

充填体与岩体三维能量耗损规律及合理匹配

刘志祥, 李夕兵, 赵国彦, 李启月, 王卫华

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 根据灰砂配比为 1:4, 1:8, 1:10 和 1:12 的 4 种胶结充填体力学试验结果, 揭示不同配比充填体三维损伤耗能规律。针对矿床开采岩体应力转移并释放能量特征, 探索矿床开采过程中岩体三维能量释放规律。研究表明, 矿体埋藏越深, 开挖岩体释放能量越高; 岩体弹性模量越高或泊松比越低, 岩体释放能量越小。根据充填体与岩体耦合作用的三维能量耗损特征, 探讨充填体与岩体的合理匹配, 并用该匹配模型验证安庆铜矿采用最低充填配比 1:12 开采矿石是可行的。研究发现, 充填体与岩体的匹配系数 K 和三维原岩应力、岩体及充填体力学参数相关, 不同开采技术条件必须设计合适的充填体抗压强度才能实现与岩体匹配。

关键词: 岩石力学; 胶结充填体; 损伤力学; 能量耗损; 充填体与岩体匹配

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)02 - 0344 - 05

THREE-DIMENSIONAL ENERGY DISSIPATION LAWS AND REASONABLE MATCHES BETWEEN BACKFILL AND ROCK MASS

LIU Zhixiang, LI Xibing, ZHAO Guoyan, LI Qiyue, WANG Weihua

(College of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: According to experimental results of four kinds of cemented backfills with the ratios of cements to tailings 1:4, 1:8, 1:10 and 1:12, the laws of three-dimensional energy dissipation of backfill are presented during the course of breakage. According to the characters of stress transfer and energy release in rock mass during deposit exploiting, the laws of energy release in excavated rock mass are researched; and the results show that the deeper ore body in underground is, or the bigger the elastic modulus of rock mass is, as well as the lower the Poisson's ratio of rock mass is, the higher the energy release in excavated rock mass is. With the characters of energy dissipation in coupling action between backfill and rock mass, their reasonable matches can be explored, and the feasibility, in which the lowest ratio 1:12 of cement to tailings can be adopted in Anqing Copper Mine, is verified. The results show that the matching coefficient K between backfill and rock mass correlates with three-dimensional geostresses, mechanical parameters of backfill and rock mass; and it is necessary to design reasonable compression strength of backfill and to realize reasonable match between backfill and rock mass under different mining conditions.

Key words: rock mechanics; cemented backfill; damage mechanics; energy dissipation; match between backfill and rock mass

1 引言

充填采矿技术在防止地表塌陷、控制采区地

压、提高资源回收率等方面具有巨大的优势^[1~4], 在金属矿山的应用日趋广泛, 如加拿大应用充填采矿法的矿山达到 70% 以上^[5], 南非深井矿山几乎全部用充填技术控制岩爆^[6]。为了指导充填采矿技术,

收稿日期: 2009 - 04 - 09; **修回日期:** 2009 - 07 - 15

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAB08B01); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400); 湖南省国土资源厅科技计划项目(2007K07)

作者简介: 刘志祥(1967 -), 男, 博士, 1989 年毕业于武汉工业大学采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事采矿与充填体力学等方面的教学与研究工作。E-mail: liulzx@mail.csu.edu.cn

M. Fall 等^[7-10]对充填体力学性质、破坏特征等进行了大量研究, 然而充填体是一种多相复合非线性力学介质, 有不同于岩石与混凝土的独特力学特性, 有必要针对充填体破坏特征, 研究其能量耗损规律, 揭示其复杂非线性力学特性。

矿床在未采动以前存在地应力, 矿石被挖走后, 围岩卸载并释放能量^[11], 开挖的采空区被充填后, 围岩变形压缩充填体, 充填体产生抗反力, 抑制围岩变形, 同时充填体内蓄积变形能^[12], 充填体与岩体耦合作用过程中存在着能量交换, 有必要根据其能量耗损机制, 研究充填体与岩体的合理匹配, 科学确定胶结充填体所需的抗压强度。

刘志祥等^[13]在对充填体进行力学试验的基础上, 得出了不同配比充填体一维损伤本构方程, 建立了简化的充填体与岩体一维匹配模型。为了更真实地模拟充填采矿技术, 本文研究充填体破坏的三维耗能机制, 并根据充填体与岩体三维耦合作用能量耗损特征, 得出了充填体与岩体的合理匹配模型。

2 充填体三维损伤耗能规律

刘志祥等^[13]通过对配比 1:4, 1:8, 1:10 和 1:12 的充填体力学试验, 采用损伤力学建立了不同配比充填体单轴压缩损伤本构方程:

(1) 峰值应力前, 有

$$\sigma = E\varepsilon - EA\varepsilon^{\beta+1} \quad (1)$$

(2) 峰值应力后^[14], 有

$$\sigma = -ED_p\varepsilon + E\varepsilon \exp[-B(\varepsilon - \varepsilon_p)] \quad (2)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; E 为弹性模量; ε_p 为峰值应力对应的应变值; A, B, β 均为常数。其余参数见 J. Mazars^[14]的研究结果。

本文试验得到不同配比充填体损伤参数如表 1 所示。

表 1 不同配比充填体损伤参数

| 配比 | E/MPa | ε_p | A | B |
|------|----------------|-----------------|--------------------|-------|
| 1:4 | 573.0 | 0.008 63 | 1.62×10^7 | 188 |
| 1:8 | 231.1 | 0.009 01 | 4.06×10^8 | 345 |
| 1:10 | 140.8 | 0.009 65 | 1.99×10^9 | 730 |
| 1:12 | 96.5 | 0.009 95 | 9.84×10^9 | 1 484 |

在单轴压缩下, 充填体在峰值应力时的变形比

能 U_p ^[13]为

$$U_p = \frac{1}{2} E\varepsilon_p^2 - \frac{EA}{\beta+2} \varepsilon_p^{\beta+2} \quad (3)$$

根据充填体损伤参数(见表 1), 使用式(3)进行计算, 得到充填体达到峰值应力时的变形比能(简称峰值比能)。不同配比充填体峰值比能如表 2 所示(侧压力为 0)。计算结果表明, 充填体配比越低, 峰值比能越小。

表 2 不同配比充填体的峰值比能

Table 2 Peak energies of backfills with different ratios

| 配比 1:4 | | 配比 1:8 | | 配比 1:10 | | 配比 1:12 | |
|---------|---|---------|---|---------|---|---------|---|
| 围压 /MPa | 峰值比能 /($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$) | 围压 /MPa | 峰值比能 /($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$) | 围压 /MPa | 峰值比能 /($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$) | 围压 /MPa | 峰值比能 /($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$) |
| 0.00 | 0.021 3 | 0.00 | 0.009 4 | 0.00 | 0.006 6 | 0.00 | 0.004 8 |
| 0.81 | 0.023 0 | 0.39 | 0.010 1 | 0.21 | 0.007 0 | 0.15 | 0.005 2 |
| 1.68 | 0.028 2 | 0.71 | 0.012 4 | 0.43 | 0.008 6 | 0.32 | 0.006 3 |
| 2.71 | 0.036 7 | 0.97 | 0.016 1 | 0.70 | 0.011 2 | 0.48 | 0.008 2 |
| 3.13 | 0.048 6 | 1.31 | 0.021 4 | 0.87 | 0.014 9 | 0.57 | 0.010 9 |

注: 1:4, 1:6, 1:8 和 1:12 充填体单轴抗压强度分别为 3.92, 1.71, 1.07 和 0.81 MPa。

胶结充填体单轴压缩损伤本构方程可以扩展到三维情况, 但必须把应变换成由下式^[15]定义的等效应变 $\tilde{\varepsilon}$, 即

$$\tilde{\varepsilon} = [< \varepsilon_1 >^2 + < \varepsilon_2 >^2 + < \varepsilon_3 >^2]^{1/2} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 均为主应变。

根据式(4), 当侧向加围压, 其约束变形为充填体单轴抗压峰值应变的 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 时, 充填体侧压和峰值比能计算结果可由表 2 给出。

从表 2 可以看出, 随着围压增高, 充填体峰值比能增大, 当围压加至单轴抗压强度的 80% 时, 与单轴压缩相比, 充填体破坏的峰值比能均增加 2 倍以上。

3 岩体开挖三维能量释放规律

矿床开采前岩体中存在地应力, 且处于三维应力状态; 矿石开采后, 岩体中积聚的能量将释放。设开挖前, 围岩处于弹性状态, 岩体中蓄积能量可用下式^[16]计算:

$$U_r = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)] \quad (5)$$

式中： μ 为岩体泊松比； σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为原岩应力的最大主应力、中间应力和最小主应力。

从式(5)可得出，岩体弹性模量越高，泊松比越小，岩体内蓄积能量越低。如果不考虑构造应力，原岩应力按自重应力计算，根据式(5)，有

$$U_r = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \gamma_i H_i\right)^2}{2E} \left(1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu}\right) \quad (6)$$

式中： γ_i 为上覆第 i 层岩体容重， H_i 为上覆第 i 层岩体厚度， n 为上覆岩层的层数。

取岩体弹性模量分别为 5 800 和 9 800 MPa，泊松比 $\mu = 0.28$ ，岩体重度 $\gamma = 28 \text{ kN/m}^3$ ，采用式(6)计算，岩体内蓄积能量随开采深度关系曲线如图 1 所示。

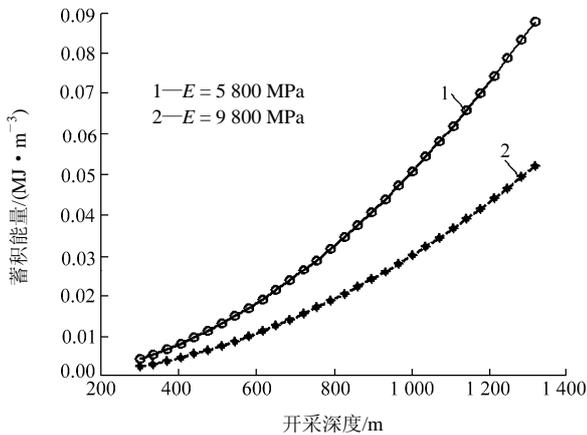


图 1 不同开采深度岩体内蓄积能量

Fig.1 Cumulative energy of rock mass in different depths

从图 1 可以看出，岩体埋藏越深，岩体内蓄积能量越高，开挖后释放能量越多。

4 充填体与岩体的能量匹配研究

4.1 充填体与岩体的能量匹配关系

岩体开挖以前处于三维地应力状态，岩体内蓄积能量可采用式(5)或(6)计算。充填采矿过程中，充填体至少一侧暴露，故考虑充填体受二维应力作用，且充填体在第二维所受的应力为 $\lambda'\sigma$ (λ' 为充填体侧压系数)，根据式(3)，(4)，充填体在二维应力作用下损伤破坏比能为

$$U_p = \frac{1}{2} E \varepsilon_p^2 (1 + \lambda'^2) - \frac{EA}{\beta + 2} \left(\varepsilon_p \sqrt{1 + \lambda'^2}\right)^{\beta + 2} \quad (7)$$

从岩体内蓄积能量与充填体峰值变形能近于相近的原则考虑充填体与岩体的匹配，设充填体变形损伤破坏比能 U_p 与岩体内蓄积比能 U_r 之比为充填体与岩体的匹配系数 K ，根据式(5)和式(7)，有

$$K = \frac{U_p}{U_r} = \frac{\frac{1}{2} E \varepsilon_p^2 (1 + \lambda'^2) - \frac{EA}{\beta + 2} \left(\varepsilon_p \sqrt{1 + \lambda'^2}\right)^{\beta + 2}}{\frac{1}{2E_0} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)]} \quad (8)$$

从式(8)可以看出，匹配系数 K 与岩体初始地应力(三维原岩应力)、岩体弹性模量、岩体泊松比、充填体弹性模量及充填体损伤参数相关。为了探索其规律，设定一组岩体地应力和岩体弹性模量参数，分别用不同配比充填体力学参数计算 K 值。岩体泊松比取 0.2，配比 1:4，1:8，1:10 和 1:12 充填体的侧压系数试验结果分别为 0.18，0.20，0.21 及 0.22，不同力学参数 K 值计算结果如表 3 所示。

表 3 计算结果表明：当 $K \geq 1.0$ 时，充填体破坏

表 3 不同力学参数 K 值计算结果

Table 3 Calculating results of K with different mechanical parameters

| 岩体参数/MPa | | | | 不同配比充填体 K 值 | | | | 不同配比充填体是否发生能量失稳 | | | |
|----------|------------|------------|------------|---------------|------|------|------|-----------------|-----|------|------|
| E_0 | σ_1 | σ_2 | σ_3 | 1:4 | 1:8 | 1:10 | 1:12 | 1:4 | 1:8 | 1:10 | 1:12 |
| 5 000 | 10 | 9 | 8 | 2.98 | 1.32 | 0.93 | 0.68 | 否 | 否 | 是 | 是 |
| 30 000 | 10 | 9 | 8 | 17.80 | 7.94 | 5.59 | 4.09 | 否 | 否 | 否 | 否 |
| 30 000 | 20 | 18 | 18 | 4.19 | 1.87 | 1.31 | 0.96 | 否 | 否 | 否 | 是 |
| 50 000 | 20 | 18 | 18 | 7.00 | 3.11 | 2.19 | 1.60 | 否 | 否 | 否 | 否 |

能量高于或等于岩体释放的能量, 充填体不会发生能量失稳; 当 $K < 1.0$ 时, 充填体破坏的能量小于岩体释放能量, 与岩体不匹配。同时从表 3 可看出, 岩体的弹性模量 E_0 越小, 开挖后释放的能量越高, 必须用抗压强度较高的充填体与之相配; 岩体内地应力越高, 蓄积能量越多, 必须用较高配比的充填体与之匹配。 K 值含义与安全系数相同, K 的合理取值可参考岩石力学的安全系数。

根据不同配比充填体力学试验结果(见表 1), 设 $U_p = \omega$, 采用式(7)进行计算, 配比 1:4, 1:8, 1:10 和 1:12 充填体峰值比能计算结果如表 4 所示。

表 4 不同配比充填体 ω 值计算结果

Table 4 Calculation results ω of backfill with different ratios

| 充填体配比 | 抗压强度 σ_c /MPa | 峰值比能 ω /(MJ · m ⁻³) |
|-------|----------------------|--|
| 1:4 | 3.92 | 0.044 0 |
| 1:8 | 1.71 | 0.019 6 |
| 1:10 | 1.07 | 0.013 8 |
| 1:12 | 0.81 | 0.010 1 |

对 ω 与充填体抗压强度 σ_c (单位为 MPa) 进行回归分析, 回归方程如下:

$$\omega = 10^{0.192 2\sigma_c - 2.091 5} \quad (9)$$

式(9)经回归检验, 其回归方程相关系数为 0.922 1, 可满足工程精度要求。

根据式(8), (9), 可得充填体抗压强度设计公式为

$$\sigma_c = 10.882 0 + 5.202 9 \lg K \cdot$$

$$\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)}{2E_0} \quad (10)$$

如果不考虑构造应力, 原岩应力按自重应力计算, 根据式(6), (8)和(9), 充填体抗压强度设计公式为

$$\sigma_c = 10.882 0 + 5.202 9 \lg K \left(\frac{\sum \gamma_i H_i}{2E_0} \right)^2 \left(1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu} \right) \quad (11)$$

设岩体弹性模量分别为 4 800 和 7 800 MPa, 泊松比 $\mu = 0.28$, 岩体重度 $\gamma = 28 \text{ kN/m}^3$, 采用式(11)进行计算, 所要求的充填体抗压强度随开采深度的关系曲线如图 2 所示。

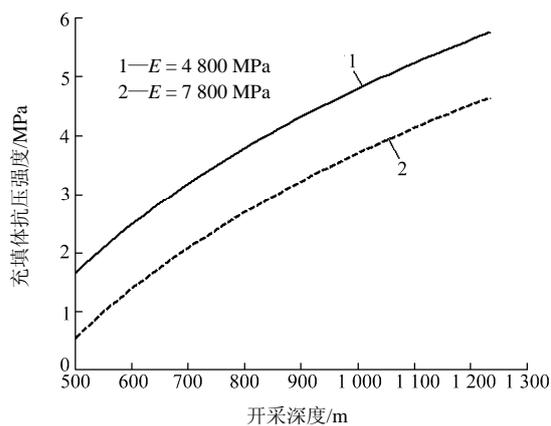


图 2 不同开采深度所要求的充填体抗压强度
Fig.2 Required compression strength of backfill for different mining depths

从图 2 可以看出, 岩体埋藏越深或弹性模量越低, 矿床开采所要求的充填体抗压强度越高。

4.2 工程实例分析

安庆铜矿矿体最大埋深约 600 m, 采用高阶段充填采矿法, 经岩石力学试验, 深部原岩应力分别为: $\sigma_1 = 14.28 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 12.53 \text{ MPa}$, $\sigma_3 = 11.71 \text{ MPa}$, 岩体弹性模量 $E_0 = 3.04 \times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.21$, 根据国内外矿床开采经验, 设计最小充填体配比为 1:12。采用式(5)计算, 岩体内蓄积能量为 4.95 kJ/m^3 。根据表(4)计算结果, 配比 1:12 充填体峰值比能为 10.1 kJ/m^3 。采用式(8)计算, 充填体与岩体的匹配系数 $K = 2.04 > 1.00$ 。因此采用最小充填配比为 1:12 的充填体在采矿过程中不会发生能量失稳, 是可行的。

5 结 论

- (1) 不同配比充填体三维损伤破坏的耗能规律研究表明, 充填体配比越低, 破坏的峰值比能越小, 围压越高, 充填体峰值比能越大。当围压加至单轴抗压强度的 80% 时, 与单轴压缩相比, 充填体破坏的峰值比能增加 2 倍以上。
- (2) 对岩体开挖的三维能量耗损规律研究显示, 岩体埋藏越深, 岩体内蓄积能量越高, 开挖后释放的能量越多; 岩体弹性模量越大, 泊松比越低, 开挖后释放的能量越低。
- (3) 充填体与岩体的匹配系数与岩体三维原岩应力、岩体弹性模量、岩体泊松比、充填体弹性模量及充填体损伤参数相关。岩体埋藏越深, 岩体弹

性模量越低,矿体越松软破碎,矿床开挖释放的能量越高,必须采用高抗压强度的充填体才能实现与岩体匹配。

(4) 采用充填体与岩体匹配模型验证了安庆铜矿采用最低配比 1:12 的充填体开采矿石是可行的,得出了矿床开采充填体合理抗压强度设计公式,为安全低成本开采矿石资源提供了理论依据。

充填体与岩体的匹配是以充填体充满采空区为前提和条件,针对复杂条件下的匹配理论及其匹配系数 K 值的合理取值范围作者将在今后进一步深化研究。

参考文献(References):

- [1] MCHAINA D M, JANUSZEWSKI S, HALLAM R L. Development of an environmental impact and mitigation assessment program for a tailings storage facility stability upgrade[J]. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 2001, 15(2): 123 - 140.
- [2] HASSANI F P, MORTAZAVI A, SHABANI M. An investigation of mechanisms involved in backfill-rock mass behaviour in narrow vein mining[J]. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 2008, 108(8): 463 - 472.
- [3] HELINSKI M, FAHEY M, FOURIE A. Numerical modeling of cemented mine backfill deposition[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(10): 1 308 - 1 319.
- [4] RANKINE R, PACHECO M, SIVAKUGAN N. Underground mining with backfills[J]. *Soils and Rocks*, 2007, 30(2): 93 - 101.
- [5] 刘同友. 充填采矿技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001. (LIU Tongyou. *Technology of backfill mining and its application*[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 2001.(in Chinese))
- [6] JOHNSON R A, YORK G. Backfill alternatives for regional support in ultra-depth South African gold mines[C]// *Proceedings of Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series*. [S. l.]: [s. n.], 1998: 239 - 244.
- [7] FALL M, BENZAAZOUA M, SAA E G. Mix proportioning of underground cemented tailings backfill[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(1): 80 - 90.
- [8] FALL M, BENZAAZOUA M. Modeling the effect of sulphate on strength development of paste backfill and binder mixture optimization[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(2): 301 - 314.
- [9] 刘志祥, 李夕兵. 尾砂分形级配与胶结强度的知识库研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(10): 1 789 - 1 793. (LIU Zhixiang, LI Xibing. Study of fractal gradation of tailings and knowledge bank of its cementing strength[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(10): 1 789 - 1 793.(in Chinese))
- [10] BERNDT C C, RANKINE K J, SIVAKUGAN N. Materials properties of barricade bricks for mining applications[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2007, 25(4): 449 - 471.
- [11] MITRI H S. Assessment of horizontal pillar burst in deep hard rock mines[J]. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 2007, 7(5): 695 - 707.
- [12] BELEM T, BENZAAZOUA M. Design and application of underground mine paste backfill technology[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2008, 26(2): 147 - 174.
- [13] 刘志祥, 李夕兵, 戴塔根. 尾砂胶结充填体损伤模型及与岩体的匹配分析[J]. *岩土力学*, 2006, 27(9): 1 442 - 1 446. (LIU Zhixiang, LI Xibing, DAI Tagen. On damage model of cemented tailings backfill and its match with rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(9): 1 442 - 1 446.(in Chinese))
- [14] MAZARS J. A description of macro-scale damage of concreted structures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1986, 25(5/6): 729 - 737.
- [15] 于晓中, 譙常忻, 周群力. 岩石和混凝土断裂力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991. (YU Xiaozhong, QIAO Changxin, ZHOU Qunli. *Fracture mechanics of rock and concrete*[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1991.(in Chinese))
- [16] 周维垣, 杨强. 岩石力学数值计算方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005. (ZHOU Weiyuan, YANG Qiang. *Numerical calculation method of rock mechanics*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.(in Chinese))