DOI: 10.3901/JME.2020.18.081

6061-T651 铝合金动态力学性能及断裂准则修正*

邓云飞 张永 曾宪智 杨永刚
(中国民航大学航空工程学院 天津 300300)

摘要: 为研究应力三轴度、Lode角、温度和应变率对6061-T651铝合金材料断裂特性的影响,利用万能材料试验机,分别进行不同应力状态、温度和应变率下的材料力学性能测试试验。首先,通过测试试验发现,6061-T651铝合金材料的断裂应变随应力三轴度的增加而减小,并且在低应力三轴度范围内,Lode角对材料断裂应变影响十分明显。当材料温度低于250℃时,温度对材料流动应力有显著影响,断裂应变基本不受温度影响;当材料温度高于250℃时,温度对材料的流动应力和断裂应变都具有显著影响。此外,应变率对6061-T651铝合金材料的断裂应变无显著影响。其次,基于力学性能试验结果,修正Johnson-Cook(J-C)断裂准则得到Modified Johnson-Cook(MJC)准则,标定MJC和Modified Mohr-Coulomb(MMC)断裂准则的各项参数。最后,采用一级气炮进行球形弹体撞击6061-T651铝合金板试验,得到靶板的弹道极限速度和失效模式。采用ABAQUS/Explicit有限元软件建立相应的弹体撞击靶板三维模型,进行数值模拟计算。通过对比试验与数值模拟结果,验证模型及其参数的有效性。相对于Lode角无关的MJC断裂准则,Lode角相关的MMC断裂准则预测结果更接近于试验。

关键词: 应力状态; 断裂准则; Lode参数; 数值模拟; 应力三轴度

中图分类号: TG156

Dynamic Mechanical Properties and Modification of Fracture Criteria of 6061-T651 Aluminum Alloy

DENG Yunfei ZHANG Yong ZENG Xianzhi YANG Yonggang

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300)

Abstract: In order to investigate the effects of stress triaxiality, Lode angle, temperature and strain rate on the fracture characteristics of 6061-T651 aluminum alloy materials, the mechanical property tests of materials are carried under different stress states, temperature and strain rate using universal material testing machine. Firstly, the mechanical property test results show that the fracture strain of 6061-T651 aluminum alloy material decreases with the increase of stress triaxiality. And also, the fracture strain of material related to the Lode angle parameter, especially the effect of the Lode angle more significantly at the range of lower stress triaxiality. When the temperature less than 250℃, the temperature of material has significant influence on its flow stress, while the influence of temperature on its fracture strain can be ignored. While the temperature more than 250℃, the temperature of material has greatly influence on its flow stress and fracture strain. Moreover, the strain rate has no significant effect on the fracture strain of 6061-T651 aluminum alloy. Subsequently, basing on the test results of mechanical properties, the Modified Johnson-Cook(MJC) criterion is obtained by modifying Johnson-Cook(J-C) fracture criterion, and the parameters of MJC and Modified Mohr-Coulomb(MMC) fracture criterion are calibrated. Finally, the impact test of sphere projectile penetrating the 6061-T651 aluminum alloy target plate is conducted on a one-stage gas gun, and also the ballistic limit velocity and failure mode of target are obtained. In order to verify the validity of the model and parameters, and the corresponding 3D model of projectile impact target is established by using ABAQUS/Explicit finite element software. The results showed that the prediction results of Lode angle dependent MMC fracture criterion is closer to the test compared with the Lode angle independent MJC fracture criterion.

Key words: stress states; fracture criterion; Lode angle; numerical simulation; stress triaxiality

* 国家自然科学基金青年基金(11702317)和中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122019076)资助项目。20191215 收到初稿, 20200505 收到修改稿

0 前言

铝合金广泛应用于航空航天、交通及建筑等领域,容易出现外来物的冲击及结构碰撞等现象。铝合金材料发生撞击时将汇聚高温、高压、冲击波的传播等瞬态物理现象,同时在高温高应变率下金属材料会产生大塑性变形、断裂破坏以至熔化和气化等相变过程。因此,研究适用于描述铝合金材料在不同应力状态、大应变、高应变率及高温下力学行为的断裂准则,对于模拟防护结构在外来物高速撞击下的瞬态响应至关重要,对于现代防护结构的设计也有着重要意义^[1]。材料的失效行为与多种因素有关,并包含复杂的物理机制,文献中常见的断裂准则包含常塑性应变断裂准则、最大剪应力或主应力断裂准则、基于塑性功的 C-L 断裂准则、基于经验的 J-C 断裂准则及含 Lode 角的断裂准则^[2]等。目前,对于仅考虑应力三轴度的 J-C 断裂准则,在冲击相关的问题中,有很多成功的应用。GILIOLI 等^[3]通过光滑圆棒和缺口圆棒拉伸试验、剪切试验,研究了不同应力状态下 6061-T6 铝合金的力学行为。对修改的 J-C 和 B-W 断裂准则进行参数标定,通过弹靶冲击试验和相应的数值模拟验证了相关准则及参数的有效性,发现修改的 J-C 和 B-W 准则预报结果与试验都具有较好的一致性。SENTHIL 等^[4]通过常温准静态拉伸试验、不同缺口半径下的缺口拉伸试验和不同温度下的准静态拉伸试验,研究了 7075-T651 铝合金材料的力学性能,发现材料延性随应力三轴度的增加而减少,而随温度的增加而增加。其次,基于力学性能试验数据校准了 J-C 本构模型和断裂准则。最后,进行了弹靶冲击试验,并进行了相应的数值仿真计算,发现采用修改 J-C 本构模型和断裂准则预测的材料断裂特性与试验结果基本一致。XIAO 等^[5]、IQBAL 等^[6]和 GIGLIO 等^[7]分别利用 7A04-T6 铝合金、Armox 500T 钢和 Ti-6Al-4V 钛合金材料进行了与文献[3-4]相似的力学性能试验,得到了相似的结论,并通过试验数据校准了 J-C 本构模型和断裂准则。采用修改 J-C 本构模型和断裂准则进行 Taylor 杆或弹靶撞击试验的数值模拟,发现 Taylor 杆或者靶板的变形和断裂行为与试验结果一致。

但是,对于一些材料,J-C 断裂准则未能合理的预测材料延性,发现在高速冲击作用下,材料的变形与断裂与复杂应力状态相关。对此,WEN 等^[8]提出了一种基于应力三轴度和 Lode 角相关的新断

裂准则,该准则不仅适用于单向加载下的各种应力状态,而且适用于复杂的加载状态。试验结果表明,新断裂准则预测精度在应力三轴度范围内不亚于同类准则,并且仅有三个参数。XIAO 等^[9-11]利用 2024-T351 与 6061-T6511H 铝合金材料,分别进行了常温 and 高温准静态、动态压缩试验,揭示了应力状态、应变率和温度对材料延性的影响。研究发现金属材料的延性不仅依赖于应力三轴度,而且与 Lode 角相关,特别是在低应力三轴度范围内 Lode 角影响更明显。此外,利用力学性能试验数据修改并标定了 J-C 和 MMC 断裂准则。最后,分别采用 MJC 和 MMC 断裂准则数值预测 Taylor 杆的变形与断裂行为、靶板的弹道极限及失效模式。预测结果表明,MJC 断裂准则高估了材料的延性,而低估了材料的断裂行为,并且高估了靶板的弹道极限。不过,采用考虑 Lode 角的 MMC 断裂准则预测结果接近于试验。刘本学等^[12]利用 Weldox900E 钢进行了不同应力状态下的常温准静态拉伸试验,获得了与 XIAO 等^[9-11]相似的结论。然而,XIAO 等^[13]对 Weldox700E 材料进行了弹靶冲击试验,并采用 MJC 和 MMC 断裂准则进行数值仿真计算,与试验对比发现,MJC 和 MMC 断裂准则预报弹道极限均接近于试验,Lode 角对 Weldox700E 材料的剪切冲塞破坏机理和弹道极限预报无显著影响。

目前,考虑复杂应力状态,即同时包含应力三轴度和 Lode 角,采用 Lode 角相关的断裂准则在数值预报中的应用仍然较少,并且关于 Lode 角对 6061-T651 铝合金材料特性是否存在影响的报道鲜见,尤其在高速冲击领域内特别缺乏相关研究。因此,有必要研究应力三轴度和 Lode 角同时相关的断裂准则在冲击断裂问题数值预报中的作用。本文拟对 6061-T651 铝合金进行准静态及动态力学试验测试,研究应力状态、应变率和温度对断裂应变的影响规律,并结合试验结果与数值模拟方法验证断裂准则及参数的有效性,评价含 Lode 角的断裂准则对该材料延性的影响。

1 6061-T651 铝合金材料力学性能试验与方法

利用电子万能材料试验机进行常温 and 高温准静态拉伸试验,如图 1 所示。光滑圆棒、缺口圆棒、平面应变和平面剪切试样的几何参数,如图 2 所示。

对于光滑和缺口圆棒试样, 使用全自动引伸计实时检测试样的变形过程, 如图 1a 所示。对于平面应变和平面剪切试样, 正面与背面均喷涂散斑, 基于三维非接触式实时光学应变场测量技术(Digital imaging correlation, DIC), 同时利用两个数码像机分别实时采集目标区域, 如图 1b 所示。利用试样正面变形的散斑图像, 结合试验机记录的载荷, 求得载荷-位移曲线。采用试样背面变形的散斑图像, 结合 MatchID-2D 软件计算得到试件的位移场, 从而得到试件表面的实时应变场(DIC 云图)以及相应的数据。

图 1 力学性能测试试验设备

图 2 力学性能试样(mm)

1.1 常温准静态拉伸试验

常温准静态光滑圆棒与缺口圆棒拉伸试验标距段为 25 mm, 拉伸速度为 2 mm/min, 相应的应变率为 $1.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。通过光滑圆棒与缺口圆棒准静态拉伸试验得到工程应力-应变曲线, 如图 3 所示。其中, R_2 、 R_3 、 R_9 分别表示缺口圆棒缺口尺寸半径为 2 mm、3 mm、9 mm, R_2-1 表示为缺口尺寸半径为 2 mm 圆棒的第 1 个试验, 其他以此类推。

图 3a 为光滑圆棒拉伸试验得到的工程应力-应变曲线, 从图中可以发现, 获取的两条曲线在颈缩之前吻合很好, 颈缩之后又一定的差异。图 3b 为缺口圆棒拉伸试验得到的工程-应力曲线, 从图中可以发现, 对于每种类型的试样, 进行相同条件的三次试验后获取的工程应力-应变曲线基本吻合, 并且发现对于工程应力随缺口半径的增加而减小, 工程应变随缺口半径的增加而增大。

剪切试样与平面应变试样标距段分别为 30 mm 和 7.5 mm, 拉伸速度为 2 mm/min。试验载荷-位移曲线如图 4 所示。Shear 表示剪切试样, PE 表示平面应变试样。

图3 准静态拉伸试验工程应力-应变曲线

图4 常温准静态试样载荷-位移曲线

1.2 常温动态拉伸试验

为了解应变率对 6061-T651 铝合金材料断裂特性的影响,进行了动态拉伸试验,拉伸试样尺寸参数如图 2a 所示。试样在不同应变率下的工程应力-应变曲线,如图 5 所示。拉伸速度为 200~800 mm/min,应变率为 0.133~0.533 s⁻¹。可以发现,在低应变率下,6061-T651 铝合金材料无显著的应变率强化效应和应变硬化效应,并且应变率对断裂应变也无显著影响。

图5 高速拉伸试验工程应力-应变曲线

1.3 高温准静态拉伸试验

基于三维非接触式光学实时应变场测量技术(DIC),利用材料试验机进行拉伸试验,拉伸速度为 2 mm/min,拉伸试验标距段为 40 mm。获得试件的工程应力-应变曲线,如图 6 所示。此外,计算获得了 DIC 平面应变场,如图 7 所示。可以发现,温度低于 250 °C 时,屈服强度随温度的增

图6 准静态高温拉伸试验工程应力-应变曲线

图 7 不同温度下的等效应变云图

加逐渐降低,但断裂应变无明显差异,约为 0.23。因此,在此温度范围内,温度对材料流动应力有显著影响,失效模式基本不受温度影响。但是,温度高于 250 °C 时,屈服强度随温度的增加大幅降低,断裂应变也显著增加。因此,在此温度范围内,温度对材料的流动应力和失效模式都具有显著影响。

2 断裂准则修正及参数标定

2.1 断裂准则模型

金属材料的延性断裂与材料中空洞形核、扩展和聚合有关,而微孔洞的产生和增长与材料的应力状态(应力三轴度、Lode 角)显著相关,温度和应变率对材料的断裂也有很大影响^[1]。因此,为表征金属材料的延性断裂特性,首先采用 J-C 断裂准则^[13],表达式如下

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

式中, ε_f 为当前应力状态、温度及应变率下材料的断裂应变; $\eta = \sigma_m / \sigma_{eq} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / (3\sigma_{eq})$ 为应力三轴度; $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 依次为第一、第二和第三主应力, σ_m 为静水压力; σ_{eq} 为 Von Mises 等效应力; $\dot{\varepsilon}_{eq}^* = \dot{\varepsilon}_{eq} / \dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲化应变率; $\dot{\varepsilon}_{eq}$ 为当前应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为无量纲温度, T 、 T_r 、 T_m 为材料当前、参考温度及熔点; $D_1 \sim D_5$ 为材料性能参数。

其次,由于 J-C 断裂准则只考虑了应力三轴度对断裂应变的影响,对此,为全面考虑应力状态对断裂应变的影响,引入含 Lode 角的 MMC 断裂准则^[9]描述金属的断裂特性。MMC 断裂准则也包含应变率和温度的影响,表达式如下

$$\varepsilon_f = \left\{ \frac{A_{pl}}{c_2} \left[c_0^s + \frac{\sqrt{3}}{2 - \sqrt{3}} (c_0^{ax} - c_0^s) \left(\sec \frac{\bar{\theta} \pi}{6} - 1 \right) \right] \right. \\ \left. \left[\sqrt{\frac{1 + c_1^2}{3}} \cos \left(\frac{\bar{\theta} \pi}{6} \right) + c_1 \left(\eta + \frac{1}{3} \sin \frac{\bar{\theta} \pi}{6} \right) \right] \right\}^{-\frac{1}{n_f}} \times \\ (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}_{eq}^*) (1 + D_6 T^{*D_7}) \quad (2)$$

$$c_{\theta}^{ax} = \begin{cases} 1 & \bar{\theta} \geq 0 \\ c_{\theta}^c & \bar{\theta} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, η 为应力三轴度; A_{pl} , n_f , c_1 , c_2 , c_0^c , c_0^s 为材料性能参数; $\bar{\theta}$ 为 Lode 角, 定义为

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{2}{\pi} a \cos \left[\frac{27}{2\sigma_{eq}^3} (\sigma_1 - \sigma_m)(\sigma_2 - \sigma_m)(\sigma_3 - \sigma_m) \right] \quad (4)$$

数值模拟中,断裂标准采用线性损伤演化^[10]损伤变量定义为

$$D = \sum \Delta \varepsilon_{eq} / \varepsilon_f \quad (5)$$

式中, $\Delta \varepsilon_{eq}$ 为等效塑性应变增量。当损伤变量 D 达到 1 时,认为材料失去承载能力,并删除该单元。

本构模型采用修改的 J-C 模型(MJC)^[10],表达式如下

$$\sigma_{eq} = \{ \alpha (A + B \varepsilon_{eq}^n) + (1 - \alpha) [A + Q(1 - \exp(-\beta \varepsilon_{eq}))] \} \times \\ (1 + C \ln \dot{\varepsilon}_{eq}^*) (1 - p T^{*m}) \quad (6)$$

式中, ε_{eq} 为等效塑性应变; A 、 B 与 Q 、 n 与 β 分别为参考应变率、温度下材料的屈服强度、应变硬化系数和硬化指数; α 为修正系数,取值范围为 $0 \leq \alpha \leq 1$; C 为应变率敏感系数; p 、 m 分别为温度软化系数及指数。

2.2 断裂准则应力状态项参数标定

为考虑应力三轴度对断裂准则的影响,进行了不同缺口尺寸的缺口圆棒常温准静态拉伸试验(光滑圆棒可认为缺口半径为无穷大),缺口试样尺寸参数如图 1c 所示。通过常温准静态缺口圆棒拉伸试验,获得载荷-位移曲线如图 4b 所示。常温准静态下,应变率项和温度项值为 1。因此, J-C 断裂准则表达式如下

$$\varepsilon_f = D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta) \quad (7)$$

利用 ABAQUS/standard 有限元软件建立四种缺口试样的轴对称模型,如图 8a~8d 所示。模型中心 20 mm 区域内网格尺寸为 $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$,沿模型两端网格尺寸逐渐变大,网格单元类型为 CAX4R。模型一端设置约束另一端施加位移。将 6061-T651 铝合金材料的 MJC 本构模型应变项参数嵌入到有限元程序中(本构模型与参数通过同一系列试验获得),通过数值模拟获得载荷-位移曲线,如图 4 所示。

图8 不同力学性能试验的有限元模型

对比试验及数值模拟结果,可以发现光滑圆棒试样试验与仿真载荷-位移曲线拟合度很好,如图4a所示。对于其他应力状态试验,每种试样的试验与数值模拟载荷-位移曲线基本吻合,如图4b~4d所示。这表明采用MJC本构模型及其参数,能够合理的预测不同应力状态下试样的载荷-位移关系曲线,即能够很好地反映材料的流动应力特性。同时,表明MJC本构模型及参数能够合理预测6061-T651铝合金在不同应变下的流动应力。因此,根据试验载荷-位移曲线的断裂点,确定数值模拟试样断裂时对应的分析步时间,取对称轴中心附近单元的等效塑性应变值为断裂应变。以等效塑性应变值最大的单元为对象,定义历程变量输出应力三轴度和Lode角,如表1所示。

表1 各应力状态下的断裂应变

试样类型	应力三轴度 η	Lode 角 $\bar{\theta}$	断裂应变 ϵ_f
$R=2$	1.335	1	0.083 5
$R=3$	1.117	1	0.136 4
$R=9$	0.782	1	0.337 2
$R=\infty$	0.612	1	0.459 5
Shear	0.018	0.017	0.611 1
PE	0.590	0.185	0.286 8

对于缺口试样,断裂应变随应力三轴度的变化关系利用式(7)拟合,如图9所示,得到参数 D_1 、 D_2 、 D_3 ,如表3所示。

图9 J-C断裂准则预测的不同应力状态下断裂应变

通过缺口圆棒准静态拉伸试验获得了 Lode 角为 1 时, 多种应力三轴度下的断裂应变。为获得不同 Lode 角下的断裂应变, 进行了剪切和平面应变试验, 得到载荷-位移曲线, 如图 4c 与 4d 所示。同时, 建立剪切和平面应变试样的 1/2 对称有限元模型, 如图 8e 和 8f 所示。模型中心区域内网格尺寸为 $0.1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$, 沿模型两端网格尺寸逐渐变大, 网格单元类型为 C3D8R。模型一端设置约束另一端施加位移。将光滑圆棒 MJC 本构模型应变项参数嵌入有限元程序中, 进行数值模拟得到载荷-位移曲线, 如图 4c 与 4d 所示, 可以发现在试件断裂前数值模拟与试验载荷-位移曲线基本吻合, 这说明了 MJC 本构模型应变项参数同样适用于剪切和平面应变拉伸试验。因此, 可以通过数值模拟计算获取剪切和平面应变下材料的应力三轴度、Lode 角与断裂应变。

采用 MMC 断裂准则描述应力状态对断裂应变的影响, 在常温准静态下表达式如下

$$\varepsilon_f = \left\{ \frac{A_{pl}}{c_2} \left[c_0^s + \frac{\sqrt{3}}{2-\sqrt{3}} (c_0^{ax} - c_0^s) \left(\sec \frac{\bar{\theta}\pi}{6} - 1 \right) \right] \left[\sqrt{\frac{1+c_1^2}{3}} \cos \frac{\bar{\theta}\pi}{6} + c_1 \left(\eta + \frac{1}{3} \sin \frac{\bar{\theta}\pi}{6} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{n_F}} \quad (8)$$

与缺口圆棒试样相同, 结合剪切与平面应变试

验、数值模拟得到多应力状态下的断裂应变, 如表 1 所示。根据材料的断裂应变与应力三轴度和 Lode 角之间的影响关系, 绘制三维图, 并利用式(8)拟合多应力状态下的断裂应变, 结果如图 10 所示。同时, 得到材料性能参数 A_{pl} 、 c_1 、 c_2 、 c_0^s 、 c_0^s 和 n_F , 如表 3 所示。

图 10 MMC 断裂准则预测的不同应力状态下断裂应变

基于 MJC 本构模型, 利用有限元软件进行不同拉伸试样的数值模拟, 得到断裂时刻等效塑性应变值云图, 如图 11 所示。图 11e 与图 11g 为剪切与平面应变试样断裂时刻的 PEEQ 云图, 图 11f 为剪切试样断裂时刻表面应变场云图。对于剪切试件, 数值仿真与 DIC 计算得到的 PEEQ 值基本相等, 并且红色区域形状(试样断裂区域形状)也基本吻合, 这表明采用 MJC 本构模型及参数能够有效地预测材料断裂时刻的应力状态值。

图 11 断裂瞬间等效塑性应变

2.3 断裂准则应变率项参数标定

对于常温下动态加载试验得到试件的断裂应

变, 如式(9)所示。高速拉伸试样断裂应变通过式(10)计算获得, 以 $\dot{\varepsilon}_0 = 1.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 作为参考应变率, 给

出断裂应变随无量纲应变率的变化,如图12所示。采用式(9)对图12中数据进行线性拟合获得应变率项系数, $D_4=0.01$ 。

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{f1}(1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}_{eq}^*) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{f1} = \ln(A_0 / A_f) \quad (10)$$

式中, A_0 为试样最小截面的初始面积; A_f 为试样断裂时的断口面积; ε_{f1} 为常温准静态条件下试样的断裂应变。

图12 不同无量纲应变率下的断裂应变

2.4 断裂准则温度项修改及参数标定

准静态高温拉伸试验获取的载荷-位移曲线如图13所示。从图中可以发现,对于不同温度下的拉伸试验,载荷随位移的增加而逐渐减小的趋势,采用MJC断裂准则数值仿真计算能够获取相似的结果。此外,数值模拟获取的不同温度下载荷-位移曲线与试验结果基本吻合。因此,MJC断裂准则及参数也能够合理预测6061-T651铝合金材料在不同温度下的流动应力。

图13 高温准静态试样载荷-位移曲线

对于准静态高温拉伸试验,试样断裂应变如式(11)所示。断裂应变利用MatchID-2D软件计算得到,如图14所示。使用J-C断裂准则对温度项进行拟合,得到材料参数 $D_5=0.0767$,可以发现使用J-C断裂准则未能较好地反映不同温度下的断裂应变。因此,对J-C断裂准则温度项进行修正,得到MJC断裂准则,如式(12)所示。使用MJC断裂准则进行

拟合,结果如图14所示,得到材料参数 D_6 、 D_7 值如表2所示。

表2 6061-T651 铝合金材料参数

弹性模量	泊松比	屈服强度	硬化系数	硬化指数
E/GPa	μ	A/MPa	B/MPa	n
64.0	0.33	278.2	245.2	0.817
密度	硬化系数	硬化指数	修正系数	应变率敏感系数 C
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Q/MPa	β	α	
2 700	58.3	9.16	0.1	0.025 6
温度软化系数 p	温度软化指数 m	参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0/(\text{s}^{-1})$	比热容 C_p $/(J\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	参考温度 T_r $/\text{K}$
2.745	2.387	1.33×10^{-3}	890	294
D_1	D_2	D_3	D_4	D_6
-0.086	1.539	-1.681	0.01	7.77
D_7	A_{PL}/MPa	n_F	c_1	c_2/MPa
4.81	358.9	0.062	0.051	183.5
融化温度 T_{melt}/K	c_θ^c	c_θ^s		
925	1	0.910		

从图14可以发现,MJC断裂准则能很好地描述断裂应变随无量纲化温度的变化关系及趋势。

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{f1}(1 + D_5 T^*) \quad (11)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{f1}(1 + D_6 T^{*D_7}) \quad (12)$$

图14 不同无量纲温度下的断裂应变

表3对比了不同温度下(不同无量纲温度下)试验获取的断裂应变值、J-C与MJC断裂准则预测的断裂应变值,及不同准则与试验之间的误差比较。可以发现,MJC断裂准则的预测值更接近于试验结果。

表3 试验断裂应变值与断裂准则预测值对比

当前温度 $T/^\circ\text{C}$	无量纲温度 T^*	试验断裂应变 ε_f	J-C 预测断裂应变 ε_f	J-C 断裂应变误差(%)	MJC 预测断裂应变 ε_f	MJC 断裂应变误差(%)
15	0	0.23	0.23	0	0.23	0
100	0.13	0.27	0.25	8	0.23	14.8
150	0.21	0.23	0.27	17.4	0.24	4.3
200	0.29	0.21	0.28	33.3	0.24	14.3
250	0.37	0.22	0.30	36.4	0.25	13.6
300	0.45	0.25	0.31	24	0.27	8
350	0.53	0.35	0.32	8.6	0.32	8.6
400	0.61	0.39	0.34	12.8	0.39	0

MJC 断裂准则如式(13)所示

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta)] \{ (D_4 \dot{\varepsilon}^{*1/n_f} + D_5 T^{*D_6}) \} \quad (13)$$

MMC 断裂准则如式(14)所示

$$\varepsilon_f = \left\{ \frac{A_{pl}}{c_2} \left[c_0^s + \frac{\sqrt{3}}{2-\sqrt{3}} (1-c_0^s) \left(\sec \frac{\bar{\theta}\pi}{6} - 1 \right) \right] \times \right. \\ \left. \left[\sqrt{\frac{1+c_1^2}{3}} \cos \frac{\bar{\theta}\pi}{6} + c_1 \left(\eta + \frac{1}{3} \sin \frac{\bar{\theta}\pi}{6} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{n_f}} \times \\ (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}_{eq}^*) (1 + D_6 T^{*D_7}) \quad (14)$$

3 断裂准则模型及参数有效性验证

使用直径为 12.67 mm、材料为 Cr12MnV 的球形弹体正撞击厚度为 2 mm、边长为 100×100 mm、材料为 6061-T651 的铝合金靶板。靶板的有效直径为 80 mm，试验中弹体未见明显变形。

利用 ABAQUS/Explicit 有限元软件建立弹靶撞击的三维有限元模型，如图 15 所示。靶板根据有效直径建模，靶板中心区域网格尺寸 0.15 mm×0.15 mm×0.15 mm，沿直径方向网格尺寸逐渐变大，对靶板周围建立固支约束。弹体按实际尺寸、质量建模，采用双线性硬化模型^[12]，弹体网格尺寸为 0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm。弹体与靶板的单元类型设为 C3D8R。设置弹体与靶板的接触时，考虑摩擦力的作用，因此摩擦系数设为 0.1。最后，将 MJC 本构模型、以及 MJC 与 MMC 断裂准则及参数分别嵌入到有限元程序中，进行与试验对相应工况的数值模拟计算。

利用 RECHT^[14]提出的弹道极限公式(R-I 公式)处理弹体速度数据，表达式如下

$$v_r = a(v_i^p - v_{bl}^p)^{1/p} \quad (15)$$

式中， a 、 p 为模型参数； v_i 、 v_r 与 v_{bl} 分别为初始速度、剩余速度及弹道极限速度。

图 15 球形弹体撞击靶板有限元模型

利用最小二乘法对弹体的初始-剩余速度进行拟合，如图 16 所示。弹体的弹道极限分别为 $v_{Test}=138.6$ m/s、 $v_{MMC}=137.9$ m/s、 $v_{MJC}=152.4$ m/s。可以发现，MMC 断裂准则预报的结果与试验基本一致，MJC 断裂准则预报结果高于试验。

图 16 试验与数值模拟的弹体初始-剩余速度对比

图 17 给出了靶板在弹体不同初始速度撞击下

初始速度 v_i /(m/s)	试验	MJC	MMC
141.7			
167.2			
231.9			

图 17 试验和数值仿真靶板失效模式对比

的失效模式。当弹体初始撞击速度为 141.7 m/s 时, MJC 断裂准则预报为弹体未贯穿靶板, 但有冲塞产生, 而 MMC 断裂准则预报的弹体剩余速度、靶体失效模式与试验基本一致。当弹体初始撞击速度为 167.2 m/s 时, MJC 和 MMC 断裂准则预报靶板的开裂花瓣数量分别为 7 和 10 个, 而试验结果为 11 个, MMC 准则预报结果与试验基本一致。当弹体初始撞击速度为 231.9 m/s 时, MJC 和 MMC 断裂准则预报靶板的开裂花瓣数量分别为 9 和 10 个, 而试验结果为 10 个, MMC 准则预报结果与试验一致。此外, MJC 断裂准则预报结果高估了材料的延性。

通过对比弹体撞击的初始-剩余速度、弹道极限和失效模式。可以发现, MJC 断裂准则预报结果高估了靶板的弹道极限和材料的延性, 而 MMC 断裂准则预报结果与试验结果基本一致。因此, 考虑多应力状态的 MMC 断裂准则能更好地预测 6061-T651 铝合金的抗冲击特性。

4 结 论

通过材料力学性能测试, 研究了应力三轴度、Lode 角、应变率和温度对 6061-T651 铝合金材料断裂特性的影响。确立了 MJC 及 MMC 断裂准则, 标定了断裂准则参数, 并且通过高速冲击试验验证了模型的有效性。

(1) 6061-T651 铝合金的断裂应变随应力三轴度增加而减小, 并且断裂应变与应力三轴度和 Lode 角同时相关, 特别在低应力三轴度范围内, Lode 角的影响更加显著。

(2) 当 6061-T651 铝合金材料温度低于 250 °C 时, 断裂应变值约为 0.23, 即断裂应变基本不受温度影响, 但是温度对材料流动应力有显著影响; 当材料温度高于 250 °C 时, 温度对材料的流动应力和断裂应变都具有显著影响。

(3) 通过圆球形弹体高速冲击靶板试验, 对材料断裂准则及其参数有效性进行了验证。MJC 断裂准则预测的弹道极限高于试验, 并且高估了靶板材料的延性, 而 MMC 断裂准则预测结果与试验比较一致。

(4) 6061-T651 铝合金材料的变形和失效破坏行为与 Lode 角相关, 同时考虑应力三轴度与 Lode 角参数的断裂准则, 能更准确地预测材料在大变形、高温和高应变率下的断裂失效行为。

参 考 文 献

- [1] 郭子涛, 舒开欧, 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.
- [2] GUO Zitao, SHU Kaiou, GAO Bin, et al. J-C model based failure criterion and verification of Q235 steel[J]. Explosion and shock waves, 2018, 38(6): 1325-1332.
- [3] 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: 31-48.
- [4] GIGLIO A, MANES A, GIGLIO M. Predicting ballistic impact failure of aluminium 6061-T6 with the rate-independent Bao-Wierzbich fracture model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 76: 207-220.
- [5] SENTHI K, IQBAL M A, CHANDEL P S, et al. Study of the constitutive behavior of 7075-T651 aluminum alloy[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 108: 171-190.
- [6] XIAO Xinke, ZHANG Wei, WEI Gang. Experimental and numerical investigation on the deformation and failure behavior in the Taylor test[J]. Materials and Design, 2011, 32: 2663-2674.
- [7] IQBAL M A, SENTHIL, SHARMA P, et al. An investigation of the constitutive behavior of Armox 500T steel and armor piercing incendiary projectile material[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 96: 146-164.
- [8] GIGLIO M, MANES A, VIHNAO F. Ductile fracture locus of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 54: 121-135.
- [9] WEN H J, ASCE S M, MAHMOUD H, et al. New model for ductile fracture of metal alloys. I: monotonic loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 142(2): 1-15.
- [10] XIAO Xinke, HAO Pan, BAI Yuanli. Application of the modified Mohr-Coulomb fracture criterion in predicting the ballistic resistance of 2024-T351 aluminum alloy plates impacted by blunt projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 123: 26-37.
- [11] XIAO Xinke, MU Zhongcheng, HAO Pan, et al. Effect of the Lode parameter in predicting shear cracking of 2024-T351 aluminum alloy Taylor rods[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 120: 185-201.
- [12] 杨庆年, 陈孝珍, 肖新科, 等. Lode 相关断裂准则在 6061-T651H 铝合金 Taylor 杆断裂预报中的应用[J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 142-149.
- [13] YANG Qingnian, CHEN Xiaozhen, XIAO Xinke, et al.

- Application of Lode dependent fracture criterion in predicting fracture of 6061-T6511H aluminium alloy Taylor rods[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(2): 142-149.
- [12] 刘本学, 焦炳银, 肖新科, 等. Lode 参数对 Taylor 撞击数值仿真的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2019, 42(2): 82-86.
- LIU Benxue, JIAO Bingyin, XIAO Xinke, et al. Influence of lode parameter on numerical simulation of Taylor impact[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2019, 42(2): 82-86.
- [13] XIAO Xinke, WANG Yaopei, VLADISLAV V V. Effect of Lode angle in predicting the ballistic resistance of Weldox 700 E steel plates struck by blunt projectiles[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 128: 46-71.
- [14] RECHT R F, IPSON T W. Ballistic perforation dynamics[J]. *Journal of Applied Mechanics* 1963, 30: 384-390.
-
- 作者简介: 邓云飞, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为材料与结构动态力学性能、冲击防护理论与应用。
E-mail: yfdeng@cauc.edu.cn