

公路下煤层群开采地表移动变形防治研究

——以攀枝花煤矿为例

罗畅^{1,2}, 刘萍^{1*}, 贾毅超¹, 陈镇¹, 王子一¹, 敖以章³

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州禾泽工程管理咨询有限公司, 贵州 兴义 562400;
3. 贵州贵能投资股份有限公司 水城县鸡场乡攀枝花煤矿, 贵州 六盘水 553000)

摘要: 伴随着国内煤炭资源日益枯竭, 矸石堆积问题日益严重, “三下” 煤体绿色开采再次被重视。以贵州攀枝花煤矿 11071 工作面为工程背景, 通过室内试验、工艺优化、数值模拟等方法论证充填方案是否可行。室内试验得出矸石膏体材料的优化质量比为 6.5 : 1.4 : 2.1, 并采用 SEM 对内部微观分析发现, 水泥水化产生碱性环境, 激发粉煤灰活性, 充填强度有所增强。基于开采条件、充填设备等因素考虑, 对充填回采工艺进行优化设计, 回采支护环节与充填环节相互协作。数值模拟结果显示: 在 5[#] 煤层开采结束的条件下, 11071 工作面充填回采完成后, 位移场叠加作用不明显, 5[#] 煤层顶板位移量由最初的 37 mm 缓慢增加至 42.7 mm, 较未用充填开采而言, 充填开采可有效防治覆岩、地表移动变形。工程实践表明: 充填后的采面回采结束后, 沉降变形最大值为 43 mm, 水平变形最大值约为 2.53 mm/m, 符合公路路基移动变形的合理范围。

关键词: “三下” 开采、煤层群、充填开采、地表移动

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2023)04-0032-11

On Surface Movement and Deformation Prevention and Control in Coal Seam Group Mining Under Highways: A Case Study of Panzhihua Coal Mine

LUO Chang^{1,2}, LIU Ping¹, JIA Yichao¹, CHEN Zhen¹, WANG Ziyi¹, AO Yizhang³

(1. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Heze Engineering Management Consulting Co., Ltd., Xingyi 562400, China;

3. Panzhihua Coal Mine Jichang Township of Shuicheng County, Guizhou Guineng Investment Co., Ltd., Liupanshui 553000, China)

Abstract: With the exhaustion of domestic coal resources, the gangue accumulation is becoming more and more serious. Taking the 11071 working face of Panzhihua Coal Mine in Guizhou province as the engineering background, the feasibility of the filling scheme is proved through laboratory test, process optimization and numerical simulation. According to the laboratory test, the optimized mass ratio of gangue gypsum body material is 6.5 : 1.4 : 2.1. When SEM is used for internal microscopic analysis, it is found that cement hydration produces alkaline environment, stimulates the activity of fly ash and enhances the filling strength. It is also found that cement hydration produces an alkaline environment, activates the activity of fly ash and enhances the filling strength. Based on the mining conditions, filling equipment and other factors, the design of filling stoping process is optimized, and stoping support link and filling link cooperate. According to the numerical simulation, the superposition of displacement field is not obvious after the filling stoping of 11071 working face at the end of No.5 coal seam mining. The displacement of No. 5 coal seam roof slowly increases from 37 mm to 42.7 mm. Compared

with that without filling mining, filling mining effectively prevents overburden and surface movement and deformation. The engineering practice shows that the maximum settlement deformation is 43 mm and the maximum horizontal deformation is about 2.53 mm/m after the stoping of the filling surface, which is in line with the reasonable range of roadbed movement deformation.

Keywords: “three-under” mining; coal seams group; filling mining; surface movement

我国煤炭资源赋存现状是“西部多、中部富、东部区域枯竭”,今后很长时间内,煤炭保障供应主要依靠西部矿区^[1-2].随着开采强度不断增加,多数煤矿无法对“三下”煤层资源进行回采,从而迫使矿井储量越来越少,加剧了煤炭资源枯竭.“三下”煤层开采风险巨大,处理不当会造成地面塌陷、水土流失、建筑物破坏等.同时,煤矸石作为煤炭采选过程中的副产物,会进一步危害环境.基于当前现象,国内外学者对此进行一系列的研究.澳大利亚、波兰等国家研发水力充填系统与水砂充填技术,利用水力将废石、炉渣等充填材料输送至井下,逐步取代废石干式充填,并对 Rockenhill 等多个矿井资源及 Katowice, Bytom 等多个城市下压煤开展工业性试验^[3-4];GAO R 等^[5]通过弹塑性力学构建充填体单轴压缩的损伤本构方程与缺陷耦合本构方程,后通过实验加以验证;许家林、孙希奎、刘建功等^[6-8]基于煤炭工业绿色开采的理念,阐述了煤炭开采后采空区造成的一系列环境问题,综述了膏体充填、矸石固体充填等充填开采方法技术原理与工艺流程;白光超、李永亮等^[9-10]以新汶矿区充填开采工艺的研究展开延伸,总结多种采场条件下的开采工艺与适用条件;赵卫强、张鹏飞等^[11-12]采用数值模拟软件对“三下”开采进行研究,分析充填开采方案的可行性,并通过工程实践进行验证;冯国瑞、张新国等^[13-14]基于井下产出的矸石,混合粉煤灰做充填骨料,通过室内试验得出膏体的最优配比,并进行现场工艺设计,通过现场验证,充填效果良好.

因地质条件与开采条件的不同,针对各类矿井“三下”煤体的回采工艺有所不同.笔者以六盘水市攀枝花煤矿 11071 浅埋工作面为工程背景,对炮采工艺中采场支护操作进行改造,与充填工艺相互协作,为工作面的充填回采提供保障.通过室内试验对充填材料力学特性进行分析,为数值模拟与现场实践提供理论基础,通过数值模拟对 5[#]煤层开采后的 11071 工作面的充填效果进行论证,后通过工程实践,加以验证.

1 工程概况

研究区位于贵州省六盘水市攀枝花煤矿,矿区位于构造侵蚀而成的盆地凸起的杨梅树向斜盆地南翼,属构造侵蚀而成的中山地貌,地形高差较大,高程最大值为+1 755.73 m,最小值为+890 m,含煤地层一般出露标高为+1 100 m,上覆地层形成桌状山,山势险峻.当前采面为 11071 工作面,工作面长 100 m,走向长约为 300 m,该工作面位于 7[#]煤层中,平均厚度为 3.0 m,平均倾角 32°,该煤层的直接顶以泥质粉砂岩、粉砂岩为主,直接底板以粉砂质泥岩为主.11071 工作面对应地表上部为荒山陡坡和 S212 省道,该采面距 S212 省道最近点仅 60 m,且同区段 5[#]煤层已采,11071 采面对应地表如图 1 所示.预计 11071 采面回采会造成省道下沉破坏、地表陡坡下沉,进而出现山体垮塌造成地质灾害,因此矿方决定采用膏体充填开采,对浅部资源进行回采,采煤工艺选用炮采,方便与充填工艺相结合.煤岩体部分综合柱状图如图 2 所示.

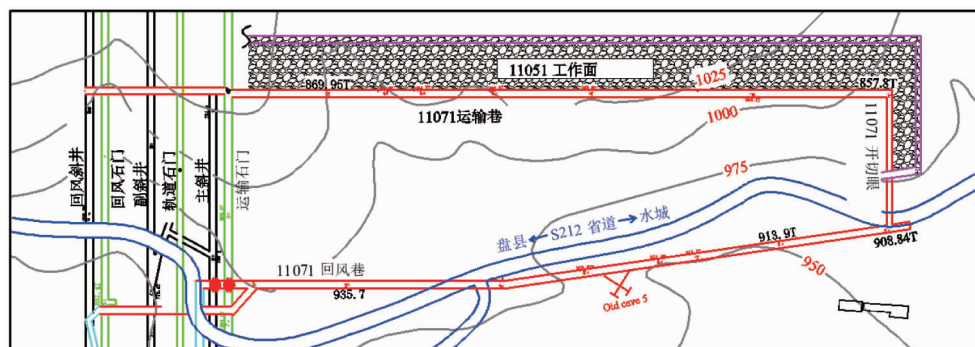


图 1 11071 采面对应地表

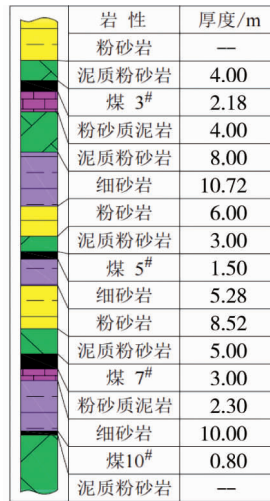


图 2 煤岩体部分综合柱状图

2 室内试验

2.1 试验原料

试验所用粗、细骨料均来源于工业排废物,粗骨料为煤矸石,煤矸石已破碎至 15 mm 以下,细骨料为粉煤灰,试验胶凝材料为 P.O.42.5 普通硅酸盐水泥,水为自来水.并对现场收集的煤矸石、粉煤灰及水泥进行 X-射线衍射分析,发现煤矸石、粉煤灰化学成分均以石英(SiO_2)为主,如图 3 所示.

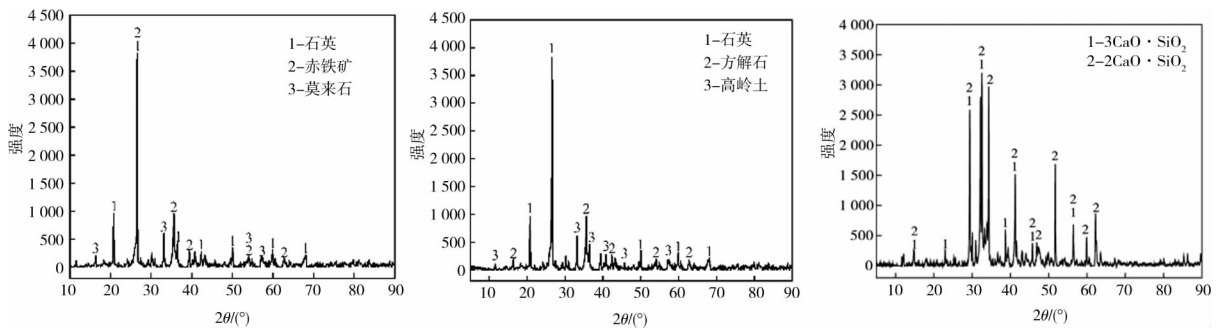


图 3 骨料与胶凝材料 XRD 光谱

2.2 试验设计

根据实验室前期的试验可确定料浆质量浓度在 78%~80%变化,水泥添加量为 10%~12%,粉煤灰的添加量为 21%~25%时,混合骨料胶凝充填材料具有良好的输送性能,后期强度增长明显.本文利用 SPSS 软件分析模块设计 3 因素、3 水平的正交试验,共设计 9 组配比,试验表采用 $L_9(3^4)$ 正交表.在试验优化设计中,3 个因素为料浆质量浓度、水泥添加量、粉煤灰添加量,分别用 A, B, C 表示,见表 1;胶结充填体在 3, 7, 28 d 的抗压强度作为试验结果,用 Y_{3d} , Y_{7d} , Y_{28d} 进行表示,探究不同试验因素及其交互作用对胶结充填体各龄期抗压强度的影响.

表 1 正交试验法的设计因素与水平

水平	因素		
	料浆质量浓度 A/%	水泥添加量 B/%	粉煤灰添加量 C/%
1	78	10	21
2	79	11	23
3	80	12	25

按试验设计,将充填物料称量好,通过机械搅拌,形成具有一定流动性的均匀料浆,注入规格为 70.7 mm×

70.7 mm×70.7 mm 的三联立方模具中,室内养护静置 24 h 后将试件从模具中取出,置于实验室恒温恒湿养护箱(温度 20℃±2℃,湿度 90%±5%),养护龄期为 3,7,28 d.采用 YAW-3000B 型微机控制电液伺服压力试验机(加载速率为 5 kN/s)测试养护龄期为 3,7,28 d 试块的单轴抗压强度.充填体单轴实验图见图 4.各养护龄期充填体试验结果见表 2.



图4 充填体单轴试验

表2 各养护龄期充填体试验结果

试验号	因素			试验强度/MPa		
	A/%	B/%	C/%	Y_{3d}	Y_{7d}	Y_{28d}
1(A ₁ B ₁ C ₁)	78	10	21	0.98	1.91	4.90
2(A ₁ B ₂ C ₂)	78	11	23	1.03	2.42	5.78
3(A ₁ B ₃ C ₃)	78	12	25	1.05	2.48	5.36
4(A ₂ B ₁ C ₂)	79	10	23	1.06	2.28	5.59
5(A ₂ B ₂ C ₃)	79	11	25	1.17	2.42	5.26
6(A ₂ B ₃ C ₁)	79	12	21	1.10	2.53	5.12
7(A ₃ B ₁ C ₃)	80	10	25	1.23	2.41	5.19
8(A ₃ B ₂ C ₁)	80	11	21	1.18	2.51	5.17
9(A ₃ B ₃ C ₂)	80	12	23	1.26	2.76	6.80

2.3 试验结果分析

极差分析法是用来判定影响因素主次的一种常用方法,通过各因素不同水平与判定指标的关系,判定各因素敏感性大小^[15].此次采用极差分析法对正交试验方案进行分析,分析不同养护龄期(3,7,28 d)各主控因素对充填时间强度的影响,具体结果见表 3.

表3 不同期龄充填体强度主控因素极差分析

养护龄期/d	研究指标	因素		
		料浆质量浓度 A	水泥添加量 B	粉煤灰添加量 C
3	K ₁	3.06	3.27	3.26
	K ₂	3.33	3.38	3.45
	K ₃	3.67	3.41	3.35
	k ₁	1.02	1.09	1.09
	k ₂	1.11	1.13	1.15
	k ₃	1.22	1.14	1.12
	极差	0.20	0.05	0.06
7	K ₁	6.81	6.6	6.95
	K ₂	7.23	7.35	7.31
	K ₃	7.68	7.77	7.46
	k ₁	2.27	2.2	2.32
	k ₂	2.41	2.45	2.44
	k ₃	2.56	2.59	2.49
	极差	0.29	0.39	0.17
28	K ₁	16.04	15.68	15.19
	K ₂	15.97	16.21	15.81
	K ₃	17.16	17.28	18.17
	k ₁	5.35	5.23	5.06
	k ₂	5.32	5.4	5.27
	k ₃	5.72	5.76	6.06
	极差	0.40	0.53	0.99

由表3中极差值可知:当期龄为3 d时,各主控因素的影响主次顺序为A>C>B,此时料浆质量浓度影响最大,说明早期水化反应较慢,随着料浆质量浓度增大,起支撑作用的粗骨料颗粒研石增多;当期龄为7 d时,各主控因素的影响主次顺序为B>A>C,此时水泥添加量影响最大,说明随着期龄的增长,水泥逐渐发生水化作用,提高充填体强度;当期龄为28 d时,各主控因素的影响主次顺序为C>B>A,此时粉煤灰添加量影响最大,说明粉煤灰受碱性环境的影响,活性成分得以激发,充填强度进一步提高.综合分析发现,为保证充填体的前期强度,料浆质量浓度选用水平3的80%,水泥添加量与粉煤灰添加量选用水平2或水平3都可.为保证充填体的后期强度,料浆质量浓度选用水平3,水泥添加量与粉煤灰添加量均选用水平3.因此,综合考虑膏体充填材料最优配比为料浆质量浓度80%,水泥添加量12%,粉煤灰添加量25%.

2.4 微观结构分析

按上述正交试验得到的最优配比(料浆质量浓度80%,水泥添加量12%,粉煤灰添加量25%)再次浇筑试块进行物理力学试验,测得各物理力学参数:密度为 $1\ 640\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,黏聚力为0.9 MPa,内摩擦角为 29° ,抗拉强度为1.1 MPa,泊松比为0.26,弹性模量为1.8 GPa.

为进一步了解充填体内部微观结构,采用扫描电子显微镜对试件观测,结合其抗压强度测试结果进行分析,扫描电镜(SEM)图如图5所示.充填材料早期强度增长迅速,随着养护时间的增加,后期强度增加较为缓慢,说明粉煤灰矿物成分中含大量玻璃相物质,具有一定的火山灰活性,水泥水化后营造出碱性环境,活性得以激发,充填强度得以提高,但过程需较长时间,因而后期充填强度变化呈缓慢增长趋势^[16].由图5可知,当养护期达到3 d时,水泥水化后产生碱性环境,粉煤灰表面被碱性薄膜溶液腐蚀;继续养护,当养护期达到7 d时,矿物逐渐分解,产生针状结晶;当养护期达到14 d时,针状结晶相互穿插,构成网状结构,附着在大颗粒表面;随着养护期的增加,水分不断被消耗,矿物质结晶成核,材料结构更加密实.

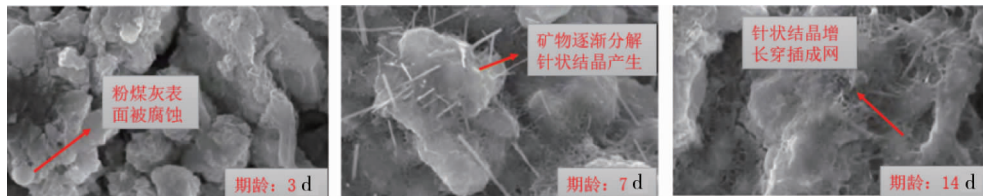


图5 扫描电镜(SEM)图

3 数值模拟

3.1 模型建立

基于矿井地质资料与室内试验测试,整理出煤岩层岩性及力学参数,以及最优配比充填体的力学参数,见表4.采用数值模拟软件FLAC^{3D},模拟5#煤开采后,7#煤层采用充填开采后对地表沉降的防治分析.模型尺寸:倾向(x)长度200 m,走向(y)长度390 m,高度(z)长度135 m,2个工作面长度均为100 m×300 m,如图6所示.为消除边界影响,5#煤层与7#煤层同区段开采时,距地表超过40 m,边界煤柱大于45 m,假设模型上方已处于地表,模型上方不赋垂直应力,对模型底部与四周进行约束,并在四周施加0.3 MPa等效水平应力,模型采用Mohr-Coulomb屈服准则.模拟前,在11071采面中心对应的地表区域设置2条监测线,即走向、倾向监测线,用于监测煤层开采造成的地表沉降或公路沉降数据.

表4 煤岩体力学参数

岩层	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/($^\circ$)
砂质泥岩	2 250	4.10	5.70	4.50	3.70	26
粉砂岩	2 460	8.13	10.83	3.74	1.85	38
细砂岩	2 540	1.60	2.70	2.10	1.00	34
煤	1 400	1.25	1.66	2.00	0.80	24
泥质粉砂岩	2 450	5.70	10.76	1.20	1.00	35
充填体	1 640	0.72	1.80	0.90	1.10	29

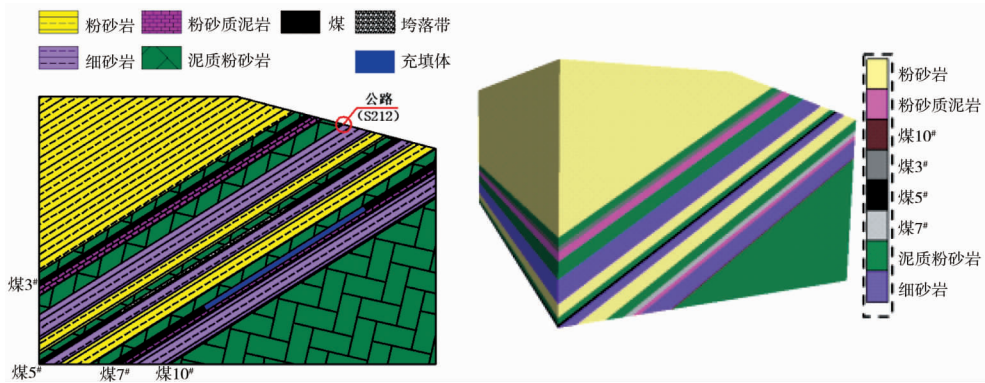


图 6 数值模拟模型

3.2 模拟设计与结果分析

模拟共分 4 步:

1) 模拟 5[#]煤层(11051 工作面)垮落回采;

2) 在步骤 1 的基础上,模拟 7[#]煤层(11071 工作面)垮落回采、充填开采这 2 种情况,并对其位移云图进行分析,结果见图 7;

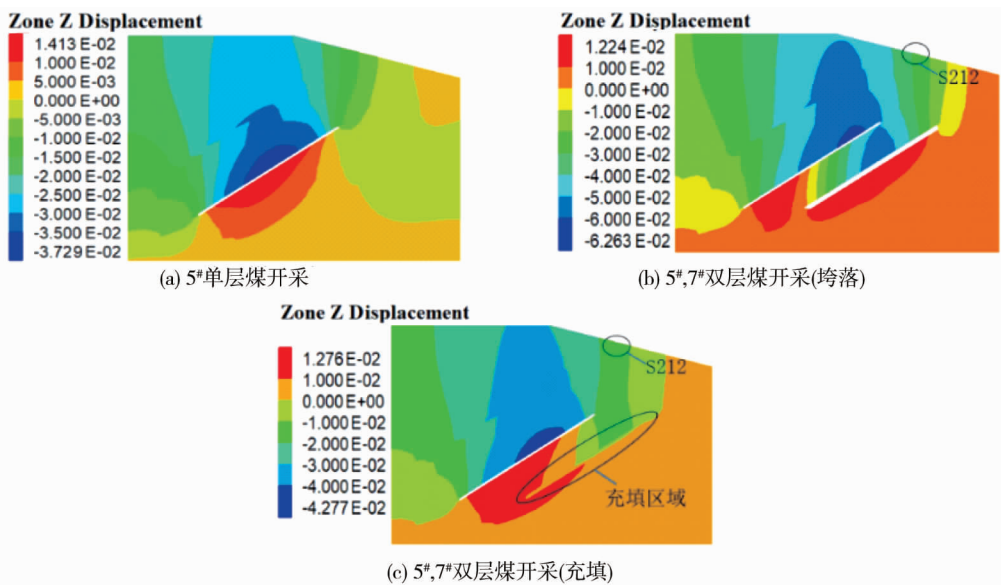


图 7 5[#],7[#]煤层开采沉降位移云图

3) 将充填回采过程划分为 5 个推进度,分别是推进 60,120,180,240,300 m,并分析地表沉降位移云图,结果如图 8 所示;

4) 分析地表走向、倾向的地表沉降监测数据,结果如图 9 所示。

由图 7 模拟情况可知:待 5[#]煤层工作面开采结束后,顶板最大位移量为 37 mm,地表最大位移量为 30 mm,公路对应区域最大位移量约为 10 mm;当 11071 采面未采用充填开采时,11071 工作面顶板最大位移量为 60 mm,因位移场的叠加作用,5[#]煤层顶板最大位移量为 62.6 mm,5[#]煤的底板由最初的底鼓转变为沉降,顶板位移场向右偏移,呈非对称,此时,公路对应区域的最大位移量约为 25 mm;当 11071 采面采用充填开采时,11071 工作面顶板最大位移量约为 30 mm,因位移场叠加作用不明显,5[#]煤层顶板最大位移量为 42.7 mm,仅局部底板由最初的底鼓转化为沉降,公路对应的区域最大位移量约为 15 mm,较垮落法治理采空区方案,降低 50%,说明充填开采对地表沉降防治有很好地控制作用。

由图 8 模拟情况可知:在 5[#]煤层开采结束的基础上,11071 工作面推进 60 m 时,中心区域沉降量最大,沉降值高达 30 mm;随着采面不断推进,当采面推至 180 m 时,沉降值区间不变,范围不断扩展,逐渐影响公路对应的位置;随着采面继续推进,推进至 240 m 时,沉降值区间再次变大,高达 40 mm,此后不再变

化,沉降范围也未发生改变,说明采场已达充分采动,充填体已被压实,公路对应位置最大沉降量在 15~20 mm,地表位移云图呈现“O”型圈形状,越靠近采场中心,地表沉降变形越大。

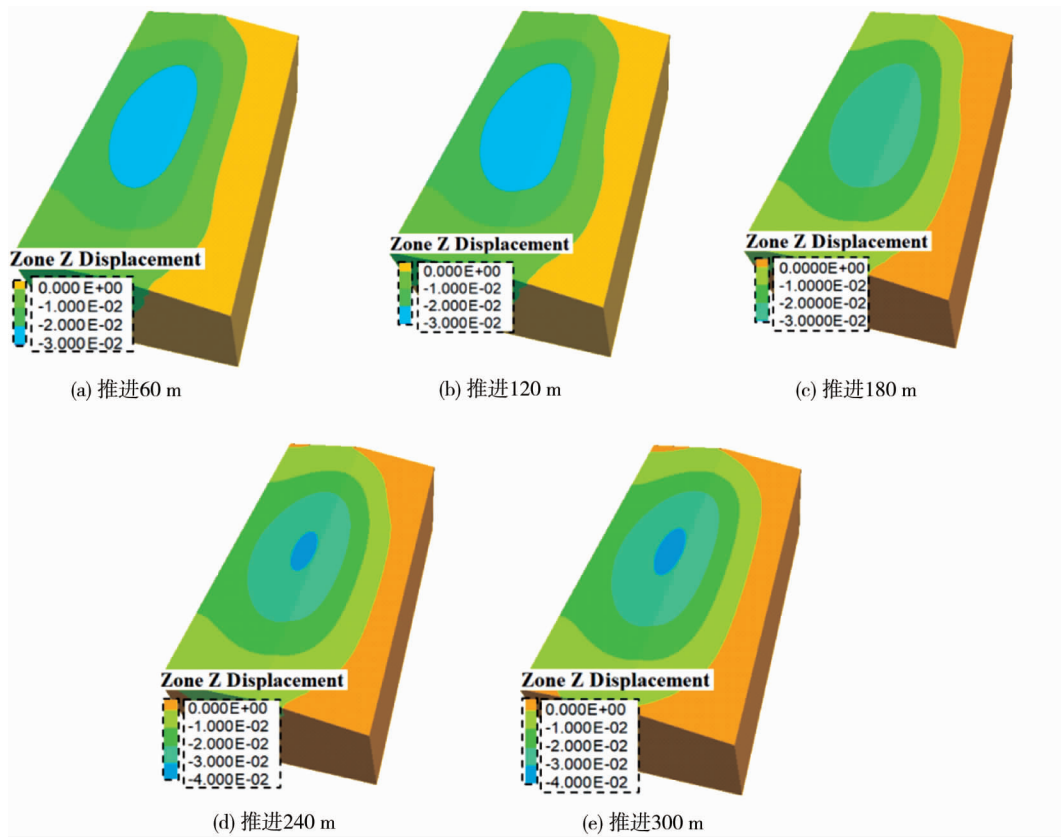


图8 11071 充填采面开采阶段地表沉降云图

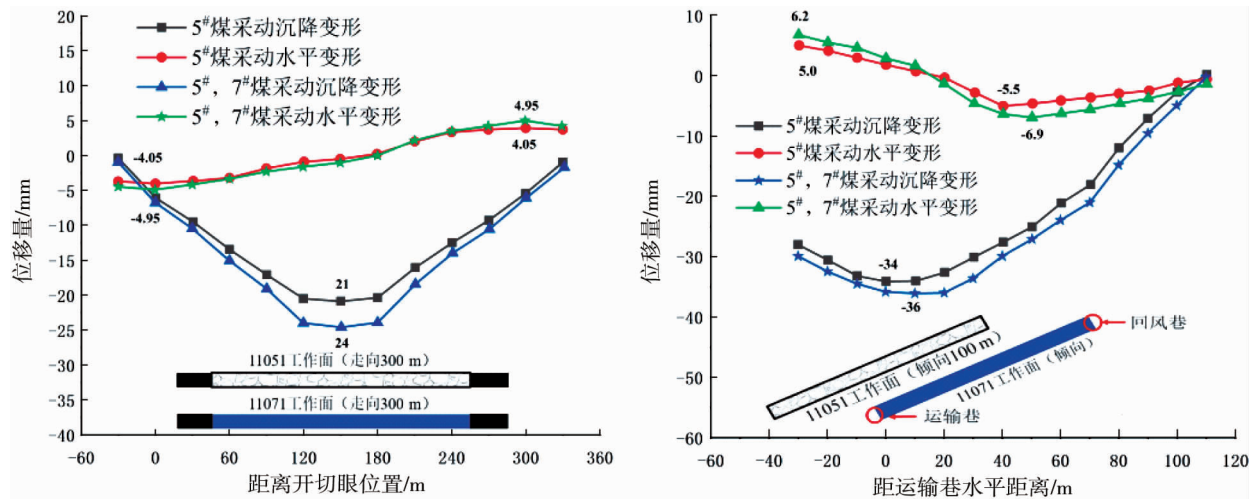


图9 11071 工作面地表移动变形曲线

由图9可知:受 11051 工作面开采影响,11071 工作面对应的地表区域变形较大,在 11071 充填工作面开采结束后,地表监测区域二次变形较小。走向方向上,当 11051 工作面开采结束后,沉降变形最大值为 21 mm,距离 11071 开切眼 120~180 m 处,水平变形的最大值为 4.05 mm,位于距 11071 开切眼 0 m 与 300 m 处,即开切眼与终止煤壁面;当 11071 充填工作面开采结束后,沉降变形最大值为 24 mm,较上次开采增加了 3 mm;开切眼 120~180 m 处,水平变形的最大值为 4.95 mm,位于距开切眼 0 m 与 300 m 处,即开切眼与终止煤壁面。倾向方向上,当 11051 工作面开采结束后,沉降变形最大值为 34 mm,距离 11071 运输巷 0~10 m 处,靠近 11051 工作面;水平变形的最大值为 5.5 mm,距离 11071 运输巷 40 m 处,靠近 11051

工作面回风巷;当 11071 充填工作面开采结束后,沉降变形最大值为-36 mm,增加了 2 mm,位于 11071 运输巷 10~20 m 处,水平变形的最大值为 6.9 mm,距离 11071 运输巷 50 m 处.显然,充填开采对地表沉陷防治效果较好,在 11051 工作面开采过后,11071 地表监测区域已经受到影响,随着 11701 工作面进行充填回采后,走向与倾向方向上的位移再次变形,变形范围增大,但变形增量较小.因此,走向方向上的垂直位移呈“盆”状,水平位移呈“S”型,倾向方向上垂直位移与水平位移都呈“勺”状,整体变形区域仍靠近 11051 工作面.

4 工程实践

4.1 充填系统

11071 工作面膏体充填工艺流程如图 10 所示,为兼顾后期充填体无煤柱开采,地面设置一套 HZS240C8H 混凝土搅拌站设备,站址选择在运输石门井口附近.混凝土搅拌站配备 4 个容积 220 m³ 储料罐,用于存放水泥和粉煤灰,矸石通过铲车装入骨料仓,通过 100 m 皮带运输进入搅拌站,膏体材料在搅拌机内充分搅拌均匀后,卸料进入输送泵推入输送管道,充填 11071 工作面采空区.输送管道选用材质为 16Mn、规格为 $\Phi 168 \times 10$ 无缝钢管,每根输送管道长 10 m,采用法兰盘连接至采面上出口,输送管路总长度为 650 m.充填设备与工程实践图如图 11 所示.

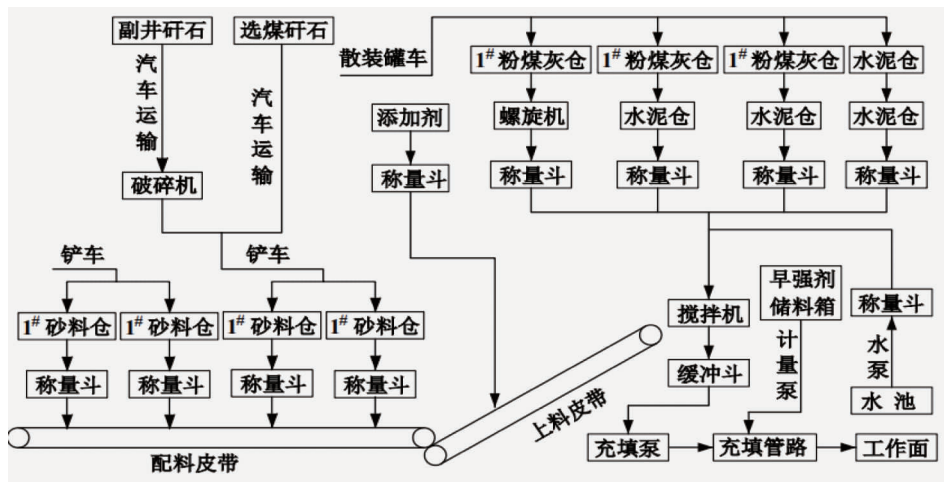


图 10 充填开采总体工艺流程

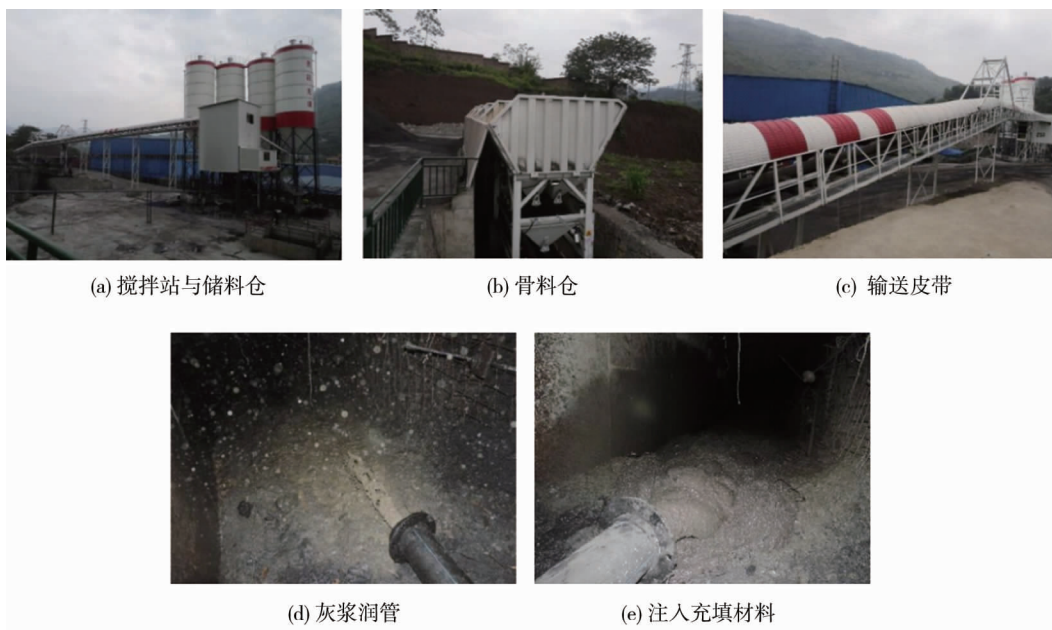


图 11 充填系统设备

工作面充填工艺包括准备工作、充填、养护、脱膜。准备工作包含工作面临时支护、支模、加固模板等^[17],以保证充填工作的正常进行。充填过程共分为两个阶段,第一阶段充填最大高度不超过 1 m,凝固 40 min,再从上往下进行第二次充填,保证充填材料均匀扩散,进而保证充填体强度。养护时间按 8 h 考虑,即膏体材料初凝时间 1 h,8 h 即可完成养护拆模。每次充填前、后都进行润管、冲洗处理,防止充填管道发生堵塞现象。管道输送工艺流程如图 12 所示,将管道输送工艺分为 3 步,分别是润管、正式充填、洗管,具体步骤如下:

1) 润管:①管道冲水,由搅拌站蓄水池的管路接入搅拌机下的储料斗中,加入 2 m³(约装满输送管 1/6)水量;②灰浆推水,在管道冲水的同时进行灰浆制备,在搅拌机内加水 1 m³、水泥 100 kg 搅拌均匀后通过储料斗、输送泵压入输送管。

2) 正式充填:按确定的比例制备膏体,润管阶段即将结束时(搅拌机内剩余 600 mm 灰浆时)注入第一批膏体,连续加工、输送至充填工作面。

3) 洗管:①灰浆推膏体,充填工作结束时,按前述方式加入水 2 m³、水泥 100 kg 搅拌成灰浆压入输送管;②水推灰浆,待充填阶段即将结束时(储料斗膏体剩余 600 mm 左右时)再次在搅拌机内注入一定量的水,通过储料斗、输送泵压入输送管,加水量根据现场观察确定,至输送管输出清水为止;③管道压风,压风清理输送管,直至输送管出口无水时结束,但不得少于 15 min。

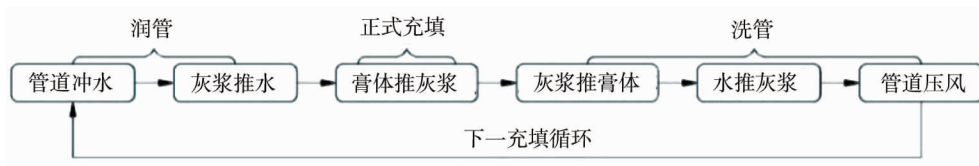


图 12 管道输送工艺流程

4.2 采煤工艺

基于地面充填系统,常规回采流程包括回采 1 m→单体铰接顶梁支护→回采 1 m→单体铰接顶梁支护→支模→充填这几个过程,每次循环所需时间为 48 h,其中膏体材料初凝 1h,8 h 即可完成养护拆模。工作面充填支护示意图如图 13,采面支护采用 DWX35-250/110 型悬浮式单体液压支柱配合 HDJA-1000 型铰接顶梁进行采面支护,“三·五排”控顶,充填式管理顶板,支柱排距为 1.0 m,支柱间距为 0.6 m,最大控顶距为 5.2 m,最小控顶距为 3.2 m,一次推进步距 1.0 m,充填步距 2 m。

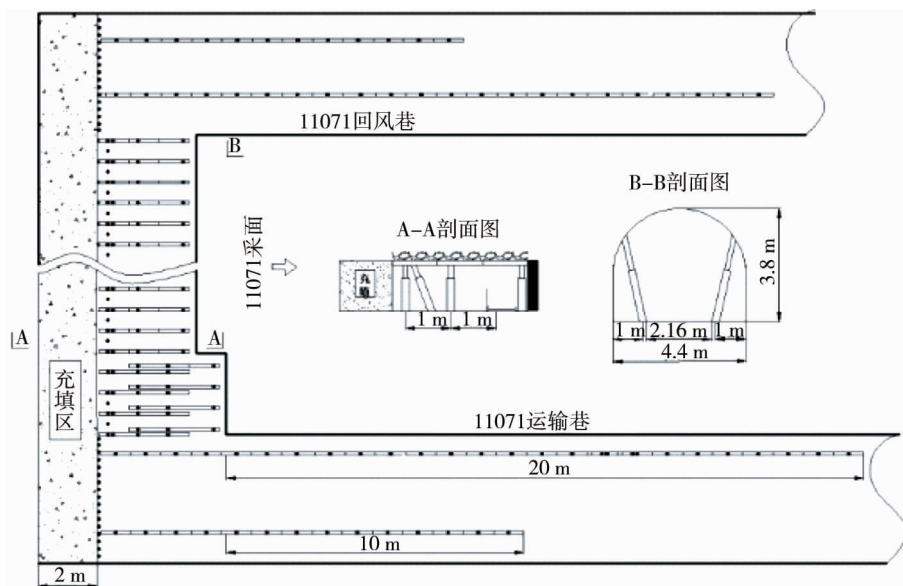


图 13 工作面充填支护

4.3 现场实测

为进一步验证 11071 采面的充填效果,沿 S212 省道布置 10 个地表沉降测点,即测点 P1~P10,随工作面的推进,地面人员定期对地表测点进行监测,直至工作面结束,并对沉降值较大的测点进行分析.测点位置坐标点见表 6.

表 6 公路各测点坐标

单位:m

观测点	坐标 X	坐标 Y	高程 H	终止坐标 X	终止坐标 Y	终止高程	X 位移	Y 位移	高程差
P1	7 622.920	71 347.788	974.791	7 622.887	71 347.816	974.781	-0.033	0.028	0.010
P2	7 607.929	71 342.086	975.415	7 607.891	71 342.123	975.402	-0.038	0.037	0.013
P3	7 588.929	71 326.593	975.669	7 588.899	71 326.617	975.645	-0.030	0.024	0.024
P4	7 578.454	71 300.480	975.557	7 578.426	71 300.521	975.520	-0.028	0.041	0.037
P5	7 569.597	71 276.804	975.892	7 569.571	71 276.810	975.852	-0.026	0.006	0.040
P6	7 557.212	71 260.576	977.035	7 557.186	71 260.592	976.992	-0.026	0.016	0.043
P7	7 509.220	71 240.053	979.598	7 509.191	71 240.090	979.576	-0.029	0.037	0.022
P8	7 373.598	71 149.363	992.420	7 373.564	71 149.400	992.417	-0.034	0.370	0.003
P9	7 350.873	71 136.917	994.342	7 350.835	71 136.956	994.326	-0.038	0.390	0.016
P10	7 274.923	70 958.793	1 004.368	7 274.877	70 958.822	1 004.352	-0.046	0.290	0.016

由表 6 可知:充填采面回采结束后,P5,P6 测点的沉降变形相对较大,最大值为 43 mm,小于 100 mm,说明采用充填开采有效地控制公路地表沉降;结合各测点位置关系,靠近充填采场中心区域的测点沉降变形相对较大,相反,越靠近采场边界,各测点的水平位移相对较大,作为相邻测点的 P8 与 P9,水平变形相对较大,两侧点间距约 30 m,该区间水平变形最大值约为 2.53 mm/m,小于 3 mm/m,符合《采空区公路设计与施工细则》中高速公路路基允许变形值.

5 结论

1) 水泥水化制造碱性环境,激发粉煤灰的活性,使得充填强度增高,与 SEM 观察到的现象相符,即矿物受碱性腐蚀,由针状逐渐变为网状,附着在大颗粒上,使充填时间更加密实.

2) 受地质因素、配套设备、支护方式等因素影响,工作面选用炮采方法,结合充填工艺对资源进行回采,支护操作按“三·五排”管理,推进 2 m,搭配钢模板对后方进行充填,依次循环,保证最大化回收煤炭资源的同时,相邻工作面避开应力集中区域,减轻巷道压力,避免片帮、渗水等问题.

3) 通过数值模拟可知,5[#]煤层开采后,顶板最大位移量为 37 mm,地表最大位移量为 30 mm,公路对应位置最大位移量约为 10 mm;7[#]煤层未采用充填开采方案时,位移场叠加作用明显.相反,7[#]煤层采用充填开采方案后,充填体对上覆岩层的支撑作用良好,使得位移场叠加作用不明显,5[#]煤层顶板最大位移量为 42.7 mm,局部底板由最初的底鼓转化为沉降,说明充填开采对地表沉降防治有很好地控制作用.

4) 采用充填开采可有效地控制公路地表沉降.

参考文献:

- [1] 国务院办公厅.能源发展战略行动计划(2014-2020)[R].北京:国务院办公厅,2014.
- [2] 杨方亮,许红娜.“十四五”煤炭行业生态环境保护与资源综合利用发展路径分析[J].中国煤炭,2021,47(5):73-82.
- [3] W.布得雷克,St.克诺特.在波兰城镇和工业建筑下面的开采问题[J].北京矿业学院学报,1958(1):3-12.
- [4] MUNJERI D. Prevention of subsidence using stowing methods[J]. Colliery Guardian, 1987,235:247-250.

- [5] GAO R, ZHOU K, YANG C. Damage mechanism of composite cemented backfill based on complex defects influence[J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2017,48(9):893-904.
- [6] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J]. *煤炭科学技术*, 2020,48(9):1-15.
- [7] 孙希奎. 矿山绿色充填开采发展现状及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2020,48(9):48-55.
- [8] 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.
- [9] 白光超. 多种采场条件下的充填开采适用性工艺研究及实践[J]. *煤炭工程*, 2014,46(9):61-63.
- [10] 李永亮, 路彬, 杨仁树, 等. 煤矿连采连充式胶结充填采煤技术与典型工程案例[J]. *煤炭学报*, 2022,47(3):1055-1071.
- [11] 赵卫强, 许保国. 村庄下充填开采的数值模拟分析[J]. *煤炭技术*, 2018,37(12):34-37.
- [12] 张鹏飞, 赵同彬, 傅知勇, 等. 矸石充填采空区顶板沉降规律及矸石承载特性分析[J]. *煤炭科学技术*, 2018,46(11):50-56.
- [13] 冯国瑞, 解文硕, 郭育霞, 等. 早期受载对矸石胶结充填体力学特性及损伤破坏的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022,41(4):775-784.
- [14] 张新国, 王华玲, 李杨杨, 等. 膏体充填材料性能影响因素试验研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2012,31(3):53-58.
- [15] 兰文涛, 吴爱祥, 王贻明, 等. 基于正交试验的半水磷石膏充填配比优化[J]. *中国有色金属学报*, 2019,29(5):1083-1091.
- [16] 高承, 尹升华, 李德贤, 等. 混合骨料胶结充填体的力学性能及其配比优化设计[J]. *矿业研究与开发*, 2022,42(1):17-22.
- [17] 胡炳南, 刘鹏亮, 崔锋, 等. 我国充填采煤技术回顾及发展现状[J]. *煤炭科学技术*, 2020,48(9):39-47.