



建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术与实践

刘浪 罗屹骁 朱梦博 苏臣 吴涛涛 王建友 杭彦龙

引用本文:

刘浪, 罗屹骁, 朱梦博, 等. 建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术与实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 83-92.

LIU Lang, LUO Yixiao, ZHU Mengbo. Mining technology and practice of full-solid waste cemented backfilling in narrow strip of extra-thick coal seam under buildings[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 83-92.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0188>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

“三下”采煤膏体充填开采技术研究

Research on paste backfilling mining technology of coal mining under buildings, water bodies and railways

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 218-224 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.017>

煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术

Foundation and technology of coordinated utilization of bulk solid waste ‘Three modernizations’ in coal power base

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 69-82 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0129>

含钙镁煤基固废CO₂矿化封存及其产物性能研究进展

Research progress on CO₂ mineralization of coal-based solid waste containing calcium and magnesium and its product performance

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 301-315 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0902>

煤基灰渣的大宗固废资源化利用现状及发展趋势

Resource utilization status and development trend of bulk solid waste of coal-based ash/slag

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 238-252 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1102>

新疆煤基固体废弃物处置与资源化利用研究

Prospect of resource utilization and disposal of coal-based solid wastes in Xinjiang

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 319-330 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.030>

我国煤矿“三下一上”采煤技术现状与展望

Current status and prospect of coal mining technology under buildings, water bodies and linear structure, and above confined water in China

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 16-26 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0b843baf-c67d-40a7-98ea-f8cfd2f0c747>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

刘浪, 罗屹骁, 朱梦博, 等. 建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术与实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 83-92.

LIU Lang, LUO Yixiao, ZHU Mengbo, *et al.* Mining technology and practice of full-solid waste cemented backfilling in narrow strip of extra-thick coal seam under buildings[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 83-92.

建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术与实践

刘浪¹, 罗屹骁¹, 朱梦博¹, 苏臣², 吴涛涛², 王建友³, 杭彦龙⁴

(1. 西安科技大学能源学院, 陕西西安 710054; 2. 榆林泰发祥矿业有限公司麻黄梁煤矿, 陕西榆林 719004; 3. 西安弗尔绿创矿业科技有限责任公司, 陕西西安 710054; 4. 榆林蒙西水泥有限责任公司, 陕西榆林 719099)

摘要:我国建筑物下压煤量巨大, 同时煤矸石、粉煤灰等煤基工业固体废弃物排放量日益增加, 严重制约地方经济社会发展。以榆林麻黄梁煤矿为试验矿井, 针对其特厚煤层、建筑物下压煤、充填成本高等问题, 提出了特厚煤层全固废连采连充开采技术。采用四阶段工序并将特厚煤层分为上、下 2 部分二次回采压覆煤炭, 最大程度控制地面沉降。为降低充填原材料成本, 采用化学优化剂对镁渣进行源头改性, 抑制镁渣冷却粉化, 稳定水化活性, 协同粉煤灰、脱硫石膏等煤基固废, 研发了改性镁-煤渣基胶凝材料。采用改性镁-煤渣基胶凝材料胶结煤矸石、粉煤灰制备了全固废充填材料。针对麻黄梁煤矿四阶段强、弱充填强度要求, 设计不同配比的改性镁渣基充填材料试验, 优选配比并应用于井下充填。论述了膏体充填系统与充填接顶方法。麻黄梁煤矿全固废胶结充填工艺试验显示, 井下 28 d 龄期充填体钻芯平均单轴抗压强度超设计强度 27%, 钻芯浸出毒性满足相关国家标准要求, 成功回收了建筑物下压覆煤炭资源, 社会经济效益显著。麻黄梁煤矿特厚煤层全固废胶结充填开采实践为国内类似矿井提供了有益借鉴, 同时为我国大型煤炭基地的“煤-电-化-冶”固废大规模资源化利用提供了新的思路。

关键词:“三下”采煤; 充填开采; 改性镁渣; 特厚煤层; 固废处置

中图分类号: X752 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2024)04-0083-10

Mining technology and practice of full-solid waste cemented backfilling in narrow strip of extra-thick coal seam under buildings

LIU Lang¹, LUO Yixiao¹, ZHU Mengbo¹, SU Chen², WU Taotao², WANG Jianyou³, HANG Yanlong⁴

(1. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Mahuangliang Coal Mine, Yulin Taifaxiang Mining Co., Ltd., Yulin 719004, China; 3. Xi'an Fill Green-innovation Mining Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 4. Yulin Mengxi Cement Co., Ltd., Yulin 719099, China)

Abstract: There is a great amount of coal pressed under buildings in our country, while the discharge of coal-based industrial solid wastes such as coal gangue and fly ash are increasing, which has severely restricted the local economic and social development. Taking Mahuangliang Coal Mine in Yulin as the test mine, aiming at the problems of extra-thick coal seam, coal pressed under buildings and high backfilling cost, the technology of full solid waste continuous mining and filling in extra-thick coal seam is put forward. The four-stage process is adopted and the extra thick coal seam is divided into upper and lower parts for secondary mining to control the ground settlement to the maximum extent. In order to reduce the cost of filling raw materials, the source modification of magnesium slag is carried out with chemical optimizer to restrain the cooling pulverization of magnesium slag and stabilize hydration activity. In collaboration with coal based solid wastes such as fly ash and desulfurized gypsum, modified magnesium-cinder based cementing material is developed. The whole solid waste filling material was prepared by cementing coal gangue and fly ash with modified magnesium cinder based cementing material. According to the requirements of strong and weak filling strength in four stages of Mahuangliang Coal mine, different ratios of

收稿日期: 2023-06-15 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0188

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52204175, 52074212); 陕西省哲学社会科学重大理论与现实问题研究年度一般资助项目 (2021ND0135)

作者简介: 刘浪 (1985—), 男, 陕西靖边人, 教授, 博士。E-mail: liulang@xust.edu.cn

通讯作者: 朱梦博 (1992—), 男, 湖北浠水人, 讲师, 博士。E-mail: mbzhu@xust.edu.cn

modified magnesium slag-based filling materials were designed to optimize the ratio and applied to underground filling. The paste filling system and roof-contact method are introduced. The experimental results show that the average uniaxial compressive strength of the 28-day underground filling body exceeds the designed strength by 27%. The leaching toxicity of the core meets the relevant national standards, which successfully liberates the coal resources under the building and has significant social and economic benefits. The practice of full-solid waste cementation and backfilling in the extra-thick seam of Mahuangliang Coal Mine provides a useful reference for similar mines in China, and provides a new idea for the large-scale resource utilization of “coal-electricity-chemical-metallurgical” solid waste in large coal bases in China.

Key words: coal mining under buildings railways and water-bodies; backfill mining; modified magnesium slag; extra-thick coal seam; solid waste disposal

0 引言

煤炭在我国能源消费中占据优势地位^[1],并且在相当长时间内依然是我国最重要的能源资源之一^[2]。我国“三下”待解放煤炭资源量巨大,其中仅山西、河北、山东、河南及安徽5个省“三下”煤炭资源量约474.15亿t,占资源总量的12.10%^[3]。充填法是用充填材料填充采空区,避免上覆岩层垮落,在控制地表沉降的同时又能提高采出率^[4]。近年来,在我国生态文明建设持续推进的背景下,充填法因其绿色开采、协同处置固废等突出优势而日益受到重视,充填法矿产资源税减征、充填法产能置换、新固废法等系列法律、法规、政策文件更是为充填开采的发展提供了机遇与保障。另一方面,我国排放的各类工业固废呈现逐年增加的趋势,尤其是煤基固废,但利用率还处于较低水平。固废堆场排放给生态环境带来威胁,固废减量化、资源化和无害化处置是绿色可持续发展的必由之路^[5-8]。煤矿大多采用煤矸石,风积沙等进行充填,充填开采不仅可以解决煤矸石堆存与排放问题,将粉煤灰、钢渣、脱硫灰等固废作为辅助胶凝材料进行利用从而替代部分水泥达到降低充填成本的效果,为矿山带来经济效益的提升。因此开发新型的全固废充填材料具有重要意义。

针对固废充填问题,国内众多学者开展了相关研究。郭利杰等^[9]总结了金属矿石充填技术的发展与新技术的应用,认为充填法是降低成本的重要措施且仍有很大的发展空间。刘建功等^[10]对我国不同地区煤炭充填的应用情况进行调研,认为充填法在“三下”压煤及处理废弃物方面具有示范意义。在煤矸石固废处置方面,宋天奇等^[11]对煤矸石充填体重金属元素的扩散进行了研究,总结了采空区底板岩性对元素迁移的扩散规律。王平等^[12]以新巨龙煤矿为背景,探讨了深部矿井矸石充填的工作面围岩稳定性及地压规律。张云等^[13]分析了矸石充填在保水

开采中的作用及机理,认为矸石充填体限制了上覆岩层的裂隙发育从而保护水资源避免流失。朱磊等^[14]对煤矸石浆体充填技术的发展进行了梳理,认为CO₂矿化是制备浆体工艺的发展趋势。刘浪等^[15]基于功能性充填体,提出了CO₂储库的构筑方法。煤基固废充填是实现煤炭资源绿色开采的重要途径^[16],在我国各地得到了应用与发展^[17-18]。黄艳利等^[19]总结了新疆煤基固废的理化特征及生产背景。杨科等^[20]调研了黄河流域煤基固废的应用情况,认为固废充填对修复生态脆弱区具有重要意义。水泥一般占充填成本的60%~80%,水泥基充填材料原材料成本一般80~150元/m³,胶凝材料成本高是制约充填开采技术推进发展的重要原因。对此,国内外众多学者开展了固废基胶凝材料的研究,以期降低充填成本。ZHU等^[21]系统研究煤气化渣的研磨动力学,并将气化渣微粉作为充填用胶凝材料。XIAO等^[22]研发了一种由35%吹氧转炉钢渣、40%粒化矿渣和25%脱硫石膏组成的钢渣基充填用胶凝材料,并研究胶结尾砂充填材料的水化、强度及孔隙特征,分析了成本优势。吴爱祥等^[23]综述了碱激发胶凝材料、高水材料、胶固粉和CH半水磷石膏胶凝材料的研究进展及发展趋势。固废改性制备充填用胶凝材料是破解充填成本高的关键所在。

以麻黄梁煤矿为试验矿井,针对其建筑物下特厚煤层开采条件,设计四阶段逐巷充填方法,采用改性镁渣、粉煤灰、脱硫石膏等固废制备全固废胶凝材料,并胶结煤矸石进行全固废充填。简述了镁渣的物理激发与碱激发原理,设计不同配比的充填材料以满足强、弱充填需求。重点论述了特厚煤层回采、充填工艺,最大程度控制地面沉降。镁渣基全固废胶结充填新技术及其实践可以为国内类似矿井提供有益借鉴。

1 试验矿井概况

麻黄梁井田位于榆林市东北方向,井田面积约

7.78 km², 开采煤层平均埋深约 185 m, 平均倾角约 0.59°, 平均厚度 10.4 m, 煤矿可采储量约为 3 000 万 t。地面建筑占地面积 2.12 km², 压煤量超 1 000 万 t, 占矿井剩余总可采储量(2017 年底)的 1/3。麻黄梁煤矿建筑物压煤区如图 1 所示。压煤区资源量巨大且地表建筑物安全等级较高, 迫切需要不搬迁开采技术。为回收压覆煤炭资源, 延长矿井服务年限, 麻黄梁煤矿于 2018 年 10 月在首试区 30401 工作面正式开展充填开采作业。

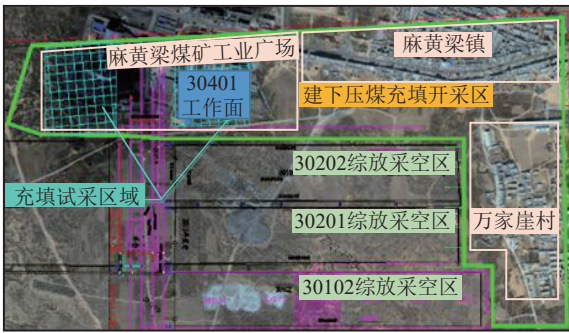


图 1 麻黄梁煤矿建筑物下压煤区

Fig.1 Coal overburden area under buildings in Mahuangliang Coal Mine

2 特厚煤层连采连充采煤工艺

2.1 四阶段逐巷回采

特厚煤层开采是近年来在煤矿工程领域备受关注的研究方向之一, 由于特厚煤层具有独特的地质特征和开采难度, 对煤矿生产效率和安全性提出了巨大挑战。麻黄梁煤矿采用一次采全高连采连充开采方法对特厚煤层工作面进行开采, 为保证覆岩载荷均匀传递至充填体, 同开切眼平行方向每 32 m 划分为一组, 每组 4 个巷道, 每个巷道 8 m 宽, 分 4 轮开采并充填采空区, 开采方法如图 2 所示。

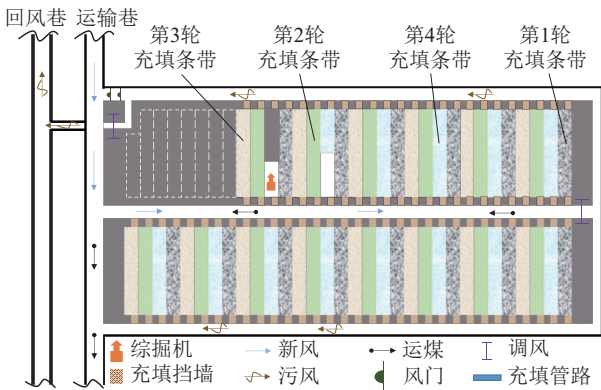


图 2 巷道划分与回采顺序

Fig.2 Roadway division and mining sequence

使用连续采煤机或者综掘机每开采完一个巷道后, 在巷道两端头用移动式隔离支架将开采后的采空区封闭, 再用膏体充填材料充满该采空区。每采完一个巷道, 间隔 24 m 的煤柱再开采下一个巷道并充填, 当完成一轮开采后再返回到起点处对剩余煤柱实施下一轮开采。下一轮充填开采需在充填体达到设计强度以后进行, 并按计划回收开切眼煤柱、开切眼底煤、采巷隔离煤柱、回采巷道底煤, 回收结束后有选择性地对回采巷道和开切眼进行充填, 直至采出所有煤炭资源。

2.2 特厚煤层回采方法

单个巷道总长 120 m, 划分为上下 2 部分进行开采。在工作面内使用掘进机垂直于回采巷道先在巷道上半部分(高度约 3.2 m)进行掘进开采, 如图 3a 所示。待掘进面贯通形成全风压通风后对下半部分(高度约 6.6 m)进行二次收底开采, 如图 3b 所示, 收底开采依设备确定留煤倾角为 15°。回采结束后进行设备回收(图 3c), 留煤区长度约 24.6 m, 最大遗留煤体体积约 650 m³。采用 EBZ160 型综掘机(爬坡 15°, 截宽 3.3 ~ 5.5 m)落煤, SGB620/40t 刮板输送机(运量 150 t/h, 运距 100 m)输送, 采空区全部充填法管理顶板, 回采巷道实施沿空留巷。

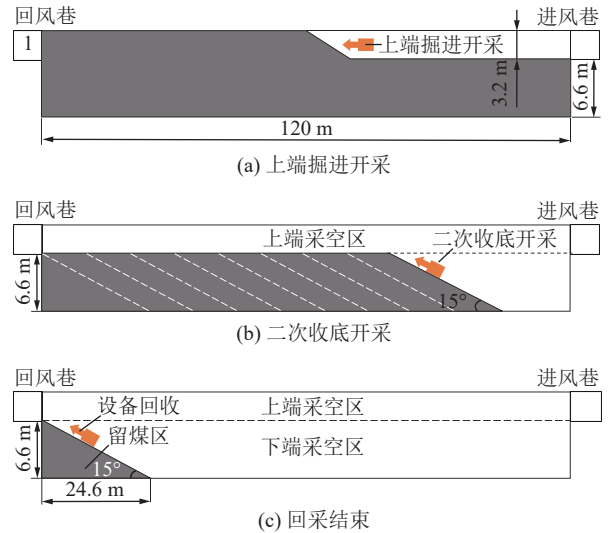


图 3 特厚煤层回采方法

Fig.3 Mining method of extra-thick coal seam

2.3 巷道断面与支护

由于特厚煤层开采后, 采空区会形成大空间, 覆岩运动剧烈, 使得顶板更容易发生变形、断裂和塌陷等不稳定情况。针对麻黄梁特厚煤层的开采, 为维护工作面空间稳定性, 在巷道掘进面开采时进行巷道顶板及左右两帮的支护, 如图 4 所示。采充工作面巷道断面为矩形, 净高×净宽为 9.8 m×8.0 m, 巷道

顶板布置8排锚杆,间排距为1 000 mm×1 000 mm,锚杆规格 $\phi 18$ mm×2 200 mm,同时联合铺设钢筋网,规格1 200 mm×2 600 mm,网格100 mm×100 mm,锚杆的设计锚固力不小于70 kN;锚杆的扭矩力不小于120 N·m。为避免煤层出现离层和淋水,在巷道顶板沿中线两侧间隔1 500 mm布置2排锚索,锚固力不小于200 kN。在巷道左右两帮各布置3排锚杆,间排距1 000 mm×1 400 mm,锚杆规格为 $\phi 18$ mm×1 600 mm玻璃钢锚杆,网片采用高强度塑料网,塑料网上方与顶网搭接,锚杆的设计锚固力不小于60 kN;锚杆的扭矩力不小于60 N·m。

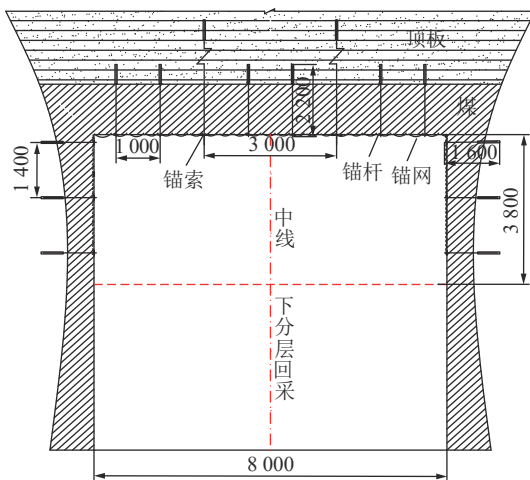


图4 巷道支护示意

Fig.4 Roadway support diagram

2.4 巷道开挖及充填数值模拟分析

运用Flac^{3D}软件对麻黄梁特厚煤层开采效果进行数值模拟分析。设定模型的下边界为固定边界,左右边界固定x轴方向位移,前后边界固定y轴方向位移,上边界取到基本顶以上,其上145 m松散层以均布载荷形式施加。根据麻黄梁煤矿地质资料,建立基于Mohr-Coulomb的本构模型,如图5所示。表1为巷道围岩力学参数。

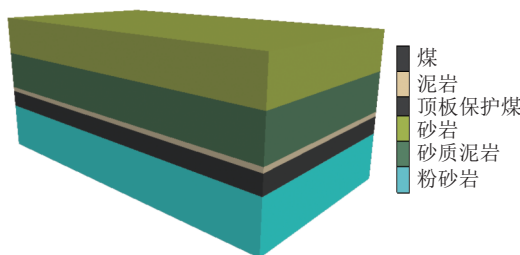


图5 数值分析模型

Fig.5 Numerical analysis model

以第3轮开采为例,包括对上一阶段条带采空区的充填和第3轮条带开挖及支护。图6是第3轮开

表1 巷道围岩力学参数

Table 1 Mechanical parameter table of roadway surrounding rock

岩层	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
细-中粒砂岩	2 260	2 241	1 543	39.1	3.35	1.43
砂质泥岩	2 420	2 235	1 152	38.2	3.26	1.19
泥岩	2 350	2 148	1 426	38.1	3.11	1.05
煤层	1 420	759	455	36.0	3.40	0.71
泥质粉砂岩	2 740	867	377	38.9	3.14	0.60
充填体	1 800	226	104	35.0	0.39	0.34

采的垂直应力图、垂直位移图和塑性区分布图,第3轮开采条带的右、左两侧第1、第2轮充填体的最大垂直应力分别为2.1、1.3 MPa,第4轮未开采煤柱的最大垂直应力为5.15 MPa。这是因为覆岩内部形成的“压力拱”结构,其拱脚分别位于第1轮充填体和第4轮未采煤柱上方。由于第2轮充填体强度尚未发育完全,使得应力拱中的应力并未完全传递到第2轮充填体内部;而第1轮充填体强度发育时间较第2轮充填体更长而具有更高的强度,该充填体与相邻煤柱共同承载上覆压力,保证开采巷道的安全作业。

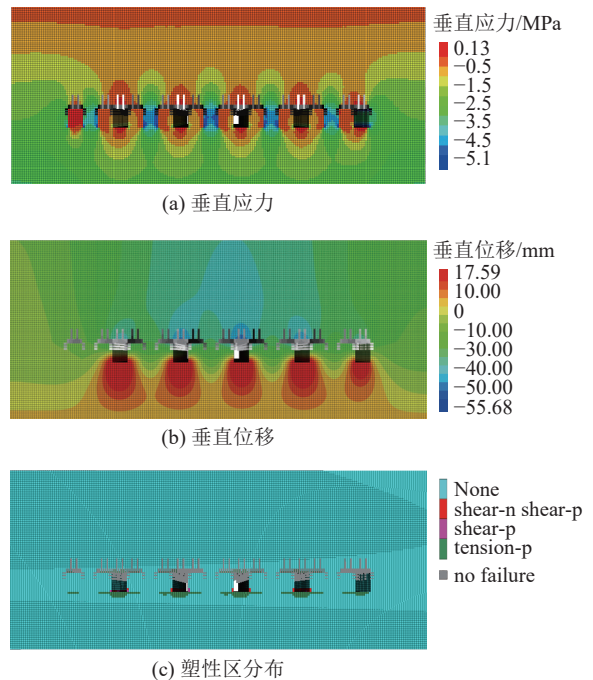


图6 第三轮开采数值分析

Fig.6 Third round numerical analysis

总体而言,第3轮开采巷道顶板最大位移为55.7 mm,拉应力较小,顶板支护效果较好,巷道轻微底鼓不会影响工作面正常作业。同时在开采巷道的顶板和底部出现小范围塑性破坏区,但不影响巷道

整体稳定性。而右侧和左侧的第1轮充填体、第2轮充填体最大位移分别为38.01 mm和23.25 mm,第4阶段未采煤柱处最大竖直位移为28.12 mm,第3阶段开采整体下沉值较小,厚煤层开采效果良好。

3 全固废充填材料与巷道充填工艺

3.1 改性镁渣基全固废胶凝材料

3.1.1 固废基原材料

国内普遍采用皮江法炼镁,而用皮江法每炼1 t的镁会产生5~7 t的镁渣^[24]。针对镁渣堆场排放问题,刘浪等^[25]通过对其进行激活与改性,获得了一种改性镁渣(Modified magnesium slag, MMS),MMS性质稳定,呈球团状且不粉化,富含 $\beta\text{-C}_2\text{S}$,具备良好的水化活性。改性镁渣和粉煤灰的化学组成见表2。改性镁渣碱性系数 B 为2.42,属于高活性碱性废渣。粉煤灰中的活性 SiO_2 、 Al_2O_3 质量分数高达57.6%,潜在火山灰活性较高。

表2 MMS及粉煤灰化学成分

Table 2 Chemical compositions of MMS and fly ash

样品	质量分数/%						
	CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	其他
MMS	55.0	26.6	8.6	3.5	0.8	0.1	5.4
粉煤灰	10.3	40.9	1.2	15.1	16.7	4.8	11.0

脱硫石膏表面为灰黄色湿粉状颗粒,颗粒较细且部分黏结,脱硫石膏较天然石膏细度更大、活性更好,能与胶凝材料迅速反应,有效调节材料凝结时间。

3.1.2 改性镁渣基胶凝材料制备工艺

改性镁渣具有良好的易磨性^[26-27],粉磨使镁渣的比表面积增大,增加其发生水化反应的表面积,并提高其水化活性。将改性镁渣、粉煤灰、脱硫石膏等一般工业固废按照一定的配比研磨,制备改性镁渣基全固废胶凝材料,工艺流程上主要包括称重上料、辊压、选粉、球磨和装库等步骤,具体如图7所示。

3.1.3 镁渣对粉煤灰的碱激发作用

制备胶凝材料过程中,粉煤灰用作辅料,其活性玻璃体在研磨过程中裂解,水化活性大幅度提高。制备充填材料过程,粉煤灰由于其细观球型形貌特性,降低了细、粗骨料颗粒相互间的摩擦力,从而使充填料浆流动性有所增大;同时,改性镁渣水化释放大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,较强的碱性水化环境下,粉煤灰中的Si、Al相玻璃体逐渐溶解,发生火山灰反应,生成

水化凝胶等水化产物,使充填体的强度得到增加。镁渣基充填膏体碱激发粉煤灰的理论模型可以简要表达为图8。

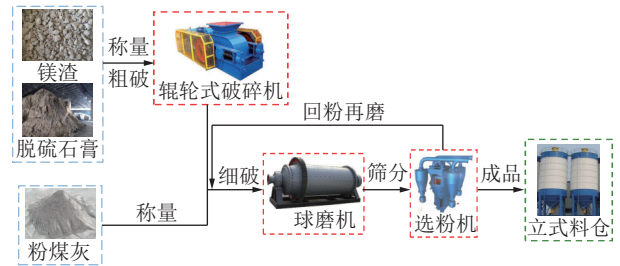


图7 改性镁渣基全固废胶凝材料制备工艺

Fig.7 Preparation process of modified magnesium slag based solid waste cementitious material

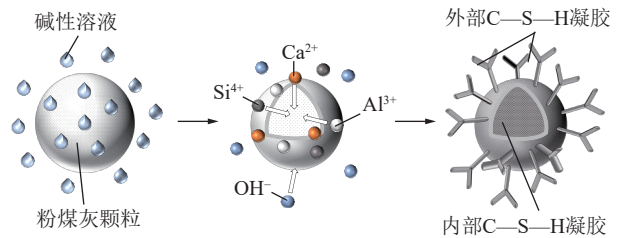


图8 镁渣基胶凝材料中粉煤灰反应机理模型

Fig.8 Reaction mechanism model of fly ash in magnesium slag based cementitious materials

研究所用粉煤灰CaO含量10.3%,属于低钙材料。基于Glukhovskiy提出了低钙体系活化反应的一般机理^[28],“镁渣-粉煤灰-脱硫石膏”三元胶凝材料水化包括强碱性水化环境的形成、解聚-凝结、凝结-沉淀、沉淀-结晶4个阶段。

图9为镁渣基胶凝材料中粉煤灰的碱激发解聚SEM图像。粉煤灰球状结构在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激发后发生破裂(图9a),可容纳其他较小的球,颗粒表面在碱溶液的作用下充斥着大量具有胶凝特性的无定形碱后活化基质,其主要成分是C-S(A)-H凝胶,为充填材料形成力学强度。随着粉煤灰火山灰反应的进行,水化产物将未反应的物质黏合在一起(图9b),使得充填体微观结构更加致密,强度逐步提高。

3.2 全固废充填材料

麻黄梁煤矿四阶段膏体充填分为强充填开采和弱充填开采,其中前3轮开采为强充填开采,第4轮开采为弱充填开采。实验室根据工程实际及过去研究成果^[29],分别设计强充填配比与弱充填配比。

3.2.1 煤矸石充填骨料

镁渣基全固废充填材料选用煤矸石作为充填骨料,煤矸石选自麻黄梁煤矿。其主要是由砂岩、高岭石等矿物组成,矸石硬度较大,不易泥化,膨胀性小,

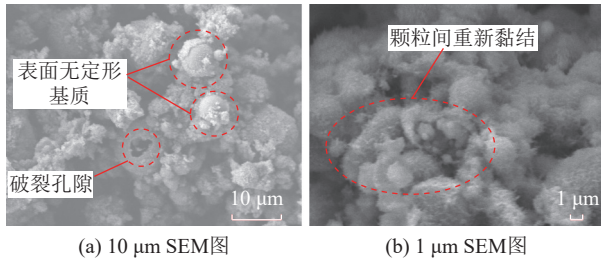


图9 镁渣基胶凝材料中粉煤灰碱激发 SEM 图像

Fig.9 SEM image of fly ash alkali excitation in magnesium slag base cementitious material

在膏体充填中作为骨料也是比较理想的。

煤矸石的压碎指标为 25.5%，介于 I 级和 II 级之间，石粉含量小于 0.08 mm 部分为 16.5%，细颗粒较多。而矸石的吸水率较大，达到 5.11%，延长膏体搅拌时间可避免浆体流动性损失。

煤矸石经过二级破碎至 10 mm 以下，颗粒级配如图 10 所示。从筛分结果看，麻黄梁煤矿破碎矸石的最大颗粒为 16 mm，大于 10 mm 的颗粒占 1.3%，小于 5 mm 的颗粒占 90.1%，其中小于 0.08 mm 颗粒占 16.5%。从颗粒级配看，矸石主要分布于 II 区，颗粒分布均匀，级配比较合理，矸石的细度模数为 2.57，达到中砂标准。

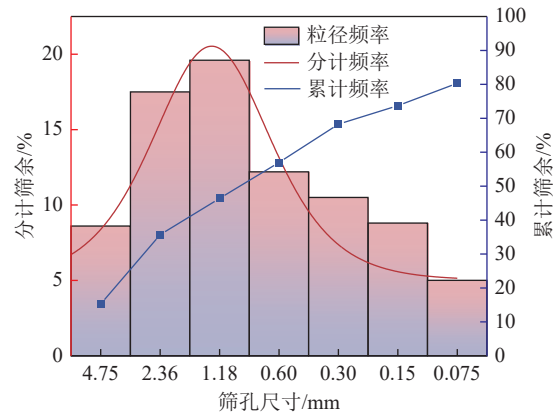


图 10 煤矸石的颗粒级配

Fig.10 Particle size distribution of coal gangue

3.2.2 充填材料配比及力学性能

根据强充填要求，设计不同浓度配比的镁渣基充填材料，配比见表 3，将实验试件养护至规定龄期后，进行单轴抗压强度测试，结果如图 11a 所示。充填体 28 d 的养护强度是评价充填材料性能的重要指标，麻黄梁煤矿条件下前 3 轮充填体强度应不小于 4.9 MPa。充填体达到此强度时，可以安全地回采相邻煤柱。从图 11a 可以看出强充填体试件 28 d 的养护强度均达到要求，综合成本及安全因素，选用 M-50-1 配比进行井下充填。

表 3 充填材料配比试验

Table 3 Mixture ratio of backfilling material

类型	编号	浓度/%	材料用量/(kg·m ⁻³)			
			胶凝材料	粉煤灰	煤矸石	水
强充填	M-20-1	77.43	220	142	1 058	413.75
	M-30-1	77.38	230	142	1 048	415.00
	M-40-1	77.54	240	142	1 038	411.25
	M-50-1	78.22	250	142	1 028	395.50
	M-50-2	79.32	250	71	1 099	370.00
	M-50-3	77.38	250	100	1 070	415.00
弱充填	M120	79.96	120	120	1 298	326.50
	M140	79.45	140	140	1 258	399.00

弱充填材料配比见表 3，各养护龄期单轴抗压强度如图 11b 所示。麻黄梁煤矿充填试验区选择第 4 轮回采采空区，采用强度 1.0 MPa 的膏体材料进行充填。可以看出，两组配比镁渣充填材料 28 d 强度均高于 1.0 MPa，且强度富余量较大。为保证经济合理，选用 M120 配比作为第 4 轮充填材料的配比。

3.3 巷道分层充填工艺

3.3.1 膏体充填系统

麻黄梁煤矿膏体充填系统由地面充填站和充填

管网组成，如图 12 所示。地面充填站是膏体料浆的生产线，包括骨料加工工艺流程和配比搅拌泵送工艺流程。麻黄梁煤矿膏体充填系统的充填能力设计为 250 m³/h，其中运到充填站的矸石最大粒度大于 50 mm，需要二级破碎加工之后进入计量斗，而镁渣基胶凝材料、水和粉煤灰在经过称量后，按比例输入搅拌机，与矸石一同进行搅拌，最后通过充填管网输送至井下充填。充填管网是膏体料浆的输送途径，包括地面管路、井下管路、工作面管路。

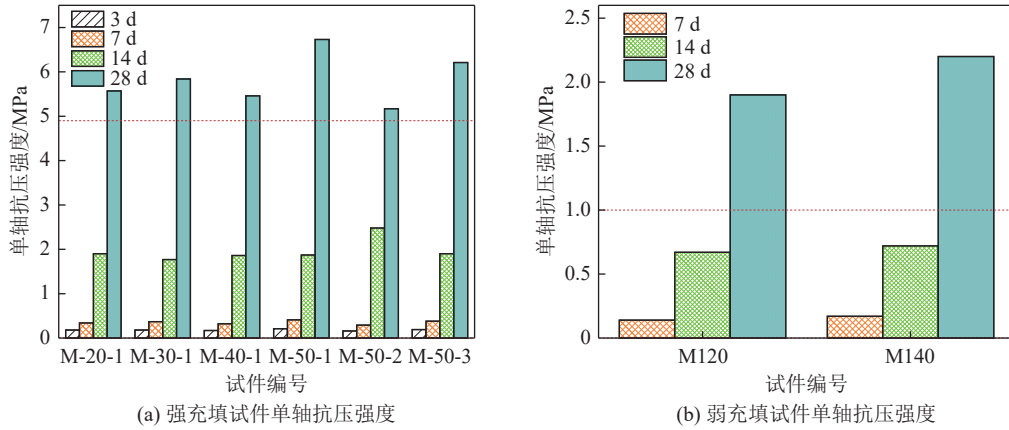


图 11 充填材料单轴抗压强度 Fig.11 Uniaxial compressive strength of backfilling material

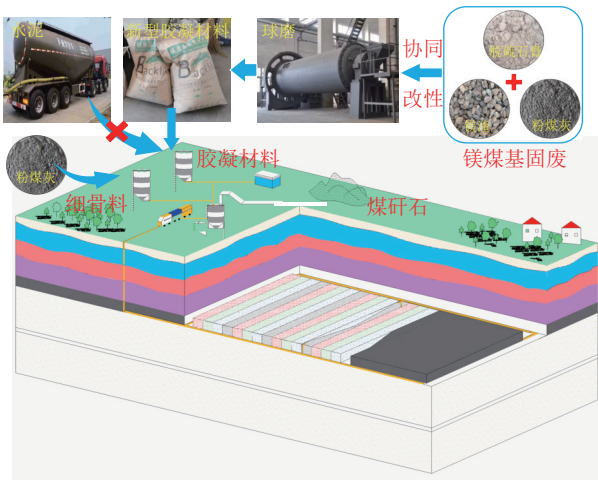


图 12 全固废充填系统 Fig.12 Full solid waste backfilling system

3.3.2 充填接顶方法

充填接顶率直接决定了上覆岩层的稳定性,接顶率越高采区的安全稳定性就越好,同时充填料浆的流动性与下料方法均会对充填体接顶率产生影响。麻黄梁煤矿在进行充填时,由于单个巷道采空区的长度较长,故采用前后 2 个下料口进行充填,同时在巷道的顶端设置前后 2 个排气口(图 13a)。前端下料口先进行充填,同时构筑主运输巷侧充填挡墙,在前端充填体表面距离顶板 1~2 m 时停止下料,由于充填料浆的流动性、重力与黏滞力的剪切作用和泌水性,会在采空区前方形成一个坡面的同时后方形成积水区(图 13b)。此时为了处理后方的未接顶空间,后端下料口开始充填,同样构筑回风巷侧充填挡墙,并当后端下料口处充填体表面距顶板 1~2 m 时停止充填(图 13c)。待两侧充填体具有一定强度后,再次使用前端下料口充填至前端排气口满管出浆,完成主运输巷侧的完全接顶(“小接顶”),如图 13d

所示。此时回收一部分后端充填管至巷道中间位置、后端排气管至巷道中间偏前端位置,后端下料口继续下料形成堆积状,前端区域在后端排气管的作用下完全接顶,然后自后端充填口位置处渐次向回风巷接顶,直至完全接顶(图 13e)。在进行料浆充填时,还应该保证封堵挡板立柱、斜撑油缸的完好,从而避免料浆流失;同时严格控制充填料浆的浓度,保证其流动性与泌水率。

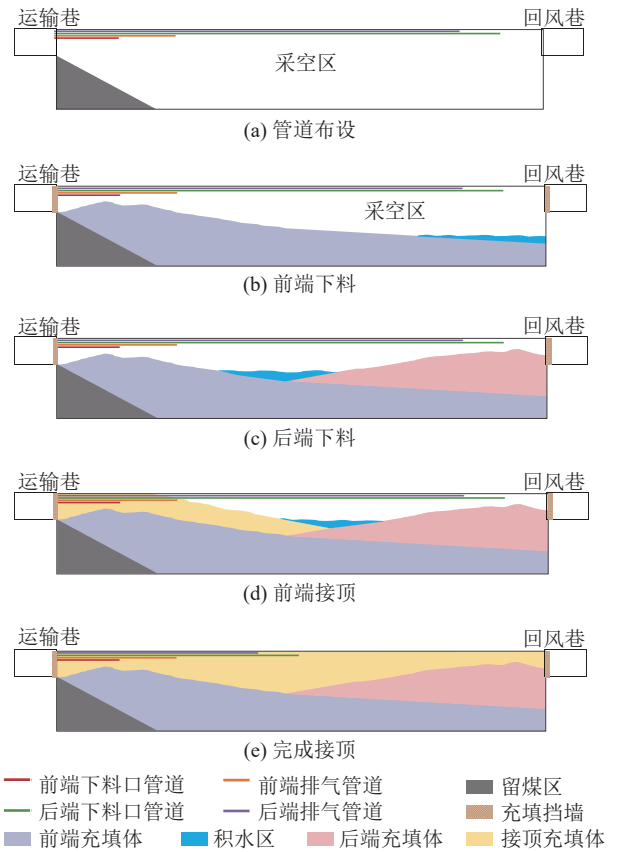


图 13 接顶方法 Fig.13 Method of roof contacting

4 全固废充填效果分析

4.1 全固废充填技术性能

4.1.1 井下充填体强度测试

根据开采方案设计确定,第1轮、第2轮、第3轮采空区膏体充填体28 d最终强度设计不低于4.9 MPa,第4轮充填体28 d最终强度设计不低于1 MPa。为了对镁渣基充填材料的实际充填效果进行检测,对井下充填体分别取心(图14)进行3、7、14、28 d的充填体强度测试(每个龄期取心3个以上,取心直径:95±3 mm,两端磨平高度:90~100 mm)。取心测试结果如图15所示。可以看出取心样品28 d平均强度达到6.23 MPa,取心平均强度远超28 d设计指标强度。取心样品整体结构密实且均匀,强度随龄期大幅增长,且28 d后仍表现出很好的强度发展潜力。



(a) 钻孔取心 (b) 工作面取心

图14 井下取心

Fig.14 Downhole coring pictures

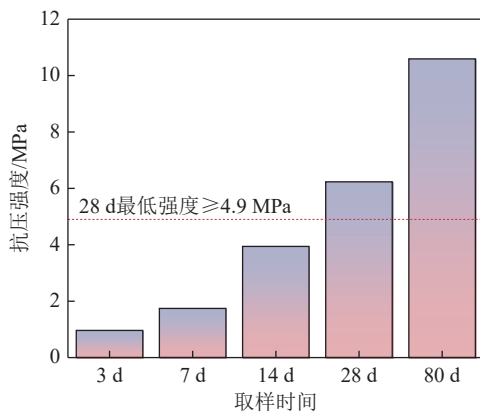


图15 井下取心测试结果

Fig.15 Downhole coring test results

观测井下整体充填条带,未见裂隙和变形;地表无肉眼可见下沉,且办公楼墙体裂缝在整个充填开采过程裂缝宽度未见明显扩展,即地表建筑物无明显损害,改性镁渣基充填材料在麻黄梁煤矿现场应

用效果良好,成功用于井下充填。

4.1.2 全固废充填材料环境性

为测试镁渣基充填材料环境性,委托具备检测资质的陕西中测检测科技股份有限公司和西安国联质量检测技术股份有限公司开展新型镁渣基充填材料环境性浸出测试,测试结果见表4。可以看出,全固废充填材料各样品检测结果均符合GB 8978—1996《污水综合排放标准》第一类污染物最高允许排放浓度限值要求。

表4 充填材料环境性检测结果

Table 4 Environmental testing results of backfilling materials

序号	项目	元素含量		限值含量	单位
		第1组	第2组		
1	总汞	0.14	0.27	50	μg/L
2	总镉	0.01	0.01	0.1	mg/L
3	总铬	0.037	0.028	1.5	mg/L
4	六价铬	0.014	0.010	0.5	mg/L
5	总砷	0.007	0.007	0.5	mg/L
6	总铅	0.2	0.2	1.0	mg/L
7	总镍	0.05	0.05	1.0	mg/L
8	总铍	0.02	0.02	5	μg/L
9	总银	0.03	0.03	0.2	mg/L

4.2 社会经济效益分析

麻黄梁煤矿建筑物压煤区膏体充填开采的成功,能够为国内“三下”压煤的开采提供经验。镁渣基充填材料应用于建筑物下充填开采能够有效防止顶板大面积来压,消除矿震安全隐患,同时有效解放工业广场、麻黄梁镇、万家崖村的压覆煤炭资源,对当地具有重要的环保和社会效益。膏体充填是国家倡导推广应用的开采技术,此举与国家政策相呼应,对煤炭产业结构升级转型,矿山绿色、可持续发展具有重大意义。

矿山在应用充填技术时,大多采用水泥作为充填体的胶凝材料,这部分水泥是充填的主要成本,使用镁渣基充填材料替代水泥,不仅可以联合处置其他固废,且其生产成本较水泥大幅降低。对镁渣而言,每处置1 t将减免25元环保税。煤矿核定生产能力为240万t/a,矸石产量约18万t/a,每吨矸石处理费用按50元计算,将这部分矸石用于充填开采,每年为矿井节约900万元。麻黄梁煤矿建筑物压煤可解放出建筑物压煤资源1000万t,预计将为煤矿企业增加30亿元的毛利。

5 结 论

1) 针对麻黄梁煤矿特厚煤层开采特点, 提出一次采全高四阶段膏体充填开采技术。阐述建筑物下四阶段膏体充填的特厚煤层开采工艺与工作面开采方法。

2) 研究开发镁渣基胶凝材料, 阐述了胶凝材料的碱激发反应机理, 并通过 SEM 图像分析粉煤灰的碱激发解聚过程。

3) 设计不同浓度的镁渣基充填材料配比试验, 综合强度、成本等因素优选配比, 成功开发出适用于麻黄梁矿井的镁渣基充填材料。

4) 论述了麻黄梁煤矿的膏体充填系统与接顶方法。井下取心表明其 28 d 强度达到 6.23 MPa, 符合充填体最低力学性能要求, 且后续仍然具有较好地强度发育潜力。

5) 镁渣基充填材料成功应用于麻黄梁煤矿, 创造了巨大的经济效益的同时联合处理固体废弃物, 具有良好的社会价值。

参考文献(References):

- [1] 张涛, 姜大霖. 碳达峰碳中和目标下煤基能源产业转型发展[J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(10): 44-49.
ZHANG Tao, JIANG Dalin. Transformation and development of coal based energy industry under the goal of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Coal Economic Research, 2021, 41(10): 44-49.
- [2] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960.
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Coal Economic Research, 2019, 44(7): 1949-1960.
- [3] 吴涛, 方向清, 宁树正, 等. 华北型煤田“三下一上”煤炭资源现状及开发利用研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 129-135.
WU Tao, FANG Xiangqing, NING Shuzheng, et al. Study on status quo and development as well as utilization of coal resources “under buildings, water bodies, railways and above confined water” in North China Coalfields[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 129-135.
- [4] 朱梦博, 刘浪, 王双明, 等. 短-长壁工作面充填无煤柱开采方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(6): 1116-1124.
ZHU Mengbo, LIU Lang, WANG Shuangming, et al. Short-and long-walls backfilling pillarless coal mining method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 1116-1124.
- [5] 魏浩杰, 于皓, 彭彝, 等. 我国大宗工业固废综合利用发展状况分析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(11): 56-58.
WEI Haojie, YU Hao, PENG Ben, et al. Analysis on the development of comprehensive utilization of solid waste in mass industries in China[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(11): 56-58.
- [6] 李宇, 刘月明. 我国冶金固废大宗利用技术的研究进展及趋势[J]. 工程科学学报, 2021, 43(12): 1713-1724.
LI Yu, LIU Yueming. Progress and trend of bulk utilization technology of metallurgical solid wastes in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(12): 1713-1724.
- [7] 罗顺, 游玉萍, 林义民, 等. 我国工业固废的产业规模和处理技术现状[J]. 材料研究与应用, 2018, 12(3): 178-182.
LUO Shun, YOU Yuping, LIN Yimin, et al. Industrial scale and processing technology status of industrial solid waste in China[J]. Materials Research and Application, 2018, 12(3): 178-182.
- [8] 席北斗, 刘东明, 李鸣晓, 等. 我国固废资源化的技术及创新发展[J]. 环境保护, 2017, 45(20): 16-19.
XI Beidou, LIU Dongming, LI Mingxiao, et al. Innovative development of solid wastes resource technology[J]. Environmental Protection, 2017, 45(20): 16-19.
- [9] 郭利杰, 刘光生, 马青海, 等. 金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4182-4210.
GUO Lijie, LIU Guangsheng, MA Qinghai, et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4182-4210.
- [10] 刘建功, 李新旺, 何团. 我国煤矿充填开采应用现状与发展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 141-150.
LIU Jianguo, LI Xinwang, HE Tuan. Application status and prospect of backfill mining in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 141-150.
- [11] 宋天奇, 黄艳利, 张吉雄, 等. 底板岩性对煤矸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.
- [12] 王平, 曾梓龙, 孙广京, 等. 深井矸石充填工作面沿空留巷围岩控制原理与技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 68-76.
WANG Ping, ZENG Zilong, SUN Guangjing, et al. Principle and technology of surrounding rock control for gob-side entry retaining in deep mine gangue backfilling face[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 68-76.
- [13] 张云, 刘永孜, 来兴平, 等. 基于导水裂隙扩展-重金属离子迁移的短壁块段式充填保水采煤机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 155-172.
ZHANG Yun, LIU Yongzi, LAI Xingping, et al. Study on mechanism of the short-wall block backfill water-preserved mining based on water-conducting fractures development-heavy metal ions migration[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 155-172.
- [14] 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.
- [15] 刘浪,王双明,朱梦博,等.基于功能性充填的CO₂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.* CO₂ storage-cavern construction and storage method based on functional backfill[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1072–1086.
- [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 backbackfilling mining technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4167–4181.
- [17] 董猛,李江山,陈新,等.煤系固废基绿色充填材料制备及其性能研究[J].*煤田地质与勘探*,2022,50(12):75–84.
DONG Meng, LI Jiangshan, CHEN Xin, *et al.* Preparation of coal-series solid-waste-based green backfilling materials and their performance[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 75–84.
- [18] 陈登红,李超,张治国.宁东矿区气化渣基膏体充填材料性能优化研究[J].*煤田地质与勘探*,2022,50(12):41–50.
CHEN Denghong, LI Chao, ZHANG Zhiguo. Study on performance optimization of gasification slag based paste backfilling materials in Ningdong mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 41–50.
- [19] 黄艳利,王文峰,卞正富.新疆煤基固体废物处置与资源化利用研究[J].*煤炭科学技术*,2021,49(1):319–330.
HUANG Yanli, WANG Wenfeng, BIAN Zhengfu. Prospects of resource utilization and disposal of coal-based solid wastes in Xinjiang[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 319–330.
- [20] 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(S2):925–935.
YANG Ke, WEI Zhen, ZHAO Xinyuan, *et al.* Theory and technology of green backfilling of solid waste in underground mine at coal power base of Yellow River Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 925–935.
- [21] ZHU M, XIE G, LIU L, *et al.* Influence of mechanical grinding on particle characteristics of coal gasification slag[J]. *Materials*, 2022, 15(17): 6033.
- [22] XIAO B, WEN Z, MIAO S, *et al.* Utilization of steel slag for cemented tailings backfill: Hydration, strength, pore structure, and cost analysis[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 15: e00621.
- [23] 吴爱祥,姜关照,王贻明.矿山新型充填胶凝材料概述与发展趋势[J].*金属矿山*,2018(3):1–6.
WU Aixiang, JIANG Guanzhao, WANG Yiming. Review and development trend of new type backfilling cementing materials in mines[J]. *Metal Mine*, 2018(3): 1–6.
- [24] FAN B, JIA L, LI B, *et al.* Study on desulfurization performances of magnesium slag with different hydration modification[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20(3): 1771–1780.
- [25] 刘浪,阮仕山,方治余,等.镁渣的改性及其在矿山充填领域的应用探索[J].*煤炭学报*,2021,46(12):3833–3845.
LIU Lang, RUAN Shishan, FANG Zhiyu, *et al.* Modification of magnesium slag and its application in the field of mine backfilling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12): 3833–3845.
- [26] 丁庆军,李悦,胡曙光,等.镁渣作水泥混合材的研究[J].*水泥工程*,1998(3):3–58.
DING Qingjun, LI Yue, HU Shuguang, *et al.* Study on magnesium slag as cement mixture[J]. *Cement Engineering*, 1998(3): 3–5.
- [27] XIE G, SUO Y, LIU L, *et al.* Mechanical grinding activation of modified magnesium slag and its use as backfilling cementitious material[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e01778.
- [28] PALOMO A, KRIVENKO P, GARCIA-LODEIRO I, *et al.* A review on alkaline activation: new analytical perspectives[J]. *Materiales De Construcción*, 2014, 64(315): e022.
- [29] ZHU Mengbo, XIE Geng, LIU Lang, *et al.* Strengthening mechanism of granulated blast-furnace slag on the uniaxial compressive strength of modified magnesium slag-based cemented backfilling material[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 174: 722–733.