

刀柱充填工作面采充间隔宽度及充填体强度指标

刘鹏亮

(天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013)

[摘要] 根据刀柱工作面煤柱与空区相间布置的特点, 提出刀柱工作面充填开采的技术思路是将整个过程分为煤房开采和煤柱回收 2 个阶段进行。煤柱的回收是在第 1 阶段充填形成的充填体柱支撑顶板条件下实现。由于刀柱工作面采留尺寸均较小, 为确保煤柱(充填体柱)稳定性, 对空区的充填须及时进行。介绍了 2 个阶段开采与充填最大间隔宽度及充填体强度指标的确定方法: 应用扩大压力拱理论计算第 1 阶段未充填区煤柱载荷和第 2 阶段未充填区充填体柱载荷, 结合煤柱(充填体柱)稳定性系数确定工作面第 1, 2 阶段开采与充填最大间隔宽度以及第 1 阶段充填体强度, 最后采用数值模拟根据地表移动变形控制要求确定第 2 阶段充填体强度。

[关键词] 刀柱充填工作面; 采充间隔宽度; 充填体强度; 扩大压力拱; 充填体柱稳定性系数

[中图分类号] TD823.7 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2013) 06-0070-04

Gap Distance between Mining and Stowing and Stowing Body's Strength Index in Pillar Stowing Mining Face

LIU Peng-liang

(Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 10013, China)

Abstract: 2 phrases including coal room mining and coal pillar mining were put forward for pillar stowing mining. When stowing body supported roof, coal pillar could be mined. Mining and pillar dimensions were minor, stowing gob must be finished in time for coal-pillar stability. The method for calculating gap distance between mining and stowing and stowing body's strength was introduced: enlarged pressure-arch theory was applied to calculating coal-pillar load in non-stowing area at 1st phrase and stowing body load at 2nd phrase, maximum gap distance and stowing body strength at 1st phrase was confirmed with stability coefficient of stowing body, finally, numerical simulation was used to obtain stowing body's strength at 2nd phrase.

Key words: pillar stowing mining face; distance between mining and stowing; stowing body's strength; distensible pressure arch; stability coefficient of stowing body

我国西北地区如榆林、鄂尔多斯等地煤炭资源储量丰富、煤层赋存条件简单, 近年来煤炭产量增长强劲, 但该地区生态环境脆弱, 大规模的煤炭开采已造成了地面沉陷、水资源流失、荒漠化加剧等环境问题^[1]。

目前控制地表沉陷的技术措施主要是条带开采与充填开采, 条带开采技术的缺点主要是煤炭采出率偏低(一般小于 50%), 而充填开采通过将矸石、沙石、膏体等充填材料送入井下, 在充填体保护下几乎将工作面煤炭全部回采出来^[2]。同时, 西北地区地表广泛存在的风积砂可提供充足的充填材料, 因此, 充填开采技术是实现该地区煤炭开发与生态环境保护协调发展的适宜途径^[3]。综合机械化充填开采技术目前已在我国多个矿区得到应用

并取得较为成熟的经验^[4-5], 本文针对该地区另一类主要采煤方法——刀柱采煤法, 提出了充填开采的工艺流程, 探讨了采充间隔宽度及充填体强度指标的确定方法, 为刀柱工作面充填开采的应用提供技术思路。

1 刀柱工作面充填开采技术思路及问题的提出

刀柱采煤法是指在采空区内沿走向每隔 5 ~ 15m 留设一定宽度、与工作面等长的煤柱, 用以支撑顶板, 使其不冒落, 采出率一般在 30% ~ 50%^[6-7]。实施充填开采, 目的是用充填体将煤置换出来, 并起到控制岩层移动, 减小地表下沉的作用。结合刀柱工作面煤柱与空区相间布置的特点, 将刀柱工作面充填开采分煤房开采和煤柱回收 2 个

[收稿日期] 2013-07-09

[基金项目] 中国煤炭科工集团有限公司科技创新基金项目(2011MS014); 天地科技股份有限公司技术创新基金项目(KJ-2012-TDKC-08); 天地科技股份有限公司开采设计事业部生产力转化基金项目(KC-SCLZH-2012-04); 天地科技股份有限公司开采设计事业部青年创新基金项目(KC-QNCX-2012-10)

[作者简介] 刘鹏亮(1980-), 男, 河北元氏人, 助理研究员, 研究方向为煤矿充填开采技术。

阶段: 第 1 阶段, 开采煤房形成常规刀柱式布置, 同时将开采后的煤房进行充填; 第 2 阶段, 充填体的强度达到设计要求后, 在充填体柱的支撑下将留设的煤柱回收, 同时对煤柱回收后的空间进行充填, 最终实现充填体对煤炭的置换^[8-9]。图 1 为刀柱工作面充填开采过程示意。

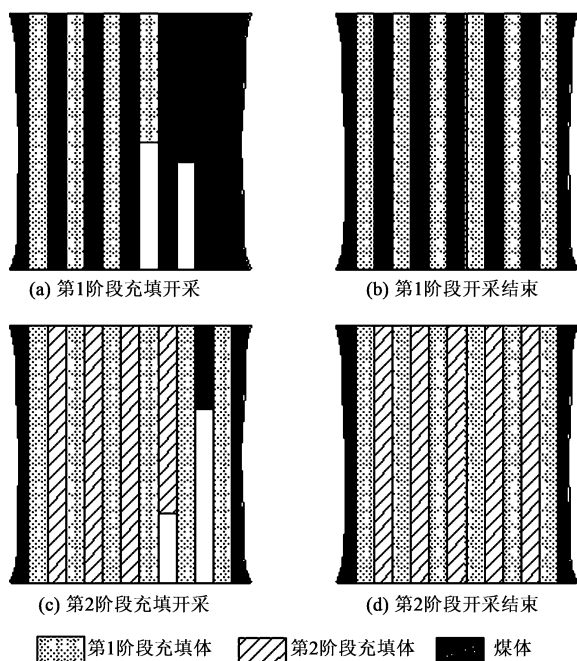


图 1 刀柱工作面充填开采过程示意

由于刀柱开采采留尺寸小, 稳定性较差, 应及时对煤房开采 (或煤柱回收) 后形成的空区进行充填, 否则, 随着开采范围的扩大, 煤柱 (或充填体柱) 载荷超过其承载能力时, 有可能发生溃屈垮塌, 所以应确定开采和充填的最大间隔宽度, 为现场安全生产提供理论指导。此外, 两个阶段充填体所起的作用存在差异, 对强度的要求也不同, 而充填体强度一般与成本成正比, 确定充填体的合理强度指标, 是保证技术成功和实现良好经济效益的保证。因此, 确定合理的采充最大间隔宽度和两个阶段的充填体强度指标是刀柱充填开采技术的关键问题, 以下结合示例对该问题进行分析探讨。

2 示例分析

2.1 工作面条件

榆林地区某矿开采 3 号煤层, 倾角 $0 \sim 3^\circ$, 采厚 3.5 m, 埋深 160 m。双翼对拉式刀柱充填开采工作面布置在矿井南部, 长 1200 m, 宽 201.6 m, 2 条回风巷和 2 条进风巷的宽度均为 5.4 m, 煤房、煤柱宽度均为 5.4 m, 长 80 m, 两翼间隔 20 m 煤柱。用连采机对煤房和煤柱进行开采, 采用锚杆支护顶

板。采用的充填材料形式为以风积砂为骨料的胶结充填体, 通过配比调整, 其长期强度范围为 0.2 ~ 8.0 MPa。

2.2 第 1 阶段 (煤房开采)

2.2.1 开采与充填的最大间隔宽度

随着刀柱工作面煤房的开采, 煤岩层原始应力平衡状态打破, 煤房上方的载荷转移到煤柱上, 上覆岩层依靠煤柱支撑。随着开采范围的扩大, 煤柱上方载荷逐渐加大, 当超过其承载能力时, 有可能发生溃屈垮塌, 导致连锁的“多米诺骨牌”效应, 而充填体可为煤柱提供侧限, 使其处于三向受力状态, 提高其支撑能力和稳定性。因此, 从安全角度考虑, 充填应尽早进行, 但工程现场由于多种原因, 充填并不一定能够紧随开采, 因此确定回采与充填之间的最大间隔宽度, 可以为现场安全生产提供依据。

(1) 煤柱载荷的确定

根据扩大压力拱理论, 单个煤房 (或“巷道”) 开采后, 上覆岩层存在自然平衡拱 (压力拱), 随着多个煤房的开采, 采动影响范围逐步扩大, 压力拱的高度 H 和跨度 W 也逐渐增加, 上覆岩层中应力状态呈“扩大压力拱”分布^[10], 如图 2 所示。

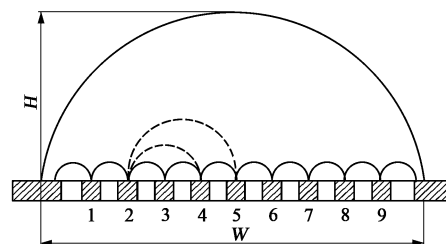


图 2 扩大压力拱理论示意^[10]

煤柱载荷计算公式为:

$$P_p = \frac{(a+b)\gamma}{a} \cdot \frac{W_1 k}{2f_k} \quad (1)$$

$$W_1 = B_1 + 2h \tan\left(45^\circ - \frac{\arctan f_k}{2}\right) \quad (2)$$

式中, P_p 为煤柱载荷, MPa; a 为煤柱宽度, m; b 为煤房宽度, m; γ 为覆岩平均容重, kN/m^3 ; W_1 为整个“扩大压力拱”跨度, m; f_k 为覆岩的坚固性系数, 数值上等于岩石单轴抗压强度的 1/10, 取 1.5; B_1 为开采与充填间隔宽度 (即开采区域总宽度), m; h 为采高, m; k 为压力拱修正系数, 取 3。

根据该矿地质采矿条件, 将 $a=b=5.4\text{ m}$, $\gamma=25\text{ kN/m}^3$, $h=3.5\text{ m}$ 代入式 (1) 和式 (2), 计算

了煤房逐个开采后煤柱上的最大载荷，如表 1 所示。当煤房开采个数为 1~7 时，扩大压力拱跨度 $W_1 = 20.1 \sim 92.1\text{m}$ ，煤柱最大载荷为 $P_p = 1.0 \sim 4.6\text{MPa}$ 。可以看出，随着煤房的逐个开采，开采范围逐步扩大，扩大压力拱的跨度和煤柱最大载荷不断增加。

表 1 开采而未充填煤房个数及煤柱最大载荷关系

开采而未 充填煤房 个数 n	煤柱宽度 a/m	煤房宽度 b/m	覆岩平均 容重 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	扩大压力 拱跨度 W_1/m	煤柱最 大载荷 P_p/MPa
1	5.4	5.4	25	20.1	1.0
2	5.4	5.4	25	32.1	1.6
3	5.4	5.4	25	44.1	2.2
4	5.4	5.4	25	56.1	2.8
5	5.4	5.4	25	68.1	3.4
6	5.4	5.4	25	80.1	4.0
7	5.4	5.4	25	92.1	4.6

(2) 煤柱安全系数

为了保证煤柱具有足够的承载能力，必须满足煤柱的安全系数 F 不小于 1.5，以满足煤柱长期稳定性要求。煤柱的稳定性系数计算公式为：

$$F_p = \frac{\sigma_p}{P_p} \tag{3}$$

式中， F_p 为稳定性系数， ≥ 1.5 ； σ_p 为煤体强度，按较为常用的比涅乌斯基公式计算， 5.6MPa ； P_p 为煤体承受载荷， MPa 。

根据公式 (3)，按照 $F_p = 1.5$ 计算，煤柱可承受的最大载荷 $P_p = 3.7\text{MPa}$ ，对照表 1，对应的开采而未充填煤房个数为 5，考虑煤房与煤柱的尺寸，充填与回采最大间隔宽度 $B_1 = 48.6\text{m}$ 。

2.2.2 充填体强度指标

第 1 阶段充填体达到要求强度后，方可进行第 2 阶段煤柱回收。煤柱回收后，其上方载荷转移到第 1 阶段充填体形成的充填体柱上，上覆岩层依靠充填体柱支撑。第 1 阶段充填体强度 σ_{n1} 的确定应以保证充填体柱的稳定性满足要求为原则。

充填体柱稳定性系数计算公式为：

$$F_{n1} = \frac{\sigma_{n1}}{P_{n1}} \tag{4}$$

式中， F_{n1} 为充填体柱稳定性系数， ≥ 1.5 ； σ_{n1} 为充填体柱强度， MPa ； P_{n1} 为充填体柱承受载荷， MPa 。

充填体柱承受载荷也通过扩大压力拱理论确定。参考公式 (1) 和公式 (2)，得到充填体柱载荷计算公式为：

$$P_{n1} = \frac{(a+b)\gamma}{b} \cdot \frac{W_2 k}{2f_k} \tag{5}$$

$$W_2 = B_2 + 2h \tan(45^\circ - \frac{\arctan f_k}{2}) \tag{6}$$

式中， P_{n1} 为充填体柱载荷， MPa ； a 为煤柱宽度（在此为开采宽度）， m ； b 为煤房宽度（在此为充填体柱宽度）， m ； W_2 为整个“扩大压力拱”跨度， m ； B_2 为开采与充填间隔宽度（即开采区域总宽度）， m 。

通过公式 (4) 可以看出，在充填体柱稳定性系数一定的前提下，充填体柱强度 σ_{n1} 越大，其能够承受的载荷 P_{n1} 越大；通过公式 (5) 和公式 (6) 可以看出，第 2 阶段开采与充填间隔宽度 B_2 越大，作用在充填体柱上的载荷 P_{n1} 越大。因此，充填体柱强度 σ_{n1} 和第 2 阶段开采与充填间隔宽度 B_2 具有相关性。根据公式 (4) 至公式 (6)，得到两者之间的关系式：

$$\sigma_{n1} = \frac{(a+b)\gamma}{P_{n1} F_{n1} b} \cdot \frac{(B_2 + 2h \tan(45^\circ - \arctan f_k))^k}{2f_k} \tag{7}$$

从公式 (7) 可以看出，要求的充填体柱强度 σ_{n1} 随第 2 阶段开采与充填间隔宽度 B_2 增加而增大。取 B_2 与第 1 阶段开采与充填间隔宽度 B_1 相同 (48.6m)，充填体柱安全系数按 $F_1 = 1.5$ 考虑，代入公式 (7)，得充填体柱（第 1 阶段充填体）强度 $\sigma_{n1} = 5.6\text{MPa}$ 。

2.3 第 2 阶段（煤柱回收）

2.3.1 开采与充填的最大间隔宽度

随着第 2 阶段煤柱逐个回收，煤柱上方载荷转移到充填体柱上。第 2 阶段回采与充填最大间隔宽度 B_2 越大，作用在充填体柱上的载荷越大，因此， B_2 的确定应以确保充填体柱的稳定性满足要求为原则。根据公式 (7) 表述的 B_2 和充填体柱强度 σ_{n1} 的相关性，取充填体柱强度 σ_{n1} 与第 1 阶段煤柱强度 σ_p 相同 (5.6MPa)，充填体柱安全系数按 $F_1 = 1.5$ 考虑，代入公式 (7)，得第 2 阶段回采与充填最大间隔宽度 $B_2 = 48.6\text{m}$ 。

2.3.2 充填体强度指标

第 2 阶段充填体的作用，一是对顶板起到支撑作用，二是为第一阶段充填体柱提供侧限^[11]。相比于第 1 阶段充填体，其始终处于三轴状态，在强度方面要求较低，但充填体的强度与其压缩率和承载能力具有相关性，从而影响岩层移动控制效果，因此，第 2 阶段充填体强度指标的确定主要从满足岩层移动控制要求方面考虑。本文采用数值模拟通过刀柱充填工作面地表移动变形计算确定第 2 阶段充填体的合理强度 σ_{f2} 。

根据充填体实测强度，共设计了第 2 阶段充填

体强度分别为 $\sigma_{f2} = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 和 1.0MPa 这 5 个方案进行对比分析。考虑到煤层开采影响范围的大小, 模型长度为 320m , 模型高度从煤层底板以下 35m 至地表, 采用数值模拟软件 $\text{FLAC}^{3\text{D}}3.0$, 计算中材料本构关系采用摩尔-库仑模型, 第 1 阶段充填体强度采用 $\sigma_{f1} = 5.6\text{MPa}$ 。数值计算模型中基岩与表土层的块体划分以及岩层与节理的力学参数, 如表 2 所示。

表 2 计算采用的煤岩物理力学参数

岩性	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$	黏聚 力/MPa	抗拉强 度/MPa
砂质泥岩	2190	2.58	1.48	27.8	2.72	1.29
细砂岩	2230	2.29	2.43	33.1	3.47	1.46
泥岩	2210	2.40	3.10	42.0	3.84	1.73
石灰岩	2090	2.26	1.11	42.0	6.72	1.58
3 号煤	1410	1.21	0.79	32.0	0.61	0.83
充填体 (第 1 阶段)	1660	2.02	2.60	36.0	2.85	1.24
泥岩	2210	2.40	3.10	42.0	3.84	1.73
粉砂岩	2320	1.56	1.08	32.1	3.47	1.26

5 个方案开采后地表移动变形模拟结果见表 3 和图 3。

表 3 地表移动变形最大值模拟计算结果

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
最大下沉值/m	0.640	0.485	0.321	0.220	0.108
最大水平移动值/m	0.128	0.097	0.064	0.044	0.022
最大倾斜值/ $(\text{mm} \cdot \text{m}^{-1})$	5.800	4.400	2.900	2.000	1.000
最大水平变形值/ $(\text{mm} \cdot \text{m}^{-1})$	1.770	1.360	0.900	0.620	0.300
最大曲率值/ $(\text{mm} \cdot \text{m}^{-2})$	0.080	0.060	0.040	0.030	0.010

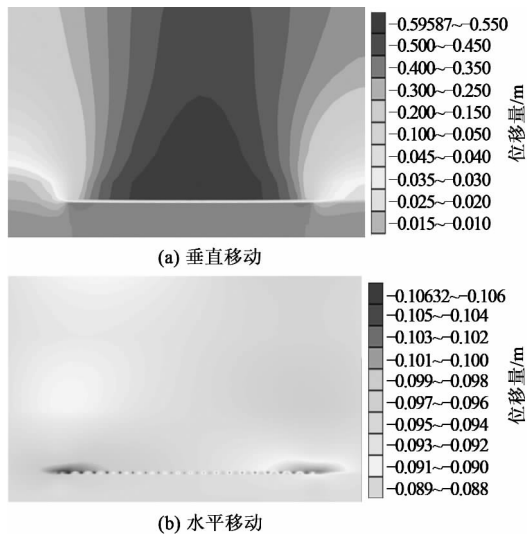


图 3 方案 2 地表移动变形数值模拟结果

通过数值模拟计算可以看出, 地表最大下沉值 W_{max} 为 $0.108 \sim 0.640\text{m}$, 最大水平移动值 U_{max} 为 $0.022 \sim 0.128\text{mm/m}$, 最大倾斜值 i_{max} 为 $1.0 \sim$

5.8mm/m , 最大水平变形值 ε_{max} 为 $0.30 \sim 1.77\text{mm/m}$, 最大曲率值 K_{max} 为 $0.01 \sim 0.08\text{mm/m}^2$ 。即, 地表移动变形随第 2 阶段充填体强度的增加而减小。参照砖混结构建(构)筑物破坏等级为 I 级(地表移动变形允许值: 倾斜 $i \leq \pm 3\text{mm/m}$ 、水平变形 $\varepsilon \leq \pm 2\text{mm/m}$ 、曲率 $K \leq \pm 0.2/\text{km}$) 的要求, 结合充填体强度尽量小(成本低)的原则, 将第 2 阶段充填体强度定为 $\sigma_{f2} = 0.6\text{MPa}$ 。

3 结论

根据刀柱工作面煤柱与空区相间布置的特点, 将充填开采的整个过程分为煤房开采和煤柱回收 2 个阶段, 开采和充填最大间隔宽度和充填体强度指标的确定是该技术的关键问题。

(1) 基于刀柱工作面采留尺寸小的特点, 采用扩大压力拱理论计算得出第 1 阶段煤房逐个开采后煤柱上的最大载荷, 结合煤柱强度 ($\sigma_p = 5.6\text{MPa}$) 和煤柱稳定性系数(取 $F_p = 1.5$) 确定了第 1 阶段采充间隔最大宽度 $B_1 = 48.6\text{m}$ 。

(2) 第 2 阶段煤柱逐个回收后, 其上方载荷转移到第 1 阶段充填体形成的充填体柱上, 上覆岩层依靠充填体柱支撑。根据充填体柱稳定性系数和充填体柱载荷计算公式, 得出了充填体柱强度 σ_{f1} 和第 2 阶段开采与充填间隔宽度 B_2 之间的关系式, 表明要求的充填体柱(第 1 阶段充填体)强度 σ_{f1} 随第 2 阶段开采与充填间隔宽度 B_2 增加而增大。 $\sigma_{f1} = 5.6\text{MPa}$ 和 $B_2 = 48.6\text{m}$ 可作为相互对应的一组值。

(3) 第 2 阶段充填体的作用, 一是对顶板起到支撑作用, 二是为第一阶段充填体柱提供侧限, 其强度的确定主要从满足岩层移动控制要求方面考虑。通过选取充填体不同强度进行地表移动变形数值模拟计算, 参照砖混结构建(构)筑物破坏等级为 I 级的要求, 结合充填体强度尽量小(成本低)的原则, 确定第 2 阶段充填体强度 $\sigma_{f2} = 0.6\text{MPa}$ 。

[参考文献]

[1] 陈佩佩. 榆林地区煤矿开采环境影响分析 [J]. 煤矿开采, 2008, 13 (3): 39-41.
 [2] 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.
 [3] 崔锋, 张兴华, 刘鹏亮, 等. 沙漠边缘煤矿风积砂膏体充填保水开采研究 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (2): 10-13, 27.

(下转 22 页)

- [5] 钱鸣高, 缪协兴, 徐家林, 等. 岩层控制的关键层理论 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [6] 赵阳升, 胡耀青. 承压水体上采煤理论与技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [7] 武 强, 庞 炜, 等. 煤层底板突水脆弱性评价的 GIS 与 ANN 耦合技术 [J]. 煤炭学报, 2006, 31 (3): 314-319.
- [8] 孟召平, 王 睿, 汪元有, 等. 开滦范各庄井田 12 煤层底板突水危险性的地质评价 [J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27 (3): 310-315.
- [9] 武 强, 金玉洁. 华北型煤田矿井防治水决策系统 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
- [10] Yi Wang, Weifeng Yang, ming Li, et al. Risk assessment of floor water inrush in coal mines based on secondary fuzzy comprehensive evaluation [J]. International Journal of Rock Mechanics & mining Sciences, 2012 (52): 50-55.
- [11] 乔 伟, 李文平, 赵成喜. 煤矿底板突水评价突水系数—单位涌水量法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (12): 2466-2474.
- [12] 武 强, 张志龙, 马积福. 煤层底板突水评价的新型实用方法 I——主控指标体系的建设 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (1): 42-47.
- [13] 武 强, 张志龙, 张生元, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法 II——脆弱性指数法 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (11): 1121-1126.
- [14] 武 强, 谢淑寒, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法 III——基于 GIS 的 ANN 型脆弱性指数法应用 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (12): 1301-1306.
- [15] 武 强, 王金华, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法 IV——基于 GIS 的 AHP 型脆弱性指数法应用 [J]. 煤炭学报, 2009, 34 (2): 233-238.
- [16] 武 强, 张 波, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法 V——基于 GIS 的 ANN 型、证据权型、Logistic 回归型脆弱性指数法的比较 [J]. 煤炭学报, 2013, 38 (1): 21-26.
- [17] 薛宏智, 周维博. 基于改进 AHP 定权的优选法在地下水水质评价中的应用 [J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23 (3): 44-47.
- [18] Zhaoping Meng, Guoqing Li, Xiaotong Xie. A geological assessment method of floor water inrush risk and its application [J]. Engineering Geology, 2012 (143): 51-60.
- [19] Jiuchuan Wei, Zhongjian Li, Longqing Shi, et al. Comprehensive evaluation of water-inrush risk from coal floors [J]. Mining Science and Technology, 2010 (20): 0121-0125.
- [20] 王爽英, 吴 超, 左红艳. 中小型煤矿安全生产模糊层次分析评价模型及其应用 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2010, 41 (5): 1918-1922.
- [21] 黄建文, 李建林, 周宜红. 基于 AHP 的模糊评判法在边坡稳定评价中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26: 2627-2632. [责任编辑: 张玉军]

(上接 11 页)

实验均采用同一组煤样, 在第 1 次实验结束后再进行第 2 次实验, 由于实验过程中外界环境自由水对煤样作用时间的持续效应不同, 经自由水浸泡 1min 的煤样, 第 2 次实验瓦斯解吸衰减系数相对于第 1 次实验瓦斯解吸衰减系数增加 3.76%, 经自由水浸泡 2min 的煤样, 第 2 次实验瓦斯解吸衰减系数相对于第 1 次实验瓦斯解吸衰减系数增加 4.62%。

(2) 外界环境中的自由水对煤样的瓦斯解吸规律有一定的抑制作用, 在自由水中浸泡过后, 煤样的瓦斯解吸速度相对于干燥煤样的瓦斯解吸速度明显降低。

[参考文献]

- [1] 张晓东. 煤分级萃取的吸附响应及其地球化学机理 [D]. 徐

州: 中国矿业大学, 2004.

- [2] 肖知国, 王兆丰. 煤层注水防治煤与瓦斯突出机理的研究现状与进展 [J]. 中国安全科学学报, 2009, 19 (10).
- [3] 刘水文, 聂百胜. 水对煤润湿的临界表面张力测算研究 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (4): 64-67.
- [4] 郭红玉, 苏现波. 煤层注水抑制瓦斯涌出机理研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35 (6): 928-931.
- [5] 李寨东, 姬玉平, 刘坤鹏. 水分对二₁煤层瓦斯吸附解吸规律的实验研究 [J]. 煤, 2012, 21 (5): 4-7, 30.
- [6] 降文萍, 崔永君, 钟玲文, 等. 煤中水分对煤吸附甲烷影响机理的理论研究 [J]. 天然气地球科学, 2007, 18 (4): 576-579, 583.
- [7] 王青松, 金龙哲, 孙金华. 煤层注水过程分析和煤体润湿机理研究 [J]. 安全与环境学报, 2004, 4 (1): 70-73.
- [8] 何学秋. 交变电磁场对煤吸附瓦斯特性的影响 [J]. 煤炭学报, 1996, 21 (1): 63-67.
- [9] 张占存, 马丕梁. 水分对不同煤种瓦斯吸附特性影响的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (2): 144-147. [责任编辑: 王兴库]

(上接 73 页)

- [4] 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.
- [5] 张吉雄, 周跃进, 黄艳利. 综合机械化固体充填采煤一体化技术 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (11): 10-13.
- [6] 杜计平. 采矿学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [7] 郭文兵, 侯景林, 邹友峰. 建 (构) 筑物下条带式旺格维利采煤技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41 (4): 8-12.

- [8] 刘鹏亮, 崔 锋. 风积砂高水膨胀材料连采面充填开采设计 [R]. 北京: 天地科技股份有限公司, 2011.
- [9] 刘鹏亮, 田锦州. 王台铺煤矿 XV2317 南工作面充填开采方案设计 [R]. 北京: 天地科技股份有限公司, 2012.
- [10] 秦乐尧, 刘长武, 方延强. 近距离巷道群覆岩活动的扩大压力拱理论与岩柱荷载研究 [J]. 金属矿山, 2009 (12).
- [11] 刘鹏亮. 邢东矿充填巷式开采数值模拟与现场实测研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2007. [责任编辑: 徐乃忠]