



沟谷山地区粉煤灰基质自流充填减沉技术与工程实践

赵茂平 武竹

引用本文:

赵茂平, 武竹. 沟谷山地区粉煤灰基质自流充填减沉技术与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 309–322.

ZHAO Maoping, WU Zhu. Technology and engineering practice of self-flowing filling and subsidence reduction of fly ash matrix in valley mountain area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 309–322.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0552>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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.cst.2021-0444>

矿井粉煤灰基防灭火技术研究进展

Research progress on fly ash foundation technology to prevent and control spontaneous combustion of coal in mines

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 329–342 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2117>

粉煤灰基膏体充填脱氨方法研究综述

A review of fly ash-based paste filling deamination methods

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 265–274 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0552>

水泥粉煤灰基矸石胶结充填体破坏特征及强度形成机制

Failure characteristics and strength formation mechanism of cement-fly ash based cemented gangue backfill

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 36–45 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0794>

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>

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

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

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 83–92 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0188>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

赵茂平, 武 竹. 沟谷山地区粉煤灰基质自流充填减沉技术与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 309–322.

ZHAO Maoping, WU Zhu. Technology and engineering practice of self-flowing filling and subsidence reduction of fly ash matrix in valley mountain area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 309–322.

沟谷山地区粉煤灰基质自流充填减沉技术与工程实践

赵茂平, 武 竹

(太原煤炭气化(集团)有限责任公司, 山西 太原 030006)

摘 要: 充填开采是一种能有效遏制地面沉降、高效处置工业固废、快速解放“三下”压煤资源的开采技术。本文针对山西神州煤业有限公司 4603(2) 工作面 4604(1) 工作面开采沉陷控制难题, 深入开展了粉煤灰成分测定、充填浆液流动性测试、充填开采工艺工程实践及沉陷观测全流程研究。结果表明: 专用辅料可充分激发粉煤灰的潜在活性, 采用流动度试模进行充填浆液流动性能的快速测试, 确定了自流充填浆液浓度上限为 55%; 研发了充填步距为 2.4 m 的“采煤→充填→采煤→充填”袋式循环的充填工艺, 掌握了不同龄期充填体强度演化特征, 建立了充填体强度与时间长度的关联方程, 固结体试件 60 d 龄期后强度基本稳定于 3.0 MPa, 满足充填体终态强度 2.0 MPa 的充填设计要求; 借助地势充填料浆自流充填后, 工作面倾向最大下沉量为 -156 mm, 走向最大下沉量为 -111 mm, 实现了地表下沉小于 200 mm 的控制目标, 保障了地面大型垃圾处理站、周边压煤村庄密集建、构筑物的安全使用。研究成果可为类似沟谷山地矿区充填开采提供借鉴。

关键词: 充填开采; 粉煤灰浆液; 重力自流; 固废处置; 沉陷控制

中图分类号: TD823.7

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)11-0309-14

Technology and engineering practice of self-flowing filling and subsidence reduction of fly ash matrix in valley mountain area

ZHAO Maoping, WU Zhu

(Taiyuan Coal Gasification (Group) Co., Ltd. Taiyuan 030006, China)

Abstract: Filling mining is a technology that can curb land subsidence, efficiently dispose of industrial solid waste, and quickly liberate the “three underground” coal resources. This article focuses on controlling mining subsidence in the 4603 (2) working face and 4604 (1) working face of Shanxi Shenzhou Coal Industry Co., Ltd. It conducts in-depth research on the determination of fly ash composition, testing of filling slurry fluidity, engineering practice of filling mining technology, and the entire process of subsidence observation. The results indicate that: the specialized auxiliary materials developed based on fly ash can fully stimulate the potential activity of fly ash. A flowability test mold was used to test the flowability of the filling slurry quickly, and the upper limit of the concentration of the self-flowing filling slurry was determined to be 55%. We have developed a bag cycle filling process with a filling step distance of 2.4 m, which includes “mining → filling → mining → filling”. We have mastered the strength evolution characteristics of filling materials at different ages and established a correlation equation between the strength of filling materials and time length. After 60 days of age, the strength of the consolidated specimens is stable at 3.0MPa, meeting the filling design requirements of 2.0 MPa for the final strength of filling materials; After filling with high-concentration slurry from the terrain, the maximum subsidence of the working face is -156 mm and the maximum subsidence of the strike is -111 mm, achieving the control goal of surface subsidence less than 200 mm. This ensures the safe use of large garbage treatment stations on the ground and dense buildings and structures in surrounding coal villages. The research results can provide a reference for filling mining in similar valley mountain mining areas.

Key words: backfill mining; fly ash; gravity flow; solid waste disposal; subsidence control

收稿日期: 2024-04-26

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2024-0552

作者简介: 赵茂平(1969—), 男, 山西高平人, 高级工程师。E-mail: 647191713@qq.com

通讯作者: 武 竹(1986—), 男, 山西高平人, 工程师。E-mail: 953737981@qq.com

0 引言

山西省是我国最为重要千万吨级现代化高产高效煤炭生产基地之一,截至 2015 年底,山西省保有查明的煤炭资源储量在 2 709.01 亿 t,占全国保有探明储量的 17.3%。自 1958 年以来山西省煤炭开采保持高速发展的态势,改革开放后山西省煤炭产业进一步加速现代化发展,煤炭年产量不断增加,为我国经济发展提供重要保障。长期、大量开采使得浅部易采掘煤炭资源日益枯竭,三下压煤资源储量占比日益提升,如何实现三下压煤特别是建构筑物下压煤开采,成为山西省境内诸多煤矿亟待解决的重大难题。山西多数城市作为煤炭能源型城市,在助力地方经济快速发展的同时,煤炭生产及使用过程中不可避免的产生了以粉煤灰为主体的、大量固体废弃物,如何实现上述煤基固废材料的无害化处理和大宗消耗及应用,亦是制约众多能源型城市转型发展及推进国家“绿水青山就是金山银山”“建设生态绿色城市”持续发展战略的阻滞因素之一。因此,立足矿区资源禀赋及开采环境,因地制宜地实现矿区粉煤灰等固废材料与充填开采的综合及协同利用,是实现能源保供与山西各矿区绿色长效持续发展的重要途径。

近年来,以煤矸石、粉煤灰等为主要充填材料的建(构)筑物下充填开采的技术在我国中东部矿区得到迅速发展^[1-2],先后形成了矸石充填、膏体充填、高水材料充填、离层注浆充填等多种高效充填方法^[3-6]。立足大宗型固废材料的绿色处理,提高固体废弃物利用率,国内外诸多学者研制出以氧化铝废渣^[7]、河湖环境治理中的底泥^[8]、废弃轮胎橡胶颗粒^[9]、粉煤灰^[10]、全尾砂-棒磨砂^[11]等废弃物为原材料的、具有优良性质的充填浆液。充填浆液流动特性、充填体强度、充填体合理配比及其对充填体应力应变特征

的影响规律也进行了大量深入的试验研究^[12-15]。部分学者针对采用聚氨酯、环氧树脂等对充填材料的流动性能、强度支撑性能进行了优化及调控,针对不同条件研究了适宜的充填浆液浓度^[16-18]。此外,诸多学者立足现场工程实践^[19],针对充填浆液流动模型^[20-22]、充填压力对浆液流动速度^[23-25]、不同裂隙围岩特征充填浆液扩展特征^[26-28]进行了深入研究^[29-30],据此得到了合理注浆压力及充填浆液有效扩展半径^[31-32]。

基于前人丰硕的研究成果,结合山西矿区地表普遍赋存的沟谷山地形态,在不具备建立大型地面高压注浆泵站、对地面下沉量有严格要求的前提下,提出沟谷山体地区自流充填技术,通过专用辅料对粉煤灰进行靶向激发制成浓度为 55% 的充填浆液,借助于山区地形优势,将充填浆液借助于重力实现自流回填,以实现充填开采地表沉陷控制,有效保护地面建(构)筑物及矿区环境,为我国煤矿绿色开采提供了新途径。

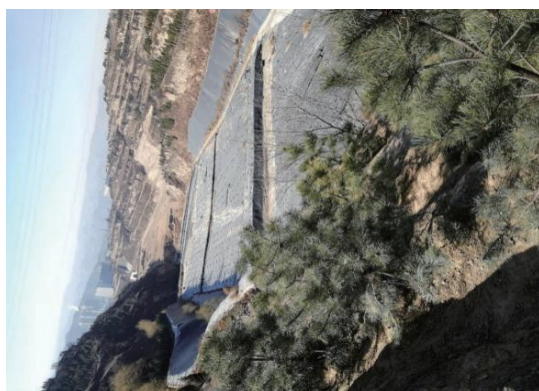
1 工程概况

山西省吕梁市离柳矿区是我国重要的焦煤产地,该地区的热力发电厂每年产生 200 万 t 以上的粉煤灰固废亟待处置。

山西神州煤业有限责任公司位于吕梁市离石区西北,主采 4 号煤六采区,该区域被地面山体、沟谷区域及大型市属垃圾处理厂设施所压覆,主要为 4603(2) 工作面 and 4604(1) 工作面,具体如图 1 所示,充填工作面布置方位如图 1d 所示。4604(1) 工作面位于神州煤业+750 m 水平,工作面标高为+725 ~ +739.7 m,地面标高为+1 002 ~ +1 073 m,走向长 414 m,倾斜长 90 m。开采顺序为先采 4604(1) 工作面,再采 4603(2) 工作面,4603(2) 工作面尚未开采。埋深 260 ~ 320 m,煤厚 1.5 m,倾角 0° ~ 5°,煤层上覆岩层岩性层厚如图 1e 所示。



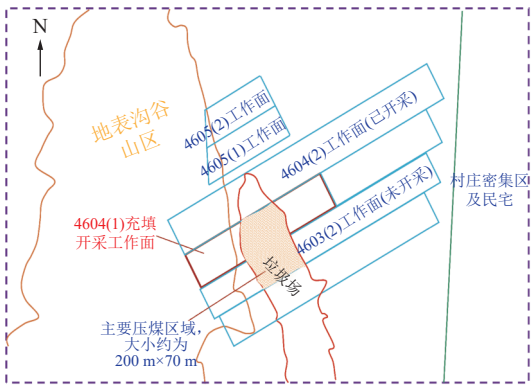
(a) 卫星影像



(b) 地面垃圾场



(c) 地面地形地貌



(d) 工作面与垃圾场相对位置

层号	层厚/m	埋深/m	岩性	柱状	层号	层厚/m	埋深/m	岩性	柱状
1	138	138.00	黄土		33	7.90	281.30	粉砂岩	
2	5.80	143.80	中粒砂岩		34	2.95	284.25	中粒砂岩	
3	2.15	145.95	砂质泥岩		35	1.50	285.75	砂质泥岩	
4	8.05	154.00	中粒砂岩		36	1.75	287.50	细粒砂岩	
5	2.35	156.35	粗粒砂岩		37	2.25	289.75	砂质泥岩	
6	3.85	160.20	砂质泥岩		38	1.85	291.60	细粒砂岩	
7	2.70	162.90	细粒砂岩		39	4.40	296.00	砂质泥岩	
8	0.80	163.70	泥岩		40	1.35	297.35	中粒砂岩	
9	3.05	166.75	细粒砂岩		41	1.40	298.75	泥岩	
10	4.80	171.55	粉砂岩		42	0.95	299.70	细粒砂岩	
11	1.20	172.75	砂质泥岩		43	3.10	302.80	砂质泥岩	
12	2.25	175.00	粉砂岩		44	0.35	303.15	煤	
13	0.65	175.65	中粒砂岩		45	3.80	306.95	砂质泥岩	
14	3.95	179.60	砂质泥岩		46	4.65	311.60	细粒砂岩	
15	4.00	183.60	细粒砂岩		47	0.25	311.85	炭质泥岩	
16	6.75	190.35	砂质泥岩		48	0.85	312.70	粉砂岩	
17	6.85	197.20	细粒砂岩		49	0.40	313.10	煤	
18	10.90	208.10	砂质泥岩		50	1.70	314.80	砂质泥岩	
19	5.10	213.20	中粒砂岩		51	0.30	315.10	煤	
20	2.25	215.45	泥岩		52	1.65	316.75	泥岩	
21	2.85	218.30	粗粒砂岩		53	0.85	317.60	粉砂岩	
22	21.35	239.65	砂质泥岩		54	1.45	319.05	砂质泥岩	
23	4.35	244.00	中粒砂岩		55	1.55	320.60	中粒砂岩	
24	6.95	250.95	砂质泥岩		56	0.80	321.40	粉砂岩	
25	5.70	256.65	细粒砂岩		57	4.60	326.00	细粒砂岩	
26	0.55	257.20	泥岩		58	7.25	333.25	砂质泥岩	
27	1.45	258.65	砂质泥岩		59	0.60	333.85	煤	
28	0.80	259.45	泥岩		60	7.25	341.10	砂质泥岩	
29	5.40	264.85	中粒砂岩		61	0.60	341.70	煤	
30	1.90	266.75	泥岩		62	6.70	348.40	砂质泥岩	
31	4.30	271.05	砂质泥岩		63	1.50	349.90	细粒砂岩	
32	2.35	273.40	细粒砂岩		64	3.30	353.20	砂质泥岩	

(e) 岩层柱状图

图 1 4604(1) 充填工作面布置、地形地貌及岩层柱状图

Fig.1 4604 (1) Layout of the filling face, topography and rock formation

吕梁市生活垃圾处理场位于六采区上方的山谷中,呈南北向狭长条状分布,南北向长度约 820 m,东

西向平均宽度约 70 m,全场占地面积约 16.38 万 m² (不含场外道路),于 2007 年通过竣工验收,2015 年

进行改造升级。垃圾场东部边坡上为办公区域,有彩钢板房、新建办公平房、抽汽机房、污水处理站、废弃污水处理池等设施。

为保障该优质高值焦煤资源的高回采率,同时防止地面大型市属垃圾场地基处深 50 ~ 100 cm 铺设的型号 GH-2S 高密度聚乙烯(HDPE)防渗膜破裂和拉断,结合实际工况^[33],研究认为若采用条带开采,预计可回收约 30%,回采率较低,故考虑采用充填开采。而采用煤矸石为主料的固体充填、膏体充填等充填方法不能很好地接顶,控制地面沉降的效果有限,最终决定采用具有主动接顶性能的粉煤灰胶凝材料进行充填开采,以实现压煤高效回收、粉煤灰的绿色处理与开采沉陷的同步控制。沟谷山区地势复杂,交通不便,不具备建立地面充填泵站的地理条件。作者因地制宜提出重力作用下自流回填充填工艺,

在充填全过程中无需使用大型加压泵站,大大简化了充填站的建设条件,充填减沉原理如图 2 所示。此外在山地沟谷地形区域井下充填的胶凝材料应满足以下特点:①充填料浆应具备较好的流动性,以改善管路自流输送的性能,从而保证充填料浆在自流输送过程中不发生堵管现象;②粉煤灰基质充填材料保水性能好,在输送至工作面形成充填体后,充填体的泌水率不能超过 3%,以保证较高的充填率;③粉煤灰基质充填料浆形成充填体后,必须具有较高的后期强度和较低的压缩率,以发挥承载结构的作用,才能够充分发挥充填减少地表开采沉陷的效果。因此,深入研究粉煤灰微细观结构、组分及其宏观胶凝材料力学特征,建立应用于山地沟谷地形区的胶凝材料充填工艺技术,评价充填开采地面沉陷控制效果,对神州煤业解放优质压煤资源具有重要意义。

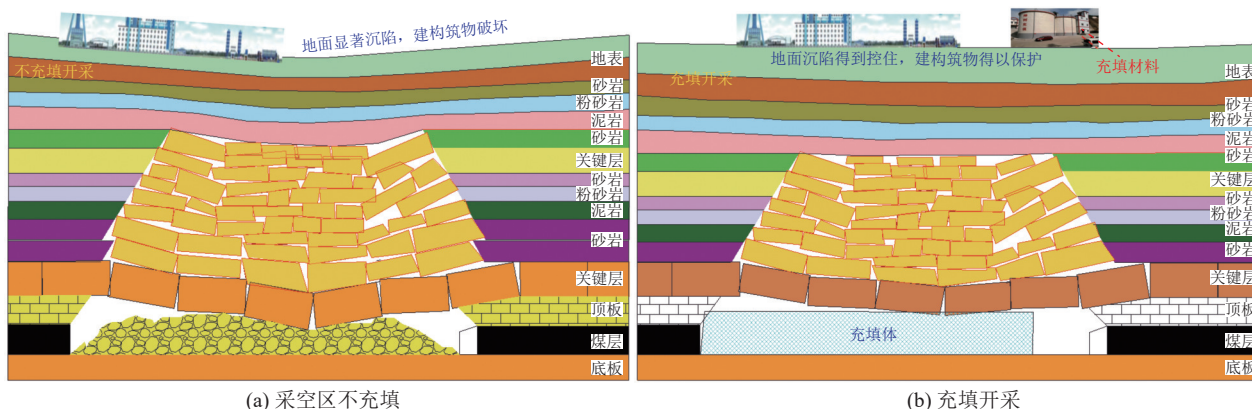


图 2 充填减沉原理示意

Fig.2 Schematic diagram of the principle of filling and subsidence reduction

2 充填材料性能及指标测定

2.1 粉煤灰物性结构

粉煤灰是一种具有良好火山灰活性的黏土矿物高温煅烧产物,主要成分为二氧化硅、三氧化二铝和氧化铁。因其具备较好的悬浮特性,能有效增强充填料浆的流动性,抑制粗骨料在管道中离析沉淀,可作为充填材料使用。

为了该地区所产生的粉煤灰能够得到资源化利用,对自于方山电厂和中钢中钨电厂试样粉煤灰成分、密度及其微观结构进行测定。利用 X 射线衍射仪(XRD)对粉煤灰的成分试验分析,粉煤灰的扫描电镜(SEM)分析照片结果如图 3 所示。

由图 3 可知,2 处试样粉煤灰均由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 和 MgO 等组成,其中,主要组分 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 平均含量分别为 30.15%、18.2% 和 7.07%,但是各成分所占的比例差别较大。图 2 中

SEM 测定结果表明 2 处粉煤灰微观结构差异较大,中钨粉煤灰比较粗糙,玻璃球珠较少,方山粉煤灰细度较好,有大量的玻璃球珠。在煤矿充填中,氧化钙含量大、粒径较细,玻璃球珠较多的粉煤灰的活性一般较高。因此,上述中优先选用方山粉煤灰作为充填材料,其对于充填体强度随龄期的持续增长及终态强度稳定是有利的。

2.2 充填辅料耦合激发特征

材料的火山灰活性是指能在常温下与水、氧化钙混合反应生成具有水硬性胶凝能力的水化物的特性。粉煤灰具备火山灰活性,在碱性环境下能胶凝硬化,生成具有一定强度的水硬性产物。研究发现,不同碱性材料对火山灰活性物质的活性激发程度有很大不同。传统中使用的 NaOH 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等单一激发剂掺量大、激发效果一般,而 NaOH 和钠水玻璃为主要组成成分的复合激发剂对粉煤灰的活性激发效

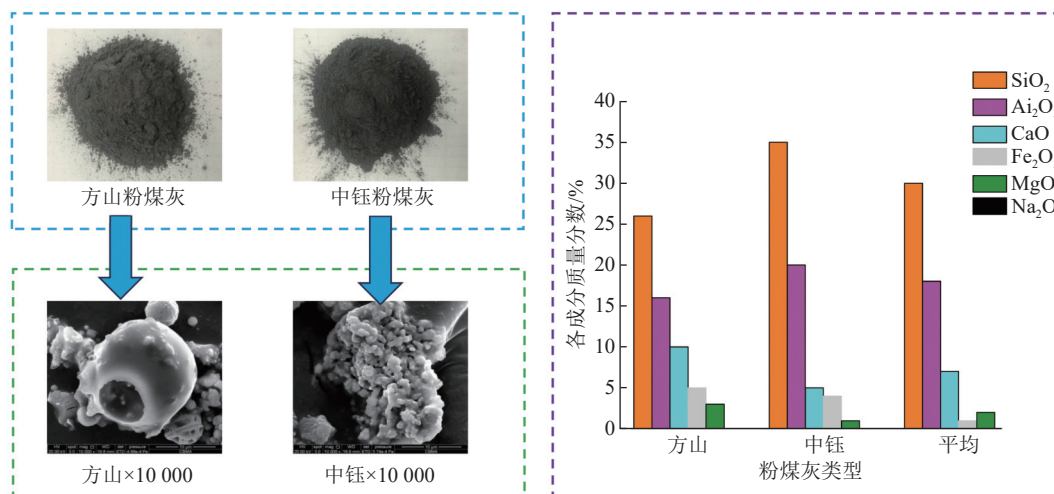


图3 粉煤灰试样、XRD 成分分析与 SEM 结构特征结果

Fig.3 Fly ash samples, XRD composition analysis and SEM structural characteristics

果更为显著。为此,研制了充填料浆专用辅料,主要成分为 NaOH、钠水玻璃、外加剂等,用以充分激发粉煤灰火山灰活性,增强充填体的力学承载性能,专用辅料如图 4 所示。粉煤灰中的活性二氧化硅、氧

化铝与水、辅料中的氢氧化钠、外加剂等充分反应,形成主要成分为钙矾石、水化硅酸盐的具有水硬性的胶凝水化物,此过程即为粉煤灰的碱激发胶凝过程。

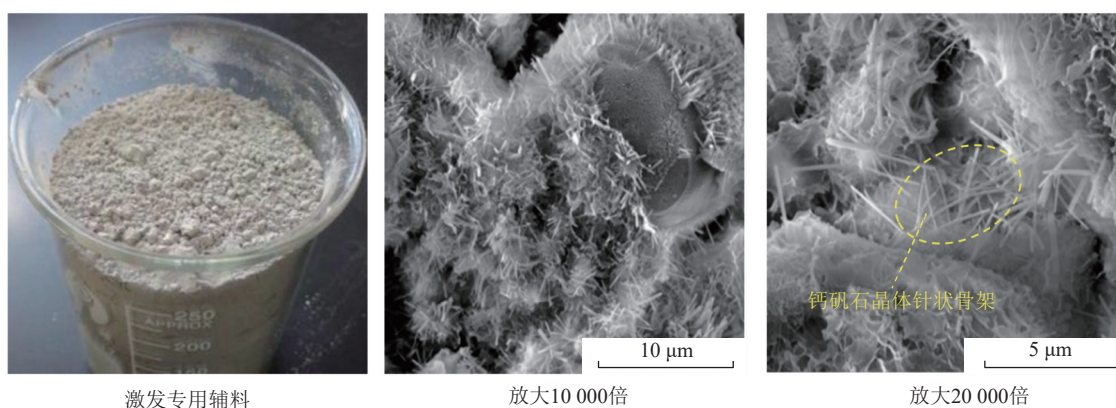


图4 充填辅料及胶凝材料不同放大倍率 SEM 结构特征

Fig.4 SEM structural characteristics of filling accessories and cementing materials with different magnification

图 4 中胶凝材料 SEM 测试结果表明,随各原材料充分混合发生水化反应,其中,钙矾石晶体不断生长形成针状、柱状结构,各种小结构之间犬牙交互,形成复杂而致密的网络骨架。而在骨架的空隙结构中又吸附了大量的自由水,进一步形成纤维状的 C-S-H 凝胶、铝胶、C-A-S-H 凝胶,使前述网状结构更为致密,强度再次增加。

2.3 浆液流动特性及浓度确定

由于地面沟谷地形区域所限制,难以完全布置占地面积较大的充填泵站,充填工作面拟借助于山体地形实现充填浆液的自流输送。探究不同浓度下充填浆液的流变特性及自流特性,是确定自流充填浆液浓度的关键。室内实验测得不同充填浆液浓度

下动力粘度和剪切应力的变化规律,如图 5a 所示。

由图 5a 可知,在相同剪切速率条件下,随着浓度的提高,充填浆液动力黏度和剪切应力也不断提高。充填浆液浓度为 49%~55% 时,动力粘度及流动剪切应力相对较低,动力黏度均小于 264 mPa·s,流动剪切应力小于 7.3 Pa;充填浆液浓度为大于 55% 时,充填浆液动力黏度及剪切应力陡然增加,动力黏度由 264 mPa·s 增加至 848 mPa·s,增幅比例高达 221%;流动剪切应力由 7.30Pa 增加至 24.06 Pa,增幅比例高达 230%。由此可知,充填浆液浓度超过 55% 流动性性能将会出现显著衰减。同时根据其它矿山似膏体自流充填的相关研究数据,实现自流输送的充填料浆其动力黏度一般不超过 1 500 mPa·s,初始

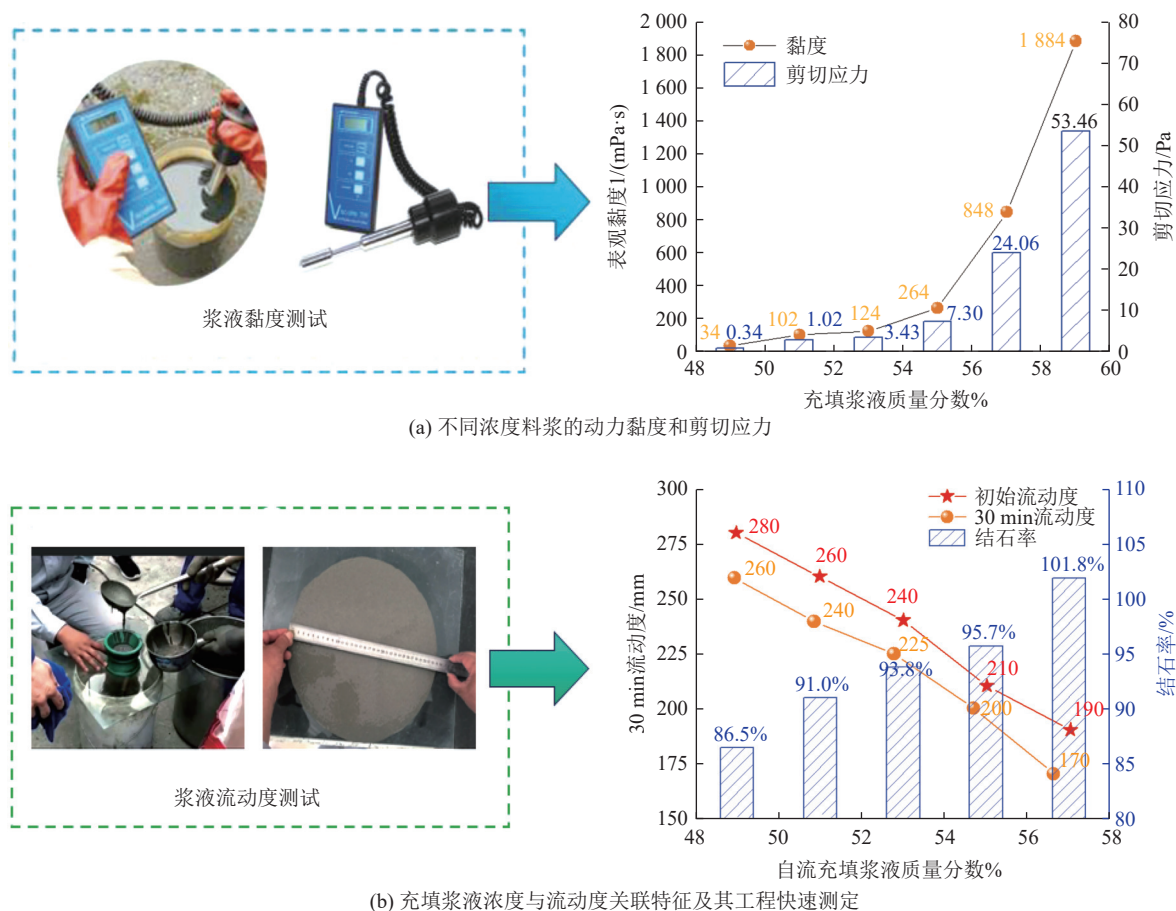


图5 不同浓度料浆的黏度和流动度测试结果

Fig.5 Viscosity and fluidity test results of different concentrations of slurry

剪切应力为 11 Pa, 结合上述实验结果, 为确保浆液具有良好的流动性, 将充填料浆的浓度上限确定为 55%。

基于上述研究, 采用流动度试模进行充填浆液流动性能的快速测试, 获得流动度与浓度的关联特征, 如图 5b 所示, 实现自流充填工程的快速调整。对照上述充填浆液流变特性与浓度的关系, 确定自流充填浆液浓度上限为 55%。自流充填工程实践中, 快速测试浆液流动度模具及测量方法, 如图 5b 所示。

在神州煤业井下充填开采工作面进行了充填料浆实际流动性测试, 充填浆液充填管道内径为 148 mm, 配比所得料浆在质量分数为 55%, 输送管道高差 270 m、管道内径为 148 mm 条件下, 料浆自流距离达到 1 800 m, 倍线达到 6.66, 经过实际测量充填浆液沿程阻力损失为 0.5 kPa/m。由充填倍线定义可知, 充填倍线为包括弯管、接头在内的换算长度总长度与管道起点和终点的高差之比, 计算可得充填倍线为 5.93, 经过实际测量充填浆液沿程阻力损失为 0.5 kPa/m。在参照 GB/T 50448—2015《水泥基灌浆材料应用技术规范》的基础上, 结合材料的流变特

性和神州煤业的管路充填倍线, 决定设计料浆的初始流动度不小于 190、30 min 流动度不小于 170 mm。

2.4 充填材料强度理论分析

由于沟谷山地地形条件复杂多变, 在煤炭开采过程中相当于煤层上部施加了不均匀的载荷, 这对支护工作和煤炭安全开采提出新的要求。为严格控制地面沉降、防止开采过程中出现冲击地压灾害, 相比于一般充填体, 要求本次研究中的充填体快速具备早期强度、同时具有更高的长期强度。

1) 充填体早期强度。煤矿充填体早期强度一般通过 8 h 单轴抗压强度表征。充填体早期强度的基本作用有两方面。①保证新凝固充填体在自重应力作用下保持稳定而不破坏, ②承担直接顶板下位可能不稳定部分岩石的重量。依据托马斯(Thomas)公式, 充填体早期强度 σ_c 可用下式计算:

$$\sigma_c \geq \gamma_f h_f / (1 + h_f / L_f) \quad (1)$$

式中, γ_f 为充填体容重, 取 0.021 MN/m³; h_f 为充填高度, 取 1.7 m; L_f 为充填步距, 取 2.4 m。

计算得到神州煤业 4604(1) 充填工作面充填其充填体早期强度不应小于 0.06 MPa。

2) 充填体长期强度。长期强度一般用 28 d 单轴抗压强度表征。充填体在围岩形成的相对密闭空间内处于三轴受力状态, 对围岩起被动支护作用。充填体长期强度要求与覆岩控制要求有关, 根据地面建筑物保护等级, 将地表水平变形控制在 1 mm/m 以内, 即: $\varepsilon_{\max} \leq 1 \text{ mm/m}$ 。

而根据地表移动理论, 有如下公式:

$$\varepsilon_{\max} = \pm 1.52bw_{\max}r^{-1} \quad (2)$$

$$w_{\max} = \Delta h \eta \cos \alpha = \left((1-\lambda) + \frac{\lambda \sigma_p}{E} \right) h \eta \cos \alpha \quad (3)$$

$$r = \frac{H}{\tan \beta} \quad (4)$$

$$\sigma_p = \sigma_c \sqrt{\frac{D}{0.9}} \left(0.64 + 0.36 \frac{a}{h} \right)^n \quad (5)$$

式中, ε_{\max} 为最大水平变形量; b 为移动系数; w_{\max} 为最大下沉量; r 为主要影响半径; Δh 为高度差; η 为垮落开采时下沉系数; α 为煤层倾角; λ 为充填率; σ 为密度; p 为应力; h 为采高; H 为煤层埋深; $\tan \beta$ 为影响角; σ_p 为充填体强度; σ_c 为实验室试样的平均单轴抗压强度; E 为充填体弹性模量; a 为工作面宽度; D 为实验室制取的立方体试样边长; n 为尺寸系数。

由以上公式可得:

$$\sigma_c = \frac{\left[\frac{H\varepsilon_{\max}}{1.52\eta h \cos \alpha \tan \beta} - (1-\lambda) \right] E}{\lambda \sqrt{\frac{D}{0.9}} \left(0.64 + 0.36 \frac{a}{h} \right)^n} \quad (6)$$

将 $H=290 \text{ m}$, $b=0.2$, $\lambda=90\%$, $\eta=0.80$, $\alpha=5^\circ$, $\varepsilon_{\max}=1 \text{ mm/m}$, $h=1.7 \text{ m}$, $a=90 \text{ m}$, $D=70.7 \text{ mm}$, $E=0.5 \text{ GPa}$, $n=1.4$, 代入式 (6) 可得: $\sigma_c=0.93 \text{ MPa}$, 取 1.0 MPa 。即充填体实验室试块达到 1.0 MPa 时, 能满足地表控制要求 ($\varepsilon_{\max} \leq 1 \text{ mm/m}$)。由于充填体长期强度与凝固时间相关, 强度越大, 则凝固时间越短, 反之亦然。为保证充填体凝固时间尽量短 (对应的脱模时间为 8 h)、提高效率, 同时考虑沿空留巷对充填体强度的要求, 将长期强度指标确定为不低于 2 MPa 。

2.5 充填材料配比及初凝时间

综上所述, 为使充填料浆及充填体能够满足充填工艺和力学性能要求, 结合大量的实验室配合比试验, 得出充填料浆的基本配比为: 固料质量浓度在 52% ~ 60%, 固料中: 粉煤灰约占 84%, 辅料约占 16%。参照神州煤业附近粉煤灰特点, 根据井下充填工业试验, 提出如表 1 所示配比 (在实际应用中根据粉煤灰特点和具体工艺要求进行调整)。

基于上述充填材料配比及浓度, 在实验室制作

了 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 的水泥砂浆试模养护试件。依据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》相关规定, 试件成形后在温度为 20°C , 相对湿度 50% 的室内静置 2 d, 当试件拆模后在温度为 20°C , 相对湿度 95% 的标准养护室养护。每个龄期养护的试块为 6 块, 养护成型试块如图 6a 所示。

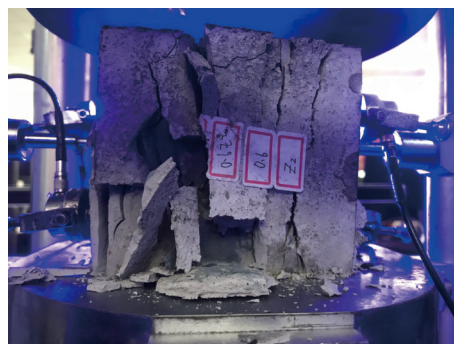
表 1 充填料浆配比

Table 1 Filling slurry proportioning

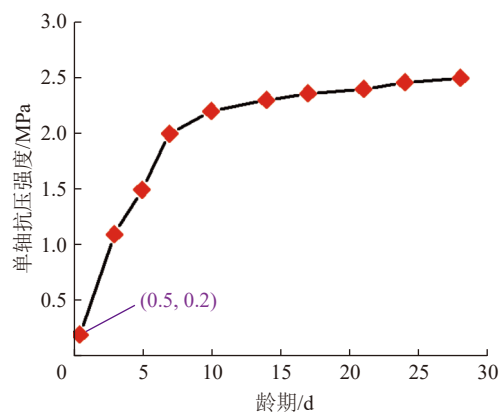
原材料	粉煤灰	辅料	水
理论含量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	670	130	700
生产含量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	650 ~ 700	120 ~ 140	680 ~ 720



(a) 实验室养护试块



(b) 试块单轴抗压强度测试



(c) 充填体单轴抗压强度随龄期变化曲线

图 6 充填浆体试件及其实验室单轴抗压试验

Fig.6 Filled slurry specimen and its laboratory uniaxial compression test

采用 DYE-300 型全自动恒应力压力试验机分别进行不同龄期的单轴抗压强度测试,如图 6b 所示,从实验室养护试块的强度实验结果可以看出,充填体强度在一个月的龄期内增长比较明显,且后期强度保持稳定,0.5 d 强度达到 0.2 MPa,28 d 强度为 2.5 MPa,因此充填材料的成型时间及后期固结体强度均能够满足矿井下充填要求。

3 充填方案设计

3.1 架后柔模充填袋设计

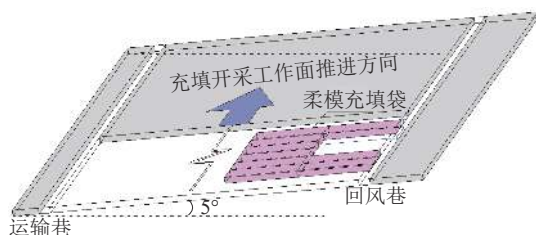
根据自流浆液充填开采要求,在工作面后方布置充填袋,搭接充填管路完成充填袋灌浆充填。充填袋是在支架后方限定浆液流动范围及达到密闭作用的重要辅助品,考虑到粉煤灰基质充填料浆中固料和水分均为有效成分,不应过多漏失,且粉煤灰等固料颗粒细,因此,选择孔隙率较低的涂覆布,作为工作面支架后方自流浆液的充填袋,如图 7 所示。



(a) 柔模充填袋缝合



(b) 地面柔模充填袋布置试验



(c) 柔模充填袋井下布置示意

图 7 柔模充填袋成组缝合与井上下布置示意

Fig.7 Schematic diagram of flexible mold filling bags grouped stitching and well up and down arrangement

柔模充填袋为长方体形状,由六面涂覆布、吊环、充填袖口等几部分组成,且充填袋顶面与液压支架尾梁之间有一定富余量,以便充填时鼓起。充填袋长、宽、高方向尺寸分别为 30.0 m、2.4 m、2.0 m,各方向富余量分别为 2.0 m、0.3 m、0.8 m,以适应局部区域采高的变化。充填袋通过缝制在其侧壁顶部的吊环进行吊挂,吊环间距为 1.5 m。充填袋侧壁中部也设置吊环,充填前将其固定,以防止浆液灌入引发充填袋下坠。充填袖口长 0.5 m,直径 0.12 m,位于充填袋端头的顶部,充填前将充填管伸入该袖口,并用铁丝扎牢。

3.2 浓浆充填工艺流程

4604(1) 工作面采用“采煤-充填-采煤-充填”交替的方式进行开采和充填。具体方法为工作面每割 4 刀煤充填一次,即充填步距为 $4 \times 0.6 = 2.4$ m。工作面推进 2.4 m 后在液压支架后方进行柔模充填带的挂袋作业,此时支架起到限位和支护作用,随后进行充填料浆自流充填作业,待充填体固结具备自稳能力后进行下一次采煤作业。如此循环往复直至工作面回采结束,如图 8 所示。为确保充填料浆在充填过程中具有良好的流动性,每次充填作业在 8 h 内完成。由液压支架尾梁产生的欠充填空间仅占充填体体积的一小部分,对充填体力学承载性能没有显著影响。充填体固结硬化过程中体积膨胀,实现主动接顶,完全硬化后充填体对覆岩沉降起控制作用。

3.3 充填体与支架力学互馈特征

浆液充填过程中,长方体充填袋 6 面均存在侧限支撑,充填袋上下两面为工作面顶底板岩层,左右两侧端面为钢板及柱挡墙,前后两面为工作面液压支架和上一次充填固结体。由于上述挡板结构之间存在一点宽度的缝隙,并未完全实现对充填包进行全表面无缝阻挡,在自流浆液侧向压力作用下,前部挡面相邻液压支架之间的空隙,约为 100 mm,是充填袋承受膨胀压力区,亦是充填浆液最容易突破充填带诱发泄露的位置。

充填浆液与支架相互作用如图 9 所示,充填浆体对充填袋压强随深度而增加,计算方法如式 (7) 所示:

$$P = \rho g H' \quad (7)$$

式中, P 为充填浆体对挡墙或充填袋的压强, MPa; ρ 为浆液密度, 1460 kg/m^3 ; H' 为充填袋内浆液高度, m。

工作面倾向方向倾角为 5° , 充填袋最高点距底部垂高达到 4.3 m, 计算结果表明充填袋底部承受的

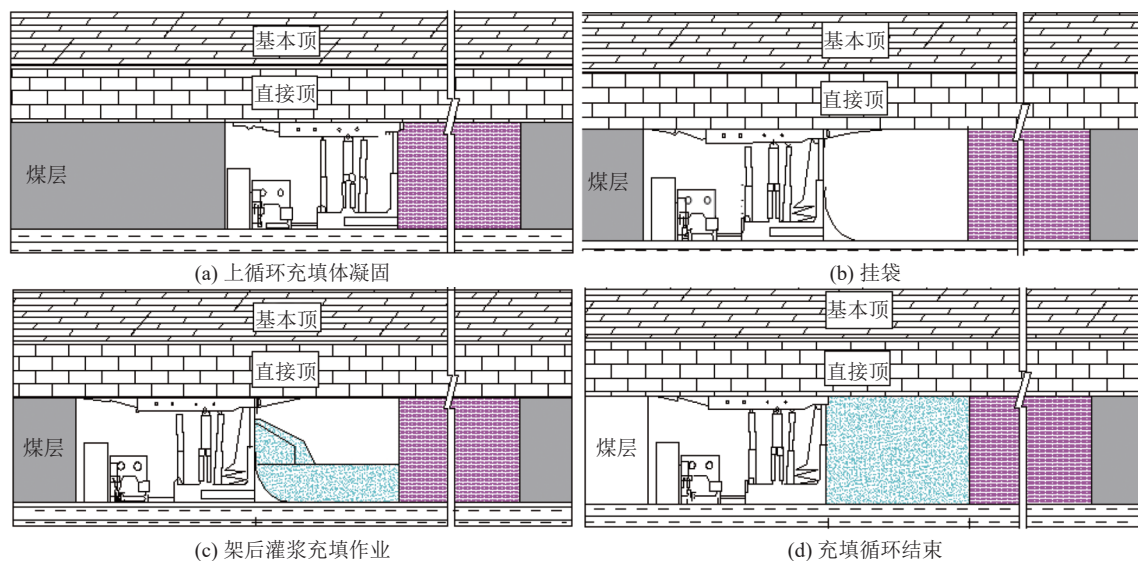


图 8 4604(1) 工作面充填开采循环示意图

Fig.8 Schematic diagram of filling mining cycle in No.4604(1) working face

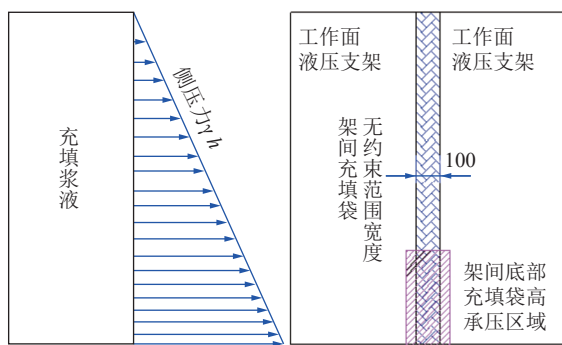


图 9 充填浆液侧压力及支架之间充填袋示意

Fig.9 Schematic diagram of filling bag between filling slurry side pressure and support

最大压强 $P_{\max} = 0.06 \text{ MPa}$, 板体之间最大间隙按 $L = 0.1 \text{ m}$ 考虑, 取宽 $B = 0.05 \text{ m}$ 窄条单元, 面积为 $S = LB = 0.005 \text{ m}^2$, 则作用在窄条上的作用力 $F = P_{\max} S = 300 \text{ N}$, 可得充填袋底部线拉伸负荷 $R_m = 60 \text{ N/cm}$, 小于充填布许用拉伸负荷 $R_m \geq 160 \text{ N/cm}$ 。由此可知, 0.1 m 的“条带”是柔充填袋的高承压区域, 但是充填袋不会被撕裂; 此外, 在井下实际操作时, 在架间空隙放置了废旧皮带, 减少充填袋局部受力, 最大限度确保充填袋结构的完整性。

4 重力自流充填工程实践

4.1 充填开采控制目标

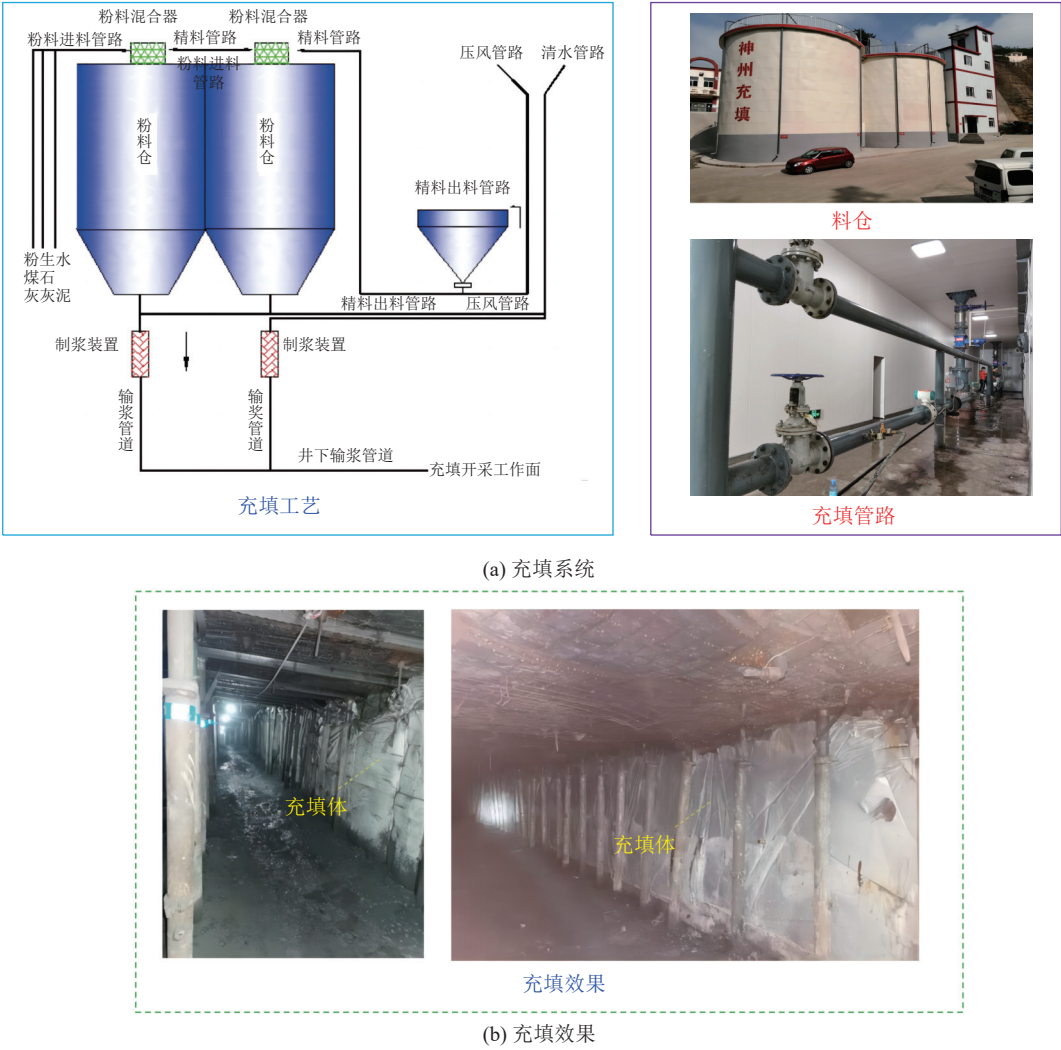
4603(2) 工作面和 4604(1) 工作面作为重力自流充填开采工作面, 通过充填开采实现地面市级大型垃圾处理站及临近村庄地面建筑物的有效保护。地面垃圾场受 4603(2) 工作面和 4604(1) 工作面开采影

响范围在垂直方向上的投影约为 $200 \text{ m} \times 70 \text{ m}$ 的矩形区域, 垃圾场地基中铺设的防水土工膜纵向横向屈服伸长率均为 14% , 纵向断裂伸长率为 767% , 横向为 757% 。充填开采工作面地面村庄累计约 400 户, 人口约 2000 人。村内以砖混、砖木结构平房、楼房为主, 综合考虑安全系数、地面建(构)筑物的变形沉降等因素, 研究认为应控制采动变形在 I 级内 ($\epsilon_{\max} \leq 1 \text{ mm/m}$), $l \times \epsilon_{\max} = 200 \text{ m} \times 1 \text{ mm/m} \leq 200 \text{ mm}$, 即下沉量小于 200 mm 。

4.2 井下原位充填体强度演化特征

探究工作面后方充填体不同龄期的强度演化规律, 对及时调整优化充填方案, 揭示充填体承载能力及其对覆岩支撑效应的动态演变规律, 科学评价充填开采地表沉陷控制效果具有重要意义。充填工艺原理及充填结果如图 10 所示。对充填体进行原位取样力学测试分析, 取样位置如图 11a 所示, 采用风煤钻在 4604(1) 工作面轨道巷中等距离间隔 10 m 对充填体进行了取样, 取样结果如图 11b 所示。滞后工作面距离较大的取样点, 充填体试件龄期较长; 而滞后工作面距离较小, 充填体试件龄期较短。不同龄期充填体试件破坏特征及其强度测试结果, 如图 11c 和图 11d 所示。

图 11 中充填体试件强度测试结果表明: ①该组配比下充填浆液固结体试件呈现出竖向劈裂型破坏, 这是由于充填浆液中不同粒径充填材料之间黏结力较弱而发生错动所致; ②不同批次充填浆液形成的固结体试件单轴抗压强度大多在 $2.98 \sim 4.68 \text{ MPa}$, 60 d 龄期后试件强度基本稳定于 3.0 MPa 左右, 超过



(a) 充填系统

(b) 充填效果

图 10 充填工艺原理及充填效果示意

Fig.10 Schematic diagram of filling process principle and filling effect

充填方案中充填体终态强度为 2 MPa 的设计要求, 能够达到支撑上覆岩层的目标; ③该组配比且充填料浆浓度为 55% 条件下, 充填体试件强度随龄期延长呈现出先增加后降低的趋势, 该组配比下强度随龄期时变方程可拟合表述, 如式 (8) 所示, 拟合均方差为 $R^2=0.849$, 表明该时变方程精度较高, 可为预计后续龄期充填体强度及其长期稳定性评价提供参考。

$$\sigma_c = -5.887e^{-6}x^4 + 8.402e^{-4}x^3 - 0.041x^2 + 0.73621x + 0.041 \quad (8)$$

充填浆液固体强度是影响充填开采沉陷效果的关键因素, 而充填浆液由液态逐步泌水固结成为充填支撑体的泌水规律及其工作面充填率也不可忽略。实验室实验测得充填浆液泌水率不超过 3%, 且充填材料泌水固结过程中的膨胀率约为 3%~10%, 充填体压缩率约为 1%~2%。因此, 在充填开采工程实践中, 借助于煤层倾角和充填料浆的良好流动性,

在重力作用下充填料浆从沟谷山区地面充填站自流至充填工作面。自下而上地向各个充填袋进行灌浆, 且充填浆液自充填注浆口流出方停止本充填待注浆。如此, 确保了充填开采工作面较高的充填率, 实践结果表明, 自流充填浆液充填率达 95% 以上, 该充填浆液配比、浓度、流动性、泌水率以及膨胀率的综合控制满足充填开采要求。

4.3 充填开采地表沉陷观测

在井下充填工作面相对应的地面区域同步开展采动沉陷观测, 地面共布置两条沉陷观测线, 分别为 1 号测线和 2 号测线, 测线相对于工作面的位置如图 12a 所示。其中, 1 号测线沿 4604(1) 面走向主断面布置, 为走向全盆地观测线, 2 号测线沿 4604(1) 与 4603(2) 面中部倾向主断面布置, 为倾向半盆地观测线。进行首次测量时尚未进行煤炭开采作业, 因此以第一次测量结果作为沉降观测基准, 往后随着煤炭开采作业的进行, 每隔一段时间对两条测线的

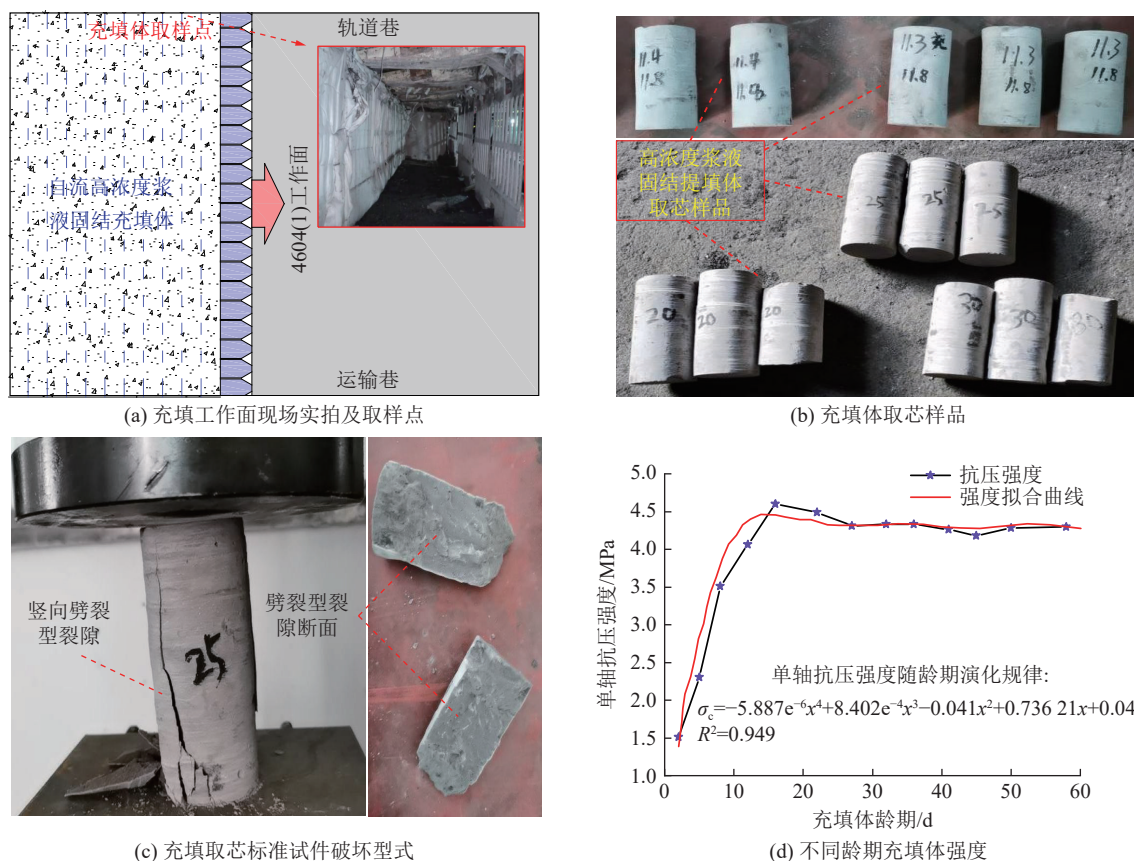


图 11 井下充填体试件破坏型式及其强度随龄期演变规律

Fig.11 Failure mode and strength evolution rule of the underground filling specimen with age

高程进行测量,测量值与首次测得的测线高程之差即为地表运移量,正值表示地表抬升,负值表示地表沉降。在对沿走向布置的1号测线的观测中,当工作面开始推进后进行的三次观测中沉降均不明显,最大沉降值仅为1.21 cm左右,几乎没有沉降发生,推测第二、三、四次观测时工作面尚未达到初次破断距;在第五次测量中,沉降量最大值突增至8.53 cm,在随后的第6、7、8、9次测量中地表下沉量稳定而缓慢的增加,最大下沉量为第九次观测中的11.10 cm,如图12b所示;对沿倾向布置的2号测线的观测中,地表下沉量的变化大致可分为三个阶段:第1个阶段为微沉降阶段,此阶段的地表沉降很小,第2、3、4次观测中发现地表最大沉降仅为1.91 cm;第2个阶段为沉降稳定增长阶段,第5、6、7次观测中沉降相较于前几次观测均有明显增加,其中第7次观测中最大下沉量达到了4.89 cm;第3个阶段为沉降激增阶段,该阶段中地表显著沉降,沉降位置集中在布置于4604(1)工作面地表上方的20~35号测点之间,第8、9次观测表明,该区域最大沉降为15.60 cm,如图12c所示。综合分析两条测线的沉降变化,得到以下规律:

1)1号测线方向上的地表沉降初次响应受煤炭回采的影响更大。在第5次观测时1号测线出现了较明显的沉降,而2号测线直至第8次测量时才观测到相同量级的地表沉降;

2)1号、2号测线上观测得到的最大下沉量在时空上高度重合。尽管1号测线首先观测到显著沉降,但是二者的最大下沉量几乎在同一时间、同一位置观测得到,该位置位于4604(1)工作面地表上方,两条测线交点附近。

4.4 浆液泌水成分测定及经济效益评价

粉煤灰作为自流充填浆液的主料,根据GB 30760—2014《水泥窑协同处置固体废物技术规范》,对井下浆体泌水固结过程重金属浸出规律也进行了同步检测与分析,以进一步掌握充填浆液对矿井水及其地下水系环境的影响规律,结果见表2。

结果表明,充填料浆中重金属元素如铬、镍、铅等相对固结体浸出液含量较高,这意味着充填浆液泌水固结过程中,可有效固化粉煤灰中的重金属元素,充填料浆的可浸出重金属及固结体重金属元素含量监测达标。因此,该充填浆液自流充填开采不会造成地下水源污染。同时,经折算充填开采吨煤

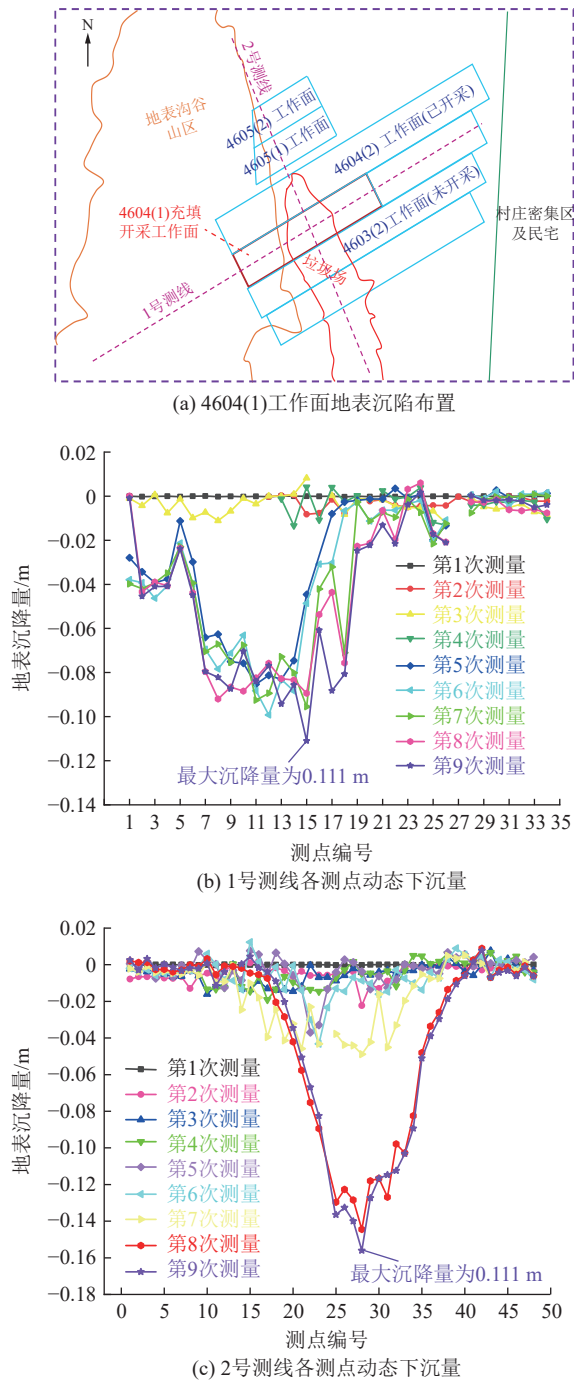


图 12 4604(1) 充填开采工作面地表沉陷测点布置及其下沉量

Fig.12 Measurement points for surface subsidence and their values for the No.4604 (1) filling mining face layout

表 2 自流充填浆液重金属浸出测定结果

Table 2 Test results of heavy metal leaching of fly ash slurry

检测内容	原浆可浸出重金属含量/(mg · g ⁻¹)	固结体浸水重金属含量/(mg · g ⁻¹)	备注
铬	112.37	0.002	合格
镉	未检出	未检出	合格
镍	31.89	0.002	合格
铅	103.89	0.006	合格

增加成本约为 128.70 元, 4 号煤原有开采成本约 450 元/t, 故吨煤成本约 578.7 元。当前该矿 4 号煤的市场综合价格为 900 元/t, 煤利润约 321.3 元/t, 压煤区域充填开采每年新增产值约 1.8 亿元, 新增利润约 5 220 万元, 研究成果可为相似矿井提供参考借鉴。

5 结 论

1) 研发了沟谷山地区自流充填浆液制备及流动性指标工程快速测定方法。以粉煤灰为主料, 以碱激发剂、固化剂、速凝剂等为辅料, 通过碱激发制备形成自流充填浆液, 揭示了动力黏度和剪切应力与充填浆液浓度的关联特征, 确定了该条件下充填浆液合理浓度为 55%, 给出了初始流动度不小于 190 mm, 30 min 后流动度不小于 170 mm 的现场充填浆液浓度快速测定方法。

2) 建立了自流充填浆液充填方法及固结充填体强度时变预测方程。借助于山谷地形优势, 利用充填站与待充填煤层高差, 实现充填浆液自流充填。基于固结充填体原位取芯测试结果, 揭示了井下原位充填体强度随时间演化特征, 拟合获得了充填体强度时变预测方程, 为预计充填体长期稳定性评价提供参考。

3) 掌握了 4604(1) 充填开采工作面地表沉降特征、充填体泌水成分及含量变化规律。沉陷观测结果表明双面充填开采后, 倾向最大下沉量为-156 mm, 走向最大下沉量为-111 mm。充填浆液泌水固结过程中, 可有效固化粉煤灰、煤矸石中重金属元素, 料浆可浸出重金属及固结体重金属元素含量监测达标, 实现了充填减沉开采与环境保护的协同发展。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 张进鹏, 李扬, 赵伟, 等. 不同岩石强度裂隙岩体约束自应力浆液加固试验研究与应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(9): 3347-3359.
ZHANG Jinpeng, LI Yang, ZHAO Wei, et al. Test and application of self-stress slurry reinforcement for fractured rock masses with different strength[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(9): 3347-3359.
- [3] 胡炳南. 我国煤矿充填开采技术及其发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(11): 1-5, 18.
HU Bingnan. Backfill mining technology and development tendency in China coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2012,

- 40(11): 1-5, 18.
- [4] 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 backfilling coal mining technology based on key strata control[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 69-76.
- [5] 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.
- [6] 冯光明, 孙春东, 王成真, 等. 超高水材料采空区充填方法研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1963-1968.
FENG Guangming, SUN Chundong, WANG Chengzhen, et al. Research on goaf filling methods with super high-water material[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1963-1968.
- [7] 张健, 王川, 李召峰, 等. 赤泥基绿色高性能注浆材料工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3339-3352.
ZHANG Jian, WANG Chuan, LI Zhaofeng, et al. Experimental study on the engineering characteristics of red mud-based green high-performance grouting material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3339-3352.
- [8] 卢海峰, 易金龙, 贺栋, 等. 底泥地质聚合物注浆材料制备试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2567-2578.
LU Haifeng, YI Jinlong, HE Dong, et al. Experimental study on preparation of geological polymer grouting material based on dredged sediment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(12): 2567-2578.
- [9] 张文泉, 朱先祥, 李松, 等. 橡胶-粉煤灰基矿井底板裂隙注浆材料性能的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 1-10.
ZHANG Wenquan, ZHU Xianxiang, LI Song, et al. Experimental study on performance of rubber-fly ash-based mine floor fissure grouting material[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 1-10.
- [10] JIANG N, ZHAO J H, SUN X Z, et al. Use of fly-ash slurry in backfill grouting in coal mines[J]. *Heliyon*, 2017, 3(11): e00470.
- [11] 杨志强, 高谦, 王永前, 等. 金川全尾砂-棒磨砂混合充填料胶砂强度与料浆流变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3985-3991.
YANG Zhiqiang, GAO Qian, WANG Yongqian, et al. Research on filling body strength and rheological properties of mixed filling mortar with unclassified tailings and rod milling sand in Jinchuan mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3985-3991.
- [12] 赵兵朝, 王京滨, 张晴, 等. 充填体-散体胶结组合体力学特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 298-309.
ZHAO Bingchao, WANG Jingbin, ZHANG Qing, et al. Experimental study on mechanical properties of filling-bulk cementation combination body[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 298-309.
- [13] 沙飞, 李术才, 刘人太, 等. 富水砂层高效注浆材料试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7): 1420-1433.
SHA Fei, LI Shucai, LIU Rentai, et al. Performance and engineering application of effective microfine cement-based grout(EMCG) for water-rich sand strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(7): 1420-1433.
- [14] 杨宝贵, 韩玉明, 杨鹏飞, 等. 煤矿高浓度胶结充填材料配比研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 30-33.
YANG Baogui, HAN Yuming, YANG Pengfei, et al. Research on ratio of high concentration cementation stowing materials in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 30-33.
- [15] 李晓磊, 杜献杰, 冯国瑞, 等. 水泥-粉煤灰基矸石胶结充填体破坏特征及强度形成机制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 36-45.
LI Xiaolei, DU Xianjie, FENG Guorui, et al. Failure characteristics and strength formation mechanism of cement-fly ash based cemented gangue backfill[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 36-45.
- [16] 侯凯, 王帅, 姚顺, 等. 矿用聚氨酯类注浆材料改性研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(10): 28-34.
HOU Kai, WANG Shuai, YAO Shun, et al. Research progress on modification of polyurethane grouting materials in mines[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10): 28-34.
- [17] 汪涛, 王志文, 王三云, 等. 煤矿高浓度胶结充填料浆管道输送特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(S1): 50-52.
WANG Tao, WANG Zhi-wen, WANG San-yun, et al. Study on Flowing Features of Mine High Density Cemented Filling Slurry in Pipeline[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(S1): 50-52.
- [18] 卢海峰, 朱晨东, 刘泉声. 不同注浆材料作用下结构面剪切力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1803-1811.
LU Haifeng, ZHU Chendong, LIU Quansheng. Study on shear mechanical properties of structural planes grouted with different materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1803-1811.
- [19] 张洪伟, 王志军, 张源. 非充分稳定覆岩下综放沿空掘巷窄煤柱巷旁注浆加固机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 489-495.
ZHANG Hongwei, WAN Zhijun, ZHANG Yuan. Mechanism of grouted-reinforcement in last roadway for pillar in the fully-mechanized gob-side entry[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3): 489-495.
- [20] 刘超, 韩斌, 孙伟, 等. 高寒地区废石破碎胶结充填体强度特性试验研究与工业应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 139-147.
LIU Chao, HAN Bin, SUN Wei, et al. Experimental study of strength of backfillings of cemented rock debris and its application under low temperature condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 139-147.
- [21] ZHAI M L, BAI H B, WU L Y, et al. A reinforcement method of floor grouting in high-water pressure working face of coal mines: a case study in Luxi coal mine, North China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 81(1): 28.
- [22] LIU H T, CHEN Y, HAN Z J, et al. Coal wall spalling mechanism and grouting reinforcement technology of large mining height working face[J]. *Sensors*, 2022, 22(22): 8675.

- [23] WANG J Q, ZHANG J X, LI M, et al. A numerical simulation of the interaction of aggregate and rockfill in a gangue fluidized filling method[J]. *Sustainability*, 2022, 14(19): 12838.
- [24] 张亮, 许家林, 轩大洋, 等. 覆岩隔离注浆充填浆体压缩特性实验与应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1117–1122.
ZHANG Liang, XU Jialin, XUAN Dayang, et al. Experimental and applied research on compression properties of slurry used for isolated overburden grout injection[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(5): 1117–1122.
- [25] 樊振丽. 离层充填开采注浆液运移通道与溶质扩散特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 172–179.
FAN Zhenli. Grouting liquid migration pathway and solute diffusion characteristics of abscission layer mining with filling[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(7): 172–179.
- [26] 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-position grouting in coal and rock fracture[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1098–1109.
- [27] 赵文, 邵红旗. 深部采空区注浆效果即时检测方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 621–628.
ZHAO Wen, SHAO Hongqi. Real-time detection method of grouting effect in deep goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 621–628.
- [28] 李建, 郑恺丹, 轩大洋, 等. 覆岩隔离注浆充填浆液无压阶段扩散规律实验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 78–86.
LI Jian, ZHENG Kaidan, XUAN Dayang, et al. Experimental study on slurry diffusion law during the non-pressure stage in overburden isolated grouting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S1): 78–86.
- [29] LI L, HUANG Q X, ZUO X, et al. Study on the slurry diffusion law of fluidized filling gangue in the caving goaf of thick coal seam fully mechanized caving mining[J]. *Energies*, 2022, 15(21): 8164.
- [30] ZHAI M L, MA D, BAI H B. Diffusion mechanism of slurry during grouting in a fractured aquifer: a case study in chensilou coal mine, China[J]. *Mathematics*, 2022, 10(8): 1345.
- [31] JIANG D H, CHENG X Z, LUAN H J, et al. Experimental investigation on the law of grout diffusion in fractured porous rock mass and its application[J]. *Processes*, 2018, 6(10): 191.
- [32] XUAN D Y, XU J L, WANG B L, et al. Borehole investigation of the effectiveness of grout injection technology on coal mine subsidence control[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(6): 2435–2445.
- [33] 武竹. 神州煤业 4604 工作面浓浆充填沉陷控制技术研究[J]. 山西煤炭, 2023, 43(2): 48–56.
WU Zhu. Subsidence control technology of thick slurry filling in No. 4604 working face of Shenzhou coal industry[J]. *Shanxi Coal*, 2023, 43(2): 48–56.