

高压物理学报

饱和细砂岩动态抗拉与抗压强度试验对比研究
王光勇 余锐 马东方 候远

Comparative Study on Dynamic Tensile and Compressive Strength of the Saturated Fine Sandstone

WANG Guangyong, YU Rui, MA Dongfang, HOU Yuan

引用本文:

王光勇, 余锐, 马东方, 等. 饱和细砂岩动态抗拉与抗压强度试验对比研究[J]. 高压物理学报, 2020, 34(4):044101. DOI: 10.11858/gwlb.20190857

WANG Guangyong, YU Rui, MA Dongfang, et al. Comparative Study on Dynamic Tensile and Compressive Strength of the Saturated Fine Sandstone[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(4):044101. DOI: 10.11858/gwlb.20190857

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gwlb.20190857>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[混凝土材料动态拉伸强度的应变率强化规律](#)

Hardening Effect of the Strain Rate on the Dynamic Tensile Strength of the Plain Concrete

高压物理学报. 2017, 31(5): 593 <https://doi.org/10.11858/gwlb.2017.05.013>

[混凝土材料动态压缩强度的应变率强化规律](#)

Effect of Strain-Rate Hardening on Dynamic Compressive Strength of Plain Concrete

高压物理学报. 2017, 31(3): 261 <https://doi.org/10.11858/gwlb.2017.03.007>

[无机玻璃动态压缩破坏的离散元模拟](#)

Discrete Element Simulations of Dynamic Compression Failure of Inorganic Glass in SHPB Tests

高压物理学报. 2019, 33(4): 044101 <https://doi.org/10.11858/gwlb.20190719>

[三向围压下碳酸盐岩的动力学试验](#)

Experimental Study on Dynamic Mechanics of Carbonate Rock under Triaxial Confining Pressure

高压物理学报. 2019, 33(2): 024201 <https://doi.org/10.11858/gwlb.20180667>

[岩石材料冲击开坑行为研究](#)

Deformation of Rock Material Target under High Velocity Impact

高压物理学报. 2017, 31(5): 603 <https://doi.org/10.11858/gwlb.2017.05.014>

[3D打印贝壳仿生复合材料的拉伸力学行为](#)

Tension Mechanical Behavior of 3D Printed Composite Materials Inspired by Nacre

高压物理学报. 2020, 34(1): 014102 <https://doi.org/10.11858/gwlb.20190768>

饱水细砂岩动态抗拉与抗压强度试验对比研究

王光勇¹, 余 锐¹, 马东方², 侯 远¹

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000;
2. 宁波大学科学技术学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 使用霍普金森压杆 (SHPB) 装置对天然状态和饱水状态下的细砂岩进行单轴动态压缩试验和动态劈裂试验, 研究水和加载速率对细砂岩动态抗拉、抗压强度的影响及其差异性, 并且结合数字图像相关 (DIC) 技术, 分析细砂岩动态抗拉、抗压时的破坏机制。试验结果表明: 两种状态下的细砂岩动态抗拉、抗压强度有明显的率效应, 随着加载速率的增大而增大, 且相同加载速率下, 细砂岩在饱水状态下比天然状态下的动态抗压强度小, 而抗拉强度比天然状态下的大; 水的存在对细砂岩动态抗压强度和抗拉强度的应变率效应影响不大, 但水能提高细砂岩动态抗压和抗拉强度增强因子, 并且对细砂岩动态抗拉强度增强因子的提高更显著; 在动态受压过程中饱水状态岩样表面的应变集中处较天然状态下明显更少, 应变梯度更显著, 在动态受拉过程中拉剪效果被削弱。

关键词: 饱水细砂岩; 动态强度; 动态强度增强因子; 数字图像相关; 破坏机制

中图分类号: O347.3; TU45

文献标识码: A

当前, 矿井建设越来越向深部发展, 深部矿井安全也成为人们关注的焦点。深部岩石常处于饱水状态, 并且容易受到爆破、冲击地压、岩爆等动载作用的影响, 因此岩石在水饱和状态下的动态力学响应受到了广泛的关注。饱水状态下的岩石因水的存在而表现出与天然状态下的岩石不同的力学特性, 近年来学者们对饱水岩石的力学特性展开了大量研究, 并取得了丰富成果。目前关于饱水岩石的静态力学特征研究比较成熟, 例如: 王宇等^[1]通过扫描电镜(SEM)对饱水砂岩破坏断口进行分析, 总结出饱水砂岩细观损伤特征; 吴疆宇等^[2]探讨了孔隙水在饱水砂岩破坏过程中对耗能特征的影响; Hawkins 等^[3]、Dyke 等^[4]探讨了不同含水率下砂岩抗压强度的变化特征; 高峰等^[5]建立了饱水砂岩在冻融循环作用下的强度模型; Zhang 等^[6]探讨了水对红砂岩破坏过程能量演化的影响; Wu 等^[7]研究了水对砂岩加载扩容的影响。相对于静态, 饱水砂岩的动态特性研究比较滞后。王斌等^[8-9]研究了单轴荷载下饱水砂岩动态抗压强度特性, 并从细观力学角度分析了水在其中的作用; Zhou 等^[10]、Selyutina 等^[11]、褚夫蛟等^[12]基于分离式霍普金森压杆(SHPB)试验研究了饱水砂岩在高应变率动态压缩过程中的率效应, 并讨论了水的存在对砂岩率效应的影响; 高富强等^[13]发现在相同围压作用下砂岩强度随含水率的增加而增大, 表现出明显的含水硬化特征; 郑广辉等^[14]探讨了不同饱水度红砂岩的动态力学特征, 得出水一方面对岩石有弱化作用, 另一方面与高应变率和岩石结构形成水-岩-力的动力耦合, 对岩石强度有强化作用; Weng 等^[15]讨论了不同温度下饱水粉砂岩的动态能量耗散; Kim 等^[16]探讨了砂岩动、静态物理力学性质与含水率和加载速率之间的相关性; Zhou 等^[17]分析了含水率对砂岩冲击断裂过程的影响。

虽然对饱水砂岩的动、静态力学性能研究取得了丰富成果, 但大部分只考虑了水对砂岩的抗压强度特性的影响, 对于饱水岩石动态抗拉强度的研究很少, 综合研究水对岩石动态抗拉、抗压强度影响的

* 收稿日期: 2019-11-15; 修回日期: 2019-12-01

基金项目: 国家自然科学基金-山西煤基低碳联合基金重点支持项目(U1810203)

作者简介: 王光勇(1977—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程动载试验研究.

E-mail: wgy2003@mail.ustc.edu.cn

差异性则更少。由文献[18]可知,岩石的抗拉和抗压有一定内在联系,故探讨饱水砂岩动态抗拉、抗压破坏的差异性将有助于揭示饱水砂岩在动载下的破坏规律以及水所起到的作用。本研究将对天然状态和饱水状态下的细砂岩进行动态压缩试验和动态劈裂试验,分析水和加载速率对于岩石动态抗拉强度、抗压强度的差异性影响,并结合数字图像相关(DIC)分析技术,探讨水对细砂岩动态抗拉和抗压强度影响的原因。

1 试 验

1.1 试验原理

SHPB 试验主要包括子弹发射系统、杆件系统和测试系统3部分。子弹发射系统包括高压气室和直径为74 mm、长500 mm、与入射杆同材料的圆柱形子弹。杆件系统主要由入射杆、透射杆和吸能装置组成。测试系统主要为通用电阻应变片、超动态应变仪、示波器及计算机记录系统。本试验中,入射杆和透射杆材料均采用40Cr合金钢,直径74 mm,抗拉强度大于或等于980 MPa,入射杆长2 745 mm,透射杆长1 800 mm。装置实物如图1所示。

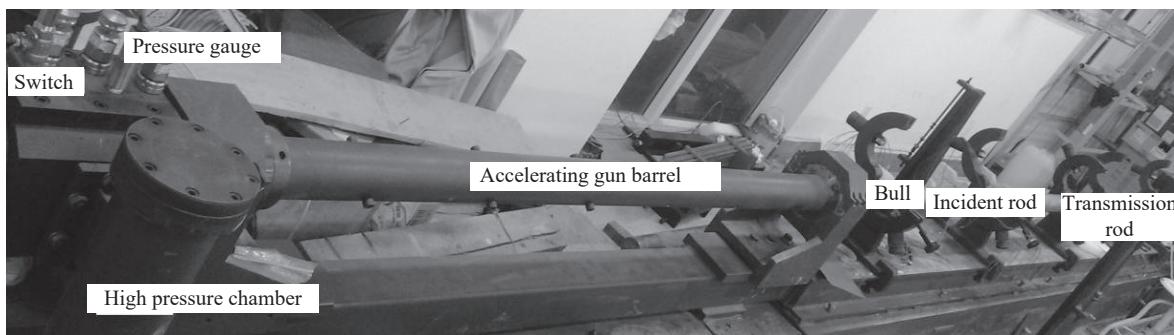


图1 SHPB 装置实物

Fig. 1 Picture of actual SHPB equipment

考虑到试件为岩石材料,尺寸相对较大,为使应力波能在试件中传播时在到达应力峰值前达到平衡,需要使应力波上升段变缓。本试验最终选定直径为15 mm、厚度为0.8 mm和1.2 mm的两种紫铜片作为波形整形器,放在子弹与入射杆之间,使原具有前驱振荡的方波变为三角波,如图2所示,波形上升段时间由整形前的170 μs增加到269 μs。此外,试验过程中使用Kirana超高速摄像机记录岩石试件在整个动态压缩和劈裂过程中的变形,该设备的记录频率高达每秒500万张,曝光时间可达到100 ns。试验时将超高速相机置于压杆侧面,用短路触发装置触发,当子弹从加速炮管冲出时触发摄像机,在控制计算机中通过调整相关的记录参数,确保拍到试样发生变形和破坏的形貌。然后将高速摄像机采集到的照片信息采用Vic2d/3d分析软件进行DIC分析,得到试件在动态受压、受拉破坏时的应变场。DIC分析的基本原理:预先对试样表面进行喷斑处理,通过分析软件将高速摄像机采集的试样表面照片分为多个小面积区域,识别每个区域的灰度值,再利用相关搜索功能对试件变形前后的照片进行匹配,分析出试样在试验过程中发生的位移和应变的变化。

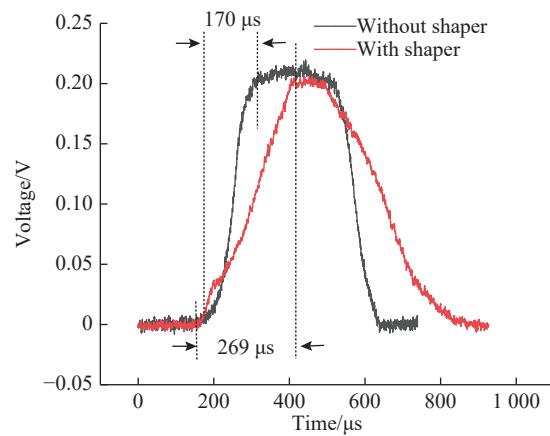


图2 波形整形前后对比

Fig. 2 Comparison before and after waveform shaping

根据一维弹性波原理

$$\sigma_s(t) = \frac{AE}{2A_s} [\varepsilon_i(X_{G_1}, t) + \varepsilon_r(X_{G_1}, t) + \varepsilon_t(X_{G_2}, t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_i(X_{G_1}, t) - \varepsilon_t(X_{G_2}, t) - \varepsilon_r(X_{G_1}, t)] dt \quad (2)$$

式中: A 为压杆材料的横截面面积; E 为压杆材料的弹性模量; C_0 为压杆材料的纵波波速, 并且 $C_0 = \sqrt{E/\rho}$, ρ 为密度; A_s 为试样的横截面面积; l_s 为试样沿轴向的长度; t 为试验所产生的应力波持续时间; $\varepsilon_i(X_{G_1}, t)$ 为入射应变; $\varepsilon_r(X_{G_1}, t)$ 为反射应变; $\varepsilon_t(X_{G_2}, t)$ 为透射应变。

$$\sigma_t = \frac{2p(t)}{\pi Dh} = \frac{2EA\varepsilon_t(t)}{\pi Dh} \quad (3)$$

式中: σ_t 为岩石的抗拉强度, p 为试样的破坏荷载, D 为试样直径, h 为试样厚度。当动态载荷 $p(t)$ 达到最大值 $p(t)_{\max}$ 时, 所得到的拉伸应力即为岩石的动态抗拉强度 σ_t 。由式(3)可知, 最大拉伸应力对应于透射波的峰值, 此时动态载荷最大, 岩石发生破坏。

对于压缩试验, 原理如图3所示, 当压杆为弹性状态时, 可由式(1)、式(2)算出试件平均应力和应变, 消去时间变量可得出试件应力-应变关系, 继而得到试件动态抗压强度。对于劈裂试验, 只需将试件旋转90°放置即可, 根据式(3)可得到岩石动态抗拉强度。

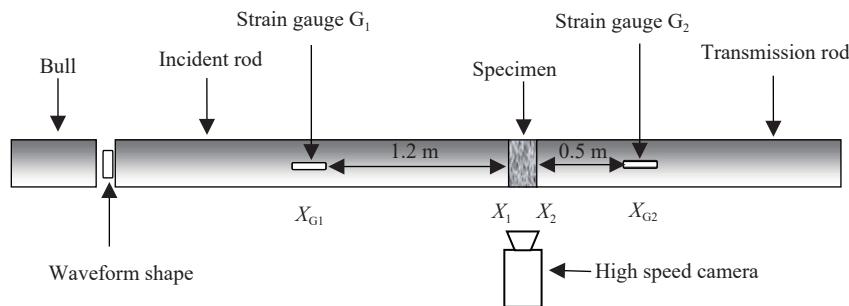


图3 SHPB装置示意图

Fig. 3 Schematic of SHPB experiment

1.2 试验材料制备与方案设计

试验岩样来自山西潞安集团余吾煤业有限公司深部矿井800 m井下细砂岩。该细砂岩整体呈灰白色, 岩块较为完整, 质地较为均匀, 颗粒细密, 岩样密度为2 500 kg/m³, 弹性模量为20 GPa, 泊松比为0.3, 单轴抗压强度为120.9 MPa, 巴西劈裂抗拉强度为10 MPa。综合考虑上述因素以及试件端部效应, 结合现有的试验条件, 岩石动态冲击试验所用试样确定为Φ50 mm、高25 mm的圆柱形试样, 如图4所示。

为研究水对细沙岩动态力学性能的影响, 采用《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)^[19]中的自由浸水法来制作饱和水状态下的岩石试样。测得准静态条件下饱水岩样的单轴抗压强度为82.9 MPa, 巴西劈裂抗拉强度为7.3 MPa, 表明此细砂岩在静载作用下有明显的遇水软化现象。表1列出了动态试验分组情况。为保证试验的准确性, 每种方案重复5次, 挑取合理数据中最接近平均值的一组数据进行分析。

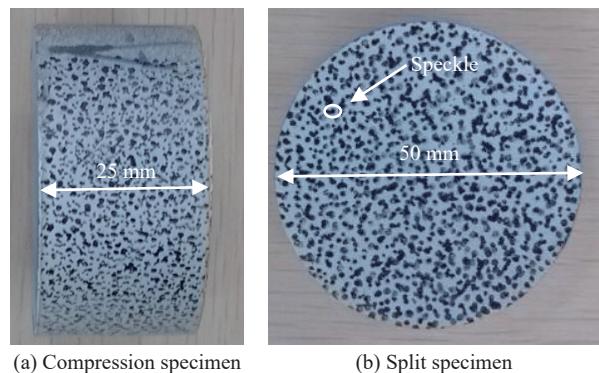


图4 动态试验试样

Fig. 4 Specimens under dynamic tests

表1 试验分组
Table 1 Test group

Type of test	State of rock samples	Group	Loading rate/(m·s ⁻¹)	Temperature/°C
Compression test	Natural state	A-1	8.01	20
		A-2	5.62	20
		A-3	2.93	20
	Saturation state	A-4	8.27	20
		A-5	5.12	20
		A-6	2.05	20
Splitting test	Natural state	B-1	8.65	20
		B-2	5.28	20
		B-3	1.87	20
	Saturation state	B-4	8.89	20
		B-5	5.34	20
		B-6	1.44	20

2 试验结果分析与比较

2.1 动态应力平衡分析

在SHPB试验中,试件能否在破坏前达到动态应力平衡是试验数据是否可信的关键。图5为动态压缩过程中试件典型的动态应力平衡曲线。从图5中可以看出:在应力波的加载段,入射应力波和反射应力波之和与透射应力波高度重合,说明应力波在试件中达到应力平衡状态,证明了试验数据的有效性。

2.2 细砂岩动态压缩试验结果分析

饱水状态和天然状态下细砂岩在不同加载速率下的压缩应力-应变曲线图6所示。分析图6可知:在单轴动态压缩试验中,细砂岩变形曲线主要分为压密阶段、弹性阶段、塑性阶段、破裂和破

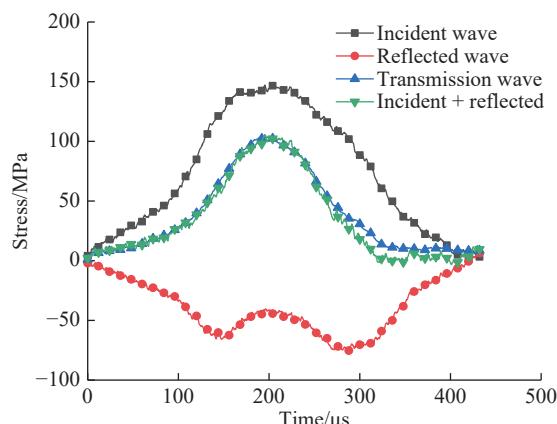


图5 应力平衡曲线

Fig. 5 Curves of stress balance

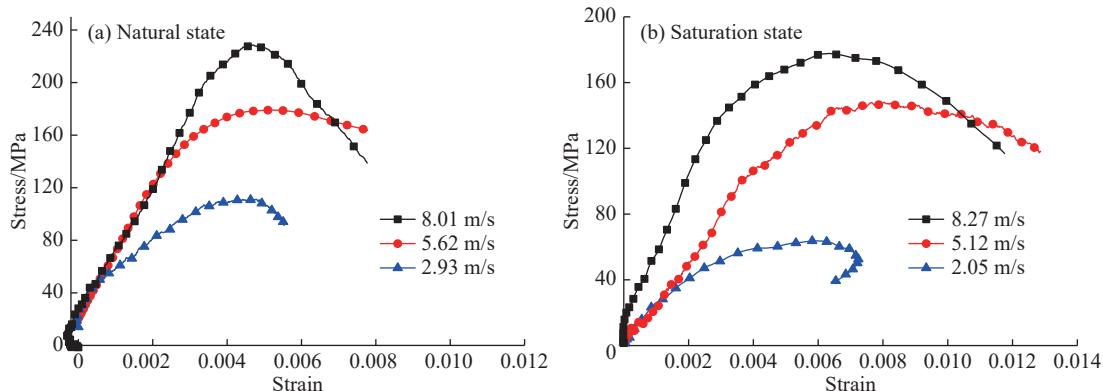


图6 不同加载速率下细砂岩的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of the fine sandstone under different loading rates

坏4个阶段;由于加载速率较高,压密阶段在很短的时间内完成;两种状态下,随着加载速率增大,弹性变形越来越大,具有明显的应变率效应。

取每组岩样动态抗压强度,绘制动态抗压强度-加载速率关系曲线,如图7所示。可见,饱水状态和天然状态下细砂岩的动态抗压强度随着加载速率的增大而明显地提高,且提高的速度随着加载速率的增大有所下降;饱水状态和天然状态下细砂岩峰值应变的应变率效应不显著,但相同加载速率作用下,饱水状态下细砂岩峰值应变明显比天然状态下细砂岩峰值应变大,分别保持在0.0065、0.0045左右;在相同加载速率作用下,饱水状态下的细砂岩动态抗压强度比天然状态下要低,并随着加载速率的增大,两种状态下细砂岩动态抗压强度相差越来越大。

为了进一步说明饱水细砂岩在动载作用下的应变率效应,将高速摄像机捕获的照片用Vic-2D/3D软件处理,获得了动态压缩下两种状态岩样表面出现裂纹瞬时的代表性应变云图,如图8、图9所示,其中 ε_{yy} 为垂直于动载作用方向上的应变。压缩试验中因A-3、A-6两组试验的加载速率较低,首次应力脉冲作用时,试样没有发生破坏,未拍到试样的破坏过程,故暂未列入图中进行分析。从图8和图9中可以看出,岩样受动态压缩时,表面应变场分布不均,多处出现应变集中,此应变集中部位也是岩样最可能出现裂纹的地方。饱水状态下岩样表面的应变集中处较天然状态下明显更少,应变梯度更显著,即饱水状态下岩样的受力不如天然状态下均匀,整体受力效果不如天然状态的岩样好,因此在动载作用下饱水状态的岩样较天然状态的岩样更容易发生破坏,表现在相同加载速率下饱水状态下的岩样抗压强度比天然状态下小。饱水状态下岩样表面出现裂纹的瞬时垂直受拉应变较天然状态下明显增大,并且都比水平方向受压应变大,说明由于水与砂岩中的亲水矿物发生反应,降低了岩样内部颗粒间的摩擦力,使得岩样脆性降低,变形能力增强,因而峰值应变增大。

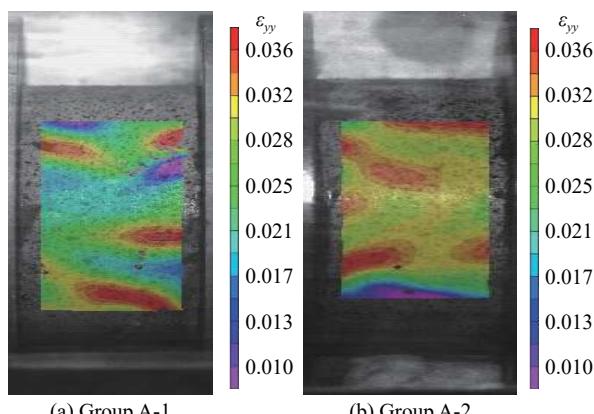


图8 动载下天然岩样表面出现裂纹瞬时应变云图

Fig. 8 Instantaneous strain nephogram of a natural rock specimen with the crack appearing on the surface under dynamic load

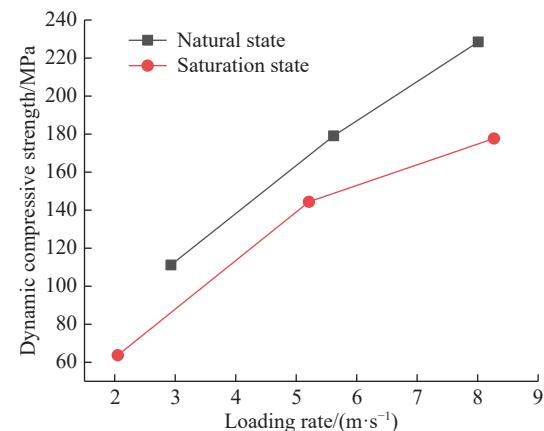


图7 不同加载速率下细砂岩的动态抗压强度曲线

Fig. 7 Relationship curves of dynamic compressive strength with different loading rates of the fine sandstone

图8、图9展示了在不同加载速率下,天然状态和饱水状态下细砂岩表面应变场分布情况。图8(a)和(b)展示了Group A-1和Group A-2在动载下天然岩样表面出现裂纹瞬时的应变云图,显示了垂直于动载作用方向上的应变分布。图9(a)和(b)展示了Group A-4和Group A-5在动载下饱水岩样表面出现裂纹瞬时的应变云图,显示了饱水状态下岩样的应变集中程度。通过对比,可以观察到在相同加载速率下,饱水状态下岩样的应变集中程度明显降低,表明其整体受力效果不如天然状态的岩样好,更容易发生破坏。

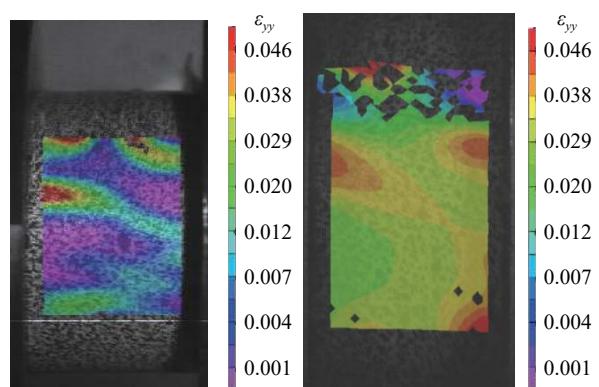


图9 动载下饱水岩样表面出现裂纹瞬时应变云图

Fig. 9 Instantaneous strain nephogram of a saturated rock specimen with the crack appearing on the surface under dynamic load

2.3 细砂岩动态劈裂试验结果分析

饱水状态和天然状态下细砂岩在不同加载速率下的拉伸应力时程曲线如图10所示。从图10可

以看出：该曲线是典型的动态劈裂应力时程曲线，在加载前期的压密阶段，曲线出现明显的下凹趋势；后期加载力随时间增加而增加，呈线性变化趋势，说明试验中力的加载较为均匀、线性。图11是取两种状态下的抗拉强度制成的抗拉强度与加载速率关系曲线，结果表明：两种状态下细砂岩的动态抗拉强度随着加载速率变化的规律相似，都表现出一定的应变率效应，并随着加载速率的增大，应变率效应越弱；饱水状态和天然状态下细砂岩峰值应变随着加载速率的增大越来越小，应变率效应非常明显；在加载速率小于8 m/s范围内，相同的加载速率作用下，饱水状态下的细砂岩动态抗拉强度比天然状态细砂岩动态抗拉强度要高，并随着加载速率的增大，两种状态下细砂岩动态抗拉强度相差越来越小。

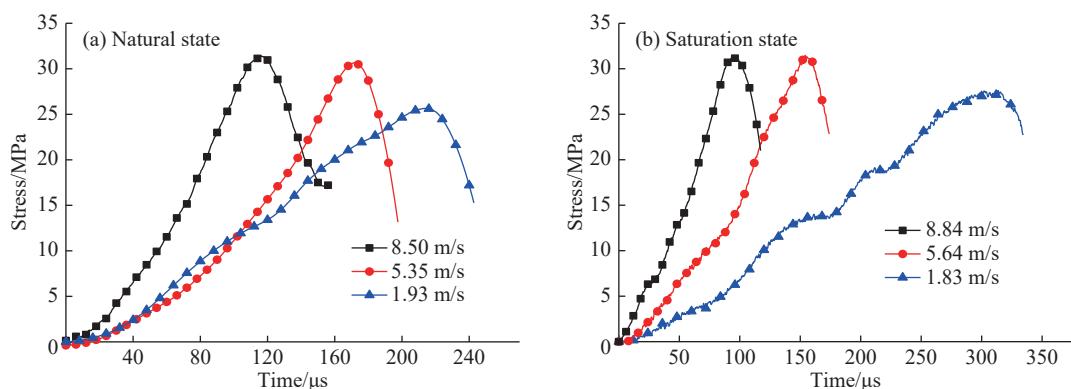


图10 不同加载速率下细砂岩动态拉应力-时间曲线

Fig. 10 Dynamic tensile stress-time curves of the fine sandstone under different loading rates

图12和图13分别是天然状态和饱水状态下动态劈裂试验岩样表面出现的裂纹瞬时应变云图。从图12、图13中可以看出，在动态劈裂试验中，各组试件表面应变场分布基本相同，应变由中心向两侧逐渐减小，呈对称条带状分布，且天然状态下岩样中间的“最大应变带”明显都带有一定“弧度”，说明岩样破坏过程中不仅受到“拉”的作用，也同时受到了“剪”的作用，受剪可能是岩石非均匀性造成的。随着加载速率的增大，受剪越来越明显，由于受剪越大表明抗拉强度越大，因此表现为天然状态下岩样动态抗拉强度随着加载速率增加而增大。由于水会弱化岩石结构的非均匀性，因而饱水岩样受剪作用不明显。

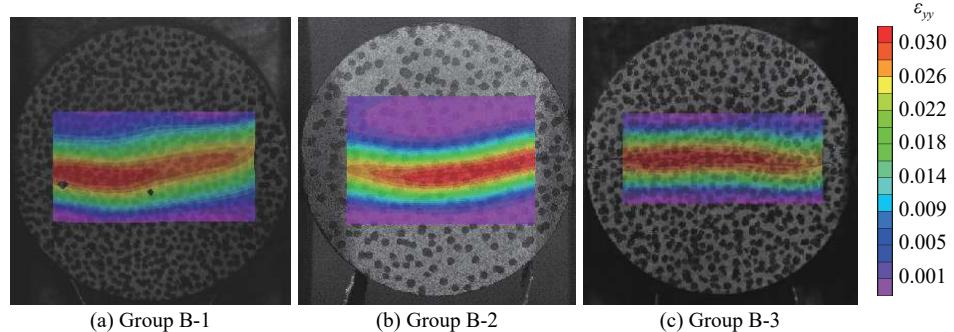


图12 动态劈裂试验中天然状态岩样表面出现裂纹瞬时应变云图

Fig. 12 Instantaneous strain nephogram of a natural rock sample with the crack appearing on the surface in dynamic splitting test

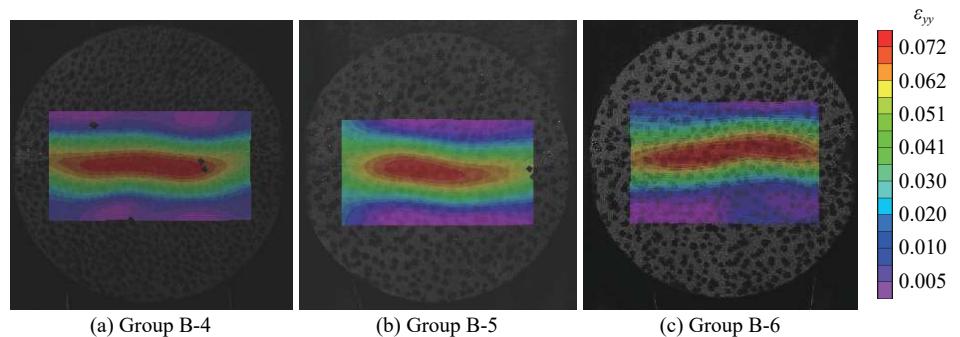


图 13 动态劈裂试验中饱水状态岩样表面出现裂纹瞬时应变云图

Fig. 13 Instantaneous strain nephogram of a saturated rock sample with the crack appearing on the surface in dynamic splitting test

2.4 水和加载速率对细砂岩动态抗压、抗拉强度的影响

为进一步探讨加载速率和水对细砂岩动态抗压强度和动态抗拉强度的影响,弱化静载的影响,利用式(4)求得饱水状态和天然状态下细砂岩岩样在不同加载速率下的动态抗压强度增强因子和动态抗拉强度增强因子,如图 14 所示。在图 14 中, a 、 b 两条曲线表示两种状态下岩样抗压强度增强因子, c 、 d 两条曲线表示两种状态下岩样抗拉强度增强因子。

$$\text{DIF}_c = \frac{f_{cd}}{f_c}, \quad \text{DIF}_t = \frac{f_{td}}{f_t} \quad (4)$$

式中: DIF_c 为动态抗压强度增强因子, f_{cd} 为动态抗压强度, f_c 为准静态抗压强度; DIF_t 为动态抗拉强度增强因子, f_{td} 为动态抗拉强度, f_t 为准静态抗拉强度。

对比图 14 中 a 、 b 两条曲线可以看到, 整体上两种状态下的细砂岩动态抗压强度增强因子随着加载速率的增大而增大。加载为低速率时, 两种状态下岩样的 DIF_c 均小于 1.0, 可能是由于在 SHPB 试验中只采集岩样受到的首次脉冲的数据计算岩样抗压强度, 然而由于岩样致密性较好, 强度较高, 较低加载速率情况下, 首次脉冲未导致岩样破坏, 故得到的动态抗压强度略小于真实值, 从而出现 DIF_c 小于 1.0 的情况。在相同加载速率下, 饱水细砂岩的 DIF_c 略大于天然细砂岩, 两种状态下随着加载速度增加, 岩样 DIF_c 的增长幅度相当。对比图 14 中 c 、 d 两条曲线可知, 饱水岩样的 DIF_t 明显比天然状态下的大, 两种状态下岩样 DIF_t 都随着加载速率的增大而增大, 增长幅度基本一样。综上所述, 两种状态下细砂岩动态抗压和抗拉强度增强因子都具有应变率效应, 且细砂岩动态抗拉强度增强因子明显大于动态抗压强度增强因子; 由于两种状态下 DIF_c 和 DIF_t 的变化趋势相近, 说明水的存在对于细砂岩动态抗压强度和抗拉强度的应变率效应影响不大, 但水可以提高细砂岩动态抗压和抗拉强度增强因子, 并且对提高细砂岩动态抗拉强度增强因子的影响更显著。

3 饱水细砂岩动态破坏机制分析

众所周知,对于动载作用下的饱水岩石,一方面水对岩石颗粒结构弱化,存在水对岩石的软化作用;另一方面在自由水表面形成阻碍裂纹扩展的黏结力 F_1 ^[20]以及由于Stefan效应产生的阻碍裂纹扩展

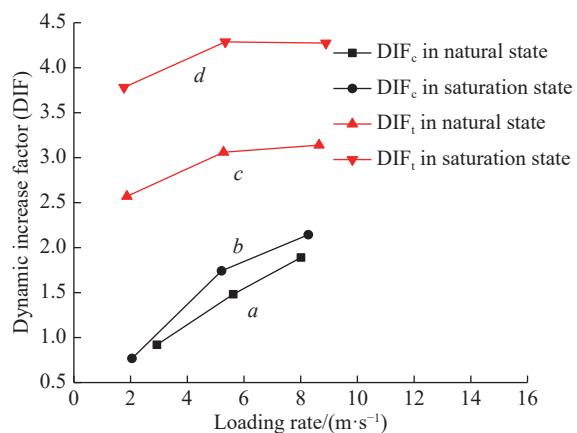


图 14 不同加载速率下饱水状态和天然状态岩样的动态强度增强因子关系曲线

Fig. 14 Relationship curves of dynamic strength increasing factors for saturated and natural rock specimens under different loading rates

的阻力 F_2 ^[21], 起到强化岩石作用。

$$F_1 = \frac{V\gamma}{2R^2 \cos\varphi} \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{3\eta V}{2\pi h^5} \frac{du}{dt} \quad (6)$$

式中: V 为液体体积, γ 为表面能, φ 为润湿角, R 为水的月牙面半径, η 为液体黏度, h 为平板间距, u 为平板分离相对速度。

在动载作用下岩样的最终强度与水的这两种作用的效能发挥密切相关。由于本试验所采用的细砂岩颗粒细密, 质地较均匀, 试件内部的微裂纹比较细, 所以液体体积 V 比较小, 另外从图 8 和图 9 可以得到岩样受压剪张拉破坏比较明显, 裂纹扩展速度有所降低, 故水对岩石的强化作用较弱, 从而导致饱水状态下细砂岩的动态抗压强度比天然状态下要低。而动态劈裂岩样主要沿着直径方向发生受拉劈裂破坏, 是集中受力, 所以裂纹扩展速度明显比动态抗压破坏裂纹扩展速度高, 水对岩石的强化作用明显加强, 故饱水状态下细砂岩的抗拉强度普遍比天然状态下高。由于动态抗压强度增强因子和动态抗拉强度增强因子主要体现动载对强度的提高作用, 故水对岩石的软化作用被弱化, 主要表现水对岩石的强化作用, 所以饱水细砂岩的动态抗压强度增强因子和动态抗拉强度增强因子比天然细砂岩大, 并且动态抗拉强度增强因子的提高更显著。

4 结 论

(1) 饱水状态和天然状态下的细砂岩动态抗压和抗拉强度都存在明显的应变率效应。随着加载速率的增大, 动态抗压和抗拉强度均增大, 但应变率效应有减弱趋势。相同加载速率下, 细砂岩饱水状态下的动态抗压强度弱于天然状态下的动态抗压强度, 而细砂岩饱水状态下的动态抗拉强度大于天然状态下的动态抗拉强度。

(2) 饱水状态和天然状态下细砂岩动态抗压和抗拉强度增强因子都具有应变率效应, 随着加载速率的增大而增大。水的存在对细砂岩动态抗压强度和抗拉强度的应变率效应影响不大, 但水可以提高细砂岩动态抗压和抗拉强度增强因子, 并且对细砂岩动态抗拉强度增强因子的提高更显著。

(3) 水的增加使细砂岩的脆性降低, 变形能力增强, 使得饱水状态下的岩样在动态受压过程中表面应变场变化梯度大于天然状态下岩样的表面应变场变化梯度。同时水的作用减小了细砂岩动态压缩破坏过程中应变集中范围, 也削弱了细砂岩受拉破坏过程中因材质不均而产生的拉剪效果。

(4) 饱水细砂岩的动态抗压和抗拉强度与细砂岩自身结构特征和水的作用密切相关。由于在动载下自由水表面的黏结力和 Stefan 效应对岩石起到强化作用, 并且在动态受拉破坏过程中的强化效果更明显, 所以表现出饱水细砂岩动态抗拉强度对水的敏感性强于动态抗压强度。

参考文献:

- [1] 王宇, 常德龙, 李建林, 等. 复杂应力路径下饱水砂岩宏细观力学特性研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3105–3114.
WANG Y, CHANG D L, LI J L, et al. Research on macro- and meso-mechanical properties of water-saturated sandstone under complex stress path [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3105–3114.
- [2] 吴疆宇, 冯梅梅, 张文力, 等. 围压及孔隙水压对饱水砂岩能耗特征的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2019(1): 180–193.
WU J Y, FENG M M, ZHANG W L, et al. Confining pressure and pore pressure effect on the energy dissipation of water-saturated sandstone [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019(1): 180–193.
- [3] HAWKINS A B, MCCONNELL B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1992, 25(2): 115–130.
- [4] DYKE C G, DOBEREINER L. Evaluating the strength and deformability of sandstones [J]. Quarterly Journal of Engineering

- [Geology and Hydrogeology](#), 1991, 24(1): 123.
- [5] 高峰, 熊信, 周科平, 等. 冻融循环作用下饱水砂岩的强度劣化模型 [J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 926–932.
GAO F, XIONG X, ZHOU K P, et al. Strength deterioration model of saturated sandstone under freeze-thaw cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 926–932.
- [6] ZHANG Z, GAO F. Experimental investigation on the energy evolution of dry and water-saturated red sandstones [J]. [International Journal of Mining Science and Technology](#), 2015, 25(3): 383–388.
- [7] WU J, FENG M, YU B, et al. Experimental investigation on dilatancy behavior of water-saturated sandstone [J]. [International Journal of Mining Science and Technology](#), 2018, 28(2): 323–329.
- [8] 王斌, 李夕兵. 单轴荷载下饱水岩石静态和动态抗压强度的细观力学分析 [J]. [爆炸与冲击](#), 2012, 32(4): 423–431.
WANG B, LI X B. Mesomechanics analysis of static compressive strength and dynamic compressive strength of water-saturated rock under uniaxial load [J]. [Explosion and Shock Waves](#), 2012, 32(4): 423–431.
- [9] 王斌, 李夕兵, 尹士兵, 等. 饱水砂岩动态强度的 SHPB 试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1003–1009.
WANG B, LI X B, YIN T B, et al. Split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiments on dynamic strength of water-saturated sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1003–1009.
- [10] ZHOU Z L, CAI X, ZHAO Y, et al. Strength characteristics of dry and saturated rock at different strain rates [J]. [Transactions of Nonferrous Metals Society of China](#), 2016, 26(7): 1919–1925.
- [11] SELYUTINA N S, PETROV Y V. The water-saturation effect for concretes and rocks subjected to high strain rates [J]. [Procedia Structural Integrity](#), 2018, 13: 705–709.
- [12] 褚夫蛟, 刘敦文, 陶明, 等. 基于 SHPB 的不同含水状态砂岩动态响应 [J]. 工程科学学报, 2017, 39(12): 1783–1790.
CHU F J, LIU D W, TAO M, et al. Dynamic response of sandstones with different water contents based on SHPB [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(12): 1783–1790.
- [13] 高富强, 张军, 何朋立. 不同围压荷载和含水状态下砂岩 SHPB 试验研究 [J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(6): 65–68.
GAO F Q, ZHANG J, HE P L. SHPB test of sandstone with different confining loads and moisture contents [J]. Mining Research and Development, 2018, 38(6): 65–68.
- [14] 郑广辉, 许金余, 王鹏, 等. 不同饱水度红砂岩静态本构关系及动态力学性能研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(16): 31–37.
ZHENG G H, XU J Y, WANG P, et al. Static constitutive relation and dynamic mechanical properties of red sandstone with different water saturation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(16): 31–37.
- [15] WENG L, WU Z, LIU Q, et al. Energy dissipation and dynamic fragmentation of dry and water-saturated siltstones under sub-zero temperatures [J]. [Engineering Fracture Mechanics](#), 2019, 220: 106659.
- [16] KIM E, STINE M A, DE OLIVEIRA D B M, et al. Correlations between the physical and mechanical properties of sandstones with changes of water content and loading rates [J]. [International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences](#), 2017, 100: 255–262.
- [17] ZHOU Z, CAI X, MA D, et al. Water saturation effects on dynamic fracture behavior of sandstone [J]. [International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences](#), 2019, 114: 46–61.
- [18] 王茹, 唐春安, 王述红. 岩石点荷载试验若干问题的研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008(1): 130–132, 140.
WANG R, TANG C A, WANG S H. Study on several problems about point load test of rock [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2008(1): 130–132, 140.
- [19] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [20] 王海龙, 李庆斌. 饱和混凝土静动力抗压强度变化的细观力学机理 [J]. [水利学报](#), 2006, 37(8): 958–962.
WANG H L, LI Q B. Micro-mechanism of static and dynamic strengths for saturated concrete [J]. [Journal of Hydraulic Engineering](#), 2006, 37(8): 958–962.
- [21] ZHENG D, LI Q. An explanation for rate effect of concrete strength based on fracture toughness including free water viscosity [J]. [Engineering Fracture Mechanics](#), 2004, 71(16/17): 2319–2327.

Comparative Study on Dynamic Tensile and Compressive Strength of the Saturated Fine Sandstone

WANG Guangyong¹, YU Rui¹, MA Dongfang², HOU Yuan¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China;

2. College of Science & Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: Using split Hopkinson compression bar (SHPB) device, uniaxial dynamic compression tests and dynamic split tests on fine sandstone in natural state and saturated state were carried out. The influence and difference of water and loading rate on dynamic tensile and compressive strength of fine sandstone were studied, and the failure mechanism of the fine sandstone in dynamic tension and compression was analyzed with digital image correlation (DIC) technology. The test results show that the dynamic compressive strength and tensile strength of the fine sandstone under the two states have obvious strain rate dependent effect, and they increase with the increase of loading rate. Under the same loading rate, the dynamic compressive strength of fine sandstone in saturated state is smaller than that in natural state, while the tensile strength in saturated state is larger. Water has little effect on the strain rate effect of dynamic compressive strength and tensile strength for the fine sandstone. However, water can improve the dynamic compressive strength and tensile strength enhancement factor of the fine sandstone, and has a more significant effect on the dynamic tensile strength enhancement factor. In the process of dynamic compression, the surface strain concentration of the rock specimen in saturated state is significantly less than that in natural state, the strain gradient is more significant, and the tensile-shear effect is weakened during the dynamic tensile process.

Keywords: saturated fine sandstone; dynamic strength; dynamic increase factor; digital image correlation; failure mechanism