

上向进路充填采矿法不同接顶率 充填体的稳定性

王新民, 朱阳亚, 姜志良, 刘奇, 万孝衡

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 基于充填料浆采场流动规律和分级尾砂充填进路终态,研究了上向进路充填采矿法不同接顶率充填体的稳定性。将充填料浆采场流动分为不受限沉积扩散和受限向上堆积两个过程,结合充填料浆采场充填终态,从50%充填接顶率开始,按5%递增梯度构建不同充填接顶率的充填体三维模型,运用MIDAS/GTS有限元软件模拟分析不同接顶率充填体受力状况,提出了考虑抗拉、抗压安全系数和拉应力、压应力集中区域体积的综合安全系数方法,用于评价充填体的稳定性。以某矿山为例的评价结果表明,对于二步进路采场开采,一步进路采场充填体的接顶率和综合安全系数越大,其稳定性越高;当接顶率不足75%时,抗拉、抗压安全系数大于1,综合安全系数小于1,充填体有失稳风险;而当接顶率大于75%时,抗拉、抗压安全系数和综合安全系数均大于1,充填体处于稳定状态,其稳定性满足安全生产要求。

关键词 充填体稳定性; 充填接顶率; 综合安全系数

中图分类号 TD853

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.20.005

Stability of Filling Materials with Different Roof-contacted Filling Ratios in Upward Filling Stopping Method

WANG Xinmin, ZHU Yangya, JIANG Zhiliang, LIU Qi, WAN Xiaoheng

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract Based on the filling-slurry flowing law and final filling state in the stope, this paper analyzes the stability of filling materials with different roof-contacted filling ratios during the upward filling process. The process was divided into two parts: unlimited diffusion deposition and limited upward stacking. Combined with the final filling state, and beginning with 50% roof-contacted filling ratio, 11 filling models were built with an increasing gradient of 5%. The MIDAS/GTS finite element software was applied to analyze the stress condition of filling materials which had different roof-contacted filling ratios, and the comprehensive safety coefficient was put forward to evaluate the stability of filling materials, including the tensile coefficient, compressive safety coefficient and area size under concentrated stress. Take a specific stope as an example, when the roof-contacted filling ratio is under 75% in one-step route stope, the filling material still has the possibility of instability, although the tensile and compressive safety coefficients are higher than 1.0 and the comprehensive safety coefficient is under 1.0. When the roof-contacted filling ratio is above 75%, the tensile, compressive and comprehensive safety coefficients are higher than 1.0, the stability of the filling material reaches a safe level.

Keywords stability of filling materials; roof-contacted filling ratio; comprehensive safety coefficient

上向进路胶结充填采矿法具有能适应各类复杂矿体,可最大限度地提高回收率,以及采空区暴露时间短、回采安全

等优点,在使用充填法的金属矿山中得到了广泛应用^[1]。在应用过程中,上向进路胶结充填法的一大技术难点逐渐显露

收稿日期:2014-04-14;修回日期:2014-06-02

项目基金:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BA02B05)

作者简介:王新民,教授,研究方向为采矿及充填技术,电子信箱:wxm1958@126.com;朱阳亚(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为充填采矿工艺,电子信箱:zhuzheng0735@126.com

引用格式:王新民,朱阳亚,姜志良,等. 上向进路充填采矿法不同接顶率充填体的稳定性[J]. 科技导报,2014,32(20): 37-43.

出来,即一步已开采进路采场胶结充填不接顶或者接顶率太低,导致胶结充填体稳定性较差,顶板实际暴露面积增大,在二步开采进路生产过程中,充填体极易受采动影响导致充填体偏帮和倒塌。因此,一步已开采进路充填体的稳定性成为影响该方法成功、高效应用的关键难点之一。

由于充填体的稳定性事关矿山的安全生产,相关专家对其失稳机理和影响稳定性因素进行了大量的研究。韩斌^[2]在对某矿区下向进路胶结充填体可靠度分析中,得出当充填体所承受的拉应力超过其抗拉强度时,充填体发生失稳。许新启^[3]运用 Bishop 法和概率分析法对分段充填采矿法充填体的稳定性进行了研究,得出充填体内聚力 C 、内摩擦角、充填高度、分次充填次数是影响充填体稳定性的几大因素。闫东飞等^[4]运用 FLAC-3D 对下向进路充填法充填体稳定性进行了分析,提出保证单进路顶板及围岩的稳定性可以提高充填体的稳定性。然而,上述研究大多假设充填料浆完全充满空区,即基于充填接顶率达到 100% 这一前提,而这在矿山实际充填中是几乎不可能实现的,虽然对此选取较高的充填体安全系数来弥补,但在模拟部分失真下得到的结果的可靠性值得商榷。为此,本文结合已采用上向进路胶结充填采矿法的某矿山的矿体产状、进路结构参数、矿岩及充填料浆物理力学参数,在采场充填料浆流动规律的理论基础上,构建不同充填接顶率的进路三维模型,研究二步进路采场开采时,一步已开采进路不同充填接顶率胶结体的受力状况和稳定性。

1 充填料浆进路采场流动规律

在已开采进路采场里布设充填管线和构筑挡墙完毕后开始充填,充填料浆从充填管口喷出到料浆开始回流表明充填结束,整个过程里充填料浆的运动受到底板摩擦阻力、料浆之间黏性阻力和进路边界等限制。由于摩擦阻力和黏性阻力恒定不变,选取进路边界作为唯一可变限制,将料浆在采场流动的过程分为两个过程,即不受限沉积扩散过程和受限向上堆积过程,充填料浆在采场的流动到最后近似充满采场是两个过程相互作用的结果^[5]。

充填料浆从起始下落点沉积扩散到进路短边边界的过程,称之为不受限沉积扩散过程。以目前矿山广泛使用的分级尾砂充填料浆为例,在不受限沉积扩散过程里,单粒分级尾砂颗粒的沉积扩散运动是独立的扩散沉积事件,其在采场里任一区间的沉积都带有概率性。设起始下落点为 O ,进路短边的一半长度为 L ,如图 1 所示,将 $2L$ 等分,步距 $\Delta x = 2L/m$,单粒分级尾砂颗粒在起始下落点至进路短边边界任一小区间 $\Delta x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 的沉积概率^[6]为

$$P(A) = \begin{cases} p & \text{料浆颗粒在 } \Delta x_i \text{ 区间内沉积} \\ 1-p & \text{料浆颗粒不在 } \Delta x_i \text{ 区间内沉积} \end{cases} \quad (1)$$

该沉积概率服从几何分布,具有如下数学期望 $E(x)$ 和方差 $D(x)$:

$$E(x) = \frac{1}{p} \quad D(x) = \frac{1-p}{p^2} \quad (2)$$

由于单粒分级尾砂颗粒对整体充填料浆的沉积扩散最终形态影响很小,但所有分级尾砂颗粒的沉积扩散运动的总和构成了料浆沉积终态。以 $k (k=1, 2, \dots, n)$ 表示不同粒级的尾砂颗粒,根据李雅普诺夫中心极限理论,沉积事件里无论随机变量 k 具有何种分布,其和 $\sum_{k=1}^n X_k$ 当 n 很大时,就近似地服从正态分布,当 n 趋向于无穷时,则近似地服从标准正态分布 $N(0, 1)$ 。由此可知,分级尾砂料浆从起始下落沉积点至进路短边边界的不受限扩散沉积体坡面曲线方程为

$$y = h e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}} \quad (3)$$

式中, h 为不受限扩散沉积体的最大高度, m ; σ^2 为均方差。

分级尾砂颗粒运动的离散程度,为图 1 所示曲线的缓陡趋势,其值可由密度函数的直方图估计得出。

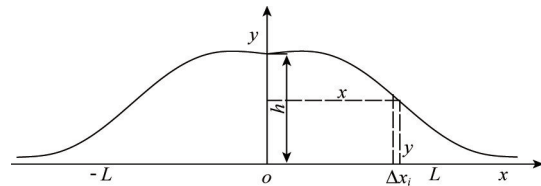


图 1 分级尾砂采场不受限扩散沉积坡面曲线

Fig. 1 Curve showing the unlimited dispersive deposition of classified tailings

由上述分析可知,在分级尾砂充填料浆进路采场不受限沉积扩散过程中,充填料浆从起始下落点向四周扩散成一个近似半径为 L 的沉积体,沉积体的坡面近似于正态分布, L 的极限长度为所充填进路短边长度的 $1/2$ 。由于底板摩擦阻力、充填料浆的黏度、表面张力是一定的,不同浓度料浆在采场的不受限扩散半径 L 与沉积高度 h 存在一定的函数关系,即 $h=f(L)$ 。根据金川二矿区棒磨砂充填胶结料浆现场试验数据,当充填料浆不受限扩散半径为 2 m 时,沉积最大高度约为 0.68 m ^[7]。采场实际充填时,由于料浆从管道出来带有一定的水平速度,真实沉积高度要略小一些。

从充填料浆扩散至进路短边边界后往上堆积至近似充满进路空间的过程,称之为受限向上堆积过程。在该过程中,由于充填空间受到进路两侧边界、充填挡墙、邻近已充填进路区域料浆的限制,扩散至进路短边边界的充填料浆不再以水平扩散为主,而是以向上堆积为主。充填结束后利用钻孔观察分级尾砂料浆进路充填最终形态发现,以充填管口为中心的一片区域充填料浆完全接顶,而从该区域边缘至进路短边边缘这一区域,最终沉积的充填料浆形成了一定的沉积坡度,如图 2 所示,该坡度与料浆的浓度、黏度及同一充填区域分次充填次数有关。充填完毕后,进路接顶区域面积 S_1 与进路平面面积 S_2 的比值,就是通常所说的充填接顶率 B ,即

$$B = \frac{S_1}{S_2} \quad (4)$$

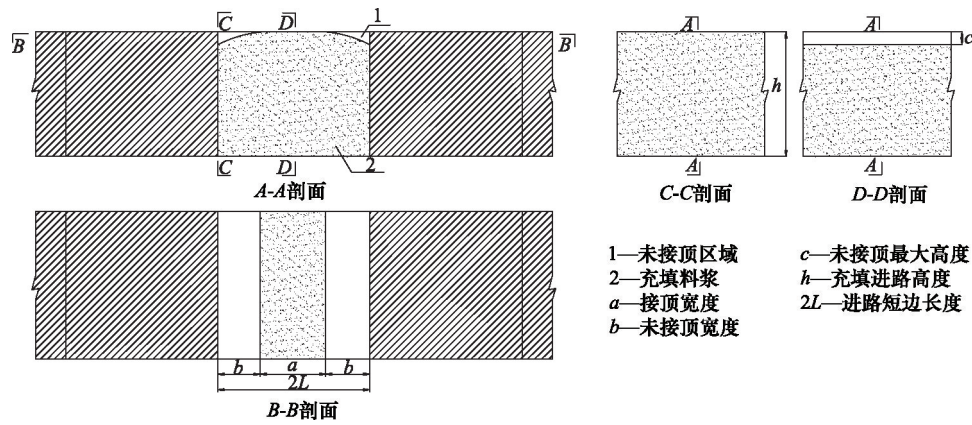


图2 分级尾砂进路充填终态

Fig. 2 Final filling state of classified tailings in the route

2 不同充填接顶率进路三维模型构建

根据充填料浆采场流动规律及分级尾砂充填进路终态情况,构建分级尾砂不同充填接顶率一步已开采进路胶结充填矿柱模型。在构建模型过程中,最大未接顶高度 c 取 $0.5\text{ m}^{[8]}$,同时将未充填区域的曲面平面近似简化处理,忽略多次充填质量的不稳定性,根据图2,将充填接顶率 B 从面充填接顶率计算简化为线充填接顶率计算,即

$$B = \frac{S_1}{S_2} = \frac{a}{2L} = \frac{a}{a+2b} \quad (5)$$

参考已有的研究结果^[6],当充填接顶率超过50%时,就能保证顶板的稳定性。以顶板稳定为前提,按照线充填接顶率定义,以5%充填接顶率递增梯度,构建了50%~100%充填接顶率胶结矿柱共11个三维模型,其中部分不同充填接顶率分级尾砂胶结矿柱三维模型如图3所示。

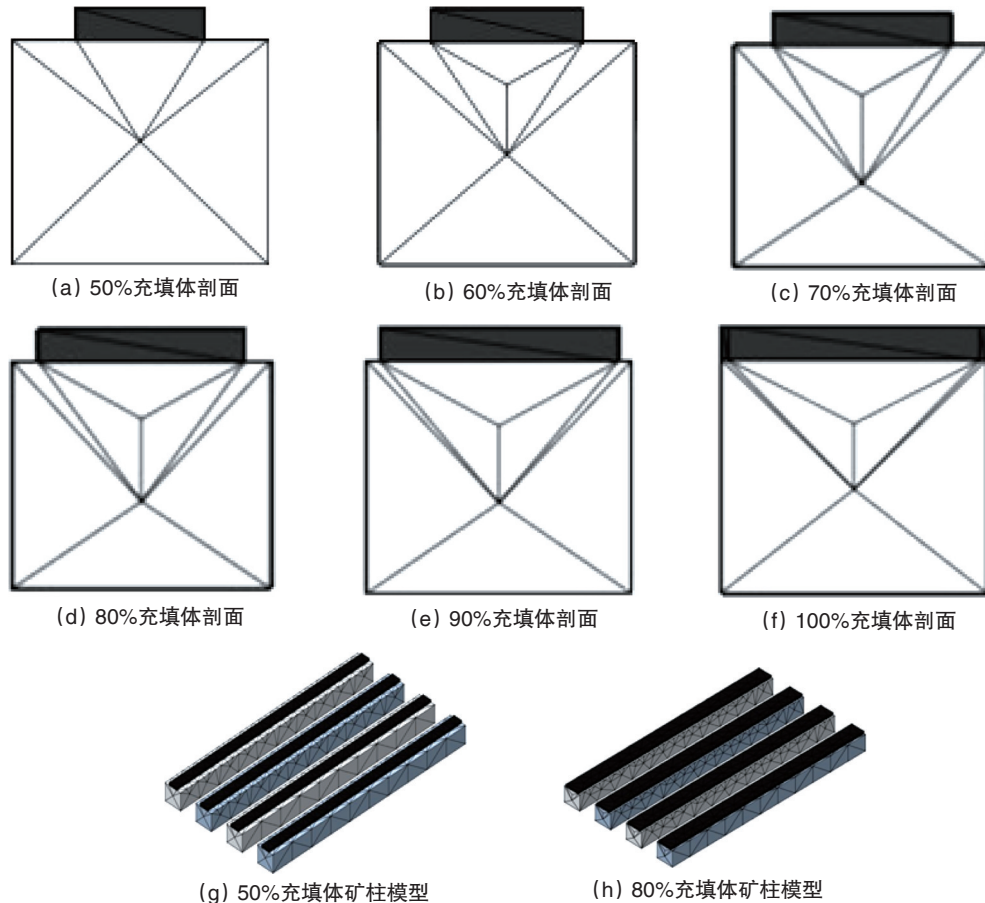


图3 不同接顶率充填体三维模型

Fig. 3 3D model of the filling material with different roof-contacted filling ratios

3 充填体稳定性分析

3.1 研究背景

某矿山地质储量较为丰富,但开采条件复杂,矿体局部分支、尖灭比较严重,矿体顶板局部属于强富水带,属于“三下”难采矿体。矿体平均埋深300 m,平均水平厚度36 m,平均倾角35°。在结合矿山开采地质条件和防治水工程进度的基础上,使用上向进路分级尾砂胶结充填采矿法可以大大缩小导水裂隙带发育高度,进而实现在强富水带下安全开采。根据矿山矿体产状和设计现状,进路沿走向布置,单条进路长度50 m,断面4 m×4 m。通过现场取样和室内岩石力学试验,本次模拟研究所涉及到的围岩、矿体和分级尾砂充填体的物理力学参数如表1所示。

表1 矿体、围岩及充填体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the ore, surrounding rocks and filling materials

序号	类别	弹性模量/ GPa	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)	黏结力/ MPa	内摩擦角/ (°)
1	上盘	56.00	30.12	3.40	0.22	2540.00	9.30	50.5
2	矿体	7.60	19.59	2.37	0.20	3570.00	6.86	45.6
3	下盘	32.00	21.67	2.20	0.22	2280.00	3.26	53.5
4	充填体	0.20	2.43	0.25	0.24	1850.00	0.33	30.7

3.2 矿体三维模型创建

运用MIDAS/GTS有限元软件进行矿体三维模型构建^[9-12],模型大小根据所模拟采动范围5倍影响半径确定。由于本次模拟所涉及到的围岩、矿体及充填体均属于弹塑性材料,破坏以剪切破坏为主,故采用主要考虑剪切破坏的Mohr-Coulomb准则作为材料本构模型。Mohr-Coulomb准则的评判依据^[13-15]为

$$\tau_i = c + \sigma_3 \tan \varphi \quad (6)$$

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) f = \left[c \cdot \cot \varphi + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) f \right] \sin \varphi \quad (7)$$

式中, τ_i 为剪切应力,MPa; σ_3 为法向压应力,MPa; σ_1 为第一主应力,MPa; σ_3 为第三主应力,MPa; c 为黏结力,MPa; f 为摩擦系数; φ 为摩擦角,(°)。

每个模型的网格划分完毕后,需对模型网格自由边进行检查,以确定网格是否耦合。按照不同充填接顶率充填体三维模型创建相应矿体三维模型,为保证模拟一致性,相同实体网格划分必须严格一致。为提高模型精密度,采取由模型边界到进路由外向内逐渐加密的网格划分方式划分网格单元。以模型7即80%充填接顶率充填体的矿体三维模型为例,共有53481个单元,9657个节点,如图4所示。

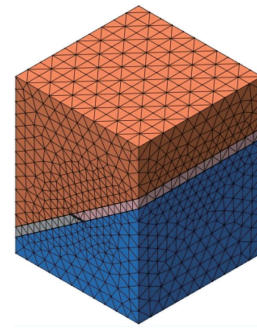


图4 三维模型

Fig. 4 Picture of the 3D model

3.3 稳定性分析

所构建的11个矿体三维模型,各模型大小一致,只是内部的一步已开采进路胶结充填体的充填接顶率不同。11个模型的数值分析结果如表2所示。这里仅给出部分不同充填接顶率胶结充填体的拉应力、压应力分析云图,如图5所示。

表2 不同接顶率充填体的矿体三维模型分析结果

Table 2 Analysis result of the 3D model with different roof-contacted filling ratios

模型	充填接顶率/ %	矿柱压应力/ MPa	矿柱拉应力/ MPa	压应力集中区域/ %	拉应力集中区域/ %
1	50	2.48	0.169	0.1	7.2
2	55	2.42	0.162	0.1	9.8
3	60	2.33	0.157	0.2	10.9
4	65	2.24	0.145	0.3	12.1
5	70	2.17	0.135	0.5	13.7
6	75	2.06	0.127	0.6	15.4
7	80	1.92	0.123	0.7	16.6
8	85	1.79	0.116	0.5	20.9
9	90	1.68	0.107	0.4	22.5
10	95	1.32	0.102	0.3	26.3
11	100	1.11	0.096	0.3	27.2

结合表2和图5可以看出,二步进路回采时,一步已开采进路胶结充填体的边帮和端头区域会产生拉应力和拉应力集中,充填接顶区域会产生压应力集中,由于拉应力是充填体破坏的首要原因,且分级尾砂充填料浆在充入地下采场时由于胶凝材料水化不完全、胶凝材料流失、充填料浆沉降,导致分级尾砂胶结充填体凝固后的实际力学强度低于实验室测定值。因此,在统计应力集中区域时,将拉应力产生区域视为拉应力集中区域(云图中拉应力值为正的区域)。可以看出拉应力集中区域远远大于压应力集中区域,各模型拉应力、压应力集中区域变化趋势如图6所示。当充填接顶率为

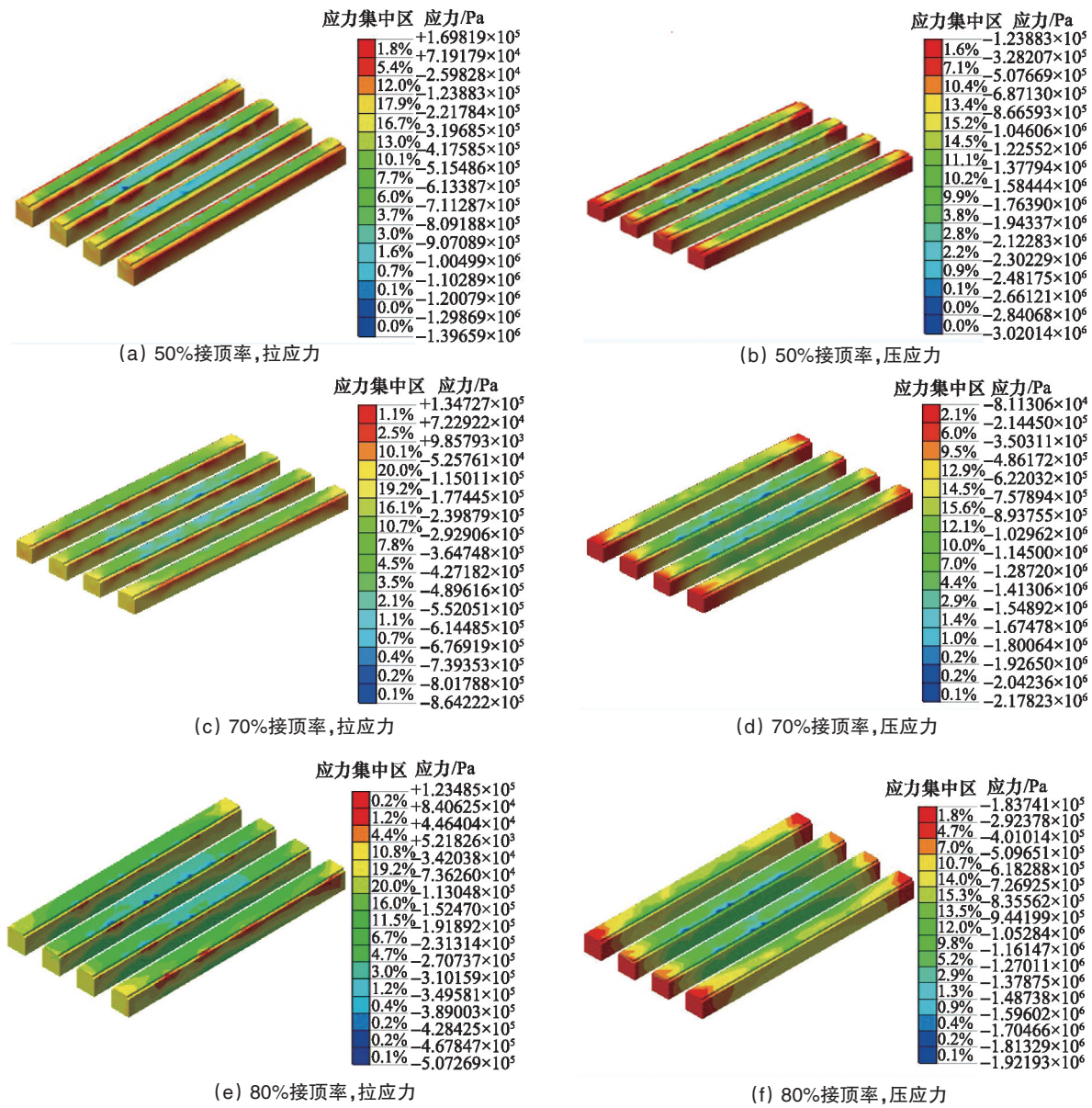


图5 不同接顶率充填体应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of filling materials with different roof-contacted filling ratios

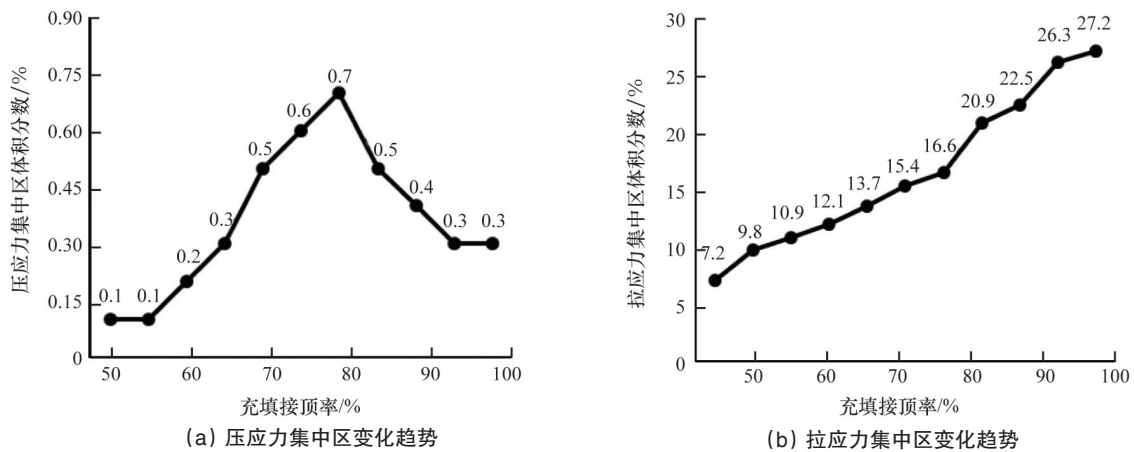


图6 不同充填接顶率矿柱拉应力及压应力集中区域变化趋势

Fig. 6 Variation trend of tensile and compressive stress concentrated areas in the jamb with different roof-contacted filling ratios

50%时,拉应力、压应力集中区域分别占矿柱体积的7.2%和0.1%,拉应力峰值为0.169 MPa,在矿柱的理论承受范围之内,但压应力峰值达到2.48 MPa,超出了矿柱的理论抗压强度,这意味着一步进路采场胶结矿柱由于充填接顶率较小,产生了局部脱落甚至偏帮现象,这对生产是不利的,虽然压应力集中区域很小,但矿柱仍有可能失效。随着充填接顶率的增大,拉应力和压应力峰值都逐渐减小,拉应力和压应力集中区域呈增大趋势,这说明胶结充填体与顶板之间的相互作用增强。当充填接顶率为80%时,拉应力和压应力集中区域分别占矿柱体积的16.6%和0.7%,拉应力集中区域继续增大,压应力集中区域达到了11个模型的最大值。当充填接顶率超过了80%,拉应力集中区域继续增大,压应力集中区域呈下降趋势,这说明充填体对顶板的支撑作用增大,拉、压应力峰值进一步降低,顶板稳定性进一步增强。

3.4 综合安全系数计算

虽然绝大多数模型一步已开采进路胶结矿柱的拉应力、压应力都在理论承受强度范围内,但由于应力集中区域的广泛性和实际力学强度的缩小,需对矿柱的安全可靠性进行考量。

为提高安全可靠度,在参考安全系数 F_s 的定义和相关学者的研究^[16-18]基础上,提出矿柱综合安全系数 F_c 的概念。所谓矿柱综合安全系数 F_c ,即综合考虑了矿柱的抗拉安全系数、抗压安全系数以及拉应力、压应力集中区域的体积分数,其计算方法如式(8)、式(9)所示,计算结果如表3所示。

表3 不同充填接顶率胶结矿柱模型综合安全系数评价
Table 3 Comprehensive safety coefficient for the jamb model with different roof-contacted filling ratios

充填接顶率/ %	抗拉安全 系数 F_t	抗压安全 系数 F_s	综合安全 系数 F_c
50	1.48	0.98	0.1
55	1.54	1.00	0.1
60	1.59	1.04	0.2
65	1.72	1.08	0.4
70	1.85	1.12	0.7
75	1.97	1.18	1.1
80	2.03	1.27	1.6
85	2.16	1.36	1.6
90	2.34	1.45	1.6
95	2.45	1.84	1.9
100	2.6	2.19	2.4

$$F_t = \frac{[\sigma_t]}{\sigma_t} \quad F_s = \frac{[\sigma_s]}{\sigma_s} \quad (8)$$

$$F_c = \left(F_t \frac{V_{t \max}}{V_t} \right) \cdot \left(F_s \frac{V_{s \max}}{V_s} \right) \quad (9)$$

式中, $[\sigma_t]$ 为矿柱抗拉强度; σ_t 为矿柱拉应力; $[\sigma_s]$ 为矿柱抗压强度; σ_s 为矿柱压应力; F_t 为抗拉安全系数; F_s 为抗压安全系数; V_t 为拉应力集中区域体积分数; V_s 为压应力集中区域体积分数。

综合比较各模型数值分析结果及不同充填接顶率胶结充填体安全系数评价情况,可以清晰地看出,由于充填接顶率不同,导致不同模型产生的拉应力、压应力峰值与应力集中区域差别较大,充填体充填接顶率越高,其抗拉、抗压及综合安全系数越大,充填体的稳定性越高。尤其是当充填接顶率超过了75%后,其综合安全系数在1以上,已经可以满足安全生产的需要;当充填接顶率达到了100%,即充填料浆完全充满采空区时,其综合安全系数达到了2.19,对于进路开采“快采快充”的发展趋势,已经属于非常安全的级别了。综合分析表明,当充填体的充填接顶率不足75%时,其综合稳定性较差,有失稳风险;当充填接顶率大于75%时,充填体的综合稳定性可以满足安全生产的要求。因此,可根据矿山自身围岩、矿体的稳定性以及对安全要求,选择充填所需的最低充填接顶率。

4 结论

1) 分析了充填料浆采场流动规律,将充填料浆采场流动整个过程分为不受限沉积扩散和受限向上堆积两个过程,并绘制了分级尾砂充填进路终态图。

2) 基于分级尾砂充填进路终态,提出不同充填接顶率进路三维模型建模方法,构建了11个不同充填接顶率矿柱三维模型。

3) 针对某矿具体条件,分析比较11个不同充填接顶率的矿体三维模型的数值分析结果,结合传统的抗拉、抗压安全系数,提出综合安全系数方法评价一步开采进路不同充填接顶率充填体的安全性:充填体充填接顶率越高;其抗拉、抗压及综合安全系数越大,充填体的稳定性越高,综合而言,二步进路采场开采,当一步进路采场充填体接顶率不足75%时,虽然抗拉、抗压安全系数大于1,但综合安全系数小于1,充填体有失稳风险;当接顶率大于75%时,充填体的抗拉、抗压及综合安全系数都大于1,充填体的稳定性可以满足安全生产的要求。

参考文献(References)

- [1] 彭士群, 王洪武. 进路充填采矿法充填技术探讨[J]. 中国矿山工程, 2004, 33 (3):30-33
Peng Shiqun, Wang Hongwu. Discussion of technology of upward approach and filling mining method[J]. China Mine Engineering, 2004, 33 (3): 30-33
- [2] 韩斌. 金川二矿区充填体可靠度分析与1#矿体回采地压控制优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004: 42-61.
Han Bin. Reliability analysis of backfill of deposit 2 of Jinchuan and pressure control optimization research during 1# deposit mining [D]. Changsha: Central South University, 2004: 42-61.
- [3] 许新启. 分段充填采矿法充填体稳定性分析及控制[J]. 有色金属,

- 2000, 52(4): 18-22.
- Xu Xinqi. The stability analysis and control of filling mass of sublevel filling method[J]. Nonferrous Metals, 2000, 52(4): 18-22.
- [4] 闫东飞, 马凤山, 赵海军, 等. 甘肃金川二矿区下向进路充填法开采充填体稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(4): 60-64.
- Yan Dongfei, Ma Fengshan, Zhao Haijun, et al. The stability of filling mass of downward slicing drift mining method of deposit 2 of Jinchuan [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(4): 60-64.
- [5] 汤丽, 肖卫国. 采场中充填料浆流动规律的研究[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(2): 7-9.
- Tang Li, Xiao Weiguo. Study on flowing law of fill slurry in slope[J]. Mining R&D, 2005, 25(2): 7-9.
- [6] 王新民, 古德生, 张钦礼. 深井矿山充填理论与管道输送技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010.
- Wang Xinmin, Gu Desheng, Zhang Qinli. Theory of backfilling activity and pipeline transportation technology of backfill in deep mines[M]. Changsha: Central South University Press, 2010.
- [7] 卢央泽, 李丽君, 姜仁义. 关于提高充填接顶率的若干问题探讨[J]. 有色金属, 2009, 61(3): 6-8.
- Lu Yangze, Li Lijun, Jiang Renyi. Discussion on raising the rate of supporting pit roof[J]. Nonferrous Metal, 2009, 61(3): 6-8.
- [8] 李洪兵, 谷新建, 宋嘉栋, 等. 郑家坡铁矿隔水矿柱厚度的确定[J]. 矿业工程研究, 2013, 28(3): 34-38.
- Li Hongbing, Gu Xinjian, Song Jiadong, et al. Determination of thickness of waterproof pillar of Zhengjiapo iron mine[J]. Mineral Engineering Research, 2013, 28(3): 34-38.
- [9] 张钦礼, 罗怡波, 柯俞贤. 露天转地下开采地表沉降安全性分析[J]. 中南大学学报, 2013, 44(8): 3441-3445.
- Zhang Qinli, Luo Yibo, Ke Yuxian. Security for ground settlement of transition from open pit to underground mining[J]. Journal of Central South University, 2013, 44(8): 3441-3445.
- [10] 周先贵, 曹金国. 岩土力学数值方法研究进展[J]. 建筑技术开发, 2002, 29(8): 15-18.
- Zhou Xiangui, Cao Jinguo. Advance in research on numerical methods of rock-soil mechanics[J]. Building Technique Development, 2002, 29(8): 15-18.
- [11] 侯恩科, 吴立新, 李建明, 等. 三维地学模拟与数值模拟的耦合方法研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 388-392.
- Hou Enke, Wu Lixin, Li Jianming, et al. Study on the coupling of 3D geoscience modeling with numerical simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 388-392.
- [12] 李明超, 钟登华, 秦朝霞, 等. 基于三维地质模型的工程岩体结构精细数值建模[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1893-1898.
- Li Mingchao, Zhong Denghua, Qin Zhaoxia, et al. Refined modeling for numerical simulation of engineering rock mass structures based on 3D geological model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1893-1898.
- [13] 廖异, 曾祥国. Hoek-Brown岩体非线性强度的线性化方法[J]. 中南大学学报, 2012, 43(12): 205-210.
- Liao Yi, Zeng Xiangguo. Linearization method of non-linear strength of Hoek-Brown rocks mass[J]. Journal of Central South University, 2012, 43(12): 205-210.
- [14] 蒋青青. 基于Hoek-Brown准则点安全系数的边坡稳定性分析[J]. 中南大学学报, 2009, 40(3): 786-790.
- Jiang Qingqing. Stability of point safety factor of slope based on Hoek-Brown criterion[J]. Journal of Central South University, 2009, 40(3): 786-790.
- [15] Priest S D. Determination of shear strength and three-dimensional yield strength for the Hoek-Brown criterion[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005, 38(4): 299-327.
- [16] 曹平, 邓志斌, 陈枫. 边坡稳定性任意条分法中安全系数的计算[J]. 中南大学学报, 2005, 36(2): 302-306.
- Cao Ping, Deng Zhibin, Chen Feng. Calculation of safety factor for slope stability analysis with polygon elements[J]. Journal of Central South University, 2005, 36(2): 302-306.
- [17] 郑颖人, 赵尚毅. 边(滑)坡工程设计中安全系数的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1937-1940.
- Zheng Yingren, Zhao Shangyi. Discussion on safety factors of slope and landslide engineering design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1937-1940.
- [18] 林杭, 曹平, 李江腾. 基于广义Hoek-Brown准则的边坡安全系数间接解法[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1147-1151.
- Lin Hang, Cao Ping, Li Jiangteng. The indirect calculation method for the safety factor of slope based on generalized Hoek-Brown criterion [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1147-1151.

(责任编辑 韩文明)



《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。