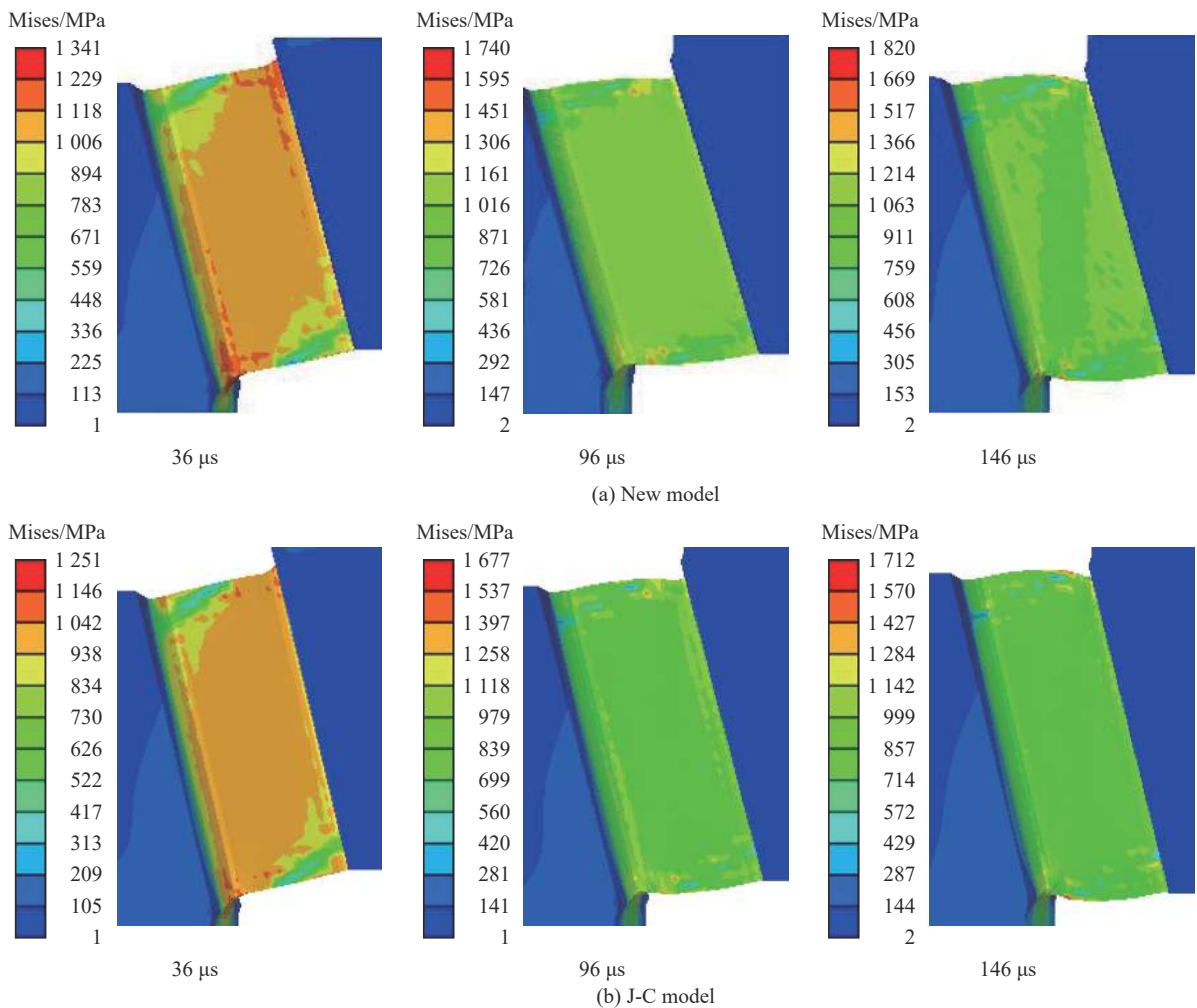


图 13 压剪试样在不同加载时刻的等效应力分布

Fig. 13 Equivalent stress evolutions of the compression-shear specimen in the simulation

时所得到的试样剪切区内部的等效应力分布情况(图 10(a)中红色框所示的 A 区域)。可以看出,在加载过程中,试样剪切区除边缘部分外,应力场始终均匀分布,且在相同时刻新模型的等效应力水平均高于 J-C 模型,该结果与两种模型预测的透射应变波信号和力-位移曲线情况相一致。这是由于在压剪状态下,材料的流动应力高于纯剪切情况下的流动应力,新模型考虑了复杂应力状态效应对材料塑性特性的影响,而 J-C 模型未能考虑该应力状态效应。因此,新模型可以更加精确地预测材料在高应变率、复杂应力状态下的力学响应。

## 5 结 论

(1)通过对 Ti-6Al-4V 钛合金材料开展单轴拉伸、单轴压缩和剪切加载下的力学性能测试发现材料的塑性流动应力水平存在明显差异。压缩实验中其流动应力水平最高,剪切流动应力最低,表明应力状态会影响材料的塑性行为。

(2)提出了一种考虑应力状态效应的塑性本构模型。该模型考虑了应力三轴度和罗德角参数对流动应力的影响,因此可以对材料在不同温度、应变率及应力状态下的力学行为进行描述。

(3)基于 Ti-6Al-4V 钛合金实验结果确定了新模型的材料参数,该模型对不同应力状态下的应力-应变曲线的预测结果与实验结果误差小于 5%。

(4)采用新型压剪试样获得了材料在压剪复合状态下的实验曲线。采用 ABAQUS 中 VUMAT 用户子程序对压剪实验进行数值模拟,发现新模型的计算结果与实验数据的吻合程度优于 J-C 模型,表明该模型能够准确描述材料在复杂应力状态下的塑性行为。

## 参考文献:

- [1] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C] // Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic. The Hague, The Netherlands, 1983: 541-548.
- [2] KHAN A S, SUH Y S, KAZMI R. Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys [J]. *International Journal of Plasticity*, 2004, 20(12): 2233-2248. DOI: 10.1016/j.ijplas.2003.06.005.
- [3] ZERILLI F J, ARMSTRONG R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61(5): 1816-1825. DOI: 10.1063/1.338024.
- [4] NEMAT-NASSER S, GUO W G. Thermomechanical response of DH-36 structural steel over a wide range of strain rates and temperatures [J]. *Mechanics of Materials*, 2003, 35(11): 1023-1047. DOI: 10.1016/S0167-6636(02)00323-X.
- [5] KLEPACZKO J R, RUSINEK A, RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ J A, et al. Modelling of thermo-viscoplastic behaviour of DH-36 and Weldox 460-E structural steels at wide ranges of strain rates and temperatures, comparison of constitutive relations for impact problems [J]. *Mechanics of Materials*, 2009, 41(5): 599-621. DOI: 10.1016/j.mechmat.2008.11.004.
- [6] SPITZIG W A, SOBER R J, RICHMOND O. Pressure dependence of yielding and associated volume expansion in tempered martensite [J]. *Acta Metallurgica*, 1975, 23(7): 885-893. DOI: 10.1016/0001-6160(75)90205-9.
- [7] SPITZIG W A, SOBER R J, RICHMOND O. The effect of hydrostatic pressure on the deformation behavior of maraging and HY-80 steels and its implications for plasticity theory [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1976, 7(11): 1703-1710. DOI: 10.1007/BF02817888.
- [8] HU W L, WANG Z R. Multiple-factor dependence of the yielding behavior to isotropic ductile materials [J]. *Computational Materials Science*, 2005, 32(1): 31-46. DOI: 10.1016/j.commatsci.2004.06.002.
- [9] CAZACU O, BARLAT F. A criterion for description of anisotropy and yield differential effects in pressure-insensitive metals [J]. *International Journal of Plasticity*, 2004, 20(11): 2027-2045. DOI: 10.1016/j.ijplas.2003.11.021.
- [10] DRIEMEIER L, BRÜNIG M, MICHELI G, et al. Experiments on stress-triaxiality dependence of material behavior of aluminum alloys [J]. *Mechanics of Materials*, 2010, 42(2): 207-217. DOI: 10.1016/j.mechmat.2009.11.012.
- [11] BRÜNIG M, CHYRA O, ALBRECHT D, et al. A ductile damage criterion at various stress triaxialities [J]. *International Journal of Plasticity*, 2008, 24(10): 1731-1755. DOI: 10.1016/j.ijplas.2007.12.001.

- [12] BAI Y L, WIERZBICKI T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence [J]. *International Journal of Plasticity*, 2008, 24(6): 1071–1096. DOI: 10.1016/j.ijplas.2007.09.004.
- [13] GAO X S, ZHANG T T, ZHOU J, et al. On stress-state dependent plasticity modeling: Significance of the hydrostatic stress, the third invariant of stress deviator and the non-associated flow rule [J]. *International Journal of Plasticity*, 2011, 27(2): 217–231. DOI: 10.1016/j.ijplas.2010.05.004.
- [14] GAO X S, ZHANG T T, HAYDEN M, et al. Effects of the stress state on plasticity and ductile failure of an aluminum 5083 alloy [J]. *International Journal of Plasticity*, 2009, 25(12): 2366–2382. DOI: 10.1016/j.ijplas.2009.03.006.
- [15] FRUTSCHY K J, CLIFTON R J. High-temperature pressure-shear plate impact experiments on OFHC copper [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1998, 46(10): 1723–1744. DOI: 10.1016/S0022-5096(98)00055-6.
- [16] YADAV S, RAMESH K T. The mechanical properties of tungsten-based composites at very high strain rates [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1995, 203(1/2): 140–153. DOI: 10.1016/0921-5093(95)09865-8.
- [17] MEYERS M A, ANDRADE U R, CHOKSHI A H. The effect of grain size on the high-strain, high-strain-rate behavior of copper [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1995, 26(11): 2881–2893. DOI: 10.1007/BF02669646.
- [18] KORTHÄUER M, ATAYA S, EL-MAGD E. Effects of deformed volume, volume fraction and particle size on the deformation behaviour of W/Cu composites [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2006, 46(1): 38–45. DOI: 10.1016/j.tafmec.2006.05.002.
- [19] CLOS R, SCHREPPPEL U, VEIT P. Temperature, microstructure and mechanical response during shear-band formation in different metallic materials [J]. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 2003, 110: 111–116. DOI: 10.1051/jp4:20020679.
- [20] GUO Y Z, LI Y L. A novel approach to testing the dynamic shear response of Ti-6Al-4V [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2012, 25(3): 299–311. DOI: 10.1016/S0894-9166(12)60027-5.
- [21] 许泽建, 丁晓燕, 张炜琪, 等. 一种用于材料高应变率剪切性能测试的新型加载技术 [J]. *力学学报*, 2016, 48(3): 654–659. DOI: 10.6052/0459-1879-15-445.
- XU Z J, DING X Y, ZHANG W Q, et al. A new loading technique for measuring shearing properties of materials under high strain rates [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(3): 654–659. DOI: 10.6052/0459-1879-15-445.
- [22] XU Z J, DING X Y, ZHANG W Q, et al. A novel method in dynamic shear testing of bulk materials using the traditional SHPB technique [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 101: 90–104. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.11.012.
- [23] XU Z J, LIU Y, SUN Z Y, et al. On shear failure behaviors of an armor steel over a large range of strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 118: 24–38. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.04.003.
- [24] 张炜琪, 许泽建, 孙中岳, 等. Ti-6Al-4V 在高应变率下的动态剪切特性及失效机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 1137–1144. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0107.
- ZHANG W Q, XU Z J, SUN Z Y, et al. Dynamic shear behavior and failure mechanism of Ti-6Al-4V at high strain rates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 1137–1144. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0107.
- [25] XU Z J, HE X D, HU H Z, et al. Plastic behavior and failure mechanism of Ti-6Al-4V under quasi-static and dynamic shear loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 130: 281–291. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.04.008.
- [26] 刘宇, 许泽建, 汤忠斌, 等. 基于 DIHPB 技术的高应变率剪切测试方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(10): 104101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0301.
- LIU Y, XU Z J, TANG Z B, et al. A high-strain-rate shear testing method based on the DIHPB technique [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(10): 104101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0301.
- [27] XU Z J, LIU Y, HU H Z, et al. Thermo-viscoplastic behavior and constitutive modeling of pure copper under high-strain-rate shear condition [J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 129: 306–319. DOI: 10.1016/j.mechmat.2018.12.007.
- [28] XU Z J, LIU Y, HU H Z, et al. Determination of shear behavior and constitutive modeling of the 603 steel over wide temperature and strain rate ranges [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 129: 184–204. DOI: 10.1016/j.jmps.2019.05.005.
- [29] MALVERN L E. Introduction to the mechanics of a continuous medium [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1969.
- [30] CULVER R S. Thermal instability strain in dynamic plastic deformation [M]//ROHDE R W, BUTCHER B M, HOLLAND J R, et al. *Metallurgical Effects at High Strain Rates*. Boston: Springer, 1973: 519–530. DOI: 10.1007/978-1-4615-8696-8\_29.

(责任编辑 曾月蓉)