



## 大海则煤矿煤矸石覆岩隔离注浆充填减排试验

马新青 轩大洋 许家林 杜星 宋香凯 武飞

### Experimental research on coal gangue overburden isolation grouting backfilling emission reduction in Dahaize Coal Mine

MA Xinqing, XUAN Dayang, XU Jialin, DU Xing, SONG Xiangkai, WU Fei

在线阅读 View online: [http://lks.xml-](http://lks.xml-journal.net/article/shaid/677ecf3d871f955b83bdf0fb9c0b6798370f504e0f9bb4a2a5af5c034b5976f9)

[journal.net/article/shaid/677ecf3d871f955b83bdf0fb9c0b6798370f504e0f9bb4a2a5af5c034b5976f9](http://lks.xml-journal.net/article/shaid/677ecf3d871f955b83bdf0fb9c0b6798370f504e0f9bb4a2a5af5c034b5976f9)

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 煤矿全生命周期绿色开采研究展望

Prospects for green mining research of coal mine life cycle

绿色矿山. 2023, (1):

#### 我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望

Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China

绿色矿山. 2023, (1):

#### 浅埋特厚煤层下向分层膏体充填开采覆岩变形控制机理

Shallow and extra-thick coal seam mining in the bottom layer paste filling overburden deformation control mechanism

绿色矿山. 2024, (3):

#### 残采区群柱遗煤资源绿色开采与地下空间开发技术挑战

Technical challenge of coal pillars resource green mining and underground space developing in the residual mining area

绿色矿山. 2023, (1):

#### 煤矿开采覆岩拱壳结构演化及其控制研究进展

Research progress on the evolution and control of overlying rock arch structure in coal mining

绿色矿山. 2024, 2(4): 357-367.



关注微信公众号，获得更多资讯信息

# 大海则煤矿煤矸石覆岩隔离注浆充填减排试验

马新青<sup>1</sup>, 轩大洋<sup>2</sup>, 许家林<sup>3</sup>, 杜星<sup>4</sup>, 宋香凯<sup>1</sup>, 武飞<sup>1</sup>

(1. 中煤天津设计工程有限责任公司 中煤(天津)生态环境科技有限公司, 天津 300120; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 4. 中煤陕西榆林能源化工有限公司, 陕西 榆林 719000)

**摘要:**大海则煤矿洗选后的大量矸石, 不仅增加了矿井运行成本, 还造成不同程度的地面环境污染, 特殊情况下, 矸石难以处理的问题还严重影响了矿井的正常生产组织。为解决煤矿堆存的大量矸石问题, 在大海则煤矿开展百万吨级煤矸石覆岩隔离注浆充填开采技术。详细分析了覆岩隔离注浆充填开采技术原理, 即在开采区域上方的地层中找出控制地表沉陷的关键层, 基于关键层不破断的原则设计注浆充填开采参数, 利用煤矸石等固废材料形成压实承载结构, 支撑关键层, 从而有效控制岩层及地表移动, 减少地面塌陷, 并结合大海则煤矿采后注浆的特殊条件与挑战, 对项目概况、工艺流程、注浆钻孔及充填参数等方案进行了研究, 并评估了项目实施的技术、经济、环境和社会效益。结果表明: 煤矸石覆岩隔离注浆充填技术有效减少了煤矸石的地面堆放量, 降低了对土地资源的占用和对环境的污染; 同时, 建成的百万吨级煤矸石处理系统, 最大日处理能力达4000 t, 随着外来矸石调配配套系统的建成, 年处理量稳定至150万 t, 提高了煤矸石的处理能力和效率, 实现了煤矸石的资源化利用。此外, 该技术将矸石的处理价格降低至60元以内, 具有较大的经济利益, 亦创新了一种“矸石不外排、保水开采、地表减沉”的绿色开采模式。这一成果不仅为类似地质条件下的矿山开采提供了新的技术路径, 也为矿区环境保护和可持续发展贡献了有效策略。

**关键词:**煤矸石; 覆岩隔离注浆; 充填减排; 绿色开采; 采动覆岩

**中图分类号:** TD823.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-3357(2025)03-0102-09

## Experimental research on coal gangue overburden isolation grouting backfilling emission reduction in Dahaize Coal Mine

MA Xinqing<sup>1</sup>, XUAN Dayang<sup>2</sup>, XU Jialin<sup>3</sup>, DU Xing<sup>4</sup>, SONG Xiangkai<sup>1</sup>, WU Fei<sup>1</sup>

(1. China Coal (Tianjin) Ecological Environment Technology Co. Ltd., China Coal Tianjin Design Engineering Co. Ltd., Tianjin 300120, China; 2. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. China Coal Shanxi Yulin Energy & Chemical Industry Co. Ltd., Yulin 719000, China)

**Abstract:** The large amount of coal gangue after washing in Dahaize Coal Mine not only increases the operation cost of the mine, but also causes environmental pollution on the ground to varying degrees. Under special circumstances, the problem of difficult treatment of coal gangue also seriously affects the normal production organization of the mine. In order to solve the problem of large amount of coal gangue stored in the coal mine, a million-ton coal gangue overburden isolation grouting backfilling mining technology is carried out in Dahaize Coal Mine. The principle of overburden isola-

收稿日期: 2025-05-09 策划编辑: 常明然 责任编辑: 常明然 DOI: 10.26940/j.cnki.10-1912/TD.2521

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374143)

作者简介: 马新青(1985—), 男, 山东泗水人, 高级工程师, 博士。E-mail: 287930903@qq.com

引用格式: 马新青, 轩大洋, 许家林, 等. 大海则煤矿煤矸石覆岩隔离注浆充填减排试验[J]. 绿色矿山, 2025, 3(3): 102-110.

MA Xinqing, XUAN Dayang, XU Jialin, et al. Experimental research on coal gangue overburden isolation grouting backfilling emission reduction in Dahaize Coal Mine[J]. Journal of Green Mine, 2025, 3(3): 102-110.



移动阅读

tion grouting backfilling technology is analyzed in detail, that is, the key layer to control surface subsidence is found in the stratum above the mining area, the grouting filling mining parameters are designed based on the principle of no breakage of the key layer, and the solid waste materials such as coal gangue are used to form a compacted bearing structure to support the key layer, so as to effectively control the movement of rock strata and surface, reduce ground collapse, and Combined with the special conditions and challenges of post-mining grouting in Dahaize Coal Mine, the project overview, process flow, grouting drilling and filling parameters are studied, and the technical, economic, environmental and social benefits of the project implementation are evaluated. The overburden isolation grouting backfilling technology of coal gangue overburden rock effectively reduces the ground stacking amount of coal gangue, reduces the occupation of land resources and the pollution to the environment. At the same time, the establishment of a million-ton coal gangue treatment system, the maximum processing capacity of gangue can reach 4 000 tons per day, with the completion of the foreign gangue allocation and repair system, the annual processing gangue can steadily reach 1.5 million tons, improving the treatment capacity and efficiency of coal gangue, and realizing the resource utilization of coal gangue. Moreover, reducing the treatment price of gangue to less than 60 yuan has great economic benefits, and also innovates a green mining model of "gangue is not discharged, water retention mining, and surface sinking is reduced". This achievement not only provides a new technical path for mining under similar geological conditions, but also contributes effective strategies for environmental protection and sustainable development of mining areas.

**Key words:** coal gangue; overburden isolated grouting; filling emission reduction; green mining; mining overburden rock

## 0 引 言

煤炭作为我国的主要能源之一,在经济发展中发挥着至关重要的作用。然而,传统的煤炭开采方式带来了一系列严重的环境问题<sup>[1-2]</sup>。其中,煤矸石堆积是一个突出问题。煤矸石是煤炭开采和洗选过程中产生的固体废弃物,随着煤炭产量的不断增加,煤矸石的排放量也日益增大。大量的煤矸石堆积不仅占用了大量的土地资源,还可能引发自燃,释放出二氧化硫、一氧化碳等有害气体,对大气环境造成污染<sup>[3-5]</sup>。此外,煤炭开采还会导致地表沉陷,地下煤炭采出后,上覆岩层失去支撑,发生移动和变形,进而引起地表沉陷<sup>[6-7]</sup>。地表沉陷会破坏地表的地形地貌,导致土地塌陷、裂缝,影响农田灌溉和耕种,破坏建筑物和基础设施,给矿区居民的生活和生产带来极大的不便。

大海则煤矿矿井生产能力由 15.0 Mt/a 调整为 20.0 Mt/a,煤矸石量将从 60~70 万 t/a 提高至 150 万 t/a 后,已有的充填系统能力将无法处理全部矿井矸石。同时《煤矸石综合利用管理办法》规定,新建(改扩建)煤矿及选煤厂应节约土地、防止环境污染,禁止建设永久性煤矸石堆放场(库),鼓励煤矸石井下充填<sup>[8-9]</sup>。因此需提高矸石处置能力,制备建材、高附加值化工产品、提取有用矿物元素等传统煤矸石处理方式,因煤矸石产量巨大,产品化等方式不足以改变其堆存量持续增加的趋势,同时无法满足环保和可持续发展的要求,因此需要寻找更加有效的处理方法<sup>[10-12]</sup>。

为解决上述问题,覆岩隔离注浆充填开采技术应运而生。该技术是一种新型的绿色开采技术,利用覆岩中的关键层,向关键层下方进行注浆充填,从而改变覆岩的应力分布和变形规律。该技术的核心在于利用注浆材料的充填作用,支撑覆岩,减缓覆岩移动向地表的传播,从而有效控制地表沉陷,同时可以消耗大量的煤矸石、粉煤灰等固体废弃物<sup>[13-15]</sup>。然而,覆岩隔离注浆充填技术具有一定的适用条件,传统上,该技术的主要注浆层位聚焦于硬岩层。在较多地区大多数以边采边注的方式开展覆岩隔离注浆充填开采技术<sup>[16-18]</sup>。随着采煤工程向更复杂的地质条件延伸,意味着以往针对硬岩层及边采边注发展起来的覆岩隔离注浆充填技术面临着新的挑战。当实际煤矿开采后留有大量采空区时,覆岩隔离注浆充填技术是否还能够有效实施。为此,笔者提出百万吨级煤矸石覆岩隔离注浆充填绿色开采技术,建立百万吨级煤矸石充填系统,并通过现场对大海则煤矿实施采后注浆进行验证,以期为采后注浆充填及大量处理煤矸石提供新的技术方法。

## 1 技术原理

在煤炭开采过程中,随着煤炭的采出,上覆岩层会发生移动和变形。当采高达到一定程度时,上覆岩层中会形成一定的隔离空间。覆岩隔离注浆充填技术的原理即基于采动覆岩卸荷膨胀累积效应对离层的抑制作用,从覆岩中找出对岩层移动与地表沉陷起

控制作用的关键层,在关键层破断前,通过地面钻孔对选定关键层下方实施高压注浆充填,产生“压下托上”作用,将关键层下方碎胀岩体压实形成支撑体,在采空区形成压实承载结构,有效支撑关键层,阻止关键层断裂,减缓覆岩的移动和变形,从而减少地表沉陷<sup>[19-21]</sup>。其技术原理如图1所示。

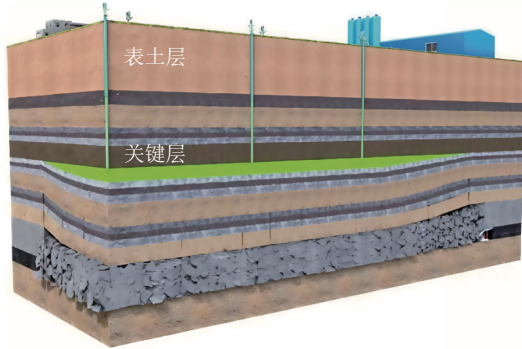


图1 覆岩隔离注浆充填技术原理示意

Fig.1 Schematic of overburden isolated grout injection

覆岩隔离注浆充填绿色开采技术已大面积推广应用,在安徽、山东、山西、河北、河南、江苏及内蒙古等地100余个工作面的建筑物下压煤开采中进行了应用,累计采出压煤8000余万t,处理固废达2000万t,节省搬迁费用近百亿元,取得了显著的经济与社会效益<sup>[22-25]</sup>。证明了其在不同地质条件和采矿场景下的有效性和可靠性,为大海则煤矿应用该技术提供了可借鉴的经验。

## 2 理论基础

### 2.1 注浆关键层判别

覆岩隔离注浆充填的关键在于准确确定控制地表沉陷的关键层。在煤系岩层中,由于成岩时间和矿物成分等不同,使各岩层在厚度和力学性质等方面总存在着不同程度的差别。一些较为坚硬的厚岩层在采动岩体的变形和破坏中起主要控制作用,它们以某种力学结构(从平面中看破断前为连续梁,破断后为砌体梁等)支承上部岩层,而它们的破断又直接影响采场矿压、岩层移动和地表沉陷<sup>[26-27]</sup>。因此,采场覆岩层中对覆岩活动全部或局部起控制作用的岩层称为关键层。关键层在采动覆岩中的作用,上可影响至地表,下可影响至采场和支架,内部影响到采动裂隙的分布和流体的运移,因而其一定程度上可作为采场矿压、岩层移动及地表沉陷、采动岩体内的流体运移研究统一的基础<sup>[20, 28-29]</sup>。

对大海则煤矿20201、20202工作面及周边范围内的ZK32-16、ZK32-19、ZK32-21钻孔关键层进行判别(图2),根据判别结果可知,地层中均具有3层以

上的关键层,且关键层以单层厚度大的砂岩为主,部分厚度可达100m以上。以大海则煤矿20201、20202工作面及周边范围ZK32-21钻孔关键层判别结果为例,覆岩内存在有10层关键层,关键层厚度为3.88~209.23m,平均厚度为51.46m。因此,该区域具备实施覆岩隔离注浆充填的关键层条件。

### 2.2 地层可注性研究

覆岩隔离注浆充填的对象是层状采动裂隙。研究表明,层状裂隙是在工作面开采过程中,随着岩层移动向上不断传播,在相邻岩层有不协调变形趋势时,岩层面产生拉、剪破坏后出现的力学现象<sup>[19-20, 30]</sup>。从这一机理来看,裂隙产生的位置必然是相邻岩性与厚度差异较大的层面,这正是关键层底界面的典型特征。因此,层状裂隙的产生位置应受控于覆岩关键层结构。

关键层理论研究表明,岩层移动由下往上成组运动,其动态过程受控于关键层的破断运动(图3)。当亚关键层1破断时,其所控制的上覆岩层组与之同步破断运动,并在亚关键层2下出现裂隙,如此往上发展直至主关键层下出现裂隙。由岩层移动的动态发育过程可知,层状裂隙主要出现在各关键层下;最大发育高度止于主关键层。

根据大海则煤矿20201、20202工作面及周边范围内的ZK32-16、ZK32-19、ZK32-21钻孔关键层的判别结果,对各钻孔的关键层赋存情况进行统计,详见表1,覆岩中存在多层关键层结构,通常在3层以上,部分厚度达100m以上。此外,在各关键层之间,主要赋存的是厚度相对较薄的岩层,表明关键层与其下方岩层之间会产生层状裂隙,能够成为受注空间,因此,地层具有可注性。同时,根据关键层判别结果,白垩系砂岩为覆岩的典型关键层,其下方具有较好的可注性。据此,确定注浆层位位于煤层顶板上方150m。

### 2.3 隔离层厚度校验

研究区域为侏罗白垩系地层结构,白垩系为巨厚砂岩,富水性强,水源丰富,下方隔水层相对单一,为侏罗系安定组泥岩,屏障脆弱,两系交界岩性差异大。加之开采高度与裂隙带高度大,关键层选择、导高计算及注浆层位选取均非常关键。因此,需要依据关键层判别结果,基于关键层位置预计区域内的导水裂隙带高度,本团队提出了“基于覆岩关键层位置的导水裂隙带高度预计新方法”,其准确性在多个矿区得到工程实践的验证,即可以粗略按7~10倍采厚( $M$ )来确定关键层破断裂隙贯通的临界高度。当关键层距开采煤层距离较近并小于 $(7\sim 10)M$ 时,该关键层破断裂隙会贯通成为导水裂隙,且受关键层控制而同步

层号	厚度/m	埋深/m	岩层岩性	关键层位置	硬岩层位置	岩层图例
28	29.5	29.50	松散层			人人人人
27	71.79	101.29	细砂岩			*** **
26	72.71	174.00	中砂岩			*** **
25	46.57	220.57	细砂岩			*** **
24	149.6	370.17	中砂岩	主关键层	第4层硬岩层	*** **
23	15.54	385.71	泥岩			*** **
22	12.55	398.26	粉砂岩			*** **
21	9.3	407.56	中砂岩			*** **
20	24.94	432.50	粉砂岩			*** **
19	1	433.50	中砂岩			*** **
18	19.51	453.01	粉砂岩			*** **
17	2.5	455.51	泥岩			*** **
16	30.79	486.30	粉砂岩	亚关键层	第3层硬岩层	*** **
15	1	487.30	泥岩			*** **
14	1.7	489.00	中砂岩			*** **
13	16.65	505.65	粉砂岩			*** **
12	6.64	512.29	细砂岩			*** **
11	10.28	522.57	砂质泥岩			*** **
10	22.23	544.80	中砂岩			*** **
9	2	546.80	泥岩			*** **
8	21.8	568.60	粉砂岩			*** **
7	5.4	574.00	中砂岩			*** **
6	32.73	606.73	粉砂岩	亚关键层	第2层硬岩层	*** **
5	2.9	609.63	细砂岩			*** **
4	9.38	619.01	中砂岩			*** **
3	9.85	628.86	砂质泥岩			*** **
2	1	629.86	细砂岩			*** **
1	16.08	645.94	粉砂岩	亚关键层	第1层硬岩层	*** **
0	6.78	652.72	煤层			*** **

(a) ZK32-16

层号	厚度/m	埋深/m	岩层岩性	关键层位置	硬岩层位置	岩层图例
28	20	20.00	细砂			
27	10	30.00	黄土			
26	149.6	179.60	粗砂岩			*** **
25	182.9	362.50	中砂岩	主关键层	第3层硬岩层	*** **
24	4.5	367.00	砂质泥岩			*** **
23	8.7	375.70	中砂岩			*** **
22	9.86	385.56	细砂岩			*** **
21	7.34	392.90	粗砂岩			*** **
20	8.7	401.60	细砂岩			*** **
19	4.9	406.50	砂质泥岩			*** **
18	5.58	412.08	中砂岩			*** **
17	12.26	424.34	砂质泥岩			*** **
16	4.86	429.20	细砂岩			*** **
15	0.8	430.00	砂质泥岩			*** **
14	9.8	439.80	中砂岩			*** **
13	4.1	443.90	粉砂岩			*** **
12	4.6	448.50	中砂岩			*** **
11	24.3	472.80	粉砂岩			*** **
10	5.95	478.75	细砂岩			*** **
9	7.2	485.95	粉砂岩			*** **
8	17.05	503.00	细砂岩			*** **
7	8.69	511.69	中砂岩			*** **
6	17.41	529.10	粉砂岩			*** **
5	4.42	533.52	中砂岩			*** **
4	71.48	605.00	粉砂岩	亚关键层	第2层硬岩层	*** **
3	8	613.00	细砂岩			*** **
2	24.6	637.60	中砂岩	亚关键层	第1层硬岩层	*** **
1	1.06	638.66	粉砂岩			*** **
0	7.35	646.01	煤层			*** **

(b) ZK32-19

层号	厚度/m	埋深/m	岩层岩性	关键层位置	硬岩层位置	岩层图例
28	13	13.00	细砂			
27	3	16.00	黄土			
26	209.23	225.23	细砂岩	主关键层	第10层硬岩层	*** **
25	148.52	373.75	中砂岩	亚关键层	第9层硬岩层	*** **
24	17.1	390.85	砂质泥岩			*** **
23	31.83	422.68	粉砂岩	亚关键层	第8层硬岩层	*** **
22	5.62	428.30	中砂岩			*** **
21	12.8	441.10	细砂岩			*** **
20	10.4	451.50	粉砂岩			*** **
19	1	452.50	细砂岩			*** **
18	5.11	457.61	粉砂岩			*** **
17	1.29	458.90	细砂岩			*** **
16	8.52	467.42	粉砂岩			*** **
15	4.7	472.12	中砂岩			*** **
14	3.58	475.70	粉砂岩			*** **
13	5.1	480.80	中砂岩			*** **
12	17.7	498.50	细砂岩			*** **
11	1.1	499.60	中砂岩			*** **
10	41.4	541.00	粉砂岩	亚关键层	第7层硬岩层	*** **
9	4	545.00	细砂岩			*** **
8	22.47	567.47	粉砂岩	亚关键层	第6层硬岩层	*** **
7	26.17	593.64	粗砂岩	亚关键层	第5层硬岩层	*** **
6	9.86	603.50	泥岩			*** **
5	8.85	612.35	中砂岩			*** **
4	21.65	634.00	粉砂岩	亚关键层	第4层硬岩层	*** **
3	4.5	638.50	细砂岩	亚关键层	第3层硬岩层	*** **
2	4.9	643.40	粗砂岩	亚关键层	第2层硬岩层	*** **
1	3.88	647.28	粉砂岩	亚关键层	第1层硬岩层	*** **
0	6.87	654.15	煤层			*** **

(c) ZK32-21

图 2 覆岩关键层判别结果

Fig.2 Identification results of key layers of overburden rock

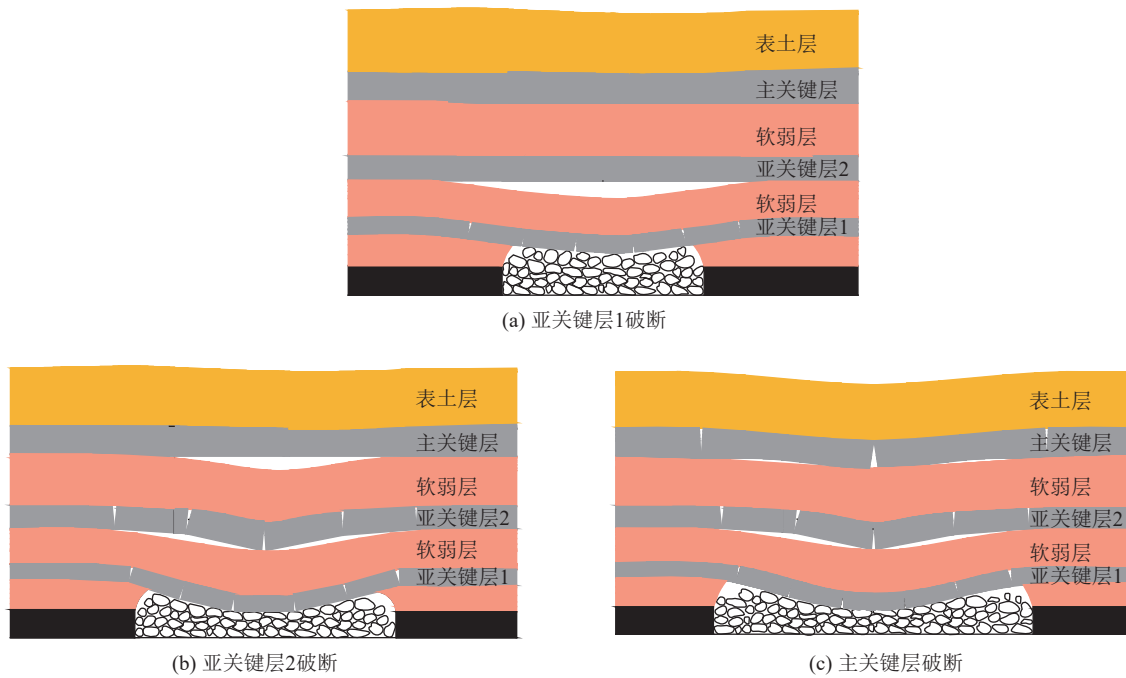


图3 覆岩移动动态过程及层状裂隙示意

Fig.3 Schematic diagram of the dynamic process of overburden rock movement and layered fractures

表1 20201、20202工作面及周边钻孔关键层赋存统计

Table 1 Statistics on the occurrence of key layers in the 20201 and 20202 working faces and surrounding boreholes

ZK32-21			ZK32-16			ZK32-19		
编号	厚度/m	均厚/m	编号	厚度/m	均厚/m	编号	厚度/m	均厚/m
10	209.23							
9	148.52							
8	31.83							
7	41.4							
6	22.47							
5	26.17	51.46			57.3			103.75
4	21.65		4	149.6				
3	4.5		3	30.79		3	182.9	
2	4.9		2	32.73		2	71.48	
1	3.88		1	16.08		1	24.6	

破断的上覆岩层破断裂隙也会贯通成为导水裂隙。以 ZK32-21 钻孔判别结果为例,当煤层开采后,在煤层上覆岩层形成的导水裂隙带最大高度为 79.81 m。

从计算结果分析可知,在煤层开采后上覆岩层形成的导水裂隙带最大高度 53.64~79.81 m。注浆层位于煤层顶板上方 150 m。同时由于该区域煤层埋深达到了 639~647 m,注浆层位距导水裂隙带仍有 70.19~96.36 m 隔离间距,因此,隔离层厚度充足,具备实施覆岩隔离注浆充填的安全条件。

### 2.4 技术适应性确定

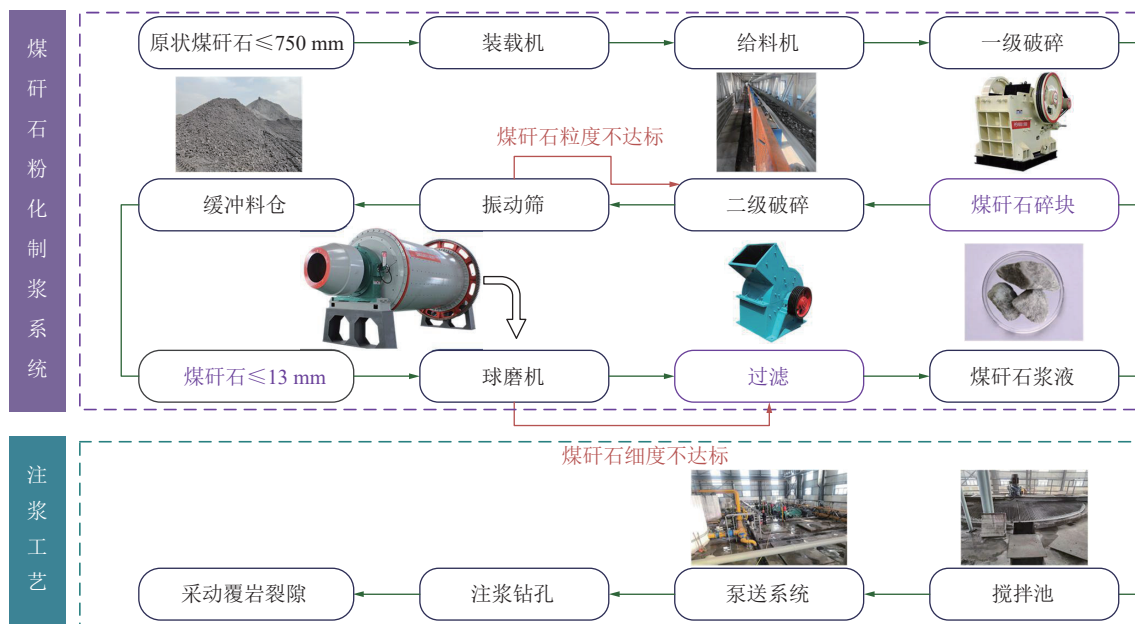
基于覆岩隔离注浆充填开采技术原理及其基本

适用条件,结合大海则煤矿基本条件,对大海则煤矿采用覆岩隔离注浆充填技术的适用性进行分析。

#### 2.4.1 可注性

从采区条件来看,大海则煤矿满足覆岩隔离注浆充填技术所需要的条件。2号煤层平均厚度 7 m,煤层厚度相对较大,对于覆岩隔离注浆充填而言相对优越。工作面埋深普遍较大,达到 547.95~654.95 m,平均 601.45 m,松散层平均厚 25 m,基岩厚度达 541.63~648.63 m,平均 595.13 m,覆岩中存在多层关键层(层数最大达到 10 层、单层厚度可达 30 m),为实施注浆充填提供了极为有利的条件。



图5 煤矸石粉化制浆及注浆充填工艺流程<sup>[19]</sup>Fig.5 Coal gangue slurry making and grouting filling proces<sup>[19]</sup>

塌陷和裂缝对土地资源的破坏,保护了农田和生态系统,减少了对环境的影响,实现了煤炭资源的绿色开采。

#### 4 结 论

1) 阐述了覆岩隔离注浆充填开采技术的原理,分析了采后注浆在大海则煤矿的特殊条件与场景。即利用岩移过程中覆岩内形成的离层空间,从钻孔向离层空间中充填矸石等材料来支撑覆岩,减缓覆岩移动向地表的传播,有效减缓地表沉降。

2) 结合大海则煤矿采后注浆的特殊地质条件分析研究了覆岩隔离注浆充填技术方案,实现了技术的因地制宜,为后续复杂地质条件注浆提供了新的思路和方法。

3) 采用了覆岩隔离注浆充填技术并建立百万吨级煤矸石处理系统,突破了传统矸石处置技术效率低、成本高的瓶颈,有效解决了大量煤矸石堆放难题并详细介绍了大海则煤矿煤矸石充填项目的工艺流程和充填效果。

#### 参考文献(References):

[1] 许家林. 煤矿绿色开采[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.  
 [2] 王双明, 刘浪, 朱梦博, 等. “双碳”目标下煤炭绿色低碳发展新思路[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 152-171.  
 WANG Shuangming, LIU Lang, ZHU Mengbo, et al. New way for green and low-carbon development of coal industry under the target of “dual-carbon” [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 152-171.

[3] 马骏, 郁钟铭, 舒仕海, 等. 煤矸石对矿区的环境危害及治理措施[J]. 煤炭工程, 2015, 47(10): 70-73.  
 MA Jun, YU Zhongming, SHU Shihai, et al. Environmental hazards of coal gangue and the control measures[J]. Coal Engineering, 2015, 47(10): 70-73.  
 [4] 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.  
 XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 1-15.  
 [5] 顾霖骏, 申艳军, 王念秦, 等. 煤矸石堆积区土壤重金属潜在危害评价及污染特征[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(5): 942-949.  
 GU Linjun, SHEN Yanjun, WANG Nianqin, et al. Pollution characteristics and potential risk assessment of heavy metals in soil of coal gangue accumulation areas[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(5): 942-949.  
 [6] 王金庄, 康建荣, 吴立新. 煤矿覆岩离层注浆减缓地表沉降机理与应用探讨[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(4): 331-334.  
 WANG Jinzhuang, KANG Jianrong, WU Lixin. Discussion on mechanism and application of grouting in SeparatedBed to reduce surface subsidence induced by coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(4): 331-334.  
 [7] XUAN D Y, ZHANG M W, LI J, et al. Experimental study on the diffusion radius of modified slurry used in longwall overburden isolated grouting[J]. Geofluids, 2023, 2023(1): 7195779.  
 [8] 卞正富, 金丹, 董霁红, 等. 煤矿矸石处理与利用的合理途径探讨[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 132-136.  
 BIAN Zhengfu, JIN Dan, DONG Jihong, et al. Discussion on rational ways for coal gangue treatment and utilization[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(2): 132-136.  
 [9] 张世鑫, 刘冬, 邵飞, 等. 煤矸石综合利用工艺探索[J]. 洁净煤技术,

- 2013, 19(5): 92–95, 122.
- ZHANG Shixin, LIU Dong, SHAO Fei, et al. Comprehensive utilization of coal gangue[J]. *Clean Coal Technology*, 2013, 19(5): 92–95, 122.
- [10] 贾建慧, 马宁, 董阳, 等. 煤矸石综合利用研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(S1): 36–45.
- JIA Jianhui, MA Ning, DONG Yang, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gangue[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(S1): 36–45.
- [11] 赵鲁涛, 李丰荣, 李照源, 等. 中国绿色低碳经济政策: 进展与展望[J]. *绿色矿山*, 2023(1): 128–137.
- ZHAO Lutao, LI Fengrong, LI Zhaoyuan, et al. China's green and low-carbon economic policies: Progress and prospects[J]. *Journal of Green Mine*, 2023(1): 128–137.
- [12] 汪天宇, 徐万茹, 刘衡秋, 等. 山西斜沟煤矿煤矸石基础性质与综合利用途径研究[J]. *中国煤炭地质*, 2024, 36(7): 55–62.
- WANG Tianyu, XU Wanru, LIU Hengqiu, et al. Study on the basic nature and comprehensive utilization of coal gangue in Shanxi Xiegou coal mine[J]. *Coal Geology of China*, 2024, 36(7): 55–62.
- [13] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵. 充填采煤技术现状与展望[J]. *采矿技术*, 2011, 11(3): 24–30.
- XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing. Present situation and prospect of filling coal mining technology[J]. *Mining Technology*, 2011, 11(3): 24–30.
- [14] XUAN D Y, XU J L. Grout injection into bed separation to control surface subsidence during longwall mining under villages: Case study of Liudian coal mine, China[J]. *Natural Hazards*, 2014, 73(2): 883–906.
- [15] 许家林, 倪建明, 轩大洋, 等. 覆岩隔离注浆充填不迁村采煤技术[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(12): 8–11.
- XU Jialin, NI Jianming, XUAN Dayang, et al. Coal mining technology without village relocation by isolated grout injection into overburden[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(12): 8–11.
- [16] 许家林, 钱鸣高. 覆岩注浆减沉钻孔布置的试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 1998, 27(3): 276–279.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Study on layout of grouting boreholes for retarding stratum subsidence[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1998, 27(3): 276–279.
- [17] 杨伦. 对采动覆岩离层注浆减沉技术的再认识[J]. *煤炭学报*, 2002, 27(4): 352–356.
- YANG Lun. Re-understand the technology of reducing the subsidence due to mining by injecting grouts into separated beds in overlying disrupted strata by extraction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(4): 352–356.
- [18] 朱卫兵, 许家林, 赖文奇, 等. 覆岩离层分区隔离注浆充填减沉技术的理论研究[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(5): 458–462.
- ZHU Weibing, XU Jialin, LAI Wenqi, et al. Research of isolated section-grouting technology for overburden bed separation space to reduce subsidence[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(5): 458–462.
- [19] 轩大洋, 许家林, 王秉龙. 覆岩隔离注浆充填绿色开采技术[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4265–4277.
- XUAN Dayang, XU Jialin, WANG Binglong. Green mining technology of overburden isolated grout injection[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4265–4277.
- [20] 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.
- [21] 许家林, 秦伟, 轩大洋, 等. 采动覆岩卸荷膨胀累积效应[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 35–43.
- XU Jialin, QIN Wei, XUAN Dayang, et al. Accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 35–43.
- [22] 许家林, 朱卫兵, 轩大洋, 等. 岩层控制的全柱状学术思想与实践[J]. *煤炭学报*, 2025, 50(1): 166–179.
- XU Jialin, ZHU Weibing, XUAN Dayang, et al. Thought of full-stratigraphy and its practice in groundcontrol[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(1): 166–179.
- [23] 许家林, 轩大洋, 李建. 覆岩隔离注浆充填技术实践与研究展望[J]. *中国煤炭*, 2024, 50(6): 74–80.
- XU Jialin, XUAN Dayang, LI Jian. Application and research prospects of overburden isolated grouting backfilling technology[J]. *China Coal*, 2024, 50(6): 74–80.
- [24] 马新青. 煤矸石离层注浆充填“五位一体”开采工艺研究[J]. *煤炭工程*, 2024, 56(10): 139–144.
- MA Xinqing. Study on the “five-in-one” mining method of coal gangue grouting and filling in separated bed[J]. *Coal Engineering*, 2024, 56(10): 139–144.
- [25] 轩大洋, 许家林. 铁路隧道下综放面覆岩隔离注浆充填开采试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(5): 1102–1110.
- XUAN Dayang, XU Jialin. Field study of longwall fully-mechanized caving mining by overburden isolated grouting under a surface railway tunnel[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(5): 1102–1110.
- [26] 马荷雯. 采动覆岩离层多层次注浆地表沉降控制技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(3): 150–157.
- MA Hewen. Surface subsidence control technology of multi-bed separation grouting[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(3): 150–157.
- [27] 双海清, 辛越强, 李树刚, 等. 基于关键层理论的切顶留巷下覆岩裂隙分布特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(5): 102–113.
- SHUANG Haiqing, XIN Yueqiang, LI Shugang, et al. Characterization of fissure distribution of overburden rock under roof cutting and entry retaining based on key strata theory[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(5): 102–113.
- [28] 许家林, 钱鸣高. 岩层采动裂隙分布在绿色开采中的应用[J]. *中国*

- 矿业大学学报, 2004, 33(2): 141-144, 149.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Study and application of mining-induced fracture distribution in green mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 141-144, 149.
- [29] 梁冰, 邢景超, 孙维吉, 等. 采动覆岩破断影响下裂隙诱发机制及三维空间特征[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 107-121.
- LIANG Bing, XING Jingchao, SUN Weiji, et al. Mechanisms and three-dimensional spatial characteristics of fissures induced under the influence of fracture of mining overburden rocks[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 107-121.
- [30] 李宏艳, 王维华, 齐庆新, 等. 基于分形理论的采动裂隙时空演化规律研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1023-1030.
- LI Hongyan, WANG Weihua, QI Qingxin, et al. Study on fissure development rule of overlying strata influenced by mining based on fractal theory[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1023-1030.