

神东矿区不同埋深弱胶结砂岩的孔隙结构特征研究

李回贵¹, 李化敏², 许国胜¹

(1. 贵州工程应用技术学院矿业工程学院, 贵州 毕节 551700;
2. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了研究神东矿区不同埋深弱胶结砂岩的孔隙结构特征,以布尔台煤矿4种不同埋深弱胶结砂岩为研究对象,运用低场核磁共振测试仪对4种不同埋深试样进行了测试,分析了不同埋深弱胶结砂岩的 T_2 谱特征、孔径分布和孔喉分布。研究表明:4种不同埋深弱胶结砂岩(92.14~94.30 m, 118.40~120.69 m, 242.27~242.95 m, 317.86~320.33 m)的 T_2 谱特征、孔径分布和孔喉分布存在差异,孔隙率分别为39.180%、36.132%、44.782%、19.732%; T_2 谱由3个波峰逐渐转变为2个波峰,波形连续性好(孔隙连通性好);弱胶结砂岩的孔径可以分为5类:微孔、小孔、中孔、大孔和微裂隙,孔径以中小孔为主,大孔次之;弱胶结砂岩的孔喉半径以0~0.10 μm 为主,0.10~0.16 μm 次之。研究成果有助于进一步揭示我国西部地区工作面溃水溃沙的机理。

关键词: 神东矿区; 埋深; 孔隙结构; 孔喉; 弱胶结砂岩

中图分类号: TD315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051(2021)09-0126-06

Pore structure characteristics of weakly cemented sandstone with different buried depths in Shendong mining area

LI Huigui¹, LI Huamin², XU Guosheng¹

(1. College of Mining Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, China;
2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to study the pore structure characteristics of weakly cemented sandstones with different buried depths in Shendong mining area, four kinds of weakly cemented sandstones with different buried depths in Buertai coal mine are taken as the research objects. Four kinds of samples with different buried depth were tested by low field NMR. The T_2 spectrum characteristics, pore size distribution and pore throat distribution of weakly cemented sandstone with different buried depths are analyzed. The results show that there are differences in T_2 spectrum characteristics, pore size distribution and pore throat distribution of four weakly cemented sandstones with different buried depths (92.14~94.30 m, 118.40~120.69 m, 242.27~242.95 m, 317.86~320.33 m). The porosity of four weakly cemented sandstones with different buried depths are 39.180%, 36.132%, 44.782% and 19.732%, respectively. T_2 spectrum gradually changed from three peaks to two peaks, with good continuity (good pore connectivity). The pore size of weakly cemented sandstone can be divided into five types: micropore, small pore, medium pore, large pore and microfissure. The pore size is mainly small and medium-sized pore, followed by large pore. The pore throat radius of weakly cemented sandstone is mainly 0~0.10 μm , followed by 0.10~0.16 μm . The research results are helpful to further reveal the mechanism of water and sediment break in working face in western China.

Keywords: Shendong mining area; buried depth; pore structure; pore throat; weakly cemented sandstone

收稿日期: 2020-10-21 责任编辑: 刘硕

基金项目: 贵州省教育厅自然科学基金资助(编号:黔教合KY字[2019]166); 毕科联合字G[2019]5号; 高层次人才科研启动基金资助(编号:院科合字G2018011); 国家自然科学基金重点资助项目资助(编号:U1261207)

第一作者简介: 李回贵(1988—),男,江西莲花人,博士,副教授,主要从事岩石力学方面的教学和科研工作, E-mail: lihuigui1221@163.com。

引用格式: 李回贵, 李化敏, 许国胜. 神东矿区不同埋深弱胶结砂岩的孔隙结构特征研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(9): 126-131. doi:10.12075/j.issn.1004-4051.2021.09.021

神东矿区由于其特殊的沉积环境和沉积过程,造成该地区地层中存在大量的弱胶结砂岩地层,其成分特征、微观结构、孔隙结构特征及力学特征与常规砂岩有显著的差异^[1-3]。我国西部地区虽然降水少,干旱缺水,但该地区同样存在严重的水害威胁^[4-5]。砂岩的孔隙大小、孔喉大小及连通性对其自身的富水性和渗透性存在显著影响,与该地区地层的富水性及水害的形成机理有关系。

国内外学者对岩石的孔隙结构特征开展了大量的研究,取得了一系列的重要成果。周科平团队^[6-11]以砂岩、大理岩、花岗岩等为研究对象,采用 AniMR-150 核磁共振测试分析系统对冻融循环作用后、卸荷损伤后的孔隙大小、孔径分布、 T_2 谱特征进行了详细的研究;宋朝阳等^[12]以侏罗系砂岩、泥质砂岩为研究对象,采用扫描电镜对不同干湿循环次数试样的细观结构进行了研究;刘钦等^[13]以新疆哈密弱胶结砂岩为研究对象,通过氦孔隙度实验与压汞实验对弱胶结砂岩孔隙结构进行了分析;李化敏等^[14-16]采用 SEM 对神东矿区不同沉积时期砂岩的孔隙结构、大小以及孔隙分布规律进行了详细的研究;张嘉凡等^[17]以陕北矿区红砂岩为研究对象,采用 SEM 对其细观结构特性进行分析,并建立了岩石细观结构与其宏观水理特性间的联系;王苏健等^[18]采用高压压汞、核磁共振等实验测试技术对柠条塔井田不同时代地层、不同岩性砂岩微观孔隙特征进行了研究。杨鹏等^[19]、王春刚等^[20]采用压汞测试手段对锦界煤矿侏罗系砂岩和榆横北区煤层顶板砂岩的孔隙特征进行了研究。

综上所述,国内外学者采用压汞实验、扫描电镜实验和低场核磁共振实验对大理岩、花岗岩、砂岩、弱胶结砂岩等的孔隙结构特征进行了研究,但是对于神东矿区弱胶结砂岩的孔隙结构特征研究相对较少,不能满足该地区矿业工程、地质工程建设和保水采煤的基础理论需求,因此,笔者以神东矿区布尔台煤矿不同埋深弱胶结砂岩为研究对象,对其进低场核磁共振实验(NMR),分析了弱胶结砂岩的孔隙率、孔径大小及分布、孔喉半径。

1 试样采集与加工及实验方案

1.1 试样采集与加工

弱胶结砂岩试样采集于神东矿区布尔台煤矿,经过防震膜包装之后,装入岩芯盒打包运送到学校实验室,对采集的岩芯进行取芯、切割、磨平后制成 $\Phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的试样。弱胶结砂岩的试样共分为 4 组,A 组试样~D 组试样都为粗粒砂岩,试样的埋深分别为 92.14~94.30 m、118.40~120.69 m、

242.27~242.95 m、317.86~320.33 m。试样参数见表 1。

表 1 弱胶结砂岩的基本参数表
Table 1 Basic parameters of weakly cemented sandstone

试样编号	岩性	埋深/m	高度/mm	直径/mm
A1	粗粒砂岩	92.14~94.30	54.14	48.70
A2	粗粒砂岩	92.14~94.30	49.14	49.02
A3	粗粒砂岩	92.14~94.30	51.10	49.80
B1	粗粒砂岩	118.40~120.69	50.02	49.02
B2	粗粒砂岩	118.40~120.69	48.50	48.80
B3	粗粒砂岩	118.40~120.69	51.60	49.42
C1	粗粒砂岩	242.27~242.95	51.42	49.02
C2	粗粒砂岩	242.27~242.95	51.10	49.40
C3	粗粒砂岩	242.27~242.95	53.30	49.62
D1	粗粒砂岩	317.86~320.33	50.10	49.96
D2	粗粒砂岩	317.86~320.33	49.20	49.80
D3	粗粒砂岩	317.86~320.33	43.10	49.60

1.2 试验方案

NMR 试验采用苏州纽曼生产的 MesoMR23-060H-I 中尺寸核磁共振分析与成像系统,该设备的主磁场为 0.5 T,频率为 21.3 MHz。实验前需要将试件在水中真空包和 2 h,饱水压力为 100 kPa;然后运用核磁共振测试仪对 12 个不同埋深粗粒砂岩(A 组试样~D 组试样)进行 T_2 谱测试,然后运用该设备对其孔隙率及孔喉进行测试。

2 不同埋深弱胶结砂岩的 T_2 谱分布

低场核磁共振实验的 T_2 谱可以反映岩石内部的孔隙率及尺寸。 T_2 值的大小与孔隙尺寸成正相关; T_2 谱曲线谱面积与孔隙数量正相关,谱面积越大,孔隙的数量就越多;单个谱峰的面积和峰值与相应尺寸的孔隙数量正相关^[21]。

图 1 为不同埋深砂岩的 T_2 谱特征,表 2 为不同埋深砂岩的谱面积分布统计表。从表 2 中可以发现,布尔台煤矿埋深为 92.14~94.30 m 的粗粒砂岩存在 3 个波峰,第一波峰占比为 18.58%~34.53%,平均值为 26.86%;第二波峰占比为 64.70%~80.57%,平均值为 72.11%;第三波峰占比为 0.77%~1.46%,平均值为 1.03%。埋深为 118.40~120.69 m 的粗粒砂岩也存在 3 个波峰,第一波峰占比为 15.23%~20.23%,平均值为 17.65%;第二波峰占比为 79.58%~84.50%,平均值为 82.20%;第三波峰占比为 0.00%~0.27%,平均值为 0.15%。埋深为 242.27~242.95 m 和 317.86~320.33 m 的粗粒砂岩都存在 2 个波峰,第一波峰占比分别为 98.77%~99.21%和 99.05%~

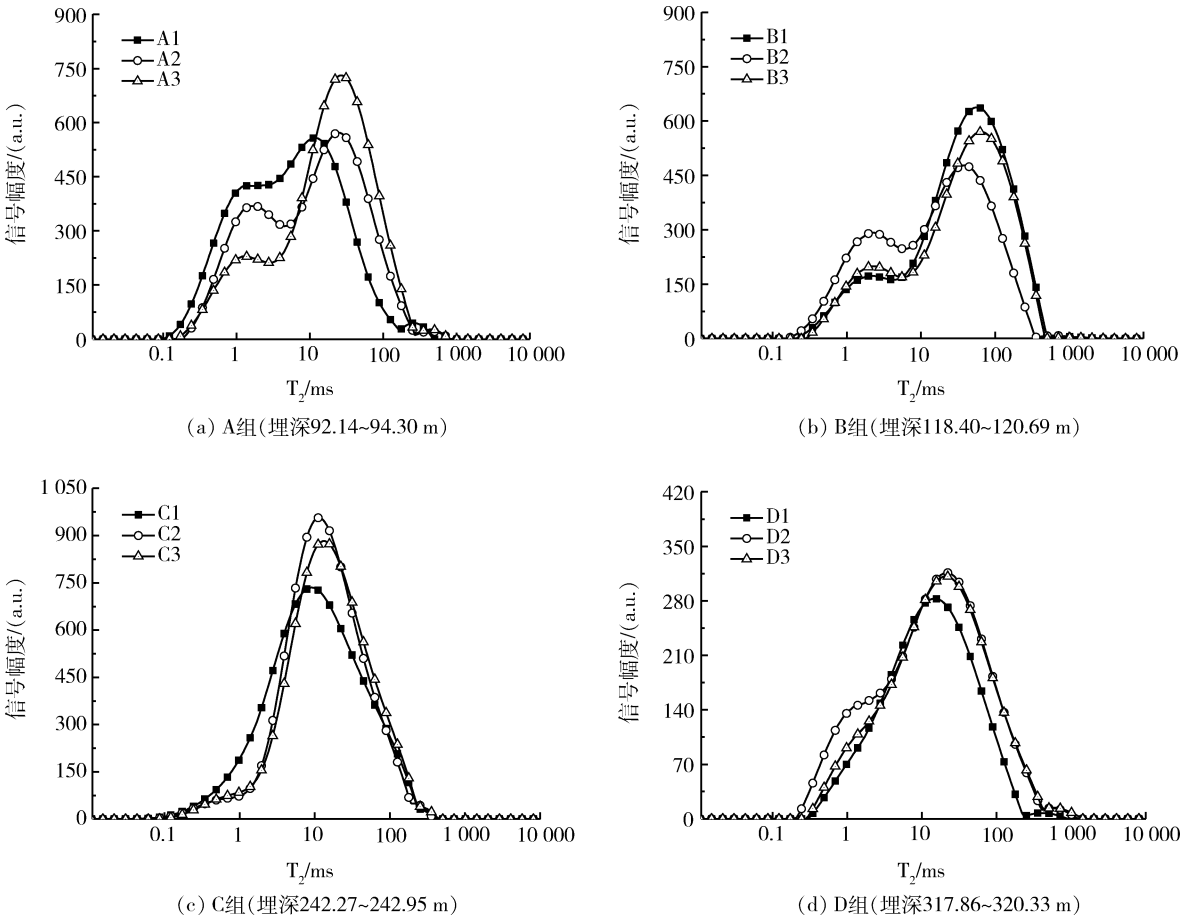


图 1 不同埋深弱胶结砂岩的 T_2 谱分布
Fig. 1 T_2 spectrum distribution of weakly cemented sandstone with different buried depths

表 2 不同埋深弱胶结砂岩的 T_2 谱面积和孔隙参数表
Table 2 T_2 spectral area and pore parameters of weakly cemented sandstone with different buried depths

试样 编号	第一波峰		第二波峰		第三波峰		孔隙率/%	
	谱面积	占比/ %	谱面积	占比/ %	谱面积	占比/ %	单个	平均
A1	9 259	27.47	23 956	71.07	491	1.46	38.149	
A2	11 279	34.53	21 135	64.70	251	0.77	38.148	39.180
A3	6 431	18.58	27 885	80.57	295	0.85	41.242	
B1	4 830	15.23	26 791	84.50	84	0.27	39.007	
B2	5 267	17.48	24 869	82.52	1	0.00	33.269	36.132
B3	5 837	20.23	22 963	79.58	53	0.18	36.120	
C1	38 004	98.77	471	1.23	—	—	44.726	
C2	38 955	99.20	316	0.80	—	—	46.036	44.782
C3	38 392	99.21	306	0.79	—	—	43.586	
D1	14 218	99.30	100	0.70	—	—	16.589	
D2	18 467	99.19	150	0.81	—	—	21.597	19.730
D3	17 071	99.05	163	0.95	—	—	21.005	

99.30%，平均值分别为 99.06%和 99.18%；第二波峰占比分别为 0.79%~1.23%和 0.70%~0.95%，平均值分别为 0.94%和 0.82%。结合以上数据分析和图 1 可知，随着埋深的逐渐增加第一波峰逐渐

减小，并与第二波峰合并成第一波峰，这主要是由于随着埋深的逐渐增加，弱胶结砂岩内部的微小孔减少，小孔和中大孔逐渐增加导致的；随着埋深的增加，最大波峰的峰点时间逐渐减小，这说明埋深对其中大孔孔径有显著的影响，孔径逐渐减小。不同埋深弱胶结砂岩最后 1 个波峰的峰点时间都很大，基本都在 600 ms 左右，这说明不同埋深弱胶结砂岩内部存在一定量的微裂隙。4 种不同埋深砂岩的 T_2 谱波形连续性很好，这说明其内部的孔隙连通性好。4 种埋深弱胶结砂岩的孔隙率分别为 39.180%、36.132%、44.782%、19.732%，这说明随着埋深逐渐变大，弱胶结砂岩的孔隙率有逐渐减小的趋势。

3 不同埋深弱胶结砂岩孔径分布分析

根据核磁共振弛豫机制，对于孔隙材料，孔隙中流体的横向弛豫速率 $1/T_2$ 可近似表示为式(1)^[11,22]。

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right)_{\text{孔隙}} \tag{1}$$

式中： S 为孔隙表面积， cm^2 ； V 为孔隙体积， cm^3 ； ρ_2 为横向表面弛豫强度， $\mu\text{m/ms}$ 。

由于孔隙半径与孔隙喉道孔径成正比，式(1)可

简化为式(2)^[11,22]。

$$\frac{1}{T_2} = \frac{\rho_2 F_s}{r} \tag{2}$$

式中: r 为孔隙半径, μm ; F_s 为几何形状因子(球状孔隙, $F_s=3$;柱状孔隙, $F_s=2$)。

根据文献[11]和文献[22],岩石类 F_s 取值为 2, ρ_2 的取值范围一般为 $1\sim10\ \mu\text{m}/\text{ms}$,本文取其中值 $5\ \mu\text{m}/\text{ms}$,代入式(2)中可以化简成式(3)。

$$r = 10T_2 \tag{3}$$

根据式(3)将不同埋深弱胶结砂岩的 T_2 谱分布图进行转化,如图 2 所示。从图 2 中可以发现,不同埋深弱胶结砂岩的孔径存在差异。砂岩为多孔介质,国内外学者对其孔隙结构进行了充分的研究,但是对于孔径划分标准还没有统一的认识,周科平等^[23]认为砂岩小孔为 $r<100\ \mu\text{m}$,中孔为 $100\ \mu\text{m}<r\leq1\ 000\ \mu\text{m}$,大孔为 $r>1\ 000\ \mu\text{m}$;李杰林等^[11]认为小孔为 $r\leq1\ \mu\text{m}$,中孔为 $1\ \mu\text{m}<r<10\ \mu\text{m}$,大孔为 $r\geq10\ \mu\text{m}$;WENG 等^[24]认为可以分为 2 类,小孔为 $r<100\ \mu\text{m}$,大孔为 $r\geq100\ \mu\text{m}$ 。笔者结合不同埋深弱胶结砂岩的孔径分布图将弱胶结砂岩的孔径分为 5 类:微孔($r\leq5\ \mu\text{m}$)、小孔($5\ \mu\text{m}<r\leq50\ \mu\text{m}$)、中孔($50\ \mu\text{m}<r\leq500\ \mu\text{m}$)、大孔($500\ \mu\text{m}<r\leq5\ 000\ \mu\text{m}$)、微裂隙($r>5\ 000\ \mu\text{m}$)。

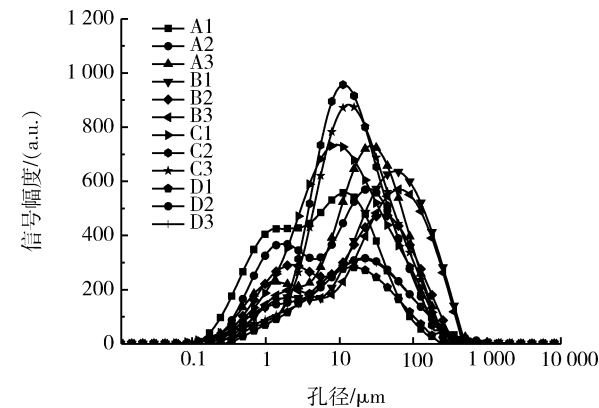


图 2 不同埋深弱胶结砂岩孔径分布图
Fig. 2 Pore size distribution of weakly cemented sandstone with different buried depths

根据以上划分标准对弱胶结砂岩的孔径进行划分,统计结果见表 3。从表 3 中可以发现,不同埋深弱胶结砂岩都明显存在微孔、小孔、中孔和大孔,但是孔径占比有所差异;埋深为 $92.14\sim94.30\ \text{m}$ 、 $118.40\sim120.69\ \text{m}$ 和 $317.86\sim320.33\ \text{m}$ 的弱胶结砂岩存在一定的微裂隙,但是埋深为 $242.27\sim242.95\ \text{m}$ 的弱胶结砂岩不存在微裂隙。从表 3 中还可以发现,不同埋深弱胶结砂岩的微孔分别为

4.40% 、 1.45% 、 2.12% 、 1.50% ,这说明微孔在弱胶结砂岩中的比例相对较小;小孔分别为 30.79% 、 20.61% 、 20.85% 、 24.37% ;中孔分别为 49.34% 、 40.30% 、 61.98% 、 53.71% ;大孔分别为 15.25% 、 37.39% 、 15.05% 、 19.76% ;微裂隙分别为 0.21% 、 0.25% 、 0% 、 0.66% 。以上数据分析说明弱胶结砂岩虽然存在 5 种不同类型的孔径,但是以中小孔为主,大孔次之,小孔、中孔和大孔之和都在 90% 以上。

表 3 按 5 类孔径划分的弱胶结砂岩岩样孔隙分布比例
Table 3 Proportional variations of pore sizes of weakly cemented sandstone specimens classified by

试样 编号	pore radius of five kinds				
	微孔	小孔	中孔	大孔	微裂隙
	($r\leq 5\ \mu\text{m}$)	($5\ \mu\text{m}<r\leq 50\ \mu\text{m}$)	($50\ \mu\text{m}<r\leq 500\ \mu\text{m}$)	($500\ \mu\text{m}<r\leq 5\ 000\ \mu\text{m}$)	($r> 5\ 000\ \mu\text{m}$)
A1	7.03	39.84	45.94	7.18	0.00
A2	3.22	32.26	47.70	16.51	0.31
A3	2.94	20.27	54.39	22.07	0.32
B1	1.13	15.13	40.41	43.06	0.27
B2	2.44	28.39	42.95	25.92	0.30
B3	0.77	18.29	37.55	43.20	0.18
C1	2.65	28.39	54.56	14.40	0.00
C2	1.97	17.83	66.59	13.62	0.00
C3	1.73	16.34	64.80	17.13	0.00
D1	0.72	24.94	58.69	15.34	0.30
D2	2.79	25.87	49.51	21.09	0.74
D3	0.98	22.28	52.94	22.86	0.95

4 不同埋深弱胶结砂孔喉分布分析

孔喉大小与弱胶结砂岩的渗透性以及孔隙连通性有关,且地下水的赋存和运移也对其有影响。研究我国西部地区弱胶结砂岩的孔喉大小有助于进一步理清该地区水的赋存、运移规律。图 3 为不同埋深弱胶结砂岩的孔喉分布图。从图 3 中可以发现,不同埋深弱胶结砂岩的孔喉以小于 $0.10\ \mu\text{m}$ 为主,分别占比 83.97% 、 63.50% 、 85.68% 和 80.52% ;孔喉半径在 $0.10\sim0.16\ \mu\text{m}$ 之间占比相对较小,分别占比为 7.18% 、 11.08% 、 6.18% 、 7.38% ;孔喉半径在 $0.16\sim0.25\ \mu\text{m}$ 之间占比与前两者相比有所减小,分别为 5.20% 、 11.39% 、 4.95% 、 6.04% ;孔喉半径在 $0.25\sim0.40\ \mu\text{m}$ 之间占比也有所减小,分别为 0.75% 、 5.09% 、 0.81% 、 1.76% ;孔喉半径大于 $0.40\ \mu\text{m}$ 的占比非常小,分别为 1.44% 、 6.64% 、 0.95% 、 2.93% 。

5 结 论

1) 布尔台煤矿埋深为 $92.14\sim94.30\ \text{m}$ 、 $118.40\sim120.69\ \text{m}$ 、 $242.27\sim242.95\ \text{m}$ 和 $317.86\sim320.33\ \text{m}$,弱胶结砂岩的孔隙率分别为 39.180% 、 36.132% 、

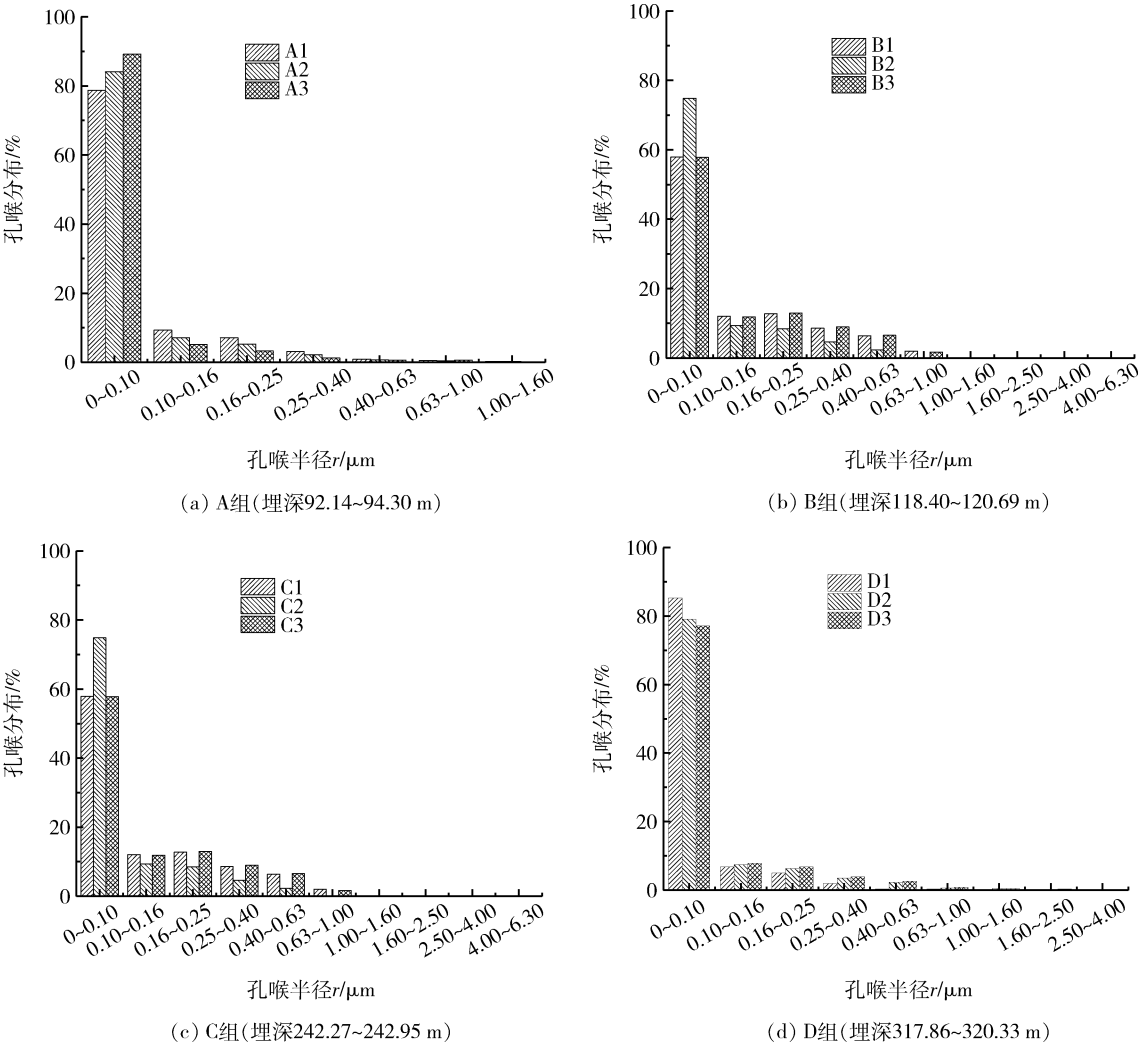


图 3 不同埋深弱胶结砂岩孔喉分布图
Fig. 3 Pore throat distribution of weakly cemented sandstone with different buried depths

44.782%、19.732%，随着埋深的增加有减小的趋势。

2) 4 种不同埋深砂岩的 T_2 谱分布存在显著差异,随着埋深的增加, T_2 谱由 3 个波峰向 2 个波峰转变,第一波峰和第二波峰逐渐合并在一起, T_2 谱的波形连续性好,这说明岩石内部不同直径的孔隙连通性好。

3) 弱胶结砂岩孔径可以分为 5 类:微孔($r \leq 5 \mu\text{m}$)、小孔($5 \mu\text{m} < r \leq 50 \mu\text{m}$)、中孔($50 \mu\text{m} < r \leq 500 \mu\text{m}$)、大孔($500 \mu\text{m} < r \leq 5\,000 \mu\text{m}$)、微裂隙($r > 5\,000 \mu\text{m}$),孔径以中小孔为主,大孔次之。

4) 不同埋深弱胶结砂岩的孔喉半径存在差异,但孔喉半径都是以小于 $0.10 \mu\text{m}$ 为主, $0.10 \sim 0.16 \mu\text{m}$ 次之。

参考文献

[1] 李回贵,李化敏,汪华君,等.弱胶结砂岩的物理力学特征及定义[J].煤炭科学技术,2017,45(10):1-7.
LI Huigui, LI Huamin, WANG Huajun, et al. Physical and

mechanical characteristics and definition of weakly cemented sandstone[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 1-7.
[2] 孙利辉,纪洪广,杨本生.西部典型矿区弱胶结地层岩石的物理力学性能特征[J].煤炭学报,2019,44(3):865-873.
SUN Lihui, JI Hongguang, YANG Bensheng. Physical and mechanical characteristic of rocks with weakly cemented strata in Western representative mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 865-873.
[3] 李化敏,李回贵,宋桂军,等.神东矿区煤系地层岩石物理力学性质[J].煤炭学报,2016,41(11):2661-2671.
LI Huamin, LI Huigui, SONG Guijun, et al. Physical and mechanical properties of the coal-bearing strata rock in Shendong coal field[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2661-2671.
[4] 徐智敏,高尚,孙亚军,等.西部典型侏罗系富煤区含水介质条件与水动力学特征[J].煤炭学报,2017,42(2):444-451.
XU Zhimin, GAO Shang, SUN Yajun, et al. A study of conditions of water bearing media and water dynamics in typical Jurassic coal rich regions in western China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 444-451.
[5] 甄战战.大南湖侏罗系弱胶结含水层动态及介质特征研究

[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.

[6] LIN Yun,ZHOU Keping,GAO Feng,et al. Damage evolution behavior and constitutive model of sandstone subjected to chemical corrosion[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2019,78:5991-6002.

[7] ZHOU Keping,LI Bin,LI Jielin,et al. Microscopic damage and dynamic mechanical properties of rock under freeze-thaw environment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2015,25:1254-1261.

[8] LI Jielin,ZHOU Keping,LIU Weijie,et al. NMR research on deterioration characteristics of microscopic structure of sandstones in freeze-thaw cycles[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2016,26:2997-3003.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 李杰林,朱龙胤,周科平,等. 冻融作用下砂岩孔隙结构损伤特征研究[J]. 岩土力学,2019,40(9):3524-3532.

LI Jielin,ZHU Longyin,ZHOU Keping,et al. Damage characteristics of sandstone pore structure under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(9):3524-3532.

[12] 宋朝阳,纪洪广,蒋华,等. 干湿循环作用下弱胶结砂岩声发射特征及其细观劣化机理[J]. 煤炭学报,2018,43(S1):96-103.

SONG Zhaoyang,JI Hongguang,JIANG Hua,et al. Influence of wetting-drying cycles on acoustic emission characteristics and micro-structure deterioration of weak cementation stratum[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(S1):96-103.

[13] 刘钦,孙亚军,徐智敏,等. 侏罗系弱胶结砂岩孔隙介质特征及其保水采煤意义[J]. 煤炭学报,2019,44(3):857-864.

LIU Qin,SUN Yajun,XU Zhimin,et al. Pore media characteristics of Jurassic weak cemented sandstone and its significance for water-preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(3):857-864.

[14] 李化敏,李回贵,PENG S Pyd,等. 神东矿区岩石物理力学性质[M]. 北京:科学出版社,2018.

[15] LI Huigui,LI Huamin,GAO Baobin,et al. Study on pore characteristics and microstructure of sandstones with different grain sizes[J]. Journal of Applied Geophysics,2017,136:364-371.

[16] 李化敏,梁亚飞,陈江峰,等. 神东矿区砂岩孔隙结构特征及与其物理力学性质的关系[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2018,37(4):9-16.

LI Huamin,LIANG Yafei,CHEN Jiangfeng,et al. Relationship between pore structural characteristics and physical-mechanical properties of sandstone in Shendong mining area[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2018,37(4):9-16.

[17] 张嘉凡,程树范,王焕,等. 西部弱胶结软岩细观结构及水理特性试验[J]. 煤田地质与勘探,2020,48(3):116-121.

ZHANG Jiafan,CHENG Shufan,WANG Huan,et al. Experiment of mesostructured and hydrologic characteristics of weakly cemented soft rock in Western China[J]. Coal Geology & Exploration,2020,48(3):116-121.

[18] 王苏健,冯洁,侯恩科,等. 柠条塔井田砂岩微观孔隙结构类型及其对含水层富水性的影响[J/OL]. 煤炭学报,2020. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20200308.1129.002.html>.

WANG Sujian,FENG Jie,HOU Enke,et al. Microscopic pore structure types of sandstone and its effects on aquifer water abundance in Ningtiaota coal mine[J/OL]. Journal of China Coal Society,2020. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20200308.1129.002.html>.

[19] 杨鹏,杨伟峰,马荣坤. 锦界煤矿侏罗系砂岩微观孔隙结构类型及其富水性研究[J/OL]. 煤炭科学技术,2020. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20200730.1546.012.html>.

YANG Peng,YANG Weifeng,MA Rongkun. Study on microscopic pore structure types of Jurassic sandstone and its water abundance in Jinjie coal mine[J/OL]. Coal Science and Technology,2020. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20200730.1546.012.html>.

[20] 王春刚,方刚. 榆横北区煤层顶板含水层岩石微观特征研究[J]. 煤矿安全,2019,50(7):31-36,41.

WANG Chungang,FANG Gang. Study on rock microscopic characteristics of roof aquifers in northern Yuheng mine area[J]. Safety in Coal Mines,2019,50(7):31-36,41.

[21] 周科平,胡振襄,高峰,等. 基于核磁共振技术的大理岩三轴压缩损伤规律研究[J]. 岩土力学,2014,35(11):3117-3122.

ZHOU Keping,HU Zhenxiang,GAO Feng,et al. Study of marble damage laws under triaxial compression condition based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(11):3117-3122.

[22] 李杰林,刘汉文,周科平,等. 冻融作用下岩石细观结构损伤的低场核磁共振研究[J]. 西安科技大学学报,2018,38(2):266-272.

LI Jielin,LIU Hanwen,ZHOU Keping,et al. An LF-NMR study of the micro-structural deterioration of rocks under the effect of freeze-thaw cycles[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2018,38(2):266-272.

[23] 周科平,薛轲,刘涛影. 微波作用下砂岩孔隙结构演化及强度劣化的试验研究[J]. 矿冶工程,2020,40(2):6-11.

ZHOU Keping,XUE Ke,LIU Taoying. Pore structure evolution and strength degradation of sandstone after microwave treatment[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2020,40(2):6-11.

[24] WENG Lei,WU Zhijun,LI Xibing. Mesodamage characteristics of rock with a pre-cut opening under combined static-dynamic loads: a nuclear magnetic resonance (NMR) investigation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018,51:2339-2354.