



煤基固废泡沫充填材料性能及空巷群围岩控制

孙强 赵瑞 周楠 高嘉良 袁辉

引用本文:

孙强, 赵瑞, 周楠, 等. 煤基固废泡沫充填材料性能及空巷群围岩控制[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 327–342.

SUN Qiang, ZHAO Rui, ZHOU Nan. Performance of coal based solid waste foam filling material and control of surrounding rock of abandoned roadways[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 327–342.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0240>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高水材料充填沿空留巷应力控制与围岩强化机理及应用

Stress control and surrounding rock strengthening mechanism of gob-side entry retaining with high-water content material filling and its application

煤炭科学技术. 2022, 50(6): 16–28 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b9409a9e-32ce-4948-b6df-661111d622d2>

软弱破碎顶板巷道围岩变形机理及控制技术

Deformation mechanism and control technology of surrounding rock in soft and broken roof roadway

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4ea78363-675e-4d8a-acbe-4435f213ab56>

回收大巷煤柱工作面过空巷围岩破坏机理和控制技术

Failure mechanism and control technology of the surrounding rock of the coal pillar crossing abandoned roadway

煤炭科学技术. 2022, 50(4): 67–75 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/117dd122-3da8-4988-956a-c1b22ffb7c19>

矿山围岩变形与破坏光纤感测理论技术及应用

Theory-technology and its application of optical fiber sensing on deformation and failure of mine surrounding rock

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 208–217 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.016>

深部大断面巷道交叉点围岩稳定性分析及控制技术

Stability analysis and control technology of surrounding rocks at deep large cross-section roadway

煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/47578ae1-c03d-41c9-9c79-43d559d68a41>

突出厚煤层沿空掘巷煤柱留设宽度优化研究

Study on optimization of coal pillar width of gob-side entry driving in thick coal seam with gas outburst

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 92–101 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7705855d-bca5-4b1e-ba1c-0b67b6a487f1>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

孙 强,赵 瑞,周 楠,等.煤基固废泡沫充填材料性能及空巷群围岩控制[J].煤炭科学技术,2025,53(6): 327-342.

SUN Qiang, ZHAO Rui, ZHOU Nan, *et al.* Performance of coal based solid waste foam filling material and control of surrounding rock of abandoned roadways[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 327-342.

煤基固废泡沫充填材料性能及空巷群围岩控制

孙 强^{1,2},赵 瑞¹,周 楠^{1,2},高嘉良¹,袁 辉¹

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要:工作面过空巷是煤矿井下生产过程中普遍面临的工程问题,空巷地质条件赋存复杂且密集时,易导致围岩失稳、支架空顶作业、支架漏底等问题,影响工作面安全高效生产。以鲍店煤矿5316综放工作面过空巷群为研究背景,采用理论分析、实验室测试、物理相似模拟及现场实测等方法,研究了水泥泡沫材料、粉煤灰泡沫材料及矸石泡沫材料性能及优势配比,工作面过空巷群围岩变形规律及控制效果。结果表明:发泡剂稀释倍数20倍、水灰质量比0.5、稳泡剂掺量为1%、发泡剂掺量1.0%、石膏掺量7%时,水泥泡沫充填材料28 d试样强度可达1.72 MPa;矸石粒径0~0.3 mm、掺量30%时,矸石泡沫充填材料28 d试样强度可达1.53 MPa;粉煤灰掺量30%时,粉煤灰泡沫充填材料28 d试样强度可达1.13 MPa。提出了以煤基固废泡沫材料充填、补强锚索与U型钢梁加强支护为主的空巷群围岩控制技术方法,并给出了煤基固废泡沫材料空巷充填技术原理及加强支护主要参数设计,通过物理相似模拟试验研究了不同层位空巷群围岩应力峰值变化范围为16.9~26.5 MPa,应力集中系数变化范围为1.61~2.53,同层空巷顶板最大下沉值介于300~400 mm,下伏空巷顶板最大下沉值介于200~300 mm,且空巷交叉处易产生应力集中,变形量较大。工作面开采期间空巷群围岩表面位移、煤岩体(充填体)应力、顶板离层及锚杆(索)载荷、支架工作阻力等现场监测数据显示,整体空巷围岩变形量控制效果较好,实现了工作面安全高效生产。

关键词:空巷;泡沫充填材料;物理模拟;围岩变形;应力分布

中图分类号:TD325

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2025)06-0327-16

Performance of coal based solid waste foam filling material and control of surrounding rock of abandoned roadways

SUN Qiang^{1,2}, ZHAO Rui¹, ZHOU Nan^{1,2}, GAO Jialiang¹, YUAN Hui¹

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. MOE Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: A working face passing through an abandoned roadway is a common engineering problem in the underground production process of coal mines. When the geological conditions of abandoned roadways are complex and dense, they can easily lead to instability of the surrounding rock, empty top operation of supports, and bottom leakage of supports, which affect the safe and efficient production of the working face. Taking the 5316 fully mechanized top coal caving working face of the Baodian Coal Mine as the research background, the coal based solid waste foam filling material, performance and superior ratio, surrounding rock deformation law, and control effect of the working face through the abandoned roadway group were studied by means of theoretical analysis, laboratory testing, physical simulation and field measurements. The test results show that when the dilution ratio of foaming agent is 20 times, the water cement ratio is 0.5, the content of foam stabilizer is 1%, the content of foaming agent is 1.0%, and the content of gypsum is 7%, the 28 day strength of cement foam filling material sample can reach 1.72 MPa; When the particle size of gangue is 0-0.3 mm and the content is 30%, the strength of gangue foam filling material sample can reach 1.53 MPa after 28 days; When the content of fly ash is 30%, the sample strength of fly ash

收稿日期:2025-02-25

策划编辑:常 琛

责任编辑:刘雅清

DOI: 10.12438/cst.2025-0240

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52104152);陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设资助项目(2025QCY-KXJ 028)

作者简介:孙 强(1988—),男,山东临沂人,副教授,博士生导师,博士。E-mail: kkyun@126.com

foam filling material can reach 1.13 MPa after 28 days. The technical method of surrounding rock control of abandoned roadway group is proposed, which is mainly filled with coal based solid waste foam material, reinforced anchor cable and U-shaped steel beam to strengthen support, and the principle of abandoned roadway filling technology with coal based solid waste foam material and the design of main parameters for strengthening support are given. Through physical similar simulation tests, the variation range of the peak stress of surrounding rock of abandoned roadway group in different layers is 16.9–26.5 MPa, the variation range of the stress concentration coefficient is 1.61–2.53, the maximum subsidence value of the roof of abandoned roadway in the same layer is between 300–400 mm, and the maximum subsidence value of the roof of the underlying abandoned roadway is between 200–300 mm, and the intersection of abandoned roadway is prone to stress concentration, with large deformation. During the mining period of the working face, on-site monitoring data such as surface displacement of the surrounding rock of the abandoned roadway group, stress of the coal rock mass (filling body), roof separation and anchor rod (cable) load, and support working resistance show that the overall deformation control effect of the abandoned roadway surrounding rock is good, achieving safe and efficient production of the working face.

Key words: abandoned roadway; foam material; physical simulation; surrounding rock deformation; stress distribution

0 引言

煤矿井下空巷的形成是自然地质、开采技术、人为管理、水文地质及时间因素共同作用的结果,而煤层接续、巷道布置、安全管理等因素是造成工作面空巷的主要原因^[1-3]。空巷对煤层工作面开采的影响主要体现在安全隐患、开采效率降低、资源浪费、经济效益下降、环境影响和技术挑战等方面^[4]。尤其是工作面采动影响易引发邻近空巷或空巷群围岩破坏,造成支架空顶作业、支架漏底、煤壁边片帮等一系列安全隐患,严重影响工作面安全高效生产^[5-7]。

相关学者针对工作面过空巷期间采场覆岩运移、矿压显现规律及围岩控制方面进行了大量研究,取得了丰富研究成果^[8-11]。张栋等^[12]基于砌体梁理论,建立考虑采空区矸石及直接顶动态压缩承载的空巷顶板结构力学模型,推导出顶板砌体梁结构动态稳定的临界判据。卢恒等^[13]通过数值模拟和理论分析,研究了综放工作面过空巷时超前应力分布、煤体稳定性和基本顶破坏特征,建立了顶板破断力学模型,发现空巷宽度越大,基本顶破断位置越远。并提出高水材料充填和木垛支护的措施。尹超宇等^[14]利用突变理论,从势能积聚的角度分析了工作面与前方空巷之间煤柱的失稳机理,并运用弹性薄板理论对煤柱失稳后基本顶的受力状态及破断位置进行了研究。刘畅等^[15]运用 Winkler 地基梁理论,对基本顶中弯矩和挠度进行了计算,解释了试验中围岩破断特征、支承应力和支架载荷的变化,给出了基本顶超前破断的机制。赵文光等^[16]采用数值模拟,研究了工作面过同层平行空巷群采动来压突显特征,提出了空巷围岩“锚索补强+泵送支柱”的控顶技术方案,并进行现场实践验证。李振华等^[17]通过理论分析,研究了工作面覆岩破断组合结构,并模拟了不同支

护强度下顶板应力-位移全周期演化规律。周海丰等^[18]提出了“泵送支柱+锚索+钢带”联合支护方式过空巷技术,使支柱与顶底板围岩处于协同作用状态,可保证综采工作面安全通过大断面空巷群。刘炳权等^[19]和张金龙等^[20]验证了高水充填、无机材料充填对空巷围岩控制效果,发现当工作面接近和切割充填体时,无架前片帮或冒顶现象,支架阻力稳定,顶板无明显变形,工作面可安全通过空巷。徐青云等^[21]计算确定了过空巷时最佳充填体强度,工业试验对比分析了木垛支护、锚杆(索)支护和高水材料充填 3 种方式的支护效果。但受到地质构造、煤层赋存特征及开采技术条件影响,导致空巷群断面尺寸、支护方式、层位布置与角度、围岩性质等存在较大差异,采取单一的空巷围岩控制方法难以满足工作面安全高效生产及空巷群围岩控制需求^[22-25],开展空巷群围岩控制研究尤为重要。

鲍店煤矿 5316 综放工作面回采过程中要通过 20 多条空巷,空巷密集且赋存差异性明显,传统工作面调斜及空巷加强支护效率低、安全性差,难以满足现场工程需求。笔者针对鲍店煤矿 5316 综放工作面过密集、复杂空巷群围岩控制难题,提出空巷群围岩控制技术方法,开展不同空巷围岩控制需求的煤基固废泡沫充填材料及性能测试试验,通过物理模拟及现场实测方法,研究工作面过空巷群围岩控制矿压显现规律及控制效果,研究成果以期为类似工作面过空巷围岩控制提供借鉴。

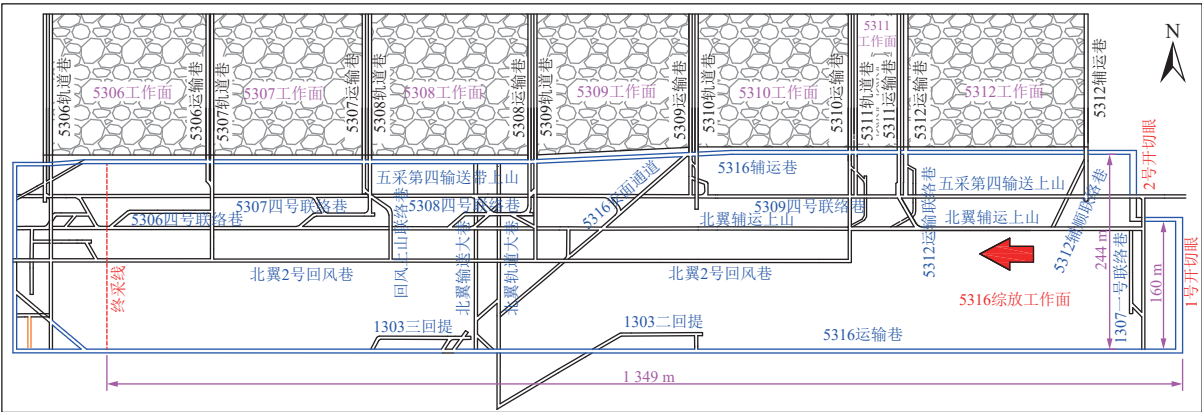
1 工作面概况

鲍店煤矿 5316 综放工作面主采 3 号煤,煤层平均厚度 8.71 m,煤层平均倾角 9°,平均埋深 436 m,平均抗压强度 29 MPa。该区域煤层结构简单,含 0~3 层不稳定夹矸,夹矸岩性为碳质泥岩、粉砂岩、

细砂岩,厚度 0.02 ~ 1.00 m,属全区可采稳定煤层。煤层直接顶主要为粉砂岩或砂质泥岩,其次为泥岩,平均抗压强度 40 MPa。基本顶以中-细粒砂岩为主,以及细粉砂岩及粉细砂岩互层,裂隙较为发育。局部有伪顶,一般为泥岩、铝质泥岩或炭质泥岩,平均抗压强度 50 MPa。直接底为铝质泥岩、粉砂岩、粉细砂岩互层,向下为中细粒砂岩和粉细砂岩互层,岩性为铝质泥岩,平均抗压强度 40 MPa。

5316 综放工作面开切眼长度 244 m,工作面走向长度约 1 349 m,工作面可采储量 367.69 万 t (图 1)。5316 工作面北侧与 5306、5307、5308、5309、

5310、5311 及 5312 综放工作面采空区相邻。此工作面开采过程中主要经过 1307 一号联络巷、五采第四输送带上山、北翼辅运上山等 25 条空巷,从层位关系上主要包括穿层巷道、同层巷道、下伏巷道等,空巷断面尺寸、断面形状、原有支护方式等具有明显差异,工作面过空巷及巷道交叉区域应力集中现象明显,主要空巷赋存特征见表 1。工作面研究区域内,开切眼至工作面推进 500 m 范围内的 10 个典型空巷剖面图如图 2 所示。因此,如何实现多层位空巷群围岩控制及工作面安全高效开采是面临的主要技术难题。



(a) 5316工作面巷道平面布置

厚度/m	柱状 1 : 200	岩性	岩性描述
9.30		铝质泥岩	暗灰色,局部略带绿色,菱铁质鲕粒较多,具块状菱铁质结构
4.80		粉砂岩	深灰色,缓波状层理,偶见植物碎片,裂隙较发育
2.20		粉细砂岩互层	灰色,以粉砂岩为主,具缓波状层理,偶见植物碎片
13.20		中砂岩	泥质及钙质胶结,石英为主,岩屑、绿色矿物及长石次之
9.30		粉砂岩	粉砂岩,深灰色,缓波状层理,偶见植物碎片,裂隙较发育
8.50		粉细砂岩互层	灰色,以粉砂岩为主,具缓波状层理,偶见植物碎片
3.60		粉砂岩	具泥质及菱铁质鲕粒,波状层理,偶见植物碎片,裂隙较发育
8.71		3号煤	亮煤为主,层状结构,裂隙发育
16.20		粉细砂岩互层	缓波状层理,含菱铁矿结核,泥钙质胶结
6.90		粉砂岩	含植物碎片化石,裂隙发育,呈缓波状层理,泥质胶结

(b) 区域煤层顶底板综合柱状

图 1 5316 工作面巷道平面图及区域煤层顶底板综合柱状

Fig.1 Working face layout and comprehensive histogram of coal seam roof and floor

2 综采面过空巷群围岩控制技术方法

综采面过空巷主要技术方法包括工作面调斜、空巷加强支护(架棚、锚网梁索、注浆加固等)、空巷

充填及联合支护等^[26],然而以上方法存在工作面调斜工艺复杂、充填成本较高、空巷围岩控制效果较差等一系列问题,为实现鲍店煤矿 5316 综采工作面安

表 1 5316 工作面主要空巷赋存特征

Table 1 Characteristics of main abandoned roadway in working face 5316

序号	空巷名称	空巷类型	空巷尺寸(宽×高)	断面形状	支护方式
1	1307一号联巷	穿层空巷	4.0 m × 3.0 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
2	5312辅运巷		4.8 m × 3.3 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
3	5310运输巷		4.4 m × 3.0 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
4	5311运输巷		4.4 m × 3.4 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
5	5311轨道巷		4.1 m × 3.0 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
6	5309运输联络巷		4.4 m × 3.3 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
7	1303二回提		4.0 m × 3.0 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
8	5309轨道联络巷		4.0 m × 3.0 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
9	5312辅顺联络巷		4.8 m × 3.3 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
10	5307运输巷		4.0 m × 3.0 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
11	5312运输巷		4.0 m × 3.0 m	拱形	锚网索联合支护
12	五采四输送带上山		4.5 m × 3.2 m	拱形	锚网索联合支护
13	5312运输联络巷	上宽4.8 m、下宽5.2 m，高3.6 m		梯形	锚网索喷+钢带联合支护
14	5307四号联络巷	下伏空巷	4.4 m × 3.0 m	拱形	锚网索联合支护
15	北翼辅运上山		4.0 m × 3.5 m	拱形	锚网索联合支护
16	5307轨道巷		4.0 m × 3.0 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
17	5306轨道巷		4.1 m × 3.2 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
18	5306四号联络巷		4.0 m × 3.2 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
19	5309运输巷		4.1 m × 3.0 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
20	安装通道		4.0 m × 3.2 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
21	5310运输联络巷		3.0 m × 3.3 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
22	1303三回提		4.0 m × 3.0 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
23	5308四号联络巷		3.0 m × 3.0 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
24	5308轨道巷		4.0 m × 3.0 m	矩形	锚网索+钢带联合支护
25	5308运输巷	同层空巷	4.0 m × 3.0 m	矩形	锚网索+钢带联合支护

全高效生产,解决工作面回采过程中受同层空巷、下伏空巷、穿层空巷等空巷群影响的围岩控制工程难题,参考文献 [27-28] 底板破坏深度理论分析,计算底板破坏深度为 14.5 ~ 17.6 m,实测矿井邻近工作面底板最大破坏深度为 18.7 m。为确保工作面过空巷时支架不空顶作业、支架不漏底,结合矿井实际条件,对于 5316 工作面穿层及下伏空巷,综合确定空巷与煤层层位距离小于 8 m 时,采用煤基固废泡沫材料对空巷进行充填,空巷与煤层层位距离为 8 ~ 20 m 时,采用锚杆(索)、U 型钢梁等进行补强支护。对于同层空巷,为避免工作面调斜过空巷工艺影响采煤效率,结合 5316 工作面同层空巷的赋存特

征及工作面采动矿压影响,确定工作面与同层空巷角度小于 15°时,采用煤基固废泡沫材料对空巷进行充填;工作面与同层空巷角度大于 15°时,采用单体、锚杆(索)等进行加强支护。

煤基固废泡沫材料空巷充填技术具有系统与工艺简单、设备与材料成本低等一系列优点,是本文中重点研究的内容,其主要原理是在空巷两端施工充填挡墙,采用发泡机、破碎机、搅拌机、充填泵、充填管路等主要设备,将水泥、水、发泡剂、外加剂、矸石或粉煤灰等混合搅拌,制成煤基固废泡沫材料,泵送充填至空巷,实现空巷围岩控制,主要原理示意图 3 所示。

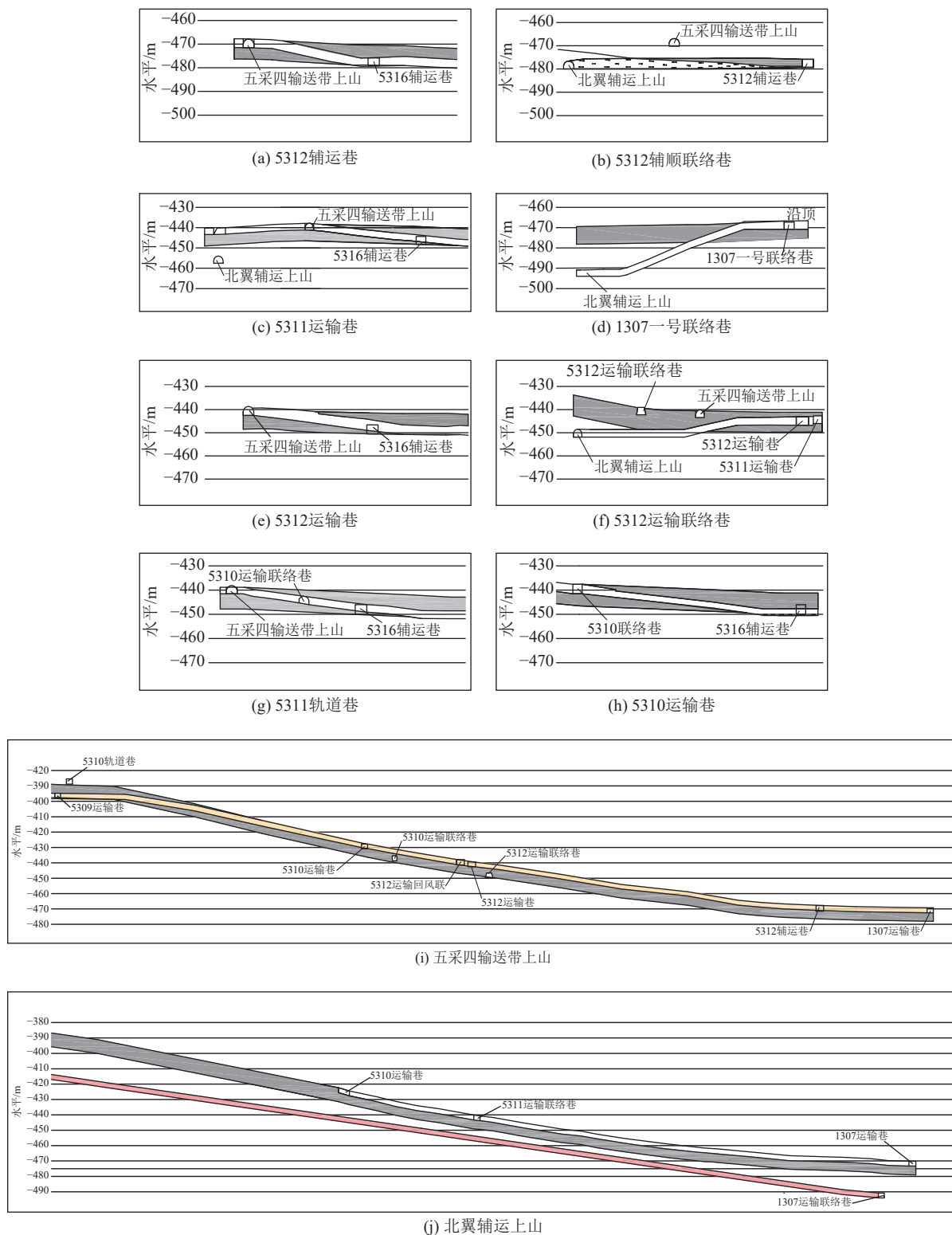


图 2 典型空巷剖面

Fig.2 Typical cross-section of abandoned roadway

3 煤基固废泡沫充填材料及性能测试

由于工作面邻近空巷群赋存层位、形状、尺寸、角度等具有一定差异,所需充填材料的性能需求不同,通过实验室试验的方式研究制备不同种类的煤基固废泡沫充填材料,可以满足不同空巷充填的需

求,同时能够达到处置煤基固废的目的。本文在水泥泡沫充填材料优势配比研究的基础上,重点研究不同粒径矸石掺量、不同粉煤灰掺量对水泥泡沫充填材料性能的影响。

3.1 试验材料及方法

试验选用普通硅酸盐水泥 PO42.5 作为胶凝材

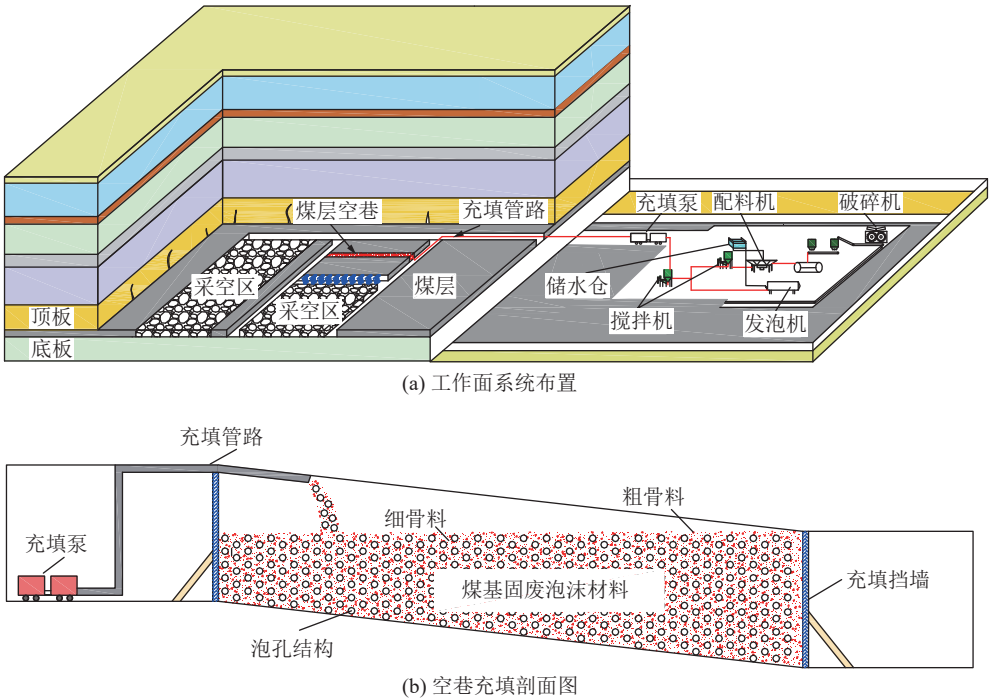


图 3 煤基固废泡沫材料空巷充填技术原理

Fig.3 Principle of abandoned roadway filling technology with coal based solid waste foam materials

料。采用高分子复合型发泡剂进行物理发泡,发泡后气泡相互独立并均匀分布在水泥浆中,可形成大量封闭的气孔,具有发泡倍数高、稳定性好等优势。试验所用稳泡剂为硬脂酸钙,分子式为 $\text{Ca}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})$,其目的是促进气泡的形成,使气泡大小更加均匀,提高气泡的稳定性。发泡量、气泡尺寸及均匀性对泡沫材料的性能具有较大影响,在发泡剂稀释倍数(10、20、30、40 倍)及稳泡剂掺量(0.6%、0.8%、1.0%、1.2%)优选预试验测试结果的基础上,确定发泡剂稀释倍数为 20 倍、稳泡剂掺量为 1.0%。探究水灰比(0.40、0.45、0.50、0.55、0.60)、发泡剂掺量(0.8%、0.9%、1.0%、1.1%、1.2%)、石膏掺量(5%、6%、7%、8%、9%)对水泥泡沫充填材料输送性能及力学性能的影响,确定其优势配比。

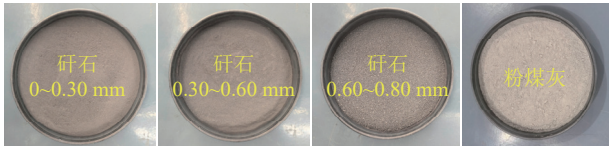
在上述研究基础上,选用工作面掘进矸石及附近电厂粉煤灰为骨料。研究不同矸石粒径(0~0.30、0.30~0.60、0.60~0.80 mm)、不同矸石质量分数(10%、20%、30%、40%)、不同粉煤灰质量分数(20%、30%、40%、50%)在不同龄期(7、14、21、28 d)条件下矸石与粉煤灰泡沫充填材料的强度性能,试验用矸石及粉煤灰如图 4 所示,试验设计方案见表 2。

煤基固废泡沫充填材料制备流程为:将水泥和水在搅拌桶内按一定比例搅拌成水泥浆;同时,通过发泡机的发泡系统将发泡剂按一定比例与水稀释后,

表 2 试验测试方案设计

Table 2 Experimental test scheme design

测试项目	粒径分布/mm	掺量/%	养护龄期/d
矸石	0~0.30	10~40	7、14、21、28
	0.30~0.60	10~40	
	0.60~0.80	10~40	
粉煤灰	—	20~50	



(a) 0~0.30 mm (b) 0.30~0.60 mm (c) 0.60~0.80 mm (d) 粉煤灰

图 4 不同粒径矸石及粉煤灰

Fig.4 Different particle sizes of gangue and fly ash

通过发泡机压缩空气形成细密泡沫,并与水泥浆、外加剂混合,加入矸石或粉煤灰制成煤基固废泡沫充填材料,制备工艺流程及试验如图 5 所示。

试验的主要过程包括材料称重、混合搅拌、制样、脱模、固化、力学性能测试、数据处理分析等。其中试样采用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的标准立方体模具制成^[29],使用的模具为三模,每组 3 个样品。试样固化成型后脱模,在恒温(20±2)℃养护箱(SHBY-40B),进行标准条件下的自然养护。

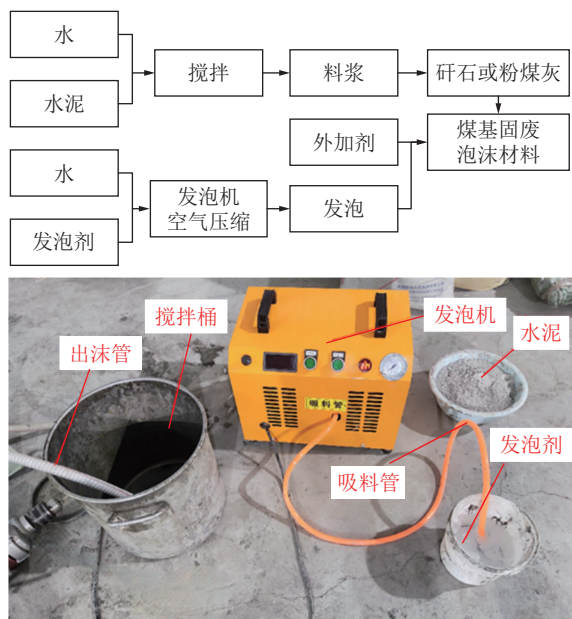


图 5 煤基固废泡沫充填材料制备流程

Fig.5 Preparation process of coal based solid waste foam filling material

3.2 试验结果分析

3.2.1 水泥泡沫充填材料

发泡剂稀释倍数为 20 倍、稳泡剂掺量为 1.0%。

不同水灰比(0.40、0.45、0.50、0.55、0.60)、发泡剂掺

量(0.8%、0.9%、1.0%、1.1%、1.2%)、石膏掺量(5%、6%、7%、8%、9%)条件下水泥泡沫充填材料输送性能及力学性能的影响试验结果如图 6 与图 7 所示。由图 6 和图 7 可知：

1)水灰比对水泥泡沫充填材料输送性能的影响最大,水灰比与浆液初凝时间及坍落度呈正相关关系,水灰比为 0.5 时初凝时间 101 min,坍落度 265 mm,相较水灰比为 0.4 时依次增加 55.4%、10.4%,增大水灰比虽可提升流动性,但会降低材料黏聚性与保水性,而减小水灰比则有利于提高材料耐久性。发泡剂掺量与初凝时间正相关,但与坍落度负相关。石膏掺量对水化速率具有调节作用,其化学与物理效应可减缓水泥颗粒表面水化产物形成,不仅延长初凝时间,还通过延缓水化进程使浆料保持更好的流动性。但总体而言,发泡剂掺量与石膏掺量对初凝时间以及坍落度的影响较小。

2)水泥泡沫充填体强度随水灰比增大而下降明显,水灰比 0.4 时试样 28 d 抗压强度 1.84 MPa、水灰比 0.5 时试样 28 d 抗压强度下降至 1.31 MPa。发泡剂掺量增加会导致试样抗压强度呈线性下降,掺量 0.8% 时 28 d 试样抗压强度达 1.64 MPa,掺量 1.2% 时骤降至 0.95 MPa,下降幅度达 42.1%。进一步添

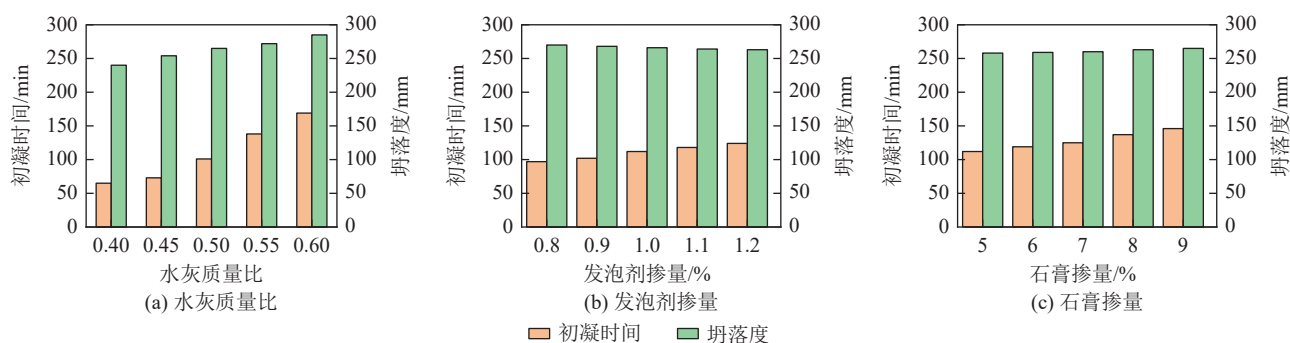


图 6 不同因素对水泥泡沫充填材料输送性能影响

Fig.6 Influence of different factors on transportation performance of cement foam filling materials

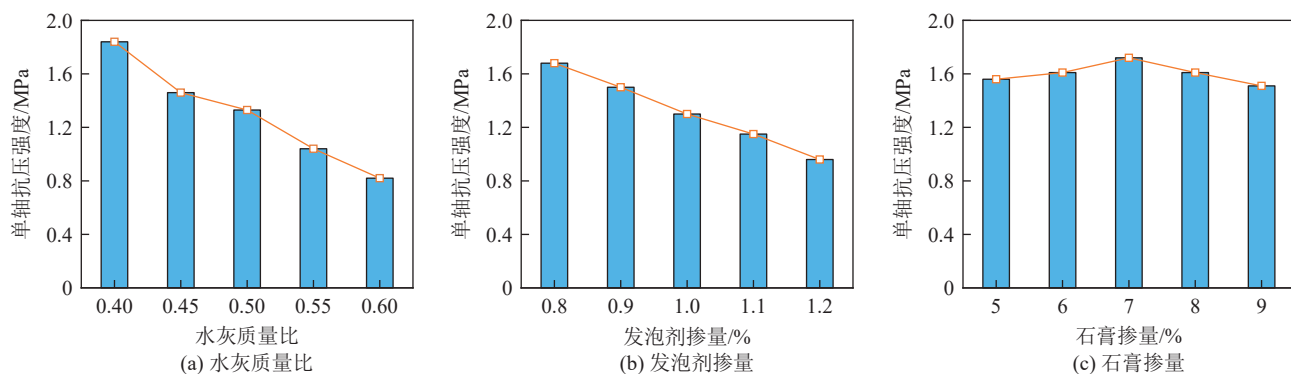


图 7 不同因素对水泥泡沫充填材料力学性能影响

Fig.7 Influence of different factors on mechanical properties of cement foam filling materials

加石膏发现, 掺量 4%~7% 时抗压强度随养护时间显著提升, 28 d 抗压强度达 1.72 MPa(较无石膏组提高 34%), 石膏促进水化产物有序产生并填充材料孔隙, 但随着石膏继续添加, 如掺量 9% 时试样强度呈下降趋势。

综合以上水泥泡沫充填材料输送性能与力学特性试验结果, 确定水泥泡沫充填材料的优势配比为发泡剂稀释浓度为 20 倍、稳泡剂掺量为 1%、水灰比为 0.5、发泡剂掺量为 1%、石膏掺量为 7%。

3.2.2 矽石与粉煤灰泡沫充填材料

发泡剂稀释倍数为 20 倍、稳泡剂掺量为 1.0%、水灰比 0.50、发泡剂掺量 1.0%、石膏掺量 7% 时, 不

同矽石粒径(0~0.30、0.30~0.60、0.60~0.80 mm)、不同养护时间(7、14、21、28 d)条件下矽石泡沫充填材料力学强度随矽石掺量(10%、20%、30%、40%)的变化曲线如图 8 所示。其中, 不同粒径矽石泡沫充填材料养护时间 7 d、矽石掺量 10% 条件下试样破坏形态如图 9 所示。粉煤灰泡沫充填材料试样抗压强度随不同粉煤灰掺量(20%、30%、40%、50%)、不同养护时间(7、14、21、28 d)抗压强度变化曲线如图 10 所示。其中, 不同粉煤灰掺量(20%、30%、40%、50%)养护时间 28 d 条件下试样破坏形态如图 11 所示。以粉煤灰为例, 其泡沫材料试样内部宏观孔泡特征如图 12 所示。

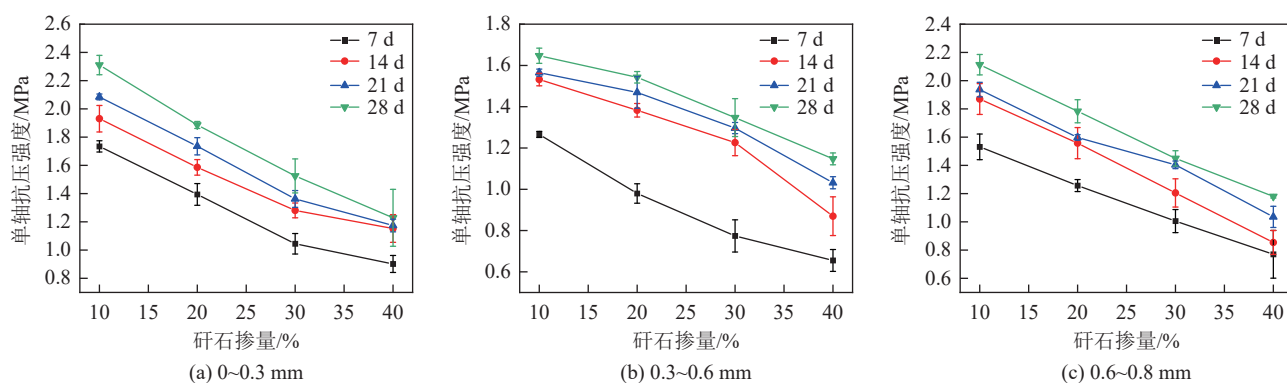


图 8 不同粒径矽石掺量泡沫材料试样强度变化曲线

Fig.8 Strength change curves of foam material samples with different particle size gangue content

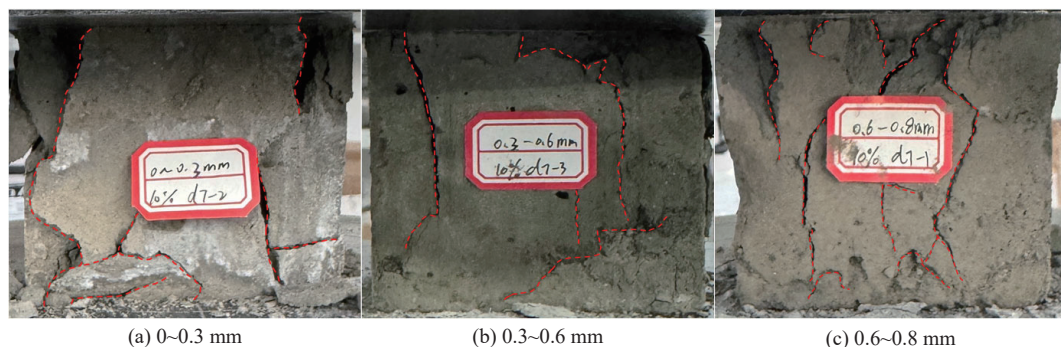


图 9 不同粒径矽石掺量泡沫材料试样破坏形态

Fig.9 Failure patterns of foam material samples with different particle size gangue content

由图 8—图 11 可知:

1) 矽石与粉煤灰泡沫材料试样抗压强度随养护时间的增加而增大, 随掺量的增加而减小。矽石粒径 0~0.3 mm, 矽石掺量 30% 时, 其 7、14、21、28 d 抗压强度依次为 1.04、1.28、1.36、1.53 MPa, 抗压强度在 7 d 基础上依次提高了 23.1%、30.8%、47.1%; 粉煤灰掺量 30% 时, 其 7、14、21、28 d 抗压强度依次为 0.79、0.88、1.03、1.13 MPa, 抗压强度在 7 d 基础上依次提高了 11.4%、30.4%、43.0%。

2) 矽石泡沫材料试样抗压强度随着矽石粒径的增大整体呈现降低趋势, 以矽石掺量 20%, 养护时间 28 d 试样抗压强度为例, 矽石粒径 0~0.3、0.3~0.6、0.6~0.8 mm, 试样抗压强度依次为 1.89、1.78、1.54 MPa, 抗压强度依次降低 5.8%、18.5%。其主要原因为泡沫较为脆弱, 无法承载大质量矽石, 随着矽石粒径增大、质量增大, 大粒径矽石泡沫材料固结体呈不均质分布, 而小粒径矽石在料浆中整体呈现悬浮状态直至固结。

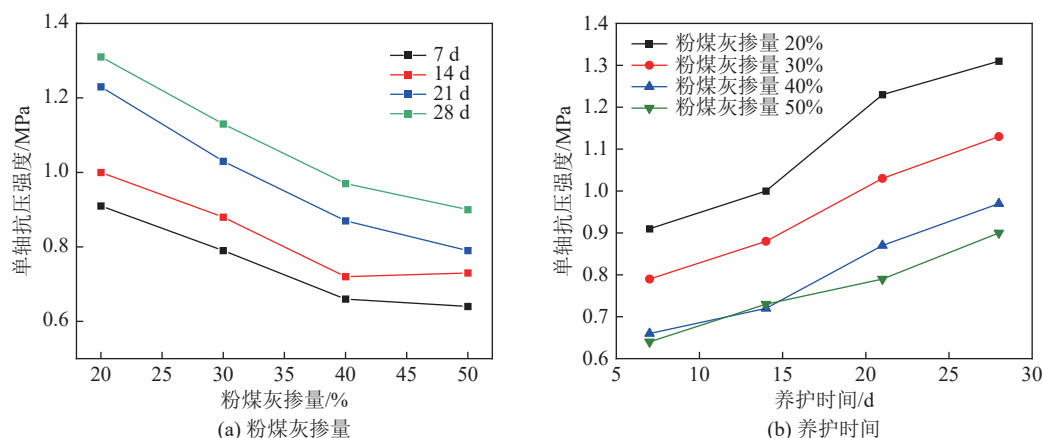


图 10 粉煤灰掺量泡沫材料试样强度变化曲线

Fig.10 Strength change curves of foam material sample with fly ash content

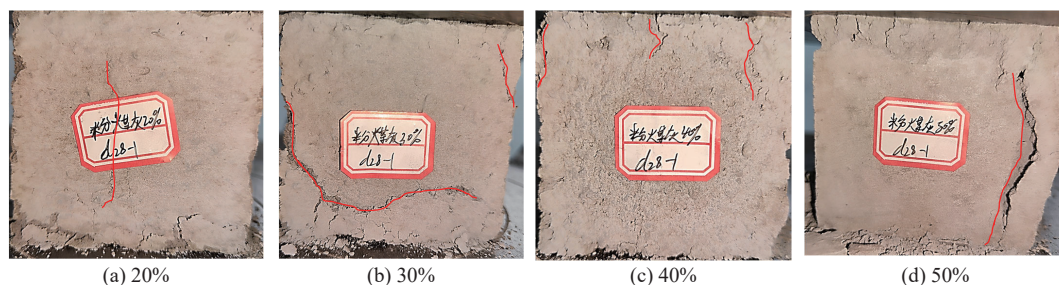


图 11 不同粉煤灰掺量泡沫材料试样破坏形态

Fig.11 Failure patterns of foam material samples with different fly ash content

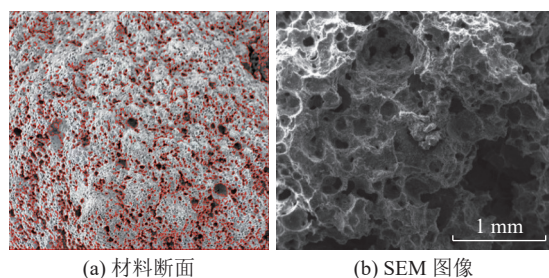


图 12 粉煤灰泡沫材料试样内部宏观孔隙特征

Fig.12 Macroscopic and mesoscopic porosity characteristics of fly ash foam material sample

根据泡沫材料断面及 SEM 图像试验结果,发现试件主要存在 2 类泡孔,一种是由于材料颗粒团聚以及料浆水化过程产生的微小泡孔,一种是由于发泡剂发泡产生的宏观泡孔,其尺寸远大于前者泡孔,一般尺寸大于 $10\ \mu\text{m}$ 。宏观孔隙的泡孔结构特征对材料试样的强度影响较大。上述试验采用相同发泡剂添加量,试件孔隙率基本一致,均稳定在 30% ~ 35%。试验结果表明,试样相同密度下,泡孔平均孔径越小,孔径分布曲线越集中,此时孔径分布越均匀,孔径分布范围越窄,其力学性能越好,有利于材料强度的提高。综合以上试验结果,确定矽石泡沫材料

在水泥泡沫材料优势配比的基础上,矽石掺量小于 30%,矽石粒径小于 0.6 mm,具有较好的力学性能。粉煤灰泡沫材料在水泥泡沫材料优势配比的基础上,粉煤灰掺量一般控制在 30% 以内。

4 空巷群围岩控制效果物理相似模拟

4.1 物理相似模拟试验方案

采用物理相似模拟试验方法研究鲍店煤矿 5316 工作面过空巷群覆岩移动特征及空巷群围岩稳定性,研究区域范围为工作面开切眼至推进 500 m 位置。依据相似材料模拟理论及相似准则,确定模型几何相似比 1 : 100,应力相似比为 1 : 166.7。试验模型长度 250 cm,厚度 30 cm,高度 125 cm,模型上部施加 0.045 MPa 的补偿载荷。相似模拟材料选取河沙为骨料,石膏和碳酸钙为胶结材料,水为混合剂,云母粉为分层材料,相似材料配比根据应力相似比及相关文献确定。工作面每次开挖 5 cm。根据前文空巷群围岩控制方法分析及煤基固废泡沫充填材料性能测试结果,确定水泥泡沫充填材料配比为:发泡剂稀释倍数 20 倍、水灰比 0.5、发泡剂掺量 1.0%、石膏掺量 7%,28 d 试件强度达到 1.72 MPa。粉煤灰

泡沫充填材料配比为:发泡剂稀释倍数 20 倍、水灰比 0.5、发泡剂掺量 1.0%、石膏掺量 7%、粉煤灰掺量为 30%, 28 d 试件强度达到 1.13 MPa。参考相关文献,根据应力相似准则制备充填体及加强支护相似材料^[30-31]。煤层开采过程中,采用 Matchid-2D 非

接触式全场应变测量系统对覆岩及空巷围岩位移进行监测,同时在空巷围岩、煤层内布置应力传感器,进行采动应力监测。鲍店煤矿 5316 工作面过空巷群覆岩移动特征及空巷群围岩稳定性物理相似模拟试验简化模型及监测布置方案如图 13 所示。

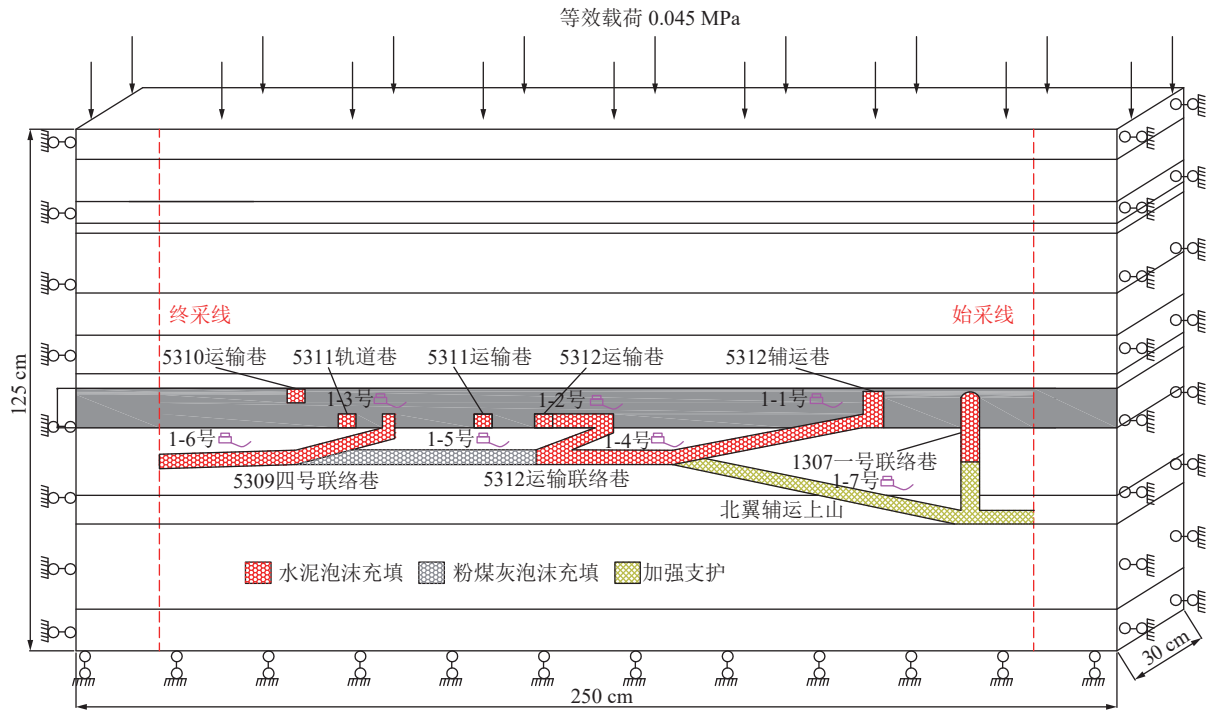


图 13 5316 工作面过空巷物理模拟方案

Fig.13 Physical simulation scheme diagram of 5316 working face passing through roadways

4.2 物理模拟结果分析

随着工作面的不断开采,上覆岩层受采动影响呈现出“裂隙发育、离层明显、裂隙扩展、岩层破断、裂隙压实闭合”的整体时空演化特征,工作面区域范围内主要空巷围岩呈现不同程度的破坏损伤特征,工作面推进距离为 80、110、160、175、190、200 m 时,其顶底板岩层移动、裂隙演化特征与空巷群围岩破坏情况如图 14 所示。工作面开采过程中不同层位空巷围压采动应力峰值及应力集中系数、空巷顶板最大下沉量变化曲线如图 15、图 16 所示。由图 14 可知:

1)随着工作面不断推进,顶板经历初次破断与周期破断特征,开采至 80 m 时,基本顶已经历初次破断与第 1 次周期破断,此时基本顶上部覆岩裂隙离层发育;开采至 110 m 时,基本顶上部覆岩发生周期破断,破断距约 22 m;开采至 160 m 时,覆岩破断形成类铰接岩梁结构,此时覆岩离层、裂隙扩展发育特征明显。在工作面推进距离为 160~200 m 的过程中,覆岩裂隙发育范围逐渐扩大,覆岩整体经历了“裂隙发育、裂隙扩展、裂隙压实闭合”的空间演化

过程,开采至 200 m 时,覆岩结构发育趋于稳定,此时垮落带发育高度约 17.4 m,裂隙带发育高度约 55.6 m。

2)受工作面采动影响,5316 工作面同层空巷以及煤层下部空巷围岩呈现差异性破坏特征。5311 运输巷、5312 运输巷等煤层内同层空巷均表现出开采至该空巷 20~30 m 位置时,变形量达到最大值,充填体压实,空巷上部产生裂隙。煤层下方水泥泡沫充填与粉煤灰泡沫充填的 5312 运输联络巷、5309 四号联络巷整体控制效果较好,巷道交叉处破坏较大,变形较明显。采取加强支护的北翼辅运上山受煤层采动影响较小,靠近煤层位置的巷道围岩略有变形。由图 15 和图 16 可知:

1)同层空巷 5312 辅运巷、5312 运输巷、5311 轨道巷的应力峰值约为 25.9、26.5、25.2 MPa,应力集中系数约为 2.47、2.53、2.40;5309 四号联络巷、5312 运顺联络巷的应力峰值约为 20.86、20.40、19.9 MPa,应力集中系数约为 1.99、1.94 与 1.90。距离煤层 10 m 位置的下伏北翼辅运上山应力峰值约为 16.9 MPa,应力集中系数约为 1.61;受工作面采动

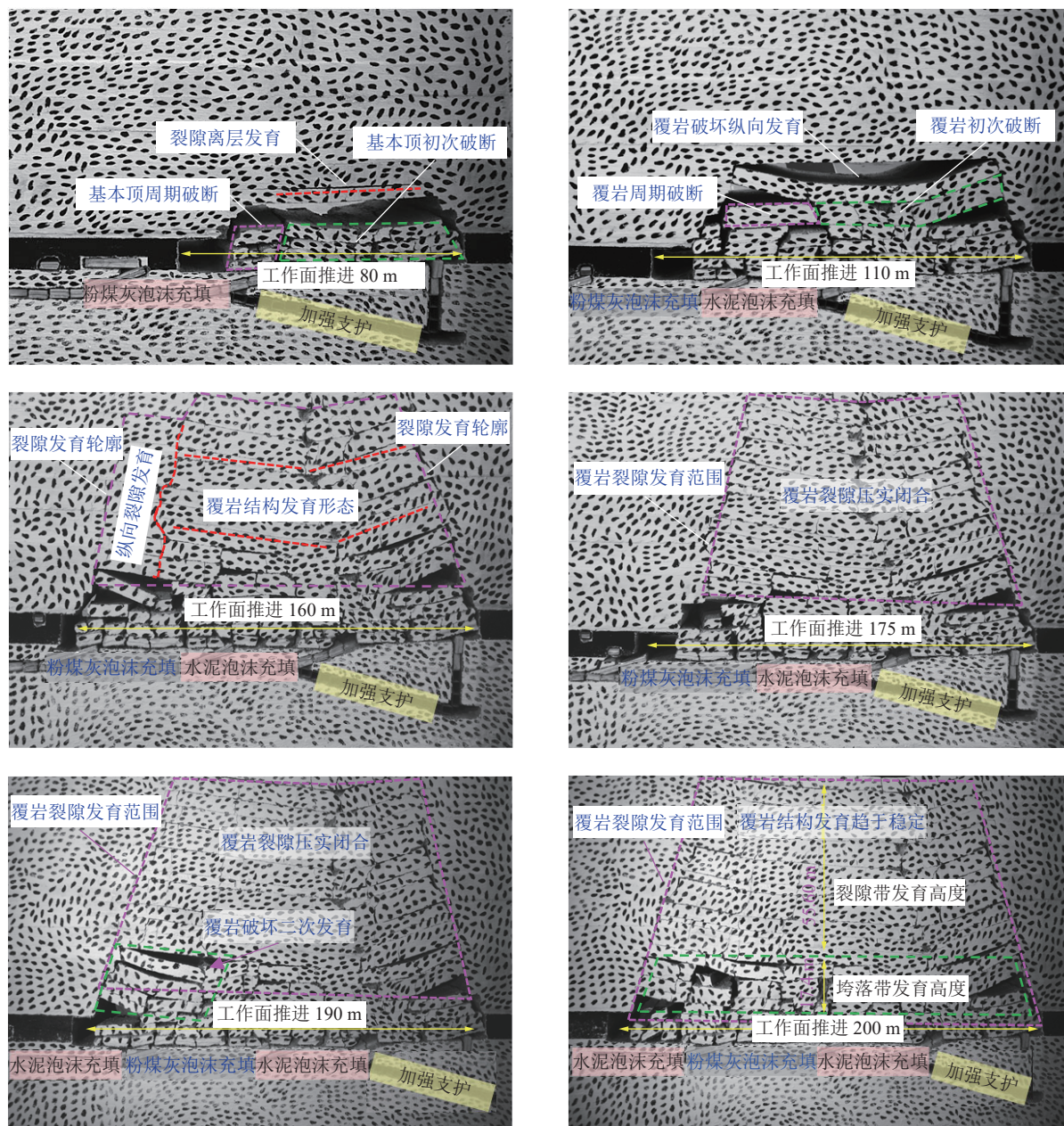


图 14 5316 工作面开采覆岩移动及围岩破坏特征

Fig.14 Characteristics of overlying rock movement and surrounding rock failure in 5316 working face

影响,不同层位空巷群围岩应力峰值及应力集中系数呈现差异性特征,整体随着距离煤层位置间距增大而变小,下伏空巷距离煤层大于 20 m 位置应力峰值接近原岩应力。

2)受工作面采动影响,同层空巷顶板最大下沉值介于 300 ~ 400 mm,如 5312 辅运巷、5310 运输巷顶板最大下沉值分别约 370、360 mm。煤层下伏空巷顶板最大下沉值介于 200 ~ 300 mm,如北翼辅运上山、5309 四号联络巷顶板最大下沉值分别约 290、220 mm。空巷围岩变形量主要受层位及角度等因素影响,总体规律表现为距离煤层越近,空巷变形量越大,空巷交叉处易产生应力集中,变形量较大,应重

点采取支护措施。

5 空巷群围岩控制效果现场实测分析

鲍店煤矿 5316 综放工作面位于五采区的南部边界,是五采区 3 号煤层第 13 个区段的工作面。工作面采高为 3.2 m,放煤高度为 5.51 m,采放比为 1 : 1.72,放煤方式采用双轮顺序多头等量放煤。工作面选用 ZF12000/18.5/35D 型液压支架控制顶板,支架数量为 156 架。受工作面采动影响程度较大的空巷主要采用煤基固废泡沫材料进行充填控制,充填设备主要包括 KFP-20 型发泡机、YBKE3-132S-4 型搅拌机、YBK3-160 m-4 型充填泵、 $\phi 51$ mm 充填

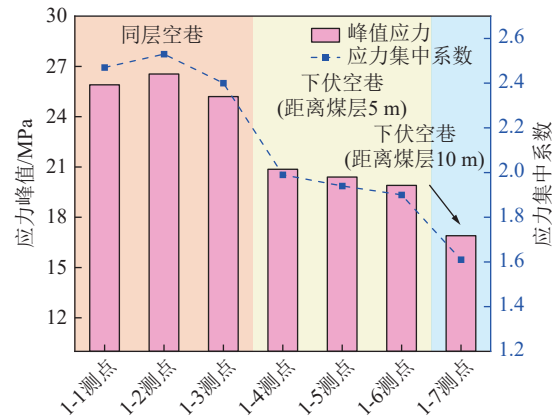


图 15 不同空巷围岩应力峰值及应力集中系数监测曲线
Fig.15 Monitoring curve of peak stress and stress concentration factor of surrounding rocks in different roadways

管路等,同时充填前施工密闭挡浆墙,防止跑浆漏料。充填材料配比根据空巷实际围岩控制效果进行选择,水泥浆水灰比 0.5~0.6,发泡倍数 3~4 倍,分次充填,确保浆料接顶。以 0307 一号联络巷、5312 辅顺联络巷、5312 运输联络巷、五采四输送带上山、5311 运输联络巷、5311 轨道联络巷、5310 运输联络巷为例,采用水泥泡沫材料充填,其充填体积分别为 829、2 800、2213、2 715、647、620、1 292 m³,北翼辅运上山采用粉煤灰泡沫材料,充填体积 2 310 m³。北翼辅运上山联络巷、北翼辅运上山、五采四输送带上山、五采四输送带一号联络巷等加强支护区域采用补强

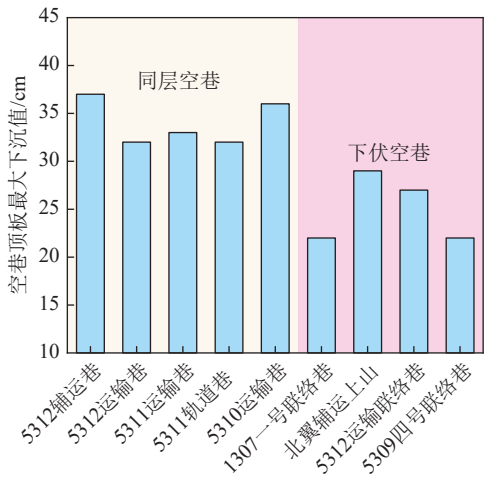
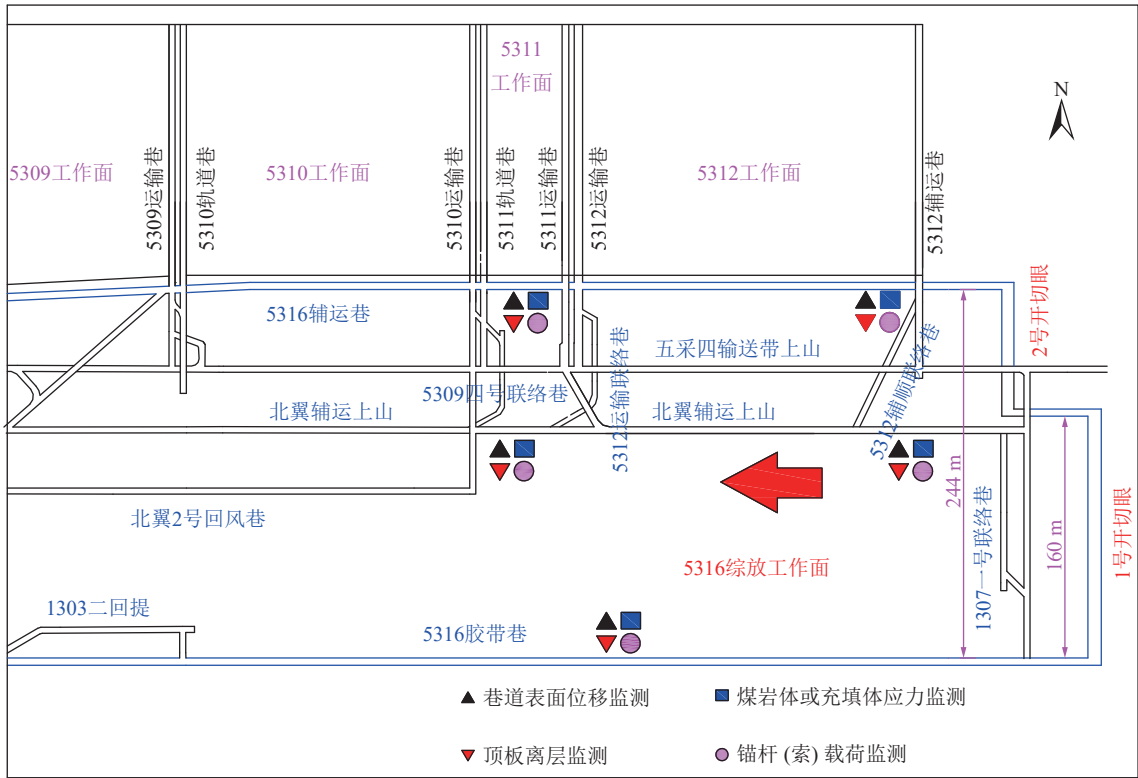


图 16 不同空巷顶板下沉量监测
Fig.16 Monitoring of roof subsidence in different roadways

锚索与 U 型钢梁支护,主要工艺为每隔 1 排施工 1 组 U 型钢梁锚索,布置在相邻 2 排钢带间(与原支护锚索错开),采用 29U 型钢加工,长 2.4 m,每根 3 个眼,拱形 U 型钢梁眼距 1 m,配合 3 根 $\phi 22$ mm、长 9 m 锚索施工,锚索间距 2.1(1.9) m、排距 1.8 m)。工作面回采过程中,为掌握工作面矿压显现规律及围岩控制效果,主要对巷道表面位移、煤岩体(充填体)应力、顶板离层及锚杆(索)载荷、支架工作阻力等指标进行监测,鲍店煤矿 5316 综放工作面空巷群围岩控制效果监测方案及井下部分实拍照片如图 17 所示。



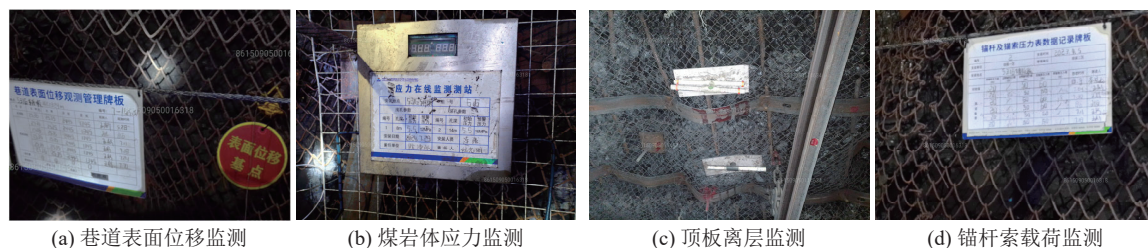


图 17 空巷群围岩控制效果监测方案及实拍

Fig.17 Monitoring plan and actual photos of the control effect of surrounding rock in the abandoned roadway group

5316 综放面回采过程中, 5316 辅运巷、北翼辅运上山、1307 一号联络巷围岩变形监测曲线如图 18 所示。5316 运输巷、5312 运输联络巷、五采四

输送带上山煤岩体及充填体应力变化曲线如图 19 所示。邻近五采四输送带上山、北翼辅运上山的工

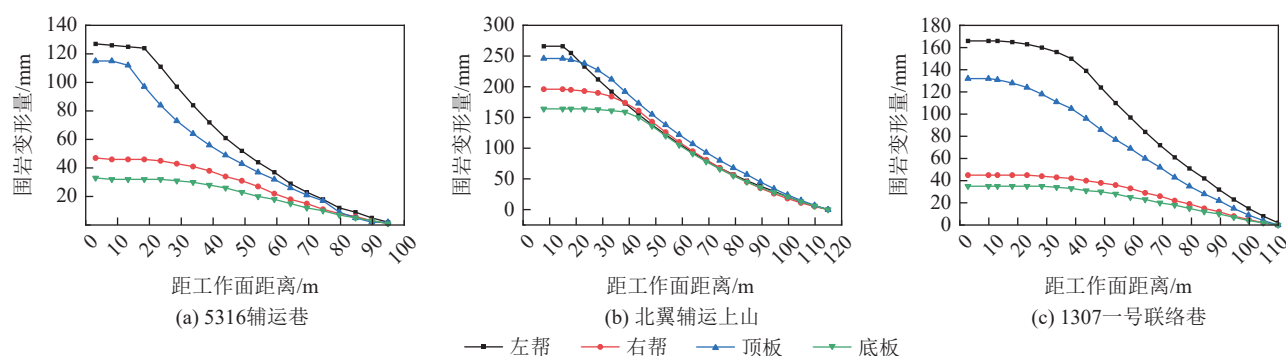


图 18 工作面巷道围岩变形量监测曲线

Fig.18 Monitoring curves of surrounding rock deformation in working face roadway

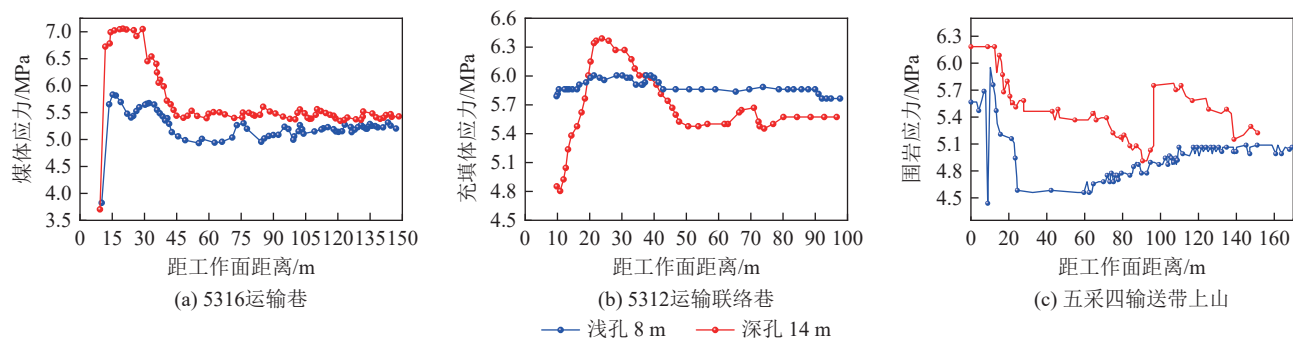


图 19 工作面巷道煤岩体或充填体应力监测曲线

Fig.19 Stress monitoring curve of coal rock mass or filling material in the working face roadway

由图 18—图 20 可知: 不同空巷围岩变形具有一定差异性, 5316 工作面辅助运输巷左帮及顶板变形量相对较大, 依次为 127、115 mm, 右帮与底板变形量均在 50 mm 以下。北翼辅运上山及 1307 一号联络巷顶底板变形量相对较大, 分别为 166、132 mm 及 266、246 mm, 整体空巷围岩变形量控制效果较好。煤岩体及充填体应力监测数据显示, 工作面推进过程中, 5316 运输巷煤体应力相对较大, 深孔应力峰值达到 7.0 MPa; 5312 运输联络巷及五采四输送带上

山充填体及围岩应力峰值相对较小, 约为 6.39、6.15 MPa。邻近五采四输送带上山、北翼辅运上山的 35 号和 50 号液压支架工作阻力监测值相对稳定, 普遍小于 10 000 kN。此外, 现场实测空巷顶板离层最大值普遍小于 40 mm, 锚杆(索)受力普遍小于 130 kN。现场结果表明, 空巷经过相应支护措施后, 工作面回采未受到较大影响, 空巷围岩整体控制效果较好, 实现了工作面安全高效生产, 井下空巷充填、加强支护及工作面回采实拍照片如图 21 所示。

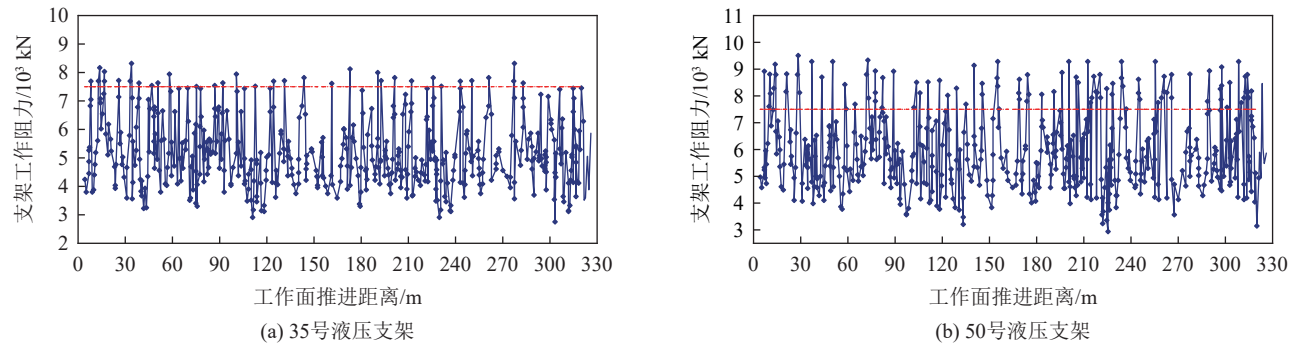


图 20 工作面支架工作阻力监测曲线
Fig.20 Monitoring curves of working resistance of working face support

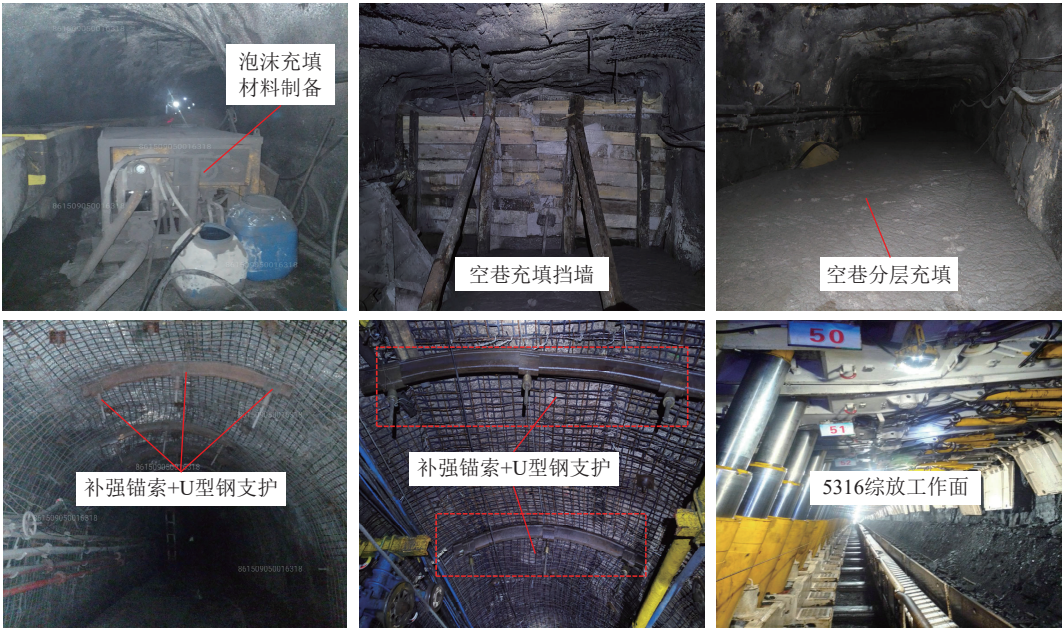


图 21 5316 工作面过空巷群现场实拍照片
Fig.21 Real time photo of 5316 working face passing through abandoned roadway group on site

6 结 论

1)研究了煤基固废泡沫充填材料性能,确定水泥泡沫充填材料优势配比为:发泡剂稀释倍数 20 倍、水灰比 0.5、稳泡剂掺量为 1%、发泡剂掺量 1.0%、石膏掺量 7% 时,水泥泡沫充填材料 28 d 试样强度可达 1.72 MPa;矽石粒径 0~0.3 mm、掺量 30% 时,矽石泡沫充填材料 28 d 试样强度可达 1.53 MPa;粉煤灰掺量 30% 时,粉煤灰泡沫充填材料 28 d 试样强度可达 1.13 MPa。材料试样孔隙率约 30%~35%,泡孔孔径越小、越均匀,其材料力学强度越高。

2)物理相似模拟结果表明,工作面推进距离为 60、80 m 时,基本顶经历初次破断与周期破断,工作面推进过程中覆岩整体呈“裂隙发育、裂隙扩展、裂隙压实闭合”的空间演化特征,开采至 200 m 时,覆岩结构发育趋于稳定,垮落带发育高度约 17.4 m,裂

隙带发育高度约 55.6 m。受工作面采动影响,不同层位空巷群围岩应力峰值变化范围为 16.9~26.5 MPa,应力集中系数变化范围为 1.61~2.53,同层空巷顶板最大下沉值介于 300~400 mm,下伏空巷顶板最大下沉值介于 200~300 mm,且空巷交叉处易产生应力集中,变形量较大。

3)分析了鲍店煤矿 5316 工作面空巷群赋存特征,提出了以煤基固废泡沫材料充填、补强锚索与 U 型钢梁加强支护为主的空巷群围岩控制技术方法,工作面开采期间空巷群围岩表面位移、煤岩体(充填体)应力、顶板离层及锚杆(索)载荷、支架工作阻力等现场监测数据显示,整体空巷围岩变形量控制效果较好,实现了工作面安全高效生产。

参考文献(References):

[1] 刘畅,杨增强,弓培林,等.工作面过空巷基本顶超前破断压架机

- 理及控制技术研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 1932–1940.
- LIU Chang, YANG Zengqiang, GONG Peilin, et al. Mechanism and control technology of supports crushing induced by main roof's breaking ahead of workface when crossing abandoned roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 1932–1940.
- [2] 刘跃东, 王东攀. 煤矿巷道柱式支护形式及新型泵充支柱研究应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(10): 2466–2484.
- LIU Yuedong, WANG Dongpan. Research and application of pillar support form and new pump-filled pillar in coal mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(10): 2466–2484.
- [3] 解嘉豪, 韩刚, 孙凯, 等. 邻空巷坚硬顶板预裂爆破防冲机理及效果检验[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2078–2091.
- XIE Jiahao, HAN Gang, SUN Kai, et al. Rockburst prevention mechanism and effect test of blast presplitting of hard roof in gob-side roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2078–2091.
- [4] 刘畅, 弓培林, 王开, 等. 复采工作面过空巷顶板稳定性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 314–322.
- LIU Chang, GONG Peilin, WANG Kai, et al. Roof stability for repeated mining workface passing through abandoned parallel gateway[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 314–322.
- [5] 何向宁, 陈勇, 秦征远. 综放工作面过空巷技术研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 124–130.
- HE Xiangning, CHEN Yong, QIN Zhengyuan. Application and study on technology of fully-mechanized top coal caving mining face passing through mine abandoned roadway[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 124–130.
- [6] 王俊杰, 曹建波, 吴怀国, 等. 泵送充填式支柱在大采高工作面过空巷支护应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(S2): 76–79.
- WANG Junjie, CAO Jianbo, WU Huaiguo, et al. Study on application of pumping filling pillar in supporting gob-crossing roadway in large mining height face[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(S2): 76–79.
- [7] 谢生荣, 李世俊, 魏臻, 等. 综放工作面过空巷时支架-围岩稳定性控制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 502–508.
- XIE Shengrong, LI Shijun, WEI Zhen, et al. Stability control of support-surrounding rock system during fully mechanized caving face crossing abandoned roadway period[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 502–508.
- [8] 罗文, 余伊河, 王文. 神东矿区综采工作面过同层位空巷强矿压显现机理及控制方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3335–3352.
- LUO Wen, YU Yihe, WANG Wen. Mechanism and control of strong mine pressure in fully mechanized mining face of Shendong mining area when crossing abandoned roadways in the same coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3335–3352.
- [9] 任晓鹏, 辛亚军, 杨俊鹏. 大采高过联巷空顶-煤柱-支架耦合承载与控制分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 251–262.
- REN Xiaopeng, XIN Yajun, YANG Junpeng. Roof-pillar-support collaborative load and control analysis in large-mining-height passing gateways[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 251–262.
- [10] 吕建光, 张慧友, 顾伟, 等. 复采巷道过空巷交叉段围岩控制技术[J]. 煤矿安全, 2024, 55(1): 176–184.
- LYU Jianguang, ZHANG Huiyou, GU Wei, et al. Surrounding rock control technology of crossing abandoned roadway intersection of compound mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(1): 176–184.
- [11] 王学坤. 工作面过空巷超前支承应力分布与煤柱稳定性研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(2): 195–201.
- WANG Xuekun. Study on distribution of advance supporting stress and stability of coal pillar during the working face passing through abandon roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(2): 195–201.
- [12] 张栋, 郭永红, 柏建彪, 等. 砌体梁结构下空巷围岩动态稳定机理及控制[J/OL]. 煤炭学报: 1–18 [2025–01–15]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1199>.
- ZHANG Dong, GUO Yonghong, BAI Jianbiao, et al. Dynamic stability mechanism and control of the abandoned roadway surrounding rock under voussoir beam structure[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1–18 [2025–01–15]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1199>.
- [13] 卢恒, 张传宝, 仵振华, 等. 综放工作面过空巷矿压显现规律及控制技术研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(6): 47–59.
- LU Heng, ZHANG Chuanbao, WU Zhenhua, et al. Study on ground pressure and control technology of a fully mechanized top coal caving longwall face passing a pre-driven roadway[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(6): 47–59.
- [14] 尹超宇, 冯光明, 高鹏, 等. 工作面过空巷围岩失稳机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 457–464.
- YIN Chaoyu, FENG Guangming, GAO Peng, et al. Research on instability mechanism of surrounding rock in stage of working face passing abandoned roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3): 457–464.
- [15] 刘畅, 张俊文, 杨增强, 等. 工作面过空巷基本顶超前破断机制及控制技术[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1411–1421.
- LIU Chang, ZHANG Junwen, YANG Zengqiang, et al. Mechanism of advance fracture of main roof and its control technology when workface crossing abandoned roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1411–1421.
- [16] 赵文光, 解振华. 基于 3DEC 的过空巷群采动来压突显现特征模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S1): 54–58.
- ZHAO Wenguang, XIE Zhenhua. Simulation study on outburst characteristics of mining pressure in goaf roadway group based on 3DEC[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S1): 54–58.
- [17] 李振华, 任梓源, 杜锋, 等. 大巷煤柱工作面过空巷矿压规律及控制技术[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 141–152.
- LI Zhenhua, REN Ziyuan, DU Feng, et al. Evolutionary pattern and control technology of mine pressure when mining face for coal pillars in main roadways passing through abandoned roadways[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 141–152.
- [18] 周海丰, 黄庆享. 大采高工作面过空巷群顶板破断及矿压规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 70–79.

- ZHOU Haifeng, HUANG Qingxiang. Study on the law of roof breakage and mine pressure passing large cross-section gob group in the fully-mechanized face with high mining height[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 70–79.
- [19] 刘炳权, 李正甲, 代双成, 等. 回收大巷煤柱工作面过空巷围岩破坏机理和控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 67–75.
- LIU Bingquan, LI Zhengjia, DAI Shuangcheng, et al. Failure mechanism and control technology of surrounding rock of coal pillar crossing abandoned roadway[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 67–75.
- [20] 张金龙, 胡成成, 古全忠. 无机材料充填技术在工作面过空巷中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S1): 51–53.
- ZHANG Jinlong, HU Chengcheng, GU Quanzhong. Application of inorganic material filling technology in goaf roadway of working face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S1): 51–53.
- [21] 徐青云, 宁掌玄, 朱润生, 等. 综放工作面充填过空巷顶板失稳机理及控顶研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3): 505–512.
- XU Qingyun, NING Zhangxuan, ZHU Runsheng, et al. Study on instability mechanism and top control of overfilled roof in fully mechanized caving face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(3): 505–512.
- [22] SHI S, MIAO Y C, WU H K, et al. The stress evolution of adjacent working faces passing through an abandoned roadway and the damage depth of the floor[J]. Energies, 2022, 15(16): 5824.
- [23] 邵春瑞, 李俊清, 赵宝友. 综放工作面过密集空巷群高水充填技术研究及应用[J]. 煤炭工程, 2022, 54(6): 57–63.
- SHAO Chunrui, LI Junqing, ZHAO Baoyou. High water filling technology for fully mechanized top-coal caving face crossing close-set abandoned roadway groups[J]. Coal Engineering, 2022, 54(6): 57–63.
- [24] 张国恩, 解振华, 史洪恺. 过空巷群支护技术与矿压显现规律特征分析[J]. 煤矿安全, 2020, 51(11): 248–252.
- ZHANG Guoen, XIE Zhenhua, SHI Hongkai. Support technology of passing through empty roadway group and mine pressure characteristics analysis[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(11): 248–252.
- [25] 牛海萍, 潘瑞凯, 于伟东, 等. 复采工作面空巷充填力学响应规律与控制效果研究[J]. 金属矿山, 2024(12): 165–172.
- NIU Haiping, PAN Ruikai, YU Weidong, et al. Study on mechanical response rule and control effect of abandoned roadway filling in remining face[J]. Metal Mine, 2024(12): 165–172.
- [26] LI Y, LEI M X, WANG H S, et al. Abutment pressure distribution for longwall face mining through abandoned roadways[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(1): 59–64.
- [27] 许延春, 杨扬. 大埋深煤层底板破坏深度统计公式及适用性分析[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 129–132.
- XU Yanchun, YANG Yang. Applicability analysis on statistical formula for failure depth of coal seam floor in deep mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 129–132.
- [28] 李昂, 杨钧皓, 王峰, 等. 深部高承压水多层结构底板破坏机理及应用研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 1–17 [2025–01–15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240920.1603.003.html>.
- LI Ang, YANG Junhao, WANG Feng, et al. Study on failure mechanism and application of deep high confined water multi-layer structure floors[J/OL]. Coal Science and Technology, 1–17 [2025–01–15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240920.1603.003.html>.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [30] 孙强. 充填开采再造隔水关键层机理及方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- SUN Qiang. Study on mechanism and method of reconstructing key water-resisting layer by filling mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [31] 李伟涛, 郭志彪, 何满潮, 等. 深部高应力软岩巷道失稳机理及补偿支护技术研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 1–18 [2025–01–15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240806.0947.002.html>.
- LI Weitao, GUO Zhibiao, HE Manchao, et al. Study on failure mechanisms and compensation support technology of deep high stress soft rock roadways[J/OL]. Coal Science and Technology, 1–18 [2025–01–15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240806.0947.002.html>.