

DOI: 10.3901/JME.2020.20.074

6061-T651铝合金动态力学性能及J-C本构模型的修正*

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

摘要: 为合理描述 6061-T651 铝合金的应力流动行为, 利用万能材料试验机和霍普金森压杆, 分别进行准静态、高温和高应变率下的材料力学性能测试, 获得材料在不同条件下的应力应变曲线。基于试验结果, 修正 Johnson-Cook 本构模型得到 MJC(Modified Johnson-Cook)模型, 并标定 MJC 模型各项参数。为校验 MJC 模型及参数的有效性, 利用一级气炮发射直径为 5.95 mm 的圆柱弹体冲击刚性靶的 Taylor 杆试验以及直径为 12.68 mm 的刚性弹撞击厚度为 2 mm 靶板的试验。最后, 采用 ABAQUS/Explicit 有限元软件建立 Taylor 杆和弹靶冲击试验的三维模型, 基于 MJC 本构模型进行 Taylor 杆冲击、以及结合 MMC(Modified Mohr-Coulomb)断裂准则进行弹靶冲击的数值模拟计算。研究结果表明, 修正的 MJC 本构模型能够有效地描述 6061-T651 铝合金材料在大应变、高应变率和高温下材料的应力流动行为和变形行为。

关键词: 6061-T651 铝合金; 力学性能; 本构模型; Taylor 杆; 冲击

中图分类号: TG156

Dynamic Mechanical Properties and Modification of J-C Constitutive Model of 6061-T651 Aluminum Alloy

DENG Yunfei ZHANG Yong WU Huapeng ZENG Xianzhi
(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300)

Abstract: In order to describe the stress-flow behavior of 6061-T651 aluminum alloy reasonably, the mechanical property of 6061-T651 aluminum alloy under quasi-static, high temperature and high strain rate are tested by universal material testing machine and Hopkinson pressure bar respectively, and the stress-strain curves of 6061-T651 aluminum alloy under different conditions are obtained. Based on the experimental results, the Johnson-Cook constitutive model is modified to obtain the Modified Johnson-Cook(MJC) model, and the parameters of the MJC model are calibrated. In order to verify the validity of MJC model and parameters, Taylor bar test is carried out for cylinder projectile with a diameter of 5.95 mm to impact rigid target, and for rigid projectile with a diameter of 12.68 mm to impact a thickness of 2 mm target plate by a one-stage gas gun. Finally, the three-dimensional impact model of Taylor rod, projectile and target are established by ABAQUS/Explicit finite element software. Based on MJC constitutive model, Taylor bar impact and Modified Mohr-Coulomb(MMC) fracture criterion are used for numerical simulation of projectile and target impact. The results show that the modified MJC constitutive model can effectively describe the stress flow behavior and deformation behavior of 6061-T651 aluminum alloy under large strain, high strain rate and high temperature.

Key words: 6061-T651 aluminum alloy; mechanical property; constitutive model; Taylor rods; impact

0 前言

T651 是 6061 铝合金的主要合金, 是经过热处

理预拉伸工艺生产的高品质铝合金产品。它具有密度小、比强度高、耐腐蚀性好、易于加工、价格低廉等特点, 所以广泛应用于航空航天、高速列车、舰船和汽车等领域。在这些领域, 高速冲击、爆炸及结构碰撞等现象时常发生, 这些现象在高温及高应变率下使金属产生很大的塑性变形和复杂的应力流动行为。传统的试验方法很难全面描述金属的塑

* 国家自然科学基金(11702317)和中央高校基本科研业务费中国民航大学专项基金(3122019076)资助项目。20190915 收到初稿, 20200505 收到修改稿

性变形和应力流动行为。因此, 研究人员主要采用数值模拟方法研究金属材料在大应变、高应变率 and 高温下的材料力学行为。对此, 材料需要采用合适的本构模型进行数值模拟研究。典型的本构模型通常定义为等效应力随等效应变、应变率和温度变化的函数关系。高温、高应变率下的典型本构模型包括: 基于有效试验数据的纯经验本构模型, 如 JOHNSON 等^[1]提出的 Johnson-Cook(J-C)和 KHAN 等^[2]提出的 Khan 模型等; 基于材料变形机制的物理本构模型, 如 ZERILLI 等^[3]提出的 Zerilli-Armstrong 模型等。目前, 研究人员主要采用经验本构模型进行数值模拟, 并且对于 6 系列铝合金的研究材料主要为 6061-T6 和 6061-T6511H 铝合金, 而对于 6061-T651 铝合金的研究报道鲜见。文献[4-5]通过冲击拉伸试验、热压缩试验研究了 6061 铝合金材料流动应力与应变、应变率和温度之间的关系, 并确定了 6061 铝合金的 J-C 本构方程及其参数。杨庆年等^[6]采用 6061-T6511H 铝合金进行了多应力状态、多温度下的材料力学性能测试, 发现材料的屈服强度与温度呈非线性关系, 并且修正了 J-C 本构模型。MANES 等^[7]通过霍普金森压杆试验, 研究了 6061-T6 铝合金材料的应变率行为, 并考虑了热现象对高应变率的影响, 进一步改善了试验与数值模拟方法。

目前, 对于铝合金材料, 基于 J-C 本构模型的研究已有一定的成果。XIAO 等^[8]进行了 2024-T351 铝合金材料的力学性能试验, 发现材料的流动应力随塑性应变的增加而显著增加, 具有明显的应变强化效应; 材料的屈服强度随应变率的增加而增加, 具有显著的应变率硬化效应。此外, 通过常温准静态拉伸试验结果发现, 采用 J-C 本构模型不能合理预测材料的塑性应变与流动应力之间的关系。因此, 修正了 J-C 本构模型的应变项。张伟等^[9-10]进行了 2A12-T4 和 7A04-T6 铝合金材料的力学性能试验。试验结果表明, 对于 2A12-T4 铝合金, 应变强化效应和温度软化效应显著, 而应变率硬化效应不显著; 对于 7A04-T6 铝合金应变强化和应变率硬化效应均不显著。采用 J-C 本构模型不能有效地描述材料的塑性应变与流动应力之间的关系, 因此, 修正了 J-C 本构模型的应变项。

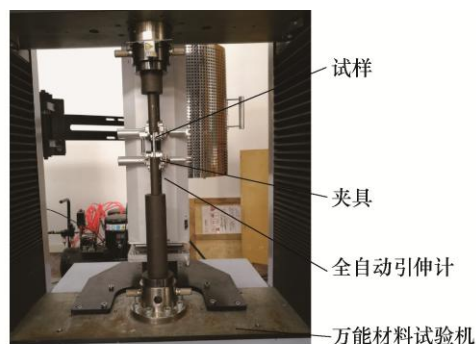
通过以上文献分析, 国内外对基于 J-C 本构模型的铝合金材料已经做了一定的研究。但是, 对于 6061-T651 铝合金的研究报道鲜见。此外, 有部分研究发现, 在准静态拉伸试验中, J-C 模型很难合理地描述材料颈缩后塑性应变与流动应力的关系,

以及温度与屈服强度、断裂应变之间的关系。特别是在高速冲击领域内, 采用 J-C 本构模型及断裂准则很难有效地预报材料的断裂失效行为。因此, 本文利用电子万能材料试验机和霍普金森压杆进行力学性能测试, 研究 6061-T651 铝合金材料在准静态、高温和高应变率下的应力流动行为。基于试验结果和有限元软件, 修正 Johnson-Cook 本构模型及进行参数标定。此外, 使用 Taylor 杆和弹靶撞击试验去验证本构模型及其参数的有效性。

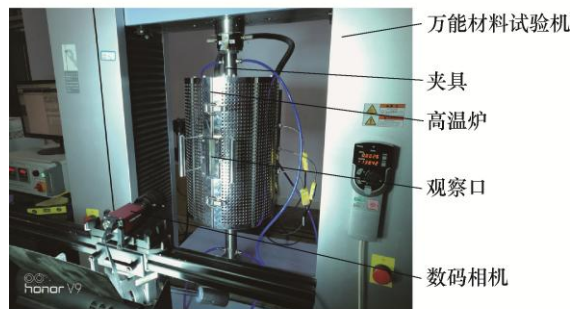
1 6061-T651 铝合金材料力学性能试验

1.1 常温准静态拉伸试验

为研究塑性应变对材料流动应力行为的影响, 利用 SHIMADZU 电子万能材料试验机进行常温准静态拉伸试验, 如图 1a 所示。试件取自厚度为 20 mm 的 6061-T651 铝合金材料轧制方向(0°方向), 准静态拉伸试件为光滑圆棒, 几何参数如图 2a 所示。试验过程中, 利用全自动引伸计实时检测准静态光滑圆棒的变形过程。



(a) 光滑圆棒拉伸试验



(b) 高温拉伸试验

图 1 力学性能测试试验设备

图 2a~2c 的样件分别用于常温准静态拉伸试验、高温准静态拉伸试验和霍普金森压杆试验。图 2a 为光滑圆棒试件, 有效直径为 6 mm, 试验温度为 15 °C, 拉伸速度为 2 mm/min, 标距段长度为 25 mm, 名义应变率为 $1.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。图 2b 为高温平

计算获得了 DIC 平面应变场, 如图 7 所示。从图 7 可以发现, 温度低于 250 °C 时, 屈服强度随温度的增加逐渐降低, 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。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。

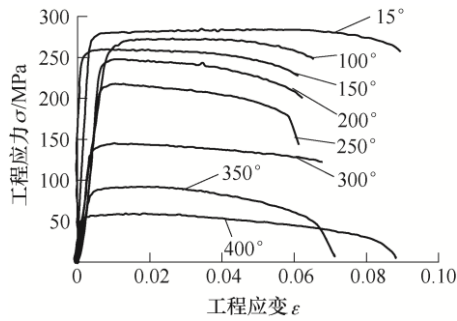


图 6 准静态高温拉伸试验工程应力-应变曲线

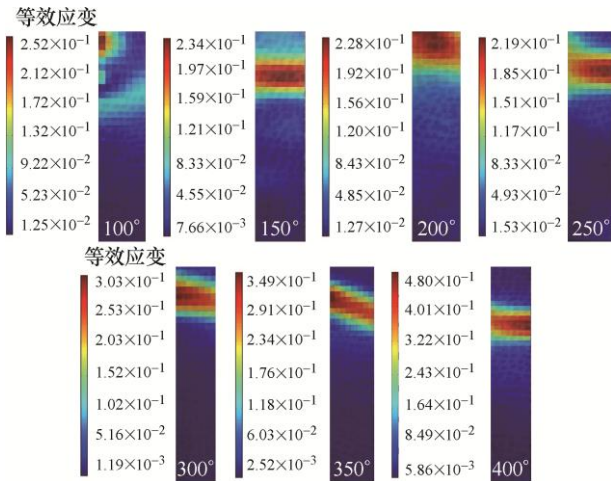


图 7 不同温度下的等效应变云图

2 材料本构模型修正及参数标定

2.1 材料的本构模型

本构模型采用 J-C 模型, 材料的流动应力定义为^[12]

$$\sigma_{eq} = f(\varepsilon_{eq}, \dot{\varepsilon}_{eq}^*, T^*) = (A + B\varepsilon_{eq}^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_{eq}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中, σ_{eq} 为 Von Mises 等效应力; ε_{eq} 为等效塑性应变; A 、 B 、 n 为参考应变率、温度下材料的屈服强度、应变硬化系数及指数; C 、 m 分别为应变率硬化系数、温度软化系数; $\dot{\varepsilon}_{eq}^* = \dot{\varepsilon}_{eq} / \dot{\varepsilon}_0$ 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 为材料当前温度、参考温度及熔点温度。

2.2 本构模型应变项修正及参数标定

对于光滑圆棒常温准静态拉伸试验, 应变率项与温度项都为 1, 此时本构模型如式(2)所示

$$\sigma_{eq} = A + B\varepsilon_{eq}^n \quad (2)$$

屈服强度 A 均取自塑性应变为 0.2% 处的工程应力, 硬化系数 B 、硬化指数 n 利用真实应力-应变曲线屈服点与缩颈点之间的数据点拟合得到, 各项参数如表 2 所列。

使用 ABAQUS/Standard 有限元软件建立光滑圆棒试件的轴对称模型, 如图 8 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。

将 J-C 本构模型参数 A 、 B 和 n 嵌入 J-C 模型中, 计算并得到试件的载荷-位移曲线, 如图 9 所示。使

表 2 6061-T651 铝合金数值仿真模型及材料参数

MJC 本构模型								
弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	屈服强度 A/MPa	硬化系数 B/MPa	硬化指数 n	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	硬化系数 Q/MPa	硬化指数 β	
64.0	0.33	278.2	245.2	0.817	2 700	58.3	9.16	
修正系数 α	应变率敏感系数 C	参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0/\text{s}^{-1}$	比热容 $C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	温度软化系数 p	温度软化指数 m	参考温度 T_r/K	熔化温度 T_m/K	
0.1	0.025 6	1.33×10^{-3}	890	2.745	2.387	294	925	
MMC 断裂准则								
材料常数 D_4	材料常数 D_5	材料常数 D_6	塑性硬化参数 A_{Pl}/MPa	塑性硬化参数 n_{F}	材料性能参 数 c_1	材料性能参 c_2/MPa	材料性能参 数 c_0^c	材料性能参 数 c_0^s
0.01	7.77	4.81	358.9	0.062	0.051	183.5	1	0.910

用 J-C 模型拟合得到的载荷-位移曲线在材料颈缩之前与试验结果吻合很好, 但是 J-C 模型不能有效预测材料缩颈之后的载荷-位移曲线。因此, 对 J-C 本构模型进行修正, 如式(3)所示

$$\sigma_{eq} = \alpha(A + B\varepsilon_{eq}^n) + (1 - \alpha)[A + Q(1 - \exp(-\beta\varepsilon_{eq}))] \quad (3)$$

式中, Q 、 β 分别与 B 、 n 相似, 分别为硬化系数和硬化指数。 α 为修正系数, 取值范围为 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

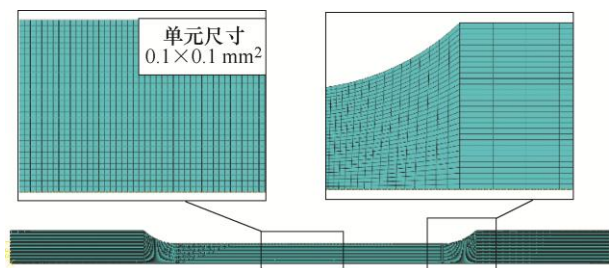


图8 光滑圆棒轴对称模型

将材料 MJC 模型的硬化参数分别嵌入到有限元程序中, 对比数值模拟与试验的载荷-位移曲线, 两者比较一致, 如图 9 所示。因此, MJC 模型能够更好地反映材料的流动应力行为。MJC 模型材料参数如表 2 所列。

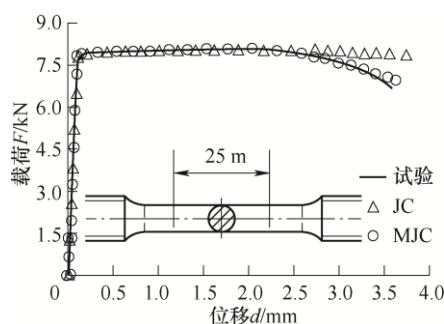


图9 光滑圆棒试件载荷-曲线

2.3 本构模型应变率项参数标定

通过霍普金森压杆试验得到屈服强度与应变率的关系, 如图 10 所示。从图中可以发现, 6061-T651 铝合金对应变率较敏感, 应变率高于 1500 s^{-1} 时, 动态屈服强度约为准静态时的 1.42 倍。

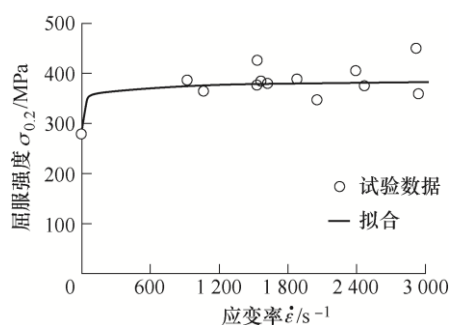


图10 不同应变率下的屈服强度

常温下, 动态加载刚好屈服时, 塑性应变为 0。因此, 应变项为 A 、温度项为 1, 此时等效应力如式(4)所示。采用 $\dot{\epsilon}_0 = 1.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 为参考应变率, 将材料常温准静态屈服强度与不同应变率下的动态屈服强度进行对比, 得到屈服强度随应变率的变化关系, 如图 10 所示。利用式(4)对材料不同应变率下的屈服强度进行拟合, 得到应变率敏感系数 C 值,

如表 2 所示。

$$\sigma_{eq} = A(1 + C \ln \dot{\epsilon}_{eq}^*) \quad (4)$$

2.4 本构模型温度项修正及参数标定

对于材料准静态高温拉伸试验, 准静态加载刚好屈服时, 塑性应变为 0, 应变率项为 1。因此, J-C 模型等效应力表达式如式(5)所示。屈服强度随无量纲温度的增加呈现显著减小的趋势, 6061-T651 铝合金具有显著的温度软化效应, 如图 11 所示。最后, 利用式(5)拟合得到温度软化系数, $m=1.076$ 。

$$\sigma_{eq} = A(1 - T^{*m}) \quad (5)$$

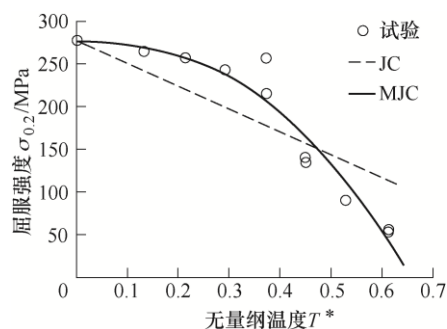


图11 不同无量纲温度下的屈服强度

从图 11 可以发现, J-C 模型不能较好地反映屈服强度随无量纲化温度的变化关系。因此, 对 J-C 本构模型温度项进行修正得到 MJC 模型, 如式(6)所示。利用式(6)对屈服强度与无量纲温度的变化关系进行拟合, 如图 11 所示。温度修正系数 p 和温度软化系数 m_1 , 如表 2 所示。可以发现, 使用 MJC 温度项模型能较准确地描述材料屈服强度随无量纲化温度的变化关系

$$\sigma_{eq} = A(1 - pT^{*m_1}) \quad (6)$$

式中, p 、 m_1 分别表示温度软化系数及指数。

最终, MJC 本构模型修正形式如式(7)所示

$$\sigma_{eq} = \{ \alpha(A + B\epsilon_{eq}^n) + (1 - \alpha)[A + Q(1 - \exp(-\beta\epsilon_{eq}))] \} \times (1 + C \ln \dot{\epsilon}_{eq}^*)(1 - pT^{*m_1}) \quad (7)$$

此外, 本文采用 MMC 断裂准则^[11], 其参数通过与本文同一系列的试验得到。

$$\epsilon_f = \left\{ \frac{A_{pl}}{c_2} \left[c_0^s + \frac{\sqrt{3}}{2 - \sqrt{3}} (1 - c_0^s) \left(\sec \frac{\bar{\theta}\pi}{6} - 1 \right) \right] \times \left[\sqrt{\frac{1 + c_1^2}{3}} \cos \frac{\bar{\theta}\pi}{6} + c_1 \left(\eta + \frac{1}{3} \sin \frac{\bar{\theta}\pi}{6} \right) \right] \right\}^{-\frac{1}{n_f}} \times (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}_{eq}^*)(1 + D_5 T^{*D_6}) \quad (8)$$

式中, η 为应力三轴度; $\bar{\theta}$ 为 Lode 角; A_{pl} , n_F 为塑性硬化参数; c_1 , c_2 , c_0^s 为应力状态项材料性能参数; D_4 为应变率项材料性能参数; D_5 、 D_6 为温度项材料性能参数。

2.5 本构模型及参数有效性验证

考虑到 MJC 本构模型主要针对瞬态冲击模拟, 而高速撞击的 Taylor 试验和数值模拟是验证本构模型及参数的有效方法^[6, 13], 因此进行 6061-T651 铝合金的 Taylor 杆撞击试验。利用一级气炮发射直径为 5.95 mm、质量为 2.22 g、长度为 29.76 mm 的弹体, 正撞击厚度为 20 mm、直径为 60 mm、材料为 Cr12MnV 的钢靶。试验中钢靶未见明显变形, 可以认为刚性。通过对试验样件进行测量, 并获得其变形信息, 如表 3 所示。

表 3 铝合金 Taylor 杆的撞击试验与模拟结果

编号	速度 $v_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	试验		数值模拟	
		直径 $d/$ mm	长度 $l/$ mm	直径 $d/$ mm	长度 $l/$ mm
1	60.5	6.09	29.50	6.13	29.47
2	98.3	6.50	28.88	6.48	28.96
3	135.4	6.92	28.19	6.94	28.25

利用 ABAQUS/Explicit 有限元软件建立 Taylor 杆弹体撞击靶体的三维有限元模型, 如图 12 所示。Taylor 杆前端网格尺寸为 $0.2\times 0.2\times 0.2\text{ mm}^3$, 沿后端

方向网格尺寸逐渐变大。弹体与靶板的单元类型设为 C3D8R。对高强钢靶周围建立固支约束, 采用双线性硬化模型^[14]。最后, 将高强钢靶的双线性硬化模型及参数、铝合金的 MJC 本构模型及参数嵌入到有限元程序中, 进行数值模拟计算。通过对比数值模拟与试验的杆弹长度与头部镦粗变形量, 发现两者很吻合, 这说明了 MJC 本构模型的准确性, 如表 3 所示。

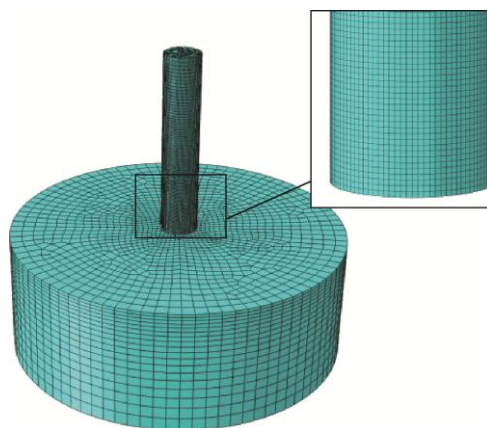


图 12 Taylor 杆撞击模型

图 13 对比了铝合金 Taylor 杆的试验与数值模拟的变形模式, 可以发现两者的变形基本一致, 这也说明了 MJC 本构模型的有效性。

初始速度 $v_i/(\text{m/s})$	60.5	98.3	135.4
试验			
数值模拟			

图 13 Taylor 杆试验和数值模拟结果的弹体变形对比

利用 Taylor 杆撞击试验验证本构模型及参数的有效性时, 只考虑了材料的变形, 未涉及材料的断裂行为。因此, 为了进一步验证本构模型及其参数的有效性, 在一级轻气炮上进行了直径为 12.68 mm 的卵形头弹体, 撞击厚度为 2 mm 的 6061-T651 铝

合金靶板的试验。

利用 ABAQUS/Explicit 有限元软件建立弹靶撞击的三维模型, 如图 14 所示。靶板厚度为 2 mm、直径为 80 mm, 中心区域网格尺寸为 $0.15\text{ mm}\times 0.15\text{ mm}\times 0.15\text{ mm}$, 远离撞击区域网格

尺寸逐渐变大,靶板的边缘建立固支约束。弹体按实际尺寸、质量建模,采用双线性硬化模型^[14],弹体网格尺寸为 $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 。弹体与靶板的单元类型设为 C3D8R。对于靶板,采用单元删除法模拟裂纹的产生与扩展。在设置接触时,考虑摩擦力的作用,因此摩擦因数设为 0.1。最后,将 MJC 本构模型与 MMC 断裂准则及参数分别嵌入到有限元程序中,进行弹体撞击靶板数值模拟计算。

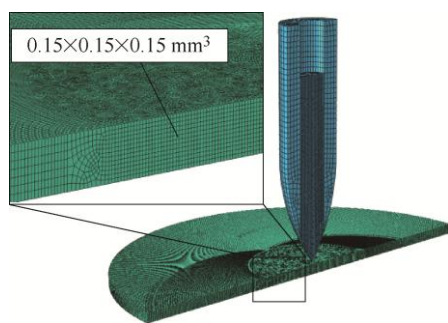


图 14 卵形头弹体撞击靶板有限元模型

利用 Recht-Ipson 公式^[15]拟合初始-剩余速度数据得到弹道极限速度和速度曲线,表达式如下

$$v_r = a(v_i^p - v_{bl}^p)^{1/p} \quad (9)$$

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。

试验和数值模拟弹体的初始与剩余速度,如图 15 所示。弹道极限分别为 $v_{Test} = 84.3\text{ m/s}$ 、 $v_{MMC} = 84.2\text{ m/s}$ 。可以发现,试验和数值模拟计算的弹道极限比较一致。

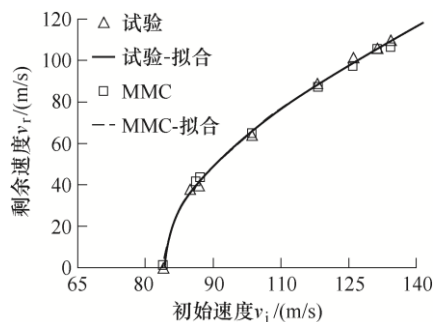


图 15 对比试验与数值模拟的弹体初始与剩余速度

靶板在弹体不同撞击速度下的失效模式,如图 16 所示。相同撞击速度下,试验和数值模拟得到的靶板花瓣开裂形状和数量、裂纹扩展长度和数量基本一致。因此,可以发现,在涉及材料断裂行为的弹靶撞击中,使用 MJC 本构模型可以有效地预测弹体弹道极限和靶板失效模式,这也进一步说明 MJC 本构模型及参数的有效性。

初始速度 v_i /(m/s)	试验	数值模拟
90.1		
134.4		

图 16 试验和数值模拟的靶板失效模式对比

3 结论

利用电子万能材料试验机和霍普金森压杆,并结合数值模拟计算和非接触全场应变测量技术,对 6061-T651 铝合金材料在常温 and 高温下的准静态及动态本构关系进行了研究。

(1) 通过常温准静态拉伸试验,得到 6061-T651 铝合金材料的流动应力随塑形应变的增加而无显著变化,材料无明显应变强化效应。

(2) 通过霍普金森压杆试验,发现 6061-T651 铝合金材料对应变率较敏感,其屈服强度随应变率的增加显著增大,并且材料存在显著的应变率硬化效应。

(3) 通过高温准静态拉伸试验发现,当温度低于 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,6061-T651 铝合金材料的屈服强度随温度的增加逐渐降低;当温度高于 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,屈服强度随温度的增加大幅降低。该材料存在显著的温度软化效应。

(4) 针对材料在不同应变下的流动应力、不同应变率与温度下的屈服强度,对其本构模型进行了相应修正。通过 Taylor 杆与卵形头弹体高速撞击试验,验证了材料本构模型及其参数的有效性。经过修正的 MJC 本构模型,能够很好地描述 6061-T651 铝合金材料在大应变、高应变率和高温下的应力流动、变形和断裂行为。

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 temperature[C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, Netherlands, 1983: 541-547.
- [2] KHAN A, LIANG R. Behaviors of three BCC metal over a wide range of strain rates and temperatures[J]. International Journal of Plasticity, 1999, 15(10): 1089-1109.
- [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.
- [4] 刘再得, 王冠, 冯银成, 等. 6061 铝合金高应变速率本构参数研究[J]. 矿业工程, 2011, 31(6): 120-123.
LIU Zaide, WANG Guan, FENG Yincheng, et al. High-strain-rate constitutive parameters of 6061 aluminum alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2011, 31(6): 120-123.
- [5] 赵培峰, 任广升, 沈智, 等. 6061 铝合金热压缩变形条件对流变应力的影响及本构方程的研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 14(6): 130-133.
ZHAO Peifeng, REN Guangsheng, SHEN Zhi, et al. Influence of hot compressive deformation conditions of 6061 aluminum alloy on flow stress and research on its constitutive equation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(6): 130-133.
- [6] 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.
YANG Qingnian, CHEN Xiaozhen, XIAO Xinke, et al. Application of Lode dependent fracture criterion in predicting fracture of 6061-T651H aluminium alloy Taylor rods[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 142-149.
- [7] MANES A, PERONI L, SCAPIN M, et al. Analysis of strain rate behavior of an Al 6061-T6 alloy[J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 3477-3482.
- [8] XIAO Xinke, MU Zhongcheng, PAN Hao, 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.
- [9] 张伟, 魏刚, 肖新科. 2A12 铝合金本构关系和失效模型[J]. 兵工学报, 2013, 34(3): 276-282.
ZHANG Wei, WEI Gang, XIAO Xinke. Constitutive relation and fracture criterion of 2A12 aluminum alloy[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(3): 276-282.
- [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.
ZHANG Wei, XIAO Xinke, WEI Gang. Constitutive relation and fracture model of 7A04 aluminum alloy[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(1): 81-87.
- [11] XIAO Xinke, WANG Yaopei, VLADISLAV V V, et al. 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.
- [12] XIAO Xinke, PAN Hao, BAI Yuanli, et al. 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.
- [13] WEI Gang, ZHANG Wei, HUANG Wei, et al. Effect of strength and ductility on deformation and fracture of three kinds of aluminum alloys during Taylor tests[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 73: 75-90.
- [14] 刘本学, 焦炳银, 肖新科, 等. Lode 角参数对 Taylor 撞击数值仿真的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(2): 1-5.
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): 1-5.
- [15] RECHT R F, IPSOON T W. Ballistic perforation dynamics[J]. International 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。
主要研究方向为飞行器结构的优化设计、结构损伤识别与维修。
E-mail: yfdeng@cauc.edu.cn