



深井高瓦斯低渗煤层深孔聚能爆破增透试验研究

傅师贵 刘泽功 常帅 杨帅 张健玉 乔国栋 张鑫

引用本文:

傅师贵, 刘泽功, 常帅, 等. 深井高瓦斯低渗煤层深孔聚能爆破增透试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 158–173.
FU Shigui, LIU Zegong, CHANG Shuai. Research on deep hole convergence energy blasting for increasing permeability in deep wells with high gas and low permeability coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 158–173.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0322>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深部高瓦斯煤层爆破致裂增透裂纹扩展规律研究

Study on propagation law of cracking and permeability enhancement caused by blasting in deep high-gas coal seams
煤炭科学技术. 2024, 52(7): 89–100 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1622>

柱状聚能药管聚能罩角度对煤层爆破增透效果试验研究

Experimental study on the effect of the angle of the shaped charge tube on the penetration enhancement of coal seam blasting
煤炭科学技术. 2024, 52(3): 129–138 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0714>

水力压裂-深孔预裂爆破复合增透技术研究

Study on hydraulic fracturing-deep hole pre-splitting blasting composite permeability enhancement technology
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e5c672f8-9e94-41d6-984d-c4ea8f766a54>

松软煤层底板爆破致裂增透模拟试验研究及应用

Simulation test research and application of blasting and penetration improvement in the soft coal seam floor
煤炭科学技术. 2024, 52(6): 102–110 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0914>

高瓦斯煤层大直径钻孔卸压增透瓦斯渗流时空演化机理

Temporal and spatial evolution mechanism of large-diameter borehole pressure relief and permeable gas seepage in high gas coal seam
煤炭科学技术. 2024, 52(S1): 47–61 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0530>

瓦斯非均衡赋存煤层精准冲孔增透技术及应用

Precise permeability enhancement technique with hydraulic flushing for coal seams with non-uniformly distributed gas
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 217–231 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0969>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



傅师贵, 刘泽功, 常 帅, 等. 深井高瓦斯低渗煤层深孔聚能爆破增透试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 158-173.
FU Shigui, LIU Zegong, CHANG Shuai, *et al.* Research on deep hole convergence energy blasting for increasing permeability in deep wells with high gas and low permeability coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 158-173.

移动扫码阅读

深井高瓦斯低渗煤层深孔聚能爆破增透试验研究

傅师贵^{1,2}, 刘泽功^{1,2}, 常 帅¹, 杨 帅¹, 张健玉^{1,2}, 乔国栋^{1,2}, 张 鑫¹

(1. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 随着煤炭逐渐往深部区域开采, 将面临着高地应力问题。针对深井高瓦斯低渗煤层在深部地应力作用下聚能爆破增透煤体内部损伤及裂隙演化规律不清楚, 建立了聚能爆破射流理论模型, 研究了聚能射流形成的临界压垮速度, 验证了射流形成的可行性, 分析了聚能爆破载荷侵蚀煤体的作用机制; 随后通过在实验室开展了不同埋深下聚能爆破和普通爆破的相似模拟对比试验, 从宏观裂纹、应变情况以及超声波数据 3 个方面分析不同埋深下聚能爆破和普通爆破对煤层裂纹扩展的影响; 其次通过数值模拟软件研究不同埋深下聚能爆炸载荷对煤体损伤分布特征情况; 最后通过现场试验研究普通爆破和不同埋深下聚能爆破对瓦斯浓度和瓦斯抽采纯量的影响。爆破相似模拟试验结果表明: 深部地应力会抑制爆破载荷对煤体的致裂范围, 并且普通爆破受地应力的影响比聚能爆破更大; 相对比于普通爆破, 聚能药包在深部煤体爆破增透时致裂范围更广, 在聚能方向上 1 号测点最大压应变峰值是普通爆破的 1.35 倍, 而非聚能方向上 3 号测点最大压应变峰值为普通爆破的 86%, 这也导致裂纹优先向聚能方向扩展, 在非聚能方向扩展较少, 爆破定向效果更佳。数值模拟结果表明: 随着埋深的增加, 聚能爆破侵彻煤体的范围会变小; 拟合了埋深与聚能爆破致裂煤体范围关系式, 能在一定程度上为深部矿井聚能爆破致裂煤体范围作为判断依据。现场试验结果表明: 深孔聚能爆破比普通深孔爆破能够更大程度增加瓦斯抽采。而埋深对深孔聚能爆破致裂范围有一定的影响, 因此在深部矿井中采用聚能爆破时应考虑地应力的影响。研究成果对深部高瓦斯低渗煤层爆破增透有一定的参考意义。

关键词: 聚能射流; 数值模拟; 煤层增透; 地应力; 相似模拟

中图分类号: X936 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)05-0158-16

Research on deep hole convergence energy blasting for increasing permeability in deep wells with high gas and low permeability coal seams

FU Shigui^{1,2}, LIU Zegong^{1,2}, CHANG Shuai¹, YANG Shuai¹, ZHANG Jianyu^{1,2}, QIAO Guodong^{1,2}, ZHANG Xin¹

(1. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China)

Abstract: With the gradual deepening of coal mining, the issue of high ground stress will be faced. In response to the unclear understanding of the internal damage and fracture evolution of deep wells with high gas and low permeability coal seams under the influence of deep ground stress, a theoretical model of convergence energy blasting jet formation was established. The critical collapse velocity of the convergence jet formation was studied, verifying the feasibility of jet formation, and analyzing the mechanism of convergence energy blasting load erosion on coal seams. Subsequently, through laboratory experiments, comparative simulations of convergence energy blasting and conventional blasting at different burial depths were conducted, analyzing the effects of convergence energy blasting and conventional

收稿日期: 2024-03-14 策划编辑: 宫在芹 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2024-0322

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52074013); 合肥综合性国家科学中心能源研究院项目 (21KZS216); 安徽省教育厅高校自然科学基金项目 (YJS20210395)

作者简介: 傅师贵(1998—), 男, 江西上饶人, 博士研究生。E-mail: fushigui2022@163.com

通讯作者: 刘泽功(1960—), 男, 安徽淮南人, 教授, 博士。E-mail: zgliu@aust.edu.cn

blasting on coal seam crack propagation from three aspects: macroscopic cracks, strain conditions, and ultrasonic data. Then, numerical simulation software was used to study the distribution characteristics of coal damage under convergence energy blasting loads at different burial depths. Finally, the effects of normal blasting and convergence energy blasting under different buried depths on gas concentration and gas extraction purity are studied through field tests. The results of blasting similarity simulation experiments show that deep ground stress can inhibit the fracturing range of blasting loads on coal bodies, and conventional blasting is more affected by ground stress than convergence energy blasting. Relative to conventional blasting, the fracturing range of convergence energy explosives in deep coal bodies is wider during permeability enhancement blasting. The maximum pressure strain peak at measurement point 1# in the convergence direction is 1.35 times that of conventional blasting, while at measurement point 3# in the non-convergence direction, it is 86% of conventional blasting. This also results in cracks preferentially propagating in the convergence direction, with less expansion in the non-convergence direction, leading to better directional blasting effects. Numerical simulation results indicate that with increasing burial depth, the range of coal penetration by convergence energy blasting decreases. A relationship formula between different burial depths and the fracturing range of convergence energy blasting was fitted, which can serve as a basis for determining the fracturing range of deep mine convergence energy blasting to some extent. Field test results show that deep hole convergence energy blasting can increase gas extraction to a greater extent than common deep hole blasting. The buried depth has a certain influence on the crack range of deep hole convergence energy blasting, so the influence of ground stress should be considered when using shaped charge blasting in deep mine. The research findings have certain reference significance for the blasting permeability enhancement of deep high gas and low permeability coal seams.

Key words: convergence energy jet; numerical simulation; coal seam permeability enhancement; ground stress; similar simulation

0 引言

煤炭作为我国主要的能源,在能源供给和经济发展中占有重要地位^[1]。随着我国经济社会的飞速发展,浅部煤炭资源逐渐枯竭,矿山资源开采逐渐向深部区域开采。但煤炭开采深度增加的同时,也将面临着高应力复杂地质条件瓦斯突出问题^[2]。传统的煤矿防突措施主要包括开采保护层^[3]、大面积预抽^[4]、水力化增透^[5]、深孔预裂爆破等^[6]。近几年,学者们逐渐将超临界 CO₂^[7]和航天固体推进剂^[8]等新方法应用于煤体增透。其中,深孔聚能爆破因其工艺简单,成本较低并且可以定向控制裂纹发展等优点被广泛应用于增透高瓦斯低透气性煤层^[9]。

针对聚能爆破机理,国内外学者开展了大量研究。BROWN等^[10]通过改进装药工艺对聚能致裂机理进行研究,并在现场实践取得较好的效果。郭德勇等^[11]从理论上分析了聚能爆破作用过程及裂隙发育特征。朱飞昊等^[12]通过相似模拟爆破试验,得出聚能爆破在聚能方向上应力峰值是普通爆破的1.12倍,并且爆生气体的静力学作用时间在聚能方向上延长了1.3 μs,非聚能方向上缩短了0.2 μs。乔国栋等^[13]通过室内模型试验得到了聚能爆破在定向破岩的同时可以有效保护正断层构造区域煤岩体不受破坏。尤元元等^[14]为探究聚能罩的角度对聚能爆破效果的影响,开展了不同聚能药罩角度的物理模型相似试验与数值模拟,研究不同聚能罩的角度对炸药利用率以及射流侵彻效果的影响。在数值模拟方面的研究中,宋彦琦等^[15]研究不耦合系数对聚能

爆破增透煤体的影响,结果表明不耦合系数在1.67~2时,聚能爆破可以增加煤体裂隙面积,对煤体增透效果好。孟宁康等^[16]利用LS-DYNA软件建立了聚能爆破数值模型,揭示了聚能射流的形成过程,分析了等效应力的演化,并研究了相邻钻孔之间主裂缝和次裂缝的发育情况,确定了岩体的破坏类型和断裂发育带。王凯飞等^[17]对高地应力下聚能切顶爆破关键参数进行了多组数值模拟研究,确定了最佳不耦合系数1.3和最佳孔间距1 000 mm。张旭进等^[18]通过数值模拟探究聚能装药结构的爆破效果,得出在减少21.1%装药量的情况下,聚能装药结构的爆破效果优于普通不耦合的装药结构。

从现有研究可以看出,目前关于煤层深孔聚能爆破的研究多集中于浅部和中部煤层,而深部煤层破岩是爆破应力波和地应力共同作用结果。因此,有必要对不同埋深下聚能爆破煤体致裂效果进行更深入研究。综上所述,笔者首先采用岩石断裂力学理论分析射流形成条件及聚能射流侵蚀煤体的力学机制,然后通过相似模拟试验研究不同埋深作用下聚能爆破和普通爆破载荷对煤体的裂纹扩展、应变演变以及内部煤体损伤规律,最后采用数值模拟方法建立不同埋深下聚能爆破致裂煤体数值模型。研究成果对深部高瓦斯低透煤层聚能爆破增透有着一定的参考价值。

1 聚能爆破形成及作用机理

1.1 聚能射流的形成条件

本文选用的聚能爆破药型罩为对称线性聚能药

罩,如图 1a 所示,选取线性药罩的一侧面建立 O_1 -XYZ 坐标系, A 为药型罩上任意一点。由于线性药型罩为轴对称结构,为了方便计算,建立 Δy 微元切面的二分之一聚能罩微元一维闭合模型,如图 1b 所示。

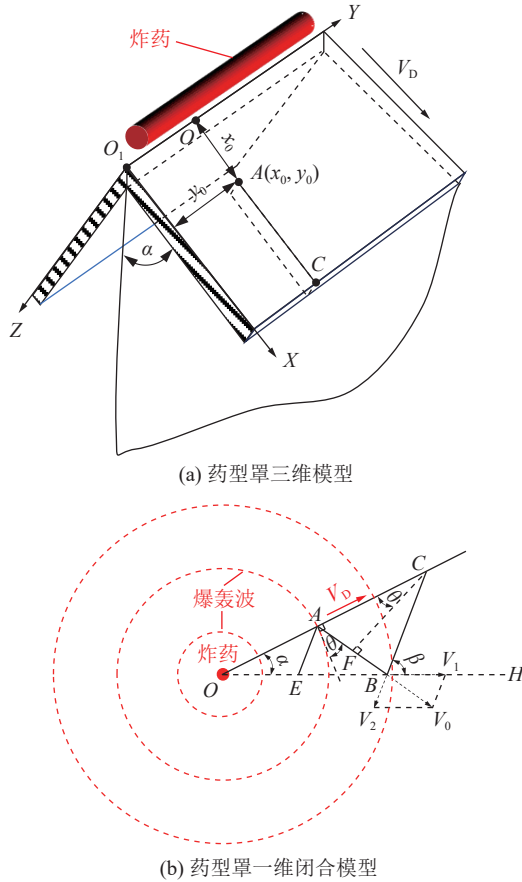


图 1 聚能罩微元闭合模型

Fig.1 Micrometric closure model of energy-gathered jacket

为方便计算爆破后产生的爆轰波对药型罩的压垮速度,笔者引用范亚夫^[19]对 Gurney 速度公式的修正模型,其中修正模型假设爆轰波垂直作用于药型罩,则修正压垮速度 V_0 为

$$\begin{cases} V_0 = \frac{V_D}{\sqrt{n^2 - 1}} \sqrt{\frac{3\rho_z^2 \varphi_z^2}{\rho_z^2 \varphi_z^2 + 5\rho_z \rho_y \varphi_z \varphi_y + 4\rho_y^2 \varphi_y^2}} \\ \varphi_z = (l - h) \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_D 为炸药的爆轰速度, m/s; n 为炸药的爆轰指数, $n=2 \sim 3$, 本文 n 取 2.5; ρ_z 为炸药密度, g/cm^3 ; ρ_y 为药型罩密度, g/cm^3 ; φ_z 为药型罩某点炸药的厚度, mm; φ_y 为药型罩的厚度, 本文 $\varphi_y=1$ mm; α 为金属罩锥角的二分之一; l 为药型罩母线长, mm; h 为药型罩某点到锥角顶点的距离, mm。

但实际上,爆轰波传播至药型罩 A 点处时并不是垂直作用于药型罩,其爆轰波的入射方向与药型

罩存在一定的角度,使药型罩的 A 点存在一个偏转角 θ ,公式如下:

$$\theta = \arcsin \frac{V_0}{V_D} \quad (2)$$

如图 1b 所示, OC 为金属罩初始位置,当爆轰波传播到 A 点处, A 点以 V_0 压垮速度朝向 B 点运动,压垮速度与聚能罩偏转角为 θ 。当 A 点运动至轴线上的 B 点时,爆轰波传播到 C 处, AC 段的金属罩运动到 BC 段(假设母线长度不变,则 $AC=BC$), BC 与轴线 OE 的夹角为 β 。过 C 点作垂直于 AB 连线交于 F 点。当 A 点运动到轴线 OH 上的 B 点时,再此期间轴线上的 E 点运动至 B 点,假设其运动速度为 V_1 。将碰撞点 B 作为坐标系原点,此时药型罩 OC 将以相对的速度 V_2 向坐标系原点 B 运动,可以推出:

$$\begin{cases} V_1 = V_0 \cos \theta / \sin \beta = V_0 \cos (\beta - \alpha - \theta) / \sin \beta \\ V_2 = V_0 \cos (\beta - \theta) / \sin \beta = V_0 \cos (\alpha + \theta) / \sin \beta \\ \beta = \alpha + 2\theta \end{cases} \quad (3)$$

药型罩在爆轰波压垮的过程中,视为不可压缩流体驱动金属罩刚性表面,此处的射流速度 V_j 为:

$$V_j = V_1 + V_2 \quad (4)$$

将公式 (3) 代入公式 (4),则射流速度 V_j 为:

$$V_j = \frac{V_0 \cos (\beta - \alpha - \theta)}{\sin \beta} + \frac{V_0 \cos (\alpha + \theta)}{\sin \beta} = \frac{V_0 \cos \left(\frac{\alpha}{2} \right)}{\sin \left(\frac{\beta}{2} \right)} \quad (5)$$

根据质量守恒定律公式(6)以及动量守恒定律公式(7),推出公式 (8) 射流质量 m_j 为:

$$m = m_j + m_s \quad (6)$$

$$mV_2 \cos \beta = m_s V_2 - m_j V_2 \quad (7)$$

$$m_j = m \sin^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) = \rho V \sin^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (8)$$

式中: m 为金属罩的质量; m_j 为聚能射流的质量; m_s 为杵体的质量; V 为金属罩的体积; ρ 为金属罩的密度。

通过公式(8)可以看出聚能射流质量跟药型罩密度成正比关系,表明当药型罩密度越大,射流质量越大,有些材料虽然密度很大,但是价格昂贵,不能大范围推广。因此综合考虑之下,本文后续相似模拟试验中金属聚能罩材料选择紫铜,不仅价格适中,而且易获得。

相似模拟试验选用三级煤矿乳化炸药^[20],炸药密度 ρ_z 为 1.1 g/cm^3 ;爆速 V_D 为 3300 m/s ;关于聚能罩开口角度,学者刘泽功等^[21]通过理论分析、相似

模拟试验得出最佳角度为 60°，因此聚能爆破研究将采用聚能罩角度为 60°下开展，聚能药罩厚度为 1 mm。

为论证后续相似模拟试验中聚能罩能否产生聚能射流，下面将通过理论分析的方法进行证明。根据吴艳青等^[22]给出了聚能射流形成的临界条件，此时压垮速度应满足下式：

$$V_0 > V_L = \frac{1}{\cos^2\beta} \sqrt{\frac{5\delta_y^D}{\rho}} \quad (9)$$

式中： V_0 为聚能罩各处的压垮速度，m/s； β 为压垮角，(°)； ρ 为聚能罩材料的密度，kg/m³； δ_y^D 为动态屈服强度，Pa。

计算求得 V_L 在 O 点速度最大，最大值为 170.3 m/s。

根据式 (1) 式 (9)，计算 Δy 微元沿 OC 各处的压垮速度 V_0 ，压垮角 β ，射流速度 V_j 以及射流质量 m_j ，并绘制成图，如图 2 所示。

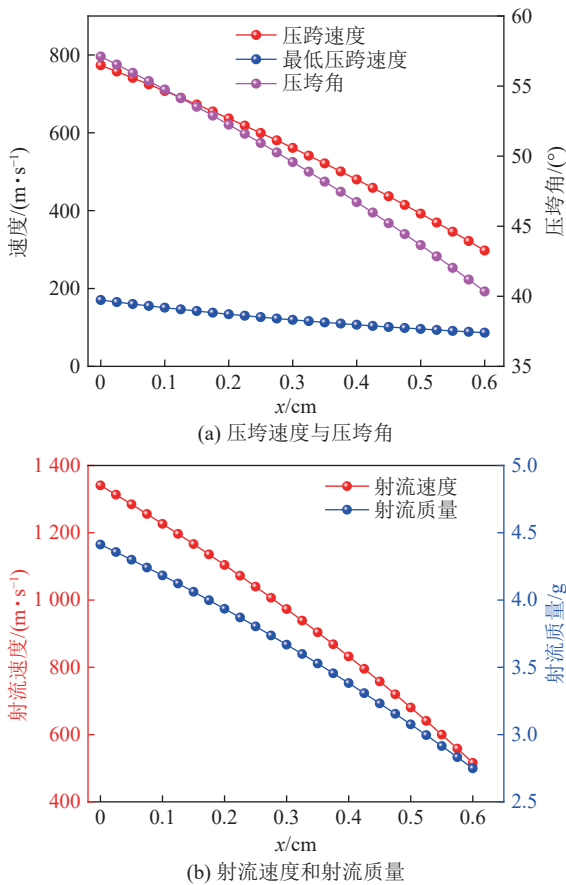


图 2 药型罩参数计算

Fig.2 Parameter calculation of drug type cover

通过图 2a 可以看出压垮速度均大于产生射流的临界压垮速度，则证明后续相似模拟试验聚能金属罩能产生金属射流。图 2b 可以看出射流速度与射流质量的最大值均出现在药型罩顶端，随着距离

顶端 O 点越远，其射流质量和速度均逐渐减小。

1.2 聚能射流侵彻媒体

聚能装药结构通过产生的金属射流形成初始定向裂纹，随后在爆生气体的作用下，裂隙继续扩展。现通过岩石断裂力学理论解释聚能爆破作用机制，如图 3 所示。

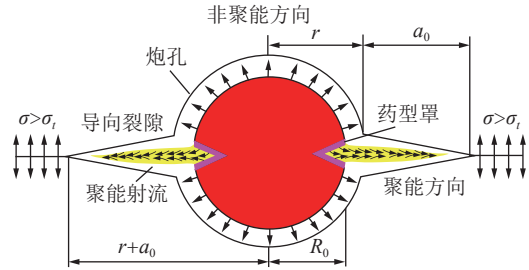


图 3 聚能爆破射流模型

Fig.3 Jet model of shaped charge blasting

当爆轰波传播到聚能罩时，会直接作用于聚能罩，此时导致聚能罩压垮并形成聚能射流的爆轰波分量为

$$\begin{cases} P = 2P_0 \cos \alpha \\ P_0 = \frac{1}{2(1+\zeta)} \rho_0 D^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中： P_0 为初始爆轰压力，MPa； P 为聚能方向的爆轰压力，MPa； ρ_0 为炸药的密度，kg/m³； ζ 为爆轰产物的膨胀绝热指数，通常取 3^[22]； D 为爆炸速度，m/s。

聚能射流在未进入媒体前受自身扩散衰减的影响，为方便计算，假设其处在理想爆轰与特定环境条件下，将其简化成二次流模型^[23]。可简化为

$$P_1 = \left(\frac{R_0}{r}\right)^{\gamma-1} P \quad (11)$$

式中： R_0 为聚能装药的等效半径，cm； r 为炮孔半径，cm； γ 为一维流幂指数，对于柱状对称， γ 取 2。

将式 (10) 代入式 (11)，可得聚能射流对炮孔处媒体侵彻产生的应力大小 P_1 为

$$P_1 = \frac{R_0 \cos \alpha}{4r} \rho_0 D^2 \quad (12)$$

由式 (12) 可以看出，随着聚能罩开口角度的减小，聚能效果增强，导致聚能方向的应力集中更加明显。当射流作用于炮孔壁时，裂纹开裂的应力强度因子 K_I 为

$$K_I = P_1 F \sqrt{\pi(r+a_0)} + \sigma_\theta \sqrt{\pi a_0} \quad (13)$$

式中： F 为应力强度因子修正系数； r 为炮孔半径； a_0 为裂隙长度； σ_θ 为切向应力。

当聚能射流进入媒体后，其在媒体中侵蚀产生的应力大小 P_2 为

$$P_2 = P_1 \left(\frac{r}{r+a_0} \right)^k = \frac{PR_0}{r} \left(\frac{r}{r+a_0} \right)^k \quad (14)$$

式中： k 为应力衰减系数，本文 k 取 1.5， a_0 为裂隙长度。

根据公式 (13) 和 (14)，则聚能射流在侵蚀煤体过程中裂隙尖端应力强度因子 K_2 为

$$K_2 = \frac{PR_0}{r} \left(\frac{r}{r+a_0} \right)^{1.5} F \sqrt{\pi(r+a_0)} + \sigma_\theta \sqrt{\pi a_0} \quad (15)$$

根据断裂力学理论，为了满足爆破裂隙的持续扩展，需要使得裂隙尖端的应力强度因子大于煤体的断裂韧性 (K_{IC})，即 $K_2 > K_{IC}$ 。因此，为了满足爆破裂隙的持续扩展，所需的爆生气体压力为

$$P_2 > \frac{K_{IC} - \sigma_\theta \sqrt{\pi a_0}}{F \sqrt{\pi(r+a_0)}} \quad (16)$$

当应力强度因子 $K_1 > K_{IC}$ 时，产生的金属射流作用于炮孔孔壁产生裂纹；当应力强度因子 $K_2 > K_{IC}$ 时，裂纹会在煤体中持续扩展。药卷起爆后，形成的金属射流作用于煤体产生初始定向裂纹。随后，大量高温高压爆生气体继续作用于初始定向裂纹，这导致聚能方向上有更多的能量汇聚，根据能量守恒定律，那么在非聚能方向上爆破能量会相应减弱。因此，采用聚能装药爆破技术可以提高在聚能方向上裂纹的发育情况，并且降低非聚能方向上的裂纹发育程度，保留非聚能方向上煤岩体的完整性。

2 不同埋深下聚能爆破相似模拟试验

2.1 试验平台搭建

相似模拟试验采用自主研发的爆破动静载模拟试验系统，该系统包括：300 mm×300 mm×300 mm 气固耦合双向加载试验箱体、瓦斯模拟装置、LK-2109A/B 型超动态应变仪数据采集装置、海创高科 HC-U81 多功能混凝土超声波检测仪以及炸药引爆装置。该系统可以模拟地应力与瓦斯赋存条件下爆破动载荷对煤体的损伤情况，通过宏观裂隙、应变数据以及超声波数据对煤体损伤特征进行研究。试验平台如图 4 所示。

1) 气固耦合双向加载试验箱体。该装置可以实现对试块在水平和垂直方向上的应力加载并对试块进行充气密封作用，能够模拟深部地应力以及煤体赋存的瓦斯压力作用。

2) 超动态应变仪监测系统。该装置可以实时监测预埋应变砖轴向和切向受爆炸载荷作用下的应变率变化。

3) 超声波检测系统。为检测试块爆破前后受爆

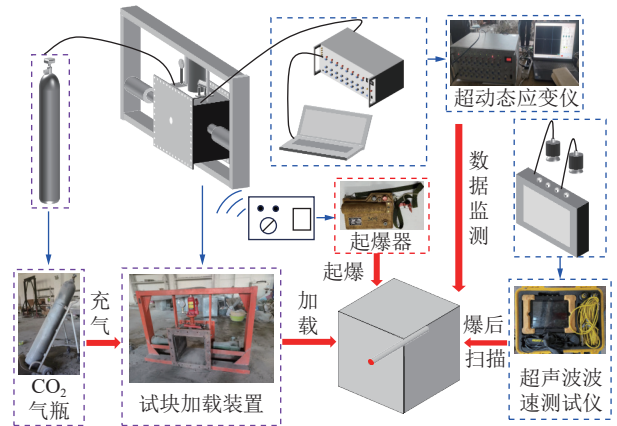


图 4 试验平台
Fig.4 Test platform

炸载荷作用下的损伤情况，采用 HC-U81 多功能混凝土超声波检测仪对试块进行监测，通过超声波在试块的传播情况，定向反演试块爆破前后的损伤情况，并测得每个检测面波速情况，定量的对比爆破前后试块的损伤程度。

在试块模型上选择 S1, S2, S3 三个面进行超声波检测。S1 为爆破孔上方 10 cm 处剖面，S2 为经过爆破孔处剖面，S3 为距爆破孔下方 10 cm 处剖面，如图 5a 所示。每个面通过扇形检测法检测，在每一个

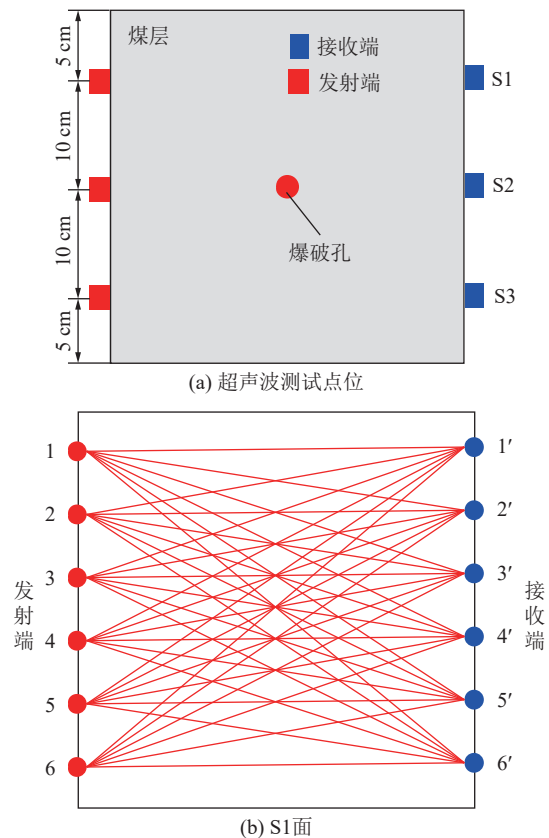


图 5 超声波检测系统

Fig.5 Ultrasonic inspection system

检测面覆盖 36 条超声波射线,如图 5b 所示

2.2 试验模型参数选取

试验原型选自淮南某矿 C13-1 煤层, C13-1 煤层厚度平均为 4.5 m。煤层原始力学参数见表 1。

表 1 原煤物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of raw coal

密度/(g·cm ⁻³)	泊松比	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa
1.36	0.32	5.3	7.2

本试验对几何相似、容重相似、应力相似和动力相似等条件做相应控制。相似试验材料配比参数,砂子与水泥、石膏、水、煤粉的质量比为 1.9 : 0.1 : 0.7 : 1.61 : 2.3。

2.3 加载应力选取

C13-1 煤层平均埋深为 800 m, 根据康红普院士对全国多处煤矿井下地应力的测量结果^[24], 分析总结出地应力分布特征与变化趋势, 计算得出埋深为 800 m 时, 水平主应力 $\sigma_x=20.47$ MPa, 垂直主应力 $\sigma_y=19.6$ MPa。因此, 本次试验对实际模型所施加的水平垂直方向上围压均为 20 MPa。由于本次相似模拟试验中应力相似比为 20, 根据式 (17), 因此本次相似模拟试验所需补偿的载荷为 1.0 MPa。

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_d}{\alpha_\sigma} \quad (17)$$

式中: σ_1 为相似模拟试验需要加载的应力; σ_d 为实际模型所受的地应力; α_σ 为应力相似系数, 取 20。

本次试验共进行 4 组对照试验: 试验 1 为模拟埋深 0 m 的普通爆破, 试验 2 为模拟埋深 800 m 的普通爆破, 试验 3 为模拟埋深 0 的聚能爆破和试验 4 为模拟埋深 800 m 的聚能爆破。对应所需补偿载荷见表 2。

表 2 相似模拟试验补偿载荷

Table 2 Compensation load of similar simulation test

试块编号	爆破种类	模拟埋深/m	施加载荷	补偿载荷
1	普通爆破	0	$\sigma_x = \sigma_y = 0$ MPa	$\sigma_x = \sigma_y = 0$ MPa
2		800	$\sigma_x = \sigma_y = 20$ MPa	$\sigma_x = \sigma_y = 1.0$ MPa
3	聚能爆破	0	$\sigma_x = \sigma_y = 0$ MPa	$\sigma_x = \sigma_y = 0$ MPa
4		800	$\sigma_x = \sigma_y = 20$ MPa	$\sigma_x = \sigma_y = 1.0$ MPa

2.4 试验模型和聚能药管制作

本次相似模拟爆破试验进行 4 组对比试验, 4 组试验中应变砖和爆破孔的布置位置均相同, 如图 6a 所示。爆破孔位于试块中心, 直径为 20 mm。1 号应

变砖布置于爆破孔正右侧 5 cm, 2 号应变砖布置于爆破孔正左侧 10 cm, 3 号应变砖布置于爆破孔正上方 5 cm, 4 号应变砖布置于爆破孔正下方 10 cm, 具体应变测点布置如图 6b 所示。

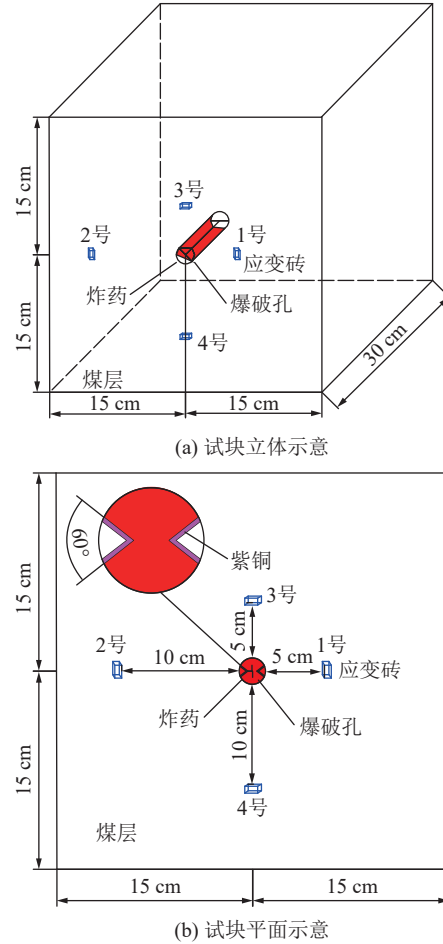


图 6 炮孔及应变测点布置

Fig.6 Layout of blasting holes and strain measuring points

将相似模拟材料按照配比进行称重、搅拌后浇筑。为了保证应力波传播的连续性, 应变砖和试块配比一致, 大小为 10 mm×10 mm×10 mm 的正方体, 如图 7a 所示。聚能药管使用直径为 20 mm, 内径为 16 mm 的 PVC 管制作而成, 聚能药罩使用厚度为 1 mm 的紫铜制作, 角度为 60°^[20], 如图 7b 所示。通过使用预制的木质模具浇筑试验模型, 在模型制作过程中, 从箱体底部逐层铺设, 在铺设过程中用 PVC 管预留爆破孔, 同时按照测点位置在煤层中布置应变砖, 如图 7c 所示。试块养护 7 d 后拆模, 将预埋的 PVC 管拔出后继续养护 18 d。试验时将试块模型装入气固耦合双向加载试验箱体, 爆破前向爆破孔装入预先制作的药卷, 再用黄泥和细沙的混合物捣实封孔, 如图 7d 所示。按照同样的布置分别进行 4 组试验。装药完成后, 将雷管的导爆管从箱体



图 7 试验用品及过程

Fig.7 Experimental supplies and processes

前盖板穿出,应变数据检测线则从后盖板穿出,密封后向加载装置内充入 CO_2 ,带压力稳定后连接雷管和发爆器进行起爆。试块模型制作过程如图 7 所示。

3 试验过程及结果分析

3.1 宏观裂纹分析

不同埋深下普通爆破模型表面裂纹扩展情况如图 8 所示。当模拟埋深为 0 m 时,爆破后爆破孔周围裂隙呈现无规则发育,在冲击爆炸载荷的作用下,炮孔周围受压剪破坏出现明显的扩大空腔区域,并且主裂纹扩展呈现类似“十”字形趋势,伴随着大量密集的次生裂纹,如图 8a 所示;相比之下,当模拟埋深为 800 m 时,试块中的爆破孔会受到围压对其产生的空孔效应,致使空孔周围受到环向压应力,在宏观表现为主裂纹长度变短以及相应的次生裂纹密集程度大幅度下降,如图 8b 所示。

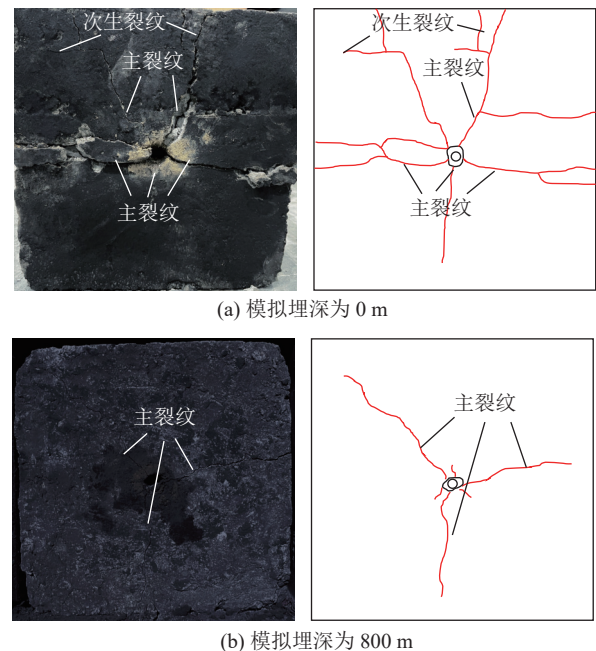


图 8 不同埋深下普通爆破模型表面裂纹扩展情况

Fig.8 Surface crack propagation of ordinary blasting models under different buried depths

如图 9 所示,为模拟不同埋深下聚能爆破模型表面裂纹扩展情况。不同埋深下聚能爆破模型表面裂纹扩展情况如图 9 所示。当模拟埋深为 0 m 时,试块在聚能射流和爆炸冲击波的共同作用下产生一条贯穿整个试块的定向裂纹。经测量,主裂纹最大长度为 300 mm,最大宽度为 12 mm,聚能方向粉碎区范围为 41 mm,而非聚能方向粉碎区范围为 23 mm,进而可以看出聚能爆破载荷在特定聚能方向上表现出极强的致裂能力,如图 9a 所示;相比之下,当模拟埋深为 800 m 时,爆破孔处受围压作用下均等环向压应力的夹制作用,定向裂纹最大长度为 225 mm,最大宽度为 8 mm,分别减少了 25% 和 33%,

并且在非聚能方向上产生了较少的次生裂纹。进而表明围压对聚能爆破致裂起抑制作用,并且影响非聚能方向上的裂纹扩展情况。

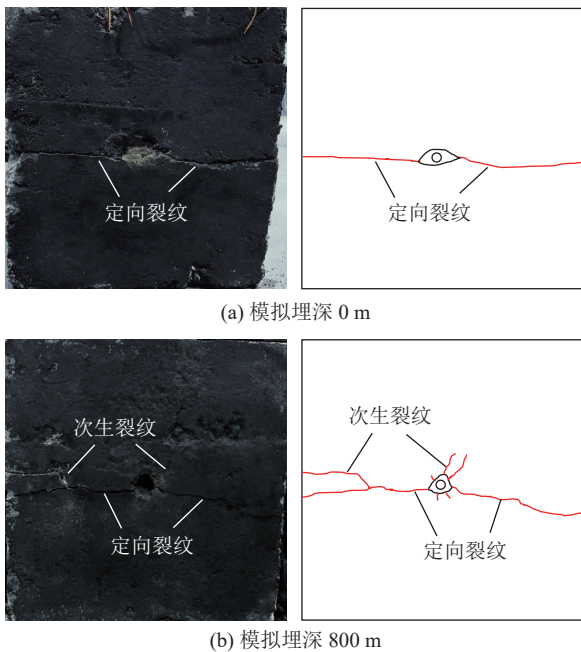


图9 不同埋深下聚能爆破模型表面裂纹扩展情况

Fig.9 Surface crack propagation of shaped charge blasting models under different buried depths

对比宏观裂纹试验结果可以得出:①埋深所导致的围压会对普通爆破和聚能爆破裂纹发育起抑制作用;②相比于普通爆破,聚能爆破受地应力影响不大,仍能够在特定聚能方向上保持裂纹的定向发育,表明聚能爆破的优越性;③采用聚能爆破能够在聚能方向产生特定裂纹,而在非聚能方向保证煤体的完整性。

3.2 应变结果分析

根据超动态应变仪监测到各个点的应变率变化曲线如图10—图11所示。图中压应变为负,拉应变为正。

不同埋深下普通爆破模型应变变化曲线如图10所示。当模拟埋深为0 m时,1号测点和3号测点曲线走势相近,均在上升到最大拉应变和最大压应变后逐渐衰减至零,测得的最大拉应变分为 6010×10^{-6} 和 5920×10^{-6} ,最大压应变分别为 10510×10^{-6} 和 10932×10^{-6} 。而2号测点和4号距离爆孔中心较远,所测得的最大拉应变和最大压应变均小于1号和2号测点,测得的最大拉应变分为 4189×10^{-6} 和 4150×10^{-6} ,最大压应变分别为 5520×10^{-6} 和 5623×10^{-6} ;相比之下,当模拟埋深为800 m时,各个测点所受到的最大拉应变和最大压应变均大幅度降低。其

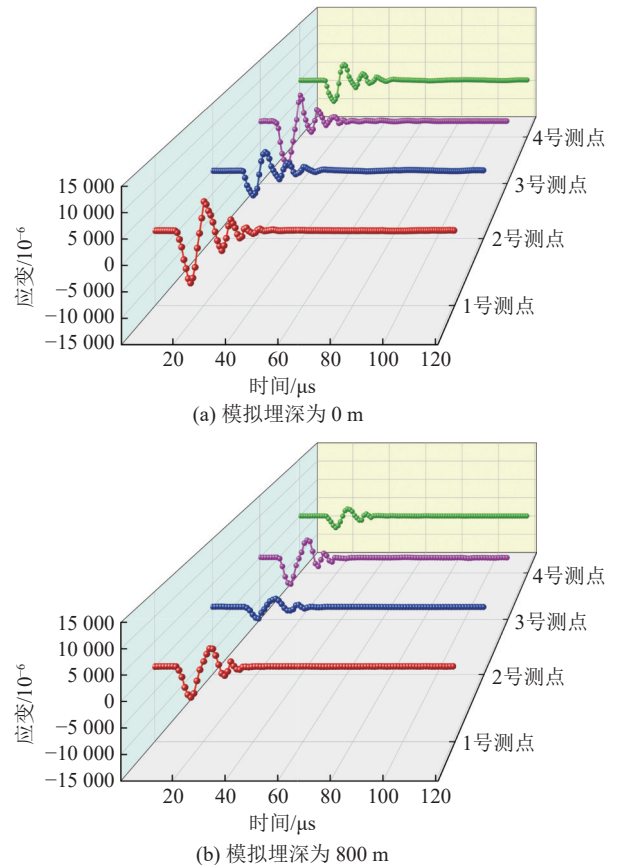


图10 不同埋深下普通爆破模型应变变化曲线

Fig.10 Strain variation curves of ordinary blasting models under different buried depths

中1号测点最大拉应变和最大压应变分别下降了34.7%和37.9%,2号测点最大拉应变和最大压应变分别下降了54.9%和45.3%,3号测点最大拉应变和最大压应变分别下降了40.0%和37.9%,4号测点最大拉应变和最大压应变分别下降了55.2%和45.1%。

不同埋深下聚能爆破模型应变变化曲线如图11所示。1号、2号是测量聚能方向上应变的变化情况,而3号和4号测点是在非聚能方向上应变变化情况。当模拟埋深为0 m时,如图11a所示,聚能方向上所受到的应变峰值更大,其中测得1号测点最大压应变峰值为 14698×10^{-6} ,是3号测点的1.48倍,2号测点最大压应变峰值为 10589×10^{-6} ,是4号测点的1.96倍;相比之下,当模拟埋深为800 m时,如图11b所示,各个测点所受到的应变峰值都减小了,1号、2号、3号和4号测点所受到的最大压应变分别下降了44.1%、48.0%、38.8%和46.1%。但总得来说,本次试验中爆破聚能效果良好,非聚能方向上能量传递受到抑制。

对比可知,地应力明显减少了各测点的应变峰值。相比于普通爆破,聚能爆破能够提高聚能方向上各个点的应变峰值,减小非聚能方向上的应变峰

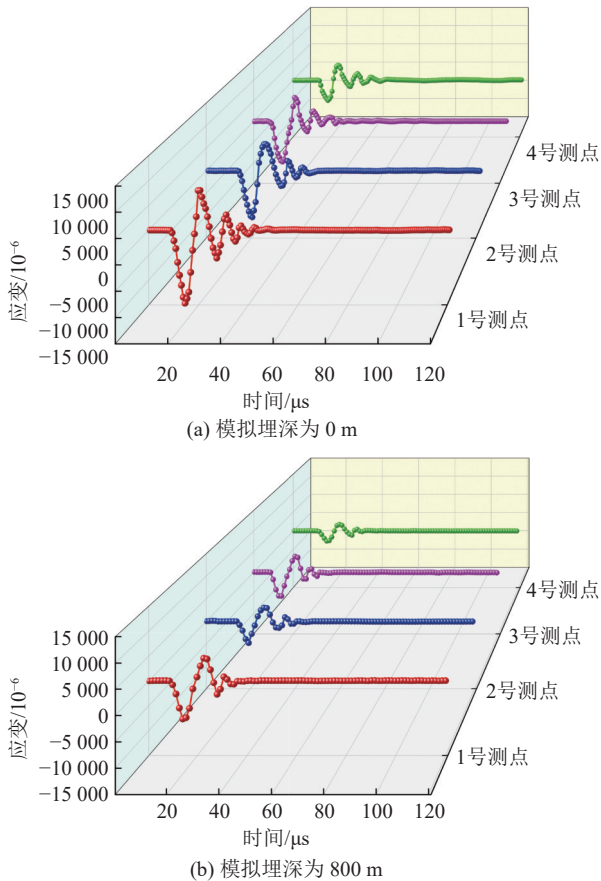


图 11 不同埋深下聚能爆破模型应变变化曲线

Fig.11 Strain change curve of shaped charge blasting model under different buried depths

值。1号测点最大压应变平均峰值 ($11\,464 \times 10^{-6}$) 是普通爆破的 1.35 倍,而非聚能方向上 3号测点最大压应力平均峰值 ($8\,027 \times 10^{-6}$) 为普通爆破的 86%。因此在爆炸能量相同条件下,聚能爆破在聚能方向上产生的裂纹发育程度要高于普通爆破,而在非聚能方向上要弱于普通爆破。

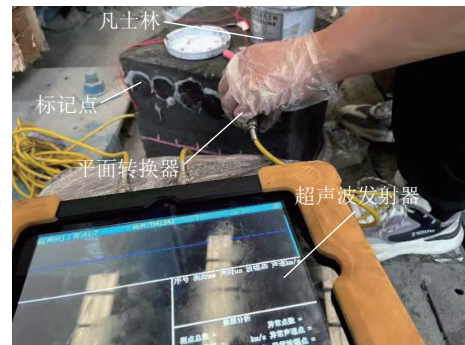
3.3 超声波数据分析

在超声波监测前采用凡士林作为耦合介质涂抹在平面转换器上,保证检测质量,测试过程如图 12 所示。四组试块爆破前后超声波反演成像结果如图 13—图 14 所示。图中颜色越深的地方代表超声波波速越大,煤体也越完整,反之则煤体破损严重。爆破前试块胶结效果好,成型紧密,完整性高,因此波速云图主要以红色为主,如图 14a 和图 14c 所示。

爆破前后超声波波速减少程度与煤体损伤程度呈正相关。当模拟埋深为 0 m 时,对比普通爆破和聚能爆破各个检测面波速云图,可以发现聚能爆破在聚能方向损伤最为严重,而在非聚能方向几乎没有损伤,相比之下普通爆破在各个检测面均有损伤,爆破能量较为分散;当模拟埋深为 800 m 时,



(a) 凡士林涂抹



(b) 检测过程

图 12 超声波检测过程

Fig.12 Ultrasonic inspection process

围压会削弱爆炸载荷对煤体损伤的程度。聚能爆破在聚能方向仍比普通爆破更有优势,但围压的存在也抑制了裂纹的发育。

通过对比爆破前后各个检测面平均波速减少程度,量化评判爆破荷载对煤体的损伤情况,见表 3 所示,为试块爆破前后超声波波速变化情况。从表 3 可以看出,爆破前 S1 和 S3 检测面平均波速为 2.1 km/s, S2 平均波速为 2.0 km/s。当埋深为 0 m 时,聚能爆破在聚能方向波速减少程度为 43.99%,是普通爆破的 1.12 倍,而在非聚能方向只有 2.43% 和 3.83%,是普通爆破的 7.15% 和 12.70%。并且普通爆破对煤体的整体损伤更大,其中模型波速减小均值为 33.48%,是聚能爆破的 2.06 倍。对比不同模拟埋深,围压使普通爆破模型波速减小均值降低了 19.43%,聚能爆破模型波速减小均值降低了 3.49%。

综上所述,普通爆破会造成裂纹的无规则发育,导致爆炸载荷能量的分散,当埋深过大时,伴随着的深部地应力对裂纹扩展的影响很大。相比之下聚能爆破充分的利用爆炸冲击波的能量,在聚能方向更能很好的对煤体造成损伤,而在非聚能方向上保留了煤体的完整性。深部地应力虽然会对聚能爆破载荷产生一定的影响,但是在聚能方向上还是比普通爆破更具有优越性。

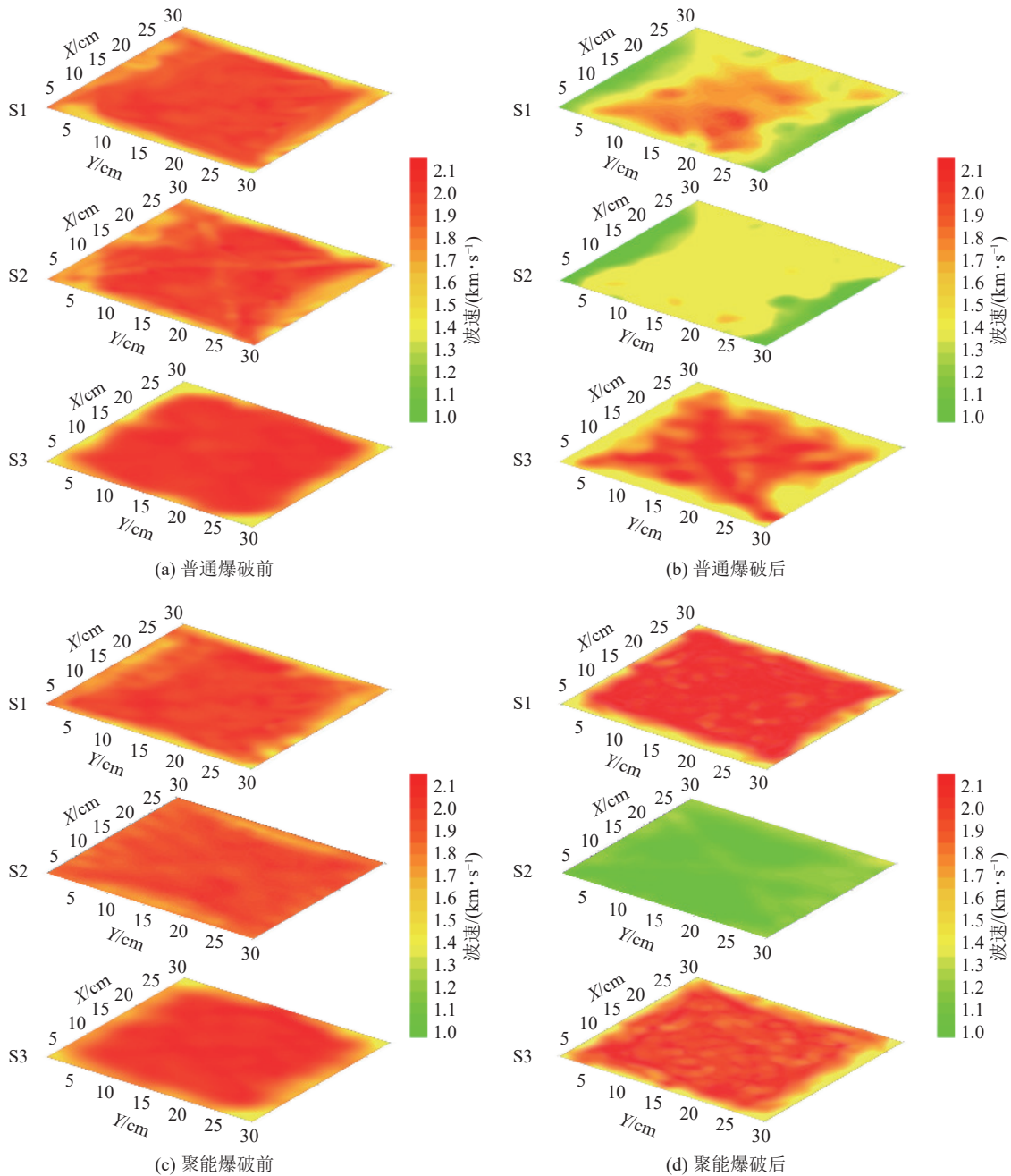


图 13 模拟埋深 0 m 时超声波反演图

Fig.13 Ultrasonic inversion diagram at simulated buried depth of 0 m

4 不同埋深下聚能爆破对煤体损伤影响

4.1 模拟工况设计

为进一步研究不同埋深下聚能爆炸载荷对煤体损伤分布特征情况,采用 ANSYS LS-DYNA 软件进行模拟。为了节省计算时间、节约资源,建立二分之一数值计算模型。模型尺寸为 300 cm×150 cm×1 cm,爆破孔的半径为 2 cm,装药半径为 1.8 cm,在模型四周设置无反射边界并在左右施加水平地应力 σ_x 、上下施加水平地应力 σ_y ,本文模型如图 15 所示。根据康普红院士^[24]建立的地应力拟合回归公式,模拟埋

深 500 m 至 2 000 m 深度下聚能爆炸载荷对煤体损伤分布特征规律,其加载方案见表 4。

4.2 模型的状态方程及参数

4.2.1 空气的材料及状态方程

空气采用 MAT_NULL 材料模型,状态方程采用 LINEAR_POLYNOMIAL 多线性状态方程:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (18)$$

式中: P 为爆轰压力, GPa; E 为单位体积内能, J/m^3 ; μ 为比体积,无量纲; $C_0 \sim C_6$ 为多项式系数。相应参数见表 5。

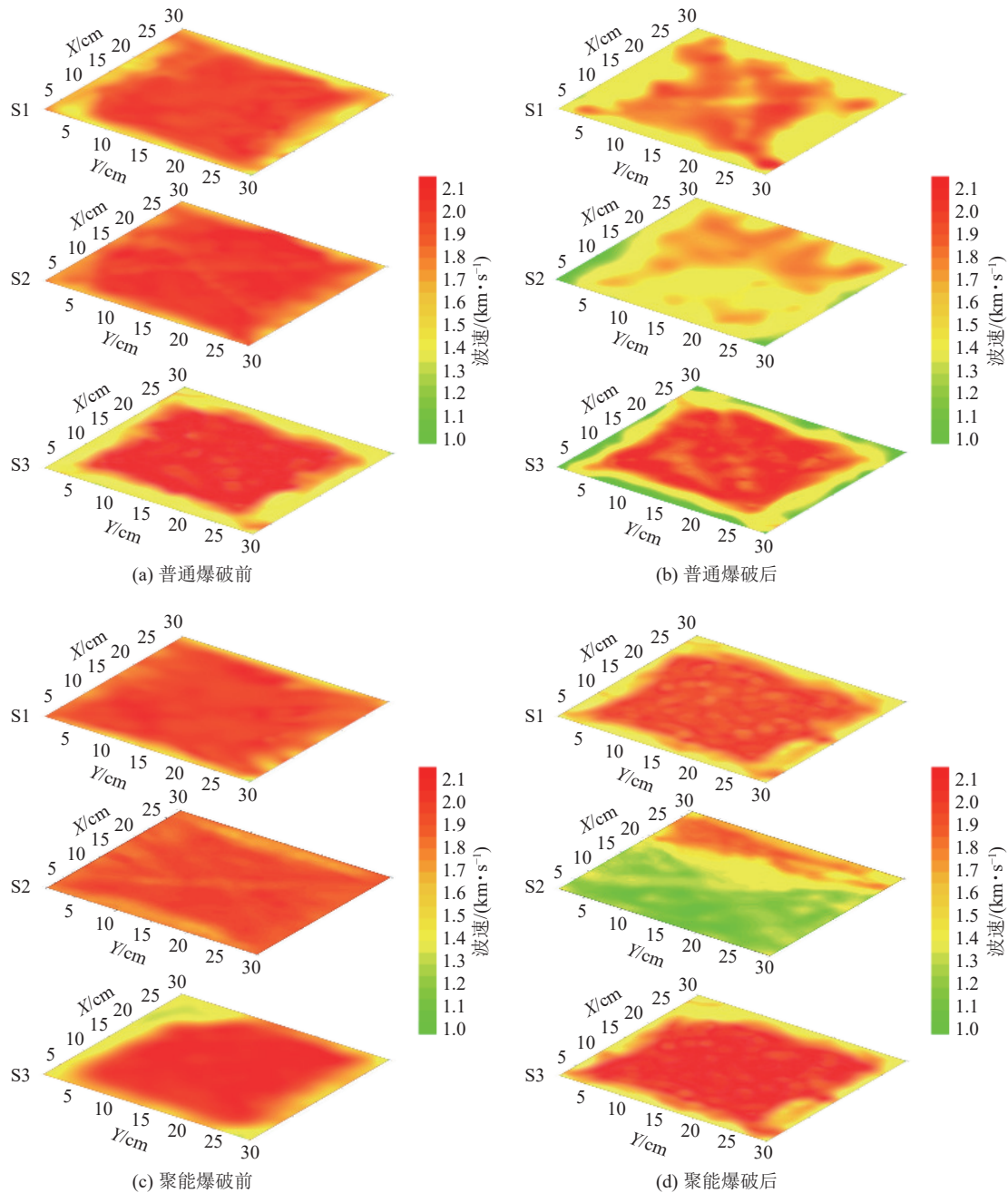


图 14 模拟埋深 800 m 时超声波反演图

Fig.14 Ultrasonic inversion map at simulated buried depth of 800 m

4.2.2 炸药的材料及状态方程

炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型, 状态方程采用 JWL 方程。JWL 状态方程能够描述爆轰产物压力、体积和能量的关系, 表达式为

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V'} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V'} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V'} \quad (19)$$

式中: P 为炸药爆轰压力, MPa; V' 为相对体积, m^3 ; E_0 为单位体积炸药爆轰能量, MJ; A 、 B 为炸药参数, 无量纲; R_1 、 R_2 、 ω 为炸药特性参数; 对应参数见表 6。

4.2.3 煤层的材料参数

用 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_COOK 模型定义媒体材料, 并添加 *MAT_ADD_EROSION 失效准则以描述爆破过程煤体的拉伸破坏。本文所取的媒体物理力学参数见表 7。

4.2.4 聚能管材料

用 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 定义 PVC 塑料和紫铜材料。该模型中利用 Cowper-Symonds 模型来考虑应变率的影响, 还可以描述各向同性硬化和随动硬化塑性模型。状态方程如下:

表 3 试块爆破前后超声波波速变化情况

Table 3 Changes of ultrasonic wave velocity before and after blasting of test block

爆破类型	模拟埋深/m	检测面	爆破前波速/(m·s ⁻¹)	爆破后波速/(m·s ⁻¹)	波速减少程度/%	模型波速减小均值/%
普通爆破	0	S1	2 151	1 420	33.98	34.48
		S2	1 985	1 205	39.29	
		S3	2 132	1 489	30.16	
	800	S1	2 146	1 805	15.89	15.05
		S2	2 012	1 682	16.40	
		S3	2 115	1 843	12.86	
聚能爆破	0	S1	2 139	2 087	2.43	16.75
		S2	2 007	1 124	43.99	
		S3	2 141	2 059	3.83	
	800	S1	2 138	2 095	2.01	13.26
		S2	1 995	1 301	34.79	
		S3	2 143	2 079	2.99	

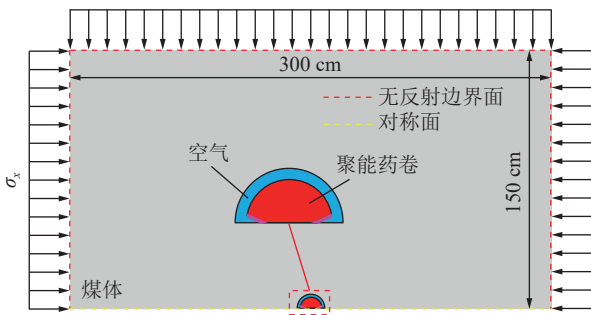


图 15 数值模拟模型

Fig.15 Numerical simulation model

表 4 不同埋深下地应力加载情况

Table 4 In-situ stress loading at different buried depths

序号	埋深/m	σ_x /MPa	σ_y /MPa
1	500	14.017	12.25
2	800	20.467	19.6
3	1 000	24.767	24.5
4	1 200	29.067	29.4
5	1 500	35.517	36.75
6	2 000	46.267	49.0

表 5 空气材料参数

Table 5 Air material parameters

密度/(g·cm ⁻³)	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	E/(J·m ⁻³)
1.2	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10 ⁵

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\varepsilon^*}{C} \right)^{\frac{1}{P'}} \right] (\sigma_0 + \beta E_P \varepsilon_{\text{eff}}^P) \quad (20)$$

式中： σ_y 为屈服强度； σ_0 为初始屈服强度； ε^* 为归一化

塑性应变率； E_P 为塑性硬化模量； $\varepsilon_{\text{eff}}^P$ 为有效塑性应变； P' 和 C 为与应变率有关的系数。PVC 塑料和紫铜参数见表 8。

表 6 炸药的参数

Table 6 Parameters of explosives

密度/(kg·m ⁻³)	爆速/(m·s ⁻¹)	A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	w	E ₀ /GPa
1 000	3 600	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

表 7 煤层力学参数

Table 7 Mechanical parameters of coal seam

密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	失效面参数	损坏参数
1.4	0.219	28	2.44	0.76

表 8 紫铜和 PVC 的材料参数及状态方程

Table 8 Material parameters and equation of state of copper and PVC

名称	ρ /(g·cm ⁻³)	E/GPa	μ	σ_y /MPa	C	P'
PVC	1 300	0.03	0.33	20	251	5.96
紫铜	8 940	1.17	0.35	70	306	6.13

4.3 模拟结果分析

如图 16 为无围压条件下聚能爆破数值模拟过程，受爆炸载荷作用下，爆破孔附近区域形成粉碎区，在 40 μs 时粉碎区发育完全。在 150 μs 时，水平方向受聚能药罩的定向射流作用，形成聚能爆破定向裂纹。随着爆炸冲击波衰减为应力波，后续裂纹继续沿着水平方向继续发育，直到 780 μs 裂纹完全贯穿煤体。

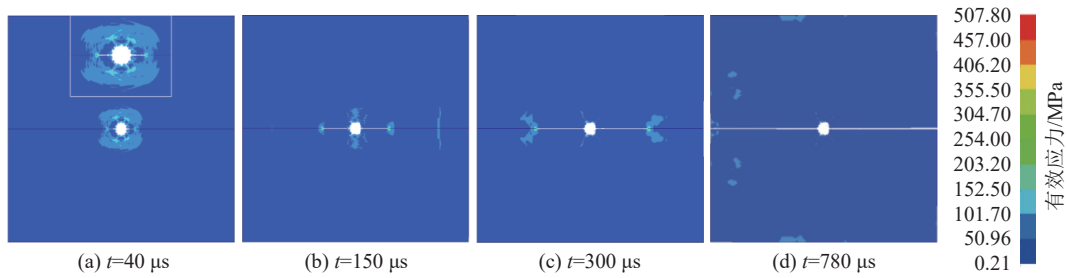


图 16 无围压条件下聚能爆破

Fig.16 Shaped blasting without confining pressure

按照表 5 的加载方案进行不同埋深下聚能爆破数值模拟,模拟计算时长与无围压模拟一致,均为 1 000 μs,模拟结果如图 17 所示。随着煤体埋深的逐

渐增加,聚能爆破侵彻煤体的最大主裂纹长度逐渐减少。当地应力超过千米时,对聚能爆破有抑制作用,但抑制效果在逐渐减少。

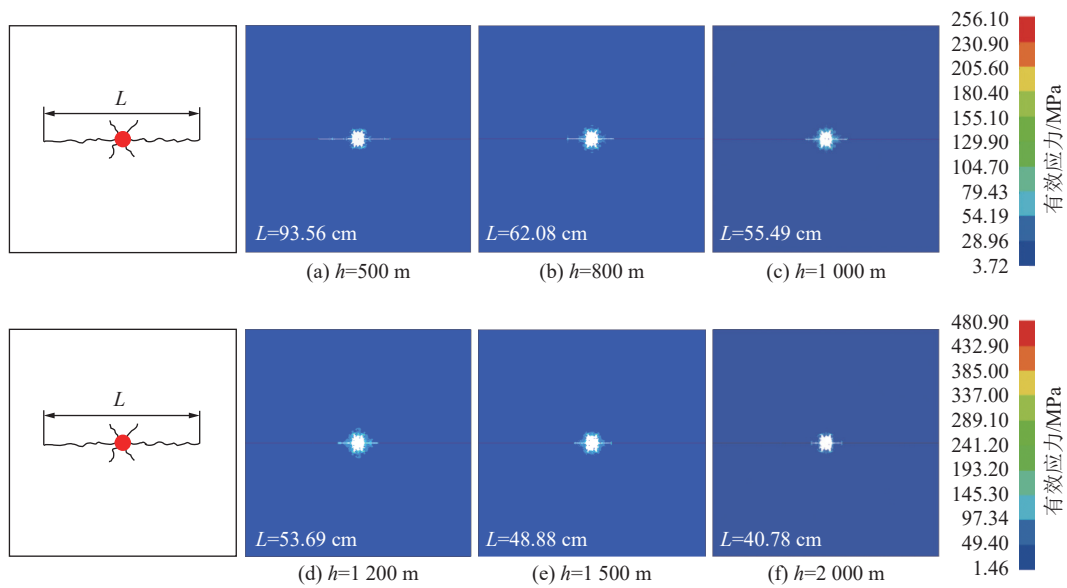


图 17 不同埋深下聚能爆破侵彻煤体的数值模拟

Fig.17 Numerical simulation of shaped energy blasting penetration of coal under different buried depth

将不同埋深下聚能爆破侵彻煤体的最大主裂纹长度进行汇总,使用 MATLAB 对主裂纹长度与埋深进行拟合,见图 18 所示。

图 18 拟合可得埋深与聚能爆破侵彻煤体主裂纹长度的关系式,拟合度 $R^2=0.978 5$,拟合程度高,说明拟合具有很高的准确性。

根据上述拟合公式,结合现场测试数据对上式进行调参,再将不同埋深的深度输入进代码,即可使用拟合方程代码对主裂纹长度进行计算,求得在一定埋深下聚能爆破致裂煤体范围,达到煤层增透的同时,尽可能提高聚能爆破能量的利用率。

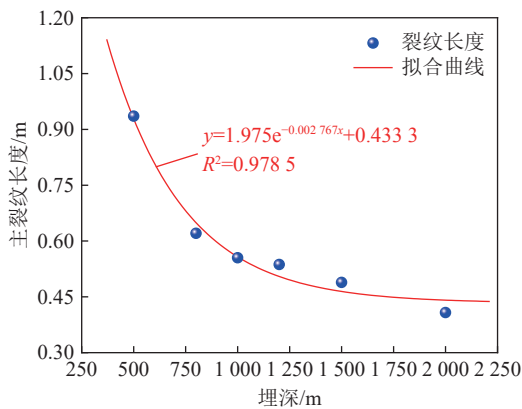


图 18 不同埋深下聚能爆破侵彻煤体的裂纹长度拟合

Fig.18 Fitting of crack length of shaped charge blasting penetrating coal under different buried depths

5 深孔聚能爆破现场试验

5.1 试验地点概况

淮南某矿区煤层埋深为 607 m 左右,该煤层实测瓦斯压力 2.8 MPa,瓦斯含量 8.6 m³/t。其中上层厚约 0.4 m,与下煤层层间距约 1.6 m;煤层顶板为泥岩,厚约 1.3 m;底板为泥岩,厚约 0.4 m。下煤层

厚约 1.4 m, 煤层顶板为泥岩, 厚约 1.0 m。在下煤层施工 2 号和 5 号爆破孔。在该矿另一煤层, 煤层埋深为 810 m, 煤厚为 4.8 m, 实测该煤层瓦斯压力为 2.4 MPa, 瓦斯含量为 8.1 m³/t, 在该煤层施工 8 号爆破孔。

5.2 炮孔参数设计

分别在联巷交叉口测点右侧 20 m 施工一组松动爆破考察孔, 右侧 60 m 处施工一组聚能爆破考察孔。即在这两处各布置一个爆破孔, 分别为 2 号、5 号孔, 在 2 号爆破孔左右分别距离 4.5、3.5 m 处各施工一个抽采钻孔, 在 5 号爆破孔左右分别距离 4.5、3.5 m 处各施工一个抽采钻孔, 6 个钻孔均垂直于巷帮以 -25°俯角施工, 钻孔直径均为 0.113 m (钻孔具体布置如图 19 所示, 钻孔参数见表 9), 钻孔须穿透下煤层并进入煤层底板 0.5 m。在另一埋深为 810 m

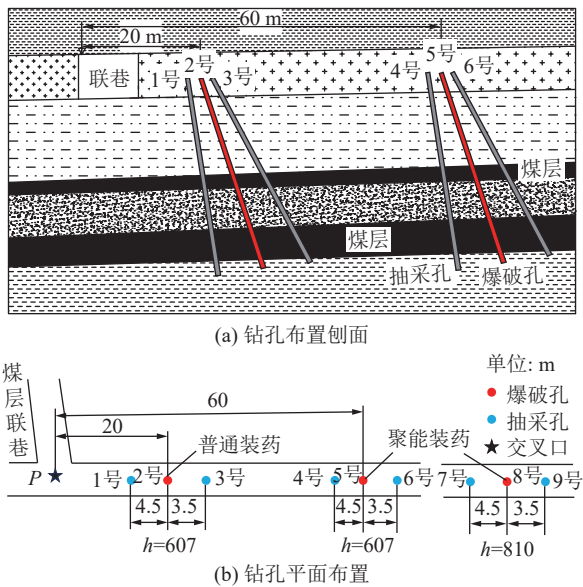


图 19 钻孔设计

Fig.19 Drilling design drawing

表 9 钻孔参数

Table 9 Drilling parameter

孔号	倾角/(°)	钻孔长度/m	位置	用途	装药/m
1	-25	27.5	距P测点15.5 m	抽采孔	—
2	-25	27.5	距P测点20 m	爆破孔	14
3	-25	27.5	距P测点23.5 m	抽采孔	—
4	-25	26.0	距P测点55.5 m	抽采孔	—
5	-25	26.0	距P测点60 m	爆破孔	14
6	-25	26.0	距P测点63.5 m	抽采孔	—
7	-10.4	32.0	—	抽采孔	—
8	-8.9	28.0	—	爆破孔	17
9	-9.7	30.0	—	抽采孔	—

处煤层布置一个 8 号聚能爆破孔, 在 8 号爆破孔左右分别距离 5 m、3.5 m 处各施工一个抽采钻孔。钻孔参数如表 9 和图 19 所示。

5.3 试验结果分析

通过采集爆破前后各个抽采孔内平均瓦斯浓度和瓦斯抽采纯量, 分析普通爆破和 2 组不同埋深处聚能爆破对抽采瓦斯的影响, 如图 20 所示。

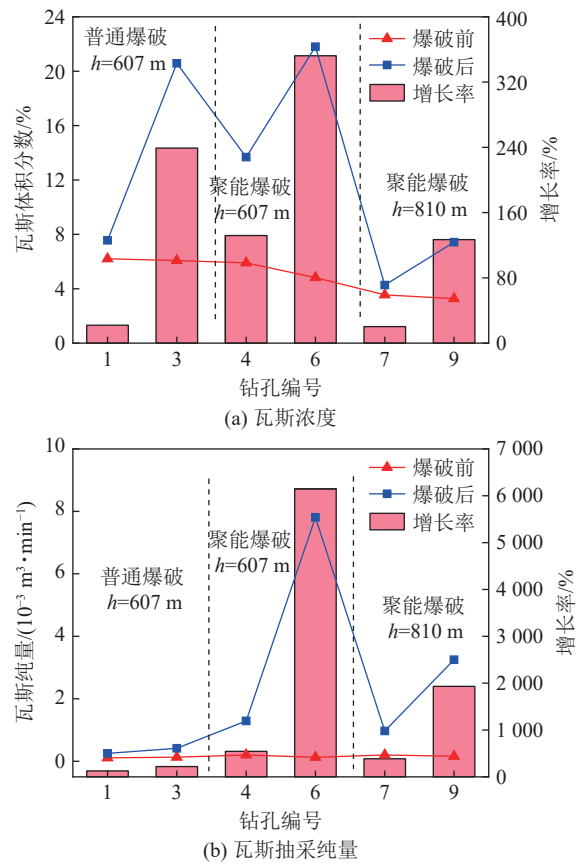


图 20 煤层深孔爆破前后瓦斯变化情况

Fig.20 Gas variation before and after deep hole blasting in coal seam

从图 20 可以看出, 当埋深为 607 m 时, 距离爆破孔均为 3.5 m 时 (3 号和 6 号抽采孔), 相比于普通爆破, 采用聚能爆破方式其瓦斯浓度增长量和瓦斯纯量增长量分别提高了 2.47% 和 7.4×10⁻³ m³/min; 而在距离爆破孔为 4.5 m 时 (1 号和 4 号抽采孔), 相比于普通爆破, 采用聚能爆破方式其瓦斯浓度和瓦斯纯量分别提高了 6.42% 和 0.949×10⁻³ m³/min。同种情况下, 聚能爆破比普通松动爆破更有优势, 致裂煤层范围更广, 能够更好的增透煤层。

而当处于不同埋深时, 对比 4 号、6 号、7 号和 9 号抽采孔情况。距离爆破孔为 3.5 m 时 (6 号和 9 号抽采孔), 埋深为 810 m 处采用聚能爆破方式其瓦斯浓度和瓦斯纯量增长量分别降低了 12.83% 和 4.59×

$10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$; 距离爆破孔为 4.5 m 时(见 4 号和 7 号抽采孔), 埋深为 810 m 处聚能爆破作用下其瓦斯浓度和瓦斯纯量增长量分别降低了 7.06% 和 $0.32 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ 。现场试验结果表明, 埋深会对深孔聚能爆破致裂煤体范围产生一定的影响, 因此在不同埋深处应考虑埋深处的地应力情况, 通过增大聚能爆破药量达到预定效果。

6 结 论

1) 通过理论分析, 研究了聚能射流的形成条件, 得到射流形成的临界压垮速度, 分析了聚能射流侵入煤体的力学机制, 得到影响致裂煤体范围的因素。

2) 相似模拟试验结果表明, 深部地应力会抑制爆破载荷对煤体的致裂范围, 并且地应力对普通爆破的影响要大于聚能爆破。相对比于普通爆破, 聚能药包在深部煤体爆破增透时致裂范围更广, 且裂纹优先向聚能方向扩展, 在非聚能方向扩展较少, 定向爆破效果更佳。

3) 通过超声波 CT 成像技术发现, 围压使普通爆破模型波速减小均值降低了 19.43%, 聚能爆破模型波速减小均值降低了 3.49%。相比之下聚能爆破充分的利用爆炸冲击波的能量, 在聚能方向更能很好的对煤体造成损伤, 而在非聚能方向上保留了煤体的完整性。

4) 通过建立不同埋深作用下聚能爆破致裂煤体数值模型, 拟合得到聚能爆破侵入煤体的裂纹长度与埋深关系式 $y=1.975e^{-0.002767x}+0.4333$ 。

5) 通过现场试验结果表明, 深孔聚能爆破比普通深孔爆破能够更大程度增加瓦斯抽采。并且埋深对深孔聚能爆破致裂范围有一定的影响, 因此在深部矿井中采用聚能爆破时应考虑地应力的影响, 通过增大聚能爆破药量达到预定效果。

参考文献(References):

- [1] 袁亮, 吴劲松, 杨科. 煤炭安全智能精准开采关键技术与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 861-868.
YUAN Liang, WU Jingsong, YANG Ke. Key technology and its application of coal safety intelligent precision mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 861-868.
- [2] 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 progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825-1845.
- [3] 石必明, 刘泽功. 保护层开采上覆煤层变形特性数值模拟[J]. 煤
炭学报, 2008, 33(1): 17-22.
SHI Biming, LIU Zegong. Numerical simulation of the upper coal and rock deformation characteristic caused by mining protecting stratum[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 17-22.
- [4] 王亮, 廖晓雪, 褚鹏, 等. 瓦斯抽采穿层钻孔扩造穴卸压增透机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 75-82.
WANG Liang, LIAO Xiaoxue, CHU Peng, et al. Study on mechanism of permeability improvement for gas drainage by cross-seam cavitation borehole[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 75-82.
- [5] 刘厅, 林柏泉, 赵洋, 等. 瓦斯非均衡赋存煤层精准冲孔增透技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 217-231.
LIU Ting, LIN Baiquan, ZHAO Yang, et al. Precise permeability enhancement technique with hydraulic flushing for coal seams with non-uniformly distributed gas[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 217-231.
- [6] 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.
- [7] 刘佳佳, 聂子硕, 于宝种, 等. 超临界二氧化碳对煤体增透的作用机理及影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 204-216.
LIU Jiajia, NIE Zishuo, YU Baozhong, et al. Analysis of the mechanism and influencing factors of supercritical carbon dioxide on coal permeability enhancement[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 204-216.
- [8] 李建军, 余梦飞, 李国富, 等. 航天固体推进剂对煤储层致裂增透试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 121-128.
LI Junjun, YU Mengfei, LI Guofu, et al. Experimental study of aerospace solid propellant fracturing in simulated coal sample[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 121-128.
- [9] 娄亚北, 冯利民, 刘健, 等. 穿层深孔爆破在突出坚硬煤层瓦斯抽采中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 66-71.
LOU Yabei, FENG Limin, LIU Jian, et al. Through strata deep borehole blasting applied to gas drainage in hard outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 66-71.
- [10] BROWN J W. Statistical study of rock drilling by hypervelocity jets from explosive shaped charges[M]. University of Missouri-Rolla, 1971.
- [11] 郭德勇, 张超, 朱同功. 地应力对煤层深孔聚能爆破致裂增透的作用[J]. 工程科学学报, 2022, 44(11): 1832-1843.
GUO Deyong, ZHANG Chao, ZHU Tonggong, et al. Effect of in-situ stress on the cracking and permeability enhancement in coal seams by deep-hole cumulative blasting[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(11): 1832-1843.
- [12] 朱飞昊, 刘泽功, 高魁, 等. 构造带内巷道定向聚能爆破掘进围岩损伤特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2037-2047.
ZHU Feihao, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Experimental study on rock damage of roadway excavation by cumulative blasting in

- structural coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2037-2047.
- [13] 乔国栋, 刘泽功, 高魁, 等. 综掘工作面过硬岩正断层爆破方式优选试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(3): 507-516.
- QIAO Guodong, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Experimental study on optimum blasting method of crossing hard rock normal fault in fully mechanized mining face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(3): 507-516.
- [14] 尤元元, 崔正荣, 张西良, 等. 爆破中双线性聚能药包最佳成缝角度[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(2): 144-158.
- YOU Yuanyuan, CUI Zhengrong, ZHANG Xiliang, et al. Optimum seam forming angle of bilinear shaped charge in engineering blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(2): 144-158.
- [15] SONG Y Q, LI X S, GUO D Y, et al. Study on the decoupled charge effect in deep-hole cumulative blasting of coal seam[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1): 8486198.
- [16] Meng N, Chen Y, Bai J, et al. Numerical simulation of directional fracturing by shaped charge blasting[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(5): 1824-1839
- [17] 王凯飞, 张昌锁, 郝兵元, 等. 高地力环境下聚能爆破动、静作用对岩石内裂纹起裂与扩展机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 50-64.
- WANG Kaiwei, ZHANG Changsuo, HAO Bingyuan, et al. Study on initiation and propagation mechanism of internal cracks caused by dynamic and static action of shaped charge blasting under in-situ stress[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 50-64.
- [18] 张旭进, 张昌锁, 宋水舟. 基于 LS-DYNA 的聚能装药结构优势数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(6): 136-140.
- ZHANG Xujin, ZHANG Changsuo, SONG Shuizhou. Numerical simulation on the advantages of shaped charges structure based on LS-DYNA[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(6): 136-140.
- [19] 范亚夫, 段祝平. 关于 Gurney 公式的强度效应修正[J]. 弹道学报, 2009, 21(1): 27-30.
- FAN Yafu, DUAN Zhuping. Strength Effect Correction of Gurney Formula[J]. Journal of Ballistics, 2009, 21(1): 27-30.
- [20] 王修辉, 郭子如, 朱福元, 等. 高威力三级煤矿许用水胶炸药巷道掘进爆破[J]. 工程爆破, 2017, 23(4): 78-81.
- WANG Xiuhui, GUO Zirui, ZHU Fuyuan, et al. High-power class 3 coal mine permissible water gel explosive used in tunnel excavation blasting[J]. *Engineering Blasting*, 2017, 23(4): 78-81.
- [21] 杨帅, 刘泽功, 张健玉, 等. 柱状聚能药管聚能罩角度对煤层爆破增透效果试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 129-138.
- YANG Shuai, LIU Zegong, ZHANG Jianyu, et al. Experimental study on the effect of the angle of the shaped charge tube on the penetration enhancement of coal seam blasting[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(3): 129-138
- [22] 吴艳青, 刘彦, 黄风雷, 等. 爆炸力学理论及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021.
- [23] 李必红. 椭圆双极线性聚能药柱爆炸理论及预裂爆破技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- LI Bihong. Study on explosion theory and presplitting blasting technology of elliptical bipolar linear shaped charge[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [24] 康红普, 伊丙鼎, 高富强, 等. 中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 23-33.
- KANG Hongpu, YI Bingding, GAO Fuqiang, et al. Database and characteristics of underground *in situ* stress distribution in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 23-33.