

厚煤层破碎顶板沿空留巷静态胀裂切顶卸压技术研究

王金红

中煤华晋集团韩咀煤业有限公司

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8943

[摘要] 针对厚煤层破碎顶板沿空留巷围岩变形严重问题，以韩咀煤矿 32205 工作面为背景，研究了静态胀裂切顶卸压关键技术参数。室内试验确定静态胀裂剂最佳水灰比 1:4，20h 体积膨胀率 2.81 倍；优选钻孔直径 60mm，最大膨胀压力 88.6MPa。基于断裂力学确定钻孔间距 1.2m，处理高度 12.5m，超前钻孔距离 50~80m，封孔长度 ≥ 1.0 m。现场试验表明：锚索应力 190~219kN，锚杆最大 137kN；顶底板最大位移 333mm，两帮 275mm，切顶处完全垮落，无悬顶。该技术为类似条件沿空留巷提供了参考。

[关键词] 静态胀裂；切顶卸压；沿空留巷；破碎顶板

Research on Static Expansion–Fracturing and Top–Cutting Pressure Relief Technology for Retained Goes in Thick Coal seams with Fractured Roof

Wang Jinhong

Hanju Coal Industry Co., Ltd., Zhongmei Huajin Group

[Abstract] To address severe surrounding rock deformation in retained goes within thick coal seams with fractured roofs, this study was conducted at the 32205 working face of Hanju Coal Mine to determine key technical parameters for static expansion–fracturing and top–cutting pressure relief. Laboratory tests identified the optimal water–cement ratio for the expansion agent as 1:4, achieving a volume expansion rate of 2.81 times after 20 hours; the preferred borehole diameter was 60 mm, with a maximum expansion pressure of 88.6 MPa. Based on fracture mechanics principles, the recommended parameters were set as: borehole spacing of 1.2 m, treatment height of 12.5 m, advance drilling distance of 50 – 80 m, and sealing length ≥ 1.0 m. Field tests demonstrated that anchor cable stress ranged from 190 to 219 kN, with maximum anchor rod stress reaching 137 kN; maximum roof and floor displacement was 333 mm, while side wall displacements were 275 mm; complete collapse occurred at the cutting point without any suspended roof sections. This technology provides valuable reference for similar retained goes under comparable conditions.

[Key words] static expansion and cracking; roof cutting for pressure relief; longitudinal tunneling; fractured roof

引言

沿空留巷是提高资源回收率的重要技术^[1-2]。但在深部厚煤层破碎顶板条件下，传统爆破切顶和水力压裂存在风险高、可控性差等问题^[3-4]。静态胀裂技术无震动、无飞石、高可控性^[5-7]，但针对深部破碎顶板的工艺参数研究不足。本文以 32205 工作面为背景，通过室内试验和理论分析优化胀裂参数，并通过现场监测验证效果。

1. 工程概况

32205 工作面主采 2#煤层，厚 6.39~7.82m（平均 6.88m），倾角 0°~13°。直接顶为泥岩（1.83~3m，平均 2.43m），节理发育、自稳差；老顶为 K8 中细砂岩（2.73~8.4m，平均 6.88m）。埋深 480m。沿空留巷段原支护下变形严重，需采用切顶卸压。

静态胀裂剂为 SCA 型，主要成分：氧化钙（ $\geq 75\%$ ）、硅

酸盐水泥（10%~15%）、复合外加剂（5%~10%）。原理：水化反应产生 70MPa 以上膨胀力，使岩体受拉剪破裂，悬顶垮落。其力学机制如图 1 所示^[8]。

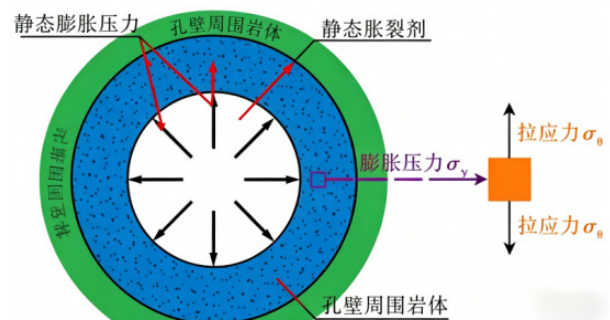


图 1 静态胀裂切顶卸压机理

2. 静态胀裂切顶卸压方案设计

2.1 最佳水灰质量比试验

制备水灰比 1:2、1:3、1:4、1:5、1:6 试样, 测定 8h 和 20h 体积膨胀率。由表 1、表 2 可知: 水灰比 1:4 时 8h 膨胀率 1.66 倍、20h 膨胀率 2.81 倍, 均为最大值。故确定最佳水灰

表 1 不同水灰比试样 8h 后膨胀参数

水灰质量比	初始混合质量/g	初始密度/(g·mL ⁻¹)	初始体积/mL	8h 后密度/(g·mL ⁻¹)	8h 后体积/mL	体积增量/mL	体积增长率/%
1:2	1000	1.17	862.08	0.47	2172.42	1310.35	1.53
1:3	1000	1.43	704.24	0.56	1816.92	1112.69	1.59
1:4	1000	1.81	555.57	0.69	1472.23	916.68	1.66
1:5	1000	1.84	540.55	0.74	1367.58	827.04	1.54
1:6	1000	2.02	497.52	0.83	1218.92	721.38	1.46

表 2 不同水灰比试样 20h 后膨胀参数

水灰质量比	初始混合质量/g	初始密度/(g·mL ⁻¹)	初始体积/mL	20h 后密度/(g·mL ⁻¹)	20h 后体积/mL	体积增量/mL	体积增长率/%
1:2	1000	1.29	781.26	0.36	2881.26	2101.00	2.69
1:3	1000	1.52	662.26	0.42	2466.26	1805.00	2.73
1:4	1000	1.81	555.57	0.48	2113.57	1559.00	2.81
1:5	1000	2.06	487.81	0.57	1800.81	1314.00	2.68
1:6	1000	2.31	434.79	0.68	1451.79	1018.00	2.35

表 3 不同钻孔直径下的膨胀压力 (单位: MPa)

时间/h	Φ20mm	Φ30mm	Φ45mm	Φ60mm	Φ75mm
2	40.3	52.5	62.9	70.9	75.4
4	42.8	53.9	64.2	74.6	76.2
6	44.6	54.8	65.6	76.8	72.9
8	45.3	55.4	68.4	82.6	80.5
10	45.2	55.5	70.3	84.8	83.3
12	44.3	55.4	69.8	88.6	80.2

2.3 钻孔关键参数设计

2.3.1 裂隙扩展模型

静态胀裂剂作用下, 钻孔周围裂隙分为先期裂纹和后期扩展裂纹, 如图 2 所示^[9]。

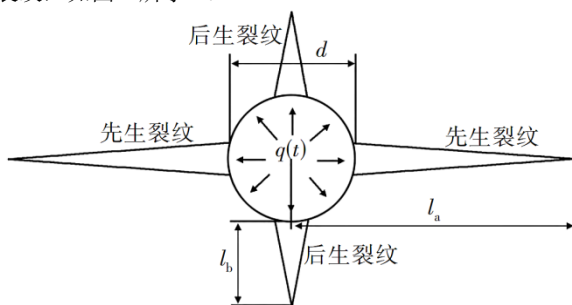


图 2 静态胀裂剂作用下钻孔的裂隙扩展模型

当裂纹长度远大于钻孔直径时, 可将裂纹上下表面等效为均布力 $p = \lim_{r \rightarrow 0} 2q(t)d$, 此时裂纹尖端的应力强度因子为^[10]:

$$K_I = P \sqrt{\frac{2R}{\pi}} \quad (1)$$

$$K_{II} = 0 \quad (2)$$

式中: K_I 为 I 型 (张开型) 裂纹尖端的应力强度因子, 单位: $\text{N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ (或 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), 表征裂纹尖端应力场强度; K_{II} 为 II 型 (滑开型) 裂纹尖端的应力强度因子, 此处为 0 表示无剪切分量; p 为裂纹面上作用的等效均布压力, 单位: MPa, 由

比为 1:4。

2.2 钻孔直径优选

以水灰比 1:4 配置胀裂剂, 测试 Φ20~75mm 钻孔的膨胀压力。由表 3 可知: 随直径增大, 压力先升后降, Φ60mm 时达最大值 88.6MPa。故现场钻孔直径选用 60mm。

静态胀裂剂膨胀产生, $p = \lim_{r \rightarrow 0} 2q(t)d$; R 为裂纹扩展半径 (从钻孔中心到裂纹尖端的距离), 单位: mm 或 m; r 为裂纹面上任意一点到钻孔中心的距离, 单位: mm; $q(t)$ 为随时间变化的静态胀裂剂膨胀压力分布函数, 单位: MPa; d 为钻孔直径, 单位: mm; t 为时间, 单位: h (小时)。

2.3.2 钻孔间距确定

基于断裂力学^[11], 裂纹扩展半径计算公式:

$$R = \frac{\pi}{2} \left(\frac{p}{0.1\sigma_c} \right)^2 \quad (3)$$

式中: R 为裂纹的理论最大扩展半径, 单位: m; p 为等效均布压力, 单位: MPa; 0.1 为经验系数, 源自断裂韧度与抗压强度的统计关系。

取顶板单轴抗压强度 69.5MPa, 膨胀压力 88.6MPa, 考虑 0.9 衰减系数, 计算得 $R \approx 0.6\text{m}$ 。钻孔间距取 $2R=1.2\text{m}$ 。

2.4 顶板处理高度与超前距离

根据顶板岩层厚度及垮落要求, 确定顶板处理高度 12.5m。为确保切顶效果与工作面推进衔接, 根据推进速度约 4m/d 及胀裂剂完全反应时间约 24h, 确定超前钻孔距离为 50~80m。

3. 井下作业面静态胀裂切顶卸压方案

由于井下预裂区域处于三向应力状态, 单一钻孔缺少自由面, 需设置辅助孔 (不装药) 以引导裂纹扩展。具体布置: 沿巷道轴线方向, 在顶板采帮侧 800mm 处布置一排钻孔, 孔径 60mm, 孔深 12.5m, 孔间距 1.2m, 钻孔垂直于顶板。采用间隔

装药方式，每两个装药孔之间设一个辅助孔用于导向和观测。
钻孔布置如图3所示。

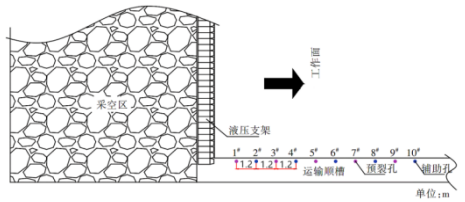
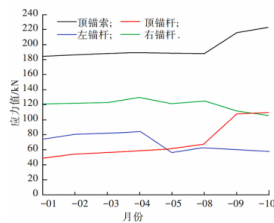
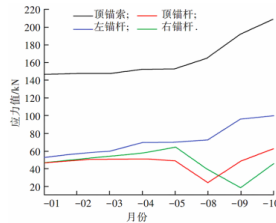


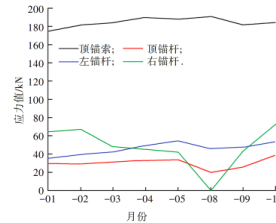
图3 井下作业面钻孔布置结构示意图



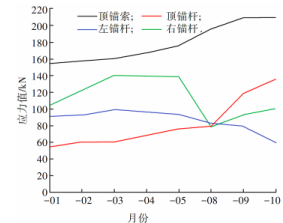
(a) 拐点位置监测点



(b) 100m 位置监测点



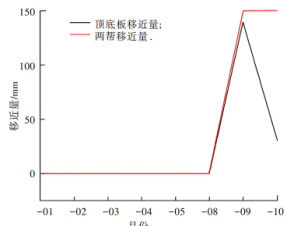
(c) 200m 位置监测点



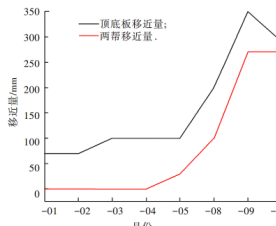
(d) 300m 位置监测点

图4 不同监测点位置的锚杆、锚索应力变化曲线

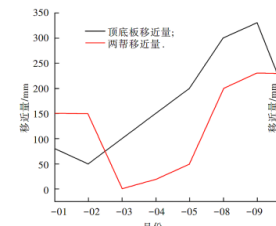
4.2 围岩变形监测



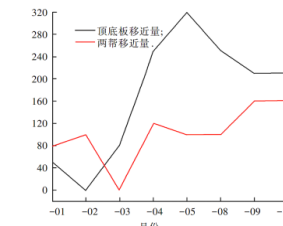
(a) 拐点位置监测点



(b) 100m 位置监测点



(c) 200m 位置监测点



(d) 300m 位置监测点

图5 不同监测点位置的围岩变化曲线

同期监测巷道位移：拐点处前9个月无变形，之后缓慢变形，最大155mm；100m处变形逐步增大，两帮最大位移275mm，顶底板245mm；200m处顶底板最大333mm，两帮235mm；300m处顶底板318mm，两帮156mm。所有变形量未超出设计允许值，切顶处顶板完全垮落并充满端头，无悬顶现象。

5. 结论

(1) 通过室内试验确定了静态胀裂剂的最佳灰水质量比为1:4，此时20h体积膨胀率达2.81倍；优选钻孔直径为60mm，可获得最大膨胀压力88.6MPa。

(2) 基于断裂力学理论，推导了裂纹扩展半径计算公式，确定钻孔间距为1.2m，顶板处理高度为12.5m，超前钻孔距离50~80m，封孔长度 ≥ 1.0 m，形成了适用于厚煤层破碎顶板的静态胀裂切顶卸压工艺参数体系。

(3) 现场工业性试验表明，采用该工艺后，锚索应力稳定在190~219kN，锚杆应力最大137kN，均处于安全区间；巷道顶底板最大位移量333mm，两帮最大位移量275mm，围岩变形得到有效控制，切顶处顶板完全垮落，无悬顶现象，验证了该技术的可行性与可靠性，为类似条件沿空留巷施工提供了技术参考。

【参考文献】

- [1]徐硕. 基于静止无功发生器的配电网综合补偿研究[D]. 沈阳农业大学, 2019.
- [2]樊占文. 坚硬顶板高压水力切顶技术的切顶角度力学机制分析[J]. 煤炭技术, 2024, 43(3): 52-55.

4. 应用情况分析

4.1 锚杆、锚索应力监测

在32205主运顺槽布置监测点(拐点、100m、200m、300m)，连续10个月监测。结果显示：锚索应力高于锚杆应力，呈逐渐上升趋势，最终稳定在190~219kN之间。锚杆应力总体增加，拐点处从48.6kN增至110kN，300m处从54.5kN增至137kN。左帮锚杆应力波动较小(38~104kN)，右帮锚杆应力波动较大(0~140kN)，但所有测值均在安全范围内。

[3]王福奇, 李治祥, 吴军, 等. 大采高工作面端头静态胀裂切顶技术研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(8): 95-99.

[4]王苏健, 王翔宇, 刘效贤. 象山矿无煤柱沿空留巷成套技术研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(4): 33-38.

[5]杨光辉, 王开, 张小强. 深井巷内预制充填体切顶无煤柱开采技术研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(1): 36-38.

[6]杨刘耀月, 温道义, 王超. 高地应力条件下沿空留巷切顶卸压关键技术参数研究[J]. 能源与节能, 2024(3): 212-215.

[7]杨文军. 综采工作面切顶卸压沿空留巷技术应用[J]. 煤矿现代化, 2024, 33(2): 51-54.

[8]于静波. 2414工作面切顶卸压无煤柱留巷技术研究[J]. 山东煤炭科技, 2021(5): 29-30.

[9]曾一鸣. 静态煤岩胀裂剂在高瓦斯矿井中的应用浅析[J]. 煤矿现代化, 2020(3): 177-179, 182.

[10]张宏范, 王国普. 深部复杂条件下切顶卸压沿空留巷无煤柱开采技术应用研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(7): 34-36.

[11]苏铭, 姚强岭, 刘梓昌. 链臂锯切顶卸压小煤柱留巷开采围岩稳定性分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(7): 146-151.

作者简介：王金红, 1993年3月, 汉族, 山西运城人, 研究方向：采矿工程。