

复杂地质构造区域高突低透气煤层瓦斯 综合治理研究

Research on Comprehensive Management of High Outburst and Low Permeability Coalbed
Methane in Complex Geological Structure Areas

廖引 (中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要:111103 工作面开采区域煤层透气性差,抽采效率低,达标周期长,区域地质条件复杂,构造区域容易瓦斯积聚,引发瓦斯事故。针对该问题,基于数值模拟软件,采用综合指标法分析评估工作面瓦斯治理措施,对低透气煤层致裂后抽采。研究表明,抽采浓度最大达到 90%,且衰减较小,连抽 6 个月即可抽采达标,抽采效果显著。构造区域进行致裂增透后连抽,效果显著。

关键词:瓦斯;数值模拟;综合考察;增透

中图分类号:TD75+4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-609X(2025)04-0051-06

Abstract:The coal seam permeability in the mining area of the 111103 working face is poor, the pumping efficiency is low, the standard period is long, the regional geological conditions are complex, and the structural area is easy to accumulate gas, which causes gas accidents. In order to solve this problem, the comprehensive index method was used to analyze and evaluate the gas treatment measures of the working face, and it was found that the traditional pre-pumping borehole could not meet the requirements of the coal seam gas treatment. Numerical simulation analysis shows that there is still a blank zone for gas extraction for 12 months. The main factor that leads to the long period of gas extraction is the poor air permeability of the coal seam. The CO₂ fracturing and permeability enhancement measures are used to carry out comprehensive gas treatment, and the maximum extraction concentration of low permeable coal seam after fracturing reaches 90%, and the attenuation is small, and the pumping can reach the standard after 6 months of pumping, and the extraction effect is remarkable. The tectonic area was continuously pumped after fracturing and permeability, and the effect was remarkable.

Key words:gas; numerical simulation; comprehensive investigation; enhanced transparency

1 前言

矿井瓦斯灾害一直是影响煤矿安全生产的一大隐形杀手,突出矿井生产过程中容易产生动力现象,出现大量煤与瓦斯突出,导致巷道掘进面遭到严重破坏,因此危害性更大。引发矿井瓦斯突出事故的危险因素比较多,其中地质构造比较复杂的区域容易引发瓦斯聚集,当开采或者掘进至复杂地质构造区域时,不采取有效措施必然会引起瓦斯突出事故,因此对复杂地质构造区域的高突低透气煤层瓦斯综合治理进行研究是十分必要的。针对复杂地质构造

区域瓦斯综合治理问题,我国专家学者进行了大量研究,张宏杰^[1]进行了地质构造复杂区域瓦斯赋存规律研究,提出断层构造和褶皱构造瓦斯赋存规律,采用数值模拟进行了数字量化研究,为后期瓦斯综合治理提供了有效的依据。王钰淦^[2]针对川南长宁—筠连区域构造进行了综合分析,确定了区域内褶皱构造的产状,进行了褶皱构造与瓦斯储存相关性研究,提出向斜构造瓦斯赋存较大的结论,根据构造区域瓦斯储存情况绘制瓦斯机制图,研究成果取得良好效果。关金锋,周侃,司中应等^[3]针对松河煤矿瓦斯赋存规律进行了研究,由于松河煤矿为典型高头低透气性煤层,地质构造比较复杂,瓦斯抽采难度比较大,瓦斯储存比较复杂,因此进行综合数字化瓦斯储存规律研究,为后期瓦斯综合治理提供了宝贵依据。李章兵^[4]针对贵州地区某矿地质情况进行了深入分析,汇总矿井地质构造以及成煤过

[作者简介] 廖引(1990—),男,湖北天门人,工程师,主要从事煤矿灾害防治研究工作。

[基金项目] 瓦斯抽采钻孔封孔质量检测仪优化研究(2023YBXM35)

[引用格式] 廖引. 复杂地质构造区域高突低透气煤层瓦斯综合治理研究[J]. 中国矿山工程,2025,54(4):51-56+62.

程演化规律,建立煤层瓦斯与地质构造相关性理论,为后期矿井瓦斯灾害防治提供有效依据。程晓阳^[5]针对杨柳煤矿10号煤层瓦斯赋存规律进行深入研究,提出背斜储存瓦斯理论,对背斜产状和煤层瓦斯赋存相关性进行深入探究,研究成果对其他矿井瓦斯治理提供宝贵依据。马学刚^[6]针对成庄煤矿瓦斯赋存特征进行深入研究,提出不同构造瓦斯分布理论,并制定相应瓦斯控制措施,取得良好效果。冯家正^[7]针对王家岭矿4号煤层瓦斯赋存规律进行探究,提出煤质-构造-埋深-瓦斯相关性理论,取得良好效果。吕乐乐,宋清坤^[8]针对新密市煤矿区瓦斯地质规律进行探究,对断层构造周边瓦斯分布规律进行分析,确定断层构造对瓦斯影响,取得良好。其他专家学者分别针对我国高突低透气性煤层瓦斯综合治理问题进行了深入研究^[9-10],结合不同区域地质构造制定的相关治理措施,分别取得了一定成果。

本文以贵州某矿在采的11#煤层为工程背景,该煤层为典型高突低透气性煤层,目前开采的111103工作面区域内构造比较多,主要构造为断层构造,常伴有瓦斯聚集现象。为保证矿井安全生产,针对该矿井111103工作面瓦斯赋存规

律进行综合分析,提出增透治理措施,进行效果考察。

2 工程概况

贵州某煤矿井田所在的二塘向斜为一不对称短轴向斜,在大地构造上属于扬子地台(I级),上扬子褶皱带(II级),威宁—水城迭陷断皱带(III级)。其煤层赋存在+1700~+1340m标高之间,井田东部及转折端一带倾角约为21°,北东翼宽2.1km,斜长平均1771m,倾角一般9°;南西翼平均宽0.42km,斜长平均380m,倾角14°,两翼由浅向深逐步变缓,轴部3°~5°。井田勘探查明断层40条,为正断层,落差均大于30m的有6条,落差在16m的有15条。所见断层中,除F1、F12、F20为走向断层外,其他均是NNE向高角度倾向断层,倾角66°~75°。

现阶段该矿主采煤层为11#煤层,煤层平均厚度为2.7m,煤层顶板以泥岩为主,底板以砂岩为主。根据矿井瓦斯基本参数测试结果,瓦斯含量为11.82m³/t,瓦斯压力为2.077MPa。瓦斯其他基本参数见表1。根据表1基本参数结合瓦斯防治相关规定可知,11#煤层突出危险性大。

表1 11#煤层瓦斯基本参数

煤号	瓦斯放散初速度 $\Delta P/\text{mmHg}$	煤的坚固性 系数 f 值	突出危险综合指标 K_1 / $\text{mLg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1/2}$	K ₁ -P关系模型	
				$K_1 = APB$	
				A	B
11	22	0.23	95.65	0.6757	0.419

矿井自生产以来发生过15次煤与瓦斯突出动力现象,对其11#煤层不同位置点的 K_1 值进行测试,总测试次数750次。测试结果如图1所示。

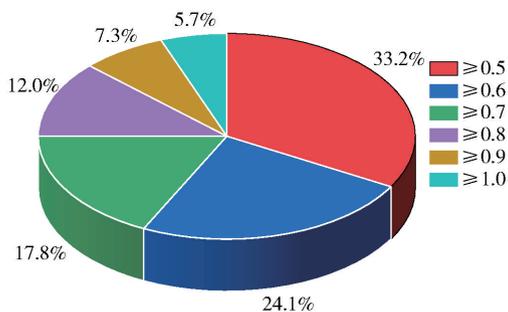


图1 11#煤层 K_1 值测试结果图

由图1分析可知,在测试的750次中, K_1 值大于0.5占比为33.2%。 K_1 值大于0.6占比24.1%。 K_1 值大于0.7占比17.8%, K_1 值大于0.8占比

12%。 K_1 值大于0.9占比7.3%; K_1 值大于1%占比5.7%。

111103工作面走向长度600m,切眼斜长为190m。区域断层构造12个,均为正断层,主要分布于工作面200~600m区间。综合分析,111103工作面开采区域突出危险性高,地质构造复杂,诱发瓦斯突出可能性大。

3 瓦斯治理现状

3.1 瓦斯现场治理措施

111103工作面目前瓦斯综合治理措施主要包括本煤层顺层预抽钻孔、高位钻孔、插管抽采,本煤层顺层钻孔进行采前预抽,高位钻孔和插管抽采为边采边抽。为保证抽采效果,顺层钻孔间距3m,抽采半径设为1.5m,抽采设计如图2所示,高位钻孔布置参数见表2。

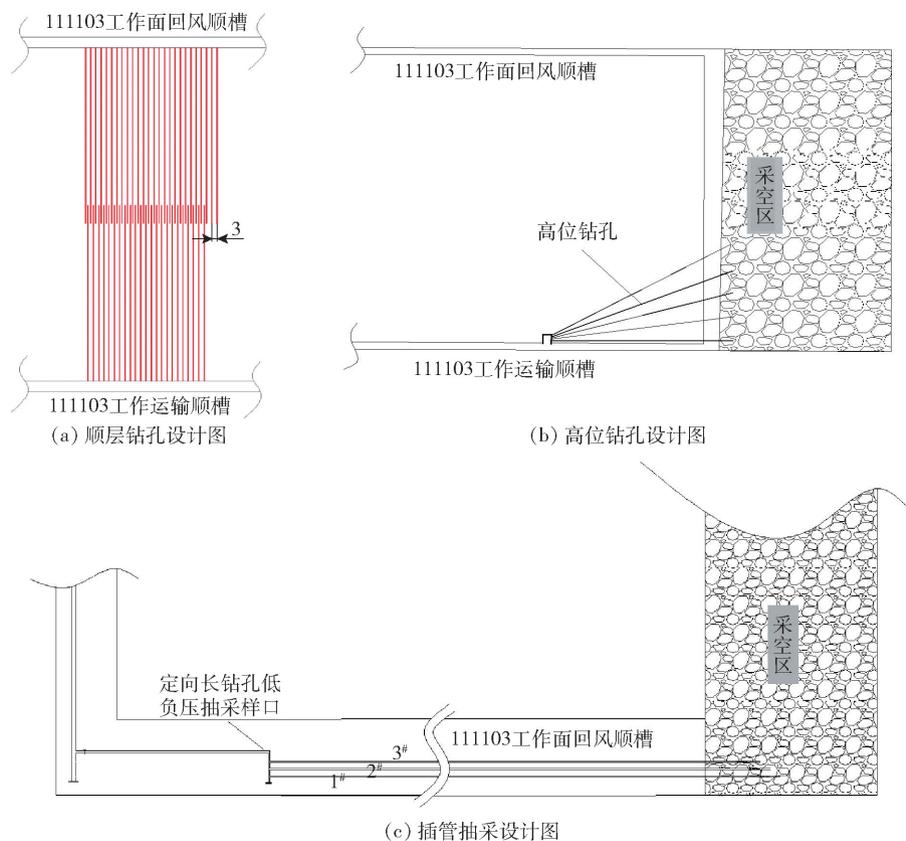


图2 111103工作面瓦斯抽采设计

表2 高位钻孔布置参数表

钻孔编号	开孔与回风巷道间距/m	开孔与钻场底板间距/m	与回风巷道夹角/(°)	预计孔长/m	与煤层顶板间距/m	与回风巷道平距/m
1	2	1.8	0	126.5	40	2
2	2.25	1.8	7	127.5	40	15
3	2.5	1.8	14	130	40	30
4	2.75	1.8	20	134	40	45.5
5	3	1.8	27	140	40	61.5
6	2	2.3	0	126.5	45	2
7	2.25	2.3	7	127.5	45	15
8	2.5	2.3	14	130	45	30
9	2.75	2.3	20	134	45	45.5
10	3	2.3	27	140	45	61.5

3.2 瓦斯预抽效果数值模拟分析

针对111103工作面顺层钻孔抽采效果进行数值模拟研究。假设钻孔内瓦斯抽采负压均匀,钻孔孔壁均匀,瓦斯抽采负压为21 kPa。采用软件COMSOL进行数值模拟研究,建立流-固耦合模型^[9-10],数值模拟过程不考虑应力释放时吸附态转化为游离态瓦斯情况。数值模拟3个月、6个月、9

个月、12个月抽采瓦斯后工作面残余瓦斯含量分布情况如图3所示。

由图3分析可知:①顺层钻孔预抽3个月后,钻孔周边约0.5 m范围内瓦斯含量低于3 m³/t,工作面中部抽采交叉区残余瓦斯含量最大值为5.0 m³/t;②顺层钻孔预抽6个月后,钻孔周边约0.6 m范围内瓦斯含量低于3 m³/t,工作面中部抽采交叉区残

余瓦斯含量最大值为 $5.0 \text{ m}^3/\text{t}$;③顺层钻孔预抽6个月,钻孔周边约 0.8 m 范围内瓦斯含量低于 $3 \text{ m}^3/\text{t}$,工作面中部抽采交叉区残余瓦斯含量最大值为 $4 \text{ m}^3/\text{t}$;④顺层钻孔预抽12个月后,钻孔周边约 0.7 m 范围内瓦斯含量低于 $3 \text{ m}^3/\text{t}$,工作面中部

抽采交叉区残余瓦斯含量最大值为 $3 \text{ m}^3/\text{t}$ 。综合分析,单个钻孔抽采半径变化比较小,预抽12个月后工作面内依旧存在抽采空白带,分析主要原因为煤层透气性差、实际瓦斯抽采半径比设计的小。

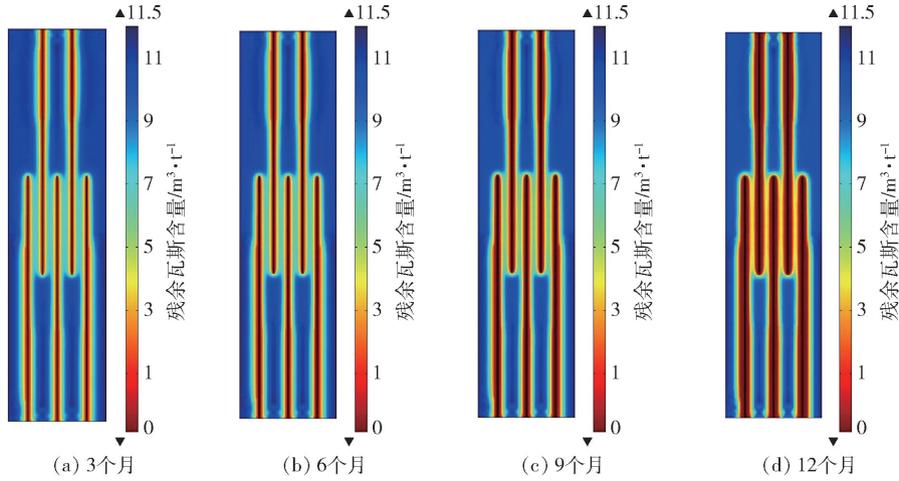


图3 顺层钻孔抽采模拟结果

3.3 瓦斯治理综合效果考察

111103 工作面顺层钻孔连续抽采6个月后,在工作面不同位置点取样8个,测得残余瓦斯含量,结果如图4所示。

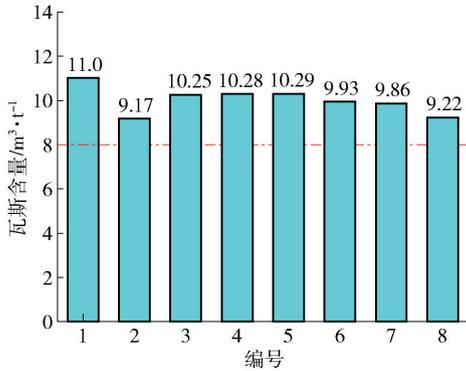


图4 残余瓦斯含量统计图

由图4分析可知,所有测点残余瓦斯含量均未达到抽采达标要求;1#测点最大残余瓦斯含量最大,为 $11 \text{ m}^3/\text{t}$,2#测点残余瓦斯含量最小,为 $9.17 \text{ m}^3/\text{t}$,工作面各测点残余瓦斯含量均超标。

对111103工作面顺层钻孔抽采浓度、抽采流量进行考察,考察结果如图5所示。

由图5分析可知,顺层钻孔连抽90d期间,在初始0~15d时间内钻孔平均瓦斯抽采浓度约为70%,抽采流量约 $2.1 \text{ m}^3/\text{min}$;随着抽采时间增大,钻孔瓦斯抽采浓度和流量衰减严重,接抽20d后钻

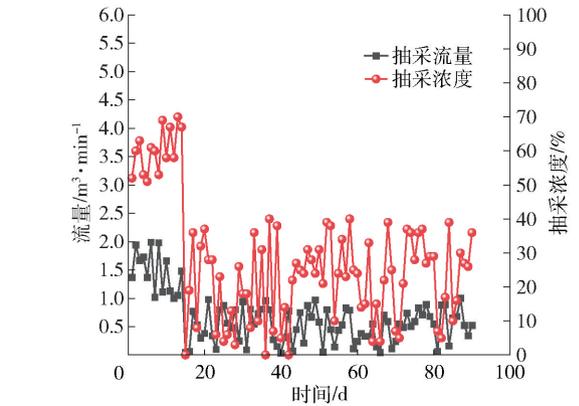


图5 瓦斯抽采流量、浓度统计图

孔平均抽采浓度为20%、平均抽采量为 $0.3 \text{ m}^3/\text{min}$,浓度衰减率为71%、流量衰减率为86%。

4 综合治理措施及效果考察

4.1 增透措施

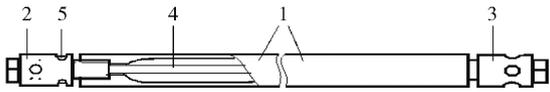
根据目前工作面情况,拟采用 CO_2 致裂增透技术进行增透后抽采。众多研究研究表明^[11-12]: CO_2 在 $31 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下, 7.2 MPa 压力时以液态存在, 1 kg 液态 CO_2 吸收 60 kJ 的热量能够汽化;当温度超过 $31 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,无论压力多大,液态 CO_2 将在 40 ms 内汽化。 CO_2 汽化产生高压波,致裂煤层增透,提高瓦斯抽采效率。利用 CO_2 的亲煤特性和其膨胀过程对煤层吸附瓦斯驱离,促进吸附态瓦斯转化为游离态,使煤层

透气性和瓦斯游离度双重提高。在具有突出威胁的煤层中使用,可安全有效地卸压煤层中“瓦斯突出源”^[13]。

1) CO₂致裂工作过程分析

CO₂致裂工艺主要包括设备组装、气体充装、井下安装及起爆^[14-16]。

(1)设备组装如图6所示,主要组装设备有主管、充气阀、泄能阀、发热装置及电极引出体,按顺序链接好后导通即可^[17-18]。



1—主管; 2—充气阀; 3—泄能阀; 4—发热装置; 5—电极引出体

图6 CO₂致裂器基本结构图

(2)气体充装主要通过增压泵将液态CO₂充入压裂器中,储液管内CO₂压力8~10 MPa,具体如图7所示^[19-20]。进行充气过程中必须保证安全,充气场所必须设置能量释放孔,防止爆炸时能量无法正常释放。

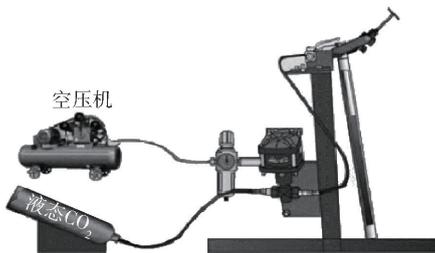
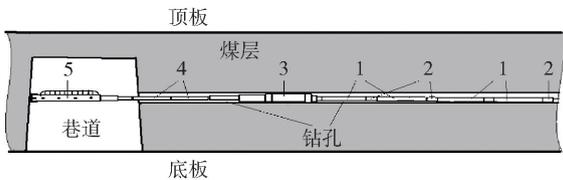


图7 液态CO₂气体充装系统示意图

(3)井下安装是将致裂器逐个连接,每次连接均需要导通,防止断路。安装完成后尾部采用胶囊封孔器封孔,封孔器水压为6~8 MPa。安装工艺如图8所示。



1—致裂器; 2—连接件; 3—封孔装置; 4—封孔引出杆; 5—推取固定器

图8 致裂器安装工艺示意图

2)工作面预裂孔及抽采钻孔设计

111103工作面抽采钻孔设计如图9所示。每5个钻孔为一组,CO₂致裂有效控制范围达到10 m,两个预裂孔同时作业时控制范围增大。具体工作面内

致裂及抽采钻孔布置参数见表3。钻孔间距为3 m,CO₂致裂增透措施煤层有效控制范围可达到10 m,治理效果良好。

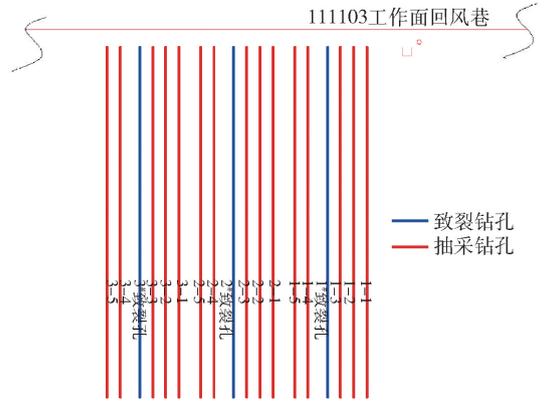


图9 CO₂预裂钻孔设计图

表3 顺层CO₂预裂钻孔及抽采钻孔布置参数表

孔号	孔深/m	倾角/(°)	方位角/(°)	孔径/mm
1#	100	2	198	94
2#	100	2	198	94
3#	100	2	198	94
预裂孔	100	2	198	94
4#	100	2	198	94
5#	100	2	198	94

4.2 构造区域预抽措施

构造区域需进行超前钻探,掘进或开采区域过构造区域时通过超前CO₂预裂钻孔施工后进行连抽,快速消除突出危险性后安全掘进,保证巷道正常进行,杜绝构造引发瓦斯突出事故。掘进过构造区域预抽措施如图10所示。钻孔参数见表4。钻孔设计呈扇形布置,控制构造区域瓦斯,进行超前抽采。致裂措施可以有效控制构造区域应力集中引发的瓦斯积聚,后期抽采效率高更高。

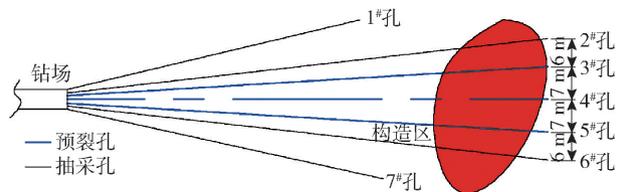


图10 构造区域消除突出危险性钻孔设计

4.3 效果考察

将综合治理措施应用于111103工作面邻近备采工作面,措施实施完成后进行正常瓦斯抽采,抽采后对瓦斯浓度、流量、残余瓦斯含量、K₁值进行考察,考察结果如图11所示。

表4 构造区域孔设计参数表

孔号	类型	方位角/ (°)	夹角/ (°)	倾角/ (°)	垂距/ m	平距/ m	斜距/ m
1 [#]	抽采孔	278	10	12.3	14.4	66	67.6
2 [#]	抽采孔	283°	5	12.2	22.8	105.4	107.8
3 [#]	预裂孔	286°	2	12.1	22.7	105.7	108.1
4 [#]	预裂孔	288°	0	12.0	21.3	100	102.2
5 [#]	预裂孔	291°	3	11.8	21.0	100.12	102.3
6 [#]	抽采孔	293°	5	11.7	20.8	100.21	102.3
7 [#]	抽采孔	298°	10	11.3	13.2	66	67.3

高,工作面区域构造比较多,地质条件复杂,为典型复杂地质构造区域高突出煤层。开采过程中,考察可知工作面现有瓦斯预抽效果比较差,导致残余瓦斯含量和 K_1 值大幅超标,无法保证安全开采;数值模拟分析顺层钻孔预抽钻孔抽采情况,模拟结果可知连抽12个月,工作面依旧存在抽采空白带。抽采效果差主要原因为煤层透气性差,因此采用 CO_2 致裂增透工艺进行预裂后进行连抽,对致裂效果进行考察,得到以下结论。

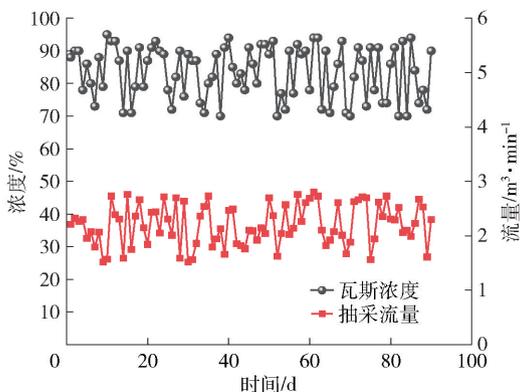
(1)不采取任何措施,111103工作面进行本煤层预抽无法满足瓦斯治理需求。由于煤层透气性差。12个月钻孔抽采半径小于1.5m。因此存在抽采空白带,导致残余瓦斯含量超标。

采用 CO_2 致裂增透措施,对本煤层预抽区域进行致裂增透后抽采,对构造区域进行增透后抽采,增透措施有效提高煤层透气性,提高瓦斯抽采效率。

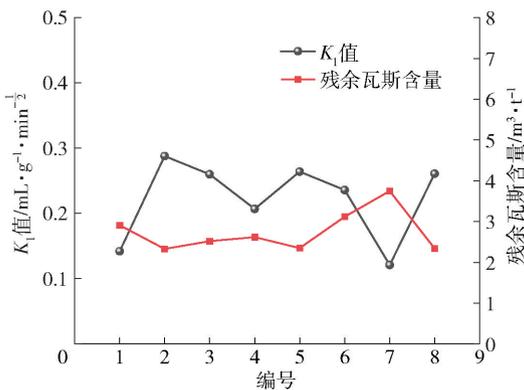
采用综合治理措施对临近采面进行瓦斯治理,考察可知顺层钻孔抽采浓度为70%~90%、抽采流量为1.5~2.5 m^3/min ,抽采浓度和抽采流量大幅提高,钻孔瓦斯抽采达标周期大幅缩短,抽采达标周期降低至6个月,治理效果明显。

[参考文献]

- [1] 张宏杰. 基于地质构造分析的瓦斯防治技术研究[J]. 山东煤炭科技, 2025, 43(1): 66-70+81.
- [2] 王钰澄. 川南长宁—筠连地区构造特征及其对瓦斯赋存影响[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
- [3] 关金锋, 周侃, 司中应, 等. 地质因素对松河煤矿瓦斯赋存的控制作用[J]. 中国矿业, 2024, 33(1): 179-185.
- [4] 李章兵. 贵州某矿地质构造及其影响概述[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(1): 172-174.
- [5] 程晓阳. 杨柳煤矿10号煤层瓦斯赋存规律研究[J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(12): 26-30.
- [6] 马学刚. 成庄煤矿瓦斯赋存特征及其控制因素分析[J]. 矿业装备, 2023(7): 134-136.
- [7] 冯家正. 王家岭矿4号煤层瓦斯赋存规律研究及主要影响因素分析[J]. 煤, 2022, 31(3): 106-108.
- [8] 吕乐乐, 宋清坤. 新密市煤矿区瓦斯地质规律及分布特征研究[J]. 科学技术创新, 2020(25): 13-15.
- [9] 王晓明, 梁磊, 陈增宝, 等. 非突出煤层采掘工作面过瓦斯富集区综合治理技术研究[J]. 能源技术与管理, 2022, 47(1): 44-45.



(a) 抽采浓度、流量考察结果

(b) K_1 值、残余瓦斯含量考察结果图11 瓦斯浓度、流量、残余瓦斯含量、 K_1 值曲线图

由图11分析可知:①采用致裂增透措施后,顺层钻孔抽采浓度为70%~90%,抽采流量为1.5~2.5 m^3/min ,整体衰减比较小;②抽采6个月后, K_1 值最大值为0.29,残余瓦斯含量最大值为3.1 m^3/t ,瓦斯治理效果良好。由于采用的增透措施可提高煤层透气性,抽采浓度、抽采流量大幅提高,抽采效果提高,因此残余瓦斯含量显著降低。

5 结论

111103工作面开采的11[#]煤层瓦斯含量及压力

(下转第62页)