基于散体侧压力理论的多口放矿下矿石结拱研究*

孙爽，温彦良，赵江东，付志勇

（辽宁科技大学 矿业工程学院， 辽宁 鞍山市 114051）

摘要：在地下矿山生产中常采用多放矿口出矿方式，而且在放矿过程中往往存在明显的结拱现象。为探究多口放矿对散体矿石结拱的影响，基于散体侧压力理论，采用散体颗粒流动侧压力测试系统，在单口、双口及三口放矿条件下开展了物理相似模拟试验，获得不同出矿方式和装填高度下的散体矿石侧压力分布规律，进而分析矿石结拱现象。研究结果表明，装填高度为75 cm时，三口放矿下矿石结拱现象较明显，且结拱强度最高；结拱的位置受放矿方式的影响较小，明显的结拱现象大多发生在距离放矿口上方55 cm处。在三口放矿条件下，装填高度会进一步影响结拱的生成和发生位置。装填高度为85 cm时，明显结拱发生于距离放矿口上方55 cm和75 cm处，且下方区域矿石有结拱趋势；装填高度增加到95 cm时，明显结拱发生区域向下延伸。

关键词：多口放矿；矿石结拱；装填高度；侧压力；相似模拟试验

中图分类号：TD853.36 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)12-0041-07

Study on Ore Arching Under Multi-Outlet Ore Drawing Based on the Theory of Lateral Pressure of Granular Materials

SUN Shuang, WEN Yanliang, ZHAO Jiangdong, FU Zhiyong

(School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China)

Abstract: Multi-outlet ore drawing method is commonly adopted in underground mine production, and there is often an obvious arching phenomenon during the ore drawing process. To investigate the influence of multi-outlet ore drawing on the arching of granular ores, based on the theory of lateral pressure of granular materials, a lateral pressure testing system for granular material flow was used to conduct physical similarity simulation experiments under single-outlet, double-outlet, and triple-outlet ore drawing conditions. The distribution laws of lateral pressure of granular ores under different ore drawing methods and filling heights were obtained, so as to further analyze the ore arching phenomenon. The research results show that when the filling height is 75 cm, the ore arching phenomenon under triple-outlet ore drawing is relatively obvious, and the arching strength is the highest. The location of arching is less affected by the ore drawing method, and obvious arching phenomena mostly occur at 55 cm above the ore outlet. Under the condition of triple-outlet ore drawing, the filling height further affects the formation of arching and the location of its occurrence. When the filling height is 85 cm, obvious arching phenomena occur at 55 cm and 75 cm above the ore outlet, and the ore in the lower area shows a tendency for arching. When the filling height increases to 95 cm, the area where obvious arching phenomena occur extends downward.

Key words: Multi-outlet ore drawing, Ore arching, Filling height, Lateral pressure, Similarity simulation test

0 引言

崩落采矿法因其低成本、高效率和较高的安全性，被广泛应用于国内外地下矿山的开采[1]。对于采用崩落法的深部矿山，采场底部结构所承受的负载明显大于浅部采场，因此需要选择合理的采场结构参数，如采场分段高度、放矿口尺寸和放矿口间距。放矿方式直接影响着崩落矿岩移动规律，从而对采场结构的稳定性和矿石损失与贫化产生重要影响。多口放矿作为崩落矿山常用的一种放矿方式，国内学者通过物理试验和数值模拟手段进行了诸多研究，但关于放矿方式对矿石结拱影响的研究尚不

* **收稿日期**：2024-12-06

基金项目：国家自然科学基金项目(51174110)

作者简介：孙爽(1998—)，男，河南驻马店人，硕士研究生，主要从事崩落法矿石结拱研究。E-mail:1287625957@qq.com

通信作者：温彦良(1975—)，男，河北辛集人，硕士，副教授，研究方向为金属矿放矿理论与工艺。E-mail:Lnkdwyl@ustl.edu.cn

深入。任凤玉[2]基于随机介质理论进行了相似模拟试验,研究结果表明,多漏口同时均匀放矿有利于矿石的放出。孙浩等[3-4]基于刚型块体模型,使用三维放矿平台进行多口放矿数值试验,发现放矿过程中矿石流动存在明显的应力拱现象;利用 PFC3D 软件建立模型,分别进行单分段和多分段多口放矿试验,得到放出体形态、放出体高度与放矿量的关系。陈庆发等[5]运用数值模拟手段,探究多漏斗放矿时的矿石散体力链特征,如数量、长度、方向等。郭晓强等[6]利用 PFC3D 建立多放矿口模型,研究多放矿口条件下聚矿槽尺寸对放矿效果的影响。

散体侧压力研究的理论基础主要有朗肯土压力和库伦土压力[7]、Jessen 理论[8-9]。目前,散体侧压力理论已经应用于矿山工程中,但尚未应用到多口放矿下散体矿石结拱研究上。刘洋等[10-11]基于临界散体柱理论,采用散体颗粒流动设备进行放矿侧压力试验,研究得出结论:放矿扰动会导致松散体范围内的矿石侧压力迅速下降,矿体倾角会影响上下盘散体侧压力的下降速率。这一结论对预测塌陷范围有参考意义。何荣兴等[12]基于散体侧压力测试系统,通过物理相似模拟试验,研究有回填和无回填两种情况下散体侧压力变化趋势。

在实际矿山崩落矿石过程中,人员无法进入采场观察矿石内部结拱情况。因此,通过放矿物理试验,并借助散体侧压力这一特征进行分析,间接研究不同放矿方式和放矿高度对散体矿石结拱的影响。研究结果具有一定的工程意义,尤其可为采场结构参数设计、放矿控制及矿山安全生产等提供参考依据。

1 多口放矿下矿石结拱现象

在多口放矿过程中,松散体中的矿石在流动过程中会受到重力、摩擦力和扰动作用的影响,导致不同区域内散体颗粒的流速和方向不均匀。尤其是在多放矿口分布不对称或出矿速率差异较大的情况下,这种不均匀性会更加明显。矿石在流动过程中,由于颗粒之间的相互作用和散体材料的特性,垂直方向的应力会通过颗粒间的接触传递向水平方向。这种应力的转移是一个逐渐累积的过程,与流动速度、颗粒尺寸及外部扰动密切相关。随着垂直应力逐渐向水平方向转移,在松动体的上方区域会形成一种以轴向应力为主的“拱”结构[13-15]。散体拱及应力转移情况如图 1 所示。

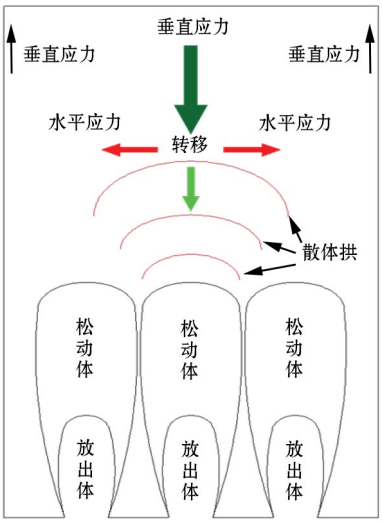


图 1 多口放矿下散体拱结构和应力转移示意

Fig.1 Diagram of arch structure and stress transfer in granular materials during multi-outlet ore drawing

散体拱的形成通常需要满足以下条件:松动体具有足够的自由流动空间;散体颗粒之间的接触力与外部扰动形成一种动态平衡;矿石颗粒形状、尺寸分布及摩擦特性适宜。在放矿或扰动过程中,结拱现象的产生和破裂会导致散体侧压力增大或减小。因此,结拱现象可以通过散体侧压力的变化情况来体现。

2 相似物理试验

2.1 试验模型

本试验采用 SKL-16 散体颗粒流动侧向压力测试系统进行多口放矿试验和数据采集,该系统由装矿模型和数据采集监测系统组成(见图 2)。装矿模型长 60 cm、宽 30 cm、高 150 cm。装置正面最下方一排是均匀分布的 5 个 5 cm×5 cm 的放矿口,上方是 14 块可移动的钢板,每块钢板上各布置一对压力和位移传感器,用于监测和采集数据信号,背面同样布置。监测点 CH1、CH2、CH3、CH4 和 CH5 离放矿口的距离分别为 15 cm、25 cm、35 cm、55 cm 和 75 cm,CH9~CH13 与之对称。模型左侧底部有一个较大的出矿口,便于清理残余矿石。装置正面斜插了一根螺纹支撑杆,可以通过手摇轮盘控制其倾斜角度,以此可以模拟矿体不同倾斜角度。

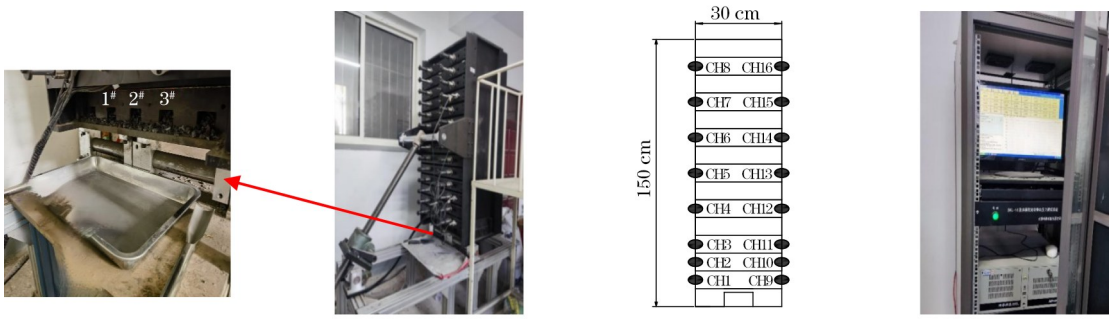


图 2 SKL-16 散体颗粒流动侧向压力测试系统

Fig.2 SKL-16 lateral pressure testing system for granular material flow

2.2 试验材料和方案

试验材料应与实际崩落矿石性质相似,参考弓长岭矿山崩落矿石块度主要为 200～300 mm,本试验采用 1∶40 的相似比,所以选用铁矿石的粒径主要为 5～8 mm;试验装填高度为 75 cm(模拟矿山实际放矿高度 30 m),模型放矿口间距 7 cm。试验材料粒径组成为:1～5 mm 占 20%,5～8 mm 占 60%,9～14 mm 占 20%。

装矿模型倾角保持 90°,将筛分并按配比混合均匀的铁矿石分层装填到模型中,装填高度达到 75 cm 后,静置 24 h,获得静止状态下各通道散体侧压力;选择 2# 口出矿,每次放出矿石约 200 g,当 CH3 和 CH4 通道侧压力都为零时,2# 口停止出矿,采集并保存各通道侧压力值。试验结束,将放出的矿石回填至高度为 75 cm,静置后再次获得侧压力数据;然后分别选择 2# 口和 3# 口同时出矿,1# 口、2# 口和 3# 口同时出矿,重复上述步骤,获得 3 种出矿方式下各通道散体侧压力数据。

3 散体侧压力分布规律研究

3.1 不同放矿方式下的散体侧压力分布规律

在放矿试验中,将通道 CH1～CH8 所在的一侧定义为下盘,CH9～CH16 的一侧定义为上盘。根据单一放矿口(即 2# 口)、两个放矿口(即 1# 口和 2# 口)和 3 个放矿口(即 1# 口、2# 口和 3# 口)放矿试验,根据试验结果得到上下盘散体侧压力随放矿量的变化曲线,如图 3 所示。

由图 3(a)可知,2# 口开始出矿时,通道 CH1 散体侧压力迅速下降,CH1 的曲线斜率明显高于 CH2。这是由于通道 CH1 离 2# 放矿口最近,该区域矿石受出矿的强烈扰动,松散性大幅增加,因而侧压力下降速率更大。而此时通道 CH3 的侧压力略有上升,然后随着放矿的进行较为平缓地下降,未能表现出明显的结拱现象。相比之下,通道 CH4 的侧压力在放矿初期增长了 39.3%,这是因为 CH4 的位置距离放矿口较远,位于松动体范围之外,该区域矿石因内摩擦影响导致侧压力激增,表现出一定的结拱趋势,但无法判定结拱是否完全形成。

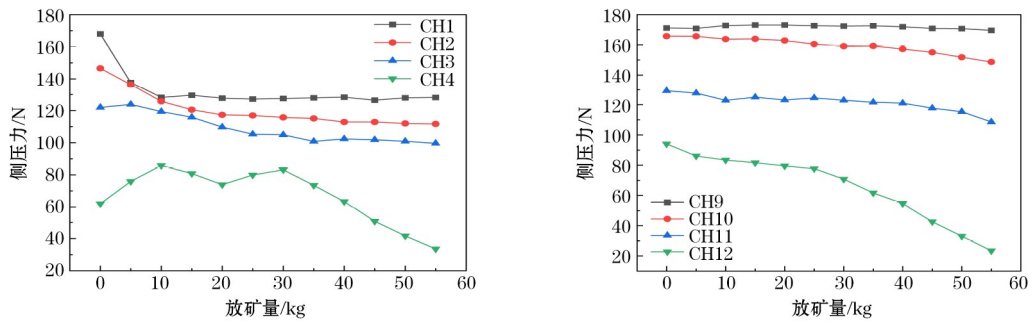
由图 3(b)可知,1# 口和 2# 口同时开始出矿时,CH1 通道的散体侧压力与单口出矿相比下降幅度差异不大,而 CH2 通道的侧压力下降幅度显著增大。这表明两个口同时出矿时,松动体范围增大,使 CH2 所在区域内的矿石受放矿扰动的影响更强,侧压力下降幅度比单口出矿时更大。CH3 通道和 CH4 通道散体侧压力变化趋势与单口放矿时较为相似,但是 CH4 侧压力峰值比单口出矿时的高。这表明 CH4 所在区域矿石的结拱现象较为明显,且两口同时放矿时形成的拱强度也要比单口放矿时的高。

由图 3(c)可知,当 1# 口、2# 口和 3# 口同时开始出矿时,通道 CHI 和 CH2 散体侧压力急速下降,比单口和两口放矿时下降幅度大。3 个放矿口同时出矿,松动体范围进一步扩大,更多矿石受到出矿扰动的影响,通道区域内矿石整体松系数变得更大,所以侧压力会下降更快。相比与单口和两口放矿来说,三口放矿时 CH3 通道侧压力变化有明显不同。开始放矿时,CH3 通道的侧压力上升幅度最大,侧压力整体变化趋势是一条连续上下起伏的折线,可以看作是结拱依次形成与破裂的过程。CH4 通道的侧压力在放矿开始时激增了快一倍,而且此时的散体侧压力增幅和最大峰值在 3 种放出矿方式中是最大的。因此,三口放矿散体矿石结拱现象最明显且强度最高。随着放矿的进行,CH4 通道的散体侧压力出现一段线性下降趋势,然后侧压力又激增到

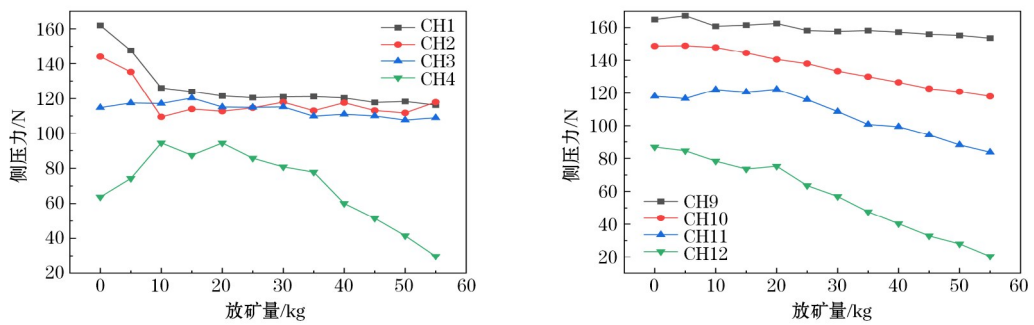
120 N,二次结拱强度更高。最后结拱破裂和矿石高度下降,导致侧压力开始急剧下降。

上盘矿石受放矿口影响较小,3 种出矿方式下各通道的散体侧压力变化趋势总体相似,都呈不同程度的下降趋势,未能体现出结拱的生成。

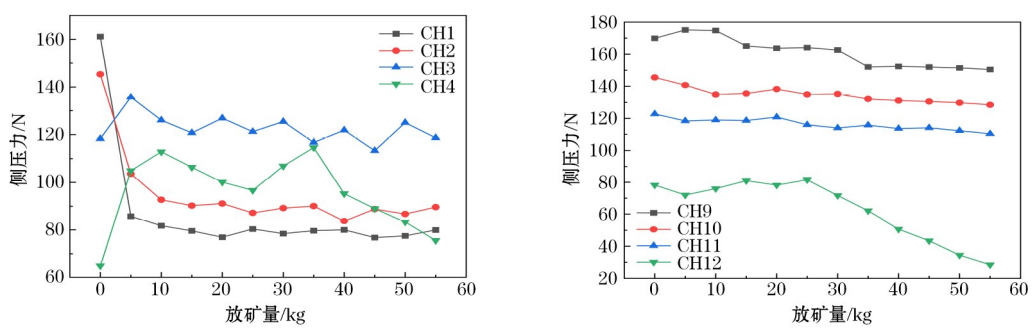
综上所述,随着放矿口数量增加,松动体范围扩大,扰动增强,局部区域(如 CH4)结拱现象逐渐显现且强度增加,而上盘矿石未表现出显著结拱特征。



(a) 单口放矿



(b) 两口放矿



(c) 三口放矿

图 3 上下盘各通道散体侧压力变化规律

Fig.3 Variation laws of lateral pressure in granular materials on each channel at upper and lower walls

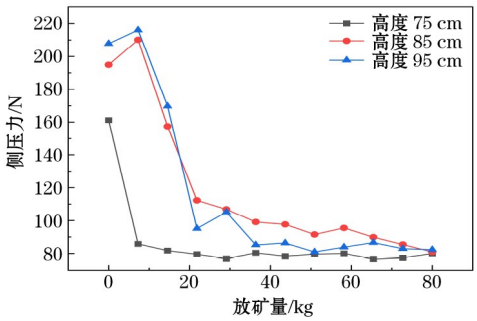
3.2 不同装填高度下散体侧压力分布规律

为进一步探索多口放矿下装填高度对结拱的影响,选择 1# 口、2# 口和 3# 口同时出矿,将装填高度增加至 85 cm 和 95 cm,重复上述试验步骤,得到不同装填高度下 3 个口同时放矿时各通道散体侧压力变化规律,如图 4 所示。

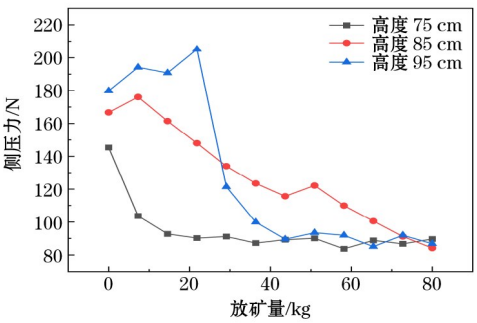
由图 4(a)可知,装填高度分别为 85 cm 和 95 cm 时,CH1 通道侧压力在放矿开始时小幅上升,这表明,随着装填高度的增加,该区域矿石压实度变大,不易受出矿扰动影响,矿石内摩擦因数增大导致侧压力变大。而后各装填高度矿石受持续出矿扰动,区域矿石变得松散,侧压力迅速下降。装填高度为 95 cm 时,在后续的放矿过程中 CH1 通道侧压力先增加再减少,这种趋势说明矿石在该高度附近区域内存在一定的结拱趋势,但未表现出明显的结拱现象。

在图 4(b)中,不同装填高度下 CH2 通道散体侧压力的变化规律存在显著差异。装填高度为 75

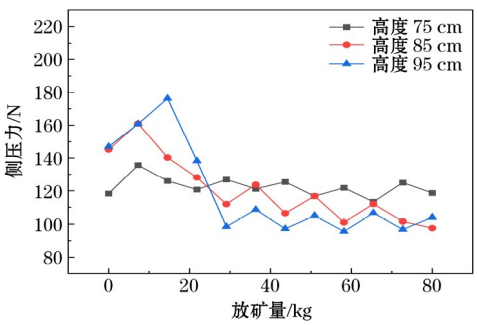
cm 时，CH2 通道侧压力在放矿开始阶段迅速下降，而后呈近似水平直线变化趋势，未体现出结拱的生成；装填高度为 85 cm 时，CH2 侧压力先小幅增加，可能是由于结拱的生成造成的，也有可能是因为受矿石颗粒内摩擦影响；装填高度为 95 cm 时，在开始阶段 CH2 侧压力略有增加，稍稍下降后继续攀升，说明该区域矿石存在较为明显的拱效应。



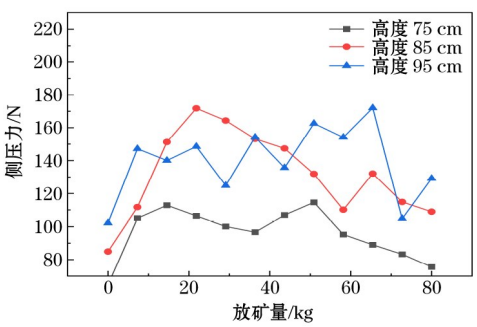
(a) CH1 通道



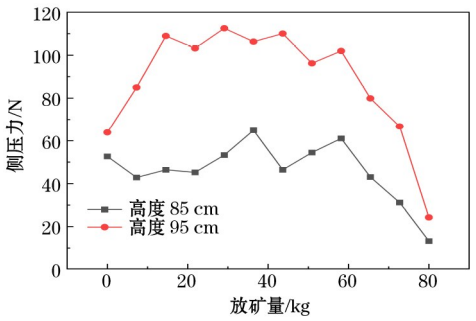
(b) CH2 通道



(c) CH3 通道



(d) CH4 通道



(e) CH5 通道

图 4　不同装填高度下各通道散体侧压力变化规律

Fig.4　Variation laws of lateral pressure in granular materials on each channel under different filling heights

从图 4(c)可以看出，在放矿初期，装填高度为 95 cm 时侧压力增长幅度最大，装填高度为 75 cm 和 85 cm 时次之，且两者相差不大，说明该区域矿石不在松动体范围内，未发生显著流动，受内摩擦影响，侧压力上升。装填高度为 95 cm 时，通道区域内矿石受上方矿石更强的压实作用，导致前期侧压力增加幅度大一些。而后随着装填矿石高度下降，侧压力的下降幅度也相对更显著。总体而言，该区域矿石在不同装填高度下均表现出一定的结拱趋势，但只有装填高度为 95 cm 时结拱现象最为明显。

由图 4(d)可知，装填高度为 75 cm 和 85 cm 时，CH4 通道侧压力变化趋势基本相似，散体侧压力都随着放矿量的变化先上升，小幅下降一段时间后继续回升，达到最高点后持续下降。这说明该区域矿石结拱现象都很明显，装填高度越高，结拱强度越大。装填高度为 95 cm 时，CH4 通道的侧压力在放矿开始后连续的上升和下降，循环往复，说明该区域矿石可能存在多次结拱的生成，且强度不断增加。

由图 4(e)可知，装填高度为 85 cm 时，CH5 通道侧压力在放矿开始阶段小幅下降，可能主要是因为受上方矿石高度下降的影响，所以整体侧压力下降；在放出约 20 kg 矿石后，侧压力开始上升，矿石结拱开始生成；随着放矿的进行，侧压力下降，结拱稳定性开始减弱；放出约 40 kg 矿石时，侧压力又开始上升，二次结拱形成，但强度要弱于一次结拱；最终，随着放矿量的增加，侧压力迅速下降，表明结拱已完全破裂。

装填高度为 95 cm 时，CH5 通道侧压力变化可以看作是一次完整的结拱发育过程。在放矿初期，

侧压力迅速上升,矿石表现出明显的结拱趋势;当侧压力达到第一个峰值时,结拱生成。随后,侧压力略有下降后再次升至最高点,表明二次结拱的生成且强度有所增强。最后,随着放矿的进行,侧压力逐渐下降,结拱强度持续减弱,最终完全破裂。

4 结论

(1) 下盘散体矿石的侧压力受出矿强度和松动体范围的影响显著。三口放矿时松动体范围最大,矿石扰动强度最高,靠近放矿口区域的矿石侧压力下降幅度最大;两口放矿次之,单口放矿最小。而上盘矿石的侧压力变化较小,未表现出明显的结拱现象。

(2) 三口放矿下矿石结拱现象最为明显,且结拱强度最高。明显的结拱现象通常发生在距离放矿口上方 55 cm 处(实际矿山高度约为 22 m)。

(3) 装填高度对结拱现象的生成和强度具有显著影响。随着装填高度的增加,结拱现象更加明显,而且出现结拱现象的范围不断向下延伸,且结拱强度与稳定性也随之提高。

参考文献(References):

[1] 谭宝会,胡颖鹏,张志贵,等.无底柱分段崩落法采场结构参数:发展现状、确定方法及存在的问题[J].化工矿物与加工,2022,51(11):52-64.
TAN Baohui, HU Yingpeng, ZHANG Zhigui, et al. Development status and determination method and existing problems of stope structure parameters in sublevel caving without sill pillar[J]. Industrial Minerals & Processing, 2022,51(11):52-64.

[2] 任凤玉.放矿口对崩落法放矿的影响[J].有色金属,1993,45(4):17-23.
REN Fengyu. Influence of drawpoint on ore drawing[J]. Nonferrous Metals,1993,45(4):17-23.

[3] 孙浩,苏楠,金爱兵,等.多放矿口间的矿岩颗粒均匀流与应力演化规律[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(5):724-732.
SUN Hao, SU Nan, JIN Aibing, et al. Uniform flow and stress evolution laws of caved ore and rock partides between multiple drawpoints[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2022,43(5):724-732.

[4] 孙浩,金爱兵,高永涛,等.多放矿口条件下崩落矿岩流动特性[J].工程科学学报,2015,37(10):1251-1259.
SUN Hao, JIN Aibing, GAO Yongtao, et al. Flow characteristics of caved ore and rock in the multiple drawpoint condition[J]. Chinese Journal of Engineering,2015,37(10):1251-1259.

[5] 陈庆发,刘恩江,秦世康.多漏斗放矿过程中散体介质力链演化特征量化研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(11):4046-4054.
CHEN Qingfa, LIU Enjiang, QIN Shikang. Quantitative study on evolution characteristics of force chain of granular materials in ore drawing from multiple funnels process[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2021,52(11):4046-4054.

[6] 郭晓强,李邵东,简锡明,等.某铜矿自然崩落法聚矿槽合理尺寸参数研究[J].有色金属工程,2023,13(8):130-137.
GUO Xiaoqiang, LI Shaodong, JIAN Ximing, et al. Study on reasonable size parameters of drawbell for block caving method of a copper mine[J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(8):130-137.

[7] 谭晗洋.考虑散体中拱效应的筒仓仓壁侧压力计算方法研究[D].郑州:河南工业大学,2022.
TAN Hanyang. Study on calculation method of silo wall pressure considering horizontal arching effect in bulk material[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology,2022.

[8] 陈喜山.古典杨森散体压力理论的拓展及采矿工程中的应用[J].岩土工程学报,2010,32(2):315-319.
CHEN Xishan. Extension of classical Janssen loose mass pressure theory and its application in mining engineering[J]. Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(2):315-319.

[9] 付吉顺,郑树衡,马驰,等.主溜井贮矿段静态及动态井壁侧压力分布特征[J].矿业研究与开发,2024,44(5):59-65.
FU Jishun, ZHENG Shuheng, MA Chi, et al. Study on distribution characteristics of static and dynamic side pessure of brehole wall in main ore-pass storage section[J]. Mining Research and Development,2024,44(5):59-65.

[10] 刘洋,任凤玉,何荣兴,等.基于放矿下临界散体柱理论的地表塌陷范围预测[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(3):416-420.
LIU Yang, REN Fengyu, HE Rongxing, et al. Prediction of surface subsidence range based on the critical medium column's theory under ore drawing[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(3): 416-420.

[11] 刘洋,何荣兴,任凤玉,等.放矿扰动和矿体倾角对散体侧压力分布的影响研究[J].金属矿山,2021(8):57-60.
LIU Yang, HE Rongxing, REN Fengyu, et al. Study on the distribution laws of lateral force induced by the drawing ore and orebody dip[J]. Metal Mine,2021(8):57-60.

[12] 何荣兴,任凤玉,谭宝会,等.有限宽度崩落矿岩散体侧压力分布规律[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(3):409-413.
HE Rongxing, REN Fengyu, TAN Baohui, et al. Distribution law of granular lateral pressure in caved ore-rock with limited width[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2019,40(3):409-413.

[13] 孙浩,陈帅军,高艳华,等.基于刚性块体模型的近-远场崩落矿岩流动特性[J].工程科学学报,2021,43(2):205-214.
SUN Hao, CHEN Shuaijun, GAO Yanhua, et al. Research on near/far-field flow characteristics of caved ore and rock based on rigid block model [J]. Chinese Journal of Engineering,2021,43(2):205-214.

[14] 柳蕴洋,任崇阁,张治强.超高分段放矿体内部应力演化规律研究[J].矿业研究与开发,2023,43(3):32-38.
LIU Yunyang, REN Chongge, ZHANG Zhiqiang. Study on internal stress evolution law of ultra-high sublevel caving the ore body[J]. Mining Research and Development,2023,43(3):32-38.

[15] 侯得峰.厚松散层类散体拱结构动态演化机理及应用研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2021.
HOU Defeng. Research on dynamic evolution mechanism and application of bulk arch structure in thick loose layers[D]. Beijing:China University of Mining & Technology-Beijing,2021.