冲击载荷下含初始损伤砂岩能量演化及损伤机理研究①

王社光[1,2], 向伟华[1,2], 王征[1,2], 赵鹏飞[1,2], 刘志义[3,4,5], 耿帅[1,2], 顾章恒[1,2], 王立杰[1,2]
(1.河北钢铁集团沙河中关铁矿有限公司, 河北 邢台 054100; 2.河北省复杂铁矿低碳智能高效开采技术创新中心, 河北 邢台 054100; 3.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 4.矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心, 河北 唐山 063210; 5.河北省矿业开发与安全技术实验室, 河北 唐山 063210)

摘 要: 为探究富水环境中砂岩受工程扰动及爆破振动后的动态损伤特性及能量演化,采用分离式霍普金森压杆(SHPB)对 3 组含不同初始损伤的砂岩进行饱水和干燥状态下的冲击试验,研究砂岩的能量演化;引入初始损伤、饱水度,建立砂岩在不同初始损伤-饱水度条件下的统计损伤本构模型,结合损伤曲线分析含初始损伤砂岩的全过程损伤机理。结果表明,砂岩的应力-应变曲线基于能量演化可分为 4 个阶段,在峰值应力之后,弹性能开始释放,且整个破坏过程伴随着显著的能量滞后现象;应变率相同时,随着初始损伤增加和饱水度增大,破碎程度逐渐增大;修正的损伤本构模型理论曲线与实测曲线吻合度较高,拟合相关系数达 0.991,建立的损伤曲线表征了砂岩的全过程损伤机理,初始损伤及饱水损伤在一定程度上可以等效为荷载损伤。

关键词: 深部开采; 砂岩; 能量演化; 霍普金森压杆; 冲击动力学; 损伤机理; 饱水度; 本构模型
中图分类号: TD313 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.009
文章编号: 0253-6099(2025)06-0055-08

Energy Evolution and Damage Mechanism of Sandstone with Initial Damage Under Impact Loading

WANG Sheguang[1,2], XIANG Weihua[1,2], WANG Zheng[1,2], ZHAO Pengfei[1,2], LIU Zhiyi[3,4,5], GENG Shuai[1,2], GU Zhangheng[1,2], WANG Lijie[1,2]
(1.*Shahe Zhongguan Iron Mine Co., Ltd., Hebei Iron and Steel Group, Xingtai* 054100, *Hebei, China*; 2.*Hebei Technology Innovation Center for Low-Carbon, Intelligent and Efficient Mining of Complex Iron Ores, Xingtai* 054100, *Hebei, China*; 3.*College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan* 063210, *Hebei, China*; 4.*Collaborative Innovation Center of Green Development of Mineral Resources and Ecological Restoration, Tangshan* 063210, *Hebei, China*; 5.*Hebei Laboratory of Mining Development and Safety Technology, Tangshan* 063210, *Hebei, China*)

Abstract: To investigate the dynamic damage characteristics and energy evolution of sandstone in aquatic environments after engineering disturbance and blasting vibration, a split Hopkinson pressure bar (SHPB) was used to test three groups of saturated and dried sandstone with different initial damages. A statistical damage constitutive model was established by introducing initial damage and degree of saturation, which was then used in combination with damage curves to analyze the whole-process damage mechanism of sandstone with initial damage. It is found that the stress-strain curve of sandstone can be divided into four parts based on energy evolution. After reaching peak stress, things change. Elastic energy begins to release and a significant energy hysteresis phenomenon occurs throughout the failure process. At the same strain rate, the degree of fragmentation gradually increases as the initial damage becomes greater and sandstone is more saturated. The theoretical stress-strain curve of the modified damage constitutive model is in better coincidence with the practical one, presenting the highest correlation coefficient (0.991). The mechanism for whole-process sandstone damage can be characterized by the established damage curves. Furthermore, the initial damage and saturation-induced damage of sandstone are equivalent to its load-induced damage to a certain extent.

① **收稿日期**: 2025-05-30
基金项目: 河钢集团重点科技项目(HG2025121)
作者简介: 王社光(1986—),男,河南濮阳人,正高级工程师,主要从事采矿工程管理工作。E-mail:406752459@qq.com
通信作者: 王征(1986—),男,河北唐山人,高级工程师,主要从事水文地质技术研究工作。E-mail:mwssbwzb2011@126.com

Key words: deep mining; sandstone; energy evolution; Hopkinson bar; impact dynamics; damage mechanism; saturation degree; constitutive model

深部矿产资源开采面临诸多环境和技术难题,受“三高一扰动”的复杂力学环境影响,易发生顶板垮落、岩爆等灾害,在富含地下水的深部矿井中这些问题更加突出[1-3]。岩石作为非均质多相复杂结构材料,存在各种损伤缺陷,在水的作用下这些原始损伤缺陷劣化趋势显著增强,严重时会导致岩体破坏失稳。因此,研究冲击载荷下饱水损伤砂岩动力学响应特征与损伤本构关系,对探讨砂岩动力学灾害成灾机制、指导深部矿山安全开采具有重要意义。

在岩石损伤本构模型研究方面,国内外学者基于分离式霍普金森压杆(SHPB)装置和三轴应变仪开展了广泛研究,主要基于应变等效原理和 Weibull 分布构建损伤模型[4-10];部分学者在此模型基础上通过增加初始损伤变量进一步完善损伤本构模型[11-13]。在岩石力学机理与能量演化方面,学者通过动、静力学试验揭示了多种环境因素和载荷条件对岩石力学特性的影响,研究了岩石在不同条件下的力学响应与破坏特征,通过探究各变量(如孔隙率、饱水度)影响条件下能量耗散演化规律,说明各因素影响作用下岩石的损伤机理[14-18];部分学者通过建立岩石应力-应变响应与能量演化规律之间的联系,说明岩石损伤破坏过程[19-21]。

然而现有研究聚焦于岩石的动态力学特性及不同状态岩石的损伤规律分析,研究因素较为单一。现有动态试验集中于单一饱水状态或瞬时冲击,未考虑饱水后砂岩的动态损伤演化,不能系统揭示不同饱水程度与预损伤共同作用对砂岩的动态力学行为与能量演化规律的影响。因此,本文利用 SHPB 冲击装置和动态监测系统对不同损伤程度及损伤后的饱水砂岩和干燥砂岩进行动态冲击试验,基于能量平衡理论获得砂岩动态破坏过程中的能量演化规律,结合动态应力-应变曲线建立考虑初始损伤和饱水度的损伤本构模型,研究初始损伤和饱水度对砂岩变形特性及破碎特征的影响,并探讨含初始损伤砂岩的全过程损伤演化机制,可为受扰动后含初始损伤砂岩的破坏失稳机制提供理论参考。

1 试验概况

试验所用砂岩取自河北某矿山,该砂岩质地均匀,无明显裂隙。为保证岩样的一致性,选取同一块岩石,为了减少 SHPB 冲击试验中的端部效应和惯性效应,将砂岩依据相关试验标准制成 Φ50 mm×25 mm 的圆饼试样,端面平整。为了探明不同状态砂岩在冲击载荷作用后的动力学响应特征和损伤本构关系,将岩样分为无损伤、低损伤、中损伤 3 组,每组 6 块,并将每组岩样分为自然、饱水和干燥状态。对原始砂岩试样进行基础参数测定后,采用 SHPB 对其进行动态冲击以预制初始损伤。含初始损伤的试样经过饱水和干燥后,再次称重、测量波速,同时测量试样的 T2 谱和孔隙度,将上述指标作为定义损伤的参数。对不同条件的砂岩试样进行动态冲击试验,冲击气压设置为 0.45 MPa。基于 SHPB 动态冲击试验结果可知,受到冲击荷载时,岩样临界破坏状态的气压为 0.4 MPa,选择冲击气压 0.30、0.35 MPa 对砂岩试样制造 2 种损伤状态,利用非金属超声检测仪对损伤砂岩试样进行波速测定,定义砂岩试样较初始试样波速降低100 m/s为低损伤,波速降低 200 m/s 为中损伤,未进行预先冲击的试样为无损伤。饱水、干燥测试规程遵循国际岩石力学学会相关标准。表 1 为砂岩试样的物理力学参数。其中 S1 为自然-无损试样,S2 为自然-低损试样,S3 为自然-中损试样,S4 为饱水-无损试样,S5 为饱水-低损试样,S6 为饱水-中损试样,S7 为干燥-无损试样,S8 为干燥-低损试样,S9 为干燥-中损试样。

表 1 砂岩试样物理力学参数

Table 1 Physical properties of sandstone samples

砂岩试样	直径/mm	高度/mm	质量/g	纵波波速/(m·s^{-1})		
				损伤前	损伤后	饱水后
S1	49.7	25.5	115.8	3 290		
S2	49.9	25.1	115.7	3 250	3 160	
S3	49.4	25.1	114.9	3 210	2 960	
S4	49.7	24.9	115.4	3 270		4 140
S5	49.6	25.0	116.0	3 260	3 180	4 120
S6	49.7	25.0	116.6	3 240	3 020	4 030
S7	49.7	25.1	116.0	3 260		
S8	49.4	25.0	116.8	3 250	3 150	
S9	49.5	24.9	116.5	3 230	3 010	

2 SHPB 试验结果与分析

2.1 吸收能计算与分析

岩石试件变形破坏由能量耗散与能量释放综合作用导致[22]。在 SHPB 试验中,能量以应力波的形式传输至入射杆中,入射杆传递给砂岩的能量可分为入射能 W_I、反射能 W_R、吸收能 W_S,各能量的计算方法如下[23]:

$$W_S(t) = W_I(t) - W_R(t) - W_T(t) \tag{1}$$

$$W_I(t) = EAc_0 \int_0^t \varepsilon_I^2(t)\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$W_R(t) = EAc_0 \int_0^t \varepsilon_R^2(t)\,\mathrm{d}t \tag{3}$$

$$W_T(t) = EAc_0 \int_0^t \varepsilon_T^2(t)\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中：W_T 为试样的透射能，J；E 为压杆弹性模量，GPa；A 为入射杆横截面积，mm^2；c_0 为弹性应力波波速，m/s。

砂岩试样的吸收能 W_S 主要包括三部分：破碎能耗、破碎动能及其他形式耗散能。经过计算可知自然状态下砂岩破碎能耗占吸收能的 94%～98%，因此可认为砂岩试样吸收能近似等于破碎能耗。为了减小试样体积的影响，定义单位体积破碎能耗为能耗密度：

$$U_d = \frac{W_S(t)}{V} \tag{5}$$

图 1 为不同损伤程度砂岩吸收能变化，由图 1 可知，在动态冲击载荷下，砂岩的能量吸收能力随初始损伤程度增加而显著降低，干燥后的砂岩吸收能最高，自然状态的砂岩次之，饱水后的砂岩吸收能最低。这一规律表明，损伤程度越高，砂岩在破坏过程中所消耗的能量越少。与自然无损伤砂岩相比，自然低损伤砂岩吸收能降低了 14.83%，自然中损伤砂岩吸收能降低了 19.44%，无损伤状态砂岩饱水后吸收能降低了 4.16%，低损伤状态砂岩饱水后吸收能降低了 22.65%，中损伤状态砂岩饱水后吸收能降低了 27.91%，说明增加损伤程度会使砂岩的微裂隙、孔隙逐渐增多，饱水后进一步劣化了砂岩的初始缺陷，使得砂岩受到冲击作用发生破坏吸收的能量减少。

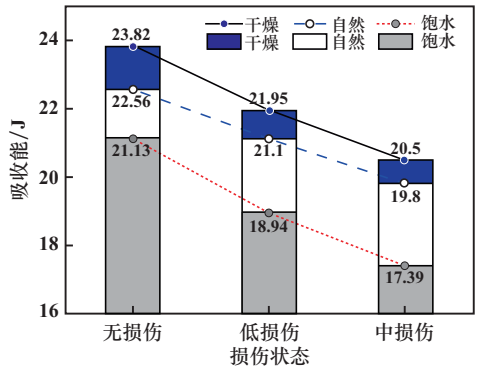


图 1　不同损伤程度砂岩吸收能

Fig. 1　Absorption energy of sandstone with different degrees of damage

2.2　动态破坏能量演化特征分析

根据热力学第一定律，岩石在变形破坏过程中，其总输入能 U、弹性应变能 U_e 和耗散能 U_d 之间满足能量守恒关系[24]：

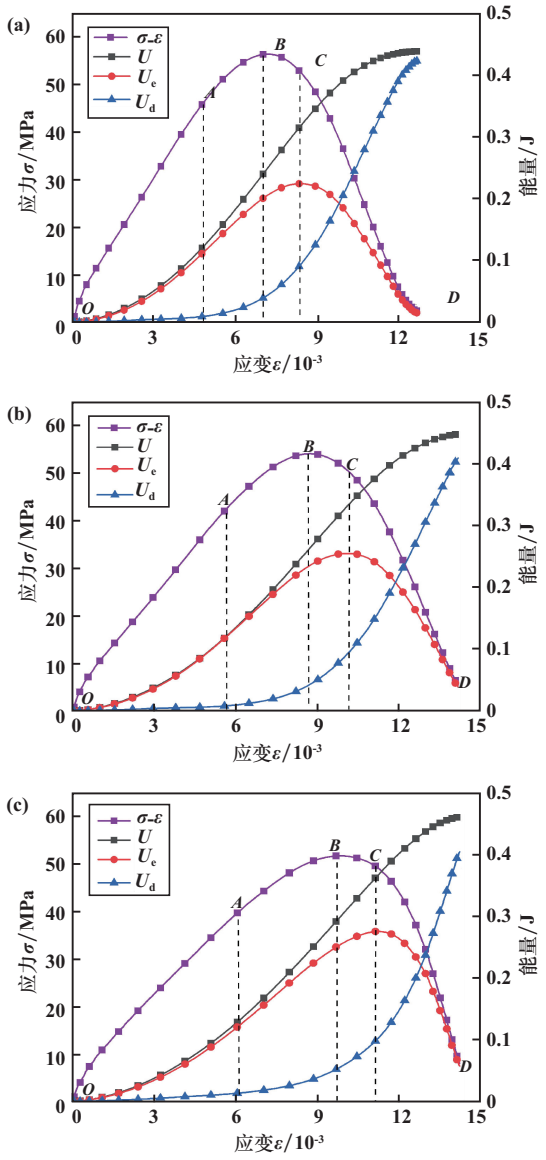
$$U = U_d + U_e \tag{6}$$

弹性应变能 U_e 储存于岩石材料中，不可逆耗散能 U_d 用于损伤演化与塑性变形。通过式(7)可以计算外部对岩石输入的总能量：

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 \mathrm{d}\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 \mathrm{d}\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_3 \mathrm{d}\varepsilon_3 \tag{7}$$

在单轴压缩条件下，$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$。σ_1 为砂岩试样所受应力值，ε_1 为应变。

计算自然状态下单位体积砂岩试样的输入能、耗散能、弹性能，进一步分析砂岩在动态冲击作用下发生破坏过程中的能量演化规律。图 2 为自然状态下单位体积砂岩试样中输入能 U、耗散能 U_d 与弹性应变能 U_e 随应变的演化规律。



(a) 自然-无损；(b) 自然-低损；(c) 自然-中损

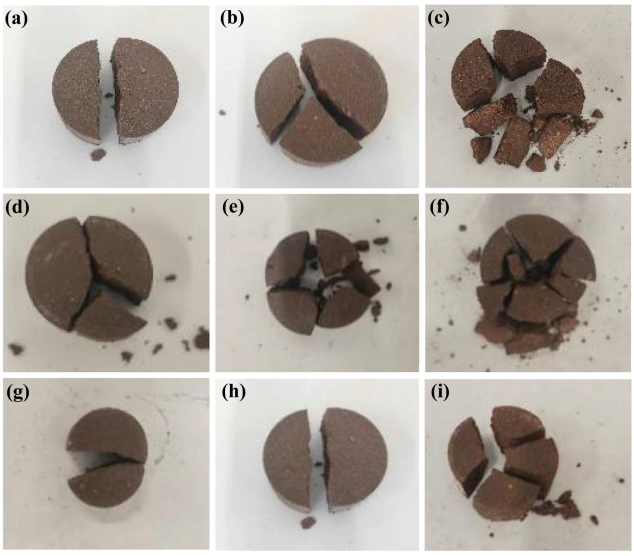
图 2　自然状态下不同损伤程度砂岩动态能量演化过程

Fig. 2　Dynamic energy evolution of sandstone with different degrees of damage in natural state

由图2可知,在动态载荷作用下,砂岩的动态破坏过程划分为4个阶段。线弹性阶段(*OA* 段):随着应变增大,应力呈现快速线性增加的趋势,试样内部原生裂纹发生扩展,新裂纹开始产生,试样输入能主要转化为弹性应变能。非线性屈服阶段(*AB* 段):随着应变增大,应力达到峰值极限,砂岩试样损伤的加剧造成能量耗散,塑性变形增大。峰后弹性能积聚阶段(*BC* 段):砂岩试样达到抗压强度后应力开始下降,耗散能快速增长导致试样内部损伤,在峰值应力 *B* 点之后,破坏过程伴随着显著的能量滞后现象。峰后弹性能释放阶段(*CD* 段):*C* 点对应弹性能的储能极限,*D* 点为应力-应变曲线的残余应力点,此阶段弹性能以破碎岩块动能形式释放[25]。

2.3 冲击破碎特征

不同饱水度和不同损伤程度的砂岩在相同应变率冲击下的破碎特征如图3所示。随着损伤程度增加,砂岩的碎块数量逐渐增加,破碎方式由最初的拉伸破坏转变为拉伸-剪切破坏。饱水处理显著加剧了损伤砂岩的破碎程度。饱水后,损伤试样的碎块数量增多,且小尺寸碎块占比显著增加,干燥处理则增强了砂岩的抗冲击性能,表现为碎块总数量减少、破碎程度减轻。说明饱水作用会劣化砂岩的力学性能,从而促进冲击载荷下的破碎行为,且该促进作用随初始损伤程度增加而愈加显著。与之相反,干燥处理在一定程度上增强了砂岩的完整性,抑制了裂纹扩展,最终降低了其动态破碎程度。



(a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4; (e)S5; (f) S6; (g) S7; (h) S8; (i) S9

图3 不同状态砂岩的冲击破碎特征

Fig. 3 Impact-induced fragmentation of sandstone in different states

2.4 动态损伤本构模型的建立

2.4.1 损伤变量分析

砂岩内部本身存在原生随机分布的微小裂隙,因此砂岩强度受许多变量共同影响[26]。假设砂岩试样是由诸多微元体组成的微元集合体,假设微元体强度符合 Weibull 分布[27],概率密度为:

$$P(F)=\frac{m}{F_0}\left(\frac{F}{F_0}\right)\exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \tag{8}$$

式中:F 为微元体的强度;m、F_0 均为 Weibull 分布参数。

对不同损伤和饱水的砂岩进行冲击,设受到冲击载荷后破坏的微元体数量为 N_a,微元总数设置为 N,则不同损伤和饱水的砂岩冲击下的损伤变量 D 可定义为:

$$D=\frac{N_a}{N}=\frac{N\int_0^F P(x)\,\mathrm{d}x}{N}=1-\exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \tag{9}$$

2.4.2 砂岩的微元体强度

由式(9)可知,岩石的损伤变量 D 与微元体强度 F 具有一定的联系,D-P 准则可以较为直观反映微元体强度与材料力学性能之间的关系[28],比其他准则更能准确反映岩石的真实状况。本文用 D-P 准则定义砂岩的微元体强度:

$$F=\alpha I_1+\sqrt{J_2} \tag{10}$$

$$\begin{cases}\alpha=\dfrac{\sin c}{\sqrt{9+3\sin^2 c}}\\ I_1=\dfrac{(\sigma_1+2\sigma_2)E\varepsilon_1}{\sigma_1-2\mu\sigma_2}\\ \sqrt{J_2}=\dfrac{(\sigma_1-\sigma_3)E\varepsilon_1}{\sqrt{3}(\sigma_1-2\mu\sigma_3)}\end{cases} \tag{11}$$

式中:α 为强度参数;c 为内摩擦角;I_1 和 J_2 分别为应力张量的第一不变量和应力偏量的第二不变量;σ_1、σ_2、σ_3 均为假三轴试验中的名义应力;E 和 μ 分别为弹性模量和泊松比;ε_1 为轴向应变。

单轴试验中,$\sigma_1=\sigma_2=0$,$\varepsilon_1=\varepsilon$,联立式(10)与式(11),可得:

$$F=\left(\alpha+\frac{\sqrt{3}}{3}\right)E\varepsilon \tag{12}$$

2.4.3 修正损伤本构模型

基于 Lemaitre[29] 提出的应变等价性假说,结合式(12),建立单轴动载作用下砂岩的损伤本构模型:

$$\sigma=E\varepsilon(1-D)=E\varepsilon\mathrm{e}^{-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m} \tag{13}$$

损伤本构模型中的参数 m、F_0 可通过动态应力-应变曲线中的峰值点坐标 (ε_a,σ_a) 求得。已知峰值点的导数为0,且位于岩石的损伤本构模型中,是岩石的临界破坏点。代入可求得:

$$m = -\frac{1}{\ln\left(\frac{\sigma_a}{E\varepsilon_a}\right)} \tag{14}$$

$$F_0 = \left(\alpha + \frac{\sqrt{3}}{3}\right) E\varepsilon_a \left[-\frac{1}{\ln\left(\frac{\sigma_a}{E\varepsilon_a}\right)}\right]^{-\ln\left(\frac{\sigma_a}{E\varepsilon_a}\right)} \tag{15}$$

将式(14)、式(15)代入式(13)，可得修正后不同损伤-饱水度砂岩损伤本构方程为：

$$\sigma = E\varepsilon \left(\frac{\sigma_a}{E\varepsilon_a}\right)^{\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_a}\right)^{\frac{-1}{\ln[\sigma_a/(E\varepsilon_a)]}}} \tag{16}$$

通过式(16)可知饱水砂岩的损伤本构模型中的未知变量包括动态弹性模 E、峰值应力 σ_a 以及峰值应变 ε_a，在相同应变率下对不同损伤及饱水度的砂岩开展冲击试验，得到的数据包含动态弹性模量 E、峰值应力 σ_a 以及峰值应变 ε_a，损伤程度和饱水度对上述实验结果具有一定影响，其中存在一定的函数关系。本文定义初始损伤为 d，饱水度为 W_s。砂岩试样受到损伤后波速发生变化，经过饱水后质量发生变化，通过上述参数变化即可建立动态弹性模量 E、峰值应力 σ_a 以及峰值应变 ε_a 与波速 w、质量差率 m 之间的函数关系。

为了表达其函数关系，通过响应曲面设计方法，构建以波速和质量差率为横坐标，以动态弹性模量、峰值应力及峰值应变为纵坐标的响应曲面图，如图 4 所示。

通过室内冲击试验数据拟合，得到 E、σ_a、ε_a 与 w、m 的关系如下：

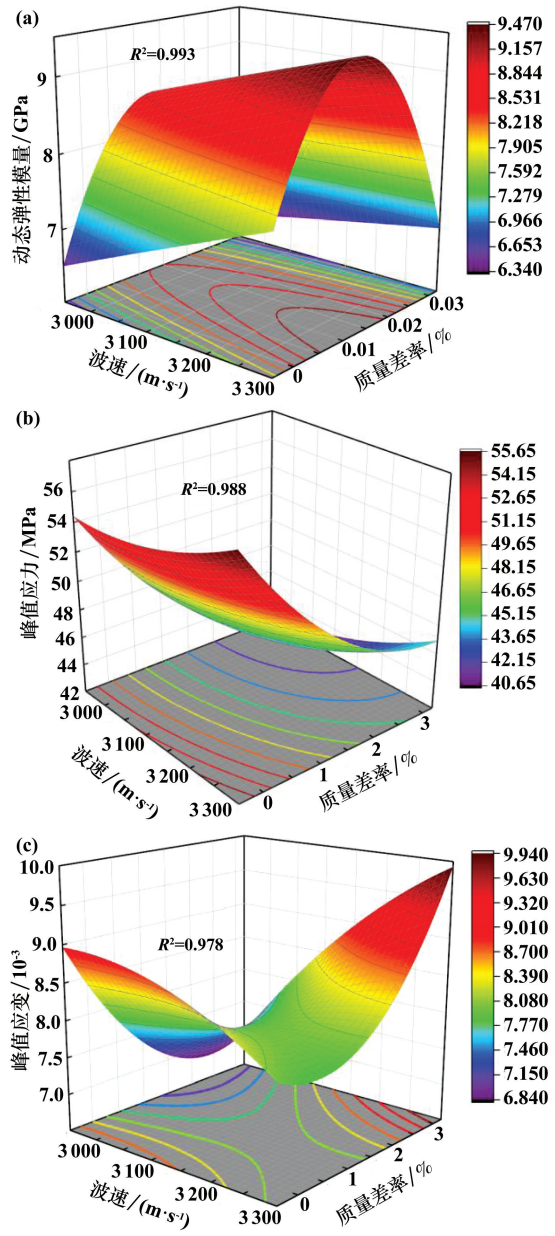
$$E = -5\,627.712 + 3.428\times10^5 m + 5.322w - 55.56mw - 6.54\times10^6 m^2 - 3.16\times10^{-4}w^2 \tag{17}$$

$$\sigma_a = 343.18 - 796.01m + 0.196w + 0.081mw + 8\,266.46m^2 + 3.3\times10^{-5}w^2 \tag{18}$$

$$\varepsilon_a = -77.024 - 1\,042.16m + 0.056\,2w + 0.309\,5mw + 2\,674.597m^2 - 9.25\times10^{-6}w^2 \tag{19}$$

上式中 $m>-0.032$，$w>0$，将波速 w、质量差率 m 的参数代入上述模型中，可以获得不同损伤程度及饱水度下砂岩的损伤本构模型拟合参数，见表 2。

不同状态下 3 种损伤程度砂岩的实测曲线与模型拟合曲线的对比见图 5。由图 5 可以看出，不同状态下的模型拟合曲线与实测曲线基本吻合，结合表 2 可知，运用本文所建立的本构模型拟合出的数据与试验数据的相关系数最大值为 0.991，最小值为 0.941，拟合效果较好。拟合的应力-应变曲线与实测应力-应变曲线变化趋势一致：随着损伤程度增加，砂岩动态峰值应力逐渐降低，峰值应变逐渐增大，饱水处理后砂岩动态峰值应力降低，干燥处理后砂岩动态峰值应力提高。拟合曲线能够准确反映不同状态下砂岩的变形特性与强度特征，该模型计算简单，但存在变量参数较少的缺点。



(a) 动态弹性模量；(b) 峰值应力；(c) 峰值应变

图 4　动态弹性模量、峰值应力及峰值应变的响应曲面

Fig. 4　Response surface design for dynamic modulus of elasticity, peak stress and peak strain

2.5　冲击载荷下饱水砂岩的损伤特性

砂岩的初始损伤变量可用损伤前后的波速定义，饱水损伤可用饱水前后的孔隙率定义，即：

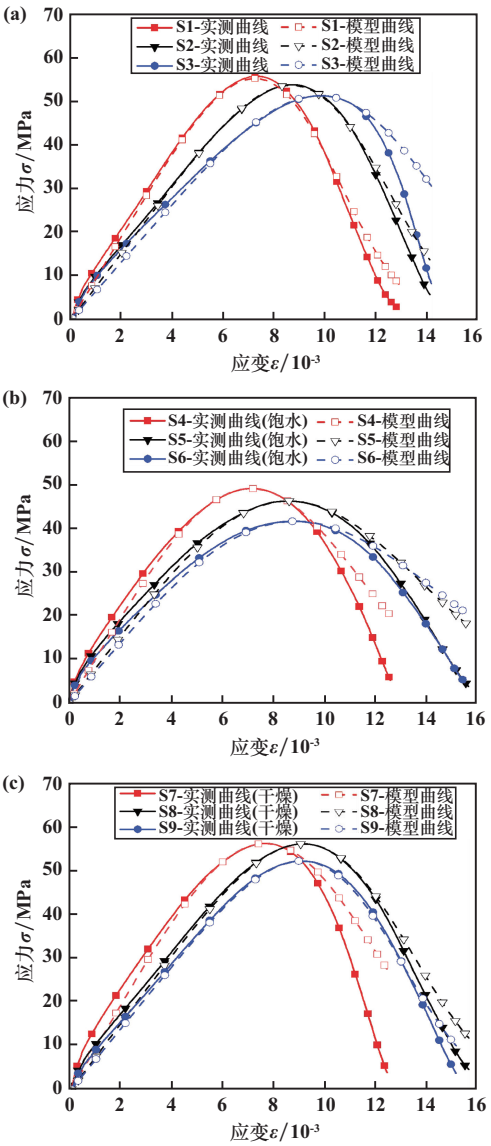
$$D_{初} = 1 - \frac{w_{后}}{w_{前}} \tag{20}$$

$$D_{饱} = 1 - \frac{T_{s前}}{T_{s后}} \tag{21}$$

表 2 不同初始损伤-饱水度下砂岩的损伤本构模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters for constitutive model of sandstone with different initial damage and saturation damage

砂岩试样	波速 w/(m·s^{-1})	质量差率 m/%	峰值应力 σ_a/MPa	峰值应变 ε_a	拟合相关系数
S1	3 290	–	55.367	0.007 22	0.991
S2	3 160	–	53.810	0.008 61	0.973
S3	2 960	–	51.370	0.009 78	0.982
S4	3 180	2.18	48.841	0.007 15	0.941
S5	3 020	2.96	45.950	0.008 43	0.958
S6	3 260	3.12	41.382	0.008 91	0.960
S7	3 250	−0.20	55.991	0.007 63	0.964
S8	3 150	−0.30	55.887	0.009 01	0.952
S9	3 010	−0.40	51.966	0.009 05	0.988



(a) 自然状态；(b) 饱水状态；(c) 干燥状态

图 5 不同损伤-饱水度砂岩的试验与理论动态应力-应变曲线

Fig. 5 Practical and theoretical dynamic stress-strain curves of sandstone with different degrees of damage and saturation

$$D_{初-饱} = D_{初} + D_{饱} \tag{22}$$

式中：$D_{初}$ 为砂岩经过初始损伤后的损伤值；$D_{饱}$ 为砂岩经过饱水作用后的损伤值；$D_{初-饱}$ 为受动态载荷前砂岩存在的损伤值；$w_{前}$ 和 $w_{后}$ 分别为饱水前和饱水后的砂岩纵波波速；$T_{s前}$ 和 $T_{s后}$ 分别为饱水前和饱水后的砂岩 T2 谱峰总面积。

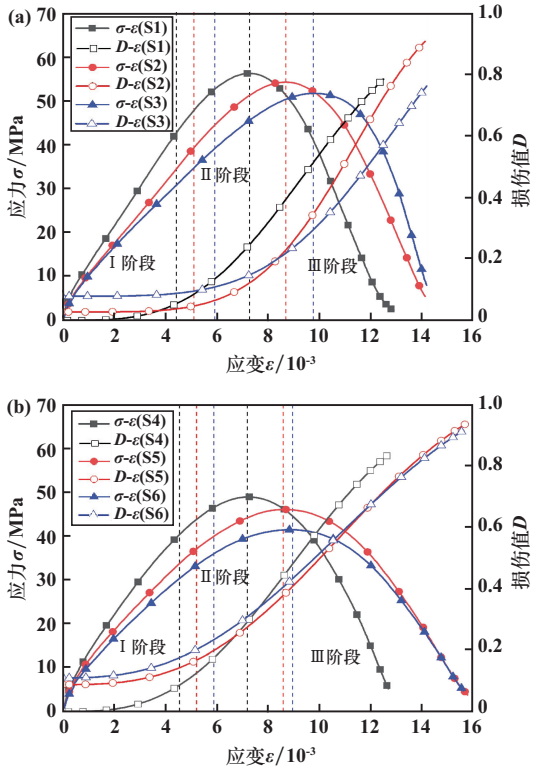
通过式(13)和式(16)可知，砂岩在动态荷载作用下的损伤变量为：

$$D_{荷} = 1 - \left(\frac{\sigma_a}{E\varepsilon_a}\right)^{\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_a}\right)^{\frac{1}{\ln[\sigma_a/(E\varepsilon_a)]}}} \tag{23}$$

含初始损伤饱水状态下的总损伤值 $D_{总}$ 为：

$$D_{总} = D_{初-饱} + D_{荷} - D_{初-饱}D_{荷} \tag{24}$$

砂岩的损伤值随着应变的改变而改变，为了分析初始损伤和饱水度对损伤全过程的影响，结合动态应力-应变曲线分析砂岩在动载作用下的损伤演化特征。不同状态下砂岩的全过程损伤曲线如图 6 所示。



(a) 自然状态；(b) 饱水状态

图 6 不同状态下砂岩的损伤演化曲线

Fig. 6 Damage evolution curves of sandstone in different states

由图 6 可以看出，不同状态下砂岩的全过程损伤曲线分为 3 个阶段。第Ⅰ阶段为损伤缓慢增长阶段，对应应力-应变曲线的线弹性阶段，随着应变增加，损伤值缓慢增加，此时砂岩内部损伤稳定发展；第Ⅱ阶段为损伤线性急速增长阶段，对应应力-应变曲线的非线

性屈服阶段,砂岩损伤值随着应变近似线性增长,应力达到峰值后,内部原生裂纹扩展加剧,孔隙聚合与贯通导致新断裂面形成;第Ⅲ阶段为损伤破坏阶段,对应应力-应变曲线的破坏阶段,随着应变不断增加,损伤持续增长,砂岩产生不可恢复的变形,其内部缺陷持续扩展直至最终发生完全破坏。

随着初始损伤程度增加,砂岩的损伤演化曲线趋于平缓,表明在达到相同损伤值时所需应变增大,反映出初始损伤显著劣化了砂岩抵抗变形与破坏的能力。饱水处理进一步加剧了该劣化效应:相较于完整干燥砂岩,含损伤试样在饱水后其初始缺陷(微裂隙与孔隙)更为发育。在高应变率冲击作用下,这些缺陷迅速扩展、贯通,导致材料在最终破坏时呈现出更大变形。

3　结论

1) 冲击载荷下砂岩的动态能量演化过程可分为 4 个阶段,砂岩的弹性能释放发生在峰值应力之后。砂岩耗散能占吸收能的 94%~98%,砂岩试样吸收能近似等于破碎能耗。

2) 应变率相同时,初始损伤增加会使砂岩破碎程度增大,初始损伤越严重,砂岩发生破碎的程度越大,碎块数量越多。存在初始损伤的砂岩经饱水处理会进一步劣化砂岩的抗冲击性能,干燥处理会增强砂岩的抗冲击性能。

3) 以初始损伤、饱水度为变量修正的砂岩动态损伤本构模型可以较为准确地反映砂岩的变形规律,修正的损伤曲线有效表征了砂岩动态应力-应变曲线的 3 个阶段,揭示了富水环境下含初始损伤砂岩的动态损伤机理,具有较好的物理意义。

4) 砂岩的损伤受初始损伤、饱水损伤和动态扰动损伤共同影响,达到相同损伤值时含损伤砂岩应变增大,初始损伤后饱水会使砂岩的损伤值进一步增加,初始损伤及饱水损伤在一定程度上可以等效为荷载损伤。

参考文献(References):

[1] 吴爱祥,王勇,张敏哲,等. 金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J]. 金属矿山, 2021(1):1-13.
WU Aixiang, WANG Yong, ZHANG Minzhe, et al. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines[J]. Metal Mine, 2021(1):1-13.

[2] 杨科,许日杰,刘帅,等. 冲击载荷下煤样动力学响应特性与损伤本构模型[J]. 振动与冲击, 2024,43(9):139-148.
YANG Ke, XU Rijie, LIU Shuai, et al. Dynamic response characteristics and damage constitutive model of coal samples under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024,43(9):139-148.

[3] 缪广红,张旭,孙伟波,等. 不同本构模型下地应力对爆破效果的影响研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):13-19.
MIAO Guanghong, ZHANG Xu, SUN Weibo, et al. Influence of in-situ stress on blasting effects under different constitutive models[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):13-19.

[4] 龙钰. 酸性溶液作用下砂岩冲击特性的试验及数值模拟研究[D]. 太原:中北大学, 2023.
LONG Yu. Experimental and numerical simulation study on impact characteristics of sandstone under acidic solution[D]. Taiyuan: North University of China, 2023.

[5] YANG J M, ZHANG Y H, LI Q W, et al. Dynamic constitutive model of penetrating jointed rock mass based on ZTW model[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019,237(3): 032110.

[6] 段继超,宗琦,高朋飞,等. 干湿动载耦合作用下石灰岩宏细观复合损伤模型研究[J]. 中国公路学报, 2025,38(3):264-277.
DUAN Jichao, ZONG Qi, GAO Pengfei, et al. Limestone macro composite damage model under dry and wet load coupling[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025,38(3):264-277.

[7] 张锋,王运敏,李小双,等. 干湿循环及循环加卸载条件下白云岩渐进损伤的能量特性研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):1-7.
ZHANG Feng, WANG Yunmin, LI Xiaoshuang, et al. Energy characteristics of progressive damage in dolomite under dry-wet cycle and cyclic loading and unloading conditions[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):1-7.

[8] 伍安杰. 基于能量机制的 Drucker-Prager 强度准则研究及其应用[D]. 贵阳:贵州大学, 2023.
WU Anjie. Research and application of Drucker-Prager intensity criterion based on energy mechanism[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.

[9] 丁祥,张广清. 等向强化-软化 Drucker-Prager 材料强度参数演化[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,36(4):910-916.
DING Xiang, ZHANG Guangqing. Variation of strength parameters of Drucker-Prager material with isotropic hardening and softening[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(4): 910-916.

[10] 孙清佩,张志镇,李培超,等. 黑色页岩动载破坏的层理效应及损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019,38(7):1319-1331.
SUN Qingpei, ZHANG Zhizhen, LI Peichao, et al. Study on the bedding effect and damage constitutive model of black shale under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019,38(7):1319-1331.

[11] 崔慧栋. 不同含水率下损伤砂岩的低温动态力学特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.
CUI Huidong. Dynamic mechanical properties of low temperature damaged sandstone under different water content[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.

[12] 吉东亮,高新强,董北毅,等. 动载作用下复合岩体力学失稳机制与损伤本构模型研究[J]. 振动与冲击, 2024,43(19):103-116.
JI Dongliang, GAO Xinqiang, DONG Beiyi, et al. Instability mechanism and damage constitutive model of composite rock mechanics under dy-

namic load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024,43(19):103-116.

[13] 吴琼,郭进平,王小林,等. 温度效应下胶结充填体动态强度及能量演化特征[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):27-34.
WU Qiong, GUO Jinping, WANG Xiaolin, et al. Effect of temperature on strength and energy evolution characteristics of cemented backfill mass under dynamic loading[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):27-34.

[14] 吕志涛,朱小宝,罗嗣成,等. 砂岩多周期累积冻融变形特性及其微观机制试验研究[J]. 岩土力学, 2025,46(2):389-401.
LYU Zhitao, ZHU Xiaobao, LUO Sicheng, et al. Experiment on cumulative freeze-thaw deformation characteristics and microscopic mechanism of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025,46(2):389-401.

[15] 唐庆林. 饱水砂岩动静组合加载力学性能试验研究与耗能分析[D]. 淮南:安徽理工大学, 2024.
TANG Qinglin. Experimental study on mechanical properties and energy consumption analysis of saturated sandstone under static and dynamic combined loading[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2024.

[16] 平琦,刘子训,孔德龙,等. 含孔砂岩试件冲击动力学特性和耗能分析[J/OL]. 地下空间与工程学报, 1-9[2025-05-10].https://link.cnki.net/urlid/50.1169.TU.20250413.0156.002.
PING Qi, LIU Zixun, KONG Delong, et al. Impact kinetic characterization and energy dissipation analysis of porous sandstone specimens[J/OL]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025:1-9[2025-05-10]. https://link.cnki.net/urlid/50.1169.TU.20250413.0156.002.

[17] 马燕,刘泽霖,王则. 饱水状态下含弯折裂纹岩石断裂特征试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):22-27.
MA Yan, LIU Zelin, WANG Ze. Experimental study on fracture characteristics of rocks with bent cracks under saturated conditions[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):22-27.

[18] LIANG Y L, HUO R K, SONG Z P, et al. Macro-meso deterioration characteristics and statistical damage constitutive model for acid-corroded sandstone[J]. Journal of Building Engineering, 2023,71:106499.

[19] 马斌文,谢和平,张修峰,等. 动载扰动下巷道围岩冲击破坏与能量释放规律研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024,6(4):5-22.
MA Binwen, XIE Heping, ZHANG Xiufeng, et al. Study on the impact failure and energy release of surrounding rock of roadway under dynamic disturbance[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024,6(4):5-22.

[20] 周昌台,谢和平,朱建波. 基于能量理论的岩石动态破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2023,42(8):1890-1898.
ZHOU Changtai, XIE Heping, ZHU Jianbo. A dynamic strength criterion of rock materials based on energy theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(8):1890-1898.

[21] 张春阳,张宇超,李小双. 基于3D-DIC系统的白砂岩单轴压缩应变率效应的力学性能试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):21-25.
ZHANG Chunyang, ZHANG Yuchao, LI Xiaoshuang. Experimental study on mechanical properties of white sandstone under uniaxial compression with different strain rate based on 3D-DIC system[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(1):21-25.

[22] 王启睿,宋二祥,范俊奇,等. 冲击作用下红砂岩动力学行为试验研究[J]. 防护工程, 2024,46(3):1-6.
WANG Qirui, SONG Erxiang, FAN Junqi, et al. Experimental study on the dynamic behavior of red sandstone under impact[J]. Protective Engineering, 2024,46(3):1-6.

[23] 高峰,杨根,熊信,等. 低温条件下边坡岩石动态力学特性实验研究[J]. 工程科学学报, 2023,45(2):171-181.
GAO Feng, YANG Gen, XIONG Xin, et al. Experimental study on the dynamic mechanical characteristics of slope rock under low-temperature conditions[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023,45(2):171-181.

[24] 刘继,郭建强,王姣姣,等. 岩石储能极限演化模型与强度准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025,44(1):140-151.
LIU Ji, GUO Jianqiang, WANG Jiaojiao, et al. Study on rock energy storage limit evolution model and strength criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025,44(1):140-151.

[25] 刘晓辉,薛洋,郑钰,等. 冲击荷载下煤岩破碎过程能量释放研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(增刊2):3201-3211.
LIU Xiaohui, XUE Yang, ZHENG Yu, et al. Study on energy release during coal and rock crushing under impact load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021,40(S2):3201-3211.

[26] 石丹丹,陈徐东,陆锴龙,等. 喷射混凝土-围岩复合体受压力学特性及本构模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024,54(5):1161-1169.
SHI Dandan, CHEN Xudong, LU Kailong, et al. Compressive mechanical performance and constitutive model of shotcrete-surrounding rock composite[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2024,54(5):1161-1169.

[27] SHEIBANIAN F, HOSSEINI-TOUDESHKY H, JALALVAND M, et al. The effect of the Weibull modulus on the shape of the stress-strain curves of thin-ply pseudo-ductile hybrid composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025,188:108532.

[28] 解北京,栾铮,陈冬新,等. 不同长径比煤样动力学特征及本构模型[J]. 矿业科学学报, 2023,8(2):190-201.
XIE Beijing, LUAN Zheng, CHEN Dongxin, et al. Dynamic characteristics and constitutive model of coal samples with different length diameter ratio[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023,8(2):190-201.

[29] 李怀鑫,晏长根,谢家乐,等. 基于等效损伤的土与结构物界面损伤强度模型[J]. 工程科学与技术, 2024,56(6):174-184.
LI Huaixin, YAN Changgen, XIE Jiale, et al. Damage strength model of soil-structure interface based on equivalent damage[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024,56(6):174-184.

引用本文:王社光,向伟华,王征,等. 冲击载荷下含初始损伤砂岩能量演化及损伤机理研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):55-62.
WANG Sheguang, XIANG Weihua, WANG Zheng, et al. Energy evolution and damage mechanism of sandstone with initial damage under impact loading[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):55-62.