

孟凡林, 李佳山, 孙治豪, 等. 风蚀地貌区浅埋煤层矿井水文地质结构及保水采煤方法[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(6): 849-857. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024911

MENG Fanlin, LI Jiashan, SUN Zhihao, et al. Hydrogeological structure of shallow-buried coal seam in wind erosion landform area and water-retaining coal mining method[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(6): 849-857. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024911

风蚀地貌区浅埋煤层矿井水文地质结构及保水采煤方法

孟凡林¹, 李佳山¹, 孙治豪¹, 蔡进², 乔伟², 王启庆², 吴慧杰²

- 库车市科兴煤炭实业有限责任公司, 新疆库车 830000;
- 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221000

摘要:新疆地区气候干旱、水资源稀缺, 如何保护矿区水资源成为新疆地区煤炭开采面临的重大课题。以位于风蚀地貌区的新疆榆树泉煤矿作为研究区, 探讨风蚀地貌区水文地质结构与水循环规律, 提出榆树泉矿区保水采煤方法。首先, 通过计算煤层开采导水裂隙带高度, 确定煤层开采直接充水含水层, 并进行富水性分区; 然后, 根据研究区内水文观测孔水位数据, 分析矿区水体间水力联系及开采造成的影响, 确定煤层顶板含水层、烧变岩含水层为应保护的目标含水层; 最后, 根据煤层开采扰动程度将研究区划分为3个区域, 分别采取留设煤柱、限高开采等保水采煤措施, 给出矿区污水净化后再利用方案。研究结果可为新疆地区后续的开采水害防控与水资源保护提供思路与参考。

关键词: 风蚀地貌区; 浅埋煤层; 水循环; 水文地质结构; 保水采煤

中图分类号: X 43; TD 741

文献标志码: A 文章编号: 2096-2193(2024)06-0849-09

Hydrogeological structure of shallow-buried coal seam in wind erosion landform area and water-retaining coal mining method

MENG Fanlin¹, LI Jiashan¹, SUN Zhihao¹, CAI Jin², QIAO Wei², WANG Qiqing², WU Huijie²

1. Kuqa Kexing Coal Industry Co., Ltd., Kuqa Xinjiang 830000, China;

2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221000, China

Abstract: Xinjiang has an arid climate and scarce water resources, thus rendering the protection of water resources a major issue for coal mining. Taking the Yushuquan Coal Mine in Xinjiang as the study area, this study investigated the hydrogeological structure and water circulation patterns of the wind-eroded landform area and proposed the water-retaining coal mining method for the mine. Specifically, we first calculated the height of the water-conducting fracture zone of coal seam, based on which the direct water-filled aquifer of coal seam was determined and the water-rich zoning was conducted. We then analyzed the hydraulic connection between the water bodies in the mining area and the impact caused by mining based on the hydrological observation hole water level data in the study area. The aquifer on the roof of the coal seam and the aquifer in the burnt rock were determined as the target aquifers to be pro-

收稿日期: 2024-06-30 修回日期: 2024-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(42472334); 江苏高校优势学科建设工程

作者简介: 孟凡林(1987—), 男, 山东滕州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿山水害防治等方面的研究工作。E-mail: 787955939@qq.com

通信作者: 乔伟(1984—), 男, 山东蒙阴人, 博士, 教授, 主要从事工程地质与水文地质方面的研究工作。E-mail: qiaowei@cumt.edu.cn

tected. Based on the degree of coal seam mining disturbance, we divided the study area into 3 regions and implemented corresponding water-retaining coal mining measures such as coal pillars retention and limited mining height, and accordingly proposed the reuse scheme of sewage purification in the mining area. This study could offer references for the prevention and control of mining water hazards and the protection of water resources in Xinjiang.

Key words: wind-erosion landform area; shallow-buried coal seam; water circulation; hydrogeological structure; water-retaining coal mining

新疆地区煤炭资源丰富,区域内煤矿煤层厚度大、赋存稳定、埋藏浅,构造、开采条件简单^[1-2],是我国重要的煤炭富集地之一。由于常见的煤层自燃现象与乱采乱挖,新疆地区形成了煤层自燃区、老窑采空区等多种复杂水体^[3]。但新疆地区由于地处干旱-半干旱的气候区,生态环境十分脆弱、水资源稀缺,而解决这一问题的基础,便是研究查明当地水文地质结构。

我国学者对新疆地区水文地质条件已进行了大量研究。杨更^[4]指出,风蚀地貌在新疆地区广泛分布,风蚀现象会极大降低地表岩石强度和产生裂缝,影响矿区补给条件。孟和等^[5]总结了新疆不同地区采空区地质灾害差异,指出在气候干燥的库拜煤田等地,采空区灾害类型主要为地表沉陷与裂缝。王海等^[6]以新疆天山北坡为例,展示老空区水量大、位置难以探查的工程问题。孙德全等^[7]揭示了新疆煤层自燃区的空间发育情况与透水能力强、储量可观的特点,展示了煤层自燃区对煤矿开采的威胁。崔德广等^[8]揭示了新疆砂沟井田煤层自燃区富水性强的特点并运用瞬变电磁等方法对储水量进行了估算。

国外也有学者对类似新疆地区地质条件进行的研究。MCMILLAN等^[9]研究了普纳高原风蚀地貌的起源与特点。KUENZER等^[10]总结了全球范围内的煤层自燃现象,并研究了自燃区的演变过程以及岩石的形态与结构特征。

为满足煤矿安全开采与矿区生态保护需求,煤矿开采时必须采取保水采煤策略。国外学者早在20世纪70年代对水资源保护与煤层开采进行了研究,如BORIS等^[11]对黄石河流域煤炭资源开采与水环境之间的矛盾进行了相关研究;KADEN等^[12]针对德国的卢萨田矿区研究了关于水资源保护性煤炭开采。我国保水采煤的理念,最初是范立民^[13]为解决神木矿区的环境保护问题而提出的矿区水资源保护方法思路。此后,范立民等^[14]总结了保水采煤的原理与科学内涵,构建了保水采煤的框架;刘洋等^[15]提出条带开采在浅埋煤层保水采

煤方面的应用,并运用数值模拟方法对其留采比参数进行了研究;王海^[16]结合现场数据研究了注浆技术在自燃区保水采煤方面的应用。许延春等^[17]进行了注浆材料黏度对浆液在裂隙中扩散与填充效果影响的研究。章丽萍等^[18]对矿井水处理方法进行了优化,并对矿井水除氟机理进行了研究。师本强等^[19]通过研究榆神府矿区的地质条件,提出了保水采煤分区治理的技术体系。

我国在保水采煤领域研究的目标矿区主要位于陕北地区,对于新疆地区的研究较为薄弱。由于两地水文地质条件的差异,陕北地区的保水采煤技术体系在新疆地区并不完全适用。新疆地区气候干旱,出于迫切的水资源保护需求,亟需针对其水文地质结构提出适用于风蚀地貌区浅埋煤层的保水采煤体系^[20]。

为此,以新疆榆树泉煤矿为研究对象,针对水文地质条件复杂、生态环境脆弱与煤炭开采之间的矛盾,从矿区勘探资料入手,结合矿区水文地质台账、工程活动,研究矿区内水文地质结构特点与水循环机制,并设计合理的保水采煤方法,以服务榆树泉煤矿水资源保护与煤炭开采工作。

1 新疆地区矿井水文地质结构

矿井水文地质结构指的是开采煤层与含(隔)水层和各种充水水源、通道的空间位置及组合关系。新疆地区矿井水文地质条件复杂,因此查明矿井水文地质结构是新疆地区矿井水害防治的基础,也是新疆地区保水采煤体系构建的前提条件。

1.1 新疆地区水文地质结构特点

新疆地区的煤层埋藏普遍较浅,除伊南煤田外,其他地区的埋深通常在100~300 m(表1)。气候方面,除了相对温和的伊犁地区外,其他地区普遍干旱少雨,同时存在煤层火烧现象。在地下水补给方面,新疆地区受到的补给较为有限,主要来自大气降水和雪山融水,少量来自于山区径流和河流。总体而言,除了伊犁地区外,新疆地区地下水文地质条件具有一定的相似性。

表1 新疆矿区煤层埋藏及水文地质条件

Table 1 Burial and hydrogeological conditions of coal seam in Xinjiang mining area

煤田	代表矿区	主采煤层埋深/ m	气候	矿区水源补给	自燃区
准东煤田	五彩湾矿区	较浅(露天)	干旱	雪山融水、地表河流	有
淮南煤田	硫磺沟煤矿	250~300(较浅)	干旱-半干旱	雪山融水、头屯河	有
和什托洛盖煤田	沙吉海煤矿	250(较浅)	大陆性	雪山融水、大气降水	有
吐哈煤田	大南湖煤矿	200~400(较浅)	干旱	雪山融水、大气降水	有
伊南煤田	伊犁一矿	100~1 000(较浅)	温和湿润	雪山融水、山区径流	无
库拜煤田	榆树泉煤矿	150~300(较浅)	干旱	雪山融水、库车河	有

结合新疆地下水文地质条件,总结并概括了新疆风蚀地貌浅埋煤层的水文地质结构模式及水循环方式,如图1所示。总体而言,地下水补给主要来自大气降水及冰雪融水等,经地表风化裂隙带和火烧、露头处渗透入地下水系统,进而补给下方砂

岩含水层。据此推测,自燃区裂隙的发育情况使其具有优先接受地下水补给的特点,因此烧变岩含水层的富水性较为突出。矿区内地下水主要集聚于自燃区域的低洼地带、砂岩含水层及后续开采形成的采空区,使得区域水文地质条件复杂多变。

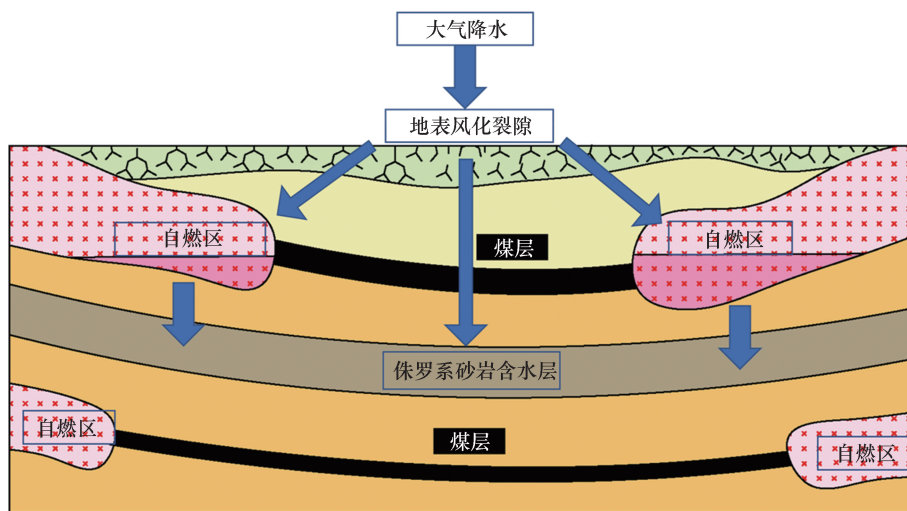


图1 风蚀地貌浅埋煤层水文地质结构简图

Fig. 1 Schematic of hydrogeological structure of shallow-buried coal seam in wind-erosion landform

1.2 榆树泉井田煤层与水文地质结构

研究区所在的新疆库车市位于我国西北部地区。区内煤炭资源主要赋存于构造盆地,水文地质结构主要受到褶皱构造、断层构造的影响。区域内地表风蚀地貌(图2)为地面降雨转换为地下水流提供了有利条件,含水层以第四系孔隙水与侏罗系裂隙水为主。

矿区揭露的地层由老到新分别为三叠系黄山街组(T₃hs)、侏罗系塔里奇克组(J₁t)、侏罗系阿合组(J₁a)、第四系(Q)(图3)。根据地层的含(隔)水性划分,共有5层含水层(表2)、1层透水岩层、4层隔水层。依据钻探成果,井田内共有13层



图2 新疆地区风蚀地貌

Fig. 2 Wind-erosion landform in Xinjiang

地层			柱状	岩性	厚度/m	岩层性质
系	组	段				
第四系	Q	—		松散层	12.96	含水层
侏罗系	阿合组	J _{1a}		砂岩、松散层	39.71	透水不含水岩层
		J _{1t³}		烧变层	43.99	含水层
	塔里奇克组	J _{1t²}		5煤	8.08	
				砂岩、泥岩	16.35	隔水层
				砂岩	18.89	承压含水层
				7煤	2.69	
				砂岩、泥岩		隔水层
				砂岩	10.84	承压含水层
				8煤	1.05	
				砂岩、泥岩	13.26	隔水层
				粗砂岩、中砂岩	38.88	承压含水层
				10煤	3.23	
	塔里奇克组	J _{1t¹}		砂岩	17.43	隔水层
				细砂岩	12.28	
三叠系	黄山街组	T _{3hs}		砂岩		

图3 研究区综合水文地质柱状图

Fig. 3 Hydrogeological histogram of the study area

煤层,分布于塔里奇克组地层,其中赋存稳定的可采煤层共有4层,分别为5煤、7煤、8煤、10煤。矿区含隔水层及煤层空间位置关系如图4所示。本文将对矿区10煤开采过程进行研究,并设计保水采煤技术体系。

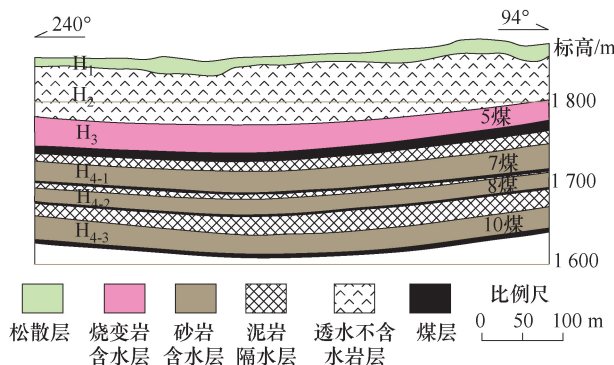


图4 研究区水文地质剖面

Fig. 4 Hydrogeological profile of the study area

矿区部分地表被煤层自燃产生的红色烧变岩所覆盖,这一现象表明该区域曾经历过煤层自燃作用,很可能是多层煤层的自燃所导致的。这也意味着,矿区内的煤层在接近地表的部分可能已经受到了自燃的影响。自燃区底部通常呈现不规则的锅底状或锯齿状,这种形态特性形成了地下储水仓,接受来自降水、地下水及地表径流的补给,水量普遍较大,但流动性较差。

表2 榆树泉煤矿含水层及水文地质参数

Table 2 Aquifer and hydrogeological parameters of Yushuquan Coal Mine

地层	含水层编号	含水层名称	含水层厚度/m	单位涌水量/ (L · s ⁻¹ · m ⁻¹)	渗透系数/ (m · d ⁻¹)	富水性
Q ₄	H ₁	冲、洪积砂砾石 潜水含水层	0.65~15.39	0.041~4.474	1.460~36.590	弱~强
J _{1t³}	H ₃	5煤烧变岩 潜水含水层	21.78~47.01	0.092~17.637	0.361~77.900	强~极强
J _{1t²}	H ₄₋₁	5煤-7煤之间 砂岩段含水层	12.00~26.00	0.003~0.008	0.020~0.021	弱~中等
J _{1t²}	H ₄₋₂	7煤-8煤之间 砂岩段含水层	11.00~18.00	0.005~0.337	0.040~0.057	弱~中等
J _{1t²}	H ₄₋₃	8煤-10煤之间 砂岩段含水层	27.00~29.00	0.004~0.046	0.004~0.046	弱~中等

根据井田内物探结果,矿区内烧变岩在平面和垂向上均呈现不均匀性,且各煤层的自燃深度存在较大差异。根据以往的地质和水文地质勘探结果以及工作面回采资料等,绘制了

研究区各煤层自燃区与采空区的分布图(图5)。这能更全面地理解自燃区的空间分布特征,为进一步的地质灾害防治和矿井安全生产提供重要依据。

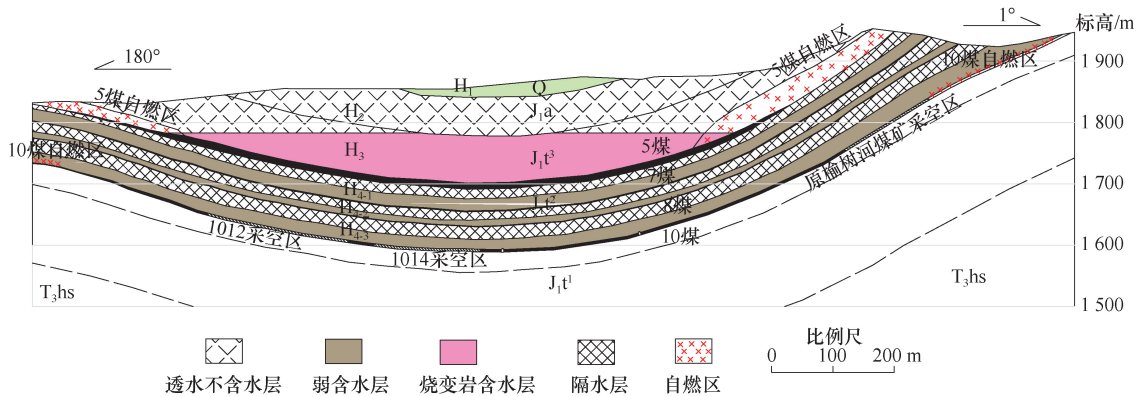


图5 研究区水文地质剖面
Fig. 5 Hydrogeological profile of the study area

2 研究区采动影响研究

2.1 开采覆岩破坏规律

对煤层开采导水裂隙带发育高度进行预计,确定煤层开采是否波及含水层,进而确定保水采煤目标层位。

根据国家安全监管总局、国家煤矿安监局、国家能源局、国家铁路局印发的《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》(“三下”规范)相关内容,选取煤层倾角小于 25° 中硬顶板开采导水裂隙带计算公式,对榆树泉矿区 10 煤开采导水裂隙带发育高度进行预计:

$$H = \frac{100 \sum M}{1.6M + 3.6} \pm 5.6 \quad (1)$$

式中, H 为导水裂隙带最大高度, m; M 为采高, m。

采高取 10 煤开采高度 3.2 m, 经计算, 10 煤开采导水裂隙带高度范围为 31.09~42.3 m, 导水裂隙带最大高度为 42.3 m, 即裂采比为 13.21。

同时, 采用井下仰孔分段注水结合瞬变电磁探测法对研究区 1013 工作面开采(采高 3.2 m)导水裂隙带发育情况进行了现场实测。通过钻孔对开采前后覆岩进行分段注水, 观测每个注水段的注水漏失量并进行对比, 观察漏失量前后变化以此判断上覆岩层的开采裂缝发育情况。对比发现, 在受开采影响区(导水裂隙带)内, 漏失量由小于 0.5 L/min 增大至 2.5~4.5 L/min, 得到开采影响区范围为 50.08 m 左右。同时, 使用瞬变电磁探测对比注水前后的电阻率变化, 也可以得到导水裂隙带发育高度。经对比发现, 注水后钻孔在 30~90 m 内电阻率降低, 开采影响范围为 30~90 m, 影响深度约为 53.5 m。

综合导水裂隙带高度计算方法(表 3), 选取 16.72 作为本文使用的裂采比。根据矿区内 10 煤最大厚度 4.57 m 计算, 全区导水裂隙带发育最大高度为 76.41 m。根据煤层与各含水层之间的空间关系判断, 在 10 煤开采过程中受到开采影响的

有 H_{4-3} 、 H_{4-2} 含水层。

表3 导水裂隙带发育高度统计
Table 3 Development height of the water-conducting fracture zone

研究方法	导水裂隙带高度/m	采高/m	裂采比
“三下”规范公式	42.30	3.20	13.21
井下仰孔注水法	50.08	3.20	15.65
瞬变电磁法	53.50	3.20	16.72

2.2 顶板含水层富水性分区

根据矿区以往开采经验, 煤层顶板含水层富水性存在较大差异, 因此需对顶板含水层进行富水性分析。使用层次分析法对研究区受到开采影响的含水层进行富水性分区, 分选出与煤层顶板含水层富水性相关的因素包括顶板含水层砂岩厚度、顶板砂岩中砂岩与粗砂岩所占比例、砂岩段冲洗液漏失量、RQD 值、含水层埋深。其中, 含水层砂岩累计厚度直接影响到含水层富水性, 而中、粗砂岩富水性要优于粉、细砂岩, 因此中、粗砂岩占比也会影响砂岩富水性; 钻孔砂岩段冲洗液漏失量与 RQD 值可以反映砂岩段岩石强度与裂隙发育程度, 而含水层埋深决定含水层在此处的补给, 间接影响到含水层富水性。经过对各因素进行打分后, 计算出各因素所占权重(表 4)。

表4 影响顶板含水层因素权重值
Table 4 Weight values of factors affecting roof aquifer

影响因素	权重
顶板含水砂岩厚度	0.51
砂岩中、粗砂所占比例	0.27
含水层埋深	0.11
RQD 值	0.05
冲洗液漏失量	0.05

将各因素数据进行归一化,统一量纲,与权重一起带入式(2)计算,可得到榆树泉10煤顶板含水层富水性评价指数,并据此绘制出研究区顶板含水层富水性分区图(图6)。

$A = k_1e_1 + k_2e_2 + k_3e_3 + k_4e_4 + k_5e_5$ (2)
 式中, A 为顶板含水层富水性指数; k_x 为各因素权重; e_i 为各因素归一化后数据。

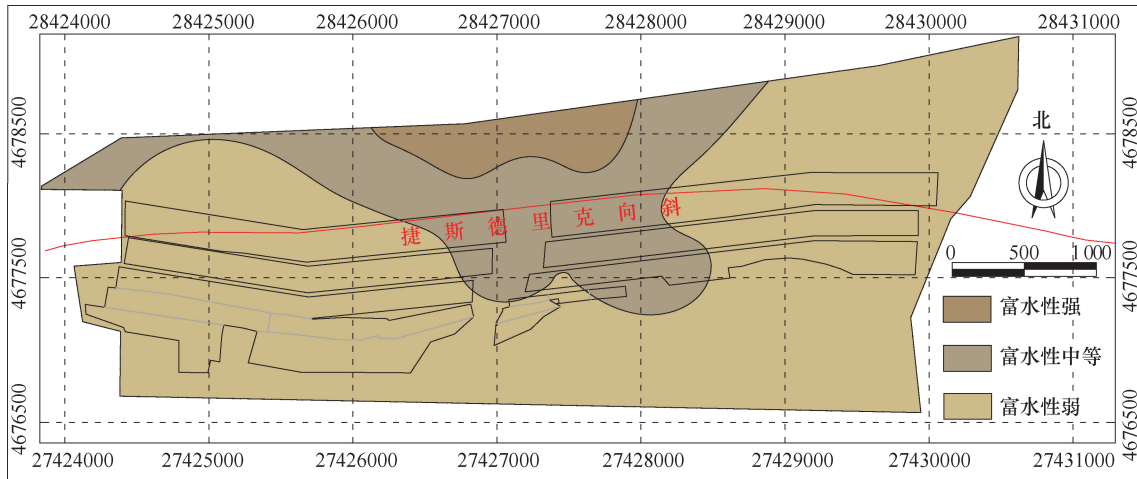


图6 顶板含水层富水性分区
 Fig. 6 Zoning map of aquifer water-richness

2.3 开采对各水体影响

煤层开采不仅会对顶板含水层造成破坏,还会对矿区内其他水体造成不同程度的影响。为研究煤层开采对矿区内不同水体的影响,选取2019年1014工作面开采活动与2020年井底车场对自然

区含水层的疏放活动进行分析,并研究同期水文地质长观孔观10(第四系含水层)与观21(烧变岩含水层)水位变化(图7),得到在研究区煤层上方烧变岩含水层与第四系含水层水力联系与补给关系。

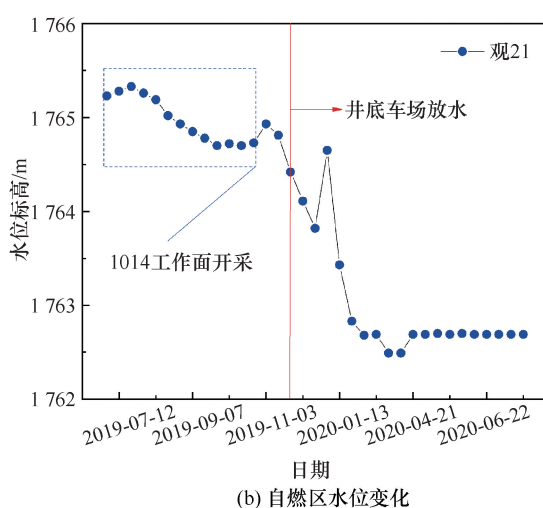
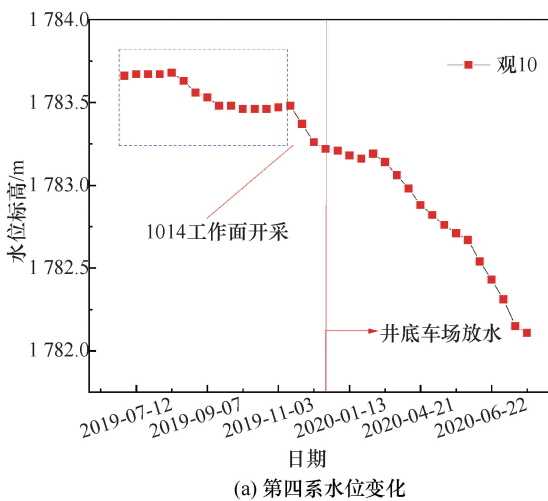


图7 含水层水位变化
 Fig. 7 Variations in the water level of the aquifer

分析图7得到,在1014工作面开采过程中,5煤烧变岩含水层与第四系含水层水位都有一定程度的下降,而在矿区井底车场对烧变岩含水层进行疏放时,第四系含水层水位也有所下降。由此可以得出,矿区煤层开采会对上方顶板含水层、烧变岩含水层、第四系含水层均造成不同程度的影响,使得含水层水位下降,而煤层开采没有直接波及上方

烧变岩含水层与第四系含水层,表明烧变岩含水层、第四系含水层对下方顶板含水层有着直接或间接的联系与补给作用。

综上,煤层开采对矿区地下水体系有着较大的影响,为保护矿区内地下水资源,需对矿区内各水体采取保水采煤措施,进行针对性的治理。

3 保水采煤方法

目前榆树泉煤矿保水采煤及防治水规划总体思路为,明确重点保水层位,从矿井涌水的源头采取针对性保护措施。采用保水采煤方法,是将防治水的过程由治理为主转向从源头预防为主。

根据榆树泉煤矿水文地质特征、充水因素和矿井生产实际情况,结合历年来水文地质工作,目前矿井的采掘工程主要受自燃区积水、采空区积水及煤层顶板含水层等的威胁。

根据煤层开采情况,榆树泉煤矿保水采煤目标层位为顶板含水层、5煤烧变岩含水层、采空区积水。根据矿区内水文地质结构,针对各水体分别设计合适的保水措施,形成矿区的保水采煤体系。

(1)采空区水。矿区内采空区距采煤工作面较近,对附近煤矿开采具有较大威胁,因此出于安全考虑应对其进行疏放。采空区水流经煤矿开采区,水质已经受到污染,因此在疏放后不能随意排放。为更好地利用采空区水,需要进行水质净化,通过化学方法对采空区水的有害成分进行处理,经检测无害后再利用。

(2)顶板含水层。由于煤层顶板含水层富水性存在差异,在部分区域富水性强,出于煤矿安全

开采与保水采煤的需求,根据顶板含水层富水性分区,对顶板含水层富水性强的区域进行煤柱留设,减少对顶板含水层的扰动。

(3)烧变岩含水层。烧变岩含水层水量大、富水性强,且由于烧变岩底界不规则,因此富水位置未知。根据烧变岩距10煤距离对烧变岩进行保护层留设,依据国家矿山安全监察局制定印发的《煤矿防治水细则》中各种工程情况,选取适合榆树泉煤矿的公式计算5煤烧变岩积水区安全保护层宽度(H_a)。

$$H_a = \frac{p}{T_s} + 10 \quad (3)$$

式中, p 为防隔水煤(岩)柱承受的水头压力,MPa; T_s 为临界突水系数,取值0.06 MPa/m。

水头压力根据5煤烧变岩水文观测孔所测量的水位计算,为0.59 MPa。经计算,自燃区保护层的值为19.83 m。根据5煤自燃区与10煤间距以及开采导水裂隙带高度,判断矿区各地区是否满足煤柱留设条件,在不满足煤柱留设条件的区域采取限高开采,以抑制导水裂隙带发育。

综合以上针对各煤层的保水采煤方法,得到榆树泉煤矿保水采煤分区如图8所示,在每个分区采取适宜的煤矿开采技术,以达到保水采煤目的。

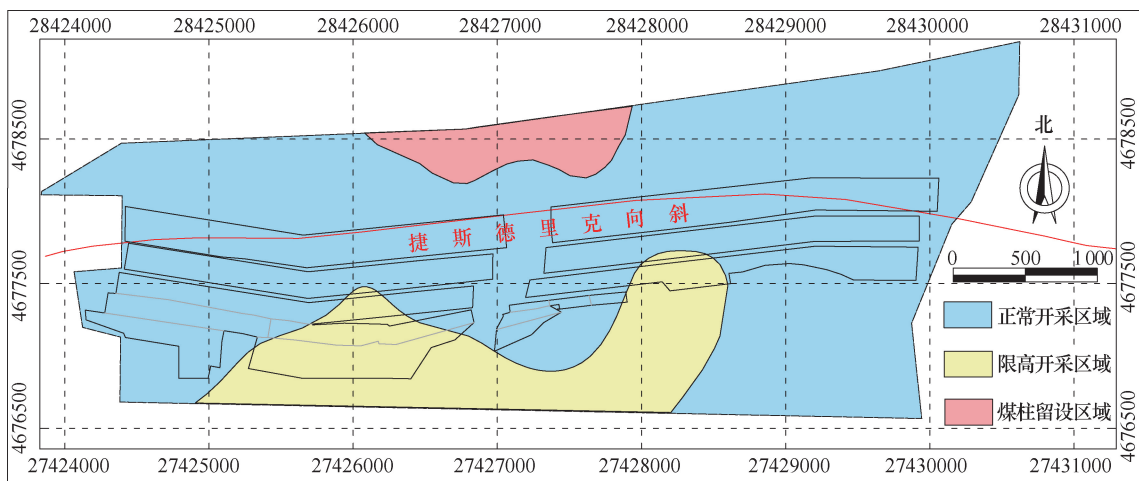


图8 榆树泉煤矿保水采煤分区

Fig. 8 Zoning map of water-retaining coal mining in Yushuquan Coal Mine

为确保煤层安全开采,在以上分区的基础上,还需加强探测与监测,做到“有疑必探,先探后采”。同时,应对区域内重点保护的水体水位进行定期监测,当出现水位异常下降的情况,对其进行针对性保护。

4 结语及展望

新疆地区煤层埋藏较浅,开采煤层距上方含水

层、地表水流较近,因此煤矿开采会对上方水体造成较大扰动,易使水资源遭到破坏。加之新疆地区干旱的气候条件及水资源稀缺的现状,新疆地区迫切需要一套成体系的保水采煤技术方案。

通过对新疆地区矿井水文地质条件进行研究,总结了新疆风蚀地貌区水文地质结构及水循环规律;计算榆树泉井田导水裂隙带发育高度,对顶板富水性进行分区;根据开采煤层与上方含水层之间

位置关系、扰动程度,对井田内各区域保水采煤方案进行设计。

新疆地区煤矿富集区众多,各煤矿虽有着相似的水文地质结构,但每个地区又都存在差异。因此,本文提出的榆树泉煤矿保水采煤方法体系虽然对于其他煤矿开采区域具有一定参考意义,但并不完全适用。对于新疆风蚀地貌区浅埋煤层保水采煤方法体系构建,仍有待继续研究,需要搜集更多矿区资料,来完善适用于全区的保水采煤体系,以更好地服务于新疆地区煤矿开采与水资源保护。

参考文献

- [1] 李本军. 新疆地区煤矿矿井水文地质条件和防治水问题分析[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(S1): 45-49.
LI Benjun. Analysis on hydrogeological conditions of coal mines and water prevention and control problem in Xinjiang coal mining area [J]. Coal Geology of China, 2022, 34(S1): 45-49.
- [2] 井源鑫. 新疆风蚀地貌区浅埋厚煤层开采采空区漏风规律及防治技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
JING Yuanxin. Study on air leakage law and prevention technology of goaf in shallow-buried thick coal seam mining in wind erosion landform area of Xinjiang [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [3] 丁志文, 陈方方, 谢恩, 等. 塔中 M 区奥陶系碳酸盐岩凝析气藏综合分类及开发技术对策[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(5): 84-92.
DING Zhiwen, CHEN Fangfang, XIE En, et al. Comprehensive classification and development strategies of Ordovician carbonate condensate gas reservoirs in Tazhong M area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(5): 84-92.
- [4] 杨更. 新疆雅丹地貌分布特征浅析[J]. 四川地质学报, 2009, 29(S2): 286-290.
YANG Geng. On distribution of the yardang in Xinjiang [J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(S2): 286-290.
- [5] 孟和尚彦军, 牛宁宁, 等. 新疆不同地区煤矿采空区地质灾害特征差异性分析[J]. 新疆地质, 2022, 40(4): 483-487.
MENG He, SHANG Yanjun, NIU Ningning, et al. Analysis on the difference of geohazard characteristics in goaf of coal mines in different regions of Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2022, 40(4): 483-487.
- [6] 王海, 王皓, 王晓东, 等. 新疆天山北坡生态脆弱矿区水害治理及水资源保护技术[C]// 中国煤炭工业安全科学技术学会水害防治专业委员会, 中国煤炭学会矿井地质专业委员会, 中国地质学会, 中国煤炭学会煤炭地质专业委员会, 煤炭工业技术委员会煤矿防治水专家委员会. 2020 年煤炭安全高效绿色智能开采地质保障学术论坛论文集. 2020: 10. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.064728.
WANG Hai, WANG Hao, WANG Xiaodong, et al. Water hazard control and water resources protection technology in ecologically fragile mining areas on the northern slope of Tianshan Mountains, Xinjiang [C]// China Coal Industry Safety Science and Technology Society, China Coal Industry Safety Science and Technology Society, China Coal Geology Committee, Geological Society of China, Coal Geology Committee of China Coal Society, Coal Industry Technical Committee, Coal Mine Water Prevention and Control Expert Committee. 2020 Proceedings of the Academic Forum on Geological Guarantee for Safe, Efficient, Green and Intelligent Coal Mining, 2020: 10. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.064728.
- [7] 孙德全, 鲁孟胜, 张兆民. 新疆大南湖北露天煤矿首采区 III 火烧区地下水资源的数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(4): 64-68.
SUN Dequan, LU Mengsheng, ZHANG Zhaomin. The numerical simulation of groundwater resources in burnt zone of the first mining area III in Dananhu northern surface mine of Xinjiang [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(4): 64-68.
- [8] 崔德广, 周梓欣, 王俊辉. 新疆阜康市砂沟井田火烧区储量预测研究[J]. 山东煤炭科技, 2023, 41(1): 158-160.
CUI Deguang, ZHOU Zixin, WANG Junhui. Study on prediction of water storage in burning area of Shagou Mine field in Fukang city of Xinjiang [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2023, 41(1): 158-160.
- [9] MCMILLAN M, SCHOENBOHM L M. Large-scale Cenozoic wind erosion in the puna plateau: the Salina del fraile depression [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2020, 125(9): e05682.
- [10] KUENZER C, STRACHER G B. Geomorphology of coal seam fires [J]. Geomorphology, 2012, 138(1): 209-222.
- [11] BORIS C M, KRUTILLA J V. Water rights and energy development in the Yellowstone River Basin: an integrated analysis [M]. United States, 1980.
- [12] KADEN S, SCHRAMM M. Control model Spree/Schwarze Elster—a tool to optimise rehabilitation of water resources in the Lusatian mining district [J].

- Landscape and Urban Planning, 2000, 51 (2/3/4): 101-108.
- [13] 范立民. 神木矿区的主要环境地质问题[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(6): 37-40.
FAN Limin. Environmental geology in Shenmu mining area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992, 19(6): 37-40.
- [14] 范立民, 孙强, 马立强, 等. 论保水采煤技术体系[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 196-204.
FAN Limin, SUN Qiang, MA Liqiang, et al. Technological system of water-conserving coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 196-204.
- [15] 刘洋, 石平五, 张壮路. 浅埋煤层矿区“保水采煤”条带开采的技术参数分析[J]. 煤矿开采, 2006, 11(6): 6-10.
LIU Yang, SHI Pingwu, ZHANG Zhuanglu. Technique parameters analysis of strip mining without destroying water resource in low-burying coal seam [J]. Coal Mining Technology, 2006, 11(6): 6-10.
- [16] 王海. 隐伏火烧区烧变岩含水层水害治理技术研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(5): 88-97.
WANG Hai. Technologies for water hazard prevention and control in burnt rock aquifers within concealed burnt areas[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(5): 88-97.
- [17] 许延春, 张二蒙, 赵霖, 等. 黏度对浆液在裂隙岩体中扩散与充填规律的影响[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(1): 71-81.
XU Yanchun, ZHANG Ermeng, ZHAO Lin, et al. Study on the law of influence by slurry viscosity on the fractured aquifer grouting and diffusion [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(1): 71-81.
- [18] 章丽萍, 安逸云, 吴二勇, 等. 响应曲面法优化含氟矿井水处理及除氟机理研究[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(6): 782-792.
ZHANG Liping, AN Yiyun, WU Eryong, et al. Optimization of fluorine mine water treatment and fluorine removal mechanism using response surface methodology [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(6): 782-792.
- [19] 师本强, 侯忠杰. 陕北榆神府矿区保水采煤方法研究[J]. 煤炭工程, 2006, 38(1): 63-65.
SHI Benqiang, HOU Zhongjie. Research on coal mining method with water conservation in Yushen Mining Area [J]. Coal Engineering, 2006, 38(1): 63-65.
- [20] 徐智敏, 孙亚军, 高尚, 等. 干旱矿区采动顶板导水裂隙的演化规律及保水采煤意义[J]. 煤炭学报, 2019, 44(03): 767-776
XU Zhimin, SUN Yajun, GAO Shang, et al. Law of mining induced water conduction fissure in arid mining area and its significance in water-preserved coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 767-776.

(责任编辑:陈贵仁)