



窄长型充填体的拱架效应及其 对目标强度的影响

吴爱祥¹, 沈慧明¹, 姜立春², 焦华喆³, 王贻明¹

(1. 北京科技大学 金属矿山安全高效开采教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510641;

3. 河南理工大学 土木工程学院, 焦作 454000)

摘要: 利用 Belem 模型计算拱架效应对于充填体垂直应力的转化率, 分析充填体 3 种应力状态下的目标强度(支撑围岩、侧向暴露自立、支撑设备), 对比拱架效应引入前后充填体垂直应力降低比率。结果表明: 谦比希铜矿窄长形充填体自重应力为 0.4 MPa, 拱架效应转化后, 充填体所受垂直应力仅为 0.055 MPa, 转化率达到 86.25%, 最大主应力为充填体宽度方向上的水平应力 0.289 MPa; 支撑围岩与设备要求强度 1 MPa, 自立要求强度 0.2 MPa。窄长型充填体的目标强度设计应考虑拱架效应对于垂直应力的转化, 从而降低相关技术经济指标。

关键词: 膏体充填; 拱架效应; 窄长型; 充填体强度; 应力转化

中图分类号: TD816

文献标志码: A

充填体强度是膏体充填系统设计的基础与核心。由于膏体充填在安全、环保方面的巨大优势, 在国内外得到了长足的发展^[1-2]。但是, 由于膏体充填直接成本较高, 在短期经济性优势不足, 造成部分矿山望“膏”兴叹^[3-4]。中色集团谦比希铜矿是我国海外资源战略的排头兵^[5]。为了适应海外安全环保政策要求, 提升高品位矿体的回收率, 该矿建设了全尾砂膏体胶结充填系统。但是由于赞比亚工业较落后, 不仅水泥供应量不足而且价格较高, 标号与 32.5R 对应的散装水泥约 250 美元/每吨, 对充填系统的稳定运行影响较大, 降低水泥用量成为了亟待解决的问题。

充填体强度应考虑两方面的影响, 充填体作为自立性人工矿柱和采场支护结构物。充填体目标强度计算方法最早是由土力学发展而来的 TERZAGHI 法, 该方法认为充填材料的强度特性与固结土的特性的相似性^[6]; BELEM 模型法和 THOMAS 模型法开始讨论充填体内部的应力分布, 并提出内部拱架效应对充填体强度的影响, 但主要是针对设计充填采场底部的挡墙问题提出的, 具有一定的局限性^[7]; MITCHELL 模型法认为膏体充填体的强度主要来源于胶凝材料的胶结作用, 而对于充填体与矿壁间的摩擦力在较长的时

间范围内可视为可以忽略不记其影响^[8]; LI^[9]针对充填体暴露条件、排水条件下的受力情况进行分析, 并提出了新的目标强度计算方法; YILMAZ 等^[10]分析养护条件对充填体强度的影响; YI 等^[11]尝试在井下充填材料中加入纤维材料以提高强度, 降低成本; 蔡嗣经^[12]通过对国内外 31 个矿山充填体强度设计值与充填高度统计, 提出了一种半立方抛物线强度设计的经验公式。综上所述, 充填体强度设计方法已经有长足的发展, 但是对于矿脉开采产生的窄长形充填体对强度要求的特殊性, 目前研究较少。

窄长型采场指采场长度与采场宽度之比(长宽比)大于 5 的分层法或嗣后充填法采场, 其充填体呈长条形或长板形, 一般见于倾斜急倾斜薄矿体或矿脉的开采过程中。该类型充填体的应力分布表现为更易成拱。即在充填体宽度方向上与围岩易形成拱架效应, 产生结构(拱架)内力, 作用在充填体上的部分垂直应力转化为水平应力, 使得有效自重减小, 在相同强度下提高对围岩的支撑作用。

本文作者针对谦比希铜矿充填体几何特征, 引入 Belem 理论研究拱架效应对于垂直应力的转化程度, 建立各开采时段的充填体力学模型, 分析在侧向暴露

自立、支撑围岩、支撑人员设备等空间条件下的受力模式,提出窄长型充填体目标强度选择方法,并开展室内实验和现场实验进行验证。

1 采矿方法与充填体受力分析

1.1 回采与充填方法

该矿西矿体埋深 50~500 m,走向长约 2000 m,水平厚度平均 15 m,倾角 25°~45°,含铜品位 2.16%。采用上向水平分层充填法开采,生产能力 3000 t/d。分段高度 16 m,分层高度 4 m,采场沿走向布置,长度 60 m,宽度 6 m,2 个采场组成一个盘区。采场采用锚杆临时支护,凿岩台车凿岩、铲运机出矿^[13]。

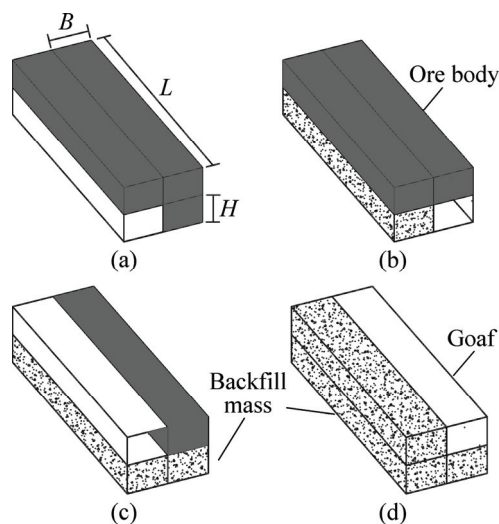


图1 回采与充填步骤

Fig. 1 Procedure of mining and backfill (B —Stope width; L —Stope length; H —Layer height): (a) First stope of 1st layer; (b) Second stope of 1st layer; (c) First stope of 2nd layer; (d) Second stope of 2nd layer

开采及充填步骤如图 1 所示,空区采用膏体充填。第一分层一步骤回采完毕后,利用膏体充填充满空区。膏体凝固达到一定强度后,开采相邻采场,并用膏体进行充填。

由图 1 所示,该充填体属于窄长型充填体:宽度为 6 m,长宽比为 5~10,长高比为 3.75~15。

原充填料浆浓度为 73%,充填采场的不同位置对充填料的要求有所不同,一步骤充填灰砂比为 1:8;二步骤充填为 1:16。上部胶面层灰砂比为 1:4,浇面厚度约 50 cm,充填方式如图 2 所示。

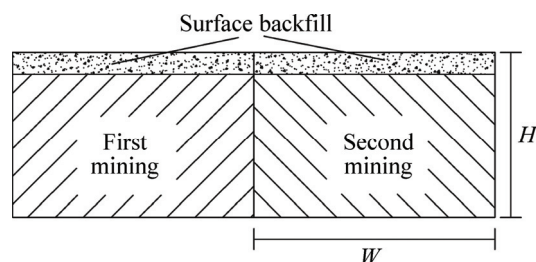


图2 采场充填方法

Fig. 2 Backfill method

全尾砂密度为 2.67 t/m³,其中粒度小于 74 μm 颗粒为 70.85%,粒度小于 37 μm 颗粒为 46.98%,粒度较细。水泥密度为 3.1 t/m³,水泥松散密度为 1.1 t/m³。

1.2 充填体在各阶段的作用

如图 1 所示,窄长形充填体在各步骤中的作用如下:

- 1) 一步骤充填后,充填体承受上部围岩压力,支撑围岩;
- 2) 二步骤回采时,一次充填体支撑上部围岩,但侧面揭露,存在侧向失稳风险;
- 3) 第二分层一步骤回采时,下分层充填体作为工作平台,支撑人员设备运行;
- 4) 第二分层二步骤回采时,充填体受力与一分层二步骤回采受力基本相同。

综上所述,应从以下 3 个方面开展充填体的受力分析与强度设计工作:

- 1) 支撑上部围岩;
- 2) 侧向暴露时自立;
- 3) 支撑设备人员。

2 拱架效应与充填体抗压强度

2.1 拱架效应

在充填体强度设计过程中,自重应力是主要的考虑内容。该方法要求充填体底部物料的单轴抗压强度要等于其上部充填体产生的自重。但是实际上,通过表面摩擦效应和拱架效应的双重作用,围岩对充填体产生一定的支撑作用。因此,充填体和围岩是相互支撑的^[14]。

尤其是对于窄长型充填体,由于摩擦力的存在,极易在充填体内部形成拱形结构,将一部分垂直应力转化为了水平应力 σ_h (Pa),使得在充填体底部产生的

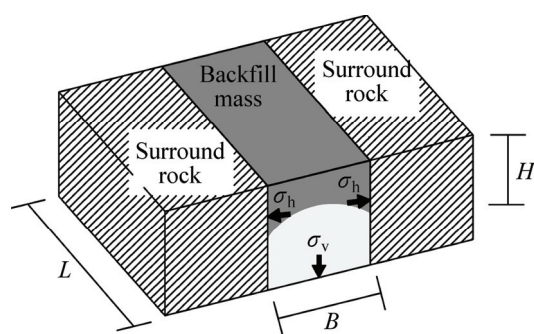


图3 窄长型充填体拱架效应示意图

Fig. 3 Schematic diagram of arching effects in narrowly exposed fill face

垂直应力小于其自身质量,称为拱架效应,如图3所示。其力学原理为

$$\sigma_v < \gamma H = \sigma_s \quad (1)$$

式中: σ_v 为充填体垂直应力, Pa; σ_s 为充填体自重应力, Pa; γ 为充填体密度, kN/m^3 ; H 为充填体高度, m。

转化程度由充填体与围岩之间的摩擦力或粘滞力大小决定^[15]。因此,拱架效应引起的水平应力转移应引入充填体强度设计中。BELEM 等^[15]基于充填体——围岩之间的粘滞力作用和剪切滑移作用将拱架效应引入计算模型中:

$$\sigma_h = w\gamma H \left(\frac{H}{B+L} \right) \times \left[1 - \exp\left(-\frac{2H}{B}\right) \right] \quad (2)$$

$$\sigma_v = 0.185\gamma H \left(\frac{H}{B+L} \right) \times \left[1 - \exp\left(-\frac{2H}{B}\right) \right] \quad (3)$$

式中: σ_v 为垂直应力, $\sigma_v = \sigma_z$, Pa; σ_h 为水平应力, Pa; γ 为充填体密度, 本研究中为 $18 \sim 25 \text{ kN/m}^3$; H 为充填体高度, 取 16 m 分段高度; B 为充填体宽度, 取 6 m; L 为充填体走向长度, 60 m; w 为方向系数, 在水平 x 方向为 1(垂直于矿体走向 $\sigma_h = \sigma_x$), 水平 y 方向为 0.185(平行于矿体走向 $\sigma_h = \sigma_y$)。

2.2 膏体充填强度设计优化

2.2.1 充填体支撑上部围岩

充填体的支撑作用机理与原岩矿柱不同。充填体无法支撑上部围岩自重产生的压力,而是限制变形区域的位移,继而在围岩——充填体交界区域形成稳定的结构,支撑上部的围岩。垂直应力产生的原因是上部围岩向下的变形,因此,充填体强度值可由以下公式设计^[16]:

$$U_1 = (E_p \varepsilon_p) F = E_p \left(\frac{\Delta H_p}{H_p} \right) F \quad (4)$$

式中: U_1 为支撑围岩时充填体的设计强度, MPa; E_p 为围岩弹性模量, GPa; 该矿上盘长石英岩弹性模量 37 GPa, 矿体 24.4 GPa; ε_p 为围岩轴向应变, %; H_p 为上部围岩初始高度, 取分段高度 16 m; ΔH_p 为上部岩层变形量, 取 0.5 m; F 为安全系数, 由式(5)确定。

$$F = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} + \frac{2cLB}{W(H - B \tan \beta / 2)(\gamma L - \gamma H / 4) \sin(2\beta)} \quad (5)$$

式中: w 为轮胎接触宽度, m。

2.2.2 侧向暴露时自立

在矿柱回采过程中,充填体侧壁完全暴露,这就要求充填体不仅能够自立,而且能够抵抗爆破振动。

爆破过程中仅有一个暴露面时充填体的一种失稳模型^[17]如图4所示。充填体相对的两个面与围岩接触,由于粘滞力和摩擦力的作用,充填体与围岩产生剪切阻力^[18],如图5所示。

此时,充填体强度由式(6)确定:

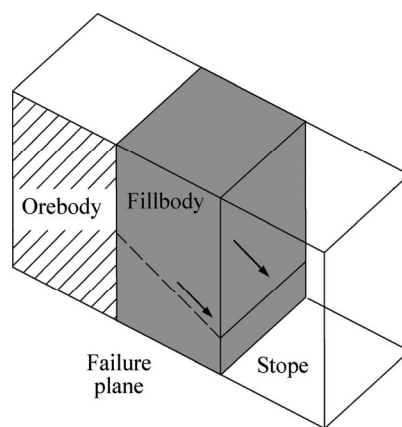


图4 相邻采场开采时充填体失稳模型

Fig. 4 Fill mass failure mechanism during secondary stope extraction

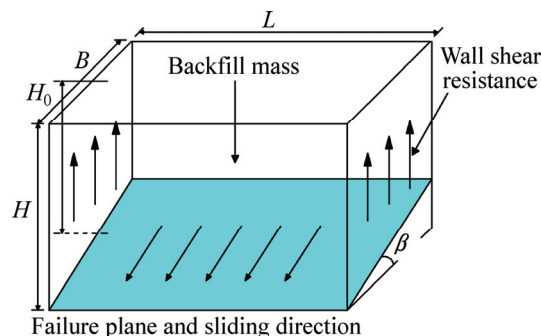


图5 侧向滑移失稳力学分析

Fig. 5 Analysis of backfill mass sliding failure

$$U_2 = \frac{(\gamma L - 2c)}{L} \left[H - \frac{B}{2} \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \times \sin \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) F \quad (6)$$

式中: U_2 为支撑围岩时充填体的设计强度, MPa。

2.2.3 支撑设备人员

在上向进路分层充填法循环过程中, 下分层充填体往往作为上分层回采作业时的工作平台, 如图 6 所示。基于太沙基模型计算其表面支撑力 Q_f (kPa) 为满足设备运行, 充填体表面承压 Q_f 需满足^[17]:

$$Q_f = 0.4\gamma W N_\gamma + 1.2c N_c \quad (7)$$

式中的 N_γ 及 N_c 均为承载因子, 由式(8)和(9)确定:

$$N_\gamma = 1.8(N_q - 1)\varphi \quad (8)$$

$$N_c = \frac{(N_q - 1)}{\tan \varphi} \quad (9)$$

$$N_q = \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \exp \pi \tan \varphi \quad (10)$$

式中: N_γ 为重力承压能力系数; N_c 为粘滞力承压能力系数; c 为充填体内聚力, kPa; W 为轮胎接触宽度, m, 取 0.15 m。

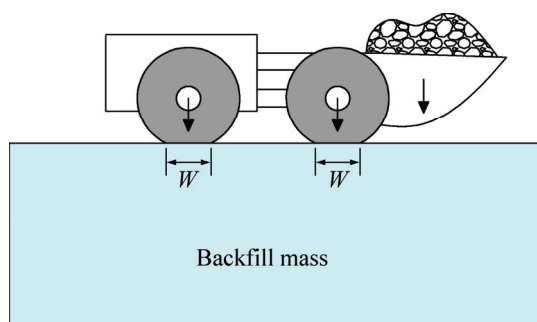


图 6 充填体作为设备工作平台示意

Fig. 6 Schematic diagram of working platform for equipment

2.3 谦比希铜矿充填体强度设计

根据 2.1 节中所述工程背景, 将围岩与充填体参数代入式(2)~(10)中, 计算不同情况下所需要的充填体强度。当全尾砂—水泥膏体配比不同时, 充填体的力学参数在一定范围内波动。为了计算最易失稳情况, 围岩弹性模量(37 GPa)、充填体的密度(25 kN/m³)和高度(16 m)取最大值, 此时其垂直方向应力最大; 充填体内聚力(100 kPa)和内摩擦角(10°)取最小值, 此时充填体强度设计值最大。

计算结果如表 1 所列, 分析如下:

1) 充填体自重应力为 0.4 MPa, 拱架效应将 86.25%的垂直应力转化为水平应力, 其中水平 x 方向

为最大主应力方向(0.289 MPa), 垂直应力仅剩余 0.055 MPa, 仅为自重应力的 13.75%。拱架效应的存在使得充填体所受的垂直应力大大降低;

2) 支撑围岩和设备运行两种状态对于充填体强度的要求较高, 此时强度设计值应大于 0.99 MPa; 在满足侧向暴露自立条件下对强度要求相对较低, 设计值应大于 0.175 MPa, 满足支撑围岩为满足自立要求强度的 5.6 倍。因此, 为了满足不同条件下的强度要求, 在设计时可取 1.0 MPa 和 0.2 MPa 两种值作为目标强度。

表 1 充填体强度计算结果

Table 1 Calculated results of required backfill UCS

No.	Item	Unit	Code	Results
1	Self-weight pressure	MPa	σ_s	0.4
2	Vertical pressure	MPa	σ_v	0.055
3	Horizontal pressure(x)	MPa	$\sigma_h(\sigma_x)$	0.289
4	Horizontal pressure(y)	MPa	$\sigma_h(\sigma_y)$	0.055
5	The UCS for rock supporting	MPa	U_1	0.981
6	The UCS for self-standing	MPa	U_2	0.175
7	The UCS for equipment supporting	MPa	Q_f	0.999

3 充填配比与强度实验

3.1 谦比希铜矿充填配比实验

在理论计算的基础上, 开展充填配比实验, 检测膏体塌落度与 28 d 单轴抗压强度。膏体浓度分别为 69%、71%、73%; 灰砂比为 1:4~1:20, 实验过程如图 7 所示。

图 8 所示为 R_{28} 单轴强度结果。由图 5 可看出, 在 69%~71%范围内, 灰砂比 1:4 时, R_{28} 为 1.34~2.93 MPa, 强度高于目标值; 灰砂比为 1:8, 当浓度大于 71%时, R_{28} 为 1.1~1.26 MPa, 满足 1.0 MPa 的要求; 灰砂比 1:12 时, R_{28} 为 0.46~0.81 MPa, 略高于 0.2 MPa 的目标值; 灰砂比为 1:16~1:20 时, 0.2~0.38 MPa, 满足 0.2 MPa 的目标值。

因此, 推荐膏体配比如下: 充填浓度 71%~73%, 一、二步骤充填灰砂比 1:16, 浇面灰砂比 1:8。按图 2 中的充填方式, 与原方案相比, 推荐配比的水泥用量降低了 23%。



图 7 充填体强度实验

Fig. 7 Experiment of backfill strength: (a) Slump test and blocks preparation; (b) UCS test

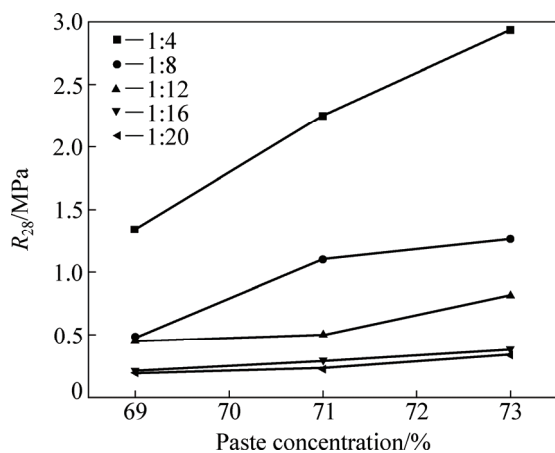
图 8 R_{28} 单轴强度结果

Fig. 8 Experimental UCS results of R_{28}

3.2 谦比希铜矿井下充填实验

在西矿体 16-2 号采场开展充填实验, 长度约为 60 m, 宽度约为 6~7 m(视围岩稳定情况), 分层高度 4 m。实际充填灰砂比约 1:12(浇面灰砂比 1:8, 其他 1:16), 充填浓度为 67%, 塌落度约为 26~28 cm, 地表养护强度为 0.2~0.3 MPa。井下凝固时间约为 30 h, 采场流平效果较好, 无明显堆积角, 48 h 之后即可支撑人员运行。采场垫渣 20 cm 厚, 可支撑铲运机运行, 如图 9 所示。

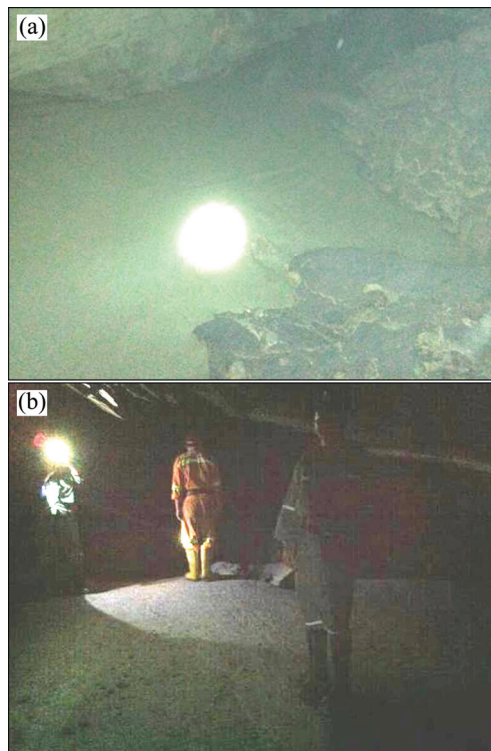


图 9 采场充填效果

Fig. 9 Mining stope backfill effects: (a) Substantially horizontal surface of backfill mass; (b) Backfill body supports staff after 48 h

4 结论

1) 窄长型充填体指长宽比大于 5 的长条形或长板型充填体, 一般见于矿脉的开采回填过程中。

2) 拱架效应将大部分垂直应力转化为水平应力, 转化率达到 86.25%; 实例中充填体自重应力 0.4 MPa, 经验算后的垂直应力仅为 0.055 MPa。

3) 拱架效应引入后的最大主应力为充填体宽度方向的水平应力, 即沿充填体最窄处易形成内力拱; 水平应力达到 $\sigma_h = \sigma_x = 0.289$ MPa。

4) 充填体 3 项作用中, 满足支撑围岩和设备运行的充填体强度为满足充填体侧向暴露自立强度的 5.6 倍。

5) 经实验验证, 理论计算的膏体配比可满足井下生产, 水泥用量比原设计降低了 23%。

REFERENCES

- [1] 王新民, 赵建文, 张德明. 全尾砂絮凝沉降速度优化预测模型[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(3): 793-798.

- WANG Xin-min, ZHAO Jian-wen, ZHANG De-ming. Optimal prediction model of flocculating sedimentation velocity of unclassified tailings[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(3): 793–798.
- [2] 张修香, 乔登攀. 粗骨料高浓度充填料浆的管道输送模拟及试验[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(1): 258–266.
- ZHANG Xiu-xiang, QIAO Deng-pan. Simulation and experiment of pipeline transportation of high density filling slurry with coarse aggregates[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(1): 258–266.
- [3] 杨建, 王新民, 张钦礼, 柯愈贤. 含硫高黏性三相流态充填浆体管道输送性能[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(4): 1049–1055.
- YANG Jian, WANG Xin-min, ZHANG Qin-li, KE Yu-xian. Pipeline transportation properties of high viscosity sulfur-content filling slurry in three-phase flow[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(4): 1049–1055.
- [4] 李公成, 王洪江, 吴爱祥, 于少峰, 陈辉, 王晓宁. 基于倾斜管实验的膏体自流输送规律[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(12): 3162–3168.
- LI Gong-cheng, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, YU Shao-feng, CHEN Hui, WANG Xiao-ning. Gravity transport law of paste based on inclined pipe experiment[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(12): 3162–3168.
- [5] 杨清平, 滕丙娟, 胡文达, 刘晓辉, 王贻明, 姚高辉. 谦比西铜矿西矿体采场结构参数优化[J]. *金属矿山*, 2012, 41(5): 1–4.
- YANG Qing-ping, TENG Bing-juan, HU Wen-da, LIU Xiao-hui, WANG Yi-ming, YAO Gao-hui. Stope structure parameters optimization of west orebody in Chambishi copper mine[J]. *Metal Mine*, 2012, 41(5): 1–4.
- [6] GUO Guang-li, ZHU Xiao-jun, ZHA Jian-feng, QIANG Wang. Subsidence prediction method based on equivalent mining height theory for solid backfilling mining[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(10): 3302–3308.
- [7] BELEM T, BENZAAZOUA M. Design and application of underground mine paste backfill technology[J]. *Geotech Geol Eng*, 2008, 26 (2): 147–175.
- [8] LIU Zhi-xiang, LAN Ming, XIAO Si-you, GUO Hu-qiang. Damage failure of cemented backfill and its reasonable match with rock mass[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(3): 954–959.
- [9] LI Li. A new concept of backfill design—Application of wick drains in backfilled stopes[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, 23(5): 763–770.
- [10] YLMAZ E, BELEM T, BENZAAZOUA M. Specimen size effect on strength behavior of cemented paste backfills subjected to different placement conditions[J]. *Engineering Geology*, 2015, 185: 52–62.
- [11] YI X W, MA G W, FOURIE A. Compressive behaviour of fibre-reinforced cemented paste backfill[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(3): 207–215.
- [12] 蔡嗣经. 矿山充填力学基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- CAI Si-jing. *Mechanics foundation of mine backfill*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [13] 郭雄, 乔伟, 罗骋. 盘区上向水平分层充填法在谦比西铜矿的应用[J]. *采矿技术*, 2011(2): 11–12.
- GUO Xiong, QIAO Wei, LUO Cheng. The application of uphand cut and fill method in chambishi copper mine[J]. *Mining Technology*, 2011(2): 11–12.
- [14] LI Li, AUBERTIN M. A modified solution to assess the required strength of exposed backfill in mine stopes[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(8): 994–1002.
- [15] BELEM T, HARVEY A, SIMON R, AUBERTIN M. Measurement and prediction of internal stresses in an underground opening during its filling with cemented fill[M]. London: Tayler & Francis Group, 2004: 619–630.
- [16] DONOVAN J G. The effects of backfilling on ground control and recovery in thin-seam coal mining[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999: 148–152.
- [17] POKHAREL M, FALL M. Combined influence of sulphate and temperature on the saturated hydraulic conductivity of hardened cemented paste backfill[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 38: 21–28.
- [18] LI Li, AUBERTIN M. Numerical investigation of the stress state in inclined backfilled stopes[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2009, 9(2): 52–62.

Arching effect of long-narrow cemented paste backfill body and its effect on target strength

WU Ai-xiang¹, SHEN Hui-ming¹, JIANG Li-chun², JIAO Hua-zhe³, WANG Yi-ming¹

(1. State Key Laboratory of China for High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Civil and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, 510641, China;

3. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The vertical stress transformation by arching effect was calculated by Belem model, the vertical stress reduction ratio was compared before and after the introduction of arch, which from the analysis of three kinds of forces (surrounding rock supporting, self-standing with one face exposed, equipment supporting). The results show that, the self-weight pressure of long-narrow backfill body in Chambishi Copper Mine is 0.4 MPa, after the arching effect transporting, the remained vertical pressure is 0.055 MPa, which means almost 86.25% self-weight press is diverted to the horizontal pressure. The maximum principal stress is 0.289 MPa with the direction of horizontal along the width of backfill body. The required UCS the surrounding rock and equipment supporting is 1 MPa, for self-standing with one face exposed is 0.2 MPa. The target strength design of long-narrow backfill body should consider the arching effect on transformation of the vertical stress, so as to reduce the related technical and economic index.

Key words: cemented paste backfill; arching effects; long narrow shape; backfill body strength; stress transformation

Foundation item: Project (51574013, 51374034) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2015-04-09; **Accepted date:** 2015-09-09

Corresponding author: JIANG Li-chun; Tel: +86-20-87111039; E-mail: ginger@scut.edu.cn

(编辑 王 超)