



牛心刚, 国林东. 顺层瓦斯抽采钻孔合理封孔深度及注浆参数研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(4): 48-54.
NIU Xingang, GUO Lindong. Research on reasonable sealing depth and grouting parameters of bedding gas drainage drilling[J].
Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(4): 48-54.
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2021.04.011

扫码阅读下载

顺层瓦斯抽采钻孔合理封孔深度及注浆参数研究

牛心刚^{1,2,3}, 国林东^{1,2}

(1. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037;
3. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:为提高顺层瓦斯抽采钻孔封孔效果,以贵州五轮山煤矿8#煤层地质条件为工程背景,开展合理的封孔深度及注浆参数研究。通过分析钻孔漏气影响因素,将钻孔漏气形式分为巷道裂隙带漏气、钻孔裂隙带漏气、孔壁边缘漏气、封孔段材料漏气4类。采用理论分析、数值模拟及现场试验的方法,对巷道及钻孔周围应力分布规律开展研究,确定合理封孔深度为15 m,合理注浆扩散半径为0.40~0.50 m。研发了新型封孔材料,其抗压强度提升了20 MPa、膨胀率增加了20%、黏度降低了23%、终凝时间缩短了5 h。基于注浆柱面扩散理论,确定合理注浆压力为1.5 MPa,合理注浆量为0.3 m³。在1811工作面运输巷道布置16个顺层瓦斯抽采钻孔,开展4组不同封孔参数条件下的工业性试验,结果表明:在封孔深度为15 m、注浆压力为1.5 MPa、注浆量为0.3 m³条件下封孔效果较好、经济性较优,钻孔日平均抽采瓦斯浓度提升30%。

关键词: 瓦斯抽采; 顺层钻孔; 钻孔漏气类型; 封孔材料; 封孔深度; 注浆参数

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 1008-4495(2021)04-0048-07

Research on reasonable sealing depth and grouting parameters of bedding gas drainage drilling

NIU Xingang^{1,2,3}, GUO Lindong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China;
2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China;
3. School of Mining and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to improve the sealing performance of bedding gas drainage drilling, reasonable sealing depth and grouting parameter are studied based on the geological conditions of No. 8 coal seam in Wulunshan Coal Mine in Guizhou. By analyzing the influencing factors of drilling air leakage, the air leakage can be divided into four types: the air leakage in the fracture zone of the roadway, the air leakage in the fracture zone of the drilling, the air leakage at the edge of the drilling wall, and the air leakage of the materials in the sealing section. Theoretical analysis, numerical simulation and field test were used to study the stress distribution law around the roadway and drilling, and the reasonable drilling sealing depth was determined to be 15 m, and the reasonable grouting diffusion radius was from 0.40 m to 0.50 m. A new type of sealing material was developed, with the compressive strength increased by 20 MPa, the expansion rate increased by 20%, the viscosity decreased by 23%, and the final setting time reduced by 5 h. Based on the diffusion theory of grouting cylinder, the reasonable grouting pressure was

determined to be 1.5 MPa, and the reasonable grouting amount was determined to 0.3 m³. In 1811 working face, 16 bedding gas extraction drillings were arranged in transport roadway, and 4 groups of industrial tests were carried out under different sealing parameters. The results show that the sealing performance and economy is good when the sealing depth is 15 m, the grouting pressure is 1.5 MPa and the grouting volume is 0.3 m³, and the

收稿日期: 2020-08-30; 2021-07-13 修订

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0804206, 2017YFC0804208); 中煤科工集团重庆研究院有限公司自立项目(2020YBXM23)

作者简介: 牛心刚(1990—), 男, 安徽淮北人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事煤岩瓦斯动力灾害防治方面的研究工作。E-mail: xingangniu@163.com。

average gas concentration of drilling is increased by 30%.

Keywords: gas drainage; bedding drilling; type of drilling air leakage; sealing material; sealing depth; grouting parameter

我国煤炭资源丰富、分布范围广泛、赋存条件复杂,高瓦斯矿井数量占比较大,其煤层主要呈现地应力高、瓦斯含量高、瓦斯压力高、渗透性低的特征,煤层瓦斯治理难度大^[1-3]。据统计,我国煤矿中约有2/3数量的瓦斯抽采钻孔密封性差,影响了煤层瓦斯抽采效果,给矿井生产带来安全隐患^[4-6]。

众多学者围绕提升钻孔密封质量进行深入研究,对封孔工艺进行优化,形成了“两堵一注”封孔^[7]、囊袋式封孔^[8]、二次封孔^[9]、封隔一体化封孔^[10]及高效综合封孔等工艺^[11]。陈宾^[12]采用FLAC^{3D}数值模拟软件并结合封孔质量检测仪判断钻孔漏气位置,确定了合理的封孔深度;姜振等^[13]采用钻屑指标法分析巷道裂隙“三带”分布情况,并进行不同封孔深度的对比试验确定了最佳封孔深度;乔元栋等^[14]建立了顺层钻孔漏气模型并运用COMSOL软件分析钻孔“三带”分布及主要漏气通道;倪冠华等^[15]利用扫描电子显微镜分别对聚氨酯、PD复合材料的渗透扩散形式进行了微观分析,结果表明选用PD复合材料能够达到较好的密封效果;翟成等^[16]研发了柔性膏体材料,确定了最佳料水比,提高了封孔材料的膨胀性及密封性,从而提升了钻孔封孔效果。

钻孔密封效果主要受封孔深度及注浆参数影响,确定合理的封孔深度及注浆参数是确保钻孔封孔质量的关键因素^[17-19]。笔者拟通过相关研究,为提高钻孔封孔质量提供指导。

1 工程概况及钻孔漏气分析

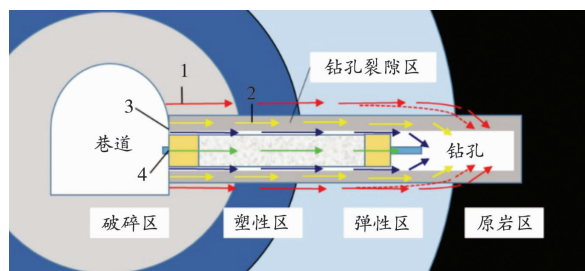
1.1 工程概况

贵州五轮山煤矿首采层8[#]煤层的煤体最高破坏类型为Ⅲ类,瓦斯含量为18.58 m³/t,最大瓦斯压力为3.0 MPa,最小煤体坚固性系数 f 值为0.52, $\Delta P=16.4$,透气性系数 $\lambda=0.000\ 2\sim 0.106\ 1\ \text{m}^2/(\text{MPa}^2\cdot\text{d})$,8[#]煤层属于较难抽放煤层。抽采瓦斯浓度(CH₄体积分数,下同)为30%左右,百米顺层钻孔抽采瓦斯纯流量为0.01~0.05 m³/min。抽采瓦斯浓度衰减较快,抽采效果较差,钻孔封孔漏气现象严重。

1.2 钻孔漏气影响因素分析

抽采瓦斯钻孔封孔段存在漏气通道是造成抽采瓦斯浓度、抽采效率降低的主要原因,煤体特征、巷道及钻孔施工情况、封孔设备及参数等因素共同影响钻孔封孔质量^[20]。

封孔段漏气主要分为巷道裂隙带漏气、钻孔裂隙带漏气、孔壁边缘漏气、封孔段材料漏气4类,钻孔漏气通道示意图如图1所示。



1—巷道裂隙带漏气;2—钻孔裂隙带漏气;
3—孔壁边缘漏气;4—封孔段材料漏气。

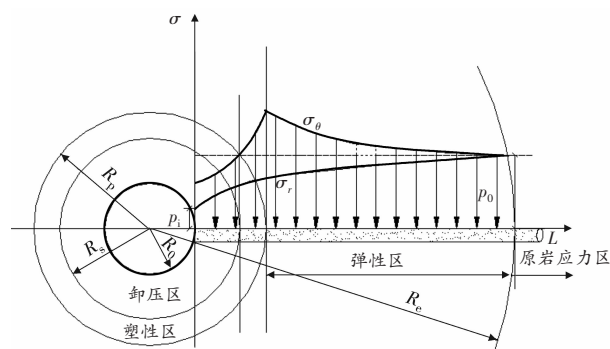
图1 钻孔漏气通道示意图

1811回采工作面运输巷道为煤巷且断面较大,顺层抽采瓦斯钻孔封孔段处于巷道应力影响范围区,产生巷道裂隙带漏气。由于煤体属于软煤且亲水性较高,在钻孔施工过程中钻孔塌孔现象严重,导致钻孔孔壁发生离层变形,周围易产生钻孔裂隙带漏气。钻孔封孔采用传统的“两堵一注”方式,两端堵头为聚氨酯封孔材料,封孔材料为水、水泥、滑石粉,其质量配比为10:8:2,封孔注浆压力为1.2 MPa。由于封孔压力较低,同时封孔材料中缺少膨胀剂、保水剂等配剂,封孔段注浆不充分及封孔材料性能不足易造成孔壁边缘及封孔段材料内部漏气。

2 钻孔应力分布规律研究

2.1 理论分析

抽采瓦斯钻孔封孔的关键技术是封孔深度的确定及对煤体裂隙的密封。钻孔周围应力分布如图2所示。



p_0 —原岩应力; σ_θ —切向应力; σ_r —径向应力; p_i —支护阻力;
 R_0 —孔洞半径; R_s —卸压区半径; R_p —塑性区半径; R_e —弹性区半径。

图2 钻孔周围应力分布示意图

钻孔在轴向及径向分别受到巷道及自身开挖应力的影响,因此需确定钻孔轴向及径向上应力的影响范围,以确定封孔参数。

依据岩石力学强度理论,煤体破坏服从 Mohr-Coulomb 强度准则,其应力本构解析方程为:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2C \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中: f_s 为应力解; σ_1 为主应力, MPa; σ_3 为水平应力, MPa; φ 为内摩擦角, ($^\circ$); C 为黏聚力, MPa。

为了简化钻孔应力区影响范围计算公式,依据岩石弹塑性力学模型将三维应力状态转化为平面问题进行分析。

由岩石弹塑性力学模型可知岩石的应力平衡方程,见式(2):

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (2)$$

式中 r 为应力影响半径, m。

在弹塑性区边界处煤体达到塑性破坏条件,见式(3):

$$\sigma_\theta - \sigma_r = 2(C \cot \varphi + \sigma_r) \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

结合应力本构方程、平衡方程、塑性方程,可求得塑性区半径,见式(4):

$$R_p = R_0 \left[\frac{(p_0 + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{p_i + C \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (4)$$

根据文献[21]所述卸压区与塑性区边界条件,求得卸压区半径,见式(5):

$$R_s = R_0 \left[\frac{(p_0 + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{(1 + \sin \varphi)(p_i + C \cot \varphi)} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (5)$$

在工程实践中,认为孔洞开挖后围岩内应力相较于原岩应力的变化影响范围约为 $\pm 5\%$ 原岩应力。由图 2 可以看出,在弹性区边界有 $\sigma_r = \sigma_\theta$, 即:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_\theta \\ \sigma_r \end{matrix} \right\} = p_0 \left[1 \pm \frac{R_e}{R_0} \right] = 1.05 p_0 \quad (6)$$

根据式(6)计算弹性区影响半径,见式(7):

$$R_e = 5 R_0 \quad (7)$$

依据 8# 煤层物理力学特征参数,可分别求得巷道卸压区半径 $R_s = 2.06$ m、塑性区半径 $R_p = 4.14$ m、弹性区半径 $R_e = 10.00$ m,钻孔卸压区半径 $R_s = 0.17$ m、塑性区半径 $R_p = 0.25$ m、弹性区半径 $R_e = 0.34$ m。

2.2 数值模拟研究

以 8# 煤层为地质背景,建立巷道及钻孔开挖数值分析模型。8# 煤层埋深约 450 m,顶底板岩性物理力学参数如表 1 所示。巷道模型顶部采用上覆岩层

自重压力边界,侧压系数为 0.8,其余边界设为固定支座约束边界。钻孔模型采用等围压应力。

表 1 围岩岩性物理力学参数

岩层类别	体积模量 K/GPa	切变模量 G/GPa	泊松比	黏聚力 C/MPa	内摩擦 角 $\varphi/(^\circ)$
粉砂岩	2.70	1.55	0.38	6.5	25.6
砂质泥岩	6.95	4.80	0.30	5.5	33.0
泥岩	7.15	4.30	0.30	4.9	34.0
粉细砂岩	5.13	3.23	0.25	6.8	35.0
煤层	2.16	0.93	0.29	3.9	30.0
细砂岩	7.28	5.24	0.21	7.4	42.0
粉细砂岩	5.13	3.23	0.25	6.8	35.0

巷道施工后,其周围煤岩体会发生不同程度的塑性破坏。由于巷道断面尺寸较大,其塑性破坏范围呈蝴蝶状分布,左右两帮破坏范围较大且呈对称分布,顶底板发生破坏范围较小,如图 3 所示。

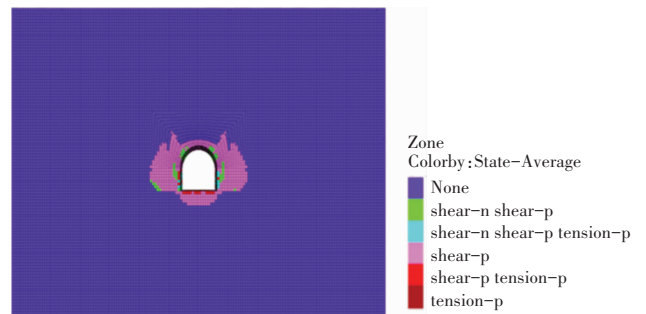


图 3 巷道围岩塑性破坏云图

在等围压应力状态下钻孔施工后,其周围煤岩体发生塑性破坏的形态为圆形,破坏范围在钻孔径向方向上均匀分布,如图 4 所示。

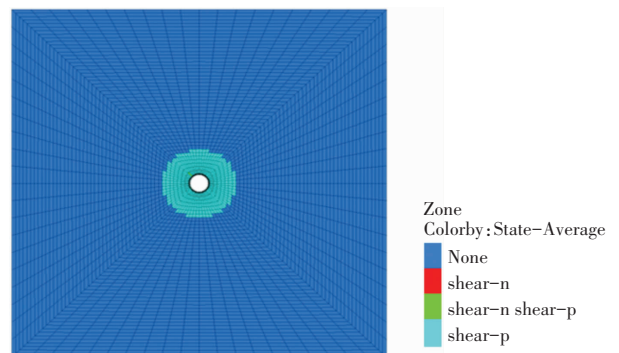


图 4 钻孔塑形破坏云图

为了更好地确定巷道及钻孔的应力影响范围,在数值分析模型中心布置监测线,提取监测数据并绘制应力一位移变化曲线,如图 5、图 6 所示。

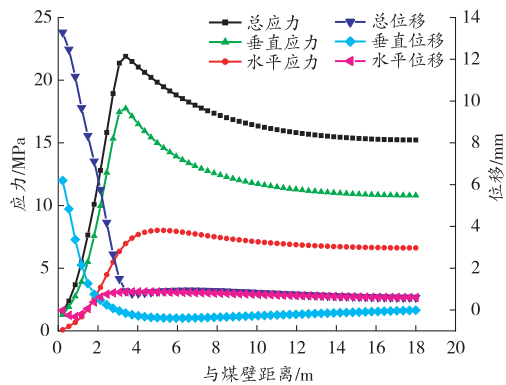


图5 巷道应力—位移监测曲线

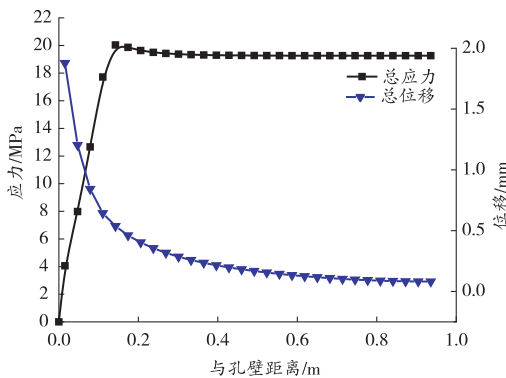


图6 钻孔应力—位移监测曲线

由图5可知,巷道煤壁向围岩内部延伸,总应力值呈现由低到高再缓慢降到稳定值的变化趋势。在距巷道壁2.0 m范围内总应力呈现缓增,超过2.0 m到3.3 m范围内总应力急剧上升至最大峰值21.9 MPa,随后在15.0 m处降到原岩应力,约为15.3 MPa。另外,水平应力及垂直应力变化亦呈现相似分布特征。巷道周围煤体总位移在煤壁处达到最大值13.50 mm,延伸至4.0 m处总位移急剧下降至最小值0.80 mm,随后总位移有所增加再渐缓下降,在超过15.0 m后总位移处于稳定状态。由此可大致判断,距离巷道2.0 m范围内为卸压区、超过2.0 m至4.0 m范围内为塑性区、超过4.0 m至15.0 m范围内为弹性区,超过15.0 m范围内为原岩应力区。

由于钻孔尺寸较小,其周围应力可被视为等围压状态,仅监测煤体的总应力及总位移即可。由图6可知,在煤层中施工钻孔后,钻孔总应力在0.14 m处达到最大值20.1 MPa,在0.40 m处总应力下降至19.3 MPa,在0.50 m后其总应力趋于稳定;总位移在卸压区由最大值1.90 mm骤降至0.60 mm,随后缓慢降至0.10 mm。由此,可确定距钻孔孔壁0.20 m范围内为卸压区、超过0.20 m至0.40 m范围内为塑性区、超过0.40 m至0.50 m范围内为弹性区,超过0.50 m范围为原岩应力区。

2.3 钻屑量分析

采用钻屑量分析法分析煤层巷道围岩内煤体的破碎范围,以确定封孔深度。在煤层巷道中部布置6个试验钻孔(S1[#]~S6[#]),钻屑量效检钻孔采用直径为42 mm的煤电钻施工,深度为15 m。记录钻进过程的排渣量,绘制曲线图,如图7所示。

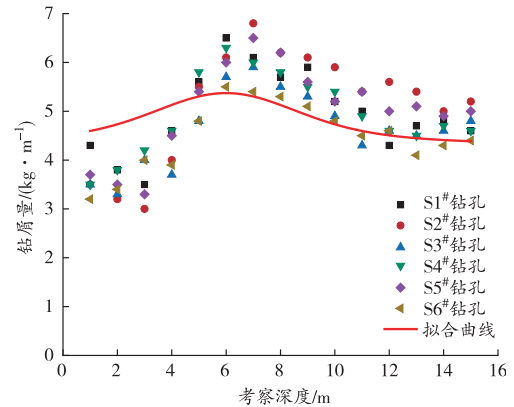


图7 单位进尺钻孔钻屑量统计曲线

由图7可知,各试验钻孔的单位进尺排渣量统计曲线与应力分布特征相近似,呈现先增大后减小的趋势。由钻屑量拟合曲线可知,在0~2 m内煤体破碎严重,钻屑量较少,为卸压区。单位进尺平均煤屑量在2~6 m内升至最大值,约为6.3 kg/m;在超过6 m至15 m范围内线性降低,至15 m处趋于稳定。由此可判断巷道弹性区范围为6~15 m。

综合分析,可确定钻孔的封孔深度及注浆扩散半径应当超过开挖孔洞周围的塑性区,达到弹性区,即封孔深度应为10~15 m,合理注浆扩散半径为0.40~0.50 m。

3 封孔注浆参数研究

3.1 封孔材料优化

目前,抽采瓦斯钻孔封孔材料普遍采用水泥砂浆材料,尽管该类材料成本低,但其性能方面存在不足。因此,遵循封孔材料应具备膨胀性、抗压性、保水性及流动性原则,对封孔材料进行优化,在封孔材料中添加膨胀剂、保水剂等成分以确保钻孔密封效果。新型封孔材料质量配比如表2所示。

表2 新型封孔材料质量配比

材料类别	质量配比/%	效用
水泥	70	主料
滑石粉	10	提升流动性
膨胀剂	5	增加膨胀效果
速凝剂	5	加快凝固
保水剂	5	防止水分严重流失
抗裂剂	5	防止干裂收缩

为了验证新型封孔材料的性能,分别对水泥砂浆(A)、新型封孔材料(B)在水灰质量比8:10条件下的力学强度、膨胀性、黏度、终凝时间4个关键指标进行测试对比。封孔材料性能对比如图8所示。

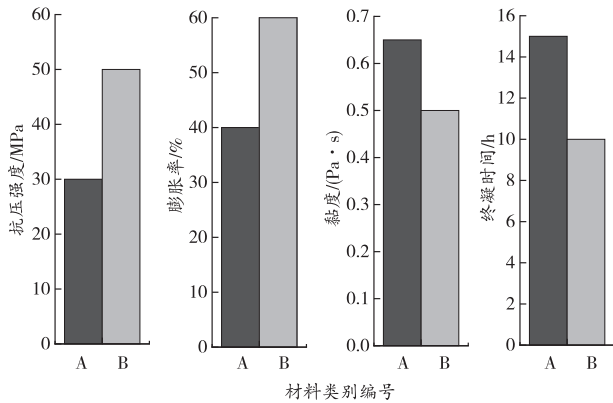


图8 封孔材料性能对比图

由图8可知,新型封孔材料的抗压强度提升了20 MPa,膨胀率增加了20%,黏度降低了23%,终凝时间缩短5 h。试验表明,新型封孔材料具有较好的抗压性、膨胀性及流动性,有效缩短凝固时间,可有效提升封孔的密封性。

3.2 注浆压力研究

基于达西公式推导封孔料浆在一定注浆压力下的柱面扩散公式,见式(8):

$$r_g = \sqrt{\frac{2kHt}{q\beta \ln\left(\frac{r_{\max}}{r_1}\right)}} \quad (8)$$

$$H = p / (\rho_g g) \quad (9)$$

式中: r_g 为注浆扩散半径,m; k 为煤体渗透系数,m/s; H 为浆液深度,m; t 为注浆时间,s; q 为煤体孔隙率,%; β 为浆液与水的黏度比; $r_{\max}$ 为最大扩散半径,m; r_1 为注浆管半径,m; p 为注浆压力,MPa; ρ_g 为浆液密度,kg/m³; g 为重力加速度, $g=9.8$ N/kg。

蒋伟成等^[22]基于柱面扩散理论,建立了注浆扩散的时间计算公式,见式(10):

$$t = \frac{\ln\left(\frac{r_{\max}}{r_1}\right) \left(\frac{r_g^2}{r_1^2}\right)}{2kpp_g} \quad (10)$$

依据现场注浆实践经验,结合注浆柱面扩散理论,建立注浆压力与孔径、注浆扩散半径的经验公式,见式(11):

$$p_g = \gamma \frac{(r_g - R_0)^{2.21}}{0.093t\psi^2 R_0^{2.21}} \quad (11)$$

式中: p_g 为钻孔注浆压力,MPa; γ 为注浆修正系数,取1.2; ψ 为裂隙张开度,取0.05 cm。

合理的注浆压力既可确保封孔浆液对周围煤体裂隙的封堵,又可防止封孔压力过高导致漏浆造成封孔材料浪费。依据公式(11)计算,得到合理的注浆压力为1.5 MPa。

3.3 注浆量计算

通过计算得到合理注浆量,有利于避免封孔时依靠现场经验判断造成的材料浪费,可节省钻孔封孔成本。钻孔封孔注浆空间主要由封孔段空间及钻孔周围裂隙注浆体积两部分构成,得到注浆量理论计算公式,见式(12):

$$V_g = \Phi (V_k + V_l) = \Phi \pi L [(R_0^2 - r_c^2) + (r_g^2 - R_0^2)] \quad (12)$$

式中: V_g 为注浆量,m³; Φ 为注浆冗余系数,取1.2; V_k 为封孔段注浆空间,m³; V_l 为钻孔破碎带注浆空间,m³; L 为封孔段长度,m; r_c 为抽采管半径,取0.025 m。

经计算钻孔注浆量约为0.3 m³。

4 现场试验

4.1 试验方案

基于上述研究,确定合理封孔深度为10~15 m、合理注浆压力为1.5 MPa、注浆量为0.3 m³。选择在1811回采工作面运输巷道对工作面施工顺层抽采瓦斯钻孔,进行封孔工业性试验。试验钻孔布置如图9所示。

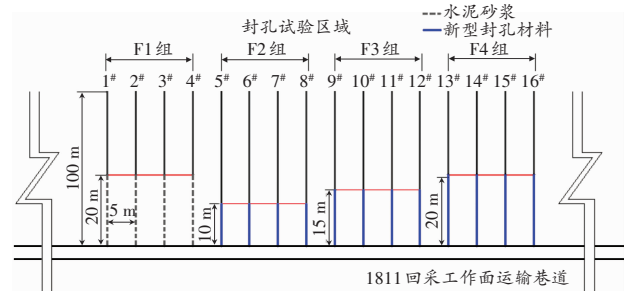


图9 试验钻孔布置示意图

本次试验共选取16个试验钻孔,孔深为100 m、钻孔直径为113 mm,共分为4组。F1组为矿方采用原有的封孔方法作为对照组。F2、F3、F4组钻孔为试验组,具体封孔参数见表3。

表3 封孔试验参数

组别	孔号	封孔材料	封孔深度/m	注浆压力/MPa
F1	1#~4#	水泥砂浆	20	1.0
F2	5#~8#	新型封孔材料	10	1.5
F3	9#~12#	新型封孔材料	15	1.5
F4	13#~16#	新型封孔材料	20	1.5

试验钻孔采用“两堵一注”式封孔工艺,如图10所示。

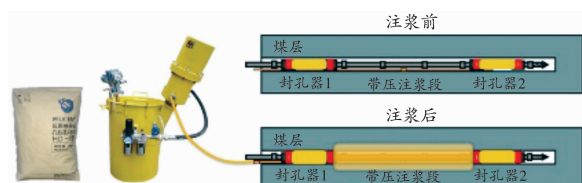
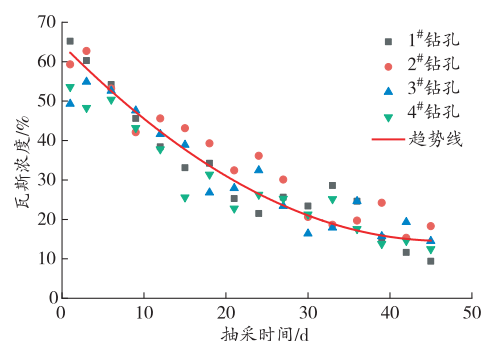


图10 封孔工艺示意图

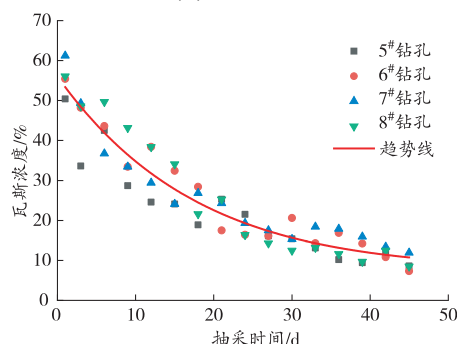
封孔段两端采用FKJW-230/1.6型囊袋式封孔器,囊袋长度为1 m。依据表3中封孔参数,使用注浆设备以指定压力将封孔材料压注到封孔空间,完成钻孔密封。待封孔浆液凝固后,将抽采管并入抽采网路抽采煤层瓦斯。

4.2 试验结果分析

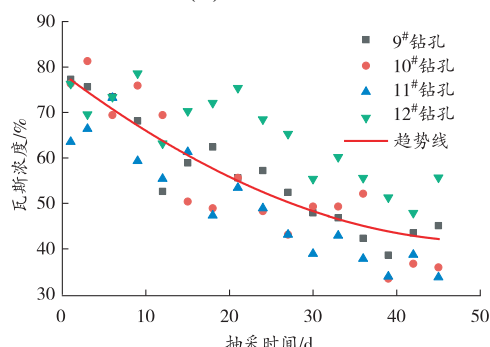
本次试验采集了各组试验钻孔连续45 d的抽采瓦斯浓度数据并绘制拟合曲线,以更好地对比分析不同参数条件下的钻孔封孔效果。试验钻孔抽采瓦斯浓度(CH_4 体积分数,下同)变化曲线如图11所示。



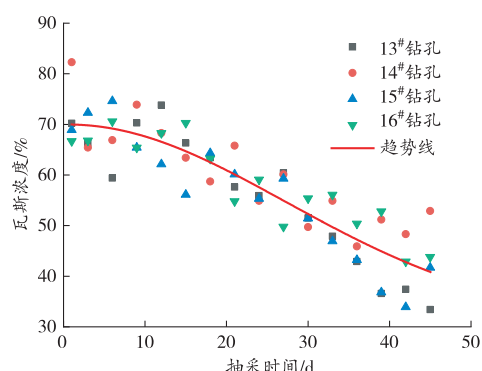
(a) F1组钻孔



(b) F2组钻孔



(c) F3组钻孔



(d) F4组钻孔

图11 试验钻孔抽采瓦斯浓度变化曲线

由图11可知,F1、F2组试验钻孔在考察期间的抽采瓦斯浓度前期衰减速率较快,下降幅度较大,大约30 d后其抽采瓦斯浓度趋于稳定并且保持在10%左右;F3、F4组试验钻孔在考察期间的抽采瓦斯浓度下降幅度为20%左右,其衰减速率相比于F1、F2组试验钻孔较小,30 d后其抽采瓦斯浓度仍保持在40%左右。

由数据分析可知,F1、F2、F3、F4组试验钻孔其日平均抽采瓦斯浓度分别为32.0%、25.0%、56.4%、57.6%。为了进一步对比各试验钻孔的封孔效果,绘制了各组试验钻孔的平均抽采瓦斯浓度对比图,如图12所示。

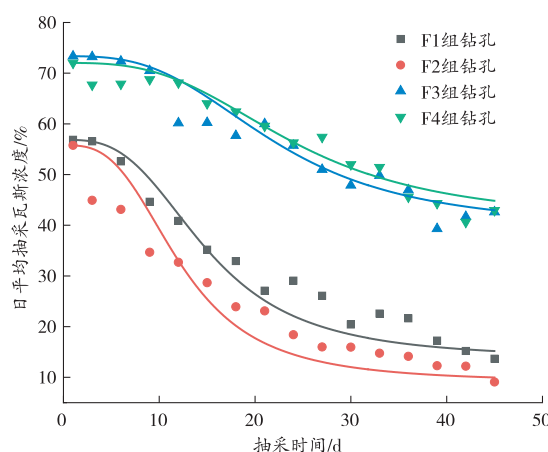


图12 各试验组钻孔平均抽采瓦斯浓度变化曲线

由图12可知,F3、F4组钻孔相较于F1、F2组钻孔抽采瓦斯浓度显著提升,抽采瓦斯浓度提升约30%,衰减速率较小。

综上所述,F3、F4组试验钻孔密封性较好,抽采瓦斯浓度较高且衰减速率较小。综合考虑封孔经济因素,F3组试验钻孔较F4组试验钻孔封孔深度短5 m,封孔成本较低。因此,封孔深度为15 m,注浆压力为1.5 MPa参数条件下,钻孔密封性较好。

5 结论

1) 根据贵州五轮山煤矿8#煤层赋存特征及原有

封孔方式,分析了封孔质量影响因素,并将钻孔漏气形式划分为巷道裂隙带漏气、钻孔裂隙带漏气、孔壁边缘漏气、封孔段材料漏气4类。

2)采用岩石力学理论分析、数值模拟、现场试验的方法,对钻孔周围应力分布规律开展研究,确定8#煤层的合理封孔深度为10~15 m,合理注浆扩散半径为0.40~0.50 m。

3)对封孔材料进行优化,新型封孔材料相较于水泥砂浆封孔材料其抗压强度提升了20 MPa,膨胀率增加了20%,黏度降低了23%,终凝时间缩短5 h。确定合理的注浆压力为1.5 MPa,注浆量为0.3 m³。

4)现场工业性试验表明,顺层抽采瓦斯钻孔合理封孔深度为15 m、注浆压力为1.5 MPa、注浆量为0.3 m³。钻孔日平均抽采瓦斯浓度提升约30%,衰减速率明显降低。

参考文献:

- [1] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等.我国煤与瓦斯共采:理论、技术与工程[J].煤炭学报,2014,39(8):1391-1397.
- [2] 程远平,俞启香,周红星,等.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(4):389-392.
- [3] 王兆丰,刘军.我国煤矿瓦斯抽放存在的问题及对策探讨[J].煤矿安全,2005(3):29-32.
- [4] 江万刚.阳泉矿区本煤层顺层钻孔标准化抽采研究与实践[J].矿业安全与环保,2019,46(3):78-81.
- [5] 王小朋,林桂玲.抽采瓦斯钻孔封孔用新型胶体材料性能及其封堵效果[J].矿业安全与环保,2019,46(5):56-59.
- [6] 周福宝,李金海,昃玺,等.煤层瓦斯抽放钻孔的二次封孔方法研究[J].中国矿业大学学报,2009,38(6):764-768.
- [7] 程志恒,卢云,李海涛,等.高位钻孔不同封孔方法质量检测及其优选[J].中国安全生产科学技术,2020,16(6):61-67.
- [8] 王念红,郭献林.高压囊带式注浆封孔技术在义安矿的

应用[J].煤矿安全,2012,43(增刊1):106-108.

- [9] 许占营.长平煤矿带压二次封孔技术及抽放优化研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [10] 国林东.软煤顺层抽采瓦斯钻孔封孔新工艺及合理参数研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2019.
- [11] 王兆丰,武炜.煤矿抽采瓦斯钻孔主要封孔方式剖析[J].煤炭科学技术,2014,42(6):31-34.
- [12] 陈宾.顺煤层瓦斯抽放钻孔合理封孔深度研究[J].煤矿安全,2019,50(5):168-171.
- [13] 娄振,魏国营.钻屑指标在确定本煤层钻孔抽采瓦斯合理封孔深度中的应用[J].煤矿开采,2016,21(6):104-107.
- [14] 乔元栋,程虹铭.基于COMSOL的顺层抽采钻孔漏气通及带压封孔技术研究[J].煤炭工程,2019,51(7):114-119.
- [15] 倪冠华,林柏泉,翟成,等.钻孔密封材料的微观特性及其对密封性能的影响[J].北京科技大学学报,2013,35(5):572-579.
- [16] 翟成,向贤伟,余旭,等.抽采瓦斯钻孔柔性膏体封孔材料封孔性能研究[J].中国矿业大学学报,2013,42(6):982-988.
- [17] 周厚权,申凯,陈宾.抽采瓦斯钻孔漏气类型划分与高效封孔技术应用研究[J].矿业安全与环保,2019,46(1):33-36.
- [18] 熊伟.抽采瓦斯漏气失效钻孔修复技术研究[J].矿业安全与环保,2020,47(1):80-83.
- [19] 国林东,赵旭生,张永将,等.顺层抽采瓦斯钻孔封隔一体化封孔工艺研究[J].煤炭科学技术,2018,46(5):114-119.
- [20] 黄文军,邓春生,李森,等.单一低透气性厚煤层钻孔群合理封孔深度的研究[J].煤炭技术,2016,35(6):163-165.
- [21] 王振锋,周英,孙玉宁,等.新型抽采瓦斯钻孔注浆封孔方法及封堵机理[J].煤炭学报,2015,40(3):588-595.
- [22] 蒋伟成,倪文耀.钻孔注浆的理论分析和控制技术[J].煤矿安全,1999(4):14-15.

(责任编辑:逢锦伦)

(上接第47页)

- [14] 杨漪.基于氧化特性的煤自燃阻化剂机理及性能研究[D].西安:西安科技大学,2015.
- [15] DENG J, YANG Y, ZHANG Y N, et al. Inhibiting effects of three commercial inhibitors in spontaneous coal combustion[J]. Energy, 2018,160:1174-1185.
- [16] MA L Y, WANG D M, WANG Y, et al. Synchronous thermal analyses and kinetic studies on a caged-wrapping and sustained-release type of composite inhibitor retarding the spontaneous combustion of low-rank coal[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 157: 65-75.

- [17] 张玉涛,史学强,李亚清,等.锌镁铝层状双氢氧化物对煤自燃的阻化特性[J].煤炭学报,2017,42(11):2892-2899.
- [18] 陆伟,王德明,陈舸,等.煤自燃阻化剂性能评价的程序升温氧化法研究[J].矿业安全与环保,2005,32(6):12-14.
- [19] 杨朔,戴广龙,唐明云.基于程序升温的煤自燃标志气体实验研究[J].煤矿安全,2018,49(7):24-27.
- [20] 王福生,王建涛,顾亮,等.煤自燃预测预报多参数指标体系研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(6):45-51.

(责任编辑:李琴)