

安全环保与资源利用

综放工作面三角区悬顶二氧化碳致裂控制技术研究

贺振金

(晋能控股煤业集团 塔山煤矿, 山西 大同 037003)

摘要: 针对塔山煤矿 8230 综放工作面三角区坚硬顶板悬顶致灾问题, 通过分析悬顶形成机理, 提出采用二氧化碳预裂爆破技术进行顶板控制。设计了包含放煤孔 (KA1) 和切顶孔 (KB1-KB3) 的差异化钻孔布置方案, 采用 F-57 型致裂器实现长钻孔分段致裂。工程应用表明, 致裂后端头三角区垮落步距由 40 m 降至 18 m, 初次来压步距由 78 m 缩短至 35 m, 降幅达 55%; 巷道顶底板收敛变形减少 48.3%, 有效避免了悬顶突垮引发的飓风灾害。研究成果为坚硬顶板条件下综放工作面安全开采提供了技术参考。

关键词: 综放开采; 坚硬顶板; 悬顶致灾; 二氧化碳致裂

中图分类号: TD712

文献标识码: B

文章编号: 2095-5979 (2025) 11-0123-04

Research on control technology of suspended roof Carbon Dioxide cracking in triangle area of fully mechanized caving face

He Zhenjin

(Jinneng Holding Coal Group Tashan Coal Mine, Datong 037003, China)

Abstract: Aiming at the problem of hard roof overhanging in the triangle area of 8230 fully mechanized caving face in Tashan Coal Mine, by analyzing the formation mechanism of overhanging, the carbon dioxide pre-splitting blasting technology is proposed to control the roof. A differential borehole layout scheme including coal caving hole (KA1) and roof cutting hole (KB1-KB3) was designed, and F-57 type fracturing device was used to realize long borehole segmented fracturing. The engineering application shows that after fracturing, the caving step distance of the end triangle area is reduced from 40 m to 18 m, and the initial weighting step distance is shortened from 78 m to 35 m, with a decrease of 55%. The convergence deformation of the roof and floor of the roadway is reduced by 48.3%, which effectively avoids the hurricane disaster caused by the sudden collapse of the suspended roof. The research results provide a technical reference for the safe mining of fully mechanized caving face under the condition of hard roof.

Key words: fully mechanized caving mining; hard roof; suspended roof disaster; carbon dioxide cracking

0 引言

综采工作面安全高效生产是煤炭长期开采的重要保障^[1-3]。长壁工作面推进过程中, 回采巷道上方三角区坚硬顶板完整度高, 无法及时在采空区垮落。随着工作面的推进, 悬顶面积持续的增加, 当达到其极限强度时, 大面积悬顶突然垮落极易造成飓风现象^[4]。不仅极易造成采空区有毒气体溢出、

上隅角瓦斯超限, 严重时将造成设备损坏、人员伤亡等重大安全事故^[5]。

目前, 研究人员针对长壁工作面三角区悬顶致灾机理展开相关研究, 主要控制技术为支护构件退锚、水压致裂切顶及爆破预裂等^[6-8]。近年来, 随着科技的发展, 二氧化碳相变预裂爆破技术在煤炭地下开采过程中展开诸多工程实践。周西华^[9]通过监测爆破器主管内高压气体压力时程曲线, 结合

责任编辑: 高小青 DOI: 10.19286/j.cnki.cci.2025.11.025

作者简介: 贺振金 (1993—), 男, 山西大同人, 工程师。

引用格式: 贺振金. 综放工作面三角区悬顶二氧化碳致裂控制技术研究[J]. 煤炭与化工, 2025, 48 (11): 123-126, 131.

FLAC3D 数值模型, 得出单孔爆破在水平层理上出气孔方向有效影响半径 6 m、法向 4 m, 控制孔能扩大多孔连续爆破裂隙区; 刘高峰^[10]基于 CT 扫描和三维裂隙重构, 分析了致裂前后煤样内部裂隙结构参数, 发现致裂后煤样裂隙总数量减少 61.92%, 总体积增大 392.73%; 贾进章^[11]构建煤体爆破损伤演化模型, 利用 LS-DYNA 软件模拟煤层物性参数和孔径对液态 CO₂ 相变致裂半径范围的影响, 发现相变致裂半径范围与瓦斯压力和钻孔孔径呈递增关系, 与煤层地应力呈递减关系; 郭宇^[12]发现岩石越破碎, 联合起爆量越大, 二氧化碳相变致裂效果越好。

为此, 本文在前人相关研究成果的基础上, 基于塔山煤矿 8230 综放工作面实际生产条件, 分析了三角区悬顶致灾机理, 并提出了二氧化碳爆破预裂技术, 取得了良好的工程应用效果。该技术为相似背景下的综放工作面顶板控制提供了借鉴。

1 工程概况

1.1 工作面地质条件

8230 综放工作面工作面井下标高 +976—+1 062 m, 地面标高 +1379—+1 540 m, 煤层厚度为 9.93 ~ 25.35 m, 平均厚度 17.51 m, 煤层结构为复杂结构, 煤层倾角为 1° ~ 3°, 平均 2°。煤层含夹矸 7 ~ 14 层, 平均 9 层, 厚度 2.79 m, 单层厚度在 0.10 ~ 2.73 m 变化, 夹矸岩性为岩浆岩、砂质泥岩、泥岩、炭质泥岩、高岭岩。煤层顶底板岩性特征如图 1 所示。

名称	厚度 /m	岩性
基本顶	5.0	中砂岩
直接顶	2.9	砂质泥岩
煤	17.5	煤
直接底	5.3	砂质泥岩
基本底	3.9	细砂岩

图 1 煤层顶底板柱状

Fig. 1 Coal seam roof and floor columnar

1.2 三角区悬顶致灾机理

煤炭地下长壁开采过程中, 综采工作面两端头三角区形成大面积悬顶主要原因是由于三角区顶板完整强度高, 受煤柱及顶板锚杆索支护结构的影响, 不能及时垮落, 如图 2 所示。随着悬顶面积的增加, 当上覆载荷作用下悬顶弯矩大于其极限应力时, 产生突然性的垮落, 对工作面安全生产产生严

重威胁, 对于高瓦斯以及煤与瓦斯突出矿井, 这种灾害的附加威胁进一步增加。

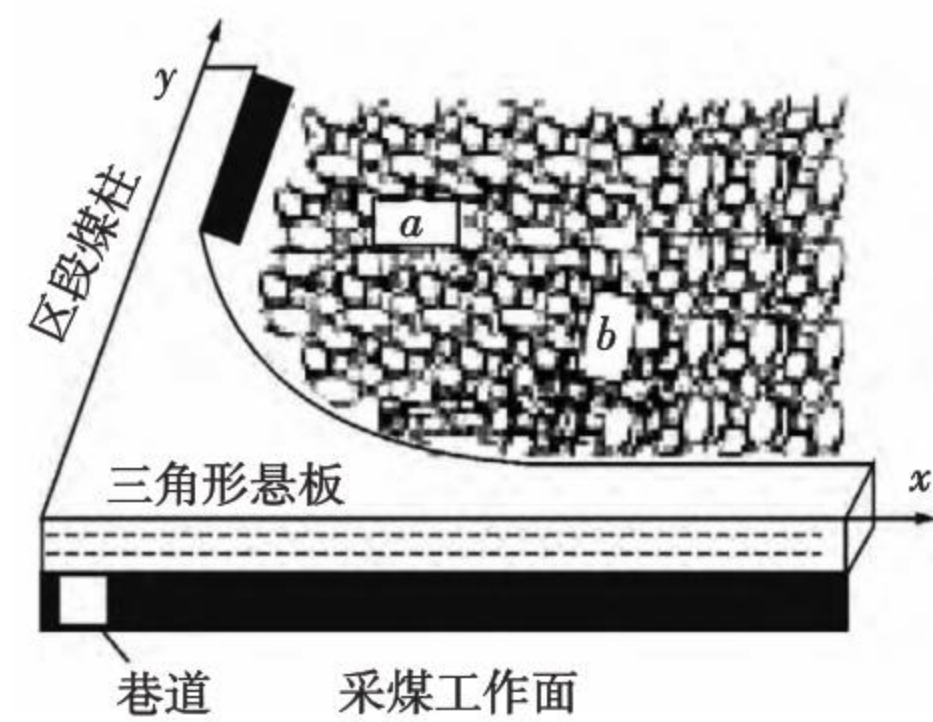


图 2 三角区悬顶示意图

Fig. 2 Suspended roof in triangle area

2 二氧化碳致裂原理及优势

2.1 二氧化碳致裂原理

二氧化碳相变产生的动态应力波首先在孔内孔壁上产生破裂。随后, 二氧化碳高压气体注入裂缝网络, 裂隙在高压作用在进一步扩展。持续的高压气体导致裂缝向深处延伸并在浅部形成纵横交错的裂纹, 有效降低坚硬岩体的完整性, 如图 3 所示。

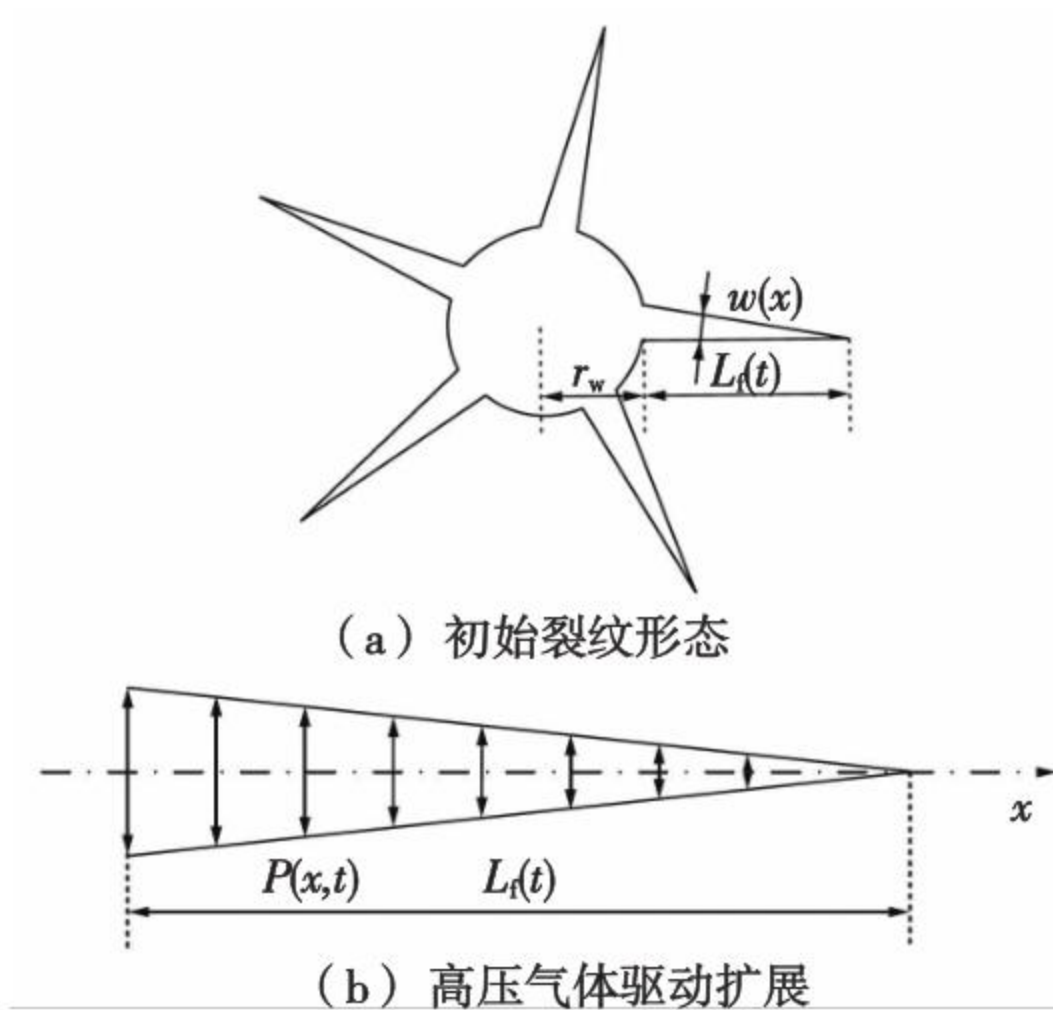


图 3 二氧化碳相变致裂裂隙扩展机理

Fig. 3 Propagation mechanism of carbon dioxide phase transition induced fracture

CO₂ 致裂压裂设备主要由储液管、充气阀、释放管、增压器、密封垫、剪切片组成 (图 4)。储液管是高强度钢管, 两端分别是与之密封连接的充气阀和释放管, 通过密封垫进行密封。储液管储存液态 CO₂ 并内置增压器, 释放管端装有控制释放压力的剪切片。



图 4 二氧化碳气相压裂装置结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of carbon dioxide gas phase fracturing device

CO₂ 致裂设备的反应过程为：充气阀一端的增压器接通电流后，管中液态 CO₂ 受热迅速转换为高压气体，在 20 ~ 40 ms 内体积瞬间膨胀达 500 ~ 600 倍，管内压力剧增，待达到预设压力时，释放管内的剪切片被打开，二氧化碳气体透过径向孔，迅速向外爆发；瞬间产生的强大推力可使煤层或岩层破裂，从而达到致裂效果，二氧化碳相变致裂应力 - 气体协同作用机理如图 5 所示。



图 5 二氧化碳相变致裂应力 - 气体协同作用机理

Fig. 5 Mechanism of stress-gas synergistic effect of carbon dioxide phase transition cracking

2.2 二氧化碳致裂优势

与常规炸药爆破相比，CO₂ 爆破技术具有低频长波、低温低压等独特优点。该技术爆破振动很小，是炸药的 1/20，不会产生地震冲击波，震速小，不会对基础产生构造性破坏。更为重要的是，该技术具有使用过程中无火花外露、致裂威力大、无需验炮、操作简便等特点，避免了传统炸药爆破的高危险性，不属于火工产品，可在高瓦斯等易燃易爆等环境中使用。不会产生有毒有害气体，对煤层及井下环境污染小。综上，二氧化碳致裂在安全性、增透效果、环境适应性等方面的综合优势，使其成为煤矿瓦斯治理和煤层增透的重要技术手段。

3 三角区悬顶二氧化碳致裂方案

3.1 切顶孔设计方案

基于 8230 工作面生产条件，确定 8230 工作面钻孔设计为 2 种，布置在切眼的放煤孔 (KA1) 和 2230 巷及 5230 巷的切顶孔 (KB1、KB2、KB3)，2 条顺槽近切眼段 37.5 ~ 52.5 m，每间隔 5 m 布置一排切顶孔 (KB1、KB2、KB3)，钻孔设计方案如图 6 所示。

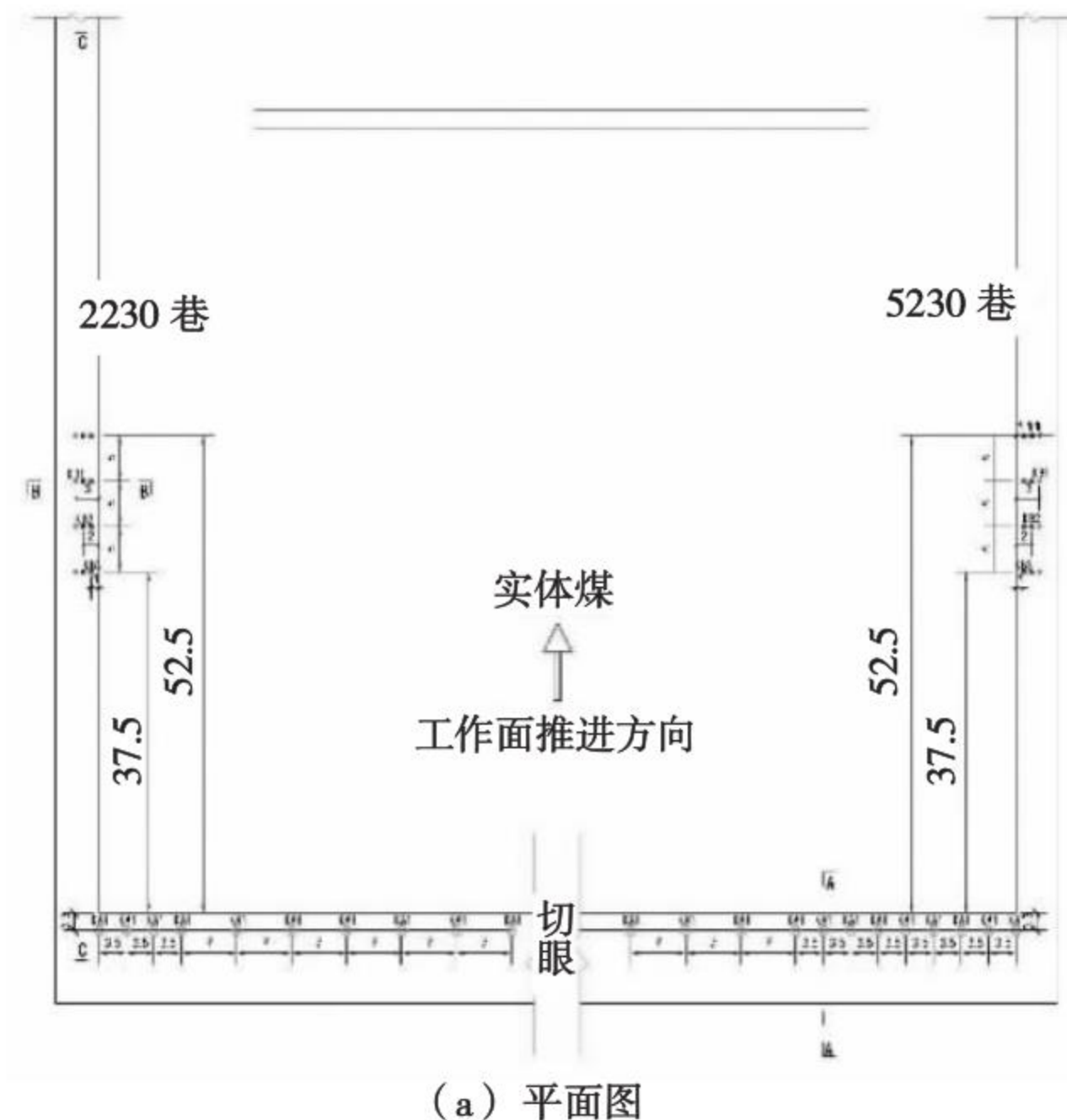
二氧化碳爆破切顶技术参数如下。

(1) 放煤孔 (KA1) 共计 44 个，钻孔直径 65 mm，钻孔深度为 13.91 m，钻孔间距为 3.5 m/7 m (近 2230 巷 10.5 m 及近 5230 巷 30 m 范围内相邻孔间距为 3.5 m，其余位置相邻孔间距为 7.0 m)，垂直切眼顶板施工。

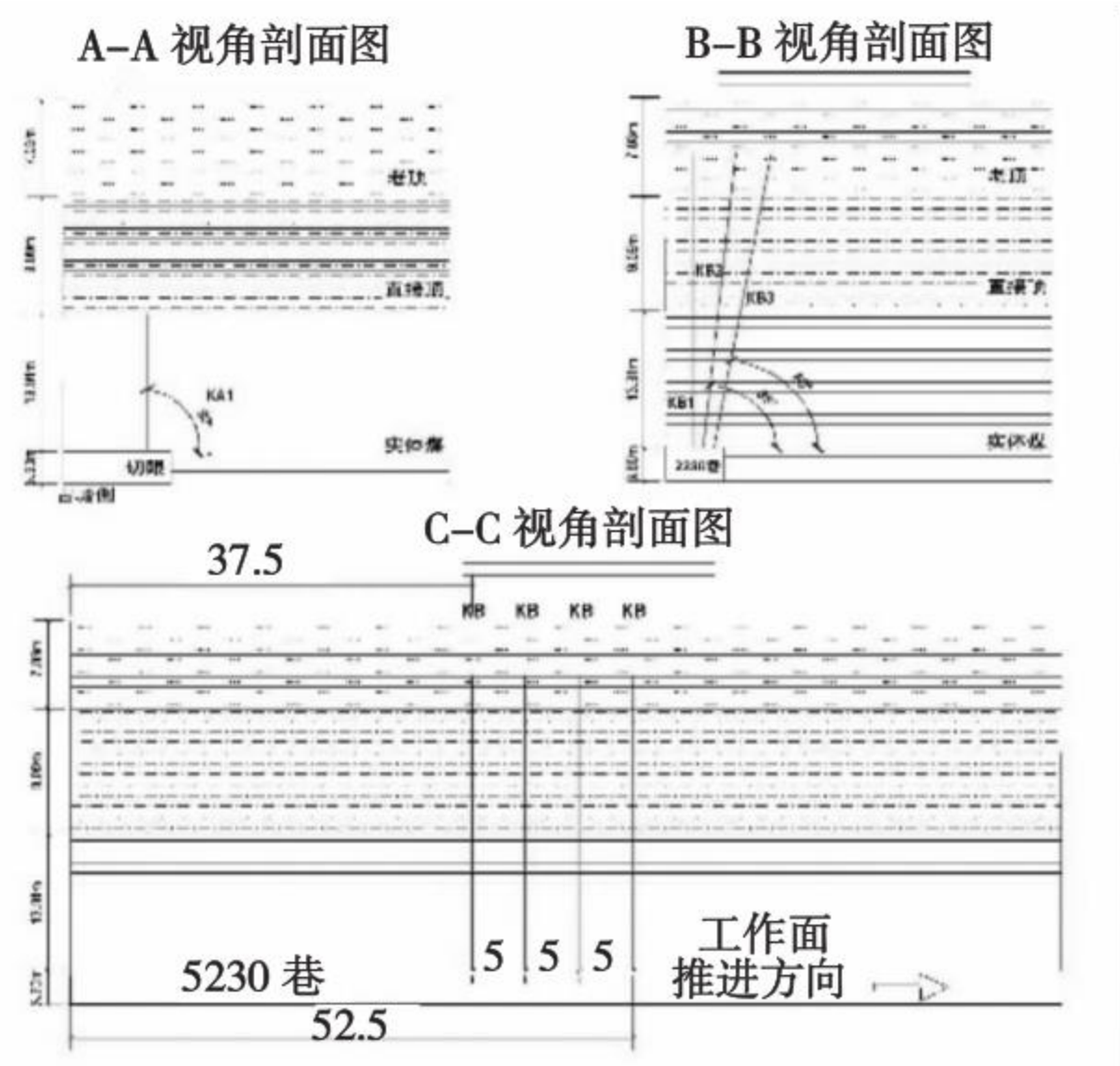
(2) 切顶孔 (KB1) 共计 8 个，钻孔直径 85 mm，钻孔深度为 27.5 m，钻孔间距为 5 m，垂直切眼顶板施工。

(3) 切顶孔 (KB2) 共计 8 个，钻孔直径 85 mm，钻孔深度为 27.7 m，钻孔间距为 5 m，与顶板所在平面的夹角为 85°。

(4) 切顶孔 (KB3) 共计 8 个，钻孔直径 85 mm，钻孔深度为 28.1 m，钻孔间距为 5 m，与顶板所在平面的夹角为 80°。



(a) 平面图



(b) 剖面图

图 6 二氧化碳致裂孔布置方案

Fig. 6 Arrangement scheme of carbon dioxide fracturing hole

3.2 致裂孔内致裂器组装方式

根据以往工程经验，致裂器型号为 F-57，长 1.6 m，直径 57 mm，单根 CO₂ 充装量 1.0 ~ 1.4 kg，爆破压力 120 MPa。致裂器后端采用顶杆支撑，支撑到地面上。钻孔内致裂器组装方式如图 7 所示。

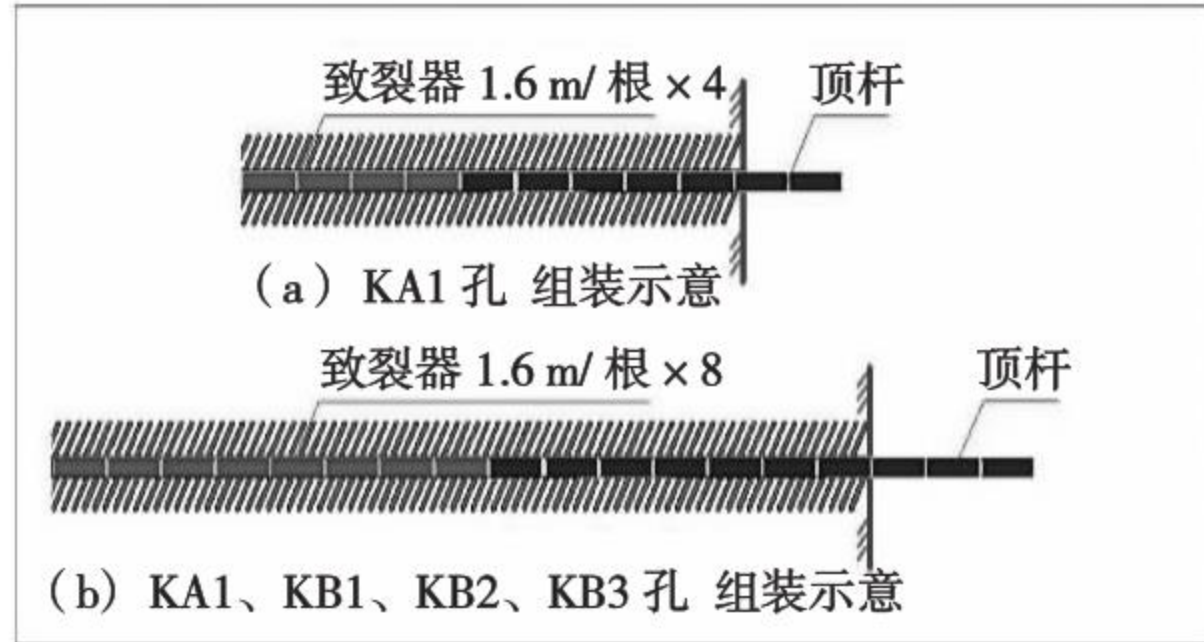


图 7 致裂器组装方式示意图
Fig. 7 Cracker assembly method

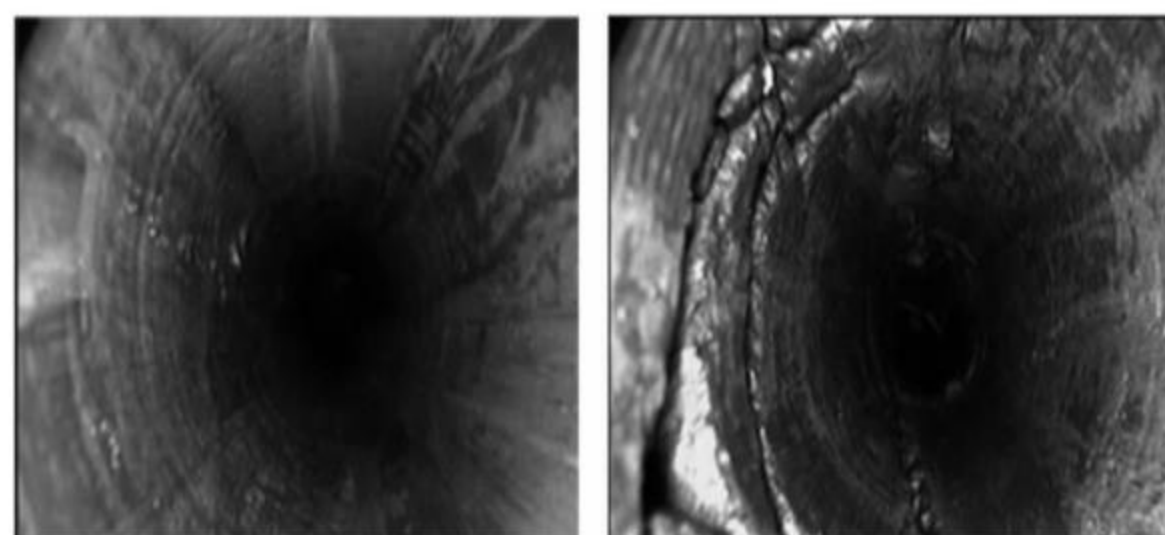
根据钻孔长度确定，KA1 孔有效致裂段装填 4 根二氧化碳致裂器；2 条顺槽共计 24 个孔 (KB1、KB2、KB3)，有效致裂段装填 8 根二氧化碳致裂器。

施工工艺：施工钻孔—器材下井及检查—压裂器材连接、推进—压裂—压裂器材拆除—补网。

4 工程应用

4.1 顶板钻孔窥视

利用钻孔成像设备对致裂前后钻孔表面裂隙发育特征进行检测，如图 8 所示。



(a) 致裂前 (b) 致裂后
图 8 钻孔致裂效果
Fig. 8 Borehole fracturing effect

4.2 初采放顶效果

8230 综放工作面在实施二氧化碳爆破预裂后，对采空区端头三角区垮落步距、初次来压步距进行统计分析，与相邻未采取控制措施的综放工作面对比结果如图 9 所示。

采用二氧化碳相变爆破对端头三角区及开切眼顶板致裂过后，应力波及气体耦合作用下，有效降低了坚硬顶板的完整性。与未采取致裂措施的相邻工作面相比，随着工作面的推进，8230 工作面端头三角区垮落步距降低至 18 m、初次来压步距降低至 35 m，均减小了 55% 左右。

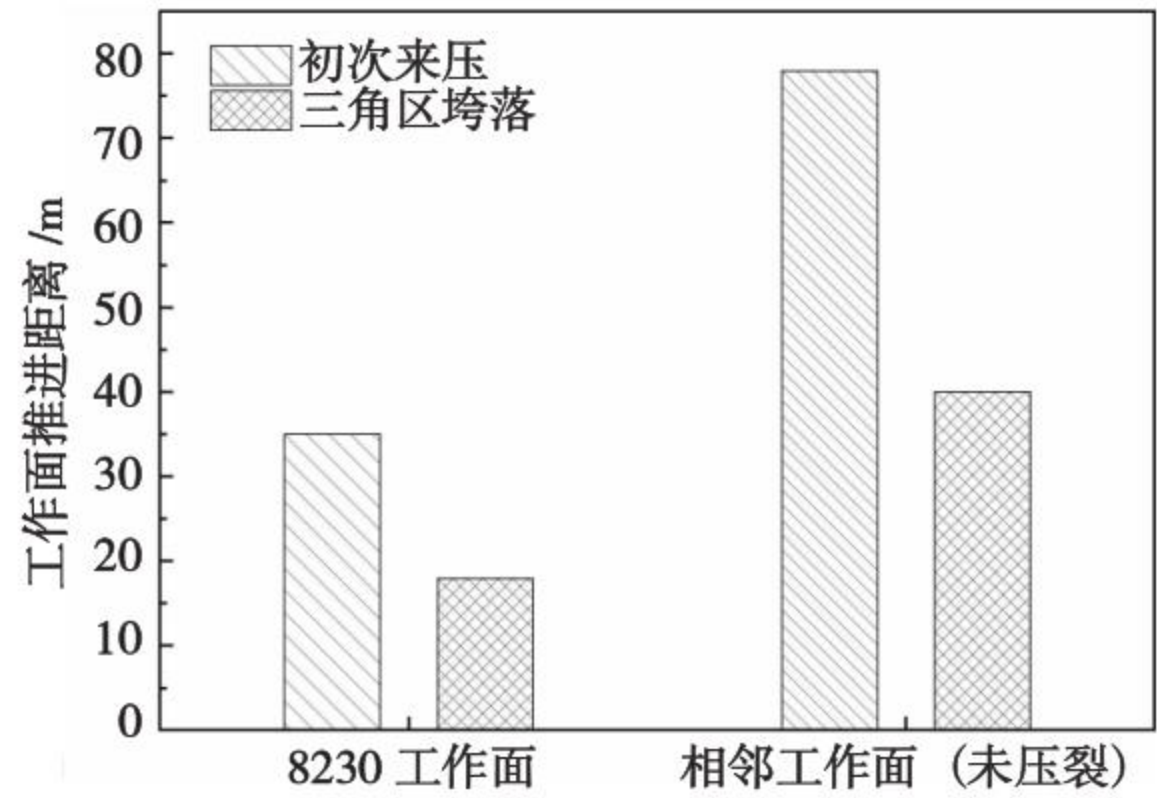


图 9 二氧化碳爆破初采放顶效果
Fig. 9 Effect of initial mining and caving by carbon dioxide blasting

4.3 巷道围岩变形

利用掘进期间建立的表面位移测站对采取二氧化碳爆破预裂切顶后的 8230 巷道变形进行监测，如图 10 所示。

采取二氧化碳爆破致裂措施后，8230 工作面距离测站 15 m 左右时，8230 巷顶底板收敛围岩变形开始快速增加，最大值为 368 mm。与未采取致裂措施的区段相比，致裂后巷道顶底板收敛变形程度降低 48.3%。

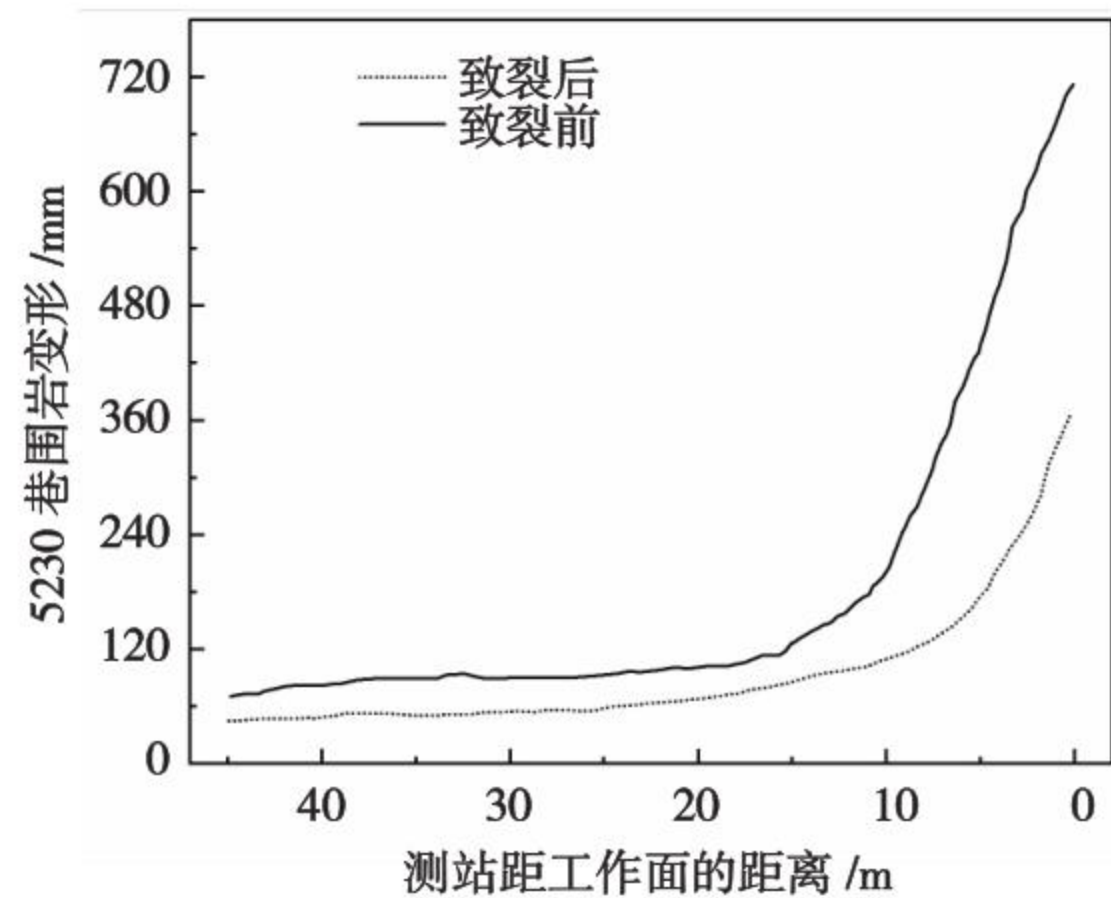


图 10 巷道顶底板收敛变形

Fig. 10 The convergence deformation of roadway roof and floor

5 结 论

本文针对塔山煤矿 8230 综放工作面三角区悬顶致灾问题，提出二氧化碳致裂预裂控制技术，主要结论如下。

(1) 针对综放开采三角区悬顶致灾机理，设计“切眼放煤孔 (KA1) + 顺槽切顶孔 (KB1-KB3)”二氧化碳相变分区致裂方案。

(2) 监测表明，端头三角区垮落步距由 40 m 降至 18 m，初次来压步距由 78 m 缩短至 35 m，悬顶面积减少 55%；巷道顶底板最大收敛量由 712

(下接第 131 页)

显著降低采空区氧浓度 ($O_2 < 7\%$)；②相变制冷效应，利用液态 CO_2 汽化潜热 (573 kJ/kg) 实现采空区快速降温，可有效抑制煤自燃放热反应，同时具备火源冷却防复燃功能。

(2) 无机固化泡沫堵漏控氧技术。

针对采空区漏风通道治理，采用新型无机固化泡沫材料实施封堵作业。相较于传统喷浆材料，该技术具有以下特性：①材料阻燃性与热稳定性优良，固化后遇火不燃；②高膨胀特性（发泡倍数 ≥ 30 倍）可有效填充复杂裂隙

7 结 论

为分析镇城底矿 28210 工作面采空区自燃“三带”分布特征，使用束管监测系统对采空区内气体组分动态变化实施了系统监测。通过 O_2 浓度变化规律，结合数值模拟方法对自燃“三带”边界范围进行了科学划分。在此基础上，采用 Fluent 软件对现场实测数据进行了数值模拟与验证分析，最终得出相应研究结论。

(1) 通风参数影响分析表明，当 28210 工作面通风量为 $2\ 394\ m^3/min$ 时，采空区自燃分区呈现显著空间差异性：主运侧散热带范围小于 115 m，氧化带分布于 115 ~ 196 m，而窒息带则超过 196 m；回风侧方面，散热带范围为 57 m，氧化带分布于 57 ~ 155 m，窒息带则超过 155 m 以上。

(2) 通过采用 Flunet 软件对“三带”分布范围进行数值模拟，所获得的结果与现场实测数据一致。该比对结论一方面确认了所建立数值模型的准确性，另一方面也为实测数据的真实有效性。

(上转第 126 页)

mm 降至 368 mm，变形速率峰值降低 48.3%。

(3) 该技术为综放工作面三角区悬顶问题提供了新范式，对类似地质条件矿井具有推广价值。

参考文献：

- [1] 马洪飞, 底俊臣, 王国牛, 等. 西庞井 9303 工作面厚硬顶板切顶卸压技术研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44 (3): 13-17.
- [2] 赵少波. 初采期爆破放顶技术优化研究[J]. 当代化工研究, 2024 (2): 115-118.
- [3] 赵铁林, 侯公羽, 邵耀华, 等. 特厚煤层综放工作面厚硬顶板深孔爆破初次放顶技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41 (6): 1 179-1 189.
- [4] 胡 杰. 二氧化碳预裂技术在坚硬顶板工作面的应用[J]. 江西煤炭科技, 2024 (3): 29-31.
- [5] 卫志敏. 超长综采工作面设备回撤期间采空区遗煤自燃防控

(3) 推进速度安全评估显示，工作面日开采进度 $\leq 2.352\ m$ 时，可避免氧化带滞留引发自燃。实测数据表明，工作面平均日推进速度达 8 m，完全满足安全生产的推进度要求。

(4) 针对高含水工作面的火灾防控，提出采用液态二氧化碳惰化技术抑制采空区氧化反应，配合无机固化泡沫封堵技术构建立体堵漏体系，形成协同防灭火机制。

参考文献：

- [1] 左志宏. 采空区自燃“三带”数值模拟研究及实测分析[J]. 煤炭与化工, 2025, 48 (8): 114-117, 121.
- [2] 马 周. 易自燃煤层采空区漏风规律及自燃“三带”划分研究[J]. 煤炭科技, 2025, 46 (4): 137-141.
- [3] 苏 鹏. 工作面采空区自燃“三带”分布规律及自然发火危险性评判[J]. 科技创新与应用, 2025, 15 (23): 85-88.
- [4] 李 峰, 韩关桥, 陈永富, 等. Y 型通风工作面漏风规律及采空区自燃“三带”分布特征研究[J]. 山西煤炭, 2025, 45 (3): 63-70.
- [5] 赵宏伟. 采空区自燃“三带”分布规律研究[J]. 山东煤炭科技, 2025, 43 (7): 64-69, 75.
- [6] 崔文利, 李慧刚, 周竹峰. 煤矿采空区自燃“三带”规律研究[J]. 陕西煤炭, 2025, 44 (8): 22-26, 71.
- [7] 田向红, 梁远建, 朱玉健, 等. 兴隆庄煤矿采空区自燃“三带”分布规律研究[J]. 煤矿现代化, 2025, 34 (4): 54-59.
- [8] 靳雷忠, 牛玉岗, 张宏虎, 等. 沿空留巷漏风对采空区自燃“三带”影响研究[J]. 中国煤炭, 2024, 50 (S2): 33-42.
- [9] 李 权. 基于 COMSOL 仿真模拟采空区自燃“三带”研究[J]. 陕西煤炭, 2024, 43 (12): 26-30.
- [10] 景瑞锋. Y 型通风及采空区瓦斯抽放条件下自燃“三带”研究[J]. 能源技术与管理, 2024, 49 (4): 127-130, 199.

技术研究[J]. 山西冶金, 2022, 45 (1): 93-95.

- [6] 陈树亮, 黄炳香. 井工矿坚硬顶煤顶板控制方法的技术经济分析[J]. 中国矿业, 2021, 30 (5): 130-135.
- [7] 贾 渊, 董世卓. 坚硬顶板临空巷道气相切顶卸压技术应用研究[J]. 同煤科技, 2020 (6): 25-26, 30.
- [8] 王 立. 坚硬顶板爆破弱化矿压控制技术研究[J]. 煤, 2022, 31 (1): 16-18, 104.
- [9] 周西华, 门金龙, 宋东平, 等. 液态 CO_2 爆破煤层增透最优钻孔参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (3): 524-529.
- [10] 刘高峰, 关文博, 张 震, 等. 基于 CT 扫描的 CO_2 相变致裂煤裂隙演化特征[J]. 矿业科学学报, 2024, 9 (3): 342-350.
- [11] 贾进章, 李 斌, 王东明. 煤层液态 CO_2 相变致裂半径范围的影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31 (4): 57-63.
- [12] 郭 宇. 沙曲一号煤矿坚硬顶板悬顶液态二氧化碳相变致裂研究[J]. 建井技术, 2025, 46 (2): 13-19.