

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0154

6061-T6 铝合金动态拉伸本构关系及失效行为*

周 伦^{1,2}, 苏兴亚¹, 敬 霖¹, 邓贵德³, 赵隆茂⁴

- (1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031;
2. 四川航空工业川西机器有限责任公司, 四川 雅安 625000;
3. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029;
4. 太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 采用 HMH-206 高速材料试验机开展了 6061-T6 铝合金在 $0.001\sim 100\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的静、动态拉伸力学性能实验, 分析了其应力-应变响应特征和应变率敏感性, 讨论了应变率对 6061-T6 铝合金流动应力和应变率敏感性指数的影响, 并基于实验结果对 Johnson-Cook 本构模型进行了修正。结合缺口试件的实验结果和模拟数据, 得到了材料的 Johnson-Cook 失效模型参数, 并对模型的准确性和适用性进行了验证。结果表明, 在拉伸载荷作用下, 6061-T6 铝合金表现出明显的应变硬化特征和应变率敏感性, 其流动应力随应变率的升高而提高, 修正的 Johnson-Cook 本构模型可以描述材料的动态塑性流动行为, 建立的 Johnson-Cook 失效模型能够表征材料的断裂失效行为。

关键词: 6061-T6 铝合金; 动态力学性质; 应变率敏感性; Johnson-Cook 本构模型; 失效参数

中图分类号: O347.3 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

Dynamic tensile constitutive relationship and failure behavior of 6061-T6 aluminum alloy

ZHOU Lun^{1,2}, SU Xingya¹, JING Lin¹, DENG Guide³, ZHAO Longmao⁴

- (1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;
2. Sichuan Aviation Industry Chuanxi Machine Co. Ltd., Yaan 625000, Sichuan, China;
3. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China;
4. Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: The quasi-static and dynamic tensile mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy in a strain rate range from 0.001 s^{-1} to 100 s^{-1} were investigated by using a HMH-206 high-speed material testing machine. The stress-strain response characteristics and strain rate sensitivity of the 6061-T6 aluminum alloy were analyzed, and the effects of strain rate on the flow stress and strain rate sensitivity index were discussed. Based on the experimental results, the Johnson-Cook constitutive model was modified to describe the plastic flow characteristics of the 6061-T6 aluminum alloy under dynamic tensile loading. In addition, the relationship between the fracture strain and stress triaxiality of the notched specimens was established by experiments and simulations, and the values of the parameters in the Johnson-Cook failure model were obtained according to the experimental and simulation results. The results show that the 6061-T6 aluminum alloy exhibits obvious strain hardening characteristics and strain rate strengthening effects, and the flow stress increases with the increase of true strain and strain rate. The strain rate sensitivity index of the material is affected by the coupling effect of strain and strain rate. During the tensile process, the Mises stress of the notched specimens was symmetrically distributed about the minimum cross-section, and the

* 收稿日期: 2022-04-08; 修回日期: 2022-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(12122211); 国家重点研发计划(2016YFF0203102); 四川省自然科学基金(2022NSFSC0035)

第一作者: 周 伦(1995—), 男, 硕士研究生, zhoulunabc@126.com

通信作者: 敬 霖(1984—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, jinglin@swjtu.edu.cn

stress triaxiality at the minimum cross-section was symmetrically distributed about the center line along the width and thickness directions. Furthermore, the fracture strain of the material decreases gradually with the increase of the stress triaxiality, and increases approximately linearly with the increasing dimensionless logarithmic strain rate. The plastic flow characteristics of the 6061-T6 aluminum alloy can be described by the modified Johnson-Cook constitutive model, and the parameters in the Johnson-Cook failure model of the material can be obtained by the experiments and simulations on the notched specimens. The verification results indicate that the established models can predict the tensile mechanical response and fracture failure behavior of the 6061-T6 aluminum alloy under a complex stress state.

Keywords: 6061-T6 aluminum alloy; dynamic mechanical property; strain rate sensitivity; Johnson-Cook constitutive model; failure parameter

金属材料通常具有应变率敏感性,在遭受爆炸、冲击、碰撞等动态载荷作用时其力学响应特征与准静态情况下的有所不同,并往往伴随着塑性变形和断裂破坏^[1-3]。因此,开展可描述金属材料在大应变和动态载荷下本构关系及失效准则的研究,对于防护结构的设计和优化具有重要意义。目前研究者们提出了多种本构模型来表征材料的动态力学行为,常见的有 Cowper-Symonds (C-S) 模型^[4]、Johnson-Cook (J-C) 模型^[5]、Zirilli-Armstrong (Z-A) 模型^[6]等, J-C 模型^[5]因具有形式简洁、物理意义明确、参数易获得等优点被广泛使用^[7-9]。此外, J-C 失效模型^[5]同时考虑了应力三轴度、应变率和温度对材料力学性能的影响,能够较好地预测率温耦合下材料的断裂失效行为,在冲击碰撞问题的研究中占有重要地位^[10-12],其中,应力三轴度定义为静水压力与 Mises 等效应力的比值,通常用来表示材料的应力状态^[13]。学者们研究了 Q235 钢^[14]、7A04 铝合金^[10]、钛合金^[15]等金属或合金缺口试件的拉伸力学性能,得到了应力三轴度与断裂应变之间的关系,并建立了可准确描述其断裂失效行为的 J-C 失效模型。

6061-T6 铝合金具有良好的焊接性、强耐腐蚀性、易于加工等特点,被广泛应用于航空航天、交通运输和国防工程等领域^[16-17]。Lee 等^[18]和 Zhu 等^[19]对 6061-T6 铝合金的压缩及拉伸力学性能开展了研究,发现该材料具有明显的应变率强化效应。随着应变率的提高,6061-T6 铝合金的压缩屈服应力、流动应力和应变率敏感性指数逐渐增大,而加工硬化率则表现出降低的趋势;应变率对材料的晶粒也会产生一定影响,在高应变率范围内材料晶粒尺寸有所增大而晶粒形状变细^[20]。Odeshi 等^[21]研究发现,高应变率下绝热剪切带的出现是导致材料压缩塑性变形和破坏的根本原因。Zhu 等^[19]对拉伸断口形貌的研究发现,静、动态拉伸载荷下 6061-T6 铝合金均呈现出韧性断裂特征。在本构模型方面, Acharya 等^[20]基于实验结果建立了材料具有物理意义的动态本构模型,并对预测结果进行了验证。可以看出,目前针对 6061-T6 铝合金力学响应的研究主要集中在准静态和高应变率加载,对中应变率范围内力学行为的研究比较匮乏。然而,6061-T6 铝合金作为民用工程结构材料时,其动态冲击服役过程常处于中应变率加载场景,如汽车/列车碰撞、冲压成型、物体坠落等。

因此,本文中,开展 6061-T6 铝合金在 $0.001 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的拉伸力学性能实验,讨论其力学响应特征和应变率敏感性,分析应变率对材料塑性流动的影响;基于完整试件的拉伸实验结果对 J-C 本构模型进行修正,结合缺口试件的拉伸实验结果和数值模拟得到修正 J-C 失效模型参数值,并对修正 J-C 模型的准确性和适用性进行验证。

1 J-C 模型

1.1 J-C 本构模型

合适的本构模型是准确预测外载荷作用下材料力学响应的关键。J-C 本构模型作为典型的经验型本构模型^[5],综合考虑了应变、应变率和温度对塑性流动的影响,可以准确描述材料的应变硬化特征和率-温耦合效应,能够较好地预测大变形、高应变率 and 高温下材料的力学响应:

$$\sigma_p = (A + B\varepsilon_p^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) [1 - (T^*)^{m_1}] \quad (1)$$

式中: σ_p 为塑性流动应力; A 为参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 和参考温度 T_r 下材料的屈服强度; B 和 n 为应变硬化参数; ε_p 和 C 分别为塑性应变和应变率敏感性系数; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}$ 为实验应变率, $\dot{\varepsilon}_0 = 0.001 \text{ s}^{-1}$; $T^* = (T_e - T_r)/(T_m - T_r)$, T_e 和 T_m 分别为实验温度和材料熔点; m_1 为温度敏感性指数。此外, 材料在变形过程中会产生绝热温升, 在较低应变率加载下, 绝热温升对其力学性能的影响通常可忽略不计。如果实验在参考温度(通常为室温)下进行, 并忽略材料绝热温升的影响, 式 (1) 可简化为:

$$\sigma_p = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (2)$$

1.2 J-C 失效模型

金属材料在大变形过程中常出现断裂失效, 而断裂失效与其应力状态(应力三轴度、Lode 角等)密切相关, 且通常表现出一定的应变率敏感性和温度依赖性。J-C 失效模型同时考虑了应变率、温度和应力三轴度对材料断裂失效的影响, 并基于累积损伤准则确定了损伤量 D 的表达式^[5]:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f} \quad (3)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 为一个时间步的塑性变形增量, ε_f 为材料的断裂应变; D 的取值范围为 $0 \sim 1$, 材料在无损伤状态下 $D = 0$, 当材料发生断裂失效时 $D = 1$ 。其中断裂应变 ε_f 表示为^[5]:

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 + D_5 T^*) \quad (4)$$

式中: $D_1 \sim D_5$ 为材料参数; 应力三轴度 $\sigma^* = \sigma_m / \sigma_{eq}$, 其中 σ_m 为静水压力, σ_{eq} 为 Mises 等效应力。如果实验在参考温度(通常为室温)下进行, 并忽略材料绝热温升的影响, 式 (4) 可简化为:

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (5)$$

2 6061-T6 铝合金动态本构关系

2.1 静动态拉伸力学性能

实验材料为 6061-T6 铝合金, 是由 6061 铝合金进行固溶热处理后经人工时效制备而成, 其化学成分如表 1 所示。采用线切割方法在铝锭上均匀取样, 为避免尺寸效应对实验结果的影响, 静动态拉伸实验均采用厚度为 2 mm、标距段宽度为 4 mm 的片状试件, 如图 1 所示。利用 HMM-206 型高速材料试验机, 分别开展 0.001 、 0.1 、 1 、 10 和 100 s^{-1} 等 5 种应变率下材料的拉伸力学性能实验。为确保实验结果的可靠性, 每种应变率工况均开展 3 次有效重复性实验, 选择最接近平均值的应力-应变响应曲线进行力学性能分析。

表 1 6061-T6 铝合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 6061-T6 aluminum alloy (mass fraction)									%
元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
含量	0.4	0.7	0.15	0.15	0.5	0.04	0.25	0.15	余量

不同应变率下 6061-T6 铝合金真实应力 σ_t 与真实应变 ε_t 之间的关系如图 2(a) 所示, 材料的应力-应变曲线均表现出双线性弹塑性特征, 没有出现明显的屈服平台。在拉伸初始阶段, 应力随应变的增大呈线性升高; 当材料进入塑性流动阶段时, 应力随应变的增大有所升高但增速明显放缓, 材料出现应变硬化现象。图 2(b) 给出了真实应变为 0.05、0.06、0.07 和 0.08 时 6061-T6 铝合金流动应力与应变率之间的关系。由图可知, 相同应变下流动应力随应变率的升高明显增大, 材料表现出应变率强化效应。这是因为在拉伸过程中材料内部会产生大量高密度位错盘结和位错胞, 位错密度随应变率的升高而增大, 此时克服位错运动所需要的外力就越大^[22]。材料的变形靠其内部的位错滑移来实现, 而位错滑移线在晶格内移时会受到晶格内间隙原子等缺陷的阻碍和约束, 导致在较高应变率下位错滑移线的移动速度滞后

于载荷的增大速度,使得滑移线很难以较快速度贯穿整个晶粒,宏观上表现为相同应变下流动应力随应变率的升高而增大。

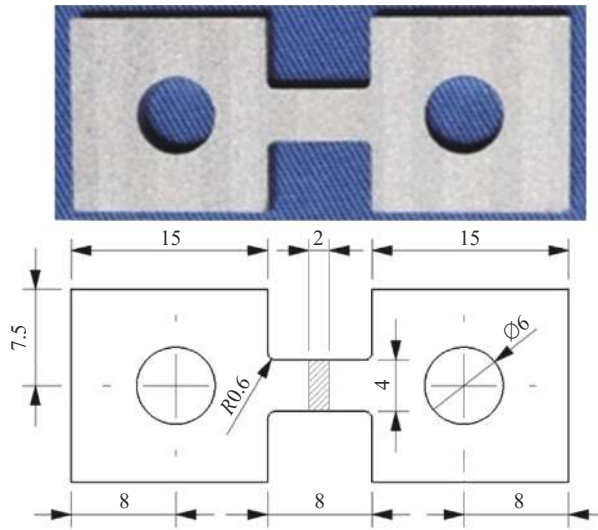


图 1 拉伸试件及其几何尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Picture and dimension of the tensile specimens (unit: mm)

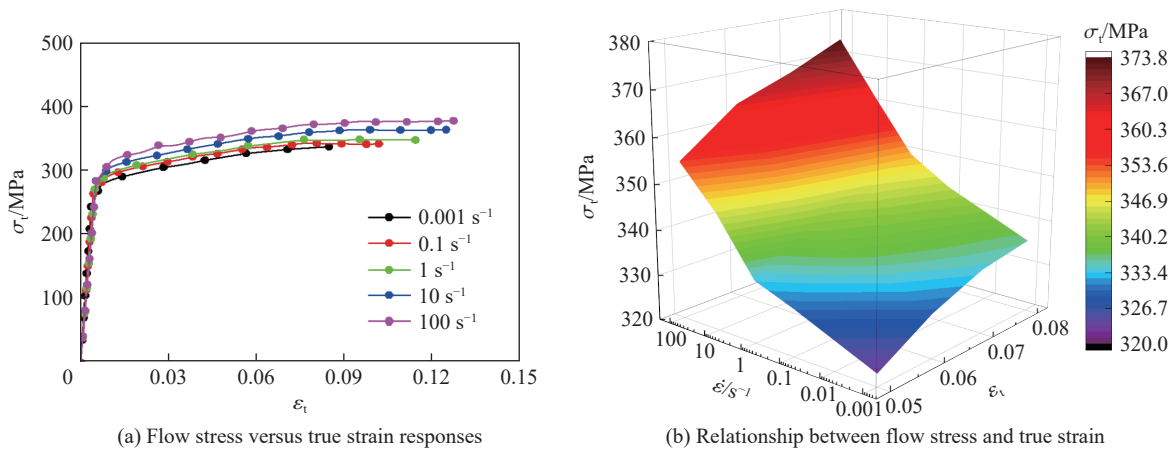


图 2 不同应变率下 6061-T6 铝合金的拉伸实验结果

Fig. 2 Tensile test results of 6061-T6 aluminum alloy at different strain rates

在给定的应变 ε 和温度 T 下,可以用应变率敏感性指数 m_0 来描述应变率对材料力学性能的影响,其表达式为^[23]:

$$m_0 = \frac{\lg(\sigma_d/\sigma_s)}{\lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s)} \Big|_{\varepsilon, T} \quad (6)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_d$ 和 $\dot{\varepsilon}_s$ 分别为动态和准静态应变率, σ_d 和 σ_s 分别为动态和准静态应变率对应的流动应力。该方法假定材料的对数流动应力差值与对数应变率差值线性相关,两者的比值即为应变率敏感性指数 m_0 。从图 2(b) 可以看出,随着应变率的升高,不同应变下 6061-T6 铝合金的流动应力变化趋势有所不同。因此,利用给定应变下的流动应力进行计算无法反映材料真实应变率效应^[24]。为了准确得到 6061-T6 铝合金的应变率敏感性,图 3 给出了不同应变和不同应变率下材料的应变率敏感性指数 m_0 。可以看出,不同应变下材料的应变率敏感性指数 m_0 随应变率的升高逐渐增大,而动态压缩载荷下该材料也出现相同的现象^[20]。

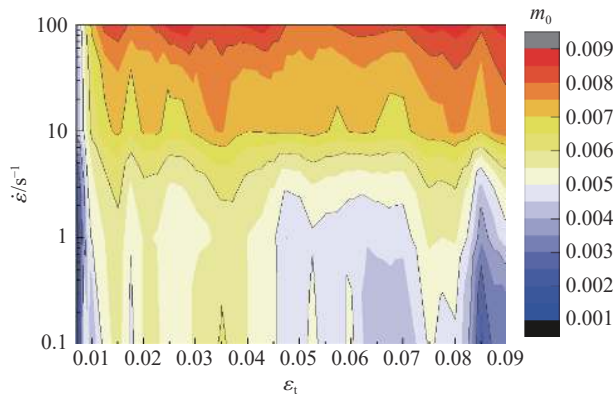


图 3 不同应变下应变率敏感性指数与应变率之间的关系

Fig. 3 Relationship between strain rate sensitivity index and strain rate at different strains

2.2 修正的 J-C 本构模型

根据图 2(a) 中 6061-T6 铝合金的拉伸实验结果, 通过拟合可得到 J-C 本构模型参数值。具体步骤为: 首先, 根据参考应变率(0.001 s⁻¹)下材料的屈服强度确定 $A = 275.96$ MPa; 然后, 利用最小二乘法对该应变率下的应力-应变响应进行拟合, 得到 $B = 288.39$ MPa 和 $n = 0.59$; 最后, 对 0.1、1、10 和 100 s⁻¹ 应变率下材料的屈服强度进行拟合, 得到 $C = 0.0064$ 。由于应力-应变曲线中没有出现明显的屈服平台, 这里取真实塑性应变 0.2% 对应的应力作为材料的屈服强度。图 4(a) 对比了模型预测和实验结果, 可以看出, 在较低应变率下两者吻合较好, 当应变率为 100 s⁻¹ 时, 该模型会过低估计材料的流动应力。这是因为 J-C 本构模型中应变率敏感性系数 C 为恒定值, 而该参数反映了材料对应变率的敏感程度, 从图 4(a) 对比结果可知, 在越高的应变率下 6061-T6 铝合金的应变率效应越明显。把 J-C 本构模型中的 C 修正为 $\ln \dot{\epsilon}^*$ 的一次函数, 得到:

$$\sigma_p = (A + B\epsilon_p^n) [1 + (C_0 + C_1 \ln \dot{\epsilon}^*) \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (7)$$

利用最小二乘法对动态拉伸实验结果进行拟合, 得到 6061-T6 铝合金修正的 J-C 本构模型参数值: $A = 275.96$ MPa, $B = 288.39$ MPa, $n = 0.59$, $C_0 = -0.00223$, $C_1 = 0.00105$ 。图 4(b) 给出了模型预测和实验结果对比, 可知修正的 J-C 本构模型能够表征动态拉伸时 6061-T6 铝合金的塑性流动行为。

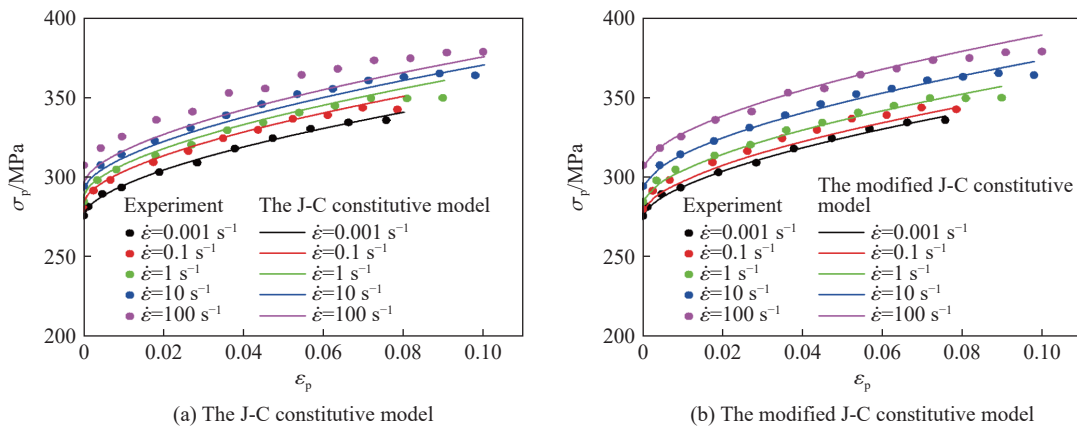


图 4 模型预测与实验结果对比

Fig. 4 Comparison of predictions by the models with experimental results

3 6061-T6 铝合金失效参数

3.1 失效参数的测定

对于 J-C 失效模型, 可靠的模型参数是准确预测材料断裂应变的前提。由式 (5) 可知, 为了获得模

型参数值, 首先需要确定应力三轴度和应变率分别与断裂应变之间的关系, 然后拟合得到参数 $D_1 \sim D_4$ 。通常情况下, 可通过缺口试件的拉伸实验或有限元模拟来研究 J-C 失效模型参数。针对图 1 所示 6061-T6 铝合金试件, 利用 HMH-206 型高速材料试验机开展 3 种不同缺口半径 R (1、2 和 3 mm) 试件的轴向拉伸实验, 并结合 ABAQUS 有限元分析软件, 来考察应力三轴度对断裂应变的影响。图 5(a) 为缺口试件, 不同缺口试件最小截面的宽度均为 2 mm, 拉伸速率为 0.08 mm/s。每种类型缺口试件均开展 3 次实验, 不同类型缺口试件 3 次实验结果的重复性较好, 这里选择最接近平均值的载荷-位移曲线进行数值模拟, 如图 5(b) 所示。可以看出, 大半径缺口试件具有较强的抗拉能力, 而断裂时刻该试件的拉伸变形量较小。

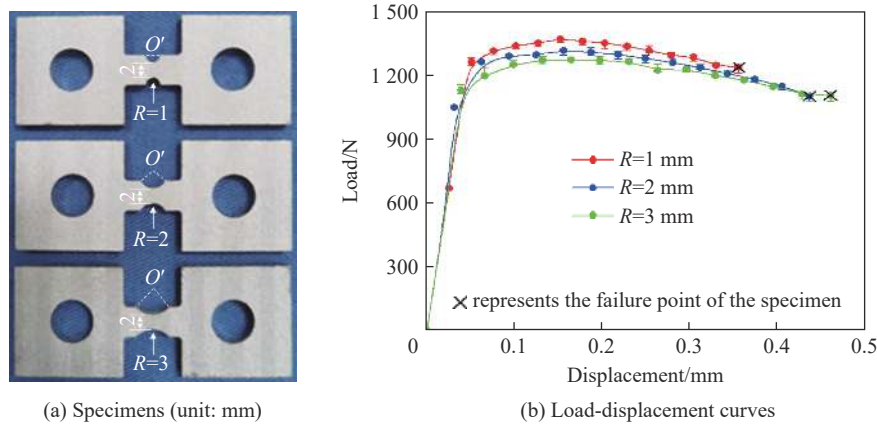


图 5 6061-T6 铝合金缺口试件和拉伸载荷-位移曲线

Fig. 5 Notched 6061-T6 aluminum alloy specimens and their tensile load-displacement curves

3.1.1 确定断裂应变和应力三轴度

在拉伸载荷作用下, 试件的断裂应变 ε_f 可根据其断口面积计算得到:

$$\varepsilon_f = \ln(S_0/S_f) \quad (8)$$

式中: S_0 为试件最小截面面积, S_f 为断口面积。

由于试件的拉伸断口形状复杂, 通常很难准确测得断口面积, 可借助数值模拟技术获得断裂应变。利用数值模拟方法获得缺口试件断裂应变的方法主要包括: (1) 提取断裂时刻最小截面中心点等效塑性应变作为断裂应变^[25]; (2) 选择断裂时刻最小截面所有单元的平均等效塑性应变作为断裂应变^[14]。由于缺口试件某点的损伤达到临界值与试件断裂发生在拉伸过程中的不同时刻, 通常情况下两者对应的应变不同^[26], 某点处失效无法真实反映试件的整体断裂行为。因此, 取断裂时刻最小截面所有单元的平均等效塑性应变近似作为试件的断裂应变。

试件的应力三轴度与缺口大小密切相关, Bridgman 等^[27] 在早期给出了棒状缺口试件应力三轴度的计算方法:

$$\sigma^* = \frac{1}{3} + \ln\left(1 + \frac{a^2 - r^2}{2aR_0}\right) \quad (9)$$

式中: R_0 和 a 分别为试件缺口半径和最小截面半径, r 为到截面中心的距离。然而式 (9) 忽略了塑性应变累积对应力三轴度的影响, 只适用于初始时刻棒状缺口试件应力三轴度的计算。因此, 可借助数值模拟技术获得拉伸载荷下缺口试件的应力三轴度, 主要包括: (1) 选取断裂时刻试件最小截面中心点的应力三轴度, 即最大应力三轴度^[25]; (2) 考虑应变累积效应, 选取试件最小截面中心点的平均应力三轴度^[14]; (3) 考虑应变累积效应和最小截面空间分布, 选取试件最小截面的平均应力三轴度^[28]。在拉伸过程中, 延性金属缺口试件的应力三轴度随塑性应变累积不断变化, 某时刻的应力三轴度无法反映其真实应力状态, 且由于试件通常在最小截面处断裂, 应力三轴度的空间分布效应也不容忽视^[28]。因此, 选取第 3 种方法得到的平均应力三轴度 σ_{av}^* 近似作为试件的应力三轴度^[28], 此时片状试件的应力三轴度可表示为:

$$\sigma_{av}^* = \frac{1}{\varepsilon_f S_f} \int_0^{\varepsilon_f} \int_0^{S_f} \sigma^*(\varepsilon_f, S) dS d\varepsilon \quad (10)$$

式中: S_f 为断裂截面面积, dS 为断裂截面上的面积微元。

3.1.2 应力三轴度对断裂应变的影响

利用 ABAQUS 软件, 分别建立 3 种缺口半径(1、2 和 3 mm)6061-T6 铝合金试件的有限元模型, 来研究拉伸过程中试件的应力三轴度和断裂应变。采用六面体单元对模型进行划分, 其中夹持端网格尺寸为 $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$, 缺口区域网格细化为 $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 。模型一端施加固定边界条件, 另一端沿轴向施加 0.08 mm/s 的恒定拉伸速度。金属试件在拉伸过程中通常会产生颈缩, 导致颈缩处材料产生非均匀变形并处于多轴应力状态, 此时其应力-应变关系很难准确获得^[25]。为了准确模拟 6061-T6 铝合金缺口试件的拉伸力学行为, 采用有限元迭代计算修正的方法模拟缺口试件的拉伸过程^[29]。具体步骤为: 首先以图 2(a) 中准静态应力-应变响应结果作为材料参数输入到模型中进行数值模拟, 接着把模拟得到的载荷-位移曲线与图 5(b) 中实验结果进行对比并得到两者的相对误差, 然后通过乘以相应系数来调整应力-应变曲线中的应力幅值, 再把调整后的应力-应变曲线输入到模型中进行数值模拟, 直至模拟得到的结果逼近实验数据为止, 如图 6 所示。

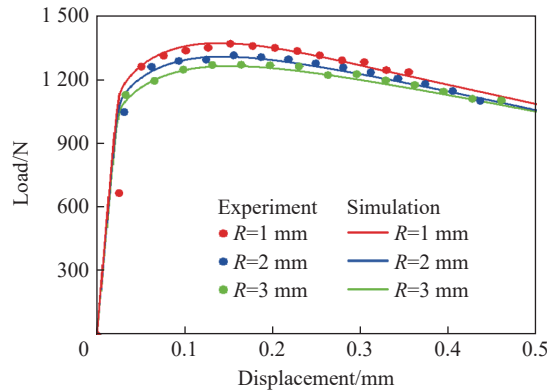


图 6 实验和数值模拟得到的缺口试件载荷-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of the notched specimens obtained by experiments and simulations

图 7 为 6061-T6 铝合金缺口试件 Mises 应力云图和最小截面处应力三轴度的分布情况, 其中图 7(b)、(d)、(f) 中坐标原点对应试件最小截面的中心点, 横坐标和纵坐标分别表示沿宽度(Y 方向)和厚度(Z 方向)方向与中心点的距离。可以看出, 在拉伸过程中不同缺口半径试件的应力关于最小截面呈对称分布。由于缺口效应的存在, 试件中心区域产生了应力集中, 且应力随着与最小截面距离的增大而减小。此外, 试件最小横截面处的应力三轴度沿宽度和厚度方向关于中心线呈对称分布, 且随着与中心点距离的增大而减小, 其中最大应力三轴度出现在截面中心处, 说明拉伸过程中最小截面中心区域的应力状态比边缘区域更复杂。图 8 给出了缺口试件最小截面中心点处应力三轴度 σ_0^* 随等效塑性应变 ε_{ep} 的变化情况, 可以看出, 拉伸过程中最大应力三轴度随等效塑性应变的累积呈增大趋势。在相同等效塑性应变下, 应力三轴度随缺口半径的减小而增大, 这是因为缺口效应随着缺口半径的减小逐渐增强, 导致小半径缺口试件的应力集中效应更明显。

由于实验过程中无法得到 6061-T6 铝合金缺口试件的应力三轴度, 因此通过提取相同拉伸速度 (0.08 mm/s) 下完整试件和 3 种不同缺口半径(1、2 和 3 mm)试件的有限元模拟结果, 来研究断裂应变与应力三轴度之间的关系。拉伸速度为 0.08 mm/s 时, 完整试件的加载应变率为 0.01 s^{-1} , 而因缺口试件拉伸过程中变形不均匀, 无法直接获得其加载应变率。这里通过提取缺口试件失效前最小截面单元不同时刻的轴向平均应变, 并对应变-时程响应进行线性拟合得到缺口试件的最大应变率(即斜率)。3 种不同缺口半径(1、2 和 3 mm)试件的最高应变率分别为 0.052 、 0.059 和 0.051 s^{-1} , 结合图 2(a) 中拉伸应力-应

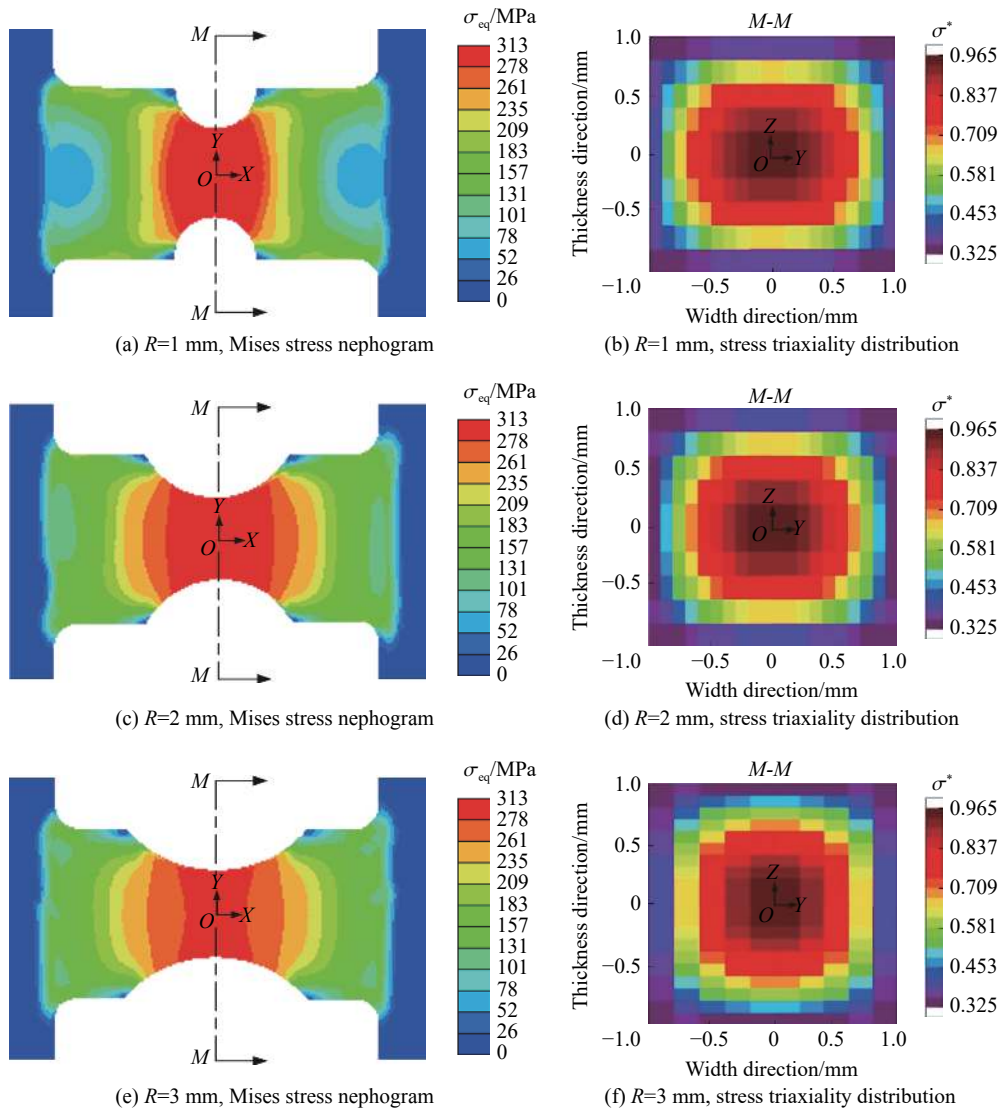


图 7 不同缺口半径试件的 Mises 应力云图和应力三轴度分布

Fig. 7 Mises stress nephograms and stress triaxiality distributions for notched specimens with different radii

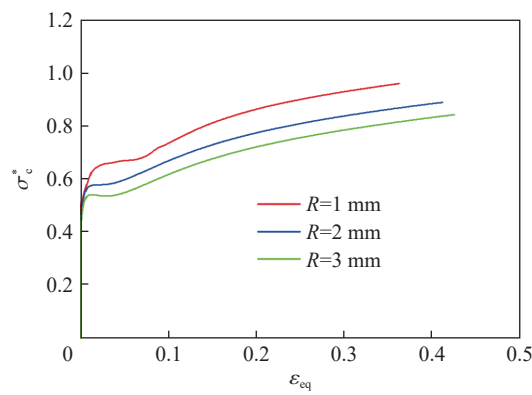


图 8 缺口试件最小截面中心点应力三轴度与等效塑性应变的关系

Fig. 8 Relationship between stress triaxiality at the center points of the minimum cross-sections of notched specimens and equivalent plastic strain

变响应结果可知, 在此应变率区间内, 应变率对试件应力-应变响应的影响可忽略不计。也就是说, 基于拉伸速度 0.08 mm/s 下完整试件和缺口试件的模拟结果来研究断裂应变与应力三轴度之间的关系是可行的。图 9(a) 给出了不同应力三轴度下试件的断裂应变, 可以看出, 断裂应变随应力三轴度的增大而减小, 且减小速率呈上升趋势。在参考应变率下, 采用最小二乘法并根据式 (5) 对模拟结果进行拟合, 可得到失效参数 $D_1 = 0.362$, $D_2 = -4.57 \times 10^{-6}$ 和 $D_3 = 17.434$ 。

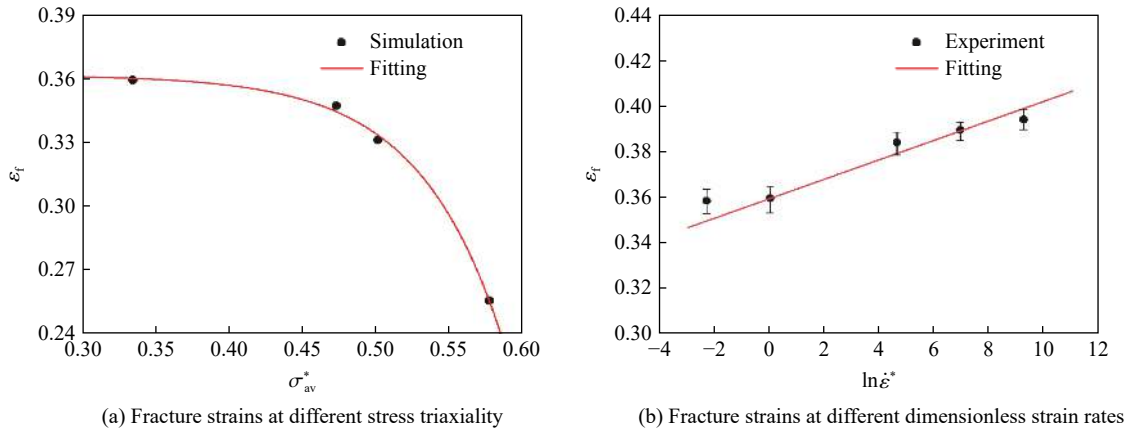


图 9 断裂应变与应力三轴度和无量纲对数应变率的关系

Fig. 9 Relationships of fracture strain with stress triaxiality and dimensionless strain rate

3.1.3 应变率对断裂应变的影响

由式 (5) 可知, 为了得到材料参数 D_4 , 需获得断裂应变与无量纲应变率 $\dot{\epsilon}^*$ 之间的关系。根据图 2(a) 中不同应变率下 6061-T6 铝合金完整试件的拉伸实验结果, 以 0.001 s^{-1} 为参考应变率, 得到断裂应变与对数无量纲应变率 $\ln \dot{\epsilon}^*$ 之间的关系如图 9(b) 所示。其中断裂应变 ϵ_f 通过测量试件截面面积和断口面积, 并根据式 (8) 计算获得。由图 9(b) 可知, 断裂应变随对数无量纲应变率的升高近似呈线性增大, 对实验结果进行拟合得到 J-C 失效模型参数 $D_4 = 0.0112$ 。

3.2 失效模型验证

为了验证 J-C 本构模型和失效模型的准确性与适用性, 在图 1 所示 6061-T6 铝合金拉伸试件中间位置处截去直径为 2 mm 的圆孔制作模型验证试件, 如图 10 所示。由于圆孔的存在, 试件测试段已不满足均匀性假设, 在拉伸过程中会引入结构响应, 从而形成复杂应力状态。采用 HMH-206 型高速材料试验机开展加载速度 v 分别为 0.8、8 和 80 mm/s 的轴向拉伸实验, 并利用 ABAQUS 软件开展相应的有限元模拟, 把确定的 J-C 本构模型和失效模型参数作为模拟参数进行输入。不同拉伸速度下实验和仿真得到的载荷-位移曲线如图 11 所示, 可以看出, 实验数据和仿真结果整体吻合较好, 表明本文中建立的 J-C 模型能够预测复杂应力状态下 6061-T6 铝合金的拉伸力学响应与断裂失效行为。

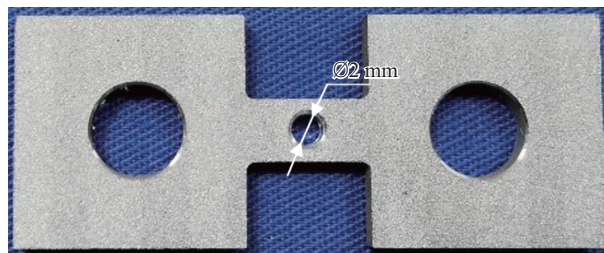


图 10 6061-T6 铝合金模型验证试件

Fig. 10 The 6061-T6 aluminum alloy specimen used for model verification

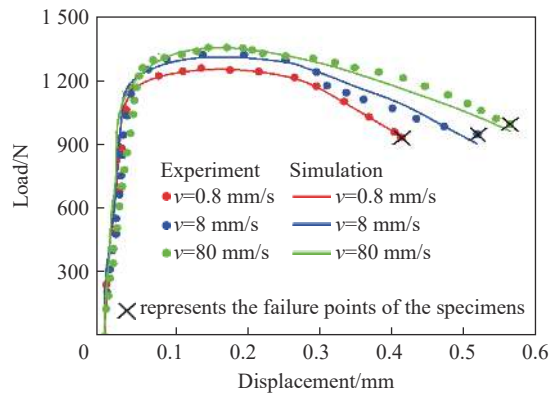


图 11 不同加载速度下实验和模拟得到的载荷-位移曲线对比

Fig. 11 Comparison of the load-displacement curves obtained by experiments and simulations at different load velocities

4 结 论

采用 HMH-206 型高速材料试验机开展了 6061-T6 铝合金的静、动态拉伸力学性能实验, 讨论了其应力-应变响应特征和应变率敏感性, 基于实验结果对 J-C 本构模型进行了修正, 利用实验和数值模拟相结合的方法建立了 6061-T6 铝合金的 J-C 失效模型, 并对模型的准确性和适用性进行了验证, 获得如下主要结论。

(1) 静、动态拉伸载荷下, 6061-T6 铝合金表现出明显的应变硬化特征和应变率敏感性。在塑性变形初始阶段, 材料的应变硬化能力较强, 随着材料塑性变形的加剧, 其应变硬化能力逐渐减弱。在考察的应变率范围内, 6061-T6 铝合金具有应变率强化效应, 其流动应力随应变率的升高而增大, 且高应变率下流动应力增量大于低应变率时的结果。

(2) 拉伸过程中, 缺口试件最小横截面处应力三轴度沿宽度和厚度方向关于中心线呈对称分布, 最大应力三轴度出现在中心点处。随着等效塑性应变的增大, 缺口试件最小截面中心点处的应力三轴度逐渐增大, 且小半径缺口试件具有更大的应力三轴度。

(3) 圆孔试件的验证结果表明, 本文中修正的 J-C 本构模型和失效模型可以预测复杂应力状态下 6061-T6 铝合金的拉伸力学响应和断裂失效行为。

参考文献:

- [1] 高玉龙, 孙晓红. 高速列车用 6008 铝合金动态变形本构与损伤模型参数研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(3): 033101. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0119.
GAO Y L, SUN X H. On the parameters of dynamic deformation and damage models of aluminum alloy 6008-T4 used for high-speed railway vehicles [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(3): 033101. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0119.
- [2] 王礼立. 高应变率下材料动态力学性能 [J]. *力学与实践*, 1982, 4(1): 9-19, 26.
WANG L L. Dynamic mechanical properties of materials under high strain rate [J]. *Mechanics and Engineering*, 1982, 4(1): 9-19, 26.
- [3] 任冀宾, 汪存显, 张欣玥, 等. 2A97 铝锂合金的 Johnson-Cook 本构模型及失效参数 [J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2019, 47(8): 136-144. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.180554.
REN J B, WANG C X, ZHANG X Y, et al. Johnson-Cook constitutive model and failure parameters of 2A97 Al-Li alloy [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(8): 136-144. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.180554.
- [4] COWPER G R, SYMONDS P S. Strain hardening and strain-rate effect in the impact loading of cantilever beams [R]. Providence, USA: Brown University, 1957.
- [5] 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. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.
- [6] 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.
- [7] JING L, SU X Y, ZHAO L M. The dynamic compressive behavior and constitutive modeling of D1 railway wheel steel over a wide range of strain rates and temperatures [J]. *Results in Physics*, 2017, 7: 1452–1461. DOI: 10.1016/j.rinp.2017.04.015.
- [8] SU X Y, ZHOU L, JING L, et al. Experimental investigation and constitutive description of railway wheel/rail steels under medium-strain-rate tensile loading [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29(3): 2015–2025. DOI: 10.1007/s11665-020-04720-1.
- [9] 郭子涛, 高斌, 郭钊, 等. 基于 J-C 模型的 Q235 钢的动态本构关系 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 804–810. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0333.
- GUO Z T, GAO B, GUO Z, et al. Dynamic constitutive relation based on J-C model of Q235 steel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 804–810. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0333.
- [10] 张伟, 肖新科, 魏刚. 7A04 铝合金的本构关系和失效模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(1): 81–87. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)01-0081-07.
- ZHANG W, XIAO X K, WEI G. Constitutive relation and fracture model of 7A04 aluminum alloy [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(1): 81–87. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)01-0081-07.
- [11] 贾东, 黄西成, 胡文军, 等. 基于 J-C 模型的镁合金 MB2 动静态拉伸破坏行为 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(6): 1010–1016. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1010-07.
- JIA D, HUANG X C, HU W J, et al. Fracture behavior of magnesium alloy MB2 under quasi-static and dynamic tension loading based on Johnson-Cook model [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(6): 1010–1016. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1010-07.
- [12] 门建兵, 卢易浩, 蒋建伟, 等. 杆式 EFP 用钽钨合金 JC 失效模型参数 [J]. *高压物理学报*, 2020, 34(6): 065105. DOI: 10.11858/gywlyxb.20200550.
- MEN J B, LU Y H, JIANG J W, et al. Johnson-Cook failure model parameters of Tantalum-Tungsten alloy for rod-shaped EFP [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(6): 065105. DOI: 10.11858/gywlyxb.20200550.
- [13] 余万千, 郁锐, 崔世堂. 考虑应力三轴度影响的 30CrMnSiNi2A 钢韧性断裂研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(3): 031404. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0334.
- YU W Q, YU R, CUI S T. On ductile fracture of 30CrMnSiNi2A steel considering effects of stress triaxiality [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(3): 031404. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0334.
- [14] 郭子涛, 舒开鸥, 高斌, 等. 基于 J-C 模型的 Q235 钢的失效准则 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1325–1332. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0163.
- GUO Z T, SHU K O, GAO B, et al. J-C model based failure criterion and verification of Q235 steel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1325–1332. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0163.
- [15] BOBBILI R, MADHU V. Flow and fracture characteristics of near alpha titanium alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 684: 162–170. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.05.155.
- [16] 丁向群, 何国求, 陈成澍, 等. 6000 系汽车车用铝合金的研究应用进展 [J]. *材料科学与工程学报*, 2005, 23(2): 302–305. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2812.2005.02.039.
- DING X Q, HE G Q, CHEN C S, et al. Advance in studies of 6000 aluminum alloy for automobile [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2005, 23(2): 302–305. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2812.2005.02.039.
- [17] AMBRIZ R R, BARRERA G, GARCÍA R, et al. A comparative study of the mechanical properties of 6061-T6 GMA welds obtained by the indirect electric arc (IEA) and the modified indirect electric arc (MIEA) [J]. *Materials & Design*, 2009, 30(7): 2446–2453. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.10.025.
- [18] LEE W S, SHYU J C, CHIOU S T. Effect of strain rate on impact response and dislocation substructure of 6061-T6 aluminum alloy [J]. *Scripta Materialia*, 1999, 42(1): 51–56. DOI: 10.1016/S1359-6462(99)00308-5.
- [19] ZHU D J, MOBASHER B, RAJAN S D, et al. Characterization of dynamic tensile testing using aluminum alloy 6061-T6 at intermediate strain rates [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2011, 137(10): 669–679. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000264.
- [20] ACHARYA S, GUPTA R K, GHOSH J, et al. High strain rate dynamic compressive behaviour of Al6061-T6 alloys [J].

- Materials Characterization*, 2017, 127: 185–197. DOI: 10.1016/j.matchar.2017.03.005.
- [21] ODESHI A G, OWOLABI G M, SINGH M N K, et al. Deformation and fracture behavior of alumina particle-reinforced Al 6061-T6 composite during dynamic mechanical loading [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38(11): 2674–2680. DOI: 10.1007/s11661-007-9242-2.
- [22] 孟宪明, 谢书港, 方锐, 等. B340-590DP 双相高强钢板的动态变形行为 [J]. *钢铁研究学报*, 2015, 27(6): 51–55. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20140425.
- MENG X M, XIE S G, FANG R, et al. Dynamic deformation behavior of B340-590DP steel sheet [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2015, 27(6): 51–55. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20140425.
- [23] YAN S L, YANG H, LI H W, et al. Variation of strain rate sensitivity of an aluminum alloy in a wide strain rate range: mechanism analysis and modeling [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 688: 776–786. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.07.077.
- [24] SUO T, CHEN Y Z, LI Y L, et al. Strain rate sensitivity and deformation kinetics of ECAPed aluminium over a wide range of strain rates [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 560: 545–551. DOI: 10.1016/j.msea.2012.09.100.
- [25] 谢凡, 张涛, 陈继恩, 等. 应力三轴度的有限元计算修正 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(1): 8–14. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)01-0008-07.
- XIE F, ZHANG T, CHEN J E, et al. Updating of the stress triaxiality by finite element analysis [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(1): 8–14. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)01-0008-07.
- [26] BAO Y B, WIERZBICKI T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46(1): 81–98. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2004.02.006.
- [27] BRIDGMAN P W. *Studies in large plastic flow and fracture with special emphasis on the effects of hydrostatic pressure* [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1952.
- [28] 贾东, 黄西成, 莫军. 基于应变路径和分布效应的应力三轴度确定方法 [J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(10): 2625–2629; 2634. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2013.10.002.
- JIA D, HUANG X C, MO J. A method to determine stress triaxiality based on strain path and distribution effect [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(10): 2625–2629; 2634. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2013.10.002.
- [29] 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. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2020.03.007.
- YI H J, ZHEN Y, CAO Y G, et al. Research on the relationship between fracture strain and triaxiality of 6061-T6 aluminum alloy [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2020, 42(3): 551–558. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2020.03.007.

(责任编辑 张凌云)