

白垩系洛河组巨厚砂岩含水层精细划分研究现状与展望

项文杰¹, 薛博²

¹安徽理工大学煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 安徽 淮南

²平安煤炭开采工程技术研究院有限责任公司, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年1月9日; 录用日期: 2026年2月9日; 发布日期: 2026年3月18日

摘要

针对鄂尔多斯盆地洛河组巨厚含水层垂向非均质性强、传统评价精度不足的问题, 本文系统综述了其精细划分的研究现状与工程应用。首先, 梳理了包含岩石微观测试、水文地球物理测井(流量与盐化测井)、双Packer分层抽水及水化学测试在内的精细探测技术体系。其次, 重点阐述了基于多源信息融合的“综合富水性指数”评价模型, 该模型通过量化地层岩性、厚度及孔隙度指标, 定量揭示了洛河组“上、下段弱富水, 中段强富水”的垂向分带规律。最后, 论证了洛河组下段作为天然“水力屏障”在限制导水裂隙发育、实现保水采煤中的工程价值, 并对未来评价技术进行了展望。

关键词

洛河组, 巨厚含水层, 精细划分, 综合富水性指数

Research Status and Prospects of Fine Subdivision of the Giant-Thick Sandstone Aquifer in the Cretaceous Luohe Formation

Wenjie Xiang¹, Bo Xue²

¹State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²Ping'an Coal Mining Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Huainan Anhui

Received: January 9, 2026; accepted: February 9, 2026; published: March 18, 2026

Abstract

Addressing the challenges of strong vertical heterogeneity and insufficient accuracy in traditional

文章引用: 项文杰, 薛博. 白垩系洛河组巨厚砂岩含水层精细划分研究现状与展望[J]. 矿山工程, 2026, 14(2): 338-345.
DOI: 10.12677/me.2026.142036

evaluation of the giant-thick aquifer of the Luohe Formation in the Ordos Basin, this paper systematically reviews the research status and engineering applications of its fine subdivision. First, a fine detection technology system is summarized, comprising rock microscopic testing, hydrogeophysical logging (specifically flow and salinization logging), double Packer staged pumping tests, and hydrochemical testing. Second, the study focuses on the "Comprehensive Water-Richness Index" evaluation model based on multi-source information fusion. By quantifying indices of stratigraphic lithology, thickness, and porosity, this model quantitatively reveals the vertical zonation pattern of the Luohe Formation, characterized by "weak water-richness in the upper and lower sections, and strong water-richness in the middle section". Finally, the engineering value of the lower section of the Luohe Formation acting as a natural "hydraulic barrier" in restricting the development of water-conducting fractures and achieving water-conserving coal mining is demonstrated, followed by an outlook on future evaluation technologies.

Keywords

Luohe Formation, Giant-Thick Aquifer, Fine Subdivision, Comprehensive Water-Richness Index

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国能源开发的战略重心已全面向西部转移,鄂尔多斯盆地及其周边的黄陇、神东等大型煤炭基地成为国家能源安全的重要保障,然而该区域煤层开采面临着极为特殊且复杂的水文地质环境,其中最具代表性的挑战便是覆盖于煤层顶板上方的白垩系下统洛河组巨厚砂岩含水层。洛河组作为该区域特大型自流水盆地的主要含水层位,具有厚度大、分布广、储水性强的显著特点[1]-[3]。这种巨厚的岩层结构不仅蕴含了巨大的地下水资源量,更在煤矿高强度综放开采条件下构成了顶板水害的主要充水水源,随着开采深度的增加和工作面尺度的扩大,煤层开采形成的导水裂隙带往往发育至相当高度,一旦沟通或波及洛河组含水层,极易引发突水淹井事故[4]-[6]。此外,除了直通式突水,巨厚砂岩特有的层间结构还易引发离层水害,这类灾害具有突发性强、瞬时水量大的特点,严重威胁矿井安全。

面对白垩系巨厚含水层的复杂性,传统的煤矿水文地质勘查方法逐渐显示出严重的不适应性。长期以来,受限于勘探成本和认知水平,工程界普遍采用“笼统化”的思路处理洛河组,往往将数百米厚的岩层视为一个均质、各向同性的单一含水层系统,或者仅进行简单的层位划分[7]-[9]。在参数获取方面,通常采用全孔混合抽水的方式,这导致获取的渗透系数、单位涌水量等关键参数仅仅是整个巨厚层的加权平均值,无法反映各层段物性的真实变化。这种“以均代层”的参数获取方式造成了严重后果:一方面,使用全段平均渗透系数进行计算会导致矿井涌水量预测结果与实际涌水量存在巨大偏差,致使排水系统设计不合理;另一方面,由于忽略了垂向上的富水性差异,传统评价无法识别出含水层内部的强富水核心带,极易导致对高位富水区威胁的误判。因此,对巨厚砂岩含水层进行精细划分,查明其垂向分段特征、富水性差异及其内在控制因素,已成为解决当前煤矿精准防治水和保水采煤的核心技术前提。

2. 志丹群含水层沉积地质背景与岩性特征

鄂尔多斯盆地洛河组作为白垩系自流水盆地中分布最广且含水性最好的岩组,其沉积发育深受早白垩世干旱古气候及盆地东西非均衡沉降构造背景的控制。该组地层覆盖盆地约四分之三的区域,厚度介

于 110 m 至 500 m 之间, 主要发育风成沙漠相, 同时伴有河流、三角洲及冲洪积相沉积。岩性特征上, 洛河组主要由紫红色石英砂岩、长石石英砂岩、灰质砂岩及含砾砂岩组成, 且在空间上表现出明显的相带差异: 盆地边缘主要发育冲积扇与河流相的砂砾岩, 呈楔状分布; 盆地腹地则以风成中细粒砂岩为主, 具有单层厚度大、分选好、杂基含量少及结构成熟度高等特点[10][11]。这种岩性结构使得洛河组具备优良的储水空间, 其砂岩孔隙度大, 渗透率高, 加之顶底板泥岩隔水层及致密胶结带的有效封隔, 形成了盆地内水循环系统性好且矿化度低的优质含水系统[12]。

统计数据显示, 洛河组在垂向岩性结构上呈现出“两头细、中间粗”的规律: 中段以粗粒砂岩为主, 砂岩厚度占比极高, 是地下水富集的优势空间; 而上段与下段因砂泥岩频繁互层, 泥质含量显著增加, 形成了天然的岩性屏障。这种由沉积旋回控制的“泥-砂-泥”岩性组合, 破坏了含水层的均一性, 为垂向分层提供了最基本的宏观地质依据。

3. 志丹群含水层精细探测技术与方法

针对深埋巨厚含水层垂向非均质性强、水文地质条件复杂的特点, 传统的混合勘探方法(如长段混合抽水)往往由于分辨率不足, 难以揭示含水层内部的精细结构。为此, 现代矿井水文地质勘探引入了多学科交叉的综合探测体系。本章重点论述岩石物理力学与微观物性测试、水文地球物理测试、双 Paker 分层抽水实验和水化学测试在含水层精细划分中的应用。

3.1. 岩石物理力学与微观物性测试方法

岩石的宏观力学强度、水理特性及微观孔隙结构是决定含水层储水与导水能力的根本因素。现有研究通常对钻孔岩芯开展多维度的实验室测试, 以获取关键定性及定量参数, 从而揭示含水层垂向分带的介质机理。

1) 岩石物理力学性质测试[13]。该测试旨在评价岩层的稳定性及作为隔水关键层的力学性能。主要通过物理基本测试及岩石力学试验(单轴压缩、巴西劈裂及三轴压缩), 重点获取岩石的比重、容重、孔隙率等物理参数, 以及单轴抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比等力学参数。

2) 岩石水理性质测试[14]。该测试旨在量化岩石与水相互作用后的物理状态及流体传输能力。通过室内变水头/常水头试验, 主要获取自然/饱和吸水率、含水率及渗透系数等关键指标; 针对泥质岩类还需获取膨胀系数与崩解指数, 以评价其在水环境下的膨胀封闭性能。

3) 矿物成分与微观结构分析[15]。结合 X 射线衍射(XRD)、岩石薄片鉴定及扫描电镜(SEM)技术, 从微观尺度查明岩石的物质组成与结构。主要获取岩石的矿物组分含量、胶结物类型(钙质、泥质、硅质)及其含量等微观结构参数。

高家堡井田的综合测试结果揭示了洛河组垂向上的显著差异: 在力学性质上, 洛河组下段砂岩的单轴抗压强度及弹性模量显著高于上段疏松砂岩, 证实深部岩层致密, 具备构成有效隔水底板的力学基础。在水理与微观特征上, 下段岩石虽保留一定的孔隙度, 但有效渗透系数极低, 呈现典型的“高孔低渗”特征。微观分析进一步证实, 这是由于下段钙质胶结物含量显著增加[16]。这些确证了洛河组下段具备相对隔水层的物质基础。

3.2. 水文地球物理测井技术

水文地球物理测井利用地球物理场差异, 获取井筒内地层岩性及流体产状参数。该方法是构建含水层地质模型的基础手段。

1) 常规水文测井

利用钻孔探头沿井筒进行连续扫描, 获取视电阻率、自然伽马及井径等地球物理响应曲线[17]。基于沉积岩层的地球物理差异, 砂岩含水层通常表现为“高电阻率、低天然伽马”的特征, 而泥岩隔水层则因粘土矿物富含放射性元素及导电性强, 呈现典型的“低电阻率、高天然伽马”特征, 且常伴随井径扩径现象。可精确识别岩性结构, 划分砂泥岩互层界面, 查明含水层的赋存位置与有效厚度, 为后续分层水力测试层段的选取提供精确的地质依据。

2) 流量测井与盐化测井

流量测井是以分析井内流体在不同深度上的流速变化为基础, 确定含水层产状的有效方法。其核心原理是利用井下叶轮(涡轮)传感器, 测量钻孔中纵向水流随深度变化的转速, 获取流量随深度变化的曲线, 通过精细解析该曲线中的拐点(突变点)或极值异常特征, 即可精准锁定涌(漏)水层的空间赋存状态(位置、厚度), 并定量计算出单个含水层的具体涌水量。

盐化测井方法基于“人工示踪”原理, 通过向孔内投放食盐(NaCl)致使井液矿化度升高, 从而构建出井液与地层水之间显著的电阻率差异背景。利用井液电阻率随时间推移的扩散、稀释或运移规律, 不仅能灵敏刻画地下水的微弱运动状态, 还能有效查明多层含水层之间是否存在越流补给等水力联系, 弥补了常规测井对滞流段分辨率不足的缺陷。

张彦林等应用流量测井技术, 对甘肃某勘探孔(日涌水量高达 3400 m³)进行了测试, 通过分析流量曲线拐点, 成功将混合出水段解析为 6 个独立层位, 并定量计算出主径流带位于 180~205 m [18]。而在层间水力联系的判定上, 刘子松利用井液电阻率盐化测井技术, 在内蒙古某矿区观测到高矿化度示踪界面随时间向深部移动的特征, 证实了上部含水层对下部含水层存在纵向越流补给[19]。上述案例表明, 流量测井与盐化测井的联合应用, 可从涌水量定量分割与流场动态示踪两个维度, 为含水层结构的精细划分提供直接依据。

3.3. 双 Paker 分层抽水实验

双 Paker 分层抽水试验是将上、下两个可膨胀的封隔器串接在钻杆上, 下放至目标层位。通过氮气充气使封隔器膨胀, 紧贴井壁, 从而在两个封隔器之间形成一个密封的独立测试段。在此隔离空间内, 利用水泵进行抽水、注水或压力测试, 并配合传感器实时监测水位、水温变化及采集水样等[20]。如图 1 所示。

在高家堡井田洛河组, 计算双 Paker 分层抽水实验数据, 表明洛不同层段的渗透系数(K)呈现出跨越数量级的剧烈变化。洛河组中上段(埋深约 480~600 m)表现出极强的透水性, K 值介于 0.599~0.709 m/d 之间, 是地下水径流的主要优势通道; 随着深度增加, 中下段(埋深约 600~750 m) K 值下降至 0.112~0.212 m/d, 渗透能力显著减弱。相比之下, 洛河组顶部上段的 K 值约为 0.065 m/d, 而底部的下段(埋深 > 750 m) K 值骤降至 0.005~0.009 m/d。由 K 值揭示出洛河组不同层有明显差别[8]。

3.4. 水化学测试

水质全分析测试与环境同位素检测是揭示多层含水系统水化学演化规律及水力联系的核心手段。采集不同含水层水样, 开展水质全分析, 系统测定主要离子组分 Na⁺、Ca²⁺、HCO₃⁻ 和 Cl⁻ 等, 矿化度(TDS) 及 pH 值等指标, 并同步进行氢氧同位素检测, 可以从水地球化学角度定量刻画不同水源的特征差异。

罗安昆对某典型矿区洛河组不同层段进行了系统的水质全分析与类型划分。结果显示, 其化学组分在垂向上存在显著的数量级差异。由洛河组上段至下段, 特征阴离子 HCO₃⁻ 含量显著降低, 而 SO₄²⁻ 与 Na⁺ 含量及矿化度(TDS)均呈显著增加趋势。受组分浓度变化控制, 水化学类型在垂向上界线分明: 洛河组上段主要为 Na-Mg-HCO₃ 型, 下段转变为 Na-SO₄ 型, 直接证实了洛河组上、下段在含水层结构存在本质差异[8]。

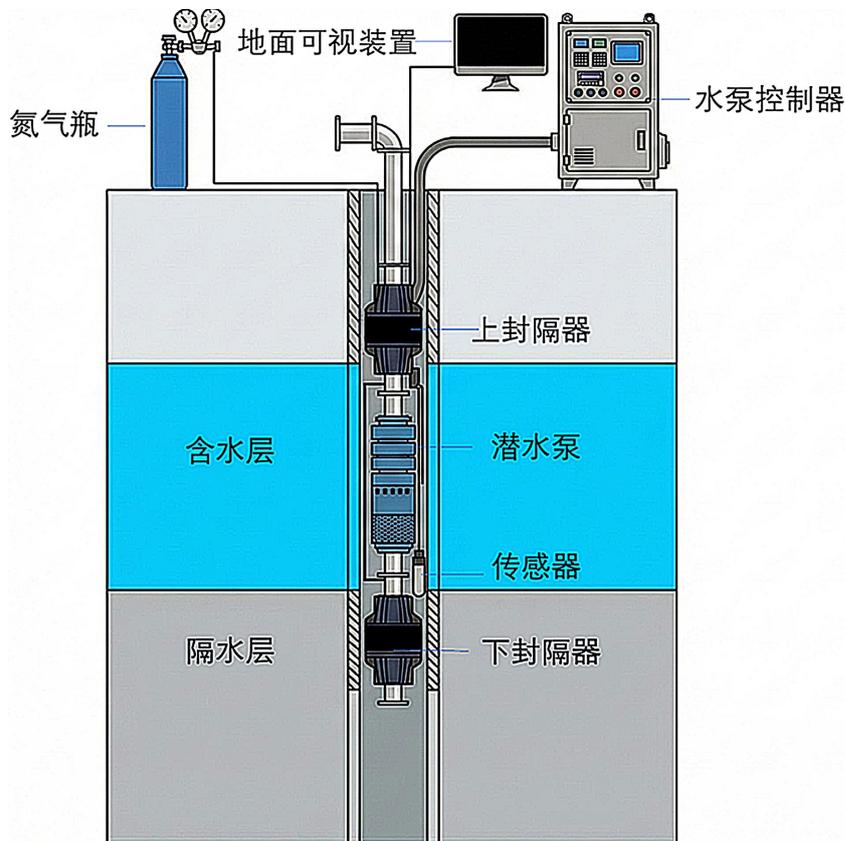


Figure 1. Schematic diagram of double Paker staged pumping
图 1. 双 Paker 分层抽水示意图

4. 综合富水性指数评价模型构建

现有的含水层富水性评价与分层研究, 大多停留在对钻孔岩性描述、水文参数等基础数据的简单罗列与定性对比层面, 缺乏对多源地质信息进行系统性量化赋值与归一化处理的数理模型, 导致评价结果往往难以精准反映巨厚地层内部的微观非均质差异。针对这一局限性, 李超峰等创新性地提出了“综合富水性指数法”, 建立了一套从指标量化系统评价流程, 实现了对含水层富水性的精细化定量表征[21]。

该方法选取控制地下水赋存与运移的三大核心要素——地层岩性、有效厚度及岩石孔隙度作为评价主控指标, 并制定了严格的量化标准: 依据岩石颗粒级配与渗透性能对岩性进行赋值(如规定泥岩为 0.1, (含砾)粗砂岩为 0.8 等); 考虑厚度对富水性的尺度效应, 对不同跨度的单层厚度进行赋值; 同时采用极差标准化公式将实测孔隙度数据归一化至[0, 1]区间。在指标量化的基础上, 基于层次分析法将地层岩性、厚度及孔隙度的权重分别设定为 0.3、0.4 及 0.3, 通过线性加权计算获得单个地层的初始富水性指数。

考虑到相邻地层的影响, 为消除单层评价的突变性误差, 该方法进一步构建了包含目标层及其上下相邻地层的加权修正计算模型。通过如下公式对目标层(权重 0.5)及其上下各两层相邻地层进行加权修正:

$$F_i = 0.5f_i + 0.15f_{i-1} + 0.1f_{i-2} + 0.15f_{i+1} + 0.1f_{i+2}$$

式中, F_i 为第 i 层地层的综合富水性指数。建立了明确的分级阈值(如 $F < 0.003289$ 判定为隔水层, $0.003289 \leq F < 0.0123289$ 为弱富水, $F > 0.015504$ 为强富水), 并据此将高家堡井田巨厚洛河组在垂向上精准划分为上段、中段(含中上、中下)和下段。图 2 为流程图。该模型为巨厚含水层的科学分层提供了可靠的量化依据。图 3 为某钻孔综合富水性指数图。

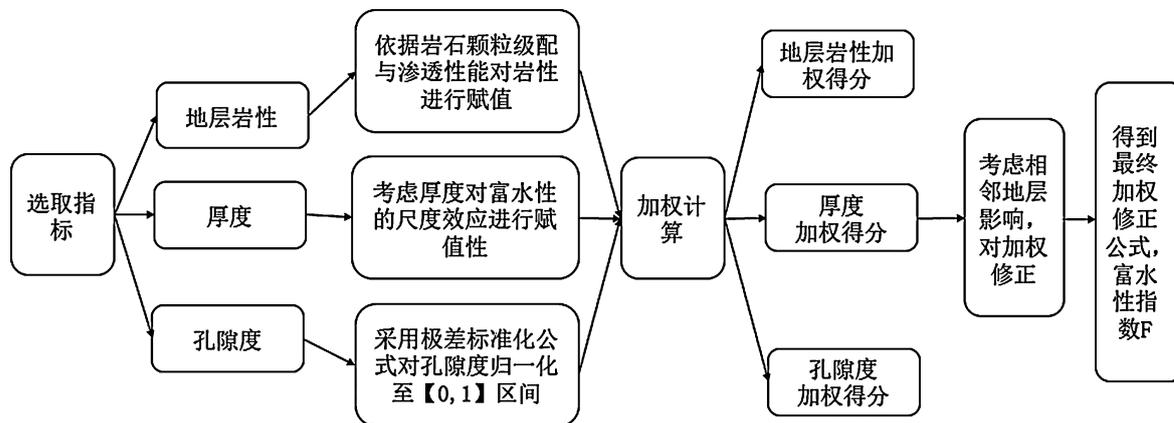


Figure 2. Comprehensive water-richness index evaluation model construction flowchart
图 2. 综合富水性指数评价模型构建流程图

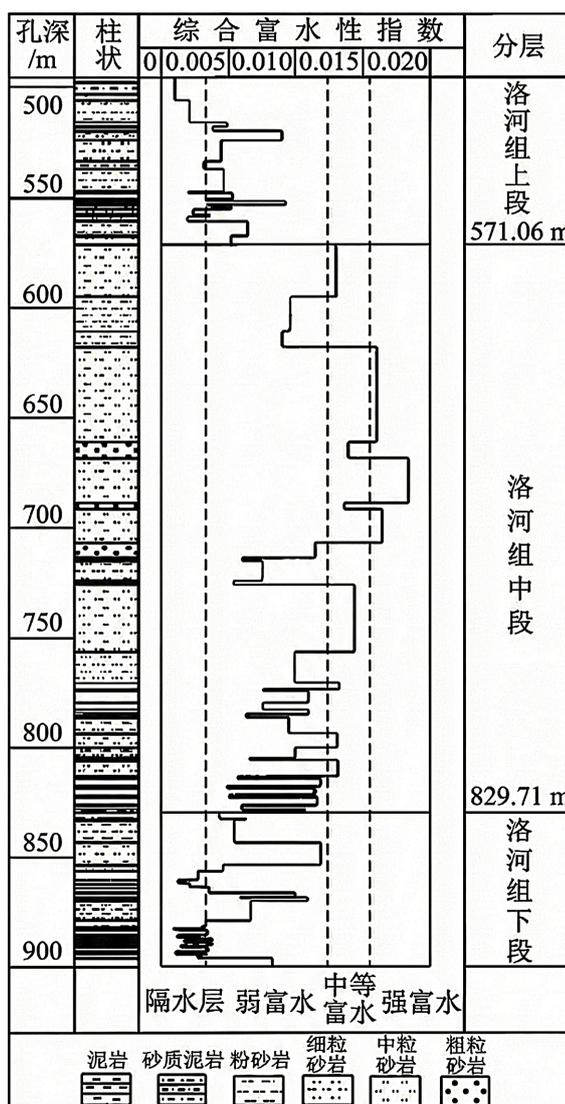


Figure 3. Comprehensive water-richness index map of a borehole
图 3. 某钻孔综合富水性指数图

5. 洛河组含水层精细划分的工程意义

综合前述评价模型与测试结果, 现有研究已证实洛河组在垂向上呈现“上段与下段弱富水、中段强富水”的非均质结构特征, 这一精细划分突破了传统“巨厚单一含水层”的认知局限, 为鄂尔多斯盆地深埋煤层的保水开采提供了关键的科学依据。

尽管洛河组下段岩性以砂岩为主, 但受沉积相变与泥质胶结影响, 其渗透性极低且与上覆强富水的中段之间存在显著的水力不连续性。在煤矿开采实践中, 这一层段被证实能够充当天然的“水力屏障”, 有效阻隔或延缓上部巨厚主含水层(中段)地下水向井下的越流补给, 从而大幅降低矿井涌水量, 减轻排水系统的压力。

精细划分结果为制定“保水限高”开采技术方案提供了精确的地质约束。基于洛河组下段的厚度与隔水性能, 工程设计可将导水裂隙带的发育高度严格控制在洛河组下段范围内, 避免其向上波及至中段主含水层。这种以保护中段含水层结构完整性为目标的开采模式, 实现了从“被动防治水”向“主动保水采煤”的转变, 既保障了煤炭资源的安全回采, 又最大限度地减少了对区域地下水资源的扰动与破坏。

6. 结论与展望

6.1. 结论

1) 鄂尔多斯盆地洛河组含水层并非均质整体, 其垂向水文地质条件存在显著差异。传统的混合抽水试验和单一指标评价难以揭示这一特征, 需采用双 Packer 分层抽水、地球物理测井及水化学同位素等综合手段进行精细化探查。

2) 基于构建的综合富水性指数法, 洛河组在垂向上被划分为上、中、下三个层段。其中, 中段是具有供水意义的主含水层, 而下段则是具有阻隔效应的相对隔水层。

3) 洛河组下段的发现为保水采煤提供了天然保护层。通过利用其阻隔导水裂隙发育, 可有效实现对中段主含水层的保护, 为深埋煤层水害防治与水资源保护提供了地质依据。

6.2. 展望

针对目前研究的不足, 未来应重点关注: 一是深化智能化分层评价技术, 利用机器学习算法挖掘测井大数据的富水性响应特征, 提高分层精度与效率; 二是加强采动响应的动态监测, 通过建立井下分层水文观测网, 揭示采动应力场与渗流场耦合作用下各分层的动态演化机理; 三是拓展区域适用性研究, 结合不同矿区的沉积地质背景, 完善全盆地通用的白垩系含水层精细化勘探技术标准。

致 谢

诚挚感谢刘老师给予的支持与指导; 同时, 对给予本文转载和引用权的资料、文献及研究思想的所有者表示由衷的谢意。

参考文献

- [1] 柴莹莹. 高家堡煤矿巨厚含水层注浆前后涌水量计算方法研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
- [2] 贺虎, 董近兴, 乔伟, 等. 巨厚含水层大流量疏降应力扰动及诱冲机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(1): 108-116.
- [3] 邢延团. 黄陇煤田顶板巨厚含水层防供水综合技术研究[J]. 煤矿开采, 2016, 21(4): 134-137.
- [4] 刘毅, 白文勇, 刘剑雷. 巨厚砂砾含水层下大采高面导水裂隙带发育规律及控制研究[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2025, 41(2): 66-71, 107.
- [5] 孙文亮, 许康, 于思源. 亭南煤矿二四盘区综放开采导水裂隙带高度探测与分析[J]. 山东煤炭科技, 2025, 43(6):

35-40.

- [6] 闫和平, 李文平, 段中会, 等. 黄陇煤田典型特厚煤层综放开采涌水机理与导水裂隙带发育规律[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(5): 129-138.
- [7] 李盼盼. 基于巨厚砂岩含水层精细划分的顶板涌(突)水危险性评价研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2025.
- [8] 罗安昆. 巨厚顶板砂岩含水层下煤层开采矿井涌水量预测研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2017.
- [9] 刘厚宁, 李萍, 成龙, 等. Packer 同径止水技术在彬长矿区多含水层分层抽水试验中的应用[J]. 地下水, 2023, 45(5): 143-144, 159.
- [10] 杨友运, 常文静, 侯光才, 等. 鄂尔多斯白垩系自流水盆地水文地质特征与岩相古地理[J]. 沉积学报, 2006, 24(3): 387-393.
- [11] 王二利, 霍高普, 薛志强, 等. 孟村煤矿洛河组含水层垂向变化特征[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(9): 109-113.
- [12] 陆斌法, 肖雨江. 黑龙江省煤系裂隙含水层岩性划分研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2017, 36(6): 96-102.
- [13] 杨占军. 岩石物理力学性质试验在煤炭工程中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(24): 186-188.
- [14] 阮剑剑. 工程勘察中岩土水理性质的测试和研究之己见[J]. 西部资源, 2018(1): 108-109.
- [15] 魏翔. 新疆花岗岩物理力学性质的矿物组成和微观结构分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13817-13822.
- [16] 王青振, 任邓君, 邢介波. 巨厚承压含水层精细化勘探方法研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(7): 92-94.
- [17] 王伟, 武正乾, 贺锋, 等. 伽马-伽马测井在鄂尔多斯盆地西南缘白垩系识别岩性的研究[J]. 世界核地质科学, 2024, 41(2): 343-350.
- [18] 张彦林, 张德权, 付东林. 流量测井在厚覆盖层地区勘查水源实例[J]. 物探与化探, 2007(3): 226-228+232.
- [19] 刘子松. 盐化测井在煤矿水资源调查及防治水中的应用[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(10): 46-49.
- [20] 许博. 巨厚洛河组含水层精细划分研究分析[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(11): 92-99.
- [21] 李超峰, 刘业献, 张金魁, 等. 基于双 Packer 抽水试验的洛河组水文地质特征垂向变异性研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(11): 55-64.