新街台格庙矿区煤矸石充填技术方案研究*

董俊亮[1],潘黎明[2],王林[1],苏波[2],刘鹏亮[2],崔锋[2],于健浩[2]

(1.神华新街能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯市 017000;
2.中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013)

摘要:为了开发兼具环保性与经济性的煤矸石处理方案,实现资源高效利用和环境可持续目标,针对新街台格庙矿区煤矸石造成的环境问题,通过对比分析多种煤矸石处理技术,确定矸石处理合理方式,设计了涵盖材料制备、输送、充填及固化等关键环节的综合充填技术方案。研究结果表明:充填技术因其环境友好性和成本效益被选为矸石处理的优选方案,采用高位注浆技术作为充填开采的首选方案,并对矸石破碎储存、配比搅拌、泵送系统及管路系统进行了设计,该技术体系包括高位注浆、邻位注浆和低位灌浆3种工艺,适用于不同条件的采空区。运营成本分析显示,所提出的充填方案在技术和经济上均具有可行性。实施该方案可显著减少地表沉降,减少环境破坏,提高资源的综合利用率,不仅改善了矿区的安全生产条件,更推动了可持续发展,实现了环境治理与安全生产的协同增效。

关键词:煤矸石利用;充填技术;环境治理;采空区稳定性;资源化利用

中图分类号:TD98 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)08-0054-07

Study on Coal Gangue Filling Technology Scheme in Xinjie Taigemiao Mining Area

DONG Junliang[1], *PAN Liming*[2], *WANG Lin*[1], *SU Bo*[2], *LIU Pengliang*[2], *CUI Feng*[2], *YU Jianhao*[2]

(1.Shenhua Xinjie Energy Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017000, China;
2.CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: To develop an environmentally friendly and economical coal gangue treatment scheme, and to achieve the goals of efficient resource utilization and environmental sustainability, the environmental problems caused by coal gangue in the Xinjie Taigemiao mining area were targeted. Through comparative analysis of various coal gangue treatment technologies, a reasonable method for gangue treatment was determined. A comprehensive filling technology scheme covering the key links of material preparation, transportation, filling and solidification was designed. The results show that the filling technology is selected as the preferred scheme for gangue treatment because of its environmental friendliness and cost-effectiveness. The high-level grouting technology is used as the preferred scheme for filling mining, and the gangue crushing storage, mixing, pumping system and pipeline system are designed. The technical system includes three processes of high-level grouting, adjacent grouting and low-level grouting, which are suitable for goafs with different conditions. The operation cost analysis shows that the proposed filling scheme is technically and economically feasible. The implementation of this scheme can significantly reduce surface subsidence, reduce environmental damage and improve the comprehensive utilization rate of resources. The scheme not only improves the safety production conditions of the mining area, but also promotes sustainable development and realizes the synergistic improvement between environmental governance and safety production.

Key words: Coal gangue utilization, Filling technology, Environmental governance, Goaf stability, Resource utilization

0 引言

煤矸石是煤炭开采和洗选过程中产生的固体废弃物,其大量堆积不仅占用土地资源,还可能对环境造成污染,如粉尘污染、水土流失、土壤侵蚀等。煤矸石占我国煤炭生产总量的15%~20%,由于其热值低、利用难度大,常被露天堆放在矿区周围,其大量堆积不仅占用土地资源,破坏生态平衡,还对人类社会的可持续发展构成威胁。煤矸石中的硫化物在淋溶作用下会污染地下水,影响水质,进而危害人类

* **收稿日期**:2024-08-21
作者简介:董俊亮(1987—),男,山西长治人,硕士,高级工程师,主要从事煤矿生产技术和科技管理工作。E-mail:329469486@qq.com
通信作者:潘黎明(1987—),男,湖北大悟人,硕士,助理研究员,主要从事充填开采技术研究工作。E-mail:709560863@qq.com

健康和生态系统。此外,煤矸石在风化和淋溶过程中释放的有害物质会污染土壤,改变土壤结构,影响农作物生长。地表径流会携带煤矸石中的污染物进入河流和湖泊,污染地表水体,破坏水生生物栖息地,影响水资源的可持续利用。煤矸石在一定条件下还可能发生自燃,释放有害气体,污染大气环境。在风化作用下,煤矸石易产生扬尘,影响空气质量。此外,煤矸石堆的不稳定性还可能诱发滑坡、泥石流等地质灾害,这些灾害不仅威胁矿区及周边地区的人民生命财产安全,还可能对交通、建筑等基础设施造成破坏。

因此,煤矸石的环境问题不容忽视,如何有效处理和利用煤矸石,已成为煤炭行业亟待解决的问题之一。煤矸石充填技术,作为一种创新的固体废弃物处理方式,通过将煤矸石作为充填材料,不仅解决了煤矸石的堆存问题,还有助于控制矿区地表沉降,提高资源的综合利用率,对于推动煤炭工业的绿色发展具有重要意义。

对于煤矸石综合利用,学者们提出了多种资源化途径,如将其转化为建筑材料、化工原料、土壤改良剂等[1-3]。此外,还发展了“采选充处”一体化固体充填开采[4-5],优化了新型煤泥沉淀处理方法,并设计了水资源循环利用系统。在分选环节,学者们提出采用色选机对不同颜色矿石进行高效分选的方案[6]。技术优化方面,学者们总结了以往煤矸石研究利用的不足,提出了优化建议,展望煤矸石综合利用技术的发展趋势,为煤炭行业的可持续发展提供参考[7-10]。同时,研发了基于关键层控制的部分充填采煤技术[11],形成了固体充填开采充填材料选择设计方法[12]。综上,本文根据新街台格庙煤矿的具体情况,分析煤矸石排放现状,通过对不同矸石处理方法进行综合对比,充填技术因其适应性强、环境影响小而被确认为更适宜的选择。对比多种充填技术,基于高位注浆充填方式提出了一套综合的煤矸石充填技术,旨在实现对采空区的有效充填,减少对环境的影响,提高资源利用效率,并保障矿区的安全生产,为新街矿区带来环境改善和经济效益的双赢。

1 煤矸石产量及组成分析

内蒙古新街台格庙矿区面积约 681 km^2,煤炭资源储量丰富,共有 8 座井田,煤矿规模合约 123 亿 t。8 个井田按北区、南区各 4 个进行规划,见表 1。其中,一井、二井为矿区首开井,然后建设三井、四井。

根据《新街台格庙矿区总体规划(修编)》,矿井全部投产后,预计年产生矸石 4 656 kt,其中掘进矸石 56 kt,洗选矸石 4 600 kt。同时根据新街一井及二井矸石产率,预测各矿井矸石产量,见表 1。

表 1 新街矿区各井矸石产量预测

Table 1 Prediction of gangue production in each well of Xinjie mining area

分区	矿井名称	井田面积/km^2	开采规模/(Mt/a)	服务年限/a	矸石产量/万 t		
					掘进	洗选	合计
北区	一井	68.67	8	62.75	12.30	64.00	76.30
北区	二井	67.12	8	60.87	12.30	70.00	82.30
北区	三井	78.82	6	105.98	12.30	50.25	62.55
北区	四井	66.71	6	72.53	12.30	50.25	62.55
南区	五井	93.78	8	79.38	12.30	67.00	79.30
南区	六井	82.62	8	62.30	12.30	67.00	79.30
南区	七井	95.39	8	69.08	12.30	67.00	79.30
南区	八井	64.86	4	77.02	12.30	33.50	45.80
合计		617.97	56	—	98.40	469.00	567.40

为合理高效地利用煤矸石,对新街矸石进行化学元素和组成分析可知,新街台格庙矿区的煤矸石矿物组成以石英(46%)和黏土矿物(38%)为主,其次为斜长石(7%)、微斜长石(5%),再次为方解石(2%)、黄铁矿(1%),未测到菱铁矿、石膏、硬石膏、浊沸石等矿物。新街煤矸石测试碳元素含量为1.05%~6.22%,平均为 3.25%。根据碳含量,将其划分为一类煤矸石,不可用于发电,可作为水泥的混合材、混凝土骨料和其他建材制品的原料,也可用于复垦采煤塌陷区回填矿井采空区。新街煤矸石黏土矿物含量达到 38%,可进行矸石制砖、制高岭土、制水泥等。

2 矸石处理方案选取

2.1 矸石处理方案对比

新街矿区煤矸石具有制造水泥、铺设路基、制陶瓷和充填等方面的潜力,结合现有矸石处理技术,对新街矿区矸石的处理方案进行对比,见表 2。

表 2 煤矸石的处理方案对比

Table 2 Comparison of coal gangue treatment technology

方案	优点	缺点
矸石制水泥	实现废物资源化利用,节能减排,推动经济发展。	矿区周边地广人稀,市场有限,运输成本高。
矸石铺路	矸石无需二次处理,利用方便。	需求量小,对矸石消耗有限。
矸石制陶瓷	产品质量高、技术成熟。	投资额较大,难以做到产销一体化,经济效益差。
矸石充填	矸石处理量可达 90%~95%,处理成本低。	受充填机械化影响较大,处理量依赖充填装备。

据调研,鄂尔多斯市区矿井煤矸石利用呈现产品附加值低,综合利用尚处于初级阶段的特点[13]。因此,考虑新街矿区煤矸石产量大,矿区周边人口密度低,煤矸石在建材方面的应用受供需不稳定和运输成本较高的现状限制,矸石充填具有较高的环境优势和技术优势,成为新街矿区的首选方案。

2.2 充填方式介绍

固体充填、膏体充填与浆体充填这 3 种技术在适用条件、经济成本及对环境与安全生产的影响方面有差异。固体充填技术,尤其是综采固体充填,适用于处理大量矸石,且在特定条件下能有效控制地表沉陷,保护矿区生态环境。该技术在新街台格庙矿区的应用案例表明,通过合理的支架设计和夯实机构,可以实现高效充填,尽管其系统建设投资较大,但矸石处理成本相对较低[14]。

膏体充填技术作为一种胶结充填开采方法,通过将固废转化为膏状浆液进行充填,不仅可以提高矸石的处理效率,还可以增强采空区的支撑能力。然而,该技术在实际应用中面临较高的建设投资和充填成本。综采膏体充填与连采连充技术虽然在矸石处理量上存在差距,但通过合理布局和设备配置,能够满足特定的矸石零排放要求[15-18]。

浆体充填技术,包括离层注浆和高位注浆,通过在岩层中注入浆体以减缓岩层移动和地表沉陷,适用于特定地质条件的煤层。离层注浆技术在新街台格庙矿区的应用显示,其能够有效处理矸石,尽管处理能力存在一定差异,但高位注浆技术提供了一种成本效益较高的解决方案,能够满足大规模矸石处理的需求[19]。

总体而言,矿井充填方案的选择需综合考虑技术适用性、经济性、环境保护和安全生产等多方面因素。

2.3 充填方案选取

新街矿区在综合比较综采固体、综采膏体、连采连充、高位注浆和离层注浆 5 种主要充填方案后,确定高位注浆方案在多个关键指标上表现最优。该方案不仅具备突出的矸石处理能力,可满足矿区大规模处理需求,同时在系统投资和管理难度方面也展现出显著优势。特别是在经济性方面,高位注浆方案能将矸石处理成本控制在 80～100 元/t,具有明显的成本优势。综合考虑技术可行性、经济效益和环境友好性,高位注浆方案被确定为最适合新街矿区的充填开采方案。

针对新街矿区一井和二井的具体地质条件和生产需求,高位注浆方案展现出独特的适应性,该方案不仅能够满足大规模(240 万 t/a)矸石处理能力要求,还能以较低的系统投资、简化的系统结构和便捷的管理流程提供高效、环保的充填解决方案。

3 高位注浆充填系统设计

高效充填系统的构建是实现矿山安全与环境可持续发展的关键。高位注浆充填系统设计需综合考虑材料制备、输送系统、分配系统和监控体系,确保充填材料从地面到井下的有效输送。此外,还需综合考虑地质条件、充填材料特性、技术可行性和经济性等因素,通过多方面优化,实现充填效率最大化与成本最优化。

3.1 矸石充填系统

新街矿区的矸石充填系统是一个综合性能优异的自动化工艺流程,包括矸石破碎储存、配比搅拌、泵送系统和充填管路。系统设计注重连续性和可靠性,通过高效鄂式和高细破碎机实现矸石的精细破碎,并通过滚筒筛分确保成品质量。成品矸石与净化矿井水在搅拌系统中精确配比,形成均匀料浆。泵送系统采用“一用一备”双泵冗余配置,确保关键设备的稳定运行。充填管路采用防冻设计,并配备自动化控制和监测系统,确保充填过程安全高效。整个系统设计矸石处理能力达 240 万 t/a,提高了资源利用率,还可有效降低对环境的影响,为矿区的可持续发展提供了可靠的技术保障。

3.1.1 矸石破碎储存

自有原料矸石通过带式输送机从选煤厂矸石仓转运至上料带式输送机,进入鄂式破碎机进行粗碎。破碎后的矸石经由带式输送机进入高细破碎机进行二次破碎,随后输送至滚筒筛进行筛分。筛上物料返回重新破碎,筛下物料(成品矸石)进入成品矸石仓,最后由仓底带式输送机运至充填车间进行搅拌混料。

为了保证充填工作的连续性,避免矸石破碎系统出现故障、影响生产,系统设置 2 座直径为 10 m 的成品矸石圆筒仓,单仓容积为 1 000 m^3,用于缓冲储存成品矸石。

3.1.2 配比搅拌系统

配比搅拌泵送工艺过程主要分三步:称量配料、投料搅拌和放浆泵送。系统采用单套配比搅拌系统和双套泵送系统(一用一备)的布置方式。矸石配料流程:成品矸石储存于成品矸石仓,仓底设带式给料

机,将矸石输送至带式输送机上方的计量斗内;计量完成后输送至充填车间矸石待料斗内;待料斗下设气动放料阀,分批次向搅拌机投料,实现循环批次配料。液体配料流程:充填用水采用净化后的矿井水,矿井水从井下泵送至充填车间蓄水池;配料时,由蓄水池内供水泵通过管路直接输送至充填车间内的水称量斗,完成水的称量,实现水的批次配料。

3.1.3 泵送系统

搅拌机卸出的浆料进入充填泵储料斗内,由充填泵通过充填管路输送至待充地点。充填泵是充填系统的核心设备,若发生故障将导致地面充填系统瘫痪、管道内膏体滞留,可能引发堵管事故。为确保系统可靠性,采用"一用一备"的双泵配置。

3.1.4 充填管路

新街矿区的煤矸石充填工艺流程体现了资源高效利用的环保理念。首先,煤矸石经过初次破碎,通过筛分确保颗粒尺寸满足要求,不合格的大颗粒重新返回破碎环节。二次破碎确保了矸石颗粒的细化,获得的细小颗粒即成品矸石碎料,与水和化学浆料按比例混合,形成均质充填料浆。该料浆通过高压充填泵输送至采空区,实现精准充填。该工艺系统不仅解决了煤矸石堆积造成的环境问题,还有效利用了固体废弃物,提高了矿区的资源利用率和安全生产水平。

矸石充填系统流程如图 1 所示。充填管路沿地表敷设,考虑到冬天防冻,管路埋入冻土层下。暂按每 500 m 设置检查井及泄料阀,检查井内设流量及压力监测传感器,对充填管路压力、充填管路浆体状态进行监测。充填时,全部过程均为自动化控制,由充填车间内集控员完成操作。

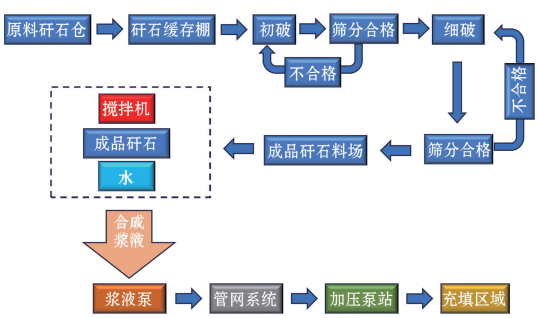


图 1 矸石充填系统工艺流程

Fig.1 Process flow of gangue filling system

3.2 矸石充填系统布置

(1) 一井、四井矸石充填系统布置。新街一井、四井矸石充填系统场地位于选煤厂联合工业场地南侧,将选煤厂洗选矸石破碎后制成浆体,经地面管路泵送至充填区域进行充填。场地内布置有筛分破碎车间、成品仓、充填站、水池及电控室。该场地布局简单,自选煤厂排矸栈桥卸载点进入筛分破碎车间,经过三级破碎,然后向东进入成品仓,再向南进入充填站,同时在充填站的北侧布置电控室,其西侧布置水池。该场地占地面积为 $1.128\ 9\times10^4\ m^2$,围墙内占地面积为 $1.05\times10^4\ m^2$。一井、四井矸石充填系统布置如图 2 所示。

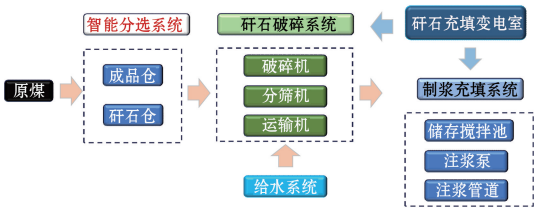


图 2 一井、四井矸石充填系统布置

Fig.2 Layout of gangue filling systems in well 1 and well 4

(2) 二井、三井矸石充填系统布置。新街二井地面矸石充填站位于工业场地北侧,靠近选煤厂矸石仓西侧布置。该站以选煤厂洗选矸石为原料,充填井下,转载通过皮带栈桥将矸石由矸石仓输送至矸石充填站,经过粉碎制浆后通过管道输送至井下进行充填。矸石破碎充填站分期建设,先期建设二井部分,包括破碎车间及二井制浆车间,布置于东侧,靠近二井回风立井井口,便于管道敷设;预留三井制浆车间(后期建设),位于破碎车间西侧,靠近三井回风立井井口。矸石破碎充填站与防火灌浆站集中布置于工业场地东北边缘,总占地面积为 $1.209\ 6\times10^4\ m^2$。该布局可有效减少噪音及粉尘对场区的影响。二井、三井充填站布置如图 3 所示。

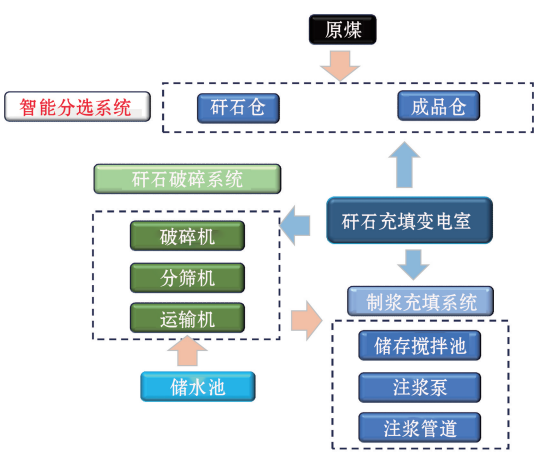


图 3 二井、三井矸石充填系统布置

Fig.3 Layout of gangue filling systems in well 2 and well 3

4 高位注浆钻孔布置方案

4.1 钻孔布置方案选取

一井 122-207 综放工作面为首个充填工作面，沿走向可充填长度 2 543 m，倾向长度 300 m，平均煤厚 6.82 m，属近水平煤层。二井 132-213 综放工作面为首个充填工作面，沿走向可充填长度 3 542 m，倾向长度 300 m，平均煤厚 7.28 m，属近水平煤层。针对采空区条件，分别制定垂直钻孔与定向钻孔两种充填钻孔布置方案。

4.1.1 垂直钻孔

在一井 122-207 工作面、二井 132-213 工作面距离边部煤柱 50 m 处布置 3 组垂直钻孔，组间距 100 m，钻孔排距 200 m。其中，一井 122-207 工作面共布设 36 个钻孔，单孔深度约为 700 m，总钻探进尺 25 200 m；二井 132-213 工作面共布设 51 个钻孔，单孔深度约为 700 m，总钻探进尺 35 700 m(如图 4 所示)。

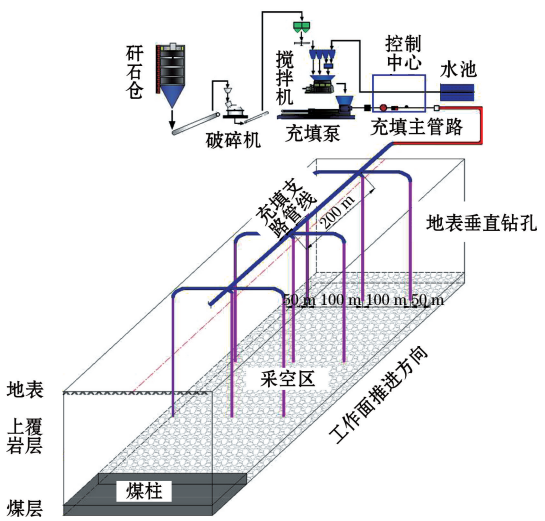


图 4 垂直钻孔布置

Fig.4 Vertical boreholes layout

4.1.2 定向钻孔

定向钻孔布置在充填工艺中起关键作用，可确保充填材料能被精确输送至采空区(如图 5 所示)。在一井 122-207 工作面、二井 132-213 工作面分别在距边部煤柱 50 m 处布置 3 组间距 100 m 的垂直钻孔，钻孔排距 200 m。一井 122-207 工作面共布设 12 组钻孔，单组深度约 1 800 m，总进尺 21 600 m；二井 132-213 工作面共布设 17 组钻孔，单组深度约为 1 800 m，总进尺 30 600 m。

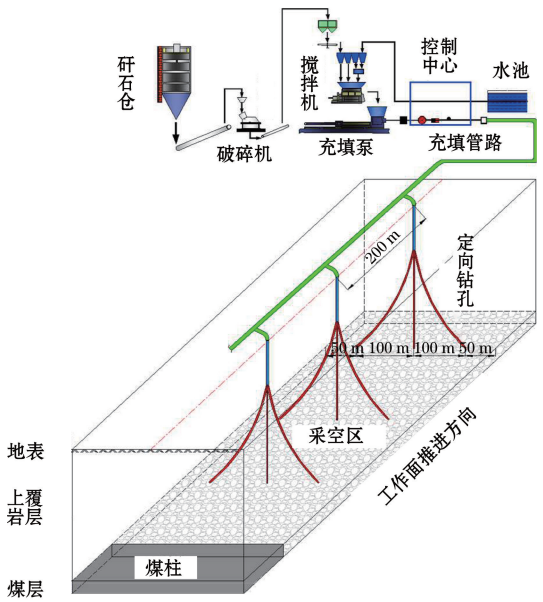


图 5 定向钻孔布置

Fig.5 Directional boreholes layout

4.1.3 不同方案对比

为系统对比垂直钻孔方案和定向钻孔方案，将从初期投资、管理成本、工程量以及实际应用情况等方面开展综合分析，具体如下。

(1) 初期投资。垂直钻孔方案：设备成本相对较低，标准钻探设备；基础设施投资较少，仅需简易充填站和储存设施。定向钻孔方案：设备成本较高，需配置高精度的定向钻探设备和测量设备；基础设施投资较大，包含精密测量和控制系统。尽管定向钻孔方案的初期投入较高，但其精确性与灵活性对复杂地质条件和环境保护具有长期优势。

(2) 管理成本。垂直钻孔方案：运营成本较低，设备维护和能源消耗较低，人员需求较少且操作简便。定向钻孔方案：运营成本较高，主要源于较高的设备维护费用与能耗，需配备专业技术人员进行操作和监控；虽管理成本较高，但其精确控制能力可提升资源利用率，环境效益显著，长期可降低环境修复成本。

(3) 工程量。垂直钻孔方案：施工难度低，便于快速部署，但充填效率一般，对复杂地质条件的适应性有限。定向钻孔方案：施工难度高，需精确测量和控制，充填效率高且能精准控制充填材料的分布；虽施工难度和工程量较大，但在提高充填效率和适应复杂地质条件方面优势显著。

(4) 实际应用情况。垂直钻孔方案：适用于地质条件简单、煤层较厚的矿区，易于实施和监控，但

在复杂地质条件下效果受限。定向钻孔方案:适用于地质条件复杂、需精确控制充填区域的矿区,实施效果优异,其在复杂地质条件下的优越性显著,有助于实现环境保护和资源高效利用的目标。

定向钻孔方案在初期投资、管理成本和工程量方面可能高于垂直钻孔方案,但其在精确性、环境友好性、资源利用效率和长期经济效益方面的优势显著,成为更优选择。尤其是在地质条件复杂、对环境保护要求高的矿区,定向钻孔方案的实施效果和可持续性表现更佳。综合考虑,钻孔布置方案的选择应基于具体的矿山条件、开采目标、成本效益分析以及环境影响评估确定。针对新街矿区特定条件,定向钻孔凭借高效性和适应性,是实现优化开采和环境友好型充填的首选方案。

4.2 运营成本分析

一井 122-207 工作面征地、管道铺设及钻孔成本合计为 4 055.46 万元,二井 132-213 工作面合计为 5 720.80 万元。两工作面可充注空间分别为 93.5 万 m^3、99.8 万 m^3,按浆体质量浓度 75%、密度 1.85 t/m^3 计算,可处理矸石量分别为 130 万 t 和 138 万 t;实际按 130 万 t 计算,两工作面矸石处理成本分别为 40 元/t 和 38 元/t。另外,叠加设备折旧、人工、耗材、水电费等,综合成本分别为 55 元/t 和 53 元/t,显著低于周边矿井现行 60～80 元/t 的矸石处理成本。

5 结论

(1) 结合新街矿区煤矸石特点及现有矸石处理技术,经综合对比分析,新街矿区煤矸石可应于建材领域和矿区回填,该利用方式具有处理效率高、投资低、安全、经济、环保等优势。通过对 5 种主要充填方案进行比较,新街矿区充填开采宜优选采用高位注浆充填技术。

(2) 新街矿区的一井和二井工作面采用矸石料浆输送充填技术,两个工作面均具备 300 m 宽度及 2 000 m 以上的年推进度,可注空间充足(一井为 93.5 万 m^3/a,二井为 99.8 万 m^3/a)。为满足新街矿区年处理 240 万 t 矸石的需求,系统配置了处理能力达 450 t/h 的高效破碎设备,并配套设计 350 m^3/h 的搅拌-泵送系统,保障充填浆体的连续稳定供应。

(3) 新街矿区采用定向钻孔技术在一井 122-207和二井 132-213 工作面实施充填作业,其中一井布置 12 组(总钻探进尺 21 600 m)、二井布置 17 组钻孔(总钻探井尺 30 600 m)。成本分析表明,两工作面包括征地、管道铺设和钻孔的总投资分别为 4 055.46 万元和 5 720.80 万元,矸石处理成本控制在 38～40 元/t,综合成本为 53～55 元/t,均低于区域平均水平。定向钻孔技术不仅提高了充填效率,降低了环境影响,还改善了矿山安全生产条件,成为推动矿山可持续发展的有效技术方案。

参考文献(References):

[1] 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]. Coalfield Geology and Exploration, 2022, 50(10):54-66.

[2] 李启辉.煤矸石的性质及综合利用研究进展[J].应用化工,2023,52(5):1576-1581.
LI Qihui. Research progress on properties and comprehensive utilization of coal gangue[J]. Application Chemical Industry,2023,52(5):1576-1581.

[3] 刘峰,刘超.煤矸石综合利用系统的研究与应用[J].煤炭技术,2019,38(12):144-146.
LIU Feng, LIU Chao. Research and application of comprehensive utilization system of coal gangue[J]. Coal Technology,2019,38(12):144-146.

[4] 李欢,杨春明.大宗工业固体废弃物煤矸石的综合利用研究进展[J].湖南师范大学自然科学学报,2024,47(1):1-9.
LI Huan, YANG Chunming. Research progress on comprehensive utilization of bulk industrial solid waste coal gangue[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University,2024,47(1):1-9.

[5] 李超,许瑞霞,王丽萍,等.煤矸石综合利用研究进展[J].应用化工,2021,50(增刊 1):209-214+231.
LI Chao, XU Ruixia, WANG Liping, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gangue[J]. Application of Chemical Industry, 2021, 50(Suppl.1): 209-214+231.

[6] 贾鲁涛,吴倩云.煤矸石特性及其资源化综合利用现状[J].煤炭技术,2019,38(11):37-40.
JIA Lutao, WU Qianyun. Characteristics of coal gangue and its comprehensive utilization status[J]. Coal Technology, 2019,38(11):37-40.

[7] 张金山,孙春宝,董红娟,等.内蒙古大青山煤矸石资源化综合利用探讨[J].矿产综合利用,2017(2):8-11.
ZHANG Jinshan, SUN Chunbao, DONG Hongjuan, et al. Exploration of comprehensive utilization of coal gangue resource in Daqing Mountain[J]. Comprehensive Utilization of Minerals,2017(2):8-11.

[8] 孙春宝,张金山,董红娟,等.煤矸石及其国内外综合利用[J].煤炭技术,2016,35(3):286-288.
SUN Chunbao, ZHANG Jinshan, DONG Hongjuan, et al. Coalgangue and its comprehensive utilization at home and abroad[J]. Coal Technology,2016,35(3):286-288.

[9] 李平,田红丽,王婷.煤矸石综合利用探析[J].环境污染与防治,2015,37(6):111.
LI Ping, TIAN Hongli, WANG Ting. Comprehensive utilization of coal gangue[J]. Environmental Pollution & Control,2015,37(6):111.

[10] 王中亮,刘海泉,王振虹.金裕达煤矿井下充填开采方案设计[J].山东煤炭科技,2022,40(7):60-63.
WANG Zhongliang, LIU Haiquan, WANG Zhenhong. Design of underground filling mining scheme in Jinyudacoal mine[J]. Shandong Coal Science and Technology,2022,40(7):60-63.

[11] 许家林,轩大洋,朱卫兵,等.基于关键层控制的部分充填采煤技术[J].采矿与岩层控制工程学报,2019,1(2):69-76.
XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, et al. Partial filling coal mining technology based on key strata control[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2019,1(2):69-76.

[12] 王云搏,张强,孟国豪,等.基于固体充填开采的充填材料选择设计方法[J].采矿与岩层控制工程学报,2022,4(3):80-89.
WANG Yunbo, ZHANG Qiang, MENG Guohao, et al. Selection and design method of filling materials based on solid filling mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2022,4(3):80-89.

[13] 鲍丽萍.鄂尔多斯市煤矸石综合利用路径研究[J].北方经济,2023(4):60-63.
BAO Liping. Research on the comprehensive utilization path of coal gangue in Ordos City[J]. Northern Economy,2023(4):60-63.

[14] 罗文,王庆雄.神东高强度开采煤矸石规模化利用模式研究[J].煤炭工程,2023,55(4):1-7.
LUO Wen, WANG Qingxiong. Study on large-scale utilization mode of coal gangue in Shendong high-intensity mining[J]. Coal Eengineering,2023,55(4):1-7.

[15] 张建中,王云搏,杨军辉,等.邢东矿充填开采智能化技术及工程实践[J].工矿自动化,2023,49(3):142-148.
ZHANG Jianzhong, WANG Yunbo, YANG Junhui, et al. Intelligent technology and engineering practice of filling mining in Xingdong Mine[J]. Journal of Mine Automation,2023,49(3):142-148.

[16] 吴建华,李玉增,王壮.连采连充膏体充填工艺系统设计与应用[J].煤炭工程,2024,56(1):8-13.
WU Jianhua, LI Yuzeng, WANG Zhuang. Design and application of continuous mining and filling paste filling process system[J]. Coal Engineering,2024,56(1):8-13.

[17] 纪润清,邓天琳,董亮亮,等.云冈煤矿充填开采设计与顶板覆岩变形破坏时空演化规律研究[J].煤矿安全,2024,55(4):124-133.
JI Runqing, DENG Tianlin, DONG Liangliang, et al. Study on filling mining design and space-time evolution law of roof overburden deformation and failure in Yungang Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines,2024,55(4):124-133.

[18] 王旭锋,张云峰,刘峰,等.煤矸石覆土填沟关键工艺参数确定与应用[J].矿业研究与开发,2023,43(5):69-75.
WANG Xufeng, ZHANG Yunfeng, LIU Feng, et al. Determination and application of key process parameters of coal gangue covered soil filling ditch[J]. Mining Research and Development,2023,43(5):69-75.

[19] 戚绪尧,王涛,陈良舟.煤岩裂隙高位注浆浆液扩散规律[J].煤炭学报,2022,47(3):1098-1109.
QI Xuyao, WANG Tao, CHEN Liangzhou. Diffusion law of high grouting slurry in coal-rock fracture[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(3):1098-1109.