doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.09.022

双暴露面的阶段充填体孤柱需求强度模型及影响因素

杨 磊[1,2], 邱景平[1], 孙晓刚[1], 邢 军[1]
(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 皇家墨尔本理工大学 工程学院, 墨尔本 3000)

摘 要: 阶段充填体孤柱侧壁均暴露、处于双轴受力状态,易发生剪切破坏. 为合理确定其所需强度值,根据 Terzaghi 松散地压理论和滑楔体极限平衡理论,建立了孤柱需求强度数学计算模型,分析了需求强度的影响因素. 结果表明:阶段充填体孤柱需求强度值与采场埋深和结构参数呈正相关,与充填体内摩擦角、充填体-围岩接触面摩擦系数和摩擦角呈负相关. 该研究成果对指导矿山充填配比设计、防止地表塌陷和环境保护等具有现实意义.

关 键 词: 阶段空场嗣后充填采矿法;充填体矿柱;需求强度;数学模型;滑楔体模型
中图分类号: TU 863 **文献标志码**: A **文章编号**: 1005-3026(2018)09-1327-05

Required Strength Model and Influence Factors of Stage Backfill-Pillar with Double Exposed Faces

YANG Lei[1,2], *QIU Jing-ping*[1], *SUN Xiao-gang*[1], *XING Jun*[1]
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Engineering, RMIT University, Melbourne 3000, Australia. Corresponding author: QIU Jing-ping, E-mail: qiujingping@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Stage backfill-pillar with double exposed faces subjected to biaxial loads is prone to shear failure. In order to determine the required strength of backfill reasonably, Terzaghi theory on loosing earth pressure and limit equilibrium theory of sliding wedge were used to build a required strength model of stage backfill-pillar. Influencing factors for the required strength of stage backfill-pillar were analysed. The results show that stope depth and structure parameters have a positive effect on the required strength of stage backfill-pillar, while internal friction angle of backfill, and the coefficient of friction and angle between backfill and surrounding rock have a negative effect on it. The results are of great practical significance in guiding backfilling ratio, preventing ground subsidence and protecting the environment.

Key words: stage subsequent filling mining; backfill-pillar; required strength; mathematical model; wedge model

随着浅部资源的逐渐枯竭,大多数矿山面临着深部开采的岩爆、高温、大变形等技术难题. 胶结充填采矿法在控制岩爆、保证采场人员设备安全、减缓地表沉降和缓解生态环境压力等方面具有显著作用,正逐渐成为深部开采矿山的首选采矿方法[1-3]. 阶段空场嗣后充填采矿法作为充填采矿技术中重要组成部分,具有采充效率高、资源回采强度大等优点,被广泛应用于倾斜或急倾斜厚大矿体的开采[4]. 该方法盘区内矿房回采顺序主要为隔一采一,多个采场同时作业. 二步采矿房回采结束后,盘区中央处的阶段胶结充填体矿柱易出现侧壁均暴露情况,上下表面分别于顶底板接触,两帮与上下盘围岩交接,处于双轴受力状态,形成阶段充填体孤柱. 与只具有单个暴露面的阶段充填体矿柱相比,孤柱更容易发生剪切破坏,所需强度值也更高. 因此,研究阶段充填体孤柱所

收稿日期: 2017-08-26
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774066); 国家重点研发计划项目(2018YFC0604604).
作者简介: 杨 磊(1993-),男,江西瑞金人,皇家墨尔本理工大学博士研究生; 邢 军(1967-),男,辽宁本溪人,东北大学教授.

需强度值对维护采场稳定性、防止顶板冒落和降低矿石损失贫化率具有重要意义.

为确定充填体目标强度,国内外学者进行了大量研究. 考虑到与固结土特性的相似性,Terzaghi[5]提出了水砂充填材料的强度模型. Mitchell 等[6]基于极限平衡理论得到了满足自立性的充填体强度公式. 蔡嗣经[7]对国内外矿山充填体高度与强度设计值统计分析,提出了半立方抛物线强度设计的经验公式. 杨宝贵等[8]建立了考虑暴露长度的高水固结充填体自立强度计算公式. 韩斌等[9]基于可靠度理论,提出了下向进路充填体强度的确定方法. Liu 等[10]、柯愈贤等[11]基于充填体本构模型,根据围岩开挖释放能量与充填体积蓄应变能相近原则,得到了考虑原岩地应力的胶结充填体强度设计公式. Li 等[12]推导了胶结充填矿柱在极限侧压状态下的三维力学强度设计模型,并针对 Mitchell 方法的不足,提出了修正 Mitchell 模型[13]和广义解析解法[14]用于充填体强度设计. 由希等[15]提出了阶段空场嗣后充填体出现临空侧时不崩解的强度设计公式. 魏晓明等[16]推导了一步采中胶结充填体极限侧压状态下的数学模型,并将其用于充填配比设计. 综上所述,充填体目标强度设计方法已取得丰硕成果,但对厚大矿体开采中阶段充填体孤柱所需强度值的研究较少.

本文根据 Terzaghi 松散地压理论和滑楔体极限平衡理论,分析了侧壁均暴露时阶段充填体孤柱的受力模式,建立了相应的目标强度数学计算模型,研究了埋深、充填采场尺寸、充填体内摩擦角、充填体与岩壁接触面特性对孤柱所需强度值的影响.

1 阶段充填体孤柱需求强度数学模型

二步采矿房回采结束后,盘区中央处阶段充填体矿柱因侧壁均临空而处于孤柱状态. 阶段充填体孤柱相对的两个面与上下盘围岩接触,在黏结力和摩擦力的作用下,与围岩产生剪切力. 孤柱受剪切力和顶板覆岩压力的共同作用,破坏方式主要表现为表面脱落和在深部产生剪切滑移面,相应的滑移失稳模型如图 1 所示.

阶段充填体矿柱在采场内扮演被动柔性支护结构,与围岩相比刚度较小,易引起岩层的相对移动,导致采场顶板移动覆岩内垂直应力呈拱形分布. 此时,可用 Terzaghi 松散地压理论计算开挖扰动后阶段充填体孤柱上表面所受顶板覆岩压力,如图 2 所示. 该理论认为,移动带高度 D_2 为移动带宽度 B_1 的 3 倍,在此高度以上的岩体不产生位移、不受矿房开挖活动的影响.

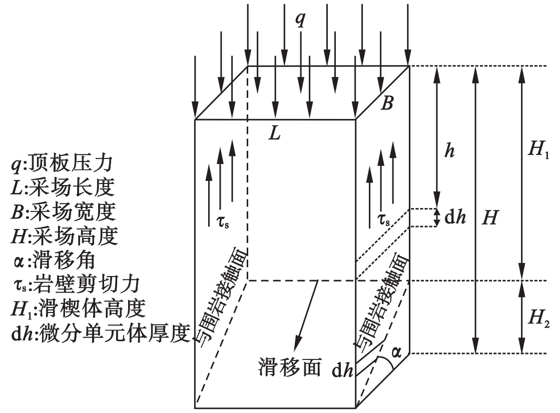

图 1 阶段充填体孤柱滑移失稳模型

Fig. 1 Destabilization model of stage backfill-pillar

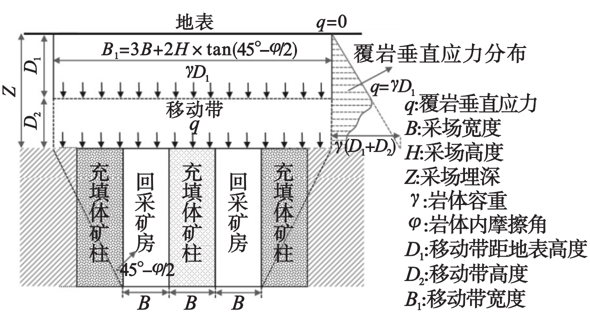

图 2 采场覆岩垂直应力随埋深变化分布

Fig. 2 Vertical stress distribution of stope roof with buried depths

当埋深 $Z(Z=D_1+D_2)$ 大于 3 倍移动带宽度 B_1 时,阶段充填体孤柱上表面所受覆岩拱压力 q 表达式为

$$q=\frac{\gamma'\times B_1}{2k\tan\varphi}\left(1-\mathrm{e}^{\frac{-2k\tan\varphi}{B_1}D_2}\right)+\gamma' D_1\mathrm{e}^{\frac{-2k\tan\varphi}{B_1}D_2}. \quad (1)$$

当埋深 $Z<3B_1$ 时,作用在阶段充填体孤柱上表面的覆岩拱压力 q 为

$$q=\frac{\gamma' B_1}{2k\tan\varphi}\left(1-\mathrm{e}^{\frac{-2k\tan\varphi}{B_1}Z}\right). \quad (2)$$

式中:q 为作用在充填采场顶板均匀分布的垂直应力,Pa;γ' 为上覆岩层容重,N/m^2;B 为矿房宽度,m;k 为岩体侧压力系数,$k=1.0\sim1.5$,一般取 1.0[5];Z 为充填体埋深,m;H 为采场高度,m;φ 为岩体内摩擦角,°;B_1 为移动带宽度,$B_1=3B+2H\times\tan(45°-\varphi/2)$,m;$D_1$ 为拱顶距地表距离,m;D_2 为拱顶距充填体上表面距离,m.

考虑到胶结充填体遵循摩尔 − 库伦破坏准则,阶段充填体孤柱与岩壁的剪切力 τ_s 为[14]

$$\tau_s=c_s+\sigma_h\tan\delta . \quad (3)$$

式中：c_s 为充填体与岩壁之间的黏结力；σ_h 为岩壁与充填体间的侧向水平应力；δ 为充填体与岩壁摩擦角，$\delta \leqslant \phi$，ϕ 为充填体内摩擦角.

$$c_s = r_s c \ . \tag{4}$$

式中：r_s 为比例系数，$r_s = 0 \sim 1$；c 为充填体内聚力.

岩壁与充填体间的侧向水平应力 σ_h 可表示为[17]

$$\sigma_h = \frac{\gamma L}{2\tan\delta}\left[1 - \exp\left(\frac{-2Kh\tan\delta}{L}\right)\right] + Kq \times \exp\left(\frac{-2Kh\tan\delta}{L}\right) \ . \tag{5}$$

式中：γ_c 为充填体容重；L 为采场长度；q 为作用在孤柱上表面的顶板围岩垂直压力；K 为朗肯主动侧压力系数，$K = \tan^2(45° - \frac{\phi}{2})$.

充填体与岩壁之间的的剪切力为

$$S_s = \int_0^{H_1} \tau_s B \mathrm{d}h + \int_{H_1}^{H} \tau_s \frac{H-h}{\tan\alpha} \mathrm{d}h = B\left(r_s c + \frac{\gamma L}{2}\right)\left(H - \frac{B\tan\alpha}{2}\right) - \frac{BL}{2}\left(\frac{\gamma L}{2K\tan\delta} - q\right) + \frac{L^2}{4K\tan\delta\tan\alpha}\left(\frac{\gamma L}{2K\tan\delta} - q\right)\left[\exp\left(-\frac{2K\tan\delta}{L}H_1\right) - \exp\left(-\frac{2K\tan\delta}{L}H\right)\right] . \tag{6}$$

式中：$H_1 = H - B\tan\alpha$；α 为滑移角，$\alpha = 45° + \phi/2$.

根据滑楔体极限平衡理论，在平行滑移面和垂直滑移面方向上充填体处于受力平衡状态. 此时，安全系数 FS 表达式为

$$\mathrm{FS} = \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} + \frac{2}{\sin 2\alpha}\left(\frac{p'}{c} - 2r_s \frac{H - \frac{B\tan\alpha}{2}}{L}\right)^{-1} . \tag{7}$$

所需充填体的内聚力为

$$c = p'\left[\frac{2}{(\mathrm{FS} - \tan\phi/\tan\alpha)\sin 2\alpha} + 2r_s \frac{H - \frac{B\tan\alpha}{2}}{L}\right] . \tag{8}$$

式(7)和式(8)中的 p' 为

$$p' = \frac{L}{2K\tan\delta}\left\{\gamma - \frac{1}{B\tan\alpha}\left(\frac{\gamma L}{2K\tan\delta} - q\right) \times \left[\exp\left(-\frac{2K\tan\delta}{L}H_1\right) - \exp\left(-\frac{2K\tan\delta}{L}H\right)\right]\right\} . \tag{9}$$

此时，所需充填体的抗压强度值 UCS 为

$$\mathrm{UCS} = 2c\tan(45° + \phi/2) \ . \tag{10}$$

将式(1)和式(2)的顶板覆岩垂直压力 q 代入式(10)，可得阶段充填体孤柱所需抗压强度值的计算式为

$$\mathrm{UCS} = \frac{L}{K\tan\delta} \times \left\{ \gamma - \frac{1}{B\tan\alpha}\left[\frac{\gamma L}{2K\tan\delta} - \frac{\gamma' B_2}{k\tan\varphi}\left(1 - \mathrm{e}^{\frac{-k\tan\varphi}{B_2}D_2}\right) - \gamma' D_1 \mathrm{e}^{\frac{-k\tan\varphi}{B_2}D_2}\right] \times \left[\exp\left(-\frac{2K\tan\delta}{L}H_1\right) - \exp\left(-\frac{2K\tan\delta}{L}H\right)\right] \right\} \times \left[\frac{2}{(\mathrm{FS} - \tan\phi/\tan\alpha)\sin 2\alpha} + 2r_s \frac{H - \frac{B\tan\alpha}{2}}{L}\right] \times \tan(45° + \phi/2) \ . \tag{11}$$

式中，当充填体埋深小于 3 倍移动带宽度时，$D_1 = 0$，$D_2 = Z$.

2　阶段充填体孤柱需求强度影响因素研究

由式(11)可知，影响阶段充填体孤柱所需强度值的因素较多，如埋深、采场尺寸、充填体内摩擦角、充填体 - 围岩接触面特性等. 由图 3a 可知，所需充填体强度值随采场宽度的增加而增加. 对于埋深 100 m 的采场，其宽度由 10 m 增加至 30 m 时，所需充填体强度值的增长率为 36% . 当埋深 600 m 的采场宽度由 10 m 拓宽至 30 m 时，所需充填体强度值由 1. 84 MPa 增加至 2. 5 MPa. 采场埋深小于 200 m 时，采场在不同埋深下所需充填体强度差值随采场宽度的增加而逐渐增加，埋深大于 300 m 时，差值较为固定.

图 3b 为 在不同埋深时所需充填体强度值随采场高度变化的曲线. 由图可知，所需充填体强度值并非随采场高度的增加而增加. 对于埋深为 100 ~ 600 m 的采场，其高度由 50 m 增加至 90 m 时，所需充填体强度值先由 1. 57 MPa 增加至 2. 20 MPa，然后再下降至 2. 18 MPa. 这是因为随着埋深的增加，作用在充填体与岩壁间的水平应力值增加，导致与岩壁间单位面积上的摩擦力增加. 同时，充填体高度的增加使得其与矿壁和岩壁间的接触面积增加，也促进了摩擦阻力的增加. 因此，当采场埋深和高度达到一定值后，会导致所需充填体强度值减小.

由图 3c 可知：所需充填体强度值随采场长度的增加而逐渐增加，但增长趋势逐渐变缓. 采场长度由 70 m 增加至 80 m 时，不同埋深下所需充填

体强度的增长范围在 0.015 ~ 0.021 MPa. 埋深 100 m 的采场长度由 30 m 增加至 80 m 时,所需充填体强度值由 1.47 MPa 增加至 1.86 MPa. 对于埋深为 600 m 的采场,其长度由 30 m 增加至 80 m时,所需充填体强度值由 1.92 MPa 增加至 2.45 MPa.

图 3d 说明了充填体与岩壁间摩擦角(δ)对所需充填体强度值的影响,所需充填体强度值随δ的增加而减小. 这是因为δ越大,作用在充填体与岩壁接触面之间的剪切力越大,作用滑移面上的正应力和滑移力均减小. 对于埋深为 100 ~ 600 m的采场,δ由 5°起按每次 5°增加至 30°时,所需充填体强度值分别减少了 14.9% ,15.1% ,15.4% ,15.7% ,15.9% 和 16.2% . 说明埋深越大,对δ的δ变化越敏感.

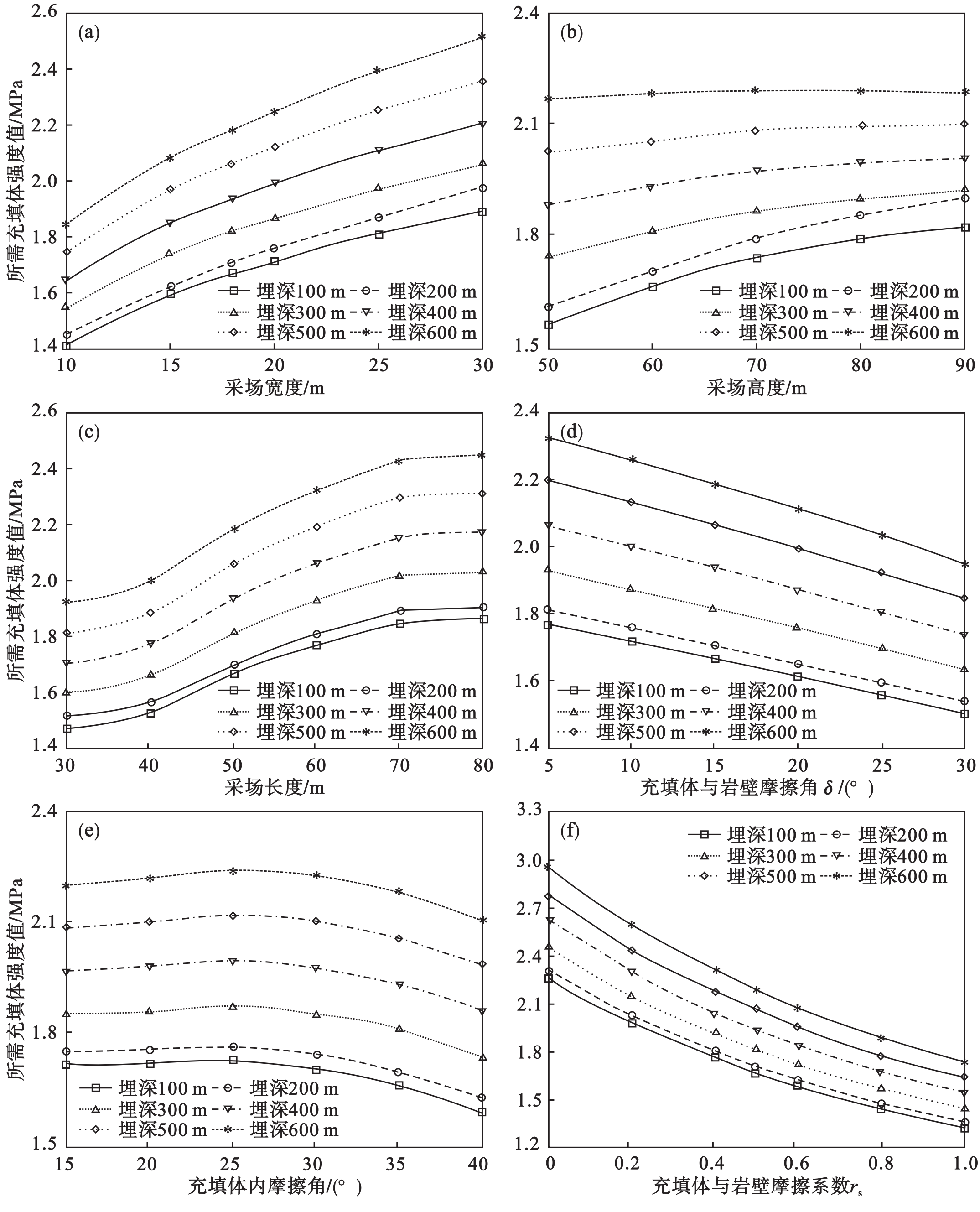

图 3 不同采场参数和自身特性下所需充填体强度值

Fig. 3 Required strengths of backfill with different structure parameters and properties

(a)—采场宽度变化; (b)—采场高度变化; (c)—采场长度变化;
(d)—充填体与岩壁接触面摩擦角变化; (e)—充填体内摩擦角变化; (f)—充填体与岩壁摩擦系数变化.

图 3e 表明,充填体内摩擦角ϕ小于 25°时,对所需充填体强度值影响不大. 当ϕ大于 25°时,ϕ越大,所需充填体强度值越小. 埋深为 100 ~ 600 m的采场,ϕ由 25°增加至 40°时,所需充填体

强度值降低率分别为 8.0%，7.7%，7.2%，6.7%，6.2% 和 5.8%. 说明埋深越小，对 ϕ 的变化越敏感. 图 3f 为所需充填体强度值随充填体与岩壁摩擦系数 r_s 变化的曲线. 由图可知，所需充填体强度值与 r_s 呈负相关. 埋深 600 m 的采场，r_s 由 0 增加至 1 时，所需充填体强度值由 2.95 MPa，减少至 1.73 MPa，降低率达 41.4%.

3　结　　论

1）阶段充填体孤柱是指在阶段空场嗣后充填采矿法中侧壁均暴露的胶结充填体矿柱. 基于 Terzaghi 松散地压理论和滑楔体极限平衡理论，建立了阶段充填体孤柱失稳模型，提出了考虑埋深、采场结构参数、充填材料自身特性和与岩壁接触特性的需求强度数学计算模型.

2）需求强度影响因素分析表明：阶段充填体孤柱需求强度与采场埋深、采场尺寸呈正相关，但当采场埋深和高度达到一定值后，会因与岩壁间的摩擦阻力增加而导致需求强度值减小；与充填体内摩擦角呈负相关，且埋深越小，对内摩擦角的变化越敏感；与充填体 - 围岩接触面摩擦系数和摩擦角呈负相关，埋深越大，对接触面特性的变化越敏感.

参考文献：

[1] Ghirian A，Fall M. Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical behaviour of cemented paste backfill in column experiments. part I：physical，hydraulic and thermal processes and characteristics［J］. *Engineering Geology*，2013，164：195 - 207.

[2] Yilmaz E，Belem T，Benzaazoua M. Effects of curing and stress conditions on hydromechanical，geotechnical and geochemical properties of cemented paste backfill［J］. *Engineering Geology*，2014，168：23 - 37.

[3] Qiu J P，Yang L，Sun X G，et al. Strength characteristics and failure mechanism of cemented super-fine unclassified tailings backfill［J］. *Minerals*，2017，7（4）：58.

[4] Yang Z，Zhai S，Gao Q，et al. Stability analysis of large-scale stope using stage subsequent filling mining method in Sijiaying iron mine［J］. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*，2015，7（1）：87 - 94.

[5] Terzaghi K V. Theoretical soil mechanics［M］. New York：John Wiley and SonsInc，1943：1 - 299.

[6] Mitchell R J，Olsen R S，Smith J D. Model studies on cemented tailings used in mine backfill［J］. *Canadian Geotechnical Journal*，2011，19（1）：14 - 28.

[7] 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. Foundations of mine backfill mechanics［M］. Beijing：Metallurgical Industry Press，2009.）

[8] 杨宝贵，孙恒虎，庄百宏. 高水固结充填体的自立［J］. 有色金属，2000，52（2）：7 - 10.
（Yang Bao-gui，Sun Heng-hu，Zhuang Bai-hong. Self-support of high water material solidifying backfill body［J］. *Nonferrous Metals*，2000，52（2）：7 - 10.）

[9] 韩斌，张升学，邓建，等. 基于可靠度理论的下向进路充填体强度确定方法［J］. 中国矿业大学学报，2006，35（3）：372 - 376.
（Han Bin，Zhang Sheng-xue，Deng Jian，et al. Determining method of backfill strength for underhand drift cut and fill stoping based on reliability theory［J］. *Journal of China University of Mining & Technology*，2006，35（3）：372 - 376.）

[10] Liu Z X，Lan M，Xiao S Y，et al. 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.

[11] 柯愈贤，王新民，张钦礼，等. 基于全尾砂充填体非线性本构模型的深井充填强度指标［J］. 东北大学学报（自然科学版），2017，38（2）：280 - 283.
（Ke Yu-xian，Wang Xin-min，Zhang Qin-li，et al. Strength determination of crude tailings backfill in deep mine based on non-linear constitutive model［J］. *Journal of Northeastern University*（*Natural Science*），2017，38（2）：280 - 283.）

[12] Li L，Aubertin M，Belem T. Formulation of a three dimensional analytical solution to evaluate stresses in back-filled vertical narrow openings［J］. *Canadian Geotechnical Journal*，2005，42（6）：1705 - 1717.

[13] Li L，Aubertin M. A modified solution to assess the required strength of exposed backfill［J］. *Canadian Geotechnical Journal*，2012，49（8）：994 - 1002.

[14] Li L. Generalized solution for mining backfill design［J］. *International Journal of Geomechanics*，2013，14（3）：04014006.

[15] 由希，任凤玉，何荣兴，等. 阶段空场嗣后充填胶结充填体抗压强度研究［J］. 采矿与安全工程学报，2017，34（1）：163 - 169.
（You Xi，Ren Feng-yu，He Rong-xing，et al. Research on compressive strength of cemented filling body in subsequent filling at the stage of open stope［J］. *Journal of Mining & Safety Engineering*，2017，34（1）：163 - 169.）

[16] 魏晓明，李长洪，张立新，等. 高阶段嗣后胶结充填体配比参数设计及工程优化［J］. 采矿与安全工程学报，2017，34（3）：580 - 586，593.
（Wei Xiao-ming，Li Chang-hong，Zhang Li-xin，et al. The ratio parameter design and engineering optimization of high stage delayed cemented backfill［J］. *Journal of Mining & Safety Engineering*，2017，34（3）：580 - 586，593.）

[17] Li L，Aubertin M. A three-dimensional analysis of the total and effective stresses in submerged backfilled stopes［J］. *Geotechnical & Geological Engineering*，2009，27（4）：559 - 569.