

基于时空属性的黄陵矿区瓦斯精准化预抽实践

唐恩贤,党利鹏,闫国锋

(陕西陕煤黄陵矿业有限公司,陕西 延安 727307)

摘要:为了实现黄陵矿区井下瓦斯精准化预抽,在综合分析煤矿瓦斯含量分布规律、有效抽采半径与抽采时间关系、以及“采-掘-抽”衔接关系基础上,从时空的角度提出了一种预抽钻孔进行分区段布置的煤矿井下瓦斯精准化预抽方法,并在黄陵矿区二号矿 207 综采工作面进行了现场验证试验。试验结果表明,该方法提出的钻孔分区布置方案可有效解决瓦斯抽采空白带和抽采达标问题,且明显优于统一钻孔间距 6 m 和 12 m 两种方案,较 2 种方案可分别节约预抽时间 36、146 d,有效缓解“采-掘-抽”工程衔接不平衡,经济效益显著,实现了煤矿井下瓦斯的精准化预抽。

关键词:抽采达标;分区布置;抽采半径;瓦斯精准化预抽

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)08-0087-06

Practices on precision gas pre-drainage based on time-space attribute in Huangling Mining Area

TANG Enxian, DANG Lipeng, YAN Guofeng

(Shaanxi Coal Huangling Mining Company Limited, Yan'an 727307, China)

Abstract: In order to realize a precision gas pre-drainage in Huangling Mining Area, based on the comprehensive analysis on the coal mine gas content distribution law, the relationship between the effective gas drainage radius and the gas drainage time as well as the “mining-excavation-drainage” connection relationship, from a view of the time and space, a pre-gas drainage borehole was provided to the precision gas pre-drainage method in a underground coal mine with sectional layout. A site demonstration test was conducted on No. 207 fully-mechanized coal mining face in No. 2 Mine of Huangling Mining Area. The test results showed that the borehole sectional layout plan of the method provided could effectively solve the blank zone of the gas drainage and the gas drainage to reach the target. This sectional layout plan was obviously better than two plans with the general borehole spacing of 6 m and 12 m individually. In comparison with the two plans, the sectional layout plan could individually save the gas pre-drainage time of 36 days and 146 days and could effectively release the connection unbalanced of the “mining-excavation-drainage”. The economic benefits of the sectional layout plan was obvious and the precision gas pre-drainage in the underground mine was realized.

Key words: gas drainage to reach target; divisional layout; drainage radius; precision gas pre-drainage

0 引 言

黄陵矿区是国家“八五”期间重点建设项目,属于煤油气共生矿区。煤田勘查钻孔揭露区内含油气钻孔近 150 个,其中,5 个钻孔出现天然气喷出或逸出。随着矿井开采活动的进行,矿井瓦斯涌出量

逐年增大,同时,出现了围岩瓦斯异常涌出,其中底板瓦斯异常涌出尤为严重,且具有突发性、隐蔽性(异常涌出前无明显征兆)和涌出量大等特点,严重影响了矿井安全高效开采。黄陵矿区二号矿位于黄陵矿区西北部,主采二号煤层,位于延安组第 1 段的中上部,层位稳定,全区分布。二号矿煤层厚度

收稿日期:2018-04-25;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.08.014

基金项目:陕西省科技统筹创新工程资助项目(2011KTZB01-02-01)

作者简介:唐恩贤(1962—),男,陕西蓝田人,教授级高级工程师,现任陕西陕煤黄陵矿业有限公司副总经理、总工程师。E-mail: tfe421@163.com

引用格式:唐恩贤,党利鹏,闫国锋. 基于时空属性的黄陵矿区瓦斯精准化预抽实践[J]. 煤炭科学技术,2018,46(8):87-92.

SHU Longyong, HUO Zhonggang, ZHANG Lang, et al. Practices on precision gas pre-drainage based on time-space attribute in Huangling Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(8): 87-92.

0.05~6.75 m,平均3.91 m,全井田大部可采。井田面积为375.6 km²,矿井生产能力为8.0 Mt/a,井田西北部受煤层埋藏深度、顶底板含气层、地质构造等因素影响,瓦斯含量分布呈现出明显的非均匀性,瓦斯含量0.61~6.94 m³/t,瓦斯含量由东向西逐渐升高,属高瓦斯矿井。预抽煤层瓦斯是防治煤与瓦斯突出,减少采场瓦斯涌出量的主要措施之一^[1-3],然而在本煤层钻孔进行瓦斯抽采过程中,由于不同区域的煤层瓦斯含量、瓦斯压力、吸附解吸、煤层埋深、导致瓦斯运移规律及衰减特征不一样^[4-8]。现场瓦斯抽采钻孔设计缺乏充分的科学依据,往往凭借经验,导致抽采设计不科学、不合理,存在设计不足或设计浪费现象^[9-10]。因此,如何做好钻孔布置工作,协调好抽采方式、钻孔布置密度、抽采时间等因素与抽采效果之间关系,实现煤矿井下瓦斯的精准化预抽对缓解“采-掘-抽”衔接平衡,保障矿井的高产高效生产具有重要意义。笔者以黄陵矿区二号矿207综采工作面为研究对象,从时空角度开展了煤矿井下瓦斯精准化预抽实践研究,以期为实现黄陵矿区井下瓦斯精准化预抽提供科学依据。

1 精准化预抽步骤及方法

煤矿井下瓦斯精准抽采方法是综合考虑时间和空间的属性,以煤矿瓦斯地质、现场瓦斯含量测定数据为依据,在准确获得煤矿瓦斯抽采半径曲线基础上,研究预抽时间与钻孔间距的关系,同时结合矿井抽采掘衔接关系,从时空的角度对抽采钻孔布置参数进行优化,最终形成的一套基于时空属性的煤矿井下预抽钻孔布置的井下瓦斯精准化预抽方法,研究思路如图1所示。具体步骤如下:

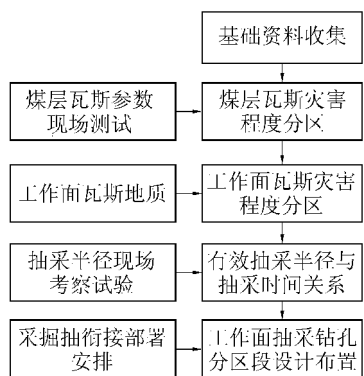


图1 煤矿井下瓦斯精准化预抽方法

Fig.1 Precise pre-pumping method of coal mine gas

1) 收集矿井基础资料,主要包括矿井瓦斯含

量、瓦斯压力、矿井瓦斯地质、采-掘-抽衔接部署等。

2) 开展工作面不同地点煤层瓦斯参数(瓦斯含量、瓦斯压力)现场测定,同时对比矿井瓦斯地质图,获得煤层瓦斯参数分布规律。

3) 开展矿井抽采半径现场考察试验,获得有效抽采半径与抽采时间的数学关系,为工作面钻孔布置优化提供基础。

4) 结合矿井的“采-掘-抽”衔接部署、有效抽采半径与抽采时间关系曲线以及工作面瓦斯地质图,提出工作面抽采钻孔的区段布置方案以及不同区段的钻孔设置间距。

2 煤矿井下瓦斯精准化预抽实践

为了验证瓦斯精准抽采方法可行性,笔者在黄陵矿区二号矿207综采工作面开展现场验证试验。

2.1 试验工作面概况

黄陵矿区二号矿207工作面煤层厚度2.5~3.6 m,平均厚度3.3 m。工作面内煤层倾角0°~3°,平均倾角1°。煤层瓦斯含量为0.83~6.54 m³/t。瓦斯吸附常数 a 为18.277~22.209 m³/t,吸附常数 b 为0.395~0.504 MPa⁻¹。煤层孔隙率为7.75%。二号煤层原始瓦斯压力为0.163~1.608 MPa。瓦斯放散初速度 ΔP 为18。煤的普氏系数 f 为0.85~0.94。207综采工作面进走向长度4 900 m,倾斜宽度279 m。工作面可采长度4 366 m。207工作面自2014年10月开始施工,至2016年6月施工完毕形成工作面,2016年7月开始在巷道煤壁实施顺煤层抽采钻孔,对煤层进行预抽作业。

2.2 煤层瓦斯参数分析

207工作面煤层底板标高+730—+770 m,标高变化不大,区域无明显地质构造,但煤层瓦斯含量变化较大,分析其可能原因如下:207运输巷2 573 m至工作面开切眼,回风巷3 247 m至工作面开切眼为顶板瓦斯富集区;运输巷1 686~2 954 m,回风巷1 763~2 600 m为底板瓦斯富集区,工作面瓦斯分布如图2所示。笔者在黄陵矿区二号矿瓦斯地质图基础上开展了207综采工作面瓦斯参数现场测试试验,测点布置方案如图3所示,测试结果如图4所示。分析测试结果及瓦斯地质可知,207综采工作面回采区域内无明显地质构造,瓦斯含量沿工作面走向呈明显的增大趋势,但呈现出明显的阶段变化趋势。笔者根据煤层瓦斯参数分布变化规律将工作

面划分为3个区域,具体描述如下:



图2 207工作面瓦斯分布

Fig.2 Gas distribution of No.207 working face

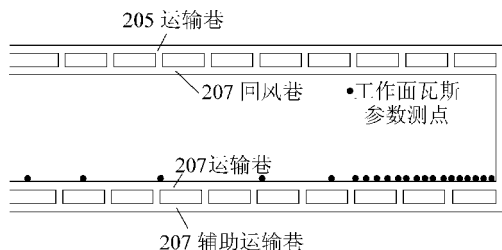


图3 207工作面瓦斯参数测点布置示意

Fig.3 Measuring points distribution of gas parameters at No.207 working face

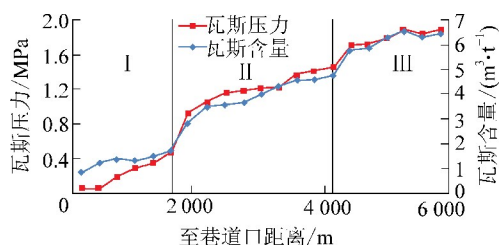


图4 煤层瓦斯参数分布变化规律

Fig.4 Distribution rules of gas parameters in coal seam

1)第Ⅰ区域为工作面巷道口至3 400 m范围,区段长度3 400 m。该区域为工作面的低等瓦斯区域,瓦斯含量 $0.83 \sim 1.72 \text{ m}^3/\text{t}$,平均瓦斯含量 $0.80 \text{ m}^3/\text{t}$;瓦斯压力 $0.04 \sim 0.46 \text{ MPa}$,平均瓦斯压力 0.23 MPa 。

2)第Ⅱ区域为距工作面巷道口3 400 m至4 400 m,区段长度1 000 m。该区域为工作面的中等瓦斯区域,瓦斯含量 $1.72 \sim 5.78 \text{ m}^3/\text{t}$,平均瓦斯含量 $3.86 \text{ m}^3/\text{t}$;瓦斯压力 $0.46 \sim 1.71 \text{ MPa}$,平均瓦斯压力 1.20 MPa 。

3)第Ⅲ区域为距工作面巷道口4 400 m至4 900 m(工作面开切眼处),区段长度500 m。该区域为工作面的高瓦斯区域,瓦斯含量 $5.78 \sim 6.54 \text{ m}^3/\text{t}$,平均瓦斯含量 $6.21 \text{ m}^3/\text{t}$;瓦斯压力 $1.71 \sim 1.89 \text{ MPa}$,平均瓦斯压力 1.80 MPa 。

2.3 有效抽采半径与抽采时间关系

有效抽采半径是煤层预抽钻孔布置方法选择的基础,主要采用数值模拟、现场测试方法获得^[11-15],它是一个随抽采时间变化而变化的空间函数,因此煤层预抽钻孔间距设计需要根据一定的预抽时间确定相应的有效抽采半径^[13]。由于207工作面底板标高+730—+770 m,205工作面底板标高+720—+760 m,二者标高近似,地质环境影响较小,因此笔者拟在相邻的205工作面开展预抽钻孔有效抽采半径现场考察试验。根据瓦斯含量分布规律,试验地点在靠近开切眼附近运输巷(瓦斯含量区域最高点),试验方法采用压降指标法。现场测试设计观测钻孔最小间距1 m,最大间距6 m,共计钻孔6个,钻孔深度140 m,孔径94 mm,钻孔布置方式如图5所示。试验钻孔封孔采用“两堵一注”注浆封孔工艺,封孔深度12 m。

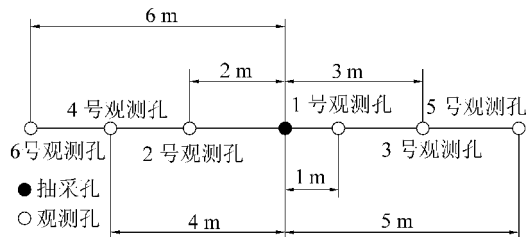


图5 有效抽采半径考察钻孔布置

Fig.5 Drilling arrangement of testing the effective extraction radius

205运输巷有效抽采半径现场考察结果如图6所示,由图6可以看出,有效抽采半径随抽采时间的增加而增大,当抽采时间8、46、101 d时,有效抽采半径分别为1、4、6 m,但增加速率逐渐减缓,最终趋于某一恒定值。

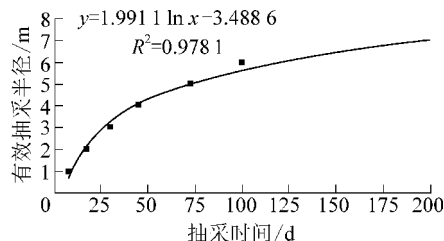


图6 有效抽采半径与抽采时间拟合关系

Fig.6 The fitting relationship of effective extraction radius and extraction time

有效抽采半径随抽采时间的增大呈指数函数增加,符合以下数学关系一般表达式:

$$R_e = A \ln x - B \quad (1)$$

式中: R_e 为有效抽采半径,m; x 为抽采时间,d; A 、 B 为拟合参数。

为了消除矿井瓦斯抽采空白带,合理钻孔布置

间距 L 与有效抽采半径 R_c 关系可表示为

$$L = \sqrt{2} R_c \quad (2)$$

根据《陕西陕煤黄陵矿业有限公司技术管理规定》可知,工作面开切眼处最近钻孔最短预抽不得小于6个月,根据式(1)和式(2)可得到有效抽采半径为6.85 m,钻孔布置间距为9.8 m。但目前煤矿井下的最短预抽时间均在7个月以上,有效抽采半径为7.5 m。综上所述,结合黄陵矿区二号矿“采-掘-抽”衔接部署情况、及工作面瓦斯分布的不均匀性特征,最终确定该矿井综采工作面的预抽钻孔最大布置间距应不超过12 m。

2.4 工作面钻孔量化分区段布置

根据207综采工作面瓦斯含量参数分布特点,拟将工作面回采巷划分为3个区段,区段划分与瓦斯参数划分区域相一致,同时结合黄陵矿区二号矿205工作面运输巷有效抽采半径现场考察结果以及矿井的工程衔接部署(离开切眼最近钻孔预抽时间不低于6个月),提出以下工作面钻孔分区段布置方式如下:

1) A区段为工作面巷道口至3 400 m范围,区段长度3 400 m,瓦斯含量0.83~1.72 m³/t,瓦斯含量低。该区段采用单排钻孔布置方式,钻孔行间距12 m。

2) B区段为距工作面巷道口3 400—4 400 m,区段长度1 000 m,瓦斯含量1.72~5.78 m³/t,瓦斯含量中等。该区段采用单排钻孔布置方式,钻孔行间距6 m。

3) C区段为距工作面巷道口4 400—4 900 m(工作面开切眼),区段长度500 m,瓦斯含量5.78~6.54 m³/t,瓦斯含量高。该区段采用双排钻孔布置方式,钻孔布置排间距1 m,钻孔行间距6 m。

试验预抽钻孔孔深140 m,孔径94 mm,钻孔封孔采用“两堵一注”注浆封孔工艺,封孔深度12 m,抽采负压不小于13 kPa。

3 抽采效果考察

根据207综采工作面现场钻孔实际施工情况可知,该工作面运输巷和回风巷均于2016年7月开始施工顺煤层钻孔,每条巷道3台钻机共同施工,一天合计施工钻孔12个,双巷钻孔施工完成104 d。根据矿井的“采-掘-抽”工程衔接部署可知,当离开切眼最近钻孔预抽6个月,对煤层瓦斯预抽效果开展现场考察分析。

3.1 抽采达标评判准则

根据《煤矿瓦斯抽采基本指标》和《陕西陕煤黄陵矿业有限公司技术管理规定》可知,黄陵矿区二号矿207综采工作面预抽达标应同时满足以下准则:

1) 瓦斯预抽率 $\eta \geq 40\%$ 。

2) 煤层残余瓦斯压力 $P_{cc} < 0.74$ MPa,检验钻孔施工过程中无喷孔、顶钻等其他异常现象。煤层残余瓦斯含量 $W_{cc} < 8$ m³/t。

3) 207综采工作面预计日产煤量13 000 t/d,煤层可解吸瓦斯量 ≤ 3.0 m³/t。

4) 207综采工作面顶底板存在油气区域富集特征,预计工作面瓦斯涌出量20~40 m³/min,采煤工作面瓦斯抽采率 $\eta_1 \geq 75\%$ 。

5) 工作面风排瓦斯量不超过4 m³/min,回风流瓦斯体积分不得数不得超过0.5%。

6) 矿井绝对瓦斯涌出量84.08 m³/min,则矿井瓦斯抽采率 $\eta_2 \geq 65\%$ 。

3.2 抽采效果检验

1) 根据采-掘-抽工程衔接部署分析,207综采工作面钻孔最长预抽时间为284 d,最短预抽时间为180 d,现场测试瓦斯含量结果及分析见表1。

表1 不同位置的煤层瓦斯含量对比分析

Table 1 Comparative analysis of gas content of coal seam in different positions

序号	取样地点	瓦斯含量/(m ³ ·t ⁻¹)		抽采率/%	所属区段
		原始	残余		
1	距巷道口2 600 m	1.35	0.73	45.52	A
2	距巷道口3 200 m	1.48	0.83	46.79	A
3	距巷道口3 900 m	3.97	1.72	50.72	B
4	距巷道口4 400 m	5.78	2.57	53.61	B
5	距巷道口4 800 m	6.32	2.98	52.32	C
6	距巷道口4 900 m	6.42	2.86	46.94	C

根据表1分析可知,预抽煤层瓦斯抽采率为45.52%~53.61%,平均瓦斯抽采率49.32%,大于瓦斯预抽率临界值40%,符合抽采达标准则1)的要求。

2) 根据表1现场测试结果可知,207综采工作面检验钻孔残余瓦斯含量为0.73~2.98 m³/t,远低于8 m³/t;同时结合煤层等温吸附常数、水分、温度等参数,利用朗格缪尔方程获得工作面残余瓦斯压力为0.04~0.60 MPa,低于0.74 MPa,符合抽采达标准则2)和3)的要求。

3) 根据相邻205工作面回采期间瓦斯涌出情

况,预计207工作面回采期间的风排瓦斯量为4.7 m³/min,瓦斯抽采量为20 m³/min,初步估算工作面瓦斯抽采率为81%,符合抽采达标准则4)的要求。

4)207综采工作面风速为2.12 m/s,甲烷体积分数为0.21%,符合抽采达标准则5)要求。

5)黄陵矿区二号矿绝对瓦斯涌出量为84.08 m³/min,瓦斯抽采率为70.1%,符合抽采达标准则6)要求。

综上所述,207综采工作面在经过预抽6个月, A、B、C三个区段均实现了抽采达标。

4 经济效益分析

矿井工作面原钻孔布置主要采用统一间距6 m和12 m两种方式,笔者结合有效抽采半径与抽采时间拟合关系曲线,对比分析了统一间距12 m(A)、统一间距6 m(B)、分区布置(C)等3种方案,具体见表2。

表2 不同钻孔布置方式的经济效益分析
Table 2 Comparative analysis of economic benefits of different drilling arrangements

项目	布孔方式		
	间距12 m	间距6 m	分区布置
布孔时间/d	70	140	104
最短预抽时间/d	360	180	180
钻孔数量/个	817	1 634	1 234
钻孔工程量/m	11 380	228 760	172 760
预抽成本/万元	514.71	1 029.42	777.42
预计新增效益/亿元	0	5.23	6.98

注:钻孔间距12 m为参考组,预计新增效益=单一工作面日产煤量×吨煤销售价格-新增钻孔预抽成本。

从表2中可以看出:
1)钻孔统一布置间距12 m条件下,钻孔布置数量、钻孔工程量最少,但预抽时间需要360 d,影响了“采-掘-抽”工程衔接部署。

2)钻孔统一布置间距6 m条件下,钻孔布置数量1 634个、钻孔工程量228 760 m,对比钻孔间距12 m可知,钻孔数量增加817个,钻孔布置时间增加70 d,预抽成本增加514.71万元,但节约预抽时间160 d,因此工作面可提前110 d完成回采作业,预计新增效益5.23万元,钻孔间距6 m明显优于钻孔间距12 m。

3)当钻孔采用分区段布置时,孔布置数量1 234个、钻孔工程量172 760 m,对比钻孔间距12 m可知,

钻孔数量增加417个,钻孔布置时间增加34 d,预抽成本增加262.61万元,但预抽时间节约180 d,因此工作面可提前146 d完成回采作业,预计新增效益6.98亿元。钻孔分区段布置明显优于钻孔间距6、12 m。

综上所述,207综采工作面试验结果表明,钻孔分区布置方案较钻孔间距6 m和12 m两种方案可分别节约预抽时间36、146 d,有效缓解“采-掘-抽”工程衔接不平衡问题,且经济效益显著。

5 结 论

1)以黄陵矿区二号矿207综采工作面为研究对象,基于时空属性的观点,针对单一工作面煤层瓦斯预抽提出了一种煤矿井下瓦斯精准抽采方法。

2)综合考虑时间和空间的属性,以现场瓦斯含量分布、有效抽采半径为基础,同时结合矿井抽采掘衔接关系,从时空的角度对抽采钻孔布置参数进行优化,最终形成的一种预抽钻孔优化布置的煤矿井下瓦斯精准抽采方法。

3)207综采工作面试验结果表明,钻孔布置优选方案依次为:钻孔分区布置、间距6 m、间距12 m。钻孔分区布置较间距6 m和12 m两种方案可分别节约预抽时间36、146 d,有效缓解“采-掘-抽”工程衔接不平衡问题,且经济效益显著。

参考文献(References):

[1] 程远平,俞启香,周红星.煤矿瓦斯治理“先抽后采”的实践与作用[J].采矿与安全工程学报,2006,23(4):389-392.
CHENG Yuanping, YU Qixiang, ZHOU Hongxing. Practice and effectiveness of “draining gas before coalmining” to prevent gas from bursting[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(4):389-392.

[2] 周世宁,林柏泉.煤层瓦斯赋存与流动理论[M].北京:煤炭工业出版社,1999.

[3] 程远平,付建华,俞启香.中国煤矿瓦斯抽采技术的发展[J].采矿与安全工程学报,2009,26(2):127-140.
CHENG Yuanping, FU Jianhua, YU Qixiang. Development of gas extraction technology in coal mines of china[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(2):127-140.

[4] 郝富昌,抄隆霄,孙丽娟,等.软硬煤瓦斯解吸规律及影响因素的实验研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(3):42-46.
HAO Fuchang, CHAO Longxiao, SUN Lijuan, et al. Experimental study on gas desorption laws and influence factors of soft and hard coal[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(3):42-46.

[5] 王珂,李波,温志辉,等.不同受载状态下含瓦斯煤体解吸规律试验研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):164-169.

- WANG Ke, LI Bo, WEN Zhihui, *et al.* Experiment study on desorption law of gassy coal mass under different loading status [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(7): 164–169.
- [6] 李云波, 张玉贵, 张子敏, 等. 构造煤瓦斯解吸初期特征试验研究[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(1): 715–720.
- LI Yunbo, ZHANG Yugui, ZHANG Zimin, *et al.* Experimental study on gas desorption of tectonic coal at initial stage [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(1): 715–720.
- [7] 刘大锰, 周三栋, 蔡益栋, 等. 地应力对煤储层渗透性影响及其控制机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(6): 1–8, 23.
- LIU Dameng, ZHOU Sandong, CAI Yidong, *et al.* Study on effect of geo-stress on coal permeability and its controlling mechanism [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(6): 1–8, 23.
- [8] 曹树刚, 郭平, 李勇, 等. 瓦斯压力对原煤渗透特性的影响[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(4): 595–599.
- CAO Shugang, GUO Ping, LI Yong, *et al.* Effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(4): 595–599.
- [9] 程志恒. 底抽巷穿层钻孔封孔深度与布孔间距优化研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(2): 76–82.
- CHENG Zhiheng. Study on optimization of strata passing borehole sealing depth and borehole layout space in floor gas drainage gateway [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(2): 76–82.
- [10] 徐青伟, 王兆丰. 预抽煤层瓦斯消除空白带钻孔布置方式的优化[J]. *煤矿安全*, 2015, 46(8): 152–155.
- XU Qingwei, WANG Zhaofeng. Optimization of borehole layout to eliminate drainage blind by pre-pumping coal seam gas [J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(8): 152–155.
- [11] 郭平, 曹树刚, 张遵国, 等. 含瓦斯煤岩体固气耦合数学模型及数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(S2): 330–335.
- GUO Ping, CAO Shugang, ZHANG Zunguo, *et al.* Analysis of solid-gas coupling model and simulation of coal containing gas [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(S2): 330–335.
- [12] 朱南南, 张浪, 范喜生, 等. 基于瓦斯径向渗流方程的有效抽采半径求解方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(10): 105–110.
- ZHU Nannan, ZHANG Lang, FAN Xisheng, *et al.* Study on the solution method of effective extraction radius based on gas radial seepage equation [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(10): 105–110.
- [13] 武磊, 戴广龙, 杨志磊. 顺层钻孔有效抽采半径试验研究[J]. *煤矿安全*, 2013, 44(5): 4–6.
- WU Lei, DAI Guanglong, YANG Zhilei. Experimental study on effective extraction radius for bedding hole [J]. *Safety in Coal Mines*, 2013, 44(5): 4–6.
- [14] 岳高伟, 王宾宾, 曹汉生, 等. 结构性煤层顺层钻孔方位对有效抽采半径的影响[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(S1): 138–147.
- YUE Gaowei, WANG Binbin, CAO Hansheng, *et al.* Influence of effective drainage radius by borehole orientation along seam with anisotropic permeability [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S1): 138–147.
- [15] 余陶, 卢平, 孙金华, 等. 基于钻孔瓦斯流量和压力测定有效抽采半径[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(4): 596–600.
- YU Tao, LU Ping, SUN Jinhua, *et al.* Measurement of effective drainage radius based on gas flow and pressure of boreholes [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(4): 596–600.