



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020 年热点论文

《煤炭学报》2021 年第 1 期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

循环冲击下弱风化岩石力学特性与渗透率演化

刘伟¹, 曾鹏¹, 闫雷¹, 杨砚¹, 刘连生^{1,2}

(1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西赣州 341000; 2. 江西省矿业工程重点实验室, 江西赣州 341000)

摘要:低渗透弱风化花岗岩型稀土矿床中蕴含大量的中重型稀土,但矿体渗透性严重影响溶浸效率,提出利用爆炸冲击载荷对稀土矿体产生多次扰动,在确保矿体保持稳定性的前提下使内部微观结构发生变化,进而提高矿体渗透性。为探究爆炸冲击载荷多次扰动下弱风化花岗岩的力学特性及渗透系数的变化,利用Hopkinson冲击试验机、RMT-150C液伺服试验机、核磁共振仪,对试件进行逐级循环冲击实验和冲击后的静态压缩实验,并测量试件的孔隙度与渗透系数。研究表明:逐级循环冲击下弱风化花岗岩存在裂隙压密阶段,但不明显;裂纹扩展阶段存在明显的应力松弛平台,且随冲击速度的增加愈加明显;动态峰值应力与临界应变随冲击速度的增加呈递增趋势;冲击后的静力学特性表现为随着冲击次数的增加,裂纹压密阶段持续时间增加,弹性阶段持续时间减少,裂纹起裂应力 σ_{ci} 、裂纹损伤应力 σ_{ed} 、单轴抗压峰值强度 σ_f 逐渐下降,临界应变逐渐增大。试件中含有小中大3种孔隙类型,在逐级循环冲击下整体表现为中等孔隙占比增加,小型、大型孔隙占比基本不变,有效孔隙度逐渐增加,第1次冲击后这种变化较为明显。弱风化花岗岩经过3次冲击后,渗透系数达到最大,长期强度下降约13%。

关键词:力学特性;渗透率;弱风化花岗岩;循环冲击;爆炸冲击载荷

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2021)06-1855-09

Mechanical properties and permeability evolution of weakly weathered rocks under cyclic impact

LIU Wei¹, ZENG Peng¹, YAN Lei¹, YANG Yan¹, LIU Liansheng^{1,2}

(1. School of Resource and Environment Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Mining Engineering, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Weathered rare earth ore contains a large amount of medium-heavy rare earth, the permeability of ore body seriously affects the mining efficiency. This paper proposes that the use of the explosive impact load can cause multiple disturbances to the rare earth ore body, change the internal micro-structure, improve the permeability and keep the ore body stable. In order to explore the mechanical properties and permeability coefficient of weakly weathered granite under multiple perturbations from blast impact load, the Hopkinson impact testing machine, RMT-150C hydraulic servo testing machine and Nuclear Magnetic Resonance were used to respectively carry out a step-by-step cyclic impact test and static compress test (after the disturbance). The porosity and permeability coefficient of the specimen were measured. The results of research show that a fracture compaction stage exists in weakly weathered granite under cyclic im-

收稿日期:2020-01-13 修回日期:2020-04-17 责任编辑:黄小雨 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2020.0066

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51404111);江西省自然科学基金资助项目(20192BAB206017)

作者简介:刘伟(1997—),男,安徽阜阳人,硕士研究生。E-mail:liuweijxust@163.com

通讯作者:刘连生(1979—),男,江西南康人,教授,博士。E-mail:lianshengliu@jxust.edu.cn

引用格式:刘伟,曾鹏,闫雷,等.循环冲击下弱风化岩石力学特性与渗透率演化[J].煤炭学报,2021,46(6):1855-1863.

LIU Wei, ZENG Peng, YAN Lei, et al. Mechanical properties and permeability evolution of weakly weathered rocks under cyclic impact[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1855-1863.



移动阅读

compact, but it is not obvious. The stress relaxation platform exists in the crack propagation stage of weakly weathered rock under a step-by-step cyclic impact test, and it becomes more obvious with the increase of impact speed. The peak stress increases with the increase of impact velocity. At the aspect of static characteristics (after impact), the duration of crack compaction stage increases and the elastic stage decreases, the crack initiation stress σ_{ci} , crack damaging stress σ_{cd} and uniaxial compressive peak strength σ_f decrease, and the critical strain increases gradually with the increase of impact times. There are three types of pores in the test specimen, the number of medium pores increase under the step-by-step loading, the number of small and large pores keep unchanged. After three impacts, the effective porosity and permeability coefficient of the specimen were greater than the initial value, and the peak stress is reduced by about 13%. The aim of increasing permeability based on the stability of ore body is realized.

Key words: mechanical property; permeability; weakly weathered granite; cycle impact; explosive impact load

江西赣南地区是离子型稀土矿探明储量最多的地区^[1],低渗透弱风化花岗岩型稀土矿床的渗透性严重影响了矿体的回采效率^[2]。为了能够适当提高矿体的渗透率,降低浸取液在稀土矿中的淋洗时间,提高稀土浸取效率。借鉴低渗透油气田、煤层气原地浸矿等提出的增渗方法^[3-4],拟采用“小药量空气间隔微差爆破”的方法,利用爆炸产生的冲击载荷改变矿床内部不同孔径孔隙在岩石内部的占比,进而在不影响整体稳定性的情况下增大矿体的渗透性。因此,需研究弱风化岩石在爆炸冲击载荷多次扰动下,渗透系数与静态、动态应力应变曲线的变化情况。

国内外学者对岩石的动力学特性与渗透率演化做了大量研究。ZHANG 等^[5]综述了岩石材料动力学试验技术,为开展爆破增渗室内试验提供参考。金解放等^[6-7]研究了砂岩在循环冲击下的力学特性、破坏模式及损伤演化过程。ZHOU 等^[8]利用核磁共振技术研究了岩石在循环冻融下细观损伤的演化过程,并分析循环冻融次数和孔隙度大小对动静力学特性的影响。YAN 等^[9]研究了冲击速度、冲击次数对弱风化花岗岩力学特性及渗透性能的影响。ZHAO 和 ZHENG^[10-11]对岩石所受应力与渗透率变化的关系进行了相关研究,发现荷载会通过改变岩样形状及内部构造的方式影响其渗透性。张磊等^[12]利用核磁共振技术研究页岩的孔隙度与渗透率之间的关系,发现两者呈幂函数递增关系。程庆迎等^[13]探究固液耦合煤体渗透性的变化,发现煤体渗透性的演变与其内部裂隙的变化趋势一致。赵宏刚等^[14]通过分析岩石变形过程中渗透性变化规律,得出应变与渗透性呈正相关的结论。WANG 等^[15]研究围压对岩土混合物渗透性的影响,发现土体基质与岩块之间的作用变化直接影响其渗透性。LIU 等^[16]结合三轴渗流试验,研究了含泥和不含泥砂

岩在不同加载条件下的渗透率演化,并分析了影响渗透率变化的因素。CHEN 等^[17]利用三维声发射装置,研究了花岗岩损伤演化与渗透性变化之间的关系,认为岩石在微裂纹合并之前,渗透率的变化可以忽略不计,之后岩石渗透性变化与损伤演化过程基本相似。上述研究主要以完整性、均质性好的岩石材料为主,对循环冲击后弱风化岩石的力学特性与渗透系数演化研究较少。

笔者以弱风化花岗岩为研究对象,进行逐级循环冲击实验,三轴渗流实验以及单轴压缩实验,探讨冲击前后静、动态应力应变曲线变化情况,以及孔隙度,渗透系数与冲击次数 3 者之间的变化关系,为爆破增渗工艺提供理论依据和工程指导。

1 试 验

1.1 试样制备

岩样取自赣南安远县某离子型稀土矿半风化层,埋深约 10 m。矿山岩石形成于燕山早期,属于粗粒黑云母花岗岩,由黏土矿物,黑云母,长石,石英等矿物组成。

为了克服静态和动态加载方法中因试样尺寸差异导致的强度差异,统一采用 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的弱风化花岗岩试样。在试样加工过程中应保证端面的不平行度和不垂直度均小于 0.02 mm,将所有试样放入干燥箱,在 108 °C 下烘干 24 h 后,冷却至室温取出,测试试样的孔隙度、质量、尺寸、超声波波速等,剔除离散性较大的试样。制备好的试样如图 1 所示。

1.2 仪器简介

逐级加载冲击试验在分离式霍普金森压杆 (SHPB) 实验系统^[18]上完成。图 2 为直径 50 mm 的 SHPB 试验系统。该装置的冲头和杆件的材质均为 40Cr 合金钢,密度为 7 810 kg/m³;波阻抗为 42 TPa/s;纵波波速为 5 400 m/s;弹性极限 800 MPa;



图1 部分加工好的试样

Fig. 1 Partially processed samples

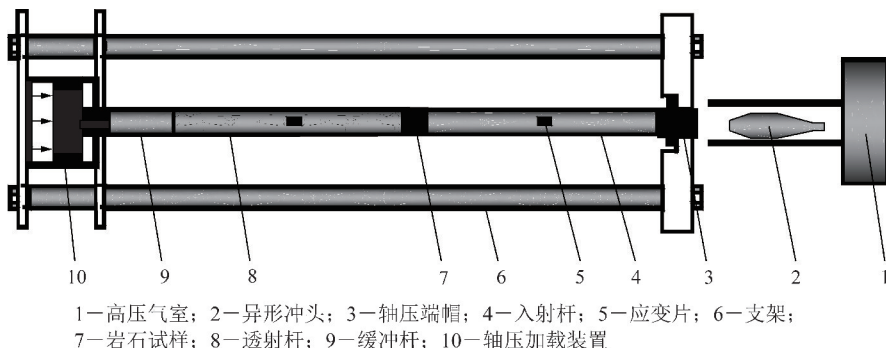


图2 SHPB 试验系统

Fig. 2 SHPB experimental system

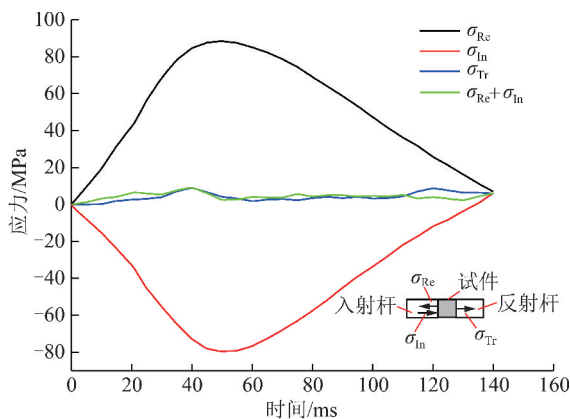


图3 试样 M-3 动态应力平衡

Fig. 3 Dynamic stress balance check for a specimen(M-3)

1.3 试验方案

为探究爆炸冲击荷载多次扰动下弱风化花岗岩的力学特性,采用 SHPB 实验系统对其施加一维循环冲击载荷。选取基本物理参数相近的试样分为 M 组和 N 组,其中, M 组为逐级循环加载冲击组; N 组为冲击后的单轴压缩实验组。① 对 M 组试样以不同的冲击速度进行逐级加载,使得试样内部产生有效损伤而不发生宏观破坏;每次冲击后测量试样的渗透系数与孔隙度变化;② 对 N 组试样,以与 M 组试样相同的速度冲击并测量渗透系数后,取出部分试样进行单轴压缩试验。组内以字母加数字的形式编号,例如

入射杆、透射杆和吸收杆的长度分别为 2.0, 1.5, 0.5 m, SHPB 冲击试验基本原理参看文献[19]。

试验时,试样两端面均匀涂抹一层黄油,确保试样两端面与入射杆和透射杆间接触良好,并能很好地减小岩石与弹性杆界面摩擦力^[20]。为确保试验数据的有效性,每次冲击后均进行动态应力平衡检验^[21],即入射应力 σ_{In} 与反射应力 σ_{Re} 的和应该近似等于透射应力 σ_{Tr} 。图 3 为试样 M-3 冲击后的应力平衡图。

N-1-1, N 代表 N 组试样,中间的数字 1 代表试样的编号为 1,末尾的 1 代表冲击次数。近似认为 N 组试样的强度即为每次冲击后 M 组试样的强度。

根据试样体积应变与裂纹体积应变拐点出现的先后顺序,可以把破坏前的应力-应变曲线分为 4 个阶段,3 个关键性的节点 σ_{cc} , σ_{ci} , σ_{cd} 。 σ_{cc} 为裂纹压缩阶段与弹性阶段的分界点; σ_{ci} 为弹性阶段与裂纹稳定扩展阶段的分界点; σ_{cd} 为裂纹稳定扩展阶段与裂纹加速扩展阶段的分界点。

采用能量阈值法,即当动态单位体积加载能 W_{dc} (动态峰值应力 σ_{dc} 与动态临界应变 ε_{dc} 包络下的面积) 大于岩样达到静态损伤强度 σ_{cd} 吸收的单位体积能量 W_{cd} 时的速度作为冲击速度的下限,如图 4 所示^[22],以宏观裂纹的出现确定冲击速度的上限,图 4 中, σ_f 为岩石静态峰值应力。当冲击速度 v 为 4.0 m/s 时,动态应力-应变曲线加载段面积大于达到静态损伤强度 σ_{cd} 时静态应力应变曲线下所包含的面积;冲击速度为 7.0 m/s 时,试样表面出现细微的宏观裂纹,由此确定冲击速度应满足 $4.0 \text{ m/s} \leq v < 7.0 \text{ m/s}$ 。考虑到采用微差爆破时,爆炸应力波在不同介质界面的反射、透射和叠加,使得作用于目标矿体的冲击载荷大小很难达到等速冲击的效果。故以 1 m/s 为间隔,把冲击速度设定为 4, 5, 6 m/s 逐级加载。

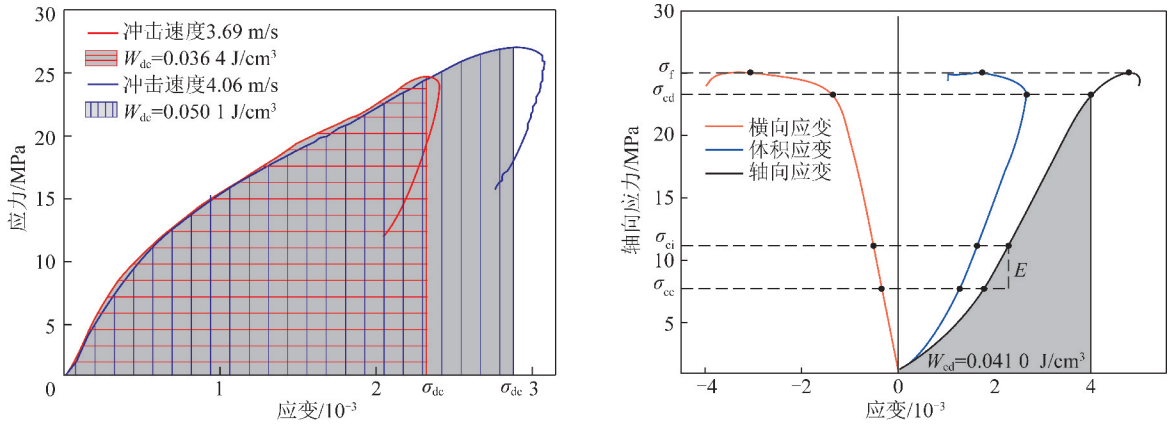


图 4 加载段单位体积能量计算^[22]

Fig. 4 Load segment unit volume energy calculation^[22]

2 实验结果分析

2.1 试样力学特性

对 M 组试样,以 4,5,6 m/s 的冲击速度逐级加载,每次冲击后测量试件渗透系数;对 N 组试样,以

相同的速度冲击并测量渗透系数后,取出部分试样进行单轴压缩试验,测量试样破坏时的峰值应力,实验结果见表 1。

图 5 为冲击后 M 组与 N 组部分试样的应力应变曲线图。

表 1 冲击前后试样静态峰值应力变化

Table 1 Peak stress change of specimen before and after impact

编号	长径比	密度/ (g · cm ⁻³)	孔隙 度/%	纵波波速/ (m · s ⁻¹)	冲击前峰值 应力/MPa	静态峰值应力/MPa		
						第 1 次冲击速 度 4 m/s	第 2 次冲击 速度 5 m/s	第 3 次冲击 速度 6 m/s
M-1	1.032	2.39	2.34	3 501				
N-1-0	1.030	2.35	2.64	3 530	38.6			
N-1-1	1.026	2.32	2.47	3 526		37.2		
N-1-2	1.033	2.36	2.32	3 590			36.6	
N-1-3	1.035	2.30	2.56	3 574				34.8
M-2	1.032	2.28	2.44	3 485				
N-2-0	1.026	2.31	2.56	3 479	37.5			
N-2-1	1.034	2.37	2.62	3 430		36.7		
N-2-2	1.031	2.26	2.80	3 459			34.5	
N-2-3	1.033	2.34	2.66	3 524				32.8
M-3	1.028	2.29	2.68	3 429				
N-3-0	1.038	2.34	2.70	3 506	36.9			
N-3-1	1.034	2.25	2.54	3 432		36.2		
N-3-2	1.025	2.30	2.63	3 484			35.4	
N-3-3	1.030	2.28	2.76	3 440				33.1
M-4	1.026	2.26	2.51	3 395				
N-4-0	1.030	2.35	2.48	3 424	37.8			
N-4-1	1.036	2.33	2.35	3 375		36.8		
N-4-2	1.028	2.37	2.78	3 340			35.9	
N-4-3	1.034	2.30	2.50	3 386				34.2

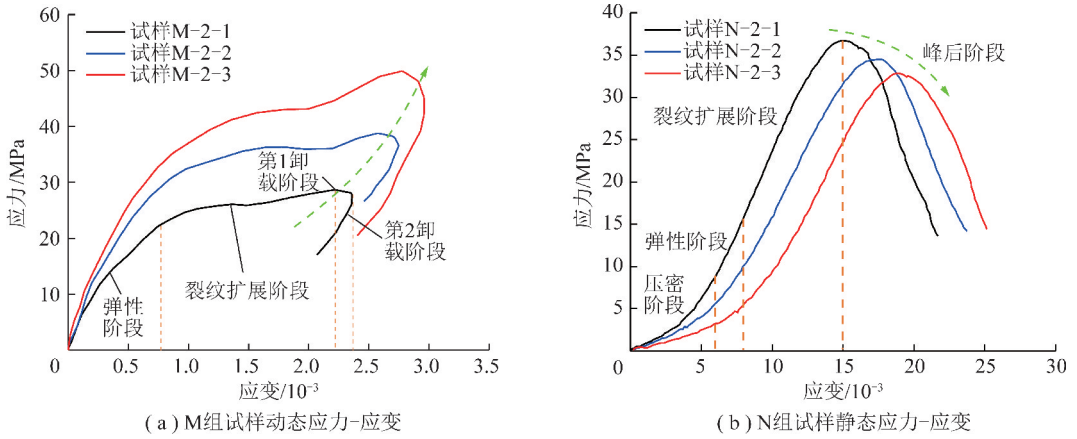


图5 试样应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of sample

由图5可以看出,随着冲击速度的增加,岩石的动态峰值应力和临界应变不断增大,这是岩石率效应的体现^[23]。动态应力应变整体可以分为4个阶段:弹性阶段、裂纹扩展阶段、第1卸载阶段、第2卸载阶段。在动态冲击中,岩石压密阶段存在但其微弱,可以忽略不记;在裂纹扩展阶段,与致密花岗岩不同^[21],弱风化花岗岩存在下凹型的非稳定增长阶段,这是由于加载的应力超过大部分孔隙的屈服极限时,岩石内部孔隙的二次坍塌(首次坍塌为加载初期的压密阶段)导致的,在弹性阶段后大量孔洞坍塌并出现应力松弛平台段;第1卸载阶段岩石所受应力逐渐减小,但应变继续增加,直至到最大应变处;第2卸载阶段岩石所受应力逐渐减小,对应的应变也逐渐变小,弹性应变能逐渐释

放^[24-25]。随着冲击次数的增加,岩石静态峰值应力 σ_f 不断减小,临界应变不断变大。由于岩石内部孔隙发育,整体破坏模式呈塑性破坏,即在 σ_f 后,岩石裂隙快速发展,交叉且相互联合形成宏观断裂面,并沿断裂面进一步滑移,岩石承载力随变形增大迅速下降。

岩石静态峰值应力 σ_f 代表试样在极限状态下的承载能力,但这种能力在长期加载中是不可靠的^[26],且 σ_f 与试验的边界条件也有关,不能完全反应出岩石内部性质^[27]。根据张晓平等^[28]的研究,裂纹损伤应力 σ_{cd} 可以代表岩石的长期强度,裂纹起裂应力 σ_{ci} 、裂纹损伤应力 σ_{cd} 是与尺寸无关的,能反映岩石内部性质的2个参数。以裂纹应变模型法^[29]确定 σ_{ci} 、 σ_{cd} ,如图6所示。

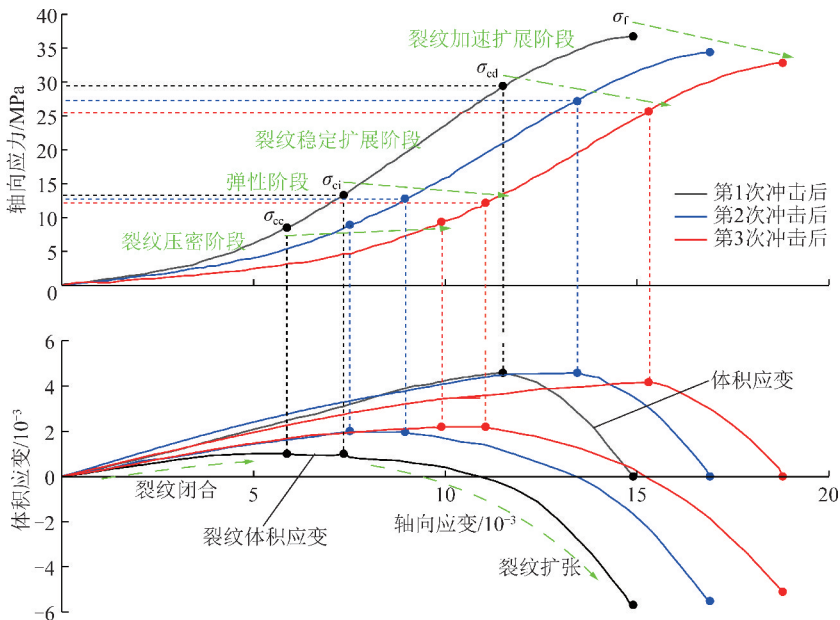


图6 弱风化花岗岩起裂强度和损伤强度取值

Fig. 6 Values of initiation strength and damage strength of weakly weathered granite

由图6可以看出,3次冲击后裂纹损伤应力 σ_{cd} 下降至25.5 MPa,与最初的29.4 MPa相比,下降了约13%。随着冲击次数的增加,岩石压密所需时间随之增加,这是由于冲击导致岩石内部裂纹增大,相同加载速率下需要更久的时间才能使裂纹完全闭合;弹性阶段逐渐变小,说明冲击虽未导致岩石出现宏观裂纹,但仍使部分岩石由弹性变形转变为塑性变形;裂纹起裂应力 σ_{ci} 和裂纹损伤应力 σ_{cd} 逐渐下降,说明裂纹稳定张拉和裂纹加速扩展所需应力逐渐变小,这是由于在冲击过程中,岩石吸收部分能量用于裂纹的形成与扩展,这个过程是不可逆的^[30],岩石内部微裂纹越多,越容易相互贯通形成宏观裂纹;最终导致岩石的宏观破坏表现为峰值应力 σ_f 不断下降,临界应变不断变大。

2.2 试样孔隙变化

通过核磁共振可以得到试样的 T_2 (试样横向弛豫时间)谱,试样 T_2 值与孔隙半径呈线性关系^[31],即 T_2 值越大,孔隙半径越大; T_2 谱峰值越大,相同孔隙

半径的数量越多; T_2 谱面积越大,孔隙度越大^[15]。可由式 $r = 3\rho T_2$ ^[32],把 T_2 值转换为孔隙半径,由此可得试样的孔隙半径分布图。其中, T_2 为横向弛豫时间,ms; ρ 为表面弛豫率, $\mu\text{m}/\text{ms}$; r 为孔隙半径, μm 。图7为冲击前后M组试样的孔径分布图。

由图7可以看出,冲击前后试样的孔径分布均存在3个峰,3个峰之间相互连通,并非孤立存在。第1次冲击后,孔径分布曲线明显改变,说明1次冲击后试样内部不同孔径孔隙的比例发生剧烈变化;第2,第3次冲击后,曲线形状相似,说明随后的2次冲击并未使不同孔径孔隙的比例发生明显变化。随着冲击次数的增加,曲线整体上移,右移不明显,说明孔隙数量不断增大,但新增的更大孔径孔隙较少。

为直观地说明不同孔径孔隙比例的变化,定义孔径小于 $0.24\ \mu\text{m}$ 的为小孔隙;孔径为 $0.24\sim 10.0\ \mu\text{m}$ 的为中等孔隙;孔径大于 $10.0\ \mu\text{m}$ 的为大大孔隙。绘出孔径分布直方图,如图8所示。

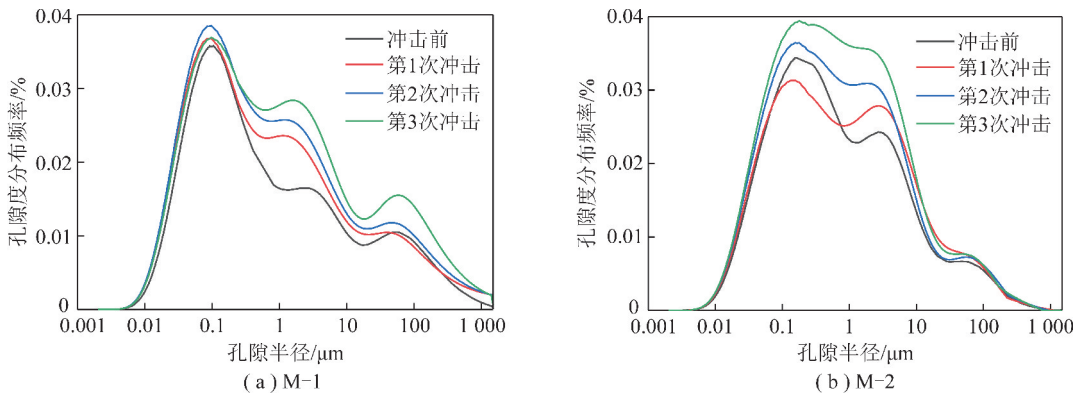


图7 M组试样孔径分布曲线

Fig. 7 Diagram of pore size distribution of group M rock samples

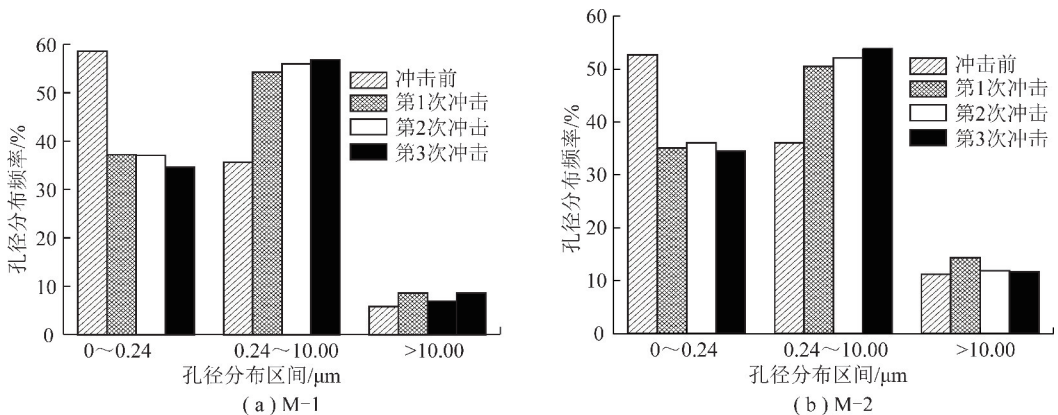


图8 M组试样孔径分布频率直方图

Fig. 8 Histogram of pore diameter frequency distribution of group M rock samples

由图8可以看出,随着冲击次数的增加,小孔隙比例不断减小,中等孔隙的比例不断增加,大孔隙数

量基本不变。第1次冲击后这种变化最为明显,之后2次冲击孔隙比例变化较小,整体孔隙度不断增大。

分析认为,试样受到冲击时,冲头撞击入射杆产生弹性压缩波,压缩波持续挤压各种孔径的孔隙。由于试样内部各种孔隙之间相互连通,大孔隙所受压力会传递给小孔隙,当小孔隙所受压力超过其承载极限时,小孔隙会发生扩展、延伸等转化为中等,致使整体孔隙度不断增大,直至试样发生破坏。冲击前的试样由于未受到动载荷的影响,近似处于天然状态。第1次冲击时,入射的弹性应力波在试样内部发生多次反

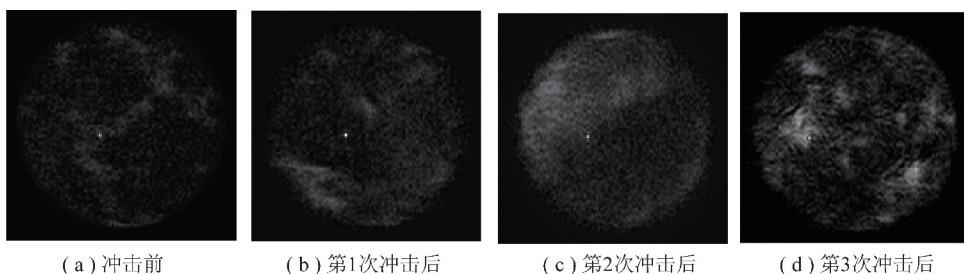


图9 M-1试样冲击后核磁共振

Fig. 9 Nuclear Magnetic Resonance (NMR) images before and after impact in M-1

由图9可知,随着冲击次数的增加,岩石内部白色斑点数量增多,亮度也有所增加,说明冲击后试样的孔隙度不断增大。冲击前后岩石内部白色斑点分布较均匀,无条带状白色斑点出现,这说明岩石试样内部没有出现明显的裂隙,孔隙分布以及孔隙变化较均匀。

2.3 孔隙度与渗透系数的关系

孔隙度是影响岩石渗透性的主要因素之一。由2.2节可知,试样孔隙度随冲击次数的增加逐渐增大,推测渗透率也逐渐变大,为直观反应试样渗透率的变化,对冲击前后的试样进行三轴渗流试验,采用基于Darcy定律的进水流量稳态法计算岩样的渗透率^[33],并绘出试样渗透系数与孔隙度随冲击次数变化趋势图,如图10所示。

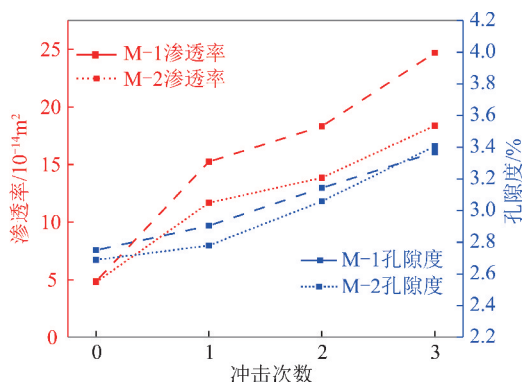


图10 M组试样冲击前后孔隙度和渗透系数的变化

Fig. 10 Changes of porosity and permeability coefficient of group M samples before and after impact

由图10可以看出,随着冲击次数的增加,试样孔隙度与渗透率逐渐增大,但两者的变化趋势不尽相

射、透射,导致试样内部孔隙类型不断发生变化,以适应这种扰动。随后的2次冲击,并未使不同孔径孔隙的比例发生明显改变,说明岩石已经适应了这种扰动。

为直观地反映岩石孔隙的分布情况,对冲击前后试样孔隙进行核磁共振成像,如图9所示,图9中黑色为底色,白色斑点代表含水孔隙,斑点面积越大表明此处孔隙数量越多或者孔隙尺寸越大。

同。孔隙度的增幅随着冲击次数的增加逐渐变大,这是由于冲击速度不断变大,试样单位体积吸收能增大,试样内部产生的有效损伤也越来越大。损伤不断累积,孔隙度也不断变大。渗透率在第1次冲击后增幅最为明显,这是由于第1次测定渗透系数时,岩石内部孔隙水压作用下形成贯通的渗流通道;由图8可以看出,首次冲击后,弹性应力波在试样内部发生多次反射、透射,中等孔隙数目迅速增加导致渗流通道明显增多;后2次冲击由于岩石已经适应了应力波的扰动,中等孔隙数目增幅较缓,渗透率增幅也随之变缓。可见,渗透率与孔隙度之间并非严格的一一对应关系,还与试样内部不同孔径孔隙的占比有关,孔径越大,对渗透率的影响越大。3次冲击后渗透率最大,可以达到增大矿体渗透率的目的。

3 结 论

(1)与静态压缩不同,弱风化花岗岩在动态压缩过程中,存在裂隙压密阶段,但不明显;在裂隙扩展阶段,存在下凹型的非稳定增长阶段;由于岩石内部孔隙的二次坍塌,在弹性阶段后会出现一段应力松弛平台。随着冲击速度的增加,岩石的动态峰值应力和临界应变不断增大。

(2)随着冲击次数的增加,弱风化花岗岩的静态压缩曲线表现为:裂隙压密阶段所需时间越来越长;弹性模量呈递减趋势,弹性阶段逐渐变小;裂纹起裂应力 σ_{ci} 和裂纹破坏应力 σ_{cd} 逐渐下降;峰值应力 σ_f 不断下降,临界应变不断变大;整体破坏模式呈塑形破坏。

(3)随着冲击次数的增加,中等孔隙占比不断增加,小孔隙与大孔隙占比基本不变,有效孔隙度不断变大。第1次冲击后,这种变化较为明显,之后的2次冲击,变化较小。冲击仅使得不同类型孔隙的数量发生改变,但未产生明显裂隙。

(4)弱风化花岗岩经过第1次冲击后,岩石渗透系数增幅最为明显;第3次冲击后,渗透系数最大,长期强度下降约13%,达到了增渗和保持矿体稳定的目的。

参考文献(References):

- [1] ZHANG L, WU K X, CHEN L K, et al. Overview of metallo genetic features of ion-adsorption type REE deposits in southern Jiangxi Province[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2015, 33(1): 10-17.
- [2] LI Y X, ZHANG L, ZHOU X M. Resource and environment protected exploitation model for ion-type rare earth deposit in southern of China[J]. Chinese Rare Earths, 2010, 31(2): 80-85.
- [3] DING Y S, CHEN L, XIE X, et al. On the stimulation with exploding in fractures in low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(2): 90-96.
- [4] WANG Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines[J]. International Journal of Coal Science & Technology 2014, 1(3): 253-260.
- [5] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2014, 47(4): 1411-1478.
- [6] 金解放, 李夕兵, 王观石, 等. 循环冲击载荷作用下砂岩破坏模式及其机理[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(4): 1453-1461.
JIN Jiefang, LI Xibing, WANG Guanshi, et al. Failure modes and mechanisms of sandstone under cyclic impact loadings[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(4): 1453-1461.
- [7] 金解放, 李夕兵, 邱灿, 等. 岩石循环冲击损伤演化模型及静载荷对损伤累积的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1662-1671.
JIN Jiefang, LI Xibing, QIU Can, et al. Evolution model for damage accumulation of rock under cyclic impact loadings and effect of static loads on damage evolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(8): 1662-1671.
- [8] ZHOU K P, BIN L I, JIE L I, et al. Microscopic damage and dynamic mechanical properties of rock under freeze-thaw environment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(4): 1254-1261.
- [9] YAN Lei, YI Wenhua, LIU Liansheng, et al. Blasting-induced permeability enhancement of ore deposits associated with low-permeability weakly weathered granites based on the split hopkinson pressure bar[J]. Geofluids, 2018(3): 1-4.
- [10] 赵闯, 武科, 李术才, 等. 循环荷载作用下岩石损伤变形与能量特征分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 890-896.
- ZHAO Chuang, WU Ke, LI Shucui, et al. Energy characteristics and damage deformation of rock subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 890-896.
- [11] ZHENG C, KIZIL M S, AMINOSSADATI S M, et al. Effects of geo-mechanical properties of interburden on the damage-based permeability variation in the underlying coal seam [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 7(55): 42-51.
- [12] 张磊, 石军太, 张庆辉, 等. 鄂尔多斯盆地东南部页岩岩磁共振实验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(10): 2876-2885.
ZHANG Lei, SHI Juntai, ZHANG Qinghui, et al. Experimental study on the nuclear magnetic resonance of shale in the southeastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society 2018, 43(10): 2876-2885.
- [13] 程庆迎, 黄炳香, 李增华, 等. 煤体固液耦合的结构及渗透性演变规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 400-406.
CHENG Qingying, HUANG Bingxiang, LI Zenghua, et al. Evolution law of the structure and permeability for coal under solid-liquid Coupling[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(3): 400-406.
- [14] 赵宏刚, 张东明, 边光, 等. 循环加、卸载速率对砂岩变形和渗透特性的影响[J]. 工程科学学报, 2017, 39(1): 133-140.
ZHAO Honggang, ZHANG Dongming, BIAN Guang, et al. Deformation and permeability of sandstone at different cycling loading-unloading rates [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(1): 133-140.
- [15] WANG Y, LI X, ZHENG B, et al. A laboratory study of the effect of confining pressure on permeable property insoil-rock mixture [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4): 284.
- [16] LI Xianshan, XU Ming, WANG Ke, Mechanism of permeability evolution for reservoir sandstone with different physical properties [J]. Geofluids, 2018: 1-16.
- [17] CHEN L, LIU J F, WANG C P, et al. Characterization of damage evolution in granite under compressive stress condition and its effect on permeability [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014, 71: 340-349.
- [18] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [19] 卢芳云. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [20] LI X B, ZHOU Z L, LIU D S, et al. Advances in rock dynamics and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2011: 105-124.
- [21] WANG P, YIN T, LI X, et al. Dynamic properties of thermally treated granite subjected to cyclic impact loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(4): 991-1010.
- [22] 闫雷, 刘连生, 刘伟, 等. 单轴循环冲击下弱风化花岗岩的损伤演化[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(5): 96-105.
YAN Lei, LIU Liansheng, LI Shijie, et al. Damage evolution of weakly weathered granite under uniaxial cyclic impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(5): 96-105.
- [23] 宫凤强, 王进, 李夕兵. 岩石压缩特性的率效应与动态增强因子统一模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1586-1595.
GONG Fengqiang, WANG Jin, LI Xibing. The rate effect of compression characteristics and a unified model of dynamic increasing factor for rock materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics

- and Engineering, 2018, 37(7): 1586-1595.
- [24] LI S H, ZHU W C, NIU L L, et al. Dynamic characteristics of green sandstone subjected to repetitive impact loading: Phenomena and mechanisms [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(6): 1921-1936.
- [25] 金解放. 静载荷与循环冲击组合作用下岩石动态力学特性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
JIN Jiefang. Study on rock mechanical properties under coupled static-cyclic impact loadings [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [26] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1994, 31(6): 643-659.
- [27] HUDSON J A, BROWN E T, FAIRHURST C. Shape of the complete stress-strain curve for rock [A]. Proceedings of the 13th U. S. Symposium on Rock Mechanics. [C]. Urbana: 1972; 773-795.
- [28] 张晓平, 王思敬, 韩庚友, 等. 岩石单轴压缩条件下裂纹扩展试验研究——以片状岩石为例 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1772-1781.
ZHANG Xiaoping, WANG Sijing, HAN Gengyou, et al. Crack propagation study of rock based on uniaxial compressive test——A case study of schistose rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1772-1781.
- [29] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of lac du bonnet granite [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1994, 31(6): 643-659.
- [30] 王春, 唐礼忠, 程露萍, 等. 一维静载与频繁扰动共同作用下含铜蛇纹岩动力学特性 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(9): 219-226.
WANG Chun, TANG Lizhong, CHENG Luping, et al. Dynamic characteristics of copper-bearing serpentine under combined action of one-dimensional static load and frequent disturbances [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(9): 219-226.
- [31] 王志战, 李新, 魏杨旭, 等. 页岩油气层核磁共振评价技术综述 [J]. 波谱学杂志, 2015, 32(4): 688-698.
WANG Zhizhan, LI Xin, WEI Yangxu, et al. NMR technologies for evaluating oil & gas shale: A review [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2015, 32(4): 688-698.
- [32] COATES G, XIAO L, PRAMMER M. Principle and application of nuclear magnetic resonance logging [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [33] 王伟, 徐卫亚, 王如宾, 等. 低渗透岩石三轴压缩过程中的渗透性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 40-47.
WANG Wei, XU Weiya, WANG Rubin, et al. Permeability of dense rock under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 40-47.