

爆破震动作用下高地应力巷道动力响应特征 与稳定性研究

乔国栋^{1,2}, 刘泽功^{1,2}, 高 魁¹, 刘 健¹, 傅师贵^{1,2}

(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: 为了研究爆破震动作用下高地应力巷道的动力响应特征及其稳定性, 以淮南潘三矿超前预裂卸压爆破扰动瓦斯综合治理巷为工程背景, 通过理论分析建立了爆破作业扰动巷道围岩模型, 并根据应力波传播理论及波前动量守恒定理推导出了爆破震动作用下巷道围岩振动方程。使用数值模拟研究了巷道围岩质点峰值振动速度 (Peak Particle Velocity, PPV) 的衰减特征, 从应力分布规律的角度对理论分析进行了补充, 并根据模拟结果对巷道围岩稳定性进行了分析。结果表明: 巷道围岩振动方程显示, 爆炸应力波入射角度的不同会导致巷道围岩不同区域的动态响应特征存在差异。随着爆心距增大, 巷道轮廓面附近围岩 PPV 出现波动, 并在自由面处获得最大峰值振速; 地应力对巷道围岩 PPV 具有抑制作用, 地应力越大抑制作用越明显, 且不同位置围岩的 PPV 对地应力敏感度存在差异; 随着地应力增大, 爆破震动作用下巷道围岩受力状态从拉剪变为压剪, 最大主应力和剪切应力也随之增大。研究认为随着埋深增加, 在对爆破震动作用下巷道围岩的稳定性进行评估时地应力因素不可忽略。对于潘三矿超前预裂卸压爆破工程现场而言, 除了巷道的直墙外, 墙角、拱墙也是危险区域, 应当着重予以加固并加强监测。

关键词: 地应力; 动力响应; 爆破震动; 围岩失稳; 质点峰值振动速度

中图分类号: O383; U455.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)03-0414-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.03.006

1 概 述

爆破技术在煤炭开采过程中运用广泛, 如硬岩巷道掘进^[1]、爆破切顶^[2]、低透气性煤层爆破增透^[3]、爆破过硬岩断层^[4]等。而井下爆破作业同时会产生很多负面效应, 其中以爆破震动危害最为突出^[5]。在爆破震动作用下巷道围岩出现动力响应现象, 严重的会造成巷道围岩破坏, 如片帮、冒顶、巷道开裂等, 影响巷道结构稳定性, 对煤矿安全生产造成威胁。高宇璠等^[6], Jiang 等^[7], Yi 等^[8]对于爆破震动作用下浅埋巷道(隧道)围岩动力响应及稳定性的相关问题进行了研究, 并取得了丰硕的成果。深部高地应力爆破动载作用下围岩的动力响应特征也受到了众多学者的关注。董春亮等^[9]研究认为, 爆破瞬时加载耦合初始地应力会诱发爆破开挖面内的裂隙发

育, 进而形成破坏区。Toksöz 等^[10], Cao 等^[11]研究认为在深部高地应力环境进行爆破开挖时, 岩石的瞬态卸荷会造成围岩振动。Yang 等^[12]通过时频分析方法对围压动态卸荷作用下的岩石振动特征进行了分析识别。

现有文献报道多集中在爆破动载对浅埋隧道的影响, 以及对高地应力环境下爆破开挖诱发岩石动态卸荷方面的研究。而对于考虑地应力条件的煤矿井下爆破作业诱发巷道围岩动力失稳的研究相对匮乏。目前中国煤炭开采正以每年 10~25 m 的速度逐渐向深部转移^[13], 在煤炭深部开采时, 巷道围岩处在地应力状态下较小的爆破扰动就能引发围岩严重的动态破坏^[14]。

淮南潘三煤矿采用“一巷多用、联合治理、连续开采”的治理模式对深部煤层群进行瓦斯治理。东四 11-2 煤下部采区某工作面标高 -732~-801 m, 工作面上方设置有瓦斯综合治理巷。为解决采空区

收稿日期: 2022-12-18; **修订日期:** 2023-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074013, 52374179); 华能集团总部科技项目能源安全技术专项(HNKJ20-H87); 合肥综合性国家科学中心能源研究院项目(21KZS216); 安徽省教育厅高校研究生科研基金资助项目(YJS20210396); 安徽理工大学 2022 年研究生创新基金项目(2022CX1003); 安徽省自然科学基金资助项目(2208085ME125); 安徽省教育厅高校自然科学基金资助项目(KJ2020A0327)。

“F”形悬臂结构导致的巷道围岩变形问题,在现场开展超前预裂卸压爆破。卸压爆破作业示意图如图1所示。爆破施工过程中使用爆破测振仪监测巷道墙角、拱顶等处的围岩质点振动速度,各传感器监测到的振动速度均未超过《爆破安全规程》(GB 6722—2014)^[15]规定的矿山巷道安全允许振速。然而现场观测发现巷道迎爆侧围岩出现了轻微开裂松动等动力响应现象。考虑到瓦斯综合治理巷受采空区侧向悬臂结构及巷道上覆岩层重力的影响,巷道围岩处于高地应力状态,认为巷道围岩出现失稳的原因与地应力因素有关。

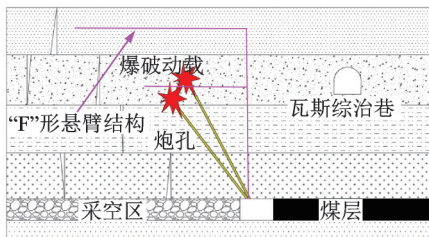


图1 超前预裂卸压爆破作业示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pre-split pressure relief blasting operation

由于超前预裂卸压爆破作业的周期性施工会使巷道围岩产生累积损伤从而降低瓦斯综合治理巷的使用寿命,因此需要预先找出巷道围岩的易受损区域并进行重点加固与监测。本文以潘三矿超前预裂卸压爆破扰动瓦斯综合治理巷为工程背景,针对深井高地应力环境爆破作业导致巷道围岩失稳这一问题进行研究。首先通过理论分析,根据应力波传播理论及波前动量守恒定理推导出深井爆破震动作用下巷道围岩的振动方程,从理论上证明巷道不同位置的围岩受爆炸应力波影响的程度存在差异;然后使用ANSYS/LS-DYNA数值模拟软件通过对不同地应力工况中爆破震动作用下巷道围岩动力响应特征进行对比分析,对理论分析进行补充;最后根据研究成果对瓦斯综合治理巷的稳定性进行评估,得到巷道围岩的易受损区域。

2 爆破震动作用下巷道围岩振动方程

2.1 问题求解的假设与说明

理论分析是研究爆破震动作用下巷道围岩动力响应特征的一种重要方式。通过理论分析可以揭示爆破地震波作用下巷道围岩动力响应的机制,并为现场试验和数值模拟计算提供指引。为简化计算,将超前预裂卸压爆破的倾斜柱状药包简化为垂直于纸面的柱状药包,如图2所示。在问题求解前作出如下必要假设与说明:①巷道埋设足够深,不受地表自由面反射波影

响;②炸药为圆柱形装药,仅考虑激发的频率恒定的P波;③求解问题为平面应变问题,P波传播平面为 $x-z$ 平面。

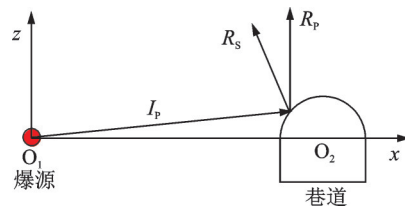


图2 巷道自由面P波反射示意图

Fig. 2 Diagram of reflection of P wave on free surface of roadway

2.2 爆破地震波与巷道自由面的相互作用

根据2.1节中的假设说明,爆炸地震波为P波,当P波传播到巷道围岩自由面时,在自由面处生成反射P波和反射S波。如图2所示, I_p 为入射P波, R_p 为反射P波, R_s 为反射S波, O_1 为爆源, O_2 为巷道中心。

P波入射巷道轮廓面可以视为应力波在节理岩石中传播的特例。Li等^[16]采用时域递推方法获得浅埋环境下应力波与岩石节理的相互作用公式,本文对其进行改造推广,剔除地表反射应力波对巷道的影,并将入射节理岩石替换为空气(波阻抗视为零),从而获得了适用于深井爆破震动作用下的巷道围岩振动方程。

如图3(a)所示,存在一个由AB,AC,BC组成的微小单元ABC,AB为巷道轮廓面,AC为波前,BC为入射P波波束, α_p 为入射夹角。AB,AD,BD组成了反射P波与围岩相互作用的微小单元ABD,其中BD为反射P波波前,AD为反射P波波束。根据Snell定律^[17],P波入射夹角和反射夹角大小相等,反射P波夹角同样记为 α_p ,如图3(b)所示。类似地,如图3(c)所示,反射S波与巷道围岩作用的微元为ABE,BE为反射S波波前,AE为反射S波波束,反射S波夹角记为 α_s 。

基于当前的二维模型,可以从平面应变问题入手进行求解,则BC侧的应力为 $\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_{ip}$,其中 σ_{ip} 为入射P波在波前的法向应力, μ 为巷道围岩的泊松比。在不考虑体力的情况下,巷道边界面上微小单元ABC在入射P波作用下所受应力状态如图3(a)所示,图中 σ_1 和 τ_1 是自由面的巷道围岩侧所受应力,根据受力平衡,单元ABC上的应力沿 z 方向需满足下式:

$$\sigma_1 = \sigma_{ip} \cos^2 \alpha_p + \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_{ip} \sin^2 \alpha_p \quad (1)$$

沿 x 方向应力满足下式:

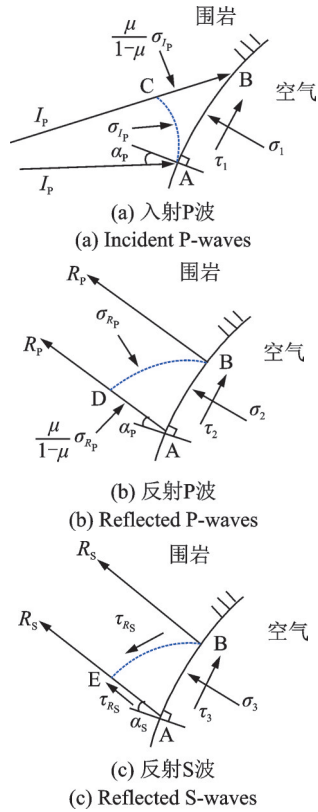


图3 波前和巷道围岩微元应力

Fig.3 Microelement stress of wave front and roadway surrounding rock

$$\tau_1 = \sigma_{I_P} \sin \alpha_P \cos \alpha_P - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_{I_P} \cos \alpha_P \sin \alpha_P \quad (2)$$

根据 Snell 定律: $\sin \alpha_S / \sin \alpha_P = c_S / c_P = \sqrt{(1-2\mu)/[2(1-\mu)]}$, c_P 和 c_S 分别为 P 波和 S 波在围岩介质中的波速。可得 μ 关于 $\sin \alpha_P$ 和 $\sin \alpha_S$ 的表达式,代入式(1)和(2),可得:

$$\sigma_1 = \sigma_{I_P} \cos(2\alpha_S) \quad (3)$$

$$\tau_1 = \sigma_{I_P} \sin(2\alpha_S) \tan \alpha_S \cot \alpha_P \quad (4)$$

类似地,反射 P 波和反射 S 波作用的微单元 ABD, ABE 所对应的 σ_2, τ_2 和 σ_3, τ_3 分别可以表示为:

$$\sigma_2 = \sigma_{R_P} \cos(2\alpha_S) \quad (5)$$

$$\tau_2 = -\sigma_{R_P} \sin(2\alpha_S) \tan \alpha_S \cot \alpha_P \quad (6)$$

$$\sigma_3 = -\tau_{R_S} \sin(2\alpha_S) \quad (7)$$

$$\tau_3 = -\tau_{R_S} \cos(2\alpha_S) \quad (8)$$

根据波前动量守恒定律可知: $\sigma_{I_P} = z_P v_{I_P}$, $\sigma_{R_P} = z_P v_{R_P}$, $\tau_{R_S} = z_S v_{R_S}$, 其中 v_{I_P} 为入射 P 波引起的围岩质点振速, v_{R_P} 和 v_{R_S} 分别为反射 P 波和反射 S 波引起的围岩质点振速。定义 $z_P = \rho c_P$, $z_S = \rho c_S$, 其中 ρ 为巷道围岩密度,因此巷道自由面处围岩的应力总和可以表示为:

$$\sigma = z_P v_{I_P} \cos(2\alpha_S) + z_P v_{R_P} \cos(2\alpha_S) - z_S v_{R_S} \sin(2\alpha_S) \quad (9)$$

$$\tau = z_P v_{I_P} \sin(2\alpha_S) \tan \alpha_S \cot \alpha_P -$$

$$z_P v_{R_P} \sin(2\alpha_S) \tan \alpha_S \cot \alpha_P - z_S v_{R_S} \cos(2\alpha_S) \quad (10)$$

考虑自由边界条件,有 $\sigma = 0, \tau = 0$, 则式(9)和(10)可以写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} v_{R_P} \\ v_{R_S} \end{bmatrix} = -B_P^{-1} A_P v_{I_P} \quad (11)$$

其中:

$$A_P = \begin{bmatrix} z_P \cos(2\alpha_S) \\ z_P \sin(2\alpha_S) \tan \alpha_S \cot \alpha_P \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$B_P = \begin{bmatrix} z_P \cos(2\alpha_S) & -z_S \sin(2\alpha_S) \\ -z_P \sin(2\alpha_S) \tan \alpha_S \cot \alpha_P & -z_S \cos(2\alpha_S) \end{bmatrix} \quad (13)$$

入射 P 波在自由面处反射引起围岩质点振动,产生一个法向分量 V_{P-nb} , 和一个切向分量 V_{P-tb} , 将其表示为入射波和反射波的函数,矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} V_{P-nb}(t) \\ V_{P-tb}(t) \end{bmatrix} = C_P v_{I_P} + D_P \begin{bmatrix} v_{R_P}(t) \\ v_{R_S}(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

联立式(11)和(14)可得:

$$\begin{bmatrix} V_{P-nb}(t) \\ V_{P-tb}(t) \end{bmatrix} = (C_P - D_P B_P^{-1} A_P) \cdot v_{I_P}(t) \quad (15)$$

其中:

$$C_P = \begin{bmatrix} \cos \alpha_P \\ \sin \alpha_P \end{bmatrix}, D_P = \begin{bmatrix} -\cos \alpha_P & \sin \alpha_S \\ \sin \alpha_P & \cos \alpha_S \end{bmatrix} \quad (16)$$

式(15)即为深井爆破震动作用下巷道围岩振动方程,从方程中可以看出巷道围岩质点振动速度与围岩密度、P 波和 S 波波速、入/反射 P 波的夹角以及反射 S 波的夹角相关。反映在工程现场表现为在同一地质现场,围岩密度、波速及炮孔与巷道距离相同的情况下,P 波入射角度的不同决定了不同位置的巷道围岩将出现不同的动力响应特征。这就导致了巷道不同区域的围岩在爆破动载作用下动力响应情况存在差异。

3 数值模拟方法

第 2.2 节的理论分析虽然推导了简化的爆破地震波作用下的巷道围岩边界单元速度方程,但其存在局限性,表现在方程仅剔除了地表反射应力波对深埋巷道围岩的影响,其振动方程无法体现地应力的影响。因此使用数值模拟的研究方法对理论分析进行补充,数值模拟中单位制采用 $g\text{-cm-}\mu\text{s}$ 。

3.1 材料模型与参数

*MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料本构模型具有很高的计算效率,在 ANSYS/LS-DYNA 模

拟软件中可以被用作岩石材料^[18]。相比于静态加载,岩体的力学性能在动态加载时表现出显著不同,这种差别与应变率紧密相关^[19]。使用Cowper-Symonds模型对弹塑性本构材料的应变率效应进行描述。工程背景中瓦斯综治巷处在泥岩层中,现场泥岩的具体力学参数如表1所示。

表1 岩石力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of rock

密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
2483	1.64	0.34	20.35	0.9

使用Jones-Wilkens-Lee(JWL)状态方程描述高能炸药爆轰产物的压力、体积与能量之间的关系。炸药起爆过程中的状态方程为^[20]:

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V}) + \frac{\omega E}{V} \quad (17)$$

式中 P 为爆轰压力; A, B, R_1, R_2, ω 为炸药特性参数; E 为爆轰产物初始内能密度; V 为相对体积。为贴合井下爆破现场,模拟使用由文献[21]校正后的煤矿许用乳化炸药,炸药具体参数如表2所示,表中 ρ_0 为炸药密度, D 为炸药爆速。

表2 炸药材料参数

Tab. 2 Explosive material parameters

$\rho_0/$ (kg·m ⁻³)	$D/$ (m·s ⁻¹)	$A/$ GPa	$B/$ GPa	R_1	R_2	ω	$E/$ GPa
1000	3600	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

在炮孔周围与巷道内部填充空气,需建立空气PART实现流固耦合效应,空气参数如表3所示。其中 $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 均为实常数; E_1 为空气单位体积内能; ρ_1 为空气的密度, V_0 为初始相对体积。

表3 空气参数

Tab. 3 Parameters of air

$\rho_1/$ (kg·m ⁻³)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E_1/$ GPa	V_0
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10^{-4}	1

3.2 模型建立与地应力施加

为简化数值模拟计算,使用单个炮孔作为数值模拟中的唯一能量源。为了模拟不同地应力的爆破环境,给数值模型施加大小为 P_0 的应力,并分别令 P_0 为0, 10, 20, 40 和 60 MPa。根据圣维南定理,炮孔和巷道与模型边界的距离均超过炮孔直径的3倍。本数值模拟为全尺寸分析,炮孔直径与工程现场一致,均为94 mm,具体尺寸如图4所示。

对于考虑地应力的爆破震动作用下巷道围岩动力响应数值模拟计算,需要预先使模型获得初始应

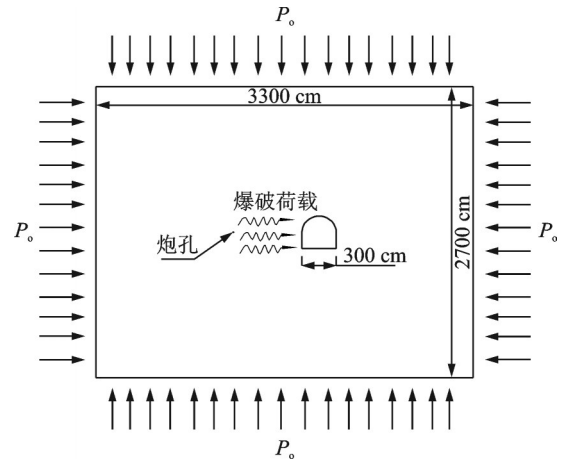


图4 模型示意图

Fig. 4 Model diagram

力,然后再进行爆破显示分析。截取 $P_0=40$ MPa时的模型应力云图,如图5所示。从图5中可以看出巷道及炮孔周围出现了明显应力集中,应力集中边界没有超出模型边界,应力初始化效果良好。

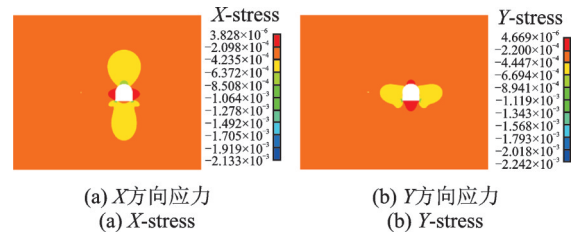


图5 40 MPa应力初始化效果

Fig. 5 40 MPa stress initialization results

3.3 数值模拟合理性分析

使用萨道夫斯基公式描述PPV衰减的规律:

$$v = k \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^\alpha \quad (18)$$

式中 v 为质点峰值振速; Q 为最大单响药量; R 为爆心距; k 和 α 为和场地岩性相关的系数和衰减指数。

数值模拟中,采集无初始应力工况的与爆心距不同距离的单元峰值振速,使用线性回归的方式求出 k 和 α 数值。对等式两边取对数,将式(18)转化为

$$y = a + bx \text{ 的形式,即: } \lg v = \lg k + \alpha \lg \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right), \text{ 对应}$$

的 $y = \lg v, x = \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}, a = \lg k, b = \alpha$ 。回归结果为

$y = 2.42 + 1.86x$, 则 $k = 263, \alpha = 1.86$ 。根据现行的《爆破安全规程》(GB 6722-2014)^[15] 规定,求得的 k 与 α 数值在的泥岩岩性的取值范围内,证明本数值模拟是可靠的。

4 计算结果分析

4.1 巷道围岩自由面效应

根据 2.2 节围岩振动方程可知,入射 P 波在自由面处反射引起围岩质点振动会产生一个法向分量和一个切向分量,使巷道围岩质点获得较高的峰值振速。随着反射应力波 R_p 和 R_s 进一步朝远离自由面的方向传播,在和入射应力波 I_p 叠加后使巷道自由面附近的围岩获得不同的应力和振动状态。数值模拟计算结果同样表明,爆炸应力波在巷道周围出现了应力波的反射和叠加,且由于应力波入射角度不同,围岩获得不同的应力状态,截取不同时刻的压力云图如图 6 所示。

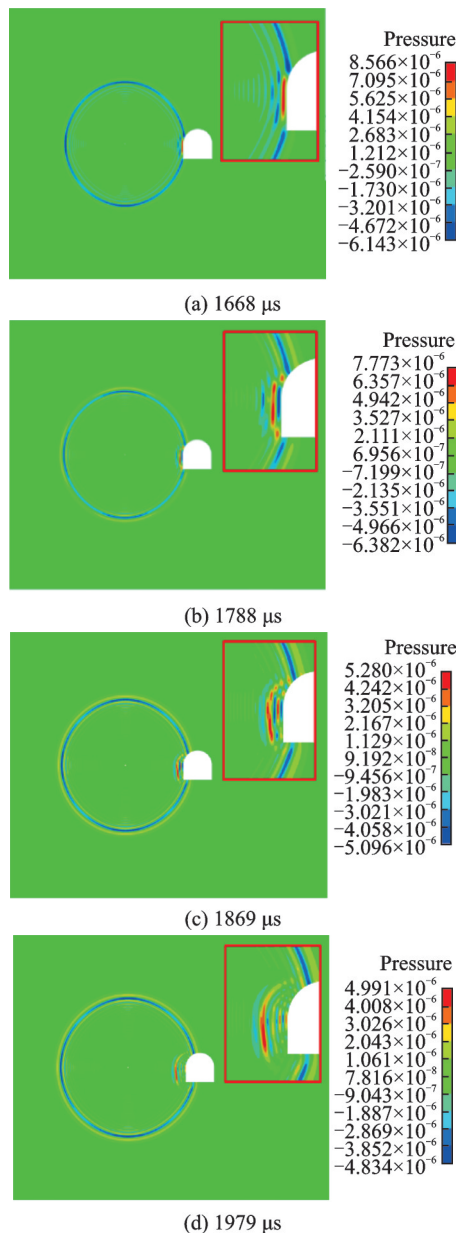


图 6 不同时刻巷道围岩压力云图

Fig. 6 Pressure clouds of the roadway surrounding rock at different times

从图 6 中可以看出爆炸应力波受自由面效应影响出现了复杂的反射叠加,应力波出现反复拉压变化,且这种变化主要出现在迎爆侧围岩,背爆侧围岩受爆破动载影响较小,这与现场观察到的巷道开裂位置一致。下面重点考察迎爆侧围岩的动力响应情况。

PPV 是中国《爆破安全规程》(GB 6722—2014)^[15] 和行业规范中规定的爆破振动安全判定指标^[22]。合成振速是各方向分振速的矢量和,可以用来反映质点振动情况,本文所考察的振速均为合成 PPV。分别在巷道轮廓面上的拱顶、拱墙、直墙、墙角、底板处设置测点单元,依次命名为 A, B, C, D, E 测点,测点布置如图 7(a) 所示。此外,以上述 5 个测点为起点,朝远离自由面方向依次分别选取 15 个测点单元,共 5 组,用来监测巷道自由面附近围岩的振速变化情况。5 组测点在不同地应力工况下的 PPV 衰减曲线如图 7(b)~(f) 所示。

从图 7 中可以看出,巷道围岩的 PPV 并没有简单遵循萨道夫斯基公式描述的 PPV 指数型衰减规律。根据第 2.2 节的理论分析,由于应力波入射角度的不同,反射应力波的反射夹角以及在不同位置的反射叠加效应差别很大,PPV 变化曲线的差异可以从巷道围岩自由面效应的角度来解释。反映在巷道围岩振速上表现为不同位置的 PPV 大小各不相同:拱墙处 PPV 在自由面上的突变最为明显(图 7(c));直墙(图 7(d))处 PPV 数值最大;拱顶(图 7(b))和底板(图 7(f))处在巷道上下端,应力波入射角度相近,因此两组测点的 PPV 变化曲线走势较为相近。总的来说,巷道轮廓面附近围岩均遵循地应力越大,PPV 越小的规律。这是因为地应力越大,围岩受到的夹制作用越强,从而在爆破动载能量相同的情况下岩体获得更小的动应力。动应力与质点振速之间的关系如下式所示^[23]:

$$\sigma_d = \rho_2 c v_0 \quad (19)$$

式中 σ_d 为动应力; ρ_2 为岩石密度; c 为地震波波速; v_0 为质点振动速度。不考虑岩石密度与地震波波速变化, v_0 与 σ_d 成正比。而地应力大小与动应力大小成反比,因此出现了地应力越大围岩 PPV 反而越小的结果。值得注意的是图 7 中各曲线均在自由面处(A, B, C, D, E 测点处)获得最大值,根据 2.1 节得到的巷道围岩振动方程可知,自由面处反射应力波会引起围岩质点振动产生一个法向分量 V_{p-nb} , 和一个切向分量 V_{p-tb} , 围岩质点的总的振速可以视为反射应力波与入射应力波引起的质点振速的矢量和。而随着反射应力波在岩石内传播,能量逐渐衰减,引起的质点振动速度也越来越小,因此出现巷道自由面

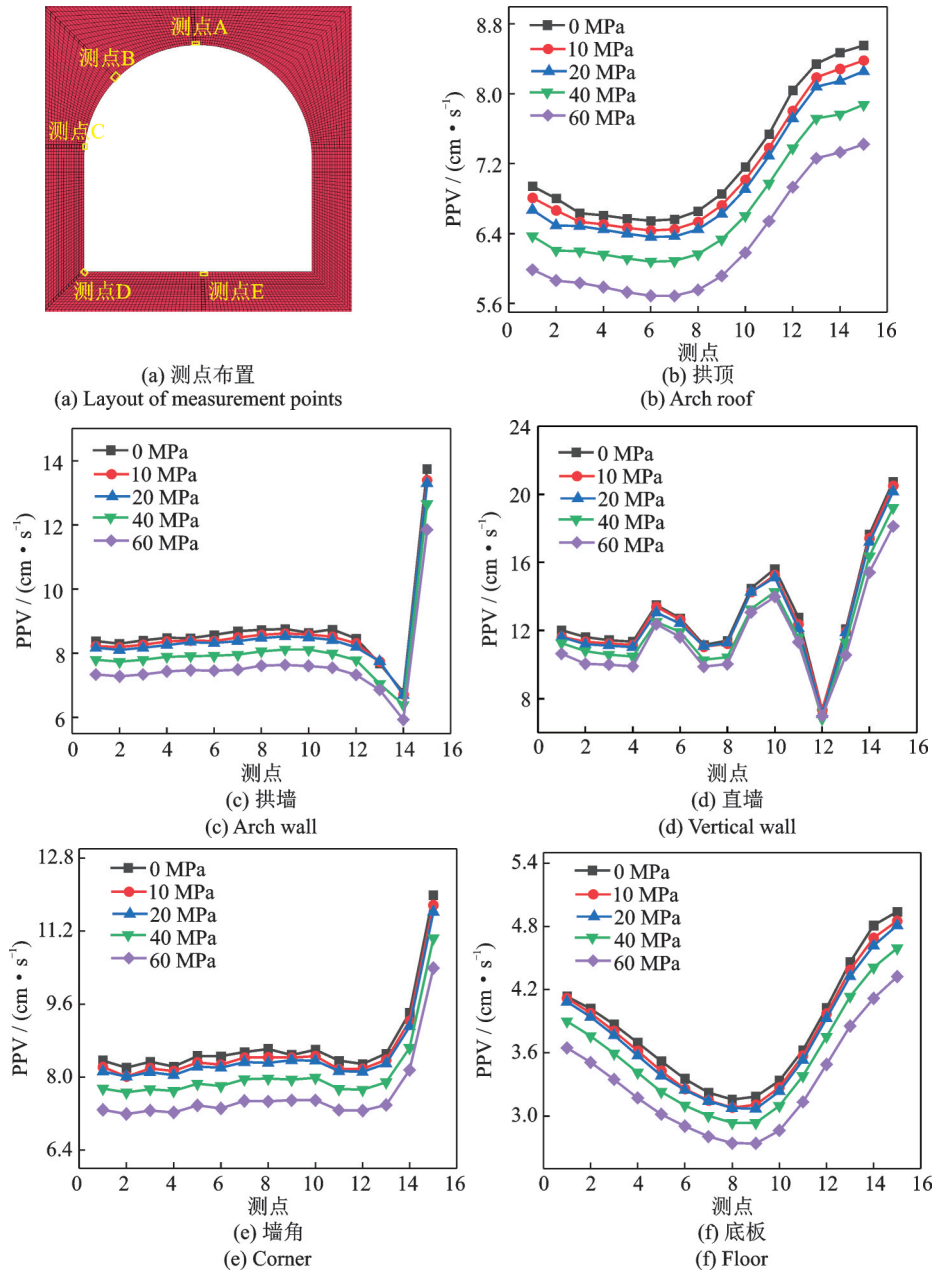


图 7 不同初始地应力下巷道附近围岩合成 PPV 变化情况

Fig. 7 Variation of synthesized PPV of surrounding rock near roadway under different initial in-situ stress

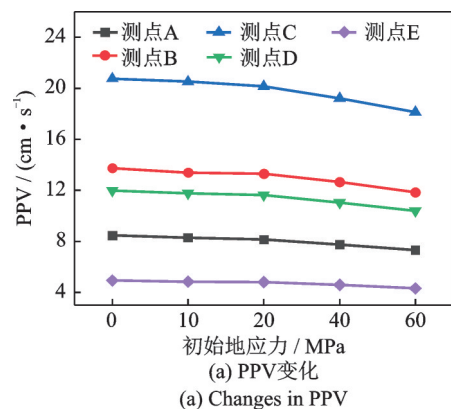
处围岩 PPV 最大的现象。模拟结果与理论计算结论一致,得到了相互印证。

4.2 巷道围岩 PPV 及应力状态分析

4.2.1 地应力对围岩 PPV 的影响

根据 4.1 节所述,由于应力波的反射叠加效应,巷道轮廓面上的 PPV 数值最大,动力响应最明显。下面对不同地应力工况下各测点的合成 PPV 进行对比分析,如图 8(a)所示。从图 8(a)中可以得出如下结论:①巷道直墙测点 PPV 最大,其余从大到小依次为拱墙、墙角、拱顶和底板,这一规律不受地应力影响。②随着地应力的增加,各测点 PPV 均出现不同程度的减小。以 0 MPa 工况下各测点 PPV 为

基准,地应力 20 MPa 时各测点 PPV 平均下降了 3.13%,40 MPa 时平均下降了 7.72%,60 MPa 时平均下降了 13.15%。这表明地应力对巷道自由面处



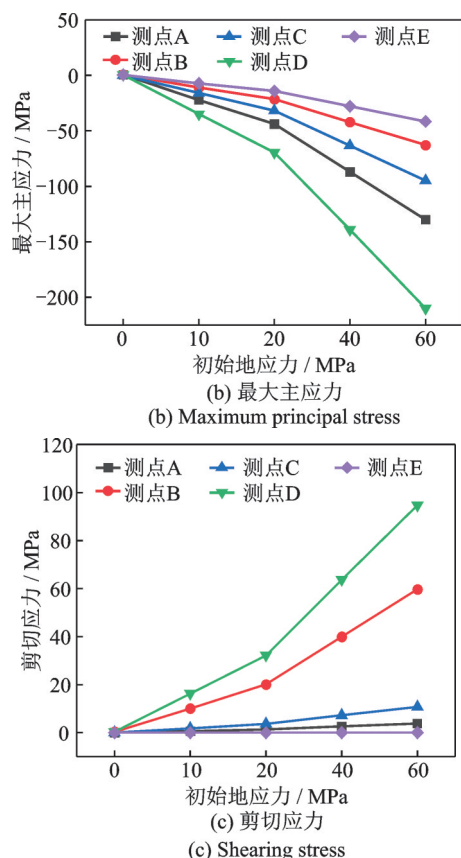


图 8 不同初始地应力下各测点 PPV 及应力变化趋势

Fig. 8 PPV and stress change trend of different initial in-situ stress measurement points

围岩振速有抑制作用,且随着地应力的增大抑制效果更加明显。③巷道不同位置的 PPV 对地应力的敏感程度存在显著差别,测点 B 在初始地应力 60 MPa 时的 PPV 比 0 MPa 时减小了 13.76%,而测点 E 仅减小了 7.5%。拱墙 PPV 受地应力抑制最为明显,底板 PPV 受影响最小。

4.2.2 地应力对围岩应力状态的影响

与浅埋巷道不同,深埋巷道的围岩受自重引起的垂直应力与开挖采动等造成的应力集中联合影响。这就使得围岩承受的应力远超岩体的抗压强度,巷道围岩承受的压力数倍于原岩应力。所以浅部处于弹性应力状态的硬岩在深部可能表现为塑性状态的软岩。文献[24]研究表明在原岩应力的影响下,深部巷道围岩受到的压、剪应力远超围岩的强度。本数值模拟案例获得了相同结论:如图 8(b)和(c)所示,在不考虑地应力时,各测点在爆破震动作用下受拉剪破坏;在地应力作用时,巷道各测点均处于压剪应力状态,且随着地应力的增大各测点的最大主应力及剪切应力均呈上升趋势。随着地应力增大,测点 D 的最大主应力及剪切应力增大最明显,因此在地应力环境中墙角处于较高的危险状态;随着地应力增大,测点 A 的主应力出现较大变化而剪切应力变化较小,表明拱顶受压破坏的可能性更大;

测点 B 处的剪切应力随着地应力增大显著增加,表明随着地应力增大,拱墙处更易受剪切破坏;测点 E 的应力状态随地应力增大变化幅度最小,处于相对安全的状态。

4.3 深井爆破巷道围岩稳定性评估

测点 D(墙角)在 60 MPa 初始地应力工况下最大主应力和剪切应力分别达到了 210 MPa 和 94.7 MPa,分别是不考虑地应力状态时的 429 倍和 312 倍。测点 A(拱顶)和 B(拱墙)随着地应力的增大最大主应力和剪切应力也较高,测点 A 的最大主应力达 130 MPa,测点 B 的剪切应力达 59.7 MPa。处于上述应力状态下的围岩所受应力已经远远超过岩石的抗压、抗剪强度,可以判定处在这种状态下的岩体内部积聚有大量固体能量。在这种情况下,较小的爆破震动也会引发围岩严重的动态破坏^[14]。

巷道迎爆侧直墙 PPV 最易超过安全阈值,应当予以重点监控。而对于在深部爆破作业中,巷道围岩不仅受爆破动载影响,还受地应力静载作用。以往研究表明,深部巷道围岩的动力响应具有突发性^[24],高应力状态下的巷道围岩存在大量固体能量积聚,当深井进行爆破作业时,扰动巷道围岩,使其内部积聚的能量瞬时超过围岩破坏失稳所需要的能量,从而造成整个巷道系统失去结构稳定性。因此判定,随着巷道理深增大,除了巷道直墙以外,巷道迎爆侧的墙角、拱顶、拱墙也都是易受损区域。这可能也是在潘三矿超前预裂卸压爆破时,尽管瓦斯综治巷围岩振速未超过安全阈值,而巷道围岩却出现失稳的原因。

鉴于此,传统的浅部巷道爆破围岩失稳的安全判据对于深部高地应力状态下的巷道围岩失稳判定存在一定的局限性,深井爆破扰动巷道围岩失稳的评估需要将围岩应力状态这一因素纳入考量。在后续的超前预裂卸压爆破过程中,应当对瓦斯综治巷迎爆侧的墙角、拱顶、拱墙进行重点加固。在瓦斯综治巷的掘进过程中,应该对后期处在迎爆侧的巷道围岩通过加密钢丝网、增加锚杆长度等方式进行加强支护,提前预防后期超前预裂卸压爆破的不良影响。

5 结 论

(1) 通过理论分析建立了爆破作业扰动巷道围岩模型,根据应力波传播理论及波前动量守恒定理推导出了剔除地表反射应力波影响的深部巷道围岩的振动方程。

(2) 数值模拟结果表明,爆炸应力波在巷道迎爆

侧围岩出现反射叠加现象;巷道轮廓面上各测点的PPV衰减曲线存在差异,但均在巷道轮廓面上获得最大值,这与振动方程描述的现象一致。

(3)地应力对PPV存在抑制作用,且随着地应力增大抑制现象更加明显。巷道不同位置的PPV对地应力的敏感程度存在显著差别,其中巷道拱墙的PPV受地应力影响最大,底板受影响最小。

(4)在不考虑地应力时爆破载荷作用下巷道围岩主要受拉剪破坏,而随着初始地应力的增大,围岩主要表现为受压剪破坏。

(5)高应力环境下较小的扰动也会对巷道围岩造成很大破坏。对于潘三矿超前预裂卸压爆破扰动瓦斯综治巷而言,迎爆侧的墙角、拱顶、拱墙均为易受损区域,工程现场应予以重点加固。

参考文献:

- [1] 杨仁树,张召冉,安晨,等. 煤矿岩巷掘进爆破掏槽孔超深问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 10-23.
Yang R S, Zhang Z R, An C, et al. Discussion on the ultra depth problem of slot hole in blasting excavation of rock roadway in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 10-23
- [2] 郭金刚,李耀晖,石松豪,等. 厚硬基本顶切顶卸压成巷及围岩控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2853-2864.
Guo J G, Li Y H, Shi S H, et al. Self-forming roadway of roof cutting and surrounding rock control technology under thick and hard basic roof[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2853-2864.
- [3] 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 J, Liu Z G, Gao K, 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.
- [4] 高魁,刘泽功,刘健,等. 定向聚能爆破弱化综掘工作面逆断层应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7): 1408-1419.
Gao Kui, Liu Zegong, Liu Jian, et al. Application research of directional cumulative blasting for weakening reverse faults in fully mechanized excavation face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(7): 1408-1419.
- [5] HAGAN T N. Rock breakage by explosives[J]. Acta Astronautica, 1979, 6(3-4): 329-340.
- [6] 高宇璠,傅洪贤. 近距离下穿既有盾构隧道的隧道钻爆降振技术研究[J]. 振动工程学报, 2021, 34(2): 321-328.
Gao Y F, Fu H X. Drilling and blasting technology for closely crossing existing shield tunnel[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(2): 321-328.
- [7] Jiang N, Zhou C B. Blasting vibration safety criterion for a tunnel liner structure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 32: 52-57.
- [8] Yi C P, Lu W B, Zhang P, et al. Effect of imperfect interface on the dynamic response of a circular lined tunnel impacted by plane P-waves[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 68-47.
- [9] 董春亮,赵光明,李英明,等. 深部圆形巷道开挖卸荷的围岩力学特征及破坏机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 511-518.
Dong C L, Zhao G M, Li Y M, et al. Mechanical properties and failure mechanism of surrounding rocks in deep circular tunnel under excavation unloading[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(3): 511-518.
- [10] Toksöz M N, Kehrler H H. Tectonic strain release by underground nuclear explosions and its effect on seismic discrimination[J]. Geophysical Journal International, 1972, 31(1-3): 141-161.
- [11] Cao W Z, Li X B, Tao M, et al. Vibrations induced by high initial stress release during underground excavations[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 53: 78-95.
- [12] Yang J H, Lu W B, Jiang Q H, et al. A study on the vibration frequency of blasting excavation in highly stressed rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 2825-2843.
- [13] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
Yuan L. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [14] LI X B, LI C J, CAO W Z, et al. Dynamic stress concentration and energy evolution of deep-buried tunnels under blasting loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104: 131-146.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety regulations for blasting: GB 6722—2014[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [16] Li J C, Li H B, Ma G W, et al. A time-domain recursive method to analyse transient wave propagation across rock joints[J]. Geophysical Journal International, 2012, 188(2): 631-644.
- [17] Li J C, Li H B, Ma G W, et al. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion[J].

- Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 35: 227-234.
- [18] 朱斌,周传波,蒋楠.隧道爆破开挖作用下砂浆锚杆动力响应特征及安全控制研究[J].振动工程学报, 2023, 36(1): 235-246.
- Zhu B, Zhou C B, Jiang N. Dynamic response characteristics and safety control of mortar bolts under the action of tunnel blasting excavation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(1): 235-246.
- [19] Zhao Y X, Gong S, Hao X J. Effects of loading rate and bedding on the dynamic fracture toughness of coal: laboratory experiments[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 178: 375-391.
- [20] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. Physics of Fluids, 1980, 23(12): 2362-2372.
- [21] WANG F, TU S, YUAN Y, et al. Deep-hole pre-split blasting mechanism and its application for controlled roof caving in shallow depth seams [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 64: 112-121.
- [22] 王国波,殷耀,谢伟平,等.坍塌触地冲击荷载作用下地铁车站动力响应分析及其安全性评价[J].振动工程学报, 2021, 34(2): 338-346.
- Wang G B, Yin Y, Xie W P, et al. Safety evaluation and dynamic response analysis of subway station under touchdown impact [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(2): 338-346.
- [23] 肖正学,张志呈,李朝鼎.爆破地震波动力学基础与地震效应[M].成都:电子科技大学出版社, 2004.
- [24] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
- He M C, Xie H P, Peng S P, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.

Characteristics and stability of dynamic response of a high in-situ stress roadway under blasting vibration

QIAO Guo-dong^{1,2}, LIU Ze-gong^{1,2}, GAO Kui¹, LIU Jian¹, FU Shi-gui^{1,2}

(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: To investigate the dynamic response characteristics and stability of a high in-situ stress roadway rock enclosures under blasting vibrations, the comprehensive gas management lane of Pan San Mine in Huainan is used as the engineering background. The research method of theoretical analysis of the blasting operation disturbing the roadway envelope rock model is established. Based on the stress wave propagation theory and the wave front momentum conservation theorem, the vibration equations for the roadway envelope under blasting vibration are derived. The theoretical analysis is then supplemented by the use of numerical simulation research methods from the perspectives of PPV (Peak Particle Velocity) attenuation characteristics and stress distribution patterns of the roadway envelope. The stability of the roadway envelope is analyzed based on the simulation results. Differences in the angle of incidence of blast stress waves lead to different dynamic response characteristics in different areas of the roadway envelope. These conclusions are drawn from the roadway envelope vibration equations. As the burst core distance increases, the PPV of the surrounding rock near the profile face of the roadway fluctuates and the maximum peak vibration velocity is obtained at the free face. In-situ stress has a suppressive effect on the PPV of the roadway envelope. The greater the ground stress is, the more obvious the suppressive effect will be. There are differences in the sensitivity of the PPV of the envelope to ground stress at different locations in the roadway. As the magnitude of the in-situ stress increases, the force state of the roadway envelope under blast vibration changes from tensile shear to compressive shear, and the maximum principal and shear stresses increase. The study reaches the conclusions that as the depth of burial increases, the ground stress factor cannot be ignored when assessing the stability of the tunnel envelope under blasting vibration. In addition to the straight walls of the roadway, the corners and arch walls are also hazardous areas that should be reinforced and monitored for the Pan San Mine project site.

Key words: in-situ stress; dynamic response; blasting vibration; surrounding rock instability; peak particle vibration velocity

作者简介: 乔国栋(1994—),男,博士研究生。E-mail: guodongqiao123@163.com。

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