

构造异常区能量单元切割理论及冲孔-爆破协同增透技术

蒋静宇^{1,2,3}, 董晓斌^{1,2}, 魏民涛⁴, 王成浩⁵, 程远平^{1,2}, 史孝宁^{1,2}

(1. 中国矿业大学 煤矿灾害防控全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 贵州研究院, 贵州 贵阳 550001; 4. 河南神火煤电股份有限公司, 河南 商丘 476600; 5. 中国矿业大学 人工智能研究院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 煤矿构造异常区通常具有应力集中、高瓦斯赋存、低渗透性、构造煤发育及致灾能量分布不均匀的特点, 是煤与瓦斯突出重点防控区域。水力/气动冲孔技术是构造煤卸荷瓦斯抽采的主要手段之一, 相较于常规抽采钻孔, 可明显提高卸压半径, 但煤层相邻冲孔钻孔之间易形成新的应力集中带, 限制和影响瓦斯抽采。采用理论分析, 数值模拟和现场实验相结合的方法, 研究了冲孔与爆破联合卸压增透降能消突原理。主要研究结论为: ①提出了突出能量单元切割理论及冲爆协同增透技术, 结合突出潜能分布和突出启动能量判据, 将煤层划分若干个能量单元, 进行边界处切割、内部分区治理。针对构造异常区煤体采用先冲孔后可控定向聚能爆破的方式对煤体定向致裂、释放应力, 冲孔孔洞为爆破影响范围内煤体移动提供了自由空间, 在爆破点处形成了煤体自由面并改变了煤层的连续性, 爆生气体与定向应力波可促进应力再平衡。②FALC^{3D} 模拟显示, 冲孔可以降低孔周煤体应力, 随着冲孔半径的增大, 卸压半径亦随之增大。且冲孔后会在孔周卸压区外形成一定范围的应力集中带, 限制瓦斯流动。③阐明了可控定向聚能爆破技术的介质-能量切割原理, 爆破改变了被切割单元煤体自由面附近的突出潜能赋存梯度, 实现介质切割控制能量切割。单元切割有效增加了采掘工作面前方阻能区长度, 降低了低能-高能过渡带内作业风险。④利用 ANSYS/LS-DYNA 软件, 模拟了煤层可控定向聚能爆破与冲孔孔洞协同作用, 结果表明可控定向聚能爆破实现了对煤体的定向致裂, 在聚能方向上侵彻煤体形成较大裂隙。随着时间推移, 以冲孔孔洞作为控制孔的孔周产生环向裂隙网, 并随着裂隙扩展逐渐与非聚能方向的裂隙贯通, 实现对煤体的有效增透。⑤冲爆协同增透技术现场试验表明, 爆破孔周围 10 m 范围内冲孔区域煤体应力和排渣量显著降低, 单、双根聚能管爆破后的瓦斯抽采纯量分别提高 1.76~4.35 倍和 1.35~8.60 倍。水力冲孔瓦斯有效抽采半径仅为 5 m, 冲孔与爆破协同卸压增透影响半径大于 10 m, 卸压效果提高一倍以上, 煤巷月掘进速度提高了 20 m。

关键词: 煤与瓦斯突出; 构造异常区; 能量单元切割; 可控定向聚能爆破; 卸压增透

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)05-2477-19

Study and application of the energy unit cutting theory and punching-blasting synergy permeability enhancement technology in tectonic anomaly areas of coal mines

JIANG Jingyu^{1,2,3}, DONG Xiaobin^{1,2}, WEI Mintao⁴, WANG Chenghao⁵, CHENG Yuanping^{1,2}, SHI Xiaoning^{1,2}

收稿日期: 2024-09-09 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1087

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174217, 52104210, 52404262)

作者简介: 蒋静宇(1983—), 男, 河南永城人, 教授, 博士生导师。E-mail: jiangjingyu@cumt.edu.cn

通讯作者: 王成浩(1997—), 男, 辽宁沈阳人, 副教授。E-mail: chenghao@cumt.edu.cn

引用格式: 蒋静宇, 董晓斌, 魏民涛, 等. 构造异常区能量单元切割理论及冲孔-爆破协同增透技术[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2477-2495.

JIANG Jingyu, DONG Xiaobin, WEI Mintao, et al. Study and application of the energy unit cutting theory and punching-blasting synergy permeability enhancement technology in tectonic anomaly areas of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2477-2495.



移动阅读

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Guizhou Research Institute, China University of Mining and Technology, Guiyang 550001, China; 4. Henan Sunho Group Co., Ltd., Shangqiu 476600, China; 5. Artificial Intelligence Research Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The coal seams in tectonic anomaly areas have high gas content, high geostress, low permeability, the development of tectonic coal, and uneven distribution of disaster-causing energy. These areas are key for preventing and controlling coal and gas outburst accidents. Hydraulic/pneumatic punching technology is one of the main methods for gas drainage in tectonic coal. Compared to conventional drilling for gas extraction, it significantly increases the pressure relief radius. However, new stress concentration areas easily form between adjacent punching holes in the coal seam, limiting and affecting gas extraction. This paper combined theoretical analysis, numerical simulation, and field experiments, this study investigated the principles of energy reduction and outburst prevention using combined punching and controlled energy-accumulating blasting measures. The main conclusions of this paper are as follows: ① This paper proposes an Outburst Energy Unit Cutting theory and a punching-blasting synergistic permeability enhancement technology, combining with the distribution of outburst potential and outburst start-up energy criteria, dividing the coal seam into several energy units, and carrying out cutting at the boundary and internal zoning management. Essentially, this method involves punching holes first, followed by controlled energy-accumulating blasting to create directional fractures in the tectonic areas of the coal seam, releasing stress. The punched holes provide free space for the movement of coal within the impact range of the blasting injection, forming a free surface of the coal at the blasting injection point and altering the continuity of the coal seam. The generated explosive gases and directional stress waves can promote stress rebalancing. This alters the gradient of elastic and gas expansion energy in the coal body, effectively cutting the energy units in tectonic anomaly areas. ② The FALC^{3D} numerical simulation shows that punching can reduce the stress in the coal around the hole. As the punching radius increases, the pressure relief radius also increases. After punching, a certain range of stress concentration forms outside the pressure relief zone around the hole, which limits gas flow. ③ The media-energy cutting principle of controlled directional cumulative blasting technology is clarified. The blasting changes the outburst potential occurrence gradient near the free surface of the coal of the cutting unit, realizing the media-cutting-controlled energy cutting. The unit cutting effectively increases the length of the energy-resistant zone in front of the mining work and reduces the risk of operation in the low-high energy transition zone. ④ A numerical model was constructed based on the fluid-solid coupling algorithm to simulate the synergistic effect of controlled directional energy-focused blasting and punching holes. Results indicate that controlled energy-accumulating blasting achieves directional fracturing of the coal seam, forming larger cracks in the energy concentration direction. Over time, radial crack networks form around the punched holes as the control hole, eventually connecting with cracks in non-energy concentration directions, effectively enhancing permeability in tectonic anomaly areas. ⑤ Field tests show that within a 10-meter range around the blasting hole, the stress and debris amount in the punched area of the coal body significantly decreases. The gas extraction volume after using single and double energy-focused tubes was 1.76 to 4.35 times and 1.35 to 8.60 times, respectively, compared to before blasting. The effective gas extraction radius of hydraulic punching was only 5 meters, while the synergistic pressure relief and permeability enhancement radius of punching and blasting were at least 10 meters, more than doubling the pressure relief radius in tectonic anomaly areas, and the monthly driving speed of coal roadway has been increased by about 20 m per month.

Key words: coal and gas outburst; tectonic anomalies; energy unit cutting; controlled energy-accumulating blasting; pressure relief and permeability enhancement

0 引言

煤与瓦斯突出(以下简称突出)是煤层中的应力能与瓦斯潜能的突然失稳释放^[1]。尽管我国采取了极为严格的综合防突措施,但突出事故仍时有发生,且大多数突出均与构造煤有关^[2-3]。以断层、褶曲、煤层

变厚带等为代表的煤矿构造异常区,控制着煤层瓦斯的生成、赋存和运移,加上受采动影响,地应力出现突变,常出现工作面顶板周期来压异常和响“煤炮”现象,易于诱发突出、冲击等动力灾害,严重威胁矿井生产安全。

卸压增透是区域瓦斯治理的有效措施,如开采保

护层^[4]、水力冲孔^[5-6]等技术。开采保护层、抽采被保护层卸压瓦斯是防治突出最有效的区域性措施之一^[7]。在矿井不具备开采保护层条件时,须采用本煤层瓦斯治理技术^[8],水力冲孔/割缝是最常见的本煤层卸压增透手段。相较于常规钻孔可有效降低煤体应力,提高瓦斯抽采有效半径。但由于煤层的非均质性和冲孔形成的几何不连续性,应力重分布规律复杂,在孔洞周围和孔间会形成新的应力集中区,制约瓦斯抽采。王恩元等^[9]研究表明水力冲孔可以有效降低孔周煤体应力,但在卸压区外仍存在应力过度区与应力集中区。冲孔过程中,应力集中区逐步向煤体深部转移,且应力集中现象与冲孔出煤量、与钻孔距离有关^[10]。在应力集中区,煤体应力较冲孔前显著增加、且煤体结构更加致密,渗透率显著低于原始应力区^[11],影响瓦斯抽采效果^[12-13]。

随着爆破技术的发展,聚能爆破技术被广泛应用于井下煤层增透。聚能爆破通过空心凹穴使爆破能量汇聚形成聚能射流,利用其侵彻作用在煤体中产生裂隙,并通过爆生气体来诱导裂隙发育^[14-17],该技术最早可追溯到1792年BAADER发现的聚能效应^[18]。定向聚能爆破能量主要集中在聚能方向,能够在聚能方向形成较大的裂缝,裂缝长度远大于非聚能方向^[19-21]。起爆位置和炮孔间距控制着炸药包中爆轰波及应力波的传播,进而对聚能流形成和煤体裂隙发育产生影响^[22]。梁洪达等^[23]对比了单孔、双孔和间隔爆破的应力波传播形式和裂纹扩展规律,发现了连孔、间隔聚能爆破水平径向的裂纹扩展长度明显大于单孔聚能爆破。通过对高瓦斯低透气性煤层进行聚能爆破,可使煤体裂隙更发育,聚能射流的初始导向裂纹与后续爆生气体形成的气楔联合作用,控制裂纹演化方向和长度^[24-26]。潘泱波等^[27]研究表明,聚能爆破在夹矸弱化和煤层增透方向上的应力峰值显著高于普通爆破。

针对构造异常区煤体卸压增透困难的工程难题,笔者提出了能量单元切割理论和其对应的冲爆协同增透技术。冲孔后爆破(简称“冲爆”)是本文采用的技术手段,笔者以薛湖煤矿二₂煤层29040工作面构造异常区为研究对象,采用理论分析、数值模拟和现场试验相结合研究方法,开展冲爆协同增透技术现场试验和效果分析研究。

1 能量单元切割理论及防突原理

1.1 煤与瓦斯突出的能量来源

突出的发生依赖于3个关键因素:应力、瓦斯以及煤体性质,其中应力和瓦斯是主要的能量来源^[28-30]。

突出过程通常分为4个阶段:孕育、激发、发展和终止^[31]。在孕育阶段,煤体中的能量逐渐积累,系统逐渐趋向不稳定状态,直至达到临界点引发突出。发展阶段涉及煤体的持续揭露和破碎,破碎的煤体不断被抛出并继续粉化。最终,当能量供应不足以维持突出过程时,突出会终止^[32]。HODOTT基于能量守恒对突出过程中的能量关系进行了描述,突出时能量转换满足以下公式^[33-34]:

$$e_c + e_g > W_f + W_m \quad (1)$$

式中: e_c 为煤体变形能,MJ; e_g 为瓦斯膨胀能,MJ; W_f 为破碎功,MJ; W_m 为搬运功,MJ。

诸多学者基于上述突出的能量关系进行持续研究^[35],虽研究结果的变量侧重不同,但均探讨了瓦斯和应力释放在突出中的重要作用。构造煤层中常发生突出的本质原因是煤层中蕴含的高突出能量未被消除,地应力高效卸荷和抽采瓦斯是构造煤层消突的主要方法。

1.2 能量单元切割理论

煤矿构造异常区通常具有高地应力、高瓦斯压力、高瓦斯含量和低渗透性等特征^[25],该区域煤体裂隙被压实,瓦斯能量异常富集且分布不均,局部易残留高能量,也是我国煤矿瓦斯事故时有发生的重要原因。构造异常区煤体因构造作用被破坏成更加粉化的颗粒,在应力集中的作用下,其透气性显著降低。在高地应力环境中,煤储层基质的裂隙被进一步压缩,煤体渗透率持续降低。采用冲孔措施可以有效降低构造煤体应力,释放煤体弹性潜能。但在构造异常区,多个冲孔孔洞布置下,冲孔孔周应力集中区与构造应力相互耦合,导致存在局部高风险区。冲孔孔径的增大可以有效增加卸荷区范围,但同时也相应增加应力集中区范围。现场经验表明,两钻孔间距离通常大于单个钻孔的两倍应力集中区范围,使得钻孔间存在无效卸压区,制约瓦斯抽采。

由于煤层突出潜能分布不均,为了有效消除构造异常区的突出危险性,笔者提出了一种能量单元切割理论,以煤层地质单元划分和突出致灾能量阈值为依据,划分煤层为高能区和低能区等若干个能量单元,利用物理、化学等技术手段将煤层物理切割,以介质切割控制能量切割,构建突出能量传递的阻断空间,将煤层改造为离散化能量单元,单元边界处的自由空间(裂隙/孔洞)形成能量势垒,削弱煤体变形能和瓦斯膨胀能的跨单元迁移,约束单一能量单元的最大储能值,大幅降低突出能量密度,更好地实现煤层瓦斯分区分级治理。

采掘作业中,单元切割措施增加了工作面前方阻力区/卸压区长度,使致灾能量在单元边界处形成梯度,限制了高能区向低能区的能量传递,图1为能量单元切割理论的布孔示意。

将冲孔造穴和可控定向聚能爆破技术相结合,依据“高能区密集-低能区稀疏”的分区布孔原则,以《煤

矿安全规程》和现场工程经验为依据,考虑区域煤体坚固性系数、瓦斯压力、瓦斯含量、煤层地应力等指标判识突出能量异常富集状态,实现布孔间距、炸药量等冲爆布孔参数的动态调整。见表1。根据薛湖煤矿施工经验,高能区冲孔布孔间距较低能区缩短40%以上,炸药量增加50%以上。

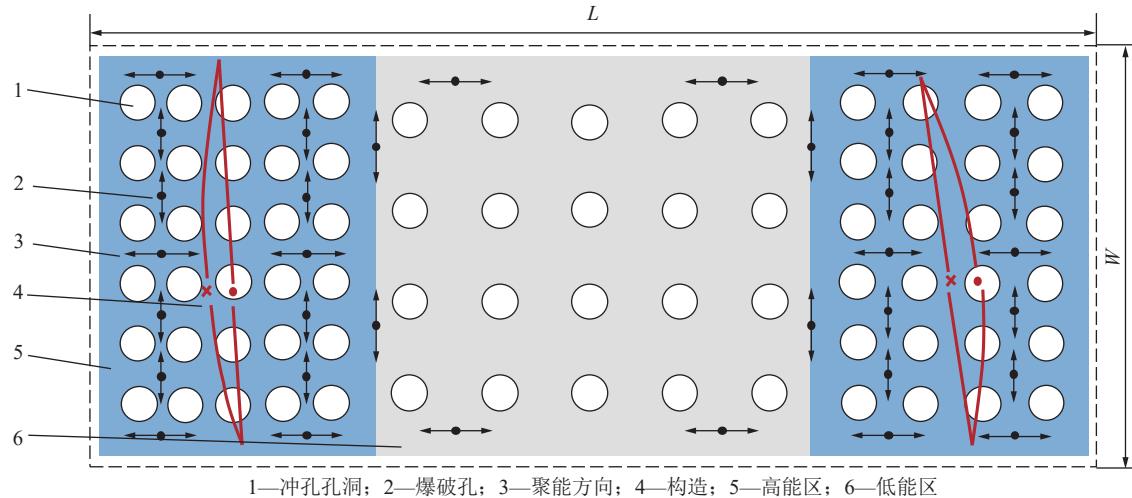


图1 能量单元切割理论及冲爆技术布孔示意

Fig.1 Drilling arrangement diagram of the energy unit cutting theory and punching-blasting technology

表1 煤层高、低能级分区阈值条件

Table 1 Threshold conditions for high and low energy level areas in coal seam

项目	高能区阈值	数据来源与依据
坚固性系数	< 0.5	《煤矿安全规程》
瓦斯压力/MPa	> 0.74	《煤矿安全规程》
瓦斯含量/(m ³ · t ⁻¹)	> 6	《煤矿安全规程》
瓦斯放散初速度/kPa	> 1.33	《煤矿安全规程》
地应力/MPa	较低能区增加30%以上	薛湖施工经验
煤层变厚系数	> 40%	突出事故调查

注:高能区满足以上任意2个及以上参数的阈值条件。

在构造异常区首先采取冲孔措施,然后在冲孔孔洞之间布置定向聚能爆破孔并实施爆破。冲孔措施使孔洞周围煤体产生卸荷损伤,同时,应力降低使裂隙张开,煤体渗透率显著提高。爆破技术为爆生气体与冲击波提供定向传播通路,冲孔孔洞作为控制孔参与裂隙扩张,提供应力波传递自由面和煤体位移空间,促使冲孔孔周煤体产生大量环向裂隙网,爆生裂隙和煤体原生裂隙相贯通,促进切割单元煤体的应力再平衡,释放构造异常区煤体富集能量,使得煤体弹性能和瓦斯膨胀能梯度发生改变,实现构造异常区突出能量单元的有效切割,从而强化构造异常区煤体增透效

果,促进瓦斯抽采。

1.3 煤层冲孔卸压增透原理

水力/气动冲孔是利用高压水/气射流冲击破坏并带出大量煤体形成孔洞,改变孔洞周围煤体应力状态,使孔周煤体迅速松动并向孔洞位移,促进孔周煤体裂隙发育,卸压半径显著扩大,透气性大幅提高^[36]。煤体渗透率与应力状态密切相关,GAO等^[37]依据数值分析和应力分布状态对水力冲孔孔周煤体的渗透率演化模型进行了研究,结果如图2所示(其中, σ_0 为初始水平应力; σ_r 为径向应力; σ_t 为切向应力; P_0 为初始孔隙压力; P 为孔隙压力; k 为渗透率; k_0 为初始渗透率; $k_{A,I}$ 为距钻孔不同距离处煤体渗透率; d 为距离)。由图2可看出,冲孔后,孔周煤体渗透率随着距离的增加呈现“先增后减”趋势,远端逐渐恢复到初始渗透率。

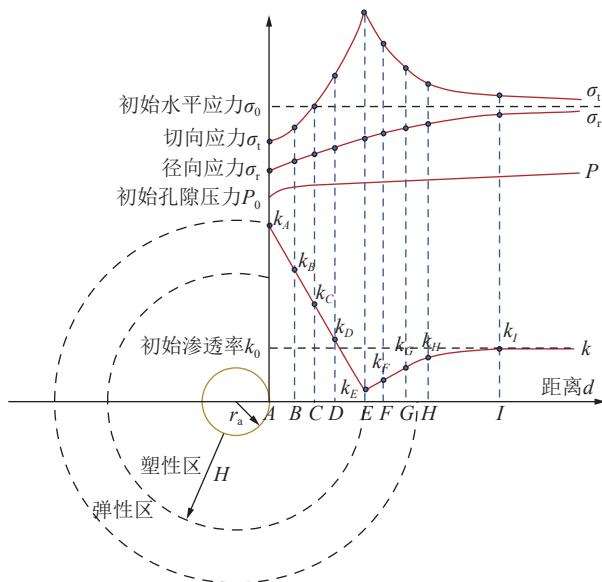
在靠近冲孔孔洞的卸压损伤区域的煤体渗透率明显提升,说明冲孔在卸压增透作用方面的有效性。此外,应力集中区域的煤体渗透率减小,对瓦斯抽采有一定的阻碍作用。

1.4 可控定向聚能爆破卸压增透机制

1.4.1 聚能管的聚能机制

聚能管作为一种装药载体,在可控定向聚能爆破技术中至关重要,其结构如图3所示。

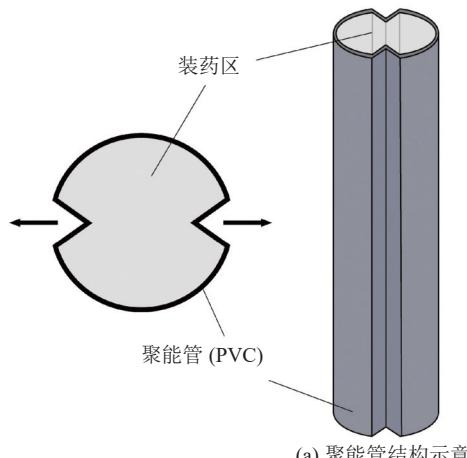
根据聚能管结构(图3),将聚能爆破能量分布分

图2 水力冲孔孔洞附近煤体渗透率演化模型^[37]Fig.2 Evolution model of coal permeability around hydraulic flushing holes^[37]

为3个方向:主聚能方向、伴生聚能方向和非聚能方向^[15]。聚能管引爆后,爆炸冲击波沿径向传播至聚能管内壁时,聚能槽方向I发生定向聚能爆炸,称主聚能方向。随爆炸冲击波传播,经聚能槽内壁反射的冲击波相互叠加,在主聚能方向垂直方向上集聚,为伴生聚能方向II。对于方向III,爆炸能量分布受聚能槽影响较小,为非聚能方向。在主聚能方向上,聚能射流的侵彻作用使煤体形成较深的初始裂隙;由于冲击波作用面较广,该伴生聚能方向上煤体会形成较为密集的初始裂隙网。

1.4.2 煤体裂隙扩展机制

在可控定向聚能爆破作用下,煤体破裂形式一般有压缩破坏和拉伸破坏2种形式。当煤体所受应力满足式(2)^[38]时,煤体破裂失效,不再承受力的作用。



(a) 聚能管结构示意

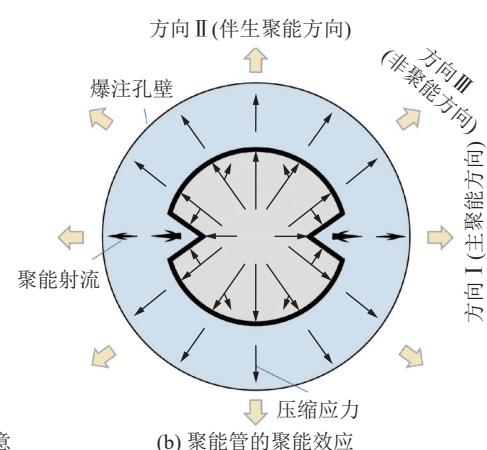


图3 聚能管及其聚能效应(修改自文献[15])

Fig.3 Concentrator and energy gathering effect (Modified from the literature [15])

$$\begin{cases} P_m \geq P_{\max} \\ P_m \leq P_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_m 为煤体所受压、拉应力, MPa; P_{\max} 为煤体动态抗压强度, MPa; P_{\min} 为煤体动态抗拉强度(取负值), MPa。

当压应力大于等于煤体的动态抗压强度时,煤体会发生压缩破坏,当拉应力大于等于煤体抗拉强度时,会发生拉伸破坏。爆破产生能量主要以两种形式进行耗散,一部分以爆炸冲击波形式作用在煤体上用于压碎煤体产生初始裂隙以及裂隙的初始扩展,另一部分则以高压气体的形式作用在裂隙尖端进行耗散用于中后期的裂隙扩展^[39]。在压缩应力波作用下煤体会发生径向压缩变形和切向拉伸变形,抗拉强度一般较小,黄楷等^[40]测出构造作用形成糜棱煤的平均抗拉强度为0.126 MPa,裂隙扩展由压缩破坏转为拉伸破坏。

1.4.3 控制孔的作用机理

在爆破孔周围设置控制孔可影响裂隙扩展规律。控制孔即空孔(冲孔孔洞),可为应力波传播提供自由面,聚能管引爆后,应力波到达控制孔时会形成应力集中,即为控制孔的应力集中效应^[41]。当压缩应力波传播到控制孔时,会经自由面反射产生拉伸应力波,使煤体产生切向变形,当煤体质点之间产生位移差达到一定程度时,会在控制孔周围产生裂隙。可控定向聚能爆破时,控制孔边界的应力反射迭加作用如图4所示。

由图4可知,爆破产生的应力波经过控制孔的边界发生反射,控制孔周围煤体的任意一点M同时受到入射的压缩应力波 σ_{ry} 、反射拉伸波 σ_{rf} 和反射横波 σ_{rh} 三者的应力叠加作用。根据弹性力学理论^[42],当应力波传播至控制孔时,控制孔周围煤体任意一点M的峰

值应力状态为

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2} (1 - k^2) (\sigma_{m\theta} - \sigma_{mr}) + \frac{1}{2} (1 - 4k^2 + 3k^4) (\sigma_{m\theta} \cos 2\theta - \sigma_{mr} \cos 2\theta) \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2} (1 + k^2) (\sigma_{m\theta} - \sigma_{mr}) + \frac{1}{2} (1 + 3k^2) (\sigma_{m\theta} \cos 2\theta + \sigma_{mr} \cos 2\theta) \quad (4)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2} (1 + 2k^2 - 3k^4) (\sigma_{m\theta} \cos 2\theta + \sigma_{mr} \cos 2\theta) \quad (5)$$

$$K = \frac{r}{r_m} \quad (6)$$

式中: σ_{mr} 为控制孔周围煤体任意质点 M 的径向应力, MPa; $\sigma_{m\theta}$ 为 M 点的切向应力, MPa; σ_{rr} 为控制孔周围煤体应力集中后 M 的径向应力, MPa; $\sigma_{\theta\theta}$ 为控制孔周围煤体应力集中后 M 点的切向应力, MPa; $\tau_{r\theta}$ 为控制孔周围煤体应力集中后 M 点剪应力, MPa; r 为控制孔半径, m; r_m 为 M 点到控制孔中心的距离, m; θ 为 M 点到控制孔中心的连线与爆破孔到控制孔中心连线的夹角。

说明控制孔周围煤体质点在爆破孔与控制孔中心的连线上时,会出现最大拉应力^[43]。当质点径向应力 σ_{rr} 大于煤的动态抗拉强度时,控制孔周围煤体会产生环向裂隙,而当质点切向应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 大于煤的动态抗拉强度时,控制孔周围煤体会产生径向裂隙。

2 煤层冲孔数值模拟分析

以薛湖煤矿 29040 机巷底抽巷穿层冲孔造穴为背景,采用 FLAC^{3D} 模拟软件模拟煤层不同水力冲孔半径条件下的煤体变形破坏情况,分析冲孔后孔周煤体的塑性区和应力分布规律。

2.1 数值模型的建立

29040 工作面埋深约 900 m, 煤厚为 2.7 m。考虑到水力冲孔孔洞的对称性, 只对冲孔孔洞的 1/8 进行建模, 如图 5 所示。将图 5 中的 OA 设置为冲孔孔周煤体物理参数的监测线。结合矿井实测数据, 煤岩层参数赋值见表 2。

2.2 水力冲孔后煤体卸压特征

为研究不同造穴半径对孔周煤体应力的影响, 分别对造穴半径为 0.3、0.6 和 0.9 m 的水力冲孔进行模拟。冲孔孔周煤体的三向主应力分布如图 6 所示。

由图6可看出,水力冲孔作业后,冲孔孔周煤体的初始应力平衡被打破,再平衡后形成新应力分布。在冲孔孔周煤体最大主应力和中间主应力形成了一定范围的卸压区。最大主应力在卸压区之外又形成应力集中区。最小主应力在孔周显著降低,产生的卸

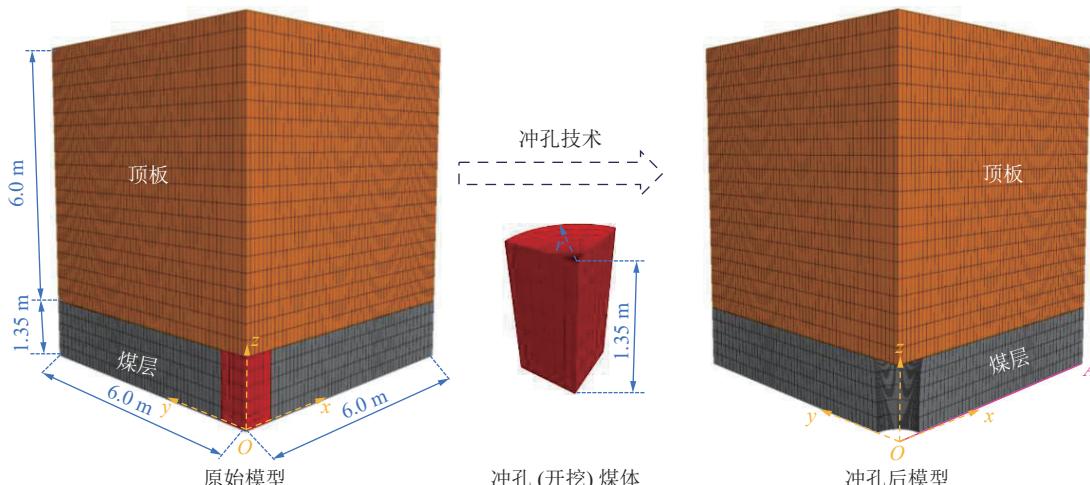


图 5 水力冲孔模拟几何模型
Fig.5 Flushing simulation geometric model

表2 模型主要参数

Table 2 Main parameters of the model

煤岩层	密度/ (kg·m ⁻³)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	厚度/ m
煤层	1 366	1.61	0.70	2.71	26	1.35
顶板	2 600	22.00	13.20	16.00	29	6.00

压范围大于其他两向主应力。随着钻孔孔径的增加,孔周煤体塑性区增大,裂隙更发育,为瓦斯渗流提供通道,但钻孔周围应力集中更显著。

为定量分析冲孔的卸压范围,使用OA监测线对距冲孔孔洞不同距离的煤体应力进行了监测,结果如图7所示。OA监测线表示距冲孔距离。

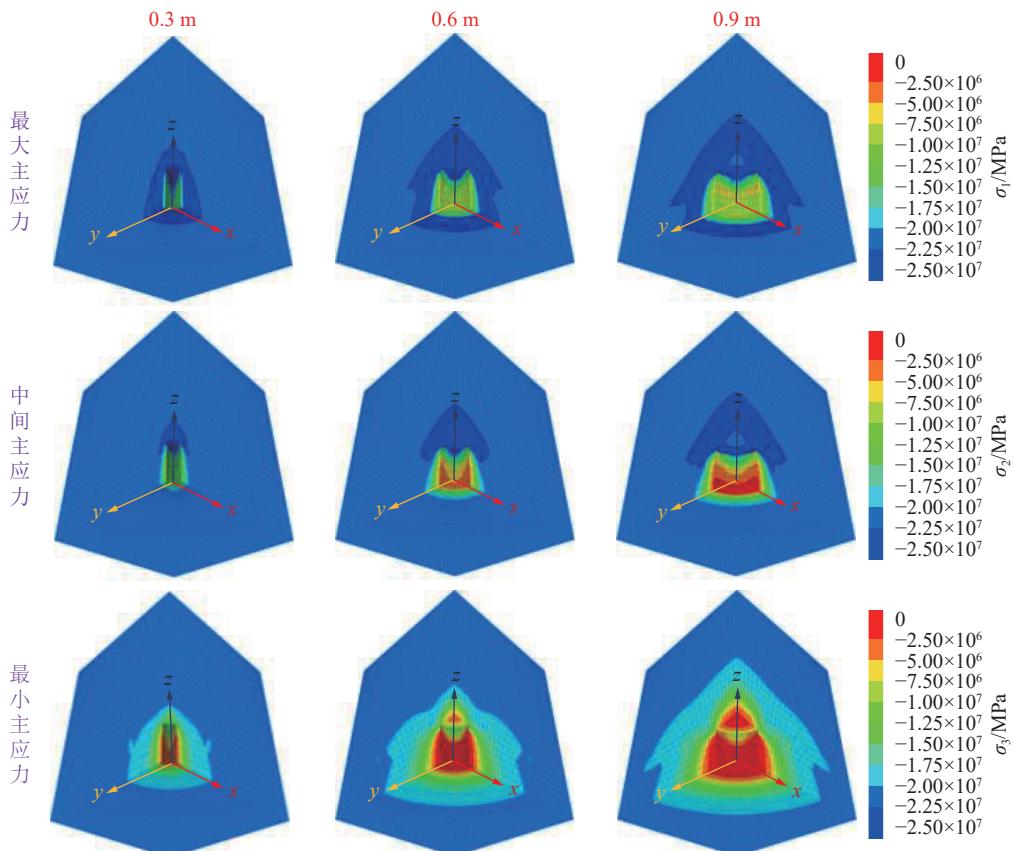


图6 冲孔孔周煤体三向主应力分布云图

Fig.6 Principal stress distribution of coal around flushing holes

3 煤层可控定向聚能爆破数值模拟

为研究煤层可控定向聚能爆破与冲孔孔洞的动态作用效应,基于薛湖煤矿煤层参数、水力冲孔布置方式等现场情况,利用ANSYS/LS-DYNA,建立了可控定向聚能爆破与冲孔孔洞协同作用数值算模型。

由于聚能管的径向长度远小于轴向,为研究定向爆破的动态力学效应,将研究对象视为平面动态问题。

如图7所示,随着冲孔半径的增加,三向主应力的卸压半径也随之增大。水力冲孔后塑性区范围增大,应力集中向远离工作面或煤壁方向移动,卸压区加长,降低了工作面前方煤体的弹性,提高了煤层的透气性^[12]。最大主应力和中间主应力的卸压半径较小。以冲孔半径0.6 m为例,最大主应力的卸压半径为0.91 m,中间主应力的卸压半径为1.58 m(图7)。最小主应力的卸压范围最大,最大主应力在卸压区和原始应力区中间形成应力集中区。为减少应力集中区对抽采效率的影响,应根据测得的有效抽采半径合理布置冲孔钻孔^[9]。当地质条件发生较大变化时,钻孔有效抽采半径可能会发生变化,若不能及时调整抽采半径,可造成煤层局部地点瓦斯抽采不达标^[44]。

设置无反射边界来表征井下较大尺寸的煤层。考虑到模型对称性,对模型适当简化,只构建并求解1/4模型^[45],运用LS-PREPOST的镜像模型功能进行后处理。

3.1 几何模型构建

采用三维实体建模方法,利用ANSYS Workbench平台建模。考虑现场水力冲孔出煤量和布孔间距,设计几何模型为1 000 cm×1 000 cm×0.2 cm。模

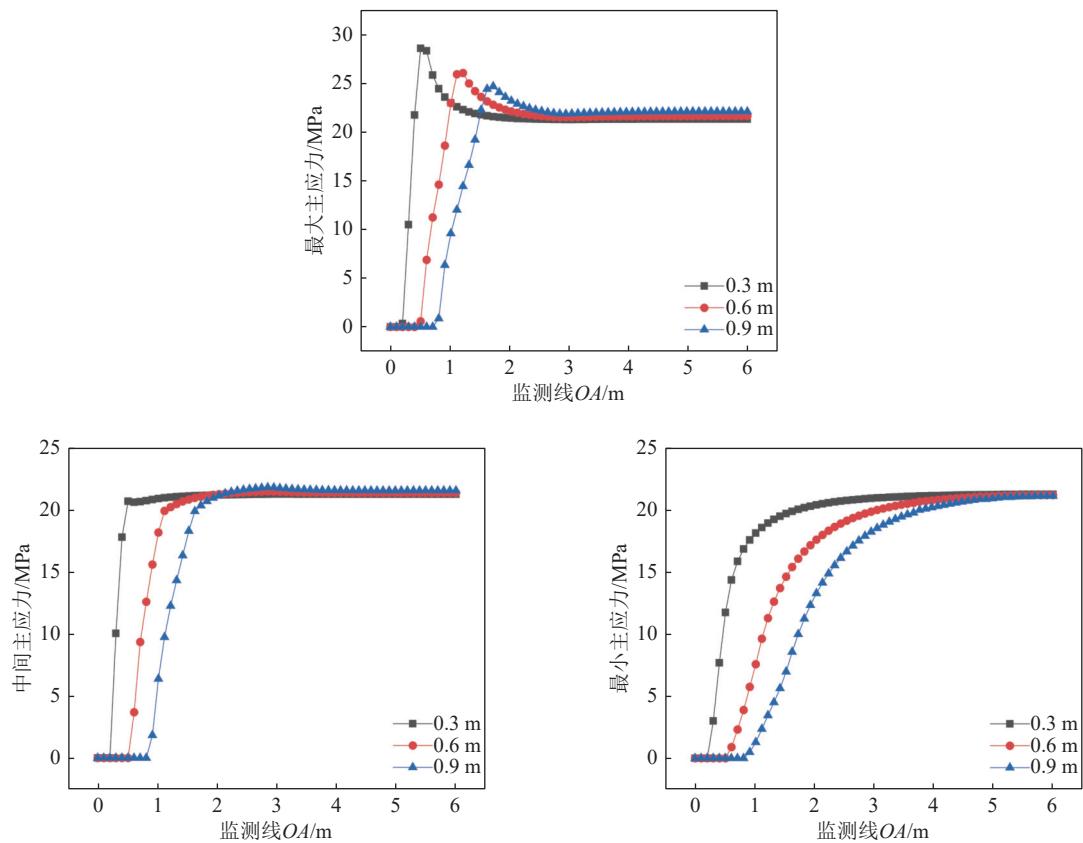


图 7 水力冲孔孔洞周围煤体三向主应力监测结果

Fig.7 The principal stress monitoring results of coal around hydraulic flushing holes

型正中央设计一个爆破孔, 直径 8.9 cm。爆破孔周围设计 4 个冲孔孔洞, 直径为 100 cm, 两冲孔中心距离为 500 cm。建模使用 cm-g- μ s 单位制, 几何模型如图 8 所示。

如图 8 所示, 仅对几何模型右上 1/4 进行建模并求解, 爆破孔内设置聚能管外径 3.7 cm, 内径 2.7 cm, 聚能管包裹炸药, 炸药直径 2.7 cm。1/4 模型右侧和

上侧设置为无反射边界^[46], 左侧和下侧设置为对称约束。

3.2 材料模型和参数设置

煤体的材料设置为固体, 选择具有等效塑性应变的弹塑性材料为本构模型, 将炸药、聚能管和空气设置为流体。流体材料除了选择材料模型, 还要设置状态方程, 所建立的模型材料和状态方程参数设置均来

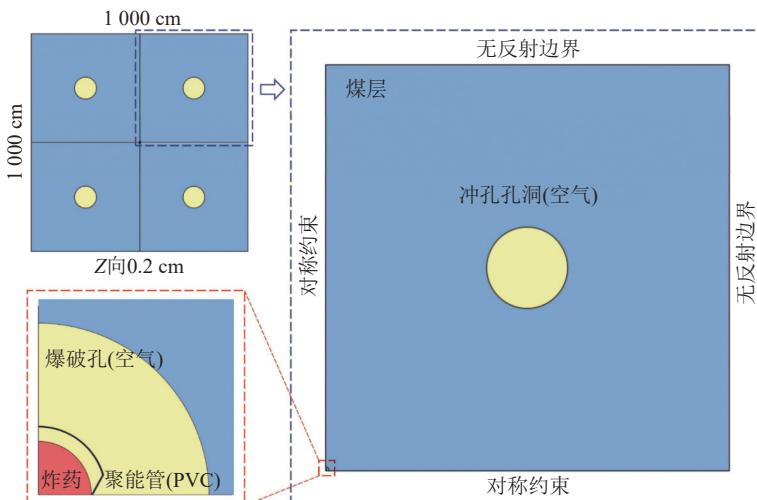


图 8 可控定向聚能爆破数值模拟几何模型

Fig.8 Geometric model for numerical simulation of controlled directional energy concentration blasting

自现场实测数据,见表3~表6。

3.3 数值模拟结果分析与讨论

3.3.1 裂隙扩展规律

根据爆炸力学和断裂力学理论,在炸药起爆后煤体所受冲击波应力强度大于它本身的断裂韧性时,裂隙会发生扩展。炸药引爆后煤体及孔周裂隙扩展发育分布模拟结果如图9所示。

如图9所示,煤体裂隙受爆破和孔洞的共同作用随时间不断扩展发育。由图9a可知,在爆破初期,爆破孔孔壁首先受到冲击载荷的作用被压碎,压碎区呈现主聚能方向大而其他方向小的类椭圆状,并在爆生气体的侵彻作用下形成具有一定深度的对称侵蚀槽,其中主聚能方向的侵蚀槽最为明显。

随着时间的推移,冲孔孔洞开始承担控制孔的作用,如图9c、图9d所示,冲孔孔周出现环向裂隙并随着裂隙扩展逐渐与非聚能方向的裂隙连通。冲孔孔洞的存在弥补了爆破非聚能方向裂隙扩展发育不足的问题。由图9e、图9f可知,冲孔孔洞与环向裂隙之间产生了径向裂隙,径向裂隙贯穿了冲孔孔洞,且在爆破孔与冲孔孔洞连线上最终形成的裂隙长度大于主聚能方向的裂隙长度。

3.3.2 网络测点单元应力

炸药引爆后爆炸应力波在煤体中传播,利用LS-PREPOST软件将模拟结果进行镜像得到爆炸应力波在煤体中的传播过程,结果如图10所示。

如图10a所示,与常规爆破的爆炸应力波呈圆形传播的方式不同^[47],定向聚能爆破由于聚能管的聚能作用,爆炸应力波传播方式呈椭圆形。爆炸应力波传播速度大于裂隙扩展速度,其主要以压缩应力的方式在煤体中传播,而在裂隙扩展掘进工作面处呈现拉伸应力集中,以主聚能方向的集中最为明显(图10b)。由图10c可知,当爆炸应力波传播至冲孔孔洞时,由于遇到新的自由面产生了反射拉伸应力波,使冲孔孔洞迎爆侧出现了拉伸应力集中,煤体从而产生环向裂隙。在爆破孔中心与冲孔孔洞中心连线上等距取5个测点单元1号~5号,测点单元选取位置如图11a所示,所绘制的单元应力变化曲线如图12a所示。此外,在爆破孔与冲孔孔周分别选取5个裂隙测点单元,单元编号分别为B1号~B5号和C1号~C5号,如图11b所示,绘制单元应力变化曲线如图12b和图12c所示。

由图11a和图12a可知,在爆破冲击载荷作用下,所选的1号~5号测点单元先后受到爆炸应力波的

表3 煤体物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of coal

密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	材料模型	失效准则
1.366	1.83	0.31	2.71	26	MAT_PLASTIC_KINEMATIC	MAT_ADD_EROSION

表4 炸药材料参数

Table 4 Explosive material parameters

密度/(g·cm ⁻³)	爆速/(m·s ⁻¹)	爆压/GPa	A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	ω	E ₀ /J	材料模型	状态方程
1.14	3 200	2.918	246.1	1.026	7.177	2.401	0.069	0.041 9	MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN	JWL

注: A、B、ω、R₁、R₂为炸药性质常数; E₀为爆轰产物内能, J。

表5 聚能管材料参数

Table 5 Concentrator material parameters

密度/(g·cm ⁻³)	C	S ₁	S ₂	S ₃	γ ₀	a	E/J	μ	材料模型	状态方程
1.41	0.394	1.49	0	0	2.02	0.47	0	1	MAT_STEINBERG	GRUNEISEN

注: S₁、S₂、S₃为反应冲击波作用于聚能管时,聚能管粒子的震动速度曲线的斜率系数; γ₀为方程常数; a为一阶体积修正量; E为初始内能, J; μ为初始相对体积。

表6 空气材料参数

Table 6 Air material parameters

密度/(kg·m ⁻³)	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	E ₀ /J	材料模型	状态方程
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5 × 10 ⁻⁸	MAT_NULL	LINEAR_POLYNOMIAL

注: C₀~C₆为状态方程常数; E为初始内能, J。

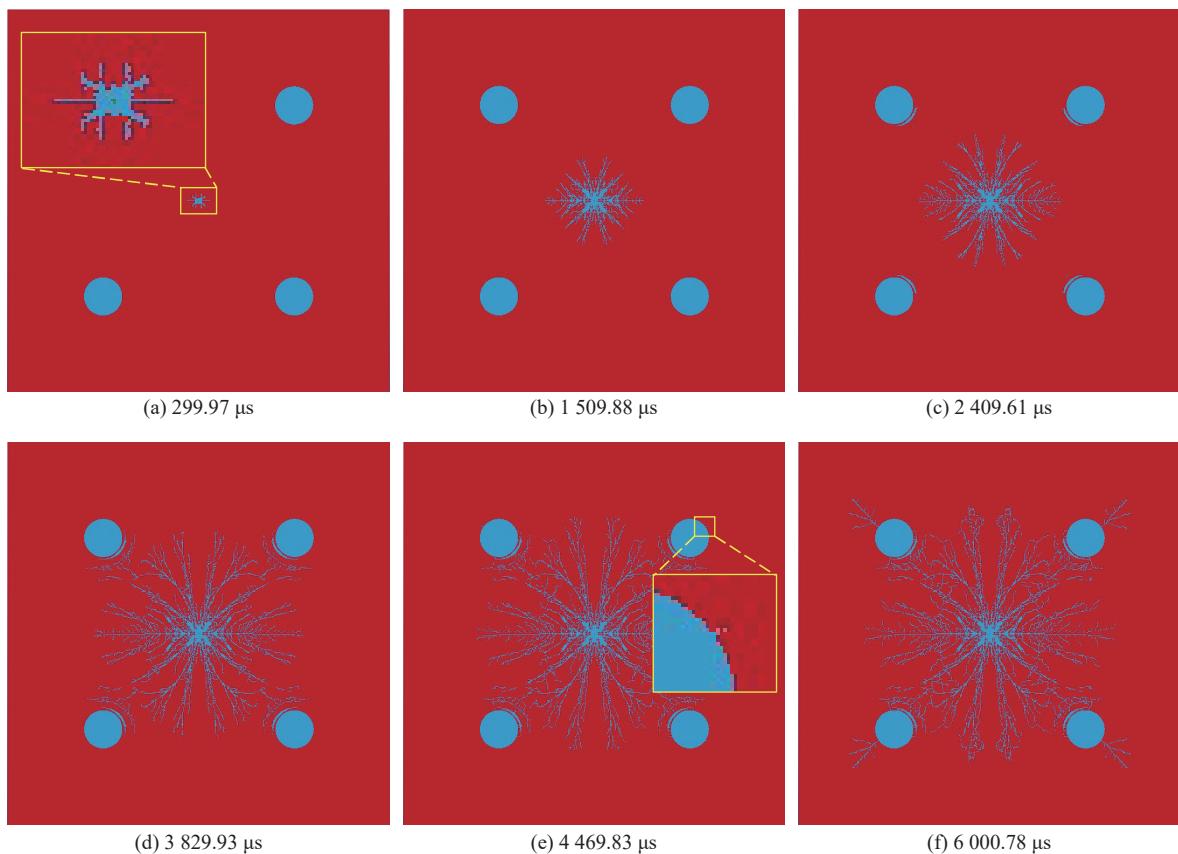


图9 可控定向聚能爆破过程中裂隙扩展过程

Fig.9 Fracture expansion during controlled directional energy concentration blasting

压缩和拉伸作用。后逐步随时间变化,不断在压缩应力和拉伸应力之间波动。

图12b所示的裂隙测点单元应力变化曲线在产生裂隙之后停止上下波动,表明这些裂隙测点单元在爆破冲击下破坏失效。B1号~B3号裂隙测点单元在达到峰值应力之后迅速衰减为0,说明在距爆破孔一定距离内煤体所受的压缩应力强度大于其断裂韧性,从而产生了压缩破坏。B4号~B5号裂隙测点单元由于应力传播过程中能量损耗导致压缩应力峰值小于B1号~B3号,压缩应力强度小于其断裂韧性,在应力缩减后产生了短暂波动后,拉伸应力达到峰值后迅速变为0,表明B4号~B5号产生了拉伸破坏。由此可知,靠近爆破孔的裂隙是由于煤体产生了压缩破坏,而其他裂隙扩展是由于煤体产生了拉伸破坏。

由图12c可知,聚能爆破使冲孔孔洞附近的煤体会受控制孔自由面的影响产生环向裂隙,环向裂隙与爆破孔扩展的裂隙相贯通,会弥补定向聚能爆破在非聚能方向裂隙扩展不足的局限。

4 冲孔-爆破协同增透技术工程应用

4.1 工程概况

薛湖煤矿为突出矿井,二₂煤层实测最大瓦斯压

力为1.90 MPa,瓦斯含量为12.83 m³/t。29040工作面正常区煤体坚固性系数 f 为0.55,断层附近煤体变软, f 仅为0.21。为保证29040机巷掘进的安全,现场采取了底抽巷穿层钻孔与水力冲孔等强化瓦斯抽采措施,大部分区域实现抽采达标。但构造异常区煤层瓦斯抽采仍不能抽采达标,亟需一种安全高效的卸压增透措施。

4.2 试验方案

为验证冲爆协同增透技术的可行性和增透影响范围,在29040工作面水力冲孔区域开展现场试验,采用矿用乳化炸药,聚能管如图13所示。增透效果的考察主要通过应力和瓦斯抽采效果变化分析,应力通过围岩应力传感器(图14)和排渣量考察,瓦斯抽采效果通过抽采纯量考察。根据现场条件,确定试验与考察范围为29040机巷的构造异常区(图15)。

单(双)根聚能管爆破影响范围测试步骤:

- 1) 在29040机巷49~54列水力冲孔区域先用ø89 mm钻头施工A1号~A5号孔,钻孔间距2 m,打孔过程中,测定16~21 m的每米排渣量。施工前关闭29040机巷底抽巷49~54列穿层钻孔;
- 2) A1号~A5号孔施工完毕后,注浆封孔14 m,使用集气多通装置进行瓦斯抽采;

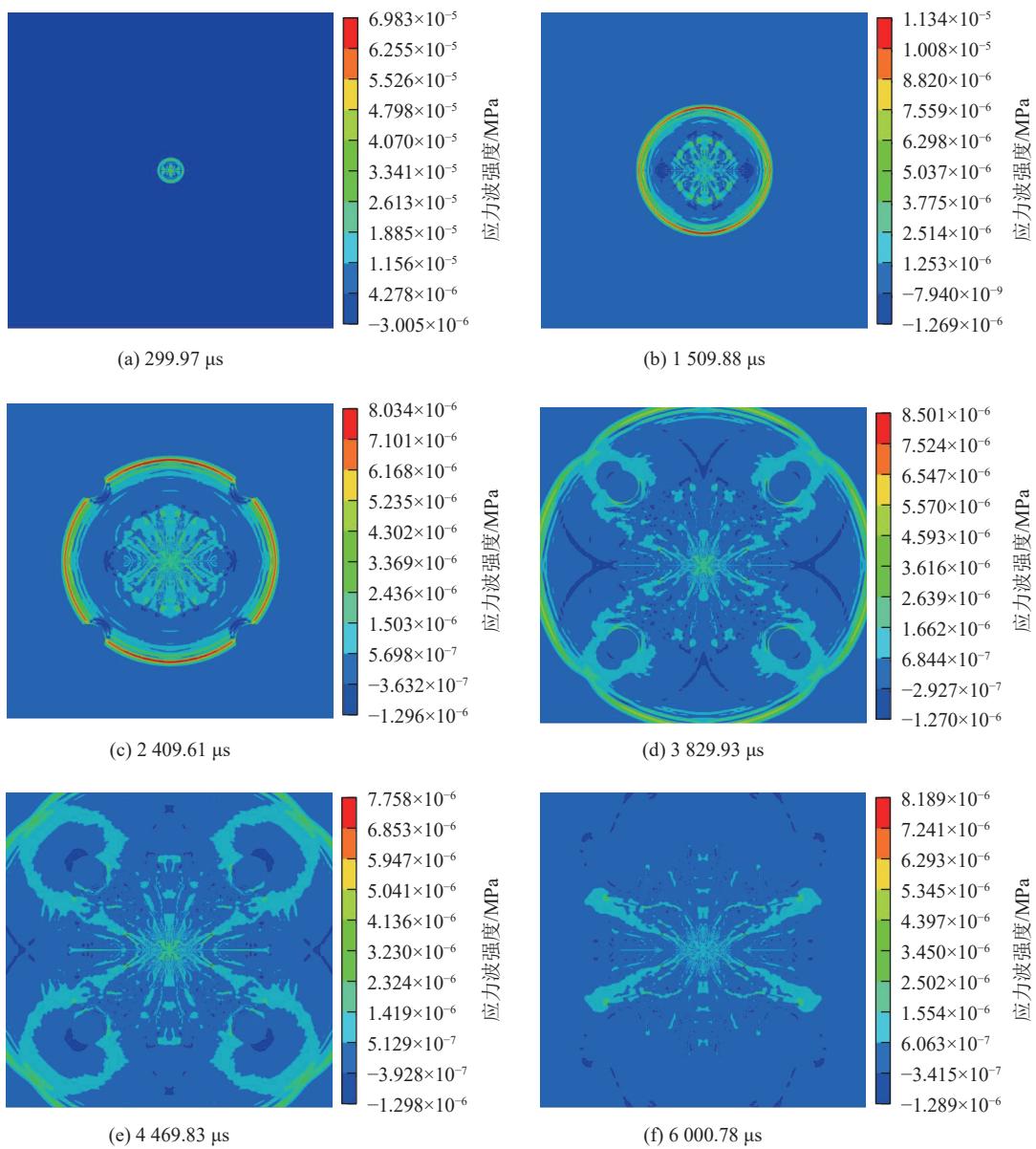


图 10 可控定向聚能爆破过程中爆炸应力波传播过程

Fig.10 Explosive stress wave propagation process during controlled directional energy concentration blasting

3) A1号~A5号孔瓦斯抽采稳定后, 使用 $\varnothing 89$ mm钻头施工A0号孔, 并送入5 m聚能管, 聚能方向平行于巷道, 封孔16 m;

4) A0号孔封孔24 h后进行起爆, 起爆前记录A1号~A5号孔稳定后的抽采数据;

5) 引爆30 min后, 测试人员进入现场(35 min), 每10 min记录1次A1号~A5号孔的抽采数据, 记录起爆后35~105 min时段的数据, 之后连续观测10 d, 每天一测;

6) 起爆35 min后, 使用 $\varnothing 89$ mm钻头开始施工A6号~A10号孔, 打孔过程中测定16~21 m的每米排渣量;

7) 分别在A6号~A10号孔周围用 $\varnothing 50$ mm钻头

施工应力测试孔, 孔深为16 m, 并安装围岩应力传感器, 每天读数直至示数稳定。

双根聚能管爆破影响范围测试步骤与以上步骤类似, 布孔参数如表7及图16所示。

4.3 试验结果分析及瓦斯治理效果

4.3.1 应力测试结果分析

应力测试结果如图17所示。

李元林等^[48]开展了深孔预裂爆破增透技术研究, 指出爆破会引起煤体应力的二次分布。由图17可知, 随着距爆破孔距离的增大, 应力整体上呈波动性增大的趋势。爆破孔2~8 m的应力皆小于10 m处的应力, 说明爆破使煤体内部应力重新分布, 对周围煤体10 m范围起到了明显的卸压作用。

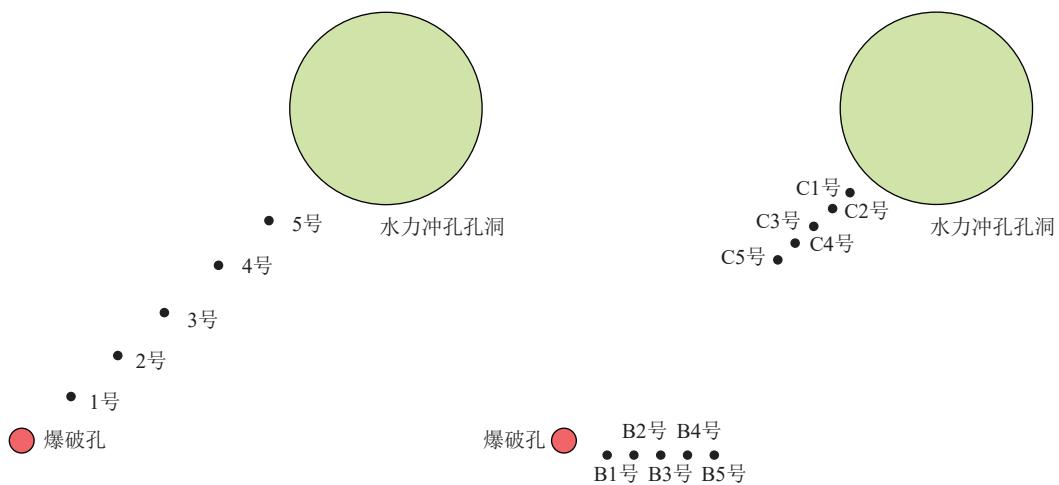


图 11 测点单元选取示意

Fig.11 Measurement point unit selection schematic diagram

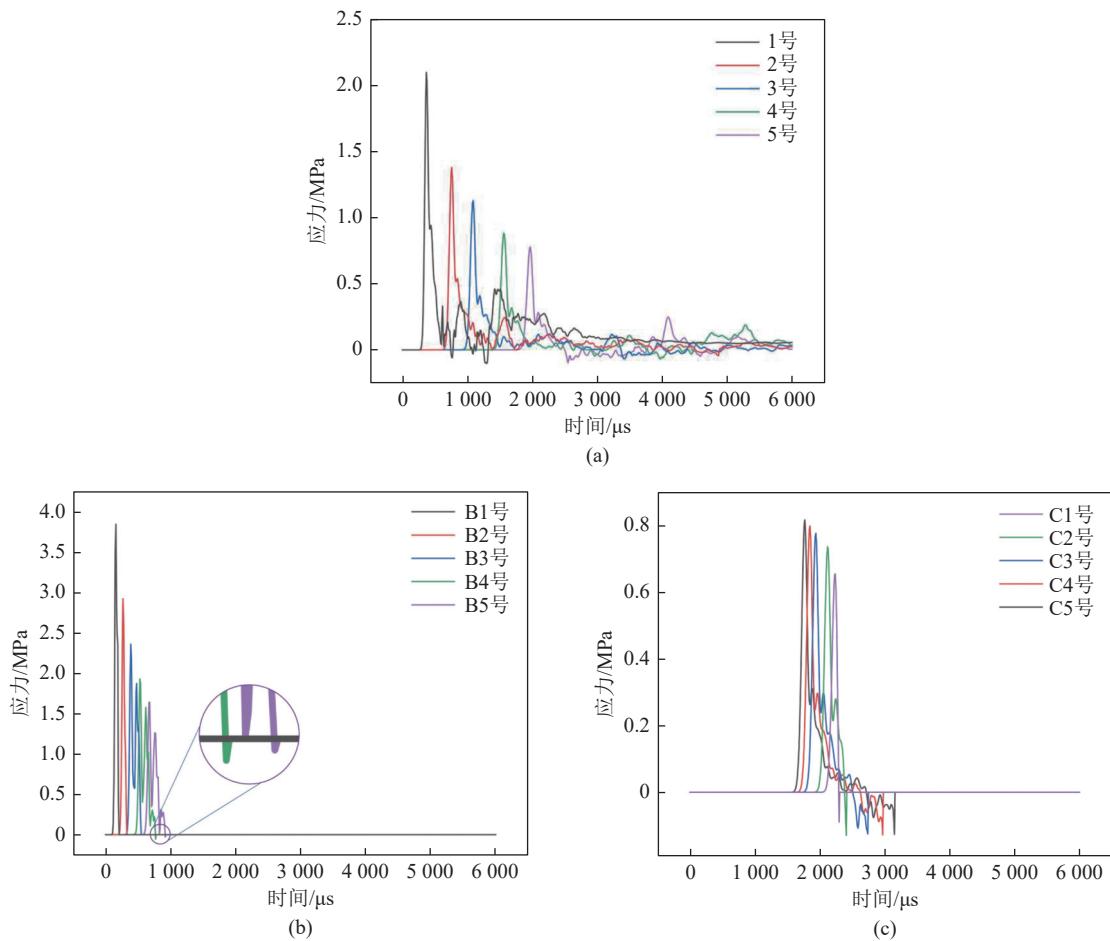


图 12 可控定向聚能爆破时各测点单元应力变化曲线

Fig.12 Unit stress change curves at each measurement point during controlled directional energy concentration blasting

4.3.2 排渣量测试结果分析

钻孔排渣量可反映测试地点应力, 为考察爆破对煤体应力的影响, 测定了距离爆破孔不同距离处煤体爆破前后钻孔的排渣量^[49]。与突出预测指标钻屑量测试方法不同, 本试验使用 $\varnothing 89$ mm 钻头测试钻孔施工过程中 16~21 m 的每米排渣量。爆破前后钻孔

排渣量测试和分析结果如图 18 所示。

由图 18 可知, 无论是单根聚能管还是双根聚能管, 距离爆破孔 10 m 范围内的排渣量均有所降低, 单根聚能管聚能爆破后 10 m 范围内平均排渣量降低了 0.45~4.08 kg/m, 双根聚能管聚能爆破后 10 m 范围内平均排渣量降低了 1.78~6.52 kg/m。表明可控定向

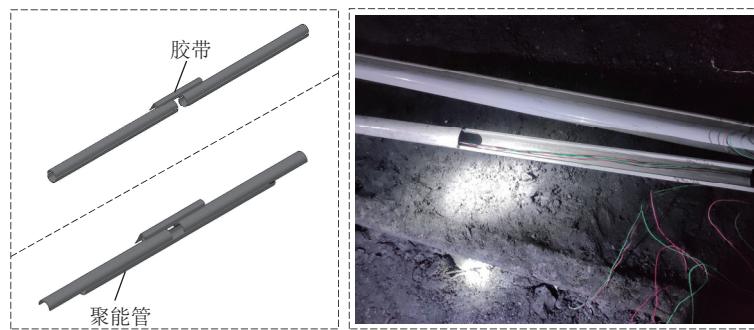


图 13 聚能管示意

Fig.13 Concentrator diagram

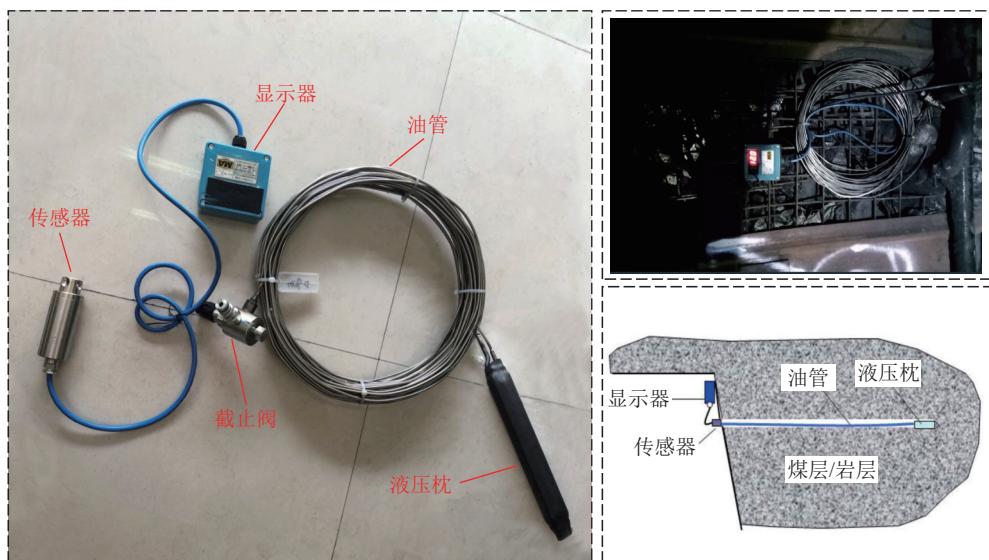


图 14 GYW25 围岩应力传感器

Fig.14 GYW25 perimeter rock stress sensor

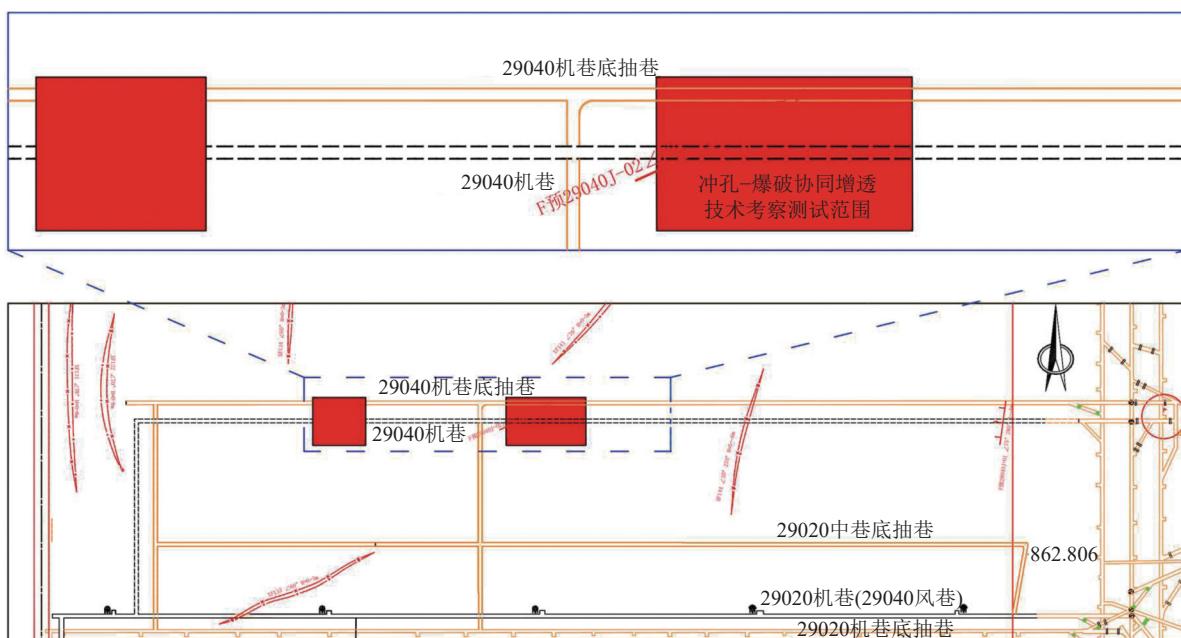


图 15 冲孔-爆破协同增透技术测试考察范围

Fig.15 “Punching-Blasting” technology testing and investigation scope

表 7 单(双)根聚能管爆破测试钻孔施工参数

Table 7 Construction parameters of single (double) concentrator blasting test drill holes

孔号	孔深/m	封孔长度/m	开孔高度距煤层底板/m	钻孔类型	钻孔方向	备注
A0号	21	16	1.1	爆破钻孔	垂直机巷北帮	单根聚能管
B0号	21	16	0.9	爆破钻孔	垂直机巷北帮	双根聚能管
A1号	21	14	0.8	瓦斯抽采钻孔	垂直机巷北帮	
A2号	21	14	0.8	瓦斯抽采钻孔	垂直机巷北帮	
A3号	21	14	0.8	瓦斯抽采钻孔	垂直机巷北帮	
A4号	21	14	0.8	瓦斯抽采钻孔	垂直机巷北帮	
A5号	21	14	0.8	瓦斯抽采钻孔	垂直机巷北帮	
A6号	21		0.8	排渣测试钻孔	垂直机巷北帮	
A7号	21		0.8	排渣测试钻孔	垂直机巷北帮	
A8号	21		0.8	排渣测试钻孔	垂直机巷北帮	
A9号	21		0.8	排渣测试钻孔	垂直机巷北帮	
A10号	21		0.8	排渣测试钻孔	垂直机巷北帮	

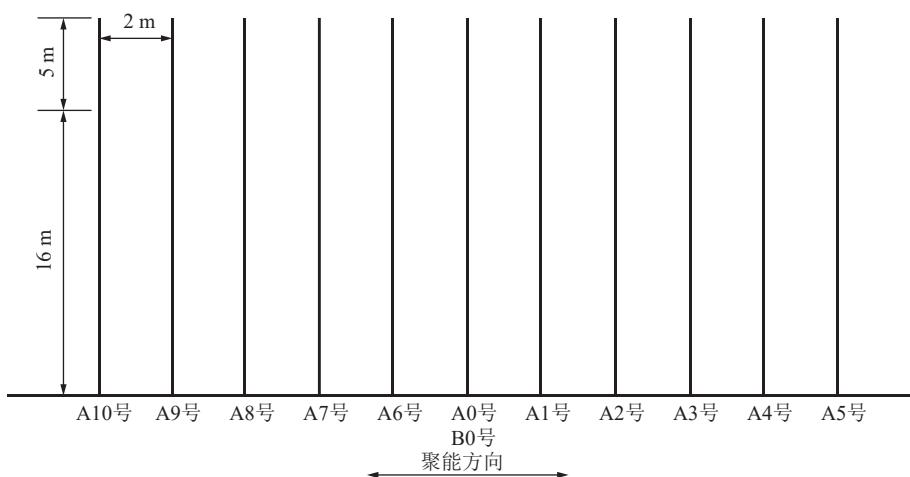


图 16 单(双)根聚能管爆破测试钻孔布置示意

Fig.16 Schematic layout of single (double) concentrator blasting test drill holes

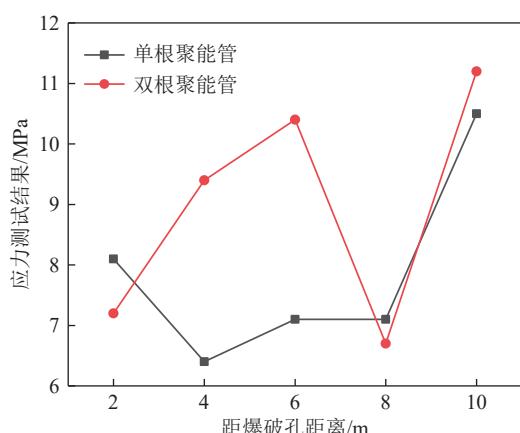


图 17 爆破后应力测试结果与距爆破孔距离的关系曲线

Fig.17 Stress test results after bursting versus distance from the bursting hole

聚能爆破在薛湖煤矿二₂煤层水力冲孔区域的卸压影

响范围至少为 10 m。

4.3.3 瓦斯抽采效果考察

在薛湖煤矿构造异常区煤层的水力冲孔区域连接管路抽采稳定后记录瓦斯抽采纯量, 爆破后 30 min 后进入现场 (35 min), 每 10 min 测定 1 次, 连续观测 10 d。单、双根聚能管爆破前后瓦斯抽采纯量变化情况如图 19 所示。

由图 19 可知, 单、双根聚能管爆破后, 距爆破孔 10 m 范围内的钻孔瓦斯抽采纯量均得到了不同程度的提升。单根聚能管爆破后 30~110 min, 距爆破孔 2~10 m 处钻孔平均抽采纯量为爆破前的 1.9~6.0 倍。双根聚能管爆破后 30~110 min, 距爆破孔 2~10 m 处钻孔平均抽采纯量为爆破前的 1.4~7.8 倍。单根聚能管爆破后平均瓦斯抽采纯量为爆破前的 1.76~4.35 倍, 双根聚能管爆破后平均抽采纯量为爆破前的

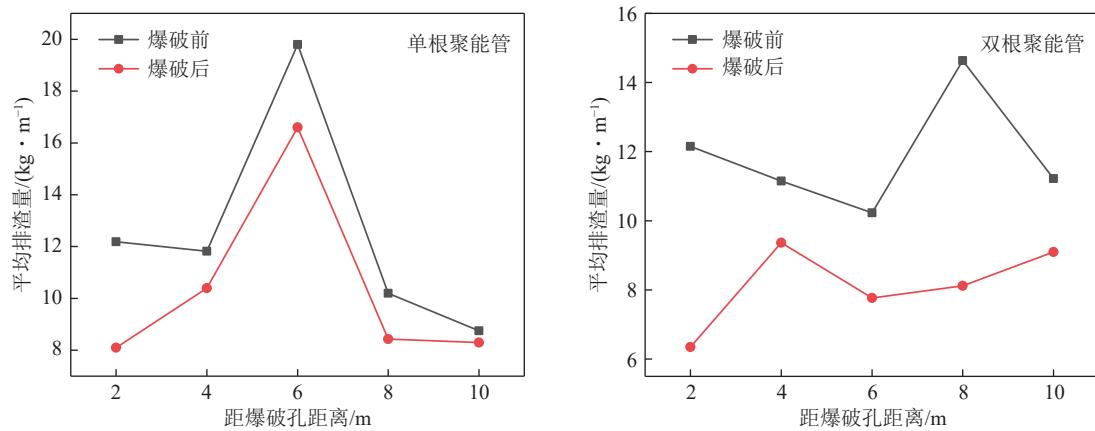


图 18 爆破前后钻孔排渣量变化曲线

Fig.18 Slag discharge curves before and after blasting

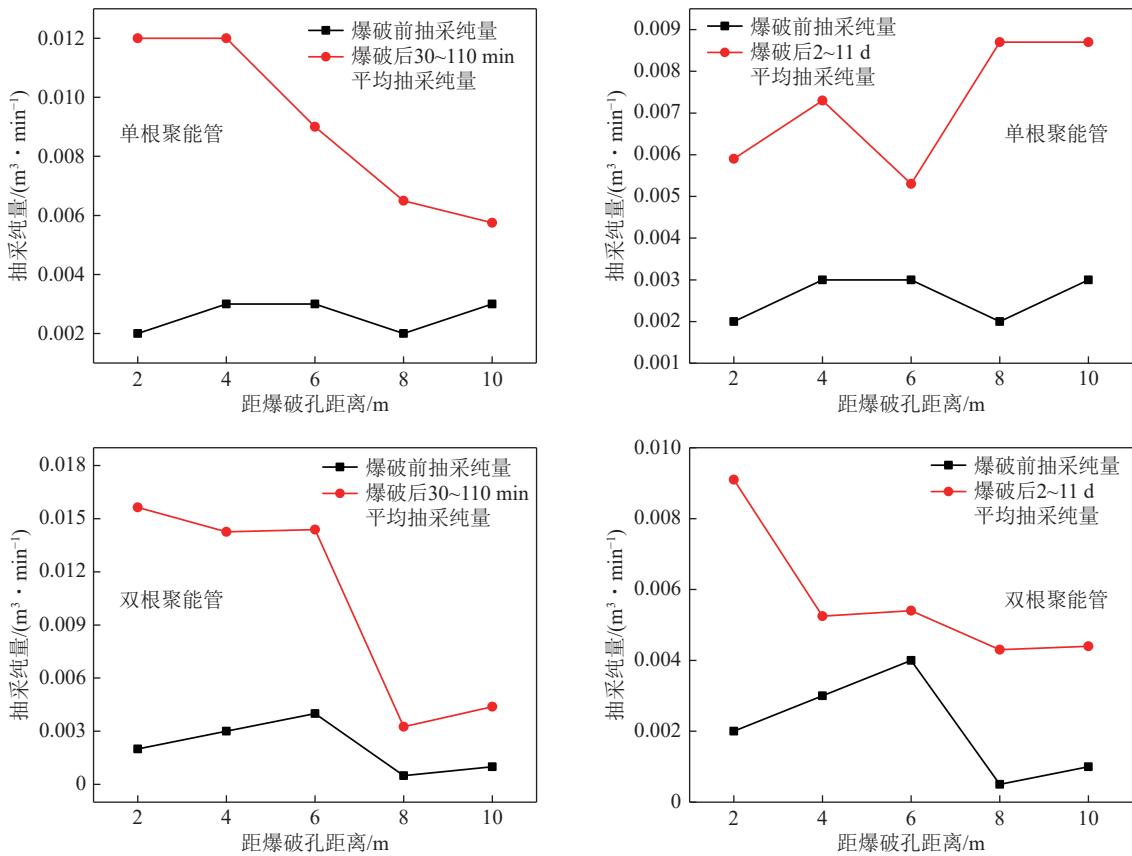


图 19 单、双根聚能管爆破前后瓦斯抽采纯量变化对比

Fig.19 Gas extraction pure volume comparison before and after concentrator blasting

1.35~8.60 倍。

可控定向聚能爆破技术在薛湖煤矿水力冲孔区域的卸压增透影响半径至少为 10 m, 对比水力冲孔有效影响半径 (5 m), 至少提高了 1 倍。

4.4 冲孔-爆破协同增透技术效果考察

4.4.1 瓦斯治理效果

在构造异常区内先后进行了 100 次取样测定煤层的瓦斯含量。其中测定原始瓦斯含量 10 次, 测定水力冲孔后抽采 2 个月的残余瓦斯含量 62 次, 测定

可控定向爆破后抽采半个月的残余瓦斯含量 28 次。将 29040 机巷构造异常区的瓦斯含量测定结果利用 Surfer 软件的克里金插值法模拟绘制成瓦斯含量等值线图^[50], 绘制结果如图 20 所示。

如图 20a 所示, 29040 机巷构造异常区的原始瓦斯含量较高, 为 $10.38 \sim 14.48 \text{ m}^3/\text{t}$, 高于突出临界值 $8 \text{ m}^3/\text{t}$, 突出危险性高。直接进行瓦斯抽采的效率低, 需要对煤层进行区域水力冲孔卸压增透措施。如图 20b 所示, 水力冲孔抽采瓦斯 60 d 后的大部分煤层

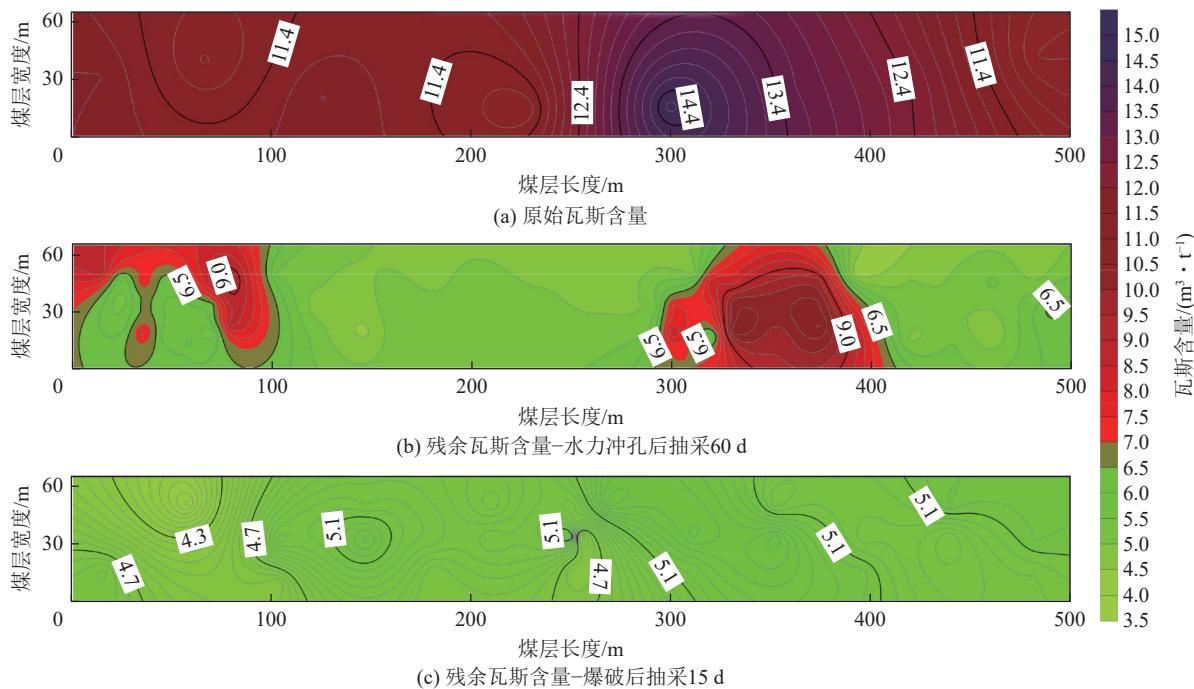


图 20 冲爆协同卸压增透技术应用过程中瓦斯治理效果对比

Fig.20 Gas content changes during the application of the combined flushing and blasting technology

残余瓦斯含量已经低于 $6 \text{ m}^3/\text{t}$, 但在部分区域残余瓦斯含量仍大于 $6 \text{ m}^3/\text{t}$, 局部区域高达 $11.04 \text{ m}^3/\text{t}$, 仍具有突出危险性。随后对煤层实施了可控定向聚能爆破技术, 补充卸压增透, 瓦斯抽采 15 d 后煤层残余瓦斯含量已全部小于 $6 \text{ m}^3/\text{t}$, 如图 20c 所示。

4.4.2 煤巷掘进情况

29040 机巷原来煤巷的掘进速度为 $160 \text{ m}/\text{月}$, 采取冲爆协同增透技术后煤巷掘进速度为 $180 \text{ m}/\text{月}$, 掘进速度提高了 $20 \text{ m}/\text{月}$ 。

5 结 论

1) 提出了一种能量单元切割理论及冲爆协同增透技术, 结合突出潜能分布和突出启动能量判据, 将煤层划分若干个能量单元, 进行边界处切割、内部分区治理。本质在于针对构造异常区煤体, 采用先冲孔后可控定向聚能爆破的方式, 对煤体定向致裂并释放应力。冲孔孔洞为爆破影响范围内煤体移动提供自由空间, 在爆破点处形成煤体自由面并改变煤层的连续性, 产生的爆生气体与经控制孔强化的定向应力波促进了应力再平衡, 使得煤体弹性能和瓦斯膨胀能梯度发生改变, 进而实现构造异常区突出能量单元的有效切割。

2) 阐明了可控定向聚能爆破技术的介质-能量切割原理, 爆破改变了被切割单元煤体自由面附近的突出潜能赋存梯度, 实现介质切割控制能量切割。通过 FLAC^{3D} 软件对冲孔造穴进行数值模拟, 结果表明冲

孔造穴可以降低钻孔周围煤体的应力, 随着冲孔半径的增大, 卸压半径亦随之增大。且冲孔后会在孔周卸压区外形成一定范围的应力集中带, 限制瓦斯流动。

3) 构建了煤层冲孔与可控定向聚能爆破协同作用的数值模型。ANSYS/LS-DYNA 模拟结果表明, 压缩应力峰值会在传播过程中逐渐减小, 爆破孔周围煤体发生压缩破坏失效产生裂隙, 随后转为拉伸破坏失效。压缩应力波会在冲孔孔洞自由面发生反射形成拉伸应力集中, 产生环向裂隙, 冲孔孔洞提供了位移补偿空间使其周围裂隙更为发育, 弥补定向聚能爆破非聚能方向煤层裂隙扩展不足的问题。

4) 现场试验结果表明, 煤层冲孔区域进行可控定向聚能爆破后, 爆破孔周围 10 m 范围内煤体应力和排渣量显著降低, 单、双根聚能管聚能爆破后 10 m 范围内平均排渣量降低了 $0.45\sim4.08 \text{ kg}/\text{m}$ 和 $1.78\sim6.52 \text{ kg}/\text{m}$ 。单、双根聚能管爆破后瓦斯抽采量分别为爆破前的 $1.76\sim4.35$ 倍和 $1.35\sim8.60$ 倍。定向聚能爆破在冲孔区域的卸压影响半径至少为 10 m , 对比水力冲孔有效半径至少提高了 1 倍。工作面残余瓦斯含量已经全部低于 $6 \text{ m}^3/\text{t}$, 煤巷月掘进速度提高了 20 m 。

参考文献(References):

- [1] 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1825-1845.
YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research pro-

- gress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1825–1845.
- [2] 程远平,雷杨.构造煤和煤与瓦斯突出关系的研究[J].*煤炭学报*,2021,46(1): 180–198.
CHENG Yuanping, LEI Yang. Causality between tectonic coal and coal and gas outbursts[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 180–198.
- [3] 张玉贵,张子敏,曹运兴.构造煤结构与瓦斯突出[J].*煤炭学报*,2007,32(3): 281–284.
ZHANG Yugui, ZHANG Zimin, CAO Yunxing. Deformed-coal structure and control to coal-gas outburst[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(3): 281–284.
- [4] 谢和平,周宏伟,刘建锋,等.不同开采条件下采动力学行为研究[J].*煤炭学报*,2011,36(7): 1067–1074.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, LIU Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(7): 1067–1074.
- [5] 刘明举,孔留安,郝富昌,等.水力冲孔技术在严重突出煤层中的应用[J].*煤炭学报*,2005(4): 451–454.
LIU Mingju, KONG Liuan, HAO Fuchang, et al. Application of hydraulic flushing technology in severe outburst coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2005(4): 451–454.
- [6] 王凯,李波,魏建平,等.水力冲孔钻孔周围煤层透气性变化规律[J].*采矿与安全工程学报*,2013,30(5): 778–784.
WANG Kai, LI Bo, WEI Jianping, et al. Change regulation of coal seam permeability around hydraulic flushing borehole[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(5): 778–784.
- [7] 刘洪永,程远平,赵长春,等.保护层的分类及判定方法研究[J].*采矿与安全工程学报*,2010,27(4): 468–474.
LIU Hongyong, CHENG Yuanping, ZHAO Changchun, et al. Classification and judgment method of the protective layers[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(4): 468–474.
- [8] 程远平,付建华,俞启香.中国煤矿瓦斯抽采技术的发展[J].*采矿与安全工程学报*,2009,26(2): 127–139.
CHENG Yuanping, FU Jianhua, YU Qixiang. Development of gas extraction technology in coal mines of China[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2009, 26(2): 127–139.
- [9] 王恩元,汪皓,刘晓斐,等.水力冲孔孔洞周围煤体地应力和瓦斯时空演化规律[J].*煤炭科学技术*,2020,48(1): 39–45.
WANG Enyuan, WANG Hao, LIU Xiaofei, et al. Spatio temporal evolution of geostress and gas field around hydraulic punching borehole in coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(1): 39–45.
- [10] 李经国,戴广龙,吴景民,等.水力冲孔后周围煤层应力分布规律研究[J].*煤矿安全*,2015,46(10): 48–51.
LI Jingguo, DAI Guanglong, WU Jingmin, et al. Study on distribution laws of coal seam stress after hydraulic flushing[J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(10): 48–51.
- [11] 李成武,乔朕.煤与瓦斯突出局部防突措施失效判定方法[J].*煤炭学报*,2024,49(S2): 924–933.
LI Chengwu, QIAO Zhen. Failure judgment method of local outburst prevention measures for coal and gas outburst[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(S2): 924–933.
- [12] 刘明举,崔凯,刘彦伟,等.深部低透气性煤层水力冲孔措施防突机理分析[J].*煤炭科学技术*,2012,40(2): 45–48.
LIU Mingju, CUI Kai, LIU Yanwei, et al. Analysis on outburst prevention mechanism of borehole hydraulic flushing measures for deep and low permeability seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(2): 45–48.
- [13] ZHANG R, CHENG Y P, YUAN L, et al. Enhancement of gas drainage efficiency in a special thick coal seam through hydraulic flushing[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 124: 104085.
- [14] 王振锋,王宇,张涛.掘进工作面水环保压聚能定向爆破卸压技术与装置[J].*煤炭学报*,2023,48(11): 4036–4048.
WANG Zhenfeng, WANG Yu, ZHANG Tao. Research and application of energy-accumulating blasting and water injecting under local water storage and pressure retention in excavation working face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(11): 4036–4048.
- [15] 郭德勇,赵杰超,张超,等.煤层深孔聚能爆破控制孔作用机制研究[J].*岩石力学与工程学报*,2018,37(4): 919–930.
GUO Deyong, ZHAO Jiechao, ZHANG Chao, et al. Mechanism of control hole on coal crack initiation and propagation under deep-hole cumulative blasting in coal seam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(4): 919–930.
- [16] 郭德勇,张超,李柯,等.松软低透煤层深孔微差聚能爆破致裂机理[J].*煤炭学报*,2021,46(8): 2583–2592.
GUO Deyong, ZHANG Chao, LI Ke, et al. Mechanism of millisecond-delay detonation on coal cracking under deep-hole cumulative blasting in soft and low permeability coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2583–2592.
- [17] 郭德勇,赵杰超,朱同功,等.双孔聚能爆破煤层裂隙扩展贯通机理[J].*工程科学学报*,2020,42(12): 1613–1623.
GUO Deyong, ZHAO Jiechao, ZHU Tonggong, et al. Crack propagation and coalescence mechanism of double-hole cumulative blasting in coal seam[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(12): 1613–1623.
- [18] 李向上,郑俊杰,宋彦琦,等.高瓦斯低透气性煤层聚能爆破增透机制[J].*爆炸与冲击*,2023,43(5): 158–170.
LI Xiangshang, ZHENG Junjie, SONG Yanqi, et al. On infiltration enhancement mechanism of shaped charge blasting in high gas and low permeability coal seam[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(5): 158–170.
- [19] 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.
LIU Jian, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Application of deep borehole blasting to top-coal pre-weakening and gas extraction in fully mechanized caving[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S1): 3361–3367.
- [20] 宋彦琦,李向上,郭德勇.多孔同段聚能爆破煤层增透数值模拟及应用[J].*煤炭学报*,2018,43(S2): 469–474.
SONG Yanqi, LI Xiangshang, GUO Deyong. Numerical simulation of multi-hole and same delay time of cumulative blasting in coal seam and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018,

- 43(S2): 469–474.
- [21] 刘健, 刘泽功, 高魁, 等. 深孔定向聚能爆破增透机制模拟试验研究及现场应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2490–2496. LIU Jian, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Experimental study and application of directional focused energy blasting in deep boreholes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2490–2496.
- [22] 郭德勇, 张超, 朱同功, 等. 深孔聚能爆破起爆位置对煤层致裂增透的影响[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 302–311. GUO Deyong, ZHANG Chao, ZHU Tonggong, et al. Effect of detonating position of deep-hole cumulative blasting on coal seam cracking and permeability enhancement[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 302–311.
- [23] 梁洪达, 郭鹏飞, 孙鼎杰, 等. 不同聚能爆破模式应力波传播及裂纹扩展规律研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(4): 157–164, 184. LIANG Hongda, GUO Pengfei, SUN Dingjie, et al. A study on crack propagation and stress wave propagation in different blasting modes of shaped energy blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(4): 157–164, 184.
- [24] 杨帅, 刘泽功, 常帅, 等. 地应力作用下聚能爆破煤体损伤特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(5): 1078–1090. YANG Shuai, LIU Zegong, CHANG, Shuai et al. Experimental study on damage characteristics of coal body in concentrated shaped charge blasting under in-situ stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(5): 1078–1090.
- [25] STEWART D S, GLUMAC N, NAJJAR F M, et al. Hydrodynamics computation of jet formation and penetration for micro-shaped charges[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 58: 39–47.
- [26] 穆朝民, 王海露, 黄文尧, 等. 高瓦斯低透气性煤体定向聚能爆破增透机制[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2496–2500. MU Chaomin, WANG Hailu, HUANG Wenyao, et al. Increasing permeability mechanism using directional cumulative blasting in coal seams with high concentration of gas and low permeability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2496–2500.
- [27] 潘泱波, 刘泽功. 含硬夹矸高瓦斯低透气性煤层多向聚能爆破技术研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(11): 144–150. PAN Yangbo, LIU Zegong. Study on multi-direction shaped charge blasting technology for coal seam containing hard dirt band with high gas and low permeability[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(11): 144–150.
- [28] 郭德勇, 端筱升, 张建国, 等. 构造应力场对煤与瓦斯突出的控制作用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3076–3090. GUO Deyong, CHUAI Xiaosheng, ZHANG Jianguo, et al. Controlling effect of tectonic stress field on coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3076–3090.
- [29] 蒋静宇, 史孝宁, 王成浩, 等. 卸压速度对构造煤突出过程中瓦斯膨胀能的控制作用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(11): 4473–4485. JIANG Jingyu, SHI Xiaoning, WANG Chenghao, et al. Control effect of pressure-unloaded speed on gas expansion energy released by tectonic coal during coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(11): 4473–4485.
- [30] 蒋静宇, 史孝宁, 程远平, 等. 急速卸压条件下构造煤体应力释放规律试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(3): 634–644.
- JIANG Jingyu, SHI Xiaoning, CHENG Yuanping, et al. Study on stress release law of tectonic coal under the condition of rapid unloading confining pressure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3): 634–644.
- [31] 谢雄刚, 冯涛, 王永, 等. 煤与瓦斯突出过程中能量动态平衡[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1120–1124. XIE Xionggang, FENG Tao, WANG Yong, et al. The energy dynamic balance in coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1120–1124.
- [32] 袁亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1557–1566. YUAN Liang. Research progress on risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1557–1566.
- [33] (苏)霍多特 B B. 煤与瓦斯突出[M]: 北京: 中国工业出版社, 1966.
- [34] XUE S, ZHENG C S, ZHENG X L, et al. Experimental determination of the outburst threshold value of energy strength in coal mines for mining safety[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 138: 263–268.
- [35] WANG C H, CHENG Y P. Role of coal deformation energy in coal and gas outburst: A review[J]. *Fuel*, 2023, 332: 126019.
- [36] ZHANG H, CHENG Y P, DENG C B, et al. Stress-unloading and gas migration improvement mechanism in the soft and hard interbedded coal seam using directional hydraulic flushing technology [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(9): 1165–1179.
- [37] GAO Y B, LIN B Q, YANG W, et al. Drilling large diameter cross-measure boreholes to improve gas drainage in highly gassy soft coal seams[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 26: 193–204.
- [38] 朱飞昊, 刘泽功, 刘健, 等. 松软煤层水不耦合装药预裂爆破的力学特性数值分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(5): 124–129. ZHU Feihao, LIU Zegong, LIU Jian, et al. Numerical analysis on mechanical properties of presplitting blasting with water uncoupled charge in soft coal seam[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(5): 124–129.
- [39] GUO D Y, ZHANG H J, LYU P F, et al. Effect of fault on deep-hole cumulative blasting to improve coal bed permeability[J]. Chinese Journal of Engineering, 2014, 36(10): 1281–1286.
- [40] 黄楷, 吴基文, 翟晓荣, 等. 不同煤体结构煤岩抗拉强度测试[J]. 工矿自动化, 2021, 47(7): 115–119. HUANG Kai, WU Jiwen, ZHAI Xiaorong, et al. Tensile strength test of coal and rock with different coal structure[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(7): 115–119.
- [41] 张鑫, 刘泽功, 张健玉, 等. 高瓦斯低渗煤层控制孔与定向控制爆破复合作用增透试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 2018–2027. ZHANG Xin, LIU Zegong, ZHANG Jianyu, et al. Experimental study on permeability enhancement by combined action of control hole and directional control blasting in high gas and low permeability coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- ing, 2023, 42(8): 2018–2027.
- [42] WEI X Y, ZHAO Z Y, GU J. Numerical simulations of rock mass damage induced by underground explosion[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(7): 1206–1213.
- [43] 陈秋宇. 爆炸载荷下控制孔作用机理及应用研究[D]. 淮南: 安徽理工大学 2012.
- CHEN Qiuyu. Research on functional mechanism and application of control hole under blasting load[D]. Huainan: AnHui University of Science and Technology, 2012.
- [44] 辛新平, 杨程涛, 魏建平, 等. 强突出煤层“内保护层”构建理论及工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 267–281.
- XIN Xinpíng, YANG Chengtao, WEI Jianping, et al. Theory and engineering practice of constructing “inner protection layer” for strongly prominent coal seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(12): 267–281.
- [45] 郭德勇, 赵杰超, 吕鹏飞, 等. 煤层深孔聚能爆破有效致裂范围探讨[J]. 工程科学学报, 2019, 41(5): 582–590.
- GUO Deyong, ZHAO Jiechao, LYU Pengfei, et al. Effective fracture zone under deep-hole cumulative blasting in coal seam[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(5): 582–590.
- [46] 尚晓江, 苏建宇. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [47] 蔡峰, 刘泽功, 张朝举, 等. 高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破增透数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(5): 499–503.
- CAI Feng, LIU Zegong, ZHANG Chaoju, et al. Numerical simulation of improving permeability by deep-hole presplitting explosion in loose-soft and low permeability coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(5): 499–503.
- [48] 李元林, 刘勇, 王沉, 等. 高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破增透技术研究及应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(9): 71–76.
- LI Yuanlin, LIU Yong, WANG Chen, et al. Research and application of deep hole pre-splitting blasting technology for permeability enhancement in high gas and low permeability coal seam[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(9): 71–76.
- [49] 刘国磊, 王泽东, 张修峰, 等. 基于围岩应力差异梯度控制的深部煤巷防冲机制与技术[J]. 煤炭学报, 2025, 49(S2): 674.
- LIU Guolei, WANG Zedong, ZHANG Xiufeng, et al. Mechanism and technology of rock burst prevention in deep coal tunnel based on controlling surrounding rock stress difference gradient [J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 49(S2): 674.
- [50] 冯俊军, 王恩元, 沈荣喜, 等. 基于克里金插值法的煤体应力场分布规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(2): 38–41.
- FENG Junjun, WANG Enyuan, SHEN Rongxi, et al. Study on coal body stress distribution based on kriging interpolation method[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(2): 38–41.