

文章编号: 1001-4888(2020)01-0174-09

干燥和饱水砂岩孔隙度对应力波能耗的影响^{*}

李业学^{1,2}, 张启明³, 周炜^{1,4}, 王学斌¹, 范建辉¹

(1. 湖北文理学院 建筑工程学院, 湖北襄阳 441053; 2. 湖北文理学院 低维光电材料与器件湖北省重点实验室, 湖北襄阳 441053;
3. 南洋理工大学 土木与环境学院, 新加坡 639798; 4. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北武汉 430071)

摘要: 为探讨应力波穿越干燥、饱水砂岩时孔隙度对能耗的影响规律, 开展了孔隙砂岩的 SHPB 试验, 并采用核磁共振分析了 SHPB 试验前后孔隙的变化特征。结果表明: (1) 砂岩冲击试验前后 T2 谱波峰数没变, 但对应小孔径孔隙的波峰峰值有所增加。这说明, 砂岩结构内部仍停留在微裂纹形成阶段, 应力波能量仅能够促使新的微裂纹形成, 而不足以撕裂扩展孔隙使其孔径更大。(2) 相同孔隙度时, 饱水砂岩比干燥砂岩能耗小; 随着孔隙度增加, 前者能耗相应减小, 后者能耗反而增加。这一现象可分别解释如下: (a) 由断裂力学理论可知, 水的表面张力和 Stefan 效应使裂纹扩展受到很大阻力, 因而, 相对干燥砂岩, 相同孔隙度的饱水砂岩更难产生新表面耗散应力波能量。(b) 冲击加载时饱水砂岩处于不排水状态, 饱水砂岩变形可近似等于砂岩和水的压缩变形之和。由于水比砂岩压缩变形小, 随着孔隙度增大, 即含水量增加, 饱水砂岩变形量减小, 出现塑性变形和新裂纹的概率减小, 能耗值也随之减小。(c) 随着孔隙度增大, 干燥砂岩的动态强度相应降低, 加载时更易出现新裂纹以表面能形式耗散应力波能量, 因而孔隙度越大则能耗越大。

关键词: 孔隙度; 能耗; 饱水; 砂岩; 应力波

中图分类号: TU443

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-128

0 引言

爆炸经过包含裂纹、孔隙、节理等不连续结构面的岩石衰减后形成的应力波对矿山工程结构、水电工程项目及各类建筑物、构筑物具有巨大破坏作用^[1], 甚至可能导致结构坍塌引发难以估量的生命财产损失, 要从根本上保证工程结构安全, 减小经济损失, 需要解决其中的一个关键科学问题: 应力波在含裂纹、孔隙、节理等不连续结构面的岩体中的传播规律和能量耗散机制。

岩石是由亿万年成岩作用形成的多孔介质, 由于成岩过程和赋存环境的差异导致岩石内部孔隙结构千差万别^[2]。岩石内部的孔隙大小、空间位置近乎随机分布, 从理论上直接探讨岩石内部的孔隙、裂隙和节理等微观、宏观不连续结构面对应力波传播的影响规律, 并解释其内在机制存在很大的困难。已有研究忽略一些次要因素或专注于某些参量的影响, 从理论上导出了孔隙、节理对应力波传播的影响^[3-6]。文[7]考虑节理粗糙面的影响, 结合分形理论, 导出了应力波穿过单一节理后的透反射系数, 随后, 文[8,9]利用位移不连续体模型, 建立了透反射系数的解析解, 并探讨了系统的能量耗散规律。显然, 以上研究导出动载作用下孔隙岩石的透反射系数解析解和能耗规律是建立在将模型多重理想化的基础之上的。

^{*} 收稿日期: 2018-05-27; 修回日期: 2018-08-30

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目(D20172601)

通讯作者: 李业学(1977-), 男, 副教授。主要从事应力波与孔隙结构方面的研究。

为了揭示天然孔隙结构岩石在动载作用下的能量变化规律,已有研究采用 ANSYS、Flac3D 等有限元计算软件,分析应力波穿越孔隙岩石后相关参数的变化规律,建立波速、能耗等参数与岩石孔隙参数(孔隙位置分布、孔隙率)间的关系^[10,11]。众所周知,由于岩石内部结构复杂,其物理力学性质上表现出非均质性和各向异性,在数值计算中设定的初始参数精度不够甚至与实际情况相差甚远,计算本构关系和边界条件的选择与实际工程吻合度较低,导致计算结果与实际数值存在偏差甚至错误。

为了导出的研究成果理论可行且工程适用,已有研究开展了大量试验工作,试图解释冲击加载条件下岩石结构孔隙的响应过程和机制。采用相似材料,加工一些具有确定孔隙度的人造岩石,开展 SHPB 试验,探讨了孔隙岩石的能量耗散规律^[12]。文[12]中提出,预制孔隙的孔隙度存在 3% 左右偏差。事实上,岩石孔隙度最大值一般在 30% 左右,孔隙度值偏差 3%,制造误差则在 10% 左右,孔隙度误差大,在叠加其他误差后,研究结果误差可能更大。文[13]采用 CT 探讨了应力波作用下岩石孔隙变形机制。CT 试验不能直接确定孔隙的孔径,同样孔隙度的岩石,它们的孔径存在差异,因而对应力波传播的影响规律存在差异甚至完全不同。

随着微观结构测试技术发展,核磁共振技术应运而生,该项技术很好地解决了材料内部孔隙的孔径和不同孔径孔隙的孔隙度的量化描述问题^[14,15],这正好弥补 CT 技术手段的不足。一些研究将该项技术应用于孔隙结构描述领域,并探讨了孔隙结构对整个材料力学性质的影响,揭示静力荷载作用下的孔隙岩石的损伤演化过程^[16,17]。

为此,本文采用核磁共振方法测定砂岩的孔隙度和孔径,建立相同类型孔径砂岩的孔隙度对应力波传播的影响规律,探讨冲击加载作用下孔隙变形破坏过程,以期揭示孔隙砂岩的能量耗散规律和机制。

1 试验过程

1.1 孔隙砂岩加工

选取多孔砂岩作为研究对象,为避免砂岩各向异性对试验结果的影响,本文采用标准钻具从同一方向钻岩块,取出直径 50mm、长 75mm 的岩芯。考虑到冲击动力学试验中对岩样上下两端面平行度($\leq 0.1\text{mm}$)和各端面平整度(≤ 0.05)的精度要求较高,试验中对半成品岩样采用二次打磨法。第一次采用精度较低的双面磨石机,快速地将半成品岩样磨至 66mm,预留 1mm 供二次精加工;而后换用精度可达 0.01mm 的磨床继续打磨,直至到达预定长度和其他试验精度要求,最终加工成的成品岩样长度 65mm、直径 50mm,共 102 个(见图 1)。



图 1 孔隙砂岩试样

Fig. 1 Porous sandstone sample



图 2 核磁共振分析仪

Fig. 2 Nuclear magnetic resonance analytical apparatus

1.2 孔隙砂岩扫描试验

试验采用低维光电材料与器件湖北省重点实验室的低场强核磁共振分析仪(见图 2),设备主要部件包括:永久磁体、试样管、射频系统和数据采集分析系统。永久磁体磁场强度为 0.5T(特斯拉),为保

证主磁场的均匀性与稳定性,磁体温度维持在 32°C ,偏差 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$,试样管的有效测试区域为 $80\text{mm} \times \Phi 80\text{mm}$ 。

将加工好的岩样全部放入饱水箱中,加压至 0.1MPa ,充分饱水 24 小时直至恒重,利用低场核磁共振分析仪扫描岩石内部孔隙结构。采集横向弛豫时间 T_2 谱图,反演出岩样孔径范围值和孔隙体积曲线,保存孔隙孔径和孔隙度至 excel 文件以备后期数据处理。值得注意的是,鉴于本文的研究目的是探讨干燥和饱水砂岩的孔隙度对应力波传播规律的影响,必须保证参与 SHPB 试验的不同岩样的孔径类型尽可能一致,然而,由于不同砂岩内部孔隙结构千差万别,我们必须开展大量的砂岩核磁共振试验,从中挑选出一批孔径类型相同的岩样做冲击加载试验,因此,试验中测定了 102 个砂岩的内部孔隙结构,挑选出孔径范围和类型基本一致的岩样 18 个,这样最大限度地避免了因孔隙尺寸差异对研究结果的负面影响。SHPB 试验后,所有砂岩重新饱水,采用核磁共振分析仪测定冲击后砂岩内部孔隙结构特征,分析干燥、饱水砂岩冲击前后孔隙结构的变化状况。



图 3 SHPB 装置

Fig. 3 SHPB apparatus

1.3 孔隙砂岩的 SHPB 试验

本试验采用的是湖北文理学院材料冲击动力学实验室的 SHPB 装置,该套装置主要包括储存高压气体的氮气瓶,实施冲击加载的子弹,量测子弹冲击速度的激光测速仪,作为应力波传播介质的入射杆和透射杆,吸收能量的吸收杆以及保护设备的阻尼器。本试验入射杆、透射杆均采用直径为 50mm 的圆柱形刚杆,杆长分别为 3.5m 、 2m ;子弹长 800mm ,直径 50mm 。在入射杆和透射杆上分别贴电阻应变片,两应变片分别距各自杆端 2250mm 和 670mm ,见图 3。

本试验的目的是探讨砂岩孔隙对应力波传播和能耗的影响,所以试验中选定的冲击速度不能太大,过大的冲击速度可能使岩样出现肉眼可见裂缝甚至开裂,这与试验目的相悖;同样,太小的冲击速度和初始能量也不合适,过小的能量输入将放大试验过程中的偶然误差,甚至导致试验失败。为此,试验正式开始前,我们多次改变枪膛内的输入气压来调整子弹冲击速度,反复试验后,选定输入气压值为 0.45atm ,子弹冲击速度约 8m/s 。

2 砂岩的孔隙结构分析

2.1 孔隙砂岩内部结构特征分析

为探讨砂岩的内部孔隙特征,并探究孔隙度对应力波能耗的影响,本文中分析了在后续参与 SHPB 试验的 18 个三波峰砂岩 T_2 谱图特征;同时,为了便于对比分析,其他的四波峰砂岩 T_2 谱图也被给出。三波峰、四波峰 T_2 谱见图 4。

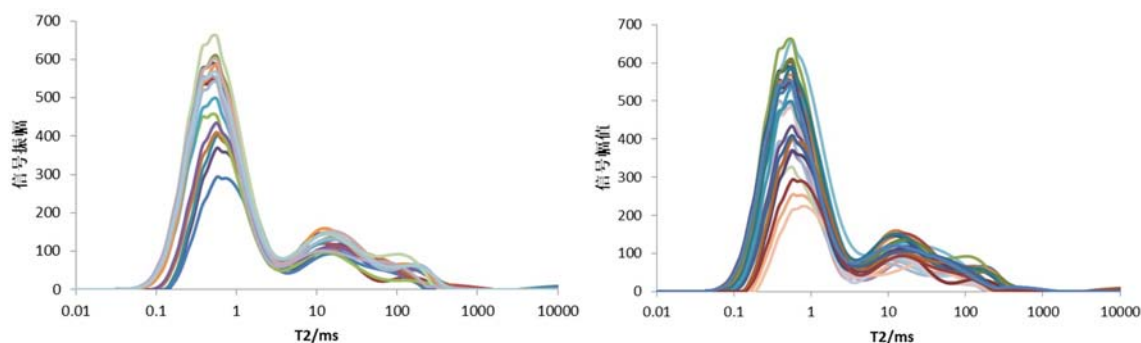


图 4 砂岩的 T_2 谱

Fig. 4 Sandstone T_2 spectrum

所有的 T_2 谱图中,对于拥有相同数量波峰的 T_2 谱,同一波峰对应的弛豫时间,基本处于相同的时

间区间,尽管对应的峰起始时间、峰顶点时间和峰结束时间有些差异,但谱图显示总体上相同,这表明,本试验选定的同批砂岩,不同砂岩试样包含的孔径类型基本相同。

以上为定性分析,为进一步从谱图中揭示砂岩内部结构特征,基于测定的砂岩孔隙尺寸和分布情况(见表 1),计算出不同类型孔隙孔径及对应的孔隙比例和孔隙度(见表 2)。

表 1 砂岩孔隙参数表
Tab. 1 Table on sandstone pore parameter

谱峰类型	峰序号	峰起始时间	峰顶点时间	峰结束时间	孔径范围/mm
三波峰	1	0.01	0.5	4	0.0002~0.08
	2	4	14	86	0.08~1.72
	3	100	150	750	2~15
四波峰	1	0.01	0.5	5	0.0002~0.1
	2	8	28	240	0.16~4.8
	3	265	403	2154	5.3~43.08
	4	2160	3000		>43.2

T2 谱图上的弛豫时间,揭示了材料内部孔隙的尺度信息,弛豫时间越长,则砂岩内部的孔隙越大;T2 谱曲线与横轴围成的面积揭示了砂岩内部孔隙体积,两者间近似成正比关系,曲线下面积的变化揭示了砂岩孔隙体积的变化。从图 5 和表 1 可以看出,孔径最小的孔隙(0.0002~0.08mm),即从左开始的第一个波峰,其对应的面积约为 7531,孔隙体积比是 80%,当孔径增加至 0.08~1.72mm,谱峰围成的对应面积随之减小,其值是 1529,孔隙体积比是 16%;孔径继续增加,当增大到 2~15mm 时的孔隙已是肉眼可见的裂缝,而对应的谱峰面积仅为 351,孔隙体积比 4%。也就是说,当孔径增大,或者说 T2 谱上弛豫时间越长,则对应的面积越小,相应孔隙的孔隙体积比越低,四波峰体积柿饼图也揭示了类似的现象。这一现象表明,砂岩内部孔径越小,则所占比例越多,或者说砂岩内部含有较多的孔径较小的孔隙,而大孔径的孔隙则相对较少。

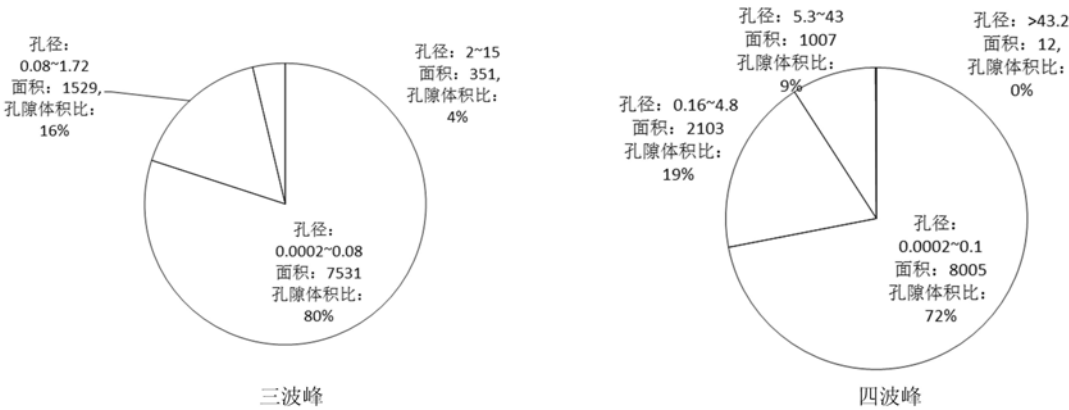


图 5 孔隙的孔径和体积柿饼图

Fig. 5 Pie chart of porous diameter and volume

2.2 冲击前后孔隙特征的对比分析

从砂岩的核磁共振 T2 谱(见图 6)来看,无论是 92 号干燥砂岩还是 64 号饱水砂岩,冲击试验后,同一个试样的 T2 谱仍然是三个波峰,谱峰总数没有增加,但小孔隙波峰的峰值存在一定程度增加,这个现象表明,冲击过程导致微小孔径的新孔隙出现,但已有小孔没有因为拉应力作用被撕裂、汇聚、贯通成大孔隙。这是因为,SHPB 试验中,我们采用了较小的冲击速度和较低的输入能量,能量大小仅能促成形成新的小孔隙,不足以使试样变形进入砂岩冲击加载破坏的第二阶段,即:小孔隙汇聚、贯通形成大孔径裂纹。因而,核磁共振和 SHPB 试验结论是相互验证的。

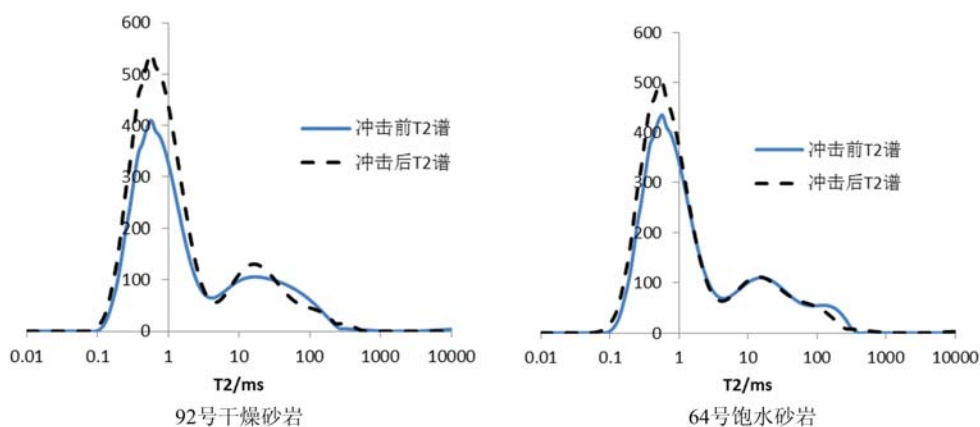


图 6 SHPB 试验前后砂岩 T2 谱对比图

Fig. 6 Figure on comparison of sandstone T2 spectrum before and after SHPB test

3 孔隙砂岩的应力波能耗特征分析

3.1 孔隙对能量传递的影响分析

为探讨岩石孔隙差异对应力波能量传递的影响规律,本文将砂岩与大理岩(以前的研究成果)在冲击加载时的能量传递特点进行了对比分析。图 7 两个砂岩的应力时程曲线显示,反射波峰值很大,略小于入射波峰值,而相比之下,透射波峰值则小很多。也就是说,应力波所携带的能量绝大部分被孔隙砂岩所反射,仅有小部分能量透射穿过孔隙岩石。而大理岩的试验结果正好相反,反射能量小,透射能量多。

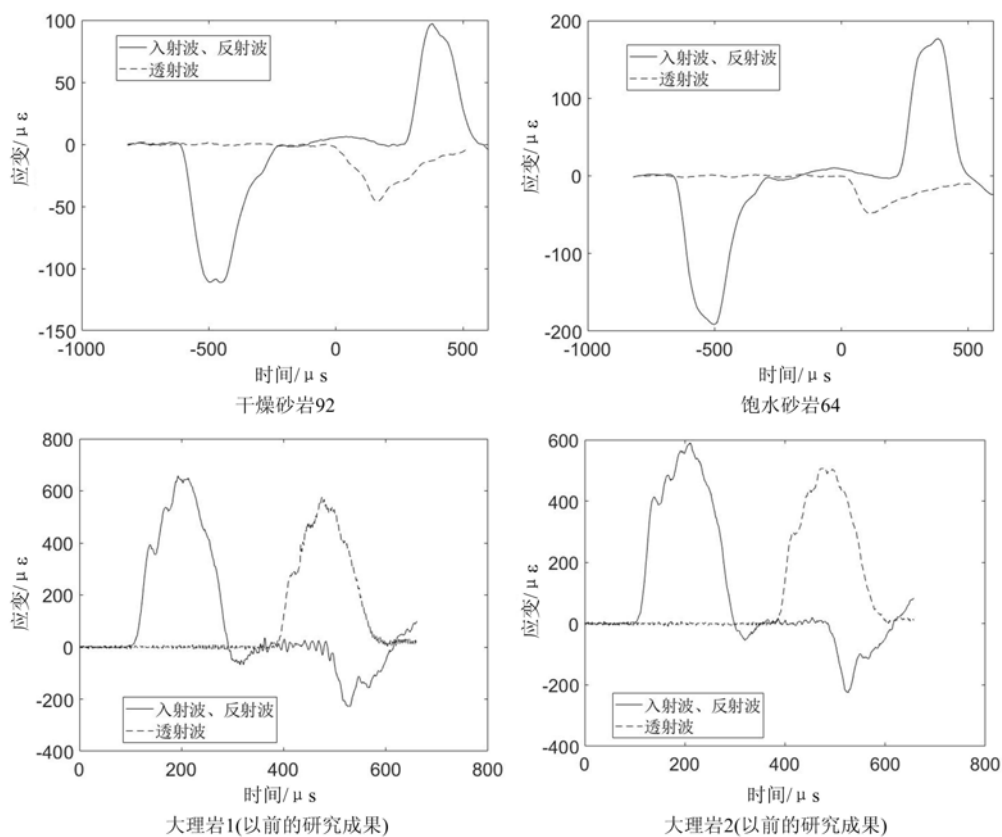


图 7 大理岩和砂岩应力波波形

Fig. 7 Stress wave waveform of marble and sandstone

岩石的核磁共振试验结果显示,大理岩、砂岩孔隙度分别为 0.1%、6%,当应力波通过孔隙岩石时,应力分别作用于固体介质及介质与孔隙的界面上,固体介质承载并传递应力波,孔隙与介质间的界面主要反射应力波,随着孔隙度的增加,透射应力波的固体介质比例减小,反射应力波的界面比例增大,因而,当应力波穿越孔隙度较大的砂岩时,透射能量越小,反射能量越大;而穿过孔隙度很小的大理岩时,则透射能量大,反射能量小。

3.2 孔隙对应力波能耗的影响分析

据文[13]研究成果可知,应力波能耗可表示为:

$$W_d = \frac{A}{C\rho} \left[\int_0^T \sigma_i^2(t) dt - \int_0^T \sigma_r^2(t) dt - \int_0^T \sigma_t^2(t) dt \right]$$
 (1)

其中, W_d 是能耗; $\sigma_i(t)$ 、 $\sigma_r(t)$ 、 $\sigma_t(t)$ 分别指入射波、反射波和透射波; ρ 、 A 指杆对应的密度和截面面积; C 是应力波在杆中的波速。

依据式(1),采用 matlab2015,编制了入射波能量、反射波能量、透射波能量和能耗的计算程序,将 18 个砂岩的 SHPB 数据输入程序,求得应力波的能耗值。由于每次加载的入射波能量不完成一致,为保证研究结论的可比性,引入归一化参数能耗比(W_d/W_i),探讨砂岩在干燥和饱水条件下孔隙度对能耗比的影响规律,计算成果见表 2。根据表 2 数据,分别绘制了干燥砂岩和饱水砂岩孔隙度与能耗比间的关系曲线,并给出孔隙度与能耗比间的趋势线。在图 8 中,三角形点表示干燥砂岩相关数据,棱形点表示饱水砂岩相关数据,实线是干燥砂岩相关数据的趋势线,虚线为饱水砂岩相关数据的趋势线。

在冲击动力学试验中,能量耗散的方式有如下几种,即:砂岩产生塑形变形时的塑形变形能;冲击后砂岩飞出的动能;裂纹出现、扩展产生新表面所耗散的表面能;砂岩破断过程中伴生的声发射能及系统内能等。已有研究显示,声发射能、内能等总计不到整个耗散能的 5%,研究时可以忽略不计,另外, SHPB 输入能量较小,试验过程中没有观测到试样飞出,也没有产生动能。因而,可能导致能量耗散的因素主要是塑形变形能和表面能。为此,下面的分析主要考虑这两种能量对能耗值的影响。

表 2 孔隙度与能量统计表
Tab. 2 Porosity and energy

编号	孔隙度	能耗比(W_d/W_i)	编号	孔隙度	能耗比(W_d/W_i)	
98	8.57%	25.16%	64	6.57%	15.13%	
95	7.51%	29.18%	61	7.72%	15.10%	
94	9.30%	28.08%	60	8.49%	15.69%	
92	5.59%	26.24%	59	8.32%	13.00%	
干燥砂岩	86	6.13%	31.33%	55	8.90%	14.72%
	80	6.26%	24.97%	54	9.58%	12.59%
	70	4.59%	21.24%	53	8.18%	16.41%
	67	8.36%	23.61%	39	7.97%	18.17%
	24	6.67%	18.63%	36	8.66%	13.45%
			饱水砂岩			

由能耗比与孔隙度间的关系曲线图(见图 8)可知,在孔隙度相同的条件下,饱水砂岩比干燥砂岩的能耗比总体上小。冲击试验前后砂岩核磁共振试验对比分析显示,干燥砂岩和饱水砂岩冲击后的孔隙体积都有一定程度增加,但饱水砂岩的孔隙体积增量较小(见图 6)。这表明,在冲击过程中,相对干燥砂岩,饱水砂岩以表面能形式耗散的应力波能量相对较小,核磁共振试验与 SHPB 试验结果是相互验证的。

另外,尽管能耗比随着孔隙度变化存在一定波动,但能耗比与孔隙度间的拟合趋势线清楚,由曲线可看出随着干燥砂岩孔隙度增加,应力波穿越岩石试样后的能耗比逐渐增大。相比干燥砂岩孔隙度对应力波能耗比的影响,饱水砂岩孔隙度对能耗比的影响表现出完成相反的规律性,当孔隙度持续增大

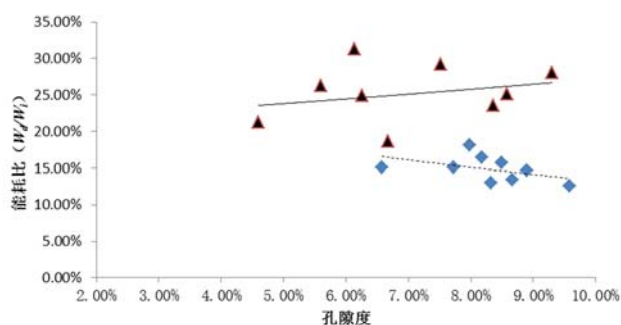


图 8 孔隙度与能耗比间的关系

Fig. 8 Relation between porosity and energy dissipation

时,应力波穿越饱水砂岩时能耗比反而减小。

3.3 能耗变化规律的机理解释

(1) 基于断裂力学理论的机理解释

从断裂力学理论来看,本试验饱水砂岩的孔隙水为自由水,在冲击加载条件下,水来不及渗透至裂纹尖端,留存在裂纹后部,由于水的表面张力和 Stefan 效应,裂纹扩展受到很大阻力,由表面张力产生的阻力^[18]为:

$$F_1 = \frac{V\gamma}{2\delta^2 \cos\theta} \quad (2)$$

式中, V 为水的体积; γ 指表面能; θ 为湿润角; δ 是水弯月面的半径。

由 Stefan 效应产生的阻力为:

$$F_2 = \frac{3\pi\alpha R^4 du}{2h^3 dt}$$

式中, α 为液体黏度; R 为裂纹面的半径; h 为两裂纹面的距离; u 为两裂纹面分离的相对速度。阻力的存在抑制裂纹扩展,阻碍新表面的产生,因而,饱水砂岩以表面能形式耗散应力波能量的“通道变窄”了,同时,饱水砂岩由于处于一种很难压缩甚至不可压缩状态,在冲击加载过程中,饱水砂岩产生塑性变形能的概率也大大降低,因而,相比干燥砂岩,孔隙度相同的饱水砂岩的能耗比要低一些。

(2) 基于岩石动态强度理论的机理解释

对于干燥砂岩,孔隙存在降低了岩石动态强度,且随着孔隙度增加,砂岩动态强度降低。强度降低,导致在动力荷载作用下砂岩更易发生塑性变形并产生微小裂纹,且随着强度持续降低,塑性变形和新表面出现的概率持续增加,从能量角度则表现为:孔隙度增加,塑性势能和表面能增加,应力波能耗比则增大。

从饱水砂岩的动态强度理论来看,随着孔隙度增加,在高速冲击作用下,由于岩石处于不排水状态,孔隙越多,含水量越大,测试的强度则越高。随着强度提高,岩石愈发不易开裂,出现裂缝的概率降低,能量上则表现为新表面能耗散的应力波能量减小。

(3) 基于砂岩变形特征的机理解释

从饱水砂岩的变形特征来看,对于饱水砂岩,在冲击加载条件下,砂岩处于不排水状态,加载时,砂岩和水共同承担着冲击荷载。饱水砂岩的变形可近似认为是砂岩和水的变形之和。随着饱水砂岩孔隙度增加,或者说试样含水量增加,由于水相比砂岩的压缩性更低,因而饱水砂岩的变形量也将随之减小,它的变形能力下降,出现新裂纹的可能性减小,从能量角度则表现为孔隙度增加导致应力波能耗比降低。

4 结论

通过干燥、饱水砂岩的核磁共振试验和 SHPB 试验,探讨了孔隙度对应力波能耗的影响,解释了试验结论的内在机理。研究结论主要包括:

(1) 从砂岩冲击作用前后的 T2 谱可知,同一砂岩的横向弛豫时间谱图中的波峰仍然是三个,但第一个谱峰峰值有所增加。这表明,砂岩冲击后内部出现了新裂纹,但冲击能量没有将已有裂纹撕裂扩展为大裂缝。这是因为,在低速冲击条件下,由于输入应力波能量较小,砂岩变形过程将停留于微裂纹形成阶段,其能量不足以使裂纹扩展、撕裂小孔径孔隙形成更大裂缝。

(2) 相同孔隙条件下,饱水砂岩比干燥砂岩能耗更小一些。干燥砂岩能耗随孔隙度增大而增加,饱水砂岩能耗随着孔隙度增大而减小。这一试验现象的机理可分别从断裂力学理论、动态强度理论和岩

石变形特征等方面进行机理解释。(a)从断裂力学理论来看,当饱水砂岩在冲击加载时,砂岩内部的自由水来不及渗透至裂纹尖端而留存在裂纹后部,由于水的表面张力和 Stefan 效应,裂纹扩展受到很大阻力,出现塑性变形和新表面的概率降低,因此,相比干燥砂岩,同样孔隙度条件下饱水砂岩以塑性变形能和表面能形式的耗散应力波能量会更少。(b)干燥砂岩内部孔隙降低了岩石强度,随着孔隙度增加,孔隙砂岩强度持续降低,在冲击加载时,砂岩内部固体介质破裂形成新孔隙的概率也随之增大,在能量角度则体现为孔隙增大则能耗增加。(c)在冲击加载时,饱水砂岩处于不排水状态,其变形可近似理解为固体介质和水的压缩变形之和。在同样荷载条件下,水的压缩变形比固体介质小很多,随着孔隙度提高,即含水量增大,孔隙砂岩的总变形量将随之下降,变形下降,出现塑性变形能和新裂纹的概率减小,能耗值也随之减小。

参考文献:

- [1] Jianchun Li, Guowei Ma. Analysis of blast wave interaction with a rock joint[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(6):777—787.
- [2] Wang Weihua, Li Xibing, Zhang Yiping, et al. Closure behavior of rock joint under dynamic loading[J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(3):408—412.
- [3] Zhao J, Zhao X B, Cai J G. A further study of P-wave attenuation across parallel fractures with linear deformational behaviour[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43:776—788.
- [4] Li J C, Zhao X B, Li H B, et al. Analytical study for stress wave interaction with rock joints having unequally close-open behavior[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(8):3155—3164.
- [5] Babanouri N, Fattahi H. Evaluating orthotropic continuum analysis of stress wave propagation through a jointed rock mass[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2018, 77(2):725—733.
- [6] Zhu J B, Zhao X B, Li J C, et al. Normally incident wave propagation across a joint set with the virtual wave source method[J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 73(3):283—288.
- [7] Yexue Li, Zeming Zhu, Heping Xie. Study on the transmission and reflection of stress waves across joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(3):364—371.
- [8] Zhu J B, Perino A, Zhao G F, et al. Seismic response of a single and a set of filled joints of viscoelastic deformational behaviour[J]. Geophysical Journal International, 2011, 186(3):1315—1330.
- [9] Yu J. Effects of single joint with different nonlinear normal deformational behaviors on P-wave propagation[M]. Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, Springer Berlin Heidelberg, 2008:458—465.
- [10] Guan Jianjun, Chen Huaining. Numerical analysis of welded joint treated by explosion shock waves[J]. Frontiers of Materials Science in China, 2007, 1(2):197—202.
- [11] Yang Ju, Hui Jie, Wang Yong, et al. Numerical simulation of mechanisms of deformation, failure and energy dissipation in porous rock media subjected to wave stresses[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(4):1098—1113.
- [12] 夏昌敬, 谢和平, 鞠杨, 等. 冲击载荷下孔隙岩石能量耗散的实验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(9):1—5 (XIA Changjing, XIE Heping, JU Yang, et al. Experimental study of energy dissipation of porous rock under impact loading[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9):1—5 (in Chinese))
- [13] Yang J, Yang Y M, Mao Y Z, et al. Laboratory investigation on mechanisms of stress wave propagations in porous media[J]. Science China Technological Sciences, 2009, 52(5):1374—1389.
- [14] Shi F, Zhang C, Zhang J, et al. The changing pore size distribution of swelling and shrinking soil revealed by nuclear magnetic resonance relaxometry[J]. Journal of Soils & Sediments, 2016, 17(1):1—9.
- [15] Chesta M A, Ramia M E, Jeandrevin S, et al. Nano-pore size and porosity study by means of nuclear magnetic resonance and positronium annihilation lifetime[J]. Applied Physics A, 2009, 97(2):301—307.
- [16] 周科平, 苏淑华, 胡振襄, 等. 不同初始损伤下大理岩卸荷的核磁共振试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8):2144—2150 (ZHOU Keping, SU Shuhua, HU Zhenxiang, et al. Experimental research into nuclear magnetic resonance in marble with different initial damages under unloading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8):2144—2150 (in Chinese))

- [17] 李杰林, 周科平, 柯波. 冻融后花岗岩孔隙发育特征与单轴抗压强度的关联分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1783—1789 (LI Jielin, ZHOU Keping, KE Bo. Association analysis of pore development characteristics and uniaxial compressive strength property of granite under freezing-thawing cycles[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8):1783—1789 (in Chinese))
- [18] 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制[J]. 水利学报, 2006, 37(8):958—962 (WANG Hailong, LI Qingbin. Micro-mechanism of static and dynamic strength for saturated concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(8):958—962 (in Chinese))

On the influence of dry and saturated sandstone porosity on stress wave energy consumption

LI Ye-xue^{1,2}, ZHANG Qi-ming³, ZHOU Wei^{1,4}, WANG Xue-bin¹, FAN Jian-hui¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 410053, Hubei, China; 2. Hubei Key Laboratory of Low Dimensional Optoelectronic Materials and Devices, Xiangyang 410053, Heibei, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798; 4. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: In order to investigate the influence of porosity degree on energy consumption during stress wave traversing dry and saturated sandstone, split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiment for porous sandstone was carried out in this paper, and the characteristics variation of pore before and after SHPB experiment were analyzed by nuclear magnetic resonance (NMR). Results indicate that before and after sandstone impact experiment, the peak number of T2 spectrum remained unchanged, but the peak value of wave peak corresponding to small size pore increases. This means that the sandstone structure is still in the micro-crack formation stage, the stress wave energy can only promote the formation of new micro-cracks, and the energy is not enough to tear the expanded pores to make its pore size larger. Under the condition of same degree of porosity, the energy consumption of saturated sandstone is lower than that of dry sandstone, and with the increase of porosity degree, the energy consumption of the former decreases and that of the latter increases. This phenomenon can be explained as follows: (a) According to theory of fracture mechanics, the surface tension of water and the Stefan effect make the crack growth suffer great resistance. Therefore, it is more difficult for saturated sandstone with the same porosity degree to produce new surface consumption stress wave energy than dry sandstone. (b) Under impact loading, the saturated sandstone is in an undrained state, and the deformation of the saturated sandstone can be approximate to the sum of the compressive deformation of the sandstone and the water. Water is less deformed than sandstone compression. With the increase of porosity degree, that is, the increase of water content, the deformation of saturated sandstone decreases. The probability of plastic deformation and new cracks decreases, so does the energy consumption. (c) With the increase of porosity degree, the dynamic strength of dry sandstone decreases accordingly, and new cracks are more likely to appear in the form of surface energy to dissipate stress wave energy. Therefore, the larger the porosity degree is, the greater the energy consumption.

Keywords: degree of porosity; energy consumption; saturated water; sandstone; stress wave