DOI: 10.11858/gywlxb.20240704

含损伤的无机防弹玻璃的 JH2 本构模型

史刘彤[1], 黄友奇[2], 高玉波[1], 贾 哲[3], 李志豪[1]

（1. 中北大学航空宇航学院, 山西 太原 030051;
2. 中国建筑材料科学研究总院有限公司, 北京 100024;
3. 中国航天科工集团第六研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010）

摘要: 防弹玻璃具有良好的抗冲击性能, 能够抵御枪弹、爆炸碎片以及其他高速飞行物体的攻击性威胁, 广泛应用于安全防护领域。为探究防弹玻璃的无机玻璃层在冲击加载下的动态力学性能及本构关系, 首先, 采用电子万能试验机和分离式霍普金森压杆（split Hopkinson pressure bar, SHPB）试验装置, 获得了不同应变率下材料的拉伸和压缩力学性能, 结果表明, 无机玻璃具有明显的应变率效应, 材料强度随应变率的升高而增大。其次, 借鉴土力学三轴围压试验, 设计了适用于本研究的高强围压套筒, 测试了完全损伤条件下玻璃颗粒的力学性能, 发现其强度明显低于完整状态下无机玻璃的强度。最后, 结合试验数据构建了含损伤无机玻璃的 JH2 本构模型, 采用非线性有限元软件 LS-DYNA 模拟了材料在 SHPB 加载下的压缩过程, 通过对比试验结果与模拟结果, 验证了本构模型的有效性。

关键词: 无机玻璃; 力学性能; 本构关系; 损伤

中图分类号: O345; TB321 **文献标志码:** A

防弹玻璃是一类可抵御枪弹乃至炮弹射击而不被穿透破坏, 可最大限度地保护人身安全的夹层玻璃, 广泛应用于军用车辆、战舰、战机的窗户或挡风玻璃[1−2]。硼硅酸盐玻璃因其具有热膨胀系数低、重量轻、耐刮擦和透光率高的特点[3], 是防弹玻璃的常用材料。不同于单一材质装甲, 防弹玻璃为多层复合结构, 其在弹靶响应过程中的破坏机理研究较为困难, 需要掌握各个材料层的力学特性。为此, 本研究将主要探究无机玻璃层的本构关系。

作为多用途的透明复合装甲, 玻璃材料在抗高速冲击（如爆炸、侵彻等）的瞬时处于高应变率加载状态, 因而, 其动态力学响应的相关研究不可或缺。Zhang 等[4] 通过对建筑碱石灰玻璃进行不同应变率下的压缩实验, 证实了玻璃的应变率敏感性。然而, 材料的应变率效应与动态本构关系相互影响, 表征其强度、动态增强因子、失效应变等力学性能参数受客观因素的影响较大, 难以进行量化研究, 需要相关理论模型的支持。

玻璃是一种典型的脆性材料, 材料表面和内部的微裂纹在加载过程中会出现扩展、汇集等现象, 继而逐渐发生功能性失效。这涉及材料的损伤累积, 最常见的脆性材料损伤累积本构模型是 JH 本构模型[5]。在 JH1 模型的基础上, Johnson 等[6] 于 1994 年提出了一种改进的本构模型——JH2 模型, 它考虑了材料的损伤、断裂和膨胀效应, 适用于大应变、高应变率和高压加载条件下的脆性材料, 广泛应用

* **收稿日期:** 2024-01-03; **修回日期:** 2024-02-04

基金项目: 国家自然科学基金（12172337）; 山西省基础研究计划（20210302123022）; 中北大学研究生科技立项（20231976）

作者简介: 史刘彤（1999—）, 女, 硕士研究生, 主要从事防弹玻璃的本构关系及损伤机理研究. E-mail: 1456185422@qq.com

通信作者: 高玉波（1986—）, 男, 博士, 副教授, 主要从事穿甲动力学、材料本构关系与损伤机理研究. E-mail: gaoyb@nuc.edu.cn

于描述玻璃、岩石、陶瓷等高度脆性材料。

浮法玻璃是一种典型的无机玻璃，Holmquist 等[7] 通过实验证明了其高应变率特性，并完成了本构建模。Alexander 等[8] 和 Renganathan 等[9] 探究了无机玻璃的 Hugoniot 弹性极限，结果表明，无机玻璃的弹塑性响应较为复杂，研究困难。然而，杨震琦等[10] 利用现有文献中的数据，采用实验与数值模拟相结合的方法，得到了作为浮法玻璃的成分之一 Al_2O_3 脆性材料的 JH2 本构模型参数。目前，关于无机玻璃的本构研究较少，缺乏损伤条件下材料的参数，因此，需要开展相关实验研究。

本研究采用理论与试验相结合的方法，深入探究防弹玻璃中无机硼硅玻璃的动态力学性能及含损伤的无机玻璃的本构关系。首先，使用万能试验机开展准静态压缩试验和准静态巴西圆盘劈裂试验，同时，使用霍普金森压杆（split Hopkinson pressure bar, SHPB）进行动态压缩试验，获取材料在不同应变率下的应力-应变曲线、动态强度以及材料的应变率效应；其次，测试玻璃颗粒的强度，以研究完全损伤条件下玻璃的力学性能；最后，基于 JH2 模型构建含损伤的无机玻璃的本构模型，并通过数值模拟验证模型的有效性。该工作可促进人们对无机玻璃性能的深入理解，为材料设计与应用提供指导。

1　试验设置

防弹玻璃一般由无机玻璃、聚合物和有机材料组成。无机玻璃作为主要承力层，通过破碎、裂纹扩展、应力波消散等过程吸收外界冲击能量。本研究所用的试样取自完整防弹玻璃的无机玻璃层。

1.1　准静态试验

使用电子万能试验机对无机玻璃进行准静态加载。受切割技术的限制，玻璃试样设计为六面体，厚度取原标准尺寸 9.86 mm，以保证端面平行度，试样的横截面设计为 8 mm×8 mm 的正方形，并且在立方体试样的 4 条轴向棱上加工半径为 0.5 mm 的圆角，如图 1(a) 所示。在试样与压头之间加入高强度碳化钨（WC）垫块，如图 1(b) 和图 1(c) 所示。为减小摩擦效应，在试样两端涂抹凡士林。进行 5 次重复试验，加载应变率设置为 10^{-4} s^{-1}。

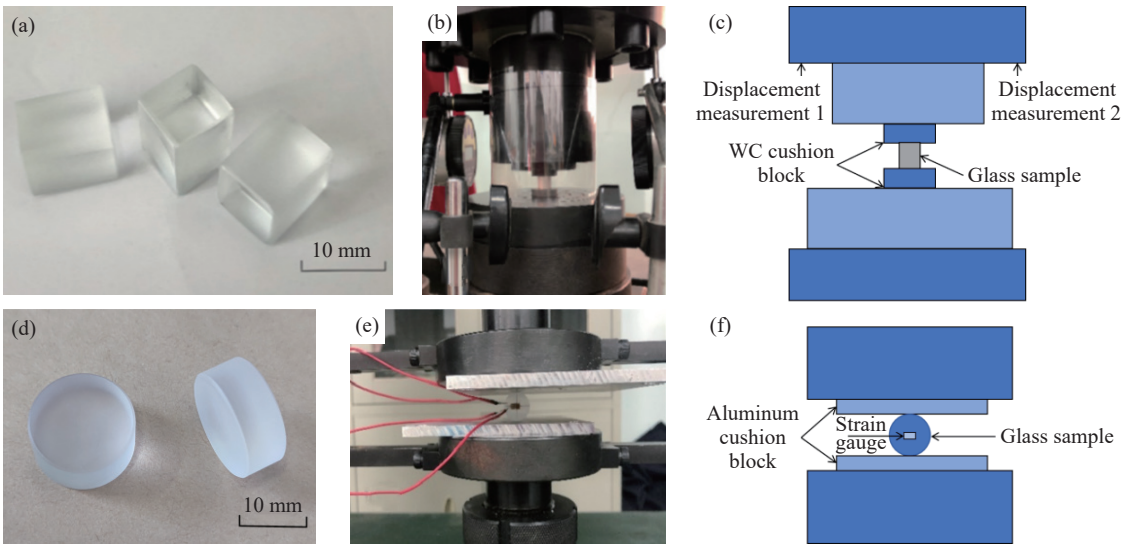


图 1　准静态试验设置

Fig. 1　Quasi-static test setup

使用电子万能试验机对无机玻璃进行准静态巴西劈裂试验。圆盘试样的直径为 16.0 mm，厚度为 6.6 mm，如图 1(d) 所示。采用 1/4 惠斯通电桥进行数据采集。为避免无机玻璃在劈裂试验中出现应力集中，使用铝合金垫片，加载装置如图 1(e) 和图 1(f) 所示。

1.2　动态压缩试验

动态压缩试验在 SHPB 装置上进行，如图 2 所示。压杆直径为 14.5 mm，撞击杆长度为 250 mm，入射杆和透射杆的长度均为 1 300 mm，压杆由高强度钢制成。试样尺寸与准静态试验一致。为避免破碎后的试样损伤压杆，在杆与试样之间加入波阻抗匹配的圆柱形钢制垫块，垫块与试样之间采用凡士林润滑，以减小摩擦效应。在入射杆冲击端面中心加入不同尺寸和厚度的紫铜作为脉冲整形器（见图 2），以减少波在长距离传播中的弥散失真，进而实现常应变率加载。

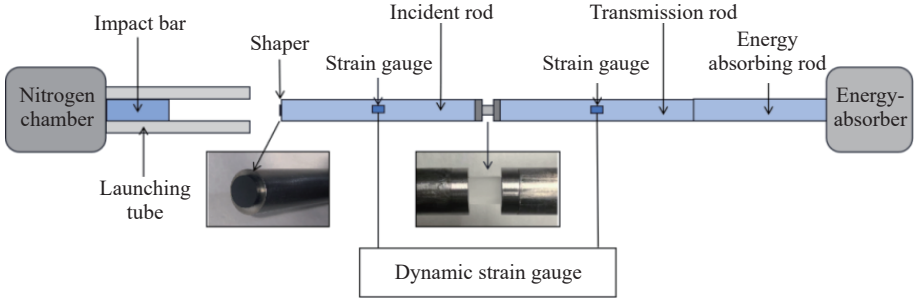


图 2　动态压缩试验装置

Fig. 2　Setup of dynamic compression tests

1.3　颗粒围压试验

为探究玻璃碎粒在高压状态下的力学性能，借鉴土力学中的经典三轴围压试验开展研究。玻璃碎粒试样分为两种：一种是颗粒尺寸为 0～0.1 mm 的试样，另一种是颗粒尺寸为 0.3～0.5 mm 的试样。由于玻璃颗粒具有较高的孔隙率，因此，采用分层填充的方法制备 2 种试样，以确保颗粒分布均匀[11]。采用高强金属套筒对无机玻璃颗粒试样进行高围压加载，如图 3 所示。确保套筒内壁的表面粗糙度较低，以减小玻璃颗粒与套筒内表面的摩擦，进而减少能量损失。将玻璃颗粒试样置于金属管中，2 个高强度、高硬度的压杆分别置于试样上、下两端，其中：一个压杆固定，另一个连接在试验机上，可移动[12]。随着加载压力的升高，玻璃颗粒试样在静水压的作用下侧向膨胀，导致金属套筒变形，颗粒之间产生滑移。实验前，对试样施加 0.04 kN 预应力。每次试验均更换新套筒。

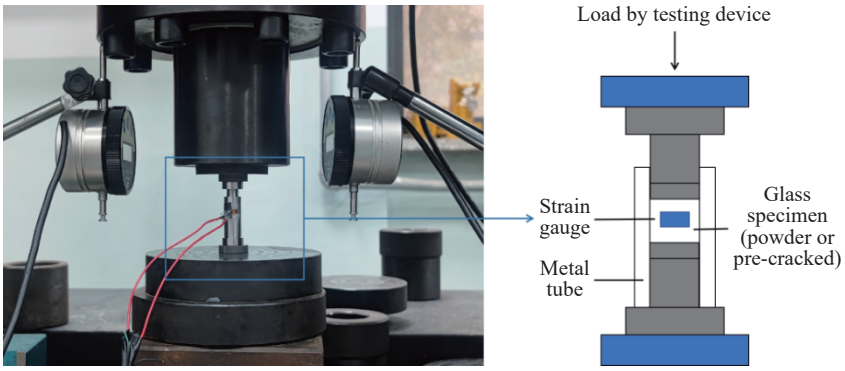


图 3　三轴围压试验装置

Fig. 3　Triaxial confining pressure test device

2　试验结果分析

2.1　抗拉强度

试样中心正、反 2 个应变计采集的试样变形历程如图 4 所示。可见，正、反两面的形变具有较高的一致性，说明试样变形均匀，满足试样均匀拉伸试验要求。根据美国 ASTM D8289–2020 标准[13]，可得巴西圆盘的劈裂拉伸强度为 70 MPa。

2.2　应变率效应

不同应变率下材料的拉伸应力-应变曲线如图 5 所示。图 5 中的数据为真实应力和真实应变。试验结果表明，在一维压缩加载下，玻璃试件的力学响应特性主要表现为线弹性，达到弹性阶段的强度极限后，试样瞬间破碎失效，因此，玻璃试件具有典型的弹脆性特征。玻璃试件的强度随应变率的升高而增大，说明玻璃材料具有明显的应变率效应。这是因为动态加载下，玻璃材料的主裂纹受惯性效应的影响而加速扩展[12]，裂纹的合并和汇集受阻，含裂纹的材料延迟破碎，材料强度提升。

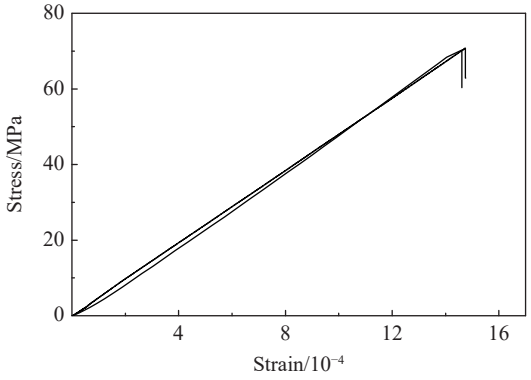


图 4　无机玻璃的拉伸应力-应变曲线

Fig. 4　Tensile stress-strain curves of inorganic glass

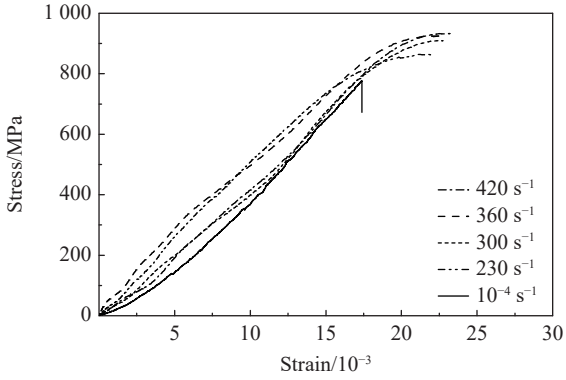


图 5　不同应变率下典型应力-应变曲线

Fig. 5　Typical stress-strain curves at different strain rates

对比不同应变率下样品的压缩强度和失效应变可知：准静态加载下，失效应变约为 0.017；动态加载下，失效应变增大，约为 0.022，比准静态条件下增加 29%。因此，低应变率下无机玻璃材料更易失效。

2.3　围压下颗粒试样的强度

设玻璃颗粒所受轴向应力为σ_{zz}，静水压力 p 和强度σ_{f}分别为

$$p=\frac{1}{3}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)=\frac{1}{3}(\sigma_{zz}+2\sigma_{\theta\theta}) \tag{1}$$

$$\sigma_{\mathrm{f}}=\frac{1}{2}(\sigma_{zz}-\sigma_{\theta\theta}) \tag{2}$$

式中：σ_1、σ_2、σ_3分别为试样受到的主应力，$\sigma_{\theta\theta}$为环向应力。

玻璃颗粒试样在 1×10^{-4} s^{-1} 应变率下的轴向应力-应变曲线如图 6 所示。应力随应变的增加而逐渐增大，变化率由小变大，继而再次变小，直至最大值。尺寸为 0～0.1 mm 的玻璃颗粒试样的强度为 533 MPa，尺寸为 0.3～0.5 mm 的玻璃颗粒试样的强度为 480 MPa，说明随着颗粒尺度的减小，材料强度增大。

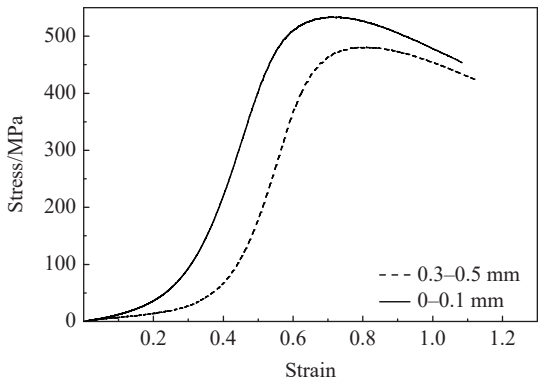


图 6　三轴围压试验轴向应力-应变曲线

Fig. 6　Axial stress-strain curves of triaxial confining pressure test

3　本构参数的获取

本研究采用 JH2 本构模型表征无机玻璃材料。JH2 本构模型包含多项式形式的状态方程、应变率、静水压力以及与损伤相关的强度模型[10]。在模型中，等效应力σ和静水压力 p 均进行归一化处理，同时，对等效应力σ、最大抗拉强度T以及应变率$\dot{\varepsilon}$均进行无量纲处理：$\sigma^*=\sigma/\sigma_{\mathrm{HEL}}$，$T^*=T/p_{\mathrm{HEL}}$，$p^*=p/p_{\mathrm{HEL}}$，$\dot{\varepsilon}^*=\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$，其中，$\sigma_{\mathrm{HEL}}$和$p_{\mathrm{HEL}}$分别为 Hugoniot 弹性极限点（Hugoniot elastic limit, HEL）处的等效应力和静水压力。

在 JH2 强度模型中，采用材料强度表征等效应力与静水压力之间的关系，考虑到材料的损伤特性，

定义完整状态和断裂状态的归一化等效应力σ_{i}^{*}和σ_{f}^{*}

$$\sigma_{\mathrm{i}}^{*}=A(p^{*}+T^{*})^{N}(1+C\ln\dot{\varepsilon}^{*}) \tag{3}$$

$$\sigma_{\mathrm{f}}^{*}=Bp^{*M}(1+C\ln\dot{\varepsilon}^{*}) \tag{4}$$

式中：A、B、M、N、C 为常数。当 M=1 时，式 (4) 中使用的断裂强度与 JH1 模型相同。为使断裂强度 S_{fmax} 在定义重要断裂强度方面具备更大的灵活性，将其定义为 0～1 区间内的常量。本研究参考文献 [14]，S_{fmax} 取 0.2。断裂状态的归一化等效应力满足

$$\sigma_{\mathrm{f}}^{*}\leqslant S_{\mathrm{fmax}} \tag{5}$$

JH2 损伤模型与 Johnson-Cook 本构模型相似[15−16]，裂纹导致的累积损伤表示为

$$D=\sum\Delta\varepsilon_{\mathrm{p}}/\varepsilon_{\mathrm{p}}^{\mathrm{f}} \tag{6}$$

式中：$\Delta\varepsilon_{\mathrm{p}}$为每一个时间步循环中的塑性应变，$\varepsilon_{\mathrm{p}}^{\mathrm{f}}$为特定压力条件下材料的最大塑性应变。

$$\varepsilon_{\mathrm{p}}^{\mathrm{f}}=D_1(p^{*}+T^{*})^{D_2} \tag{7}$$

式中：D_1、D_2 为材料常数。

3.1　状态方程

当材料未发生损伤（D=0）时，材料的状态方程表示为

$$p=K_1\mu+K_2\mu^2+K_3\mu^3 \tag{8}$$

式中：K_1 为材料的体积模量；K_2、K_3 为材料常数；p 为静水压力；μ为压缩体应变，$\mu=\rho/\bar{\rho}-1$，其中，ρ为材料冲击压缩后的密度，ρ_0为材料的初始密度。材料损伤状态下的状态方程还涉及弹性能损失和静水压势能的转化率参数β（$0\leqslant\beta\leqslant1$），参考文献 [17]，$\beta$=1.0。

根据广义胡克定律，材料的体积模量 K_1 及切变模量 G 可表示为弹性模量 E_{p} 和泊松比ν的函数

$$K_1=\frac{E_{\mathrm{p}}}{3(1-2\nu)} \tag{9}$$

$$G=\frac{E_{\mathrm{p}}}{2(1+\nu)} \tag{10}$$

本研究的无机玻璃的平均密度$\bar{\rho}$、弹性模量和泊松比数据[4, 7, 18] 列于表 1。

表 1　玻璃的基本力学性能参数

Table 1　Basic mechanical parameters of glass

$\bar{\rho}$/(kg·m^{-3})	E_{p}/GPa	ν	G/GPa	K_1/GPa
2468	72	0.23	29.3	44.4

在平面冲击波理论中，内能 E、压力 p、冲击波速 u_{s}、密度ρ（或比容 V）、粒子速度 u_{p} 这 5 个未知物理量满足 Rankine-Hugoniot 守恒方程

$$\begin{cases}\rho_0u_{\mathrm{s}}=\rho(u_{\mathrm{s}}-u_{\mathrm{p}})\\ p-p_0=\rho_0u_{\mathrm{s}}u_{\mathrm{p}}\\ E-E_0=\dfrac{1}{2}(p+p_0)(V_0-V)\end{cases} \tag{11}$$

式中：p_0 和 p 分别为冲击前、后作用在材料上的压力，V_0 和 V 为分别为冲击前、后的比容（单位质量的未压缩和压缩的特定体积），E_0 和 E 分别为冲击前、后的内能。

将实验获得的冲击波速度和粒子速度代入式 (11)，即可求得其余未知物理量。冲击波速度和粒子速度满足如下关系

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 = \frac{u_\mathrm{p}}{u_\mathrm{s} - u_\mathrm{p}} \tag{12}$$

Renganathan 等[9] 进行了浮法玻璃的高压平板撞击试验，并采用冲击波速和粒子速度计算得到了材料的体应变和压力数据，拟合得到无机玻璃的 Hugoniot 曲线，如图 7 所示。

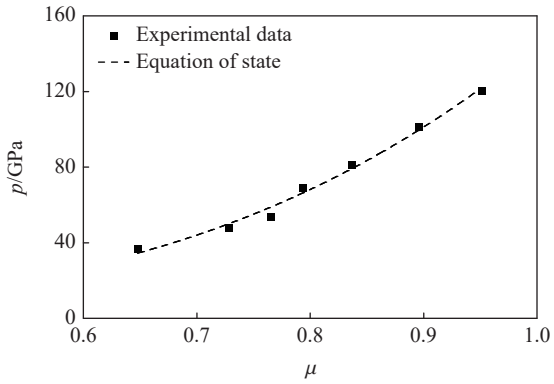


图 7　无机玻璃的 Hugoniot 曲线

Fig. 7　Hugoniot curve of inorganic glass

通过拟合实验数据，得到 JH2 状态方程中的参数 K_2=−145, K_3=244。因此，无机玻璃的状态方程可表示为

$$p = 44.4\mu - 145\mu^2 + 244\mu^3 \tag{13}$$

许多学者[19–21] 对无机玻璃的 Hugoniot 弹性极限进行了研究，得到的 Hugoniot 弹性极限 σ_HEL 在 3.1～6.0 GPa 区间。Alexander 等[8] 指出，平板撞击时材料内部的剪应力带来的塑性变形会导致试验获得的压强极限结果偏低，排除剪应力的影响后发现，材料在较高压力下的纵向响应仍保持弹性，并提出纵向弹性变形的压强阈值为 7.5 GPa。本研究中，σ_HEL=7.5 GPa, Hugoniot 弹性极限可以采用静水压力 p_HEL 和偏应力 s_HEL 来表示，并且三者满足以下关系

$$\sigma_\mathrm{HEL} = p_\mathrm{HEL} + \frac{2}{3} s_\mathrm{HEL} \tag{14}$$

偏应力可以描述为

$$s_\mathrm{HEL} = 2G \frac{\mu_\mathrm{HEL}}{1 + \mu_\mathrm{HEL}} \tag{15}$$

则 σ_HEL 与 Hugoniot 状态下的体积应变 μ_HEL 满足如下关系

$$\sigma_\mathrm{HEL} = K_1\mu_\mathrm{HEL} + K_2\mu_\mathrm{HEL}^2 + K_3\mu_\mathrm{HEL}^3 + \frac{4}{3} G \frac{\mu_\mathrm{HEL}}{1 + \mu_\mathrm{HEL}} \tag{16}$$

联立式 (14)～式 (16) 可得: μ_HEL=0.113, p_HEL=3.52 GPa, s_HEL=5.97 GPa。

3.2　未损伤条件下的强度模型

由巴西圆盘劈裂试验可得无机玻璃的准静态抗拉强度为 70 MPa, 取最大抗拉强度 T=0.07 GPa, 可得无量纲抗拉强度 $T^* = T/p_\mathrm{HEL}$ =0.0199。

根据准静态和动态压缩试验结果获得的材料系数如表 2 所示。

表 2　准静态和动态压缩试验得到的参考参数

Table 2　Parameters obtained by quasi-static and dynamic compression test

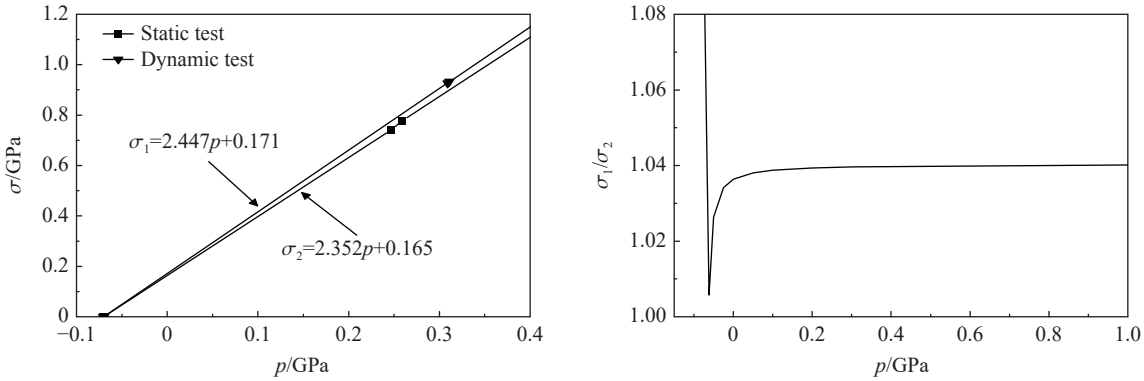
Test	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	σ/GPa	p/GPa	σ^*	p^*
Quasi-static compression	10^{-4}	0.760	0.253	0.127	0.0719
SHPB	420	0.930	0.310	0.156	0.0881

图 8(a) 给出了无机玻璃材料在准静态加载和动态加载下的等效静水压力 p 与单轴压缩强度 σ_i 的关系，其中: σ_1 和 σ_2 分别为动态和准静态加载下的单轴压缩强度。图 8(b) 给出了偏应力比 σ_1/σ_2 随 p 的变化曲线。当 p>0.2 GPa 时，不同应变率下 σ_1/σ_2 趋于常数 1.04。

由式 (3) 可得

$$\frac{\sigma_{i1}^*}{\sigma_{i2}^*} = \frac{A(p^* + T^*)^N(1 + C\ln\dot{\varepsilon}_1^*)}{A(p^* + T^*)^N(1 + C\ln\dot{\varepsilon}_2^*)} = \frac{1 + C\ln\dot{\varepsilon}_1^*}{1 + C\ln\dot{\varepsilon}_2^*} \tag{17}$$

式中: σ_{i1}^*、σ_{i2}^* 分别为动态和准静态下单轴压缩等效应力，$\dot{\varepsilon}_1^*$ 和 $\dot{\varepsilon}_2^*$ 分别为动态和准静态下单轴压缩应变率。



(a) Relationship between p and σ under two strain rates　　(b) Variation of σ_1/σ_2 with p

图 8　应变率敏感系数 C 的拟合过程

Fig. 8　Fitting process of strain rate sensitivity coefficient C

在固定应变率加载条件下，材料的静水压力与等效应力呈线性关系。参考应变率取 1.0 s^{-1}，可求得 C=0.002 56。

无量纲化的等效应力、静水压力和应变率满足

$$\ln\frac{\sigma^*}{1+C\ln\dot{\varepsilon}^*}=N\ln(p^*+T^*)+\ln A \tag{18}$$

令

$$\begin{cases}X=\ln(p^*+T^*)\\ Y=\ln\dfrac{\sigma^*}{1+C\ln\dot{\varepsilon}^*}\end{cases} \tag{19}$$

由式 (18) 可知，变量 Y 是变量 X 的一次函数，两者均无量纲，参数 N 为直线斜率，ln$A$为纵轴截距。选取 4 个典型应变率下的试验结果列于表 3。采用式 (18) 拟合这些数据，得到材料的完整强度参数 A=3.10 和 N=1.51，Y 与 X 之间的关系如图 9 所示。

表 3　根据动态压缩试验数据拟合得到的完整强度参数

Table 3　Complete strength parameters obtained by dynamic compression test data fitting

No.	$\dot{\varepsilon}^*$	σ/GPa	σ^*	p^*	X	Y
1	230	0.864	0.144 7	0.081 8	−2.039 3	−1.957 6
2	280	0.893	0.149 6	0.084 6	−2.018 4	−1.925 5
3	350	0.917	0.153 6	0.086 8	−2.001 5	−1.900 0
4	420	0.933	0.156 3	0.088 4	−1.990 3	−1.883 5

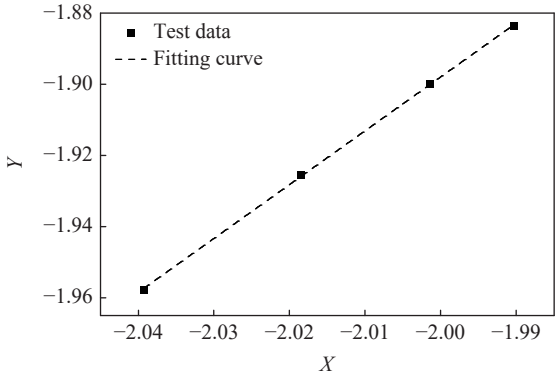


图 9　材料完整强度模型的拟合曲线

Fig. 9　Fitting curve of complete strength model of material

根据研究经验，借助数值模型，通过将不同损伤度下的模拟结果与实验结果进行对比，优化出最终的 D_1、D_2。

3.3　完全损伤条件下的强度模型

应力传感器和应变片获得的无机玻璃颗粒在高围压作用下的轴向和环向应力列于表 4，其中下标 c 代表套筒。根据式 (1)、式 (2) 可得静水压力分量和偏应力分量。通过 Hugoniot 状态下的 p_{HEL}、s_{HEL} 对静水压力和剩余强度 σ_{f} 进行无量纲化处理。σ_{f}^{*} 为完全损伤条件下的等效应力。

表 4　三轴围压试验数据

Table 4　Triaxial confining pressure test data

Particle size/mm	σ_{zz}/GPa	$\varepsilon_{\mathrm{c}}/10^{-3}$	E_{c}/GPa	$\sigma_{\theta\theta}$/GPa	p/GPa	σ_{f}/GPa	p^{*}	σ_{f}^{*}
0–0.1	0.533	7.00	192	0.089	0.237	0.222	0.067	0.037
0.3–0.5	0.408	4.75	192	0.058	0.175	0.175	0.050	0.029

压实后 2 种无机玻璃颗粒的强度较完整玻璃有明显差距。图 10 给出了无机玻璃颗粒完全损伤条件下的等效应力 σ_{f}^{*} 与无量纲静水压力的关系，可以看出，玻璃颗粒的强度随着静水压力的增加而增大，当静水压力达到一定值时，玻璃颗粒的强度达到材料最大破碎强度 $\sigma_{\max}$。由式 (4) 可解得无机玻璃在完全损伤条件下（D=1）的强度模型参数：B=0.36，M=0.83。

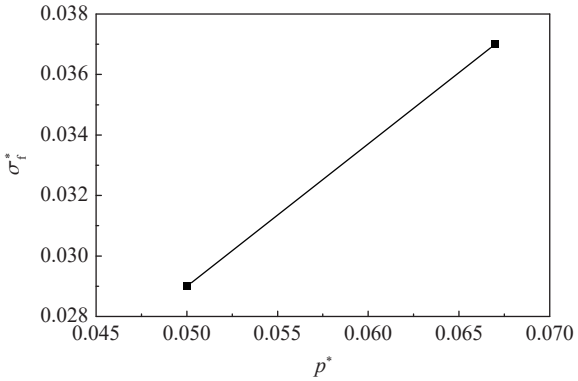


图 10　无机玻璃颗粒的无量纲静水压力与无量纲强度的关系

Fig. 10　Relation between dimensionless hydrostatic pressure and dimensionless strength for inorganic glass particles

3.4　本构模型有效性验证

采用 LS-DYNA 有限元软件，对建立的 JH2 本构模型进行有限元模拟，通过对比试验与模拟结果，验证模型的有效性。

3.4.1　有限元建模

设置仿真模型与试验工况完全相同，将试验采集到的入射信号换算为节点力直接加载在入射杆端。选取 3 种不同的应变率工况。杆和试样均使用 Lagrange 网格划分，试样和垫块使用精细网格划分，以提高结果的准确性，如图 11 所示。为避免负体积效应，减小时间步的缩放系数，并采用沙漏控制。有限元模型中，SHPB 的网格尺寸为 1.2 mm，钢垫块的网格尺寸为 0.6 mm，试样的网格尺寸处于 0.2～0.3 mm 区间，并且在沿长度方向的棱角处设置半径为 0.5 mm 的倒角。

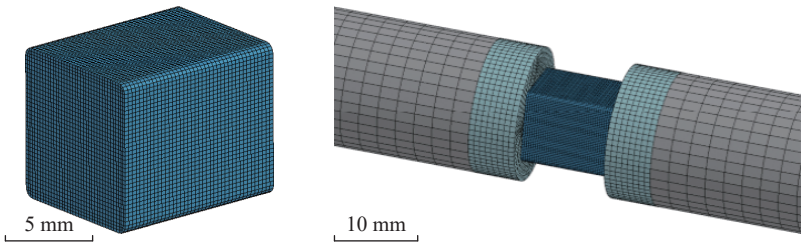


图 11　玻璃试样和 SHPB 的有限元模型

Fig. 11　Glass specimen and finite element model of SHPB

采用罚函数法设置杆件间的接触；垫块与试样之间采用 ERODING_NODE_TO_ SURFACE 接触，该方法在单元失效后会自动生成新的接触面以避免穿模[14]。对于试样，采用有限元法-光滑粒子流体动力学（finite element method-smoothed particle hydrodynamics, FEM-SPH）自适应耦合算法，失效后网格保留质

量并转化为 SPH 粒子，从而更准确地模拟玻璃的损伤与破碎。试验杆和垫块使用线弹性本构模型描述，玻璃试样采用拟合得到的 JH2 本构模型描述。钢杆和垫块的参数以及拟合得到的玻璃材料的本构模型参数列于表 5 和表 6，其中，ρ_s 为钢杆和垫块的密度。

表 5　钢杆和垫块的线弹性材料参数

Table 5　Linear elastic material property parameters of steel bar and block

ρ_s/(kg·m^{-3})	E_p/GPa	ν
7850	200	0.30

表 6　试验拟合得到的玻璃材料的 JH2 本构模型参数

Table 6　Parameters of JH2 constitutive model of glass material fitted by the test

ρ/(kg·m^{-3})	G/GPa	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	T/GPa	σ_{HEL}/GPa	p_{HEL}/GPa
2468	29.3	44.4	−145	244	0.07	7.5	3.52
A	B	C	M	N	D_1	D_2	S_{fmax}
3.10	0.36	0.002 56	0.83	1.51	0.005	0.85	0.2

3.4.2　结果分析

图 12 显示了应变率为 425 s^{-1} 时不同时刻玻璃材料的有效应力云图，可以看出玻璃材料在动态加载下的失效历程。设波开始传递的时刻为零时刻，则 260 μs 时，脉冲信号传递至试样，300 μs 时，试样边缘开始出现破坏，裂纹很快扩散至整个试样，直至玻璃试样粉碎。数值模拟中入射波上升沿的长度为 75 μs，试样从加载开始到出现破坏历时 40 μs，说明在斜波加载过程中试样便出现了破坏。由于试样的纵波波速与杆的纵波波速相近，约为 5.2 km/s，由此可推算出加载过程中应力波在系统中的传播距离约为 200 mm。该距离远大于试样长度，说明应力波在试样中多次反射，在试样破碎前试样内部已达到应力平衡。从图 12 可以看出：首先，由于试样两端面的应力最集中，因而两端面最先出现破碎；随后，裂纹沿轴向扩展，并贯穿试样；接着，裂纹开始沿横向扩展，并逐渐汇集，出现更多衍生裂纹；最终，试样完全破碎。

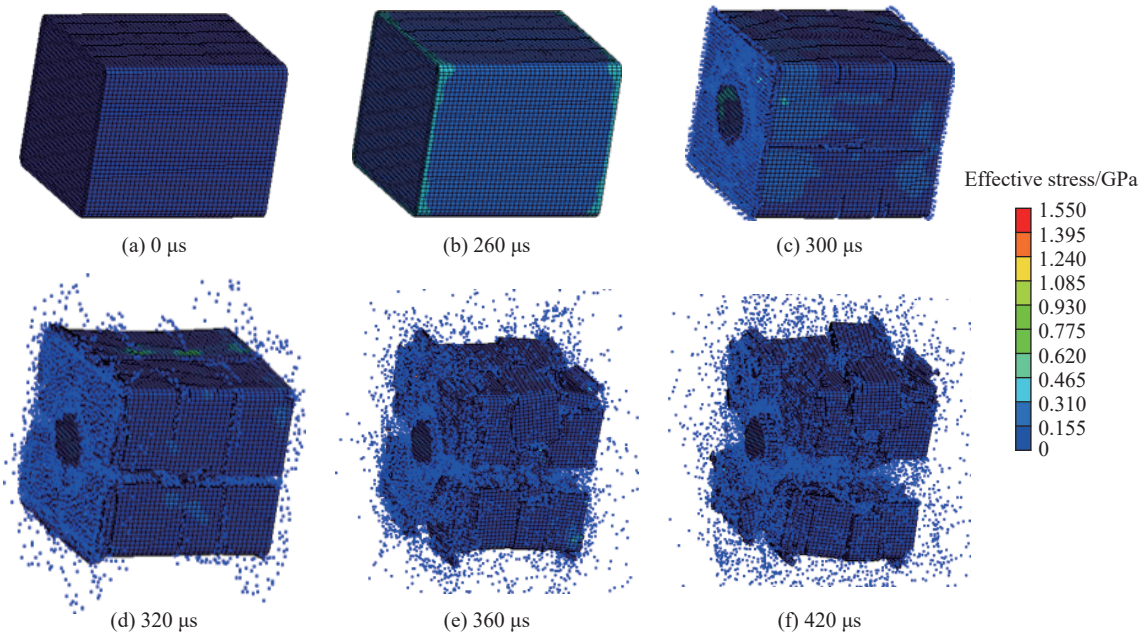
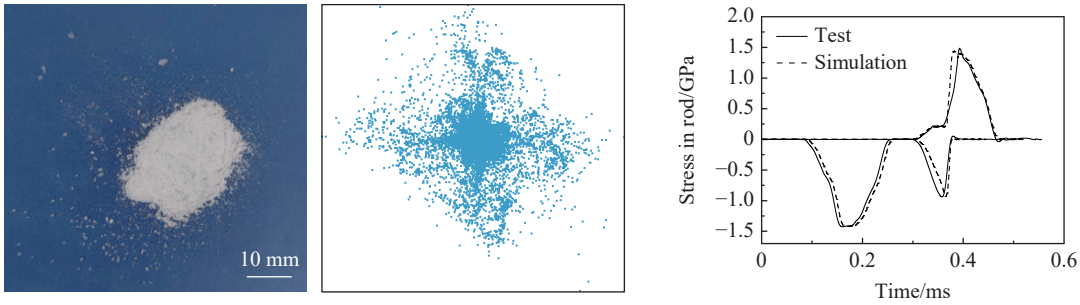


图 12　模拟得到的无机玻璃的失效历程

Fig. 12　Failure process of inorganic glass obtained by simulation

对比试验与数值模拟得到的玻璃破碎形貌，可以发现，它们具有较高的一致性，玻璃试样均破碎为粉末状小颗粒，如图 13(a)所示。图 13(b) 给出了无机玻璃材料在应变率为 425 s^{-1} 的条件下试验和数值模拟得到的入射杆和透射杆中的应力信号。反射波的平台段证实数值模拟实现了与试验相同的应变率加载。



(a) Morphology of glass fracture in test and simulation　　(b) Typical incident and transmitted signals of test and simulation

图 13　试验与数值模拟结果对比

Fig. 13　Comparison of test and simulation results

材料的单轴压缩强度可根据下式算出

$$\sigma(t)=\frac{E_0A_0}{A}\varepsilon_0(t) \tag{20}$$

式中：下标 0 代表杆。

数值模拟和试验获得的不同应变率下的单轴压缩强度列于表 7。数值模拟与试验结果的相对误差均小于 5%，说明本研究所得的本构模型有效。

表 7　数值模拟和试验获得的不同应变率下的单轴压缩强度

Table 7　Uniaxial compression strength at different strain rates obtained by simulation and test

$\dot{\varepsilon}/s^{-1}$	Uniaxial compression strength/MPa		Error/%
	Test	Simulation	
220	874	837	4.2
350	917	885	3.5
425	939	911	3.0

4　结　论

通过电子万能试验机和 SHPB 试验研究了无机玻璃的力学性能，构建了含损伤无机玻璃的 JH2 本构模型，并验证了模型的有效性，主要结论如下：

(1) 无机玻璃的压缩强度随应变率的升高而增大，具有显著的应变率敏感性，动态加载下的失效应变比准静态加载下的失效应变增加了 29%，说明低应变率下材料更易失效；

(2) 设计了玻璃颗粒在高强套筒围压下的力学性能试验，获得了完全损伤条件下玻璃颗粒的力学性能，结果表明，随着颗粒尺度的减小，材料强度逐渐增大，在相同的应变率下，玻璃颗粒的强度小于玻璃未损伤条件下的强度；

(3) 基于含损伤的 JH2 本构关系，对试验数据进行拟合，获得了含损伤无机玻璃的本构模型，对比数值模拟与试验的动态压缩典型信号、试样破碎过程以及材料强度，验证了含损伤无机玻璃的本构模型的有效性。

参考文献：

[1] 刘志海. 夹层玻璃的发展现状及趋势 [J]. 中国建材, 2003(9): 64–66.
LIU Z H. Current situation and future trends of laminated glass [J]. China Building Materials, 2003(9): 64–66.

[2] SHIM G I, KIM S H, EOM H W, et al. Improvement in ballistic impact resistance of a transparent bulletproof material laminated with strengthened soda-lime silicate glass [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 77: 169–178.

[3] SHIM G I, EOM H W, KIM S H, et al. Fabrication of lightweight and thin bulletproof windows using borosilicate glass strengthened by ion exchange [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 69: 44–49.

[4] ZHANG X H, HAO H, MA G W. Dynamic material model of annealed soda-lime glass [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 77: 108−119.

[5] 葛彦鑫. Al_2O_3/SiC 复相陶瓷冲击失效机理研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022: 52−54.
GE Y X. Study on impact failure mechanism of Al_2O_3/SiC composite [D]. Taiyuan: North University of China, 2022: 52−54.

[6] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. An improved computational constitutive model for brittle materials [J]. AIP Conference Proceedings, 1994, 309(1): 981–984.

[7] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, GRADY D E, et al. High strain rate properties and constitutive modeling of glass [C]//The 15th International Symposium on Ballistics. Jerusalem, Isreal, 1995: T14929.

[8] ALEXANDER C S, CHHABILDAS L C, TEMPLETON D W. The hugoniot elastic limit of soda-lime glass [J]. AIP Conference Proceedings, 2007, 955(1): 733–738.

[9] RENGANATHAN P, DUFFY T S, GUPTA Y M. Hugoniot states and optical response of soda lime glass shock compressed to 120 GPa [J]. Journal of Applied Physics, 2020, 127(20): 205901.

[10] 杨震琦, 庞宝君, 王立闻, 等. JH-2 模型及其在 Al_2O_3 陶瓷低速撞击数值模拟中的应用 [J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(5): 463–471.
YANG Z Q, PANG B J, WANG L W, et al. JH-2 model and its application to numerical simulation on Al_2O_3 ceramic under low-velocity impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(5): 463–471.

[11] 高玉波. TiB_2-B_4C 复合材料动态力学性能及抗侵彻机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 29−42.
GAO Y B. Study of dynamic mechanical property and anti-penetration mechanism of TiB_2-B_4C composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 29−42.

[12] MEYER L W, FABER I. Investigations on granular ceramics and ceramic powder [J]. Journal De Physique Ⅳ, 1997, 7: C3-565–C3-570.

[13] ASTM. Standard test method for tensile strength estimate by disc compression of manufactured graphite: D8289-2020 [S]. 2020.

[14] 贾哲. 弹道冲击下防弹玻璃的损伤机理和抗侵彻性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023: 12−36.
JIA Z. Study on damage mechanism and anti-penetration performance of bulletproof glass under ballistic impact [D]. Taiyuan: North University of China, 2023: 12−36.

[15] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures [C]//The 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, The Netherlands, 1983.

[16] 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.

[17] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, GERLACH C A. An improved computational constitutive model for glass [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2017, 375(2085): 20160182.

[18] OSNES K, HOLMEN J K, GRUE T, et al. Perforation of laminated glass: an experimental and numerical study [J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 156: 103922.

[19] GRADY D E, CHHABILDAS L C. Shock-wave properties of soda-lime glass [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1996: 4−6.

[20] DANDEKAR D P. Index of refraction and mechanical behavior of soda lime glass under shock and release wave propagations [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(12): 6614−6622.

[21] SIMHA C H M, GUPTA Y M. Time-dependent inelastic deformation of shocked soda-lime glass [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(4): 1880−1890.

JH2 Constitutive Model of Inorganic Bulletproof Glass with Damage

SHI Liutong[1], HUANG Youqi[2], GAO Yubo[1], JIA Zhe[3], LI Zhihao[1]

（1. *School of Aerospace Engineering*, *North University of China*, *Taiyuan* 030051, *Shanxi*, *China*;

2. *China Building Materials Academy*, *Beijing* 100024, *China*;

3. *The Sixth Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation Limited*, *Hohhot* 010010, *Inner Mongolia*, *China*）

Abstract: Bulletproof glass exhibits excellent impact resistance and protective capabilities against bullets, explosive fragments, high-speed projectiles, and various other aggressive threats, making it extensively utilized in the field of safety and security. To investigate the dynamic mechanical properties and constitutive relation of the inorganic glass layers in bulletproof glass under impact loading, we firstly employed an electronic universal testing machine and a split Hopkinson pressure bar (SHPB) test setup to obtain the tensile and compressive mechanical properties of the material at different strain rates. Results reveal a noticeable strain rate effect that the material's strength increases with the strain rate. Secondly, drawing on the experience of geotechnical triaxial compression tests, we designed a high-strength confinement sleeve suitable for assessing the mechanical properties of glass particles under conditions of complete damage. Results show a significantly lower strength compared to that of the intact state of inorganic glass. Finally, by integrating test data, an JH2 constitutive model for inorganic glass with damage was established. By using the non-linear finite element software LS-DYNA, the SHPB test process was simulated. The effectiveness of the constitutive model was verified by comparing test and simulated results.

Keywords: bulletproof glass; mechanical properties; constitutive relation; damage