

# 覆岩隔离注浆充填绿色开采技术

轩大洋<sup>1,2</sup>, 许家林<sup>2</sup>, 王秉龙<sup>1</sup>

(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 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

**摘要:**充填是煤矿减损开采与固废减排的技术,覆岩隔离注浆充填是在深入揭示覆岩卸荷膨胀累积效应基础上提出的绿色开采新方法。该项技术通过确定控制岩层移动与地表沉陷的关键层,采用压实注浆新工艺,在关键层下的主层位实施高压注浆,将下方覆岩的卸荷膨胀量重新压缩转化为可充填空间,大幅提高了注采比,在采空区形成压实承载结构,支撑关键层,实现岩层沉陷控制与建(构)筑物保护。覆岩隔离注浆充填采用粉煤灰、煤矸石、煤泥等作为注浆材料,充分利用了煤矿采动空间与空隙,实现固废减排。介绍了不同类型固废制浆的工艺及特点,论述了充填浆液从固体-浆体-压实体的转变过程,以及浆液流动泌水固结特征。浆液由钻孔进入覆岩裂隙腔体内快速泌水,并在压力作用下不断固结压实,泌出水向注浆层围岩渗流。岩层饱和度对泌出水向工作面的流动产生影响。注浆充填体最终在地层内形成压实体,保证了地表沉陷控制的长期效果。除沉陷控制、固废减排之外,覆岩隔离注浆充填还可用于减震防冲、保水采煤等领域,并在无煤柱开采、相邻采空区开采、多煤层开采等复杂地质采矿条件中得到了成功应用。该技术的适用条件是工作面具有一定的基岩厚度,能够找出可作为注浆层位的关键层。未来该技术仍需在减震防冲、保水采煤中开展进一步试验研究。

**关键词:**绿色开采;关键层;覆岩隔离注浆;煤基固废减排;沉陷控制

**中图分类号:**TD823.7 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2022)12-4265-13

## Green mining technology of overburden isolated grout injection

XUAN Dayang<sup>1,2</sup>, XU Jialin<sup>2</sup>, WANG Binglong<sup>1</sup>

(1.School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Backfilling is a technology for reducing both mining damage and solid waste emission in coal mines. The overburden isolated grout injection technology was proposed based on the accumulative effect of strata expansion induced by stress relief. By identifying the key strata controlling surface subsidence and overburden movement, this technology utilizes the new method of compaction grouting into the main injection horizon below a key stratum, which transfers the expansion volume of overburden strata into injectable zone. The injection ratio is significantly increased, and a compaction zone that supports the overburden key strata and reduces subsidence is then generated, thus allowing the strata control and protection of surface buildings and infrastructures. The overburden isolated grouting uses fly ash, coal gangue, and coal slime as the injection material, allowing the reduction of coal waste by utilizing mining-induced voids and fractures. The process and characteristics of slurring were proposed for different types of solid

收稿日期:2022-09-19 修回日期:2022-10-27 责任编辑:郭晓炜 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2022.1352

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020ZDPYMS15)

作者简介:轩大洋(1987—),男,河南鄢陵人,副教授,博士。E-mail:xdy\_cumt@163.com

引用格式: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.



移动阅读

wastes. The transformation process of solid-grout-fill and the characteristics of grout flowing, bleeding, and consolidation were discussed for the injection material. The grout bleeds as soon as it flows into the overburden fracture from the borehole. Under the injection pressure, the grout is compacted continuously, and the water flows into the surrounding rock layers. The saturation of the strata play a vital role in the seepage of bleeding into the underground long-wall face. The grout is finally transformed into a compaction fill, which ensures the long-term stability of surface subsidence control. In addition to subsidence control and solid waste emission reduction, the overburden isolated grouting can also be used for mine quake reduction and outburst prevention. It has been successfully applied in some complex geological and mining conditions such as non-pillar mining, adjacent gob mining and multi-seam mining. A certain thickness of bedrock in the overburden is needed for the application of this technology, which allows a key layer that can be determined as grouting horizon. This technology still needs to be further tested in mine quake reduction, prevention of outburst, and water conservation mining.

**Key words:** green mining; key strata; overburden isolated grouting; coal based waste reduction; subsidence control

我国煤炭资源的开采强度大,地表塌陷等采动损伤影响面积广,尤其是在东部地区,人口与建(构)筑物密集、农田广布,面临的沉陷控制问题突出。同时,煤炭开采与利用过程中产生了煤矸石、粉煤灰、煤泥等固体废物,已成为我国大宗固废的重要组成部分,是固废减排的重点对象。绿色开采是实现采动减损与固废资源化利用的重要手段<sup>[1]</sup>,对矿区可持续发展意义重大。

部分开采与充填开采是减损开采的重要手段。前者是通过留设煤柱支撑覆岩、控制地表沉陷的方法,如条带开采与房柱式开采,但该方法将导致部分煤炭资源损失,后者是通过在采动空间(隙)充填物料支撑覆岩达到减损的目的。根据煤炭长壁垮落法开采后采动空间(隙)的产生与演化过程,充填的位置可以是采空区、垮落带或弯曲带<sup>[2-3]</sup>。利用地面钻孔对裂隙带以上覆岩进行注浆充填的方法,具有充填与采煤空间相分离、充填对采煤干扰小的优势,是充填技术的重要发展方向。

离层注浆是一种典型的覆岩注浆充填方法,该技术于 20 世纪 80 年代开始在我国试验,是覆岩注浆充填减沉的有益尝试,取得了一定的减沉效果,但尚不能应用于建筑物下开采保护。覆岩隔离注浆充填技术,是在深入揭示岩层采动裂隙演化的基础上研发,创新了关键层下压实注浆减沉新理论与新工艺,大幅提高了注采比与地表沉陷控制效果<sup>[2,4-7]</sup>。笔者回顾了离层注浆起源、实例,分析了其减沉效果。论述了覆岩隔离注浆充填技术原理、煤基固废注浆材料及工艺,介绍了该项技术的典型应用领域及工程效果。

## 1 离层注浆技术回顾

### 1.1 离层注浆技术起源

离层注浆充填技术研究始于对覆岩离层现象的认识。国内外学者对煤矿覆岩离层现象很早已达成

共识,且围绕这一主题开展了广泛的研究。前苏联学者鲍里索夫<sup>[8]</sup>于 1980 年出版的著作中,将离层作为覆岩层状岩层共同变形和破坏的最典型特点和重要规律;西德学者 KRATZSCH<sup>[9]</sup>于 1983 年出版的《Mining Subsidence Engineering》一书中描述了离层现象并给出了相关实测结果。在我国,刘天泉院士等<sup>[10]</sup>早在 1982 年出版的著作中证实了层间离层的存在,张延涛等<sup>[11-12]</sup>均对离层现象进行了描述。之后,国内外众多学者均围绕这一主题开展了广泛研究。

对煤系层状覆岩而言,长壁开采地表沉陷本质上是采动空隙由开采空间逐渐向上传播到地表所形成的。因此,阻止采动空隙的传播即可控制开采沉陷,覆岩离层注浆正是利用了这种原理,通过地面钻孔对采动覆岩中的离层区实施注浆充填,从而减小地表沉陷<sup>[13-14]</sup>。离层注浆思想最初可能由前苏联学者提出<sup>[15]</sup>。据 PALARSKI<sup>[16]</sup>报道,波兰曾于 20 世纪 80 年代开展了离层注浆试验,使地表变形减小了 20%~30%。范学理等<sup>[17]</sup>于 1985 年在我国开始离层注浆方法及设备研究,后在抚顺老虎台煤矿开展了国内第 1 例现场试验,并取得了较好的效果。这一技术随即受到了我国采矿工业和学术界的极大重视,先后在近 10 个矿井的 20 余个工作面进行了试验(表 1)。

### 1.2 离层注浆技术效果

根据表 1 中相关文献给出的数据,采用离层注浆技术的工作面,地表下沉一般大于 700 mm,个别达到 2 000 mm(图 1(a)),地表减沉率平均为 40%~50%(图 1(b)),与建筑物下采煤的沉陷控制要求尚有一定的差距。杨伦<sup>[31]</sup>对老虎台等煤矿 10 个注浆充填工作面减沉率重新分析后认为,在考虑采动充分度并重新计算后,实际减沉率应为 15%~20%。该结果与 PALARSKI<sup>[16]</sup>所报道的波兰注浆充填减沉率(20%~30%)接近。

表 1 我国早期开展的部分高层注浆现场试验情况

Table 1 Reported case histories of traditional grout injection into separation in China

序号	矿区	矿井	工作面	压煤类型	注浆充填 开始时间	注浆充填 结束时间	采高/m	倾角/ (°)	采深/ m	采宽/ m	走向长/ m
1	抚顺	老虎台煤矿 <sup>[17]</sup>	512	—	1986 年 7 月	1988 年 4 月	6.47	26	602	120.0	427.0
			510	—	1988 年 1 月	1990 年 4 月	6.47	26	619	82.0	345.0
			511	—	1990 年 4 月	1992 年 6 月	6.47	26	621	85.0	415.0
2	大屯	徐庄煤矿 <sup>[18]</sup>	7215	河闸、水泥厂和河堤下开采	1992 年 3 月	1993 年 5 月	2.60	20~23	529	110.0	960.0
3	新汶	华丰煤矿 <sup>[19-20]</sup>	1046	抑制地表斑裂下沉	1994 年 4 月	1994 年 8 月	2.20	27	686	112.0	575.0
			1407	抑制地表斑裂下沉	1994 年后	—	—	—	—	—	—
			1408	抑制地表斑裂下沉	1994 年后	—	—	—	—	—	—
4	兖州	东滩煤矿 <sup>[21-23]</sup>	14307 西	养鸡场下开采	1994 年 11 月	—	5.40	3	545	179.0	850.0
			14307 东	养鸡场下开采	1994 年后	—	6.00	3	560	180.0	924.0
			14308 东	养鸡场下开采	1999 年 3 月	1999 年 7 月	5.60	2~3	547	195.0	914.0
5	兖州	济宁二号井 <sup>[24-26]</sup>	4302	地面高压线下开采	1997 年 9 月	1999 年 4 月	3.60	6	572	180.0	1 195.0
6	枣庄	田陈煤矿 <sup>[27-28]</sup>	110	村庄下开采	1997 年 12 月	1998 年 9 月	2.50	3~5	385	120.0	400.0
			210	村庄下开采	1998 年后	—	2.20	10	372	120.0	520.0
			208	村庄下开采	1998 年后	—	2.20	10	371	100.0	340.0
7	开滦	唐山煤矿 <sup>[14,29]</sup>	3696	建筑物与工厂下开采	1998 年 4 月	1999 年 2 月	10.00	10	784	90.0	380.0
			3694	建筑物与工厂下开采	1998 年后	—	10.00	10	784	90.0	422.0
			T2191	京山铁路货运线下开采	2000 年 9 月	2002 年 1 月	10.00	10	594	145.0	1 040.0
			T2195	京山铁路货运线下开采	2002 年 4 月	2003 年 5 月	10.00	4	708	120.0	854.0
			T2192	京山铁路货运线下开采	2003 年 5 月	2004 年 3 月	10.00	9	613	150.0	960.0
			T2194	京山铁路货运线下开采	2004 年 6 月	2005 年 7 月	10.00	10	691	124.0	852.0
			T2193 上	京山铁路货运线下开采	2005 年 7 月	2006 年 6 月	10.00	13	639	124.0	905.0
8	开滦	范各庄矿 <sup>[30]</sup>	2180(6-1)	沙河公路桥下开采	2006 年 6 月	2007 年 7 月	6.50	—	—	133.7	660.5
			2180(11)	沙河铁路桥下开采	2008 年 2 月	2008 年 11 月	6.50	—	—	95.7	708.9

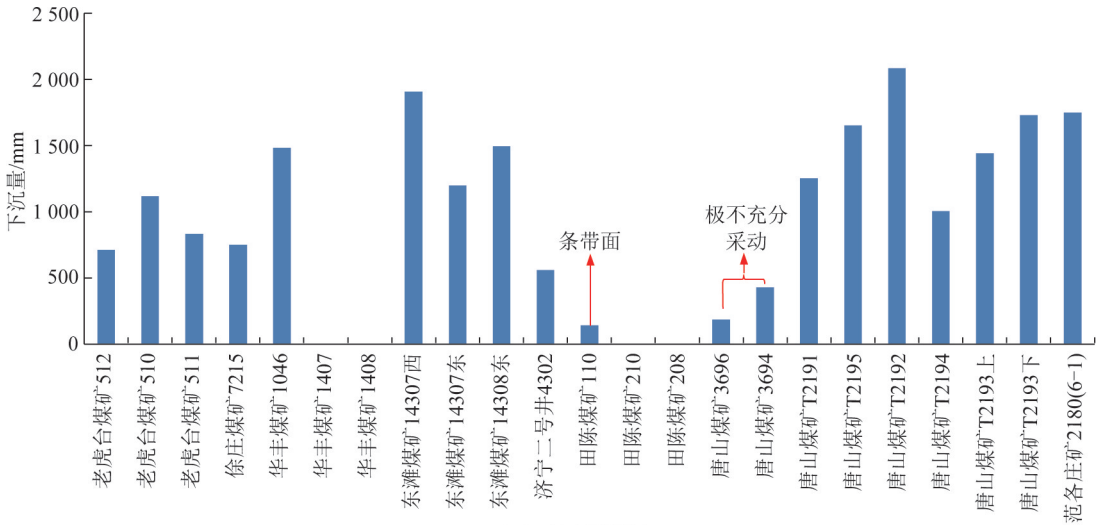
综上,高层注浆减沉率一般小于 50%,在相邻工作面开采后更低。因此,尽管高层注浆具有工艺简单、成本低、对采煤干扰小等优势,但尚不能作为一种建筑物不搬迁开采技术,导致该技术在我国的试验应用逐步减少。

### 1.3 原因分析

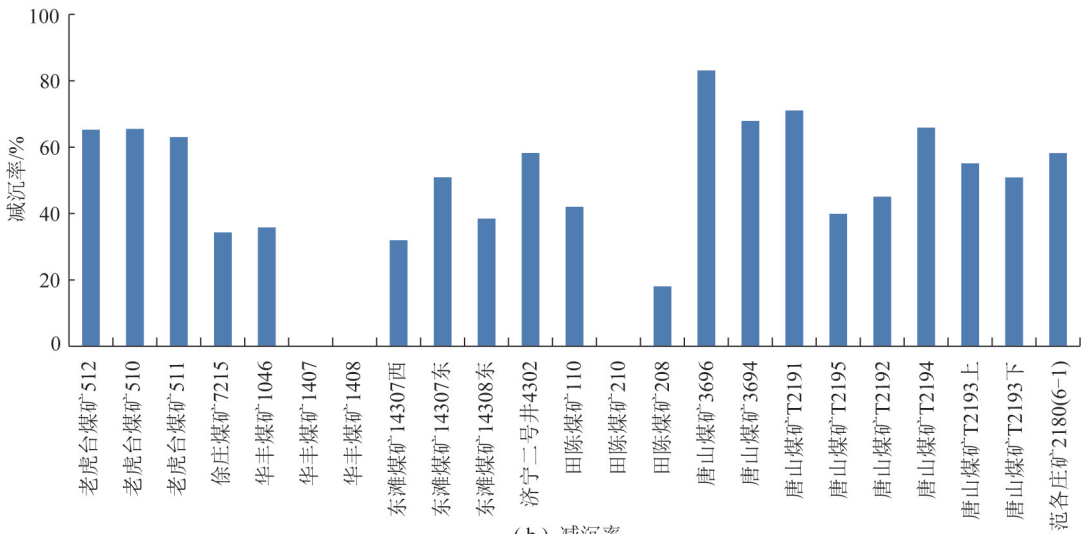
高层注浆的减沉率低与其注采比(注入至覆岩裂隙内的压实充填体体积与采出体积之比)小有密切关系。根据相关文献(如文献[14,17-18,31])中搜集的 18 个工作面高层注浆试验数据来看,注采比平均仅为 6.8%(图 2)。在早期的高层注浆实例中,多数工作面注入的灰体不足采出体积的 10%;之后,在京山铁路下开采时提高至 30%左右<sup>[14]</sup>。文献[32]分析指出,我国首例高层注浆工作面注入的灰体仅占采出煤量的 3%,很难起到减沉作用。

进一步研究表明,高层注浆的注采比与长壁开采条件下覆岩内的离层量与采高比值接近。理论上,覆岩离层与岩层条件、煤层采厚等因素相关,其值存在从无到有、增加到闭合的过程。从文献披露来看,以往关于高层注浆的研究中,有较多文献集中于离层位置及离层量值,存在“充填量等于离层量”的认识,一定程度上决定了注采比大小。

由中国<sup>[33-35]</sup>、澳大利亚<sup>[36-38]</sup>、以色列<sup>[39]</sup>等国学者所开展的大量模拟与实测研究表明(表 2),长壁开采条件下的自然离层量是相对较小的,单个离层的量一般为 0.002~0.4 m,平均值小于 0.15 m,仅占采高的 8%左右;模拟或观测到的覆岩累计离层量与采高的比值上限为 20%~30%(图 3)。文献[40]分析了覆岩注浆钻孔的注采比,得到无压阶段的总注采比一般在 10%以下,也表明单个离层高度不足采高的 10%。



(a) 最大下沉量



(b) 减沉率

图 1 离层注浆的减沉率

Fig.1 Subsidence reduction of traditional bedding separation grouting

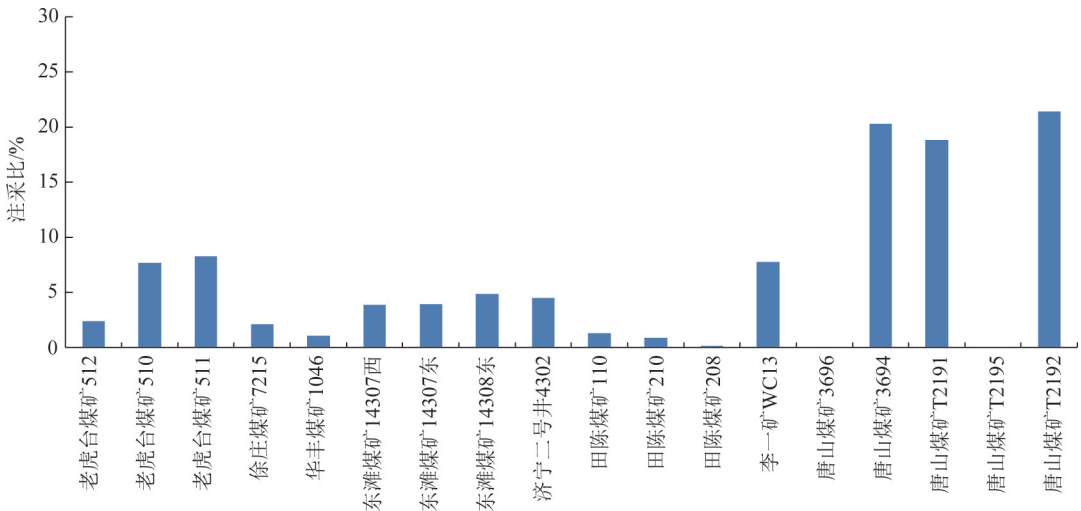


图 2 离层注浆的注采比

Fig.2 Injection ratio of bedding separation grouting

表 2 文献中的离层量  
Table 2 Bedding separation apertures from the literatures

文献	研究方法	研究区域	采深/m	采宽/m	采高/m	单个离层量/m	单个离层量与采高比值/%	不同时期离层量总和/m	离层量总和与采高比值/%
王金庄等 <sup>[41]</sup>	理论分析	—	—	—	—	—	—	—	30~40
CHEN 等 <sup>[37]</sup>	数值模拟	模拟工作面	500	280	2.5	0.1~0.4	4~16	1.290	51.6
CHEN 等 <sup>[36]</sup>	数值模拟	West Cliff 煤矿 4 个工作面	460	1 170	2.5	0.002~0.580	0.1~23.1	0.693~0.710 [0.691]	26.4~28.1 [27.7]
滕永海等 <sup>[42]</sup>	钻孔岩移观测	钟家山煤矿	127	79	1.9	—	—	0.046	2
贾君莹等 <sup>[33]</sup>	钻孔岩移观测	开滦唐山煤矿 T2291 面	636	138	10	0.024~0.270 [0.147]	0.2~2.7 [1.5]	0.773	7.3
SHEN 等 <sup>[38]</sup>	钻孔岩移观测	West Cliff 煤矿	520	305	2.6	0.120~0.273 [0.204]	4.6~10.4 [7.8]	1.0	38
张华兴等 <sup>[34]</sup>	钻孔电视观测	枣庄蒋庄煤矿	425	50	—	0.2	—	—	—
PALCHIK <sup>[39]</sup>	钻孔直接观测	乌克兰顿涅茨 克煤田	280~450	—	0.8~1.6	0.05~0.40 [0.08]	3~29 [7]	0.145~0.665 [0.341]	14~44 [28]

注:数据格式“最小值~最大值[平均值]”。

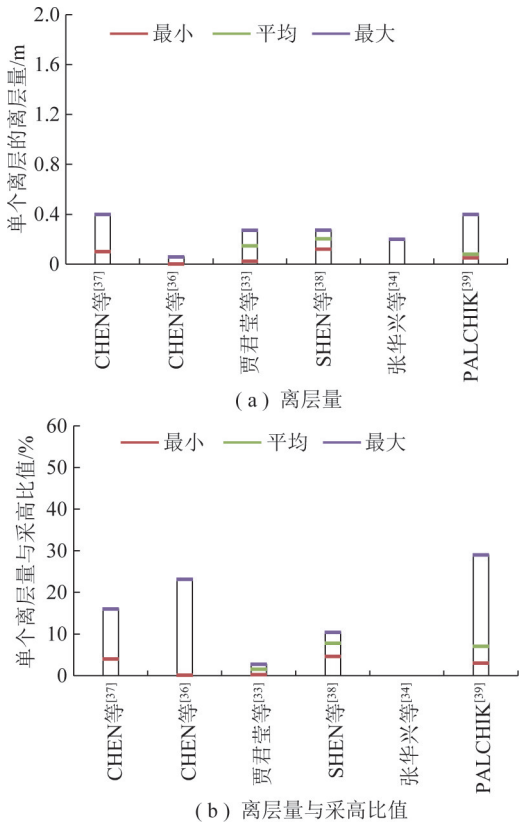


图 3 单个离层的量值及其与采高的比值  
Fig.3 Aperture of single bedding separation and ratio of it to mining height

究其原因,是采动后的覆岩卸荷膨胀累积效应抑

制了离层的形成,即离层被垮落带岩体碎胀及裂隙带岩体膨胀量所取代<sup>[35,43]</sup>;仅当地层中存在能够控制覆岩的典型关键层时,随着下部岩体的压实,离层能够存在一定时间。如不对离层实施有效干预,较难达到较高的注采比与减沉率。离层注浆的注采比小,与原生状态下的离层量相接近,无法形成有效支撑覆岩的结构,说明充填层位下方采空区未受到充分作用力,导致残存空隙多、可压缩量大,在多工作面开采时采空区将进一步压缩从而加剧地表下沉。这是离层注浆地表减沉率低的重要原因。

## 2 覆岩隔离注浆充填原理

覆岩隔离注浆充填(图 4)的原理与离层注浆不同,其基本原理是:基于关键层理论,从覆岩中找出对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的采动裂隙实施高压注浆充填,压实下部碎胀岩体,从而扩大受注空间、增大注采比,在采空区形成压实承载结构,有效支撑关键层,提高减沉率<sup>[2,4-6]</sup>。这是与离层注浆主要充填离层空隙的本质区别所在。

### 2.1 主层位注浆

通过在选定的关键层下实施注浆充填,形成主注浆层位,能够大幅提高注采比。前期通过注浆结束后的钻探取心结果表明,注浆充填呈现了

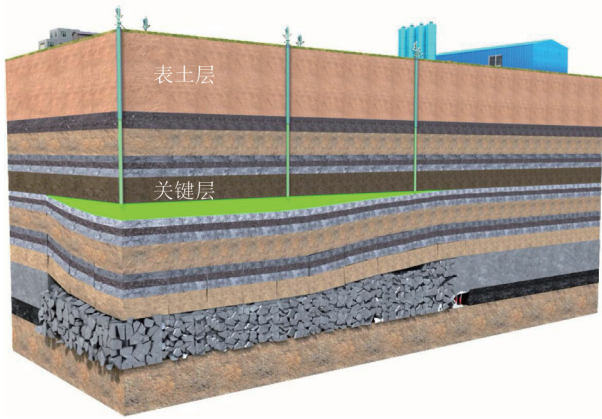


图 4 覆岩隔离注浆充填示意

Fig.4 Schematic of overburden isolated grouting

主层位特征,即 90% 以上的充填体均集中在终孔上方第 1 层关键层以下<sup>[44]</sup>。进而,通过注浆过程中的现场探测进一步对覆岩隔离注浆充填的主层位进行验证。

提出了注浆充填层位探测方法并进行了现场试验(图 5)。根据流量连续性条件可知,在注浆层位以上的各点浆液流量相等(为注入总流量),在注浆层位下方,流量大幅衰减。探测方法即是对钻孔全孔段流量进行测量,绘制出流量与深度的关系曲线,根据流量衰减位置确定注浆层位深度。

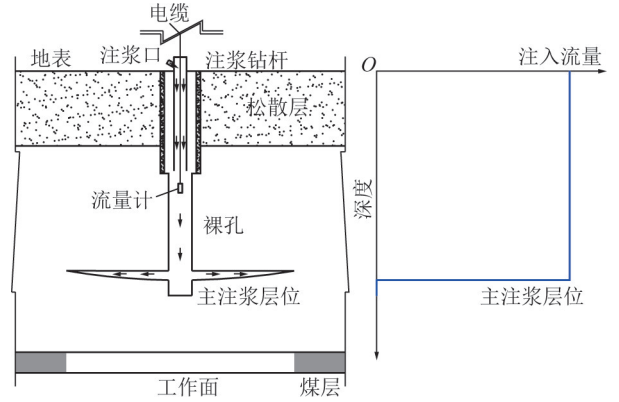


图 5 钻孔注浆层位探测方法原理

Fig.5 Principle of borehole grouting horizon detection method

对淮北袁店二井煤矿 7221 工作面 5 号注浆孔进行了探测。分别在工作面距钻孔 28.9, 16.7, 10.0 m 时对钻孔裸孔段进行了测量,根据不同位置的流量,绘制出全断面的流量趋势线(图 6)。通过 3 次观测结果得出,钻孔流量发生突变的位置在 344.0 ~ 346.4 m,上方流量虽有所变化,但整体在某个位置上下波动,这是由于钻孔变形后过流断面发生变化导致的。因此,可以得出该孔的主注浆层位为 344.0 ~ 346.4 m。同时,采用钻孔电视对孔壁变形情况进行探测,进一步对测量结果进行了验证,证实了主注浆层位。

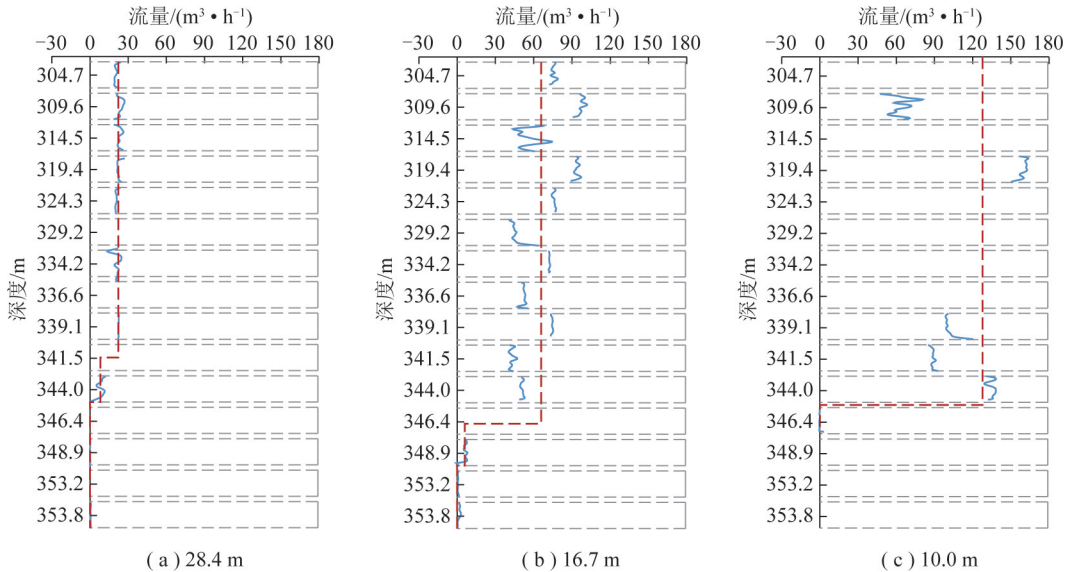


图 6 7221-5 号孔注入流量及趋势线

Fig.6 Injection flow and trend curves for borehole 7221-5

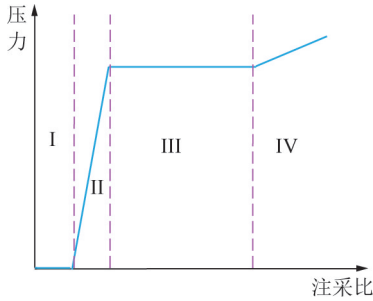
### 2.2 压实注浆

针对离层注浆存在的充填量小的问题,覆岩隔离注浆充填采用压实注浆新方法,通过高注浆压力对选定的关键层下方主层位实施注浆,利用注浆压力压实下部碎胀岩体,消除覆岩卸荷膨胀累积效应并转化出

可注浆空间,大幅提高注浆量,形成压实区,从而支撑上覆关键层。

覆岩隔离注浆充填压力包括零压、增压、稳压与超压几个过程(图 7),其中,压实作用在增压段开始产生,稳压阶段则是压实的主要过程。通过压实注

浆,使注采比得到大幅提升,单一工作面可达 50% 以上。通过钻孔探测及实验表明,在压实注浆下,覆岩内充填体厚度可达到离层量值的数倍<sup>[4,44]</sup>。

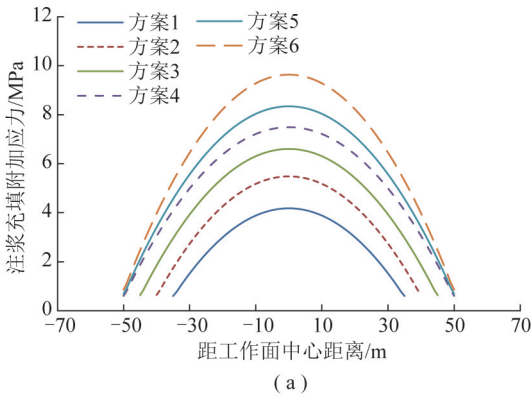


I—零压; II—增压; III—稳压; IV—超压

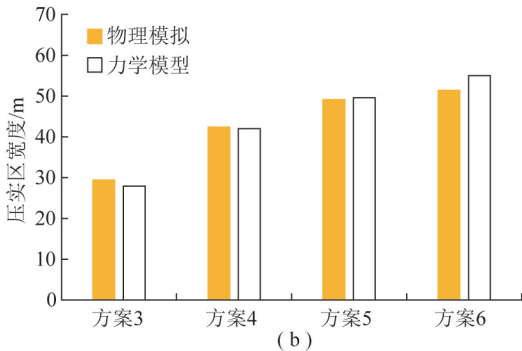
图 7 钻孔注浆压力曲线<sup>[40]</sup>

Fig.7 Borehole injection pressure curves<sup>[40]</sup>

覆岩隔离注浆充填压实区也在力学模型与实验研究中得到了验证<sup>[40]</sup>。文献[40]建立了注浆充填压实区力学模型,导出了注浆充填压力传递到采空区后的附加应力、采空区压实量与压实区宽度。图 8 为物理模拟实验得到的不同开采宽度下的注浆充填附加应力与压实区宽度。该模型共模拟了 6 种方案,原型中工作面采高 3.0 m,基岩厚度 170 m,松散层厚度 250 m,注浆层位于煤层上方 60 m,方案 1~6 中的注浆压力分别为 7.86,7.86,7.86,7.86,8.66,9.46 MPa,工作面宽度分别为 110,120,130,140,140,140 m<sup>[40]</sup>。



(a)



(b)

图 8 注浆充填附加应力及压实区宽度验证<sup>[40]</sup>

Fig.8 Verification of injection induced stress and width of compaction area<sup>[40]</sup>

随着注浆层位与煤层间距加大,采空区附加应力、压缩量、压实区宽度、压实度、注采比均不断减小,即注浆层位越高时,不利于压实区的形成。当注浆压力较低时,也难以有效形成对下部岩体的压实作用,压力选取应以平衡所选择关键层载荷为准。选定的关键层位置即注浆层位,当关键层距离煤层较远时,形成的压实区宽度较窄,关键层距煤层较近时,所形成的压实区宽度较大,此时多工作面回采时可以不留煤柱,即能够有效控制地表沉陷。

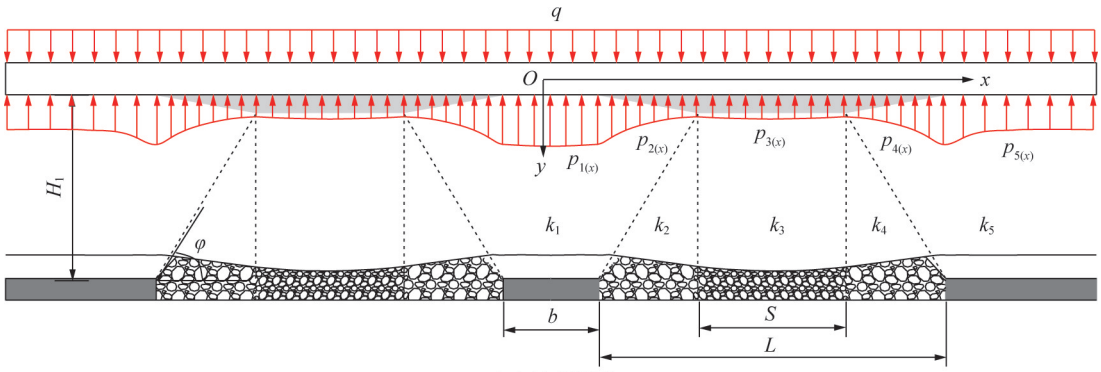
### 2.3 承载结构

覆岩隔离注浆充填是通过压实区或与隔离煤柱联合支撑关键层,控制地表沉陷。文献[45]基于弹性地基梁理论,建立了覆岩隔离注浆充填承载结构关键层的挠度力学模型,并利用模型实验进行了验证(图 9,其中,  $q$  为注浆充填体上方关键层承受的载荷,MPa;  $\varphi$  为充分采动角;  $L$  为工作面宽度, m;  $S$  为压实区宽度, m;  $b$  为隔离煤柱宽度, m;  $H_1$  为注浆层位与煤层间距, m;  $p_{1(x)}, p_{2(x)}, p_{3(x)}, p_{4(x)}, p_{5(x)}$  分别为关键层在隔离煤柱区、隔离煤柱侧非压实区、压实区、实体煤壁侧非压实区、实体煤壁区所受的地基反力,  $N/m^2$ ;  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  分别为隔离煤柱区、隔离煤柱侧非压实区、压实区、实体煤壁侧非压实区、实体煤壁区的弹性地基系数,  $MN/m^3$ )。在所述的模拟实验中,隔离煤柱宽度为 40 m,工作面实施覆岩注浆充填开采后,煤柱仍保持了稳定性,详见文献[46]。所建立的力学模型中,将注浆充填关键层下方的煤岩层分为隔离煤柱区、隔离煤柱侧非压实区、压实区、实体煤壁侧非压实区和实体煤壁区,并确定了不同区域的弹性地基系数,利用该模型确定了影响地表沉陷的因素依次为:工作面宽度、采高、注采比、注浆层位高度、隔离煤柱宽度。

## 3 覆岩隔离注浆充填工艺

### 3.1 注浆材料及工艺

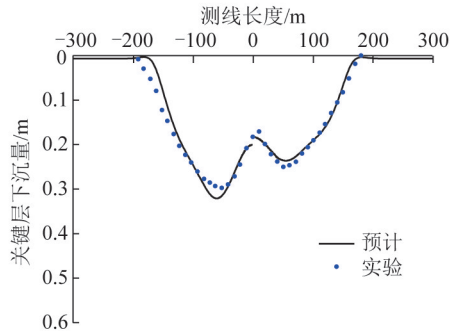
覆岩隔离注浆充填以粉煤灰、煤泥、煤矸石等煤基固废作为充填原材料,在控制地表沉陷的同时,实现固废减排目的。粉煤灰以散体干料形态制浆,注浆系统相对简单(图 10),投资少、建设周期短(1~2 月)。煤矸石原状块度大,无法直接用于注浆充填,需要进行粉化处理,可采用的方法有球磨等方法。煤矸石粉磨制浆系统相对复杂(图 10),建设成本与周期较粉煤灰系统明显增加。煤泥以浆状直接混合制浆,通常作为其他注浆材料的补充。需要指出的是,为避免对地下水产生影响,注浆钻孔仅在设计的关键层下留设注浆段,含水层段均下套管封固,防止浆液



(a) 承载模型



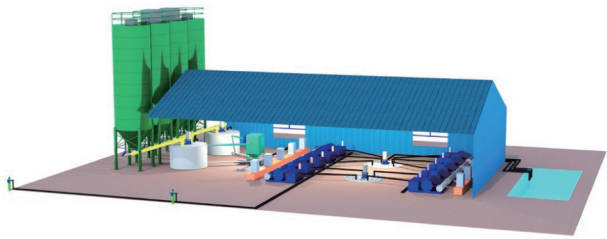
(b) 物理模拟



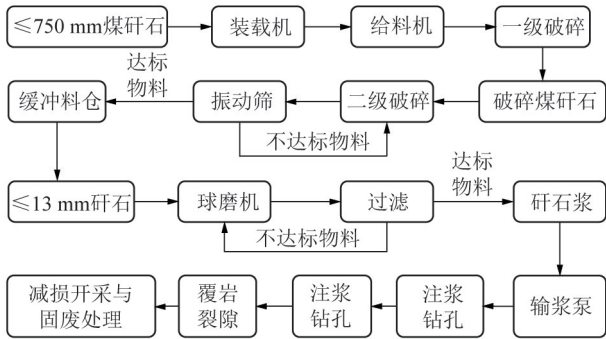
(c) 关键层下沉

图 9 覆岩隔离注浆充填承载结构模型及验证<sup>[45]</sup>

Fig.9 Model and verification of bearing structure of isolated overburden grouting<sup>[45]</sup>



(a) 粉煤灰制浆系统



(b) 矸石粉磨制浆系统

图 10 煤基固废注浆工艺

Fig.10 Grouting system for coal based solid waste

渗入。同时,煤基固废注浆材料选择时,主要采用满足标准<sup>[47]</sup>的一般工业固体废物中的 I 类工业固体废弃物。在采用煤矸石或其他材料进行制浆时,可以采用沉析速率、黏度、当量压实系数等参数来评估注浆材料的可用性。

### 3.2 浆液流动及泌水

采用的充填浆料由固料与水混合制成,流经路径为地表→管路→钻孔→裂隙,经历了由固料、浆体、压实体的相变过程。在这一过程中,浆液流动泌水特性关系到注浆效果及安全性。

实验研究表明,充填浆液在裂隙内呈两阶段流动特征,在无压阶段呈现“先径向后双向”流动特征,有压阶段呈现出优势通道流动。优势流动通道近似呈椭圆形,以注浆孔为中心,沿着走向不断扩展,且通道的尺寸逐渐增大,随着注浆时间的延长,通道逐渐发育成为较狭长的形态,主要原因是倾向边界处的浆液逐渐出现固结沉积(图 11)<sup>[48-49]</sup>。

煤基固废浆液为典型的固液两相流,浆液进入裂隙空间后,流动速度大幅衰减,导致固相颗粒沉积,出现水与颗粒分离,即出现泌水现象。在裂隙腔体内,浆液在倾向方向的析水速度要大于走向方向,尤其是越靠近边界处速度越小,也即距离钻孔越远,浆液的固结程度越大。

高压注浆作用下,注入地层中的浆液将发生泌水固结,并转化为压实体,起减沉作用的正是这一部分充填物。前期的钻孔取芯探测已经得到了证实<sup>[44]</sup>。根据浆液在覆岩裂隙所处的封闭环境,类比充填浆体在岩层中的受力情况对其固结特性进行了实验研究<sup>[50-51]</sup>。实验得出,充填浆液出现了泌水固结,最终

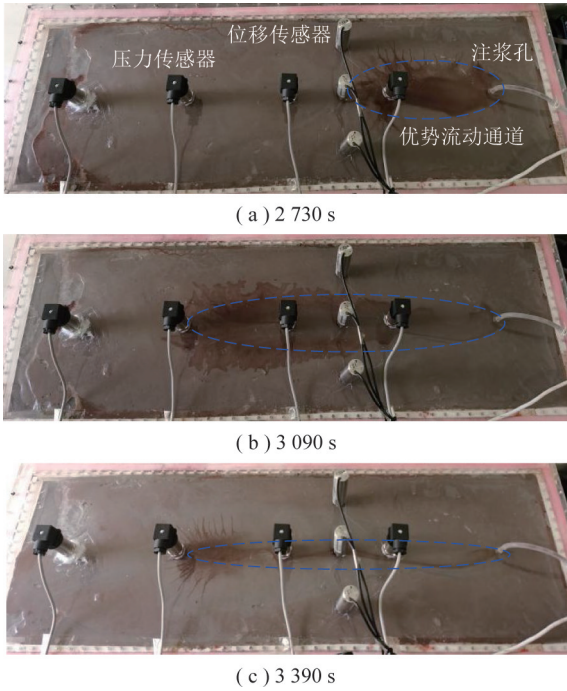


图 11 浆液的优势流动通道演化过程<sup>[48]</sup>

Fig.11 Evolution of slurry flow channel<sup>[48]</sup>

形成了压实体。12 MPa 压力条件下形成的典型粉煤灰压实体如图 12 所示。为了表征浆液的压实特性,定义了当量压实系数,并将其引入到注采比计算中,更加符合工程实际<sup>[50]</sup>。由于充填浆体最终转换成压实体,因此覆岩隔离注浆充填后地表能够保持长期稳定。



图 12 粉煤灰浆液压实体

Fig.12 Fly ash slurry compaction

浆液泌出水将向围岩渗流,研究表明,隔离层饱和度对充填浆液泌出水向工作面的流动产生影响。在非饱和覆岩条件下,浆液泌出水被注浆层位围岩孔隙储存,由于围岩水平方向的渗透率明显大于垂直方向,导致泌出水以水平方向扩散为主,多数在透过隔离层之前已被围岩充分吸收,无法在工作面涌出。在饱和覆岩条件下,围岩孔隙无法继续储存浆液泌出水,使其具备向工作面渗流的条件,可能会造成工作面涌水稳定增加。该研究结论在淮北矿区注浆充填工作面得到了验证:非饱和覆岩条件下,工作面涌水

无变化;饱和覆岩条件下,工作面涌水有少量增加(图 13)。

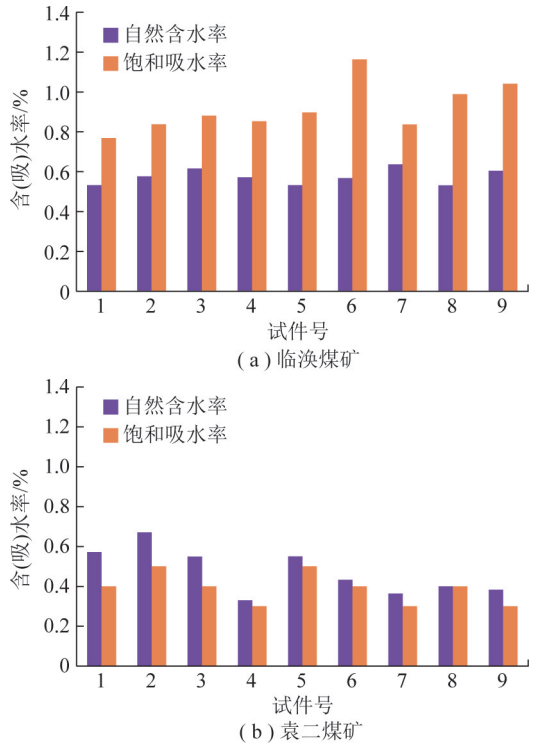


图 13 淮北矿区覆岩饱和度实测

Fig.13 Measurement of strata saturation for Huaibei mining area

### 4 实践及效果

覆岩隔离注浆充填技术主要应用于地表沉降控制、建(构)筑物压煤开采、固废减排领域中,在减震防冲与保水采煤也具有潜在应用价值。目前已在安徽、山西、山东、河南、河北、内蒙古等地多个矿区进行了推广应用,采出压覆煤炭资源 3 000 万 t 以上。

覆岩隔离注浆充填技术最广泛应用于建(构)筑物压煤开采,以东部矿区为典型代表。在保护对象方面,包括村庄、窑体、垃圾处理站、铁路隧道、工业场地。工作面的最大采宽达 260 m,最大采高 9.0 m,单工作面年产量可达 300 万 t/a,地表保护区下沉系数控制在 0.10 以内,吨煤充填成本 40~60 元。

地质开采条件方面,在单一煤层与多煤层开采中均得到了成功应用,并针对各种复杂条件形成了针对性的设计与控制方法(图 14)。在单一煤层开采中,涉及到工作面间留设隔离煤柱、工作面之间无隔离煤柱、相邻采空区侧开采(包括一侧采空区与两侧采空区)等多种类型。在多煤层开采中,涉及到采空区下伏煤层覆岩隔离注浆充填、多煤层开采覆岩隔离注浆充填等类型,均得到了成功应用。

在单一煤层开采中,各工作面间留隔离煤柱、相邻采空区侧等条件下的实例见文献[2,5]。

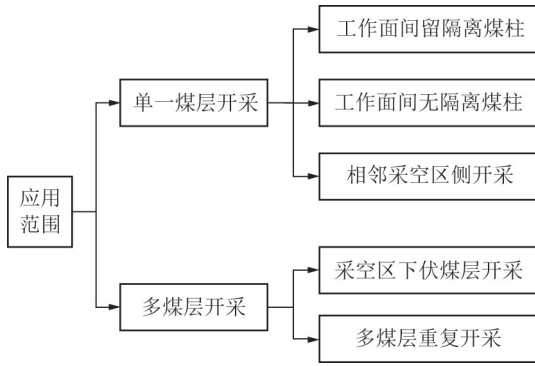


图 14 覆岩隔离注浆充填技术已应用范围

Fig.14 Application ranges of overburden isolated grouting

以淮北某煤矿 8<sub>2</sub>采区为例,介绍覆岩隔离注浆充填在建筑物下多煤层开采中的应用。8<sub>2</sub>采区开采 7<sub>2</sub>与 10 煤层,其中 7<sub>2</sub>煤层包括 5 个工作面,10 煤层包括 2 个工作面。采区内 5 个工作面被 2 个地面村庄所压覆,其中 7<sub>2</sub>煤层 4 个、10 煤层 1 个(图 15)。

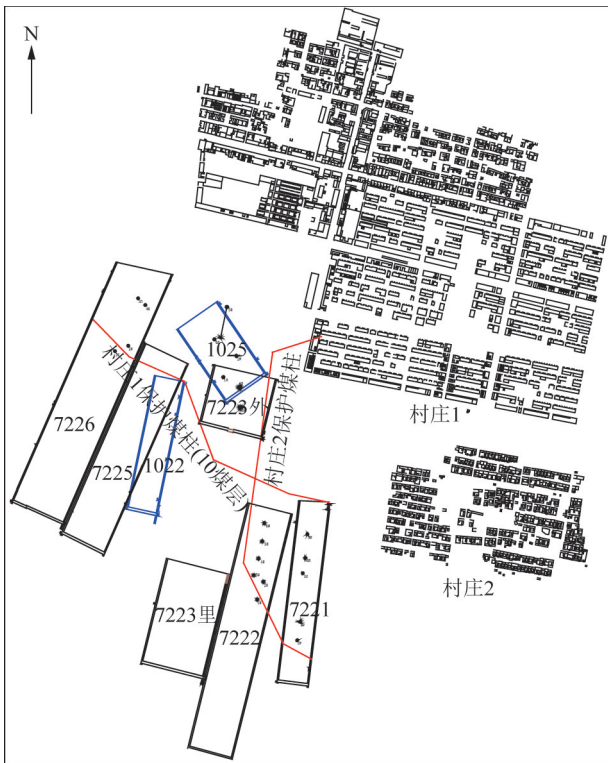


图 15 8<sub>2</sub>采区井上下对照

Fig.15 Plan of surface-underground contrast for the 8<sub>2</sub> mining area

7<sub>2</sub>煤层厚度平均 4.3~5.0 m,10 煤层厚度 4.1 m,煤层倾角平均 9°。7<sub>2</sub>煤层上覆岩松散层厚度 260 m,基岩厚度 113~234 m,10 煤层上覆基岩厚度 273~295 m,与 7<sub>2</sub>煤层间距平均约 90 m。工作面宽度平均为 161 m,最大 204 m。项目自 2013 年开始,至 2020 年结束,共充填粉煤灰 47.4 万 t,采出村庄压煤量 163 万 t。通过实施覆岩隔离注浆充填,村庄最大下沉控

制在 266 mm,建筑物没有出现损坏。

以淮北某煤矿 II3 采区为例,介绍覆岩隔离注浆充填在建筑物下无煤柱开采中的应用(图 16)。II3 采区 3 个工作面累计采宽 502 m,平均采深 625 m(表土层厚度 240 m),煤层厚度 3.0~3.5 m,工作面采宽最大 228 m。通过实施覆岩隔离注浆充填,安全采出压煤 130 万 t,地表最大下沉 335.1 mm,建筑物最大下沉 156 mm,未出现任何损坏,无害化处理固废 38 万 t,环境经济社会效益显著。



图 16 II3 采区井上下对照

Fig.16 Plan of surface-underground contrast for the II3 mining area

覆岩隔离注浆充填能够防止坚硬岩层破断,减小其能量释放,减缓实体煤应力集中,从而实现减少动力灾害目的,已在淮北某煤矿 II102 采区巨厚岩层下动力灾害控制中得到应用(图 17)<sup>[52]</sup>。通过实施覆岩隔离注浆充填,成功避免了井下动力灾害,保护了地面建筑物,为巨厚岩层下采动灾害防控提供了有效技术途径。

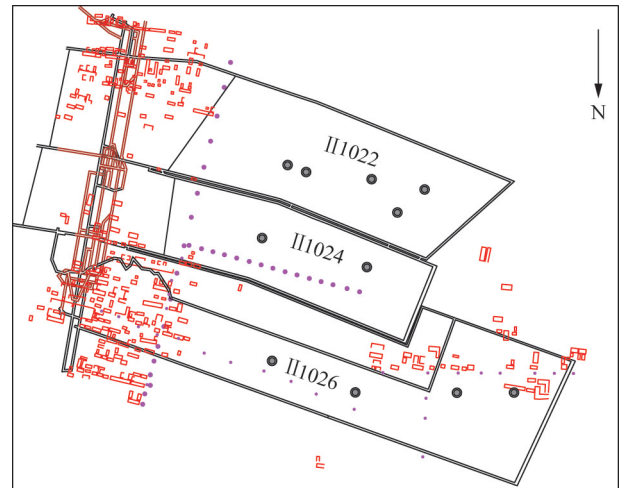


图 17 II102 采区井上下对照

Fig.17 Plan of surface-underground contrast for the II102 mining area

## 5 结 论

(1)覆岩隔离注浆充填与离层注浆的减沉作用原理不同。覆岩隔离注浆充填技术的理论基础是关键层理论与覆岩卸荷膨胀累积效应,采用压实注浆新方法,通过在选定关键层下的主层位实施高压注浆,将覆岩卸荷膨胀量重新转化为可充填空间,大幅提高了注采比;通过在采空区形成压实承载结构,有效支撑关键层,控制地表沉降。

(2)覆岩隔离注浆充填采用煤基固废作为充填材料,实现固废减排目的。介绍了不同固废的制浆工艺及特点,论述了充填浆液从固体-浆体-压实体的转变过程,以及浆液流动泌水固结特征,注浆充填后形成的压实体保证了地表沉降控制的长期效果。

(3)覆岩隔离注浆充填广泛应用于沉陷控制、建(构)筑物压煤开采、固废减排,已在多种复杂地质开采条件中得到了成功应用。其适用条件是工作面具有一定的基岩厚度,能够找出可作为注浆层位的关键层。该技术在减震防冲、保水采煤中具有潜在应用价值,仍需开展进一步现场试验研究。

## 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] 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(1):135041-135048.

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(1): 135041-135048.

[3] 许家林,朱卫兵,李兴尚,等. 控制煤矿开采沉陷的部分充填开采技术研究[J]. 采矿与安全工程学报,2006,23(1):6-11.

XU Jialin, ZHU Weibing, LI Xingshang, et al. Study of the technology of partial-filling to control coal mining subsidence[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 6-11.

[4] 许家林,轩大洋,朱卫兵,等. 部分充填采煤技术的研究与实践[J]. 煤炭学报,2015,40(6):1303-1312.

XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, et al. Study and application of coal mining with partial backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1303-1312.

[5] 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.

[6] 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.

[7] XUAN Dayang, XU Jialin. Longwall surface subsidence control by technology of isolated overburden grout injection[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(5): 813-818.

[8] 鲍里索夫(Борисов А А). 矿山压力原理与计算[M]. 北京:煤炭工业出版社,1986.

[9] KRATZSCH Helmut. Mining subsidence engineering[M]. Berlin Heidelberg New York:Springer-Verlag, 1983.

[10] 煤炭科学研究院北京开采研究所. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,1981.

[11] 张延涛. 钻孔注浆法减小地表变形破坏的机理及可行性[J]. 中州煤炭,1987(5):16-19.

ZHANG Yantao. Mechanism and feasibility of borehole grouting to reduce surface deformation[J]. Zhongzhou Coal, 1987(5): 16-19.

[12] 张延涛,王春林. 长壁开采覆岩破坏移动的基本规律[J]. 煤炭科学技术,1986,14(8):2-8.

ZHANG Yantao, WANG Chunlin. The general law of overburden movement and failure during longwall mining[J]. Coal Science and Technology, 1986, 14(8): 2-8.

[13] 赵德深,王忠昶,张文泉. 覆岩离层注浆充填效果的综合评价[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(5):766-769.

ZHAO Deshen, WANG Zhongchang, ZHANG Wenquan. Comprehensive evaluation of grouting effect in separate strata layers of overburden[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2009, 28(5): 766-769.

[14] 高延法,钟亚平,李建民,等. 覆岩离层带多层次注浆减沉的理论与实践[J]. 煤矿开采,2002,7(2):42-45.

GAO Yanfa, ZHONG Yaping, LI Jianmin, et al. Theory and practice of subsidence control by multi-layer grouting in overburden bed-separation zone[J]. Coal Mining Technology, 2002, 7(2): 42-45.

[15] 张玉卓,徐乃忠. 地表沉陷控制新技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998.

[16] PALARSKI J. The experimental and practical results of applying backfill [A]. Innovations in mining backfill technology—Proceedings of the 4th international symposium on mining with backfill[C]. Rotterdam, Balkema, 1989:33-37.

[17] 赵德深,范学理,洪加明,等. 离层注浆技术的应用与效果[J]. 东北煤炭技术,1995(5):9-12.

ZHAO Deshen, FAN Xueli, HONG Jiaming, et al. The application and effect of grout injection into the bed separation[J]. Coal Technology of Northeast China, 1995(5): 9-12.

[18] 徐乃忠,马伟民,曹祖民,等. 综采分层及重复采动影响条件下覆岩离层注浆减沉试验[J]. 煤炭科学技术,1998,26(3):10-13.

XU Naizhong, MA Weimin, CAO Zumin, et al. Field trial on grout injection into bed separation during repeated mining[J]. Coal Science and Technology, 1998, 26(3): 10-13.

[19] 毛仲玉,王学民. 浮选尾矿水注浆充填控制地表斑裂下沉[J]. 煤炭科学技术,1995,23(4):26-28.

MAO Zhongyu, WANG Xuemin. The control of surface cracks by grouting with flotation tailings water[J]. Coal Science and Tech-

- nology, 1995, 23(4): 26-28.
- [20] 于永春, 徐方军. 采动覆岩离层高压注浆减沉技术研究[J]. 煤矿开采, 2002(1): 55-57.  
YU Yongchun, XU Fangjun. Study of high pressure filling into overburden separations after coal mining to reduce subsidence [J]. Coal Mining Technology, 2002(1): 55-57.
- [21] 王志刚. 东滩煤矿 14307 放顶煤工作面覆岩注浆减沉试验的初步总结[J]. 煤矿现代化, 1995(4): 26-27.  
WANG Zhigang. A preliminary summary of the overburden grouting test during longwall top coal caving mining in 14307 of Dongtan Coal Mine [J]. Coal Mine Modernization, 1995(4): 26-27.
- [22] 陈长臻. 特厚煤层开采覆岩注浆技术的首次应用[J]. 煤矿现代化, 1998(4): 16-18.  
CHEN Changzhen. Application of the technique of grout injection into the bed separation during mining the super high seam [J]. Coal Mine Modernization, 1998(4): 16-18.
- [23] 梁作江. 东滩煤矿 14308 工作面覆岩注浆及效果[J]. 煤矿现代化, 2000(1): 18-19.  
LIANG Zuojiang. Effect and test of overburden grouting into longwall 14308 of Dongtan Coal Mine [J]. Coal Mine Modernization, 2000(1): 18-19.
- [24] 张东俭, 郭恒庆. 覆岩离层注浆技术在济宁矿区的应用[J]. 矿山测量, 1999(3): 42-44.  
ZHANG Dongjian, GUO Hengqing. Application of bedding separation grouting in the Jining Mine District [J]. Mine Surveying, 1999(3): 42-44.
- [25] 张东俭. 济二煤矿离层注浆保护地面高压线实践[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2000, 19(1): 101-103.  
ZHANG Dongjian. Practice of protecting surface high-tension wires by separated strata grouting in Jining No. 2 Mine [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2000, 19(1): 101-103.
- [26] 刘文生. 覆岩离层注浆充填保护地面高压线路试验研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 236-239.  
LIU Wensheng. Experimental study on protecting high voltage electric power lines by grouting separated strata zone in overburden [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 236-239.
- [27] 陈凡臣, 陈增科, 潘巨刚. 村庄下宽条带开采离层注浆技术减沉效果分析[J]. 矿山测量, 2000(4): 28-31.  
CHEN Fanchen, CHEN Zengke, PAN Jugang. Analysis of subsidence reduction effect of bedding separation grouting technology in strip mining under village [J]. Mine Surveying, 2000(4): 28-31.
- [28] 张华兴, 王建学, 魏遵义, 等. 离层带注浆的实践与认识[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(9): 11-13.  
ZHANG Huaxing, WANG Jianxue, WEI Zunyi, et al. Practice and understanding of grouting into bedding separation zone [J]. Coal Science and Technology, 2000, 28(9): 11-13.
- [29] 高延法. 特厚煤层充分采动条件下覆岩离层注浆减沉理论与实践[A]. 2010 绿色开采理论与实践国际研讨会(7th International Symposium on Green Mining) [C]. 徐州, 2010.
- [30] 冯树国, 王睿, 王柏林. 公路桥下放顶煤开采注浆减沉技术[J]. 煤矿开采, 2010, 15(4): 32-34.  
FENG Shuguo, WANG Rui, WANG Bolin. Technology of reducing subsidence with grouting in caving top coal under highway bridge [J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(4): 32-34.
- [31] 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.
- [32] 杨伦. 我国首例离层注浆减沉试验的再思考[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 102-104.  
YANG Lun. Rethinking about the first subsidence reducing test of injecting grout into separated beds in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(1): 102-104.
- [33] 贾君莹, 钟亚平, 王素华, 等. 铁路下特厚煤层综放开采覆岩离层规律实测研究[J]. 矿山测量, 2008(4): 59-62.  
JIA Junying, ZHONG Yaping, WANG Suhua, et al. Field measurements of bed separation in the overburden during longwall top coal caving under the railways [J]. Mine Surveying, 2008(4): 59-62.
- [34] 张华兴, 张刚艳, 许延春. 覆岩破坏裂缝探测技术的新进展[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(9): 60-62.  
ZHANG Huaxing, ZHANG Gangyan, XU Yanchun. New development on probing and measuring technology for failed cracking of overburden rock [J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(9): 60-62.
- [35] 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.
- [36] CHEN Shougen, HU Weidong. A comprehensive study on subsidence control using COSFLOW [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2009, 27(3): 305-314.
- [37] CHEN Shougen, GUO Hua. Numerical simulation of bed separation development and grout injecting into separations [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(4): 375-385.
- [38] SHEN Baotang, POULSEN Brett. Investigation of overburden behaviour for grout injection to control mine subsidence [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(3): 317-323.
- [39] PALCHIK V. Experimental investigation of apertures of mining-induced horizontal fractures [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(3): 502-508.
- [40] 滕浩. 覆岩隔离注浆充填压实区形成机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.  
TENG Hao. Formation mechanism of compacting area in the gob with grouting into overburden of isolated panels during longwall mining [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [41] 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): 31-34.

- WANG Jinzhuang, KANG Jianrong, WU Lixin. Discussion on mechanism and application of grouting in separated bed to reduce surface subsidence induced by coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(4): 31-34.
- [42] 滕永海, 阎振斌. 采动过程中覆岩离层发育规律的研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 27-30.
- TENG Yonghai, YAN Zhenbin. Study on law of overburden split developing in mining process[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(1): 27-30.
- [43] 许家林, 秦伟, 陈晓军, 等. 采动覆岩卸荷膨胀累积效应的影响因素[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 115-127.
- XU Jialin, QIN Wei, CHEN Xiaojun, et al. Influencing factors of accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 115-127.
- [44] XUAN Dayang, XU Jialin, WANG Binglong, 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.
- [45] 王秉龙. 覆岩隔离注浆充填承载结构模型及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- WANG Binglong. Study on the bearing structure model of isolated overburden grout injection and its application [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [46] 轩大洋. 采动覆岩隔离注浆充填沉陷控制原理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- XUAN Dayang. Principle of subsidence control using grout injection into overburden of isolated panels during longwall mining [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [47] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- [48] XUAN Dayang, LI Jian, ZHENG Kaidan, et al. Experimental study of slurry flow in mining-induced fractures during longwall overburden grout injection[J]. Geofluids, 2020: 8877616.
- [49] 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.
- [50] 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): 1118-1123.
- 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): 1118-1123.
- [51] 张亮, 许家林, 轩大洋. 覆岩隔离注浆充填浆体泌水特性试验研究[J]. 中国煤炭, 2017, 43(9): 121-124.
- ZHANG Liang, XU Jialin, XUAN Dayang. Experimental research on slurry bleeding properties of isolated grouting filling for overburden [J]. China Coal, 2017, 43(9): 121-124.
- [52] 轩大洋, 许家林, 朱卫兵, 等. 注浆充填控制巨厚火成岩下动力灾害的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 1967-1974.
- XUAN Dayang, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Field test on dynamic disaster control by grouting below extremely thick igneous rock[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 1967-1974.