



移动扫码阅读

程志恒,陈亮,邹全乐,等.近距离煤层群煤与瓦斯高效共采技术体系——以山西吕梁沙曲矿区为例[J].煤炭科学技术,2021,49(2):122-137. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.02.016
 CHENG Zhiheng, CHEN Liang, ZOU quanle, et al. Study on high-efficiency co-mining technology system of coal and gas in contiguous seams:a case study of Shaqu Mining Area in Lüliang, Shanxi Province[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 122-137. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.02.016

近距离煤层群煤与瓦斯高效共采技术体系研究 ——以山西吕梁沙曲矿区为例

程志恒^{1,3},陈亮^{2,3},邹全乐⁴,王宏冰⁵,浦仕江⁶,齐庆新^{7,9},梁椿豪⁸,樊少武⁹,苏士龙⁸,闫大鹤⁸

(1.华北科技学院 安全工程学院,北京 101601;2.华北科技学院 安全监管学院,北京 101601;3.华科中安科技(北京)有限公司,北京 102300;
 4.重庆大学,重庆 400044;5.北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083;6.贵州大学 矿业学院,贵州 贵阳 550025;7.煤炭科学研究院
 深部开采与冲击地压研究院,北京 100013;8.华晋焦煤有限责任公司,山西 吕梁 033300;9.煤炭科学技术研究院有限公司 北京 100013)

摘要:为掌握近距离煤层群叠加开采的应力-裂隙-瓦斯渗流规律,构建近距离煤层群煤与瓦斯高效共采技术体系及动态评价模型,以山西吕梁沙曲矿区为研究对象,采用物理相似模拟、超声波试验及SF₆示踪气现场监测相结合的研究方法,分析了沙曲矿区近距离煤层群煤层气资源的赋存特点,探究了沙曲矿区近距离煤层群多次扰动下煤岩损伤变量随应力的变化规律,建立了 Boltzmann 煤岩损伤方程,得出了沙曲矿区近距离煤层群叠加开采条件下采动应力演化-裂隙发育-瓦斯运移规律。研究结果表明:沙曲矿区煤层的孔裂隙结构特征不利于瓦斯运移,在近距离煤层群叠加开采条件下二次采动对于覆岩应力场和裂隙场的影响并非简单的效果叠加,而是“1+1>2”的影响效果,下伏煤层在叠加开采下产生了贯穿型裂隙,并在其周围衍生了大量的次生裂隙,为煤层瓦斯运移提供了优势通道;根据沙曲矿区煤-气共采不同阶段的时空条件和消突要求,分区分级优选并集成了近距离煤层群煤与瓦斯共采技术体系,即在规划区采用多种地面井规模化多煤层长时间预抽煤层气,在准备区采用多分支水平井井定向对接共采和保护层开采+底抽巷定向钻孔群抽采,在生产区采用大采高沿空留巷共采及大直径定向钻孔群共采技术;通过分析煤与瓦斯共采的影响因素,提出了近距离煤层群煤与瓦斯共采动态评价指标体系,建立了贝叶斯煤与瓦斯共采评价模型,实现了对沙曲矿区煤与瓦斯共采效果及矿井部署合理性的评价,得出沙曲一矿煤与瓦斯共采动态合理性概率为 0.65、共采合理性等级为“较为合理”;最后阐述了近距离煤层群煤与瓦斯共采技术存在的关键问题,展望了近距离煤层群煤与瓦斯共采技术未来发展方向。

关键词:近距离煤层群;叠加开采;煤与瓦斯共采;三区联动;时空衔接关系;贝叶斯评价模型

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2021)02-0122-16

Study on high-efficiency co-mining technology system of coal and gas in contiguous seams:a case study of Shaqu Mining Area in Lüliang, Shanxi Province

CHENG Zhiheng^{1,2}, CHEN Liang³, ZOU quanle⁴, WANG Hongbing², PU Shijiang⁷, QI Qingxin^{3,5},
 LIANG Chunhao⁶, FAN Shaowu³, SU Shilong⁶, YAN Dahe⁶

(1. School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 2. School of Safety Supervision, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 3. Huake Zhongan Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 102300, China; 4. Chongqing University, Chongqing 400044, China; 5. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing 100083, China;
 6. Mining College of Guizhou University, Guiyang 550025, China; 7. Deep Mining and Rock Burst Research Institute, China Academy of Coal Science, Beijing 100013, China; 8. Huajin Coking Coal Co., Ltd., Lüliang 033300, China; 9. Mine Safety Technology Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

收稿日期:2020-09-12;责任编辑:李金松

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助项目(52074120);中央高校基本科研业务费资助项目(3142019005)

作者简介:程志恒(1988—),男,河南郑州人,副研究员。E-mail:chengzhiheng21@vip.qq.com

通讯作者:陈亮(1987—),男,河南信阳人,副研究员。E-mail:sezichan@126.com

Abstract: In order to grasp the law of stress-fracture-gas seepage in the superimposed mining of contiguous seams, a technical system and dynamic evaluation model for high-efficiency co-mining of coal and gas in contiguous seams were constructed. The combined research method of ultrasonic test and on-site monitoring of SF₆ tracer gas field analyzed the occurrence characteristics of coalbed methane resources in contiguous seams in the Shaqu Mining Area and explored the variation of coal and rock damage variables under multiple disturbances in the close-distance seam group in Shaqu Mine. The law of stress changes, the Boltzmann damage equation of coal and rock was established, and the characteristic law of mining stress evolution fracture development gas migration under the condition of superimposed mining of close coal seams in Shaqu Mine was obtained. The research results show that the pore and fissure structure characteristics of the coal seams in Shaqu Mining Area are not conducive to the migration of gas. Under the condition of superimposed mining of contiguous seams, the influence of secondary mining on the stress field and fissure field of the overburden rock is not a simple superposition of effects, but the effect of “1+1>2”, and the overburden coal seam produced through type fracture under superposition mining, and a large number of secondary fissures were derived around it, which provided an advantageous channel for gas migration in the coal seam. The temporal and spatial conditions and outburst elimination requirements at different stages of coal and gas co-mining in Shaqu Mine, the technical system of simultaneous extraction of coal and gas in contiguous seams are formed, that is to say, in the planning area, a variety of surface wells are used for large-scale and long-term pre-extraction of coalbed methane. In the preparation area, multi branch horizontal wells are used for directional joint mining and protective layer mining + bottom extraction roadway for directional drilling group mining. In the production area, large mining height along gob and large diameter directional drilling group mining technologies are used for simultaneous extraction of coal and gas; by analyzing the influencing factors of coal and gas co-mining, a dynamic evaluation index system of coal and gas co-mining in contiguous seams is put forward, and a Bayesian coal and gas co-mining evaluation model is established to realize the evaluation of the effect of coal and gas co-mining and the rationality of mine deployment in Shaqu Mine. It shows that the dynamic rationality probability of coal and gas co-mining in Shaqu No.1 Mine is 0.65, and the rationality grade of co-mining of coal and gas is relatively reasonable; the key problems existing in the technology of coal and gas co-mining in the coal seam group are discussed, and the future development direction of the technology of co-mining coal and gas in contiguous seams is prospected.

Key words: contiguous seams; superimposed mining; co-mining of coal and gas; three-zone linkage; spatio-temporal connection; Bayesian evaluation model

0 引言

近距离煤层群在我国分布广泛,煤层层间距小、煤层间采动相互影响大,且在其开采过程中煤层瓦斯始终威胁矿井安全。随着矿井开采深度不断延深,煤层瓦斯含量、瓦斯压力也随之增加,瓦斯治理难度进一步增大。因此,采用煤与瓦斯共采技术,形成近距离煤层群煤与瓦斯高效共采技术体系,是解决近距离煤层群煤碳资源开采及煤层气资源高效抽采利用的必然手段,也是响应当今社会倡导绿色开采的技术体系之一。目前,在近距离煤层群煤与瓦斯共采技术领域,国内外众多学者从不同视角进行了研究,并取得了丰硕成果。在近距离煤层群方面:文献[1-2]探究了近距离煤层群在叠加开采条件下应力-裂隙演化特征,实现了对采动裂隙带分布特征的精细化模拟;文献[3]研究了保护层开采下首采层的采动影响范围,分析了高瓦斯煤层群保护层开采技术的可行性;文献[4]发现叠加开采条件下覆岩垮落特征呈多层协调移动,位移场、裂隙场也出现了叠加效果;文献[5-6]研究了煤层群重复开采下三维应力场的时空演化特征和覆岩裂隙带的破碎力学行为。在煤与瓦斯共采方面:文献[7-8]初步

提出了“矿山绿色开采”的新概念;文献[9-11]研究了上覆岩层的破断机理及裂隙分形特征,揭示了采动裂隙的演化规律;文献[12-14]改变了传统“风排”瓦斯的治理措施,采取首采层卸压开采,实现了高效“抽采”瓦斯的新模式,并形成了保护层开采下的煤与瓦斯共采技术;文献[15-16]建立了无煤柱开采下的煤与瓦斯高效共采理论,实现了对煤层瓦斯分布的定量描述;文献[17]采用了大孔径千米定向钻机高效抽采了顶板裂隙带瓦斯,提出了高瓦斯煤层千米定向钻孔煤与瓦斯共采机理。

上述研究成果切实地解决了目前近距离煤层群开采过程中存在的技术难题,并构成了我国煤与瓦斯共采技术的基本内容,但在近距离煤层群开采条件下叠加应力场与瓦斯压力耦合致害机理方向的研究较少,且各项煤与瓦斯共采技术衔接关系不佳,近距离煤层群下煤与瓦斯共采技术体系尚未形成,缺少近距离煤层群煤与瓦斯共采全过程的动态效果评价模型。基于此,笔者以沙曲矿区为研究背景,对沙曲矿区叠加开采条件下应力场及其作用下瓦斯压力演化规律进行研究,从而为近距离煤层群条件下煤与瓦斯共采技术提供理论支撑,并对沙曲矿区煤层群采用共采技术后的抽-采-掘效果进行评价,以形

成近距离煤层群煤与瓦斯高效共采技术体系。

1 近距离煤层群的资源赋存特征

1.1 近距离煤层群煤炭资源赋存特征

近距离煤层群具有煤层层间距小、煤炭资源储

量大、煤层间采动相互影响大等特点,主要分布在我国安徽淮南淮北、重庆松藻、河南平顶山、贵州水城、吕梁西汾柳等矿区,受限于各自地质构造条件,其煤层群间的煤炭资源赋存分布特征亦不相同,具体赋存特征见表1。

表1 近距离煤层群煤炭资源赋存特征

Table 1 Occurrence characteristics of coal resources in close distance coal seams

矿井	矿井位置	煤炭资源赋存特征				
		可采煤层 数量/层	最小煤层 间距/m	平均可采 厚度/m	煤层变质 程度	煤层含气 量/(m ³ ·t ⁻¹)
潘二矿	淮南矿区	3	15.1	2.6~4.5	低变质的烟煤	0~25.85
桃园矿	淮北矿区	9	6.2	1.5~2.8	低变质的烟煤	0~24.79
松藻一矿	松藻矿区	3	21.0	5.45	变质程度较高的无烟煤	11.52~27.54
首山一矿	平顶山矿区	5	6.0	0.68~6.15	变质程度中等的肥煤	5.50~18.00
火铺矿	水城矿区	10	7.3	1.3~6.1	变质程度较高的无烟煤	3.69~20.33
华晋沙曲矿	西汾柳矿区	7	12.0	1.1~4.4	变质程度较高的焦煤	3.83~14.71

1.2 近距离煤层群煤层气资源赋存特征

据统计,我国近距离煤层群煤层气资源赋存状态整体呈现为:①在煤层含气量方面:松藻矿区含气量最高,其次为淮南淮北矿区、水城矿区、平顶山矿区,而西汾柳矿区的含气量最低,平均为9.27 m³/t;②在煤层气资源储量储存方面:西汾柳矿区储量最大,其次为平顶山矿区、淮南淮北矿区,水城矿区的煤层气储量最低^[18],如图1所示。

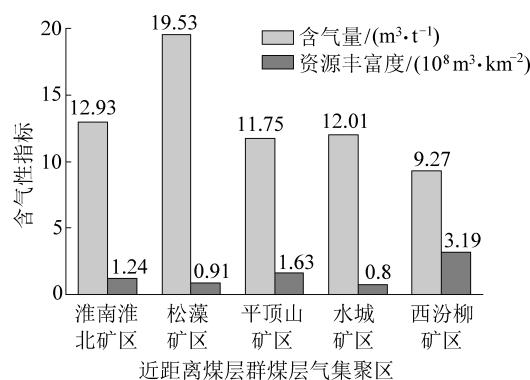


图1 近距离煤层群煤层气赋存分布特征

Fig.1 Occurrence and distribution characteristics of coalbed methane in close distance coal seams

虽然我国近距离煤层群煤炭资源和煤层气资源储量丰富,但由于开采过程中受重复采动影响,煤层裂隙演化规律不清,致使煤层瓦斯运移特征不明。因此,笔者以沙曲矿区近距离煤层群为例,通过分析煤层群中煤层瓦斯吸附-解吸特征,进而研究叠加开采条件下采动应力场-裂隙场的演化特征,从而揭示叠加开采条件下瓦斯运

移富集特征。

1.3 沙曲矿区煤炭资源赋存特征

1.3.1 煤炭资源宏观赋存特征

沙曲矿区隶属华晋焦煤有限责任公司,位于吕梁山脉中段西部,河东煤田中部,井田大致呈西北—南东向弧形,井田面积138.3535 km²。批采煤层共8层,分为上下2组,上煤组为山西组的2、3、4(3+4)、5号煤层,下煤组为太原组的6、8、9号煤层。主采煤层为3、4、5号煤层,平均煤层厚度分别为1.21、4.2、4.45 m,煤层层间含有少量夹矸层,均为稳定全区可采煤层,最小煤层间距为5.56 m,故沙曲矿区属于典型的近距离煤层群开采,如图2所示。

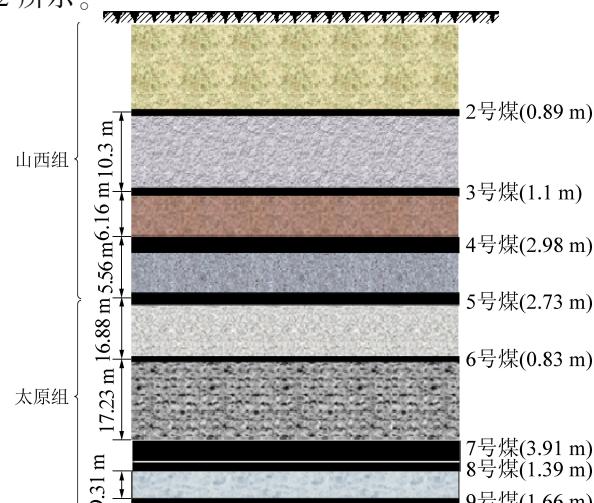
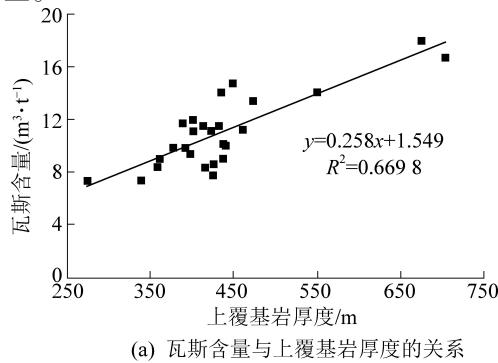


图2 沙曲矿区可采煤层特征

Fig.2 Characteristics of minable coal seam in Shaqu Mining Area

煤层瓦斯含量与煤层埋深、上覆基岩厚度及顶底板岩性之间具有相关性。因此,笔者取沙曲矿区同一时期主采煤层的煤样进行研究,其煤层瓦斯含量与上覆基岩厚度、煤层埋深的关系如图3所示。由图3可知,煤层瓦斯含量与煤层埋深、上覆基岩厚度呈线性关系,但由于沙曲矿区南翼煤层的埋深普遍大于北翼煤层的埋深,致使在相同煤层底板标高条件下南翼煤层的瓦斯含量普遍高于北翼煤层的瓦斯含量。



(a) 瓦斯含量与上覆基岩厚度的关系

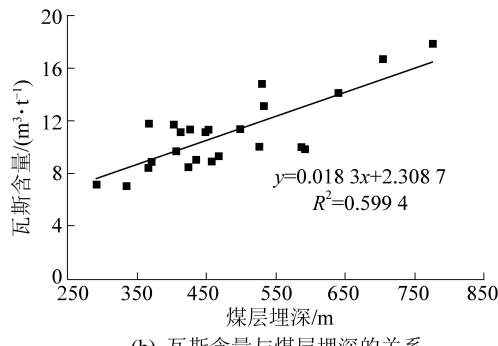


图3 煤层瓦斯含量与上覆基岩厚度、煤层埋深的关系

Fig.3 Relationship between gas content in coal seam and bed rock thickness and burial depth

基于沙曲矿区地质构造特征与瓦斯赋存特点,以三川河为界,将沙曲矿区划分为2个矿井,北翼煤层为沙曲一矿,南翼煤层为沙曲二矿(图4)。沙曲二矿的瓦斯富集程度高于沙曲一矿,瓦斯灾害呈现为“北超南突”的特点。根据2个矿井的煤层瓦斯含量及赋存特征,采用不同的煤与瓦斯共采技术。

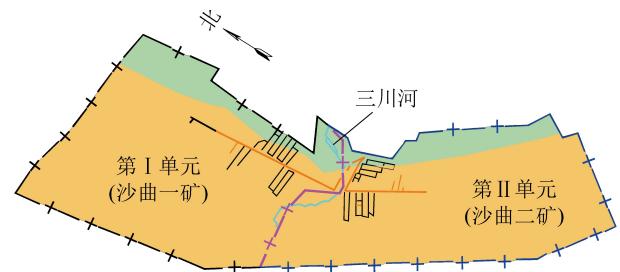


图4 沙曲矿区煤炭资源赋存划分示意

Fig.4 Coal resource division in Shaqu Mining Area

1.3.2 煤体细观结构及吸附解吸特征

煤是多孔隙物质,在成煤作用过程中往往伴有瓦斯形成,而煤层中微孔、微裂隙是瓦斯的主要储存和运移空间^[19]。因此,研究煤层中微孔、微裂隙的类型、大小和结构对掌握瓦斯赋存和涌出规律具有重要意义。

沙曲矿区煤层孔隙分布特征见表2。沙曲矿区3、4、5号煤层内中孔、微孔、小孔所占比例最大,约占总孔隙的83.57%、66.31%、69.57%,而瓦斯在煤层中主要流动场所为可见孔、大孔和中孔,微孔和小孔是吸附态瓦斯主要储存空间。3、4号煤层透气性系数为3.52~3.70 m²/(MPa²·d),平均瓦斯含量11.06 m³/t,5号煤层透气性系数为1.99~2.23 m²/(MPa²·d),平均瓦斯含量11.16 m³/t。

表2 沙曲矿区煤层孔隙分布特征

Table 2 Pore distribution characteristics of Shaqu Mining Area

煤层	微孔		小孔		中孔		大孔		比表面 积/(m ² ·g ⁻¹)	孔隙 率/%
	孔隙体 积/(mL·g ⁻¹)	比孔隙 体积/%								
3号	0.016 5	56.51	0.007 9	27.06	0.001 4	4.79	0.003 4	11.64	3.756	3.55
4号	0.025 9	43.55	0.013 6	22.76	0.009 5	15.90	0.010 3	17.27	3.893	2.68
5号	0.022 7	45.04	0.012 3	24.53	0.009 1	17.97	0.006 9	11.61	2.455	3.53

沙曲矿区煤层孔裂隙结构特征有利于瓦斯赋存,但不利于瓦斯运移,且煤层对瓦斯吸附性较强,导致沙曲矿区主采煤层的瓦斯含量较高。

上文以宏观和微观的角度分析了沙曲矿区煤层瓦斯赋存特征,受地质条件影响,南北两翼矿井表现出不同的瓦斯富集特征。即沙曲二矿的瓦斯

富集程度普遍大于沙曲一矿的瓦斯富集程度,且沙曲矿区煤层的孔裂隙结构特征不利于瓦斯气体运移,导致在叠加开采条件下卸压煤层裂隙发育特征及瓦斯运移规律不清晰。因此,有必要开展在叠加开采条件下采动应力场-裂隙场-瓦斯渗流场演化规律的研究。

2 沙曲矿区煤层群覆岩采动及瓦斯运移特征

2.1 煤层群叠加开采下煤岩损伤演化特征

采用介质损伤程度作为定量表征介质损伤程度的参数。将轴向应力、应变分别作为荷载变量,将对应的响应变量作为加卸载响应比值的参量^[20],加卸载响应比 Y_E 为

$$Y = X_+ / X_- \quad (1)$$

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \Delta R / \Delta P \quad (2)$$

式中: X_+ 、 X_- 分别是加载和卸载阶段的响应量; X 为加卸载阶段的响应量; ΔP 、 ΔR 分别是应力响应变量 P 和应变响应变量 R 所对应的增量, 应力响应变量 P 和应变响应变量 R 是从循环荷载试验下应力-应变曲线中获得的。可用加卸载响应比 Y 来表征循环荷载过程中煤样的损伤量。

基于 Weibull 分布规律建立了加卸载响应比 Y_E 与损伤变量 D 之间的关系^[21]

$$Y_E = \frac{1}{m(\varepsilon_F^m - \varepsilon^m)} = \frac{1}{1 + m_W \ln(1 - D(\varepsilon))} \quad (3)$$

式中: m_W 为 Weibull 指数; ε 为应变, $\varepsilon = (1/m)^{1/m}$; m 为试样质量; ε_F^m 为破坏点处的应变, 故该破坏点所对应的损伤为 $D_F = 1 - e^{(-1/m)} D_F$, $D(\varepsilon)$ 为试样变形所对应的损伤变量函数。

将式(3)变换可得损伤量与加卸载响应比的关系式为

$$D = 1 - e^{m_W Y_E} \quad (4)$$

由图 5 可知, 煤样随着轴向应力的增大, 加卸载响应比先缓慢增大, 然后加快增大, 最后基本呈直线增加(图 5b), 而损伤变量曲线分为缓增-急增-缓增 3 个阶段(图 5c)。

加载阶段煤样产生了损伤累积, 加卸载响应比逐渐增大, 当煤样所承受应力达到一定水平之后, 加载阶段弹性模量进一步降低, 加卸载响应比突增, 预示煤样即将发生破坏, 煤样进入了屈服阶段; 通过 Y 值计算获得的损伤变量 D 也具有相似的变化规律, 均能用 Boltzmann 公式进行拟合, 拟合度均 >0.9 。

2.2 煤层群叠加开采采动应力演化及分布特征

沙曲矿区作为近距离突出煤层群, 且主采煤层间的平均间距最大为 17.23 m(图 2), 为探究煤层群多次开采条件下采动应力场和裂隙场分布规律及演化特征, 采用自主研制的相似模拟试验平台, 模型铺设及测点布置如图 6 所示, 相似几何比 $a_L = 100 : 1$, 相似容重比 $a_\gamma = 1.625 : 1$ 。

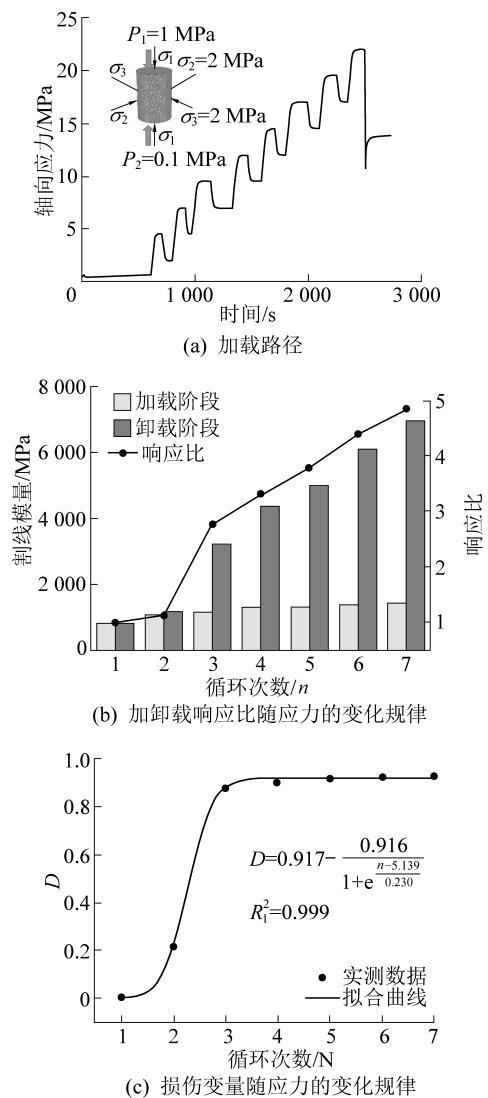


图 5 原煤加卸载响应比和损伤变量随加载应力的变化规律

Fig.5 Change rule of raw coal loading unloading response ratio and damage variable with stress

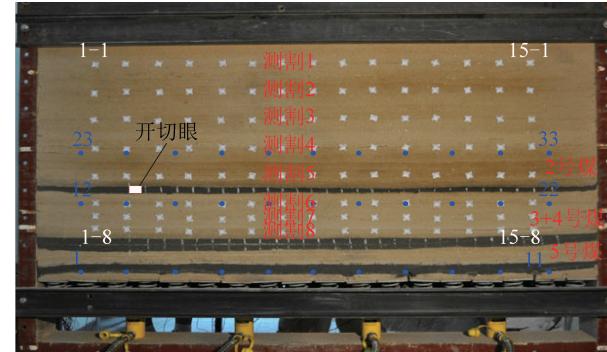
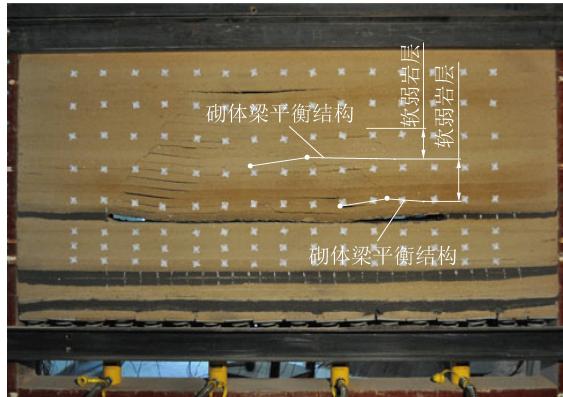


图 6 模型铺设及测点布置

Fig.6 Model laying and measuring point layout

1) 叠加开采下伏岩垮落演化规律。近距离煤层群在叠加开采条件下不同开采强度对上覆岩层的垮落特征影响不同, 具体为: 当工作面推进至 120 m 时, 在首采层开采条件下, 基本顶再

次断裂,采场第2次周期来压,但此时基本顶仍然可形成砌体梁平衡结构,如图7a所示;而在下伏煤层二次开采条件下,基本顶发生第4次周期来压现象,下位基本顶断裂垮落,上位基本顶形成砌体梁平衡结构,由于基本顶下沉量较大,更高位岩层在二次采动作用下再次发生断裂现象,如图7b所示。



(a) 首采层(2号煤)



(b) 下伏煤层(3+4号煤)

图7 工作面推进至120 m时岩层垮落特征

Fig.7 Rock collapse characteristics when the working face is pushed to 120 m

2) 叠加开采下伏岩应力分布特征。对比首采层和下伏煤层先后开采过程中覆岩不同层位上的应力变化(图8)可知:初采期间,下伏煤层(3+4号煤)卸压程度大于首采层(2号煤)的卸压程度,其最大应力降低值约是首采层的1.5倍;首采层开采条件下,当工作面推进至120 m时开始出现应力恢复现象,二次采动时覆岩发生应力恢复现象有所提前,约在下伏煤层工作面推进至100 m处,应力恢复现象产生后,下伏煤层开采时顶底板岩层测线上的卸压程度仍高于首采层开采时的卸压程度。

因此,基于叠加开采条件下伏岩垮落规律及应力分布特征,二次采动条件下采动影响范围远大于

首次层开采条件下的影响范围,且二次采动影响区所产生的裂隙多为破断型裂隙,而首采层开采影响区的裂隙多为离层裂隙,二次采动条件下产生的裂隙数量大于首采层开采影响下产生裂隙数量的2倍。因此,叠加开采条件下所产生的采动影响并非简单的首次层开采影响的2倍,而是产生了“1+1>2”的影响效果。

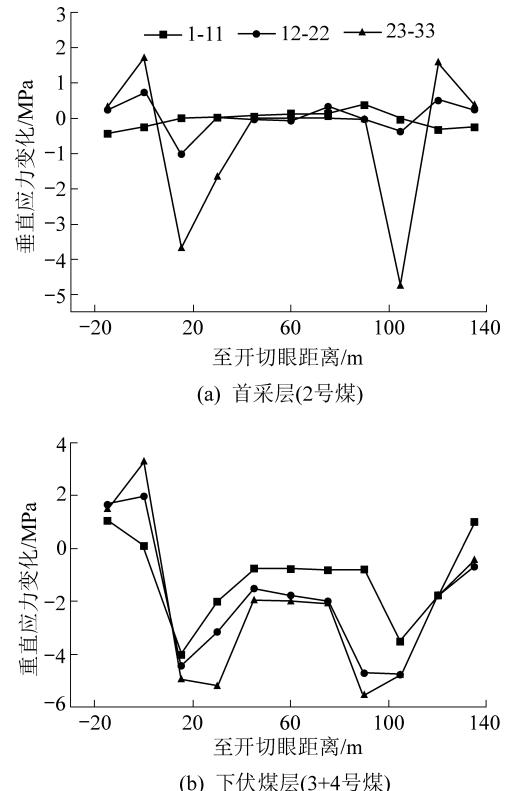


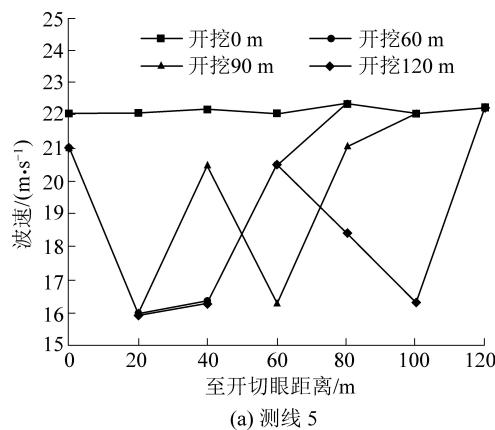
图8 工作面推进120 m时采动应力场变化特征

Fig.8 Change characteristics of mining stress field when working face advances 120 m

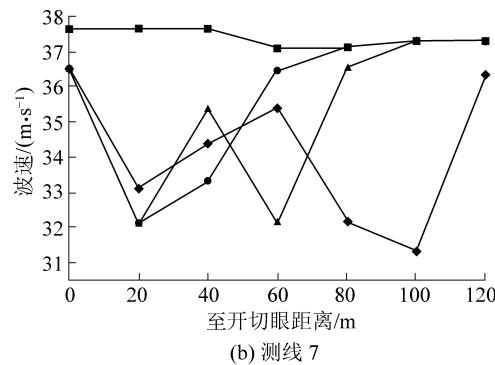
2.3 煤层群叠加开采裂隙发育及分布特征

超声波在裂隙发育的岩层中传播时波速减慢,可用超声波传播速度来反映岩层内裂隙的发育状态^[22]。测点布置如图6所示,其中测线5和测线7分别为超声波监测位置。

根据首采层和下伏煤层先后开采过程中测线上的波速变化情况(图9、图10)可知:在首采层(2号煤)开采过程中,测线7上的超声波波速及振幅降低程度远大于测线5,表明2号煤层开采时顶板岩层裂隙发育程度远大于底板岩层。而在下伏煤层(3+4号煤)开采过程中,2条测线上超声波波速降低程度明显高于首采层(2号煤)开采时的影响程度,因此可以推断,(3+4)号煤层开采过程中,裂隙发育数量及张开程度均大于2号煤层开采过程的裂隙发育数量及张开程度。



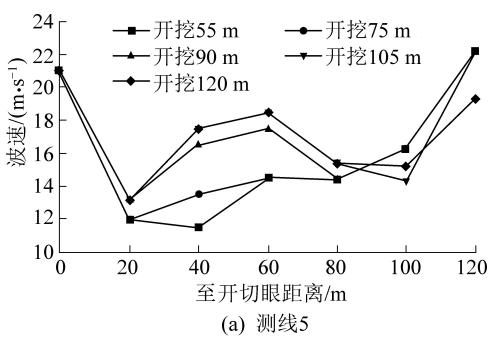
(a) 测线 5



(b) 测线 7

图9 首采层(2号煤)开挖过程中测线上波速变化

Fig.9 Variation of wave velocity on the survey line during the underlying coal seam (No.2 coal)



(a) 测线 5

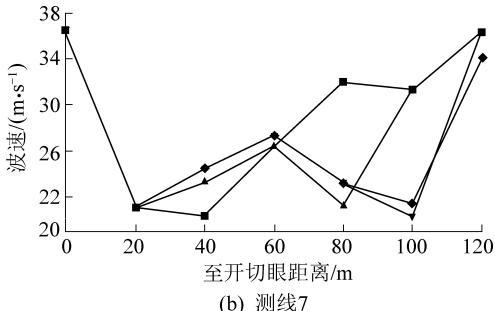


图10 下伏煤层(3+4号煤)二次开采时测线上波速变化

Fig.10 Variation of wave velocity on survey line during secondary mining of underlying coal seam (No.3+4 coal seam)

2.4 煤层群叠加开采瓦斯运移及富集特征

2.3节所研究的覆岩应力场-裂隙场演化规律及分布特征表明煤层群在叠加开采条件下,极有可

能产生大裂隙或贯穿型裂隙,然而煤层间的裂隙贯通情况对瓦斯运移及抽采参数的确定有着重要影响。因此,为探究近距离煤层群在叠加开采条件下瓦斯运移规律及富集特征,采用SF₆示踪气体标识法对煤层间裂隙的贯穿情况及贯穿型裂隙影响程度进行了现场试验验证。

试验地点为沙曲一矿(3+4)号煤层4208回风巷下第13钻场,目标煤层为(3+4)号煤层,取样地点为2号煤层2201工作面采空区及(3+4)号煤层瓦斯抽采钻孔(图11),在2201工作面2个端头和采空区底板分别布置5条测线,采用预埋管的方式采集气体样本,如图12所示。

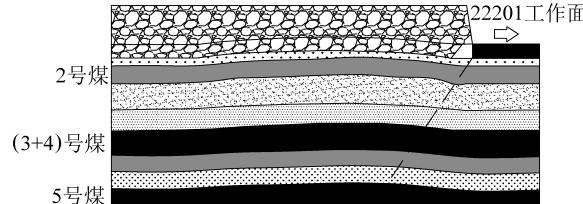


图11 工作面层位关系示意

Fig.11 Schematic diagram of working face layer relationship

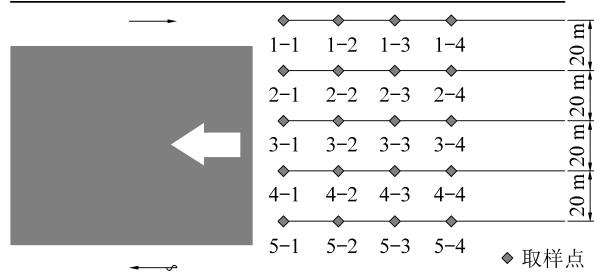


图12 2201工作面采空区气体取样点布置

Fig.12 Layout of gas sampling points in goaf of No.2201 working face

由于在2号煤层2201工作面采空区内的各测线上发现了SF₆气体,表明此时2号煤层与(3+4)号煤层之间已产生了贯穿型裂隙;前9次取气均未发现SF₆气体,而在第10次取气时发现SF₆,表明2201工作面回采到第10次取气时的位置,在2号煤层和(3+4)号煤层之间产生了贯穿型裂隙;分别在2-3测点和4-3测点首先检测到SF₆气体,说明保护层工作面后方30~40m的位置产生了底板贯穿型裂隙(图13b、图13c)。

由沙曲一矿2201采空区SF₆时间浓度分布三维图(图13)可知:根据2-3测点和4-3测点首先监测到SF₆气体的时间及此时工作面推进的距离表明煤层间贯穿性裂隙的产生在2号煤层工作面后方40m左右,随后并在其他测点(2-2测点、2-4测点、4-2测点、4-4测点)上也同时监测到SF₆气体,

表明(3+4)号煤层间不仅产生了贯穿型裂隙,而且在其附近也伴随着次生裂隙发育,而此时源于(3+4)号煤层的 SF_6 气体通过贯穿型裂隙运移至 2 号煤层工作面后方 20~60 m 区域。

因此,根据沙曲矿区近距离煤层群叠加开采条件下采动应力演化-裂隙发育-瓦斯运移特征发现,

叠加开采对于覆岩应力场和裂隙场的影响并非简单的效果叠加,而是“1+1>2”的影响效果,因此在下覆煤层在叠加开采下产生了贯穿型的裂隙,且在周围衍生了大量的次生裂隙,及时为煤层瓦斯的运移提供了优势通道。

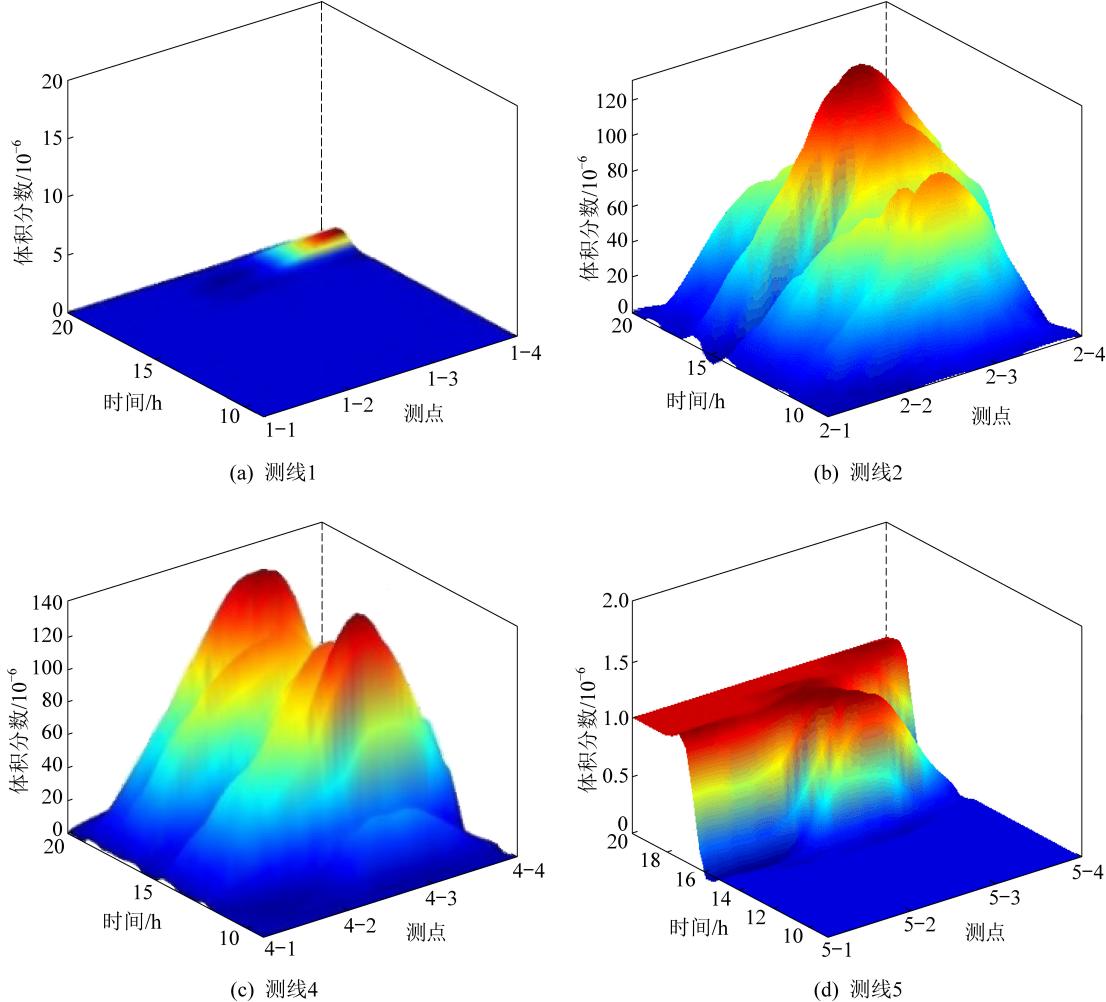


图 13 沙曲一矿 2201 采空区 SF_6 浓度变化梯度三维图

Fig.13 Three dimensional diagram of time concentration gradient of sulfur hexafluoride in No.2201 goaf of Shaqu No.1 Mine

3 沙曲矿区煤层群煤与瓦斯共采技术

为突破传统单一的采煤方法,实现多煤层立体区域煤与瓦斯共采,笔者基于煤-气共采不同阶段的时空条件和消突要求,分区分级优选并集成了近距离煤层群煤与瓦斯共采技术体系,形成了多煤层-区域-局部 3 级精细化煤与瓦斯共采模式,逐级进行多煤层资源同采、区域立体化预抽及局部精准抽采煤层气,最终保障矿井安全生产的同时,极大释放了优质煤炭和煤层气产能。

3.1 近距离煤层群煤与瓦斯共采模式科学内涵

由于不同煤与瓦斯共采技术具有不同的煤层赋存、地质适用性和煤储层物性特征,且受煤与瓦斯资

源开发的时空阶段及其安全生产要求的影响,为准确优选并集成近距离煤层群煤与瓦斯共采技术模式,须先确立煤与瓦斯共采技术的优选原则和方法。

3.1.1 煤-气共采模式优选原则

为优选出与不同阶段的时空和安全生产条件相匹配的煤与煤层气共采技术,须给出煤层气抽采与煤炭开采技术的适用条件(地质条件、煤层赋存及煤储层特征),见表 3。煤层气抽采对地质条件、煤层赋存及煤储层特征均有要求,即当地质构造越少、煤层间距越近、煤层含气量高且透气性较好时,多煤层大范围长时间协同抽采效果就会越好;煤炭开采受煤层赋存及地质条件影响较大,煤层厚度及倾角直接决定了采煤方法,地质构造异常区的采煤方法

及割煤速度均要综合分析确定并进行实时调整。

依据煤与瓦斯共采的时空交替顺序,矿井井田依次划分为规划区、准备区及生产区,三区采煤与采气工作的时空条件和安全生产条件见表4。规划区的煤层气抽采基本不受时空条件限制,时间一般>6年,相对较长,由于该区煤层气抽采的安全目标主要为降低煤层突出危险性,降低的煤层瓦斯含量 W_g 取决于原煤瓦斯含量 W_0 ,并满足 $W_g < \beta \cdot W_0$ (β 为经验系数);准备区的煤-气共采空间主要受控于采掘衔接,时间一般为2~6年,该区主要为区域煤-气共采,煤层瓦斯压力 $P_z < 0.74$ MPa,相应的 $W_z < 8$ m³/t;生产区的空间主要集中于各采区的采掘空间,时间一般为0~2年,为进一步减少多煤层采动应力叠加及高能瓦斯大量涌入采掘空间所造成的瓦斯超限,达到煤-气高效共采,以满足《矿井抽采达标暂行规定》中的可解吸瓦斯量 W_s 及抽采率 η_s 等指标。

表3 煤与瓦斯共采技术适用条件

Table 3 Applicable conditions of “coal and gas simultaneous extraction technology”

项目	地质条件	煤层赋存	煤储层特征
煤层气开采	地质构造较少或呈封闭型状态	近距离煤层群,坚硬中厚煤层、瓦斯含量、瓦斯压力大	透气性好、变质程度高,易解吸
煤炭开采	地质构造分布少,影响较小	近距离煤层群、煤层厚度及倾角	无

表4 资源开采不同阶段的时空条件及安全生产要求

Table 4 Time and space conditions and safety production requirements of different stages of resource exploitation

区域	时空条件	安全生产条件
规划区	空间限制较少, $T > 6$ 年	$W_g < \beta \cdot W_0$
准备区	受控于采掘衔接, $T \in (2, 6)$ 年	$W_z < 8$ m ³ /t, $P_z < 0.74$ MPa
生产区	集中于采区各采面, $T \in (0, 2)$ 年	$W_s < M$ m ³ /t, $H_s < N\%$

注:M、N为常数。

3.2.2 煤气共采模式的建立

根据既定优选原则及井上、下抽采煤层气技术的使用条件,分别得出煤气共采不同阶段的井上下联合防突方法(图14),即规划区采用常规井、防突压裂井与多分支水平井联合抽采煤层气;准备区优先采用保护层开采+定向长钻孔群立体区域化抽采煤层气,可实现被保护层多层协同抽采,或者采用多分支水平井井孔对接抽采+定向长钻孔群立体化抽采;生产区采用大采高沿空留巷以及大孔直径定向

钻孔群煤与煤层气高效共采。

三区煤层气抽采强度逐级递进,经过区域—局部效果检验达标,逐渐实现高突煤层在无危险情况下进行资源安全共采,三区实现高效转化,先采气后采煤,以采气保采煤,以采煤促采气,保障矿井安全生产的同时,极大释放了优质煤、气资源。

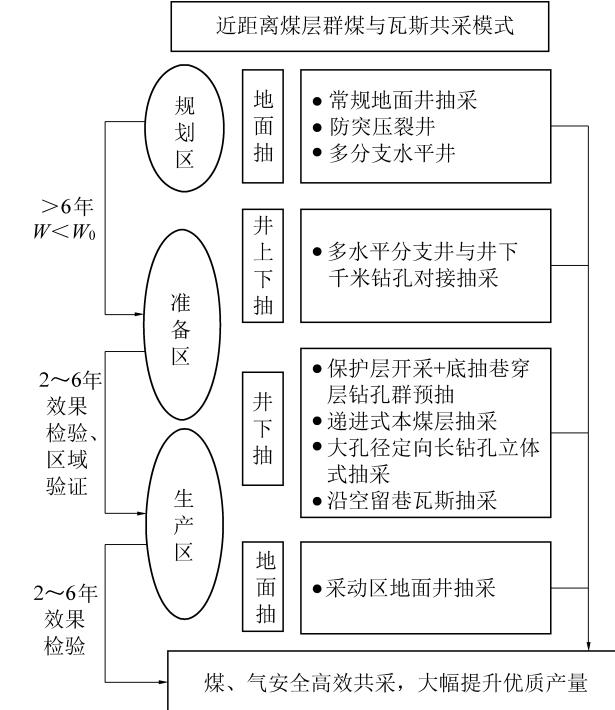


图14 近距离煤层群煤与瓦斯共采模式

Fig.14 Simultaneous extraction mode of coal and gas in close distance coal seam

3.2.3 时空转换机制

1) 煤气共采的时空分布。依据矿井煤炭开采过程的时空接替特征,将矿区井田划分为规划区、准备区和生产区。以煤炭开采和瓦斯抽采工程的时间轴和空间轴为横纵坐标轴,以规划区、准备区和生产区作为点坐标,全面系统分析煤炭开采与瓦斯抽采工程的时空分布及其演化特征,进而得出煤炭开采与瓦斯抽采全过程的时空规律。鉴于煤炭开采与瓦斯抽采工程的多层次性和复杂性,对其进行简化,建立了基于煤炭开采与瓦斯抽采过程直接活动的时空坐标系(图15)。

在规划区,主要采用常规地面钻井预抽瓦斯,其预抽时间较长,为6~10年,降低煤层中游离态和吸附态瓦斯量,为后续的采煤作业奠定基础;在准备区,主要采用以地面钻井抽采为辅,大面积开展井下区域预抽为主的方法治理瓦斯,保障井下巷道开拓,依次形成采区、回采工作面,高突矿井掘进前工作面瓦斯含量与压力等指标必须满足《煤与瓦斯突出防治规定》;在生产区,由于煤层开采卸压作用,大量

瓦斯涌出工作面,主要采用井上下联合抽采方法来治理瓦斯,工作面瓦斯含量与压力等指标需同时满足《抽采达标暂行规定》和《防突规定》。

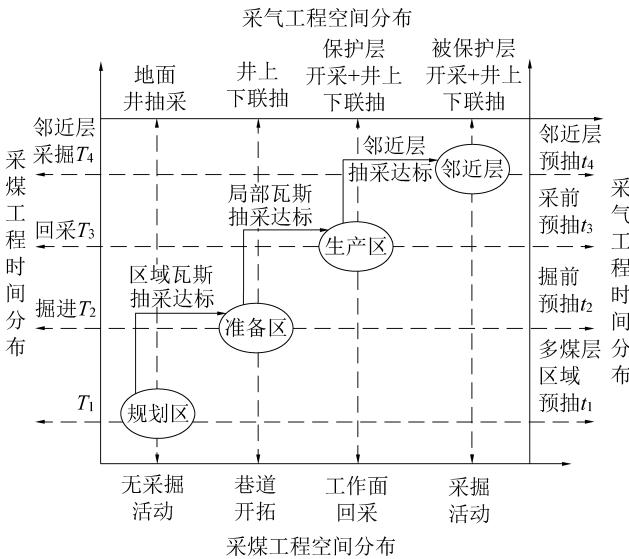


图 15 煤-气共采的时空坐标系

Fig.15 Time space coordinate system of coal and gas simultaneous extraction

2) 煤气共采的时空转换机制。基于采气与采煤工程的时空约束分析,可得采煤与采气工程受约束等级与指标见表 5。采煤工程在“三区”内的时间和空间上均受到严重的制约,同时受到煤矿安全生产容许最高瓦斯含量指标的限制;采气工程在“三区”内的时空限制较小,在不考虑受采动作用影响的

表 5 煤与煤层气共采技术的时空约束特征

Table 5 Time and space constraint characteristics of coal and gas simultaneous extraction technology

抽采方法	规划区约束级别		准备区约束级别		生产区约束级别		临界指标
	时间	空间	时间	空间	时间	空间	
煤层气抽采	一般	一般	一般	一般	一般	一般	瓦斯含量、压力指标;极限瓦斯抽采率
煤炭开采	—	—	受限	受限	严重受限	严重受限	瓦斯含量、压力指标;极限瓦斯抽采率

3.2 近距离煤层群煤与瓦斯共采关键技术

沙曲一矿三区划分如下:规划区为六采区,准备区为四采区、前期五采区,生产区为一、二、三采区(图 17)。在规划区和准备区采用多分水平井+常规地面井联合抽采,其中多分支水平井分支为 3~9 个,形态呈叶脉型和混合型,井身结构为三开,从上至下钻井直径依次为 311.1、215.9、139.7 mm,用于(3+4)号煤层及 5 号煤层预抽。

在规划区采取地面直井超前预抽煤层气;在准备区采用分支水平井与井下千米钻孔对接抽采技术,以保护层开采+被保护层定向穿层钻孔群抽采,煤层气;在生产区采用大孔径定向钻孔群立体式抽

情况下,每种抽采技术工艺均存在着极限抽采率,是制约煤层气抽采效率的重要指标。

煤层气与煤炭高效共采就是采气与采煤的优势互补,消除或降低系统工程的时空约束,采气与采煤的时空协调如图 16 所示。煤层气地面井开发技术在时空协调关系中发挥着重要作用,在采煤工程及井巷工程施工前有效地降低煤层中的瓦斯含量,为巷道作业提供安全环境,节约因瓦斯含量高而增加的施工费用和时间投入,消除矿井的采掘接替压力,有效解决了采煤在空间上受到的制约,即以时间换取空间;同时,在采气工程进入一定阶段后,采气效率会受到严重制约,而此时通过采煤活动能够突破抽采瓶颈,提高采气井或钻孔的采气能力,缩短采气工程时间,即以空间换取时间。

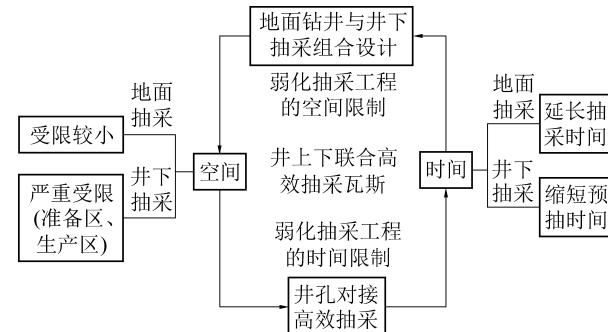


图 16 采煤与采气的时空协调示意

Fig.16 Time space coordination of coal mining and gas production

采以沿空留巷煤与瓦斯共采技术,计划规划区、准备区及生产区的采气时长分别为 8 年左右、5~6 年、0.5~2 年。

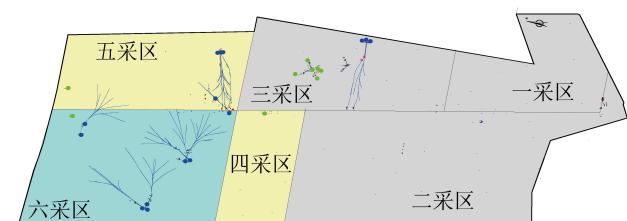


图 17 沙曲一矿三区划分及地面井分布

Fig.17 Division of three areas and distribution of surface wells in Shaqu No.1 Mine

3.2.1 多分支水平井井孔对接关键技术

以沙曲一矿为例,在五采区(3+4)号煤层4501工作面及其下部5号煤层5501工作面分别布置2口井(编号SQN-0501-41、SQN-0501-42)和1口井(SQN-0501-5),其中0501-41为单主支井,0501-42井带有3个分支,分支间距约270 m,长度为280~400 m,2口井主支间距约160 m,分别与井下XC41、XC42采用RMRS定向导航系统对接后接入北翼轨道大巷抽采管路,对4501工作面煤层气抽采。0501-5井有3个分支,长度400~510 m,主支与井下XC51钻孔对接并入北翼轨道大巷抽采干管,用于5501工作面预抽消突(图18)。

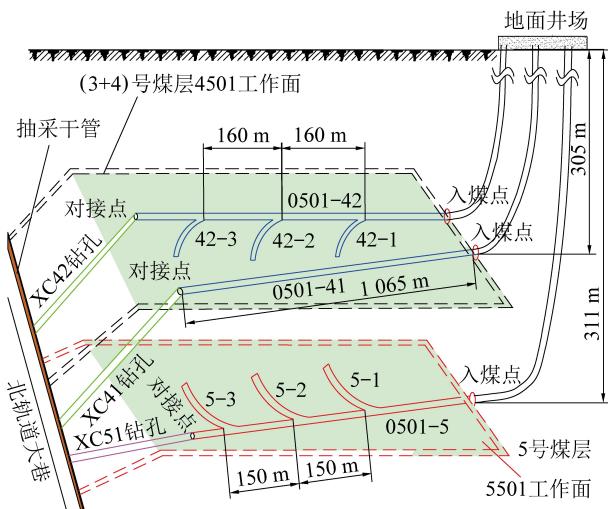


图 18 4501 工作面水平井井孔对接预抽设计

Fig.18 Pre pumping design of horizontal well
hole butt joint in No.4501 working face

统计分析4501工作面多分支水平井井孔对接抽采及井下相同进尺的顺层钻孔抽采数据可知(图19),在抽采前期的10~23 d,水平井处于排采初期瓦斯逐步解吸,日产气量小于顺层钻孔,在中后期多分支水平井产气量显著提升至22 500 m³,抽采浓度在58%以上。

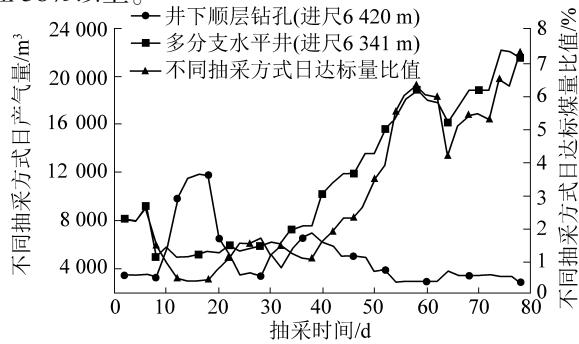


图 19 水平井与井下顺层钻孔抽采量对比

Fig.19 Gas extraction comparison of multi-branch horizontal well and downhole drilling underground

基于2种抽采方式下瓦斯量数据可得相应抽采达标煤量的比值由前期的0.5倍提高至5.4倍,多分支水平井有效抽采范围较大。

3.2.2 保护层开采+底抽巷定向钻孔群共采关键技术

在沙曲一矿二采区为例,2号煤层作为保护层开采2203—2207共计5个工作面(图20),在2205工作面下方5号煤层底板布置2号底抽巷,巷道长度为1 284 m,在巷道南北翼两帮各布置10个钻场(10个定向钻孔),并沿煤层走向施工上向穿层定向钻孔群,孔径113 mm,孔间距20 m,孔深462~558 m,终孔高度位于分别(3+4)、5号煤层,各覆盖这2层上下煤对应的5个工作面,2号煤本煤层采用120 mm大孔径递进式预抽。

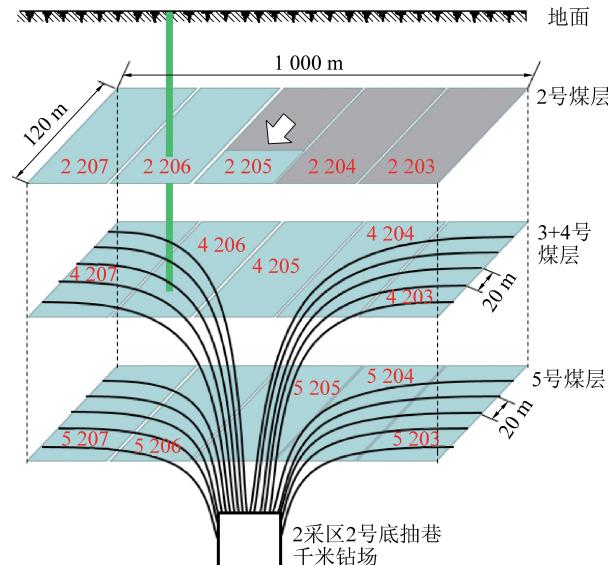


图 20 二采区保护层开采+底抽巷定向钻孔群预抽设计

Fig.20 Design of directional drilling group pre pumping
in protective layer mining + floor extraction roadway

统计分析二采区4203工作面千米钻孔与普通穿层钻孔(图21)抽采纯量可知:千米钻孔的纯量为5.05~10.91 m³/min,约为普通穿层钻孔的2.5倍,且

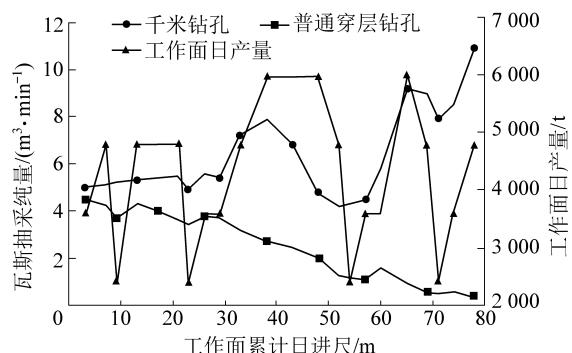


图 21 千米钻场与普通穿层钻场抽采纯量对比

Fig.21 Gas drainage pure volume comparison of
directional drillings and ordinary through layer drillings

随着工作面推进普通钻孔纯量逐渐减低,定向长钻孔抽采量基本大于 $6 \text{ m}^3/\text{min}$,与此同时,工作面日产量由 4 800 t 提升至 6 000 t,增加 25%,煤与煤层气产量均得到明显增加。

3.2.3 大采高沿空留巷煤与瓦斯共采关键技术

为了从根本上解决工作面上隅角瓦斯超限和瓦斯积聚问题,采用了沿空留巷煤与瓦斯共采技术,而由于充填膏体的更新发展,沙曲二矿经历了“砌块-模斗-柔模”的沿空留巷技术沿革历程,逐渐摸索出了合理的柔模支护沿空留巷煤与瓦斯共采技术,以沙曲二矿 4401 工作面为例(图 22),4401 工作面轨道巷沿空留巷隔离墙混凝土强度为 30 N/mm^2 ,并根据充填材料的强度要求将沿空留巷充填墙体宽度定为 2.0 m,采用打眼放炮的方式对开缺口护帮处理,由于留巷宽度 2 m,设计跨度为 4.2 m,因此,将开缺口宽度确定为 2.7 m,并且采用留巷内一梁四柱支护方式实现对留巷内辅助支护。

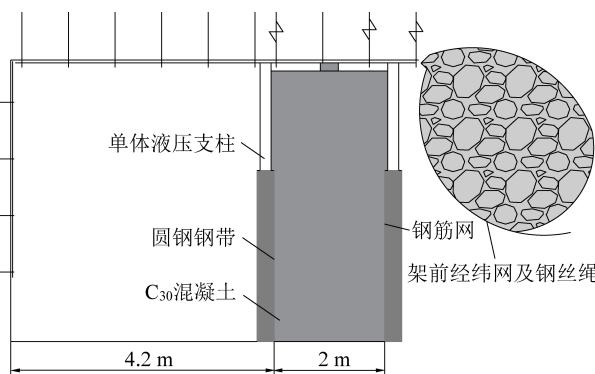


图 22 4401 大采高沿空留巷技术设计

Fig.22 Technical design of retaining roadway along gob in No.4401 large mining height

对比分析沿空留巷与普通工作面瓦斯抽采及日产量情况(图 23)可知,随着 4401 工作面开采,沿空留巷瓦斯抽采量为 $9.44\sim19.01 \text{ m}^3/\text{min}$,平均值为普通工作面的 1.72 倍;由于沿空留巷采用 Y 型通风,上隅角瓦斯体积分数控制在 0.52% 以下,同时可回收 30 m 煤柱资源量,显著提升工作面日产量,其与普通工作面的日产量比值高达 175%,达到 6 600 t/d。

3.2.4 大直径定向钻孔群煤与瓦斯共采关键技术

以沙曲一矿 4503 工作面为例,采用 ZYL-17000D 定向钻机施工,孔径 120 mm,在 4503 轨道巷开设一钻场,以目标方位角为 90° ,沿着 4 号煤顶板向上预计爬升 60 m 到达顶板裂隙带内,平均设计孔深为 620 m,从而实现顶板裂隙带瓦斯抽采;在 4503 轨道巷钻场内,以开孔倾角为 $+3^\circ$,向 4 号煤层施工定向钻孔,钻孔孔径为 120 mm,平均钻孔间距为 14 m,从而实现对本煤层瓦斯区域预抽;由于 4

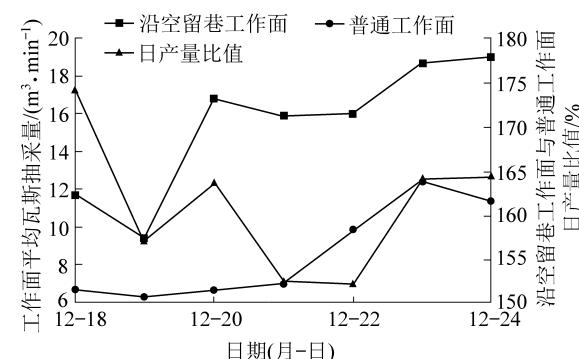


图 23 沿空留巷与普通工作面瓦斯抽采纯量对比

Fig.23 Comparison chart of gas drainage pure volume compared retaining roadway along gob with ordinary working face

号煤层与 5 号煤层平均层间距为 5.56 m,因此,在 4503 轨道巷钻场内,以目标方位角为 78° ,钻孔直径为 120 mm,平均设计孔深为 626 m,沿着 4 号煤底板向预计施工 10 m 可达到 5 号煤内,从而实现对 5 号煤层瓦斯预抽(图 24)。

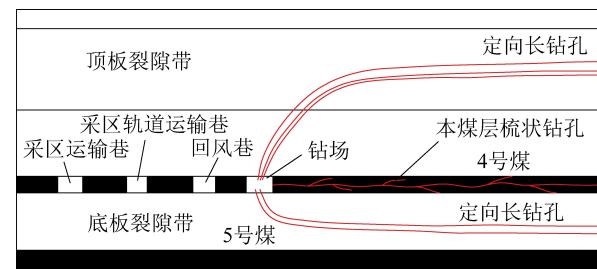


图 24 4503 工作面定向钻孔立体式瓦斯治理设计

Fig.24 Three dimensional gas control design of directional drilling in No.4503 working face

统计分析顺层定向长钻孔与普通顺层钻孔瓦斯抽采量可知,定向长钻孔单孔平均瓦斯抽采量 $0.26 \text{ m}^3/\text{min}$,瓦斯体积分数为 82%,分别为普通顺层钻孔的 3.25 倍和 1.86 倍,大幅减少了顺层钻孔工程量及封孔成本,同时,可实现采掘工作面瓦斯零超限及邻近层达标煤量同步解放,邻近层达标煤量为普通钻孔的 2 倍以上,煤气共采效益明显。

4 沙曲矿区煤与瓦斯共采动态评价技术体系

基于各项煤与瓦斯共采技术具有不同的时空条件、地质适用性和消突效果,通过确立沙曲矿区煤与瓦斯共采技术的优选原则和方法,进而准确优选出了一系列煤与瓦斯共采技术,最后形成了近距离煤层群煤与瓦斯共采技术模式,大幅缓解了矿井抽掘紧张的局面。为对采用共采技术模式后沙曲矿区的煤与瓦斯共采效果及矿井部署合理性进行评价,结合矿井煤与瓦斯共采影响因素与专家组意见,提出了

近距离煤层群煤与瓦斯共采动态评价指标体系。

4.1 近距离煤层群煤与瓦斯共采动态评价指标体系

该指标体系将近距离煤层群煤与瓦斯共采动态合理性因素归纳为地质因素、工艺技术因素和资源采出因素3大指标。在地质因素指标中,资源储量、煤质评价、煤层物性对煤与瓦斯共采动态合理性影响较大;在工艺技术因素中,共采生产规模、共采工艺、共采设备与煤与瓦斯共采动态合理性有密切的关系;而煤炭采出率、瓦斯抽采率从根本上决定了煤与瓦斯是否可行。基于此,笔者提出的近距离煤层群煤与瓦斯共采动态合理性评价指标体系(A_1)由地质因素、工艺技术因素和资源采出因素等构成的二级指标(B_i)及其对应的三级指标(C_i)组成,如图25所示,具体评价标准见表6。

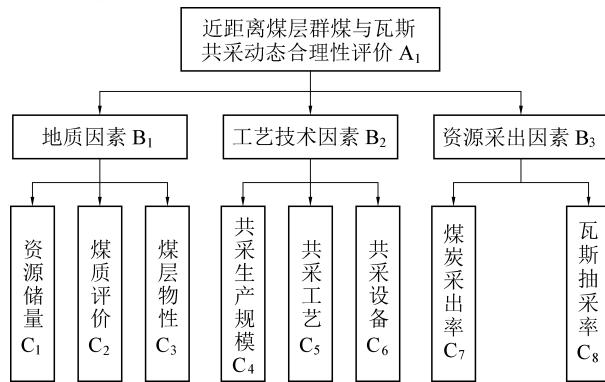


图25 近距离煤层群煤与瓦斯共采动态评价指标体系

Fig.25 Dynamic evaluation index system of coal and gas simultaneous extraction in close distance coal seam

表6 评价标准

Table 6 Evaluation criterion

指标名称	指标评价标准	
	合理 ($C_i = \text{YES}$) = 100%	不合理 ($C_i = \text{YES}$) = 0%
资源储量 (指标 C_1)	瓦斯含量 $\leq 8 \text{ m}^3$	瓦斯含量 $> 8 \text{ m}^3/\text{t}$
煤质评价 (指标 C_2)	镜质组 反射率 ≥ 0.8	镜质组 反射率 < 0.8
煤层物性 (指标 C_3)	透气性系数 $\geq 0.1 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$	透气性系数 $< 0.1 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$
共采生产规模 (指标 C_4)	煤炭年产量 $\geq 120 \text{ 万 t}$	煤炭年产量 $< 120 \text{ 万 t}$
共采工艺 (指标 C_5)	综采作业	非综采作业
共采设备 (指标 C_6)	液压支架 等先进设备	传统支架 等设备
煤炭采出率 (指标 C_7)	$\geq 90\%$	$< 90\%$
瓦斯抽采率 (指标 C_8)	$\geq 70\%$	$< 70\%$

4.2 贝叶斯评价模型的建立

矿井生产条件复杂,不确定因素较多,在近距离煤层群中煤与瓦斯共采作业中面临着许多生产安全、经济等问题,因此有必要对各影响因素进行定量分析,以确定主要影响因素。而贝叶斯网络是将概率论与图论结合起来的定量分析方法,能够较为直观地识别问题的主要因素,具有较为严谨的数学一致性,适用于近距离煤层群中煤与瓦斯共采作业的合理性动态评价与分析。因此,本节依据专家组的评价数据,基于贝叶斯网络理论模型,对现阶段沙曲矿区中煤与瓦斯共采部署合理性进行了评价分析。根据评价指标模型在Netica软件中建立贝叶斯网络模型(在未开始评价之前,将底层指标的合理性概率均设为50%),如图26所示。同时,专家组根据各指标因素的合理性(YES/NO)评价造成上层事件合理的概率 $P(C_i = \text{YES})$,构建贝叶斯网络所需要的条件概率表,见表7。

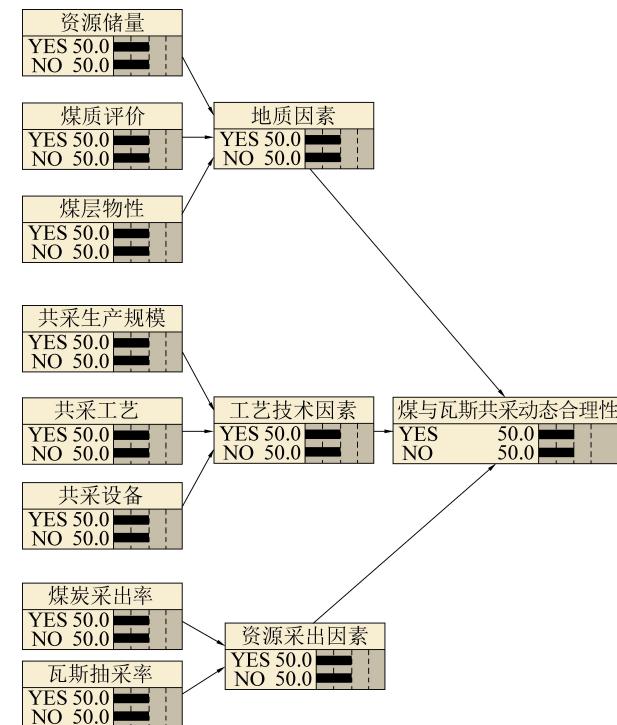


图26 贝叶斯网络评价模型

Fig.26 Bayesian network evaluation model

将表7代入贝叶斯网络评价模型,得到完整的煤与瓦斯共采动态合理性评价模型,如图27所示。

模型构建完成后,可通过更改底层评价指标概率向前推进,得到煤与瓦斯共采动态合理状态的概率,即 $P(A_1 = \text{YES})$ 。评价煤与瓦斯共采动态合理性可依据以下准则:若 $P(A_1 = \text{YES}) < 0.5$,则矿井共采合理性等级为1;若 $P(A_1 = \text{YES})$ 为 0.5~0.7,则矿井共采合理性等级为2;若 $P(A_1 = \text{YES})$ 为 0.7~0.9,则矿井共采合理性等级为3。具体分级情况见表8。

表 7 贝叶斯评价模型条件概率表(CPT)
Table 7 Conditional probability of Bayesian evaluation model

指标 B 概率										指标 C 概率									
B ₁	B ₂	B ₃	YES	NO	C ₁	C ₂	C ₃	YES	NO	C ₄	C ₅	C ₆	YES	NO	C ₇	C ₈	YES	NO	
YES	YES	YES	100	0	YES	YES	YES	100	0	YES	YES	YES	100	0	YES	YES	100	0	
YES	YES	NO	10	90	YES	YES	NO	50	50	YES	YES	NO	35	65	YES	NO	60	40	
YES	NO	YES	50	50	YES	NO	YES	85	15	YES	NO	YES	60	40	NO	YES	40	60	
YES	NO	NO	7	93	YES	NO	NO	20	80	YES	NO	NO	20	80	NO	NO	0	100	
NO	YES	YES	30	70	NO	YES	YES	30	70	NO	YES	YES	45	55	C7	C8	YES	NO	
NO	YES	NO	5	95	NO	YES	NO	10	90	NO	YES	NO	5	95	YES	YES	100	0	
NO	NO	YES	20	80	NO	NO	YES	5	95	NO	NO	YES	25	75	YES	NO	60	40	
NO	NO	NO	0	100	NO	NO	NO	0	100	NO	NO	NO	0	100	NO	YES	40	60	

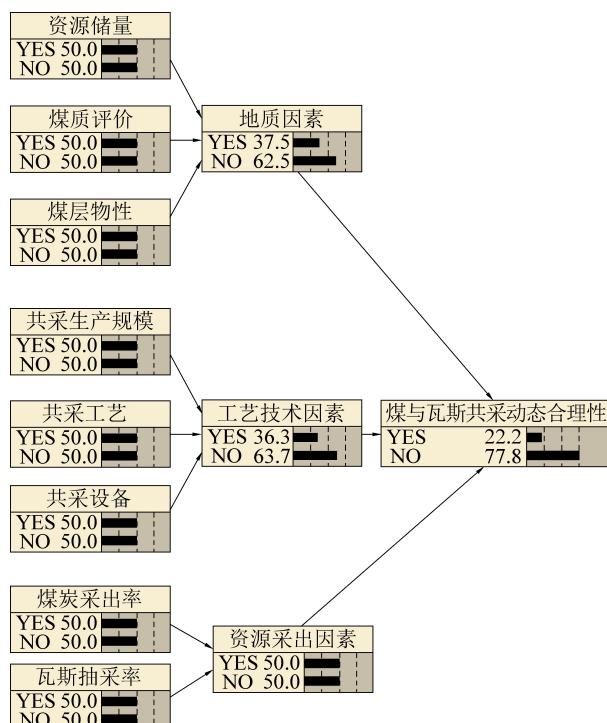


图 27 煤与瓦斯共采动态合理性评价模型

Fig.27 Dynamic rationality evaluation model

of coal and gas simultaneous extraction

表 8 煤与瓦斯共采动态合理性评价表

Table 8 Dynamic rationality evaluation form
of coal and gas simultaneous extraction

P(A ₁) = YES	合理性等级	等级描述
<0.5	1	不合理
≥0.5~0.7	2	较为合理
≥0.7~0.9	3	完全合理

4.3 共采效果评价

以沙曲一矿为例,利用4.2节建立的贝叶斯网络评价模型对2019年沙曲一矿煤与瓦斯共采合理性进行分析评价,沙曲一矿基本指标信息见表9。

表 9 沙曲一矿具体评价指标

Table 9 Specific evaluation indexes of Shaqu No.1 Mine

指标	沙曲一矿对应指标信息
资源储量(指标 C ₁)	瓦斯含量<8 m ³ /t; $P(C_1 = \text{YES}) = 100\%$
煤质评价(指标 C ₂)	焦煤为主,镜质组反射率约为1.2; $P(C_2 = \text{YES}) = 100\%$
煤层物性(指标 C ₃)	透气性系数<0.1 m ² /(MPa ² ·d); $P(C_3 = \text{YES}) = 0\%$
共采生产规模(指标 C ₄)	煤炭年产量为500万t; $P(C_4 = \text{YES}) = 100\%$
共采工艺(指标 C ₅)	大采高综采一次采全高; $P(C_5 = \text{YES}) = 100\%$
共采设备(指标 C ₆)	均采用先进设备; $P(C_6 = \text{YES}) = 100\%$
煤炭采出率(指标 C ₇)	煤炭采出率为93%; $P(C_7 = \text{YES}) = 100\%$
瓦斯抽采率(指标 C ₈)	瓦斯抽采率为74%; $P(C_8 = \text{YES}) = 100\%$

根据以上数据,对沙曲一矿进行煤与瓦斯共采动态合理性评价。将底层指标信息输入贝叶斯网络评价模型中,然后向前推进,结果如图28所示。

由贝叶斯网络模拟结果可知,沙曲一矿现阶段煤与瓦斯共采动态合理性概率为0.65,即 $P(A_1 = \text{YES}) = 65\%$,对应煤与瓦斯共采动态合理性评价表(表9)可知,该矿的煤与瓦斯共采合理性等级为2,即较为合理,其结果与实际情况较为相符。随着开采作业的持续进行,底层指标的合理性概率(C₁~C₈)可能会发生变化,因此,每年依据贝叶斯评价模型与评价指标进行煤与瓦斯共采合理性评价,就能实现对该矿井的煤与瓦斯共采动态合理性评价。

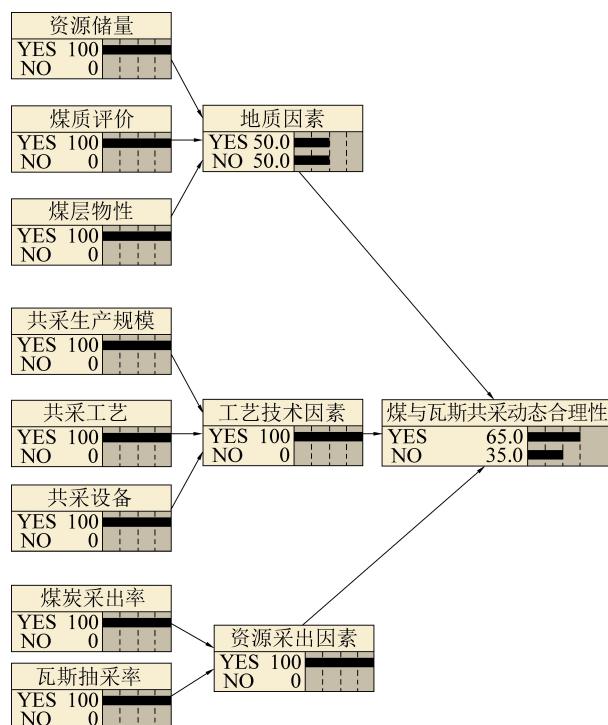


图 28 沙曲一矿煤与瓦斯共采动态合理性评价

Fig.28 Dynamic rationality evaluation of coal and gas simultaneous extraction in Shaqu No.1 Mine

5 结论与展望

5.1 结论

1) 基于煤样循环加卸载试验,确定了加卸载响应比 Y_E 与损伤量 D 之间的关系, $D = 1 - \frac{1-Y_E}{e^{M_w Y_E}}$, 且在加载阶段煤样产生了损伤累积,加卸载响应比逐渐增大,当煤样达到一定应力水平之后,加载阶段弹性模量进一步降低,加卸载响应比出现突增,预示煤样即将发生破坏。

2) 沙曲矿区煤层的孔裂隙结构特征不利于瓦斯运移,当叠加开采时对下覆岩应力场和裂隙场的影响并非简单的一次开采效果的叠加,而是“1+1>2”的影响效果,且下伏煤层在叠加开采下产生了贯穿型的裂隙,并在其周围衍生了大量的次生裂隙,及时为煤层瓦斯的运移提供了优势通道。

3) 确立了近距离煤层群煤与瓦斯共采的时空转换、安全生产及资源赋存等优选原则,构建了相应共采技术体系,即在准备区采用多分支水平井井孔对接、保护层开采+底抽巷定向钻孔群共采技术,在生产区采用大采高沿空留巷、大直径定向钻孔群共采技术。

4) 提出了近距离煤层群煤与瓦斯共采动态评价指标体系,并建立了贝叶斯评价煤与瓦斯共采评价模型,对沙曲矿采用各项煤与瓦斯共采技术后共

采效果及矿井部署合理性进行了评价,即沙曲一矿煤与瓦斯共采动态合理性概率为 0.65,且煤与瓦斯共采合理性等级较为合理。

5.2 展望

瓦斯作为近距离煤层群煤与瓦斯共采理论的一项重要内容,目前对煤层瓦斯的认识多数集中在煤体多孔介质渗流属性及瓦斯本身运移的基本特征,而未考虑采动影响下特别是近距离煤层群叠加开采时导致煤体内部结构发生改变及采动应力与裂隙发育耦合下煤层瓦斯渗透特征,故无法正确描述叠加开采下煤层渗透特性;充填沿空留巷煤与瓦斯共采技术,虽实现了无煤柱开采,但充填材料本身的性质对邻近工作面煤体上方应力集中,可能诱发沿空留巷的动压显现,对下组煤开采造成严重影响。

因此,为切实解决近距离煤层群叠加开采时采动应力与裂隙发育耦合下煤层瓦斯渗透机理不清的难题,应开展不同开采方式或重复开采下煤体渗透率演化特征的研究;基于“切顶卸压理论”,切实解决沿空留巷充填体对于下组煤层开采的影响,应不断完善无煤柱无巷道的新型煤与瓦斯共采开采技术。为响应我国煤矿绿色开采理念,未来的煤矿开采技术应以科技发展为依托,将科研基础研究与科技攻关相结合,进而研发出智能化无人开采装备,如智能掘进、智能采煤、智能支护、抽采机器人,同时也将云数据、人工智能及互联网技术融入智能化煤矿开采中,以期形成认知、分析、预测及参与重大决策的智能化系统,形成井下无人开采新局面。

参考文献(References):

- [1] 程志恒,齐庆新,李宏艳,等.近距离煤层群叠加开采采动应力-裂隙动态演化特征实验研究[J].煤炭学报,2016,41(2):367-375.
CHENG Zhiheng, QI Qingxin, LI Hongyan, et al. Evolution of the superimposed mining induced stress-fissure field under extracting of close distance coal seam group [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 367-375.
- [2] 程志恒,苏士龙,汪昕.近距离煤层采动裂隙场 BBM-DEM 模拟研究[J].煤炭科学技术,2019,47(12):1-9.
CHENG Zhiheng, SU Shilong, WANG Xin. Study on mining-induced fracture field of contiguous coal seam with BBM-DEM simulation [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47 (12): 1-9.
- [3] 齐庆新,程志恒,张浪,等.近距离突出危险煤层群上保护层开采可行性分析[J].煤炭科学技术,2015,43(4):43-47,52.
QI Qingxin, CHENG Zhiheng, ZHANG Lang, et al. Analysis on feasibility of upper protective layers mining in contiguous seams with coal and gas outburst hazard [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(4): 43-47, 52.
- [4] 马海峰,程志恒,刘伟.近距离煤层群叠加开采采动应力与

- 覆岩位移场演化特征[J].中国安全生产科学技术,2017,13(5):28-33.
- MA Haifeng, CHENG Zhiheng, LIU Wei. Evolution characteristics of mining stress and overlying strata displacement field under superimposed mining in close distance coal seam group[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(5):28-33.
- [5] LI Jiazhuo, JIAO Zhenhua, ZHANG Ming *et al.* Dynamic evolution characteristics and mechanism of surrounding rock fractures during the repeated mining of closed distance deep coal seam[J]. Revista International DE Contamination Ambiental, 2019, 1(35):165-176.
- [6] NING Jianguo, WANG Jun, TAN Yunliang, *et al.* Mechanical mechanism of overlying strata breaking and development of fractured zone during close-distance coal seam group mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 2(30):207-215.
- [7] 许家林,钱鸣高.岩层采动裂隙分布在绿色开采中的应用[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):141-144.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Study and application of mining-induced fracture distribution in green mining[J]. Journal of China University of Mining& Technology, 2004, 33(2):141-144.
- [8] 钱鸣高,许家林,缪协兴.煤矿绿色开采技术[J].中国矿业大学学报,2003,32(1):343-347.
- QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiebing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(1):343-347.
- [9] 薛东杰,周宏伟,唐咸力,等.采动煤岩体瓦斯渗透率分布规律与演化过程[J].煤炭学报,2013,38(6):930-935.
- XUE Dongjie, ZHOU Hongwei, TANG Xianli, *et al.* Evolution of mining-induced enhancement and distribution of gas permeability in coal seam and surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6):930-935.
- [10] 薛东杰,周宏伟,赵天,等.基于体积估算岩石断面分维的算法研究[J].岩土工程学报,2012,34(7):1256-1261.
- XUE Dongjie, ZHOU Hongwei, ZHAO Tian, *et al.* Algorithm of fractal dimension of rock fracture surface based on volume estimation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7):1256-1261.
- [11] ZHOU Hongwei, LIU Jinfeng, XUE Dongjie, *et al.* Numerical simulation of gas flow process in mining induced crack network[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(6):793-799.
- [12] 程远平,周德永,俞启香,等.保护层卸压瓦斯抽采及涌出规律研究[J].采矿与安全工程学报,2006,23(1):12-18.
- CHENG Yuanping, ZHOU Deyong, YU Qixiang, *et al.* Research on extraction and emission laws of gas for pressure-relief in protecting coal seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1):12-18.
- [13] 俞启香,程远平,蒋承林,等.高瓦斯特厚煤层煤与卸压瓦斯共采原理及实践[J].中国矿业大学学报,2003,32(2):128-131.
- [14] YU Qixiang, CHENG Yuanping, JIANG Chenglin, *et al.* Principles and applications of exploitation of coal and pressure relief gas in thick and high-gas seams[J]. Journal of China University of Mining& Technology, 2003, 32(2):128-131.
- [15] 程远平,俞启香,袁亮.上覆远程卸压岩体移动特性与瓦斯抽采技术[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2003,22(4):483-486.
- CHENG Yuanping, YU Qixiang, YUAN Liang. Gas extraction techniques and movement properties of long distance and pressure relief rock mass upon exploited coal seam[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(4):483-486.
- [16] 袁亮.低透气性高瓦斯煤层群无煤柱快速留巷Y型通风煤与瓦斯共采关键技术[J].中国煤炭,2008,34(6):9-13.
- YUAN Liang. Key technology for simultaneous extraction of coal gas in low permeable high gas content coal seam cluster under pillarless gob-side entry retained with Y type ventilation[J]. China Coal, 2008, 34(6):9-13.
- [17] 袁亮,郭华,沈宝堂,等.低透气性煤层群煤与瓦斯共采中的高位环形裂隙体[J].煤炭学报,2011,36(3):357-365.
- YUAN Liang, GUO Hua, SHEN Baotang, *et al.* Circular overlying zone at longwall panel for efficient methane capture of multiple coal seams with low permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3):357-365.
- [18] 方新秋,耿耀强,王明.高瓦斯煤层千米定向钻孔煤与瓦斯共采机理[J].中国矿业大学学报,2012(6):26-33.
- FANG Xinqiu, GENG Yaoqiang, WANG Ming. Kilometer directional drilling: Simultaneous extraction of coal and gas from a high gas coal seam[J]. Journal of China University of Mining& Technology, 2012(6):26-33.
- [19] LI Junqian, LIU Dameng, YAO Yanbin, *et al.* Geological controls of the coalbed methane (CBM) enrichment in the Zhengzhuang Coal Zone, Southern Qinshui Basin, China [J]. Advanced Materials Research, 2013, 616-618:234-239.
- [20] 陈亮,樊少武,李海涛,等.煤体孔隙结构特征及其对含气性的影响[J].煤炭科学技术,2017,45(11):126-132.
- CHEN Liang, FAN Shaowu, LI Haitao, *et al.* Pore structure characteristics of coal and its influences to gas bearing[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11):126-132.
- [21] 张浪平,李志雄,尹祥础,等.介质非均匀性对加卸载响应比峰值异常特征时间影响的数值研究[J].工程力学,2011,28(9):44-50,58.
- ZHANG Langping, LI Zhixiong, YIN Xiangchu, *et al.* Numerical simulation research on the influence of material heterogeneity on characteristic time of load/unload response ratio's peak abnormality[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9):44-50,58.
- [22] 张浪平,尹祥础,梁乃刚.加卸载响应比与损伤变量关系研究[J].岩石力学与工程学报,2008(9):1874-1881.
- ZHANG Langping, YIN Xiangchu, LIANG Naigang. Study on relation between load/unload response ratio and damage variable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(9):1874-1881.
- [23] 王振伟,马克,田洪圆,等.煤岩体应力波传播规律及其影响因素的数值分析[J].煤炭科学技术,2019,47(6):66-72.
- WANG Zhenwei, MA Ke, TIAN Hongyuan, *et al.* Numerical analysis on time delay law and its influence factors of stress wave propagation through cracks[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6):66-72.