充填倍线变化条件下的料浆管道输送工艺参数优化研究*

江科[1,2]，董军庭[3]，蒋谋芳[1]，彭亮[1,2]，幸吉祥[3]，郑伯坤[1,2]，黄腾龙[1,2]，吴灿[1,2]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.金属矿山安全技术国家重点实验室， 湖南 长沙 410012；
3.福建马坑矿业股份有限公司， 福建 龙岩市 364000）

摘要：矿山增储工作随着勘探理论发展和设备应用取得了长足的进步，大量矿山边深部新增资源的开发利用与现有生产系统的匹配度需重新论证，绿色充填回采面临充填倍线变化幅度大，原有料浆管道输送参数无法满足实际需求等问题。对矿山充填材料粒度分布、充填料浆流动性能等进行试验，确定合理的料浆输送质量浓度为70%～72%；通过理论分析计算，验证已有充填系统设计参数与矿体充填倍线的匹配度，质量浓度为70%和72%的料浆可实现的最大自流输送倍线分别为9.31和5.56；构建仿真模型验证理论分析的正确性。结果表明，质量浓度为72%时料浆可满足矿山老矿体2.3～4.9充填倍线采场自流输送的需求，而适当降低质量浓度至70%，能实现充填倍线7.2～8.7的新增矿体大倍线采空区自流充填的需求。为使矿山取得最佳技术经济效益，提出增设充填泵加压输送质量浓度72%料浆（方案一）和质量浓度70%的料浆自流输送（方案二），通过综合对比分析，方案一具有明显的优缺点，方案二无需技改、工艺流程更可靠，且方案二较方案一可节省充填运营成本约233.45万元/a，故方案二更优。

关键词：充填倍线；管道输送；自流充填；料浆质量浓度；充填成本

中图分类号：TD853.34　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)04-0063-07

Optimization of Slurry Pipeline Transportation Process Parameters Under Variable Filling Gradients

JIANG Ke[1,2], *DONG Junting*[3], *JIANG Moufang*[1], *PENG Liang*[1,2],
XING Jixiang[3], *ZHENG Bokun*[1,2], *HUANG Tenglong*[1,2], *WU Can*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mine, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Fujian Makeng Mining Co., Ltd., Longyan, Fujian 364000, China)

Abstract: Advancements in exploration theory and equipment have significantly enhanced mine reserve expansion. However, adapting new resources in the deep periphery of mines to existing production systems requires reassessment. Green stoping-and-filling operations face challenges from varying filling gradients and existing slurry pipeline transportation parameters that no longer meet practical demands. To address these challenges, tests were conducted on the particle size distribution of backfill materials and slurry flow performance at the mine. Results identify that a reasonable range of slurry mass concentration is 70%-72%. Through theoretical analysis and calculation, the matching degree between the design parameters of the existing filling system and the ore body filling gradients was verified. The maximum gravity flow filling gradients of the slurry mass concentration of 70% and 72% are 9.31 and 5.56, respectively. Simulation models were constructed to verify the correctness of theoretical analysis. The results show that a 72% slurry mass concentration is suitable for gravity flow transportation in older mine zones with filling gradients of 2.3-4.9, while reducing concentration to 70% enables gravity filling in high-gradient goafs with filling gradients of 7.2-8.7 in newly developed zones. For the mine to achieve optimal technical and economic performance, two schemes are proposed: implementing additional pumps to transport slurry with a mass concentration of 72% under pressure(first scheme), and utilizing slurry with a mass concentration of 70% for gravity flow(second scheme). A comparative analysis shows that the first scheme has obvious advantages and disadvantages, while the second scheme requires no technical modification, offers a more reliable process, and reduces operational costs by RMB 2 334 500 compared to the first scheme. Therefore, the second scheme is the preferred option.

Key words: Filling gradient, Pipeline transportation, Gravity filling, Slurry mass concentration, Filling cost

* **收稿日期**：2024-10-10
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC2907203)
作者简介：江科(1992—)，男，湖北天门人，硕士，高级工程师，主要从事矿山绿色开采及安全相关的研究工作。E-mail:Jiangk92@163.com

0 引言

绿色矿山安全高效充填开采符合国家资源保障战略要求,是矿产可持续开发的基础,利用矿山尾废进行充填是重要手段之一,在控制回采安全风险的同时可提升资源的利用效率[1-5]。近年来,随着边深部找矿理论及技术装备的突破,越来越多的矿山有望大幅延长服务年限,在充分利用矿山企业已有固定资产投资的条件下,如开拓系统、选矿厂等,可实现矿山改扩建的快速投产达产[6-7]。管道输送是充填料浆由地表至井下空区最经济合理的运输方式,地表充填系统在矿山整体设计规划时,已根据矿体与主要设施之间的空间位置关系确定料浆的合理输送方式。一般情况下,当充填倍线小于5～7时,宜采用自流输送方式,利用料浆自重势能实现充填;当倍线大于上述范围时,则需要增设充填泵实现加压输送[8-11]。

在原有设计条件下,边深部矿体的开发利用使部分矿山井下充填倍线发生较大变化,原有系统无法满足生产需求。丁文智[12]、刘鹏亮等[13]提出加压输送解决大倍线采场充填问题,通过改造地表充填站或井下新建泵送硐室的方式,增设充填泵送设备加压输送料浆至边远采场,但此方法普遍面临技改难度大,土建、设备投资费用较高,新增设备与原系统衔接困难等问题;王新民[14]、温茂[15]、靳天朴[16]、曹宝栋等[17]提出,添加外加剂可改善充填料浆流动性能,减小料浆管输沿程阻力,提高可自流输送的倍线范围,但外加剂添加成本高,自流服务范围提高幅度有限,具有一定的局限性。在尽量减少投资,充分利旧的前提下,本文通过矿山充填材料研究入手,探索倍线变化与已有充填工艺之间的关系,确定输送浓度与可实现自流倍线的匹配度,对比优化输送方式,确保矿山充填技术经济效益最大化。

1 矿山概况

某矿山采用阶段空场嗣后充填采矿法,原设计地表充填系统采用全尾砂胶结充填,单套系统充填能力200～220 m^3/h,充填倍线2.3～4.9,充填质量浓度72%,采用自流输送方式服务井下采矿,充填钻孔内套管为Φ203 mm×20 mm双金属耐磨管(耐磨层厚10 mm),各中段水平主管道为Φ184 mm×12 mm无缝钢管,矿山充填工艺流程如图1所示。随着开拓工程的推进以及边深部找矿工程的实施,新增边部矿体储量及品位具备开采经济效益,根据规划,未来新增边部矿体实现的产能为矿山年整体产能的35%。经测算,边部新增矿体充填倍线达7.2～8.7,已有充填系统工艺参数无法满足需求,亟需研究充填料浆输送性能,优化新增矿体充填管输方案,以达到新增矿体井下充填采矿法的技术要求。

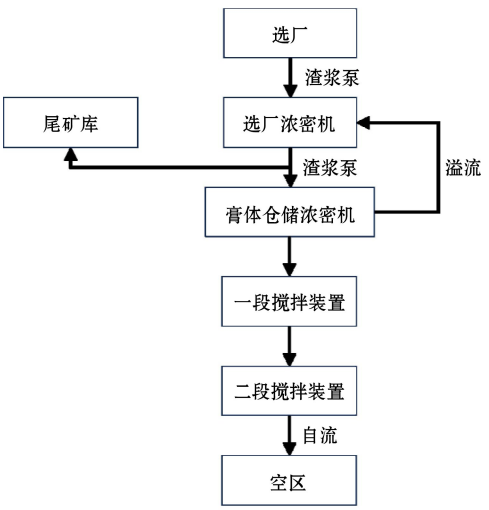


图1 充填工艺流程

Fig.1 Filling process

2 料浆输送性能试验及理论分析

2.1 合理充填料浆质量浓度确定

充填材料粒度决定料浆最佳输送浓度范围及输送性能,不同矿山充填材料粒度差异较大,适宜输送的充填料浆质量浓度范围由主要材料各自的粒级组成和配比决定。为了反映实际工程条件,取矿山全粒级尾砂和胶凝材料,按灰砂比的最大值1∶4和最小值1∶20混合制样,采用激光粒度分析仪分别对充填材料的粒度进行分析,全尾砂取自矿山选厂总尾排放口,胶凝材料取自罐车卸料口,粒度分析结果见表1。

表1 充填材料粒度测试数据

Table 1 Particle size test data for filling materials

粒径/μm	全尾砂/%	灰砂比1∶4/%	灰砂比1∶20/%
−5	12.37	14.89	13.88
−10	22.87	25.34	23.91
−20	34.96	40.28	36.28
−50	52.66	60.19	55.21
−75	61.82	70.76	64.45
−150	80.51	88.92	84.97
−250	93.61	97.35	95.19
−500	100.00	100.00	100.00

由表1可知,胶凝材料的加入,使充填材料的细颗粒含量增加,特别是20 μm以下极细颗粒的含量增加,细颗粒材料一定程度上提升了充填料浆的保

水性能,也使料浆黏度增加,对应的管输阻力增大,因而1∶4灰砂比条件下充填料浆输送工况最困难。1∶4灰砂比充填材料的平均粒径为75.3 μm。

充填料浆的坍落度可以直观地反映料浆的流动性能和保水性能,坍落度的测试标准依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016),使用标准圆锥筒体进行测试,按胶结剂∶全尾砂=1∶4配制试验材料,从高浓度开始以质量浓度2%的梯度递减逐步进行试验,直至料浆明显离析不具备良好的流动性,多次测试取平均值作为测试结果,试验在(25±1) ℃的条件下进行,测试结果见表2。由表2可知,质量浓度为74%的料浆坍落度值为25.9 cm,浓度过高,具有较大的黏聚力,不适宜充填;料浆质量浓度为70%、72%时坍落度值分别为28.7 cm、27.4 cm,流动性能较好,保水性能强,在管道内不易发生沉降离析;料浆质量浓度为68%时坍落度值为29.2 cm,出现较明显离析,保水性能和流动性能差,不宜作长距离管道输送,在实际生产中应避免充填料浆质量浓度降至此范围。故矿山最佳充填质量浓度范围为70%～72%,已有充填系统服务井下空区的质量浓度为72%,处于合理输送浓度范围。

表2 坍落度测试结果

Table 2 Results of slump test

质量浓度/%	坍落度值/cm
74	25.9
72	27.4
70	28.7
68	29.2

2.2 充填料浆流变参数测定

流变参数是评价充填料浆输送性能的基础,通过计算充填料浆流动阻力,研究可输送浓度范围内充填料浆在矿山当前管道规格参数条件下的可实现充填倍线,对于指导实际生产具有重要意义。采用RST-SST流变仪测试结构流态充填料浆的相关流变参数,选取最佳充填料浆质量浓度70%、72%进行试验,结果见表3。

表3 充填料浆流变参数

Table 3 Rheological parameters of filling slurry

质量浓度/%	容重 γ/(N/m³)	屈服剪切应力 τ_0/Pa	黏性系数 η/(Pa·s)
70	19 993.0	6.337	0.479
72	20 558.3	12.761	0.807

2.3 管网模型可实现充填倍线分析

矿山井下充填管网由竖管及水平管道组成,近似为"L"形布置,质量浓度为70%～72%的充填料浆在管道内为不可压缩的宾汉流体,满足伯努利方程:

$$\frac{\gamma v_1^2}{2g}+p_1+\gamma z_1-\gamma h_L=\frac{\gamma v_2^2}{2g}+p_2+\gamma z_2 \quad (1)$$

式中:p_1 为竖管入口处压力,Pa;p_2 为管道出口处压力,Pa;γ 为料浆容重,N/m³;v_1 为竖管入口处流速,m/s;v_2 为管道出口流速,m/s;z_1 为竖管入口处高度,m;z_2 为管道出口处高度,m;h_L 为料浆从竖管管口到管道出口的压头损失,m;g 为重力加速度,m/s²。

因竖管入口和管道出口均与大气连通,故 $p_1-p_2=0$;设竖管入口与管道出口在纵向上的高差为 H,则 $z_1-z_2=H$;竖管入口处流速为0,$v_1=0$;考虑单套充填系统管道输送量为200 m³/h,管道内径160 mm,则由公式(2)可知,$v_2=2.765$ m/s。

$$v=\frac{Q}{3\ 600\times\frac{\pi}{4}D^2} \quad (2)$$

式中:v 为料浆在管道内的流速,m/s;Q 为料浆流量,m³/h;D 为管道内径,m。

管道压头损失 h_L 由沿程阻力压头损失 h_f 和局部阻力压头损失 h_j 组成,根据流体力学经验数据及矿山实际工程经验,局部阻力损失一般为沿程阻力损失的15%[14],则 $h_L=1.15h_f$。设水平管道长度为 L,则井下管道总长度为 $H+L$,管道沿程阻力 i 计算见公式(3)。

$$\gamma h_f=i(H+L) \quad (3)$$

式中:h_f 为沿程阻力压头损失,Pa;i 为沿程阻力,Pa/m;H 为竖管高度,m;L 为水平管道长度,m。

关于沿程阻力 i 的计算方法,相关研究较多,本文不再赘述,式(4)为 i 的求解公式,其中屈服剪切应力 τ_0、黏性系数 η 均可由试验测试得到。由式(1)至式(4)计算可得式(5),设充填倍线为 B,矿山竖直管道垂高超400 m,$0.39/H$ 这一项数值较小,可忽略,因而矿山不同浓度料浆可实现的充填倍线与料浆容重及沿程阻力相关,当充填料浆质量浓度、流量、管道规格参数确定时,即可求出对应的最大充填倍线。

$$i=\frac{16\tau_0}{3D}+\frac{32\eta v}{D^2} \tag{4}$$

$$B=\frac{H+L}{H}=\frac{\left(1-\frac{0.39}{H}\right)\gamma}{1.15i} \tag{5}$$

依据上述计算公式,求得矿山充填质量浓度为70%和72%时,充填料浆可实现的最大自流输送倍线分别为9.31和5.56。计算结果说明现有矿体充填工艺参数合理,质量浓度为72%的料浆自流输送可满足充填倍线为2.3～4.9采场的需求,但无法满足边深部新增矿体采矿的需要,而降低充填料浆质量浓度至70%,能服务充填倍线为7.2～8.7的空区。

3 料浆自流输送数值模拟研究

3.1 模型构建

为验证上述自流输送机理分析结果的合理性,运用数值模拟手段获得不同质量浓度料浆可实现的充填倍线,通过前处理软件构建试验模型,再运用FLUENT软件进行模拟。为简化研究,共设定3种模型,分别为模型Ⅰ(充填倍线5)、模型Ⅱ(充填倍线7)、模型Ⅲ(充填倍线9),各个模型管道内径均为160 mm,竖管入口与管道出口在纵向上的高差H均为2 m,模型Ⅰ水平管段长度L为8 m,模型Ⅱ水平管段长度L为12 m,模型Ⅲ水平管段长度L为16 m,竖管与水平管之间由90°弯头连接。模拟参数设置为:多相流模型选择流体体积函数模型(VOF);重力加速度$g=9.8\ \mathrm{m/s^2}$;黏性模型选择层流。模拟过程中,各种工况条件下的模拟计算过程收敛类似,变量残差值的监测显示计算结果趋于收敛,收敛效果较好,达到预期收敛值,计算结果可靠性强。

3.2 仿真结果与分析

根据理论计算结果,质量浓度为72%的料浆最大自流输送倍线为5.56,选用模型Ⅰ、模型Ⅱ进行仿真;质量浓度为70%的料浆最大自流输送倍线为9.31,选用模型Ⅱ、模型Ⅲ进行仿真。不同参数条件下料浆压力及流速分布云图模拟结果如图2所示。

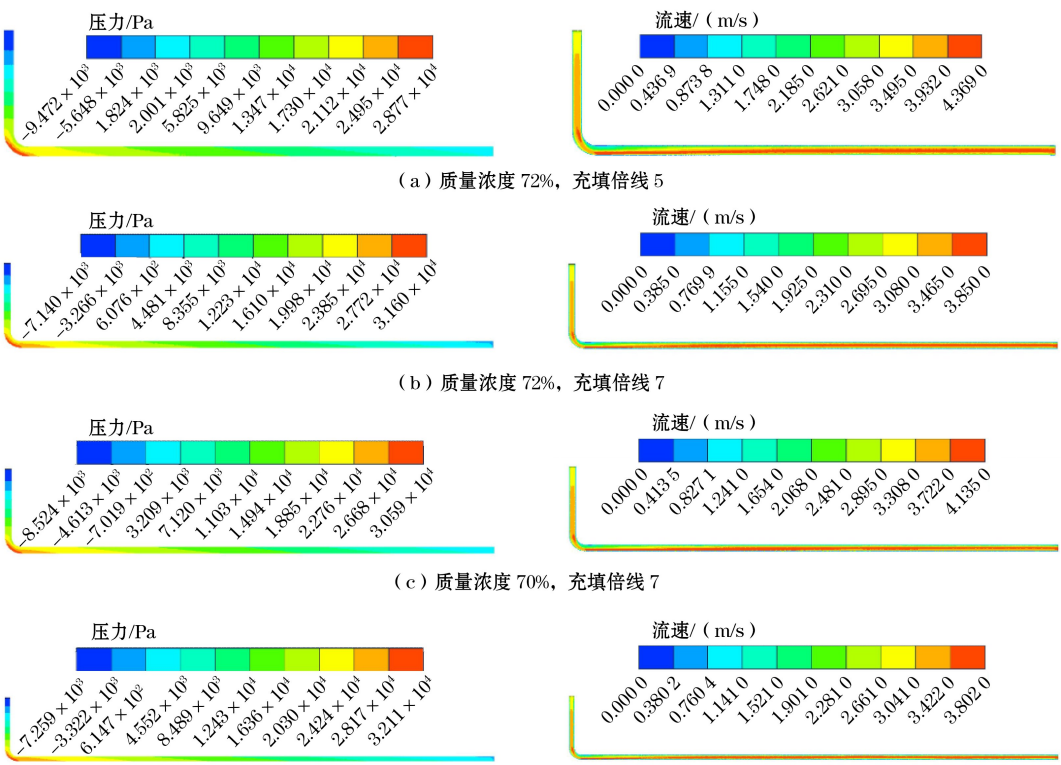


图2 不同参数条件下料浆压力及流速分布云图

Fig.2 Cloud diagrams of pressure and flow velocity of slurry under different parameter conditions

所有仿真模型均呈现类似规律:竖管入口及初始阶段为负压,随着竖管深度加大,压力逐渐升高,在弯管外侧区域达到最大,受沿程阻力的影响,水平管段料浆压力逐渐降低,直至出口处降至大气常压;

料浆入竖管后即形成一定的流速,随着竖管深度加大,流速逐渐升高,在弯管外侧过弯后附近区域达到最大,弯管中心及内侧区域流速较小,且在弯管内侧过弯后附近区域接近于 0,料浆过弯后流速由于沿程阻力影响逐渐减缓。

竖管入口及初始管段因虹吸效应产生一定的负压,相同浓度条件下,充填倍线越大,入口处产生的负压越小,负压的产生与料浆在管道内流速大小呈正相关关系;不同浓度条件下,倍线相同时,浓度越高,入口处产生的负压越大,负压的产生与料浆容重呈正相关关系。充填料浆经 90°弯管改变流动方向,竖管中料浆势能转变为动能作用于内壁外侧,特别是过弯外侧后半段区域,此处是管道受力磨损最严重区域,在实际工程应用中应采取加大管道曲率半径、加厚及使用耐磨材质等方式保证弯管的正常使用。充填料浆质量浓度相同时,充填倍线越大,料浆所受阻力更大,料浆在管道内流速降低,充填料浆重力势能转化为动能的部分变少,而对管道做功增加,磨损加剧;浓度越高,磨损越大。

3.3 不同模型条件下料浆输送流量分析

根据上述 4 组仿真模型,获取水平管道料浆出口流量数据,见表 4。矿山单套充填系统设计流量为 200～220 m^3/h,若仿真模型在相关条件下流量能达到设计要求,即说明此料浆质量浓度和输送倍线情况下符合矿山井下管网要求。由表 4 可知,质量浓度为 72%、充填倍线为 5 时,料浆自流输送流量为 209.8 m^3/h;质量浓度为 70%、充填倍线为 7 和 9 时,料浆自流输送流量分别为 215.9 m^3/h、203.8 m^3/h,上述 3 种工况下均能满足要求。而质量浓度为 72%、充填倍线为 7 时,自流输送模型能实现的最大流量为 131.8 m^3/h,与矿山需求相差甚远,不满足要求。数值模拟结果与理论计算相符,质量浓度为 72%时,料浆只能在充填倍线 5 以内自流输送;质量浓度为 70%时,料浆可在充填倍线 9 以内自流输送。

表 4 仿真模型输送流量分析

Table 4 Simulation model for transport flow

质量浓度/%	模型类别	充填倍线	输送流量/(m^3/h)
72	Ⅰ	5	209.8
	Ⅱ	7	131.8
70	Ⅱ	7	215.9
	Ⅲ	9	203.8

4 大倍线采场管输方案优化研究

根据理论计算与数值模拟分析,可知将充填质量浓度设定为 70%时,可满足新增矿体空区充填倍线 7.2～8.7 自流输送的需求,但在井下采矿方法对强度要求不变的前提下,浓度的降低意味着充填综合灰砂比的提升,充填成本将攀升。有必要对比研究增设充填泵与降低浓度输送两种方案的技术经济效益,以期为矿山大倍线采场选择更优的料浆管输方案。方案一为增设充填泵加压输送质量浓度 72%充填料浆至大倍线采场,充填泵作为料浆加压输送的常用设备,在矿山充填应用中有大量工程经验,为了节省能耗,更多地利用料浆自重势能,在矿山充填倍线约为 4 的区域,选择工程地质条件良好的位置施工充填泵硐室,硐室内布置 2 台充填工业泵(一用一备),根据实际工况需求,充填泵选型参数为 200 m^3/h、8 MPa,硐室内配置电气设施、检修行车、检修区域、事故池以及与主巷道连通的联络巷道,硐室立面配置示意如图 3 所示。方案二为质量浓度为 70%的料浆自流充填大倍线采场,对于现有系统无需技改,只更改相应的工艺流程参数设定,调整制备输送充填料浆质量浓度即可。

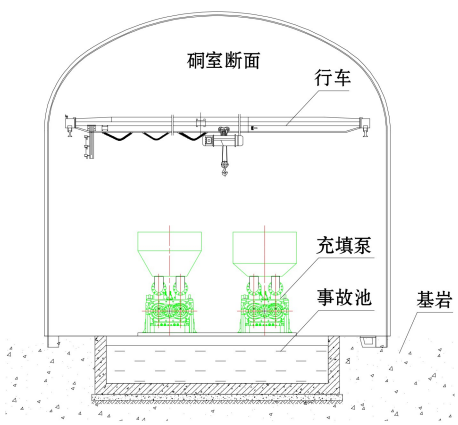


图 3 充填硐室配置

Fig.3 Filling chamber configuration

因不同浓度条件下胶结剂用量不同,在实验室内按规范要求制作充填体试块,测得相应灰砂比强度数值后,将胶结剂用量与强度数值进行拟合,得到质量浓度为 72%和 70%条件下胶结剂用量与强度的关系,如图 4 所示。两组拟合方程式相关系数 R^2 均接近 1。

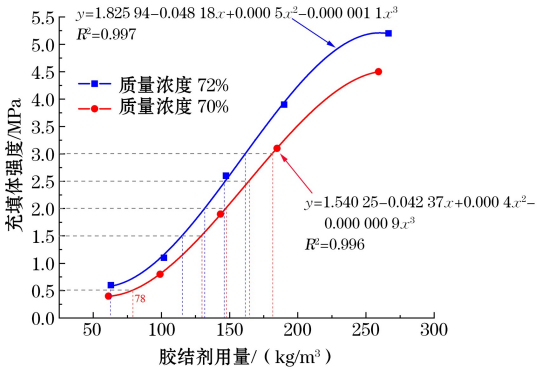


图 4 不同质量浓度条件下充填体强度与胶结剂用量关系

Fig.4 Relationship between filling strength and cementing agent consumption under different mass concentrations

矿山对充填体强度要求及对应的胶结剂用量见表 5,根据表 5 数据可得质量浓度 72%条件下单位充填体胶结剂综合用量为 111.5 kg/m³,质量浓度 70%条件下单位充填体胶结剂综合用量为 128.6 kg/m³,后者比前者多消耗胶结剂 17.1 kg/m³。

表 5 充填体强度对应的胶结剂用量

Table 5 Cementing agent consumption corresponding to filling strength

强度要求/MPa	所占比例/%	胶结剂用量/(kg/m³)	
		质量浓度 72%	质量浓度 70%
3.0	20.7	161.4	182.5
2.5	16.5	146.3	164.2
2.0	18.4	132.2	147.4
1.5	3.2	115.7	129.5
0.5	41.2	62.9	78.8
综合	100.0	111.5	128.6

方案一和方案二两种方案在技术上均可实现,但各有优缺点,并且经济效益有一定差别,为了更好地进行分析,对比两种方案的技术经济效益,将技术优缺点及新增成本差异结果列于表 6。

表 6 两种方案技术经济比较

Table 6 Technical and economic comparison of two schemes

对比内容	方案一	方案二
技术优点	①充分结合自流、泵送工艺,在充填倍线约为 4 的区域构建充填泵硐室; ②提高输送浓度,避免增加胶结剂用量。	①无需技改; ②工艺可靠性高。
技术缺点	①需新增投资; ②可靠性不如自流工艺; ③增加备品备件、电耗、人工等费用; ④硐室较大,需持续安全监测。	综合灰砂比大,胶结剂费用高。
新增成本分析	①新增投资:硐室(25 m×10 m×10 m)和附属设施开挖、支护及后期维护费用约 155 万元;新增充填泵、电气控制、行车、液下渣浆泵等设备费用 760 万元;合计 915 万元,固定资产摊销约 1.6 元/m³。 ②新增运营费用:值守人员、电费、备品备件、管理费用摊销约 6.8 元/m³。	按表 5 计算结果,胶结剂用量增大 17.1 kg/m³,胶结剂单价 320 元/t,新增成本 5.5 元/m³。

由表 6 可知,方案一优点与缺点同样明显,方案二无需技改、工艺流程更可靠;从经济的角度对比,方案二新增胶结剂成本约 5.5 元/m³,而方案一新增投资折旧、人工、电费及管理费用等合计约 8.4 元/m³,可知方案二较方案一节省运营成本约 2.9 元/m³。通过技术经济综合分析,方案二即质量浓度 70%的料浆自流充填大倍线采场更优。

5 结论

(1) 矿山勘探所获新矿体的回采作业常会引起充填倍线发生较大变化,通过充填材料物理性质分析及流变参数测定,确定合理的料浆输送浓度,结合矿山新增矿体充填倍线需求,进行可自流输送倍线的理论计算分析和数值模拟分析,为矿山提供不同的管道输送方案。

(2) 本文根据某矿山新增矿体大倍线输送的需要,研究得到 1∶4 灰砂比条件下最佳输送质量浓度为 70%和 72%;经理论计算分析,质量浓度为 70%和 72%时充填料浆可实现的最大自流输送倍线分别为 9.31 和 5.56;数值模拟结果证明理论分析的正确性,质量浓度 72%时料浆可满足矿山 2.3～4.9 充填倍线采场自流输送的需求,但无法满足边深部新增矿体采矿的需要,而适当降低质量浓度至 70%,能实现充填倍线 7.2～8.7 的大倍线采空区自流充填的需求。

(3) 针对新增矿体大倍线采空区充填,提出增设充填泵加压输送质量浓度 72%充填料浆至大倍线采场(方案一)和质量浓度 70%的料浆自流充填大倍线采场(方案二),通过技术经济综合对比,方案一优点与缺点同样明显,方案二无需技改、工艺流程更可靠,且方案二较方案一节省运营成本约 2.9 元/m³,按新增矿体规划年充填量约 80.5 万 m³ 计算,年节省充填运营成本约 233.45 万元,故方案二更优。

参考文献(References):

[1] 任高峰,郑印,徐海波,等.缓倾斜中厚磷矿残矿资源二次开采与采空区稳定性研究[J].矿业研究与开发,2023,43(10):6-14.

REN Gaofeng, ZHENG Yin, XU Haibo, et al. Study on secondary mining of residual ore resources and goaf stability in gently inclined medium thick phosphatte mine [J]. Mining Research and Development,2023,43(10):6-14.

[2] 齐冲冲,杨星雨,李桂臣,等.新一代人工智能在矿山充填中的应用综述与展望[J].煤炭学报,2021,46(2):688-700.
QI Chongchong, YANG Xingyu, LI Guichen, et al. Research status and perspectives of the application of artificial intelligence in mine backfilling[J]. Journal of China Coal society,2021,46(2):688-700.

[3] 周科礼,熊国雄.铜绿山矿中深孔爆破参数优化试验研究[J].黄金,2023,44(7):96-100.
ZHOU Keli, XIONG Guoxiong. Experimental study on optimization of blasting parameters for medium-long holes in Tonglushan Mine[J]. Gold,2023,44(7):96-100.

[4] 江科,彭亮,康瑞海,等.底流浓度波动对胶结剂单耗的影响研究[J].矿业研究与开发,2020,40(3):155-160.
JIANG Ke, PENG Liang, KANG Ruihai, et al. Study on the influence of underflow concentration fluctuation on unit consumption of cementing agent[J]. Mining Research and Development,2020,40(3):155-160.

[5] 曾令义.低品位倾斜中厚矿体充填采矿法优选[J].黄金,2023,44(2):22-26.
ZENG Lingyi. Filing mining method optimization for low-grade medium-thick inclined ore body[J]. Gold, 2023, 44(2):22-26.

[6] 刘大勇,彭桥梁,苏特.万家坪锰矿地质地球化学特征及找矿远景[J].金属矿山,2020(8):119-128.
LIU Dayong, PENG Qiaoliang, SU Te. Geological and geochemical characteristics and prospecting prospect of Wanjiaping manganese deposit[J]. Metal Mine,2020(8):119-128.

[7] 肖飞云.广东省大宝山铜多金属矿边深部控矿因素及找矿探讨[J].现代矿业,2023,39(5):29-32+51.
XIAO Feiyun. Ore-controlling factors and prospecting discussion of Dabaoshan copper polymetallic deposit in margin and depth areas in Guangdong[J]. Modern Mining, 2023,39(5):29-32+51.

[8] 刘伟涛,王莹莹,杨莹,等.自流充填管道局部变径满管输送的环管试验[J].矿冶工程,2023,43(6):20-23+28.
LIU Weitao, WANG Yingying, YANG Ying, et al. Loop pipe test on transportation with full pipe flow in a tapered pipeline with gravity-fed backfill [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2023,43(6):20-23+28.

[9] 孙凯华.高浓度充填料浆大倍线管道自流输送技术及应用[J].矿业安全与环保,2021,48(6):113-117+122.
SUN Kaihua. Gravity convey technology and application by pipeline with high density backfill slurry and great times line [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(6):113-117+122.

[10] 江科,崔旺,胡剑宇,等.某铁矿充填管网延深参数优化研究[J].金属矿山,2019(1):29-33.
JIANG Ke, CUI Wang, HU Jianyu, et al. Optimization study on the deepening parameter of a certain iron mine backfilling pipe network[J]. Metal Mine,2019(1):29-33.

[11] 张淑坤,杨浩杰,付康,等.磷石膏矿山充填材料研发与性能试验研究[J].矿业安全与环保,2024,51(1):133-139.
ZHANG Shukun, YANG Haojie, FU Kang, et al. Research on the development and performance test of phosphogypsum filling materials for mines [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2024,51(1):133-139.

[12] 丁文智.凡口矿边缘矿体充填管路布置研究[D].长沙:中南大学,2022.
DING Wenzhi. Study on filling pipeline layout of edge ore body in Fankou Mine[D]. Changsha:Central South University,2022.

[13] 刘鹏亮.固料特性对煤矿充填料浆流动性影响规律研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2021.
LIU Pengliang. Study on the influence of solid properties on the fluidity of coal mine filling slurry [D]. Beijing: Coal Science Research Institute,2021.

[14] 王新民.基于深井开采的充填材料与管输系统的研究[D].长沙:中南大学,2006.
WANG Xinmin. A Study of filling materials and pipeline transportation systems in deep mines[D]. Changsha:Central South University,2006.

[15] 温茂.减水剂-粉煤灰复合掺料膏体力学性能及水化机理研究[J].煤炭与化工,2023,46(10):11-18.
WEN Mao. Study on mechanical properties and hydration mechanism of water reducing agent-fly ash composite admixture paste[J]. Coal and Chemical Industry,2023,46(10):11-18.

[16] 靳天朴.减水剂对粗骨料膏体料浆流动性及强度的影响研究[J].中国矿业,2023,32(增刊 2):223-228.
JIN Tianpu. Effect of water reducers on fluidity and strength of coarse aggregate filling slurry [J]. China Mining Magazine,2023,32(Suppl.2):223-228.

[17] 曹宝栋,郭攀.减水剂对掺膨润土胶结充填体强度及流动性能的影响研究[J].金属矿山,2023(10):247-252.
CAO Baodong, GUO Pan. Study on the influence of water reducing agent on the strength and flow performance of bentonite-doped cemented backfill [J]. Metal Mine, 2023(10):247-252.