

空场嗣后充填体稳定性分析与带式充填结构设计*

王谦源¹, 袁庆盟², 林敏³, 王海龙⁴

(1. 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛市 266033;

2. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 511400;

3. 安徽庐江龙桥矿业股份有限公司, 安徽 合肥 231551;

4. 青岛理工大学创新科技有限公司, 山东 青岛市 266033)

摘要:针对中段矿房嗣后充填体的稳定性缺乏系统研究、充填体强度设计主要依靠经验和工程类比的现实问题,为提高嗣后充填体强度设计水平,根据某铁矿充填采矿实际,测定了不同充填配比的充填体力学参数,建立了连续7个矿房的大范围嗣后充填分析模型。通过数值模拟研究,获得了各步开采后一步骤充填体塑性区、应力、变形分布情况,并计算了充填体潜在滑移面的位置及演化规律,结果表明:一步骤充填体的失稳破坏部位主要在下部、腰部和顶部接顶区。对此,提出了带式充填结构设计,即嗣后充填不需要采用均质充填强度,应重点加强上、中、下三个薄弱部位,其他充填区可用较低强度充填。分析表明:这种带式充填结构的整体稳定性好,并可较大幅度地降低充填成本。

关键词:充填体强度;中段采矿;嗣后充填;带式充填结构;数值模拟

中图分类号:TD853 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)06-0026-08

0 引言

两步骤中段或称阶段嗣后充填采矿法是随着VCR采矿法的应用和充填采矿技术的发展,于20世纪90年代前后出现的一种高效充填采矿法^[1]。由于其具有高效率、大产能、充填成本相对较低等特点,在矿岩中等稳定以上的厚大矿体开采中得到广泛应用,矿房充填高度也从最初的五六十米发展到一百多米^[2-3]。一步骤嗣后充填体的强度设计是阶段空场嗣后充填采矿设计的关键,它直接关系到充填成本和二步骤矿房的回采安全^[4]。

公式法是最常用的充填体强度设计法,包括蔡嗣经验公式、太沙基公式和基于岩石力学楔体滑

移稳定平衡理论的托马斯(Thomas)模型、卢平修正公式等^[5-8]。随着人们认识水平的不断提高,近年来又出现了一些考虑更多影响因素、表达也更为复杂的充填体强度计算公式^[9-11]。公式法简单,但假设条件和考虑因素很难反映实际,同一工程问题的不同公式计算结果也往往相差较大,难以普遍采用。

随着计算水平的不断提高,数值模拟开始应用于充填体强度设计^[12-13]。但数值模拟结果的可靠性依赖于工程模型的简化和岩石力学参数取值,这种简化程度与取值的范围又对计算结果影响很大。因此实际应用的充填体强度主要还是来源于“经验”和“类比”,一般偏于保守。

近年来,由于成本控制和安全生产的双重压力,推动了充填体合理强度设计的研究工作,出现了工程类比与数值模拟相结合的充填体强度设计方法^[14-15],并开始关注和研究充填矿房宽度、高度、充填体强度和充填体稳定之间的关系。充填矿房的宽度、高度和强度不仅影响充填体的整体稳定性,而且有影响“拐点”^[16],可依此确定合理的矿房尺寸或充填体强度。充填体的动态抗压强度也开始受到重视^[17-19]。

实际上,一步骤充填体的稳定性是一种类似“压杆”的“自立”性结构稳定问题,但这种结构的失稳机理和控制因素还未引起人们足够的重视,缺乏系统的研究。本文结合安徽某铁矿实际,通过建立尽可能反映实际的工程模型和实测的充填体强度参数,对一步骤充填体的稳定性和控制因

* 收稿日期:2024-04-02

作者简介:王谦源(1956—),男,山东五莲人,硕士,二级教授,主要从事矿山充填技术、地压控制、矿山充填胶凝材料等方面的研究工作,
E-mail:qdwqyuan@sina.com。

素进行数值模拟分析,获得了充填体失稳破坏的基本规律。在此基础上,提出一种带式充填结构,并验算其先进性。

1 工程背景与计算模型

1.1 工程背景

某铁矿设计规模 300 万 t/a。矿体倾角为 $15^\circ \sim 20^\circ$,最大为 30° ;矿体厚度为 2.73~43.27 m,平均为 16.22 m;采用分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法,中段高为 50 m。设计沿矿体走向每 100 m 划分为一个盘区,盘区宽为矿体的水平宽度,高为矿体垂直高度,盘区矿柱宽 15 m;采场沿走向布置,长度为 85 m,宽度为 15 m,凿岩分段高度为 12.5 m,两步骤回采和充填。采用全尾砂胶结充填,一步充填体 28 d 强度要求大于 2.0 MPa。

1.2 计算模型

从一个中段的盘区矿块布置中依次选取 7 个矿房,采用 FLAC3D 分析软件,按平面应变问题处理,进行一步充填体稳定性的数值模拟研究。

取矿体垂直高度为 50 m,倾角为 17.5° ,计算区域埋深取 400 m。矿房宽度为 15 m,自左向右依次编号 1#~7# 矿房。模型尺寸高 300 m,宽 305 m,网格划分如图 1 所示。矿房区域网格尺寸为 0.1~0.5 m,边缘网格尺寸取 10 m,模型共包括 42 912 个网格,42 586 个节点。

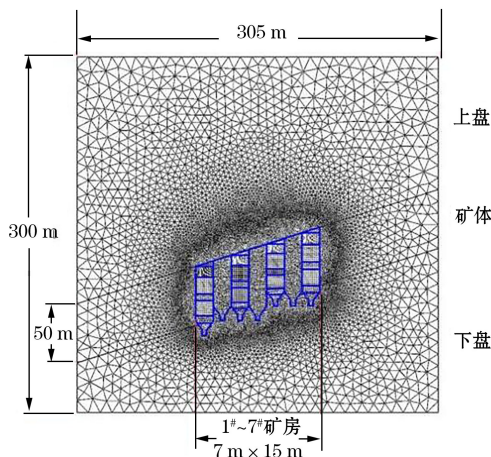


图 1 计算模型网格剖分

Fig.1 Calculation model mesh generation diagram

为避免二步骤矿房回采时出现一步充填体两侧临空的不利情况,以上 7 个矿房至少需要分三步进行回采和充填,见表 1。

表 1 回采和充填计算步骤

Table 1 Calculated steps of mining and filling

工况	矿房和充填体						
	1	2	3	4	5	6	7
一步回采	√	矿体	√	矿体	√	矿体	√
一步充填	一充	矿体	一充	矿体	一充	矿体	一充
二步回采	一充	√	一充	矿体	一充	√	一充
二步充填	一充	二充	一充	矿体	一充	二充	一充
三步回采	一充	二充	一充	√	一充	二充	一充
三步充填	一充	二充	一充	三充	一充	二充	一充

注:“√”表示回采,“一充”“二充”“三充”分别是一、二、三步骤充填体。

2 充填体力学性质实测与岩体参数取值

2.1 充填体力学性质实测

根据现场实际制浆与自流输送能力,取充填料浆质量浓度 62%,灰砂比分别为 1:6, 1:8, 1:10, 1:12 和 1:15,检测了固化充填体的抗拉强度 σ_t 、抗压强度 σ_c 、弹性模量 E 、泊松比 μ 、内聚力 c 、内摩擦角 φ 等力学性质。

抗拉强度采用巴西劈裂法检测,制作的圆盘试块直径为 100 mm、厚度为 50 mm;其他力学性质检测采用直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱型试块。

弹性模量 E 、泊松比 μ 采用电测法检测,即通过在试块轴向和横向粘贴应变片,用应变仪检测出应变后,再根据应力-应变曲线得到 E 、 μ 值。

c 、 φ 值检测则采用了高压温控静三轴试验测试系统。试验获得不同围压下的试块抗压强度之后,通过莫尔圆与强度包络线简化得到 c 、 φ 值,图 2 是其中一组数据的处理结果,检测与数据处理结果汇总见表 2。

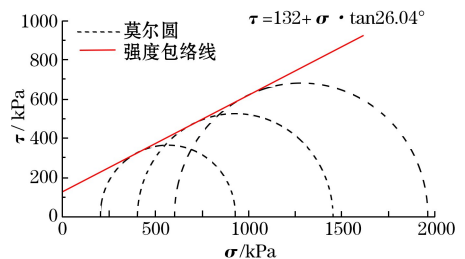


图 2 莫尔圆与强度包络线

Fig.2 Mohr circle and strength envelope

表 2 不同灰砂比的充填体力学性质检测结果

Table 2 Test results of mechanical properties of filling body with different cement-sand ratios

灰砂比	σ_c /MPa	σ_t /MPa	E /MPa	μ	c /MPa	φ /($^\circ$)
1:6	2.9	0.21	850	0.26	0.39	27.9
1:8	2.5	0.19	700	0.25	0.27	27.2
1:10	1.9	0.15	550	0.24	0.18	26.5
1:12	1.5	0.10	450	0.25	0.13	26.0
1:15	1.0	0.05	400	0.25	0.08	25.4

2.2 岩体参数取值

计算模型范围内,矿体与盘区围岩的力学参数参照矿山地质报告和有关前期研究成果取值;不同灰砂比的充填体力学参数参照表 2 的实测结果取值,有关结果见表 3。

表 3 岩石力学参数取值

Table 3 Rock mechanics parameters

岩体材料	强度/MPa	灰砂比	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	E/GPa	μ	c/MPa	$\varphi/(\text{°})$	σ_t/MPa
上盘	—	—	2700	38	0.18	25	30	4.74
矿体	—	—	3980	22	0.25	13	25	3.20
下盘	—	—	2800	37.5	0.25	30	32	5.22
充填体	2.5	1:6	1830	0.85	0.25	0.52	27.3	0.09
	2.0	1:8	1830	0.70	0.25	0.44	26.8	0.08
	1.5	1:10	1830	0.55	0.25	0.36	26.1	0.07
	1.2	1:12	1830	0.45	0.25	0.31	25.7	0.06
	0.7	1:15	1830	0.40	0.25	0.23	25.1	0.05
	0.5	1:18	1830	0.32	0.25	0.15	24.2	0.04

3 均质充填模型计算与分析

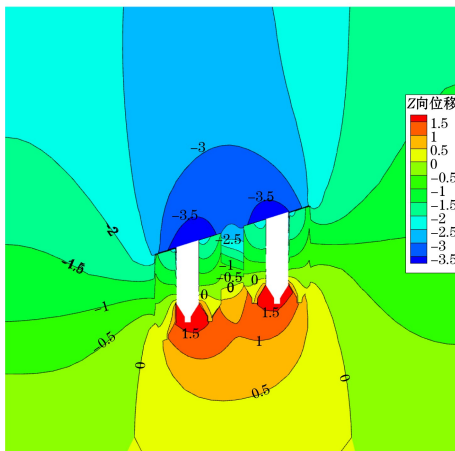
矿房充填按均质充填体考虑。二步骤矿房充填体强度取 0.5 MPa,一步骤矿房充填体强度有 2.0 MPa(A1)和 1.5 MPa(A2)两个分析方案,并均考虑 20 mm 的充填不接顶距离。因两个方案的变形、应力等规律基本相同,除特别声明外,以下分析主要以 A1 方案为例。

3.1 位移与变形

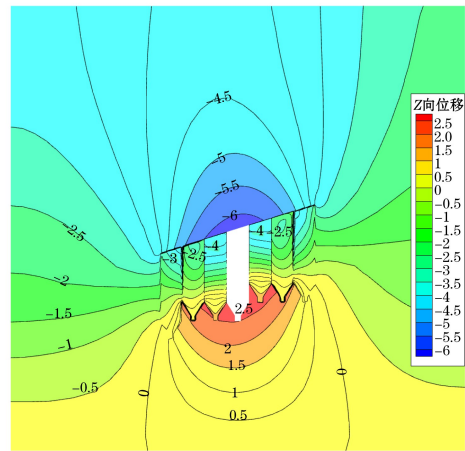
图 3 和图 4 分别是二、三步回采后计算模型的竖向和横向位移云图,分析得到以下结论。

(1) 各步回采后,顶板位移有局部拱形和区域拱形的特点;中间矿房最后回采后,7 个矿房顶板位移呈现整体拱形;顶板下沉的同时伴随底鼓现象。

(2) 第一到第三步回采后,新产生的顶板最大下沉量分别为 17.2 mm、12.7 mm 和 36.5 mm。



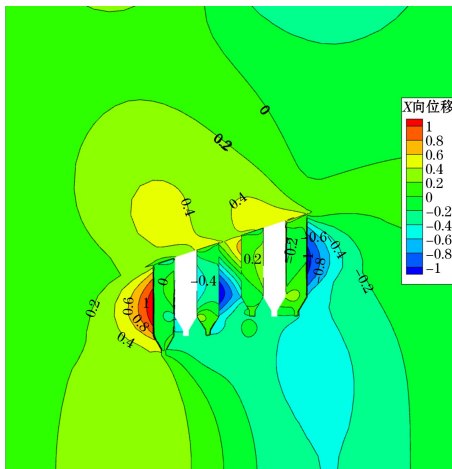
(a) 二步回采后竖向位移



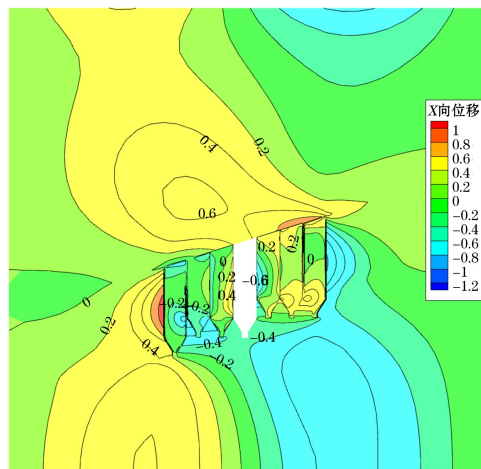
(b) 三步回采后竖向位移

图 3 不同回采步骤的竖向位移云图(单位:mm)

Fig.3 Vertical displacement cloud diagram of different mining steps (Unit: mm)



(a) 二步回采后横向位移



(b) 三步回采后横向位移

图 4 不同回采步骤的横向位移云图(单位:mm)

Fig.4 Lateral displacement cloud diagram of different mining steps (Unit: mm)

(3) 充填体中部临空一侧有鼓起现象,3[#] 矿房充填体二步回采后鼓起量为 7.1 mm,三步回采后鼓起量为 10.5 mm。

3.2 塑性区与应力分布

重点分析二步回采,即完成一步回采和充填,回采 2[#]、6[#] 两个二步骤回采的矿房后,考察一步骤矿房充填体的塑性区和应力分布。

塑性区云图见图 5,3[#] 矿房的竖向应力与拉应力云图见图 6。

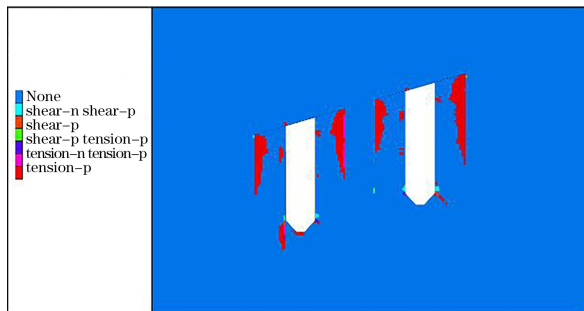
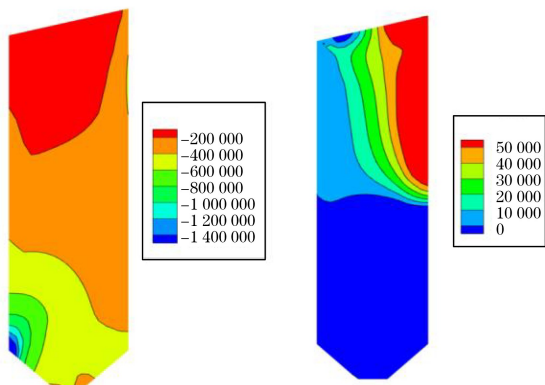


图 5 一步骤充填体二步回采后塑性区云图

Fig.5 One-step filling body two-step post-mining plastic zone cloud map



(a) 竖向应力分布

(b) 拉应力分布

图 6 二步骤回采后 3[#] 矿充填体竖向应力与拉应力云图(单位:Pa)

Fig.6 Vertical stress and tensile stress contour of filling in No.3 mine after two-step mining (Unit: Pa)

从图 6 可以看出,塑性区主要由拉应力(tension-p,tension-n)构成,而且主要在一步骤充填体的上部内侧,剪切塑性区很小,可忽略;最大压应力发生于下部外侧,约 1.0 MPa,略大于自重应力 0.93 MPa;但在充填体的内侧上半部,出现了数值很小(均小于 0.1 MPa)的拉应力,这显然说明,上部充填体有外倾趋势。

计算分析表明:三步回采后,相邻的 3[#]、5[#] 两个一步骤矿房充填体的竖向压应力呈现较好的均布状态,最大压应力也在下部,约为 1.0 MPa;在顶部接顶区外侧出现拉应力区,但数值也不大。临空侧最大拉应力为 0.08 MPa,位于顶部,平均拉破坏范围约为 0.35 m。

3.3 潜在滑移面与安全系数

用强度折减法研究了二步回采后一步骤充填体的潜在滑移面演化,截取的部分塑性区演化过程云图见图 7。观察图 7 可知,塑性区滑移面有如下演化规律:

(1) 破坏首先从充填体的上下隅角开始,然后向内扩展;

(2) 随着塑性区由内隅角向充填体中部延伸,塑性区开始在腰部临空侧汇合;

(3) 中间未采矿房(4[#])两侧的两个一步骤充填体滑移面分别从临空侧上下向内扩展,在 4[#] 矿体内连通,形成剪刀型滑移面。

分析潜在滑移面的同时,计算得到二步回采后的安全系数:方案 A1 的安全系数为 1.87;方案 A2 的安全系数为 1.69。

4 带式结构充填体的稳定分析

4.1 理论依据与设计方案

根据上述计算分析可以发现,一步骤矿房充填体可能发生破坏的部位主要有 3 个。

(1) 充填体底部外侧:最大压应力的部位,特别在顶板下沉位移较大,产生的附加应力较大时,可能因抗压强度不足而发生破坏。

(2) 充填体腰部:横向鼓起变形较大,也是潜在滑移面的交汇点,在充填体高宽比较大时,可能导致充填体失稳破坏。

(3) 充填体顶部接顶区:由于充填体有外倾趋势而易产生拉应力的部位。也由此可知,充填接顶十分重要:若接顶不好,充填体易发生楔形垮落;只有接顶充分,才会对充填体外倾失稳产生较大限制。

由此可得出:一步骤矿房充填体不必采用均质强度充填,可采用变强度带式充填结构,重点加强薄弱部位。基于这一认识,设计了 2 个三带三区变强度带式充填结构方案,计算模型见图 8,计算方案见表 4。

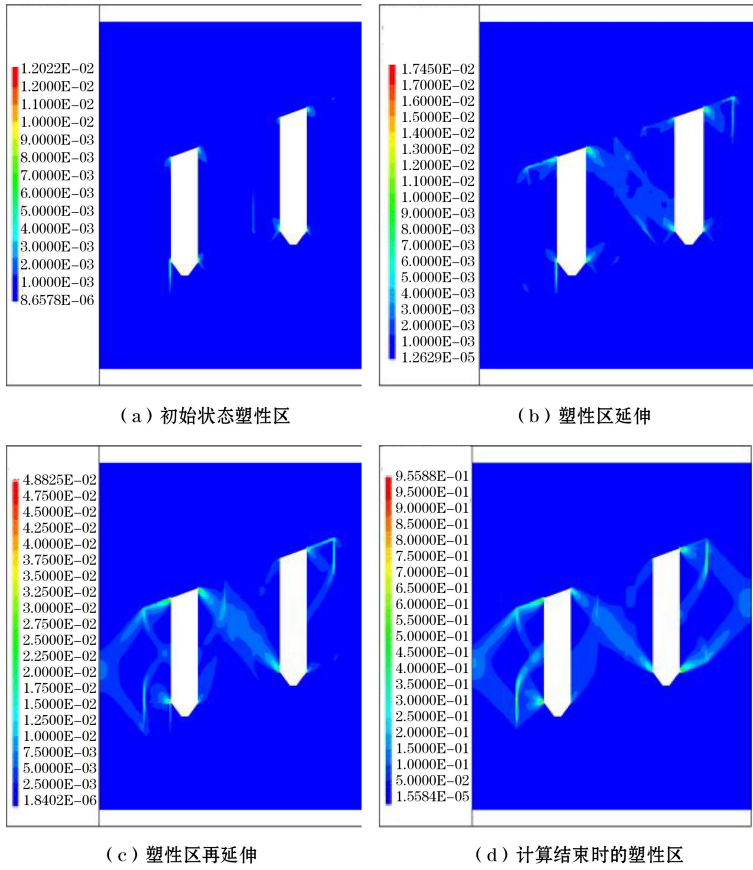


图 7 均质充填结构潜在滑移面演化云图

Fig.7 Contour of potential slip surface of homogeneous filling structure

表 4 带式充填计算方案

Table 4 Belt filling calculation schemes

计算方案	带区划分及设计强度/MPa					
	堑沟充填区 0~9 m	下部加强带 9~14 m	下部充填区 14~25 m	腰部加强带 25~30 m	上部充填区 30~42 m	顶部加强带 42~50 m
B1	0.7	2.0	1.2	2.0	1.2	2.0
B2	0.7	2.0	1.2	2.5	1.2	2.5

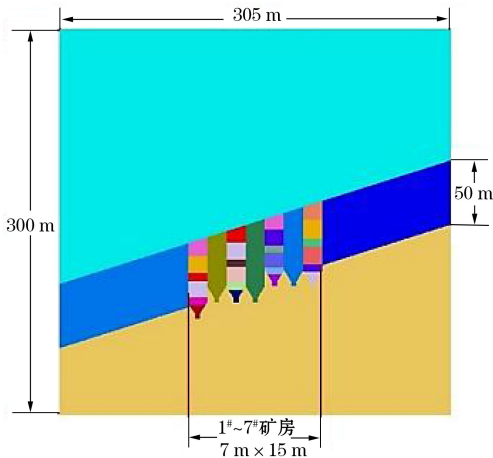


图 8 三带三区变强度充填结构示意

Fig.8 Three zones three areas variable strength filling structure diagram

以下分析除特别声明外,主要给出 B1 方案的计算结果。

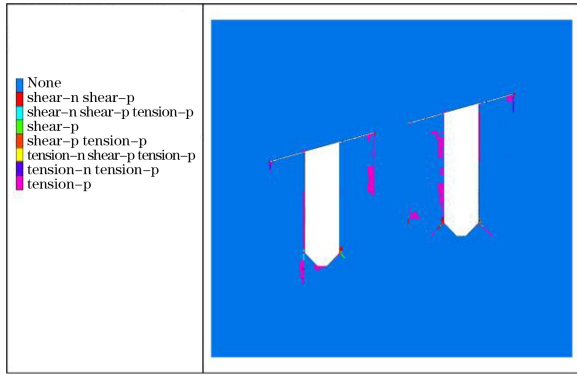
4.2 塑性区、应力分布与变形

图 9(a)是二步回采后一步骤矿房充填体的塑性区云图,比较图 5 可见,塑性区的分布大致相似,但程度明显减弱,且不连续,表明高强度加强带打断了均质充填塑性区的联系,特别是充填体背部拉应力破坏区明显变小,这可能是上部加强带抗拉强度的提高发挥了重要作用。

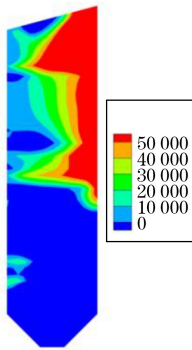
二步回采后 3# 矿房充填体的拉应力云图见图 9(b)。比较图 6(b)可见,拉应力区的分布明显不同。虽然拉应力区仍在充填体内侧上部,但中部和

带式充填结构由高强度充填带和低强度充填区组成,两个方案的低强度充填区相同,主要差别在于高强度充填带的强度不同,B1 方案的强度为 2.5 MPa,B2 方案的强度为 2.0 MPa。

腰部的加强带明显承受了较多的拉应力,上部低强度充填体的拉应力区则变小。最大拉应力为 0.07 MPa,小于 A1 均质充填方案的 0.08 MPa,大于 A2 方案的 0.06 MPa;平均拉破坏范围为 13 cm,与方案 A1 和 A2 的计算结果(17 cm、19 cm)相比,分别减小了 23.5%和 31.6%。注意到 B1 方案的加强带强度与均质充填 A1 方案相同,可见带式充填结构改变了应力分布,有利于整体稳定。



(a) 带状充填体塑性区云图



(b) 带状充填体拉应力区云图

图 9 带状充填体塑性区云图和拉应力区云图(B1 方案)(单位:Pa)

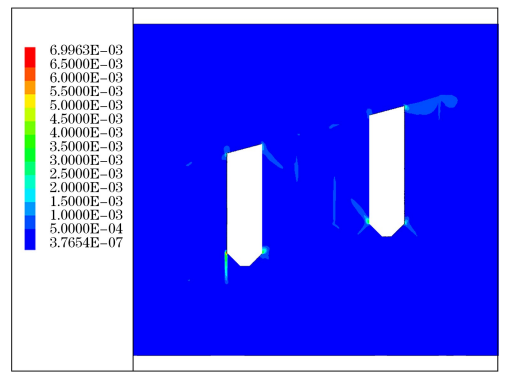
Fig.9 The plastic zone cloud and the tensile stress zone cloud of the strip filling body (B1 scheme) (Unit: Pa)

分析表明:带式充填结构的竖向应力分布基本与均质充填相同,不再赘述。

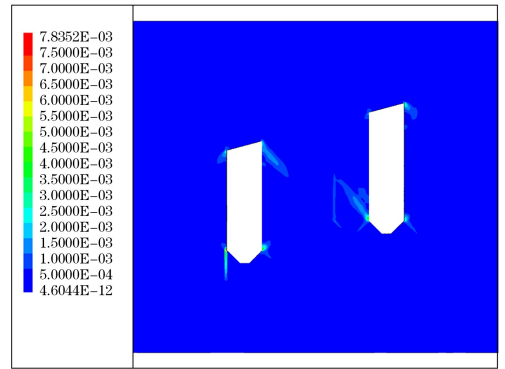
变形分析表明:带式充填结构的最大竖向变形比均质充填略有减小,而 3[#] 矿房充填体三步回采后的最大腰鼓突出位移为 8.3 mm,比 A1 方案的 10.5 mm 减少了 21%,可见带式充填结构的整体稳定性得到提高。

4.3 潜在滑移面与安全系数

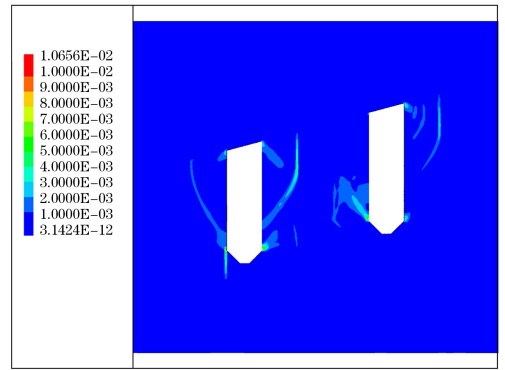
利用强度折减法获得的二步回采后带式充填结构潜在滑移面演化云图见图 10。对照图 7 可见:虽然破坏仍然从充填体的上下隅角开始,但扩展方式和结果有所不同:



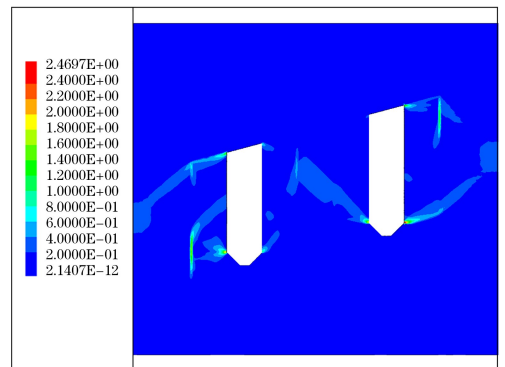
(a) 初始状态塑性区



(b) 塑性区延伸



(c) 塑性区再延伸



(d) 计算结束时的塑性区

图 10 带式充填结构潜在滑移面演化(B1 方案)
Fig.10 Potential slip surface evolution of belt filling structure (B1 scheme)

(1) 先从充填体的临空侧下隅角开始,在充填体内向内、向上扩展,再从上部隅角向内,向下发展;

(2) 3[#]、5[#] 充填体和 4[#] 未采矿体的贯通趋势明显减弱,并且滑移线的位置有所改变,可见带式充填结构的加强带对潜在滑移面路径有影响,产生了阻力作用。

同样的,利用强度折减法获得了 B1、B2 两个带式充填结构方案的安全系数:分别为 2.06 和 2.34。

A1、A2 均质充填方案的两个安全系数分别为 1.87 和 1.69,而 B1 方案的加强带强度和 A1 方案非常接近,虽然充填区强度略有下降,但整体安全系数却比 A1 高,可见带式充填结构的整体稳定性优于均质充填。

5 结论

(1) 连续 7 个矿房的二步骤充填回采分析表明:各步回采后的顶板下沉位移呈局部与整体拱形形式,反映出了覆盖围岩应力转移现象。实际开采中要十分重视充填回采顺序,避免出现一步骤充填体两侧临空和最后回采矿房承载过大的现象。

(2) 一侧有未采矿体的二步骤矿房回采后,一步骤矿房充填体的破坏部位主要有 3 个:下部、腰部和顶部。下部可能因压应力过大而破坏,中部是由于产生较大的腰鼓变形,上部则是由于充填体有外倾趋势而容易产生拉应力,也由此说明充填接顶十分重要。

(3) 根据发现的一步骤充填体失稳破坏部位,提出了一种带式结构充填模型,即在易于发生破坏的部位,采用高强度充填,其他充填区则可采用较低的强度。

(4) 针对研究矿山实际,设计了 2 套三带三区充填结构方案。数值模拟分析表明:带式充填结构的拉应力区范围显著降低;中部横向腰鼓变形量明显变小;整体安全系数则显著提高,显示了良好的优化结构效应。经济分析表明:若将带式充填结构 B2 方案替代均质充填方案 A1,高性能胶凝材料的使用量可减少 13.6%,经济效益可观,而且稳定性更好。

参考文献(References):

[1] 刘念苏.金属矿床开采[M].北京:冶金工业出版社,2012.
LIU Niansu. Mining of Metal Deposits [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.

[2] 方向.地下矿山高阶段采场回采工艺技术研究[J].有色金属(矿山部分),2010,62(4):1-2.
FANG Xiang. Research on stoping technology of high-level stope in underground mine [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2010, 62(4): 1-2.

[3] 张洪海,路文智,江宁.大直径深孔(高)阶段空场嗣后充填采矿方法改进实践[J].中国矿山工程,2020,49(6):25-28.
ZHANG Honghai, LU Wenzhi, JIANG Ning. Improvement and practice of the large-diameter long-hole (high) level open-stoping with filling [J]. China Mine Engineering, 2020, 49(6): 25-28.

[4] YANG Zhiqiang, ZHAI Shuhua, GAO Qian, 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] 蔡嗣经. 矿山充填力学基础[M].北京:冶金工业出版社,1994.
CAI Sijing. Fundamentals of Mine Filling Mechanics [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.

[6] 卢平.胶结充填矿柱强度的设计[J].江西有色金属,1990(2):48-53.
LU Ping. Design of strength of cemented fill pillars [J]. Jiangxi Nonferrous Metals, 1990(2): 48-53.

[7] 蔡嗣经.胶结充填材料的强度特性与强度设计(I):胶结充填体的强度设计[J].南方冶金学院学报,1985(3):39-46.
CAI Sijing. Strength characteristics and designing of cemented hydraulic fill (I): designing of strength of cemented fill [J]. Journal of Southern Institute of Metallurgy, 1985(3): 39-46.

[8] BELEM T, BENZAAZOUA M. Design and application of underground mine paste backfill technology [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 26 (2): 147-74.

[9] 王俊,乔登攀,韩润生,等.阶段空场嗣后充填胶结体强度模型及应用[J].岩土力学,2019,40(3):1105-1112.
WANG Jun, QIAO Dengpan, HAN Runsheng, et al. Strength model of cemented backfill in subsequent filling at the stage of open stope and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 1105-1112.

[10] 房智恒.阶段空场嗣后充填胶结充填体力学强度模型研究[J].中国钨业,2019,43(6):22-29.
FANG Zhiheng. Mechanical strength model of cemented backfill pill for stage empty field subsequent filling mining method [J]. China Molybdenum Industry, 2019, 43 (6): 22-29.

[11] 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 Xiaocong, GUO Lijie. Models of three-dimensional arching stress and strength requirement for the backfill in open stoping with subsequent backfill mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44 (5): 1391-1403.

[12] QI Chongchong, FOURIE A. Numerical investigation of the stress distribution in backfilled stopes considering creep behaviour of rock mass [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(9): 3353-3371.

- [13] GUO Lijie, LIU Guangsheng, YANG Xiacong. Models of three-dimensional arching stress and strength requirement for the backfill in open stoping with subsequent backfill mining [J]. Journal of the China Coal Society, 2019, 44: 1391-1403.
- [14] 李再易,尹丽冰,孙远江,等.某矿充填体合理强度研究[J].采矿技术,2024,24(1):174-179.
LI Zaiyi, YIN Libing, SUN Yuanjiang, et al. Research on the reasonable strength of a certain mining fill body [J]. Mining Technology, 2024, 24(1): 174-179.
- [15] 莫静,曹易恒,田长林,等.不同矿体厚度二步骤空场嗣后充填采场宽度优化研究[J].采矿技术,2023,23(6):180-186.
MO Jing, CAO Yiheng, TIAN Changlin, et al. Optimization of the width of a two-step open-pit with subsequent filling under different ore body thicknesses [J]. Mining Technology, 2023, 23(6): 180-186.
- [16] 王作鹏,金爱兵,庞如顺,等.基于主成分分析法的嗣后充填采场矿柱及充填体强度研究[J].矿业研究与开发,2023,43(3):45-52.
WANG Zuopeng, JIN Aibing, PANG Rushun, et al. Study on pillar width and backfill strength of subsequent filling
- stope based on principal component analysis [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(3): 45-52.
- [17] 郭陈响,朱建国,刘恩彦,等.动态冲击下龄期较短充填体的力学特性研究[J].黄金,2024,45(1):6-11.
GUO Chenxiang, ZHU Jianguo, LIU Enyan, et al. Study on mechanical characteristics of shortage backfill under dynamic impact [J]. Gold, 2024, 45(1): 6-11.
- [18] 王小林,梅佳伟,郭进平,等.基于 CSSA-BPNN 模型的胶结充填体动态抗压强度预测[J].有色金属工程,2024,14(2):92-101.
WANG Xiaolin, MEI Jiawei, GUO Jinping, et al. Prediction of dynamic compressive strength of cemented backfill based on CSSA-BPNN model [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(2): 92-101.
- [19] 薛田喜,徐鸿鹏,张旭飞,等.进路式采矿爆破振动波在充填体内的传播规律研究[J].矿业研究与开发,2023,43(7):42-49.
XUE Tianxi, XU Hongpeng, ZHANG Xufei, et al. Study on propagation law of blasting vibration waves in filling body during drift mining [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(7): 42-49.

Stability Analysis on Subsequent Filling Body in Open Field and Design of Belt Filling Structure

WANG Qianyuan¹, YUAN Qingmeng², LIN Min³, WANG Hailong⁴

(1.School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;

2.Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 511400, China;

3.Anhui Lujiang Longqiao Mining Co., Ltd., Hefei, Anhui 231551, China;

4.Qingdao Polytechnic University Innovation Technology Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266033, China)

Abstract: The stability of the subsequent filling body in the mid-segment mining of the rooms lacks systematic research, and the strength design of the filling body mainly relies on experience and engineering analogy. In response to this issue, in order to improve the strength design level of the subsequent filling body, the mechanical parameters of the filling body with different filling ratios were measured based on the actual filling mining of a certain iron mine, and a large-scale subsequent filling analysis model for evaluating consecutive backfill operations across seven mine rooms was established. Through numerical simulation research, the plastic zone, stress, and deformation distribution of the first-step filling body after each mining step were obtained, and the position and evolution law of the potential sliding surface of the filling body were calculated. The results show that the instability and failure of the filling body in the first step occurs in the lower sections, around the midsection, and near the ceiling. In this regard, a belt filling structure design was proposed, which means that subsequent filling does not require the use of homogeneous filling strength, and should focus on strengthening the upper, middle, and lower weak areas, while other filling areas can be filled with a lower strength. Analysis shows that this belt filling structure has a good overall stability and can significantly reduce filling costs.

Key words: Strength of the filling body, Mid-segment mining, Subsequent filling, Belt filling structure, Numerical simulation