

doi: 10.11799/ce202308012

回采巷道顶煤二氧化碳气爆致裂冒放技术

王崇勋¹, 荚逸晨², 赵宝友²

(1. 山西三元煤业股份有限公司, 山西 长治 046000;

2. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 基于理论分析计算得到的回采巷道顶煤气爆致裂影响半径, 设计了回采巷道顶煤气爆致裂助冒放爆破孔布置方案及参数, 并开展了数值模拟验证和现场工程应用。研究表明: 沿煤柱侧及跨中打设两列爆破孔对回采巷道顶煤进行液态二氧化碳相变气爆致裂后, 爆破孔间的顶煤均进入塑性屈服状态, 煤柱侧、跨中及回采侧巷道顶板的下沉变形不再呈现常规的下凸形式, 工作面采动影响下回采巷道煤柱侧与跨中的顶煤下沉量基本相当且增加较明显; 综放工作面回采巷道顶煤气爆致裂助冒放技术可在不影响安全出口顶板维护的前提下, 不仅显著改善了回采巷道顶煤的冒放性, 实现了回采巷道顶煤的顺利安全回收, 而且还消除了端头顶板悬顶带来的诸多重大安全隐患, 促进了三元煤业综放工作面安全高效可持续开采。

关键词: 回采巷道; 二氧化碳气爆; 顶煤致裂; 冒放技术; 端头悬顶

中图分类号: TD823.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2023)08-0063-05

Top coal caving enhancement by CO₂ gas shock technique in coal mine entry

WANG Chongxun¹, JIE Yichen², ZHAO Baoyou²

(1. Shanxi Sanyuan Coal Industry Co., Ltd., Changzhi 046000, China;

2. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Based on the theoretical analysis and calculation of the influence radius of gas shock induced fracture in the top coal of the gob-side roadway, a blasting hole layout scheme and parameters for gas shock induced fracture were designed to enhance top coal caving property of the gob-side roadway. Numerical simulation verification and field engineering application were also carried out. The results show that the roof top coal between the blasting holes enters the plastic yield state due to the phase change gas shock of liquid carbon dioxide along coal pillar side and the middle span of roadway roof, the subsidence deformation of roadway roof along coal pillar side, across the middle, and on the mining side no longer presents a downward convex shape, and the subsidence deformation of the top coal on the coal pillar side and across the middle of roadway near the working face is basically the same and increases significantly. Without affecting the maintenance of the safety entrance, the gas shock technique not only significantly improves the caving property of roadway top coal, ensuring the safe and efficient recovery of the roof coal in the roadway, but also eliminates many major security risks with the hanging roof of side working face.

Keywords: entry; CO₂ gas shock; top coal fracturing; caving enhancement technique; face-end roof hanging

我国能源的禀赋特征决定了煤炭仍然是我国主体能源。据统计我国厚煤层储量和产量占比接近一半, 厚煤层高效开采对于保障国家能源安全、促进经济社会发展具有重要作用。目前, 我国厚煤层的开采方法主要有分层开采、大采高综采及综放开采

3种采煤技术, 与前2种开采方法相比, 综放开采具有高产高效、巷道掘进率低、吨煤成本低、对复杂煤层地质赋存条件适应性较强等优势, 已经成为我国开采厚煤层的主要方法; 我国自1982年引进长壁工作面综放开采技术, 40年来我国的厚煤层放顶

收稿日期: 2023-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51304109)

作者简介: 王崇勋(1971—), 男, 山东菏泽人, 高级工程师, 主要从事煤矿生产与技术管理工作, E-mail: w8635538008@163.com。

引用格式: 王崇勋, 荚逸晨, 赵宝友. 回采巷道顶煤二氧化碳气爆致裂冒放技术 [J]. 煤炭工程, 2023, 55(8): 63-67.

煤开采理论、技术和装备均取得了长足发展与进步,促进了厚煤层矿井的安全高效开采,这也促使少数矿井开始尝试回收综放工作面回采巷道顶煤这部分煤炭资源^[1,2]。与综放工作面正常区域相比,由于受下区段煤柱的支撑与约束,使得端头顶板不易变形破断垮落,造成端头区域顶煤的冒放性差,顶煤难以正常回收,需采取人工致裂措施来提高回采巷道顶煤的冒放性。

综放工作面顶煤助冒放方法主要有爆破预裂和水力压裂两种技术^[3-11]。但由于化学炸药爆破的高频高强度冲击动载特性和水力压裂裂缝扩展不易控制的特点,这两种顶煤助冒放技术很难有效解决综放工作面回采巷道放煤与安全出口顶板维护这一矛盾。因此,有必要开展回采巷道顶煤致裂助冒放技术研究,在不影响工作面安全出口顶板维护的前提下实现回采巷道顶煤的安全高效回收。

1 工程概况

山西三元煤业股份有限公司核定生产能力 260 万 t/a,采用走向长壁综合机械化综采低位放顶煤采煤法。现开采的 3 号煤层位于山西组下部,煤层埋深 380~401 m,平均煤层厚 7.2~7.7 m,普遍含 0~2 层炭质泥岩夹矸,属全区可采稳定煤层;煤层直接顶为厚约 8 m 的砂质泥岩与粉砂岩互层结构,基本顶为厚约 4 m 的中粒砂岩;工作面斜长一般为 240 m,采用一进一回 U 型通风方式,回采巷道断面为矩形,毛宽 5.2 m,毛高 3.2~3.5 m,均沿煤层底板掘进,留有厚约 3.7~4.2 m 的顶煤。运输(回风)巷内布置前后两架一组的端头(尾)支架组,端头(尾)支架组前方为四架一组的超前支架组,其中端头支架组在用于维护安全出口顶板的同时,端头后架还用于回采巷道顶煤的放煤。

2 巷道顶煤二氧化碳气爆冒放方案设计

2.1 二氧化碳气爆裂缝扩展范围分析

煤体气爆前爆破孔周围任意一点的应力状态为^[12]:

$$\sigma_{r\theta a} = -\frac{\sigma_{yy}}{2} \left[(1+K) \left(1 - \frac{r_b^2}{r^2} \right) - (1-K) \left(1 - \frac{4r_b^2}{r^2} + \frac{3r_b^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta a} = -\frac{\sigma_{yy}}{2} \left[(1+K) \left(1 + \frac{r_b^2}{r^2} \right) + (1-K) \left(1 + \frac{3r_b^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (2)$$

$$\sigma_{r\theta a} = -\frac{\sigma_{yy}}{2} \left[(1-K) \left(1 + \frac{2r_b^2}{r^2} - \frac{3r_b^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right] \quad (3)$$

式中, $\sigma_{r\theta a}$ 、 $\sigma_{\theta\theta a}$ 、 $\sigma_{r\theta a}$ 分别为以爆破孔中心为极点的极坐标系下气爆前煤体任一点处的应力分量, Pa; K 为水平地应力分量比值, $K = \sigma_{xx} / \sigma_{yy}$; σ_{xx} 、 σ_{yy} 分别为水平地应力分量, Pa; r_b 、 r 分别为爆破孔半径和煤体任一点的极径, m; θ 为极坐标与水平方向的夹角, ($^\circ$)。

气爆应力波在爆破孔周围煤体内产生的切向拉应力 $\sigma_{\theta\theta b}$ 为:

$$\sigma_{\theta\theta b} = P_s [(\mu / (1 - \mu)) (r_b / r)^\alpha] \quad (4)$$

式中, P_s 为爆破孔孔壁处的应力波峰值压力, Pa; α 为衰减系数, $\alpha = 2 - \mu / (1 - \mu)$; μ 为煤体的泊松比。

因此,气爆过程中爆破孔周围煤体的总切向应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 为:

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta a} + \sigma_{\theta\theta b} \quad (5)$$

当裂缝尖端周向应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 小于煤体拉强度 σ_t 时,径向初始裂缝才停止扩展,据此得到气爆应力冲击致裂煤体的径向裂缝长度 L_1 的计算公式为^[13]:

$$L_1 = r_b \{ [\mu P_s / (1 - \mu) / (\sigma_t - \sigma_{\theta\theta a})]^{1/\alpha} - 1 \} \quad (6)$$

已知气爆冲击波峰值压力 $P_s = 200$ MPa 和 $\sigma_{\theta\theta a} = 3$ MPa、 $\sigma_t = 0.1$ MPa、 $\mu = 0.33$ 、 $r_b = 0.0375$ m 等参数,可计算得到气爆应力波冲击致裂煤体的径向裂缝长度 $L_1 = 0.33$ m。

现有研究成果表明^[13-19],煤岩体爆破致裂是初期爆生应力波和中后期爆生气体共同作用的结果,爆生气体的气楔压裂影响范围是爆生应力波冲击致裂的 1.5~3 倍。据此可估算出三元煤业回采巷道顶煤气爆致裂的影响半径为 0.83~1.32 m,爆破孔间距为 1.6~2.6 m。

2.2 二氧化碳气爆致裂方案设计

由于回采巷道顶煤完整性较好且力学强度较高,加之煤柱侧巷帮的支撑效应,使得回采巷道内端头放煤支架之上的顶煤不易破碎,冒放性差,易形成悬顶,不仅严重降低了回采巷道顶煤的采出率,而且还存在顶煤悬顶带来的潜在安全隐患。基于上述理论分析结果,结合三元煤业综放工作面实际情况,垂直回采巷道顶板打设两列爆破孔,孔深 3.5 m,孔径 75 mm,孔距 2.4 m,第一列爆破孔距煤柱帮 0.5 m,第二列爆破孔距煤柱帮 2.6 m;为充分发挥气爆致裂效果,两列爆破孔沿巷道走向呈前后交错

的三花布置,如图1所示。

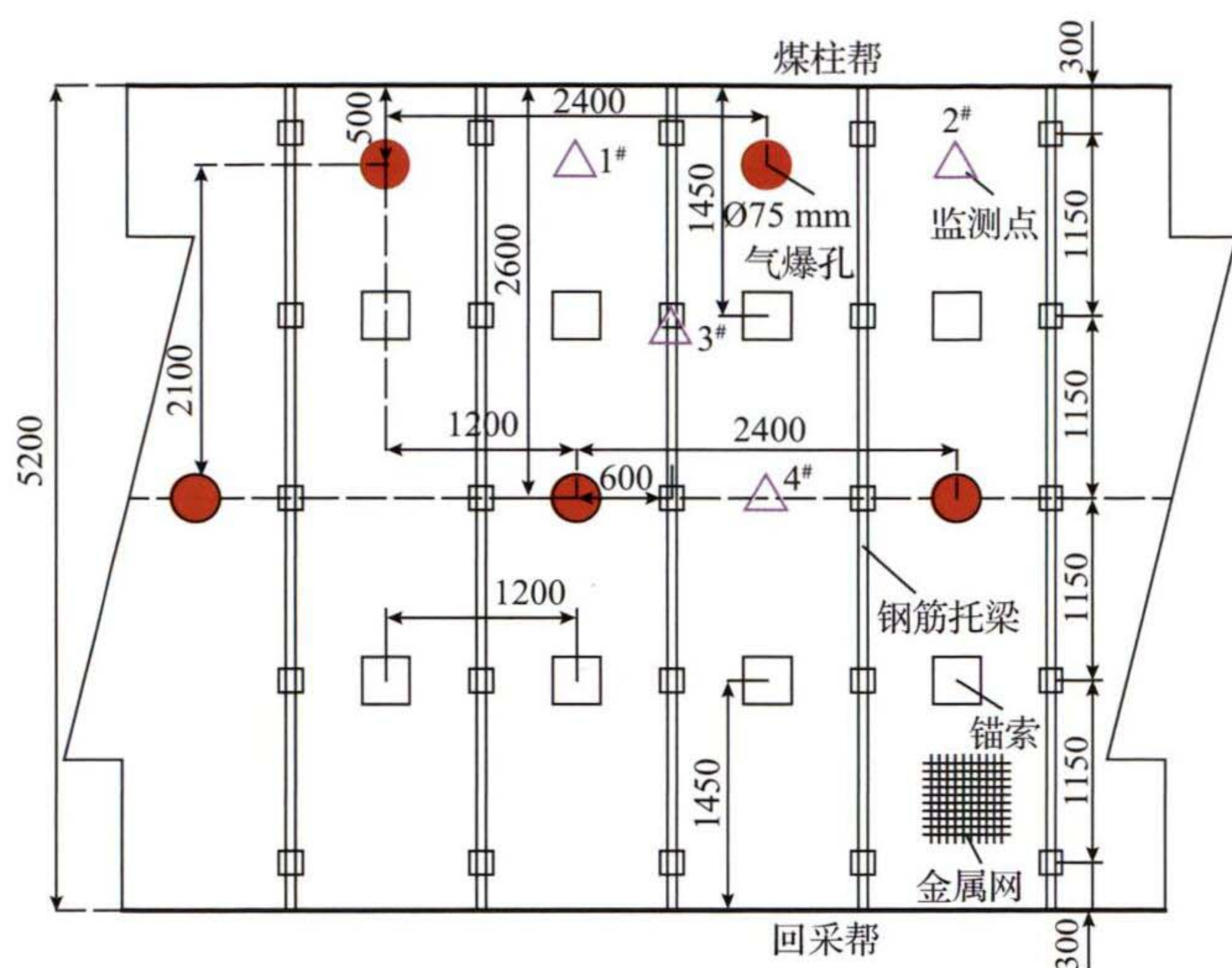


图1 巷道顶煤二氧化碳气爆致裂爆破孔布置 (mm)

3 二氧化碳气爆致裂数值模拟

依据上述爆破孔设计方案,采用FLAC^{3D}数值模拟软件,建立三元煤业综放工作面回采巷道顶煤气爆助冒放数值模型,模型几何尺寸为长×宽×高($X \times Y \times Z$)=50 m×20 m×100 m,第一列和第二列各含2个和3个爆破孔。气爆动力模拟前模型四周及底面采用面法向位移约束,气爆动力模拟过程中模型四周及底板采用粘弹性边界条件,且在爆破孔孔壁施加气爆压力,气爆压力时程曲线如图2所示^[20];模型顶部施加300 m埋深对应的7.5 MPa竖向自重应力,水平两向施加3 MPa的地应力;煤岩层均采用拉剪复合破坏屈服准则的理想弹塑性本构模型,其基本物理力学参数见表1。气爆动力致裂模拟过程中监测距巷道顶板3 m处4个位置的力学反应,监测点布置如图1所示。

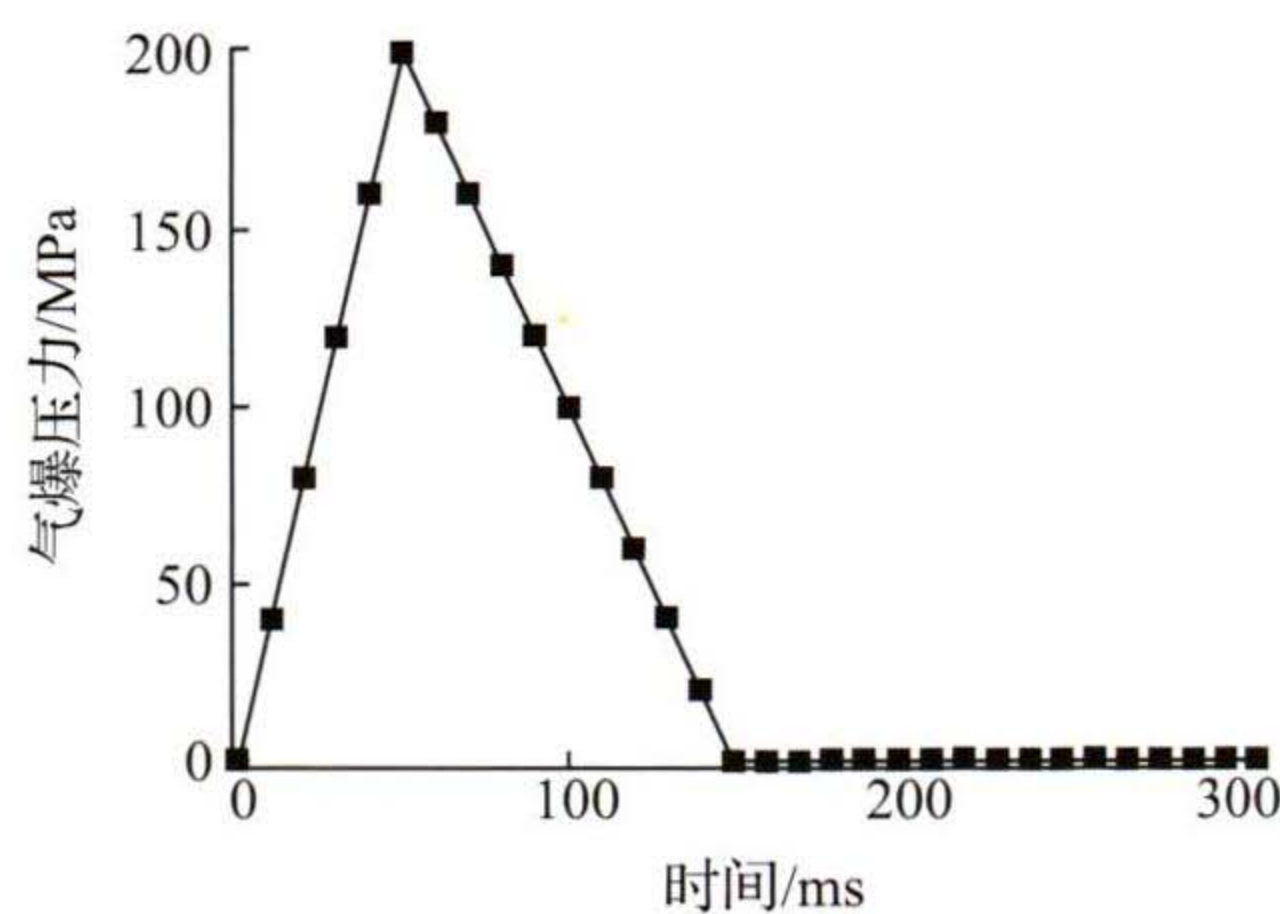


图2 气爆压力时程曲线

平行巷道走向顶煤气爆致裂的塑性区分布如图3所示,由图3可看出:相邻两爆破孔间的煤体均处于塑性屈服状态,例如 $X=0.5$ m、 $X=1.55$ m、

$X=2.6$ m的竖向剖面,可见气爆致裂在相邻两爆破孔间的影响半径可达1.2 m;第一列爆破孔外侧和第二列爆破孔外侧的气爆致裂影响半径为1~1.1 m,例如 $X=0.5$ m、 $X=2.6$ m、 $X=3.8$ m的竖向剖面。

表1 煤岩体基本物理力学参数

煤岩层	弹性模量 E/GPa	抗拉强度 σ_t/MPa	内聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
基本顶	9.86	2.85	8.9	45
直接顶	7.52	1.75	6.5	42
煤层	0.75	0.10	2.2	35
直接底	6.87	1.45	5.6	40

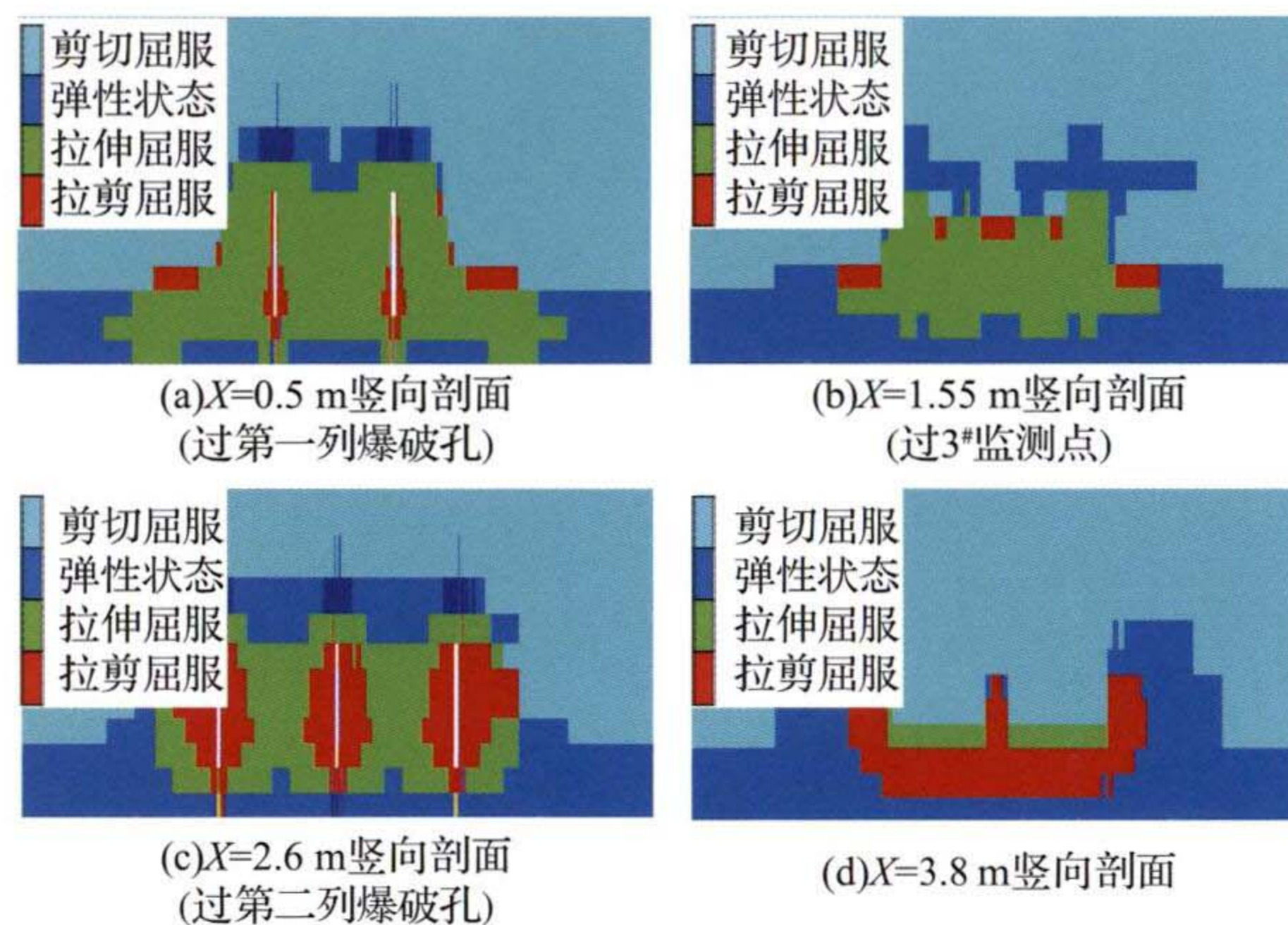


图3 平行巷道走向塑性区分布

垂直巷道走向顶煤气爆致裂塑性区分布如图4所示,由图4可以进一步表明:若爆破孔一侧还有爆破孔,则爆破孔在该侧的气爆致裂影响半径可达1.2 m,反之若爆破孔一侧无其他爆破孔,则爆破孔在该侧的气爆致裂影响半径为1~1.1 m。由此可知,受相邻爆破孔气爆动力相互作用的影响,无论是平行还是垂直巷道走向方向,相邻爆破孔间的气爆致裂影响半径可达1.2 m。

监测点最大主应力时程曲线如图5所示,由图5可以看出:除了2#监测点,其他3个监测点的最大主应力在20~50 ms时就达到煤体的抗拉强度0.1 MPa,煤体产生拉伸或拉剪复合破坏,例如 $X=1.55$ m、 $Y=3.6$ m、 $Y=4.2$ m、 $Y=4.8$ m竖向剖面;在整个气爆过程中2#监测点的最大主应力始终为压应力,说明该位置的煤体不会产生拉伸破坏,例如 $Y=6$ m竖向剖面内距回采巷道顶板3 m的2#监测点位置处的煤体仍处于弹性状态。

进一步分析塑性区模拟结果可知:在二氧化碳气爆冲击动载的作用下,回采巷道爆破孔1 m封孔段高度的顶煤及爆破孔孔底1 m深的顶煤也均处于塑性屈

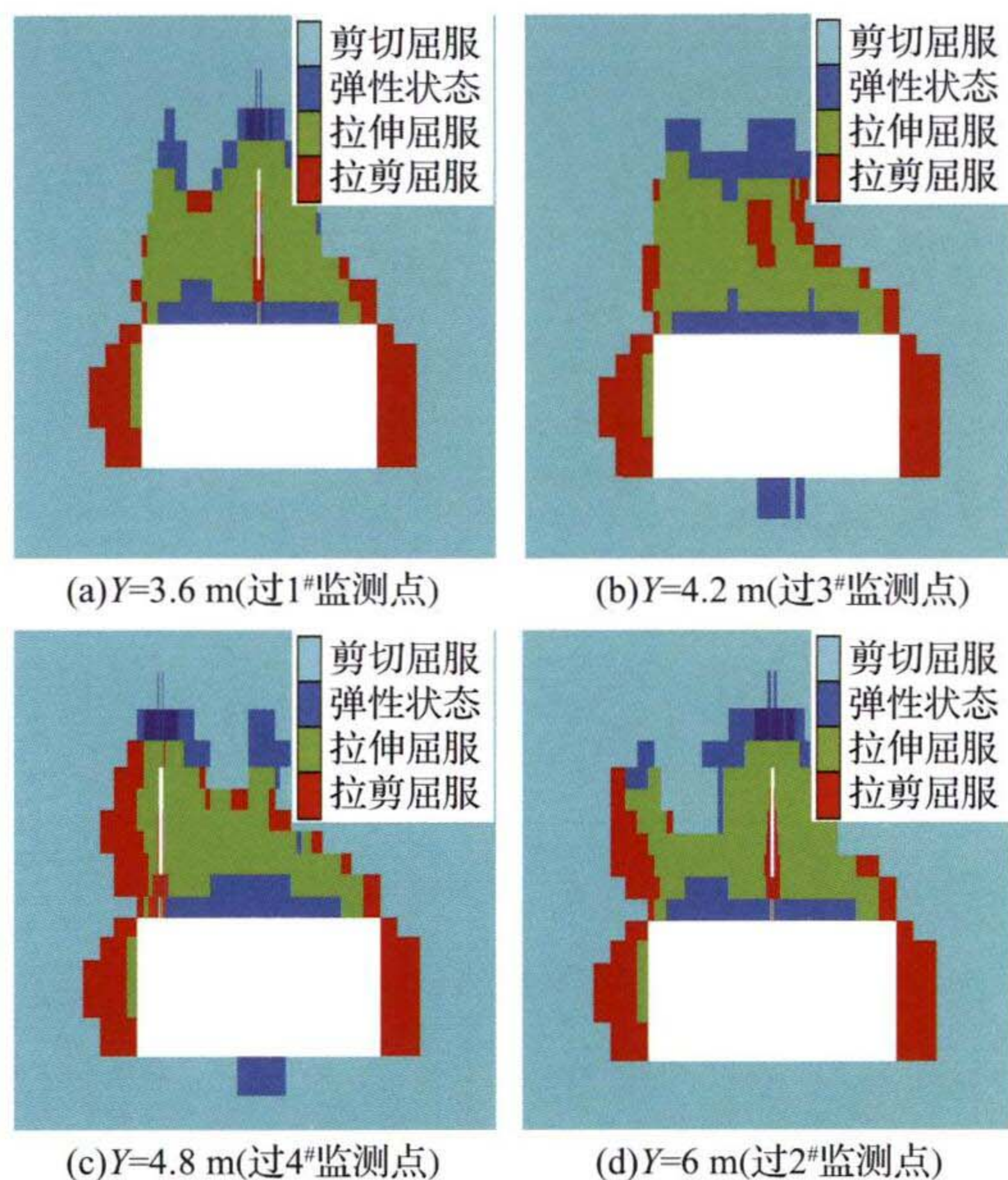


图4 垂直巷道走向顶煤气爆致裂塑性区分布

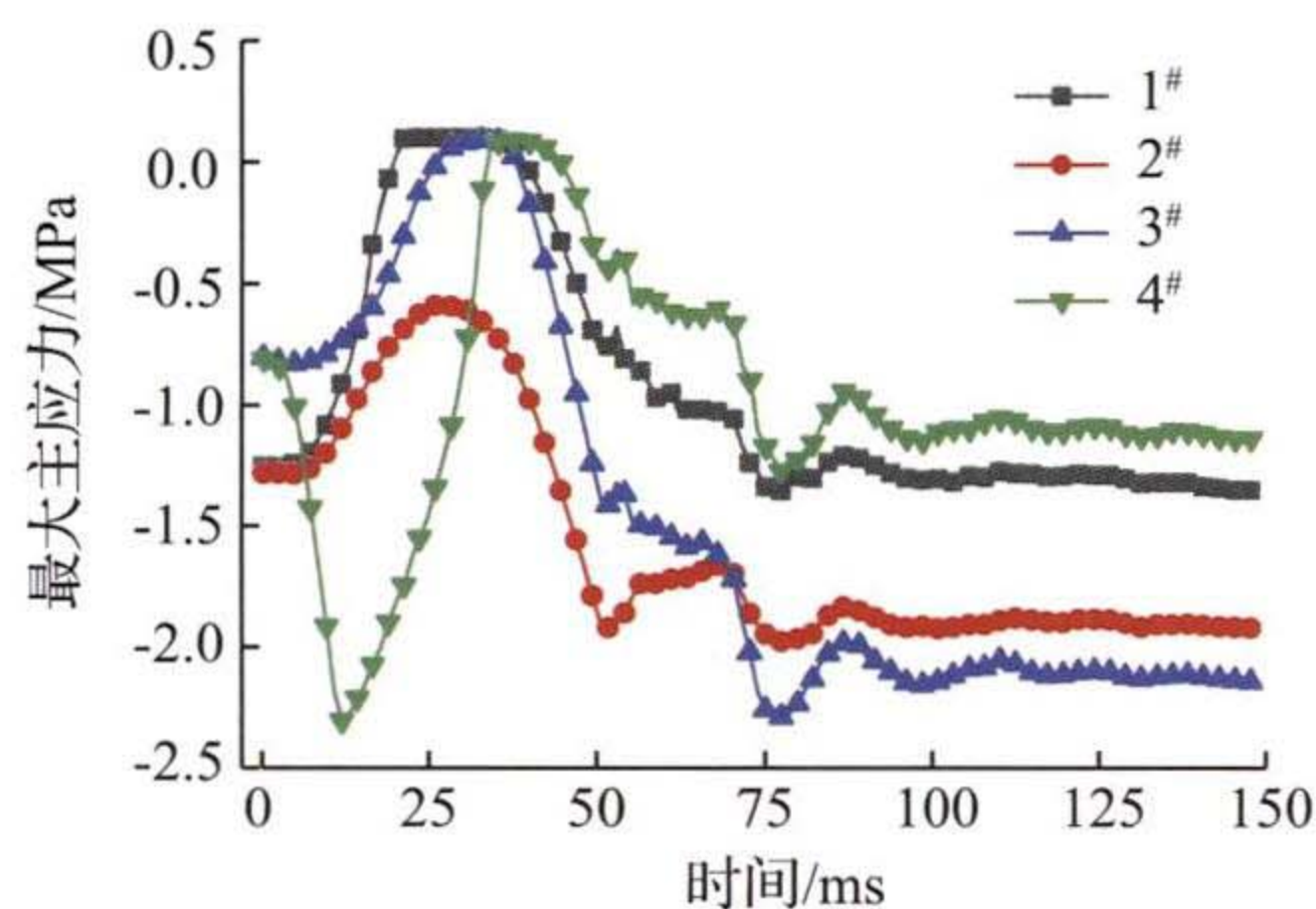


图5 监测点最大主应力时程曲线

元煤业4301综放工作面运输巷顶煤开展二氧化碳气爆致裂顶煤助冒放试验。爆破孔孔口1 m封孔段采用锥形塞钢棒挤推炮泥的封孔方式,锥形塞尾部通过凹槽连接止飞推杆,止飞推杆顶至底板岩层柱窝内。检修班期间在超前工作面50 m之外按设计方案打设两列爆破孔,然后依次向爆破孔内推入事先准备好的二氧化碳致裂器至孔底,将引爆导线引出后进行封孔和止飞推杆安装,设置好警戒线及安全管控措施后开始引爆二氧化碳致裂器。每次气爆作业同时起爆8~10个爆破孔(两列各4~5个爆破孔),即每次回采巷道顶煤气爆致裂长度为7~10 m,可满足工作面2~3 d的回采需求。

4.2 二氧化碳相变气爆致裂效果分析

从三元煤业现场应用角度分析运输巷顶煤二氧化碳相变气爆致裂冒放效果,回采巷道顶板下沉量监测曲线如图6所示,由图6可知:

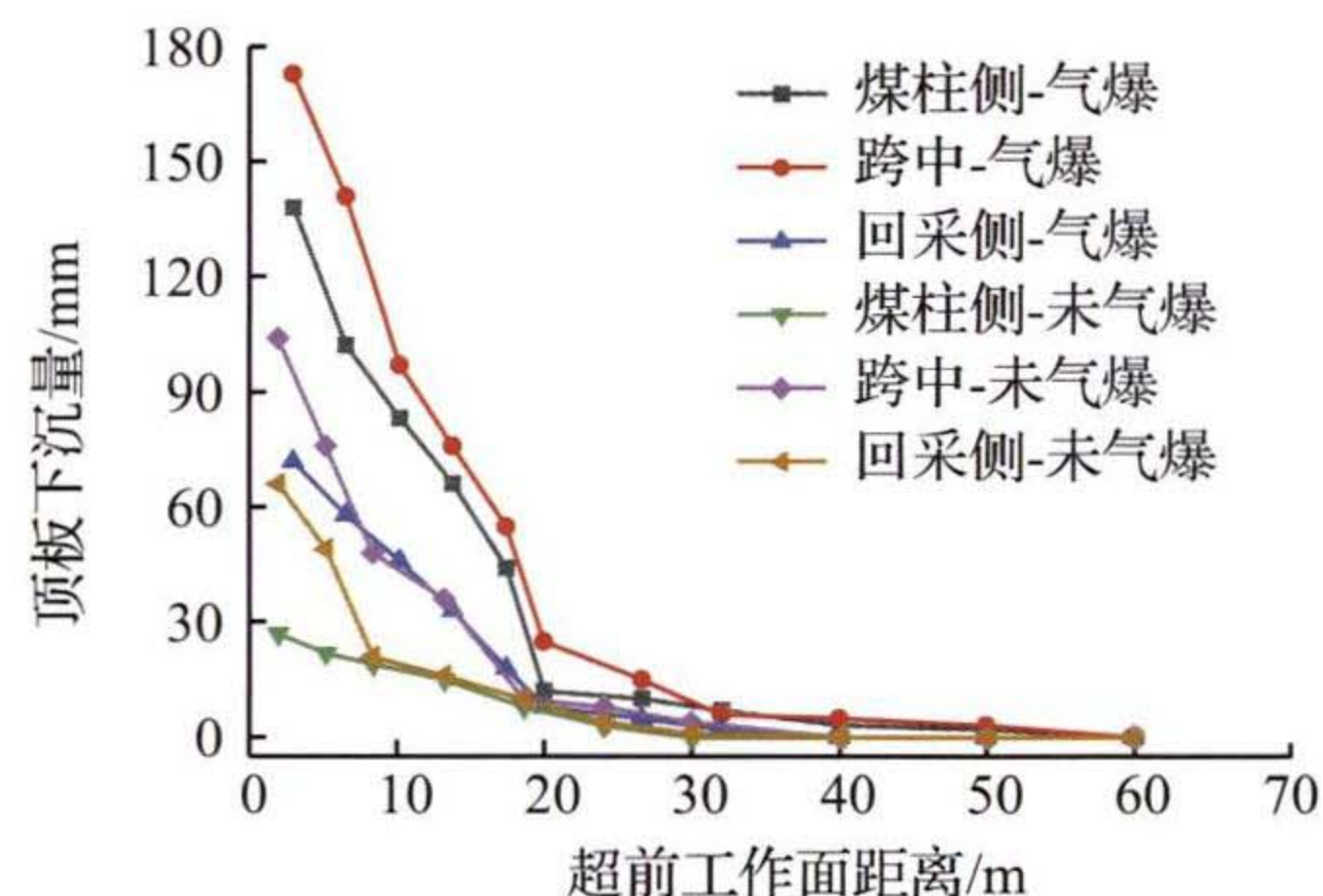


图6 回采巷道顶板下沉量监测曲线

服状态,即爆破孔孔底煤体的气爆致裂影响深度可达1 m;自煤柱帮至回采帮的2/3跨度的回采巷道顶煤均处于拉伸、剪切或拉剪的塑性屈服状态。回采巷道顶煤的预裂不仅需考虑其致裂助冒放效果,还要保证安全出口顶板的稳定;气爆致裂后距回采帮1/3跨度的回采巷道顶煤未进入屈服状态,利于工作面安全出口稳定性的维护;三元煤业以往生产实践表明,后期在回采巷道端头放顶煤支架的反复加卸载作用下,该部分顶煤完全可达到放煤要求。

综上所述,三元煤业回采巷道顶煤气爆致裂设计方案不仅有效解决了端头顶煤的悬顶问题,又实现了煤柱侧回采巷道顶煤的助冒放目的,还利于回采侧安全出口顶板的维护要求,气爆致裂设计方案在理论上是有效且可行的。

4 现场应用

4.1 二氧化碳气爆致裂爆破孔试验

根据二氧化碳气爆致裂爆破孔设计方案,在三

1) 运输巷顶煤未实施二氧化碳相变气爆致裂切顶时,超前综放工作面巷道顶板下沉量均不显著,同一断面位置运输巷煤柱侧与回采侧顶板下沉量相当且小于跨中顶板下沉量,顶板下沉变形沿巷道跨度方向呈现常规的下凸形式,即使当监测点已接近工作面时,煤柱侧、跨中及回采侧的巷道顶板下沉量仅为27、104和66 mm,运输巷顶煤存在不同程度的滞后采空区悬顶现象,使得运输巷顶煤回收率低甚至无法回收,造成综放工作面漏风严重,存在顶板、瓦斯、通风、防灭火等诸多安全隐患。

2) 运输巷顶煤采用二氧化碳相变气爆致裂技术后,超前工作面30 m动压区范围内运输巷顶板下沉量增加明显,相同超前距离下运输巷跨中顶板的下沉量略大于煤柱侧顶板,但均大于回采侧顶板的下沉量,当监测点已接近工作面时,煤柱侧、跨中及回采侧的巷道顶板下沉量为138、173和72 mm,与未采取致裂切顶相比,煤柱侧、跨中及回采侧的巷道顶板下沉量分别增加411%、66%和9%。

三元煤业运输巷顶煤二氧化碳相变气爆致裂现场实施表明,通过对煤柱帮及巷道跨中两列顶板爆破孔气爆致裂后,运输巷顶煤紧随工作面冒落,不仅显著改善了运输巷端头顶煤的冒放性,实现了运输巷顶煤的顺利回收,运输巷顶煤最大回收率可达70%左右,还消除了端头顶板悬顶带来的诸多安全隐患;同时由于两列爆破孔均施工于巷道跨中至煤柱帮的顶板处,利于工作面安全出口顶板的维护,增加了运输巷端头放煤及安全出口维护的安全度。

5 结 论

1) 基于理论分析计算得到的液态二氧化碳相变气爆致裂回采巷道顶煤的影响半径,并考虑综放工作面回采巷道安全出口的维护要求,设计了液态二氧化碳相变气爆致裂回采巷道顶煤的爆破孔布置方案及参数。

2) 通过液态二氧化碳相变气爆致裂回采巷道顶煤的数值模拟结果分析,验证了液态二氧化碳相变气爆致裂回采巷道顶煤设计方案及参数的合理性。

3) 通过液态二氧化碳相变气爆致裂回采巷道顶煤的工程实践,在不影响综放工作面安全出口顶板维护的前提下,不仅显著改善了回采巷道端头顶煤的冒放性,实现了回采巷道顶煤的顺利安全回收,还消除了端头顶板悬顶带来的顶板、瓦斯、通风、防灭火等诸多安全隐患,促进了三元煤业综放工作面安全高效可持续开采。

参考文献:

- [1] 王家臣. 我国放顶煤开采的工程实践与理论进展 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 43-51.
- [2] 宋选民, 朱德福, 王仲伦, 等. 我国煤矿综放开采 40 年: 理论与技术装备研究进展 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 1-29.
- [3] 苏波. 间隔切缝水力压裂提高综放顶煤回收率研究 [J]. 煤炭工程, 2021, 53(7): 71-74.
- [4] 许红杰. “钻-切-压”定向水力压裂顶煤弱化技术应用研究 [J]. 煤炭工程, 2021, 53(6): 73-76.
- [5] 黄好君, 李寿君, 郭洁, 等. 水压致裂顶煤弱化技术在综放工作面中的试验 [J]. 煤矿开采, 2018, 23(S1): 67-69.
- [6] 李峰云, 刘玉斌, 肖刚. 厚煤层放顶煤开采顶煤预裂技术研究 [J]. 煤炭技术, 2005, 24(12): 31-32.
- [7] 冯宇峰. 综放开采含硬夹矸顶煤破碎机理及控制技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3): 133-139.
- [8] 沈杰, 范志忠, 赵明, 等. 预裂松动爆破技术在特厚煤层综放工作面的应用研究 [J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(5): 27-29, 32.
- [9] 刘健, 刘泽功, 高魁, 等. 深孔爆破在综放开采坚硬顶煤预先弱化和瓦斯抽采中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3361-3367.
- [10] 王志根, 郭志伟, 丁志刚. 6106 综放工作面端头放顶煤工艺优化研究与应用 [J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(3): 3-5.
- [11] 高士岗. 大柳塔矿活鸡兔井 12 煤下分层放顶煤工作面放煤效果研究 [J]. 煤炭工程, 2020, 52(10): 56-60.
- [12] Evert Hoek. Practical rock engineering [EB/OL]. <http://www.rocsience.com/education/hoekscorner>.
- [13] 赵宝友, 王海东. 我国低透气性本煤层增透技术现状及气爆增透防突新技术 [J]. 爆破, 2014, 31(3): 32-41.
- [14] 杨小林, 孙博, 褚怀保. 爆生气体在煤体爆破过程中的作用分析 [J]. 金属矿山, 2011, 46(11): 65-68.
- [15] 卢文波, 陶振宁. 爆生气体驱动的裂纹扩展速度研究 [J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(3): 264-268.
- [16] 宗琦. 爆生气体的准静态破岩特性 [J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 73-78.
- [17] 王家来, 程玉生. 爆生气体作用过程的模拟试验研究 [J]. 爆破, 1998, 15(2): 5-9.
- [18] 杨小林, 王梦恕. 爆生气体作用下岩石裂纹的扩展机理 [J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(2): 111-116.
- [19] 李宁, 陈莉静, 张平. 爆生气体驱动岩石裂缝动态扩展分析 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 460-463.
- [20] 郑天照. 液态 CO₂ 相变气爆爆破孔爆能分布特征研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.

(责任编辑 张宝优)