



移动扫码阅读

冯龙飞,王双明,王海,等.彬长矿区典型顶板水害矿井洛河组砂岩微观孔隙特征研究[J].煤炭科学技术,2023,51(8):208-218.
FENG Longfei, WANG Shuangming, WANG Hai, et al. Micro pore characteristics of Luohe aquifer sandstone in Binchang Mining Area typical roof water hazard mines[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 208-218.

彬长矿区典型顶板水害矿井洛河组砂岩微观孔隙特征研究

冯龙飞^{1,2},王双明^{1,3},王海²,李超峰²,张跃宏²

(1. 煤炭科学研究总院,北京 100013;2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司,陕西西安 710054;
3. 西安科技大学 地质与环境学院,陕西西安 710054)

摘要:黄陇煤田开采面临巨厚洛河组砂岩顶板水害的威胁。针对彬长矿区高家堡煤矿洛河组砂岩骨架的微观孔隙特征展开实验室研究,综合运用 XRD 衍射,铸体薄片、扫描电镜研究了砂岩骨架颗粒的孔隙类型,采用覆压孔渗探究其不同压力下的孔隙率和渗透率变化特征,联合高压压汞和核磁共振手段表征了砂岩岩心的孔喉半径大小,结合 X 射线三维 CT 扫描对砂岩内部大于 9 μm 的孔隙进行精细量化表征,结果表明:①中粒砂岩骨架颗粒大,孔隙类型主要以剩余粒间孔为主,少量粒间溶孔,而细粒砂岩骨架颗粒小,颗粒间多由黏土矿物填充,为次生溶蚀粒间孔,少量粒内溶孔,孔隙发育较小;②中粒砂岩中的大孔孔喉半径介于 0.61~4.94 μm,累积分布频率达到 48%,而细粒砂岩中的大孔孔喉半径介于 0.188~0.683 μm,累积分布频率达到 47%,说明中粒砂岩的孔喉半径较大,更有利于地下水存储和运移;③CT 显示中粒砂岩平均面孔隙率为 7.081%,细粒砂岩平均面孔隙率为 2.032%,中粒砂岩内高度发育的大孔(等效孔隙直径>180 μm)和微孔贡献了较高的面孔隙率,结合较大的孔喉半径,宏观表现较高的渗透性,两者的微观孔隙特征与现场对应含水层的富水层评价相一致。研究成果可为洛河组砂岩顶板水害防治提供基础参考。

关键词:洛河组砂岩;微观孔隙;含水层;压汞;核磁共振;渗透性

中图分类号:TD12 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2023)08-0208-11

Micro pore characteristics of Luohe aquifer sandstone in Binchang Mining Area typical roof water hazard mines

FENG Longfei^{1,2}, WANG Shuangming^{1,3}, WANG Hai², LI Chaofeng², ZHANG Yuehong²

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710054, China; 3. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The mining of Huanglong Coalfield faces a serious threat from roof sandstone water disaster of the extremely thick Luohe Formation. A laboratory study on the microscopic pore characteristics of the sandstone of the Luohe Formation in the Gaojiapu Coal Mine, Binchang Mining Area were carried out using various methods. XRD diffraction, casting thin sections, and scanning electron microscopy were combined to study the pore types of the sandstone particles. Overburden porosimeter was used to illustrate the variation characteristics of porosity and permeability under different confining pressures. High-pressure mercury injection and nuclear magnetic resonance techniques were used to characterize the pore-throat radius of the sandstone core, and X-ray three-dimensional CT scanning was used to quantitatively characterize sandstone pores larger than 9 μm. The results show that, ①the sandstone particles of medium-grained sandstone are larger, and the pore types are mainly residual intergranular pores with a small amount of intergranular dissolved pores, while the particles of fine-grained sandstone are smaller, and the intergranular pores are mostly filled with clay minerals, secondary dissolution intergranular pores, and a smaller degree of pore development.; ②The pore throat radius of large pores in medium-grained sandstone ranges from 0.61 to 4.94 μm, with a cumulative distribution frequency of 48%, while in fine-grained sandstone, the pore-throat radius ranges from 0.188 to

收稿日期:2022-08-25 责任编辑:周子博 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1016

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52004326);陕西省 2023 年自然科学基金基础研究计划资助项目(2023-JC-QN-0459)

作者简介:冯龙飞(1992—),男,河南登封人,博士研究生。E-mail: flf201122@126.com

通讯作者:王双明(1955—),男,陕西岐山人,中国工程院院士。E-mail: sxmtwsm@163.com

0.683 μm , with a cumulative distribution frequency of 47%, indicating that medium-grained sandstone has larger pore-throat radius, which are more conducive to groundwater storage and migration.; ③CT scanning shows that the average surface porosity of medium-grained sandstone is 7.081%, and that of fine grained sandstone is 2.032%. The highly developed macropores (equivalent pore diameter > 180 μm) and micropores contribute to a higher surface porosity. Combined with a larger pore throat radius, the medium-grained sandstone presents a higher permeability. The microscopic pore characteristics of the two types of sandstone are consistent with the on-site evaluation result of the water yield property of the corresponding aquifer. The research findings can provide a basic reference for the prevention and control of water disasters from the sandstone roof of the Luohe Formation.

Key words: Luohe Formation sandstone; microscopic pore; aquifer; mercury injection; nuclear magnetic resonance; permeability

0 引 言

鄂尔多斯盆地侏罗纪煤炭资源是我国重要的主采煤层^[1],其中黄陇煤田开采面临巨厚洛河组砂岩顶板水害威胁。彬长矿区厚煤层综放开采时导水裂隙带高度大,现场实测验证已发育至厚层洛河组砂岩含水层下段^[2-7],矿井涌水量普遍较高。针对洛河组砂岩含水层特征已有诸多研究,靳德武等^[4]研究了巨厚砂岩含水层对彬长矿区开采的影响,并进行了分区分级,提出含水层“楔入比”概念及相应的减水模式;李超峰等^[5]对洛河组砂岩层水文地质条件进行了精细化勘探,采用综合富水性指数法对承压含水层垂向富水性进行精细化评价,认为导水裂隙带部分楔入洛河组下段地层,并未沟通上段含水层,对保水采煤有利。郭小铭等^[6]通过探查,得出洛河组含水层渗透性随地层深度增加而呈负指数降低,上段单位涌水量约为下段的7倍,垂向非均质性较强,提出以控制含水层上段水位降深为核心,允许导高适当波及含水层下段的“控水开采”技术;刘英峰等^[7]以大佛寺煤矿为试验矿井,采用钻孔电视系统和钻孔简易水文观测法,探测深埋特厚煤层综放开采导水裂缝带发育高度为170.80~192.12 m;徐拴海等^[8]开展了超细水泥浆液在洛河组砂岩中的注浆试验,初步统计洛河组砂岩内部孔隙为7~15 μm ,超细水泥浆液无法注入。

高家堡煤矿为彬长矿区典型的顶板水害矿井,其洛河组地层厚度为区域最大,首采区平均400.35 m,最大厚度可达509.93 m,首采区水压高达7 MPa,与主采煤层间距不足百米,实测最大涌水量接近3 500 m^3/h ,因此围绕高家堡的顶板水害已开展诸多研究工作。杜文斌等^[9]通过抽水和水力连通试验研究了高家堡井田洛河组含水层的富水性和连通性,洛河组中段或中上段富水性强,下段富水性弱,两者的水力联系较弱;孙福勋^[10]研究了高家堡煤矿的导水裂隙带发育高度,并基于砂岩和泥岩的厚度特征开展了顶板富水性分区评价和预测;李金龙等^[11]采用水平

钻孔注浆开展了高家堡煤矿煤层顶板注浆加固堵水实践,探查顶板裂隙发育高度已超过210 m,裂隙发育角度达到80°以上;杨静^[12]研究了地面水平定向钻孔注浆封堵覆岩导水裂隙的合理层位,总结了钻进过程中不同分区裂隙特征及注浆封堵的难易程度,得出优选注浆层位的原则;李超峰^[13]以高家堡井田为研究区,系统深入开展了巨厚洛河组砂岩含水层垂向水文地质特征差异性,揭示含水层向工作面充水机理并开展工作面涌水量预测;林磊^[14]研究了高家堡煤矿洛河组砂岩的沉积控水规律,将洛河组砂岩分为风成砂岩、水成砂岩和风水交替作用砂岩3类,其中钙质/泥质胶结风成砂岩孔喉半径在4~16 μm 较为集中,整体孔喉特征以大~中孔喉为主;风水交替作用砂岩整体孔喉以小微孔为主,大中孔喉分布较少;水成砂岩整体孔喉以小微孔为主,渗透性最差;杜二宝^[15]针对高家堡煤矿保水采煤的难题提出了短壁协调充填开采控制覆岩变形的技术,并提出了关键参数的确定方法。

巨厚洛河组砂岩含水层是下伏侏罗纪煤层开采后矿井涌水的主体,洛河组砂岩自身的多孔介质是顶板承压水赋存和流动的主要通道,因此掌握洛河组砂岩微观孔隙结构是实现顶板水防治的重要基础条件。针对多孔介质的裂隙-孔隙微观特征,学者主要运用高压压汞和核磁共振等手段联合对页岩储层^[16-17]、砂岩储层^[18-20]和煤层^[21-22]进行微观孔隙结构定量表征及成因分析;此外,三维CT扫描^[23-25]也是岩心内部裂隙-孔隙精细表征的重要手段。

综上,现有针对彬长矿区洛河组砂岩的微观孔隙特征研究较少,因此笔者针对高家堡煤矿洛河组广泛赋存的中粒砂岩和细粒砂岩岩心进行精细化研究,综合运用XRD衍射、铸体薄片、扫描电镜、覆压孔隙、高压压汞、核磁共振、X射线三维CT等研究手段对洛河组砂岩的微观孔隙进行定量可视化表征,对照洛河组上下分段的富水性评价结果,以为煤矿巨厚洛河组砂岩顶板水的防治提供基础参考。

1 样品特征及试验方法

1.1 样品特征

研究样品取自彬长矿区高家堡煤矿一盘区洛河组砂岩,选取广泛分布的中粒砂岩和细粒砂岩,其中中粒砂岩取自洛河组上段,细粒砂岩取自洛河组下段,如图 1 所示。主要由浅红、棕红色块状粗砂、中砂、细砂和极细砂组成。中粒砂岩颗粒粒度主要以中砂、细砂为主,其中中砂 32.12%,细砂 48.73%;细粒砂岩的颗粒粒度主要以细砂、极细砂为主,细砂 34.51%,极细砂 49.11%。



图 1 洛河组砂岩样品

Fig.1 Sample of Luohe Formation sandstone

通过 XRD 成分分析得到洛河组砂岩岩心的矿物成分(表 1),细粒砂岩样品的石英含量 51.4%,长

石含量 29.9%,还有少量的方解石、伊利石、白云石等,且蒙脱石成分较多,含量为 9.9%;中粒砂岩样品石英含量 58.3%,长石含量 26.5%,还有少量的方解石、伊利石、赤铁矿等,白云石较多,含量为 5.7%。

1.2 研究方法

运用薄片鉴定、场发射扫描电镜, CMS-300 型孔渗、高压压汞、核磁共振、X 射线三维扫描等手段对洛河组砂岩样品联合测试,达到对砂岩含水层孔隙特征的定量可视化研究。其中采用 PoreMaster33 型压汞仪,获得进汞、退汞曲线和各个参数,进汞压力范围 0 ~ 206.8 MPa;对应的孔喉半径区间为: 0.003 6 ~ 214 μm ;核磁共振试验采用纽迈公司 MesoMR23-60H-I 低场核磁共振仪器,分别测量砂岩样品的饱和水和束缚水状态下的 T_2 谱,研究砂岩中流体的可动性,两次核磁共振采用相同参数,CPMG 脉冲序列、回波间隔 0.1 ms,等待时间 1.5 s,扫描次数 64 次;进一步采用 nanoVoxel 4000 型 X 射线三维显微镜,对岩心进行 360° 旋转扫描,得到大量 X 射线衰减图像重构出三维立体 CT 图像以反映出孔隙结构。测试曝光时间 0.5 s,测试电压 180.0 kV,测试电流 200.0 μA ,扫描样品截面半径为 25 mm,其分辨率 9 μm 。

表 1 岩心成分分析

Table 1 Core composition analysis

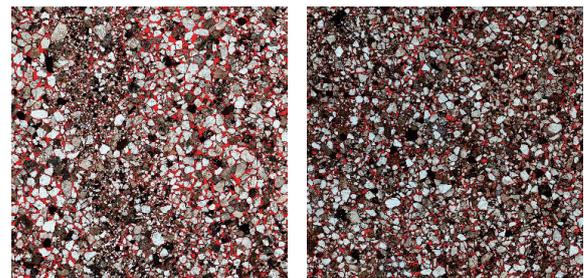
岩性	质量分数/%										
	石英	斜长石	钾长石	方解石	伊利石	白云石	绿泥石	闪石	赤铁矿	蒙脱石	铁白云石
细粒砂岩	51.4	17.9	12.0	2.2	1.9	0	1.7	0	0.9	9.9	2.1
中粒砂岩	58.3	19.2	7.3	3.9	2.4	5.7	2.2	0.7	0.3	0	0

2 洛河组砂岩孔隙结构特征

2.1 孔隙类型

由图 2—图 4 的薄片和扫描电镜测试结果看出,中粒砂岩颗粒排列松散,粒径主体 200 ~ 500 μm ,面孔隙率为 12.5% ~ 14.23%,平均孔隙直径达到 95.95 μm ,剩余粒间孔发育,部分颗粒被溶蚀。粒间少量黏土矿物和方解石胶结物混杂产出。孔隙发育较好,孔隙类型以剩余粒间孔为主,少量粒间溶孔。成岩自生矿物由黏土矿物和方解石等组成,少量自生石英,主要呈孔隙充填式产出。剩余粒间孔发育,孔隙直径 10 ~ 80 μm ,少量颗粒不规则溶蚀,少量黏土矿物和方解石胶结。放大 600 倍,剩余粒间孔发育,孔隙直径 5 ~ 30 μm ;进一步放大至 1 000 倍,孔隙直径 5 ~ 30 μm 。

细粒砂岩颗粒排列相对紧密,粒径 100 ~ 300 μm ,面孔隙率为 6.03% ~ 7.14%,平均孔隙直径达到 69.43 μm ,较多黏土矿物和方解石混杂产出。孔隙类型以溶蚀粒间孔为主,少量粒内溶孔。成岩自生矿物由黏土矿物和方解石等组成,主要呈孔隙充填式产出。溶



(a) 中粒砂岩

(b) 细粒砂岩

图 2 岩心薄片孔隙识别(红色表示孔隙)

Fig.2 Core slice porosity identification (red indicates porosity)

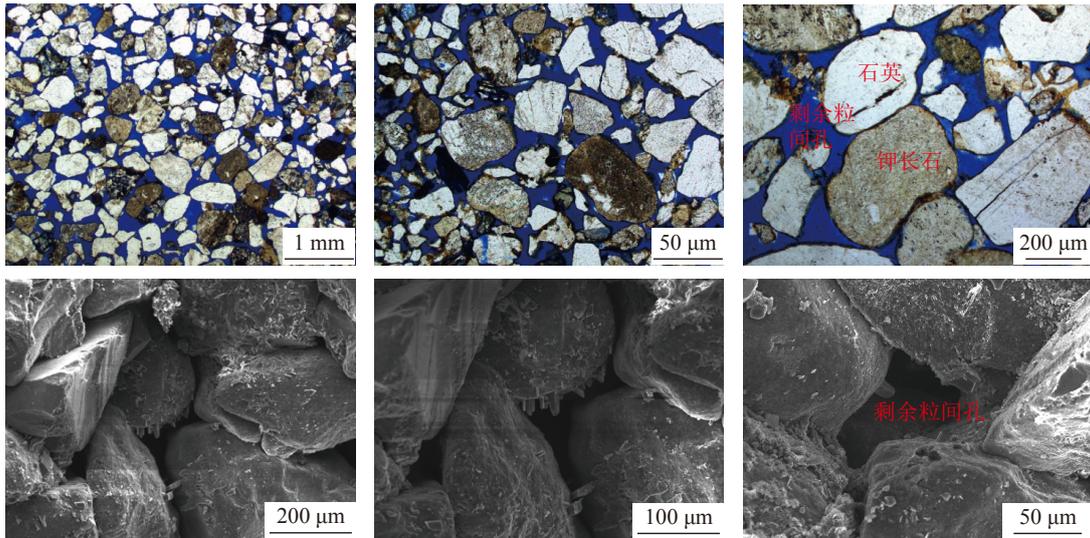


图 3 中粒砂岩孔隙类型薄片(上)和扫描电镜(下)照片

Fig.3 Medium sandstone pore type thin section (upper) and scanning electron microscope (lower) photos

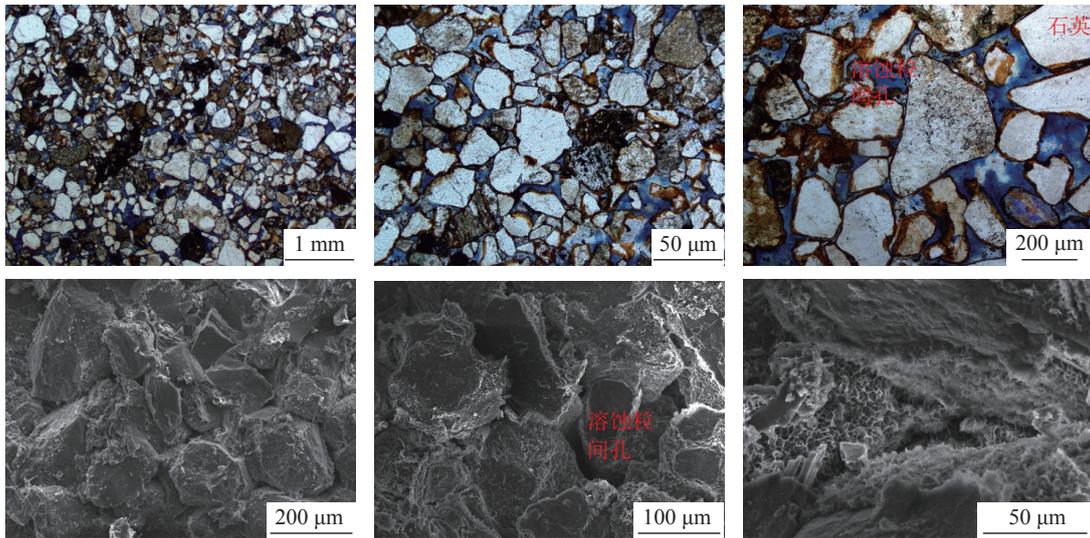


图 4 细粒砂岩孔隙类型薄片(上)和扫描电镜(下)照片

Fig.4 Thin sandstone pore type thin section (upper) and scanning electron microscope (lower) photos

蚀粒间孔发育,孔隙直径 $5\sim 30\ \mu\text{m}$,少量颗粒溶蚀,粒表、粒间较多黏土矿物和方解石胶结。进一步放大至1500倍,溶蚀粒间孔孔隙直径 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 。

通过对比发现,中粒砂岩骨架颗粒相对细粒砂岩较大,且多为原生粒间孔,孔隙发育好,而细粒砂岩骨架颗粒小,颗粒间多由黏土矿物填充,为次生溶蚀粒间孔,孔隙发育较差。

2.2 覆压作用下孔渗变化特征

孔渗测试结果见表2,中粒砂岩和细粒砂岩的常压孔隙率分别为18.26%和16.1%,比较接近,但是气测渗透率相差较大,文献[26]对比了同一岩心气测渗透率和水测渗透率的差异,指出由于微孔束缚水的存在,水测渗透率明显小于气测渗透率,因此实际

地下水在中粒砂岩和细粒砂岩中的渗透率都偏小。进一步开展不同覆压下岩心的渗透率变化,如图5所示,随着覆压的增大,中粒砂岩整体的孔隙率和渗透率不断减小并趋于稳定;而细粒砂岩随覆压的增大,孔隙率和渗透率不断较小;覆压增大压缩了骨架颗粒间的孔隙,而煤矿开采后采场围岩会由三轴应力状态卸压,洛河组砂岩的孔隙率会增大,渗透率也会随采动卸压增大,但是在地层破坏前渗透率增大幅度有限,砂岩含水层会发生弹性释水。

2.3 高压压汞表征的孔喉分布特征

高压压汞测试结果如表3和图6所示,中粒砂岩和细粒砂岩整体孔隙率比较接近,最大汞饱和度也接近。但是退汞效率和排驱压力相差巨大,排驱

表 2 岩心孔渗测试结果

Table 2 Core porosity and permeability test results

岩性	岩样长度/cm	直径/cm	常压孔隙率/%	气测渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
中粒砂岩	4.881	2.53	18.26	110.6154
细粒砂岩	4.666	2.526	16.1	1.25419

压力表示非湿润相开始连续进入岩样最大喉道时对应的毛管压力。中粒砂岩的排驱压力是细粒砂岩十分之一,说明中粒砂岩的最大喉道尺寸是细粒砂岩

的 10 倍。退汞效率上中粒砂岩也明显大于细粒砂岩,主要是由于细粒砂岩的喉道更狭小,液态汞受到毛细力的作用更为明显,导致退汞以后残留于孔隙的汞比较多。

当同样进汞 50% 时,中粒砂岩所对应的毛管压力 1.482 MPa 明显小于细粒砂岩的 3.741 MPa。其中,中粒砂岩的孔喉半径分布范围为 0.003 55 ~ 5.34 μm ,而细粒砂岩的孔喉分布为 0.003 55 ~ 0.618 6 μm ,中粒砂岩的分布范围更广,所以喉道半径的变异系数更大。

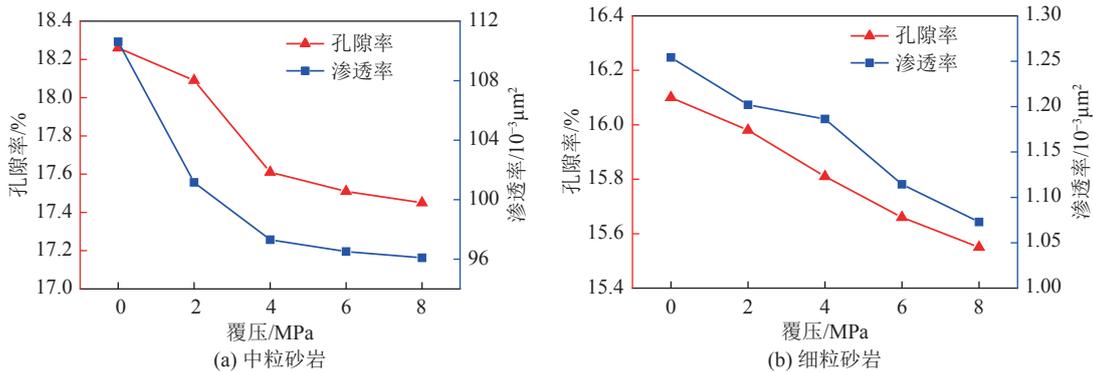


图 5 不同覆压下岩石孔隙率和渗透率变化曲线

Fig.5 Variation curves of rock porosity and permeability under different overburden pressures

表 3 岩心压汞测试结果

Table 3 Core mercury injection test results

岩性	岩样体积/ cm^3	孔隙率/%	最大汞饱和度/%	退汞效率/%	变异系数	饱和中值压力/MPa	排驱压力/MPa
中粒砂岩	24.50	17.42	93.68	24.47	19.58	1.482	0.172
细粒砂岩	23.44	16.20	93.06	15.8	10.25	3.741	1.500

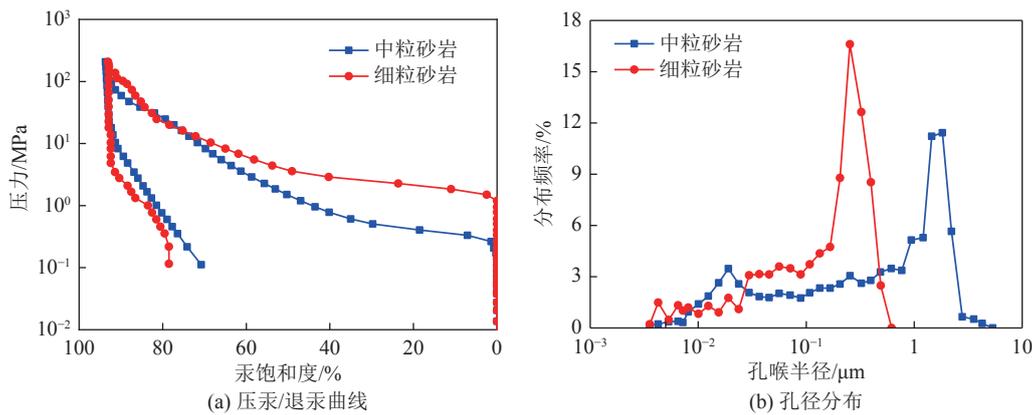


图 6 压汞曲线形态及孔径分布特征

Fig.6 Morphology and pore size distribution characteristics of mercury pressure curve

中粒砂岩内分布频率最高的孔喉半径为 1.454 ~ 2.792 μm , 累计频率达到 28.29%; 细粒砂岩内分布频率最高的孔喉半径为 0.205 ~ 0.324 μm , 累计频率达到 25.39%, 显然中粒砂岩的孔隙发育程度更好, 孔喉半径较大, 更有利于地下水的渗流。结合薄片和扫

描电镜的结果, 两者的孔隙类型及孔间填充物的不同造成了地下水渗流的差异。

2.4 核磁共振表征的孔隙分布特征

根据核磁共振理论, 岩石饱和单相流体的核磁共振 T_2 谱可以反映其内部孔隙大小及比例图 7

[26]。图 8a 反映了中粒砂岩和细粒砂岩的 T_2 谱分布，其中中粒砂岩 T_2 谱为单峰分布，分布范围为 5.57 ~ 372.76 ms，孔隙分布相对集中，孔隙类型为剩余粒间孔；岩性主要为中砂和细砂为主，而且成分分析显示中粒砂岩的黏土矿物很少；而细粒砂岩 T_2 谱为双峰分布（以 10 ms 为界），左峰介于 2.68 ~ 10 ms，右峰介于 10 ~ 258.64 ms，孔隙类型以溶蚀粒间孔为主，少量粒内溶孔；岩性主要为细砂和极细砂为主，颗粒间填充由较多的黏土矿物，右峰主要对应孔径较大的溶蚀粒间孔，与左峰的连通性较差。

研究表明[27] 利用压汞和核磁的联合测试可以弥补单一手段的缺陷，从而更好的确定岩心的孔隙结构。由压汞法测毛管压力曲线的原理，从毛管压力曲线可以得到储层岩石孔隙喉道的大小及与其联通的孔隙体积分布，而岩心饱和水的核磁共振 T_2 谱可以评价孔隙大小和对应的孔隙体积分布。两种测量手段反映的孔隙分布相同，因此建立 T_2 弛豫时间与喉道半径的关系就可将核磁共振 T_2 分布转换为孔喉半径分布。对饱和水的砂岩，弛豫时间与喉道半径 r

的关系[20] 为

$$T_2 = \frac{(c_1 r)^n}{\rho_2 F_s} \quad (1)$$

式中， c_1 为平均孔喉比； n 为幂指数； F_s 为孔隙形状因子； ρ_2 为横向表面弛豫强度，取决于孔隙表面性质和矿物组成的大小和饱和流体性质， $\mu\text{m}/\text{ms}$ 。

令 $C = \frac{(\rho_2 F_s)^{1/n}}{c_1}$ ，则式(1)可进一步转换为

$$r = CT_2^{1/n} \quad (2)$$

因此，根据压汞和核磁联合测试变可求得 C 和 n 的值，即可将岩心饱和水的 T_2 弛豫时间分布转换为孔喉半径分布曲线。

如图 7a 所示，绘制核磁共振 T_2 弛豫时间和高压压汞孔喉半径的累积分布曲线，在累积分布频率 < 最大进汞饱和度的区域，任意喉道半径为 $r(i)$ 时累积分布频率为 $S(i)$ ，进一步插值得到累积分布频率为 $S(i)$ 时的弛豫时间 $T_2(i)$ 。拟合得到式 (2) 中的 C 和 n 的值，如图 7b 所示。最终得到如图 8b 所示的岩心核磁共振 T_2 谱换算的孔喉分布。

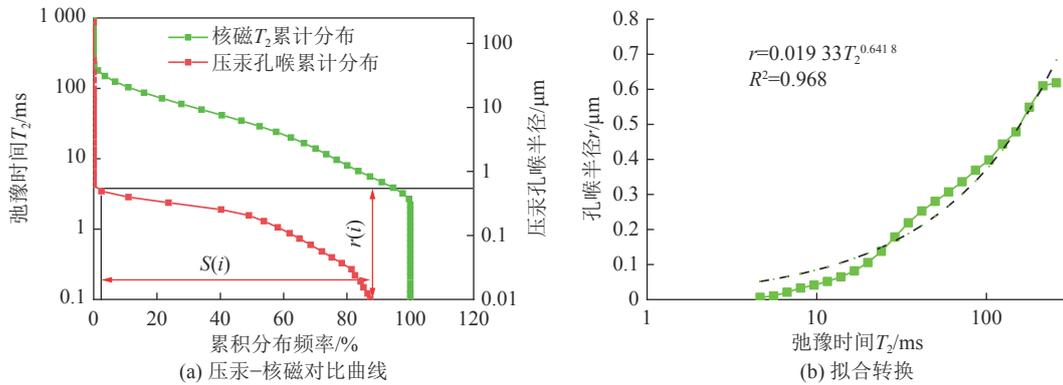


图 7 细粒砂岩岩心核磁 T_2 弛豫时间-压汞孔喉的分布频率曲线

Fig.7 T_2 relaxation time distribution frequency curve of core NMR and mercury injection pore throat

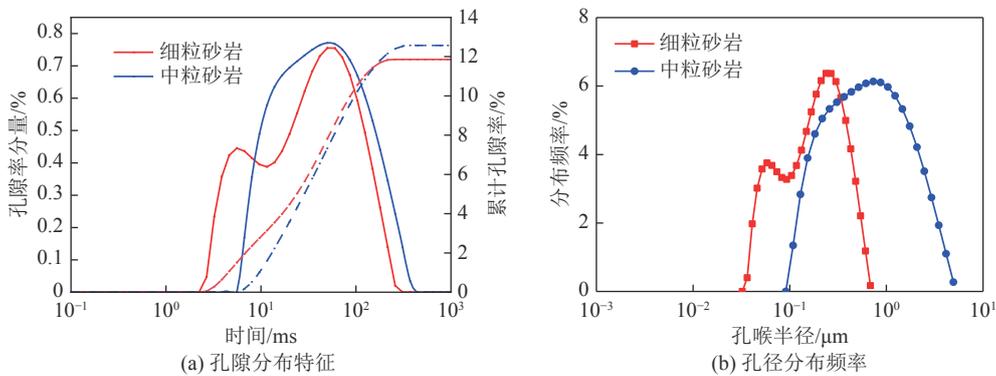


图 8 岩心核磁共振的孔隙分布曲线

Fig.8 Pore distribution curve of core NMR

细粒砂岩的孔喉分布范围为 0.036 3 ~ 0.683 μm , 孔喉分布频率呈双峰状, 其中左峰的孔喉半径区间为 0.051 μm ~ 0.058 μm , 右峰的孔喉半径区间为 0.211 ~ 0.300 μm ; 中粒砂岩的孔喉分布为 0.091 9 ~ 4.94 μm , 孔喉分布频率呈单峰状, 峰值半径区间为 0.615 ~ 2.07 μm ; 中粒砂岩的大孔孔喉半径介于 0.61 ~ 4.94 μm , 累积分布频率达到 48%, 而细粒砂岩的大孔孔喉半径介于 0.188 ~ 0.683 μm , 累积分布频率达到 47%, 显然, 中粒砂岩的孔喉半径更大, 连通性更好。利用饱和砂岩的核磁共振 T_2 弛豫时间可以计算岩心可动水饱和度。两者整体的孔隙率和可动水饱和度接近, 结合薄片鉴定的结果, 说明细粒砂岩虽然孔隙直径小, 孔喉尺寸小, 但数量较多, 见表 4。

表 4 岩心核磁测试结果
Table 4 Core NMR test results

岩性	岩样体积/ cm^3	孔隙率/%	可动水饱和度/%
中粒砂岩	24.50	12.572	59.897
细粒砂岩	23.34	11.858	52.387

2.5 X 射线 CT 表征的孔隙分布特征

CT 扫描利用大量 X 射线衰减图像重构出三维的立体模型能够真实的反映出岩心内部的孔隙结构。为更好反映岩心内部孔隙, 扫描的岩心直径 25 mm, 如图 9 为扫描的样品照片及三维孔隙表征结果, 发现中粒砂岩和细粒砂岩的内部孔隙高度发育。

选取岩心典型的横截面和竖剖面 CT 切片如图 10—图 11 所示, 中粒砂岩骨架颗粒直径大, 排列较松散, 剩余粒间孔发育非常明显, 且孔隙尺寸较大, 面孔隙率较大, 非常有利于地下水的储存和运移, 而且水平方向存在优势孔隙通道, 垂向上非均质性较强; 而细粒砂岩骨架颗粒直径小, 排列相对紧密, 溶蚀粒间孔发育, 孔隙直径相对较小, 地下水同样可以存储和运移, 垂向上孔隙的均质性较强。进一步定量计算得到各个 CT 截面的面孔隙率和各个等效孔隙的直径分布如图 12 和图 13 所示, 中粒砂岩的面孔隙率范围为 2.306% ~ 16.151%, 平均值为 7.081%, 在垂向分布上存在优势孔隙通道, 非均质性较强, 局部面孔隙率达到 16.151%, 与周围切片的面孔隙率相差巨大; 细粒砂岩的面孔隙率范围为 0.926% ~

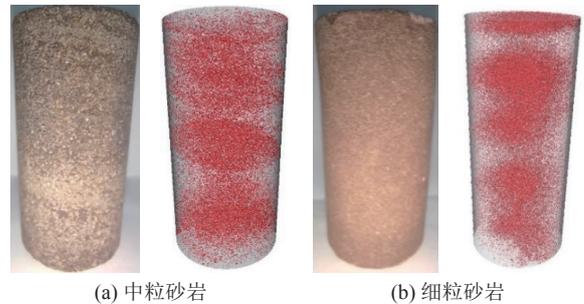
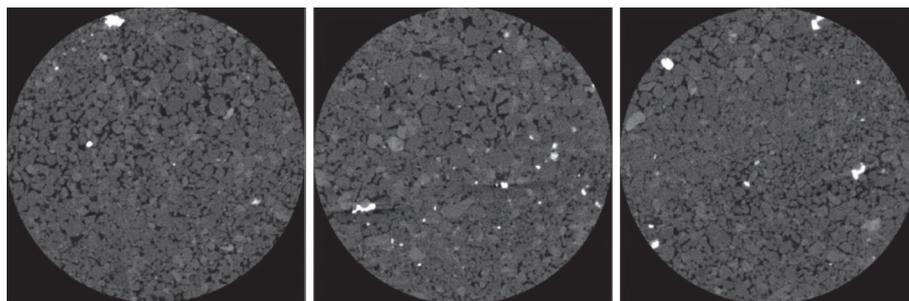
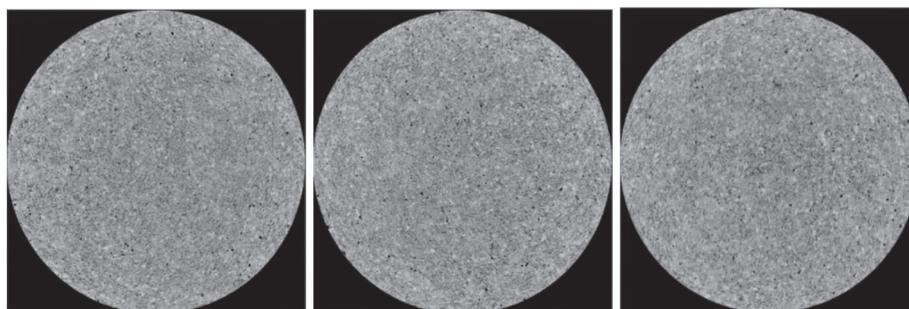


图 9 岩心形态及三维孔隙表征
Fig.9 Core morphology and three-dimensional pore characterization



(a) 中粒砂岩



(b) 细粒砂岩

图 10 岩心 CT 平面孔隙切片
Fig.10 Core CT plane pore slice

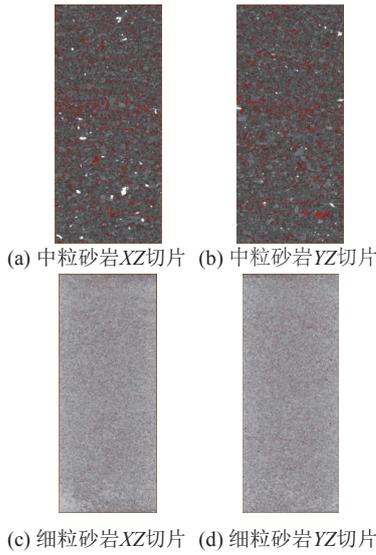


图 11 岩心 CT 剖面孔隙切片 (红色代表孔隙)

Fig.11 Core CT section pore slice (red represents pore)

2.978%, 平均值为 2.032%, 细粒砂岩的面孔隙率较小且相对稳定。

而在等效孔隙直径分布方面, 在 9 ~ 30 μm 的微孔和 90 ~ 180 μm 范围的大孔数量上, 中粒砂岩大于细粒砂岩, 尤其对于孔隙直径 > 180 μm 的大孔, 中粒砂岩内部高度发育, 而细粒砂岩内几乎没有; 在孔隙直径为 30 ~ 60 μm 的小孔和 60 ~ 90 μm 的中孔, 细粒砂岩的孔隙数量大于中粒砂岩; 细粒砂岩内部同样发育大量有 90 ~ 180 μm 的孔隙, 测试结果和薄片孔隙的统计结果接近。

结合面孔隙率的变化曲线及孔隙分布, 中粒砂岩的大孔、微孔的高度发育贡献了较高的面孔隙率, 且广泛分布的大孔更有利于地下水的流动, 表现出较高的渗透性。而细粒砂岩小孔和中孔数量更多, 同样也可作为地下水存储和运移的通道。

3 洛河组砂岩微观孔隙探查的工程意义

文献 [9,10,13,14] 结合钻孔岩性、水文测井、流量测井资料、单孔和群孔抽水试验、水文地质参数等手段根据富水性差异将巨厚洛河组砂岩分上段和下段, 高家堡首采区洛河组含水层厚度为 318.00 ~ 509.93 m, 平均 400.35 m, 分别统计取心钻孔附近地面孔 T1、T2, 井下孔 JT1、JT2、JT3 孔洛河组下段和上段地层岩性厚度见表 5, 计算各种岩性平均厚度占比如图 14 所示。

洛河组上段平均厚度为 322.57 m, 主要岩性占比由大到小依次为中粒砂岩 (55.8%)、细粒砂岩 (17.54%)、泥质岩类 (16.62%) 和粗粒砂岩 (10.04%), 其中中粒砂岩累计厚度达到 179 m; 洛河组下段平均厚度为 71.21 m, 主要岩性占比由大到小依次为泥质岩类 (49.08%)、细粒砂岩 (32.97%)、中粒砂岩 (13.55%) 和砾岩 (4.4%), 其中细粒砂岩累计厚度达到 23.9 m。

洛河组上段地层主要有较厚的中粒砂岩, 抽水试验实测渗透系数为 0.92 ~ 1.552 m/d, 单位涌水量为 1.305 ~ 2.248 13 L/(s·m), 而洛河组下段主要有泥质岩类和细粒砂岩, 抽水试验实测渗透系数为 0.027 ~ 0.049 m/d, 单位涌水量为 0.013 ~ 0.084 3 L/(s·m)。洛河组上段渗透系数大, 富水性强, 下段渗透系数小, 富水性弱, 洛河组上段和下段富水性差异明显, 结合实验室测试的上段中粒砂岩和下段细粒砂岩的岩心孔隙特征, 发现主要是由于洛河组上段中粒砂岩孔隙以剩余粒间孔为主, 孔隙填充物少, 骨架较为疏松, 存在高度发育的大孔, 宏观表现较高的渗透率; 而洛河组下段的细粒砂岩骨架颗粒小, 颗粒间多由黏土矿物填充, 为次生溶蚀粒间孔, 孔隙直径以小孔和中

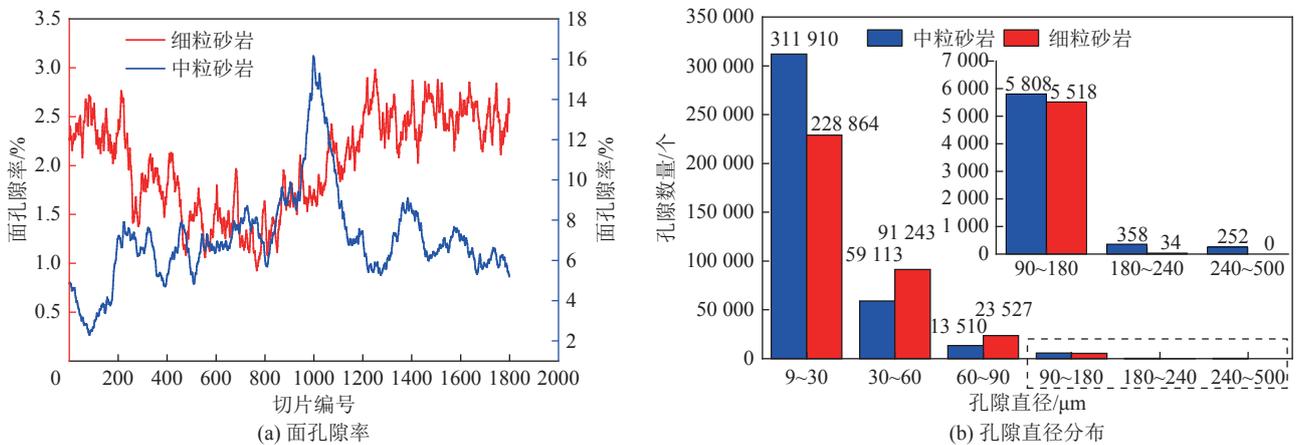


图 12 X 射线 CT 测试下岩心孔隙分布特征

Fig.12 Distribution characteristics of core pores under X-ray CT test

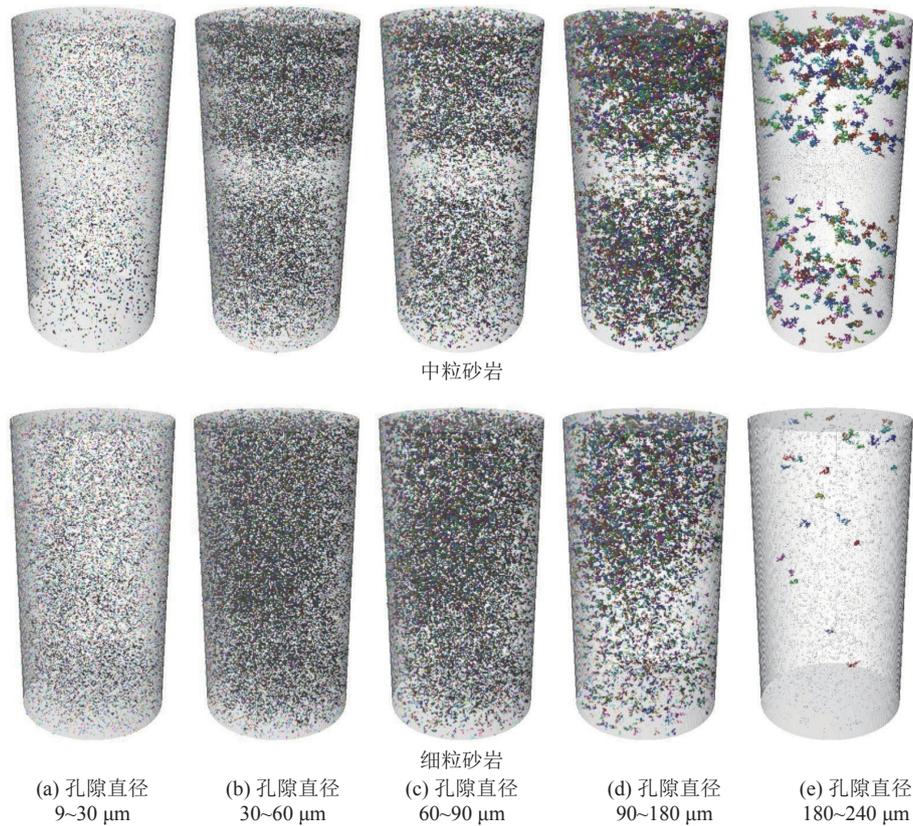


图13 X射线CT测试下中粒砂岩岩心孔隙分布特征

Fig.13 Distribution characteristics of medium sandstone core pores under X-ray CT test

表5 洛河组上段与下段地层岩性统计

Table 5 Lithology statistics of upper and lower Luohe Formation

地层	孔号	泥质岩类/m	细粒砂岩/m	中粒砂岩/m	粗粒砂岩/m	砾岩/m	累厚/m
洛河组下段	T1	31.98	19.95	18.46	0	0	70.39
	T2	20.12	50.59	4.03	0	0	74.74
	JT1	40.93	10.72	11.99	0	2.46	66.10
	JT2	41.84	15.38	14.6	0	2.38	74.20
	JT3	43.02	22.88	0	0	4.72	70.62
	平均值		35.58	23.90	9.82	0	3.19
洛河组上段	T1	53.22	78.95	169.01	22.62	0	323.80
	T2	54.04	34.18	190.95	42.16	0	321.33
	平均值		53.63	56.57	179.98	32.39	0

孔为主,表现出较小的渗透率。

因此,通过对洛河组广泛分布的厚层砂岩岩心的微观孔隙探查,可以掌握其孔隙类型、孔隙直径、孔喉大小,结合现场抽水试验确定的含水层富水性进行对照验证。同样,掌握巨厚洛河组砂岩典型层位的孔隙特征对采场导水裂隙带附近的三维孔隙-裂隙注浆改造有很强的指导意义,应优先选择孔隙类型为剩余粒间孔、孔隙填充物少、存在高度发育大孔的中粗砂岩层位进行采前/采后的注浆减水改造。

4 结 论

1)综合运用XRD衍射,铸体薄片、扫描电镜等手段表征了洛河组岩心的孔隙结构,其中中粒砂岩骨架颗粒大,孔隙类型主要以剩余粒间孔为主,少量粒间溶孔,孔隙较大;而细粒砂岩骨架颗粒小,颗粒间多由黏土矿物填充,为次生溶蚀粒间孔,少量粒内溶孔,孔隙发育较小。

2)高压压汞和核磁共振联合测试表明:中粒砂岩中的大孔孔喉半径介于 $0.61 \sim 4.94 \mu\text{m}$,累积分布

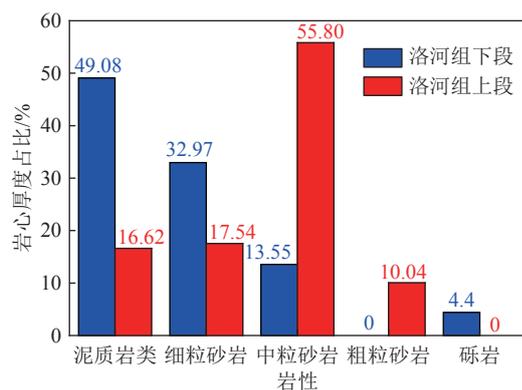


图 14 洛河组含水层分段岩性累计厚度占比

Fig.14 Proportion of accumulative thickness of aquifer section lithology in Luohe formation

频率达到 48%，而细粒砂岩中的大孔孔喉半径介于 $0.188 \sim 0.683 \mu\text{m}$ ，累积分布频率达到 47%，中粒砂岩的孔喉半径较大，更有利于地下水存储和运移。

3) 采用三维 CT 扫描统计了岩心内部直径大于 $9 \mu\text{m}$ 孔隙，结果显示中粒砂岩的面孔隙率为 $2.306\% \sim 16.151\%$ ，平均值 7.081% ；细粒砂岩的面孔隙率范围为 $0.926\% \sim 2.978\%$ ，平均值 2.032% ，中粒砂岩内高度发育的大孔（等效孔隙直径 $>180 \mu\text{m}$ ）和微孔贡献了较高的面孔隙率，结合其较大的孔喉半径，宏观表现较高的渗透性。

4) 洛河组上段中粒砂岩和下段细粒砂岩的微观孔隙特征与现场对应含水层的富水性宏观特征相一致，掌握巨厚洛河组砂岩典型层位岩心的孔隙特征对顶板水的注浆改造层位优选具有指导意义。

参考文献(References):

- [1] 董书宁, 姬亚东, 王皓, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2367-2375.
DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, *et al.* Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367-2375.
- [2] 董书宁. 鄂尔多斯盆地煤层典型顶板水害成因与防控技术[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [3] 任邓君, 孙亚岳, 李建阳. 高家堡煤矿煤层顶板水水化学特征及其水害防治技术[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(S1): 26-31.
REN Dengjun, SUN Yayue, LI Jianyang. Hydrochemical characteristics and control of water hazard from coal seam roof in Gaojiabao coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(S1): 26-31.
- [4] 靳德武, 刘英锋, 王甜甜. 巨厚砂岩含水层下厚煤层综放减水开采技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 88-95.
JIN Dewu, LIU Yingfeng, WANG Tiantian. Water-reducing mining technology for fully mechanized top coal caving mining in thick coal seams under ultra thick sandstone aquifer[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 88-95.
- [5] 李超峰, 虎维岳, 刘英锋. 洛河组含水层垂向差异性研究及保水采煤意义[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 847-856.
LI Chaofeng, HU Weiye, LIU Yingfeng. Vertical hydrogeological characteristics of Luohe aquifer and its significance of water-preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 847-856.
- [6] 郭小铭, 董书宁. 深埋煤层开采顶板基岩含水层渗流规律及保水技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 804-811.
GUO Xiaoming, DONG Shuning. Seepage law of bedrock aquifer and water-preserved mining technology in deep coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 804-811.
- [7] 刘英锋, 王世东, 王晓蕾. 深埋特厚煤层综放开采覆岩导水裂隙带发育特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1970-1976.
LIU Yingfeng, WANG Shidong, WANG Xiaolei. Development characteristics of water flowing fractured zone of overburden deep buried extra thick coal seam and fully-mechanized caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1970-1976.
- [8] 徐拴海, 邢龙龙, 王国强, 等. 超细水泥浆液在微裂隙岩体中的注浆试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(6): 96-102.
XU Shunhai, XING Longong, WANG Guoqiang, *et al.* Experimental research on grouting of superfine cement slurry in micro-fissured rock body[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(6): 96-102.
- [9] 杜文斌, 郑杨帆, 耿明奇. 彬长矿区高家堡井田白垩系下统富水性及水力连通试验分析[J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(5): 38-41.
DU Wenbin, ZHENG Yangfan, GENG Mingqi. Analysis of Lower Cretaceous Water Yield Property and Hydraulic Connectivity Test in Gaojiabu Minefield, Binchang Mining Area[J]. Coal Geology of China, 2015, 27(5): 38-41.
- [10] 孙福勋. 巨厚含水层下煤层顶板突水机理及水害危险性预测——以高家堡煤矿为例[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
SUN Fuxun. Mechanism of water inrush from coal seam roof under extremely thick aquifer and prediction of water hazard -- a case study of Gaojiapu coal mine[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [11] 李金龙, 张允强, 徐新启, 等. 高家堡煤矿煤层顶板注浆加固堵水技术探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(S1): 20-25.
LI Jinlong, ZHANG Yunqiang, XU Xinqi, *et al.* Reinforcement and water plugging technology of roof grouting in Gaojiabao coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(S1): 20-25.
- [12] 杨静. 地面水平定向钻孔注浆封堵覆岩导水裂隙的合理层位研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
YANG Jing. Study on reasonable horizon of grouting of horizontal directional borehole to seal water flowing fractured [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [13] 李超峰. 采煤工作面顶板巨厚层状含水层涌水量预测研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.
LI Chaofeng. Study on prediction of water inflow of huge thick layered aquifer in coal face roof [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2019.
- [14] 林磊. 高家堡煤矿洛河组砂岩沉积控水规律研究[D]. 西安:

- 西安科技大学, 2020.
- LIN Lei. Study on water control law of Luohe formation sandstone sedimentation in Gaojiapu coal mine [D]. Xian: Xi'an University of science and technology, 2020.
- [15] 杜二宝. 主含水层下特厚煤层短壁协调充填开采覆岩变形与控制研究. [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- DU Erbao. Research on deformation and control of overlying strata in coordinated filling mining of short-walled extra-thick coal seam under main aquifer [D] Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [16] 王璟明, 肖佃师, 卢双舫, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩储层物性分级评价[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 172-183.
- WANG Jingming, XIAO Dianshi, LU Shuangfang, *et al.* Classification evaluation of shale oil reservoir physical properties in Lucaogou formation, Jimsar sag[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 172-183.
- [17] 肖佃师, 赵仁文, 杨 潇, 等. 海相页岩气储层孔隙表征, 分类及贡献[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1215-1225.
- XIAO Dianshi, ZHAO Renwen, YANG Xiao, *et al.* Characterization, classification and contribution of marine shale gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1215-1225.
- [18] 孔星星, 肖佃师, 蒋 恕, 等. 联合高压压汞和核磁共振分类评价致密砂岩储层-以鄂尔多斯盆地临兴区块为例[J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 38-47.
- KONG Xingxing, XIAO Dianshi, JIANG Shu, *et al.* Application of the combination of high-pressure mercury injection and nuclear magnetic resonance to the classification and evaluation of tight sandstone reservoirs: A case study of the Linxing Block in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3): 38-47.
- [19] 苏玉亮, 李新雨, 李 蕾, 等. 基于核磁共振可视化试验的致密气藏气水两相渗流机制[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2021, 45(5): 104-112.
- SU Yuliang, LI Xinyu, LI Lei, *et al.* Gas-water two-phase percolation mechanism in tight gas reservoirs based on NMR visualization experiment[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2021, 45(5): 104-112.
- [20] 张宪国, 张 涛, 刘玉从, 等. 深层低渗-致密气层孔喉参数核磁共振测井定量解释[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(5): 941-950.
- ZHANG Xianguo, ZHANG Tao, LIU Yucong, *et al.* Quantitative interpretation of pore-throat parameter in deep low permeability-tight gas reservoir with NMR logging[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(5): 941-950.
- [21] 刘一楠, 刘 勇, 辛福东, 等. 压汞实验对低阶煤表征的适用性分析及校正方法[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 118-125.
- LIU Yinan, LIU Yong, XIN Fudong, *et al.* Applicability of mercury injection test to the characterization of low rank coal and its correction method[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 118-125.
- [22] 杨 明, 柳 磊, 刘佳佳, 等. 中阶煤孔隙结构的氮吸附-压汞-核磁共振联合表征研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 67-74.
- YANG Ming, LIU Lei, LIU Jiajia, *et al.* Study on joint characterization of pore structure of middle-rank coal by nitro-gen adsorption-mercury intrusion-NMR[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 67-74.
- [23] 王登科, 曾凡超, 王建国, 等. 显微工业CT的受载煤样裂隙动态演化特征与分形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1165-1174.
- WANG Dengke, ZENG Fanchao, WANG Jianguo, *et al.* Dynamic evolution characteristics and fractal law of loaded coal fractures by micro industrial CT[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1165-1174.
- [24] 付 裕, 陈 新, 冯中亮. 基于CT扫描的煤岩裂隙特征及其对破坏形态的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 568-578.
- FU Yu, CHENG Xin, FENG Zhongliang. Characteristics of coal-rock fractures based on CT scanning and its influence on failure modes[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 568-578.
- [25] 柳昭星, 董书宁, 南生辉, 等. 邯邢矿区中奥灰顶部空隙特征显微CT分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(2): 343-352.
- LIU Zhaoxing, DONG Shuning, NAN Shenghui, *et al.* Micro-CT analysis of void characteristics at the top of middle ordovician limestone in Hanxing mining area[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(2): 343-352.
- [26] 吴洁璞, 张红玲, 周晓峰, 等. 鄂尔多斯盆地低渗透岩心水测渗透率和气测渗透率关系研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(1): 52-56, 63.
- WU Jiepu, ZHANG Hongling, ZHOU Xiaofeng, *et al.* Study on relationship between water measuring permeability and gas measuring permeability of low permeability sandstone cores in Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2017, 32(1): 52-56, 63.
- [27] 李爱芬, 任晓霞, 王桂娟, 等. 核磁共振研究致密砂岩孔隙结构的方法及应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(6): 92-98.
- LI Aifen, REN Xiaoxia, WANG Guijuan, *et al.* Characterization of pore structure of low permeability reservoirs using a nuclear magnetic resonance method[J]. Journal of China University of Petroleum, 2015, 39(6): 92-98.