

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. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.3055

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. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.3055

部分充填采煤技术的研究与实践

许家林^{1,2}, 轩大洋¹, 朱卫兵², 王晓振², 王秉龙^{1,2}, 滕浩^{1,2}

(1. 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; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 对煤矿充填开采而言, 如何提高充填采煤效率、降低充填成本是需要持续深入研究的问题。结合煤系层状覆岩移动特点和控制要求研发的部分充填采煤技术, 为上述问题的解决提供了一条重要途径。在对我国充填采煤技术发展进行综述的基础上, 系统总结了部分充填采煤技术的研究进展, 包括: 部分充填开采的概念与技术框架, 覆岩隔离注浆充填、短壁冒落区嗣后充填、长壁墩柱同步充填等3种部分充填采煤技术的原理、设计方法、适用条件和应用情况。实践证明, 部分充填是一种高效低成本充填采煤技术, 尤其是覆岩隔离注浆充填, 其吨煤充填成本仅为30~60元, 单面充填采煤能力可达60~100万t/a, 已在淮北矿区得到推广应用。

关键词: 部分充填; 建筑物下采煤; 覆岩隔离注浆充填; 关键层; 绿色开采

中图分类号: TD823.7

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2015)06-1303-10

Study and application of coal mining with partial backfilling

XU Jia-lin^{1,2}, XUAN Da-yang¹, ZHU Wei-bing², WANG Xiao-zhen², WANG Bing-long^{1,2}, TENG Hao^{1,2}

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

Abstract: For the technology of coal mining with backfilling, how to improve the coal mining efficiency with backfilling and reduce the backfilling cost are the problems that need in-depth and continuous studies. The partial backfilling technology, which was proposed based on the characteristics of layered strata movement and its control requirements, provides an important way to solve the above problems. Following a review of the developments of coal mining with backfilling in China, the research progresses of partial backfilling were summarized. These consist of the concept and technical framework of partial backfilling, and principles, design methods, applicable conditions and the application of three typical partial backfilling techniques, namely isolated grout injection into overburden, subsequent backfilling in shortwall caved zone, and longwall synchronous columns backfilling. Practices show that the techniques of coal mining with partial backfilling are high-efficient and low-cost, in which isolated grout injection into overburden is especially representative, for its backfilling cost for unit coal of just 30–60 Yuan per ton of coal produced and the annual coal mining capacity at a single panel of 0.6–1.0 Mt/a. The grout injection technique has been applied successfully in the Huaibei mining district.

Key words: partial backfilling; coal mining under buildings; isolated grout injection into overburden; key stratum; green mining

近十多年, 充填开采在我国煤矿得到了极大发展, 在“三下”压煤开采和环境保护中发挥了十分重

要的作用^[1-3]。如何进一步提高充填采煤效率、降低充填成本是煤矿充填开采中需要持续深入研究的问题

收稿日期: 2014-12-18

责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAK04B06)

作者简介: 许家林(1966—), 男, 江苏句容人, 教授, 博士生导师。Tel: 0516-83885581, E-mail: cumtxjl@cumt.edu.cn

题,部分充填采煤技术是解决该问题的途径之一,也是实现高效低成本充填采煤的客观要求。本文简要回顾了充填采煤技术的发展,对其面临的难点与挑战进行了探讨。针对这些难点,从控制覆岩关键层稳定性出发,基于采动空隙的传播与演化过程建立了部分充填采煤技术框架,研发了覆岩隔离注浆充填、短壁冒落区嗣后充填、长壁墩柱同步充填等 3 种部分充填采煤技术,并着重就其技术原理、设计方法、适用条件和应用情况进行了介绍。

1 充填采煤技术的发展与挑战

1.1 充填采煤技术的发展

充填开采是指用废弃物填充开采导致的采空区、冒落区、离层区等采动空间,在煤矿实施充填的主要目的是处理固体废弃物(如煤矸石、粉煤灰)、控制岩层移动和地表沉陷,从而实现绿色开采。煤矿充填开采方法可分为全部充填与部分充填。全部充填也即采空区充填,是在煤层采出后顶板未冒落之前对所有采空区域进行充填,其充填范围与采出空间大体一致;部分充填则是相对全部充填而言的,其充填量和充填范围仅是采出空间的一部分^[1,4-3]。

在我国煤矿,采空区充填经历了较长的发展历史,但近十余年来发展尤为迅速。早在 1912 年,抚顺矿务局即开始了极小规模的水砂充填试验,但并非用于控制地表沉陷。1960 年,胜利煤矿首次采用水砂充填采煤法,成功地开采了矿务局车辆修理厂的保护煤柱;之后,新汶矿务局孙村等矿井也开展了水砂充填开采试验^[4]。早期,水砂充填的主要目的是在厚煤层分层开采时进行顶板管理而不是控制地表沉陷。由于水砂充填的机械化程度与生产效率低、充填系统复杂、充填材料泌水严重,导致其并未得到推广应用。随着煤矿绿色开采的提出^[5-7],充填开采作为地表沉陷控制和“三下”压煤开采的重要手段,得到了较大发展,形成了以固体^[8]、膏体^[9]、高水材料^[10]等为代表性的多种充填采煤技术。这些采空区充填技术的最显著区别特征在于所用的充填材料,造成充填工艺和装备均有所不同,以及机械化水平和效率也有所差别,但本质上,这些方法均是在工作面推进过程中顶板垮落之前及时充填后方采空区。

膏体充填通过泵送膏体充填采空区,充填体密实度高且强度大^[11-12]。固体充填主要利用破碎矸石作为充填物,为了提高密实度和充填率,常添加粉煤灰并增设夯实机构压实充填体^[11,13-14]。高水材料充填则采用高体积含水率(85%~97%)的“高水材料”作为充填物^[15],分别泵送 2 种单浆液,在工作面混合后

注入采空区^[16]。这些技术在我国建筑物下采煤中发挥了十分积极的作用,其中以冀中能源集团、山东能源集团较具代表性。

1.2 充填采煤技术面临的挑战

较之非煤矿山而言,在煤矿实施采空区充填面临诸多难点,这是由于煤矿自身特点所决定的,主要包括以下几个方面:① 采煤工作面多采用综合机械化开采,推进速度快、生产能力大,故所要求的充填能力也大;② 煤系地层为层状岩体,直接顶板多随采随垮,造成充填空间极难维护,使得充填与采煤几乎处于同一场所;③ 由于采出空间体积大,故所需要的充填材料量大;④ 由于充填并非采煤的必须工序,因而实施充填时除新增充填系统及设备外,往往还需增加配套的专用支架。

上述特点决定了煤矿实施充填将面临如下技术难点^[16]:① 充填速度难以满足采煤能力要求。由于煤矿开采空间极大而实际充填速度受限,往往制约工作面快速推进,导致充填采煤能力与效率低。② 充填与采煤相互干扰。实施充填必然要停止采煤,而若持续开采则不再具备充填空间,加剧了充填工作面效率低这一局面。③ 充填材料供应难以满足实际需求。由于煤矿所需的充填量大,而自身所产出的煤矸石、粉煤灰分别仅占原煤产量的 10%~20%,20%~30%,使得煤矿实施充填面临充填材料不足的问题。④ 充填成本与新增效益均衡难度大。专用充填支架、充填系统及装备、充填材料导致吨煤成本增加 30% 左右(多数达 100 元/(t 煤)左右),实际值受充填原材料等影响极大,同时,因实施充填导致采煤效率的降低进一步增加了吨煤成本。尽管目前国家已出台了鼓励充填采煤的相关政策,如对充填开采置换出的煤炭,资源税减征 50%^[17],但考虑到当前煤炭行业利润较低,因而实现充填成本与新增效益均衡的难度较大。上述多种因素限制了充填采煤的推广应用。

除了以上难点之外,在地表沉陷控制效果方面,采空区充填也面临着一定挑战。尽管采空区充填也称作全部充填,但严格意义上,任何充填工艺均不能完全将采空区充填密实,即充填率达不到 100%,这既与充填工艺、充填材料压缩特性等有关,也与采动地层的超前下沉有关。因而,在充填条件下,地表仍然会出现无法避免的下沉。文献^[18]曾搜集得到德国、波兰等国采用水砂充填开采时的地表下沉系数为 0.05~0.35,与我国采用水砂充填开采时的地表下沉系数 0.06~0.30 相符(表 1)。文献^[9]通过对我国太平煤矿等矿井实测得出了膏体充填开采时的地表

下沉系数为 0.09 ~ 0.26(表 2), 与水砂充填时的下沉系数接近。总体而言, 充填材料密度越大、压缩率越小, 则地表下沉系数越小。由于膏体具有密度高等优势, 故对岩层移动与地表沉陷控制效果较好。因此可以推断, 一般情况下采空区充填开采的地表下沉系数为 0.1 ~ 0.3, 实际值与充填材料、充填工艺、充填率等因素有关。

表 1 水砂充填地表下沉系数^[18]

Table 1 Subsidence coefficient with hydraulic sand backfilling^[18]

矿区(井)	下沉系数
德国鲁尔矿区	0.20
波兰上西里西亚矿区	0.12
法国 North & Pas-de-calais 矿区	0.25 ~ 0.35
英国煤矿区	0.15 ~ 0.20
日本 Kuho 煤矿	0.19
印度 Kamptee 矿区	0.05
中国抚顺、新汶矿区	0.06 ~ 0.30

表 2 膏体充填充分采动地表下沉系数^[19]

Table 2 Subsidence coefficient for critical extraction using paste backfilling^[19]

矿井	采高/m	下沉系数	备注
太平煤矿	4.40	0.15 ~ 0.26	分层无煤柱长壁开采(面宽 180 m)
朱村煤矿	1.34	0.09 ~ 0.15	无煤柱长壁开采(面宽 105 m)
小屯煤矿	5.50	0.15 ~ 0.20*	分层无煤柱长壁开采(面宽 120 m)
岱庄煤矿	2.66	< 0.10*	回收条带开采遗留煤柱

注: * 由非充分开采条件下推断得出。

文献 [20] 通过数值模拟得出, 在充填工作面采高大于某一高度时(临界采高), 较小采宽条件下能够保证开采后建筑物不发生破坏, 而一旦采宽加大, 充填开采的沉陷控制效果将变差, 可能导致建筑物出现大于《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》规定的 I 级破坏^[21]。在文献 [20] 给出的条件下, 临界采高为 3 m。针对这种情况, 文献 [22] 提出了采空区隔离充填开采的概念, 即基于关键层稳定性控制以设计长壁工作面的开采宽度, 在相邻工作面之间留设隔离煤柱限制采宽, 利用充填体和隔离煤柱共同控制关键层稳定性, 从而使得超临界采高开采时的地表沉陷得到有效控制。

2 部分充填采煤技术的研究与实践

2.1 部分充填采煤技术框架

针对充填采煤技术面临的上述难点与挑战, 结合煤系层状覆岩移动特点, 提出了基于关键层稳定性控

制的部分充填采煤方法^[5]。部分充填不是单纯利用充填控制开采沉陷, 而是靠覆岩关键层结构、充填体、隔离煤柱联合控制地表沉陷。自部分充填提出以来^[5], 在理论、技术与实践方面得到了不断发展, 在建筑物下采煤中发挥了较大作用, 其中以淮北矿业集团、淄博矿业集团等较具代表性。

根据煤层采出后采动空隙由下向上的传播与演化过程, 部分充填位置可以为采空区、冒落区或离层区^[5,23]。针对这 3 个不同充填位置, 研发了 3 种部分充填开采技术模式(图 1): 长壁墩柱同步充填、短壁冒落区嗣后充填、覆岩隔离注浆充填, 前 2 者是基于控制覆岩第 1 层亚关键层的稳定性以减少地表沉陷, 后者则是基于控制“导高”以上覆岩关键层的稳定性以减少沉陷。以下分别对这 3 种部分充填采煤技术的原理、设计方法、技术参数、适用条件、应用情况等进行介绍。

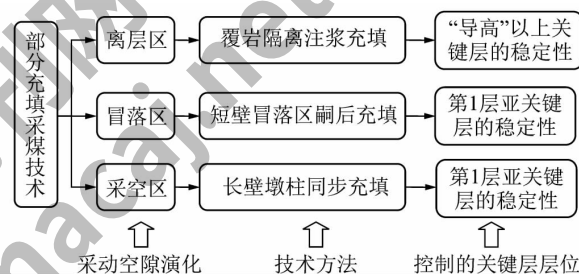


图 1 部分充填采煤技术框架

Fig. 1 Technical framework of coal mining with partial backfilling

2.2 覆岩隔离注浆充填不迁村采煤技术

2.2.1 技术原理

覆岩隔离注浆充填是对传统离层区注浆充填的创新^[24-27], 通过设计合理的工作面采宽并留设一定宽度的隔离煤柱, 充分利用上覆岩层结构的自承载能力, 通过地面钻孔对采动覆岩高压注浆充填在工作面中部形成一定宽度的压实支撑区, 利用压实区与隔离煤柱联合控制覆岩关键层结构的稳定性, 从而减小地表下沉、实现不迁村采煤(图 2)。

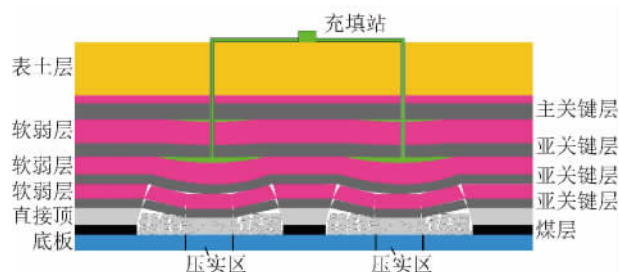


图 2 覆岩隔离注浆充填不迁村采煤技术原理

Fig. 2 Schematic of coal mining without removal of villages using isolated grout injection into overburden

覆岩隔离注浆充填技术原理在钻孔原位探测和相似模拟实验中均得到了验证。

在已实施隔离注浆充填的刘店煤矿104采区开展了钻孔探测^[28],得出覆岩内注浆充填体以压实灰体形式存在(即不再含有自由水),90%以上的充填体位于注浆充填钻孔(注3孔)终孔上方的第1层关键层(即关键层5)以下,即存在1个主注浆充填

段,段内充填厚度占充填体总厚度的92.7%(图3(a)),其上限受到了该关键层的控制。进一步根据探测钻孔所在位置的粉煤灰充填厚度、地表下沉(下沉曲线如图4所示)等数据,计算得到采空区中部的残余碎胀系数与常规的长壁工作面采空区残余碎胀系数接近,表明注浆充填后工作面中部已处于压实状态。

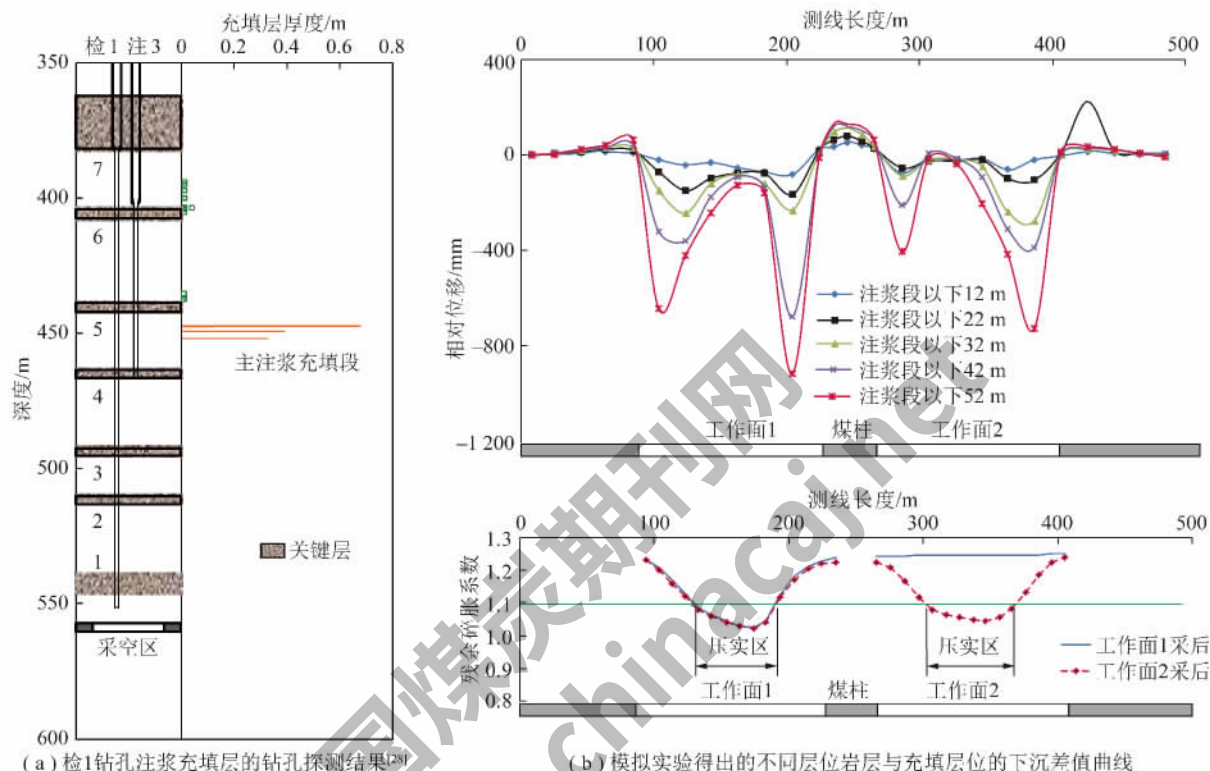


图3 覆岩隔离注浆充填压实区验证

Fig. 3 Verification of compaction area for isolated grout injection into overburden

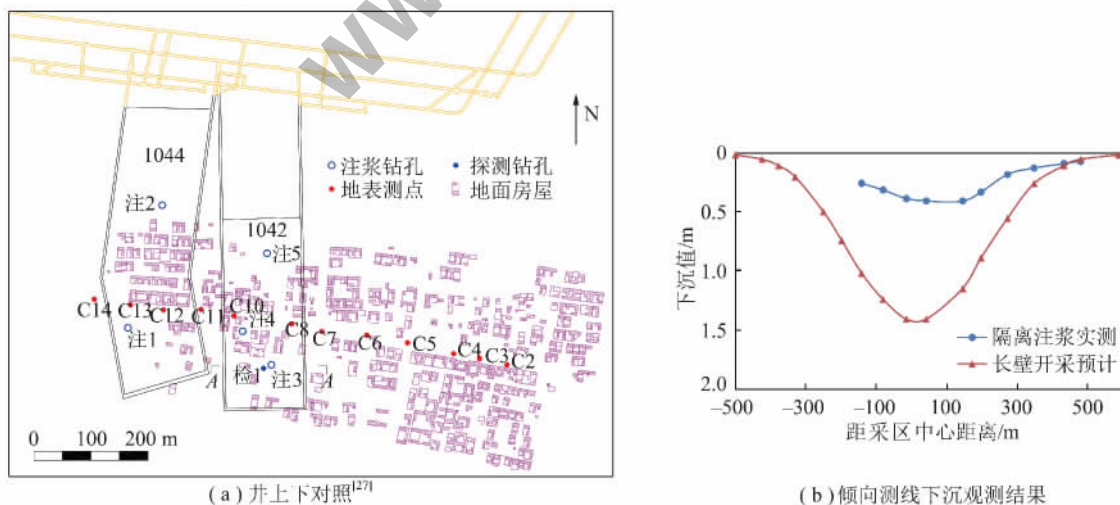


图4 刘店煤矿104采区井上下对照图及地表沉陷观测结果

Fig. 4 Surface-underground contrast plan and observed surface subsidence for 104 area in Liudian Coal Mine

双工作面覆岩隔离注浆充填开采模拟实验结果表明,采空区中部(约40 m范围)与注浆充填层位之

间的岩层经历了较大的变形,各岩层与注浆充填层位下界面的下沉量差值趋近于0(图3(b)),残余碎胀

系数接近 1.05, 表明注浆充填后在工作面中部形成了压实区, 从而证实了覆岩隔离注浆充填沉陷控制原理。

2.2.2 设计方法

覆岩隔离注浆充填技术设计流程如图 5 所示, 主要包括注浆充填工作面采宽和隔离煤柱宽度、注浆充填钻孔布置、覆岩隔离注浆充填工艺系统与参数设计, 以下分别对这 3 部分进行介绍。

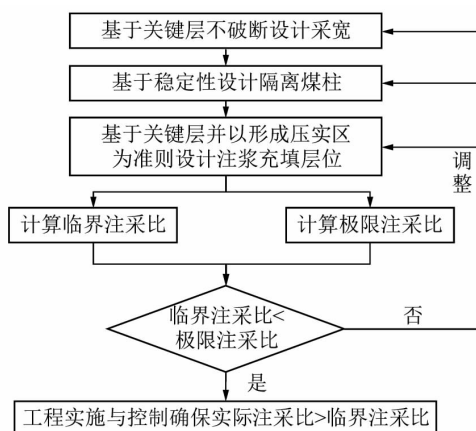


图5 覆岩隔离注浆充填设计流程

Fig. 5 Flow of the design for isolated grout injection

(1) 采宽和隔离煤柱宽度设计。

根据主关键层对地表沉陷的控制作用, 可以按照覆岩主关键层不破断设计充填工作面采宽(图 6), 其原则是: 最大采宽应保证覆岩主关键层不发生破断失稳; 当主关键层不是典型的厚硬岩层时, 为安全起见可以按下方某一层亚关键层不破断进行设计。其中, 关键层的极限跨距可基于薄板模型或梁模型计算。当计算得出关键层破断距后, 结合关键层与煤层的间距、岩层破断角, 可以按式(1) 计算得出基于某一层关键层不破断的充填工作面采宽:

$$W \leq L_k + 2D/\tan \delta \quad (1)$$

式中, W 为工作面采宽; D 为关键层到工作面的距离; δ 为岩层破断角; L_k 为关键层极限跨距。

为保证注浆充填沉陷控制效果, 必须使相邻工作面开采后一直处于非充分采动状态, 即工作面之间应留设一定宽度的煤柱隔离开来。根据覆岩隔离注浆充填技术原理, 可将注浆充填压实区视作为条带煤柱, 从而将隔离注浆充填开采等效为条带开采, 并参照条带煤柱设计方法进行隔离煤柱宽度设计^[23]。实践中, 常以满足稳定性为原则采用安全系数法进行计算, 即煤柱强度与承受载荷的比值(安全系数) 大于 1.5。

(2) 注浆充填钻孔布置。

注浆充填钻孔终孔深度设计须首先考虑安全问

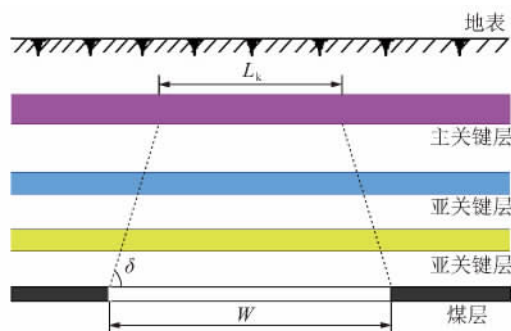


图6 基于关键层不破断思想设计工作面采宽

Fig. 6 Schematic of panel width design based on the non-breaking concept of key stratum

题, 即应避免浆液进入工作面, 因此终孔层位设计应以不沟通水裂隙带顶界为原则。此时, 可以利用“基于关键层位置的导水裂隙带高度判别方法”^[24]对注浆充填钻孔的终孔层位作出设计。同时, 注浆充填钻孔沿走向布置也应结合具体的覆岩关键层结构进行确定^[25]。

(3) 覆岩隔离注浆充填工艺系统与参数。

决定覆岩隔离注浆充填沉陷控制效果的关键因素是注采比(即覆岩内充填的压实灰体体积占采出体积的百分比), 它也是实践中的重要工程控制指标。根据实验研究结果, 当注浆充填层位确定之后, 该层位所能实现的最大注采比(定义为极限注采比)也随之确定, 其经验计算公式^[23]为

$$\alpha = \left(1 - \frac{H}{W \tan \varphi}\right) \left[1 - \frac{H_c (K_p - 1)}{M}\right] \quad (2)$$

式中, α 为注采比; H 为主注浆充填段与煤层间距; φ 为充分采动角; M 为采高; H_c 为垮落带高度; K_p 为采空区残余碎胀系数。

然而, 对于特定的研究区域, 满足地表沉陷控制要求时存在 1 个最小的注采比(定义为临界注采比), 只有临界注采比小于极限注采比时, 所选定的注浆充填层位才是合理的。考虑到实际工程中注浆充填系统等原因的限制, 所能实现的注采比(定义为实际注采比)往往无法达到极限注采比, 因此在注采比设计中, 应要求临界注采比小于极限注采比。临界注采比的确定方法见文献[22]。

注浆充填系统是确保工程中达到临界注采比的关键环节。设计的典型的覆岩隔离注浆充填系统工作流程如下: 电厂的粉煤灰经罐车运至地表注浆充填站, 并利用气压送入粉煤灰储料仓中; 然后粉煤灰经螺旋机送至一级搅拌池中与水进行初搅拌, 再送入二级搅拌池中进行二次搅拌; 最后通过注浆泵由输浆管路注入注浆充填钻孔。此外, 研究形成了覆岩隔离注浆充填的其他工艺参数设计方法, 如注浆充填材料、

注浆压力、注浆充填与采煤速度匹配等,限于篇幅,不再赘述。

2.2.3 技术参数与适用条件

覆岩隔离注浆充填技术可布置常规长壁综采工作面,单面产量可达 60 ~ 100 万 t/a,煤炭采出率大于 80%,地表下沉系数控制在 0.1 ~ 0.2,吨煤充填成本为 30 ~ 60 元。目前,该技术适用条件为:基岩厚度较大(一般 > 100 m)的单一煤层,地面具备注浆充填钻孔施工条件。覆岩隔离注浆充填对“局部压煤”条件下不迁村开采具有独特的优势,即工作面仅局部被地面建(构)筑物所压覆(如开切眼侧压煤、终采线侧压煤等),此时仅需对压煤区域实施注浆充填,其他区域仍正常回采,避

免了井下充填在压煤、非压煤区域过渡时需要变换支架进行跳采的问题。我国村庄压煤多数情况属于局部压煤类型,因此,覆岩隔离注浆充填技术具有广阔的应用前景。

2.2.4 应用情况

自 2009 年以来,覆岩隔离注浆充填不迁村采煤技术已在淮北矿业集团 8 个煤矿的 12 个压煤采区(压煤村庄 22 个)进行了应用(表 3),累计采出村庄下煤量 742.1 余万 t,地表下沉系数均处于 0.2 以下,建筑物不需要任何维修可正常使用,节省了迁村费用约 10 亿元,缓解了矿井的采掘接续紧张局面,取得了显著的经济效益和社会效益。目前,该技术已推广应用于皖北矿区、山西三元煤业等。

表 3 覆岩隔离注浆充填不迁村采煤技术应用情况

Table 3 Application projects of coal mining without removal of villages using isolated grout injection

序号	矿 井	采 区	类 型	应用年份	采高/m	采出煤量/万 t
1	刘店煤矿	104 采区	村庄下采煤	2009	3.0 ~ 3.2	85.0
2		103 采区	村庄下采煤	2010	3.2	76.9
3		76 采区	村庄下采煤	2012	3.8 ~ 4.0	140.1
4		101 采区	村庄下采煤	2012	3.2 ~ 3.5	93.8
5	海孜煤矿	I3 采区	村庄下采煤	2009	3.0	67.2
6		III102 采区	村庄下采煤	2009	3.0	56.3
7	祁南煤矿	36 采区	村庄下采煤	2012	4.0	55.7
8	桃园煤矿	北八采区	垃圾站、开发区下采煤	2012	2.4	27.0
9	袁店二井煤矿	82 采区	村庄下采煤	2013	5.0	72.2
10	临涣煤矿	III103 采区	村庄下采煤	2013	3.5	45.6
11	杨庄煤矿	IV51 采区	村庄下采煤	2014	3.1	22.3
12	石台煤矿	III 采区	村庄下采煤	2015	2.8 ~ 3.0	-

以刘店煤矿 104 采区为例,对覆岩隔离注浆充填不迁村采煤技术实践进行简要介绍。104 采区开采 10 煤层,煤层倾角 9°;采深 570 ~ 670 m,平均 620 m;松散层厚度 350 m;基岩厚度 220 ~ 320 m,平均 270 m。104 采区为矿井首采区,全部被地面 2 个村庄压覆。采区共布置 1044,1042 两个工作面,1044 工作面采宽 150 m,推进总长 490 m,为首采工作面;1042 工作面长 145 m,推进长 420 m;两工作面间隔离煤柱 32 ~ 54 m(断层保护煤柱),平均宽度约 42 m(图 4(a)),工作面采高为 3.0 ~ 3.2 m。1044,1042 工作面注浆充填时间分别为 2009 年 9 月至 2010 年 6 月,2011 年 12 月至 2012 年 8 月。采区总充填粉煤灰量 169 651 t,总注采比达 43.1%。采区开采结束时,地表下沉控制在 0.4 m 以下(图 4(b))。开采结束后 1 a 观测得到地表最大下沉为 0.496 m,下沉速度趋近于 0。地面建筑物没有任何损坏,不需要任何维修即可正常使用。在保证地面建筑物安全的同时,累计采

出压煤 85 万 t。覆岩隔离注浆充填吨煤成本约 30 元,为采区节省搬迁费用高达 7 000 万元,同时解决了矿井投产与村庄搬迁的矛盾,取得了显著经济与社会效益。

2.3 短壁冒落区嗣后充填开采技术

2.3.1 技术原理

短壁冒落区嗣后充填技术原理是:将采区划分为若干个短壁工作面,面间留设隔离煤柱;利用浆体膨胀复合材料对短壁工作面冒落区的空隙进行注浆充填,形成冒落矸石与浆体膨胀复合材料的组合充填体,以支撑上覆关键层;待浆体充填体自身达到一定强度后,回采各短壁工作面之间的隔离煤柱,并根据煤柱两侧充填体的稳定性有选择地对煤柱采出后的冒落区实施注浆充填(或不充填),最终形成多个间隔的冒落矸石与浆体组合充填体,共同支撑上覆关键层,从而有效控制地表沉陷。该方法的优势在于实现了采充分离,避免了采充干扰问题。

2.3.2 设计方法

短壁冒落区嗣后充填技术设计流程如图7所示, 主要包括合理的短壁工作面采宽设计、短壁工作面冒落区充填率估算、短壁工作面之间隔离煤柱宽度设计、回收隔离煤柱时冒落区嗣后充填间隔设计以及短壁冒落区嗣后充填地表沉陷预计, 以下对其进行介绍。

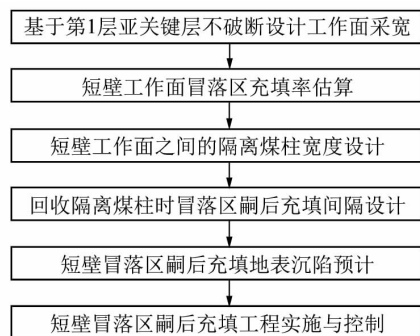


图7 短壁冒落区嗣后充填设计流程

Fig. 7 Flow of the design for subsequent backfilling in shortwall caved zone

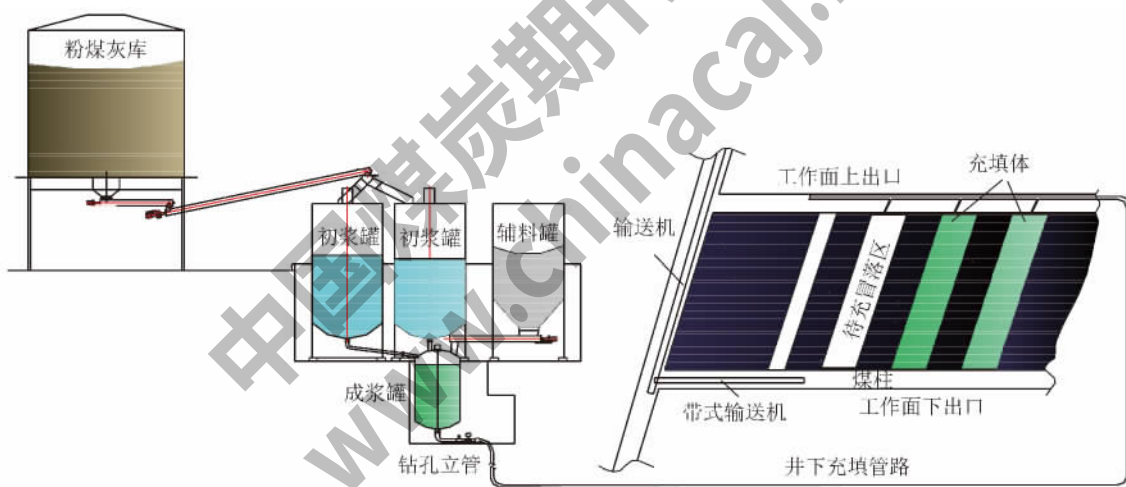


图8 短壁冒落区嗣后充填系统与工艺流程

Fig. 8 System and process for subsequent backfilling in shortwall caved zone

2.3.4 应用情况

短壁冒落区嗣后充填已在淄博市田家煤矿、淄博矿业集团埠村煤矿等矿井不迁村采煤中得到了成功应用。以埠村煤矿911采区9111工作面为例, 对短壁冒落区嗣后充填技术实践进行简要介绍。

911采区面临地面建筑物压煤、底板奥灰水的双重威胁, 早期(2004—2009年)为安全采煤采用了条带开采方案, 但采出率仅为45%, 造成了31.3万t的呆滞煤炭。为提高采出率, 在911采区进行了短壁冒落区嗣后充填开采试验。9111为采区的首个试验工作面^[3], 走向长621 m, 倾斜宽110 m; 煤厚平均1.3 m, 倾角5°~14°; 埋深345~480 m; 原条带方案为采

短壁工作面采宽以第1层亚关键层不破断为原则进行设计。在估算短壁工作面冒落区充填率时, 可将该层亚关键层视作梁结构, 通过求解其挠度方程得出亚关键层下沉体积, 进而根据其与采出煤层体积的差值求出充填率的估算值。在隔离煤柱宽度设计时, 同样采用安全系数。如何确定回收隔离煤柱时的合理冒落区充填间隔是该方法的关键, 此时需要将多个相邻的冒落矸石与浆体膨胀材料组合充填体视作一个整体, 将不充填区域视作采空区, 利用安全系数法计算出合理的充填间隔。图8为短壁冒落区嗣后充填系统与流程。限于篇幅, 详细的短壁冒落区嗣后充填设计方法将另行撰文介绍。

2.3.3 技术参数与适用条件

短壁冒落区嗣后充填工作面宽度可布置为20~50 m, 单面产量为20~40万t/a, 煤炭采出率大于95%, 地表下沉系数控制在0.15~0.20, 吨煤充填成本较采空区充填降低20%~50%。该技术主要适用于薄及中厚煤层, 尤其适合于充填置换条带煤柱。

宽15~20 m、留宽15~20 m。

根据图7所示的设计流程, 确定了如下充填方案: 首先对已采条带的采空区实施自流式开放充填, 待充填体强度增长至2.2 MPa后间隔回收条带煤柱, 每开采1个条带煤柱后及时对其采空区实施自流式充填, 最后依次回收工作面内剩余的条带煤柱, 此时不进行充填。根据该方案, 9111工作面总充填率为76.6%, 比全部充填减少约20%, 但所有充填条带的充填率平均值高达98.7%, 表明各条带均充填密实。9111工作面实施短壁冒落区嗣后充开采后, 实测地表最大下沉仅为0.011 m, 建筑物没有任何损坏, 实现了不迁村安全采煤。

2.4 长壁墩柱同步充填开采技术

2.4.1 技术原理

长壁墩柱同步充填是在工作面每推进一定距离后,在后方采空区间隔设置一定形状的布袋并灌注浆体膨胀复合材料,待充填体凝固后形成多个独立的墩柱(图9),从而共同支撑覆岩亚关键层、有效控制地表沉陷。该技术是采空区条带充填的一种简化形式^[23]。

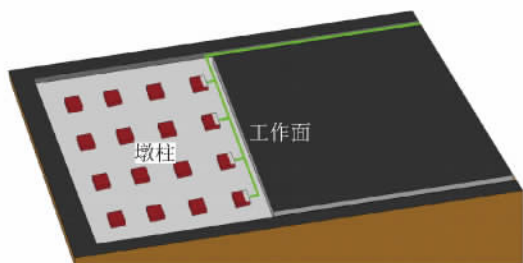


图9 长壁墩柱同步充填技术原理示意

Fig. 9 Schematic of longwall synchronous columns backfilling

2.4.2 设计方法

长壁墩柱同步充填技术设计流程如图10所示,主要包括合理的墩柱尺寸设计、合理的墩柱间排距设计、最优的充填率设计,其中,前面2者是长壁墩柱同步充填地表沉陷控制的关键,以下分别对这3个部分进行介绍。

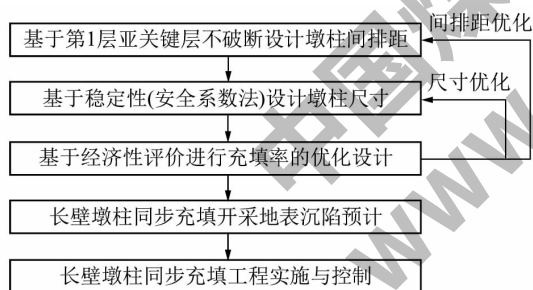


图10 长壁墩柱同步充填技术设计流程

Fig. 10 Flow of the design for longwall synchronous columns backfilling

墩柱间排距设计应以控制煤层上方第1层亚关键层不破断为原则,实践中为安全起见,采用控制墩柱之间的直接顶不破断为原则进行设计:令墩柱间暴露的直接顶所受的最大拉应力小于其抗拉强度可求出合理的墩柱间排距。墩柱尺寸采用类似于隔离煤柱设计的安全系数法进行计算。由上述方法确定出的墩柱间排距、墩柱尺寸均为可选择的区间,此时需要以充填率最小为原则确定出最优的间排距、尺寸组合,以获得最佳经济效益。长壁墩柱同步充填系统与工艺流程与图8类似。限于篇幅,详细的长壁墩柱同步充填设计方法、技术实践将另行撰文介绍。

2.4.3 技术参数与适用条件

长壁墩柱同步充填开采技术可以布置长壁工作面,单面产量可达20~30万t/a,煤炭采出率大于95%,地表下沉系数控制在0.1~0.2,吨煤充填成本较采空区全部充填降低20%~50%。该技术适用条件为:采深较浅的近水平薄煤层,且要求直接顶稳定性好。

2.4.4 应用情况

长壁墩柱同步充填已在淄博市王庄煤矿等进行了成功应用。以该矿七采区27401工作面为例,对长壁墩柱同步充填技术实践进行简要介绍。工作面采宽120~130m,开采4号煤层,煤厚平均0.82m,倾角平均6°;采深平均约240m,其中基岩厚度约113m,松散层厚度约127m。工作面直接顶为1.4m厚的细砂岩(第1层亚关键层),抗拉强度5MPa。充填材料为淄博市王庄煤矿自主研发的浆体膨胀复合材料,7d强度为5.4MPa。按照图10所示的长壁墩柱同步充填设计流程,理论计算确定了墩柱间、排距为7.0m,墩柱边长为7.1m,此时所需充填率仅为25.4%,比全部充填时减少69.6%。27401工作面实施长壁墩柱同步充填开采后,吨煤充填成本减少了50元,实测地表最大下沉仅0.048m,地表严格控制在I级变形以内,有效保护了地面建筑物,实现了不迁村安全采煤。

3 结 论

(1) 煤矿实施充填开采面临着充采能力不匹配、充采相互干扰、充采效益不均衡等难点,基于煤系层状覆岩移动特点研发的部分充填采煤技术是解决这些难点的一种有效途径。

(2) 根据采动空隙由下向上的传播与演化过程,部分充填位置可以是采空区、冒落区或离层区,针对这3个位置,研发形成了长壁墩柱同步充填、短壁冒落区嗣后充填、覆岩隔离注浆充填等3种高效低成本的部分充填不迁村采煤技术,并进行了工程应用。其中,覆岩隔离注浆充填不迁村采煤技术已在淮北矿区8个煤矿的12个压煤采区(压煤村庄22个)得到了成功应用,取得了显著的经济与社会效益。

(3) 部分充填核心思想是充分利用覆岩结构的自承载能力,通过覆岩关键层结构、充填体、隔离煤柱联合控制地表沉陷,其技术关键是基于具体覆岩关键层结构进行充填开采方案设计,包括所需控制的覆岩关键层层位确定、工作面采宽与隔离煤柱宽度设计、充填与采煤的时空配合、地表沉陷预计等。

有关研究工作得到了淮北矿业集团、淄博矿业集团、淄博市王庄煤矿的领导和工程技术人员的大力支持和帮助,特致感谢!

参考文献:

- [1] 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 backfill coal mining technology [J]. Mining Technology, 2011, 11(3): 24-30.
- [2] 胡炳南. 我国煤矿充填开采技术及其发展趋势 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(11): 1-5.
Hu Bingnan. Backfill mining technology and development tendency in China coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(11): 1-5.
- [3] 吴 吟. 中国煤矿充填开采技术的成效与发展方向 [J]. 中国煤炭, 2012, 38(6): 5-10.
Wu Yin. Effectiveness and development direction of filling mining technology in China's coal mines [J]. China Coal, 2012, 38(6): 5-10.
- [4] Xuan Dayang, Xu Jialin, Zhu Weibing. Backfill mining practice in China coal mines [J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 2013, 61(7-8): 225-234.
- [5] 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.
- [6] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术 [J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 5-10.
Qian Minghao, Xu Jialin, Miao Xiexing. Green technique in coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 5-10.
- [7] Xu Jialin, Zhu Weibing, Lai Wenqi, et al. Green mining techniques in the coal mines of China [J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 2004, 52(12): 395-398.
- [8] 缪协兴, 张吉雄. 井下煤矸分离与综合机械化固体充填采煤技术 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1424-1433.
Miao Xiexing, Zhang Jixiong. Key technologies of integration of coal mining-gangue washing-backfilling and coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1424-1433.
- [9] 周华强, 侯朝炯, 孙希奎, 等. 固体废物膏体充填不迁村采煤 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 154-158.
Zhou Huaqiang, Hou Chaojiong, Sun Xikui, et al. Solid waste paste filling for none-village-relocation coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 154-158.
- [10] 冯光明, 孙春东, 王成真, 等. 超高水材料采空区充填方法研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1963-1968.
Feng Guangming, Sun Chundong, Wang Chengzhen, et al. Research on goaf filling methods with super high-water material [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1963-1968.
- [11] 刘建功, 赵庆彪. 综合机械化充填采煤 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1413-1418.
Liu Jiangong, Zhao Qingbiao. Comprehensive mechanized filling coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9): 1413-1418.
- [12] 李贻久, 江新兵. 综采膏体充填工艺在太平煤矿的应用 [J]. 煤矿开采, 2009, 14(2): 42-43.
Li Yijiu, Jiang Xinbing. Application of full-mechanized mining and stowing with paste in Taiping Colliery [J]. Coal Mining, 2009, 14(2): 42-43.
- [13] 张吉雄. 矸石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究 [J]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- [14] 缪协兴, 张吉雄, 郭广礼. 综合机械化固体充填采煤方法与技术研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 1-6.
Miao Xiexing, Zhang Jixiong, Guo Guangli. Study on waste-filling method and technology in fully-mechanized coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 1-6.
- [15] 冯光明, 丁 玉, 朱红菊, 等. 矿用超高水充填材料及其结构的实验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 813-819.
Feng Guangming, Ding Yu, Zhu Hongju, et al. Experimental research on a superhigh-water packing material for mining and its micro-morphology [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(6): 813-819.
- [16] 李兴尚, 许家林, 朱卫兵, 等. 从采充均衡论煤矿部分充填开采模式的选择 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2008, 27(2): 168-171.
Li Xingshang, Xu Jialin, Zhu Weibing, et al. Choice of coal mine partial-filling technology according to balance between mining and filling [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2008, 27(2): 168-171.
- [17] 财政部, 国家税务总局. 关于实施煤炭资源税改革的通知(财税[2014] 72号) [EB/OL]. http://szs.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201410/t20141011_1148669.html, 2014-11-11.
- [18] Lokhande R D, Prakash A, Singh K B, et al. Subsidence control measures in coalmines: A review [J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 2005, 64(5): 323-332.
- [19] 周华强. 中国膏体充填采煤的研究与发展趋势 [J]. 徐州, 2010 绿色开采理论与实践国际研讨会, 2010.
- [20] 轩大洋, 许家林, 朱卫兵. 充填采煤减沉的适用性研究 [J]. 中国煤炭, 2012, 38(5): 44-48.
Xuan Dayang, Xu Jialin, Zhu Weibing. Research on applicability of coal mining with backfilling [J]. China Coal, 2012, 38(5): 44-48.
- [21] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [22] Xu Jialin, Xuan Dayang, He Changchun. Innovative backfilling longwall panel layout for better subsidence control effect—separating adjacent subcritical panels with pillars [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 297-305.
- [23] 许家林, 尤 琪, 朱卫兵, 等. 条带充填控制开采沉陷的理论研究 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 119-122.
Xu Jialin, You Qi, Zhu Weibing, et al. Theoretical study of strip-filling to control mining subsidence [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 119-122.

- ety, 2007, 32(2): 119–122.
- [24] 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): 17–20.
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): 17–20.
- [25] 许家林, 钱鸣高, 金宏伟. 岩层移动离层演化规律及其应用研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 632–636.
Xu Jialin, Qian Minggao, Jin Hongwei. Study and application of bed separation distribution and development in the process of strata movement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 632–636.
- [26] 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.
- [27] Xuan Dayang, Xu Jialin. 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.
- [28] 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, 1–11. doi: 10.1007/s00603-015-0710-5.
- [29] 许家林. 煤矿绿色开采 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
- [30] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 762–769.
Xu Jialin, Zhu Weibing, Wang Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 762–769.
- [31] 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): 58–61.
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): 58–61.
- [32] 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.
- [33] 杨平, 朱卫兵, 陈梦. 埠村矿承压水上充填复采条带煤柱试验研究 [J]. 中国煤炭, 2014, 40(2): 5–8.
Yang Ping, Zhu Weibing, Chen Meng. Experimental study of repeated filling mining on strip coal pillar above confined water in Bucun Mine [J]. China Coal, 2014, 40(2): 5–8.

编辑部郑重声明《煤炭学报》唯一官方投稿网址为 www.mtxb.com.cn

近日, 本刊编辑部接到作者举报, 有不法分子利用作者急于毕业或评职称需求, 通过网络发布征稿或论文发表等信息, 假冒《煤炭学报》编辑部名义诱骗作者投稿, 后发送虚假录用通知, 承诺其有能力安排尽快出版, 以此向作者收取审稿费和高额版面费。上述行为不仅损害了作者的利益, 也严重影响了《煤炭学报》的声誉。

为此, 我刊严正声明《煤炭学报》唯一的官方投稿网址为 www.mtxb.com.cn, 本刊编辑部从未与其他单位或个人签订任何论文征稿或发表合作协议, 其他发布《煤炭学报》征稿或肯定能代为发表的网站均为虚假信息 (已调查核实有 11 家网站冒充本刊发布征稿或发表消息)。《煤炭学报》所有稿件均采用三级审稿的处理流程, 任何称可以直接发表或通过缴纳高额费用即可发表的个人或单位均为假冒者。

为维护广大作者利益, 请大家仔细甄别, 勿给不法分子可乘之机。编辑部也将保留对其追究法律责任的权利。如有任何疑问, 请与编辑部联系: 010–84262930–804。