

不同初始孔隙度页岩的三轴压缩强度及裂隙发育规律

田彦德*

(山西焦煤西山煤电集团股份有限公司 西铭矿, 山西 太原 030000)

摘要: 岩石在三轴作用下的破裂规律是影响岩体稳定性的重要因素. 针对煤矿中页岩易发生片帮、冒顶的突出问题, 基于核磁共振技术, 研究页岩三轴压缩作用下的裂隙发展规律, 结合颗粒流程序得到了相同条件下的不同孔隙度页岩裂纹形成过程. 研究表明: T_2 谱曲线直观、真实地反映岩石内部裂隙状态, 微裂纹随轴向应力增加呈指数形式增长. 页岩三轴压缩低轴压阶段, 岩石损伤以裂隙数增加为主要诱因; 高轴压条件下, 岩石损伤主要由裂隙数增加及裂隙贯通引起. 孔隙度越大对岩石强度弱化越明显. 不同孔隙度岩石的强度及裂隙发育规律研究对岩体工程的支护设计和防护措施实施具有指导意义.

关键词: 核磁共振; T_2 谱分布; 孔隙度; 三轴压缩; 裂隙发育

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2019)04-0040-04

Triaxial Compression Strength and Fracture Development of Shale with Different Initial Porosity

Tian Yande

(Ximing Coal Mine of Xishan Coal Electricity Group Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract: The fracture law of rock under triaxial action is an important factor affecting the stability of rock mass. Aiming at the prominent problems that shale is prone to fracture in coal mines, based on the nuclear magnetic resonance, crack development law is analyzed under conventional triaxial compression condition, and the formation process of fracture are obtained by PFC. Results show that T_2 spectrum distribution reflects the process of crack development visually and factually, and the porosity increases exponentially with axial stress. When the granite is in the low axial compression stage, rock damage is mainly caused by the increase of fracture number and by both fracture number and crack connection under the high axial pressure. The initial porosity has a significant effect on the axial strain and the final number of microcracks. With the increase of initial porosity, the axial strain of microcrack becomes smaller, and the final number of crack increases. The larger the porosity is, the weaker the strength is. The study of strength and fracture development of rock with different porosity is of guiding significance to support design and protective measure

Keywords: nuclear magnetic resonance; T_2 spectrum distribution; porosity; triaxial compression; fracture development

自然环境中, 岩石大多处于三向应力状态, 三轴压缩作用下岩石力学特性及破坏机制研究主要集中在宏观层面, 而岩石内部裂隙、孔隙对岩石力学特征的影响效应是岩石损伤破坏机理研究的本质内容. 国内外许多学者对其进行了研究并获得大量研究成果. Wawersik, DAWN^[1,2] 等开展了岩石三轴压缩试验和理

论分析,研究岩石试样的强度和变形特性.王家禄^[3]借助 CT 扫描技术研究了岩石孔隙变化特征.朱红光等人通过 CT 细观扫描观测岩石裂隙在单轴^[4]和三轴压缩作用下的扩展规律,从微观角度描述了裂隙随压力经历压密-扩展-加速扩展-贯通的过程^[5-7],并依据细观试验,确定了峰前岩石应力损伤演化方程^[6,7].李晓娟^[8]等人利用 SEM 获取粉砂岩三轴压缩条件下裂纹产状演变信息,为岩石三轴损伤破坏机理研究提供了大量细观信息.田文岭等人通过 PFC,FLAC 等程序重构了三维孔隙模型,分别探讨了孔隙对砂岩抗拉强度的影响^[9-12],片麻岩单轴压缩过程中微裂隙的演化规律^[13]以及煤样三轴循环加载过程中裂纹随应力变化特征^[14].Davies S 和 Packer K J^[15]利用核磁共振技术得到了固体的孔隙分布特征并通过傅里叶变换得到了核磁共振的 T_2 谱.

与 CT,SEM 等常规手段不同,近年来快速发展的核磁共振技术,通过无损测试,可定量描述岩石内部孔隙对力学特性的影响以及不同加载作用下内部孔隙数量、大小的变化规律.与常规手段相比,核磁共振技术不仅解决了无损测试,而且可以通过核磁信号快捷、直接定量表述岩石损伤程度.核磁试验不仅测试结果精度高,而且时间成本大幅降低.本文采用核磁共振技术、PFC 数值模拟方法,结合岩石常规三轴压缩试验,对不同孔隙度岩石的力学特征进行研究,揭示微观裂隙与岩石宏观力学行为的相关性,为地下工程三轴受力状态下的煤矿页岩围岩的破坏机制研究提供试验支撑.

1 围岩性质

西铭矿是山西焦煤集团一个特大型现代化煤矿,年产 360 万 t 煤.其掘进 48707 工作面,围岩性质即底板岩层状况如表 1 所示.

表 1 48707 工作面顶底板岩层状况

顶板名称	岩石名称	厚度/m	岩性特征
直接顶托上夹石	页 岩	0.60~3.50	黑色,层理节理发育,含植物化石碎片,较破碎易冒落
		2.45	
伪 顶	页 岩	0~0.70	灰黑色,层理、裂隙发育,破碎易冒落
		0.20	
直接底	砂质页岩	1.95~3.00	灰黑色,节理发育,顶、底部有薄层页岩,含植物化石碎片,局部相变为细砂岩
		2.43	

2 试验原理及方案

2.1 核磁共振技术

核磁共振技术的核心是弛豫机制,表面弛豫作为主要作用表征孔隙尺寸和孔隙率,可表示为

$$\frac{1}{T_2} \approx \frac{1}{T_{2\text{表面}}} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right)_{\text{孔隙}} \quad (1)$$

式中: ρ_2 为 T_2 表面弛豫率; $(S/V)_{\text{孔隙}}$ 为孔隙的比表面积.

2.2 核磁共振设备

利用 MesoMR23-060H-I 型核磁共振设备对压缩后试样内部孔隙分布进行测量,核磁共振系统中磁体采用永磁体,共振频率为 12.798 95 MHz,探头线圈的直径为 60 mm,适用于环境温度为 (35.00 ± 0.02) °C.

2.3 岩样制备

岩样加工尺寸为直径 50 mm,高 100 mm.试样的参数如表 2 所示.试验围压设置为 2 MPa,通过核磁共振设备对压缩前的试验内部孔隙分布进行测试,孔隙度分别为 Y-1[#] 为 1.51%,Y-2[#] 为 1.40%,Y-3[#] 为 1.78%,Y-4[#] 为 0.91%.

表 2 样品核磁孔隙度测量结果

试件编号	高/mm	直径/mm	密度/(g/cm ³)	孔隙度/%
岩石 Y-1 [#]	100.13	50.08	2.62	1.51
岩石 Y-2 [#]	100.15	50.04	2.62	1.40
岩石 Y-3 [#]	100.68	50.20	2.71	1.78
岩石 Y-4 [#]	100.36	50.19	2.64	0.91

2.4 试验方案

分别对岩石进行围压 2 MPa 条件下的三轴压缩试验,试验过程如下:

- 1) 首先对样品饱和蒸馏水处理,浸泡时间为 48 h,后将试样取出并擦干表面水,进行孔隙度扫描;
- 2) 孔隙度扫描后的试样进行压缩试验至岩石试件破坏并继续加载至稳定残余强度阶段.

3 不同孔隙度岩样的力学特征

相同围压条件下的三轴抗压强度随岩样初始孔隙度不同呈现明显的差别,岩石孔隙度 0.91%~1.78%,相对应的三轴峰值强度由 27.93 MPa 降低至 16.77 MPa.孔隙度相比提高了 95.6%,峰值强度降低 40%.不同孔隙度的岩石峰值强度随孔隙度的变化特征如图 1 所示.通过图 1 中数据拟合曲线可知,峰值强度与岩样孔隙度呈良好的线性关系,拟合相关系数为 0.923 5,相关性高.且随着孔隙度的增加,峰值强度的降低幅度增加.孔隙度越大对岩石强度的影响越明显,加速了岩石强度的弱化.因此在工程中有必要探明岩石内部孔隙分布状态及孔隙率的大小,对岩体工程的支护和防护措施实施具有指导意义.

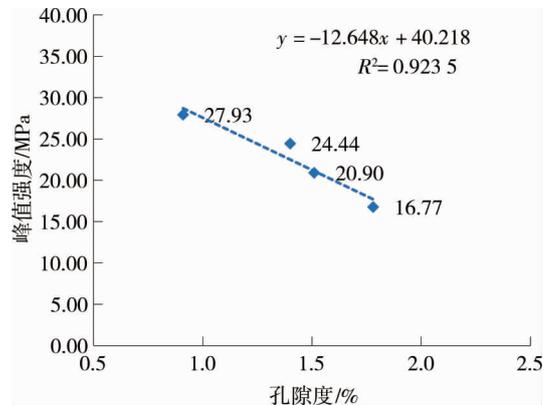


图 1 孔隙度与峰值强度的关系

4 不同孔隙度岩样的裂隙发育特征

基于岩石试样常规三轴试验,利用颗粒流程序对不同孔隙度岩样的裂隙发育过程进行追踪,通过模拟探明岩石孔隙与裂隙发育特征的关系.

加载初始阶段,岩石内部裂隙均处于稳定状态,模拟结果显示裂隙数在岩石轴向应变小于 0.2%时均为 0.不同初始孔隙度的岩样产生微裂纹所对应的轴向应变不同,随着初始孔隙度的增加该值减小,即初始孔隙度越大微裂纹产生时所对应的轴向应变越小.

如图 2 所示,相同岩性岩样三轴压缩状态下随轴压的增加微裂纹数均呈指数形式增长,初始孔隙度对裂纹数增加形式没有影响,对微裂纹产生时对应的轴向应变和最终的微裂纹数有明显影响.随初始孔隙度的增加,产生微裂纹时的轴向应变较小,岩样破坏时所产生的最终裂纹数较多.

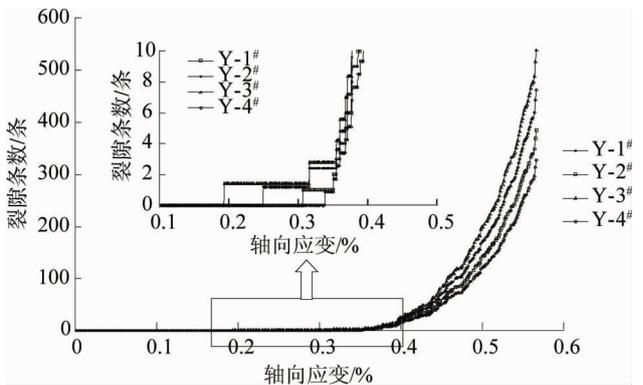


图 2 裂隙数随轴向应变的变化曲线

加载初期,裂隙随轴向应变增加速率较低,轴向应变值小于 0.2%时,岩石内无新裂隙生成,同样岩石试件在轴向应变小于 0.2%时,内部孔隙度没有明显变化,表明低轴压状态下,无新裂隙生成也没有原生裂隙的扩展活动.裂隙产生后,开始以指数函数形式的加速增加过程.Y-1#试样的 PFC 模型中颗粒体细观参数如表 3,模拟裂隙发育过程如图 3 所示.

表 3 颗粒体细观参数

参数	取值	参数	取值
最小半径/mm	0.9	最大半径/mm	1.5
黏结模量/GPa	100	平行黏结模量/GPa	100
黏结刚度比	2.5	平行黏结刚度比	2.5
颗粒间摩擦系数	0.5	初始孔隙度/%	0.66

轴向应力处于较低阶段时,岩石损伤主要由裂隙数目增加导致,如图 3 所示, σ_1 为 10.4~16.6 MPa

时,新裂隙产生,数量不断增加,裂隙所处位置较随机,岩石损伤以裂隙数增加为主要诱因.轴向应力加载至接近峰值应力时, ($\sigma_1 = 18.8 \text{ MPa}$ 以上) 微裂隙大量生成,同时贯通裂隙产生,最终导致岩石破裂,该阶段岩石损伤的主要诱因是裂隙数增加及贯通裂隙形成.

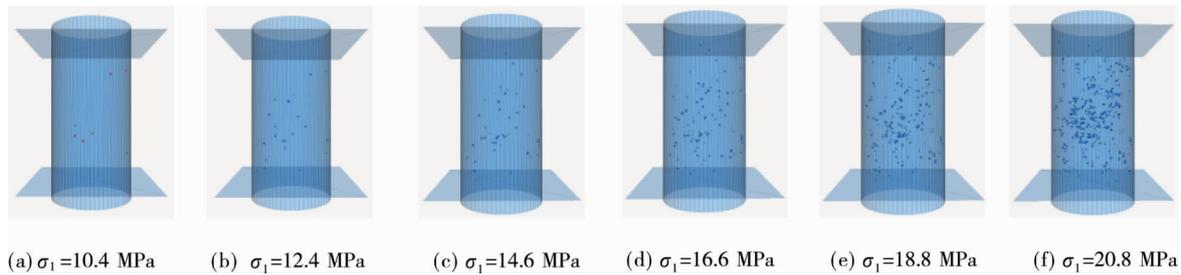


图3 三轴压缩作用下裂隙发育过程

5 结论

1) 核磁共振技术可以有效表征岩石内部裂隙发育程度与外荷载的关系.页岩三轴压缩过程中,岩石试样在低轴向应力条件下裂隙发育程度低、扩展速度慢.高轴向应力状态下呈指数函数形式增加.

2) 初始孔隙度对微裂纹产生时对应的轴向应变和最终的微裂纹数有明显影响.随初始孔隙度的增加,产生微裂纹时的轴向应变变小,岩样破坏时所产生的最终裂纹数增多.

3) 页岩三轴压缩低轴向应力阶段,岩石损伤主要是由裂隙数量增多而导致,高轴向应力条件下,岩石损伤主要是由裂隙数量及裂隙贯通引起.

4) 孔隙度越大对岩石强度的影响越明显,加速了岩石强度的弱化.工程中探明岩石内部孔隙分布状态及孔隙率的大小,对岩体工程的支护和防护措施实施具有指导意义.

参考文献:

- [1] Wawersik W R, Fairhurst C. A study of brittle rock fractures in laboratory compression experiments[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1970, 7(5): 565-575.
- [2] Dawn N T, Nicholson F H. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25: 1295-1308.
- [3] 王家禄, 高建, 刘莉.应用 CT 技术研究岩石孔隙变化特征[J].石油学报, 2009, 30(6): 887-893.
- [4] 朱红光, 谢和平, 易成, 等.岩石材料微裂隙演化的 CT 识别[J].岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1230-1238.
- [5] 李廷春, 吕海波.三轴压缩载荷作用下单裂隙扩展的 CT 实时扫描试验[J].岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 289-296.
- [6] 任建喜.三轴压缩岩石损伤扩展细观机理及其本构模型[J].煤炭学报, 2001, 26(6): 578-583.
- [7] 任建喜, 冯晓光, 刘慧.三轴压缩单一裂隙砂岩细观损伤破坏特性 CT 分析[J].西安科技大学学报, 2009, 29(3): 300-304.
- [8] 李晓娟, 倪晓慧, 孙斌祥, 等.粉砂岩三轴压缩条件下细观损伤特征的定量研究[J].煤炭学报, 2012, 37(4): 590-595.
- [9] 杨永明, 鞠杨, 刘红彬, 等.孔隙结构特征及其对岩石力学性能的影响[J].岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2031-2038.
- [10] 段连强, 刘风华, 苏永军.基于三轴压缩的岩石峰前裂隙发育及损伤规律研究[J].化工矿物与加工, 2019(10): 1-4.
- [11] 周伶俐, 伍文凯, 曾鹏.基于 PFC2D 的红砂岩破坏机制研究[J].化工矿物与加工, 2018, 47(3): 32-36.
- [12] 侯永强, 王磊, 张耀平.孔隙度变化对充填体动载冲击变形的影响[J].化工矿物与加工, 2017, 46(8): 60-62.
- [13] 冀东, 杨志军, 彭超.片麻岩破裂演化机制的颗粒流模拟研究[J].地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 825-830.
- [14] 田文岭, 杨圣奇, 方刚.煤样三轴循环卸卸载力学特征颗粒流模拟[J].煤炭学报, 2016, 41(3): 603-610.
- [15] Davies S, Packer K J. Pore-size distributions from nuclear magnetic resonance spin-lattice relaxation measurements of fluid-saturated porous solids. I. theory and simulation[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 67(6): 3163-3170.