

宽大采场充填顶板的稳定性分析研究*

廖宁^{1,2}, 王伟³, 李金良³, 张海云^{1,2}, 张鹏飞³, 周礼^{1,2}

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012;

2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南长沙 410012;

3.西乌珠穆沁旗银漫矿业有限责任公司, 内蒙古锡林郭勒盟 026211)

摘要:充填采矿法的推广应用,革新了金属矿地下开采模式以及间柱回采方式,提高了资源回采安全性和资源回采率。然而,针对宽大采场的顶柱资源回采,常需留设一定厚度的顶柱来维持充填体的稳定,造成资源浪费。因此,对宽大采场的充填顶板稳定性进行了研究。通过顶板稳定性理论计算,结合矿山充填体料浆配比试验,进行顶板结构优化以及强度设计研究,得到20 m分段高度时不同跨度下充填体顶板结构以及强度要求,并利用FLAC3D进行模拟验证。模拟结果表明:将设计的充填体作为中深孔采场直接顶板,有较好的稳定性,能满足强度要求。研究结果可为宽大采场充填顶板设计提供参考。

关键词:充填体顶板;安全厚度;充填体强度;数值模拟

中图分类号:TD853.34 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)11-0038-08

0 引言

金属矿地下开采过程中会产生地下空场结构,如果空场结构的侧帮或顶板发生垮冒,将直接威胁到矿房的安全生产。因此,对空区侧帮和顶板的稳定性进行研究具有重要意义^[1-2]。近年来,随着充填采矿法的逐步推广,为矿柱资源提供了新环境与回采新思路^[3]。在两步骤回采中,当采场侧帮为充填体时,空区稳定性只考虑揭露的充填体自立强度;当顶板为充填体时,由于充填体与原岩强度相差巨大,需留设一定厚度的顶柱作为承载隔离层维持充填体的稳定^[4-6],造成大量顶柱资源遗留。无论这些顶柱留作永久损失或后期进行回采,都将严重影响生产效率,增加生产成本。因此,将充填体作直接顶板,研究充填顶板下的矿石资源安全回采对矿山具有重大意义。

目前许多学者进行了顶板稳定性的研究。张东飞等^[7]借助多种顶板理论计算方法得到充填体荷载下的安全厚度,并利用数值模拟来验证顶板稳定性。刘大金等^[8]在充分考虑地下水因素的情况下,借助数值模拟对顶板安全厚度进行研究。还有学者通过突变理论^[9-11]、聚类分析^[12-13]等数学方法来分析顶板的稳定性,这些方法仍以充填体荷载下顶板厚度及跨度的研究为主。针对充填体作直接顶板的研究,依然集中在进路充填法,例如赵奎等^[14]构建顶板位移尖点突变模型,确定下向分层充填法承载层厚度;曹定洋等^[15]引入薄板模型与尖点突变理论,构建了下向进路充填体顶板的力学模型,得到充填体顶板破坏的临界条件,从而指导充填体设计;况丹阳^[16]利用理论分析以及经验类比法,进行下向进路充填法的人工假顶的强度需求分析与设计;郭鹏^[17]、高通^[18]、贾学元^[19]运用理论分析、数值模拟、现场试验等方法,对下向分层进路顶板破坏模式以及顶板稳定性问题进行了研究。目前针对中深孔及深孔采矿形成的宽大充填顶板的研究较少。然而,开展宽大采场充填顶板的稳定性研究,对于矿山的顶板资源回采具有重要意义。

本文基于顶板稳定性理论计算方法,结合矿山充填体料浆配比试验,借助结构力学梁理论,将充填体作为中深孔采场直接顶板,进行顶板结构优化以及强度设计。通过对不同跨度下的充填体结构进行分析,得到其结构关系及强度要求。最后,利用FLAC3D数值模拟软件进行验证,评估设计的充填体结构在不同跨度下的稳定性。本研究为宽大充填顶板的稳定性评估提供了理论依据,对指导矿山的安全生产具有参考意义。

* 收稿日期:2024-01-12

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC2905102)

作者简介:廖宁(1999—),男,湖南衡阳人,硕士研究生,主要从事高效采矿技术研究。E-mail:2228499518@qq.com

1 矿区概况

银漫矿业位于内蒙古高原的中东部,地势南高北低,属中浅切割地形,水系不发育。矿床赋存铜锡银锌矿体,以三区主要回采的17#矿体为例,矿体走向长度为750~900 m,矿体倾角为70°~80°,局部接近垂直,以15~35 m的厚大矿段为主,局部和两端为少量薄至中厚(<10 m)的矿段。矿体和围岩的力学强度高,属坚硬、半坚硬岩石,岩体结构完整,以块状结构为主,矿体及围岩整体稳固。

银漫矿业原设计采矿方法主要为分段空场嗣后充填采矿法,中段高度为60 m,分段高度为20 m,在中段回采过程中,为了保证生产安全,留设一定厚度的顶柱作为上中段松散充填体的承载层,造成了大量矿柱资源的留存,严重影响了矿山的整体经济效益。

2 顶板稳定性理论计算

现场工程实践表明,顶板岩层破坏主要分为两种形式。一种是顶板呈层状结构,上覆岩层形成高叠层结构,应力呈梯度分布,若最下层岩层承载的压力高于其自身强度,将导致顶板暴露层出现破坏;另一种是岩层暴露面积过大,顶板呈张裂状态,而岩石属于脆性材料,拉应力抵抗能力较差,随着拉应力超过岩石材质的抗拉强度极限,将导致顶板在中部区域发生垮冒破坏现象。

采场充填可以分为两种形式。一种是非胶结充填体,该类充填体的主要作用是填充采空区,消除空区自由面,对围岩变形进行被动限制,非胶结充填体属于松散体,无自立强度,揭露后易出现泄漏现象;另一种是胶结充填体,该类充填体具备一定的固结强度,填充于空区后,能够有效抵御围岩变形和吸收围岩应力,揭露后具有较好自稳能力。根据不留顶柱的回采方式,胶结充填体才具备开采条件,故只针对胶结充填体进行研究。以胶结充填体为矿房直接顶板,探索宽大充填顶板下回采稳定性问题。

按不留顶柱完全暴露的充填体作为顶板的方式,当前计算顶板稳定性的方法主要有Mathews图解法、极限跨度理论、厚跨比法、K.B.鲁佩涅依特理论等^[20-24]。

由于充填体是回采后期通过料浆的形式充入空区,相较于原矿岩体,其在凝结过程中能够有效吸收围岩释放的应力,凝固成充填体后围岩所受应力作

用相对较弱。同时充填体是脱水凝固而成,与岩体相比并未受到长期的地质构造活动影响,高强度充填体作为采场顶板其材质均质性更佳。因此,通过理论计算的方式确定采场顶板稳定性更为贴合实际。

2.1 厚跨比理论

厚跨比法是在现场实践的基础上,总结提出的采场顶板参数选取经验公式法,该方法主要考虑空间结构条件下的顶板安全厚度 H 与跨度 W 的比值,并依据不同的安全条件选取安全系数 K (取1.0~1.8),进而确定顶板安全厚度。

$$H \geq 0.5KW \quad (1)$$

通过式(1)计算得到的空区顶板安全厚度见表1。

表1 不同安全系数下采空区顶板安全厚度

Table 1 Safety thickness of the goaf roof		under different safety factors					m
跨度	顶板安全厚度						
	$K=1.1$	$K=1.2$	$K=1.3$	$K=1.4$	$K=1.5$	$K=1.8$	
4	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.6	
6	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	5.4	
8	4.4	4.8	5.2	5.6	6.0	7.2	
10	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	9.0	
12	6.6	7.2	7.8	8.4	9.0	10.8	
14	7.7	8.4	9.1	9.8	10.5	12.6	
16	8.8	9.6	10.4	11.2	12.0	14.4	
18	9.9	10.8	11.7	12.6	13.5	16.2	
20	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	18.0	

2.2 荷载传递交汇线法

荷载传递交汇线法是学者通过分析顶板受力特性,归纳总结认为顶板所受荷载通过三角的形式进行传递,如图1所示,若三角区间超过了顶板跨度,将实现顶板的稳定。计算公式见式(2)。

$$H = \frac{W}{2 \tan \beta} \quad (2)$$

式中, β 为传递扩散角,取30°~35°。计算结果见表2。

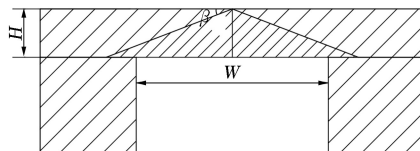


图1 荷载传递交汇线法示意

Fig.1 Schematic diagram of the load transfer intersection method

表 2 不同扩散角下采空区顶板安全厚度

Table 2 Safe thickness of goaf roof under different diffusion angles m

跨度	顶板安全厚度					
	$\beta=30^\circ$	$\beta=31^\circ$	$\beta=32^\circ$	$\beta=33^\circ$	$\beta=34^\circ$	$\beta=35^\circ$
4	3.46	3.33	3.2	3.08	2.97	2.86
6	5.20	4.99	4.8	4.62	4.45	4.28
8	6.93	6.66	6.4	6.16	5.93	5.71
10	8.66	8.32	8.0	7.70	7.41	7.14
12	10.39	9.99	9.6	9.24	8.90	8.57
14	12.12	11.65	11.2	10.78	10.38	10.00
16	13.86	13.31	12.8	12.32	11.86	11.43
18	15.59	14.98	14.4	13.86	13.34	12.85
20	17.32	16.64	16.0	15.40	14.83	14.28

2.3 结构力学梁理论

结构力学梁理论将顶板假设为平面固支梁结构,极限顶板高度以结构抗弯抗拉作为判别标准,据此得到的顶板安全厚度计算公式为:

$$H = 0.25W \frac{\rho W + \sqrt{(\rho W)^2 + 8Wq\sigma_B}}{\sigma_B l} \quad (3)$$

式中: ρ 为顶板密度, kg/m^3 ; σ_B 为顶板抗拉强度, kPa ; l 为顶板宽度, m ; q 为顶板上部荷载, kPa 。

根据顶板充填体的物理力学参数可知:充填体凝固后的密度大致为 $1\ 800\ \text{kg}/\text{m}^3$,充填体抗拉强度取 $0.1\sim 0.6\ \text{MPa}$ 。可利用托马斯模型算法计算充填体底板的垂直应力:

$$q = \frac{\rho h}{1 + h/W} \quad (4)$$

式中, h 为充填体厚度, m 。

设上部荷载为 0,得出不同跨度条件下采场顶板安全厚度,结果见表 3。

表 3 不同抗拉强度下采空区顶板安全厚度

Table 3 Safe thickness of roof in empty area under different tensile strength m

跨度	顶板安全厚度					
	$\sigma_B = 0.1\ \text{MPa}$	$\sigma_B = 0.2\ \text{MPa}$	$\sigma_B = 0.3\ \text{MPa}$	$\sigma_B = 0.4\ \text{MPa}$	$\sigma_B = 0.5\ \text{MPa}$	$\sigma_B = 0.6\ \text{MPa}$
4	3.46	3.33	3.2	3.08	2.97	2.86
6	5.20	4.99	4.8	4.62	4.45	4.28
8	6.93	6.66	6.4	6.16	5.93	5.71
10	8.66	8.32	8.0	7.70	7.41	7.14
12	10.39	9.99	9.6	9.24	8.90	8.57
14	12.12	11.65	11.2	10.78	10.38	10.00
16	13.86	13.31	12.8	12.32	11.86	11.43
18	15.59	14.98	14.4	13.86	13.34	12.85
20	17.32	16.64	16.0	15.40	14.83	14.28

2.4 Mathews 图解法

Mathews 稳定图法以稳定数和水力半径为基础,稳定数代表岩体在给定应力条件下维持稳定的能力,水力半径反映了采空区尺寸和形状,然后将这两个因子绘制在预测稳定区、潜在不稳定区和崩落区的图上,直观地显示出不同区域的风险程度。

水力半径计算如下:

$$S = S_{\text{帮壁}} / l_{\text{帮壁}} \quad (5)$$

式中: S 为水力半径, m ; $S_{\text{帮壁}}$ 为待分析帮壁或采空面的横截面积, m^2 ; $l_{\text{帮壁}}$ 为待分析帮壁或采空区的周长, m 。

稳定数的计算公式如下:

$$N = Q' \times A \times B \times C \quad (6)$$

式中: N 表示稳定数; A 为岩石应力系数,为在评价的采空面边界上单轴抗压强度与诱生的压应力之比,根据充填体特性其强度与诱生压应力之比大于 10,故 A 值取 1; B 为节理产状调整系数,由于充填体均质性较好,内部几乎无较大节理分布,故 B 值取 1; C 为重力调整系数,与重力作用下的待分析采空面的破坏模式如顶板冒落、片帮、帮壁下滑等有关,采场顶板倾角为 0° ,故 C 值取 1; Q' 为岩体质量指标 Q 修正后的值,是假设应力折减系数和节理渗水折减系数均为 1 的情况下计算得到的 Q 值,在实际生产中,充填体特性主要是以灰砂比的不同进行区分,即凝固后胶凝材料与骨料的混合固体,此处岩体质量指标根据某矿的现场原位取芯数据进行计算。充填体呈块状,存在较少节理,节理组数取值范围为 $0.5\sim 2$ 。节理多为光滑的波状结构,节理粗糙度系数取值 1。节理蚀变现象属于节理轻微变质或粉质覆盖或黏土矿物覆盖等,节理蚀变系数取 $2\sim 4$ 。

水力半径主要跟结构参数相关,不同采场跨下水力半径计算结果见表 4。

表 4 不同结构参数下采场顶板水力半径

Table 4 Hydraulic radius of stope roof under different structural parameters m

顶板宽度	水力半径					
	$W=8\ \text{m}$	$W=10\ \text{m}$	$W=12\ \text{m}$	$W=14\ \text{m}$	$W=16\ \text{m}$	$W=18\ \text{m}$
8	2.00	2.22	2.40	2.55	2.67	2.77
10	2.22	2.50	2.73	2.92	3.08	3.21
12	2.40	2.73	3.00	3.23	3.43	3.60
14	2.55	2.92	3.23	3.50	3.73	3.94
16	2.67	3.08	3.43	3.73	4.00	4.24
18	2.77	3.21	3.60	3.94	4.24	4.50

稳定数计算结果见表 5。

表5 不同灰砂比充填体顶板稳定数计算结果

Table 5 Calculation results of roof stability number of filling body with different cement-sand ratios

充填料浆灰砂比	Q'值	稳定数 N	容许水力半径/m
1 : 2.5	85.24	85.24	13.15
1 : 3	63.97	63.97	11.95
1 : 4	24.05	24.05	8.13
1 : 6	20.18	20.18	5.65
1 : 8	6.03	6.03	4.38
1 : 10	4.46	4.46	4.02

综上所述,4种理论计算方法选取的参数不同,计算结果也存在一定差异,对整体结果进行综合分析,可以发现顶板安全厚度随着采场跨度以及安全系数的增加而增加,顶板安全厚度随着充填体强度增大而减少。

3 充填体结构及强度优化

充填体作为流态料浆进入采场,由于料浆属于高密度液体,充入采场后对四周特别是底部充填挡墙产生巨大压力,在实际充填过程中需通过分次分层充填,进而降低料浆的高压力作用^[25]。故在实际生产中空区内充填体会出现明显的层理面,属于结构弱面。实际生产中在底部揭露的情况下,由于明显的层理弱面作用,导致分层充填体之间黏结强度低,易出现层状垮冒现象,对以充填体作为直接顶板的采矿方式的安全生产影响很大。因此,需要进行充填料浆配比试验,以获得最佳的充填料浆配比。

3.1 充填料浆配比试验

根据室内测试,银漫矿业全尾砂的密度为 2.8 g/cm^3 ,尾砂粒径 $-74\ \mu\text{m}$ (-200 目)占 85.12% , $-37\ \mu\text{m}$ (-400 目)占 64.49% ,属于细尾砂。

选择矿区尾砂进行充填料浆配比试验,不同配比与强度之间的关系见图2,全尾砂坍塌度试验结果见表6。

试块强度随灰砂比提升、养护期龄的增长而提高,灰砂比为 $1:4$ 的料浆 28 d 强度超过 4 MPa ,灰砂比为 $1:2.5$ 的充填料浆 28 d 强度可达 6 MPa 以上。强度要求可以满足矿山实际需要。

根据表6料浆塌落度结果,充填料浆的流动性随着灰砂比的提高而逐渐降低,料浆黏度增加,泵送阻力增大,无法满足输送和采场流动性要求。结合矿山实际情况,充填料浆的塌落度值应在 $180\sim 250\text{ mm}$,扩散度以 $200\sim 500\text{ mm}$ 为宜,料浆灰砂比不

宜超过 $1:4$ 。

因此选择高强度充填体灰砂比为 $1:4$ 。

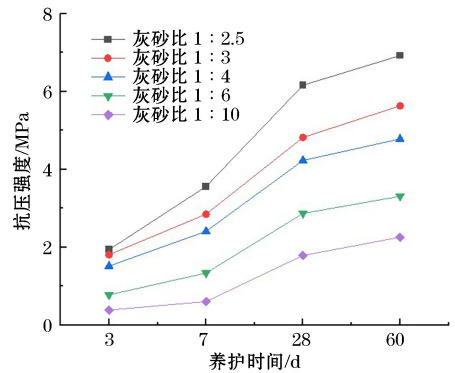


图2 不同配比充填料浆强度测试结果

Fig.2 Strength test results of filling slurry with different proportions

表6 塌落度测试结果

Table 6 Collapse test results

灰砂比	坍塌度/mm	扩散度/mm
1 : 2.5	76	209
1 : 3	124	254
1 : 4	186	322
1 : 6	211	481
1 : 10	246	442

3.2 充填体结构优化

为提升整体充填体强度,同时兼顾经济性,合理经济的采场充填结构至关重要。

充填体结构主要是以分层数和分层强度为主要设计内容。以下向进路为例,充填体作为直接顶板,某集团下向充填体采用的灰砂比为 $1:4$,且要求龄期 28 d 强度达到 5 MPa 以上,充填体分为3层,底层充填体中配合金属网+吊筋进行加固,上两层充填体强度与底部充填体强度一致。(中)深孔采矿方法的空区充填体也分为3层,底层高强充填体凝固形成高强承载结构支撑上部高度内的充填体压力,中间层采用低强度充填,降低充填成本以及限制围岩变形。顶层充填体采用高强度充填体,作为人员机械作业底板。

采用结构力学梁理论进行充填体结构优化,考虑顶板载荷以及充填体的力学物理参数:充填体的密度为 1800 kg/m^3 ,抗拉强度为 0.3 MPa ,通过式(3)与式(4)可以得到不同分段高度下不同跨度与顶板高强度充填体厚度的关系,计算结果见表7。

表 7 不同采场跨度下各分段充填体厚度

Table 7 The thickness of each section filling body under different stope spans m

跨度	充填体厚度			
	分段高度为 15 m	分段高度为 20 m	分段高度为 25 m	分段高度为 30 m
6	3.65	3.77	3.85	3.91
8	6.23	6.49	6.66	6.79
10	9.38	9.83	10.13	10.36
12	13.05	13.75	14.23	14.59
14	17.21	18.21	18.92	19.45
16	21.83	23.19	24.17	24.91
18	26.88	28.66	29.95	30.93

计算结果表明,随着分层高度增加,高强度充填体厚度也随之增加,同时顶板极限跨度也随之增加。再根据表 3 和表 7 的计算结果,可以获得充填体结构优化值,当分段高度为 20 m 时,其充填体结构见表 8。由表 8 可知,当采场跨度为 10 m 时,最上层厚度为 4 m,中间层厚度为 10 m,底层为 6 m,便可以满足顶板强度要求;当采场跨度为 12 m 时,最上层厚度为 5 m,中间层厚度为 6 m,底层为 9 m,才能满足顶板强度要求。

表 8 充填体各分层厚度

Table 8 The thickness of each layer of filling body m

采场跨度	充填顶板顶层厚度	充填顶板中间层厚度	充填顶板底层厚度
6	2	16	2
8	2	13	5
10	4	10	6
12	5	6	9
14	6	2	12

同时根据相关理论研究可知^[26],顶板均质性越好,材质强度越高,其稳定性越佳。故可对充填体结构进行调整:优化充填次数,减少分层弱面的形成,提升凝固后充填体整体稳定性;提高充填体浓度,降低充填滤水对充填体的弱化作用;优化高度内充填强度分布结构,提升上覆充填体稳定性。

首先,在底部构筑高强充填挡墙,并改变原有多次充填工艺,采用一次充填超出挡墙高度 2 m,底层充填采用灰砂比 1:4,28 d 强度 ≥ 4.0 MPa,待底层充填体凝固后,中部 10 m 采用一次充填,最后顶部采用高强度充填体一次充填。

4 数值模拟分析

借助 FLAC3D 数值模拟软件,模拟在宽大充填体顶板下回采的稳定性。整体模型如图 3 所示。矿体埋深范围为 140~320 m,厚度为 25 m。

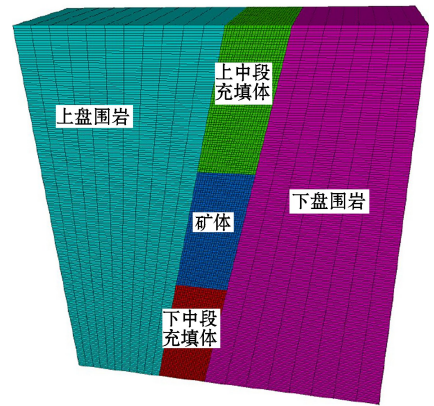


图 3 开采模型示意

Fig.3 Schematic diagram of the mining model

由于矿体埋深较浅,地表为内蒙古草原地层区,构造应力相对较小,故此处只考虑矿岩自重应力场的影响。同时根据前期矿区矿岩物理力学试验得出矿岩特性参数,见表 9。

由于未对充填体进行相关参数测试^[27],参照国内矿山充填体强度参数,选用类似强度的标准参数,28 d 强度 ≥ 1.5 MPa 充填体黏聚力为 0.70 MPa、内摩擦角为 31°;28 d 强度 ≥ 4.0 MPa 充填体黏聚力为 1.18 MPa、内摩擦角为 39°。

表 9 矿岩力学参数

Table 9 Ore and rock mechanical parameters

矿岩种类	密度/(t/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
上盘砂岩	2.69	34.98	0.20	10.12	24.07	30.22
矿体	2.90	60.00	0.20	17.13	20.86	55.00
下盘斑岩	2.62	58.72	0.20	21.95	37.19	29.75

根据矿区实际回采顺序进行开挖模拟,得到开挖后的主应力、位移以及塑性区分布情况,见图 4 至图 7。

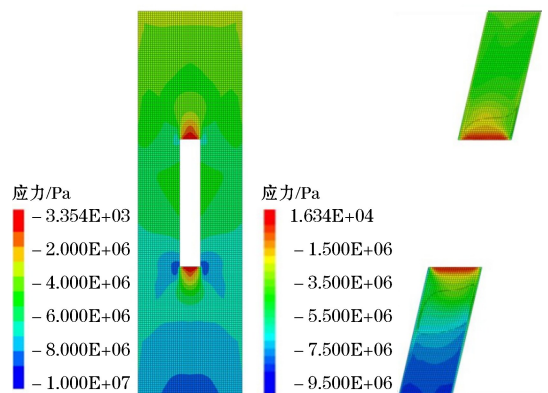


图 4 最大主应力云图

Fig.4 Maximum principal stress cloud diagram

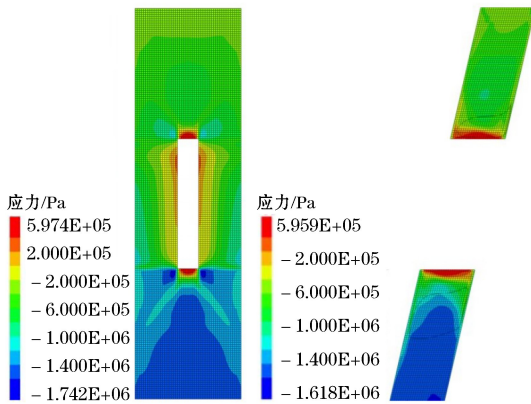


图5 最小主应力云图

Fig.5 Minimum principal stress cloud diagram

由图4、图5可知,在顶板处出现了拉应力,而矿岩与充填体在拉应力的作用下极易发生破坏。根据云图统计采场顶板拉应力分布情况,采场顶板出现拉应力的区域为0~4.1 m。

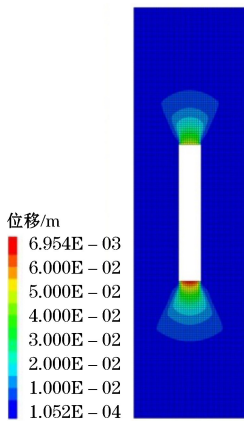


图6 位移变化云图

Fig.6 Displacement change cloud diagram

由图6可知,矿体开采完毕后变形主要发生在矿体顶底板处,其中以底板变形较为明显。

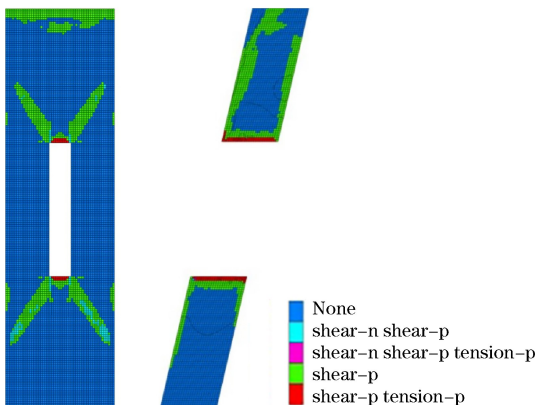


图7 塑性区分布云图

Fig.7 Plastic zone distribution cloud diagram

由图7可知,塑性区主要发生于顶底板处,采场顶板0~2 m深度内出现了剪切与拉张破坏,该区域易出现垮冒现象。顶板2~5 m深度内为历史剪切破坏,表示在回采过程中某个阶段达到了剪切破坏,若矿山采用一次充填,则充填体均质性较好,2~5 m发生垮冒的概率较小。

整体模拟结果表明,在10 m采场跨度下,使用本文提出的充填体结构作直接顶板,进行回采时,充填体整体稳定性较好,拉应力全部出现在高强度充填体区域,采用设计的充填方式,顶板垮冒风险较低。分别对12 m跨度和14 m跨度宽大充填体顶板下回采稳定性进行模拟,顶板出现拉应力的区域分别为0~6.2 m和0~7.9 m,都位于高强度充填体区域,稳定性较好,充填体设计可满足强度要求。

5 结论

(1) 通过4种理论计算方法获得充填体作顶板时的厚度要求,计算结果表明,顶板安全厚度与采场跨度以及安全系数呈线性正相关,顶板安全厚度与充填体强度呈线性负相关。当采场跨度为10 m时,顶板底部5~12 m采用28 d强度 ≥ 4 MPa的高强度充填体时可以满足理论计算要求。

(2) 开展了银漫矿业充填料浆配比试验,灰砂比为1:4的料浆28 d强度超4 MPa,但考虑充填料浆的流动性,灰砂比不宜超过1:4,最终选取高强度充填体的灰砂比为1:4。

(3) 基于结构力学梁理论进行了充填体结构强度设计,最终获得分段高度为20 m时顶板充填体各分层的厚度,并使用FLAC3D对10 m、12 m、14 m采场跨度下的回采稳定性进行模拟验证,设计的充填体强度与结构能满足开挖时的稳定要求,为宽大采场充填体顶板设计提供了参考。

参考文献(References):

- [1] 赵远,林雪丹,赵阳.某磷矿回采过程中顶板稳定性数值模拟研究[J].内蒙古煤炭经济,2023(6):9-11.
ZHAO Yuan, LIN Xuedan, ZHAO Yang. Numerical simulation study of roof stability during the recovery of a phosphate ore[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2023(6): 9-11.
- [2] 刘强,魏银鸿,王平,等.自然崩落法顶板稳定性监测分析与预警研究[J].中国安全生产科学技术,2021,17(8):91-96.
LIU Qiang, WEI Yinhong, WANG Ping, et al. Stability monitoring analysis and early warning of natural collapse roof[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(8):91-96.

- [3] 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 Fengyu, HE Rongxing, et al. Study on compressive strength of filling body after stage field[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(1): 163-169.
- [4] 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 Xiaoming, LI Changhong, ZHANG Lixin, et al. Parameter design and engineering optimization of cemented filling ratio in high stage[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(3): 580-586+593.
- [5] 闫至开,徐贞社,薛田喜,等.松散尾砂充填体下无预留顶层的顶柱回采方法[J].矿业研究与开发,2023,43(8):7-12. YAN Zhikai, XU Zhenshe, XUE Tianxi, et al. The headpillar mining method without reserved top layer under the loose tailings filling body [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(8): 7-12.
- [6] 王晓军,郭鹏,黄惟盛,等.多因素组合影响下向进路充填顶板稳定性计算[J].岩土力学,2022,43(12):3453-3462. WANG Xiaojun, GUO Peng, HUANG Weisheng, et al. Calculation of stability of downstream approach filling roof influenced by multi-factor combination [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12): 3453-3462.
- [7] 张东飞,亚呼甫·依布拉英,王斐,等.充填体荷载作用下金属矿山采空区顶板稳定性分析[J].能源与环保,2023,45(1):309-313. ZHANG Dongfei, YAHUPU Ibrahim, WANG Fei, et al. Analysis of roof stability of goaf in metal mines under the action of filling body load [J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(1): 309-313.
- [8] 刘大金,闻磊,石召龙.考虑地下水因素的矿山顶板安全厚度数值模拟研究[J].采矿技术,2022,22(3):60-63. LIU Dajin, WEN Lei, SHI Zhaolong. Numerical simulation study of the safety thickness of mine roof [J]. Mining Technology, 2022, 22(3): 60-63.
- [9] 刘轩廷,陈从新,刘秀敏,等.充填开采下顶板-间柱支撑体系的突变失稳分析[J].岩土力学,2021,42(9):2461-2471. LIU Xuanting, CHEN Congxin, LIU Xiumin, et al. Mutation instability analysis of the roof-interpillar support system under filling mining [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9): 2461-2471.
- [10] 徐恒,王贻明,吴爱祥,等.基于尖点突变理论的充填体下采空区安全顶板厚度计算模型[J].岩石力学与工程学报,2017,36(3):579-586. XU Heng, WANG Yiming, WU Aixiang, et al. Calculation model of safety roof thickness based on the tip mutation theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 579-586.
- [11] 黄昌富,田书广,吴顺川,等.基于突变理论和广义 H-B 强度准则的采空区顶板稳定性分析[J].煤炭学报,2016,41(增刊2):330-337. HUANG Changfu, TIAN Shuguang, WU Shunchuan, et al. Analysis of roof stability in goaf based on mutation theory and generalized H-B strength criteria [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(Sup.2): 330-337.
- [12] 陈万胜,王建国,白宏伟.基于灰色变权聚类模型的煤矿绿色矿山评价研究[J].煤炭经济研究,2021,41(8):38-43. CHEN Wansheng, WANG Jianwen, BAI Hongwei. Research on green mine evaluation of coal mine based on grey variable clustering model [J]. Coal Economic Research, 2021, 41(8): 38-43.
- [13] 蒋卫东,李夕兵,胡柳青,等.基于灰色定权聚类的采空区上部地表稳定性分析[J].矿冶工程,2002(4):15-17. JIANG Weidong, LI Xibing, HU Liuqing, et al. Analysis of surface stability of uppergoaf based on gray weight clustering [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002(4): 15-17.
- [14] 赵奎,王万银,曾鹏,等.胶结充填体顶板承载层厚度的尖点突变模型及其应用[J].金属矿山,2022(8):57-62. ZHAO Kui, WANG Wanyin, ZENG Peng, et al. The point mutation model of the thickness of cemented filling roof and its application [J]. Metal Mines, 2022(8): 57-62.
- [15] 曹定洋,尹升华,陈大鹏,等.下向进路式采场充填体顶板力学模型及稳定性分析[J].矿业研究与开发,2021,41(12):35-40. CAO Dingyang, YIN Shenghua, CHEN Dapeng, et al. Mechanical model and stability analysis of down-headope filling top [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(12): 35-40.
- [16] 况丹阳.破碎矿体下向进路胶结充填人工假顶强度需求研究[J].有色金属(矿山部分),2021,73(5):24-28. KUANG Danyang. Study on the strength of artificial false top in the downward approach of broken ore body [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(5): 24-28.
- [17] 郭鹏.下向分层进路充填体顶板破坏模式及失稳控制研究[D].赣州:江西理工大学,2023. GUO Peng. Study on the failure mode and instability control of the roof of the layered approach filling body [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023.
- [18] 高通.考虑分层面影响的下向进路胶结充填体力学特性及稳定性研究[D].昆明:昆明理工大学,2023. GAO Tong. Study on physical characteristics and stability of lower forward filling [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023.
- [19] 贾学元.下向进路式充填体侧帮片帮机理与控制研究[D].昆明:昆明理工大学,2022. JIA Xueyuan. Study on mechanism and control of down approach filling side sheet [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [20] 张海波,宋卫东,付建新.大跨度空区顶板失稳临界参数及稳定性分析[J].采矿与安全工程学报,2014,31(1):66-71. ZHANG Haibo, SONG Weidong, FU Jianxin. Large span empty area roof instability critical parameters and stability analysis [J]. Mining & Safety Engineering Journal, 2014, 31(1): 66-71.

- ZHANG Haibo, Song Weidong, Fu Jianxin. Critical parameters and stability analysis of roof instability in large span empty area [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 66-71.
- [21] 樊纯坛,梁庆国,岳建平,等.深埋水平层状围岩拱形隧洞顶板稳定性分析[J].长江科学院院报,2023,40(11):146-153.
FAN Chuntan, LIANG Qingguo, YUE Jianping, et al. Stability analysis of arch tunnel roof of deep buried horizontal layered surrounding rock[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(11): 146-153.
- [22] 卢西洲,王文杰,贾稳宏,等.大体积充填体下胶结充填法回采进路参数优化研究[J].矿冶工程,2022,42(5):20-25.
LU Xizhou, WANG Wenjie, JIA Wenhong, et al. Optimization of recovery approach parameters by massive filling[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(5): 20-25.
- [23] 王同旭,康正卿.叠层梁理论在复合顶板受力分析中的应用[J].矿业安全与环保,2022,49(6):7-12.
WANG Tongxu, KANG Zhengqing. Application of lambeam theory in the analysis of composite roof force[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(6): 7-12.
- [24] 刘光生,杨小聪,郭利杰.阶段空场嗣后充填体三维拱应力及强度需求模型[J].煤炭学报,2019,44(5):1391-1403.
LIU Guangsheng, YANG Xiacong, GUO Lijie. Three-dimensional arch stress and strength requirement model of stage filling body[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1391-1403.
- [25] 钟敏,谭宝会,张志贵,等.大面积胶结充填体下覆盖层安全高效形成方法研究[J].金属矿山,2021(6):108-114.
ZHONG Min, TAN Baohui, ZHANG Zhigui, et al. Study on the safe and efficient formation method of overlay under large area cemented filling body[J]. Metal Mines, 2021(6): 108-114.
- [26] 周可,张聪瑞,帅金山,等.复杂充填体下残矿回采方案优化研究[J].金属矿山,2017(12):14-20.
ZHOU Ke, ZHANG Congrui, SHUAI Jinshan, et al. Study on optimization of residual mining under complex filling[J]. Metal Mines, 2017(12): 14-20.
- [27] 李文辉.尾砂充填体下水平矿柱回采稳定性研究[D].赣州:江西理工大学,2023.
LI Wenhui. Study on the recovery stability of horizontal ore column under tailings fill body [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023.

Analysis and Research on the Stability of Filling Roof in Wide and Large Stope

LIAO Ning^{1,2}, WANG Wei³, LI Jinliang³, ZHANG Haiyun^{1,2}, ZHANG Pengfei³, ZHOU Li^{1,2}

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;

2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;

3.Xi Ujimqin Banner Yinman Mining Co., Ltd., Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia 026217, China)

Abstract: The popularization and application of the filling mining method have innovated the underground mining mode and pillar mining mode of metal mines, and improved the safety and recovery rate of resources. However, for the mining of the top pillar resources in the wide and large stope, it is often necessary to set a certain thickness of the top pillar to maintain the stability of filling body, resulting in resources waste. Therefore, the stability of filling roof in wide and large stope was studied. Through the theoretical calculation of roof stability, combined with the slurry ratio test of filling body, the roof structure optimization and strength design were studied. The roof structure and strength requirements of filling body under different spans at 20 m sublevel height were obtained, and FLAC3D was used for simulation verification. The simulation results show that using the designed filling body as the direct roof of the medium-deep hole stope has a good stability and can meet the strength requirements. The research results can provide a reference for the design of filling roof in wide and large stopes.

Key words: Filling roof, Safe thickness, Backfill strength, Numerical simulation