

基于钻孔多参数测井的煤层顶底板岩性及厚度识别

李哲 高保彬 雷文杰 李东会 李子馨

引用本文:

李哲, 高保彬, 雷文杰, 等. 基于钻孔多参数测井的煤层顶底板岩性及厚度识别[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(12): 190–200.

LI Zhe, GAO Baobin, LEI Wenjie, et al. Identifying the lithologies and thicknesses of coal seam roofs and floors based on multiparameter logging of boreholes[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(12): 190–200.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.03.0177>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于测井参数优选的煤层含气量预测模型

Prediction model of coalbed methane content based on well logging parameter optimization

煤田地质与勘探. 2021, 49(3): 227–235, 243 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.03.029>

矿用电磁随钻伽马测井仪标定与试验

Calibration and experiment of mine electromagnetic LWD gamma logging tool

煤田地质与勘探. 2019, 47(5): 208–212 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.05.029>

声波测井在煤岩弹性力学分析中的应用

Application of acoustic logging in elastic mechanics analysis of coal and rock

煤田地质与勘探. 2019, 47(S1): 104–112 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.S1.020>

基于穿层钻孔声波远探测有限元方法的煤岩界面成像

Coal-rock interface imaging based on acoustic remote reflection logging within crossing boreholes using the finite element method

煤田地质与勘探. 2024, 52(3): 118–129 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.06.0366>

面向智能化开采的矿井煤岩层综合对比技术

Comprehensive correlation technology of coal and rock layers in mines for intelligent mining

煤田地质与勘探. 2022, 50(2): 24–38 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.04.0238>

基于聚煤环境分区的煤体结构测井判别及应用——以沁水盆地南部马必东地区为例

Coal body structure identification by logging based on coal accumulation environment zoning and its application in Mabidong Block, Qinshui Basin

煤田地质与勘探. 2021, 49(4): 114–122 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.014>



移动阅读

李哲, 高保彬, 雷文杰, 等. 基于钻孔多参数测井的煤层顶底板岩性及厚度识别[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 190–200. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.03.0177

LI Zhe, GAO Baobin, LEI Wenjie, et al. Identifying the lithologies and thicknesses of coal seam roofs and floors based on multiparameter logging of boreholes[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(12): 190–200. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.03.0177

基于钻孔多参数测井的煤层顶底板岩性及厚度识别

李 哲^{1,2}, 高保彬^{1,2,*}, 雷文杰^{2,3}, 李东会^{1,2}, 李子馨^{1,2}

(1. 河南理工大学 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454003; 2. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003;
3. 安徽理工大学 公共安全与应急管理学院, 安徽 合肥 230000)

摘要: 【背景】在煤层开采过程中, 有效的地层特征探测方法对于井下工作开展至关重要, 精确掌握煤层及其顶底板围岩的地层特征信息, 有助于煤层瓦斯治理, 保障矿井安全高效生产。【方法】采用底抽巷穿层钻孔进行多参数测井, 重点分析了低位上行钻孔轨迹信息与自然伽马、自然电位和电阻率等参数的变化特性; 通过综合对比多个钻孔的轨迹数据钻孔视频成像和测井结果, 详细描述了工作面煤层及周围岩层的分布特征, 并准确界定了各岩石类型及其真厚度; 基于钻孔测井曲线特征和对应区域成孔视频, 识别煤层中煤体结构异常区域和煤层含水区域。【结果和结论】研究结果表明: 研究区域煤层顶底板岩性主要包括砂质泥岩、泥岩、细砂岩、煤 4 种岩石, 不同岩性具有显著的测井响应特征, 结合岩性划分结果和对应的钻孔轨迹信息, 能有效划分煤层及其顶底板围岩层位。对单个钻孔开展重复性测井, 提高了岩石岩性和厚度的识别精度, 孔内厚度测量误差控制在 0.2 m 内, 验证了测井结果的可靠性。煤层自然电位和电阻率曲线交会图表明, 底抽巷第三、第四组钻孔之间存在长 8.4 m, 厚 1.1 m 的煤体结构异常区域; 自然伽马、电阻率曲线交会图曲线和钻孔视频表明, 第 6 组钻孔间存在长 3.4 m, 厚 0.9 m 的含水区域, 研究结果与工作面瞬变电磁法勘测结果相一致, 区域表现为弱富水性。多参数测井为快速判别井下钻孔的目标层位提供了高效手段, 在推进矿井地质信息的透明化建设上有着良好的应用前景。

关键词: 多参数测井; 钻孔轨迹; 岩石类型; 岩性划分; 测井曲线

中图分类号: P539.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2024)12-0190-11

Identifying the lithologies and thicknesses of coal seam roofs and floors based on multiparameter logging of boreholes

LI Zhe^{1,2}, GAO Baobin^{1,2,*}, LEI Wenjie^{2,3}, LI Donghui^{1,2}, LI Zixin^{1,2}

(1. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. School of Public Safety and Emergency Management, Anhui University of Science & Technology, Hefei 230000, China)

Abstract: 【Background】In the process of coal mining, effective exploration methods for stratigraphic characteristics are crucial to underground operations. The reason is that the accurate stratigraphic characteristics of coal seams, along with the surrounding rocks of coal seam roofs and floors, facilitate the treatment of gas in coal seams, thereby ensuring safe and efficient coal mining. 【Methods】Based on the multiparameter logging of boreholes crossing strata in a bottom drainage roadway, this study highlighted the lowstand, upgoing borehole trajectories, as well as the variations in parameters including natural gamma rays, spontaneous potential, and resistivity. By comprehensive comparison of the tra-

收稿日期: 2024-03-12; 接收日期: 2024-08-30

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目 (U23A20600)

第一作者: 李哲, 1993 年生, 男, 河南许昌人, 博士研究生。E-mail: 836888053@qq.com

*通信作者: 高保彬, 1977 年生, 男, 河南商丘人, 博士, 教授。E-mail: gaobaobin@hpu.edu.cn

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

jectories, video-derived images, and logging results of multiple boreholes, this study detailed the distributions of the coal seams and surrounding rocks of the mining face and determined the accurate types and true thicknesses of various rocks. Besides, using the logging curves of boreholes and corresponding video-derived images, this study identified zones with anomalous coal structures and the water-bearing zones within coal seams. [Results and conclusions] The results indicate that the coal seam roofs and floors in the study area consist primarily of sandy mudstones, mudstones, fine-grained sandstones, and coals, which exhibit significantly different logging responses. The combination of the lithologic classification results and corresponding borehole trajectories allows for the effective definition of coal seams, as well as the horizons of the surrounding rocks of coal seam roofs and floors. Repeated logging of a single borehole can improve the accuracy of identified lithologies and thicknesses of rocks. With errors of thickness measurements within boreholes controlled at below 0.2 m, the logging results proved valid. The cross plot of spontaneous potential and resistivity curves reveals a zone with anomalous coal structures measuring 8.4 m in length and 1.1 m in thickness between the third and fourth groups of boreholes in the bottom drainage roadway. Additionally, the cross plot of natural gamma ray and resistivity curves and borehole videos suggest the presence of a water-bearing zone with a length of 3.4 m and a thickness of 0.9 m between the boreholes of the sixth group. These results align with the results obtained using the transient electromagnetic method (TEM), suggesting regionally weak water-yield properties. Overall, multiparameter logging serves as an efficient method for rapidly determining target horizons in underground drilling, demonstrating promising prospects for advancing the geological transparency of coal mines.

Keywords: multiparameter logging; drilling trajectory; rock type; lithologic classification; logging curve

采煤工作面透明化作为保障煤炭智能化开采的主要组成部分,对我国煤炭健康、绿色、高效发展有着重要的意义^[1]。在推进煤矿智能化开采的过程中,煤岩界面精准识别是制约煤矿工作面智能化、无人化的关键因素^[2-3]。因此,煤岩类型与岩性划分对智能化开采、突出煤层钻孔定位来说都是非常重要的。

地球物理测井作为常用的物探手法之一,在岩性识别和地层划分上有着明显的优势^[4-8]。常用的测井方法包括放射性测井^[9-10]、电法测井^[11-12]、声波测井^[13-14]、成像测井^[15-16]、随钻测井^[17]、倾角测井^[18-19]、电磁法测井^[20-24]等,在使用时可根据现场实际地质条件和具体工况要求进行选择。结合相关物探数据,地球物理测井能够有效识别煤体结构信息,分析和预测煤体构造发育情况,具有良好的应用前景^[25-29]。

对于井下钻孔,受井下作业条件及钻孔孔径等因素的限制,常采用随钻伽马测井^[30]、随钻参数反演测井^[31-32],划分钻孔内岩石岩性。缺少自然电位、电阻率测井系列,在测井时需要对测斜、窥视、自然伽马、电阻率、自然电位等单独施工,施工工序复杂、施工周期长。

基于此,笔者结合多参数测井及轨迹和视频成像,考察孔内岩石的自然伽马(GR)、浅三侧向电阻率(RS)、自然电位(SP)、钻孔轨迹、成孔视频等多个测井参数,对钻孔内岩石岩性和对应的分布特征进行定性及定量划分,判断煤层及其顶底板围岩岩性,提升工作面地质及其构造的信息化和透明化。

1 多参数测井仪的组成与分析方法

1.1 仪器组成

多参数测井仪由钻孔轨迹和多参数测井两部分组

合而成,硬件包括主机、绞车、编码器、探管等部分组成,其中主机负责系统供电、信号转换储存与分析等功能,编码器主要通过计量电缆的旋转位移来测量,探管内装设有方位角倾角等计量钻孔角度传感器。仪器采用浅三侧向电极系方法测井,现场采集孔内侧向电阻率、自然电位、自然伽马等测井参数。钻孔在施工后,孔壁存在富水性较弱的地下水,自然电位曲线有响应,所以存在导电性。在探杆推入或下放过程中,为防止探管在孔内转动,探管周围还安装有弹性紧固件,使探管保持径向平动。探管仪器工作原理如图 1 所示,结合钻孔内部视频成像及多参数测井数据,考察相关区域地层裂隙等构造发育情况、成孔特征、层位信息、钻孔偏斜情况等地层特征。

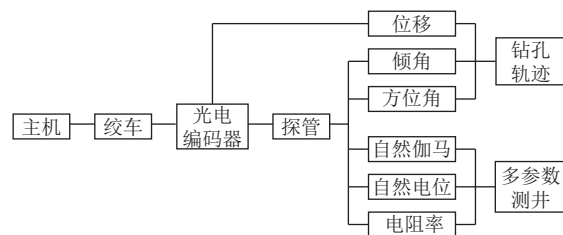


图 1 多参数测井工作原理

Fig.1 Principle of multiparameter logging

1.2 岩石测井曲线响应特征

不同类型岩石在电阻率、自然伽马、自然电位测井曲线响应具有明显的差异性,依据其在测井曲线的响应特征可对岩石岩性进行识别。在各煤、岩层段的交界处,岩石的测井曲线有明显的分层现象。对于测井曲线,可根据相关区域曲线上边界对应的深度 l_1 和 l_2 , 确定曲线“半幅点”位置 l_d (下式), 常见煤矿井下不同类型岩石测井曲线特征见表 1。

表 1 不同岩石测井曲线特征
Table 1 Characteristics of the logging curves of varying lithologies

岩性	自然电位	自然伽马	电阻率	自然电位/mV		自然伽马/API		电阻率/(Ω·m)	
				-400	200	0	1 000	0	1 400
砂质泥岩	低	中	低						
细砂岩	低	低	低						
泥岩	高	高	低						
煤	高	低	高						
灰岩	低	低	中						

$$l_d = \frac{l_1 + l_2}{2} \quad (1)$$

根据表 1 不同岩石测井曲线特征可知,在识别煤层及其工作面顶底板围岩岩性时,可依据煤层高自然电位、高电阻率、低自然伽马;灰岩低自然电位、中电阻率、低自然伽马;砂岩低自然电位、低电阻率、低自然伽马;砂质泥岩低自然电位、低电阻率、中自然伽马;泥岩高自然电位、低电阻率、高自然伽马区分岩性。按照曲线的“半幅点”,划分岩石层位。

1.3 钻孔轨迹算法

实现钻孔层位精准划分,钻孔轨迹测定是基础。井下钻孔轨迹考察时,采用磁通门和重力加速度计计算对应测点的方位角和倾角,通过编码器掌握各个测点的深度变化。计算钻孔轨迹时,根据钻孔相邻两测点之间的距离 Δl ,在水平方向投影的角度 α_i 、 α_j ,及垂直方向投影的角度 β_i 、 β_j (图 2),得到钻孔在水平和垂直方向的增量。

$$\begin{cases} \Delta X = \Delta l \sin \frac{\beta_i + \beta_j}{2} \cos \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2} \\ \Delta Y = \Delta l \sin \frac{\beta_i + \beta_j}{2} \sin \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2} \\ \Delta Z = \Delta l \cos \frac{\beta_i + \beta_j}{2} \end{cases} \quad (2)$$

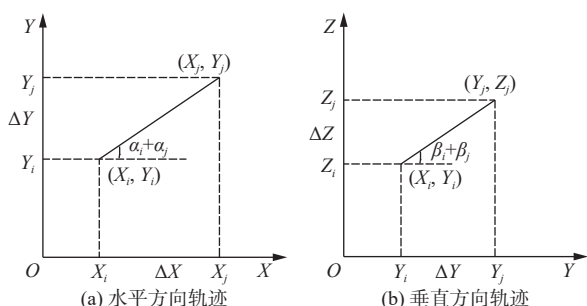


图 2 钻孔轨迹计算原理
Fig.2 Principle of borehole trajectory calculation

以钻孔开孔位置为起点,采用上述方法,结合钻孔多参数测井结果,可得到钻孔水平方向和垂直方向的轨迹和分层厚度,钻孔水平方向与垂直方向轨迹、层位与厚度划分如图 3 所示。

掌握钻孔内不同类型岩石的深度、倾角和方位角等数据后,采用上述方法,能够得到对应岩石的真实厚

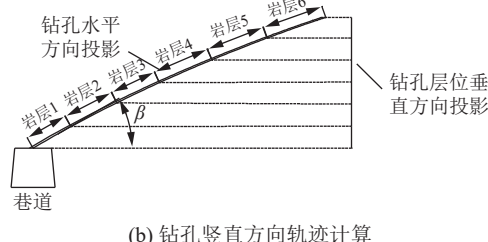
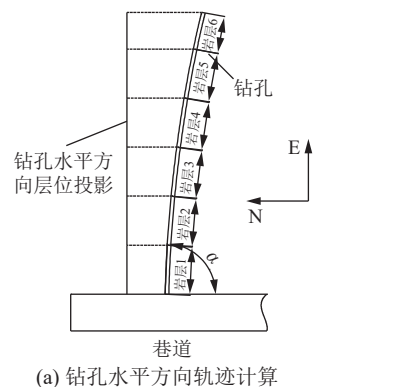


图 3 钻孔轨迹与岩性划分

Fig.3 Schematic diagrams showing borehole trajectories and lithologic classification

度,为后续的数据分析和处理工作奠定基础。

2 现场试验与结果

2.1 地质概况

选取华阳集团新景矿佛洼采区 15 号煤层为试验对象,该区域围岩类型主要包括砂岩、泥岩、砂质泥岩、煤等,局部存在石灰岩。煤层厚度约 6 m,埋深位于 700~750 m,属于高变质无烟煤。煤层顶底板为石灰岩或灰黑色泥岩,煤层中间包含一层厚为 2 m 左右的夹矸,将煤层分为 15 煤和 15 下煤层。

钻孔施工区域位于 15121 底抽巷,现场施工 30°、50°、80°的钻孔各三组,每组施工 3 个钻孔,相邻两组钻孔间距为 5 m,共布置 9 组 27 钻孔,为保证测试结果的可靠性,每个钻孔分别进行 4 次测井,共测试 108 次。通过对钻孔施工后孔内测井曲线进行考察,对工作面顶底板煤层岩层分布情况和相关区域内地层走向进行分析。

2.2 单个钻孔重复性测井数据分析

为保障测井结果的有效性,对于单个钻孔测井曲线进行重复性测试。以 15121 底抽巷 1-1 号钻孔为例,1-1 号钻孔 4 次钻孔测井曲线测试及岩性划分结果如图 4 所示。

分析钻孔测井曲线资料时,按照表 1 中测井曲线特征,在判识钻孔内岩石岩性时,以自然伽马曲线为主要划分依据,以自然电位曲线和电阻率曲线为辅。根据式(1) 计算自然伽马曲线上升或下降区域的“半幅点”位置,对钻孔内岩性进行定厚解释。根据图 4 和表 2 可

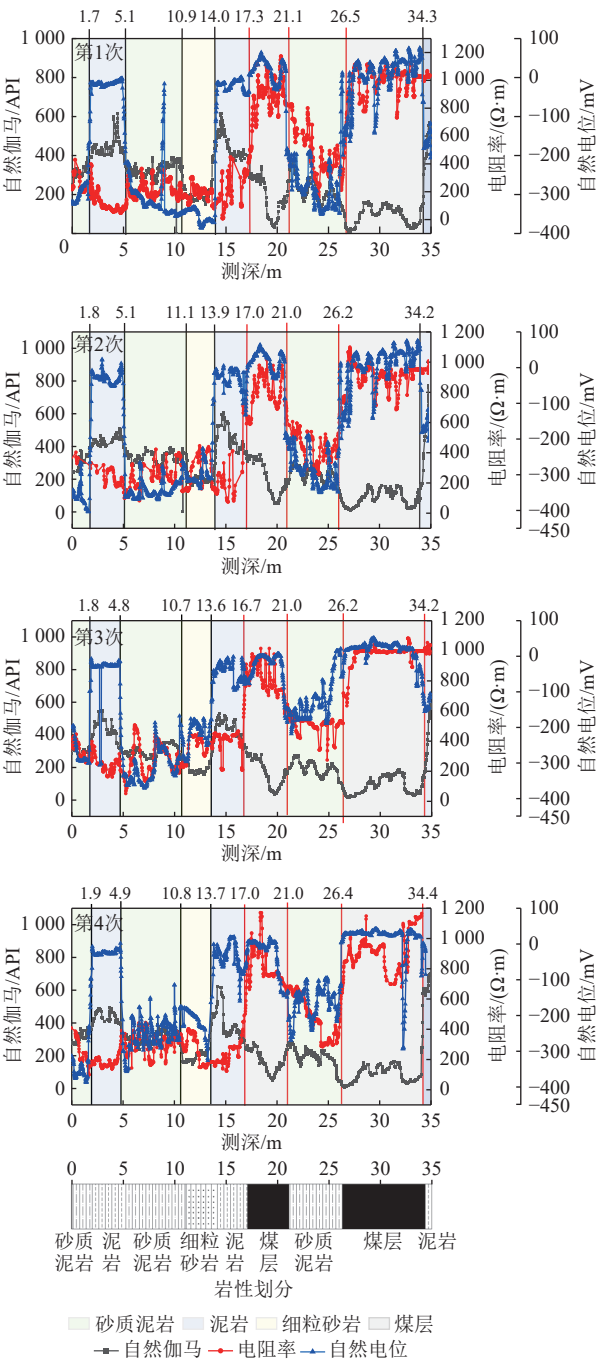


图 4 1-1 号钻孔测井结果
Fig.4 Borehole logging 1-1

知,1-1 号钻孔多次岩性划分结果,与钻孔 4 次测井结果基本一致,各个岩层真厚度的测量误差均不超过 0.2 m,这表明钻孔划分结果较为可靠,在此基础上,可对钻孔进行测井曲线进行分析,划分煤岩层位。

表 2 单个钻孔测井结果
Table 2 Single borehole logging results 单位: m

岩性	第一次	第二次	第三次	第四次	平均视厚度	测量误差
砂质泥岩	1.8	1.7	1.8	1.9	1.8	<0.1
泥岩	3.3	3.4	3.0	3.0	3.2	<0.2
砂质泥岩	6.0	5.8	5.9	5.9	5.9	<0.1
细粒砂岩	2.8	3.1	2.9	2.9	2.9	<0.2
泥岩	3.1	3.3	3.1	3.3	3.2	<0.1
煤层	4.0	3.8	4.3	4.0	4.0	<0.3
砂质泥岩	5.2	5.4	5.2	5.4	5.3	<0.1
煤层	8.0	7.8	8.0	8.0	8.0	<0.2
泥岩	0.8	0.7	0.8	0.6	0.7	<0.1

2.3 不同倾角测井一致性分析

对周边角度为 50°、80°的钻孔测井曲线进行分析,以 5-2 号钻孔和 7-1 号钻孔为例,5-2 号、7-1 号钻孔岩性划分结果如图 5 所示。

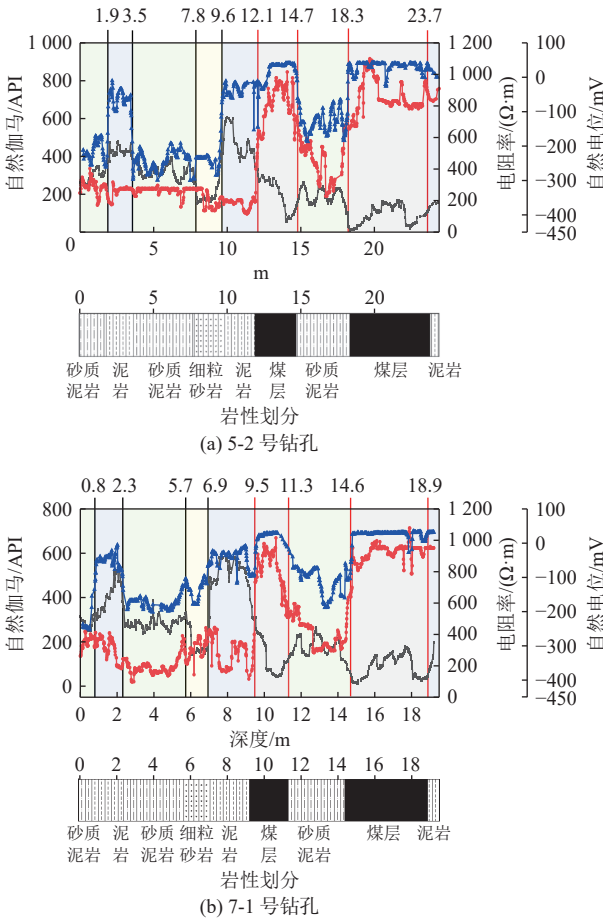


图 5 不同角度钻孔测井结果
Fig.5 Borehole logging results at different angles

周边不同角度钻孔测井曲线划分结果表明,研究区域内各钻孔内部围岩成分相一致。孔内岩石种类主要为细砂岩、泥岩、砂质泥岩、煤岩,岩石组成从下至上依次为:砂质泥岩、泥岩、砂质泥岩、细砂岩、泥岩、15号下煤、夹矸、15号上煤。

根据式(2) 钻孔轨迹计算方法,已知各个钻孔深度、倾角、方位角,可以得到对应钻孔煤层和岩层的分层厚度。综合多次钻孔测井曲线结果,归纳总结底抽巷研究区域内不同角度钻孔层位厚度、自然电位、电阻率、自然伽马曲线分布范围和均值见表3。

表 3 钻孔测井数据
Table 3 Logging data of boreholes

岩性	自然电位/mV			电阻率/($\Omega \cdot m$)			自然伽马/API			平均真厚度/m		
	30°	50°	80°	30°	50°	80°	30°	50°	80°	30°	50°	80°
砂质泥岩	-300~-100	-300~-100	-300~-100	100~450	130~420	180~450	244~375	248~364	240~368	0.9	1.1	0.9
	-164	-171	-168	292	310	300	334	341	336			
泥岩	-150~50	-150~50	-150~50	100~450	100~420	80~400	392~560	400~488	400~520	1.5	1.2	1.4
	-6	2	-7	222	231	234	470	448	455			
砂质泥岩	-300~-100	-300~-100	-300~-100	50~500	100~400	80~440	248~392	248~392	240~370	3.1	3.2	3.2
	-160	-167	-163	313	316	325	330	338	329			
细砂岩	-250~-50	-260~-50	-260~-50	150~400	100~400	70~480	144~244	147~240	93~237	1.5	1.4	1.4
	-184	-187	-182	331	317	321	190	195	192			
泥岩	-150~50	-150~50	-150~50	100~400	100~390	70~480	398~618	392~618	394~640	1.8	2	2
	-3	0	-7	216	219	221	480	482	491			
15下煤	-100~100	-100~100	-100~100	680~1200	670~1000	660~1000	12~304	13~296	18~283	2	2	2.3
	30	31	29	938	867	839	90	120	85			
夹矸	-300~-80	-300~-80	-300~-80	215~650	200~620	290~630	119~312	120~268	130~304	2.6	2.6	2.6
	-165	-162	-166	441	426	449	187	177	184			
15上煤	-100~100	-100~100	-100~100	685~1200	720~1200	720~1000	11~165	13~162	8~242	4.1	3.9	4
	37	38	34	944	886	904	85	80	94			

注:数据 $\frac{-300 \sim -100}{-164}$ 为 $\frac{\text{最小} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$, 其他数据同。

钻孔自然伽马、电阻率、自然电位测井数据交会结果如图6所示。钻孔测井数据在电阻率-自然伽马和自然电位-自然伽马平面上的投影分布均具有一定的规律性。由图6和表3可知,煤的自然电位、电阻率最大,自然伽马较小,范围与均值分别为-100~100 mV (35 mV)、660~1 200 $\Omega \cdot m$ (906 $\Omega \cdot m$)、8~304 API (88 API); 泥岩自然电位位于基线附近,电阻率较小,自然伽马最大,范围与均值分别为-150~50 mV (-3 mV)、70~480 $\Omega \cdot m$ (219 $\Omega \cdot m$) 和 392~640 API (485 API); 砂质泥岩自然电位和电阻率较小,自然伽马仅次于泥岩,夹矸处电阻率较大,范围与均值分别为-300~-80 mV (-168 mV)、100~

650 $\Omega \cdot m$ (310 $\Omega \cdot m^{-1}$) 和 119~392 API (334 API); 细砂岩自然电位、电阻率、自然伽马均相对较小,范围与均值分别为-260~-50 mV (-183 mV)、70~480 $\Omega \cdot m$ (323 $\Omega \cdot m$) 和 93~244 API (192 API)。根据钻孔内部测井参数,能够有效识别孔内岩石的岩性、层位分布情况。

3 工程应用

以新景矿 15121 工作面相关区域为研究对象,结合多个钻孔的测井数据,对相关区域钻孔岩性分布、煤体结构和含水区域等地层信息进行识别。

3.1 钻孔层位综合成图

结合井下钻孔视频成像,可对钻孔内部岩石类型及煤层及岩层划分结果的有效性进行评估,判断孔内成孔情况,识别钻孔内部构造及裂隙发育情况。以 1-1 号钻孔为例,孔内各岩层测井曲线及对应视频成像结果如图7所示。

钻孔测井曲线特征能有效辨识岩石种类,划分煤层及其顶底板围岩层位,实现孔内不同类型岩石的定性定量划分。钻孔测深、倾角方位角测井曲线能掌握钻孔轨迹及偏斜情况,确定钻孔真厚度,同时可以提高工作面瓦斯治理效率,减少瓦斯抽采过程中空白带的出现。钻孔内部视频成像能够准确判断钻孔顶板信息、定位煤层位置及判断成孔效果,识别孔内裂隙分布情况,验

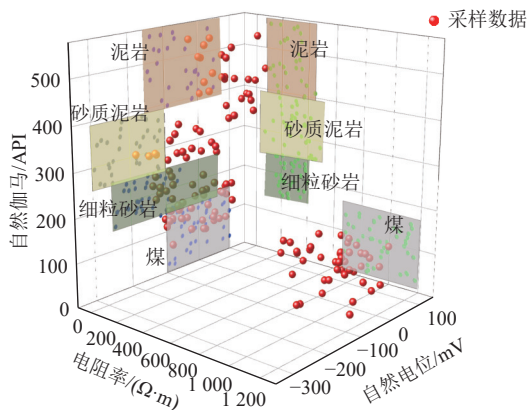
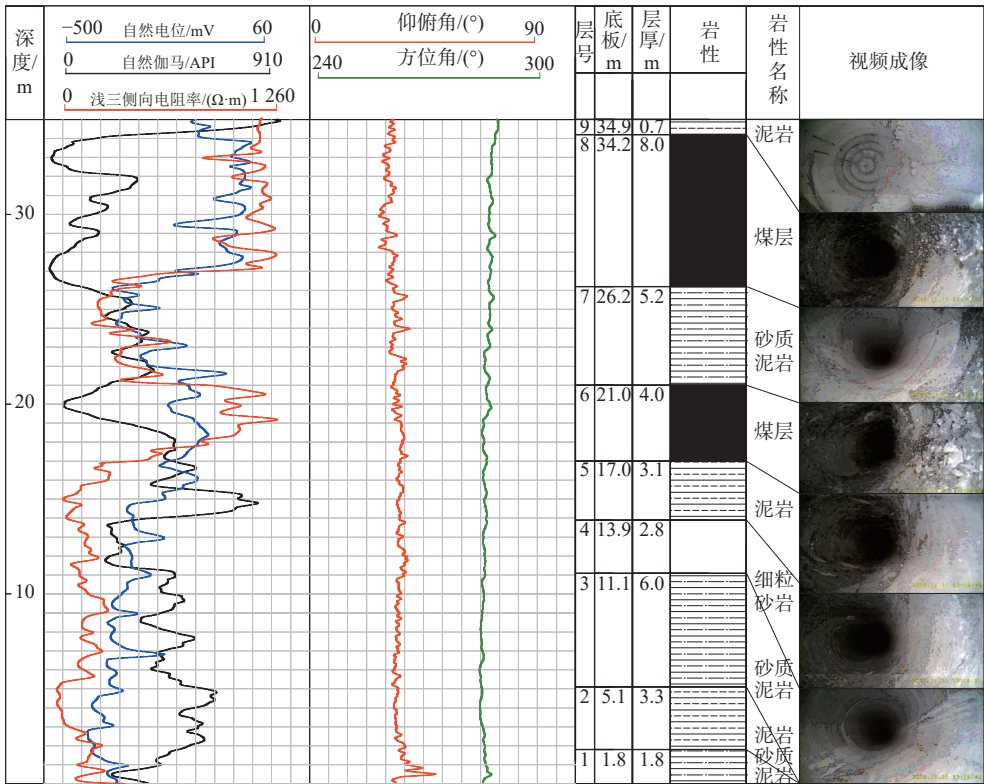


图 6 测井三参数交会图

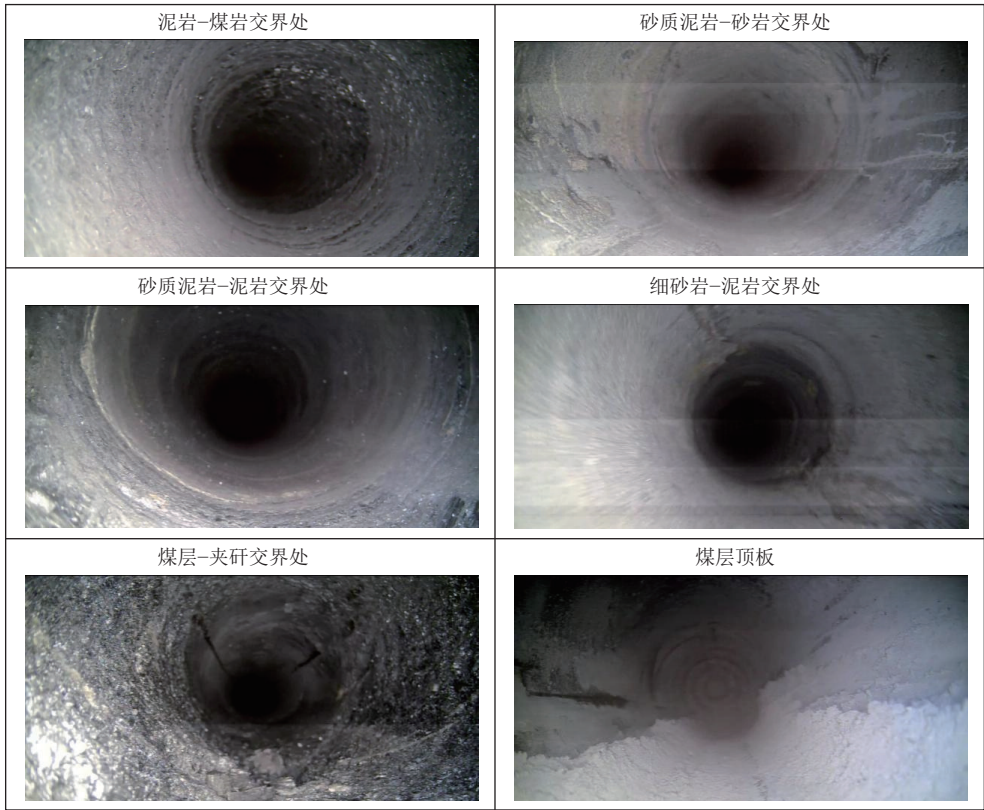
Fig.6 Cross plot of three logging parameters

证岩性划分结果的准确性,为后续钻孔施工提供帮助。
钻孔倾角和方位角测井曲线表明,钻孔开孔倾角

为 31°,方位角为 281°,随着钻孔深度的增加,钻孔倾角
和方位角均发生一定程度的偏斜,孔底倾角变为 26°,



(a) 钻孔测井曲线



(b) 部分岩性界面处钻孔视频

图 7 钻孔测井曲线及视频

Fig.7 Logging curves and video-derived images of a borehole

方位角变为 285°。孔内煤岩交界处位于 17.0 m 和 26.0 m 处,在煤和岩层交界处,孔内视频有明显的变化,呈现明显的分层现象。钻孔岩性划分结果与孔内钻孔视频成像内容相一致,这表明依据“半幅点”划分方法,可有效划分孔内煤岩层位。

3.2 煤体结构与含水区域识别

对于煤层而言,受到地层构造运动等因素的影响,煤层自身应力场发生变化,会出现煤体结构变化、含水区等异常区域。根据测井曲线局部显示的变化情况以及对应视频,对钻孔内部块煤堆积区域、含水区域进行识别。通过分析煤层异常区域测井曲线的响应特征,能够准确识别区分煤层构造带及含水区域,完善工作面地

层信息精确化建设。

原生结构煤发育较好,煤体表面层理清晰。受构造作用的影响,构造煤煤体结构发生破坏,自身孔裂隙更为发育,煤体密度降低,单位体积煤体的放射性较低,自然伽马测井曲线下降;同时随着煤体内生裂隙的增加,煤体孔隙内含水率增加,增强了自由电子在煤体内部通道的运移能力,煤体导电能力增强,煤体的电阻率测井曲线降低。在钻孔内煤层含水区域,煤体内部结构相对完整,煤体表面存在大量煤泥,造成电阻率测井曲线和自然电位曲线明显降低。煤层异常区域测井曲线特征及钻孔视频成像如图 8 所示,对应区域煤体测井曲线响应范围见表 4。

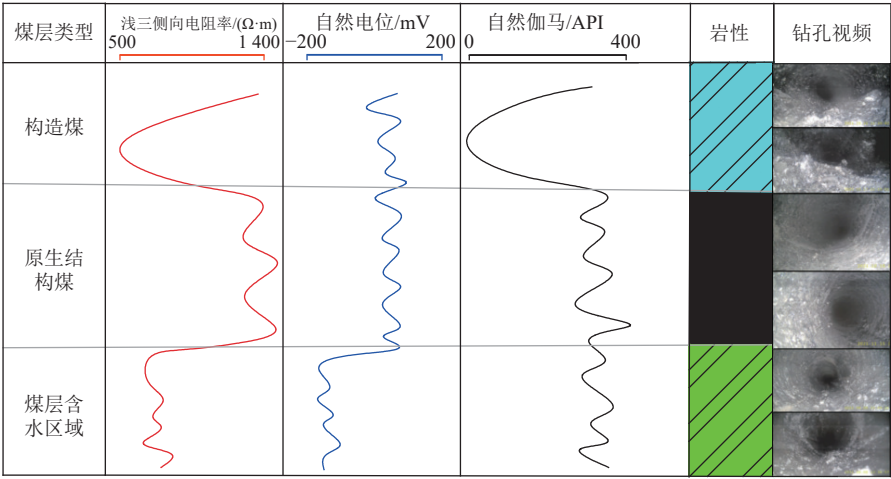


图 8 煤层异常区域测井曲线特征
Fig.8 Characteristics of logging curves of zones with anomalous coal structures

表 4 煤层异常区域测井数据
Table 4 Logging data of zones with anomalous coal structures

煤层类型	自然电位/mV	电阻率/(Ω·m)	自然伽马/API
原生结构煤	-50~100	720~1 200	18~296
构造煤	-50~100	650~720	8~44
含水区域	-100~-60	660~740	18~296

在煤孔成孔较为规整区域内,原生结构煤自然伽马曲线相对较高,相对平滑或呈一定的波浪形,电阻率测井曲线幅值较高,曲线平直,呈微小波浪状,钻孔内部较为规整,成孔效果好。钻孔内部存在一定的构造煤,构造煤主要类型为碎裂煤,煤体内部裂隙发育,钻孔成孔不规则,钻孔孔径变大;构造煤自然伽马曲线多呈钟形,曲线低于原生结构煤,电阻率曲线呈钟形明显下降。煤层含水区域,电阻率和自然电位曲线呈阶梯状下降,钻孔局部有煤泥堆积,视频成像效果一般。依照上述测井曲线特征和钻孔视频成像,可有效判别煤层构造和含水情况。

对于煤层来讲,构造煤和煤层中的含水区域在测井

响应特征上具有一定的差异性。结合表 3 中的测井数据分布范围,使用自然电位、电阻率曲线交会图描述煤层构造带,使用自然伽马、电阻率曲线交会图描绘煤层内的含水区域(图 9)。

由图 9a 可知:构造煤自然伽马为 8~44 API,电阻率为 650~720 Ω·m,与原生结构煤有明显的差异,利用电阻率与自然伽马测井数据交会图可识别煤体内部的构造区域;由图 9b 可知:煤层含水区域自然电位为 -100~-60 mV,明显低于煤孔干燥区域的电位,煤层含水区域电阻率为 660~740 Ω·m,利用自然电位和电阻率测井数据交会图可识别煤体内部的构造区域。

采用上述方法对底抽巷钻孔中的煤体结构和煤层含水区域进行判识,结果表明:底抽巷 3-2 号钻孔、3-3 号钻孔、4-1 号钻孔分别在层厚 15.9、16.2、16 m 处存在构造煤,构造煤厚度分别为 1.1、0.8、0.5 m,主要类型为碎裂煤,6-2 号孔、6-3 号孔分别在层厚 15、15.4 m 处为含水区域,此处有一定量的煤泥堆积,对应煤层厚度分别为 0.9、0.7 m。6-2 号钻孔含水区域测井曲线和对

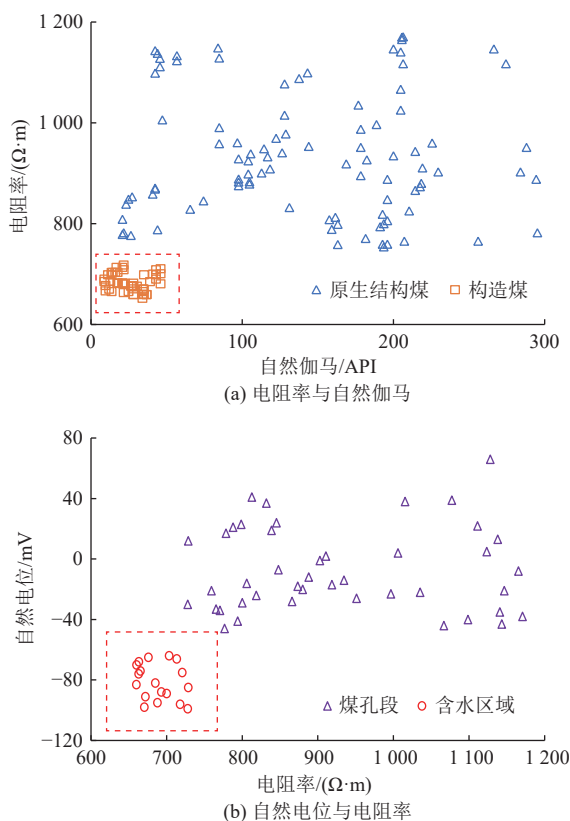


图 9 煤层特征测井曲线交会图

Fig.9 Cross plots of logging curves of coal seam zones

应的钻孔视频成像如图 10 所示。测井曲线识别结果和钻孔视频成像信息具有良好的一致性,这表明该方法能够有效识别煤层中的构造及含水区域。

3.3 工作面煤岩层位分布特征描述

以 5-2 号钻孔的钻孔轨迹测井信息为例,钻孔设计倾角为 50° , 钻孔施工后, 钻孔设计轨迹(理论轨迹)和实际轨迹信息如图 11 所示。钻孔终孔位置水平方向偏差为 0.29 m, 竖直方向偏差为 0.79 m。结合式(2), 可得到钻孔内各岩层的实际分层厚度。

钻孔轨迹偏移信息结果表明, 钻孔施工过程中, 井眼实际轨迹和理论轨迹存在一定的偏差。掌握钻孔轨迹和测井信息, 有助于精准确定孔内各岩层的分层厚度。

已知区域内 9 组 27 个钻孔开孔信息、布孔设计、钻孔轨迹测试结果、层位分布特征和煤层结构和含水区域的空间展布, 可进一步掌握考察区域工作面煤层及其顶底板围岩分布情况与走向变化, 相关区域煤层及岩层层位分布剖面如图 12 所示, 测井前后煤体结构和含水异常区域煤层厚度变化见表 5。

钻孔施工区域位于底抽巷距巷道口 60~177.5 m 处。结合 15121 底抽巷试验区域的地质资料, 已知底抽巷各个钻孔的开孔坐标和对应钻孔的轨迹信息、岩性划分结果、煤层结构和含水区域分布, 能够有效地描述区域内煤层岩层走向及分布信息。将所获取的 15121 底抽

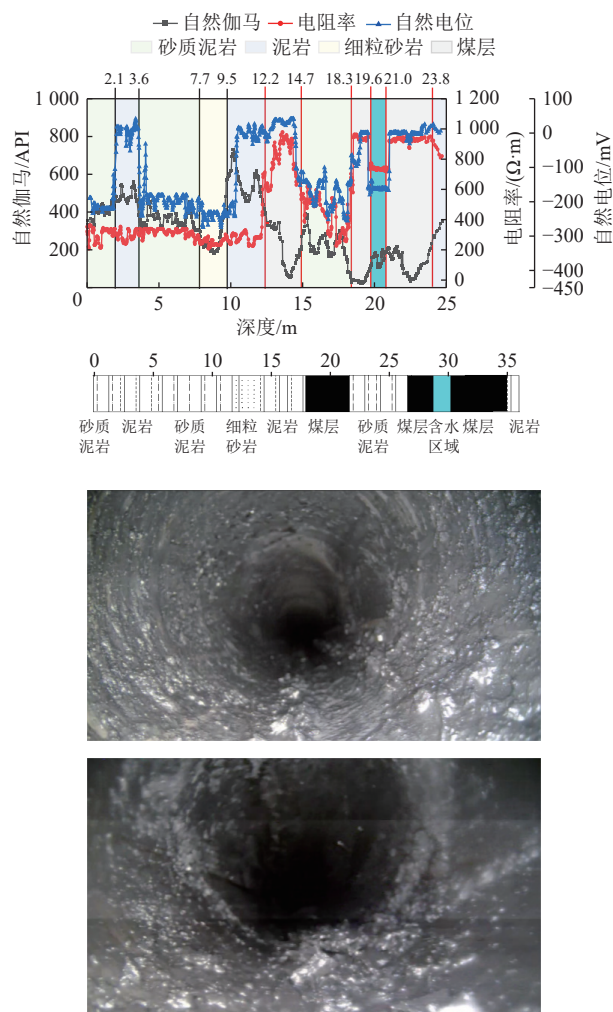


图 10 钻孔含水区域电法勘探结果和钻孔视频

Fig.10 Electrical prospecting results of water-bearing zones in boreholes and video-derived images of boreholes

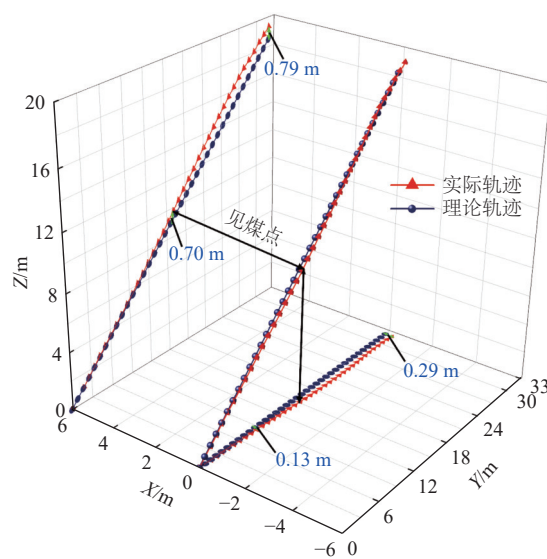


图 11 钻孔施工前后轨迹曲线

Fig.11 Borehole trajectories before and after borehole drilling

巷煤岩层位走向划分结果与区域内煤岩取心实测各煤岩层位厚度数据进行对比, 多参数测井测得钻孔岩石层

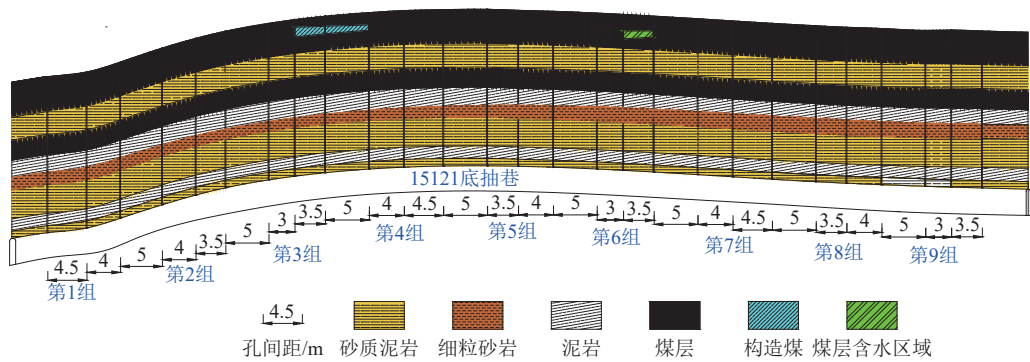


图 12 研究区工作面顶底板围岩走向剖面

Fig.12 Profile showing the surrounding rock strikes of the mining face roof and floor in the study area

表 5 测井前后煤层异常区域厚度变化

Table 5 Variation in the thickness of zones with anomalous coal structures before and after logging

测井前煤层厚度/m	测井后煤层厚度/m
煤层含水区域测井前 煤层厚度/m	煤层含水区域测井后 煤层厚度/m

厚、煤层结构发育信息数据与实际数据具有较好的一致性,这表明基于钻孔多参数测井在井下地层信息精准识别具有良好的可行性。

从表 5 煤层测井前后异常区域厚度变化结果可知,第三组钻孔和第四组钻孔之间存在长 8.4 m,厚度为 1.1 m 的煤体结构异常区域,第 6 组钻孔之间存在长 3.4 m,厚 0.9 m 的含水区域。采用瞬变电磁法在回风巷巷道工作面对煤层含水区域进行探测,含水区域探测结果已于图 13 红色位置圈出。由图 13 可知,15121 回风巷掘进工作面方向视电阻率断面图瞬变电磁探测结果与多参数测井结果一致,区域内表现为弱富水性。开展钻孔多参数测井,能够有效探明煤矿工作面的地层信

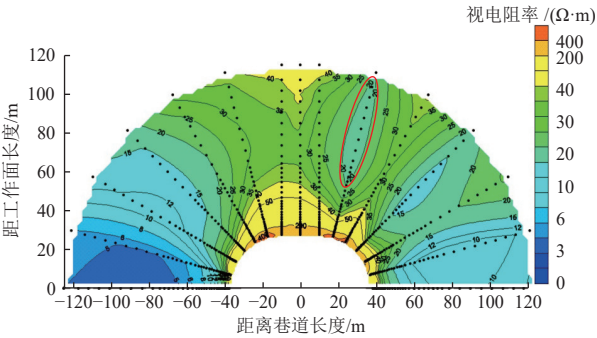


图 13 15121 回风巷巷道工作面瞬变电磁探测结果

Fig.13 TEM-derived results of the mining face of air return roadway 15121

息,识别煤体结构异常区域、煤层含水区域,对后续工作面煤层瓦斯治理,煤炭开采及工作面智能化建设提供帮助。

对比工作面开采设计图中的 15121 回风巷剖面煤层厚度变化剖面预测图和多参数测井得到的钻孔剖面(图 14),采用多参数测井结果得到的煤层厚度变化更为准确。15121 底抽巷相关区域煤层及岩层走向剖面图能够清楚地反映岩层和煤层的厚度变化、煤层顶底板岩性、煤层层间距,以及剖面方向上地形起伏情况和向深部的延伸变化情况。有助于探明区域内采煤工作面顶底板围岩的发育情况,煤体结构信息和含水煤层,提升了工作面地质信息化和透明化。

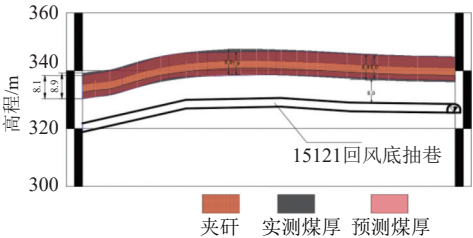


图 14 考察区域煤层厚度预测与实测剖面

Fig.14 Profile showing predicted and measured thicknesses of coal seams in the study area

4 结论

(1) 基于钻孔轨迹、自然电位、电阻率、自然伽马等测井参数,识别钻孔内岩石岩性和厚度,有效提高了工作面及其顶底板围岩分布情况。

(2) 利用测井信息交会图和钻内视频成像,辨识煤层中煤体结果和含水区域位置,实现了对煤体结构和含水区域分布情况的精准识别。

(3) 通过对研究区域的工程实践应用,建立了该区域无烟煤井下钻孔煤体结构、围岩岩性、富水区识别的模板,为该区域井下测井工作开展提供帮助。

符号注释:

l_d 为半幅点, m; Δl 为相邻两个测点之间的距离, m;

X 为水平巷道方向; Y 为水平垂直于巷道方向; Z 为垂直方向; ΔX 、 ΔY 为水平方向的位移变化, m ; ΔZ 为倾角方向的位移变化, m ; α_i 、 α_j 为相邻点 i 、 j 的方位角, ($^\circ$); β_i 、 β_j 为相邻点 i 、 j 的倾角, ($^\circ$)。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 贾建称, 贾茜, 桑向阳, 等. 我国煤矿地质保障系统建设 30 年: 回顾与展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 86–106.
JIA Jiancheng, JIA Qian, SANG Xiangyang, et al. Review and prospect of coal mine geological guarantee system in China during 30 years of construction[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 86–106.
- [2] 王海军, 刘善德, 马良, 等. 面向智能化开采的矿井煤岩层综合对比技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(2): 24–38.
WANG Haijun, LIU Shande, MA Liang, et al. Comprehensive correlation technology of coal and rock layers in mines for intelligent mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 24–38.
- [3] 程建远, 王保利, 范涛, 等. 煤矿地质透明化典型应用场景及关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(7): 1–12.
CHENG Jianyuan, WANG Baoli, FAN Tao, et al. Typical application scenes and key technologies of coal mine geological transparency[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 1–12.
- [4] LAI Jin, WANG Guiwen, FAN Qixuan, et al. Geophysical well-log evaluation in the era of unconventional hydrocarbon resources: A review on current status and prospects[J]. *Surveys in Geophysics*, 2022, 43(3): 913–957.
- [5] 李宇刚, 高雪. 测井曲线在地层划分中的应用[J]. *陕西煤炭*, 2021, 40(6): 158–161.
LI Yugang, GAO Xue. Application of logging curve in stratigraphic division[J]. *Shaanxi Coal*, 2021, 40(6): 158–161.
- [6] CHEN Qiang, JING Jin, LIU Jun, et al. Productivity evaluation of coalbed methane well with geophysical logging-derived tectonically deformed coal[J]. *Energies*, 2019, 12(18): 3459.
- [7] CUI Chao, CHANG Suoliang, YAO Yanbin, et al. Quantify coal macrolithotypes of a whole coal seam: A method combining multiple geophysical logging and principal component analysis[J]. *Energies*, 2021, 14(1): 213.
- [8] 邵先杰, 孙玉波, 孙景民, 等. 煤岩参数测井解释方法: 韩城矿区为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 559–565.
SHAO Xianjie, SUN Yubo, SUN Jingmin, et al. Logging interpretation of coal petrologic parameters: A case study of Hancheng mining area[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 559–565.
- [9] KHALIL M I, ISLAM F, AKON E. Gamma and resistivity logs for characterization of Gondwana coal seams at the Northwestern part of Bangladesh[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(9): 6497–6506.
- [10] KHALIL M I, ISLAM F, AKON E. Nuclear geophysical logging for Gondwana coal exploration: A case study at Phulbari Coal Basin, northern part of Bangladesh[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(5): 1647–1655.
- [11] LIU Shiming, LIU Rui, TANG Shuheng, et al. Quantitative measurement on coal components through the interpretation model of geophysical log: A case study from the Qaidam Basin, NW China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2021, 39(6): 2027–2044.
- [12] KRISHNAMURTHY N S, ANANDA RAO V, KUMAR D, et al. Electrical Resistivity Imaging technique to delineate coal seam barrier thickness and demarcate water filled voids[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2009, 73(5): 639–650.
- [13] 李力, 欧阳春平. 基于超声相控阵的煤岩界面识别研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(3): 485–492.
LI Li, OUYANG Chunping. Research on coal-rock interface recognition based on ultrasonic phased array[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(3): 485–492.
- [14] 董振国, 赵伟, 任玺宁, 等. 声波测井在煤岩弹性力学分析中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(增刊 1): 104–112.
DONGONG Zhenguo, ZHAO Wei, REN Xining, et al. The application of acoustic logging in the analysis of coal rock elasticity[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(Sup.1): 104–112.
- [15] 李新, 倪卫宁, 米金泰, 等. 一种基于非接触耦合原理的新型随钻微电阻率成像仪器[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(6): 46–52.
LI Xin, NI Weining, MI Jintai, et al. A novel high-resolution resistivity imaging while drilling tool based on contactless coupling[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2020, 44(6): 46–52.
- [16] ROSLIN A, ESTERLE J S. Electrofacies analysis for coal lithotype profiling based on high-resolution wireline log data[J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 91: 1–10.
- [17] 汪兴明, 鲜林, 陈璐思, 等. 基于响应面法的煤矿钻孔随钻超声成像仪器受力部件优化设计[J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(7): 97–102.
WANG Xingming, XIAN Lin, CHEN Lusi, et al. Optimization design of forced parts in ultrasonic imaging instrument while drilling in coal mine based on response surface method[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(7): 97–102.
- [18] 蒋必辞, 田小超, 张鹏, 等. 随钻伽马对方位角测量的影响及校正方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(12): 175–181.
JIANG Bici, TIAN Xiaochao, ZHANG Peng, et al. Study on influence and correction method of gamma while drilling on azimuth angle measurement[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12): 175–181.
- [19] LIU Xiugang, JIANG Zaibing, WANG Yi, et al. Research on trajectory control technology for L-shaped horizontal exploration wells in coalbed methane[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 11343.
- [20] 王楠, 秦其明, 陈理, 等. 天然源超低频电磁探测技术在煤储层识别中的应用[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(1): 141–146.
WANG Nan, QIN Qiming, CHEN Li, et al. Natural source super-low frequency electromagnetic prospecting in the application of coal-bed methane reservoir identification[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(1): 141–146.

- [21] LIU Z D, ZHAO J Z, ZHANG P, et al. Evaluating the CBM reservoirs using NMR logging data[J]. *Open Geosciences*, 10(1): 544-553.
- [22] LI Mengqi, LU Jun, XIONG Shu. Prediction of fractures in coal seams with multi-component seismic data[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 6488.
- [23] LU Jun, WANG Yun, CHEN Jingyi. Detection of tectonically deformed coal using model-based joint inversion of multi-component seismic data[J]. *Energies*, 2018, 11(4): 829.
- [24] 潘辉, 印兴耀, 李坤, 等. 地震反演驱动的改进匹配追踪煤层识别方法[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(6): 2276-2293.
- PAN Hui, YIN Xingyao, LI Kun, et al. An improved matching pursuit method for coal seam identification driven by seismic inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(6): 2276-2293.
- [25] 傅雪海, 姜波, 秦勇, 等. 用测井曲线划分煤体结构和预测煤储层渗透率[J]. *测井技术*, 2003, 27(2): 140-143.
- FU Xuehai, JIANG Bo, QIN Yong, et al. Classification of coal-body structure and prediction of coal reservoir permeability with log curves[J]. *Well Logging Technology*, 2003, 27(2): 140-143.
- [26] 李存磊, 杨兆彪, 孙晗森, 等. 多煤层区煤体结构测井解释模型构建[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2): 721-730.
- LI Cunlei, YANG Zhaobiao, SUN Hansen, et al. Construction of a logging interpretation model for coal structure from multi-coal seams area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 721-730.
- [27] REN Pengfei, XU Hao, TANG Dazhen, et al. The identification of coal texture in different rank coal reservoirs by using geophysical logging data in Northwest Guizhou, China: Investigation by principal component analysis[J]. *Fuel*, 2018, 230: 258-265.
- [28] 彭苏萍, 魏文希, 杜文凤, 等. 基于 AVO 反演与叠前同步反演预测构造煤分布[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(5): 929-934.
- PENG Suping, WEI Wenxi, DU Wenfeng, et al. AVO inversion associated with prestack simultaneous inversion in determining the distribution of tectonic coal[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(5): 929-934.
- [29] 鲁秀芹, 汪关妹, 杨延辉, 等. 基于叠前 AVO 数据的波形指示反演预测煤体结构[J]. *石油地球物理勘探*, 2022, 57(增刊 1): 117-121.
- LU Xiuqin, WANG Guanmei, YANG Yanhui, et al. Waveform indication inversion prediction of coal structure based on prestack AVO data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(Sup.1): 117-121.
- [30] 和郑翔, 卢才武, 居培, 等. 基于 PCA-BP 神经网络的随钻参数岩性智能感知方法研究[J]. *矿业研究与开发*, 2022, 42(7): 155-159.
- HE Zhengxiang, LU Caiwu, JU Pei, et al. Research on lithology intelligent sensing method of drilling parameters based on PCA-BP neural network[J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(7): 155-159.
- [31] 张幼振, 张宁, 邵俊杰, 等. 基于钻进参数聚类的含煤地层岩性模糊识别[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2328-2335.
- ZHANG Youzhen, ZHANG Ning, SHAO Junjie, et al. Fuzzy identification of coal-bearing strata lithology based on drilling parameter clustering[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2328-2335.
- [32] 梁栋才, 汤华, 吴振君, 等. 基于多钻进参数和概率分类方法的地层识别研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(4): 1123-1134.
- LIANG Dongcai, TANG Hua, WU Zhenjun, et al. Stratum identification based on multiple drilling parameters and probability classification[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(4): 1123-1134.

(责任编辑 聂爱兰)