膏体充填多孔等量泄流原理试验研究*

王勇兵[1],白龙剑[2],王洪江[2],袁龙森[3],张润芳[2],石宏伟[1],滕高礼[1]

(1.云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖市 654212;
2.北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
3.紫金矿业集团股份有限公司, 福建 龙岩市 364299)

摘要:充填管道多孔等量泄流技术能够消除由膏体自流坡度形成的未接顶空区,提升采场接顶效果,避免顶板下沉问题。首先,通过理论分析初步确定多孔等流量泄流管道沿程水头损失和各泄流孔处的压力水头,并基于此得到泄流孔直径。然后,采用自主研发的多孔等量泄流试验装置,通过试验研究了入口流量、开孔个数和孔间距对等量泄流效果的影响。最后,采用数值模拟方法分析了泄流管道的压强和流量变化规律。结果表明:泄流孔间距对泄流孔的泄流均匀度影响最显著,其次为开孔个数;孔间距为14.5 cm、入口流量为330 mL/h、开孔个数为6个时,泄流均匀度高达96%。膏体在水平管段流动时,管道静压沿流动方向呈下降趋势,在泄流孔口处出现负压,且越靠近膏体入口端的泄流孔处压强差越大;膏体达到稳定状态后各泄流孔出流量基本一致,均匀度系数达98.8%,即膏体可以实现多孔等量泄流。

关键词:膏体充填,等量泄流,孔间距,自流坡度,接顶率

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)02-0090-07

Experimental Study on the Principle of Porous and Equal Discharge of Paste Filling

WANG Yongbing[1], *BAI Longjian*[2], *WANG Hongjiang*[2], *YUAN Longsen*[3], *ZHANG Runfang*[2], *SHI Hongwei*[1], *TENG Gaoli*[1]

(1.Yunan Chihong Zn & Ge Co., Ltd., Qujing, Yunnan 654212, China;
2.School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3.Zijin Mining Group Co., Ltd., Longyan, Fujian 364299, China)

Abstract: The porous and equal discharge technology for filling pipelines can eliminate the unattached goaf area formed by the self-flow gradient of the paste, improve the roof-contact effect of the mining site, and avoid the problem of roof subsidence. Firstly, through theoretical analysis, the head loss along the porous and equal flow discharge pipeline and the pressure head at each discharge hole were preliminarily determined, and on this basis, the diameter of the discharge hole was obtained. Then, using a self-developed porous and equal discharge test device, the influences of inlet flow rate, the number of holes, and hole spacing on the equal discharge effect were studied through experiments. Finally, numerical simulation methods were used to analyze the pressure and flow rate variations of the discharge pipeline. The results indicate that the spacing between the discharge holes has the most significant impact on the uniformity of discharge, followed by the number of holes. When the hole spacing is 14.5 cm, the flow rate at the inlet is 330 mL/h, and the number of holes is 6, the uniformity of discharge can reach up to 96%. When the paste flows in a horizontal pipe section, the static pressure of the pipeline decreases along the flow direction, and negative pressure appears at the discharge holes. The closer the discharge hole is to the inlet of the paste, the greater the pressure difference. After the paste reaches a stable state, the flow rate of each discharge hole is basically the same, and the uniformity coefficient reaches 98.8%, which means that the paste can achieve porous and equal discharge.

Key words: Paste filling, Equal discharge, Hole spacing, Self-flow gradient, Roof-contact ratio

0 引言

采场充填接顶对矿山压力控制有积极作用,但也是膏体充填采矿中的技术难点[1]。目前,国内大部分采用充填法的矿山将膏体泄流口安装在采场挡墙顶部,称为单孔泄流。受膏体料浆流动性的限制,

* **收稿日期**:2024-03-11
基金项目:国家自然科学基金重点项目(51834001)
作者简介:王勇兵(1984—),男,云南曲靖人,高级工程师,主要从事充填采矿方面的研究。E-mail:188225142@qq.com

当膏体进入采场后不会自流成水平状态,而是在采场的上方形成一个三角形未接顶空区[2-3]。三角形空区的存在会劣化充填体对顶板的支撑效果,造成顶板下沉等问题。因此,消除三角形未接顶空区是提高充填接顶效果的有效途径。姚振巩[4]首次提出等量分流技术,即增加膏体的泄流口能够改善充填体的沉降特性和颗粒分布状态。

针对"充填接顶"这个在膏体充填领域广泛存在的问题[5],大量的学者通过研发新材料[6]、新技术[7]和新装备[8]以提高采场接顶率。然而,已有研究大多以优化充填料浆配比[9]、膨胀性和采场结构[10]为主,改善接顶率的方法有强制崩落接顶、膨胀接顶和加压泵送接顶[11],并没有特别考虑采空区料浆的泄流方式。国内膏体充填管道系统末端泄流方式为自然出流[12],这种泄流方式存在无法消除流量变化、气泡溃灭引起的管道振动[13]和膏体料浆[14]冲击扰动采场内浆体等方面的问题。为了消除由膏体自流坡度形成的三角形未接顶空区,改善充填体质量的不均匀性和提升采场充填接顶率,本文将探明多孔等量泄流原理,提出充填管道等量泄流设计方法。

本文基于流体力学理论,考虑矿山充填实际情况,自主研发了多孔等量泄流试验装置,通过模拟试验研究了入口流量、开孔个数和孔间距对等量泄流效果的影响。在试验的基础上,利用 Fluent 软件,分析了多孔泄流中孔口处的压强和流量变化规律,并提出了多孔等量泄流管道设计方法。研究成果可为充填管道等量泄流孔的设计提供理论依据。

1 多孔等量泄流基本理论

1.1 管道水力坡度计算

依据有压管道沿程水头损失达西-韦斯巴赫公式[15],沿水流方向单位长度管道上的水力坡度可表达为式(1)。

$$\Delta h_f=\frac{\lambda v^2}{2gD} \tag{1}$$

式中:Δh_f为水力坡度,m;D 为管道内径,m;λ 为沿程摩擦阻力因数;v 为管道截面平均流速,m/s;g 为重力加速度,m/s^2。

流速 v 为流量和截面积的比值,则水力坡度可表达为式(2)。

$$\Delta h_f=\frac{8\lambda Q^2}{\pi^2 gD^5} \tag{2}$$

式中,Q 为管道流量,m^3/s。

在膏体充填过程中,伸入采场管道的长度远大于泄流孔直径,局部结构变化所占的比例很小。因此,忽略局部水头损失,即水力坡度仅考虑沿程水头损失。

1.2 泄流孔直径计算

多孔等量泄流管道中,流量和每段管道的水力坡度都是逐渐递减的。假设每个泄流孔之间的孔距相等,且孔距为 a,开孔个数为管道总长和孔间距的比值,则总孔数为 E 的多孔等流量泄流管道沿程水头损失见式(3)。

$$\begin{aligned}h_f=&(EQ)^2\frac{8a\lambda}{\pi^2 gD^5}+[(E-1)Q]^2\frac{8a\lambda}{\pi^2 gD^5}+\\&[(E-2)Q]^2\frac{8a\lambda}{\pi^2 gD^5}+\cdots+Q^2\frac{8a\lambda}{\pi^2 gD^5}=\\&\frac{8a\lambda Q^2}{\pi^2 gD^5}\begin{bmatrix}E^2+(E-1)^2+\\(E-2)^2+\cdots+2^2+1^2\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{3}$$

令 $B=\dfrac{8a\lambda}{\pi^2 gD^5}$,即:

$$h_f=BQ^2[1^2+2^2+3^2+\cdots+E^2] \tag{4}$$

式中:a 为孔距,m;E 为总孔数,个。

管道上的泄流口为薄壁圆形孔口。依据薄壁圆形孔口出流公式,泄流孔处的流量计算见式(5)。

$$q_i=\mu A_i\sqrt{2gH_i} \tag{5}$$

式中:A_i为第 i 个泄流孔的面积,m^2;q_i为第 i 个泄流孔的出流量,m^3/h;μ 为管道薄壁孔口的流量系数,取 0.62;H_i为第 i 个孔口的压力水头,m。

泄流孔直径计算公式见式(6)。

$$d_i=\sqrt{\frac{4q_i}{\mu\pi\sqrt{2gH_i}}} \tag{6}$$

综上可知,首先用式(2)和式(3)可得到多孔等流量泄流管道沿程水头损失和各泄流孔处的压力水头。然后,基于各泄流孔的压力水头利用公式(6)得到开孔直径。

2 多孔等量泄流模型试验

2.1 试验材料

试验材料主要为云南某铅锌矿的浓密机底流全尾砂,密度为 2 750 kg/m^3。充填所用全尾砂的粒级分布曲线见图 1。由图 1 可知,全尾砂中-74 μm 所占比例为 65.06%,-200 μm 所占比例为 86.72%,加权平均粒径为 78.25 μm,属于尾中砂[16]。

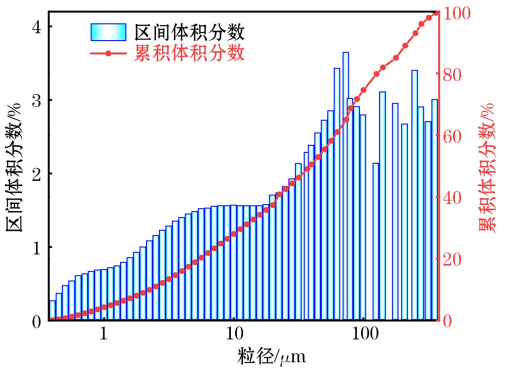


图 1 全尾砂粒级分布曲线

Fig.1 Grain size distribution curve of unclassified tailings

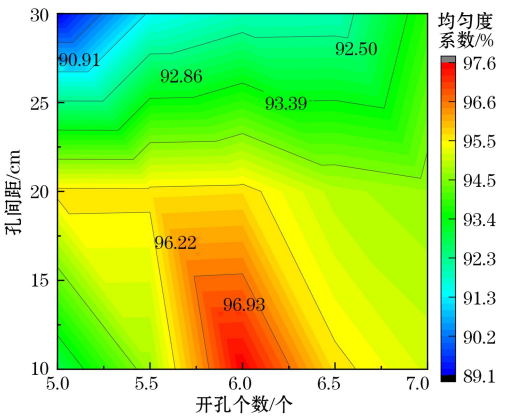


图 2 孔间距与开孔个数对等量泄流效果的交互影响

Fig.2 The interactive effect of hole spacing and number of holes on the equivalent discharge effect

2.2 试验方案

多孔等量泄流试验装置由充填泄流管道和采场的等比例缩小模型组成。泄流管道直径 $D=15$ mm,采场模型尺寸为:长×宽×高=750 mm×150 mm×150 mm。

多孔等量泄流模型试验主要研究入口流量、开孔个数和孔间距这 3 个因素对多孔等量泄流效果的影响,料浆质量浓度为 78%,泄流孔直径为 5～7 mm。采用正交设计试验方案,入口流量设置为 260 mL/h、300 mL/h、340 mL/h;开孔个数为 5 个、6 个、7 个;孔间距为 10 cm、20 cm、30 cm。

首先,配置 10～25 L 质量浓度为 78%的膏体料浆,并用清水润湿模拟管道,减弱管壁效应的影响[17]。然后,将膏体料浆加入漏斗,打开膏体出料阀门,观察泄流孔的出流情况,并使用容器收集每个孔流出的膏体料浆。最后,用量杯测定每个孔流出的料浆量,做好记录。

2.3 试验结果与分析

2.3.1 孔间距和开孔个数对等量泄流效果的影响

孔间距与开孔个数对等量泄流效果交互影响的等高线及响应曲面见图 2(颜色标识见电子版)。由图 2 可知,均匀度系数受开孔间距的影响变化很大,两端颜色越来越浅,颜色变化相比于开孔个数对响应值的影响更显著,在孔间距为 10 cm 时,孔口出流的均匀度系数随开孔个数的增加表现出先增大后减小的趋势,在开孔个数为 6 时出现最大值,这说明开孔个数并非越多越好,存在一个中间峰值。在开孔个数为 6 时,均匀度系数在孔间距为 14.5 cm 处出现最大值,且在 20～30 cm 区间内,均匀度系数从 95.65%递减至 90.07%,变化显著。

2.3.2 孔个数和入口流量对等量泄流效果的影响

开孔个数和入口流量对等量泄流效果交互影响的等高线见图 3(颜色标识见电子版)。

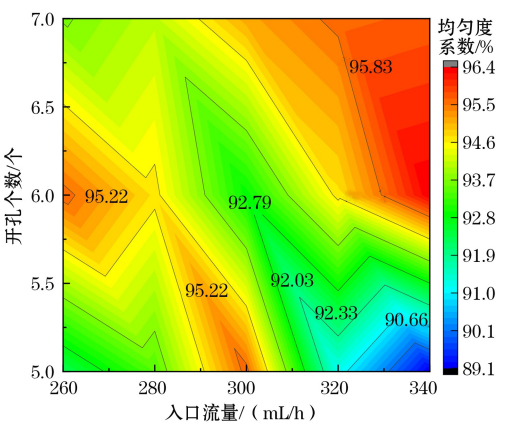


图 3 开孔个数与入口流量对等量泄流效果的交互影响

Fig.3 The interactive effect of the number of holes and flow rate at the inlet on the equivalent discharge effect

由图 3 可知,等高线图颜色变化受开孔个数的影响相较于入口流量更加显著,且均匀度系数随着入口流量和开孔个数的增大均表现出先增大后减小的趋势,在入口流量为 300 mL/h 时,均匀度系数随开孔个数增大从 95.65%降至 92.86%后又回升至 95.65%。在入口流量为 330 mL/h、开孔个数为 6 个时,均匀度系数达到峰值。

2.3.3 孔间距和入口流量对等量泄流效果的影响

孔间距和流量对等量泄流效果交互影响的等高线见图 4(颜色标识见电子版)。由图 4 可知,等高线图中曲线形状为椭圆形,表明孔间距及入口流量对等量泄流效果影响显著,且等高线图颜色变化受孔间距的影响相较于入口流量更明显。孔间距为

20 cm时,均匀度系数随入口流量变化不大,约为95.65%。整体来看,均匀度系数受孔间距影响呈现出的规律与上文分析结果一致,随着孔间距的增大,均匀度系数先增大后减小。在入口流量为330 mL/h、孔间距为15 cm时,均匀度系数达到峰值,为96.58%。

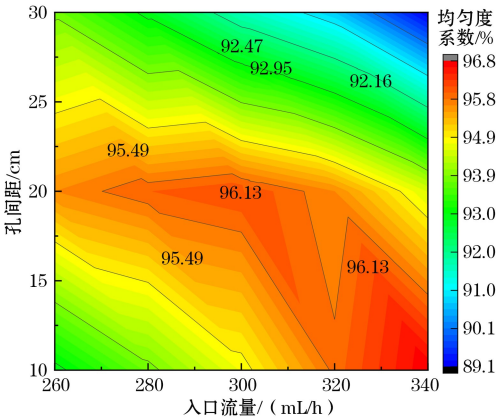


图4 孔间距与入口流量对等量泄流效果的交互影响

Fig.4 The interactive effect of hole spacing and flow rate at the inlet on the equivalent discharge effect

3 多孔等量泄流数值模拟研究

3.1 构建多孔等量泄流数值模型

(1)模型参数与网格划分。采用Fluent数值模拟软件构建多孔等量泄流数值模型[18]。充填泄流管道数值模型参数为:内径150 mm,长5 000 mm,如图5所示。图中4个绿色点为泄流孔,位置分别为$z=0$ m、$z=0.5$ m、$z=1.5$ m、$z=2.5$ m(颜色标识见电子版)。为了提高网格质量以及后处理的计算速度,将四面体网格转化成多面体网格,网格数为30 188,网格精度为0.01[19]。

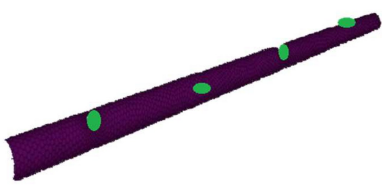


图5 泄流管道数值模型

Fig.5 Numerical model of discharge pipeline

(2)边界条件及材料参数。在数值模拟中,流体为全尾砂、水泥和水组成的全尾砂膏体。对膏体赋予相应的黏度和密度等参数[20]。数值模型在入口端采用速度边界,设定泄流管道入口处的膏体流速为1.5 m/s,末端不设置出口边界,膏体均从泄流孔流出,泄流孔采用质量出口边界条件,均为自由出流。膏体模型使用k-ε湍流模型,管道材料为钢。数值模拟中材料参数见表1。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	密度/(kg/m³)	泊松比	黏度/(kg·m⁻¹·s⁻¹)
全尾砂膏体	2 020	0.23	0.645
钢	8 020	0.29	—

3.2 等量泄流模拟结果分析

3.2.1 泄流管道压强变化规律

为了观察管道内部的压强变化,创建沿管道轴向中心截面(X方向)以及垂直管道轴向(Z方向)各泄流孔中心截面,创建$z=0$ m,$z=0.5$ m,$z=1.5$ m,$z=2.5$ m共4个截面,各截面压力云图如图6所示。

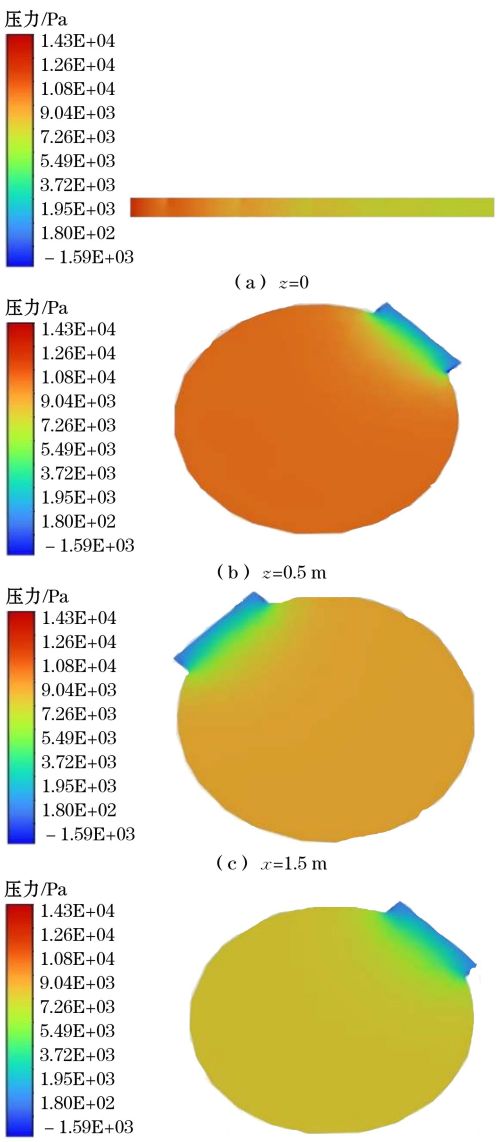


图6 泄流管道各截面压力云图

Fig.6 Pressure cloud maps of each section of the discharge pipe

由图 6 可知,膏体从水平管入口端沿管道流动过程中,管道的静压呈现下降趋势,但是在泄流孔的孔口处却出现了负压,其原因在于泄流孔处流量损失造成泄压。泄流孔处压力最小,这是由于膏体在水平管段流动时,流态相对稳定,当到达泄流孔附近时,孔径突然缩小导致膏体流态发生变化,管道内的膏体由被挤压状态转变为孔口自由出流,流速突然增大。根据膏体流速与压强的关系(边界层效应)可知,膏体速度加快时会导致膏体边界压力减小,与此同时,部分膏体静压转换成动压,产成扰动圈致使静压值出现波动并达到最小值。

管道入口处静压值为 14.3 kPa,沿着膏体流动方向逐渐递减,在管道末端静压值为 6.53 kPa。各泄流孔处的压强变化表现出相同的规律,均为从管内正压变化为负压,再恢复至正压。在管壁与空气交界处,压力迅速下降至负值并且在泄流孔圆周附近达到静压最小值,为 −3.36 kPa。各个泄流孔出口端与大气接触,压强值均为 0.19 kPa,但是远离管道入口端的泄流孔对应的管道压力较小。综上所述,靠近膏体入口端的泄流孔处的压强差大,且距离入口端越近压强差值越大。

3.2.2 泄流管道流量变化规律

分别对 4 个泄流孔进行流量监测,得到各个泄流孔的流量与迭代次数关系,如图 7 所示。由图 7 可知,各泄流孔出口处的流量波动曲线最终都趋近于平稳,说明流动达到了收敛状态,管内膏体稳定出流。膏体达到稳定状态时,泄流孔流量分别为 10.26,10.23,10.43,10.27 kg/s,均匀度系数为 98.8%,达到多孔等量泄流标准。

在出口 1 处,膏体流量从 38.65 kg/s 急剧下降后趋于 10.26 kg/s,这是由于膏体进入管道后在管首段的压强最大,而膏体运动的基本原理是从压强大的区域流向压强小的区域,所以当流经第一个泄流孔时,管壁内外的巨大压强差使得出口流量瞬间“飙升”至高点,然后随着膏体继续向前流动出现分流情况,流量又迅速下降。

在出口 2 处,膏体流量先从 8.41 kg/s 上升至 11.34 kg/s 后“倒流”回 10.23 kg/s 直至稳定,以及后面的泄流孔出口流量均开始由从小流量慢慢加大到稳定状态,这说明膏体在面对多个出口边界时存在一个调节区间,在这个区间内膏体通过自我调节能力将流量调控至稳定状态。

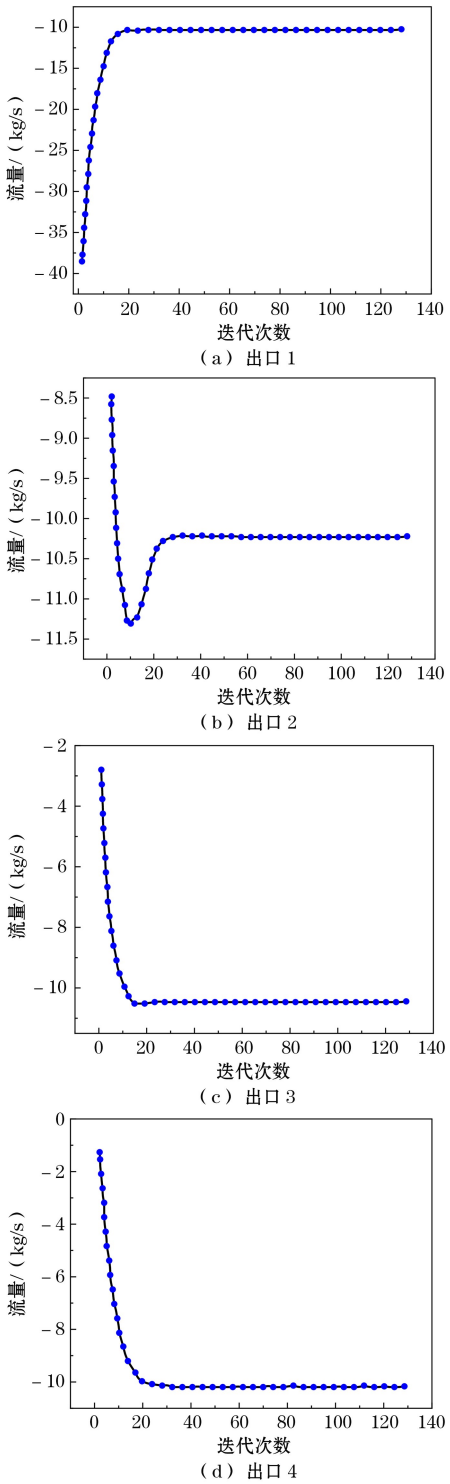


图 7 管道泄流口流量变化

Fig.7 Changes in flow rates at different outlets of discharge pipeline

4 结论

(1) 针对单孔泄流会造成采场内形成三角形未接顶空区的问题,基于流体力学理论,提出多孔等量

泄流充填管道中开孔直径和个数的设计方法。

(2) 采用自制多孔等量泄流管道模型开展模拟试验,结果表明泄流孔间距对泄流孔的泄流均匀度影响最显著。当孔间距为 14.5 cm、入口流量为 330 mL/h、开孔个数为 6 时,泄流均匀度高达 96%。相比于单孔泄流,多孔泄流能够消除由膏体自流坡度形成的三角形未接顶空区。

(3) 膏体在水平管段流动时,管道静压沿流动方向呈下降趋势,在泄流孔口处出现负压且越靠近膏体入口端的泄流孔处压强差越大。

(4) 通过监测泄流口流量可知,膏体达到稳定状态后,各泄流孔出流量基本一致,均匀度系数达 98.8%,即膏体可以实现多孔等量泄流。本研究为膏体充填领域等量泄流技术的推广应用提供了理论支撑。

参考文献(References):

[1] 吴爱祥,张晋军,王贻明,等.膏体充填:金属矿绿色开采的变革性技术[J].中国有色金属学报,2024,34(5):1652-1666.
WU Aixiang, ZHANG Jinjun, WANG Yiming, et al. Cemented paste backfill: transformative technology for green mining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2024,34(5):1652-1666.

[2] 刘福春,白龙剑,严庆文,等.充填采场内膏体流动规律及接顶率预测模型[J].有色金属(矿山部分),2023,75(3):124-130+136.
LIU Fuchun, BAI Longjian, YAN Qingwen, et al. Flow law of paste in filling stope and prediction model of roof rate [J]. Nonferrous Metals(Mining Section),2023,75(3):124-130+136.

[3] 陶明,赵岩,过江.二步骤回采采场顶板拱架模型及充填接顶率优化[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2023,33(6):1893-1905.
TAO Ming, ZHAO Yan, GUO Jiang. Arch model of roof and optimization of roof-contacted filling rate in two-step mining[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2023,33(6):1893-1905.

[4] 姚振巩.等量分流技术在矿山充填系统中的应用与研究[J].矿业研究与开发,2007(6):1-3+57.
YAO Zhengong. Study and application of isometric flow distribution technology in mine filling[J]. Mining Research and Development,2007(6):1-3+57.

[5] 阮竹恩,吴爱祥,焦华喆,等.我国全尾砂料浆浓密研究进展与发展趋势[J].中国有色金属学报,2022,32(1):286-301.
RUAN Zhuen, WU Aixiang, JIAO Huazhe, et al. Advances and trends on thickening of full-tailings slurry in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2022,32(1):286-301.

[6] 白龙剑,严国超,杨涛.氟石膏改性高水粉煤灰复合充填材料性能研究[J].矿业安全与环保,2020,47(6):32-36.
BAI Longjian, YAN Guochao, YANG Tao. Study on properties of composite filling material of fluorogypsum modified high water fly ash [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2020,47(6):32-36.

[7] 刘雨杭.高应力软岩巷道膨胀混凝土充填接顶支护技术[J].有色设备,2020,34(6):36-40.
LIU Yuhang. Research on filling and supporting technology of expanded concrete wall in high stress soft rock roadway [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2020, 34(6): 36-40.

[8] 余固吾,朱正伦,陈检顺.UBY—10/35 型充填接顶液压砂浆泵[J].有色金属(矿山部分),1979(2):38-41.
SHE Guwu, ZHU Zhenglun, CHEN Jianshun. UBY—10/35 filling roof hydraulic mortar pump[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),1979(2):38-41.

[9] 尹升华,曹永,吴爱祥,等.玻璃纤维增强含硫尾砂胶结充填体的力学及流动性能研究[J].材料导报,2023,37(13):246-252.
YIN Shenghua, CAO Yong, WU Aixiang, et al. Study on mechanics and flow behavior of glass fiber reinforced cemented sulfur tailings backfill [J]. Materials Reports, 2023,37(13):246-252.

[10] 赵国彦,高洁,卢俊华,等.房柱交替上升式采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2012,32(2):1-4+17.
ZHAO Guoyan, GAO Jie, LU Junhua, et al. Study on optimization of stope structure parameters of room and pillar alternately raised mining with backfill[J]. Mining Research and Development,2012,32(2):1-4+17.

[11] 曾照凯,张义平,王税睿.简述提高充填接顶效果的控制措施[J].有色金属(矿山部分),2010,62(1):6-7+21.
ZENG Zhaokai, ZHANG Yiping, WANG Shuirui. Brief introduction on some control measures for improving the effect of roof-contacted filling [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2010,62(1):6-7+21.

[12] 李公成,王洪江,吴爱祥,等.基于倾斜管实验的膏体自流输送规律[J].中国有色金属学报,2014,24(12):3162-3164+3166-3169.
LI Gongcheng, WANG Hongjiang, WU Aixiang, et al. Gravity transport law of paste based on inclined pipe experiment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014,24(12):3162-3164+3166-3169.

[13] 赵卫强,黄玉诚,卓同超.似膏体充填管路振动特性有限元分析[J].煤炭工程,2014,46(6):106-108.
ZHAO Weiqiang, HUANG Yucheng, ZHUO Tongchao. Finite element analysis of vibration characteristics of paste-like material filling pipeline[J]. Coal Engineering,2014,46(6):106-108.

[14] 张磊,王洪江,吴爱祥,等.硫化钠对某铅锌矿充填膏体凝结性能的影响[J].金属矿山,2016(9):44-48.
ZHANG Lei, WANG Hongjiang, WU Aixiang, et al. Influence rules of sodium sulfide to condensing properties of the paste in a lead-zine mine[J]. Metal Mine,2016(9):44-48.

[15] CUI Meiying, DONG Wenchao, GUO Zhenhua. Global well-posedness of coupled Navier-Stokes and Darcy equations[J]. Journal of Differential Equations, 2024, 388: 82-111.

[16] 王洪江,白龙剑,张玺,等.低灰砂比细粒尾砂堆存体抗液化强度试验研究[J].中国有色金属学报,2023,33(9):3092-3103.
WANG Hongjiang, BAI Longjian, ZHANG Xi, et al. Liquefaction resistance of fine tailings cemented deposit[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(9): 3092-3103.

[17] BAI Longjian, WANG Hongjiang, ZHANG Xi, et al. Effect of cement content on the static and dynamic liquefaction resistance of fine tailing[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02825.

[18] VARALLO N, MEREU R, BESAGNI G, et al. Computational fluid dynamics modelling of the regular wave flow regime in air-water downwards annular flows[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2024, 201: 631-644.

[19] HU Yongzheng, CHEN Jun, SHEN Xiaodong, et al. Nozzle thrust eccentricity calculation based on FLUENT software[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2489(1): 012031.

[20] 张连富,王洪江.基于固体浓度函数的尾砂膏体触变行为评估[J].Journal of Central South University, 2023, 30(1): 142-155.
ZHANG Lianfu, WANG Hongjiang. Evaluation of thixotropic behaviors of tailings pastes as a function of solids concentration[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(1): 142-155.