

李建光,孙超,蔡来星,等.煤系岩石电性特征与含水饱和度定量关系实验:以山西宁武榆树坡为例.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(5):1724-1735. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240006.

Li Jianguang, Sun Chao, Cai Laixing, et al. Experiment on Quantitative Relationship Between Electrical Properties and Water Saturation of Coal-Bearing Rocks: A Case Study of Yushupo in Ningwu, Shanxi. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (5):1724-1735. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240006.

煤系岩石电性特征与含水饱和度定量关系实验 ——以山西宁武榆树坡为例

李建光¹, 孙超², 蔡来星³, 屈少波⁴, 童雪瑞², 窦中浩², 姜志海²

1. 晋能控股装备制造集团有限公司, 山西 晋城 048000

2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116

3. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

4. 山西宁武榆树坡煤业有限公司, 山西 宁武 036700

摘要:煤层含水量定量预测对于解决矿井水灾害问题、提升煤矿防治水技术水平、降低煤矿防治水经济成本投入以及提高煤矿安全与经济效益具有重要意义。为实现煤层含水量定量预测,本文选用山西宁武榆树坡5煤顶板石炭系上统太原组富水区岩石,测量其物性及电阻率参数;基于测量结果,分析确定 Archie 参数,建立岩石物理量板,确定电性参数与含水饱和度、储层压力、岩性以及孔隙的定量关系。研究表明:1)煤层顶板岩石具有低孔低渗特征。2)储层有效压力对煤层顶板岩石电阻率具有影响,有效压力增加导致低频段(10 Hz)电阻率降低,但对高频段(100 kHz)电阻率几乎无影响。3)含水饱和度对煤层顶板岩石电阻率影响显著,含水饱和度增加导致低频段电阻率降低,但对高频段电阻率影响微弱;低含水饱和度对电阻率频散影响更明显,高含水饱和度对电阻率频散影响相对微弱,全饱和状态下无电阻率频散影响。4)煤层顶板岩性以砂岩为主,同时存在泥岩、灰岩等,岩性差异对干燥和饱和水样品均有显著影响,不同岩性之间的电阻率差异可达两个量级。5)胶结指数、饱和度指数以及岩性系数均随深度变化,但变化率相对平缓,以其平均值构建的岩石物理量板对含水饱和度能够进行有效预测。

关键词:突水灾害;电阻率;岩石物理量板;定量预测

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240006

中图分类号:P631.8

文献标志码:A

Experiment on Quantitative Relationship Between Electrical Properties and Water Saturation of Coal-Bearing Rocks: A Case Study of Yushupo in Ningwu, Shanxi

Li Jianguang¹, Sun Chao², Cai Laixing³, Qu Shaobo⁴, Tong Xuerui², Dou Zhonghao², Jiang Zhihai²

收稿日期:2024-01-10

作者简介:李建光(1974—),男,采矿高级工程师,主要从事煤矿开采方面的研究,E-mail: 242612372@qq.com

通信作者:孙超(1988—),男,副教授,主要从事地震岩石物理、油气地球物理方面的研究,E-mail: sunchao@cumt.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42104111,42230811);国家重点研发计划项目(2023YFC3008901);油气资源与探测
国家重点实验室开放课题(PRP/open 2207);徐州市科技局青年人才项目(KC22018)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (42104111, 42230811), the National Key Research and Development Program of China (2023YFC3008901), the State Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Open Project (PRP/open 2207) and the Science and Technology Bureau Young Talents Project of Xuzhou (KC22018)

1. Jinneng Holding Equipment Manufacturing Group, Jincheng 048000, Shanxi, China
2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China
3. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
4. Yushupo Coal Industry Co., Ltd., Ningwu 036700, Shanxi, China

Abstract: The quantitative prediction of water content in coal seams is of significant importance for solving the problems of water disasters in mines, improving the technological level of water prevention and control in coal mines, reducing the economic costs of water prevention and control, and enhancing the safety and economic benefits of coal mines. In order to realize the quantitative prediction of coal seam water content, this paper selects the rock of the Carboniferous Taiyuan Formation aquiferous area above the No. 5 coal seam roof in Ningwu Yushupo, Shanxi, and measures its physical properties and resistivity parameters. Based on the measurement results, the parameters in the Archie’s formula are analyzed and determined, and the rock physics model is established to quantify the relationship between electrical parameters and water saturation, reservoir pressure, lithology and pores. The study shows that: 1) The rock of the coal seam roof has the characteristics of low porosity and low permeability. 2) The effective pressure of the reservoir affects the resistivity of the coal seam roof rock. The increase of effective pressure leads to the decrease of the resistivity at low frequencies, but has almost no effect on the resistivity at high frequencies. 3) Water saturation significantly influences the resistivity of the coal seam roof rock. An increase in water saturation causes a decrease in resistivity at low frequencies, but has a weak effect on high-frequency resistivity. Low water saturation has a more significant impact on resistivity dispersion, high water saturation has a relatively weak effect on resistivity dispersion, and full saturation has no effect on resistivity dispersion. 4) The lithology of the coal seam roof is mainly sandstone, with the presence of mudstone, limestone, etc. Lithological differences have a significant impact on both dry and water-saturated samples, and the resistivity difference between different lithologies can reach two orders of magnitude. 5) Cementation index, saturation index, and lithology coefficient all change with depth, but at a relatively steady rate, and the water saturation can be effectively predicted by the rock physics model constructed by its average value.

Key words: water inrush disaster; resistivity; rock physics model; quantitative prediction

0 引言

据国家安全生产监督管理总局(现国家应急管理部)统计,在煤矿重、特重大事故中,水害是仅次于瓦斯爆炸的灾害,截至 2022 年,我国发生煤矿水害事故超 1 200 起^[1]。在煤矿灾害事故中,水害矿难造成的经济损失严重程度、事故抢险救援难度和恢复矿井生产所需时间等方面最为突出。近年,随着防治水技术水平的提高与发展,在国家与地方的双重强力监管下,煤矿突水事故的发生次数虽呈连年下降趋势,但仍未得到根本有效的扼制。煤矿防治水工作须坚持“预测预报,有疑必探,先探后掘,先治后采”的原则,受采空区突水威胁严重的山西省进一步强化了该原则,要求“有掘必探”。在此原则下,形成了“物探先行、钻探验证、化探跟进”的技术措施。作为上述技术措施的排头兵,地球物理水文地质探测

技术在煤矿防治水中取得了一定的应用效果,但仍无法满足煤矿防治水的技术要求,其理论、方法、技术与应用等方面均需进一步创新发展^[2],以实现突水危险源的精准探测,确实有效解决突水灾害问题,提升煤矿防治水技术水平,降低煤矿防治水经济成本投入,提高煤矿安全与经济效益。

煤矿防治水的突破关键在于准确圈定富水区域并定量评估其含水量。岩石物理技术是定量预测气体、流体及岩体组分特征的关键钥匙,近年发展迅速^[3-4]。岩石物理实验研究表明,电阻率是储层岩石含水饱和度最为敏感的参数。Ahmed 等^[5]认为,基于 Archie 公式和实验测量的电阻率和孔隙度可定量反演含水饱和度。Archie 公式中最重要的两个参数是胶结指数(m)和饱和度指数(n)。其中,胶结指数受多种因素影响,相关研究有:El-Aswad 等^[6]认为砂岩的胶结指数与应力和孔隙度密切相关;

Keller^[7] 研究结果表明岩性、孔隙度、压实度、胶结程度和时间均会影响岩石胶结指数; Atkins 等^[8] 同样认为胶结指数强烈依赖于岩石颗粒和孔隙的形状、粒度类型、岩性及矿物学组成, 并且, 泥质黏土含量增加以及沉积物或岩石的非均质混合物存在都会导致胶结指数的增加。饱和度指数与饱和度的影响密切相关, 通常在实验中获得^[9], 其物理意义尚未有广泛解释。其有关影响因素的研究包括: Zhao 等^[10] 的研究结果表明, 饱和度指数受孔隙中水的分布和连通性影响, 随着含水饱和度的减小, 饱和度指数也减小; Keller^[11] 的研究表明, 土壤的润湿性同样会影响饱和度指数; Toumelin 等^[12] 通过数值模型研究了饱和度指数, 结果表明孔隙对饱和度指数影响巨大。此外, 饱和度指数同样会受到应力的影响。如: 孙建孟等^[13] 和陈春宇等^[14] 的研究表明, 应力对饱和度指数的影响具有不确定性, 有时会增大, 有时会减小。上述研究结果均表明, 饱和度指数和胶结指数受多种因素影响, 其范围特征存在差异。如廖东良等^[15] 的研究结果表明, m 的取值范围为 1.52~2.02, n 的取值范围为 1.15~3.80, 与 Archie 公式最初提出时的预设值 ($m=n=2$) 存在较大差异; 罗娜^[16] 研究了几种理想情况下 Archie 公式的胶结指数和饱和度指数, 认为 n 的取值范围为 1.5~2.5; 李先鹏^[17] 的研究表明, 同一层位孔隙度完全相同的岩心, 胶结指数和饱和度指数同样可能存在差异; Shankar 等^[18] 的研究表明, 孔隙结构使岩层渗透率、电导率等发生变化, 对应的 m 取值范围为 0.8~1.0; Jackson 等^[19] 研究了不同球度下岩石的胶结指数, 结果表明 m 的取值范围为 1.39~1.58; Anderson^[20] 的研究结果表明, 受孔隙连通性或黏度改变的影响, n 的取值范围为 2.0~3.5; Spangenberg^[21] 研究了水合物储层岩石的饱和度指数特征, 结果表明 n 在 0.5~4.0 之间变化, 在特定情况下, n 值可达 6; Bahuguna 等^[22] 进一步指出, 同一岩石不同层段内的胶结指数和饱和度指数也不同, 上部分别为 1.89 和 1.46, 中部则分别为 1.88 和 1.40; Li 等^[23] 研究了岩石饱和水合物时胶结指数和饱和度指数的取值, 分别为 0.167 7 和 1.601 9; Mohamad 等^[24] 的研究表明, n 在 0.84~3.40 之间变化且幅度较大, m 在 1.49~2.19 范围内不稳定变化。上述研究结果表明, 岩石类型和种类对胶结指数、饱和度指数以及岩性参数的影响显著。

煤层顶底板岩石的富水量与突水灾害密切相

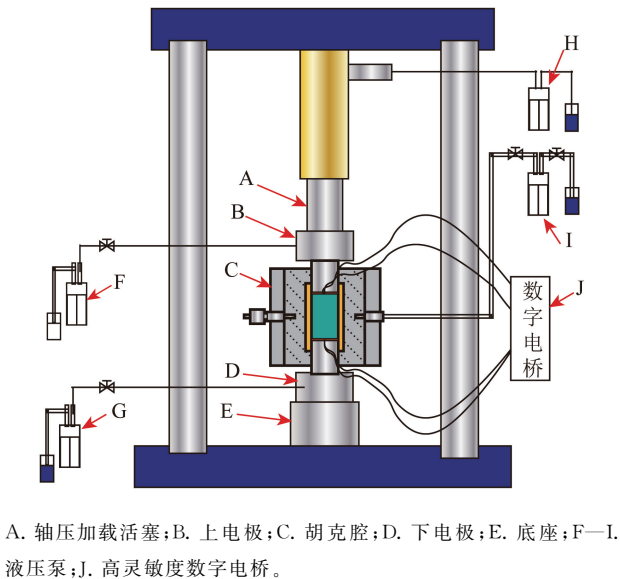
关^[25]。已有研究表明煤层顶底板岩石具有低孔低渗特征^[26]。姚军朋等^[27] 分析了低孔低渗砂岩的岩性系数, 发现岩性系数 a 为 1.01~2.22, m 为 1.32~1.58, 岩性系数 b 为 0.78~1.64, n 为 1.56~4.44。么忠文等^[28] 测量分析了低孔低渗泥质砂岩水淹层的电性特征, 结果表明 m 取值范围为 1.4~1.8, n 取值范围为 1.9~1.5。邹德江等^[29] 发现低孔低渗岩石的胶结指数在一定范围内变化。Tan 等^[30] 发现低孔低渗砂岩的岩性系数 a 约为 4.8。上述研究虽表明低孔低渗砂岩的胶结指数和饱和度指数变化范围很大, 但并未对煤层顶底板岩石电性参数进行直接研究, 因而缺少对 Archie 公式表征煤层顶底板岩石电阻率的定量认识, 导致煤层含水量预测工作存在挑战。本文选取山西宁武榆树坡 5 煤顶板主要充水层岩石, 通过实验分析确定其 Archie 公式参数, 建立岩石物理量版, 预期为实现煤层顶板含水量定量预测提供数据和理论依据。

1 实验设备及方法

1.1 实验设备及原理

本文使用的测量装置为中国矿业大学自主研发的高温高压电阻率测量设备。该设备结合了地震测量单元、超声测量单元和电阻率测量单元, 可同步测量地震频段、超声频段的弹性参数以及电阻率, 具有操作简便、装置简单、测量精度高的优点。图 1 为设备设计图, 可测量岩石样品的直径尺寸为 25 或 38 mm, 电阻率频率测量范围为 0~1 MHz。设备具体包括: 轴压加载活塞(图 1,A), 用以加载轴向压力, 可加载到 60 MPa; 上电极(图 1,B), 用以加载电压, 基底材料为聚醚醚酮(PEEK), 顶端为导电性良好的紫铜; 胡克腔(图 1,C), 可加载围压到 60 MPa, 温度到 100 °C; 下电极(图 1,D), 材料为 PEEK, 可加载电压, 顶端为导电性良好的紫铜; 底座(图 1,E), 用于调整高度; 液压泵(图 1,F、G、H、I), 用于加载轴压和围压; 数字电桥(图 1,J), 可测量电阻率, 有效测量频带为 0~1 MHz。

电阻率测量采用二级法完成, 该方法具有以下特点: 1) 在测量过程中, 测试样品上下电极沿轴线垂直对齐放置, 通过轴压加载预应力, 使样品和电极紧密粘合以消除接触电阻。对于电阻率较大的岩石样品, 测量时可在样品两端涂抹适量导电胶, 以增强样品两端的导电性。2) 将紫铜电极设置为蜂窝状, 采



A. 轴压加载活塞;B. 上电极;C. 胡克腔;D. 下电极;E. 底座;F—I. 液压泵;J. 高灵敏度数字电桥。

图 1 高温高压电阻率测量设备图

Fig.1 High-temperature and high-pressure resistivity measurement equipment schematic

用铜制引线,端口均匀缠绕于铜片上,用以消除电极的电解反应,保证电荷分布均匀。3)样品外部包裹绝缘胶套,通过围压将样品外表面和胶套内测贴合,保证测试时电流直接通过样品,而不通过边界流体。

使用高精度 LCR(电感电容电阻)数字电桥采集岩石样品两端的电压和电流,计算电阻率。当供电电压频率为 0 Hz 时,即直流电法,其测量原理为

$$\rho = \frac{U}{I} \quad (1)$$

式中: ρ 为电阻率; U 为电压; I 为电流。当供电电压频率大于 0 Hz 时,即交流电法,其测量原理为

$$\rho_s = \rho_x \cos \theta \quad (2)$$

式中: ρ_x 为电桥测量所得复电阻率; ρ_s 为实电阻率; θ 为相位角。一般而言,电场随频率增大而减小,此时称其为频率域激发极化现象,即频率域激电效应。逐次改变所供交变电流的频率(但保持供电电流的幅值不变),根据测量电极之间电位差的变化,可以观测到频率域激电效应。

1.2 测试样品饱和和方法

实验中使用矿井水对测试样品进行饱和,具体步骤如下:1)将样品放入干燥箱中烘干 10 h,测量干燥样品质量;2)将干燥样品放入充满矿井水的真空仓中进行负压饱和,维持压力为-0.1 MPa,持续时间 5 h;3)将样品放入胡克腔(图 1,C),加载 1 MPa 孔压,持续排出 3 倍孔隙体积的矿井水后,关

闭流体出入口,实现测试样品全饱和;4)将样品拿出,放在空气中干燥,依据样品重量计算岩石含水饱和度,实现部分饱和。

2 样品描述与物性测量

本次实验选用山西宁武榆树坡 5 煤顶板石炭系上统太原组富水区岩石样品 37 块,所在深度为 394.0~583.4 m;样品直径为 38 mm,高为 76 mm;取样涵盖顶板所有岩性,包括泥岩(图 2,4-66)、粉砂岩(图 2,63-29)、细砂岩(图 2,66-28)、中砂岩(图 2,66-27)、粗砂岩(图 2,106-9)、铝土矿(图 2,115-3)以及石灰岩(图 2,119-1)等。表 1 显示了样品编号、所在深度、岩性、孔隙度及渗透率。图 3a 为样品孔隙度分布特征,大部分样品孔隙度集中在 1%~3% 之间,少量粗砂岩、中砂岩、细砂岩和泥岩的孔隙度在 3%~4% 之间,少量粗砂岩、细砂岩、粉砂岩和泥岩的孔隙度在 1% 以下。总体上看,煤层顶板岩石的孔隙度偏低,属于致密岩石,孔隙结构十分复杂。图 3b 为样品渗透率分布特征,大部分样品渗透率集中在 0.2~2.0 μD 之间,其余分布在 0.0~0.2 和 2.0~20.0 μD 这两个区间。综合孔隙度和渗透率特征,煤层顶板岩石具有低孔低渗特征。



图中样品编号 aa-bb 样式中的 aa 为取样回次,bb 对应于表 1 中的样品编号。由于有些样品在完成测试后又进行了压裂测试,无法保存,因此,图中并没有包含表 1 中记录的所有样品。

图 2 榆树坡煤矿顶板测量岩样示意图

Fig.2 Measured samples from the roof strata of Yushupo coal mine

饱和样品的原位矿井水密度为 1 g/cm³,电导率为 1 126 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。矿井水密度与纯水类似,但地下矿井水富含更多矿物,因而电导率更高。

表 1 榆树坡煤矿顶板 37 块样品参数

Table 1 Parameters of 37 samples from the roof strata of Yushupo coal mine

样品 编号	取样深度/m	岩性	孔隙 度/%	渗透 率/ $\mu\text{D}^{\text{①}}$	样品 编号	取样深度/m	岩性	孔隙 度/%	渗透 率/ μD
67	394.0	粉砂岩	1.88		27	482.8	中砂岩	1.97	0.35
66	395.3	泥岩	1.34		26	485.3	细砂岩	1.40	0.01
63	399.6	粉砂岩	1.92		24	492.9	泥岩	1.20	
61	402.7	粉砂岩	2.29	2.80	23	495.2	粉砂质泥岩	1.95	
58	411.2	细砂岩	1.41	1.43	22	499.6	细砂岩	1.84	
56	414.7	中砂岩	3.78	1.35	21	503.5	粉砂岩	2.11	0.21
54	417.8	粗砂岩	2.42		19	515.0	粉砂岩	1.57	0.18
52	423.6	粉砂岩	2.17		18	518.9	细砂岩	4.02	0.92
49	432.3	中砂岩	2.58	0.68	14	540.6	细砂岩	2.03	
48	433.1	粗砂岩	2.93		13	543.8	中砂岩	1.76	0.29
47	433.6	中砂岩	4.02	1.35	10	550.5	中—细砂岩	1.41	2.37
37	455.5	中砂岩	1.69	2.71	9	551.5	粗砂岩	1.00	0.29
36	456.4	粗砂岩	2.16	1.78	8	565.3	泥岩	3.52	
33	471.1	细砂岩	1.54	1.19	7	565.7	粗砂岩	3.66	2.74
32	471.8	泥岩	0.74		5	568.3	粉砂质泥岩	1.84	15.00
31	475.2	粉砂岩	0.13		4	570.8	泥岩	0.43	0.01
30	476.7	细砂岩	0.30	1.72	3	573.2	铝土矿	2.97	0.00
29	478.9	粉砂岩	0.53	1.67	1	583.4	石灰岩	1.30	2.04
28	481.5	细砂岩	2.54	0.07					

注：① μD (微达西)为非法定计量单位,1 μD = 0.987×10^{-6} μm^2 ,下同。

3 结果与分析

依据岩性,选取粉砂岩、细砂岩、中砂岩、粗砂岩和泥岩各两块进行分析(图 4)。其中,含水饱和度变化范围为 0%~100%,有效压力变化范围为 0~15 MPa。

整体上看,随频率增加,电阻率从 $10^6\ \Omega\cdot\text{m}$ 量级降到 $\Omega\cdot\text{m}$ 量级。这种频散现象可归结为频率域的激发极化效应。在评价频率域激发极化效应的众多模型中,Cole-Cole 模型应用较为广泛,此模型通常将岩石骨架及孔隙流体分别等效为电路中的电阻或电容等电子元器件^[31]：

$$\rho(\omega)=\rho_{\text{L}}\left\{1-\eta\left[1-\frac{1}{1+(\text{i}\omega\tau)^c}\right]\right\}。 \quad (3)$$

式中： ω 为角频率； $\rho(\omega)$ 为与角频率有关的复电阻率； ρ_{L} 为低频极限电阻率； η 为极化率， $\eta=1-\rho_{\infty}/\rho_0$ (ρ_{∞} 为高频电阻率， ρ_0 为直流电阻率)； τ 为弛豫时间； c 为频率相关常数。该模型解释了实验观

测到的电阻率频散现象。

3.1 含水饱和度对岩石电阻率的影响

以 31 号粉砂岩(图 4a)为例,干燥样品的频散幅度最强,约为 99.9%；随着含水饱和度增加到 45.2%，频散幅度变为 99.0%，频散过渡带轻微向左移动；当含水饱和度增加到 60.3%时,在测量频率 $1\sim10^6$ Hz 内观测到明显的频散过渡带；随着含水饱和度从 74.0%增加到 100%，频散大幅减小,约为 0。图 4b—j 的规律与图 4a 类似。

为更清晰地显示电阻率与含水饱和度的关系,抽取 67 号、47 号、36 号以及 23 号样品的电阻率特征(图 5)进行研究。以 67 号样品为例:在低频(例如 10 Hz)情况下,随含水饱和度增加,电阻率从 $10^8\ \Omega\cdot\text{m}$ 量级降低到 $10^4\ \Omega\cdot\text{m}$ 量级；在中间频率(例如 1 kHz)情况下,随含水饱和度增加,电阻率从 $10^6\ \Omega\cdot\text{m}$ 量级降低到 $10^4\ \Omega\cdot\text{m}$ 量级；在高频(例如 100 kHz)情况下,随含水饱和度增加,电阻率变化

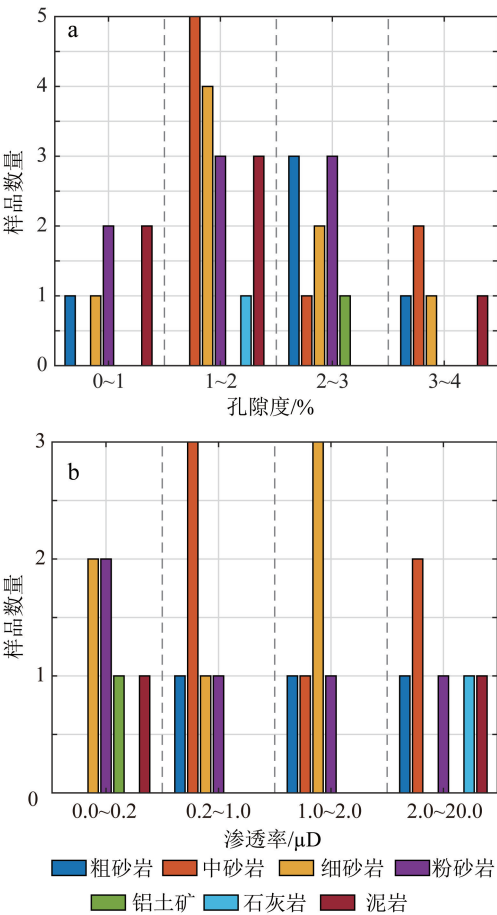


图 3 榆树坡煤矿顶板 37 块样品物性统计结果
Fig.3 Property statistics of 37 rock samples from the roof strata of Yushupo coal mine

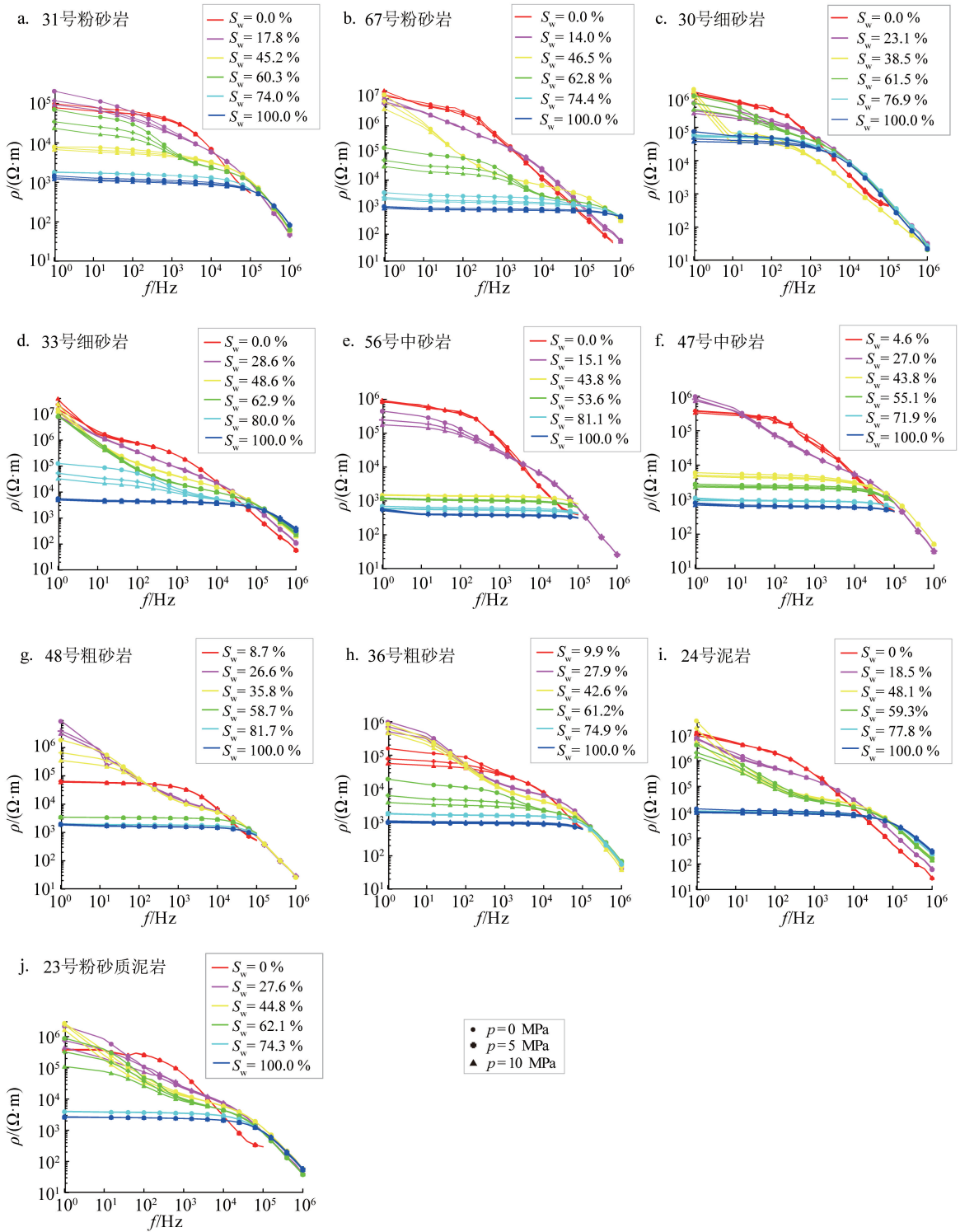
微弱。整体分析,47 号中砂岩、36 号粗砂岩以及 23 号粉砂质泥岩的电阻率变化规律与 67 号粉砂岩类似;但对于 36 号样品(图 5c),在 10 Hz 情况下,当含水饱和度从 9.9%增加到 27.9%时,岩石电阻率有明显升高现象。这种现象可能是因为岩石过低的孔隙度导致低含水饱和度测量时存在误差;此外,低饱和度下存在较为明显的润湿性效应,同样可能是造成上述现象的原因。总的来说,当含水饱和度低于 60%时,电阻率频散现象明显;当含水饱和度大于 60%时,频散现象逐渐消失。这表明当样品接近全饱和时,激发极化效应影响变弱乃至消失。尽管如此,也存在特例,比如 30 号细砂岩(图 4c),过低的孔隙度(0.30%)导致样品含水量并不大,只在低频范围内存在轻微的影响。

3.2 有效压力对岩石电阻率的影响

有效压力(约等于围压减去孔压)变化同样对岩石电阻率具有重要影响。对于 31 号粉砂岩(图

4a):当含水饱和度为 0%、17.8%和 45.2%时,有效压力从 0 MPa 增加到 10 MPa 对岩石电阻率影响很小。当含水饱和度增加到 60.3%时,随有效压力增加,电阻率的频散特征发生变化。具体而言,在低频部分(小于 10 Hz),随有效压力增加,电阻率降低;在高频部分(大于 100 kHz),随有效压力增加,电阻率几乎没什么变化。当含水饱和度增加到 100%时,随有效压力增加,电阻率几乎没什么变化。67 号粉砂岩(图 4b)对有效压力的依赖性与 31 号粉砂岩类似。对于 30 号细砂岩(图 4c):当含水饱和度为 0%时,有效压力从 0 MPa 增加到 10 MPa 对岩石电阻率影响很小。当含水饱和度为 23.1%、38.5%和 61.5%时,随有效压力增加,电阻率的频散特征发生变化。具体而言,在低频部分,随有效压力增加,电阻率降低;在高频部分,随有效压力增加,电阻率几乎没什么变化。当含水饱和度增加到 100%后,随有效压力增加,电阻率变化微弱。30 号细砂岩在相对低含水饱和度时表现出有效压力的敏感性,与 31 号粉砂岩表现出轻微差异。对于 33 号细砂岩(图 4d),当含水饱和度为 80.0%时,随有效压力增加,电阻率的频散特征发生变化:同样在低频部分,随有效压力增加电阻率降低;高频不受影响。56 号中砂岩(图 4e)在低含水饱和度 15.1%时表现出有效压力敏感性,即随有效压力增加,低频时电阻率降低,高频时电阻率不发生变化。47 号中砂岩(图 4f)在所有含水饱和度下电阻率均未发生明显变化。48 号粗砂岩(图 4g)在含水饱和度为 35.8%时表现出明显的有效压力敏感性。36 号粗砂岩(图 4h)从含水饱和度为 9.9%开始,直至 61.2%时均表现出有效压力敏感性,但在高含水饱和度 74.9%和 100%时同样未表现出有效压力敏感性。24 号泥岩(图 4i)和 23 号粉砂质泥岩(图 4j),分别在含水饱和度为 59.3%和 62.1%时表现出明显的有效压力敏感性,其余含水饱和度则并未展有效压力敏感性。

总的来说,对大部分样品而言,在低饱和度(如干燥样品)和高饱和度(如全饱和)下,有效压力对电阻率几乎没有影响;然而在中间饱和度(如 20%~80%之间)下,随有效压力增加,电阻率降低。上述现象的本质原因可能是有效压力导致岩石中的裂缝、软孔隙等闭合,从而流体饱和度提升,电阻率降低;另一方面,微观结构的轻微变化同样改变了导电性的差异。对于极低和极高的饱和度,尽管有效压



p . 有效压力; S_w . 含水饱和度; f . 频率。

图 4 榆树坡煤矿顶板 10 块样品在不同饱和度、不同压力下的频变电阻率曲线

Fig.4 Frequency-dependent resistivity curves of ten samples under various saturations and pressures from the roof strata of Yushupo coal mine

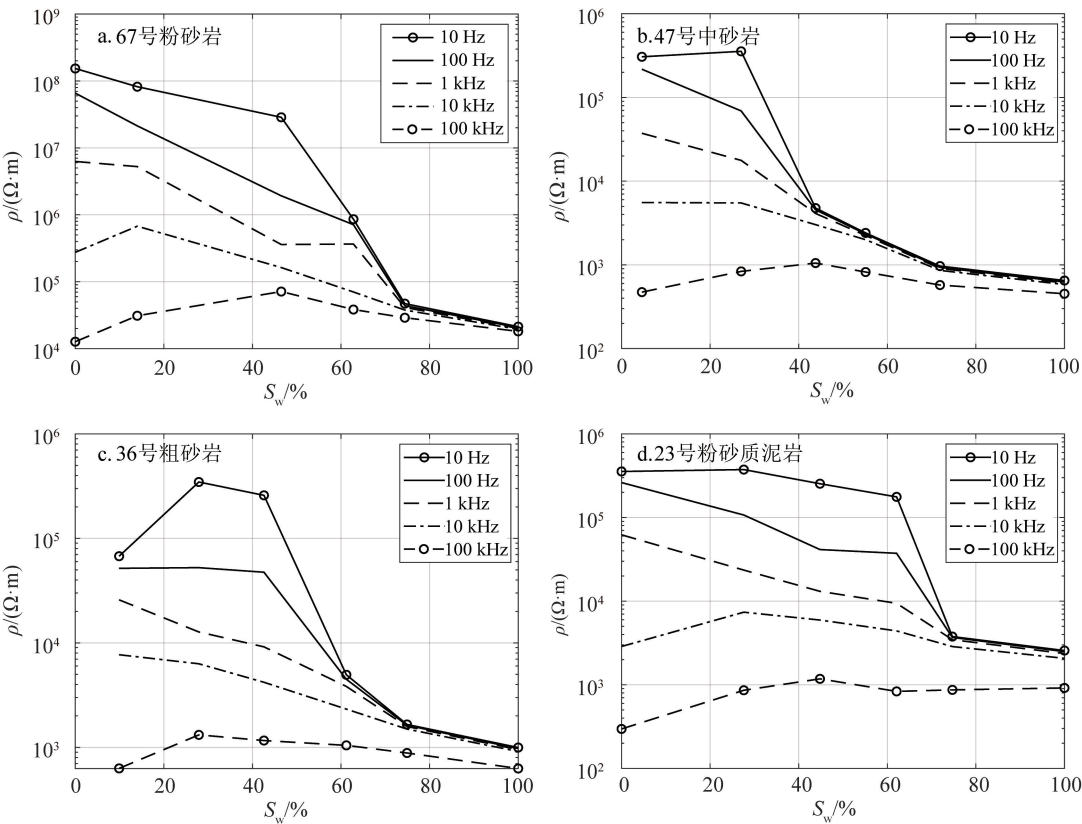


图5 榆树坡煤矿顶板4块样品的岩石电阻率随含水饱和度的变化规律

Fig.5 Resistivity versus water saturation for four samples from the roof strata of Yushupo coal mine

力能够导致裂隙闭合,但二者展示出了有效压力的不敏感性(极低的饱和度变化不大,而极高的饱和度几乎没有变化)。

特别地,在中间饱和度时,47号中砂岩(图4f)对有效压力并不敏感,其原因可能是该样品的裂隙密度、软孔隙较小,导致有效压力对岩石含水饱和度的影响微弱。

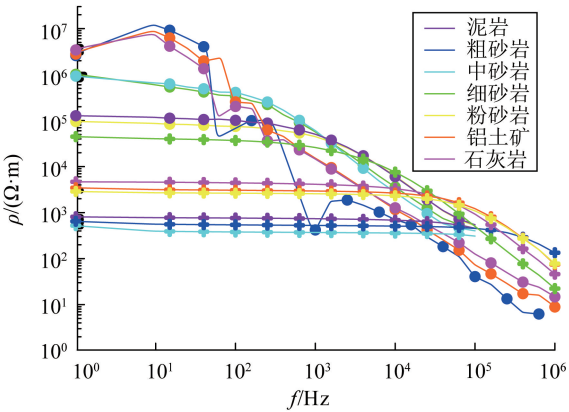
3.3 岩性对岩石电阻率的影响

图6展示了煤层顶板岩性对电阻率的影响。在干燥情况下,泥岩电阻率最低:低频时量级约为 $10^5 \Omega \cdot \text{m}$,较砂岩(约 $10^7 \Omega \cdot \text{m}$)、铝土矿(约 $10^7 \Omega \cdot \text{m}$)和石灰岩(约 $10^7 \Omega \cdot \text{m}$)低了两个量级,但与粉砂岩相当;高频时各岩性电阻率类似。

当样品为完全饱和和矿井水时,泥岩、粗砂岩和中砂岩的电阻率(约 $10^3 \Omega \cdot \text{m}$)均比粉砂岩、铝土矿和石灰岩(约 $10^4 \Omega \cdot \text{m}$)低一个量级。通过表1所示的孔隙度特征,粉砂岩、铝土矿和石灰岩的含水量较小,导致电阻率较高。

综上所述,目标区煤层顶板岩性对电阻率影响

显著,不同岩性之间的电阻率差异可达两个量级。因此,在进行岩石含水饱和度定量预测时,针对性考虑岩性的影响是十分必要的。



有效压力为5 MPa时不同岩性样品在干燥与全饱和状态下的频变电阻率

Fig.6 Frequency-dependent resistivity of different lithology samples under dry and fully saturated conditions at an effective pressure of 5 MPa

3.4 孔隙对岩石电阻率的影响

孔隙是影响岩石电阻率的另一重要因素。岩石孔隙喉道的类型、分布、形状特征及其在岩石中的占比均会对岩石电阻率产生影响。Archie 公式是描述电阻率与孔隙度关系最经典、最常用的模型。Wyllie 等^[32]对 Archie 公式修订后的形式为

$$F = \frac{\rho_0}{\rho_w} = \frac{a}{\varphi^m} \quad (4)$$

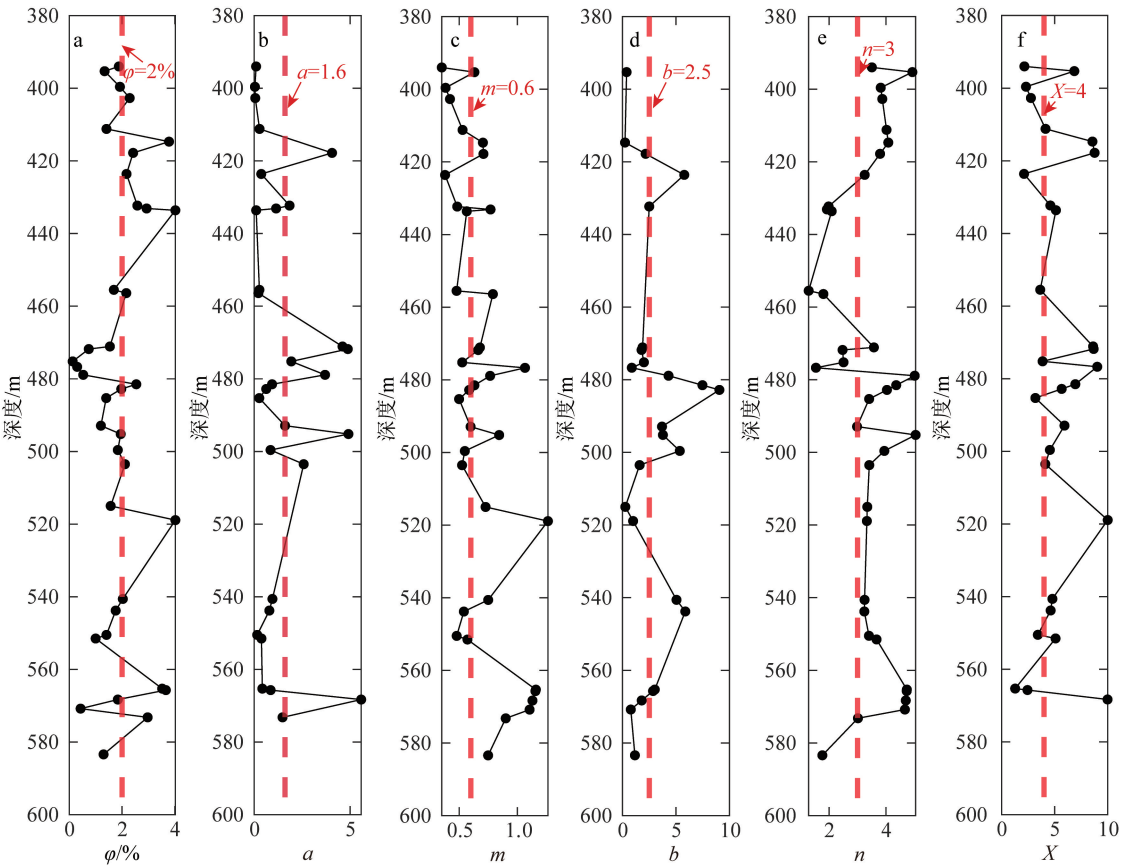
式中: F 为地层因子; ρ_w 为地层水电阻率; φ 为孔隙度; a 为岩性系数。图 7a 是实测孔隙度。利用实验数据,根据式(4)拟合线性关系,获得 a 和 m ,结果如图 7b、c 所示,可见:随深度增加,岩性系数 a 轻微增加,变化范围为 0~5,大部分位于 1.6 附近(图 7b); m 与 a 的变化规律类似,为深度的单调递增函数, m 的变化范围为 0.1~1.3(图 7c),小于假设岩石完全由球体构成时的胶结指数 1.5^[33],意味着煤层顶板岩石 REV(representative elementary volume)并不是球体结构。对比纯石英砂岩的胶结指数(1.805)

和岩性系数 a (0.856)^[34]可知,煤层顶板砂岩的岩性系数 a 偏大,胶结指数 m 偏小。上述差异源于煤层顶板砂岩的孔隙结构更加复杂。

Archie 公式^[35]的另外一种形式描述了岩石电阻率与流体饱和度的关系:

$$I = \frac{\rho_t}{\rho_0} = \frac{b}{S_w^n} \quad (5)$$

式中: I 为电阻率增大系数; ρ_t 为岩样部分含水时的电阻率; b 为岩性系数。利用实验数据拟合线性关系,获得 b 和 n ,结果如图 7d、e 所示,可见:岩性系数 b 随深度增加而变化,变化范围为 0~10,大部分居于 2.5 附近(图 7d); n 的变化范围多为 2~4,其中 460 m 以上 n 值偏小,460 m 以下 n 值偏大,均值为 3(图 7e),大于 Archie 经典参数^[35]的预设范围 1.0~2.5,表明煤层顶板岩石 REV 与经典球状模型不一致。对比纯石英砂岩的饱和度系数(0.97~1.82)和岩性系数 b (1.008~1.006)^[34]可知:煤层顶板砂岩的岩性系数 b 和饱和度指数均偏大。



黑色圆点为利用回归方法拟合所得参数;红色虚线为各参数平均值。

图 7 基于实验数据获得的孔隙度及 Archie 公式中对应参数随深度的变化

Fig.7 Variation with depth of porosity and corresponding parameters in Archie's formula based on experimental data

式(4)(5)中的 ρ_0 在现场很难直接测量,相反 ρ_w 更加容易获得并测量(一个区域可以按同样比例调配),为此,将式(4)(5)相乘,得到

$$IF = \frac{\rho_t}{\rho_0} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_w} = \frac{a}{\varphi^m} \cdot \frac{b}{S_w^n} \quad (6)$$

由于 a 和 b 均为岩性系数,令 $ab = X$,得到

$$\frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{X}{\varphi^m S_w^n} \quad (7)$$

参数 X 随深度变化结果见图 7f, X 均值为 4。

参数 m 、 n 、 a 及 b 受多种因素影响,使用固定参数值预测电阻率并不理想,反而通过测井或实验模拟数据拟合分析更加可靠。

3.5 岩石物理量版建立及含水饱和度定量预测

通过实验约束可获得 Archie 公式中各参数与深度的关系(见 3.4 节)。然而,参数预测结果无法直接用于定量预测煤层顶板含水饱和度。为此,基于 Archie 公式及各参数构建岩石物理量板,以实现含水饱和度定量预测。取岩性系数、饱和度指数和胶结指数的均值 $X = 6$ 、 $n = 3$ 以及 $m = 0.5$ 作为量板的正演参数,并利用式(7)确定岩石电阻率与含水饱和度之间的关系。构建后的岩石物理量板见图 8。根据 Avseth 等^[36]关于有效压力与深度的换算关系,当孔隙压力为静水压力时,5 MPa 的有效压力能够近似岩心所处 500 m 深度地层的压力条件,即相当于顶板深度在 400~600 m 之间。依据图 8,实验数据点与量板之间存在很好的匹配度。以测井数据作为验证,投影到量板,预测含水饱和度接近

100%,该值在实际打井取样中得到证实。实验数据、测井数据与量板的高匹配度表明利用定量关系构建量板,从而进行含水饱和度预测是可行的。

4 结论与展望

1)本文测量了煤层顶板岩石在不同含水饱和度及有效压力下的电阻率。测试结果表明含水饱和度、有效压力、岩性和孔隙均对电阻率有影响。其中,岩性和含水饱和度对电阻率的影响最为显著,可达两个量级,有效压力次之。

2)基于 Archie 公式,以电阻率测试数据为约束,计算了岩石的胶结指数、流体饱和度指数以及岩性系数的平均值,构建了岩石物理量板。以测井数据作为验证,结果表明可以依靠岩石物理量板定量预测煤系岩石的含水饱和度。

尽管如此,上述研究并没有考虑大尺度裂缝等因素的影响,未来将对其影响进行定量研究,进一步提升含水饱和度预测精度,为避免矿业突水灾害提供帮助。

参考文献(References):

[1] 曾一凡,武强,赵苏启,等. 我国煤矿水害事故特征、成因与防治对策[J]. 煤炭科学技术,2023, 51(7): 1-14.

Zeng Yifan, Wu Qiang, Zhao Suqi, et al. Characteristics, Causes, and Prevention Measures of Coal Mine Water Hazard Accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 1-14.

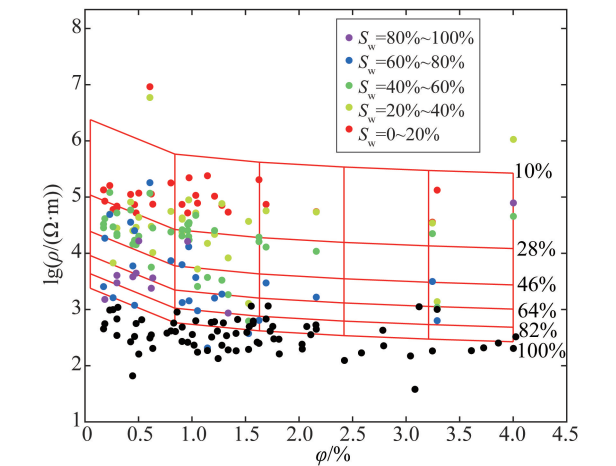
[2] 张耀辉,张海波. 矿井防治水技术研究现状及展望[J]. 煤矿安全,2016, 47(4): 195-198.

Zhang Yaohui, Zhang Haibo. Research Status and Outlook of Mine Water Prevention and Control Technology[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(4): 195-198.

[3] 余传涛,柳春林,薛俊杰,等. 废弃矿井煤层气资源地球物理勘探研究进展[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(6): 1991-2005.

Yu Chuantao, Liu Chunlin, Xue Junjie, et al. Review in the Geophysical Methods for Coalbed Methane Resources in Abandoned Coal Mine[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1991-2005.

[4] 李阳,韩立国,孟兆海,等. 辽西地质走廊带岩石物性在岩石成因研究中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2023, 53(5): 1623-1634.



红色线框为通过 Archie 公式构建的量板,标值 10%~100 %为含水饱和度。黑色散点为测井数据,其他颜色散点为岩石样品实测数据。

图 8 岩石物理量版
Fig.8 Rock physics template

- Li Yang, Han Liguang, Meng Zhaohai, et al. Application of Petrophysical Properties in the Geological Corridor of Western Liaoning Province to Petrogenesis[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(5): 1623–1634.
- [5] Ahmed R, Farman G M. How to Estimate the Major Petrophysical Properties: A Review[J]. Iraqi Journal of Oil and Gas Research, 2023, 3(1): 43–58.
- [6] El-Aswad A, Elagil I, Fatooh S. Stress Effect on Cementation Factor of Sandstone Rocks Type Evidence for a Variable Archie Porosity Exponent “ m ” [J]. Scientific Journal of Applied Sciences of Sabratha University, 2018, 1(1): 50–66.
- [7] Keller G V. Handbook of Physical Properties of Rocks: Electrical Properties of Rocks and Minerals [M]. Boca Raton: CRC Press, 1982.
- [8] Atkins E R Jr, Smith G H. The Significance of Particle Shape in Formation Resistivity Factor-Porosity Relationships[J]. Journal of Petroleum Technology, 1961, 13(3): 285–291.
- [9] Glover P W J. A New Theoretical Interpretation of Archie’s Saturation Exponent[J]. Solid Earth, 2017, 8(4): 805–816.
- [10] Zhao J, Liu C, Li C, et al. Pore-Scale Investigation of the Electrical Property and Saturation Exponent of Archie’s Law in Hydrate-Bearing Sediments [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(1): 111.
- [11] Keller G. Effect of Wettability on the Electrical Resistivity of Sand[J]. Oil and Gas Journal, 1953, 51(34): 62–65.
- [12] Toumelin E, Torres-Verdin C. Influence of Oil Saturation and Wettability on Rock Resistivity Measurements: A Uniform Pore-Scale Approach [C]// SPWLA Annual Logging Symposium. [S. l.]: SPWLA, 2005: SPWLA–2005–PPP.
- [13] 孙建孟, 吴金龙, 于代国, 等. 阿尔奇参数实验影响因素分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(2): 39–41.
- Sun Jianmeng, Wu Jinlong, Yu Daiguo, et al. Influential Factors in Archie Parameters Experiment [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(2): 39–41.
- [14] 陈春宇, 梁利喜, 刘向君, 等. 围压对碳酸盐岩储层饱和度指数影响实验研究[J]. 测井技术, 2012, 36(5): 448–450.
- Chen Chunyu, Liang Lixi, Liu Xiangjun, et al. The Experimental Study of Confining Pressure Effect on Carbonate Reservoir Saturation Index [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(5): 448–450.
- [15] 廖东良, 孙建孟, 马建海, 等. 阿尔奇公式中 m 、 n 取值分析[J]. 新疆石油学院学报, 2004, 16(3): 16–19.
- Liao Dongliang, Sun Jianmeng, Ma Jianhai, et al. The Analysis of Value-Taking for m , n in Archie Formula[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2004, 16(3): 16–19.
- [16] 罗娜. 阿尔奇公式数值分析及其意义[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 111–114.
- Luo Na. Numerical Analysis of Archie Formulae and Its Meanings[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 111–114.
- [17] 李先鹏. 胶结指数的控制因素及评价方法[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(4): 105–108.
- Li Xianpeng. Controlling Factors and Evaluation Methods of Cementation Factor [J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(4): 105–108.
- [18] Shankar U, Riedel M. Assessment of Gas Hydrate Saturation in Marine Sediments from Resistivity and Compressional-Wave Velocity Log Measurements in the Mahanadi Basin, India[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58: 265–277.
- [19] Jackson P D, Smith D T, Stanford P N. Resistivity-Porosity-Particle Shape Relationships for Marine Sands[J]. Geophysics, 1978, 43(6): 1250–1268.
- [20] Anderson W G. Wettability Literature Survey: Part 3: The Effects of Wettability on the Electrical Properties of Porous Media[J]. Journal of Petroleum Technology, 1986, 38(12): 1371–1378.
- [21] Spangenberg E. Modeling of the Influence of Gas Hydrate Content on the Electrical Properties of Porous Sediments [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2001, 106(B4): 6535–6548.
- [22] Bahuguna R M, Pabla S S, Lal M, et al. Impact on Estimation of Water Saturation Values Using Laboratory Determined ‘ a ’, ‘ m ’ & ‘ n ’ Parameters: A Case Study [C]// Proceedings of the 6th International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics. Kolkata: [s. n.], 2006: 4–6.
- [23] Li F G, Sun C Y, Li S L, et al. Experimental Studies on the Evolvement of Electrical Resistivity During Methane Hydrate Formation in Sediments[J]. Energy and Fuels, 2012, 26(10): 6210–6217.
- [24] Mohamad A M, Hamada G M. Determination Techniques of Archie’s Parameters: a , m and n in

- Heterogeneous Reservoirs[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2017, 14(6): 1358-1367.
- [25] 孟召平,张贝贝,谢晓彤,等. 基于岩性-结构的煤层底板突水危险性评价[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(5): 35-40.
- Meng Zhaoping, Zhang Beibei, Xie Xiaotong, et al. Evaluation of Water Inrush Risk of Seam Floor Based on Lithology-Structure [J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(5): 35-40.
- [26] 李康. 沁水盆地 SZN 区块煤层顶底板测井评价方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- Li Kang. Research on Logging Evaluation Methods of the Roof and Floor of Coal Seam in SZN Block, Qinshui Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [27] 姚军朋,司马立强. 合川地区低孔低渗砂岩储层含水饱和度的评价方法[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 22-25.
- Yao Junpeng, Sima Liqiang. Evaluation Methods for Water Saturation of Low Porosity and Low Permeability Sandstone Reservoirs in the Hechuan Area, Middle Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 22-25.
- [28] 么忠文,张剑风,何凯,等. 低孔低渗泥质砂岩水淹层岩电参数及定量评价标准的研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(6): 97-102, 529.
- Yao Zhongwen, Zhang Jianfeng, He Kai, et al. Lithological-Electrical Parameters and Quantitative Evaluation Criterion of Shaly-Sandstone Water-Out Reservoirs with Low Porosity and Permeability [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(6): 97-102, 529.
- [29] 邹德江,于兴河. 低孔低渗砂岩储层特征及岩石物理实验分析[J]. 石油地质与工程, 2008, 15(1): 12-14.
- Zou Dejiang, Yu Xinghe. Characteristics and Petrophysics Experiment of Low-Porosity and Low-Permeability Sandstone Reservoir [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 15(1): 12-14.
- [30] Tan F, Zhao R, Zhao Y, et al. A Case Study: Evaluating Low-Porosity and Ultra-Low-Permeability Triassic Reservoir Rocks in the Ordos Basin by the Integration of Logs and Core [J]. Petroleum Geoscience, 2017, 23(4): 454-465.
- [31] 许巍,魏然,黄航,等. 油气储层低频界面极化效应数值模型[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(6): 1481-1488.
- Xu Wei, Wei Ran, Huang Hang, et al. Numerical Simulation of Polarization Effect in Low-Frequency Interface of Oil-Gas Reservoirs[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(6): 1481-1488.
- [32] Wyllie M R J, Gregory A R. Formation Factors of Unconsolidated Porous Media: Influence of Particle Shape and Effect of Cementation [J]. Journal of Petroleum Technology, 1953, 5(4): 103-110.
- [33] Edmundson H. Archie's Law: Electrical Conduction in Clean, Water-Bearing Rock [J]. The Technical Review, 1988, 36: 4-13.
- [34] 李晓,李闯,陈猛,等. 法国巴黎盆地枫丹白露砂岩电性响应特征[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(1): 130-138.
- Li Xiao, Li Min, Chen Meng, et al. Electrical Response Characteristics of Fontainebleau Sandstone in Paris Basin, France [J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(1): 130-138.
- [35] 孙建国. 阿尔奇(Archie)公式: 提出背景与早期争论[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 472-486.
- Sun Jianguo. Archie's Formula: Historical Background and Earlier Debates [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 472-486.
- [36] Avseth P, Jorstad A, van Wijngaarden A J, et al. Rock Physics Estimation of Cement Volume, Sorting, and Net-to-Gross in North Sea Sandstones [J]. The Leading Edge, 2009, 28(1): 98-108.