

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220228003

# 6061-T6 铝合金材料的冲击压缩力学性能实验与数值模拟\*

傅先文, 柳锦春, 孙妮, 沙海洋

(南京航空航天大学民航学院, 江苏南京 211106)

**摘要:** 为了探究 6061-T6 铝合金的冲击力学性能和在防护结构上的应用前景, 采用实验与数值模拟相结合的方法开展分析研究。根据多组准静态压缩及冲击压缩实验数据, 对 Johnson-Cook 本构模型的相应参数进行了拟合; 再进行数值模拟分析, 并把数值模拟的结果与实验结果对比分析。最终, 得到了 6061-T6 铝合金在常温下的屈服强度、峰值应力等力学参数; 拟合出了 6061-T6 铝合金 J-C 模型的相应参数; 研究表明 6061-T6 铝合金是一种应变率敏感材料, 其屈服强度、流动应力峰值随着应变率的提高而提高, 同时材料对冲击荷载的能量吸收也越来越多; 当应变率为  $1\ 600\ \text{s}^{-1}$  时, 相对于准静态, 其屈服强度和极限承载力分别提高了 30%、78%; 数值模拟结果与实验结果吻合较好, 表明拟合的 J-C 模型能够较好地表现出 6061-T6 铝合金在高应变率下的应力流动行为。研究成果可为 6061-T6 铝合金材料冲击动力学分析和在抗爆结构上的应用提供依据和参考, 其在防护工程, 防灾减灾工程领域上应用前景广阔。

**关键词:** 6061-T6 铝合金; 冲击力学性能; 分离式霍普金森压杆; Johnson-Cook 本构模型; 数值模拟

**中图分类号:** TU512.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1076-08

## Experimental and Numerical Simulation of Impact Compression Mechanical Properties of 6061-T6 Aluminum Alloy

FU Xianwen, LIU Jinchun, SUN Ni, SHA Haiyang

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In order to explore the impact mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy and its application prospects in protective structures, the method of combining experiments and numerical simulations was used to carry out analysis and research. Based on multiple sets of quasi-static compression and impact compression experimental data, the corresponding parameters of the Johnson-Cook constitutive model were fitted; Conduct further numerical simulation analysis and compare the results of the numerical simulation with the experimental results. Finally, the yield strength, peak stress and other mechanical parameters of 6061-T6 aluminum alloy at room temperature are obtained. The corresponding parameters of the J-C model of 6061-T6 aluminum alloy are fitted; The results show that 6061-T6 aluminum alloy is a strain rate-sensitive material. Its yield strength and flow stress peak increase with

\* 收稿日期: 2022-02-28; 修回日期: 2022-06-06

基金项目: 后勤保障部开放课题 (BLJ20J016)、南京航空航天大学 2021 研究生科研与实践创新计划项目 (xcxjh20210712) 资助

作者简介: 傅先文 (1998—), 男, 硕士研究生。主要从事材料动态力学性能研究。E-mail: fuxianwen@nuaa.edu.cn

通讯作者: 柳锦春 (1973—), 男, 教授, 博士。主要从事工程结构抗爆与防护研究。E-mail: weise@163.com

the increase in strain rate, and the energy absorption to the impact load is also increases; When the strain rate is  $1\ 600\ \text{s}^{-1}$ , the yield strength and ultimate bearing capacity increase by 30% and 78%, respectively, compared with the quasi-static state; The numerical simulation results are in good agreement with the experimental results, indicating that the fitted J-C model can better represent the stress flow behavior of 6061-T6 aluminum alloy at high strain rates. The research results can provide a basis and reference for the impact dynamic analysis of 6061-T6 aluminum alloy and its application in anti-explosion structure. It has broad application prospects in the fields of protection engineering, disaster prevention, and reduction engineering.

**Keywords:** 6061-T6 aluminum alloy; impact mechanical properties; Split Hopkinson Pressure Bar; Johnson-Cook constitutive model; numerical simulation

## 0 引言

铝合金作为一种重要的工业原料,在工业生产,国民生活及经济建设中具有十分重要的地位。因其力学性能好、密度小、价格合理、易于回收等特点,在航空航天、汽车工业、交通运输、建筑领域均有广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。近年来,随着国防事业与民防事业的发展,铝合金也被越来越多地应用在防护结构上。

目前世界上有近7成的铝合金挤压型材采用6000系铝合金<sup>[5]</sup>。6061-T6铝合金属于Al-Mg-Si系,是一种典型的可热处理强化合金,主要的强化相为 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 相,它强度较高,抗腐蚀性优异,加工性好,制作工艺成熟,成本较低,综合性能优良。在常见的铝合金中,虽2000系与7000系比6061-T6铝合金强度高,但它们抗腐蚀性能较差,价格较高,且通常呈现出应变率不敏感现象<sup>[6]</sup>,甚至表现出脆性<sup>[7]</sup>。5000系的铝合金可加工性能好,耐疲劳,但其强度偏低。与其它6000系的铝合金相比,6061-T6铝合金具有更好的力学性能。

在铝合金动态力学性能方面,刘文辉等<sup>[8]</sup>发现7N01铝合金具有一定的应变率敏感性和温度敏感性,通过拟合得到了7N01铝合金的Johnson-Cook本构方程(后面简称J-C模型)。杨铁江<sup>[9]</sup>探究了应变率和温度对7075-T651铝合金动态力学性能的影响,最终拟合得到了其动态本构方程。而对于6061-T6铝合金,盈亮等<sup>[10]</sup>通过实验和数值模拟相结合的方式,探究了6061-T6铝合金在不同温度阶段的黏塑性特征,并拟合了Field-Backofen方程中相应参数。李春雷<sup>[11]</sup>基于实验,考虑温度与应变率的影响,拟合了2A12铝合金J-C模型的相关参数,

并与数值模拟相结合,进行了验证。刘军等<sup>[12]</sup>通过动态拉伸实验研究了 $0.08\sim 500\ \text{s}^{-1}$ 应变率下的力学性能,拟合J-C模型的相应参数。雷经发等<sup>[13]</sup>通过分离式霍普金森压杆(SHPB)实验发现6061铝合金是一种应变率较敏感材料,其应变率和峰值应力、应变率和峰值应变间的线性相关性较强;同时,根据实验数据对J-C本构模型进行修正。邓云飞等<sup>[14]</sup>基于准静态、高温以及高应变率下的力学性能实验结果,修正J-C模型得到MJC(Modified Johnson-Cook)模型及对应各项参数;最后通过仿真模拟验证了MJC本构模型的准确性。S.Y.Li等<sup>[15]</sup>通过实验,获得了6061-T6铝合金在高温(高达 $400\ ^\circ\text{C}$ )和高应变率(高达 $1\times 10^4\ \text{s}^{-1}$ )下的流动应力—应变关系,提出了温度相关的J-C模型。A.Manes等<sup>[16]</sup>对6061-T6铝合金进行了若干动态试验(应变率 $10^{-4}\sim 10^4\ \text{s}^{-1}$ )。采用J-C模型,观察了实验数据的离散性,并与其他文献中的结果进行了比较,得出结论:在 $10^3\ \text{s}^{-1}$ 之前,应变率对流动应力没有显著影响,而在 $10^3\ \text{s}^{-1}$ 之后,应变率敏感性有明显增加。D.R.Lesuer等<sup>[17]</sup>对6061-T6在 $10^{-4}\sim 10^4\ \text{s}^{-1}$ 应变率范围内的应变变形响应进行了评估,结果与实验较为接近。

纵观国内外研究现状,我们不难发现,基于J-C模型在高应变率下的铝合金应力流动行为的研究已经取得了一定的成果。但其服务对象主要为汽车工业、航空航天领域,很少有人探究铝合金材料在防护工程领域的表现。目前防护结构中大多采用较为厚重的钢筋混凝土或填土墙等结构,这些类型结构的防护作用虽然较好,但其较大的自重也为防护工程的建造及转运带来了困扰,特别是对于应急防护结构。本文将从防护工程的角度出发,采用SHPB探究6061-T6铝合金在高应变率( $800\sim$

1 600 s<sup>-1</sup>)下的力学性能,揭示应变率对6061-T6铝合金屈服强度和承载力的影响。并根据实验结果拟合出J-C模型的相应参数。然后利用ANSYS/LS-DYNA软件模拟SHPB实验,进行模型验证,并拓展更高应变率下6061-T6铝合金材料的动态响应,为6061-T6铝合金在应急防护结构中的应用提供基础参考。考虑到铝合金是一种各向同性材料,故本文主要以压缩试验的方式来研究其力学性能。

## 1 6061-T6 铝合金静动态实验

### 1.1 材料

实验采用直径为10 mm,高度为6 mm的圆柱形6061-T6铝合金试件。其主要化学成分见表1<sup>[5]</sup>。T6是指由固溶热处理后进行人工时效的状态。适用于在固溶热处理后,不再进行冷加工,然后人工时效的产品。

表1 6061 铝合金的主要化学成分

Table1 Main chemical composition of 6061 aluminum alloy

元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
Al	Bal	Mn	≤0.15
Si	0.4~0.8	Cr	0.04~0.35
Mg	0.8~1.2	Zn	≤0.25
Cu	0.15~0.4	Ti	≤0.15
Fe	≤0.7		

### 1.2 准静态压缩试验

使用微机控制电子万能试验机进行准静态压缩实验。为保证实验准确性,进行了3组实验,如图1所示。实验前,依次测量试件的直径与高度,并在试件上下接触面涂抹一定量的石墨粉起到润滑作用。设置加载速度为0.5 mm/min,根据试件的实际

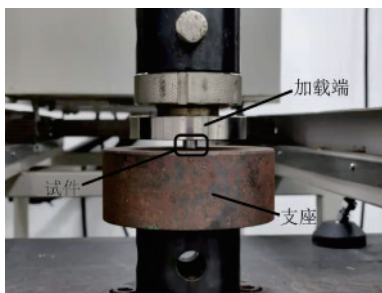


图1 准静态压缩实验

Fig.1 Quasi-static compression experiment

高度,得到应变率0.001 28 s<sup>-1</sup>下的应力应变曲线,后换算得到真实的应力应变曲线,如图2所示。三组实验得到6061-T6铝合金的屈服强度分别是287.75、281.80、282.64 MPa。实验结果表明,6061-T6铝合金在准静态下具有良好的力学性能,能够较好地承受来自外部的荷载。相应的力学性能与盈亮等<sup>[10]</sup>开展的准静态拉伸实验结果相近。

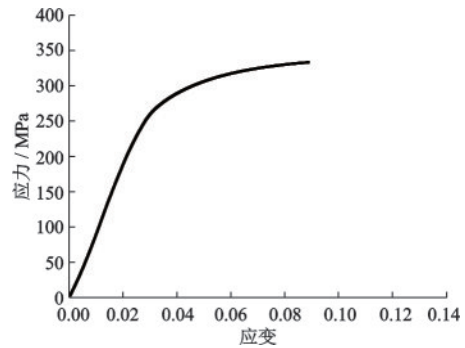


图2 准静态应力应变曲线

Fig.2 Quasi static stress-strain curve

### 1.3 动态冲击压缩实验

为了研究6061-T6铝合金在高应变率下的力学性能,并探究其能否较好地应用在抗冲击爆炸领域,我们使用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)开展冲击压缩实验。SHPB装置包括子弹、入射杆、透射杆、吸收杆、阻尼器、数据采集装置、应变放大器,计算机等,如图3所示。入射杆、透射杆均为钢制材质。

试件的变形基于一维应力波以及均匀变形假设理论<sup>[18]</sup>。本次实验将应变率梯度设置在800~1 600 s<sup>-1</sup>。试件的尺寸与准静态压缩实验保持一致。共进行了18次冲击压缩试验,获得了18组有效数据,最终选取其中具有代表性的6组数据进行分析。得到了6061-T6铝合金材料在不同应变率下的应力应变曲线,如图4所示。

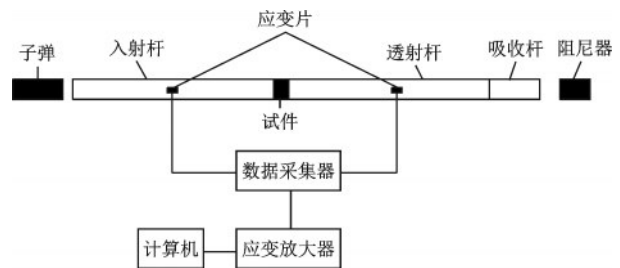


图3 SHPB装置示意

Fig.3 Schematic diagram of SHPB device

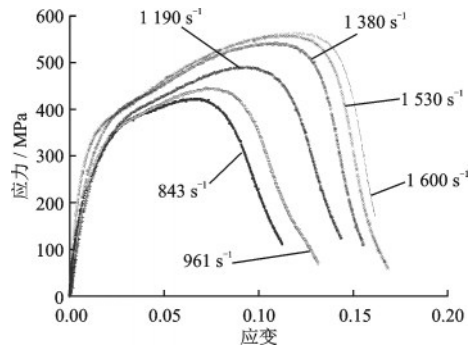


图4 不同应变率下的应力应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves at different strain rates

从实验数据中可以分析得知,6061-T6 铝合金是一种应变敏感材料。在弹性变形阶段,几组曲线的变化较为接近,但在塑性变形阶段就会变现出差异,应变率越大,塑性变形也越大,其流动应力的幅值也越大。随着应变率的提高,其屈服强度也会得到相应的强化,弹性模量会有一些的提高,相对应的塑性变形阶段的承载力也有较大的提高。其流动应力的幅值,也就是极限承载力会随着应变率的提高而显著提高。图5中,我们处理了6组不同应

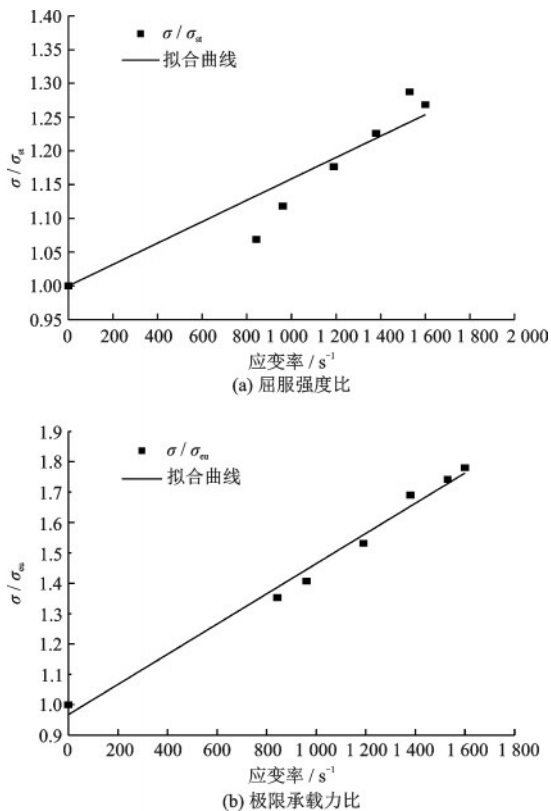


图5 不同应变率下的屈服强度比与极限承载力比

Fig.5 Yield strength ratio and ultimate bearing capacity ratio under different strain rates

注: $\sigma$ 为实际屈服强度或极限承载力; $\sigma_{st}$ 为 $0.00128\text{ s}^{-1}$ 下的屈服强度; $\sigma_{en}$ 为 $0.00128\text{ s}^{-1}$ 下的极限承载力

变率下的屈服强度比和极限承载力比。可以发现屈服强度整体随着应变率的提高而提高,呈现近乎线性增长的关系,当应变率为 $1600\text{ s}^{-1}$ 时,相对于准静态可提高30%。而极限承载力,也就是流动应力幅值,提升的更加明显,当应变率为 $1600\text{ s}^{-1}$ 时相对于准静态可增加78%,并且,其线性增长的趋势更加鲜明。表明6061-T6铝合金随着应变率的提高,呈现出明显的强化现象,其承载力也越来越大。

此外,随着应变率的提高,试件所产生的应变也越来越大,随之永久变形量也越来越大,对应的应力应变曲线包络范围也越来越大。试件在变形过程中,会将所承受部分的荷载以变形能的形式储存起来,待卸载后,部分变形能再次释放到环境中,而剩余的将以变形能的形式储存在塑性变形中。

如图6所示,我们通过专业的作图软件将应力应变图形中曲线段与坐标轴所围成的面积计算出来,而这些面积也就代表着在整个实验过程中,试件所吸收能量的多少。通过柱形图可以发现试件所吸收能量的多少与应变率呈正比,应变率越大,能量吸收越多。除此之外,应变率变化的越大,对应的能量吸收变化也越大。这也很好地解释了试件变形量与应变率之间的关系。

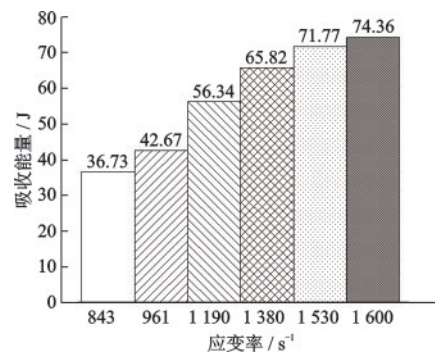


图6 试件能量吸收数据

Fig.6 Energy absorption data of test piece

综上,6061-T6铝合金材料具有优异的冲击力学性能和耗能特性。

## 2 本构模型及其参数拟合

### 2.1 本构模型的选取

为了更好地研究6061-T6铝合金在高应变、高应变率下的材料力学行为,同时也为了给后续的数值模拟提供计算依据,需要有一个合适的本构模型。材料本构模型需要将流动应力与应变、应变速

率和温度联系起来。目前常用的两类本构模型分别是:基于有效试验数据的纯经验本构模型的J-C模型<sup>[19]</sup>和C-S模型<sup>[20]</sup>。我们这里考虑使用J-C模型,在式(1)中,材料本构模型由应变硬化、应变速率敏感性和温度三个乘法项定义,表示为:

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

$$\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0 \quad (2)$$

$$T^* = (T - Tr) / (Tm - Tr) \quad (3)$$

式中, $\sigma$ 为等效屈服应力; $\epsilon$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲应变率; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率(参考应变率为 $0.00128 \text{ s}^{-1}$ ); $A$ 为参考温度,参考应变率下的屈服应力; $B$ 为应变硬化系数; $n$ 为应变硬化指数; $C$ 为应变率硬化系数; $T^*$ 为无量纲温度; $T$ 、 $Tr$ 、 $Tm$ 分别为材料当前温度、参考温度及熔点温度。

## 2.2 参数的拟合

因忽略温度的影响,其室温下本构关系式为:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (4)$$

当应变率为 $0.00128 \text{ s}^{-1}$ 时,即在参考应变率下,式(4)可简化成:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \quad (5)$$

由准静态压缩试验可确定参数 $A=284.06 \text{ MPa}$ ;同时对式(5)两边同时取对数,可以得到:

$$\ln(\sigma - A) = \ln B + n \ln \epsilon \quad (6)$$

将参考应变率下得到的实验数据代入式(6),可以拟合得到参数 $B=247.83 \text{ MPa}$ 、 $n=0.788$ 。为了得到参数 $C$ ,将公式(4)进行变换可得:

$$C \ln \dot{\epsilon}^* = \sigma / (A + B\epsilon^n) - 1 \quad (7)$$

根据原始的J-C模型, $C$ 值应为常数,不过在实验中6061-T6铝合金 $C$ 值并不恒定。所以采用不同应变速率梯度下的固定有效应变代替流动应力数据,依据公式(7),最终拟合 $C$ 值为0.04。最终,获得原始Johnson-Cook本构模型:

$$\sigma = (284.06 + 247.83\epsilon^{0.788})(1 + 0.04 \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (8)$$

式中, $\sigma$ 为等效屈服应力; $\epsilon$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 是无量纲应变率, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率(参考应变率为 $0.00128 \text{ s}^{-1}$ )

## 3 SHPB实验数值模拟

### 3.1 材料模型参数的输入

为了验证本构模型的准确性,根据实验建立1:1

等比例模型,利用ANSYS/LS-DYNA进行了SHPB实验的模拟工作。钢杆选用弹性模型,6061-T6铝合金材料选取J-C模型,状态方程选用Gruneisen状态方程。根据前述分析,模型主要参数取值根据实验跟参数拟合得到,见表2、表3。

表2 Johnson-Cook模型参数

Table 2 Johnson cook model parameters

$\rho/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$
2700	71	0.33	284.06	247.83	0.788
$C$	$m$	$C_p/$ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	$Tr/\text{K}$	$Tm/\text{K}$	$\dot{\epsilon}_0/\text{S}^{-1}$
0.04	1.34	875.6	293	877.6	0.00128

注: $\rho$ 为密度; $E$ 为弹性模量; $\mu$ 为泊松比; $m$ 为材料热软化参数; $C_p$ 为材料比热

表3 Gruneisen状态方程参数<sup>[21]</sup>

Table 3 Gruneisen equation of state parameters<sup>[21]</sup>

$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$S_1$	$\Gamma$
5240	1.4	1.97

注: $C$ 为材料冲击波速度; $S_1$ 和 $\Gamma$ 为方程参数

### 3.2 数值模拟结果

根据实验建立1:1等比例模型,并将实验所得的入射波的相关数据作为荷载输入到有限元软件ANSYS/ls-dyna中。图7、图8分别为数值模拟中的压缩过程、试件横截面与受压面的应力分布图。

从图7、图8中我们可以看到,当冲击荷载作用在试件上时,在极短的时间内,试件内部的应力数值明显高于入射杆跟透射杆,且产生一定的变形,将部分能量转化为变形能,在卸载后,试件的部分变形将随着时间的推移得到恢复。

为了更好地比较实验与数值模拟的结果,我们将相同应变率下数值模拟与实验的得到应力应变曲线放在同一张图中对比,考虑到数据较多和为了

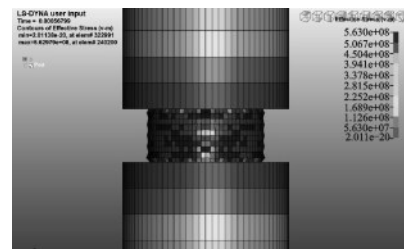
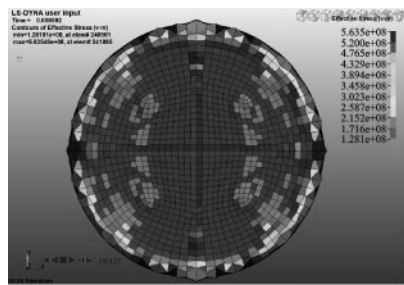
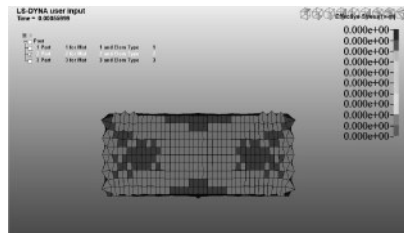


图7 数值模拟中的压缩过程

Fig.7 Compression process in numerical simulation



(a) 试件横截面应力分布



(b) 试件纵截面应力分布

图8 试件横、纵截面应力分布

Fig.8 Stress distribution in the transverse and longitudinal sections of the specimen

便于观察,我们选取  $843\text{ s}^{-1}$ 、 $1\ 600\text{ s}^{-1}$  两种较有代表性的应变率的数据,如图9、图10所示。其中,控制沙漏的关键字采用默认的设置,这可能是导致模型中出现部分沙漏变形的原因。我们在后处理的文件中发现,沙漏能的数值较小,其峰值低于内能的10%;在采集数据时,也避开了存在沙漏变形的单元;因此可以忽略部分沙漏变形对模拟结果的影响。

从实验与数值模拟结果的对比图中可以看出,在  $843\text{ s}^{-1}$  下数值模拟得到的应力应变曲线整体比实验得到的数据稍大,而在  $1\ 600\text{ s}^{-1}$  下得到的相关数据,则是偏小的。这可能与数值模拟中输入的应变率硬化系数  $C$  有关,在数值模拟中  $C$  取的是一固定值,而在实验中,我们发现  $C$  值在塑性变形阶段,实际会随着应变率的变化而变化。总体来看,数值模拟结果和试验值两者差别不大,基本满足工程分析要求,因此,我们认为前面的参数拟合部分的工作是有意义的,所拟合的J-C模型在整体上也能够体现出6061-T6铝合金在高应变率下的力学行为。

在充分考虑冲击爆炸荷载的基础上,增加了  $2\ 000\text{ s}^{-1}$  和  $3\ 000\text{ s}^{-1}$  应变率下的数值模拟,模拟结果如图11所示。从图11中我们发现,随着应变率的提高,6061-T6铝合金的屈服强度与流动应力均有一定的提高,这很好的体现了其应变敏感这一特性。其在弹性阶段的重合度较高,主要可能与数值模拟中输入的弹性模量的值恒定有关,在实际实验

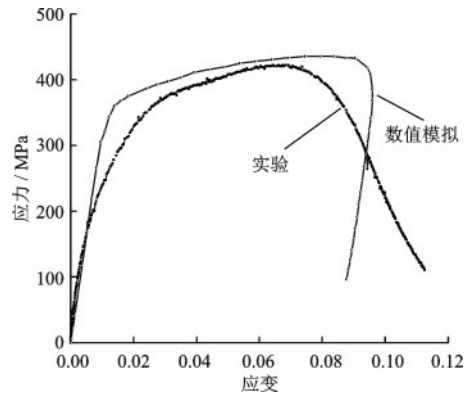


图9  $843\text{ s}^{-1}$  下的实验与数值模拟对比

Fig.9 Comparison between experiment and numerical simulation under  $843\text{ s}^{-1}$

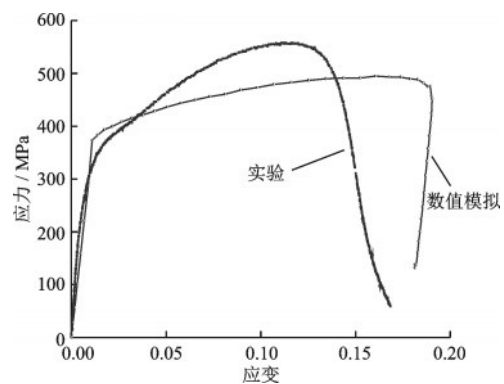


图10  $1\ 600\text{ s}^{-1}$  下实验与数值模拟对比

Fig.10 Comparison between experiment and numerical simulation under  $1\ 600\text{ s}^{-1}$

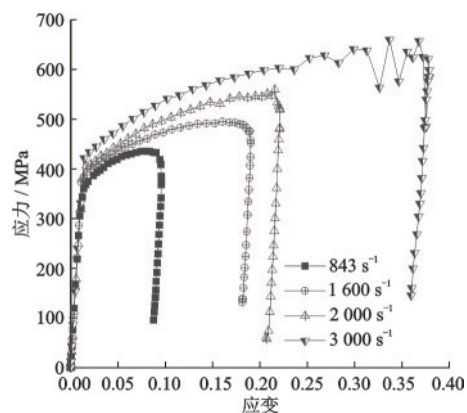


图11 4种不同应变率下数值模拟的应力应变曲线

Fig.11 Stress-strain curves of numerical simulation under four different strain rates

中,弹性模量的值通常会随着应变率的提高而得到一定的提高。

从数值模拟的结果我们也能看出,6061-T6铝合金的冲击力学性能较好。在高应变率下表现出应变敏感现象,这有助于其承受诸如冲击爆炸荷载在内的各种荷载。

## 4 结 论

使用微机控制电子万能试验机和分离式霍普金森压杆进行了一系列的准静态压缩实验和冲击压缩实验;根据实验数据拟合了J-C模型相应的参数,并结合数值模拟探究了6061-T6铝合金在高应变率下的力学性能。得到以下结论:

(1)通过准静态压缩实验,得到了6061-T6铝合金在常温下的屈服强度、弹性模量等力学参数;发现6061-T6铝合金在准静态下表现出良好的力学性能。

(2)冲击压缩试验表明:6061-T6铝合金是一种应变率敏感材料,呈现出明显的强化现象,随着应变率的提高,其屈服强度跟流动应力峰值均有较大的提高,且吸收的能量也越多。当应变率为 $1\ 600\ \text{s}^{-1}$ 时,相对于准静态,其屈服强度和极限承载力分别提高了30%、78%。

(3)选用J-C模型,根据实验结果,拟合了相应的参数,并开展了SHPB实验数值模拟分析,结果表明,拟合的参数能较好地反应6061-T6铝合金在高应变率下流体力学行为。

通过实验与数值模拟得到的结果,可以认为,6061-T6铝合金良好的力学性能使其能够较好地承受爆炸冲击产生的荷载,预计将在民防、国防营地防护等应急防护结构上能有出色的表现,在防护工程、防灾减灾工程领域应用前景广阔。

### 参考文献:

- [1] 张钰. 铝合金在航天航空中的应用[J]. 铝加工, 2009(3):50-53.  
Zhang Y. Application of aluminum alloy in aerospace [J]. Aluminum Processing, 2009(3): 50-53. (in Chinese)
- [2] 李龙,夏承东,宋友宝,等. 铝合金在新能源汽车工业的应用现状及展望[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(9): 18-25,33.  
Li L, Xia C D, Song Y B, et al. Application status and Prospect of aluminum alloy in new energy vehicle industry [J]. Light Alloy Processing Technology, 2017, 45(9):18-25,33. (in Chinese)
- [3] 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.  
Ding X Q, He G Q, Chen C S, et al. Research and application progress of 6000 series automotive aluminum alloy [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005, 23(2):302-305. (in Chinese)
- [4] 陈奇芳. 铝合金在建筑结构工程中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2010(24):112-113.  
Chen Q F. Application of aluminum alloy in building structure engineering [J]. China New Technology and New Products, 2010(24):112-113. (in Chinese)
- [5] 唐徐. 6013铝合金动态压缩变形行为研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.  
Tang X. Study on dynamic compression deformation behavior of 6013 aluminum alloy [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [6] 张正礼. 几种铝合金材料动态力学性能测试[J]. 中国民航大学学报, 2014, 32(1):41-45.  
Zhang Z L. Test of dynamic mechanical properties of several aluminum alloy materials [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2014, 32(1): 41-45. (in Chinese)
- [7] 赵寿根,何著,杨嘉陵,等. 几种航空铝材动态力学性能实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(8): 982-985.  
Zhao S G, He Z, Yang J L, et al. Experiment on dynamic mechanical properties of several aviation aluminum materials [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(8): 982-985. (in Chinese)
- [8] 刘文辉,周凡,邱群,等. 7N01铝合金动态力学性能及其本构关系研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(6):44-47.  
Liu W H, Zhou F, Qiu Q, et al. Study on dynamic mechanical properties and constitutive relationship of 7N01 aluminum alloy [J]. Hot Working Process, 2016, 45(6):44-47. (in Chinese)
- [9] 杨铁江. 7075铝合金动态试验及其本构关系研究[J]. 制造业自动化, 2016, 38(11):28-32.  
Yang T J. Study on dynamic test and constitutive relationship of 7075 aluminum alloy [J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(11):28-32. (in Chinese)
- [10] 盈亮,戴明华,胡平,等. 6061-T6铝合金高温本构模型及温成形数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(7):1815-1821.  
Ying L, Dai M H, Hu P, et al. High temperature constitutive model and numerical simulation of warm forming of 6061-T6 aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2015, 25(7):1815-1821. (in Chinese)
- [11] 李春雷. 2A12铝合金本构关系实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

- Li C L. Experimental study on constitutive relationship of 2A12 aluminum alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [12] 刘军, 杨黎明, 谢书港, 等. 6061 铝合金的动态拉伸性能及其本构模型[J]. 机械工程材料, 2017, 41(3):49-53.  
Liu J, Yang L M, Xie S G, et al. Dynamic tensile properties and constitutive model of 6061 aluminum alloy [J]. Mechanical Engineering Materials, 2017, 41 (3) : 49-53. (in Chinese)
- [13] 雷经发, 许孟, 刘涛, 等. 高应变率下 6061 铝合金力学性能及本构模型研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(1):74-78.  
Lei J F, Xu M, Liu T, et al. Study on mechanical properties and constitutive model of 6061 aluminum alloy under high strain rate [J]. Weapon Material Science and Engineering, 2019, 42(1):74-78. (in Chinese)
- [14] 邓云飞, 张永, 曾宪智, 等. 6061-T651 铝合金动态力学性能及断裂准则修正 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (18):81-91.  
Deng Y F, Zhang Y, Zeng X Z, et al. Dynamic mechanical properties and fracture criterion correction of 6061-T651 aluminum alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (18) :81-91. (in Chinese)
- [15] Li S Y, Sui J B, Ding F, et al . Optimization of milling aluminum alloy 6061-T6 using modified Johnson-Cook Model[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2021, 111: 102330.
- [16] 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.
- [17] Leuser D R, Kay G J, LeBlanc M M. Modeling large-strain, high-rate deformation in Metals[R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.
- [18] Xiao X K, Wang Y P, Vladislav V, et al. Effect of lode angle in predicting the ballistic resistance of Weldox 700E steel plates struck by blunt projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 128:46-71.
- [19] 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: International Ballistics Committee, 1983: 541-547.
- [20] Liang R Q, Khan A S. A critical review of experimental results and constitutive models for BCC and FCC metals over a wide range of strain rates and temperatures [J]. International Journal of Plasticity, 1999, 15 (9) : 963-980.
- [21] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.  
Xin C L, Xue Z Q, Tu J, et al. Handbook of common material parameters for finite element analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2019. (in Chinese)

(本文编辑: 池营营)