

矽石浆体输送阻力特性及采空区流动规律试验研究

朱磊^{1,2},宋天奇^{1,2},古文哲^{1,2},徐凯^{1,2},刘治成^{1,2},秋丰岐^{1,2},袁超峰^{1,2}

(1.中煤能源研究院有限责任公司,陕西 西安 710054;2.中煤西安设计工程有限责任公司,陕西 西安 710054)

摘要:浆体充填是一种低干扰条件下矽石无害化处置的重要技术手段,保证浆体在管道中安全输送及在采空区中稳定流动是充填系统稳定运行的基础。为深入研究矽石及矽石浆体基本特性、浆体输送阻力特性及采空区流动规律,通过 X 射线衍射试验、电镜扫描试验、矽石粒径分布试验、浆体塌落度试验得到了矽石及矽石浆体的基本特性参数;设计了矽石浆体长距离环管输送试验系统,并针对不同流速进行环管试验,建立浆体流速与沿程阻力的关系,确定最佳工作流速及该条件下的沿程阻力;开展邻位注浆充填采空区流动扩散试验,掌握浆体在采空区垮落带内的流动扩散规律,测定试验条件下浆体在采空区内的自流坡度,揭示浆体流动过程颗粒沉降规律;并对矽石浆体邻位注浆充填进行了工程应用。研究表明:矽石的物相组成包括主要包括石英、高岭石,有部分长石、云母和少量的绿泥石、方解石、菱铁矿、黄铁矿等矿物,粒径分布为 1 250~3 000 μm (18.18%), 630~1 250 μm (18.99%), 315 ~630 μm (19.35%), 160~315 μm (15.02%), 75~160 μm (11.73%), <75 μm (16.74%), 70% 质量分数的矽石浆体塌落度为 28.1 cm,扩展度为 50.1 cm,自流坡度为 3.8%,具有较好的流动性;浆体管道输送的沿程阻力随流速的增加而增加,且近似成正比关系,拟合关系函数为 $y=0.602\ 44\ x+0.784\ 11$, 确定试验浆体在管径为 $\phi 60\ \text{mm}$ 条件下最佳工作流速为 1.50 m/s,其沿程阻力为 1.68 kPa/m;浆体采空区内流动规律整体呈现先纵向扩展再横向扩散的规律,首先在出料口下方形成半圆形覆盖层,然后继续向底部扩展形成纵向扩展通道,待浆体沿纵向通道扩散至底部边界时,浆体开始沿横向扩散,稳定后浆体平均自流坡度为 7.1%,且固体颗粒在采空区流动过程中出现颗粒分选现象,在浆体流动方向上<74 μm 细颗粒比例有所升高,>74 μm 的粗颗粒比例有所下降。工程应用结果表明,充填期间矽石浆体管道输送状态稳定,浆体中的固体颗粒未发生淤积,且浆体在采空区空隙空间流动性极佳,未出现聚集沉降现象,根据钻孔窥视结果,浆体扩散距离大于 45 m,设计的浆体管道输送流速、浆体级配质量分数合理,满足系统要求。

关键词:浆体充填;邻位注浆;阻力特性;流动规律;颗粒沉降

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2022)S1-0039-10

Experimental research on transport-resistance characteristics of gangue slurry and its flow trend in goaf

ZHU Lei^{1,2}, SONG Tianqi^{1,2}, GU Wenzhe^{1,2}, XU Kai^{1,2}, LIU Zhicheng^{1,2},
QIU Fengqi^{1,2}, YUAN Chaofeng^{1,2}

(1.China Coal Energy Research Institute,Xi'an 710054,China;2.China Coal Xi'an Design Engineering Co.,Ltd.,Xi'an 710054,China)

Abstract: Slurry filling is deemed as a significant technique for harmless disposal of gangue under the condition of low interference.The safe transport of slurry in the pipe and its stable flow in the goaf area lays the foundation for the relia-

收稿日期:2021-08-15 修回日期:2021-09-10 责任编辑:郭晓伟 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.1298
作者简介:朱磊(1982—),男,安徽阜阳人,高级工程师,博士。Tel:029-87870177,E-mail:103210851@qq.com
通讯作者:宋天奇(1995—),男,黑龙江望奎人,工程师,硕士。Tel:029-87876974,E-mail:stq344359844@163.com
引用格式:朱磊,宋天奇,古文哲,等.矽石浆体输送阻力特性及采空区流动规律试验研究[J].煤炭学报,2022,47(S1):39-48.
ZHU Lei, SONG Tianqi, GU Wenzhe, et al. Experimental research on transport-resistance characteristics of gangue slurry and its flow trend in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 39-48.



ble operation of filling system. In order to deeply study the fundamental characteristics of gangue and slurry, and the piping resistance and flow dynamics of slurry in the goaf area, the basic parameters of gangue and gangue slurry were obtained through X-ray diffraction test, electron microscope scanning test, gangue particle size distribution test as well as slurry slump test. A long-distance loop piping system for transporting gangue slurry was designed and a series of loop piping tests were carried out under different flow velocities, thus the relationship between transport velocity and friction loss was established and the optimized transport velocity and friction loss of slurry could be determined. Then, grouting tests were carried out in the adjacent goaf to analyze the flow and diffusion characteristics of slurry within the caving zone of the goaf area and measure the slurry flow induced by gravity gradient in the goaf, thereby revealing the particle sedimentation law in the process of slurry flow. According to the testing results, the engineering application of gangue slurry in grouting filling in the adjacent goaf was provided. The research shows that the gangue is predominantly composed of quartz and kaolinite. Also, some feldspar and mica, and a small amount of chlorite, calcite, siderite, pyrite, and other minerals could be found in the gangue. The particle size ranging from 1 250 μm to 3 000 μm , from 630 μm to 1 250 μm , from 315 μm to 630 μm , from 160 μm to 315 μm , from 75 μm to 160 μm as well as particle size smaller than 75 μm account for 18.18%, 18.99%, 19.35%, 15.02%, 11.73%, and 16.74% respectively. In addition, 70% of slurry containing gangue has a slump of 28.1 cm, a slump flow of 50.1 cm as well as the flowing slope induced by gravity of 3.85, which demonstrating a decent flowability. The resistance along with the slurry pipeline increases with flow velocity and an approximately proportional relationship could be found and expressed as $y=0.602\ 44x+0.784\ 11$. When the diameter of the pipeline is 60 mm, the optimal transport velocity and friction loss are determined to be 1.50 m/s and 1.68 kPa/m. Overall, the slurry flowing characteristics presents trends of first vertically expanding and then horizontally diffusing. A semi-circular covering layer is firstly formed under the discharging port, and then the slurry travels across the covering layer and spreads towards the bottom floor. Once it reaches the bottom boundary, it starts to diffuse laterally, with the average flowing slope induced by gravity reaching 7.1% after stabilization. In addition, particle separation phenomena could be observed when the solid particles flow in the goaf area, with the proportion of fine particles smaller than 200 mesh increasing slightly and coarse particles bigger than 200 mesh reducing in the flowing direction of slurry. The engineering application indicates that the gangue slurry could be reliably piped without sedimentation amid filling, and no aggregation and settlement occur within the permeable space of goaf, meaning that the slurry shows an excellent flowability. According to the visual results through the peepholes, the spreading distance of slurry could exceed 45 m, which means that the slurry piping velocity and gradient concentration have been reasonably designed to meet the system requirements.

Key words: slurry filling; adjacent grouting; resistance characteristics; flow dynamics; particle sedimentation

煤炭作为我国一次能源中的主体,在经济运行中的压舱石作用没有改变,能源消费占比较高。但大规模高强度回采活动和煤炭资源利用过程产生了大量的煤矸石固体废弃物^[1-3]。据不完全统计,我国煤矸石年排放量已高达 7.59 亿 t^[4],且排放量呈逐年上升趋势。除少量综合利用外,仍主要以地面排放方式进行处理,占用大量土地资源,同时污染空气、地下水及土壤,带来一系列生态环境问题^[5-8]。针对上述问题,国内外学者提出了包含综合利用技术和充填开采在内的多种应对措施。但综合利用技术存在技术适应性差,推广难度大的弊端;膏体充填、固体充填等充填开采技术也存在着工作面生产能力低、成本高等缺点,主要用于特殊条件下的“三下”采煤,无法满足现代化高产高效矿井的生产需求^[9-11]。因此,针对煤炭

行业高质量发展行业现状下的矸石处理问题,提出了以矸石处理及地表减沉为主要目的的浆体充填技术^[1]。通过井下制浆系统将煤矸石与水混合制成一定质量分数的矸石浆体,利用邻位注浆形式对采空区垮落带进行充填,实现工作面低干扰条件下的煤矸石无害化处置。

由于充填目的的不同,浆体充填区别于膏体充填,不过高追求充填体强度,主要通过优化浆体配比及工艺增加矸石充填量。同时,为降低充填成本,取消了胶结料的添加,但带来细粒级骨料含量下降的问题,导致煤矸石浆体与传统膏体在输送性能及流动性上存在较大差异^[12-13]。另一方面,为实现矸石充填量的大规模提升,矸石浆体在满足长距离输送需求的同时,还需满足采空区内流动性较好的要求。

目前,国内外对于料浆输送阻力特性研究多针对膏体开展,且多集中在膏体管道输送阻力模型研究和环管试验研究^[14]。早期国内学者基于两相流理论在特定物料、特定应用环境下建立了大量的沿阻计算模型,如金川公式、长沙矿冶院公式、鞍山院公式和会泽经验公式^[15-16],但均适用于特定条件,在推广应用上存在一定局限性,且不完全适用于浆体。通过大量文献总结,认为料浆的沿程阻力因素主要包括质量分数、骨料级配、密度、管径、流速、添加剂等,影响因素较多,变化规律复杂^[17-19]。因此,工程中为充分考虑浆体管道运输的各种影响因素,常采用环管试验模拟系统实际运行情况,分析确定浆料的输送性能^[20-22]。鉴于此,为得到煤矽石浆体输送阻力特性,笔者设计环管输送试验,确定矽石浆体沿程阻力损失,同时补充采空区流动相似模拟试验,验证矽石浆体采空区中流动特性,为邻位注浆充填工程实施与设计提供数据支撑。

1 矽石及矽石浆体基本特性

1.1 矽石粉末基本理化性质

采用 X 射线衍射仪对矽石充填材料的矿物成分进行测试,测试结果如图 1 所示。

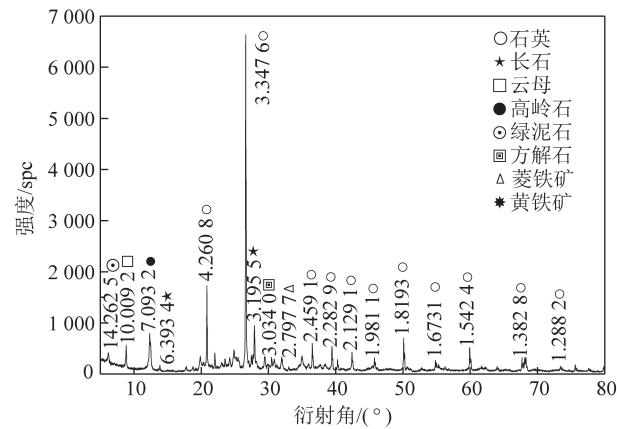


图 1 煤矽石 X 射线衍射图谱

Fig.1 X-ray diffraction pattern of coal gangue

根据粉末衍射联合会国家数据中心 (TCPDS-IC-DD) 提供的各种物质标准粉末衍射资料,按照标准分析方法进行对照分析。分析结果如下:物相组成主要包括石英、高岭石,有部分长石、云母和少量的绿泥石、方解石、菱铁矿、黄铁矿等矿物。

为表征破碎后矽石粉末外观形貌,对其进行电镜扫描试验,在高倍率(1 000 倍图片中显示)条件下观测时可见表面存在部分裂隙,表面凹凸不平,如图 2 所示。

结合 X 射线衍射能谱测试结果可得,矽石内含

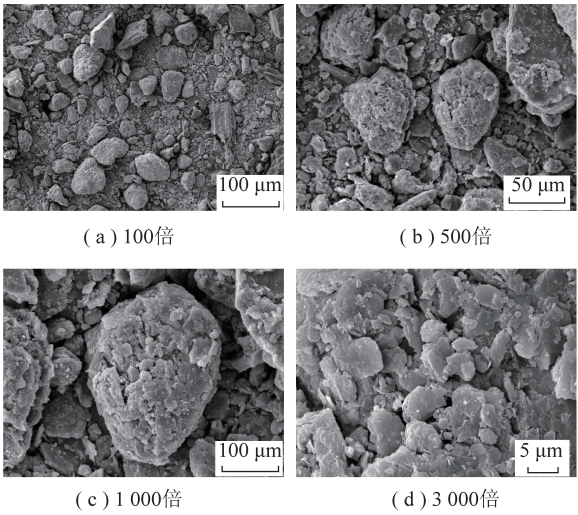


图 2 SEM 电镜扫描图片

Fig.2 SEM scanning picture

有较多的高岭石(呈片状)等矿物,少量的“大块”颗粒被大量的细小粒径且呈片状颗粒包裹。在制浆过程中片状高岭土矿物可作为细颗粒将大粒径的矽石包裹悬浮,有利于保证浆体的稳定性,实现长距离稳定输送。

1.2 矽石粒径分布

破碎后的矽石粉末为浆体充填材料的主要骨料,经实验室测定本次试验所用矽石粉粒径在 1 250 ~ 3 000 μm, 630 ~ 1 250 μm, 315 ~ 630 μm, 160 ~ 315 μm, 75 ~ 160 μm, <75 μm 的比例分别为 18.18%, 18.99%, 19.35%, 15.02%, 11.73%, 16.74%。粒径分布曲线如图 3 所示。

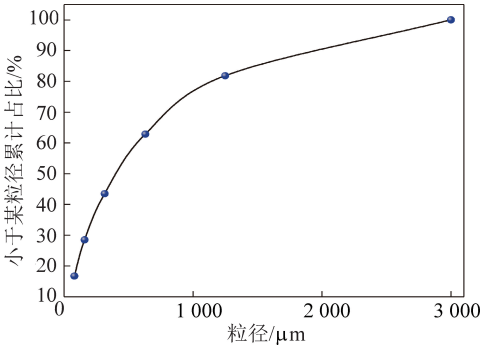


图 3 破碎后矽石粉末粒径分布

Fig.3 Particle size distribution of crushed gangue powder

1.3 矽石浆体塌落度试验

根据基础试验测试结果,试验选用浆体质量分数为 70%,固相物料为矽石粉末,液相为水。按照现有膏体充填实践经验,满足泵送的料浆塌落度至少为 15 ~ 20 cm,根据金川镍矿、铜绿山铜矿等矿山实践经验,塌落度在 25 ~ 28 cm 时,料浆具有较好的流动

性^[23]。对 70%质量分数的煤矸石浆体进行塌落度试验如图 4 所示,试验测试得到塌落度及扩展度结果见表 1,计算得到浆体平均自流坡度为 3.8%。

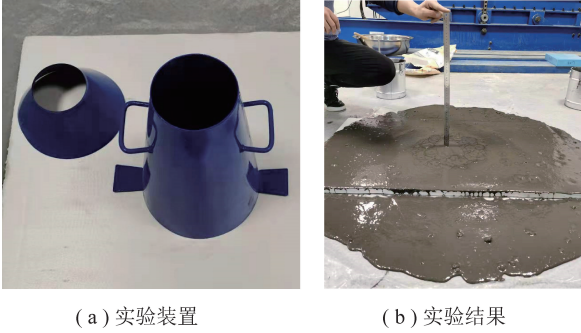


图 4 矸石浆体塌落度试验
Fig.4 Slump test of gangue slurry

表 1 塌落度及扩展度测试结果

Table 1 Test results of slump and expansion

编号	质量分数/%	塌落度/cm		扩展度/cm	
		实测	平均	实测	平均
1	70	28.2	28.1	50.4	50.1
2		27.6		49.7	
3		28.1		50.1	

2 矸石浆体长距离环管输送试验

浆体输送是浆体充填中重要的工艺环节,其输送阻力是关键设备选型和系统设计的基础。由于浆体性质与膏体性质存在较大差异性,且国内暂无应用经验,为合理确定输送参数,采用环管试验形式对煤矸石浆体的输送阻力进行测试,为输送系统设计提供数据支撑。

2.1 试验参数设计

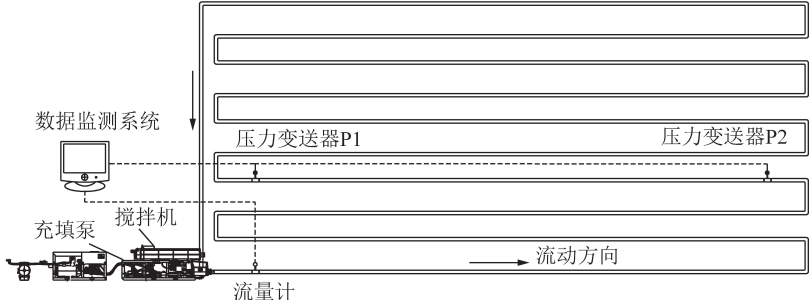
根据基础试验测试结果,确定试验用浆体质量分数为 70%,试验管径为 $\phi 60\text{ mm}$ 。根据理论计算,临界流速为 1.31 m/s ,为保证长距离环管试验系统不发生淤积,能够正常运行,试验流速需大于该临界流速,即流量应大于 $13.4\text{ m}^3/\text{h}$,因此确定试验流量为 $15, 18, 21, 24\text{ m}^3/\text{h}$ (变化梯度 $3\text{ m}^3/\text{h}$),对应流速分别为 $1.47, 1.77, 2.06, 2.35\text{ m/s}$ 。

2.2 长距离环管试验系统

长距离环管试验系统用于测量煤矸石浆体输送阻力及输送过程中浆体稳定性,相比传统短距离环管试验系统,该系统浆体流动更稳定,状态更接近真实情况,数据精度高。主要设备包括储料仓、定量给料设备、连续搅拌机、柱塞充填泵、管路系统($1\text{ }100\text{ m}$)、传感器及数据监测系统,系统布置实物及原理如图 5 所示。



(a) 试验系统实物



(b) 原理示意

图 5 长距离环管试验系统示意

Fig.5 Schematic diagram of long distance loop tube test system

2.3 试验结果及分析

根据长距离环管输送试验数据,监测得到流速分别为 $2.35, 2.06, 1.77, 1.47\text{ m/s}$ 条件下的管道沿程阻力分别为 $2.13, 1.96, 1.78, 1.64\text{ kPa/m}$,如图 6 所示。通过数据可以看出,与煤矿常规的膏体充填材料相比,管道沿程阻力明显降低,可泵送性能显著提高,大幅度提高料浆输送距离,对于井田范围较大的矿井实施浆体充填提供了便利条件^[24-25]。为进一步分析矸石浆体的阻力特性,根据数据点拟合该颗粒级配及质量分数条件下浆体流速与沿程阻力的关系函数为 $y = 0.602\ 44x + 0.784\ 11$ 。

由图 6 可知,试验测试范围内,浆体沿程阻力随

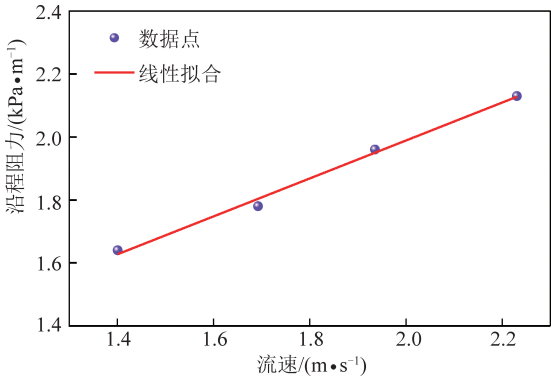


图 6 浆体流速对沿程阻力影响

Fig.6 Effect of slurry velocity on resistance

浆体流速的增加而增加,且近似成正比关系,因此在保证浆体稳定输送的前提下,应尽量减小输送速度,防止浆体管道沿程阻力过大出现堵管或爆管事故。但浆体流速亦不可无限限制减小,浆体流速过低导致固体颗粒受流体的升力大大降低,当速度降低至某一临界值时,则容易出现浆体中粗颗粒沉淀分层等不利输送的因素,该流速临界值称为临界流速。目前常用的临界流速计算方法为秦皇岛黑色冶金矿山设计院公式和长沙矿冶研究院公式^[26]。

(1) 秦皇岛黑色冶金矿山设计院公式:

$$U_{kp} = 2.44 \left(\frac{\rho_s - \rho_h}{\rho_h} \right)^{0.27} C_{QV}^{-0.135} D^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中, U_{kp} 为临界流速, m/s; ρ_s 为矸石粉末密度, kg/m³; ρ_h 为水的密度, kg/m³; C_{QV} 为固液两相流流量体积分数; D 为管道直径, m。

(2) 长沙矿冶研究院公式:

$$U_{kp} = 2.809 \left(\frac{\rho_s - \rho_h}{\rho_h} \right)^{-0.308} C_{QV}^{-0.308} D^{0.31} \quad (2)$$

将试验用矸石浆体参数代入式(2)计算,得到临界流速分别为 1.15, 1.31 m/s。在长距离环管试验过程中,进行初始搅拌后均未在循环起点位置(柱塞泵吸料口)对输送浆体进行 2 次搅拌,通过不同流速条件下浆体输送状态的观察,发现在 2.35, 2.06, 1.77, 1.47 m/s 四种流速状态下连续输送 2 h,浆体仍可保持稳定状态,如图 7 所示。因此,基于临界流速计算结果及长距离环管试验结果,综合确定试验浆体临界流速为 1.31~1.47 m/s。由于沿程阻力随浆体流速增大显著增加,且浆体流速增加管道磨损程度也随之增加,考虑输送经济性及系统稳定性,并考虑一定安全系数,确定管径为 $\phi 60$ mm 的该浆体最佳工作流速为 1.50 m/s。



图 7 浆体长距离输送稳定性

Fig.7 Stability of slurry long distance transportation

确定工作流速后,根据拟合浆体流速与沿程阻力的关系函数 $y = 0.602 44x + 0.784 11$,计算得到工作流速条件下浆体沿程阻力为 1.68 kPa/m。

3 邻位注浆充填采空区流动扩散试验

3.1 技术背景

邻位注浆充填是指在垮落带上部区域布置邻位注浆充填钻孔,构建同一层位在倾向空间的浆体充填通道,其实现手段主要为从相邻工作面巷道或相邻大巷等位置施工仰上钻孔至垮落带上部区域,如图 8 所示。

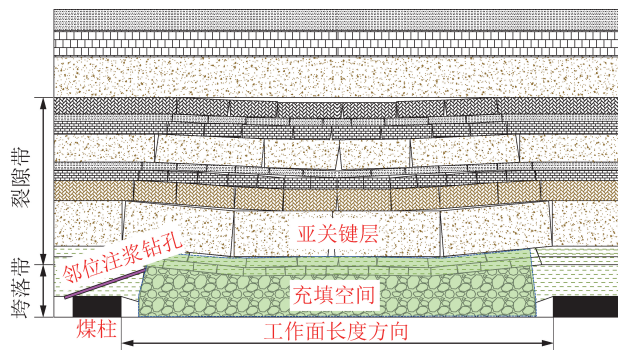


图 8 邻位注浆充填技术手段示意

Fig.8 Schematic diagram of adjacent grouting filling technology

邻位注浆充填的适用条件较为宽泛,既可应用于正在回采的工作面实现随采随充,同时也可通过在大巷或终采线内施工仰上钻孔作为老空区浆体充填的技术手段,实现采后充填。

3.2 试验方案设计

邻位注浆充填采空区流动扩散试验系统是基于长距离环管试验系统进行扩展,包含原有的搅拌系统、泵送系统、管道系统、数据监测系统和新增的采空区垮落带模拟区,如图 9 所示。

采空区内孔隙在倾向和走向分布存在非均匀性,且倾向的非均匀性更为显著。当工作面回采后,工作面后方采空区上覆岩层垮落,基本顶初次来压基本形成“O—X”破断,在工作面端头破断形成弧形三角块,并在采空区内形成岩层承载结构,该结构能够承受上覆岩层的大部分载荷,使弧形三角块下部垮落矸石呈松散堆积状态,为浆体可充填利用空间。本次流动扩散试验主要模拟矸石浆体在弧形三角块下的采空区的内流动特点以及流动过程中的颗粒沉降规律。试验设计的采空区垮落带模拟区的尺寸为 3.0 m × 7.0 m × 1.8 m (长×宽×高),模型右侧边界共设计 3 个不同高度注浆孔(按高度从高到低分别为 1 号、2 号、3 号),本次试验主要模拟邻位注浆条件下浆体在采空区垮落带内的流动扩散规律,根据邻位注浆钻孔的终孔位置,利用 1 号孔进行试验。考虑试验对浆体流动性的观测效果,模型堆积平面范围为整个箱体范

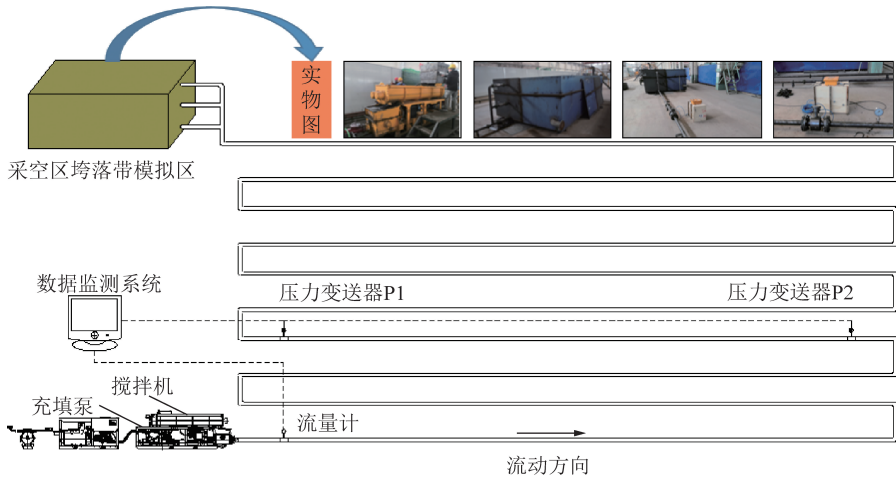


图 9 邻位注浆充填采空区流动扩散试验系统

Fig.9 Flow diffusion test system of adjacent grouting filling goaf

围,堆积高度为 1.5 m,共布置两条测线对浆体充填过程中在采空区内的自流坡度进行监测,模型及测线布置示意图 10 所示。

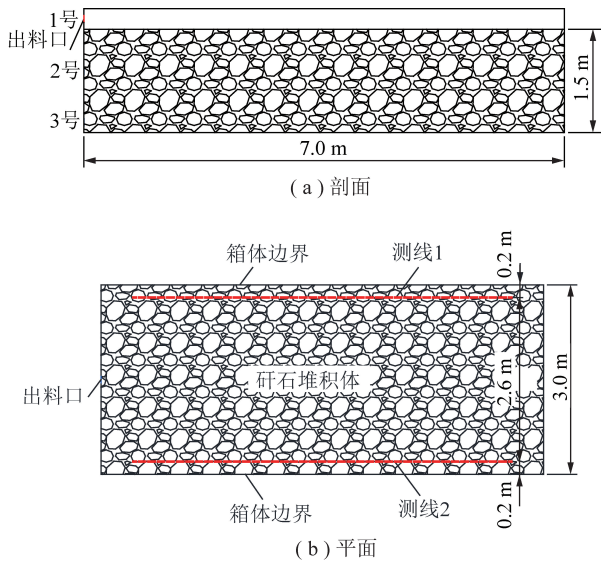


图 10 采空区邻位注浆充填模型

Fig.10 Filling model of adjacent grouting in goaf

试验所用矸石浆体与长距离环管试验的浆体粒径质量分数完全一致,在矸石堆积体堆满后利用工具挖开测线位置的矸石堆积体,用来记录充填过程中浆体的流动特性及自流坡度。

3.3 试验结果及分析

3.3.1 矸石浆体流动规律

根据试验过程的观察,矸石浆体可以通过堆积体的空隙空间进行流动,且整体流动性较好,流动规律整体呈现先纵向扩展再横向扩散的规律,根据流动特点可分为 4 个阶段(图 11)。阶段 1:试验前期,矸石浆体首先在出料口下方矸石堆积体上形成半径约

0.5 m 的半圆形覆盖层,随着充填量的不断增加浆体并未沿矸石堆积体上层边界进一步扩展,而是在覆盖区域内向下部扩展,在孔口附近一定范围形成纵向扩展通道。阶段 2:待浆体沿纵向通道扩散至箱体底部边界时,浆体开始沿横向扩散,并沿扩散方向形成一定的坡度。阶段 3:随着充填量继续增加,浆体在横

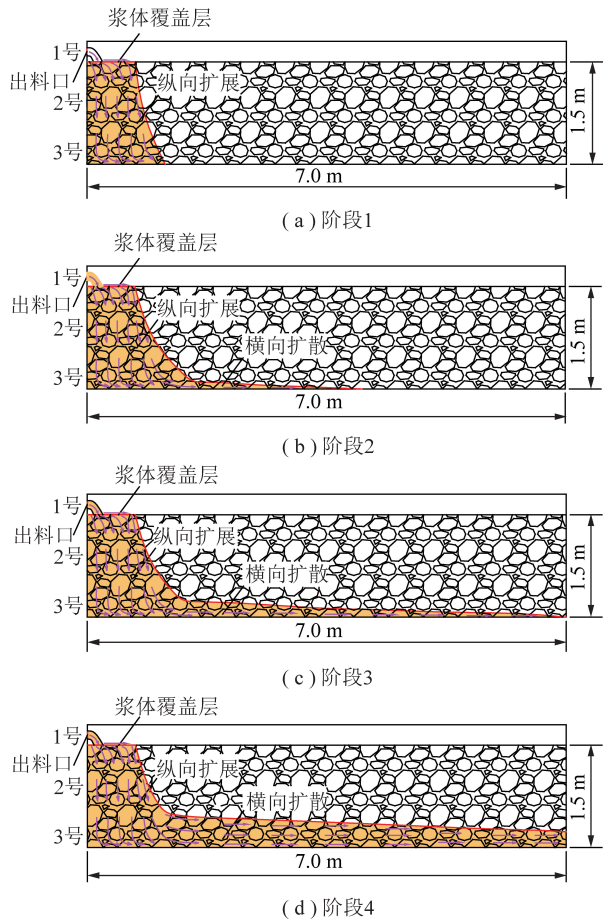


图 11 浆体在矸石堆积体中流动过程

Fig.11 Flow process of slurry in gangue accumulation

向方向不断扩散,直至接触到箱体边界。阶段 4:浆体接触边界后,浆体高度随充填量不断上升,但液面坡度基本保持稳定,其流动过程如图 11 所示。

在充填过程中,利用工具挖开测线位置的矽石堆积体,便于数据记录及浆体流动状态观察如图 12 所示。利用测线 1 和测线 2 位置的监测结果,绘制出充填量为 0.9、1.6、2.0 m³时的堆积高度曲线,如图 13 所示。

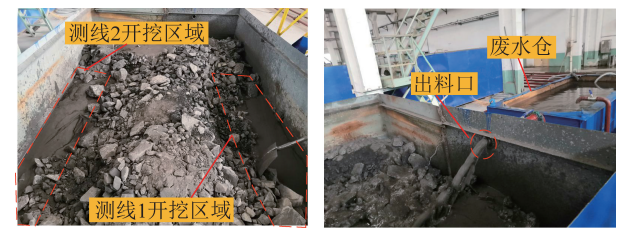


图 12 邻位注浆采空区流动试验现场
Fig.12 Flow test site of adjacent grouting goaf

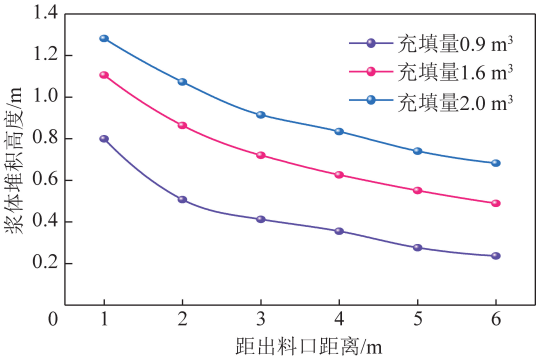


图 13 浆体堆积高度曲线
Fig.13 Curves of slurry stacking height

由图 12、13 可知:
(1)距离出料口较近区域的浆体自流坡度明显大于距离出料口较远区域。这是由于浆料在出料口附近位置主要流动为纵向扩展,因此在出料口附近的箱体底部出现堆积,坡度较大,堆积过程浆体依靠重力及自流作用向横向扩散。

(2)浆体自流坡度随距出料口距离的增加,先不断减小,最后趋于稳定。矽石堆积体中浆体自流坡度按变化规律大致可分为 2 个区域:Ⅰ类区域在距出料口 0~3 m,受纵向扩展区域的影响,自流坡度较大,平均值为 18.82%;Ⅱ类区域在距出料口 3~7 m,自流坡度趋于稳定,平均值为 7.1%。

(3)浆体在矽石堆积体中稳定后坡度为 7.1%,而塌落度试验中浆体坡度为 3.8%,相比塌落度试验矽石堆积体中的自流坡度有所增大。这是由于矽石堆积体对浆液流动存在一定的阻挡作用,同时矽石堆积体表面较干燥,在浆液流动过程中吸收一部分浆体

中的水分,导致浆体质量分数上升,进一步导致浆体横向扩散能力减弱,自流坡度增大。

3.2.2 矽石浆体流动过程颗粒沉降规律

矽石浆体在流动过程中可能出现颗粒沉降现象,试验结束后对测线 1 区域距离出料口边界 1.0、6.0 m 位置 2 点进行均匀取样,如图 14 所示。取样后对浆体进行烘干筛分,烘干后的矽石粉末中-74 μm 占比分别为 11.18%和 22.69%。

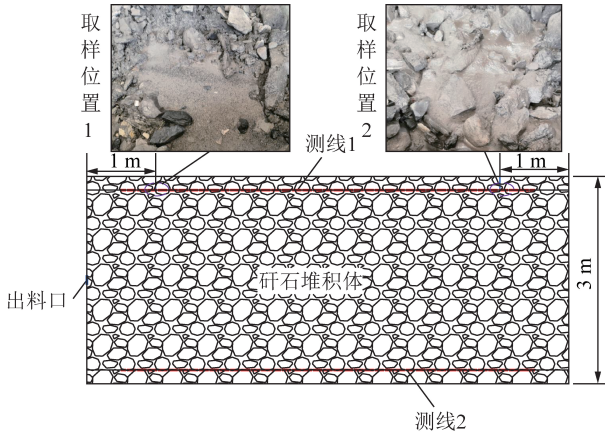


图 14 充填试验后浆体取样情况
Fig.14 Slurry sampling after filling test

通过筛分结果可知,在浆体流动方向上小于 74 μm 细颗粒比例有所升高,相应的流动方向上大于 74 μm 的粗颗粒比例有所下降,说明矽石浆体中的固体颗粒在采空区流动过程中出现颗粒分选现象。产生这种现象的主要原因:矽石堆积体中的空隙空间形状各异且随机分布,当局部位置出现较小空隙时,矽石浆体在其中流动过程,速度大小和方向频繁发生大幅度改变,导致浆体流动状态多变且自身稳定性下降,最终导致矽石浆体中粗颗粒在竖直方向的沉降速度加大。同时,在局部矽石堆积体空隙较小的位置,也可观察到大颗粒聚集沉降现象,发生沉降的多为 2.0~3.0 mm 的粗颗粒,这说明采空区中尺寸较小的空隙是浆体颗粒分选作用的主要位置,且主要作用于 2.0~3.0 mm 的粗颗粒。基于此,浆体充填过程中颗粒级配需合理考虑,避免粗颗粒占比较大,造成浆体采空区流动过程在局部位置出现密集沉降。

4 矽石浆体邻位注浆充填工程应用

4.1 工程概况

黄陵二号井原煤生产能力 10 Mt/a,每年矽石总量约 0.85 Mt/a,其中井下工作面布置过程中起底及硐室掘进产生的纯矽约 20 万 t/a。目前已经回采完成 3 盘区的 301 工作面和 2 盘区的 209 工作面,其接续工作面为 4 盘区的 404 工作面和 2 盘区的 211 工

工作面。3 盘区的 303 工作面为备采工作面,短时间内 303 回风巷闲置,因此将充填系统布置在 303 回风巷

对 301 老空区进行充填,可有效避免生产与充填的交叉作业,具体的邻位注浆充填位置如图 15 所示。

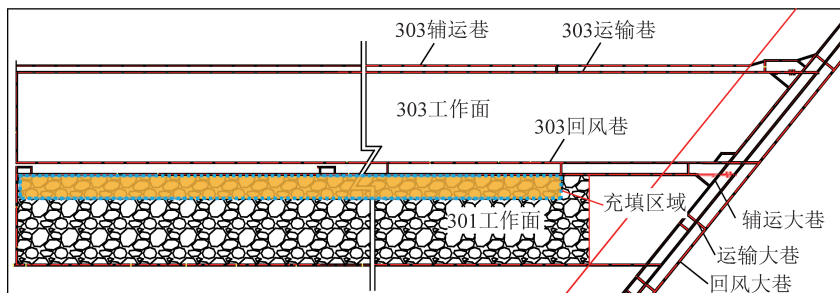


图 15 邻位注浆充填位置

Fig.15 Filling position of adjacent grouting

4.2 充填方案

4.2.1 充填工艺及关键参数

根据前期试验结果,确定工程应用阶段矸石浆体质量分数为 70%,泵送压力为 8 MPa,工作流速为 1.5 m/s,选用的柱塞充填泵型号为 HBMG30/21-110S,选用的搅拌机型号为 JSY3200。工艺主要分为以下步骤:定量上料→搅拌制浆→泵送→充填,具体设备布置平剖面如图 16 所示。

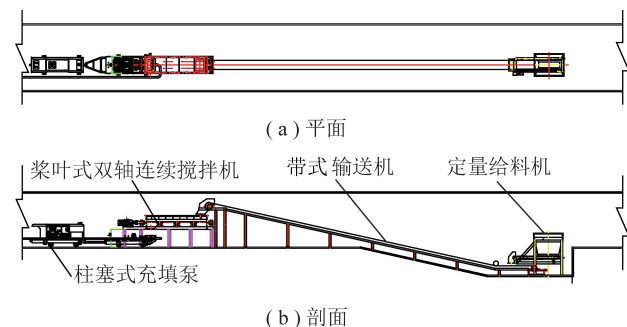


图 16 邻位注浆充填站设备布置

Fig.16 Equipment layout of adjacent grouting filling station

4.2.2 充填钻孔布置

综合理论计算、实测数据及工作面顶板情况分析,301 工作面煤层回采后形成的采空区垮落带高度为 9.2~16.9 m。因此,为保证终孔位置位于垮落带,前期设计充填钻孔终孔高度为 11 m,仰角为 9°,钻孔孔径 $\phi 133$ mm。注浆钻孔全程下保护套管用于隔离采空区垮落矸石,下套管后钻孔尾端进行注水泥浆固管,注浆管末端 3.0~5.0 m 连接花管增加洒浆范围,花孔孔径 25 mm。

4.3 充填效果

现场压力监测数据表明注浆期间管道及充填钻孔压力稳定,可实现连续稳定充填作业,采空区邻位注浆充填效果良好(图 17)。成功验证了井下邻位注浆充填技术的可行性,进一步证明采空区垮落带内存在充足的充填空间,同时证明工程应用所选定的设备

及输送参数合理,系统稳定性较高。

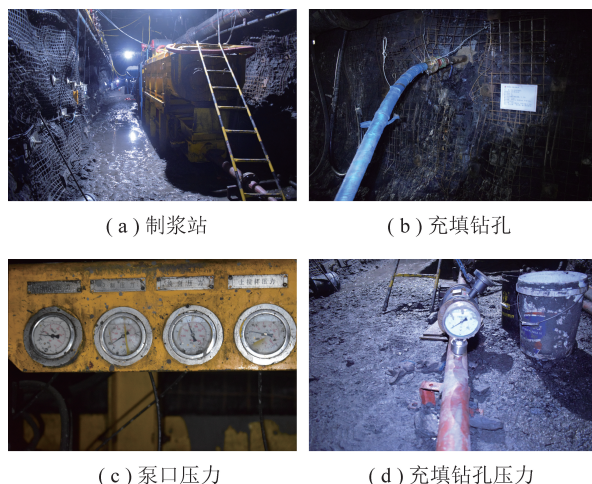


图 17 邻位注浆充填现场

Fig.17 Site of adjacent grouting filling

充填期间矸石浆体管道输送状态稳定,浆体中的固体颗粒未发生淤积,且浆体在采空区空隙空间流动性极佳,未出现聚集沉降现象,说明前期设计的浆体管道输送流速、浆体级配质量分数合理。

单孔累计注浆量达到 700 m³时,根据浆体在采空区内的自流坡度 7.1%进行计算,预计浆液扩散距离为 53 m。在距离钻孔 45 m 位置穿过煤柱施工俯斜孔,孔深 36 m,确保钻孔终孔位置位于底板上方,成孔后立即用钻孔窥视仪对孔内情况进行窥视,孔内窥视情况如图 18 所示。

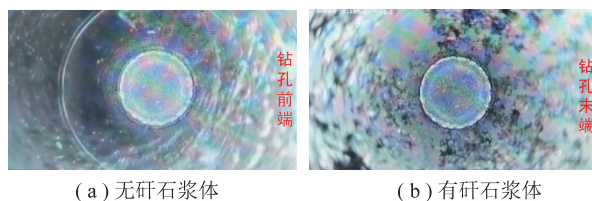


图 18 钻孔窥视情况

Fig.18 Bored peeping pictures

窥视结果显示,在钻孔前端位置孔内孔壁完整,窥视仪继续深入到达钻孔末端位置,窥视仪镜头被浆体覆盖,说明矽石浆体已扩散至窥视位置。证明充填浆液在采空区中流动扩散性能较好,该充填钻孔浆体的扩散距离大于 45 m。

5 结 论

(1) 破碎后煤矽石的物相组成主要包括石英、高岭石,有部分长石、云母和少量的绿泥石、方解石、菱铁矿、黄铁矿等矿物,与水混合配置成的 70% 质量分数的矽石浆体塌落度为 28.1 cm,扩展度为 50.1 cm,自流坡度为 3.8%,具有较好的流动性。

(2) 矽石浆体充填材料与煤矿常规的膏体充填材料相比,由于未添加胶结料,浆体黏度显著降低,管道沿程阻力明显降低。试验条件下,浆体沿程阻力随浆体流速的增加而增加,且近似成正比关系,浆体流速与沿程阻力的关系函数为 $y = 0.602\ 44x + 0.784\ 11$ 。

(3) 基于理论计算及试验结果,综合确定试验浆体临界流速为 1.31~1.47 m/s。且考虑管道磨损、输送经济性及系统稳定性,确定管径为 $\phi 60$ mm 的该浆体最佳工作流速为 1.50 m/s。

(4) 矽石浆体可以在采空区空隙空间内稳定流动,且整体流动性较好,流动规律整体呈现先纵向扩展再横向扩散的规律。首先在出料口下方形成半圆形覆盖层,然后在覆盖层区域向底部扩展形成纵向扩展通道;待浆体沿纵向通道扩散至箱体底部边界时,浆体开始沿横向扩散,稳定后浆体在矽石堆积体中平均坡度为 7.1%。

(5) 工程应用结果表明,充填期间矽石浆体管道输送状态稳定,浆体中的固体颗粒未发生淤积,且浆体在采空区空隙空间流动性极佳,未出现聚集沉降现象。说明前期设计的浆体管道输送流速、浆体级配及质量分数合理。

参考文献 (References):

- [1] 张吉雄,鞠杨,张强,等. 矿山生态环境低损害开采体系与方法[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2): 56-68.
- ZHANG Jixiong, JU Yang, ZHANG Qiang, et al. Low ecological environment damage technology and method in coal mines[J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 56-68.
- [2] 朱磊. 西部生态脆弱区固废多态充填技术应用与实践[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(4): 81-86.
- ZHU Lei. Application and practice of solid waste multi-state filling technology in ecological fragile area of western China[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(4): 81-86.
- [3] 贺佑国,叶旭东,王震. 关于煤炭工业“十三五”规划的思考[J]. 煤炭经济研究, 2015, 35(1): 6-8.

- HE Youguo, YE Xudong, WANG Zhen, et al. Consideration on the 13th Five Year Plan of Coal Industry[J]. Coal Economic Research, 2015, 35(1): 6-8.
- [4] 宋天奇. 煤矽石充填材料地球化学特征及重金属元素迁移行为研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- SONG Tianqi. Study on geochemical characteristics and heavy metal element migration of coal gangue backfilling materia[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [5] 宋天奇, 黄艳利, 张吉雄, 等. 底板岩性对煤矽石充填体重金属元素迁移影响规律数值模拟[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1983-1989.
- SONG Tianqi, HUANG Yanli, ZHANG Jixiong, et al. Numerical simulation on migration effects of heavy metal elements in coal gangue backfilling body caused by the lithology of coal seam floor[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1983-1989.
- [6] YANG Deli, LI Junmeng, HUANG Yanli, et al. Research on migration law of Mn in mudstone floor in the goaf under coupling conditions of seepage and stress[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2019, 29(1).
- [7] LI Junmeng, HUANG Yanli, PU Hai, et al. Influence of block shape on macroscopic deformation response and meso-fabric evolution of crushed gangue under the triaxial compression[J]. Powder Technology, 2021, 384(25): 112-124.
- [8] LI Junmeng, HUANG Yanli, LI Wei, et al. The 3D reconstruction of a digital model for irregular gangue blocks and its application in PFC numerical simulation[J]. Engineering with Computers, 2021: 1-11.
- [9] 古文哲, 朱磊, 刘治成, 等. 煤矿固体废弃物流态化浆体充填技术[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 83-91.
- GU Wenzhe, ZHU Lei, LIU Zhicheng, et al. Fluidization slurry backfilling technology of coal mine solid waste[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(3): 83-91.
- [10] 杨科, 魏祯, 赵新元, 等. 黄河流域煤电基地固废井下绿色充填开采理论与技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S): 925-935.
- YANG Ke, WEI Zhen, ZHAO Xinyuan, et al. Theory and technology of green filling mining of solid waste underground in coal power base of Yellow River Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S): 925-935.
- [11] 张吉雄, 屠世浩, 曹亦俊, 等. 深部煤矿井下智能化分选及就地充填技术研究进展[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 1-10, 22.
- ZHANG Jixiong, TU Shihao, CAO Yijun, et al. Research progress of technologies for intelligent separation and in-situ backfill in deep coal mines in China[J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering, 2020, 37(1): 1-10, 22.
- [12] FALL M, CELESTIN J, SEN H F. Potential use of densified polymer-pastefill mixture as waste containment barrier materials[J]. Waste Management, 2010, 30(12): 2570-2578.
- [13] WANG X M, ZHAO B, ZHANG C S, et al. Paste-like self-flowing transportation backfilling technology based on coal gangue[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(2): 137-143.
- [14] 吴爱祥, 杨莹, 程海勇, 等. 中国膏体技术发展现状与趋势[J]. 工程科学学报, 2018, 40(5): 517-525.

- WU Aixiang, YANG Ying, CHENG Haiyong, et al. Status and prospects of paste technology in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5): 517-525.
- [15] 王新民, 古德生, 张钦礼. 深井矿山充填理论与管道输送技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010.
- [16] 吴爱祥, 王洪江. 金属矿膏体充填理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [17] 覃星朗, 郑攻关, 黄刚, 等. 铜山铜矿全尾砂充填料浆流变特性试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(3): 102-106.
- QIN Xinglang, ZHENG Gongguan, HUANG Gang, et al. Experimental study on the rheological properties of the total tailings filling slurry in tongshan copper mine[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(3): 102-106.
- [18] 石宏伟, 黄吉荣, 滕高礼, 等. 高浓度分级尾砂充填料浆管输阻力影响因素研究与分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2019, 71(6): 89-94.
- SHI Hongwei, HUANG Jirong, TENG Gaoli, et al. Influencing factors of pipeline transport resistance of high concentration graded tailings filling material[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2019, 71(6): 89-94.
- [19] 陆海, 尹军, 袁一星, 等. 污泥管道输送沿程阻力影响因素分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6): 29-32.
- LU Hai, YIN Jun, YUAN Yixing, et al. Influencing factors of on-way resistance in sludge transportation pipelines[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(6): 29-32.
- [20] 郑伯坤, 姚维, 黄腾龙, 等. 基于环管试验的改性全尾砂充填料浆输送性能[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 520-529.
- ZHENG Bokun, YAO Wei, HUANG Tenglong, et al. Transportable performance of modified unclassified tailings filling slurry based on loop test[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 520-529.
- [21] 王洪江, 王小林, 寇云鹏, 等. 全尾砂高浓度胶结充填的环管试验[J]. 工程科学学报, 2021, 43(2): 215-222.
- WANG Hongjiang, WANG Xiaolin, KOU Yunpeng, et al. Loop test study on the high-concentration cemented filling of full tailings[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(2): 215-222.
- [22] 郑伯坤, 尹旭岩, 黄腾龙, 等. 基于环管试验的改性充填料浆输送特性试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(10): 93-97.
- ZHENG Bokun, YIN Xuyan, HUANG Tenglong, et al. Experimental research on conveying characteristics of modified filling slurry based on loop tests[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(10): 93-97.
- [23] 杨超, 郭利杰, 张林, 等. 铜尾矿流变特性与管道输送阻力计算[J]. 工程科学学报, 2017, 39(5): 663-668.
- YANG Chao, GUO Lijie, ZHANG Lin, et al. Study of the rheological characteristics of copper tailings and calculation of resistance in pipeline transportation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(5): 663-668.
- [24] 邵亚平, 郭利杰, 陈寅, 等. 基于环管试验确定粗骨料膏体充填料浆管道输送参数[J]. 有色金属(矿山部分), 2018, 70(4): 20-23.
- SHAO Yaping, GUO Lijie, CHEN Yin, et al. Determination of conveying parameters of coarse aggregate paste filling slurry pipeline based on annular tube test[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2018, 70(4): 20-23.
- [25] 唐海, 赵海龙, 黄靖龙, 等. 煤矿膏体充填材料配比试验研究[J]. 华北科技学院学报, 2015, 12(4): 43-47, 52.
- TANG Hai, ZHAO Hailong, HUANG Jinglong, et al. Study on proportion experiment of paste filling material in coal mine[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2015, 12(4): 43-47, 52.
- [26] 黄玉诚. 矿山充填理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.