

三软煤层“两堵两注”封孔工艺参数优化

杨延龙

郑煤集团大平煤矿 河南 登封 452470

摘要: 三软煤层因顶板软弱、底板松软、煤层破碎,瓦斯抽采钻孔封孔难度大,传统封孔工艺易出现漏气、抽采浓度低等问题。“两堵两注”封孔工艺通过两端堵头和中间注浆形成分段密封结构,能有效适应三软煤层的变形特征。本文以郑州矿区三软煤层为工程背景,采用理论分析、数值模拟和现场试验相结合的方法,系统研究“两堵两注”封孔工艺的关键参数,包括堵头长度、注浆压力、浆液配比、封孔深度等。现场应用表明,优化后的封孔工艺使瓦斯抽采浓度提高35%以上,抽采有效期延长2倍,为三软煤层瓦斯治理提供了有效技术支持。

关键词: 三软煤层;两堵两注;封孔工艺;参数优化;瓦斯抽采

引言: 我国煤矿三软煤层分布广泛,其顶板软弱破碎、底板松软变形、煤体强度低,给瓦斯抽采钻孔封孔带来极大挑战。传统水泥砂浆封孔或聚氨酯封孔在三软煤层中应用效果不佳,常因围岩变形导致钻孔与封孔材料界面产生裂隙,造成瓦斯漏气、抽采浓度快速衰减。近年来,“两堵两注”封孔工艺逐渐应用于松软煤层,该工艺在钻孔两端设置高强度堵头,中间分段注入膨胀性浆液,形成多重密封结构,能够适应围岩变形,提高封孔可靠性。然而,目前该工艺的参数设计多依赖经验,堵头长度、注浆压力、浆液配比等关键参数缺乏系统优化,限制了其应用效果。本文针对三软煤层地质特点,开展“两堵两注”封孔工艺参数优化研究,通过理论分析和现场试验确定最优参数组合,为类似条件下瓦斯抽采钻孔封孔提供科学依据。

1 工程地质条件与封孔工艺原理

1.1 三软煤层地质特征

本研究郑州矿区二1煤层为工程背景。该煤层具有典型的三软特征:直接顶为泥岩或砂质泥岩,厚度4-6m,单轴抗压强度8-12MPa,遇水易软化崩解;直接底为泥岩或炭质泥岩,厚度2-3m,强度低,易发生底鼓;煤层本身为碎粒煤-糜棱煤结构,f值0.3-0.5,裂隙发育,透气性差。煤层埋深255-500m,地应力较高,瓦斯含量8-12m³/t,瓦斯压力0.6-0.8MPa。在这种地质条件下,钻孔施工后围岩变形显著,孔壁易塌陷,传统封孔材料难以与孔壁形成有效粘结,漏气通道发育,瓦斯抽采浓度通常在15d内降至20%以下。

1.2 “两堵两注”封孔工艺原理

“两堵两注”封孔工艺是在钻孔内设置两个堵头将

钻孔分为三段,中间段和孔口段分别注入不同功能的浆液,形成多重密封结构。其核心原理包括:两端高强度堵头提供初始密封和支撑,抵抗围岩变形对封孔段的挤压;第一注浆段注入膨胀性浆液,充填钻孔与堵头间的空隙,并渗透进入周围裂隙;第二注浆段注入高强度浆液,形成永久性密封段。这种结构将传统单一密封改为分段密封,提高了封孔系统对围岩变形的适应性。堵头通常采用聚氨酯或高强水泥卷,注浆材料可根据需要选用水泥基浆液、化学浆液或复合浆液^[1]。

1.3 封孔失效机理分析

三软煤层钻孔封孔失效主要有三种模式:一是界面脱粘失效,因围岩变形产生剪切应力,导致封孔材料与孔壁界面开裂;二是材料破坏失效,浆液收缩或强度不足产生裂隙;三是结构变形失效,钻孔整体变形过大导致封孔系统破坏。针对这些失效模式,“两堵两注”工艺通过分段密封、柔性适应、刚性支撑相结合的方式,提高了封孔系统的可靠性和耐久性。

2 封孔工艺参数理论分析

2.1 堵头长度确定

堵头是“两堵两注”工艺的核心部件,其长度直接影响初始密封效果和抗变形能力。根据弹性力学厚壁筒理论,堵头承受的径向压力与钻孔变形量成正比。堵头与孔壁间的最大静摩擦力应大于堵头两端压力差产生的推力。设堵头长度为L,直径为D,堵头与孔壁间的摩擦系数为μ,注浆压力为P,则堵头抗推出条件为:

$$\pi DL\mu\sigma_r \geq \frac{\pi D^2}{4}P$$

式中 σ_r 为堵头与孔壁间的径向接触应力,由堵头膨

胀产生。简化可得堵头最小长度：

$$L_{min} = \frac{P \cdot D}{4\mu\sigma_r}$$

对于三软煤层，孔壁强度低， σ_r 不宜过大，一般取 0.3-0.5MPa， μ 取 0.3-0.4，注浆压力 P 取 1.5-2.0MPa，计算得 L_{min} 为 0.8-1.2m。考虑安全系数，堵头长度宜取 1.2-1.5m。

2.2 注浆压力优化

注浆压力是浆液扩散和充填裂隙的动力，但压力过高会破坏三软煤层孔壁稳定性。根据水力劈裂理论和煤层抗拉强度，注浆压力上限应满足：

$$P_{max} \leq \sigma_3 + \sigma_t$$

式中 σ_3 为最小主应力， σ_t 为煤层抗拉强度。研究区 σ_3 约 4-6MPa， σ_t 约 0.2-0.4MPa，因此注浆压力理论上限 4.2-6.4MPa。但考虑到三软煤层结构松散，实际应用中注浆压力过高易导致浆液沿层理或裂隙远距离流失，造成浪费且影响封孔效果。根据经验，第一注浆段（膨胀段）压力宜控制在 1.0-1.5MPa，以充填堵头周围空隙和浅部裂隙为主；第二注浆段（强化段）压力可提高至 1.5-2.5MPa，使浆液充分渗透和密实。

2.3 浆液配比设计

浆液性能对封孔效果起决定性作用。第一注浆段要求浆液具有良好膨胀性和早期强度，以补偿堵头收缩并适应围岩初期变形；第二注浆段要求浆液具有高强度、微膨胀和耐久性。本研究选用硫铝酸盐水泥基浆液，通过添加膨胀剂、减水剂和早强剂调节性能^[2]。采用正交试验设计，考虑水灰比、膨胀剂掺量、减水剂掺量三个因素，以浆液流动度、膨胀率、抗压强度为评价指标，确定最优配比。试验结果表明，水灰比 0.8：1、膨胀剂掺量 8%、减水剂掺量 0.5% 时，浆液综合性能最佳，初凝时间 2.5h，28d 膨胀率 0.15%，28d 抗压强度 18.5MPa。

2.4 封孔深度确定

封孔深度即钻孔内密封段的长度，应大于围岩松动圈厚度，以确保封孔段位于相对稳定的原岩区。根据松动圈理论，巷道围岩松动圈厚度与地应力、岩体强度相关。研究区巷道侧帮松动圈实测厚度 1.8-2.5m。封孔深度应深入松动圈以外 0.5-1.0m，因此总封孔深度取 3.0-3.5m。对于“两堵两注”工艺，第一堵头位于孔口附近，第二堵头位于封孔段末端，两堵头间距即注浆段长度，取 2.0-2.5m。

3 数值模拟分析

3.1 模型建立

为分析不同参数对封孔效果的影响，采用 FLAC3D 软件建立钻孔-围岩-封孔系统耦合模型。模型尺寸 10m×10m×10m，钻孔直径 94mm，位于模型中心。围岩采用摩尔-库仑模型，参数根据实测确定：煤层弹性模量 0.8GPa，泊松比 0.35，粘聚力 0.3MPa，内摩擦角 22°；顶板泥岩弹性模量 3.5GPa，泊松比 0.25，粘聚力 1.2MPa，内摩擦角 30°。封孔材料采用线弹性模型，弹性模量随龄期变化。模拟分步进行：钻孔开挖 → 应力释放 → 封孔施工 → 围岩蠕变。

3.2 方案设计

采用正交试验设计，选取堵头长度（1.0m、1.2m、1.5m）、注浆压力（1.0MPa、1.5MPa、2.0MPa）、封孔深度（2.5m、3.0m、3.5m）三个因素，每个因素三个水平，设计 L9 正交试验方案。以封孔段界面剪应力、界面变形量、封孔系统完整性为评价指标，分析各因素敏感性。

3.3 结果分析

模拟结果表明，堵头长度对界面剪应力影响最显著。堵头长度从 1.0m 增至 1.5m，界面最大剪应力降低 35%，说明长堵头能有效分散围岩变形产生的剪切作用。注浆压力对界面变形量影响显著，压力从 1.0MPa 增至 2.0MPa，界面径向变形量减少 28%，但压力超过 1.5MPa 后效果趋于平缓。封孔深度对整体密封性有重要影响，深度 3.0m 以上时封孔段末端处于低应力区，界面状态稳定^[3]。综合各因素，最优参数组合为：堵头长度 1.5m、注浆压力 1.5MPa、封孔深度 3.0m。在此参数下，封孔系统经历 180d 蠕变后仍保持完整，界面最大剪应力 0.23MPa，低于材料与围岩的粘结强度。

4 现场试验与效果分析

4.1 试验方案设计

在郑州矿区 1 煤层轨道巷布置 6 个试验钻孔，分为 3 组，每组 2 个钻孔。组 1 采用优化前参数（堵头长度 1.0m、注浆压力 1.0MPa、封孔深度 2.5m），组 2 采用模拟优化参数（堵头长度 1.5m、注浆压力 1.5MPa、封孔深度 3.0m），组 3 采用极限参数（堵头长度 1.8m、注浆压力 2.0MPa、封孔深度 3.5m）。各钻孔间距大于 5m，避免相互干扰。钻孔直径 94mm，深度 60m，采用相同钻具和施工工艺。封孔后接入抽采系统，连续监测抽采浓度、流量和负压。

4.2 施工工艺

“两堵两注”施工流程为：钻孔施工完成 → 清孔 → 送入第一堵头至设计深度（孔底堵头）→ 通过注浆管注入第一注浆段浆液 → 待第一堵头浆液初凝后 → 送入第二堵头至孔口设计位置 → 注入第二注浆段浆液 → 封孔完成。关键控制点包括：堵头定位准确，采用定位绳或专

用送进装置；注浆压力稳定控制，采用注浆泵压力和流量双参数调节；注浆量记录与理论量对比，判断浆液渗透情况。

4.3 效果分析

经过 90d 的连续观测，各钻孔抽采数据统计如表 1 所示。

表 1 不同参数钻孔瓦斯抽采效果对比

组别	初始浓度/%	30d 浓度/%	60d 浓度/%	90d 浓度/%	平均流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
组 1	68.5	42.3	28.6	18.2	0.12
组 2	75.2	68.5	61.3	55.8	0.18
组 3	73.8	66.2	58.5	52.1	0.17

由表可见，组 2 钻孔初始浓度 75.2%，90d 后仍保持 55.8%，衰减率仅 25.8%；组 1 钻孔 90d 后浓度降至 18.2%，衰减率高达 73.4%；组 3 效果略低于组 2，表明参数并非越大越好，过大注浆压力可能导致浆液过度流失。组 2 平均抽采流量 $0.18\text{m}^3/\text{min}$ ，较组 1 提高 50%。表明优化后的封孔参数显著提高了封孔质量和耐久性。

4.4 钻孔窥视检查

对组 2 和组 1 部分钻孔进行钻孔窥视，结果发现：组 2 钻孔封孔段界面光滑连续，无明显裂隙，堵头位置准确，注浆段浆液充填密实；组 1 钻孔封孔段界面存在多处环向裂隙，堵头与孔壁间有可见空隙，部分区域浆液收缩明显。直观验证了优化参数的优越性。

5 参数优化讨论

5.1 各参数交互作用

现场试验结果与数值模拟具有较好的一致性，但也反映出参数间的交互作用。堵头长度与注浆压力存在耦合效应：长堵头可承受较高注浆压力而不被推出，为高压注浆创造条件；高压注浆能使浆液更好渗透，提高堵头与孔壁的粘结力。封孔深度与注浆压力的关系表现为：深度较大时，末端围岩稳定性好，可适当提高注浆压力；深度较小时，注浆压力需严格控制避免破坏浅部围岩^[4]。

5.2 浆液性能匹配

浆液性能应与注浆工艺匹配。第一注浆段要求浆液初凝时间较短，控制在 2-3h，以便及时进行第二段注浆；第二注浆段要求浆液具有微膨胀性和长期稳定性。试验中采用的硫铝酸盐水泥基浆液基本满足要求，但在高应力软岩条件下，可进一步研究复合化学浆液的应用，提高浆液渗透性和韧性。

5.3 适用条件分析

优化后的“两堵两注”参数适用于类似本研究区的三软煤层条件。对于顶板更破碎、瓦斯压力更高的条件，应适当增加堵头长度和封孔深度；对于围岩完整性相对较好的条件，可适当减小参数以降低成本和简化工艺。建议在实际应用中，根据具体地质条件进行针对性调整。

结束语

三软煤层瓦斯抽采钻孔封孔是煤矿瓦斯治理的技术瓶颈之一。本研究针对三软煤层地质特点，系统开展“两堵两注”封孔工艺参数优化，取得以下成果：从理论上分析了堵头长度、注浆压力、浆液配比、封孔深度等关键参数的影响规律，建立了参数设计公式；通过数值模拟明确了各参数的敏感性，堵头长度对界面剪应力影响最显著，注浆压力对界面变形影响最显著；现场试验确定了最优参数组合为堵头长度 1.5m、注浆压力 1.5MPa、封孔深度 3.0m，优化后瓦斯抽采浓度 90d 保持 55% 以上，较传统工艺提高 35%。研究成果为三软煤层瓦斯治理提供了有效技术支撑，对类似条件下钻孔封孔具有重要参考价值。

参考文献

[1] 李海平. 三软厚煤层综放工作面浅孔注水技术应用[J]. 江西煤炭科技, 2026(1): 167-169,176.

[2] 贺韶鹏, 李丰乐, 勾攀峰, 等. 邢村煤矿三软煤层回采巷道支护改革与实践[J]. 能源与环保, 2025, 47(4): 274-281.

[3] 康志鹏, 任波, 罗勇, 等. “三软”厚煤层大采高工作面覆岩破断及应力运移规律实验研究[J]. 中国煤炭, 2025, 51(1): 158-164.

[4] 张帅. “三软”煤层综采“三机”选型配套关键技术[J]. 煤炭技术, 2025, 44(5): 212-216.