

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.01.001

全尾砂胶结充填体的爆破振动 破坏机制和振动速度阈值研究*

黄欣成^{1a,1b}, 卢文波^{1a,1b}, 张立新², 严鹏^{1a,1b}, 石磊³

(1. 武汉大学 a. 水资源与水电工程科学国家重点实验室; b. 水工岩石力学教育部重点实验室, 武汉 430072;
2. 五矿矿业控股有限公司, 合肥 230091; 3. 安徽开发矿业有限公司, 六安 237426)

摘要: 结合五矿矿业安徽李楼铁矿-425 m 中段矿柱爆破回采工程实例, 利用应力波理论, 分析了爆炸应力波在全尾砂胶结充填体中的传播及其与介质界面的相互作用, 基于充填体的冲击压剪、剪切和反射拉伸等不同破坏机制和破坏准则, 研究了充填体的质点振动速度阈值。研究表明: 在爆炸应力波作用下, 矿柱与1:8 充填体的胶结面易发生剪切破坏, 而胶结充填体易发生压剪破坏; 在透、反射应力波作用下, 1:8 和1:20 配比充填体的胶结面易发生拉裂破坏, 而与1:20 充填体相邻侧的1:8 充填体则可能发生层裂破坏。具体的充填体质点振动速度阈值为: 矿柱与1:8 充填体胶结面的剪切破坏质点振速阈值为27.6 cm/s, 紧邻矿柱1:8 充填体的冲击压剪破坏质点振速阈值为172 cm/s; 1:8 和1:20 配比充填体胶结面的拉裂破坏质点振速阈值为12.6 cm/s, 而与1:20 充填体相邻侧1:8 充填体的层裂破坏质点振速阈值为52.6 cm/s。

关键词: 爆破振动; 应力波理论; 胶结充填体; 破坏机制; 质点振速

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)01-0001-07

Study on Blasting Vibration Failure Mechanism and Vibration Velocity Threshold of Total Tailing Cemented Backfill

HUANG Xin-cheng^{1a,1b}, LU Wen-bo^{1a,1b}, ZHANG Li-xin², YAN Peng^{1a,1b}, SHI Lei³

(1. a. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science;
b. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Minmetals Mining Holdings Co., Ltd., Hefei 230091, China; 3. Anhui Development Mining Co., Ltd., Lu'an 237426, China)

Abstract: The pillar blasting stope project of 425 m medium stage in Lilou Iron Mine of Minmetals Mining was presented. Based on the stress wave theory, the propagation of blasting stress wave in total tailing cemented backfill and its interaction with medium interface were analyzed. According to the different failure criteria and mechanism of backfill, such as impact-compression-shear, shear and reflective tension, the particle vibration velocity threshold of backfill were studied. The research shows that the cementing surface between the pillar and the 1:8 ratio backfill is prone to shear failure due to blast stress wave, and the cemented backfill is prone to compression-shear failure. Under the action of refracted and reflected stress wave, the cementing surface between the 1:8 ratio and 1:20 ratio backfill is prone to tensile failure, and the spall fracture of the 1:8 ratio backfill adjacent to the 1:20 ratio backfill may occur. The specific particle vibration velocity threshold of the backfill is summarized below: The particle vibration velocity threshold of shear failure on the cemented surface between the pillar and the 1:8 ratio backfill is 27.6 cm/s; the particle vibration velocity threshold of compression-shear failure of 1:8 ratio backfill adjacent to pillar is 172 cm/s; the particle vibration velocity threshold of tensile failure on the cementing surface between the 1:8 ratio and 1:20 ratio backfill is 12.6 cm/s. the particle vibration velocity threshold of spall fracture of the 1:8 ratio backfill adjacent to the

1:20 ratio backfill is 52.6 cm/s.

Key words: blast vibration; stress wave theory; cementing backfill; failure mechanism; particle vibration velocity

空场嗣后充填法成为国内外缓解采矿工程地质灾害的一种普遍方法^[1,2],在空场嗣后充填法中胶结充填体起重要承载作用,而矿柱爆破回采可能对邻近充填体产生冲击和振动破坏^[3,4],因此分析充填体破坏机制并确定对应质点振速阈值成为采矿工程建设过程中的重要技术问题之一。

目前胶结充填体的爆破振动破坏及其控制研究取得了一些成果。数值模拟方面,主要利用FLAC^{3D}、ANSYS/LS-DYNA等专业软件模拟充填体破坏过程^[5,6]。试验研究方面,多借助分离式霍布金森压杆技术,对胶结充填体的动态力学参数与破坏规律进行试验研究^[7-9]。理论研究方面,姜立春等采用弹性力学半逆解法,建立边界力耦合作用下胶结充填体的临界爆破振速理论模型^[4];刘志祥、李夕兵等建立了爆破动载下高阶阶段矿柱不同开采高度处充填体动静应力理论模型^[10];朱瑞鹏等通过分析爆炸应力波在胶结充填体内部空隙中的透反射规

律,建立了充填体张拉破坏理论模型^[6],但目前研究较少结合矿柱分段回采、炮孔布置特征等实际工况,并且鲜有全尾砂胶结充填体的爆破振动破坏机制及对应振动速度阈值的系统分析。

李楼铁矿-425 m中段回采采用25 m分段上向扇形孔阶段空场嗣后充填法,如图1,一步骤开采I、III、V及VII号矿房后,用灰砂比1:8的全尾砂胶结充填体进行充填,二步骤回采II、VI号矿柱后,用灰砂比1:20的全尾砂胶结充填体进行充填。结合此实例,针对IV号关键矿柱回采可能导致的相邻胶结充填体爆破振动破坏问题,分析了胶结充填体的爆破振动破坏机制,并求解出不同破坏机制下胶结充填体的爆破振动速度阈值。由于结构对称,仅分析IV号矿柱-325~-300 m分段回采对一侧充填体的爆破振动影响,如图2所示, α 表示炮孔与水平方向夹角,工程实际中炮孔与水平方向夹角分布在 $40^\circ \sim 86^\circ$ 之间。

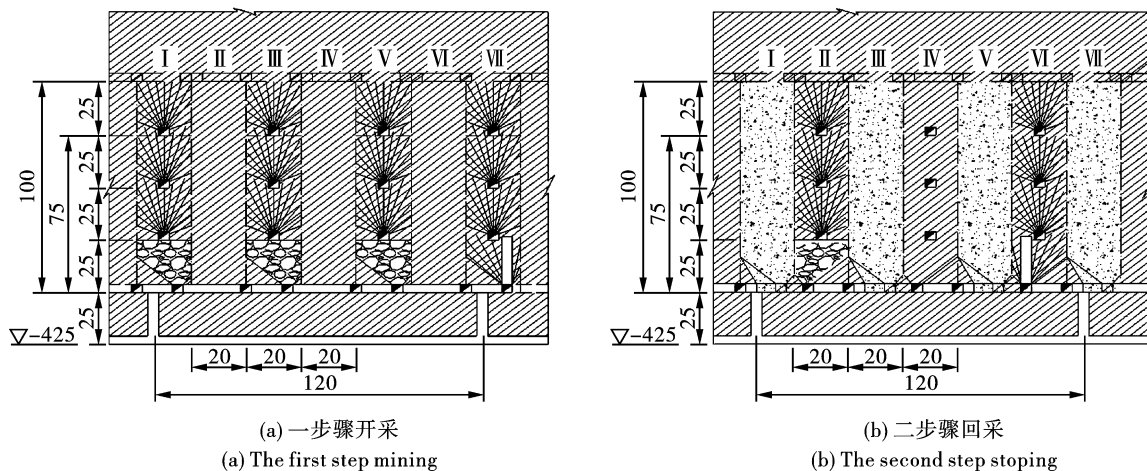


图1 阶段空场嗣后充填法(单位:m)

Fig. 1 Stage delayed cemented filling method(unit:m)

1 应力波与胶结充填体相互作用分析

IV号矿柱爆破回采,炮孔采用柱状装药,在其近

区产生柱面波,但在离爆心一定距离外,可近似视为平面波,就弹性平面波通过III~IV胶结面时的情况进行研究。入射P波在III~IV胶结面的透反射情况如图3所示。

利用波的位移场分析此问题,平面简谐应力波位移场^[11]

$$\vec{U}^n = A_n \vec{d}^n \exp[i(k_n \vec{x} \vec{p}_x^n - k_n \vec{z} \vec{p}_z^n - \omega_n t)] \quad (1)$$

式中: $n=0,1,2,3,4$ 分别表示入射P波、反射P波、反射SV波、透射P波、透射SV波; A_n 为波的位移幅

收稿日期:2020-12-06

作者简介:黄欣成(1995-),男,湖北随州人,硕士研究生,主要从事岩石动力学及工程爆破的相关研究工作,(E-mail) 2018202060056@whu.edu.cn。

通讯作者:卢文波(1968-),男,教授、博士生导师,主要从事岩石动力学及工程爆破的相关研究,(E-mail) wblu@whu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(51779190);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2042018k0211);湖北省自然科学基金杰出青年基金项目(2019CFA060)

值; \vec{d}^n 为波的位移单位矢量; i 为虚数单位; k_n 为波数; \vec{p}^n 为波传播方向上的单位矢量; w_n 为圆频率; 对于 P 波, $\vec{d}^n = \vec{p}^n$, 对于 SV 波, $\vec{d}^n \vec{p}^n = 0$ 。

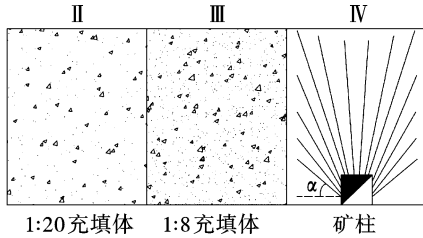


图 2 IV 号矿柱 -325 ~ -300 m 分段回采
Fig. 2 The -325 ~ -300 m sublevel stoping of IV pillar

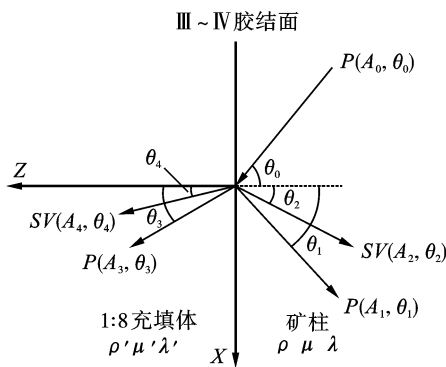


图 3 III ~ IV 胶结面 P 波的透反射规律
Fig. 3 Law of refraction and reflection of P wave through the III ~ IV cemented surface

胶结面两侧的位移

$$\left. \begin{aligned} U_k(\text{IV}) &= \sum_j \bar{U}_j \vec{i}_k, j = 0, 1, 2 \\ U_k(\text{III}) &= \sum_j \bar{U}_j \vec{i}_k, j = 3, 4 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $k = X, Z; \vec{i}_k$ 为坐标轴的单位矢量。

胶结面两侧位移与应力的关系

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \left| \lambda \left(\frac{\partial U_x}{\partial X} + \frac{\partial U_z}{\partial Z} \right) + 2\mu \frac{\partial U_z}{\partial Z} \right| \\ \sigma_{zx} &= \left| \mu \left(\frac{\partial U_x}{\partial Z} + \frac{\partial U_z}{\partial X} \right) \right| \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: λ, μ 为拉梅常数。

联立式 (1) ~ (3), 可得 III ~ IV 胶结面上的法向、切向应力

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= (\lambda' + 2\mu' \cos^2 \theta_3) A_3 k_3 - \mu' A_4 k_4 \sin 2\theta_4 \\ \sigma_{zx} &= \mu' \sin 2\theta_3 A_3 k_3 + \mu' A_4 k_4 \cos 2\theta_4 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: λ', μ' 为 1:8 充填体拉梅常数。

由于 III ~ IV 胶结面两侧位移连续, 其附近 1:8 充填体所受应力可由式 (4) 表示。II ~ III 胶结面及其附近 1:8 充填体受到入射 P 波、SV 波作用, 应力

表达式同式 (4), 只需将式中参数换成对应参数。

2 胶结充填体破坏机制

2.1 胶结面破坏机制

III ~ IV 胶结面在爆炸应力波作用下可能出现两种破坏模式: (1) 拉裂破坏。由于爆炸压应力波是从矿柱 (大波阻抗介质) 进入 1:8 充填体 (小波阻抗介质), 压应力波经过胶结面反射为拉应力波, 在反射拉应力波作用下, 可能导致胶结面拉裂破坏; (2) 沿胶结面发生剪切破坏。爆炸应力波在胶结面上产生的切向应力, 可能导致矿柱与充填体相互错动, 从而造成胶结面发生剪切破坏。II ~ III 胶结面在爆炸应力波作用下的破坏机制同 III ~ IV 胶结面。

2.2 III ~ IV 胶结面附近 1:8 充填体破坏机制

III ~ IV 胶结面附近充填体在爆炸应力波作用下可能出现的破坏包括: (1) 冲压破坏。爆炸应力波法向应力分量对充填体造成冲击压缩作用, 法向应力过大时, III ~ IV 胶结面附近充填体将产生冲压破坏; (2) 压剪破坏。取 III ~ IV 胶结面附近 1:8 充填体任一单元, 如图 4 所示, 透射应力波对此单元侧面产生法向和切向应力作用, 应力大小如式 (4), 单元顶面同样受到法向压应力和切向应力作用, 法向压应力为 $\frac{\mu_d}{1 - \mu_d} \sigma_z$, 其中 μ_d 为动泊松比, 单元顶面切向应力同侧面切向应力, 在爆炸应力及侧向应力共同作用下, 可能诱发 III ~ IV 胶结面附近 1:8 充填体压剪破坏。

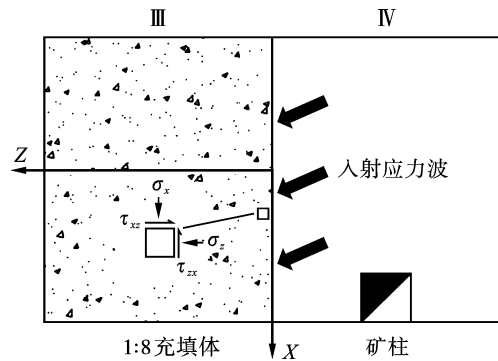


图 4 III ~ IV 胶结面附近 1:8 充填体压剪破坏
Fig. 4 Compression shear failure of 1:8 ratio backfill near the III ~ IV cemented surface

2.3 II ~ III 胶结面附近 1:8 充填体破坏机制

由于透过 III ~ IV 胶结面的应力波折射角较小, 其传播至 II ~ III 胶结面时可近似按照垂直入射考虑。入射压应力波经过 II ~ III 胶结面反射为拉应力波, 考虑三角形爆炸荷载曲线, 如图 5, σ_0 表示入射波荷载峰值, 当反射拉应力波荷载峰值与入射压应

力波荷载值叠加恰好达到充填体抗拉强度时,发生第一次拉裂破坏,形成竖向裂纹;此时入射压应力波继续传播,经过裂纹自由面反射形成拉应力波,当第二次反射的拉应力波荷载峰值与压应力波荷载叠加

再次达到充填体抗拉强度时,发生第二次拉裂破坏,直至在新自由面反射的拉应力波峰值荷载与入射压应力波荷载叠加小于充填体抗拉强度,开裂过程停止,即充填体可能发生层裂破坏。

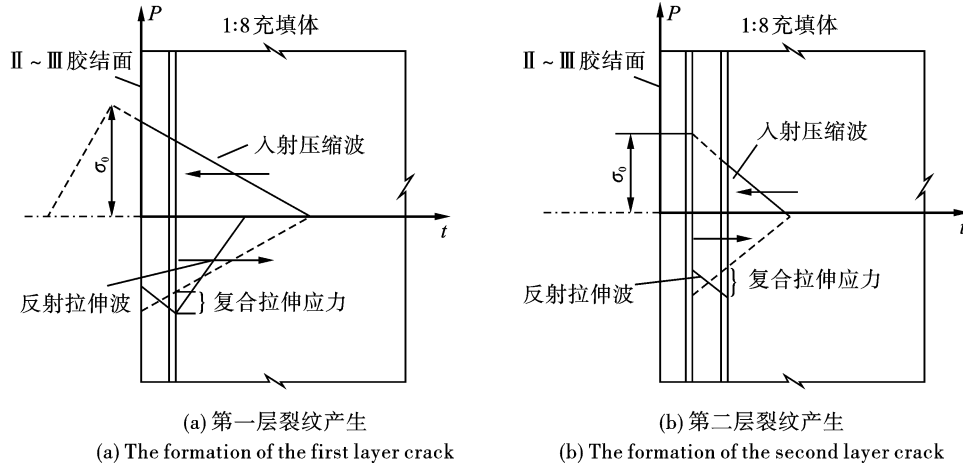


图5 II ~ III胶结面附近1:8充填体层裂破坏

Fig. 5 Spall fracture of 1:8 ratio backfill near the II ~ III cemented surface

3 强度准则与计算参数

3.1 强度准则

根据上述胶结充填体破坏机制分析可知,胶结充填体同一位置处在爆炸应力波作用下可能对应多个破坏模式,针对不同破坏模式,采用对应的强度准则计算该破坏模式下的安全质点振速,取各不同破坏模式所对应安全质点振速的最小值作为该位置处充填体不发生破坏的质点振速阈值。

剪切破坏对应莫尔-库伦强度准则,可由法向、切向应力或最大、最小主应力分别表示^[3]

$$\sigma_{xx} = \sigma_z \tan \varphi + c \quad (5)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) - 2c \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (6)$$

式中: c 为胶结面内聚力; φ 为胶结面有效内摩擦角。

拉裂破坏对应极限拉应力强度准则,可表示为

$$\sigma_z = f_t \quad (7)$$

式中, f_t 为容许拉应力。

冲压破坏对应极限压应力强度准则,可表示为

$$\sigma_z = f_c \quad (8)$$

式中, f_c 为容许压应力。

爆炸应力波是由多频率成分叠加而成的复杂组合,选取统计意义上、贡献最大的频率成分作为研究对象,可将爆炸应力波视为简谐波,近似得对应的安全质点振速^[11]

$$[v] = w_f [A_0] \quad (9)$$

式中, w_f 为圆频率,其值可近似取为主振频率。

3.2 计算参数

根据试验和经验公式确定矿柱、1:8充填体和1:20充填体力学参数^[3,12-14],如表1~3。矿柱、充填体动弹性模量可由动弹模与纵、横波波速及密度关系式求得^[14];III~IV、II~III胶结面抗拉强度分别取为1:8配比与1:20配比充填体抗拉强度的60%^[11];充填体动抗拉强度缺乏试验和理论研究,近似参照岩石动强度与应变率及静强度关系得到,因此矿柱、胶结充填体的动强度分别近似取为静强度的2和3倍^[15,16];胶结面有效内摩擦角近似取为 10° ,III~IV胶结面内聚力取为0.05 MPa,II~III胶结面内聚力取为0.01 MPa^[3];动泊松比取为静泊松比的0.8倍^[6]。

表1 矿柱力学参数

Table 1 Mechanical parameters of pillar

弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	纵波波速/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	横波波速/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
25.119	0.202	3.487	5.21	3.10

4 全尾砂胶结充填体爆破振动速度阈值

4.1 III~IV胶结面爆破振动速度阈值

扇形炮孔起爆可产生多个不同入射角度平面应力波,而入射角与图2中炮孔水平夹角 α 具有对应关系,因此得到入射角分布范围为 $4^\circ \sim 50^\circ$,为分析方便,选取典型入射角进行考虑,其余角度入射时分

析方法类似;忽略延时起爆与应力波传播影响,认为各入射应力波同时与胶结面作用,结合透射应力波振幅系数^[17]、应力表达式、破坏准则及质点振速表

达式,代入材料参数,可得各入射角应力波作用下Ⅲ~Ⅳ胶结面发生破坏时的安全质点振速,如表4所示。

表2 1:20 配比充填体力学参数
Table 2 Physical parameters of the 1:20 ratio backfill

弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	纵波波速/ ($km \cdot s^{-1}$)	抗拉强度/ MPa	横波波速/ ($km \cdot s^{-1}$)
0.06	0.28	1.81	0.60	0.02	0.35

表3 1:8 配比充填体力学参数
Table 3 Physical parameters of the 1:8 ratio backfill

弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	纵波波速/ ($km \cdot s^{-1}$)	横波波速/ ($km \cdot s^{-1}$)	抗拉强度/ MPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	抗压强度/ MPa	内聚力/ MPa
0.38	0.25	1.74	1.50	0.90	0.16	39	1.95	0.30

表4 Ⅲ~Ⅳ胶结面的安全质点振速
Table 4 Safe particle vibration velocity of Ⅲ~Ⅳ cementing surface

入射角/ $^{\circ}$	4	12	20	28	36	44	50
安全质点振速/($cm \cdot s^{-1}$)	40.0	41.1	43.5	47.5	40.3	31.3	27.6
拉裂破坏质点振速/($cm \cdot s^{-1}$)	40.0	41.1	43.5	47.5	53.4	61.5	70.5
剪切破坏质点振速/($cm \cdot s^{-1}$)	-	-	111.0	64.8	40.3	31.3	27.6

由计算结果可知,爆炸应力波作用下,小入射角易诱发胶结面拉裂破坏,大入射角易诱发胶结面剪切破坏,胶结面破坏类型随入射角的增大,由拉裂破坏转变为剪切破坏,安全质点振速随入射角的增大呈先增后减的变化规律,由于最大入射角应力波诱发剪切破坏时对应最小安全质点振速,即胶结面更易发生剪切破坏,对应质点振速阈值为27.6 cm/s。

需要说明的是,矿柱回采过程,需要通过爆破方法使矿体破碎崩落,并与充填体分离,以实现爆破回采目的。

4.2 Ⅲ~Ⅳ胶结面附近充填体爆破振动速度阈值

采用上述计算方法,可得不同入射角应力波作用下Ⅲ~Ⅳ胶结面附近1:8 充填体发生冲压破坏或压剪破坏时的安全质点振速,如表5所示。

表5 Ⅲ~Ⅳ胶结面附近1:8 充填体的安全质点振速

Table 5 Safe particle vibration velocity of 1:8 ratio backfill near the Ⅲ~Ⅳ cementing surface

入射角/ $^{\circ}$	4	12	20	28	36	44	50
安全质点振速/($cm \cdot s^{-1}$)	541	557	590	432	272	203	172
冲压破坏质点振速/($cm \cdot s^{-1}$)	541	557	590	644	724	832	955
压剪破坏质点振速/($cm \cdot s^{-1}$)	-	-	966	432	272	203	172

由计算结果可知,爆炸应力波作用下,小入射角易诱发充填体冲压破坏,大入射角易诱发充填体压剪破坏,充填体破坏类型随入射角的增大,由冲压破坏转变为压剪破坏,安全质点振速随入射角的增大呈现先增后减的变化规律,由于最大入射角应力波诱发压剪破坏时对应最小安全质点振速,即Ⅲ~Ⅳ胶结面附近1:8 胶结充填体更易发生压剪破坏,对应的质点振速阈值为172 cm/s。

4.3 Ⅱ~Ⅲ胶结面爆破振动速度阈值

入射P波透射过Ⅲ~Ⅳ胶结面将产生折射角

为 θ_3, θ_4 的P波、SV波,如图3所示,随后P波、SV波以角度 $\theta_3 = \beta_0, \theta_4 = \xi_0$ 入射至Ⅱ~Ⅲ胶结面,如图6所示。

根据异质界面应力波入射角 θ_0 与折射角 θ_3, θ_4 关系,可求得P波、SV波传播至Ⅱ~Ⅲ胶结面时入射角 β_0, ξ_0 大小^[11],结合前述计算方法,得Ⅱ~Ⅲ胶结面发生拉裂或剪切破坏时的安全质点振速,如表6、表7所示。

SV波入射到Ⅱ~Ⅲ胶结面时,由于入射角较小且引起的质点振动方向与波阵面传播方向垂直,因

此较难导致胶结面拉裂,仅可能发生剪切破坏,由计算结果可得安全质点振速随入射角增大而增大;P波入射到II~III胶结面时,由于入射角较小即沿胶结面切向应力分量较小,因此较难导致胶结面两侧充填体发生相互错动,仅可能发生拉裂破坏,安全质点振速随入射角增大而增大。对比不同破坏模式下的安全质点振速可知,II~III胶结面更易在入射P波作用下发生拉裂破坏,对应质点振速阈值为12.6 cm/s。

4.4 II~III胶结面附近1:8充填体爆破振动速度阈值

传播至II~III胶结面入射应力波近似按照垂直入射考虑,为防止层裂破坏,根本需防止第一层裂纹的产生。考虑三角形爆炸荷载曲线,当第一次反射拉应力波荷载峰值与入射压应力波谷值叠加时,作用在充填体上的拉应力最大,若此时叠加拉应力恰好达不到充填体抗拉强度,充填体将不会发生开裂,对应安全质点振速最小即为防止层裂破坏出现的质

点振速阈值,结合前述计算方法,得质点振速阈值为52.6 cm/s。

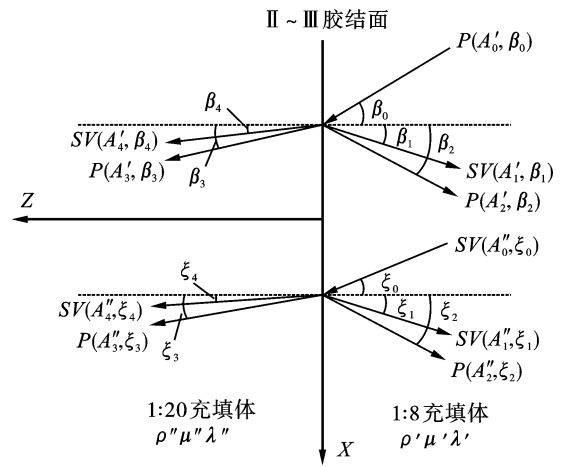


图6 II~III胶结面P,SV波的透反射规律

Fig. 6 Law of refraction and reflection of P and SV wave through the II~III cemented surface

表6 SV波入射的II~III胶结面的安全质点振速

Table 6 Safe particle vibration velocity of II~III cementing surface under SV wave

入射角/°	0.7	2.1	3.4	4.7	5.8	6.9	7.6
剪切破坏质点振速/(cm·s ⁻¹)	20.8	21.1	21.4	21.6	21.9	22.2	22.4

表7 P波入射的II~III胶结面的安全质点振速

Table 7 Safe particle vibration velocity of II~III cementing surface under P wave

入射角/°	1.2	3.4	5.7	7.8	9.7	11.5	12.7
拉裂破坏质点振速/(cm·s ⁻¹)	12.6	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.1

4.5 分析与讨论

结合上述计算结果可知,工程上,III~IV胶结面需发生破坏以达到矿柱崩落回采的目的,对应最小质点振速为27.6 cm/s;III~IV胶结面附近1:8充填体在应力波作用下的压剪破坏需防止,对应质点振速阈值为172 cm/s;II~III胶结面在应力波作用下的拉裂破坏需防止,对应质点振速阈值为12.6 cm/s;为防止II~III胶结面附近1:8充填体发生层裂破坏,对应质点振速阈值为52.6 cm/s。

为保证矿柱回采过程的工程安全,实际中可采取合理确定扇形孔底部与胶结充填体的距离、适当增大一步采矿房厚度和提高胶结充填体强度等工程控制措施。

5 结论

结合上述分析与计算结果,可得以下结论:

(1)爆炸应力波作用下,矿柱与1:8充填体胶结面可能发生剪切或拉裂破坏,小入射角度易诱发

胶结面拉裂破坏,大入射角度易诱发胶结面剪切破坏。此胶结面更易在大角度入射应力波作用下发生剪切破坏,对应爆破振动质点峰值振动速度为27.6 cm/s,工程上此胶结面需破坏以达到矿柱崩落回采的目的。

(2)爆炸应力波作用下,1:8充填体可能发生冲压破坏或压剪破坏,小角度入射易诱发胶结充填体冲压破坏,大角度入射易诱发胶结充填体压剪破坏。1:8充填体更易在大角度入射应力波作用下发生压剪破坏,对应质点振速阈值为172 cm/s。

(3)爆炸应力波传播至1:8与1:20充填体之间胶结面,由于应力波入射角较小,仅可能在P波作用下发生拉裂破坏或在SV波作用下发生剪切破坏,此胶结面更易在P波作用下发生拉裂破坏,对应质点振速阈值为12.6 cm/s。

(4)在反射拉应力波与入射压应力波叠加作用下,1:20充填体相邻侧的1:8充填体可能发生层裂破坏,对应质点振速阈值为52.6 cm/s。

参考文献 (References)

- [1] HOU Chen, ZHU Wan-cheng, YAN Bao-xu, et al. Analytical and experimental study of cemented backfill and pillar interactions [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(8):04019080.
- [2] JIANG Fei-fei, ZHOU Hui, SHENG Jia, et al. Evaluation of safety and deformation characteristics of cemented tailings backfill mining disturbed area near shafts: a case study in China [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2020, 6(3):54.
- [3] 魏晓明. 高阶全尾砂胶结充填体强度特性及充填体配比设计研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [3] WEI Xiao-ming. Study on strength characteristics and ratio design of high stage whole tailing cemented backfill [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018. (in Chinese)
- [4] 姜立春, 苏勇. 胶结充填体矿柱失稳的临界爆破振动理论模型及应用 [J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(11):2663-2670.
- [4] JIANG Li-chun, SU Yong. Theoretical model and application of critical blasting vibration velocity for instability of cemented backfill pillar [J]. *The Chinese Journal of Non-ferrous Metals*, 2019, 29(11):2663-2670. (in Chinese)
- [5] EMAD M Z, MITRI H, KELLY C. Effect of blast-induced vibrations on fill failure in vertical block mining with delayed backfill [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(9):975-983.
- [6] 朱鹏瑞, 宋卫东, 曹帅, 等. 爆破动载下胶结充填体的张拉力学响应机制 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(3):605-611.
- [6] ZHU Peng-rui, SONG Wei-dong, CAO Shuai, et al. Tensile mechanical response mechanism of cemented backfills under blasting load [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(3):605-611. (in Chinese)
- [7] 张钦礼, 杨伟, 杨珊, 等. 动载下高密度全尾砂胶结充填体稳定性试验研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(3):78-82.
- [7] ZHANG Qin-li, YANG Wei, YANG Shan, et al. Test research on stability of high density total tailing cemented backfilling under dynamic loading [J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(3):78-82. (in Chinese)
- [8] ZHANG Yun-hai, WANG Xin-min, WEI Chong, et al. Dynamic mechanical properties and instability behavior of layered backfill under intermediate strain rates [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(7):1608-1617.
- [9] TAN Yu-ye, YU Xin, ELMO D, et al. Experimental study on dynamic mechanical property of cemented tailings backfill under SHPB impact loading [J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2019, 26(4):404-416.
- [10] 刘志祥, 李夕兵. 爆破动载下高阶阶段充填体稳定性研究 [J]. *矿冶工程*, 2004, 24(3):21-24.
- [10] LIU Zhi-xiang, LI Xi-bing. Research on stability of high-level backfill in blasting [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2004, 24(3):21-24. (in Chinese)
- [11] 陈明, 卢文波. 爆炸应力波对新浇混凝土衬砌的影响研究 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(2):455-459, 464.
- [11] CHEN Ming, LU Wen-bo. The influence of explosive stress wave on young concrete lining [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2):455-459, 464. (in Chinese)
- [12] 李庆忠. 岩石的纵、横波速度规律 [J]. *石油地球物理勘探*, 1992(1):1-12, 154.
- [12] LI Qing-zhong. Velocity regularities of P and S-wave in formations [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1992(1):1-12, 154. (in Chinese)
- [13] 卢央泽, 郭章, 姜仁义. 浅议李楼铁矿胶结充填体的选择 [J]. *矿冶*, 2009, 18(4):20-24.
- [13] LU Yang-ze, GUO Zhang, JIANG Ren-yi. Discussion on cementation-filling mass in Lilou iron ore [J]. *Mining and Metallurgy*, 2009, 18(4):20-24. (in Chinese)
- [14] 王让甲. 声波岩石分级和岩石动弹性力学参数的分析研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [14] WANG Rang-jia. The acoustic classification of rocks and study of dynamic-elastic mechanical parameters of rocks [M]. Beijing: Geology Press, 1997. (in Chinese)
- [15] 杨伟, 张钦礼, 杨珊, 等. 动载下高浓度全尾砂胶结充填体的力学特性 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(1):156-161.
- [15] YANG Wei, ZHANG Qin-li, YANG Shan, et al. Mechanical property of high concentration total tailing cemented backfilling under dynamic loading [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(1):156-161. (in Chinese)
- [16] 杨建华. 深部岩体开挖爆破与瞬态卸荷耦合作用效应 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [16] YANG Jian-hua. Coupling effect of blasting and transient release of in-situ stress during deep rock mass excavation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese)
- [17] 徐仲达. 地震波理论 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [17] XU Zhong-da. Seismic wave theory [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese)