



## 煤矸石浆体充填技术应用与展望

朱磊 古文哲 袁超峰 刘成勇 潘浩 宋天奇 盛奉天

### 引用本文:

朱磊, 古文哲, 袁超峰, 等. 煤矸石浆体充填技术应用与展望[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 93–104.

ZHU Lei, GU Wenzhe, YUAN Chaofeng. Application and prospect of coal gangue slurry filling technology[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 93–104.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1919>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 采空区煤矸石浆体充填技术研究进展与展望

Research progress and prospect of coal gangue slurry backfilling technology in goaf

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 143–154 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1725>

##### 双碳背景下龙王沟煤矿新型绿色矿山建设

The new green mine construction in Longwanggou Coal Mine under the background of carbon peaking and carbon neutrality

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 440–448 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1612>

##### 煤矸石资源化利用现状与进展

Current situation and progress of coal gangue resource utilization

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 380–390 <https://doi.org/10.12438/est.2023-1917>

##### 煤矸石井下原位智能分选充填技术研究进展

Research progress on in-situ intelligent sorting and filling technology of coal gangue underground

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 12–27 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1677>

##### 煤矸石胶结充填管路输送不满管流及其防治方法研究

Research on non-full pipeline flow transportation and prevention method of coal gangue cemented backfill

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 117–122 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/196d092e-6bf8-4a50-8c0e-a1a1e6b078a2>

##### 深部充填开采矸石粉煤灰料浆流变特性研究

Research on rheological characteristics of gangue-fly ash slurry in deep filling mining

煤炭科学技术. 2023, 51(3): 85–93 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021-0444>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

朱 磊,古文哲,袁超峰,等.煤研石浆体充填技术应用与展望[J].煤炭科学技术,2024,52(4):93-104.  
ZHU Lei, GU Wenzhe, YUAN Chaofeng, et al. Application and prospect of coal gangue slurry filling technology[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 93-104.

## 煤研石浆体充填技术应用与展望

朱 磊<sup>1,2</sup>,古文哲<sup>3,4</sup>,袁超峰<sup>1</sup>,刘成勇<sup>1</sup>,潘 浩<sup>1</sup>,宋天奇<sup>1</sup>,盛奉天<sup>1</sup>

(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; 3. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083; 4. 中煤(鄂尔多斯市)能源科技有限责任公司,内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要:**为实现煤研石原位、绿色和规模化处置,煤研石浆体充填技术作为新兴充填技术近年来得到了快速发展与应用。论文系统回顾和总结了煤研石浆体充填技术框架提出、浆体充填理论体系形成、工程示范应用及技术迭代创新等不同阶段下浆体充填标志性成果与关键工艺技术,形成了高位注浆、低位灌浆和邻位注浆3种充填方式,建立了煤研石浆体采空区垮落带流动的“介入理论”和浆体管道输送的“三度一场”理论,成功开展了国内外首套煤研石井下浆体充填和地面制浆+井下邻位注浆充填示范工程;阐述了煤研石浆体充填技术体系,围绕煤研石浆体充填过程中的煤研石破碎、成品研石粉料加水制浆、制备浆体泵送和井下目标区域充填等工艺流程,探讨了煤研石高效分级破碎、浆体精准制备、浆体管道输送和末端充填等关键技术核心问题,分析了破碎设备、筛分设备、计量设备、搅拌设备和泵送设备等关键设备技术原理与应用场景;以张家峁煤矿小空间、多设备、高能力的煤研石浆体充填需求为工程背景,创新研发设计了煤研石浆体充填地面制浆、管道输送、井下充填和智能控制等不同系统的布置,年充填研石量可达55.4万t,形成了煤研石浆体充填工程示范,实现了矿井研石零排放和绿色处置,树立了良好的地区示范效应;未来煤研石浆体充填技术将围绕设备小型轻量化、系统高度集成化、技术迭代创新化等方向进一步研究发展,为构建煤矿绿色开采技术体系、实现国家“双碳”目标提供技术支撑。

**关键词:**煤研石;浆体充填;煤研石高级分级破碎;绿色开采;“双碳”目标

**中图分类号:**TD849      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2024)04-0093-12

### Application and prospect of coal gangue slurry filling technology

ZHU Lei<sup>1,2</sup>, GU Wenzhe<sup>3,4</sup>, YUAN Chaofeng<sup>1</sup>, LIU Chengyong<sup>1</sup>, PAN Hao<sup>1</sup>, SONG Tianqi<sup>1</sup>, SHENG Fengtian<sup>1</sup>

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

3. School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

4. China Coal (Ordos City) Energy Technology Co., Ltd., Ordos 017000, China)

**Abstract:** In order to realize in-situ, green and large-scale disposal of coal gangue, coal gangue slurry filling technology, as a new filling technology, has been rapidly developed and applied in recent years. This paper systematically reviews and summarizes the landmark achievements and key technologies of coal gangue slurry filling at different stages, such as the proposal of the technical framework, the formation of the theoretical system of slurry filling, the application of engineering demonstration and the innovation of technology iteration, and forms three filling methods, namely, high-level grouting, low-level grouting and adjacent grouting. The “intervention theory” of coal gangue slurry flow in goaf caving zone and the “three degrees and one field” theory of slurry pipeline transportation have been established, and the first demonstration project of coal gangue underground slurry filling and surface slurry preparation + underground adjacent grouting filling has been successfully carried out at home and abroad; This paper expounds the technical system of coal gangue slurry filling, and discusses the key technical core issues of coal gangue high-efficiency grading crushing, slurry precise preparation, slurry

收稿日期:2023-12-16      责任编辑:黄小雨      DOI: 10.12438/cst.2023-1919

基金项目:中煤集团重大科技专项资助项目(ZMYXM-JT-22-02)

作者简介:朱 磊(1982—),男,安徽阜阳人,教授级高级工程师,博士。E-mail: 103210851@qq.com

通讯作者:袁超峰(1994—),男,陕西咸阳人,工程师,硕士。E-mail: 15862173272@163.com

pipeline transportation and end filling, focusing on the process flow of coal gangue crushing, water slurring of finished gangue powder, slurry pumping preparation and underground target area filling. The technical principles and application scenarios of key equipment such as crushing equipment, screening equipment, metering equipment, mixing equipment and pumping equipment are analyzed; Based on the engineering background of small space, multi-equipment and high capacity of coal gangue slurry filling in Zhangjiaomo Coal Mine, the layout of different systems such as surface slurry making, pipeline transportation, underground filling and intelligent control of coal gangue slurry filling was innovatively developed and designed, and the annual filling amount of coal gangue could reach 554 000 tons, forming a demonstration of coal gangue slurry filling engineering. In the future, the coal gangue slurry filling technology will be further studied and developed in the direction of small and lightweight equipment, highly integrated system, iterative and innovative technology, which will provide technical support for the construction of green coal mining technology system and the realization of the national carbon peaking and carbon neutrality goal.

**Key words:** coal gangue; slurry filling; coal gangue high-efficiency grading crushing; green coal mining; carbon peaking and carbon neutrality goals

## 0 引言

煤炭作为我国基础能源和重要工业原料,为国民经济和社会发展提供了可靠的能源保障,是我国能源供应的“压舱石”和“稳定器”<sup>[1-2]</sup>。但在煤炭资源大规模开采、加工和利用过程中产生了大量煤矸石固体废弃物。据统计,每年煤矸石排放量占煤炭产量的10%~25%,是我国排放量仅次于尾矿的第二大工业固体废弃物<sup>[3-4]</sup>。截止2022年,我国煤矸石存量约75亿t,且每年以5亿~8亿t的速度持续增加<sup>[5-6]</sup>,主要分布在山西、陕西、内蒙古和黑龙江等重要的煤炭资源开发利用区域,已累计形成矸石山约2 600余座<sup>[7-8]</sup>。

传统的煤矸石处理方式是地面排矸场排放或矿区周边的沟壑填埋,这种粗放型的处置方式造成较为严重的环境问题,如侵占大量土地和农田、污染矿区周边生态环境和影响水资源等,同时堆积的矸石山在高温和降雨等自然条件下又会衍生出新的环境问题<sup>[9-11]</sup>。党的十八大以来,国家将生态文明建设纳入中国特色社会主义事业“五位一体”总体布局之中,生态文明历史性地写入宪法。与此同时,习近平总书记多次强调要加强黄河流域生态保护,明确开展矿区生态环境综合整治,提出强化生产矿山边开采、边治理举措,及时修复生态和治理污染,停止对生态环境造成重大影响的矿产资源开发等要求。作为我国最重要的煤炭资源富集区、原煤生产加工区和煤炭产品转换区,黄河流域40%以上的流域面积蕴藏煤炭资源<sup>[12]</sup>。在保障国家能源供给安全、促进沿线产煤省区发展的同时,流域生态环境问题突出,治理尚存多处短板。尤其是煤矸石的危害,如何平衡煤炭资源高效利用和煤矸石无害化处置成为煤炭企业亟待解决的艰巨任务,也是煤炭绿色开采的重要技术攻关方向。

现阶段常用的煤矸石处置方式主要包括资源化利用<sup>[13-14]</sup>和高效无害化井下充填<sup>[15-17]</sup>,其中煤矸石资源化利用途径有直接利用(筑路修道<sup>[18]</sup>、造地复垦<sup>[19-20]</sup>和火力发电等<sup>[21-22]</sup>)、提质利用(制铝系产品、制硅铝合金和制备活性炭材料等<sup>[23-24]</sup>)和综合利用(生产煤气、制备陶粒和制水泥原料等<sup>[25-27]</sup>),但受限于煤矸石产地和利用目的地之间的距离限制,导致煤矸石资源化利用成本较高,加之煤矸石提质利用和综合利用前期投资大、运营成本高和易产生新的煤基固废,导致煤矸石资源化利用的整体利用率偏低<sup>[28]</sup>。矸石井下充填技术是将井下或地面煤矸石充填入采空区,达到处理矸石以及控制岩层移动和地表沉陷的目的。根据矸石井下充填位置可分为采空区充填、离层区充填和冒落区充填<sup>[29-30]</sup>;根据充填方式分为固体充填、膏体充填和浆体充填<sup>[31]</sup>。其中固体充填和膏体充填属于传统的充填方式,主要用于“三下压煤”和井下呆滞资源的安全高效回收,而浆体充填主要以处理煤矸石为目的。矸石充填技术分类如图1所示。



图1 充填方法分类

Fig.1 Classification of filling methods

煤矸石无害化充填作为一种安全、绿色、高效和规模化处置煤矸石的方法,近十年在全国各大矿区得到广泛应用<sup>[32]</sup>,并形成了多个工程示范项目,取得了良好的经济效益和社会效益;同时国家也先后出台一系列政策,鼓励、引导和支持煤矿企业采用充填方法处理煤矸石,相关政策如图2所示。

传统的固体充填和膏体充填经过十多项技术研发和推广应用,已形成较为成熟的技术体系,并成功进行多个示范工程建设。但受限于传统充填方法前期投资大、采充无法平行作业和对采高要求严格等现状<sup>[33-34]</sup>,使得传统充填工作面的产能受限,严重

影响该技术在高产高效矿井的推广和使用。浆体充填技术是中煤能源研究院有限责任公司基于矿井采空区残余空间大、井下废弃巷道利用率低和矸石外排压力大等问题,通过对离层注浆技术、长距离管道输送技术、采空区注浆防灭火等技术集成和创新,自主研发的新型充填技术<sup>[35-37]</sup>,现已在多个矿井进行了成功应用。煤矸石浆体充填作为新兴充填技术,继承了传统固体充填和膏体充填对煤矸石处置能力大的优势,攻克了采充不平行的技术瓶颈,同时充分利用了煤矿井下废弃巷道和采空区残余空间,真正实现了煤矸石绿色原位、安全高效和规模化处置。

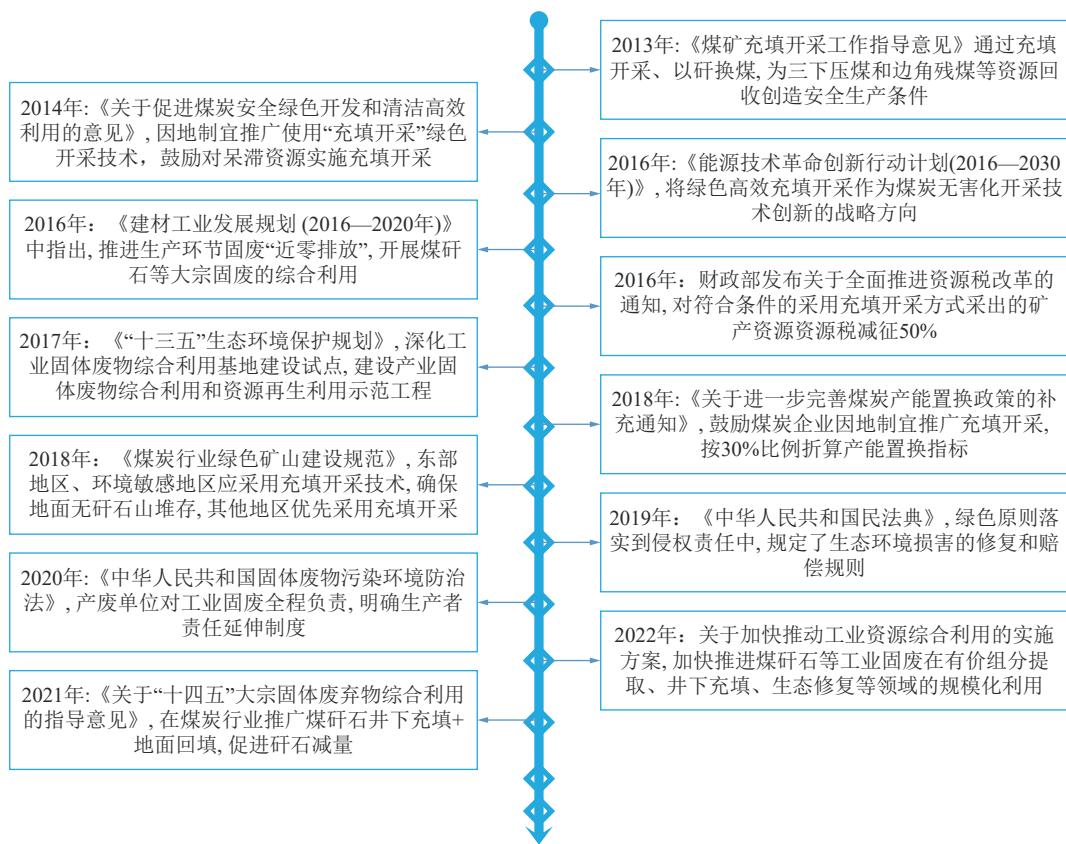


图2 煤矸石充填相关政策  
Fig.2 Policies related to coal gangue filling

## 1 浆体充填技术

### 1.1 浆体充填技术发展历程

煤矸石浆体充填技术自2019年提出至今,相关科研院所经过近5年的技术研发和难点攻克,先后搭建了煤矸石浆体充填技术框架,完善了浆体充填理论体系,形成了高位注浆、低位灌浆和邻位注浆三种充填方式,建立了煤矸石浆体采空区垮落带流动的“介人理论”和浆体管道输送的“三度一场”理论,成功开展了国内外首套煤矸石井下浆体充填和地面制浆+井下邻位注浆充填示范工程;同时基于国家

“双碳”战略目标,以煤矸石浆体充填技术为基础,积极开展浆体充填技术迭代创新,提出了浆体充填协同固碳技术和浆体充填制备功能材料等技术。煤矸石浆体充填技术发展历程如图3所示。

### 1.2 浆体充填关键技术

浆体充填技术是将煤炭全生命周期过程中产生的煤矸石、粉煤灰和炉渣等固废破碎成制浆要求的粒径,与水按一定配比搅拌均匀,利用充填工业泵提供动力,借助管道输送至采空区附近<sup>[38-40]</sup>。浆体充填关键技术包括煤矸石高效分级破碎技术、煤矸石

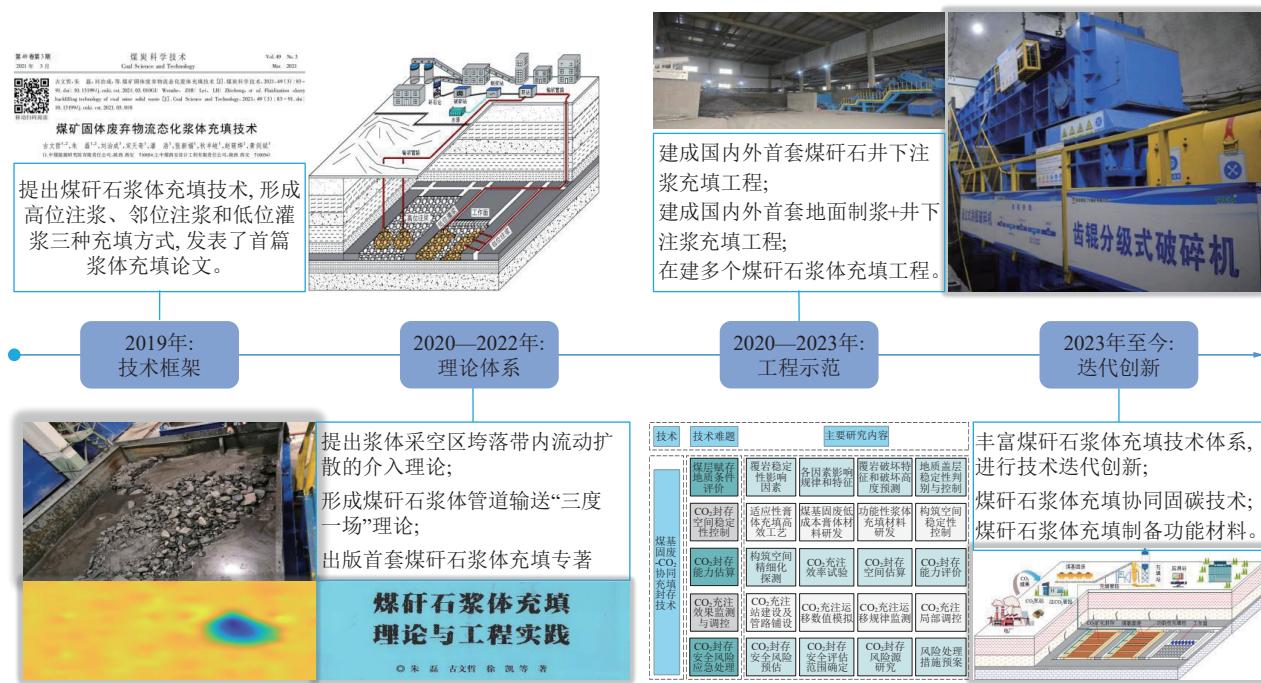


图3 浆体充填技术发展历程  
Fig.3 Development history of slurry filling technology

浆体精准制备技术、煤矸石浆体管道输送技术和煤矸石浆体末端充填技术。

### 1.2.1 煤矸石高效分级破碎技术

煤矸石高效分级破碎技术是将煤矸石等固废破碎成满足制浆要求的粒径,且各粒径占比需满足相应要求。根据各粒径占比对煤矸石浆体流变特性的影响规律,高效分级破碎技术需各级破碎设备选型和配套合理,避免破碎粉料不足影响煤矸石浆体输送的稳定性和粉料过多影响浆体在采空区垮落带的流动性与扩展度,以及增加破碎系统运行成本。

### 1.2.2 煤矸石浆体精准制备技术

煤矸石浆体精准制备技术是将破碎的成品矸石粉和水按一定配比制成设定浓度的浆体。现阶段常用的煤矸石浆体制备工艺主要分为连续制备和间断制备。连续制备是利用称量带式输送机连续输送矸石粉至搅拌系统,并与水进行充分搅拌,此过程需要称量带式输送机和给水阀实时匹配调整。间断制备是将定量的成品矸石粉和水混入搅拌系统搅拌,因采用静态计量方式,可以保证制备浆体浓度的精准控制。连续制备因避免矸石粉给料设备和转运设备定期启停而受到广泛应用。但受限于称量带式输送机和给水阀门控制精度,使得连续制浆工艺在浆体浓度精准控制方面还面临较大挑战,其制备的煤矸石浆体浓度在一定范围内波动,如某矿连续制浆10 h的浆体质量分数波动介于61.9%~67.2%,平均质量

分数65.0%,如图4所示。煤矸石浆体精准制备包括成品矸石粉静态或动态计量技术、自动给水技术和高效搅拌技术等。

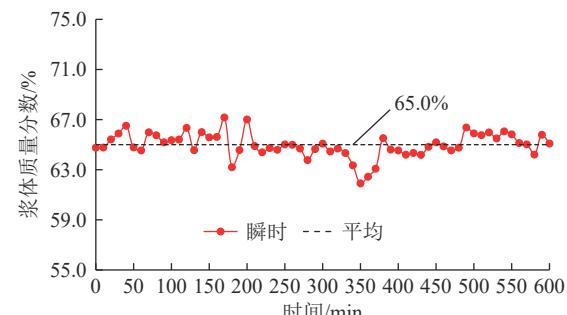


图4 连续制浆浓度波动  
Fig.4 Concentration fluctuation of continuous pulping

### 1.2.3 煤矸石浆体管道输送技术

煤矸石浆体管道输送技术是利用充填工业泵或浆体自重将制备的煤矸石浆体借助沿途敷设的管路输送至采空区或废弃巷道附近。为保证煤矸石浆体管道输送的稳定性和经济性,需设置合理的输浆流速,防止流速过小造成粗颗粒沉淀堵管和流速过大导致管路磨损严重、沿程阻力增大等。煤矸石浆体管道输送需综合考虑煤矸石粒径级配、浆体浓度和流速,以及浆液在管道中流动的流场,即根据浆体管道输送的“三度一扬”理论确定合理的流速。煤矸石粒度、浆体浓度和输送流速相互作用关系如图5所示。

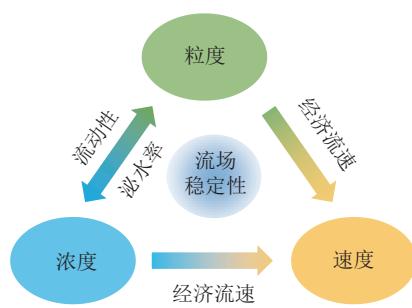


图 5 粒度、浓度和流速关系

Fig.5 Relationship between particle size, concentration and flow rate

#### 1.2.4 煤矸石浆体末端充填技术

煤矸石浆体末端充填技术是将制备符合要求流动性和扩展度的浆体充填至工作面采空区或井下废弃巷道。其充填形式依据管路布置方式不同分为高位注浆、邻位注浆和低位灌浆。煤矸石浆体末端充填技术包括钻孔稳定性控制、钻孔参数设计和浆体采空区垮落带高效流动扩散规律。其中钻孔稳定性研究主要是高位注浆垂直钻孔和邻位注浆倾斜钻孔稳定性控制；钻孔参数设计主要是钻孔间距、倾角和滞后工作面距离等参数确定；浆体采空区垮落带流动扩展规律是指煤矸石浆体在采空区垮落矸石中的扩散特征、垮落矸石压实过程对浆体流动性影响特征和浆体与垮落矸石之间的流固耦合特性。

#### 1.3 浆体充填工艺流程

浆体充填是将固态的煤矸石经破碎或研磨与水混合制成液态，之后以充填工业泵或浆液自流为动力，管道为输送路径，井下采空区和废弃巷道为充填区域的新型固废处置方式。浆体充填工艺包括煤矸石破碎、成品料加水制浆、制备浆体泵送和井下目标区域充填，其涉及系统有破碎系统、缓存系统、搅拌系统、给水系统、泵送系统、控制系统和配套的辅助系统。浆体充填工艺流程如图 6 所示。

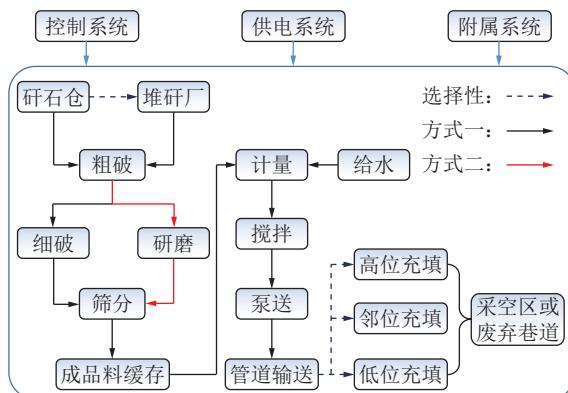


图 6 浆体充填工艺流程

Fig.6 Process flow of slurry filling

## 2 浆体充填关键设备

基于煤矸石浆体充填关键技术和工艺流程可知，浆体充填涉及到的关键设备主要有破碎设备、筛分设备、计量设备、搅拌设备和泵送设备等。

1) 破碎设备：又称碎石设备，是实现煤矸石破碎至合理粒径级配的基础。破碎设备按进料和排料粒度大小分为粗破、中破和细破；按破碎方式可分为挤压破碎、劈裂破碎、折断破碎、冲击破碎或打击破碎以及研磨等。挤压破碎依靠破碎机工作面板对物料进行挤压而破碎物料；劈裂破碎是指破碎工作面自带棱楔进入物料使物料产生拉应力，当超过物料抗拉强度极限时，物料劈开；折断破碎是指物料受多个支点作用，且作用力交错相反而会产生弯曲变形，当应力超过物料抗弯强度时，物料因断裂破坏而破碎；冲击破碎是指高速运动的破碎体对破碎物料的冲击和高速运动的物料向固定壁的冲击以及运动物料的相互冲击；研磨破碎是指物料在相对运动的金属面之间、在各种形状的研磨介质之间或在外力作用下物料与物料之间受到剪切力作用，应力超过物料抗剪强度，物料被研磨成更小的颗粒。各种破碎方式典型设备见表 1。破碎设备作为煤矸石浆体充填工艺的前端环节，设备选型的合理与否决定了制备浆体成浆的可行性、可输送性和在采空区垮落带的可流动性，其选型受煤矸石岩性、湿度和破碎粒径级配要求的影响。

表 1 各种破碎原理及典型设备

Table 1 Various crushing principles and typical equipment

破碎方式	典型设备类型	设备示意图
挤压破碎	颚式破碎机和圆锥式破碎机	
劈裂破碎	辊式破碎机	
折断破碎	辊式破碎机	
冲击破碎	锤式破碎机和反击式破碎机等	
研磨破碎	球磨机、棒磨机和振动磨机等	

2) 筛分设备：筛分设备是控制煤矸石粒径级配的关键，也是保障制备的煤矸石浆体稳定程度的枢纽。根据煤矸石浆体中各粒径的作用可知，粗颗粒对浆体的稳定性影响严重，尤其针对长距离管道输送，故高效合理的筛分设备选型尤为重要。筛分设

备按照筛面结构形式分为固定筛、滚动筛、交叉筛和振动筛。固定筛是物料在自重作用下沿倾斜固定筛面滑落,小于筛孔的颗粒通过筛面达到分级;滚动筛的工作部分为圆柱面或圆锥面筛筒,沿筛筒的对称轴线装有转轴,整个筛子绕筒体轴线回转;交叉筛是在传统滚轴筛基础上研制出的一种筛分设备,筛面由多组同向旋转的筛轴组成,每根筛轴上安装若干等距筛片,相邻筛轴上的筛片相互交叉排列;振动筛是利用振动电机激振原理,使物料在筛面作振荡运动,并向前进作直线运动,同时配以合理匹配的筛网实现筛分目的。筛分设备选型受煤矸石湿度影响较大,尤其对于含水量较大的矸石。

3)计量设备:计量设备是煤矸石浆体制备工艺流程中的关键环节,其计量的精度直接决定了浆体的浓度,进而影响到浆体管道输送的适宜性和浆体在采空区冒落带的流动性。常见的计量设备分为静态计量和动态计量,其中静态计量是指被称载荷与称量设备无相对运动,属于非连续计量过程;动态计量是指被称载荷与称量设备存在着相对运动,属于连续计量,也有非连续的动态计量。煤矸石浆体充填主要采用动态连续计量。

4)搅拌设备:搅拌设备是保障煤矸石浆体状态的核心,其对煤矸石浆体搅拌的均匀度直接影响浆体管道输送堵管发生的概率。结合煤矸石浆体充填对浆液似均质流的要求,高效、快速和拌和均匀度高的搅拌设备选型至关重要。搅拌设备按作业方式分为循环作业式和连续作业式;按搅拌轴形式分为立式搅拌和卧式搅拌;按搅拌轴数量分为单轴搅拌和双轴搅拌。现阶段常采用两台双轴卧式搅拌实现连续搅拌功能。

5)泵送设备:泵送设备为煤矸石浆体管道输送提供动力。按工作原理分为往复式和回转式。往复式泵通过活塞、柱塞或隔膜在缸内往复运动使工作容积交替增大和缩小来实现吸液和排液,包括活塞泵、柱塞泵和隔膜泵,煤矸石浆体充填一般采用柱塞泵。

### 3 浆体充填工程示范

张家峁煤矿核定生产能力为 11.0 Mt/a,现阶段地面分选矸石约 0.2 Mt/a,后期薄煤层开采时矸石量将增大至 0.5 Mt/a。在环保政策持续收紧的形势下,为践行绿色、环保、低碳新发展理念,设计采用煤矸石浆体充填技术处置固废,浆体充填系统能力为 0.5 Mt/a。笔者团队基于矿井工业场地空间小、制浆

系统设备多和物料缓存能力要求高等现状,创新性地研发设计了高效率、低能耗和集约化的地面精准制浆系统,相比较类似工程,制浆系统占地面积减少约 50%,真正实现小空间、大利用的有效突破。张家峁煤矿浆体充填系统包括地面制浆系统、管道输送系统、井下充填系统和智能控制系统。浆体充填系统布置如图 7 所示。

#### 3.1 地面制浆系统

地面制浆系统由破碎子系统、筛分子系统、缓存子系统、称量子系统、搅拌子系统、泵送子系统等组成。

1)破碎子系统:张家峁煤矿地面洗选矸石粒径介于 30~160 mm,为保证破碎成品矸石粉粒径级配满足要求,基于矿井矸石岩性、管道输送距离和煤矸石浆体流变特性,设计采用三级破碎系统,分别为通过式破碎机、双齿辊破碎机和鼠笼式破碎机,将分选矸石分别破碎至-80 mm、-30 mm 和-3.0 mm,矸石破碎粒径级配如图 8 所示。

2)筛分子系统:为控制成品矸石粉质量,保证最大粒径满足设计要求,采用弛张筛对鼠笼式破碎机出料进行筛分。现场应用结果显示,成品矸石粉中+3.0 mm 磁石粒径占比<3.0%,筛分效果优异,同时现场测试含水量较大的分选矸石破碎筛分效果,未出现堵塞筛孔和成品粉结块现象,进一步验证了弛张筛应用效果。

3)缓存子系统:张家峁煤矿地面制浆系统位于二盘区风井场地,为提高制浆系统的连续性,设计增加缓存子系统。包括分选矸石破碎之前的缓存和成品矸石粉缓存,用于地面矸石运输系统和破碎系统以及成品矸石粉和搅拌系统的缓冲衔接。设计在制浆系统场地中间位置布置矸石堆放场,占地 19.0 m×19.0 m,储存矸石 2 000 t;同时在搅拌设备和筛分设备转载位置增加缓冲仓,容积为 20 m<sup>3</sup>,平衡搅拌设备对矸石粉消耗量和筛分设备矸石粉产量关系,并提高称量带式输送机计量精准度。

4)称量子系统:为保证制备的煤矸石浆体质量浓度满足要求,地面制浆系统配套了称量子系统,包括成品矸石粉称量和给水计量。张家峁成品矸石粉和制浆用水采用动态连续计量系统,其中成品矸石粉采用称量带式输送机计量,制浆用水采用电磁流量计和电动闸阀配合控制给水量。现场注浆实践显示,动态连续计量系统的矸石粉量和水量在一定范围内波动,如图 9 所示。

5)搅拌子系统:考虑到称量子系统采用动态连续

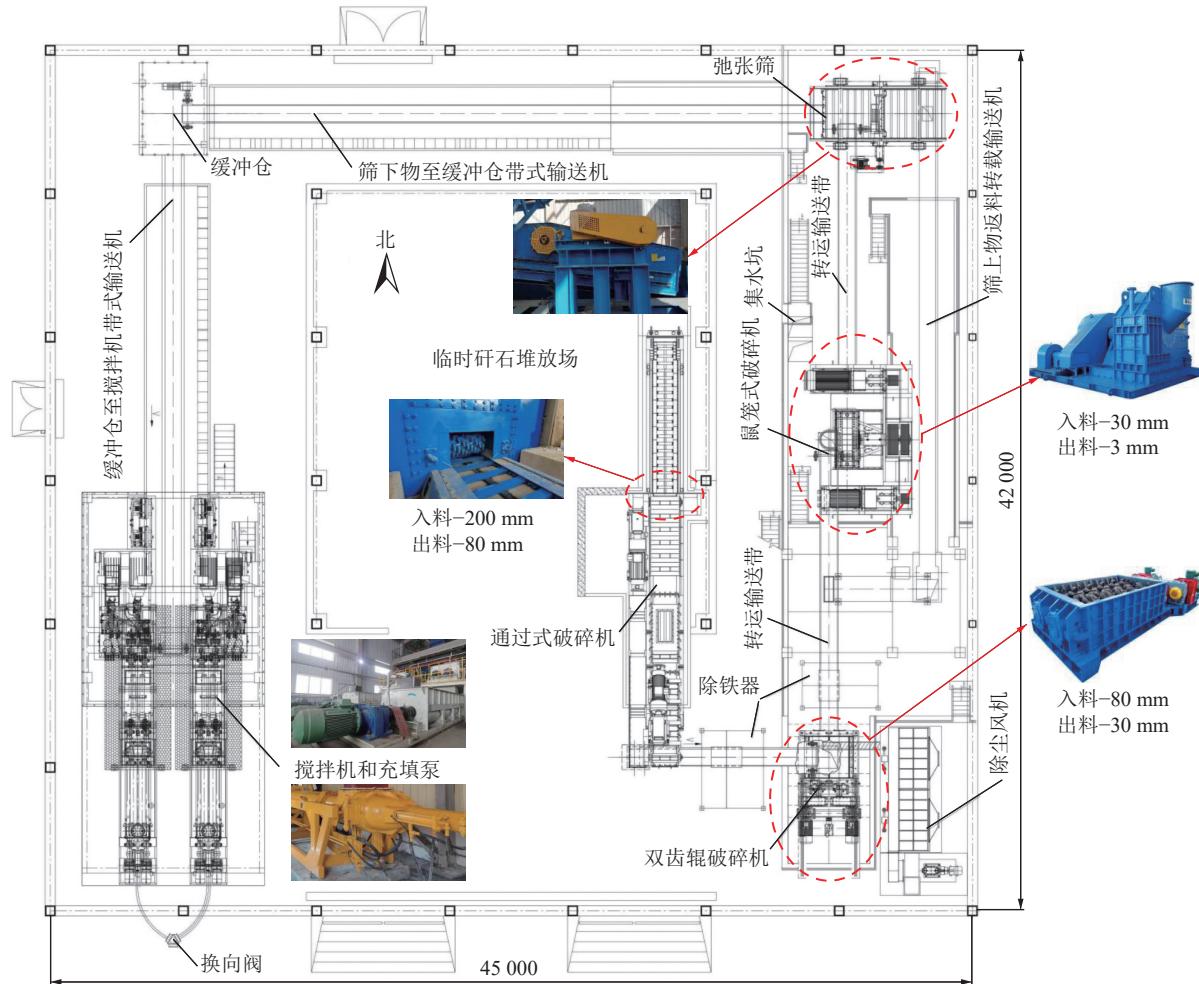


图 7 浆体充填系统布置

Fig.7 Arrangement of slurry filling system

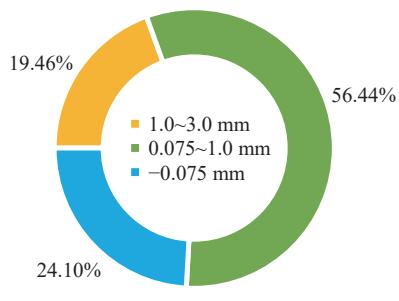


图 8 砾石破碎粒径级配

Fig.8 Grading of broken grain size of gangue

计量,为提高煤矸石浆体搅拌的均匀度,设计采用两级双轴卧式搅拌设备,两台搅拌机上下布置,增加浆液在搅拌机中的搅拌距离和搅拌时间,同时一级搅拌设备配套上溢流装置,进一步提高浆体搅拌的均匀度。搅拌设备布置和搅拌效果如图 10 所示。

6) 泵送子系统:设计采用两台提升阀式柱塞泵,一用一备。现场实践过程中,输浆管路长度为 3.5 km,管路高差约为 123.0 m,输浆管路满管流状态输送过程中注浆泵出口压力平均为 1.52 MPa。注浆泵出口

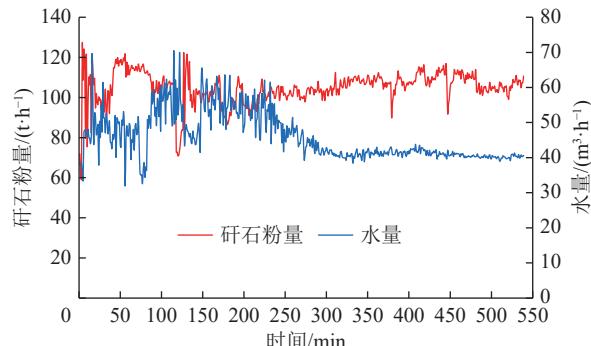


图 9 动态连续计量系统给料量和给水量

Fig.9 Feed quantity and water quantity of dynamic continuous metering system

压力变化如图 11 所示。

### 3.2 管路输送系统

管道输送系统是在注浆泵泵送压力或浆体自重作用下将煤矸石浆体输送至井下充填区域,其主要包括管路敷设路径、管路固定方式和管路参数等。张家峁煤矿地面制浆系统位于二盘区风井场地,其管路敷设路径先后经过地面管沟、回风斜井、联络巷、

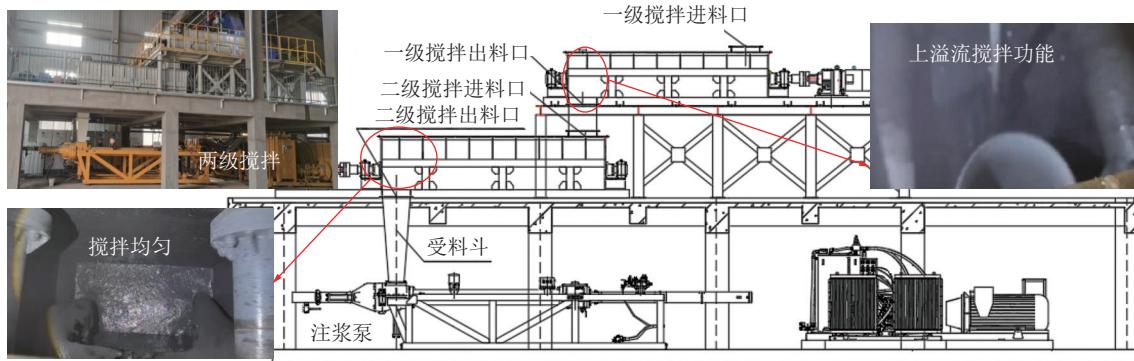


图 10 搅拌设备布置和效果  
Fig.10 Arrangement of mixing equipment and effect

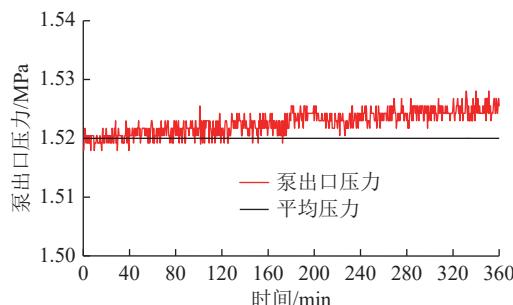


图 11 注浆泵出口压力  
Fig.11 Outlet pressure of grouting pump

回风大巷、运输大巷和工作面辅运巷与工作面回风巷，主管路总长度为 4.6 km，备用管路总长度为 3.5 km。输浆管路采用耐磨无缝钢管，管道参数为  $\Phi 180 \text{ mm} \times$

15 mm(内径 150 mm)，管路沿线沿巷道底板敷设，并采用抗震管卡固定。输浆管路敷设路线如图 12 所示。

### 3.3 井下充填系统

井下充填系统是指将输浆管路中的浆体充填至井下采空区或废弃巷道。煤矸石浆体充填有高位注浆、邻位注浆和低位灌浆三种方式，设计张家峁煤矿采用邻位注浆方式进行充填。其实现路径是利用 22203 工作面回风巷或辅运巷穿煤柱施工倾斜钻孔，钻孔终孔位置位于工作面裂隙带下方，并随工作面推进间隔施工邻位注浆钻孔进行注浆充填，同时注浆钻孔应滞后工作面一定间距，防止充填至采空区的浆体涌流至工作面影响生产。基于张家峁煤矿具

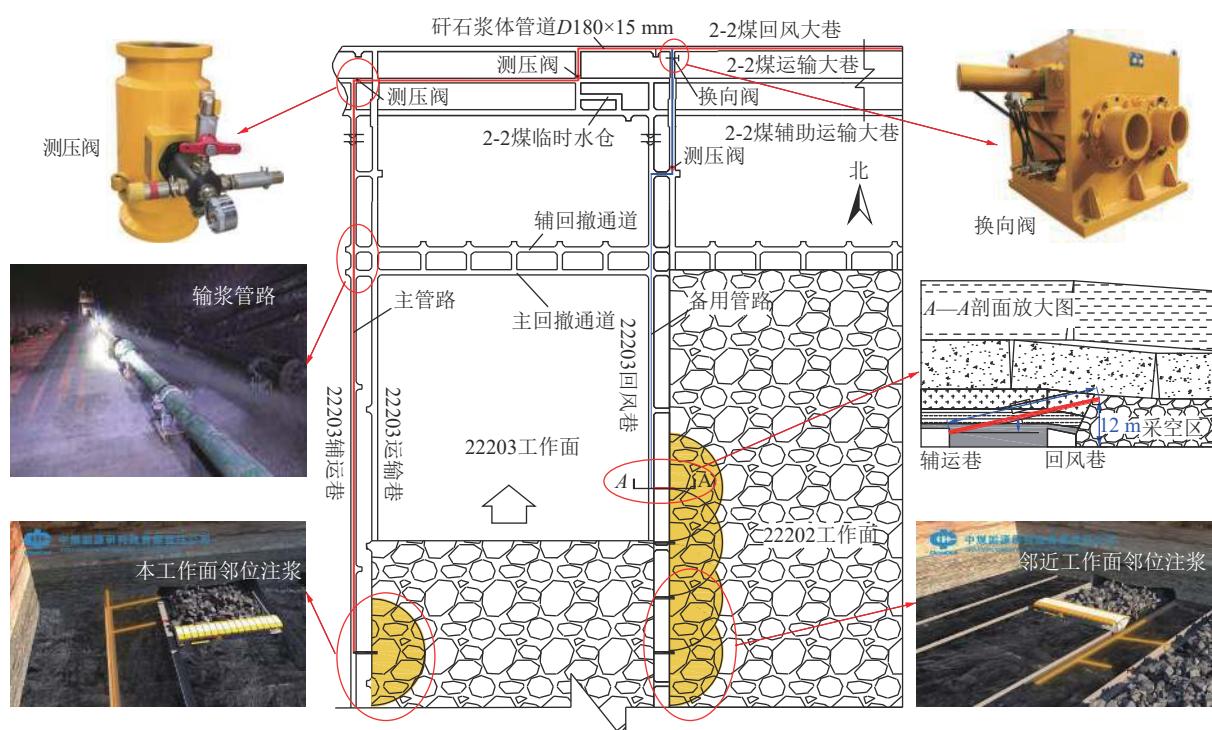


图 12 输浆管路敷设路线和邻位钻孔布置  
Fig.12 Layout of laying route and adjacent boreholes of slurry pipeline

体地质条件,邻位注浆钻孔布置如图 12 所示。

### 3.4 智能化控制系统

煤矸石浆体充填技术是利用多系统、多设备之间的相互配合,实现煤矸石破碎制浆、管道输送和井下充填。为提高各系统和各设备的自动化水平,减少操作人员数量,应提高单机设备和控制系统的智能化水平,实现各设备之间信号实施传递和反馈,并根据信号变化特征及时自动调整各系统运行状态。基于此,张家峁煤矿浆体充填系统配套了智能化控制系统,具有远程启动、一键启停、风险预警和故障自诊断等功能,浆体充填控制系统如图 13 所示。



图 13 浆体充填智能控制系统

Fig.13 Intelligent control system for slurry filling

煤矸石浆体充填的关键是制备设定浓度的似均质浆体,保证管道输送的稳定性和采空区垮落带高效扩散的流动性。基于此,对地面制浆系统的相关子系统配套了实时监测设备,利用智能化控制程序,结合监测到的相关数据自动调整各子系统运行工况。如针对张家峁煤矸石浆体充填的连续制浆系统,以设定的浆体质量浓度为指标,称量带式输送机的计量结果和给水管路上流量计数据为过程量,通过称量带式输送机和流量计数据的实时反算,校核连续制浆过程中制备的浆体浓度是否合适,同时利用管路上安装的浓度计进行二次校核,确保煤矸石浆体质量浓度符合要求。煤矸石浆体质量浓度控制系统原理如图 14 所示。

### 3.5 系统试运行情况

张家峁煤矿浆体充填系统于 2023 年 4 月 11—4 月 28 日试运行。试运行期间在 22203 工作面回风巷布置邻位注浆钻孔,利用 22203 工作面备用管路(即 22203 工作面回风巷中敷设的管路)进行煤矸石浆体充填,备用管路总长度为 3.5 km,设置浆体质量浓度为 70%,注浆泵出口压力最大为 2.0 MPa,输浆管路沿程压力损失平均为 0.6 MPa/km;同时浆液在管路中停滞 28 h 后未发生沉淀固结现象,利用管路盲板三通和地面注浆泵泵送制浆用水可快速处理堵

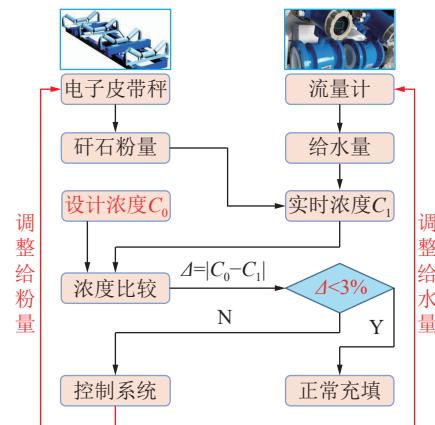


图 14 煤矸石浆体质量浓度控制系统原理

Fig.14 Principle of coal gangue slurry mass concentration control system

管事故,证明了地面制浆系统设计合理和煤矸石浆体采空区垮落带流动效果良好。试运行期间累计充填煤矸石 2 000 t,充填能力平均 120 t/h,按每日净充填时间 14 h 计算,年充填矸石量可达 55.4 万 t,实现了矿井矸石零排放和绿色处置。

## 4 浆体充填技术展望

随着国家环保政策的收紧和环保意识的增强,浆体充填技术作为煤矿绿色开采技术体系的重要环节,其在煤矸石处置领域将扮演愈加重要的角色。制浆设备和制浆系统作为浆体充填的核心,其设备稳定性、能耗、适用性和系统布置的合理性直接影响煤矸石浆体充填技术的推广;同时国家“双碳”目标的提出对煤矸石浆体技术的迭代创新提出新挑战和新要求。基于此,对煤矸石浆体充填技术开展如下展望:

- 1) 设备小型轻量化:煤矸石浆体充填技术的核心是将煤矸石破碎制浆浓度的似均质浆液,利用充填泵借助管道输送至井下废弃空间,其制浆、输送和充填过程中涉及的设备包括破碎设备、筛分设备、计量设备、搅拌设备和泵送设备等。结合现阶段设备实际情况可知,现有设备处置能力可满足矿井矸石处理能力的要求,但面临尺寸大、能耗高和移动笨重等挑战,导致浆体充填技术的推广受到限制,尤其是煤矸石井下浆体充填系统布置,受制于井下巷道断面限制,使得设备能力和井下实际现状之间的矛盾突出,进一步造成井下浆体充填系统能力偏小。基于此,应研发小型轻量化设备,适应井下巷道布置的空间环境,提高浆体充填的适用范围,真正实现小空间、大能力系统和高效利用的有效突破。

- 2) 系统高度集成化:煤矸石浆体充填系统包括

破碎系统、筛分系统、搅拌系统和泵送系统等。根据浆体充填系统建站位置分为地面制浆系统和井下制浆系统。为优化制浆站占地面积,地面系统布置一般采用U型布置、环形布置或线性布置,而井下受限于巷道断面,一般采用线性布置,造成各系统之间转运环节增多,系统整体稳定性降低。基于此,研发高度集成化系统,尤其是地面制浆系统立体化布置,以适应矿井地面已有系统和狭小空间布置要求,简化各系统之间物料转运环节,提高制浆系统的稳定性。

3)技术迭代创新化:煤矸石浆体充填作为固废处置领域的新技术,受国家双碳目标的持续推进和国家对固废粗放型处置方式零容忍态度愈发严格的背景要求和鼓励,在继续深耕煤矸石浆体充填相关技术理论的基础上,应积极开展技术迭代创新,改变传统的煤矸石“固废属性”为“资源属性”,探索“煤矸石梯级回收+资源化利用”技术体系以及煤矸石浆体充填和二氧化碳协同处置技术,促进煤矸石源头减量、高值化利用和无害化充填,真正实现煤矸石浆体充填应用的“一充治多废,一废防多灾”。

## 5 结 论

1)介绍了煤矸石浆体充填技术发展历程、关键技术和工艺流程。煤矸石浆体充填核心内涵是将煤矸石破碎成合适的粒径级配,与水按一定配比搅拌均匀,利用充填工业泵提供动力,借助管道输送至井下采空区残余空间或废弃巷道。

2)梳理了煤矸石浆体充填主要关键设备包括破碎设备、筛分设备、计量设备、搅拌设备和泵送设备等,整理了各设备的工作原理和技术分类,以及在煤矸石浆体充填领域应用现状。

3)论述了张家峁煤矿浆体充填系统组成,包括地面制浆系统、管路输送系统、井下充填系统和智能化控制系统,同时介绍了各系统中相关子系统设备选型、布置方式和应用效果。

4)基于煤矸石浆体充填技术发展应用现状,结合国家双碳目标的要求,展望了浆体充填技术发展趋势,主要包括设备小型轻量化、系统高度集成化和技术迭代创新化。

## 参考文献(References):

- [1] 王国法,任世华,庞义辉,等.煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J].煤炭科学技术,2021,49(9):1-8.  
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of “dual carbon” target[J].

Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8.

- [2] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].煤炭学报,2021,46(7):2197-2211.  
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [3] 曾 鹏,谢海云,晋艳玲,等.我国煤矸石的特性及其提取氧化铝研究进展[J].矿产保护与利用,2022,42(6):21-29.  
ZENG Peng, XIE Haiyun, JIN Yanling, et al. A review on characteristics and alumina extraction of coal gangue in china[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(6): 21-29.
- [4] 刘 浪,王双明,朱梦博,等.基于功能性充填的CO<sub>2</sub>储库构筑与封存方法探索[J].煤炭学报,2022,47(3):1072-1086.  
LIU Lang, WANG Shuangming, ZHU Mengbo, et al. CO<sub>2</sub> storage-cavern construction and storage method based on functional backfill[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1072-1086.
- [5] 周 楠,姚依南,宋卫剑,等.煤矿矸石处理技术现状与展望[J].采矿与安全工程学报,2020,37(1):136-146.  
ZHOU Nan, YAO Yinan, SONG Weijian, et al. Present situation and prospect of coal gangue treatment technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 136-146.
- [6] 仲 蕊.煤矸石资源化综合利用提质空间大[N].中国能源报,2022-06-13.
- [7] 邓颖兰,魏恺颉,赵迪斐,等.我国煤矸石固体废弃物在建筑与环境修复领域的资源化利用[J].能源研究与利用,2021(5):33-36.  
DENG Yinglan, WEI Kaijie, ZHAO Difei, et al. Resource utilization of coal gangue solid waste in the field of construction and environmental restoration in China[J]. Energy Research & Utilization, 2021(5): 33-36.
- [8] 冉 洲.煤矸石污染物释放机理及与赤泥混合堆存动态淋溶规律[D].北京:中国矿业大学(北京),2021.  
RAN Zhou. The release mechanism of coal gangue pollutants and dynamic leaching law of co-disposal with red mud[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2021.
- [9] 杨 科,赵新元,何 祥,等.多源煤基固废绿色充填基础理论与技术体系[J].煤炭学报,2022,47(12):4201-4216.  
YANG Ke, ZHAO Xinyuan, HE Xiang, et al. Basic theory and key technology of multi-source coal-based solid waste for green backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4201-4216.
- [10] 顾霖骏,申艳军,王念秦,等.煤矸石堆积区土壤重金属潜在危害评价及污染特征[J].西安科技大学学报,2022,42(5):942-949.  
GU Linjun, SHEN Yanjun, WANG Nianqin, et al. Pollution characteristics and potential risk assessment of heavy metals in soil of coal gangue accumulation area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(5): 942-949.
- [11] 董兴玲,董书宁,王 焯,等.古土壤层对煤矸石淋滤液中典型污染物的防污性能[J].煤炭学报,2021,46(6):1957-1965.  
DONG Xingling, DONG Shuning, WANG Hao, et al. Antifouling property of the paleosol layer to the contaminants in the coal

- gaugue leachate[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1957–1965.
- [12] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211–1221.
- PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211–1221.
- [13] 竹涛, 武新娟, 邢成, 等. 煤矸石资源化利用现状与进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 380–390.
- ZHU Tao, WU Xinjuan, XING Cheng, et al. Current situation and progress of coal gangue resource utilization[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 380–390.
- [14] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1–15.
- LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1–15.
- [15] 朱磊, 古文哲, 宋天奇, 等. 采空区煤矸石浆体充填技术研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 143–154.
- ZHU Lei, GU Wenzhe, SONG Tianqi, et al. Research progress and prospect of coal gangue slurry backfilling technology in goaf[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 143–154.
- [16] 张吉雄, 张强, 周楠, 等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4167–4181.
- ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167–4181.
- [17] 张吉雄, 周楠, 高峰, 等. 煤矿开采嗣后空间矸石注浆充填方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 150–162.
- ZHANG Jixiong, ZHOU Nan, GAO Feng, et al. Method of gangue grouting filling in subsequent space of coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 150–162.
- [18] 邬俊, 高文华, 张宗堂, 等. 煤矸石路基填料强度与变形特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(4): 885–891.
- WU Jun, GAO Wenhua, ZHANG Zongtang, et al. Study on strength and deformation characteristics of coal gangue subgrade filling[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(4): 885–891.
- [19] 马腾辉, 李蓉, 王坤, 等. 时间序列下煤矸石充填复垦耕地和林地的土壤碳动态特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 260–268.
- MA Tenghui, LI Rong, WANG Kun, et al. Soil carbon dynamic characteristics of coal gangue-filled reclaimed cropland and forest land under time series[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 260–268.
- [20] 焦赫, 李新举. 煤矸石充填复垦土壤细菌群落变化[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3332–3341.
- JIAO He, LI Xinju. Variation in the soil bacterial community of reclaimed land filled with coal gangue[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3332–3341.
- [21] 徐裕焕. 循环流化床煤矸石和煤共燃发电过程生命周期分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
- XU Yuhuan. Life cycle assessment of coal gangue and coal co-combustion in a circulating fluidized bed power plant[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2023.
- [22] 郭洋楠, 李能考, 何瑞敏. 神东矿区煤矸石综合利用研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 144–147.
- GUO Yangnan, LI Nengkao, HE Ruimin. Study on comprehensive utilization of coal refuse in Shendong Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 144–147.
- [23] 李兆强, 王仲宇, 孙嘉炜, 等. 煤矸石-污泥基活性炭对苯酚的吸附[J]. 化工环保, 2023, 43(4): 470–477.
- LI Zhaoqiang, WANG Zhongyu, SUN Jiawei, et al. Adsorption of Phenol by  $ZnCl_2$  modified coal gangue-sludge based activated carbon[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2023, 43(4): 470–477.
- [24] 李宏伟, 燕可洲, 文朝璐, 等. 煤矸石制备活性炭-介孔硅复合材料及其过程物相转变[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 310–319.
- LI Hongwei, YAN Kezhou, WEN Chaolu, et al. Preparation of activated carbon-mesoporous silica composites from coal gangue and phase transformation during its preparation[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 310–319.
- [25] 徐培杰, 朱毅菲, 曹永丹, 等. 煤矸石资源高值化利用研究进展[J]. 环境工程学报, 2023, 17(10): 3137–3147.
- XU Peijie, ZHU Yifei, CAO Yongdan, et al. Research progress of high-value utilization of coal gangue resources[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(10): 3137–3147.
- [26] 张华林, 滕泽栋, 江晓亮, 等. 废弃煤矸石资源化利用研究进展[J]. 环境化学, 2024, 43(6): 1–14.
- ZHANG Hualin, TENG Zedong, JIANG Xiaoliang, et al. Research progress on resource utilization of waste coal gangue[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43(6): 1–14.
- [27] 周春财. 煤矸石资源化利用过程中微量元素的环境地球化学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- ZHOU Chuncai. The environmental geochemistry of trace elements during the utilization of coal gangue[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [28] 田莉, 于晓萌, 秦津. 煤矸石资源化利用途径研究进展[J]. 河北环境工程学院学报, 2020, 30(5): 31–36.
- TIAN Li, YU Xiaomeng, QIN Jin. Research progress in utilization of coal gangue resources[J]. Journal of Hebei University of Environmental Engineering, 2020, 30(5): 31–36.
- [29] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 1–15.
- XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 1–15.
- [30] 胡炳南, 刘鹏亮, 崔锋, 等. 我国充填采煤技术回顾及发展现状[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 39–47.
- HU Bingnan, LIU Pengliang, CUI Feng, et al. Review and development status of backfill coal mining technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 39–47.
- [31] 王玉涛. 煤矸石固废无害化处置与资源化综合利用现状与展望

- [J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10): 54–66.  
WANG Yutao. Status and prospect of harmless disposal and resource comprehensive utilization of solid waste of coal gangue[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2022, 50(10): 54–66.
- [32] 刘建功, 王翰秋, 赵家巍. 煤矿固体充填采煤技术发展回顾与展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 27–38.  
LIU Jiangong, WANG Hanqiu, ZHAO Jiawei. Review and prospect of development of solid backfill technology in coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 27–38.
- [33] 李亮, 黄庆亭, 惠博, 等. 研石流态化充填冒落区四级分区模型研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(1): 11–16.  
LI Liang, HUANG Qingxiang, HUI Bo, et al. Study on four-level partition model of gangue fluidized filling in the caving zone[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(1): 11–16.
- [34] 李永亮, 路彬, 杨仁树, 等. 煤矿连采连充式胶结充填采煤技术与典型案例[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1055–1071.  
LI Yongliang, LU Bin, YANG Renshu, et al. Cemented backfilling mining technology with continuous mining and continuous backfilling method for underground coal mine and typical engineering cases[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1055–1071.
- [35] 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.
- [36] 古文哲, 杨宝贵, 朱磊, 等. 研石浆体充填空间特征研究与工程实践[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(3): 409–418.  
GU Wenzhe, YANG Baogui, ZHU Lei, et al. Study on spatial characteristics of gangue slurry filling mining and engineering practice[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(3): 409–418.
- [37] 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.
- [38] 古文哲, 杨宝贵, 顾成进. 研石浆体邻位注浆充填技术研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(1): 75–79.  
GU Wenzhe, YANG Baogui, GU Chengjin. Study on adjacent grouting filling technology of gangue slurry[J]. *Coal Technology*, 2023, 42(1): 75–79.
- [39] 朱磊, 潘浩, 古文哲, 等. 垮落带研石浆体充填模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 629–638.  
ZHU Lei, PAN Hao, GU Wenzhe, et al. Experimental study on flow and diffusion law of gangue filling slurry in caving zone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 629–638.
- [40] 朱磊, 宋天奇, 古文哲, 等. 研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.