

页岩地层瓦斯钻孔抽排参数研究

——以白云山隧道为例

罗林毫¹, 谢彬彬²

¹重庆交通大学土木工程学院, 重庆

²重庆交大建设工程质量检测中心有限公司, 重庆

收稿日期: 2026年3月5日; 录用日期: 2026年3月25日; 发布日期: 2026年4月8日

摘要

页岩地层隧道施工中, 掌子面前方岩体瓦斯压力过高是诱发岩体与瓦斯突出的主要因素。本文以白云山隧道为实际工程, 基于流固耦合理论, 建立数值模型, 系统研究了抽排钻孔直径、抽排时间、抽排负压及钻孔间距对瓦斯抽排效果的影响规律。研究表明: 当钻孔直径在0.100~0.125 m时有效抽排半径增量最大; 抽排时间与有效抽排半径符合幂函数方程, 抽排时间2 d时有效半径增量达到最大; 抽排负压在一定范围内对有效抽排半径影响微弱; 钻孔间距控制在1.5 m时, 两孔抽排叠加效应明显, 残余瓦斯压力位于0.74 MPa以下。揭示了瓦斯抽排参数与抽排效果的定量关系, 确定了白云山隧道的最优钻孔参数, 为类似的页岩地层隧道瓦斯防治提供理论依据与技术参考。

关键词

页岩地层, 瓦斯防治, 抽排参数, 优化研究

Research on Gas Drilling and Drainage Parameters in Shale Formation

—A Case Study of Baiyun Mountain Tunnel

Linhao Luo¹, Binbin Xie²

¹School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

²Chongqing Jiaotong University Construction Engineering Quality Test Center Co., Ltd., Chongqing

Received: March 5, 2026; accepted: March 25, 2026; published: April 8, 2026

Abstract

In the construction of tunnels through shale formations, excessive gas pressure in the rock mass

文章引用: 罗林毫, 谢彬彬. 页岩地层瓦斯钻孔抽排参数研究[J]. 土木工程, 2026, 15(4): 77-86.

DOI: 10.12677/hjce.2026.154082

ahead of the working face is the primary factor inducing rock and gas outbursts. Taking the Baiyun Mountain Tunnel as a practical case, this study establishes a numerical model based on fluid-solid coupling theory to systematically investigate the influence of borehole diameter, extraction time, extraction negative pressure, and borehole spacing on gas extraction efficiency. The findings reveal: when the borehole diameter ranges between 0.100~0.125 m, the effective extraction radius increment reaches its maximum; the extraction time and effective extraction radius conform to a power function equation, with the effective radius increment peaking at 2 days of extraction; within a certain range, extraction negative pressure has minimal impact on the effective extraction radius; when borehole spacing is controlled at 1.5 m, the superposition effect of dual borehole extraction is pronounced, keeping residual gas pressure below 0.74 MPa. This study quantifies the relationship between gas extraction parameters and efficiency, determines the optimal borehole parameters for the Baiyun Mountain Tunnel, and provides theoretical foundations and technical references for gas prevention in similar shale formation tunnels.

Keywords

Shale Stratum, Gas Control, Extraction and Drainage Parameters, Optimization Research

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着我国经济持续增长,交通强国战略与西部大开发政策的推进,我国交通基础设施建设得到了快速发展。尤其在山区公路隧道工程中,瓦斯抽排技术得到广泛应用[1]。针对该技术领域,国内学者从不同角度探讨了抽排参数(抽排时长、钻孔直径等)对瓦斯渗流特性的影响。徐三民[2]在研究煤层瓦斯抽排技术时,将数值模拟与现场监测数据进行对比分析,精确计算出瓦斯有效抽排范围。赵长闯与李增华团队[3]明确了岩体内部瓦斯涌出量是决定抽排有效半径的主要因素之一,测定了钻孔影响范围,为瓦斯钻孔抽排优化提供了方向。林柏泉[4]等基于煤体各向异性、瓦斯应力场及渗流场,研究了地应力、瓦斯压力及渗透率对钻孔有效抽排区域的影响,为瓦斯抽采钻孔布置提供了合理指标。刘永茜等[5]揭示了煤体孔隙结构对瓦斯气体运移的“容阻效应”,为煤体内部瓦斯运移变化规律提供了参考。张飞等[6]研究了初始瓦斯压力、渗透率、抽排负压、钻孔孔径及抽排时间对瓦斯抽排有效半径的影响,为抽排参数优化提供了方向。

本文以白云山隧道为工程依托,研究钻孔直径、抽排时间、抽排负压及钻孔间距条件下岩体内部瓦斯的运移规律与压力分布特征,综合分析各参数对抽排效果的影响机制,确定白云山隧道瓦斯抽排最优参数,旨在为穿越页岩地层瓦斯隧道的钻孔抽排设计提供理论依据与技术支持。

2. 工程概况

本文以白云山隧道为依托工程,隧道采用分离式独立双洞设计,主洞净高 5.00 米,净宽 14.25 米,双洞间最小净距 16.00 米。左右洞起讫桩号分别为 ZK81 + 693~ZK88 + 135 和 YK81 + 705~YK88 + 109,长度 6442 米、6404 米,最大埋深 803.6 米,属深埋特长山岭隧道。

隧道穿越区域地形受岩性和构造控制明显。中部二叠系地层形成溶丘洼地中山地貌,高程 1300~1450 米,溶丘高 30~50 米。沿线最高点位于 K84 + 200 附近,高程 1433 米,最低点为出口,高程 593 米,高

差达 840 米。进口段位于原田坝煤矿内,地势平缓,坡度 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$;出口段位于右侧斜坡地带,坡度 $25^{\circ}\sim 40^{\circ}$,局部为陡坎。

隧道穿越三叠系、二叠系和志留系地层,岩性以灰岩、页岩为主。其中穿越二叠系上统龙潭组煤层及田坝煤矿采空区,瓦斯浓度较高;下统梁山组煤层段为高瓦斯工区,需加强瓦斯监测与防控。

3. 计算模型建立

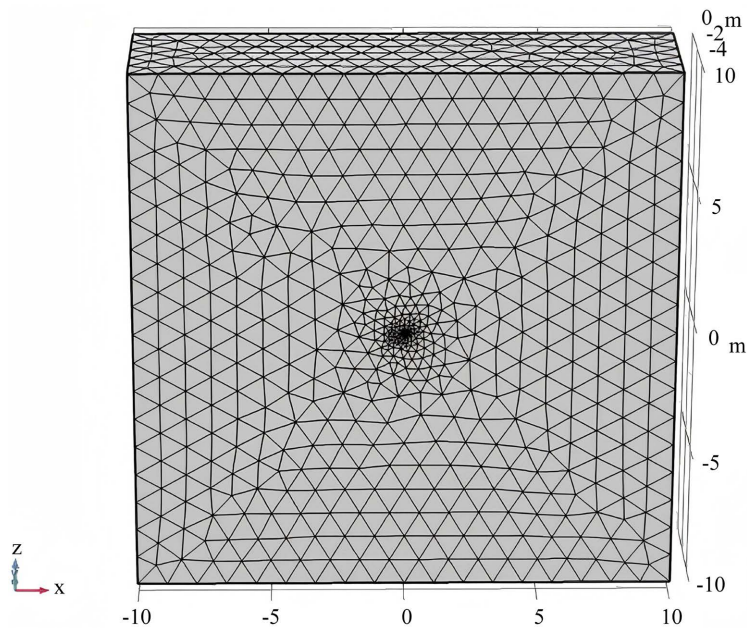


Figure 1. Meshing diagram of the single borehole calculation model
图 1. 单个钻孔计算模型网格划分图

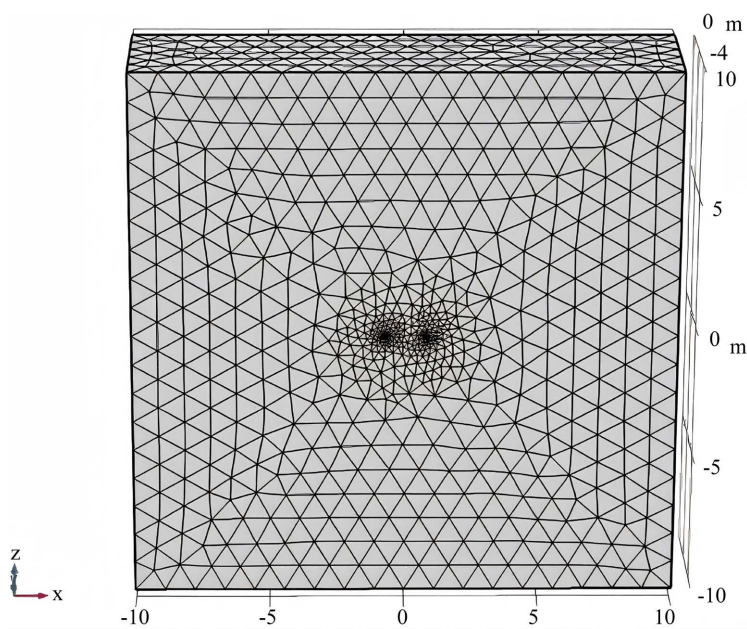


Figure 2. Grid division diagram of two drilling calculation models
图 2. 两个钻孔计算模型网格划分图

针对页岩地层隧道施工中瓦斯突出风险, 建立数值模型, 模拟分析钻孔抽排岩体内部瓦斯压力变化规律。通过研究不同钻孔抽排参数(钻孔直径、抽排时间、抽排负压、钻孔间距)对抽排效果的影响, 揭示瓦斯抽排参数与抽排效果的定量关系。模拟计算模型如图 1、图 2 所示, 钻孔设置于模型中心位置。沿 (20, 0, 0)至(-20, 0, 0)设置监测线, 用于记录瓦斯压力的动态分布。

4. 模拟结果分析

4.1. 不同钻孔直径参数优化

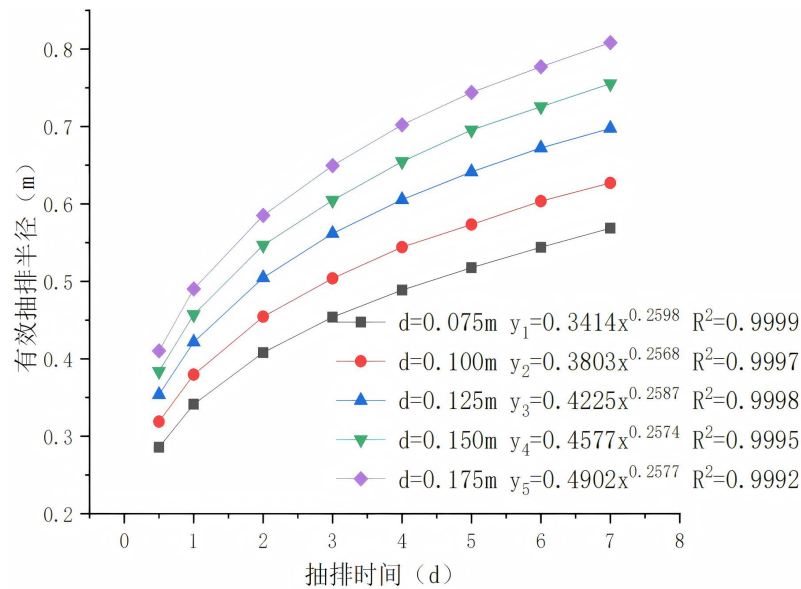


Figure 3. The effective drainage radius corresponding to the borehole diameter changes over time
图 3. 钻孔直径的有效抽排半径随时间变化

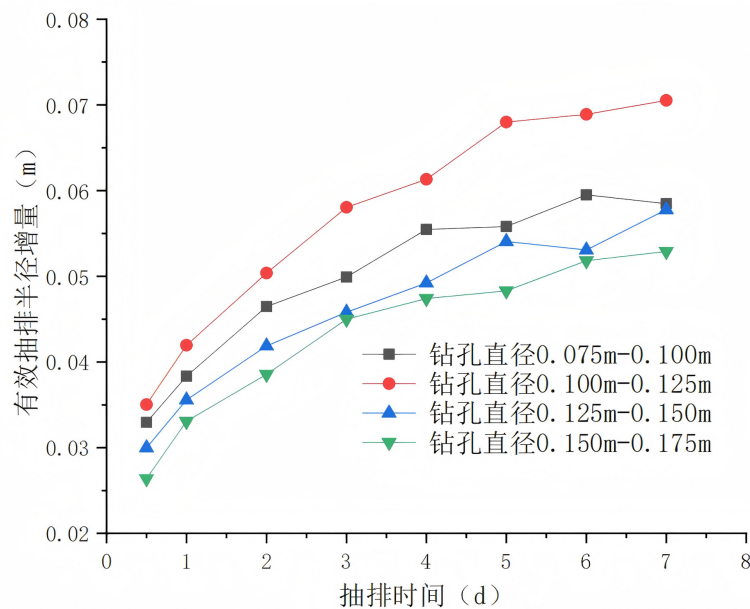


Figure 4. Increment in the effective drainage radius between drilling diameters over time
图 4. 钻孔直径之间随时间有效抽排半径增量

设置五种不同直径的钻孔来模拟高埋深页岩地层瓦斯隧道的抽排效果, 探讨不同钻孔直径下的抽排效果, 同结合数值模拟结果与现场实际工程情况选取最优直径参数。

如图 3、图 4 所示, 可以看到, 在同一时间下, 钻孔抽排的有效半径随着钻孔直径的增大而增大, 在 $d = 0.175$ m 时, 有效抽排半径最大。同时, 随着抽排时间的增加, 岩体内部不同直径之间有效抽排半径增量亦呈现增加趋势, 且增加趋势逐渐变缓。进一步计算五种不同钻孔直径之间的有效抽排半径增量, 发现在相同的抽排时间内, 不同钻孔直径之间有效抽排半径增量的变化幅度随着钻孔直径增加呈现出先增大后减小的态势。当钻孔直径从 $d = 0.100$ m 增加至 $d = 0.125$ m 时, 有效抽排半径的增量最大, 在抽排时间 7 d 时, 达到最大值 0.07 m; 而直径从 $d = 0.150$ m 增加至 $d = 0.175$ m 时, 增量最小。

在保持抽排负压 $P = 13$ kPa 不变下, 有效抽排半径随着钻孔直径的增大而增大, 当钻孔直径 $d = 0.175$ m 时的有效抽排半径为最大值, 理论上计算选取钻孔直径 $d = 0.175$ m 抽排效果最佳, 但过大的孔径会加剧隧道工程施工难度, 增大钻孔与掌子面岩体接触表面积, 从而提高瓦斯隧道施工风险, 威胁施工安全, 同时造价成本会显著增大, 故不宜选用钻孔直径 0.175 m。因此, 从瓦斯有效抽排半径增量方面考虑, 抽排钻孔直径由 $d = 0.100$ m 增加到 $d = 0.125$ m 时, 瓦斯有效抽排半径增量是所有孔径区间最大值, 这表明 0.100~0.125 m 区间能获得较高抽排效率。综合钻孔瓦斯抽排效果、隧道施工安全、工程实施难度及工程成本, 并结合白云山隧道页岩地层的实际情况, 选择钻孔直径 $d = 0.125$ m 为最优参数。

4.2. 不同抽排时间参数优化

在岩体内部瓦斯原始压力 1.02 MPa, 钻孔直径 $d = 0.125$ m, 抽排负压为 $P = 13$ kPa 条件下, 分析八种抽排时间下钻孔孔口附近的瓦斯压力分布规律。

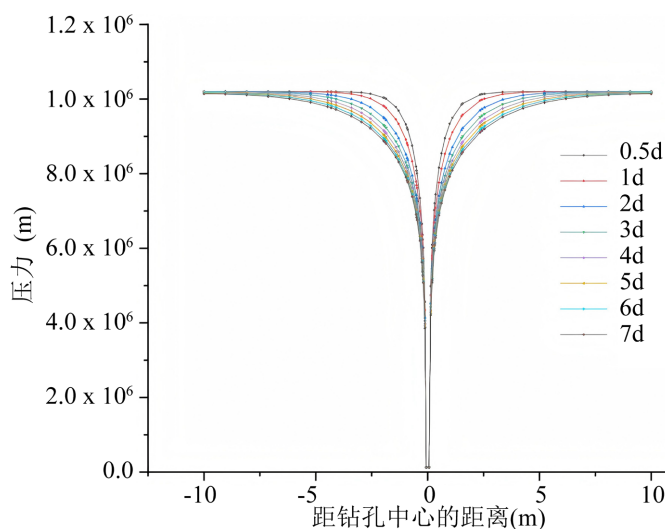


Figure 5. Gas pressure variation curve of monitoring line at different pumping times
图 5. 监测线不同抽排时间下瓦斯压力变化曲线图

如图 5 所示, 八种不同抽排时间曲线的瓦斯压力变化趋势基本一致: 测定点距离钻孔中心越近岩体内部瓦斯压力值越小, 距离中心越远的位置瓦斯压力值越大。这主要是由于瓦斯钻孔抽排过程中, 钻孔抽排负压与岩体内部原始瓦斯压力形成压力差, 驱使瓦斯向孔口周围岩体迁移。同时, 随着瓦斯抽排时间的增加, 钻孔周围岩体中的瓦斯压力呈现逐步下降的态势, 且越靠近钻孔位置处压力变化幅度越大, 瓦斯压力下降速率越快, 这表明钻孔抽排效果随时间的延长而更加显著。

根据有效抽排半径曲线图以及有效抽排半径增量曲线图(见图 6、图 7), 在钻孔直径 $d = 0.125$ m 和抽

排负压 $P = 13 \text{ kPa}$ 情况下, 抽排时间与有效抽排半径具有较好的拟合性, 拟合方程 $y = 0.4225x^{0.2587}$ 的相关性系数 $R^2 = 0.9999$ 接近于 1; 随着抽排时间增加, 有效半径增量变化呈现先增大后减小的态势, 在 0.5 d 到 2 d 区间内, 有效半径增量不断增大, 而在 2 d 之后有效半径增量持续减小; 同时, 随着瓦斯钻孔抽排时间增加, 钻孔有效半径逐渐增大, 但超过 4 d 后增速变缓, 最后趋于平稳。在页岩地层瓦斯隧道开挖过程中, 理论上钻孔抽排时间越长孔口周围岩体瓦斯压力越低, 且有效抽排半径也会增大, 因此, 计算模拟中瓦斯抽排时间越长对隧道越有利。但实际过程中过长的瓦斯抽排时间不利于隧道施工, 延长施工工期, 增加工程造价。且相关研究提出了以抽排半径变化速率确定最佳抽采时间[7], 所以在实际隧道项目中, 可以确定白云山隧道最优钻孔抽排时间为 2 d。

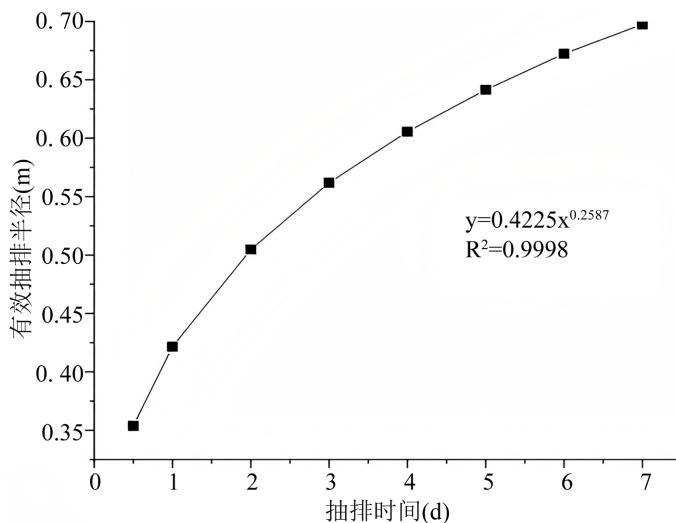


Figure 6. Curve graph of effective pumping radius for different pumping times
图 6. 不同抽排时间的有效抽排半径曲线图

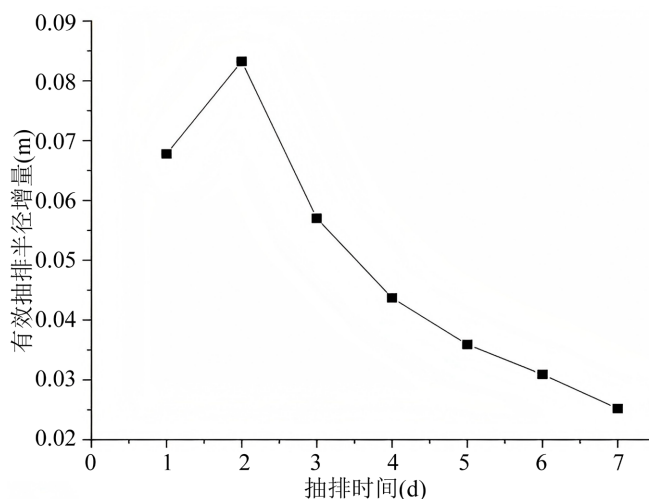


Figure 7. Incremental curve of effective pumping radius at different pumping times
图 7. 不同抽排时间的有效抽排半径增量曲线图

4.3. 不同抽排负压参数优化

当钻孔直径为 $d = 0.125 \text{ m}$ 、抽排时间为 2 d 时, 在不同抽排负压条件下时, 根据页岩内部瓦斯压力

的变化图(如图 8 所示), 在 13 kPa~41 kPa 负压条件下钻孔孔口周边岩体(煤)内部的瓦斯压力分布曲线基本一致。可以表明, 在此负压区间内, 抽排负压变化对页岩隧道瓦斯有效抽排半径的影响程度相对有限。

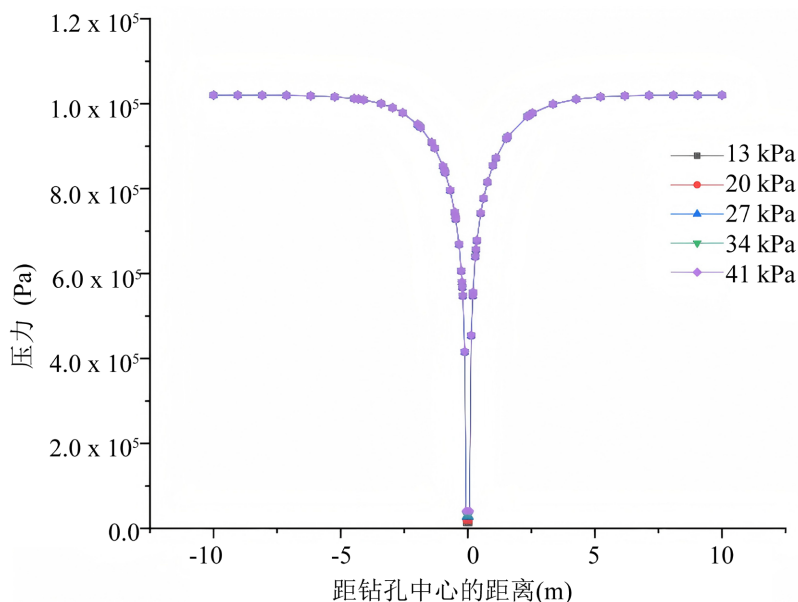


Figure 8. Curve diagram of gas pressure changes under different negative pressures in monitoring lines
图 8. 监测线不同抽排负压下瓦斯压力变化曲线图

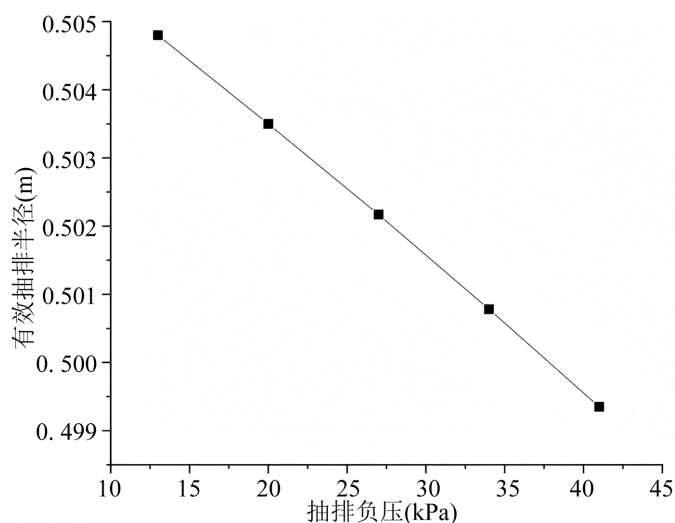


Figure 9. Curve of effective pumping radius under different pumping negative pressures
图 9. 不同抽排负压下的有效抽排半径曲线图

分析 13 kPa~41 kPa 抽排负压条件下有效抽采半径的变化规律(见图 9), 随着钻孔负压值的升高, 岩体内部瓦斯有效抽排半径呈现递减态势。当钻孔直径为 $d = 0.125$ m、抽排时间为 2 d 时, 13 kPa 与 41 kPa 两种负压条件下的抽排半径差值为 5.5 mm。常规情况下, 钻孔抽排负压值远远低于页岩内部初始瓦斯压力, 因此负压变化对页岩层瓦斯压力的影响很小。依照行业标准要求, 瓦斯钻孔抽排时钻孔孔口负压必须维持在 13 kPa 以上。基于上述分析, 结合现场工程特点, 抽排负压 $P = 13$ kPa 符合规范要求, 同时也符合工程可行性。

4.4. 钻孔间距参数优化

由于两个钻孔之间存在着明显的抽排叠加效应[8], 同一组钻孔之间区域的岩体瓦斯压力明显低于外围区域(见图 10)。随着钻孔间距逐步扩大, 钻孔之间区域的瓦斯压力呈现递增趋势。当钻孔间距处于 0.5~2.0 m 范围内时, 连线区域瓦斯压力均能控制在 0.74 MPa 以内; 但当间距增至 2.5 m 时, 该区域最高残余瓦斯压力回升至约 0.79 MPa, 未能达到 0.74 MPa 以下的控制标准。

通过分析瓦斯抽排有效半径云图(见图 11), 在两孔同时抽排过程中存在明显的相互叠加效应。随着两个钻孔距离缩短, 这种效应会显著增强, 在相同时间内岩层内部瓦斯压力降低速率越快。假设以残余瓦斯压力 0.74 MPa 等值面作为瓦斯钻孔抽排临界面, 其空间分布特征会随两个钻孔之间的距离发生变化: 当两孔之间的距离在 0.5~1.5 m 范围内时, 等值面会围绕两个钻孔呈现近似圆柱形形状分布; 但当两孔之间的距离增大至 2.5 m 时, 等值面将分裂为两个独立的圆柱形区域, 并在两孔之间形成未受抽排影响的空白区。基于施工安全性综合考量, 白云山隧道在页岩层段实施瓦斯抽排作业时, 采用 1.5 米的孔距设计符合技术合理性。

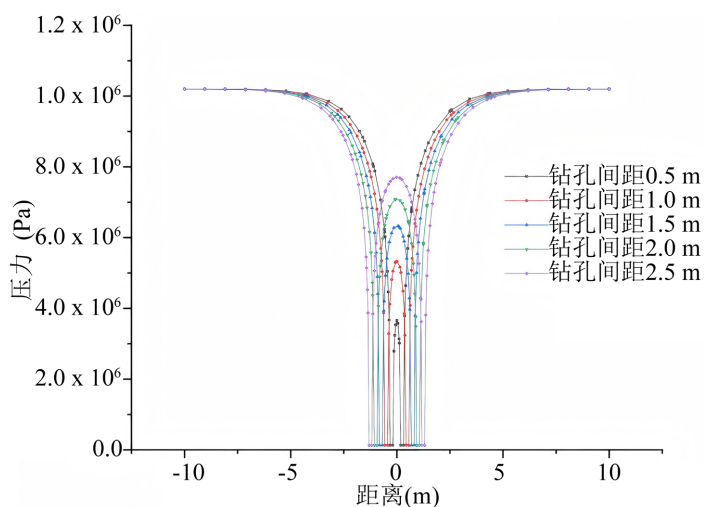
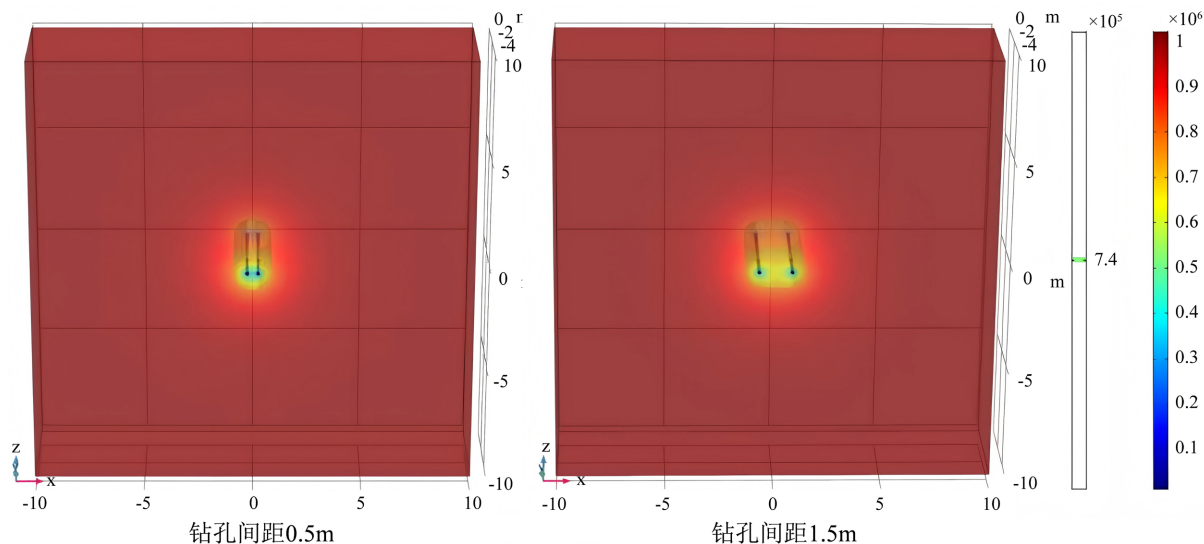


Figure 10. Gas pressure distribution curve of monitoring line at different drilling intervals
图 10. 监测线不同钻孔间距下瓦斯压力分布曲线图



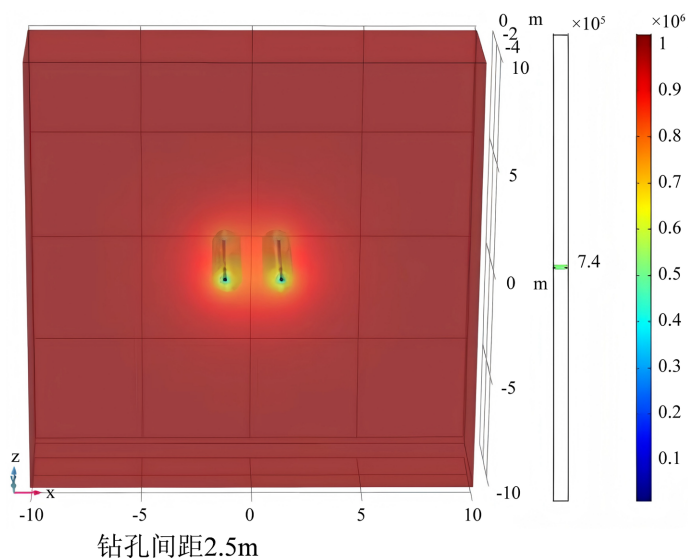


Figure 11. Stereoscopic cloud map of effective gas drainage radius at different drilling intervals

图 11. 不同钻孔间距下瓦斯有效抽排半径立体云图

5. 总结

本文以深埋特长山岭隧道 - 白云山隧道为研究对象, 针对其穿越的页岩地层(主要岩性为灰岩、页岩, 局部含煤层)在施工中面临的瓦斯突出风险, 对瓦斯钻孔抽排参数进行了优化研究。基于白云山隧道特定的地质条件和模拟边界条件得出以下结论, 其适用性需结合具体工程的地质与工况进行评估。

(1) 在瓦斯钻孔抽排过程中, 有效抽排半径随孔径增大而增大, 但有效抽排半径增量呈现先增大后减小的趋势, 在 0.100~0.125 m 区间增量最大, 抽排效率最高; 0.150~0.175 m 区间增量最小。尽管直径为 0.175 m 时理论抽排半径最大, 但综合考虑施工安全风险与成本, 选择直径 $d = 0.125$ m 为本工程最优参数。同时, 钻孔直径对地层初始瓦斯压力及岩体渗透率可能较为敏感, 若地质条件变化导致瓦斯涌出量差异显著, 需重新评估孔径选择。

(2) 抽排时间与有效抽排半径符合幂函数方程 $y = 0.4225x^{0.2587}$, 相关系数接近于 1。有效半径增量在抽排 2 天时达到峰值, 之后增速显著放缓。因此, 从抽排效率变化率与工期成本平衡考虑, 确定 2 天为最优抽排时间。抽排时间受初始瓦斯压力及渗透率影响显著, 不同地层条件下最优抽排时间仍需通过现场监测或数值模拟重新确定。

(3) 在 13~41 kPa 负压范围内, 抽排负压的减小与增大对瓦斯压力及有效抽排半径影响微弱, 抽排时间为 2 d, 抽排负压 13 kPa 与 41 kPa 有效半径差值仅 5.5 mm。根据行业规范要求, 13 kPa 抽排负压即可满足工程需求。同时, 抽排负压在低渗透性地层中影响有限, 若地层渗透性较强, 负压变化可能对抽排效果产生影响较大。

(4) 双孔抽排存在明显叠加效应, 间距越小, 两孔间区域瓦斯压力降低越快。当钻孔间距为 0.5~1.5 m 时, 两孔之间区域的岩体内部瓦斯压力位于 0.74 MPa 安全标准以下; 间距 2.5 m 时瓦斯压力位于标准以上, 不符合控制标准。从施工安全性考虑, 推荐采用 1.5 m 钻孔间距。钻孔间距受叠加效应影响, 如果地层渗透性差异较大, 叠加效应的强度与范围也将发生变化。

基于以上结论, 在页岩地层瓦斯隧道施工中, 应综合考虑地质条件、施工进度与成本控制, 合理优化抽排参数, 避免盲目追求高效率而选择高负压或大孔径, 造成资源浪费。建议后续研究结合现场监测数据, 对抽排参数进行优化, 提升瓦斯防治的精准性与经济性。

参考文献

- [1] 晏宏坤. 高压煤层隧道瓦斯抽排效果优化研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(5): 10-13.
- [2] 徐三民. 确定瓦斯有效抽放半径的方法探讨[J]. 煤炭工程师, 1996(3): 43-44+18+49.
- [3] 赵长闯, 李增华, 马新青, 等. 钻孔瓦斯涌出量确定排放半径影响因素分析[J]. 煤炭技术, 2009, 28(9): 93-95.
- [4] 林柏泉, 宋浩然, 杨威, 等. 基于煤体各向异性的煤层瓦斯有效抽采区域研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(6): 139-145.
- [5] 刘永茜, 张书林, 舒龙勇. 吸附-解吸状态下煤层气运移机制[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 12-18.
- [6] 张飞, 尚玮炜, 罗华贵, 等. 煤层钻孔瓦斯抽采有效半径影响因素分析[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(2): 137-142.
- [7] 齐黎明, 祁明, 陈学习. 抽采钻孔周围煤层瓦斯压力分布理论分析及应用[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(7): 102-108.
- [8] 谢彬彬. 穿越页岩地层隧道瓦斯综合防治关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.