

赵鹏涛,王海桥,王龙,等.非凝材料恒压注浆技术在松软煤层封孔中的应用[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2024,39(2):9-16.10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.02.002

ZHAO P T, WANG H Q, WANG L, et al. Application of Constant Pressure Grouting with Non-condensable Material to Soft Coalbed Sealing[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(2): 9-16. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.02.002

非凝材料恒压注浆技术在 松软煤层封孔中的应用

赵鹏涛¹,王海桥^{1*},王龙²,王馨蕾²

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;2.湘潭大学 环境与资源学院,湖南 湘潭 411105)

摘要:为解决松软低透气性煤层抽采钻孔的密封质量差、预抽瓦斯浓度低等问题,提出无机非凝材料恒压注浆封孔技术.采用 COMSOL Multiphysics 多物理场数值模拟软件构建底抽巷穿层钻孔注浆扩散流固耦合模型,探究底抽巷及钻孔围岩松动圈的范围,分析不同注浆压力下非凝浆液的渗流能力并验证该注浆技术的封孔效果.结果表明:新型无机非凝注浆材料具有低析水性、高渗透性、高悬浮稳定性和较好的封堵性能,可作为“两堵一注”带压封孔材料;2164 底板抽采巷及穿层钻孔施工后,巷道肩角部位及钻孔孔底处易产生应力集中,钻孔的始封深度为 6 m;浆液在砂岩段的渗流范围比泥岩段大,随着注浆压力的增加,浆液的有效渗流半径也逐渐增大,合理的注浆压力为 3 MPa.采用非凝材料恒压注浆技术后,浦溪井的钻孔平均瓦斯抽采体积分数为 51.5%,平均抽采纯流量为 0.005 m³/min,分别是水泥注浆封孔的 1.34 倍和 1.67 倍.

关键词:无机非凝材料;囊袋式封孔;始封深度;注浆压力;流固耦合

中图分类号:X936

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2024)02-0009-08

Application of Constant Pressure Grouting with Non-condensable Material to Soft Coalbed Sealing

ZHAO Pengtao¹, WANG Haiqiao¹, WANG Long², WANG Xinlei²

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. College of Environment and Resources, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: To solve the problems of bad sealing effect and low pre-drainage gas concentration of boreholes in soft coalbeds, the constant pressure grouting technology with inorganic non-condensable material is proposed. The seepage model of slurry in layer-through borehole is built with COMSOL Multiphysics simulation software, to explore the scope of loosening zone around drainage roadway and borehole, and to analyze the seepage capacity of slurry under different grouting pressures. Eventually, the sealing quality is investigated. Results show that the inorganic non-condensable material has low water separation, high permeability, suspension stability and good plugging performance. After the excavation of No. 2164 drainage roadway and the borehole, stress concentration is easy to occur at the shoulder of roadway and the borehole bottom; and the reasonable initial sealing depth of borehole should exceed 6 m. The seepage range of slurry in the sandstone section is larger than that in the

收稿日期:2022-10-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52104224)

*通信作者,E-mail:hqwang@hnu.edu.cn

mudstone section, and the effective seepage radius of slurry gradually increases with the grouting pressure. Adopting the constant pressure grouting technology with the slurry, the average drainage concentration of boreholes in Puxi coal mine is 51.5%, and the average gas flowrate is $0.005 \text{ m}^3/\text{min}$, which are 1.35 times and 1.67 times than those with the cement grouting method.

Keywords: inorganic non-condensable material; capsular bag sealing; initial sealing depth; grouting pressure; fluid-solid coupling

在我国,近80%的碳排放来源于煤炭,煤炭行业高效低碳化发展是实现碳中和目标的关键,也是实现能源安全兜底保障的必经之路^[1-2].煤层瓦斯与煤伴生,属于高热值、无污染的清洁能源,目前已在世界范围内进入商业化开采阶段.我国埋深在2000 m以浅煤层气可采资源量约为 $12.51 \times 10^{12} \text{ m}^3$,开发潜力巨大^[3-4].许多煤层经历多次大型的构造运动,构造软煤发育,透气性差,造成井下抽采浓度低,效率低下,也给矿井安全带来极大隐患^[5-6].因此,在“双碳”驱动下,提升煤层瓦斯采收率具有弥补常规油气资源匮乏、降低温室气体排放和促进煤矿安全生产的多重意义.

井下瓦斯抽采除了受煤层渗透性、钻孔布置、抽采方式和抽采系统能力等因素的影响外,抽采钻孔的封孔质量更是直接影响到瓦斯的抽采效果^[7].近年来,国内外众多学者针对不同地质条件下的钻孔封孔特点,开展理论及试验研究.早期仅使用黏土或水泥等单一封孔方法,由于密封距离短,造成钻孔周围破碎带漏气,已被淘汰^[8].目前,“两堵一注”封孔方法被许多煤矿推广应用,其原理是先采用聚氨酯或囊袋对钻孔两端封堵,再将水泥砂浆注入钻孔“两堵”之间的空间,从而有效封堵钻孔周围的破裂^[9-10].在水平钻孔中,由于水泥的自收缩效应,浆液凝固后会在钻孔上部留下一条缝隙(“水线”),并与煤层裂隙连通,形成漏气通道.WANG等^[11]提出多级变径带压封孔技术,成功在贵州低渗煤层中测得原始瓦斯压力;周福宝等^[12-13]提出使用超细膨胀粉料注浆的二次封孔法,以克服抽采率随钻孔变形衰减过快的问题;武炜^[14]通过现场注浆试验,发现改性的硫铝酸盐水泥基材料可将煤壁周围的微裂隙扩散充填,封堵效果良好;孙炜浩等^[15-16]研究水溶性聚合物粉末、再分散性聚合物粉末和粉煤灰复掺对封孔浆液的析水率、黏度和抗压强度的影响;王兆丰等^[17]认为,在现场注浆时,由于缺乏对钻孔始封位置的深入考量,且钻孔两端封堵材料的强度和注浆压力不够,导致“两堵一注”封孔技术在一些煤矿应用中名存实亡.

湖南省煤炭资源主要赋存于下石炭统测水组、上二叠统龙潭组,推覆构造发育,地层重叠,构造复杂,且煤层含气量大、放散速度快^[18].采用常规穿层抽采钻孔消突措施往往达不到预期效果,主要表现为抽采钻孔存在塌孔,瓦斯浓度与流量衰减过快等现象.为解决松软低透气性煤层抽采钻孔密封质量差、预抽瓦斯浓度低的问题,提出无机非凝材料恒压注浆封孔技术,通过建立底抽巷穿层钻孔注浆扩散流固耦合渗流模型,探究底抽巷及钻孔围岩松动圈的范围,分析不同注浆压力下浆液的扩散能力,并验证该注浆技术的封孔效果.

1 新型注浆封孔工艺

1.1 无机非凝封孔材料

无机非凝封孔材料属于无机复合材料,主料为钠基膨润土和高岭土,并辅以一定量的硅酸盐水泥、粉煤灰等混合而成.无机非凝封孔材料与水混合前后的状态如图1所示,其黏度系数大于 $2.8 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,pH值介于6.5~8.5,烧失量小于10%.封孔试验选用的无机非凝浆液的水灰比为5:1,经过析水率和流动度测试,该浆液的流动特性参数如表1所示.将无机非凝封孔材料与水混合后,可长期呈现不脱水流体状,具有低析水性、高渗透性、高悬浮稳定性和较好的封堵性能.



图1 无机非凝封孔材料与水混合前后状态

表 1 无机非凝封孔材料流动性能参数

水灰比	密度/(kg/m ³)	析水率/%	流动度/mm	黏度/(Pa·s)	封堵率/%
5:1	1.26	0	210	2.8×10^{-3}	70.6

该无基非凝封孔材料浆液可长期保持流体状态,在瓦斯抽采钻孔封孔的过程中,以一定压力将浆液注入钻孔,当封孔段注满浆液后仍继续带压注浆一段时间,直至达到停止注浆的压力阈值.因此,钻孔中的浆液始终处于一种相对恒压的状态,一旦钻孔周围受到采动应力的扰动产生新的裂隙后,非凝浆液可主动渗流自动封堵裂隙,隔绝外界空气涌入,减少漏气通道,从而提升钻孔的瓦斯抽采浓度.无基非凝封孔材料配合囊袋式“两堵一注”封孔技术,开辟了“固封液,液封气”的封孔新思路,可以实现煤矿井下钻孔瓦斯的高浓度抽采和高效利用.

1.2 囊袋式封孔工艺

囊袋式“两堵一注”带压封孔是利用注浆管向囊袋注浆,囊袋膨胀后,囊袋与钻孔壁紧密接触.当注浆压力超过注浆嘴的开启压力时,注浆嘴向 2 个囊袋之间的空隙注浆,浆液进入囊袋与钻孔壁的缝隙以及钻孔周边一定深度的煤体裂隙,实现抽采钻孔封孔.囊袋式“两堵一注”注浆如图 2 所示.

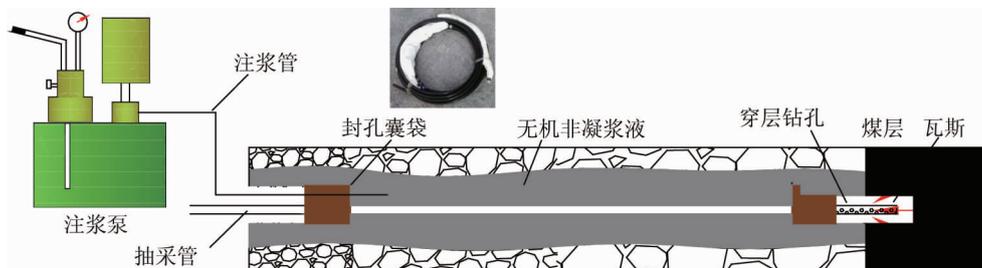


图 2 囊袋式“两堵一注”注浆

该注浆技术优点在于:囊袋注入浆液后迅速膨胀,可消除开孔时形成的初期漏气通道;当注浆压力超过囊袋爆破阀的阈值时可自行开启,浆液在大渗透压力梯度的作用下,可有效封堵钻孔周边煤体的裂隙,并沿钻孔周边径向裂隙渗流扩散,直至填满深处煤体的微裂隙,有效密封漏气通道;产生凝聚力,使钻孔得到一定的支护.

2 封孔参数模拟

造成抽采钻孔漏气的原因主要有 2 个:一是封孔材料与钻孔壁及其周围裂隙的气密性,在一定注浆压力的驱动下,浆液才能渗入钻孔深处的裂隙;另一方面在于封孔深度是否超过巷道开挖形成的围岩松动圈,封孔深度过浅,会导致巷道内的空气沿松动裂隙进入钻孔内.因此,“两堵一注”带压封孔技术的关键在于合理的注浆压力及始封位置的选择.

根据浦溪井 2164 底板抽采巷的地质条件及 V 煤层的瓦斯赋存参数,采用 COMSOL Multiphysics 多物理场数值模拟软件构建底抽巷穿层钻孔注浆扩散流固耦合模型,模拟分析底抽巷及钻孔开挖后围岩的应力分布及塑性区的分布特征,为选择合理的初始封孔深度提供依据,并考察不同注浆压力下浆液的流动扩散范围,从而得到合理的注浆压力.底抽巷穿层钻孔注浆扩散流固耦合模型的基本假设如下:(1)煤层顶底板的透气性较差,可视顶底板为不透气岩层;(2)煤岩各向同性且均质,变形破坏满足 Mohr-Coulomb 准则;(3)无机非凝浆液视为不可压缩流体,仅在封孔段的岩石裂隙中流动;(4)浆液在裂隙中的渗流满足达西定律;(5)注浆时无压力损失,钻孔边界上的注入压力为泵的工作压力.

2.1 控制方程

2.1.1 浆液渗流方程

无机非凝材料在钻孔封孔段的流动遵循达西渗流方程:

$$v = -\frac{k}{\mu}(\nabla P + \rho g \nabla D). \quad (1)$$

式中: v 为浆液的渗流速度, m/s ; k 为煤岩的渗透系数, m^2 ; μ 为浆液的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; P 为注浆压力, MPa ; ρ 为无机非凝浆液的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; D 为垂直坐标.

浆液渗流的连续性方程为

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla(\rho v) = \rho q. \quad (2)$$

式中: φ 为煤岩的孔隙率, $\%$; q 为浆液的体积流量, m^3 ; t 为时间, s .

联立方程可得到注浆压力与浆液密度之间的关系:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \left[-\frac{k}{\mu}(\nabla P + \rho g \nabla D) \right] = q. \quad (3)$$

2.1.2 围岩变形方程

假设在2164底抽巷及钻孔开挖的影响范围内,煤岩体发生弹塑性变形,根据胡克定律,煤岩体形变本构方程为

$$Gu_{i,jj} + \frac{G}{1-2\nu}u_{j,ji} - \beta_i P_{f,i} - \beta_m P_{m,i} + F_i = 0 \quad (4)$$

式中: G 为煤岩的剪切模量, MPa ; F_i 为体应力, MPa ; ν 为煤岩泊松比; P_f 和 P_m 分别为裂隙和基质上的气体压力, MPa ; β_f , β_m 分别为裂隙和基质的Biot系数; u_i , u_j 为 i , j 方向上的位移.

2.2 数值模型

为避免边界效应的影响,穿层钻孔注浆扩散模型总尺寸为 $55\text{ m}\times 40\text{ m}$,其中2164底抽巷位于煤层老底下方的砂岩层内(巷高为 3 m ,巷宽为 3.2 m),抽采钻孔从底抽巷顶板直至揭穿V煤层(钻孔长度为 20 m ,孔径为 94 mm),底抽巷穿层钻孔注浆模型如图3所示.V煤层的平均埋深约为 400 m ,因此,模型上边界的覆岩层载荷设为 $\sigma_v = 10\text{ MPa}$,顶底板为不透水岩层,模型下边界为固定约束,初始速度场和位移场为 0 ,模型左右边界为滚支边界约束.钻孔注浆封孔段为直接底和老底段,钻孔边界压力为初始注浆压力,取 $1\sim 4\text{ MPa}$,其他边界无浆液流动.该流固耦合模型各岩层的相关物性参数如表2所示.

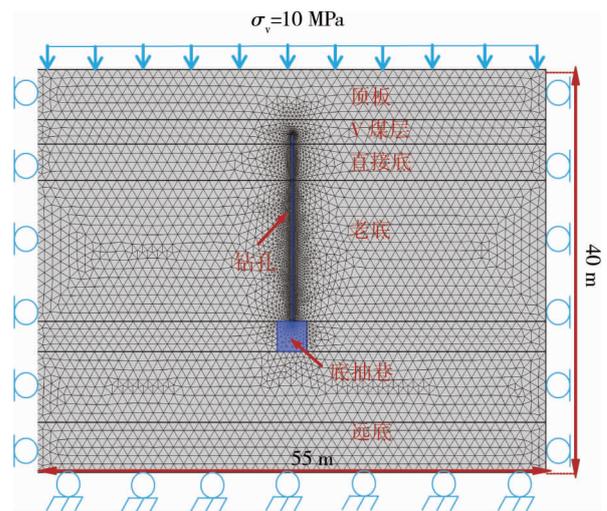


图3 底抽巷穿层钻孔注浆模型

表2 岩层物性参数

岩层	密度/ (kg/m^3)	杨氏模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ $(^\circ)$	孔隙率/ $\%$	渗透率/ m^2	储存系数/ MPa^{-1}
V煤层	1 400	3.2	0.32	1.5	22	—	—	—
顶板	2 500	7.5	0.25	2.2	32	—	—	—
直接底	2 500	6.8	0.25	2.2	32	3.4	8.7×10^{17}	0.01
老底	2 500	12.5	0.22	3.7	38	6.0	1.3×10^{15}	0.05
底抽巷	2 500	9.8	0.23	2.8	32	—	—	—
远底	2 500	9.6	0.23	2.7	35	—	—	—

2.3 模拟结果

2.3.1 底抽巷松动圈范围

穿层钻孔周围的裂隙带是在底抽巷掘进和打钻的双重应力扰动下形成的,2164底抽巷及钻孔开挖后围岩的应力分布如图4所示.由图4a可知:底抽巷及钻孔开挖后,巷道两帮及肩角部位出现明显的垂直应

力集中区,垂直应力峰值达到 32.5 MPa,造成巷道两帮移进变形量大;巷道顶板、底板沿钻孔轴向方向产生垂直应力降低区,这是顶板、底板及钻孔轴向产生塑性破坏卸压的结果.由图 4b 可知:水平应力在底抽巷顶板、底板的肩角位置及钻孔孔底处(见煤点)产生应力集中,水平应力峰值达到 28.0 MPa,造成塑性破坏沿巷道顶板、底板的肩角延伸,且钻孔孔底更易变形塌孔.

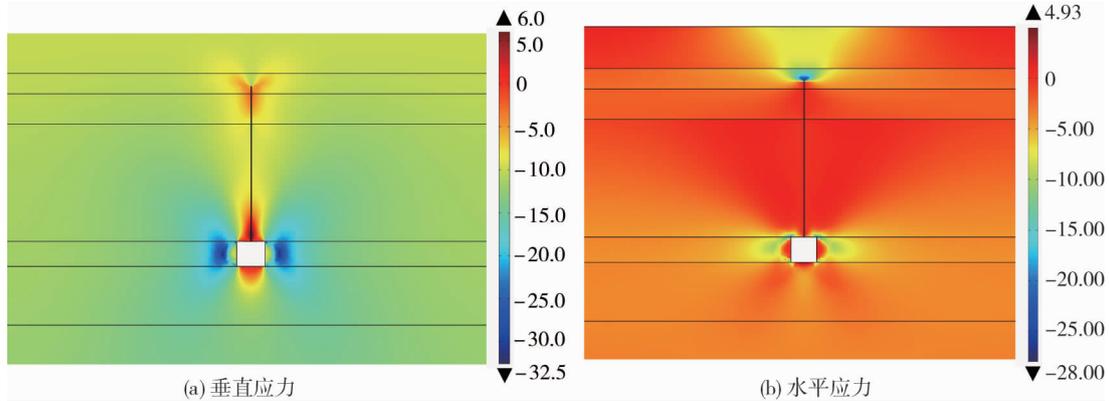


图 4 底抽巷及钻孔开挖后围岩的应力分布(单位:MPa)

根据模拟应力数据,绘制巷道左帮围岩的垂直应力分布曲线(图 5).由图 5 可知:距底抽巷两帮 0~1.5 m 范围内,围岩处于应力降低区,此处围岩先发生张拉破坏产生裂隙,应力集中向深部转移;距底抽巷两帮 1.5~6.5 m 范围内,围岩处于应力升高区,处于塑性变形区围岩的受力状态为双向甚至三向,承载强度增大,距左帮 2 m 处达到应力峰值 32.5 MPa;距底抽巷两帮 6.5 m 以上的围岩受开挖及打钻应力的扰动不大,此处为原岩应力区.围岩塑性区分布如图 6 所示.由图 6 可知:底抽巷围岩的塑性区对称分布,其肩角位置塑性区的范围最大,为 6.2 m,这与应力分布的结果一致.因此,在选择钻孔的始封位置时应避开此段区域,即钻孔的始封深度应不低于 6 m,并且沿钻孔轴向在煤层及直接底段均产生明显的塑性变形,范围约为 0.3 m,此处易产生与巷道松动圈连通的裂隙.

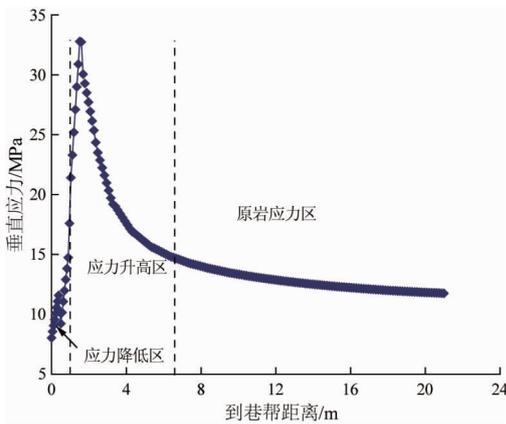


图 5 巷道左帮垂直应力曲线

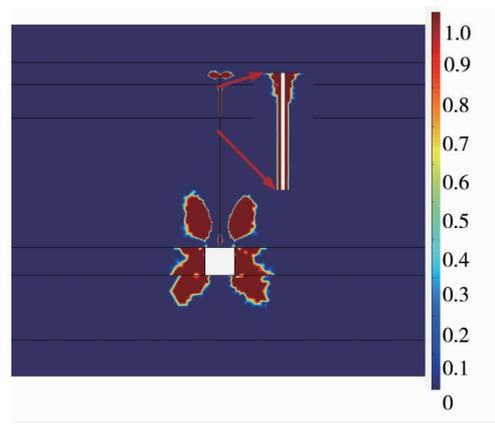


图 6 围岩塑性区分布

2.3.2 浆液渗流范围

穿层钻孔在不同注浆压力下,浆液的渗流分布范围如图 7 所示.由图 7 可知:注浆压力一定时,无机非凝材料浆液的渗流范围随岩层渗透率、储存系数的不同而变化,由于老底砂岩的孔隙率和渗透性较直接底泥岩更高,裂隙更为发育,封孔浆液在钻孔老底段的渗流扩散范围更大;随着注浆压力的逐渐升高,浆液在直接底段和老底段的渗流半径持续增大.为进一步分析浆液在不同岩层段的有效扩散半径与注浆压力的关系,得到钻孔径向的浆液压力数据如图 8 所示.

无机非凝浆液只有在一定的压力下,才能克服材料的黏滞力、摩擦阻力及孔隙压力进入到岩层裂隙中,即有效渗流压力和孔径越小的裂隙所需的有效渗流压力越大.浆液保持有效渗流压力以上时流经的距

离即为有效渗流半径,本注浆模型的有效渗流压力为 0.5 MPa.由图 8a 可知:随着初始注浆压力的升高,封孔浆液的渗流范围逐渐增大;注浆压力分别为 1, 2, 3, 4 MPa 时,浆液在老底段的有效渗流半径分别为 0.21, 0.43, 0.64, 0.75 m.由图 8b 可知:浆液在直接底段的渗流范围明显比老底段小,注浆压力分别为 1, 2, 3, 4 MPa 时,直接底段的有效渗流半径分别为 0.12, 0.25, 0.37, 0.43 m.

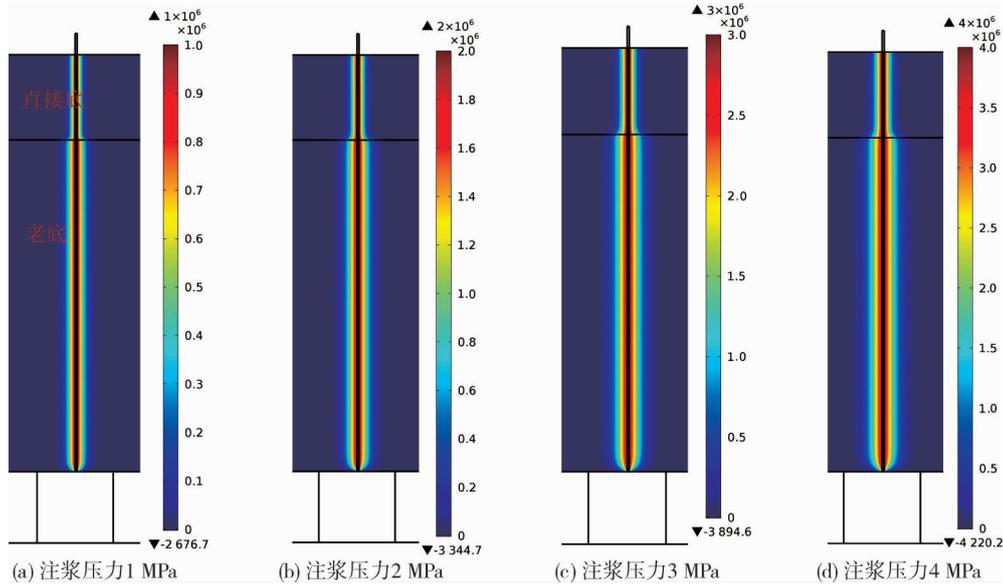


图 7 不同压力下浆液的渗流分布范围(单位:Pa)

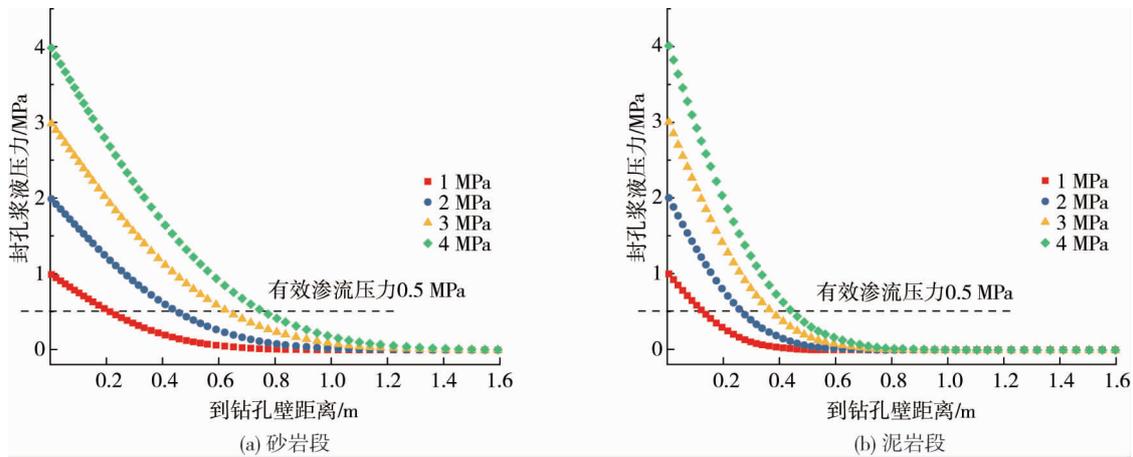


图 8 不同岩段封孔浆液的有效渗流半径

底抽巷穿层钻孔在直接底段的塑性区范围为 0.3 m,若要完全封堵钻孔周围的裂隙,注浆压力应不小于 3 MPa.此外,当注浆压力超过 3 MPa 持续增加时,无机材料浆液的有效渗流半径的增长幅度减缓,并且过高的注浆压力不仅对泵的功率的要求更高,还可能会破坏孔口及孔底处囊袋(“两堵”)的密封.因此,2164 底抽巷穿层钻孔的封孔注浆压力为 3 MPa.

3 浦溪井现场封孔试验

3.1 钻孔设计

为检验新型非凝恒压注浆技术的封孔效果,在浦溪井 2164 底抽巷选择 A-13~A-18 共 6 组抽采钻孔为封孔试验的考察对象,对每组 7 个钻孔(4[#], 5[#], 6[#], 7[#], 13[#], 14[#], 15[#])的抽采参数进行观测.采用试验组与对照组钻孔交替布置,即 A-13 组采用新型非凝恒压注浆材料+囊袋封孔,A-14 组采用 PO425 水泥砂浆+囊袋封孔,以减少因地质变化对试验结果的影响.封孔所用单节囊袋长度为 500 mm,外节囊袋深度为 6 m,注浆段长度为 10 m,爆破压力为 1.0 MPa,具备排气返水功能.2164 底抽巷穿层钻孔的设计如图 9 所示.

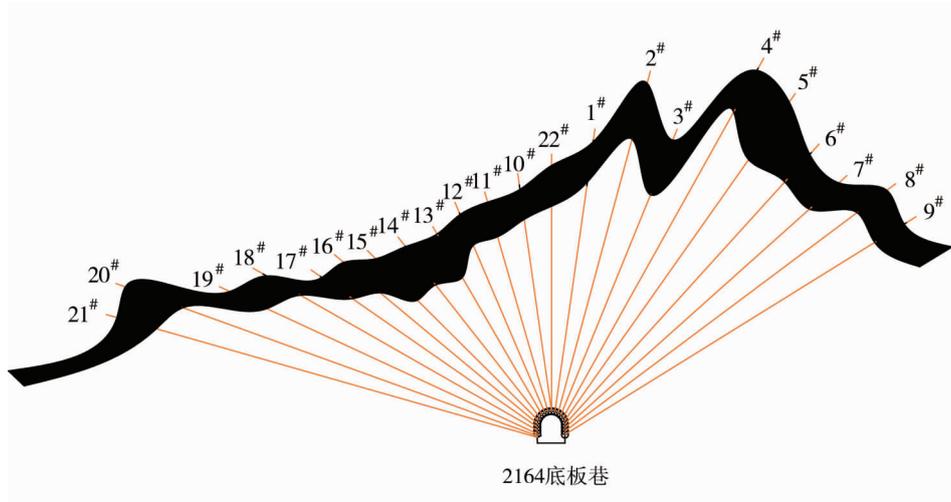


图 9 2164 底抽巷穿层钻孔设计

3.2 抽采效果

2164 底抽巷穿层钻孔采用非凝恒压注浆材料/水泥砂浆封孔施工完成后,及时接抽采管路连抽,并对 A-13~A-18 共 6 组钻孔进行连续 2 个月的抽采参数观测,得到各钻孔的平均抽采体积分数如图 10 所示,各钻孔的平均抽采纯流量如图 11 所示。

由图 10 和图 11 可知:采用非凝恒压注浆封孔的试验钻孔在 2 个月中,平均瓦斯抽采体积分数为 51.5%,平均抽采纯流量为 0.005 m³/min;而采用传统水泥砂浆带压封孔钻孔的平均瓦斯抽采体积分数为 38.3%,平均抽采纯流量仅为 0.003 m³/min.因此,浦溪井采用新型非凝恒压注浆封孔技术后,钻孔的平均瓦斯抽采体积分数是原来的 1.34 倍,平均抽采纯流量是原来的 1.67 倍,封孔效果得到明显提升。

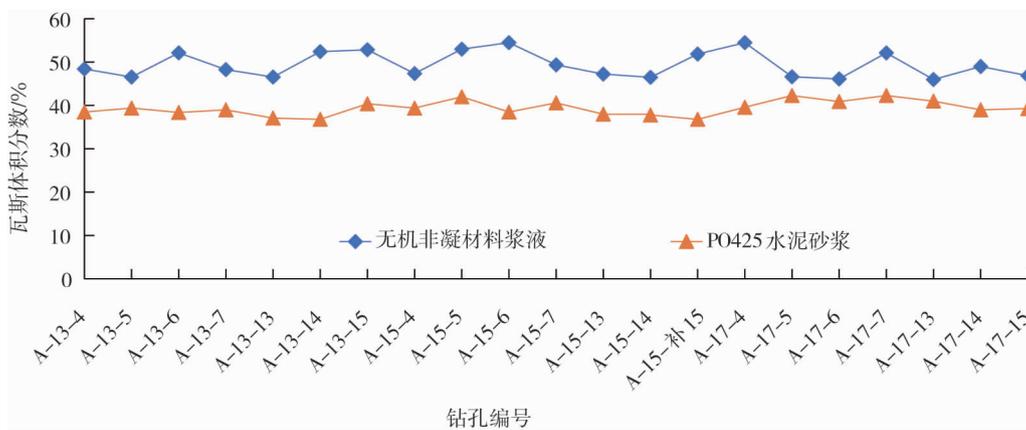


图 10 不同注浆方式下的平均瓦斯抽采体积分数

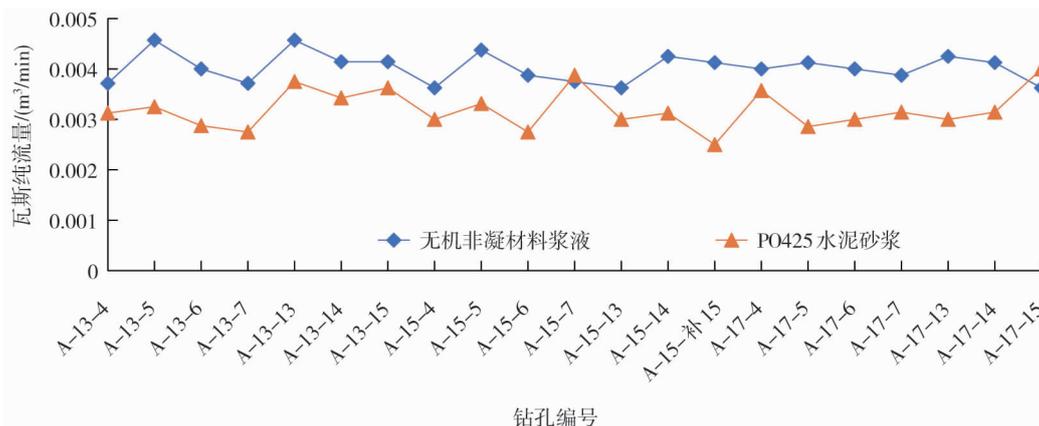


图 11 不同注浆方式下的平均抽采纯流量

4 结论

1) 新型无机非凝注浆材料具有低析水性、高渗透性、高悬浮稳定性和较好的封堵性能,可作为“两堵一注”带压封孔材料。

2) 2164 底抽巷及穿层钻孔开挖后,巷道肩角部位及钻孔孔底处易产生应力集中,穿层钻孔的始封深度应超过底抽巷围岩松动圈半径,即 6 m。

3) 无机非凝浆液在钻孔砂岩段的渗流范围比泥岩段大;随着注浆压力的增加,浆液的有效渗流半径也逐渐增大,合理的注浆压力为 3 MPa。

4) 浦溪井采用非凝恒压注浆技术后,钻孔的平均瓦斯抽采体积分数为 51.5%,平均抽采纯流量为 $0.005 \text{ m}^3/\text{min}$,是传统水泥砂浆带压封孔的 1.34 倍和 1.67 倍。

参考文献:

- [1] 马冰,贾凌霄,于洋,等.地球科学与碳中和:现状与发展方向[J].中国地质,2021,48(2):347-358.
- [2] 桑树勋,袁亮,刘世奇,等.碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前瞻[J].煤炭学报,2022,47(4):1430-1451.
- [3] 庚勳,陈浩,陈艳鹏,等.第4轮全国煤层气资源评价方法及结果[J].煤炭科学技术,2018,46(6):64-68.
- [4] MOORE T A. Coalbed methane: a review[J].International Journal of Coal Geology, 2012,101:36-81.
- [5] 张巨峰,施式亮,谢亚东,等.基于瓦斯地质单元划分的突出精准防控实践[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(1):10-16.
- [6] 刘海,王龙.低渗煤层淹没射流扩孔瓦斯抽采有效影响半径模拟研究[J].煤炭科学技术,2019,47(8):135-141.
- [7] 李树刚,包若羽,张天军,等.本煤层瓦斯抽采钻孔合理密封深度确定[J].西安科技大学学报,2019,39(2):183-188.
- [8] 刘兴亮.矿井瓦斯抽采技术的研究现状及前景[J].能源与节能,2018(12):114-115.
- [9] WANG C J, YANG S Q, JIANG C L, et al. A method of rapid determination of gas pressure in a coal seam based on the advantages of gas spherical flow field[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 45: 502-510.
- [10] 张超,林柏泉,周延,等.本煤层近水平瓦斯抽采钻孔“强弱强”带压封孔技术研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(6):935-939.
- [11] WANG L, WANG Z F, LIU H, et al. An improvement sealing method for gas pressure measurement by drilling a reducing-nipple borehole[J]. Energy Science & Engineering, 2018,6:595-606.
- [12] 周福宝,李金海,昝玺,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.
- [13] ZHOU F B, XIA T Q, WANG X X, et al. Recent developments in coal mine methane extraction and utilization in China: a review[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 31: 437-458.
- [14] 武炜.水泥基复合材料带压注浆封孔测压技术研究[D].焦作:河南理工大学,2015.
- [15] 孙炜浩.聚合物粉末改性水泥基封孔材料的实验研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
- [16] 胡春红,王彦伟,朱昌星.碳纤维增强聚合物水泥注浆材料力学性能及其微观机理[J].硅酸盐通报,2022,41(1):20-26.
- [17] 王兆丰,武炜.煤矿瓦斯抽采钻孔主要封孔方式剖析[J].煤炭科学技术,2014,42(6):31-34.
- [18] 宋元明,黄盛初,李荣欣.湖南省煤层气开发现状、问题与对策[J].中国煤炭,2009,35(11):5-9.