

煤矿井下巷旁充填早强混凝土沿空留巷技术

贾民, 马纪安

(兖州煤业股份有限公司 济宁二号煤矿 山东 济宁 272072)

摘要:针对济宁二号煤矿深部中厚煤层综采工作面地质条件复杂、开采深度大、工作面搬家频繁、采掘接续紧张、工作面孤岛开采等问题,研究了沿空留巷顶板运动规律,采用以巷旁充填早强混凝土为主体的沿空留巷技术,对沿空留巷巷旁混凝土墙受力与变形进行了数值模拟分析,并对巷旁支护参数和顶板锚固加强支护进行了设计。在93_上02工作面运输巷中采用该技术沿空留巷870 m,混凝土墙墙体稳定;93_上03工作面轨道巷沿空留巷后,矿压观测结果表明沿空留巷变形小于煤柱护巷,经济效益显著。

关键词:泵送早强混凝土;沿空留巷;巷旁支护;顶板控制;矿压观测

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2013)05-0058-05

Technology of Gateway Retained Along Goaf with Quick Setting Concrete Backfilled at Gateway Sidewall in Underground Mine

JIA Min, MA Ji-an

(Jining No. 2 Mine, Yanzhou Coal Mining Company Ltd., Jining 272072, China)

Abstract: According to the complicated geological conditions, deep mining depth, frequent coal mining face removing, high tension replacement of coal mining face and excavation face, mining in island seam face and other problems of a fully mechanized coal mining face in the deep section of Jining No. 2 Mine, the paper studied the roof movement law of the gateway retained along goaf. The gateway retained along goaf technology mainly with quick setting concrete backfilled at the gateway side was applied. A numerical simulation analysis was conducted on the stress and deformation of the concrete wall at the side of the gateway retained along goaf. A design was conducted on the support parameters of the gateway side and the anchor reinforced support of the roof. In the transportation gateway of No. 93_A02 mining face, the technology was applied to the gateway retained along the goaf with a length of 870 m and the concrete wall was stable. After the rail gateway of No. 93_A03 mining face gateway retained along goaf, the mine strata pressure observation results showed that the deformation of the gateway retained along the goaf was less than the coal pillar protected gateway and the economic benefits were obvious.

Key words: quick setting concrete pumping; gateway retained along goaf; support of gateway sidewall; roof control; mine strata pressure observation

0 引言

沿空留巷技术是一种无煤柱护巷技术,具有煤炭采出率高、巷道掘进率低、采掘衔接合理等优点,并且有利于优化巷道布置和煤矿安全生产,其技术优势和经济效益显著。沿空留巷技术自20世纪50年代在我国开始使用以来,一直是国内外煤炭开采的重要技术发展方向^[1]。截至目前,我国在沿空留巷理论与技术研究方面做了大量的工作。在条件较

好的薄及中厚煤层采煤工作面,沿空留巷技术已日趋完善,巷旁支护、巷内支护、加强支护及煤帮加固技术已趋成熟,但在条件困难的中厚煤层或厚煤层较大断面巷道中采用沿空留巷技术仍存在着一些技术难题,使得一些矿井在应用沿空留巷技术时没有取得预期的效果,甚至留巷失败,从而一定程度上限制了沿空留巷技术在我国推广应用^[2-3]。巷旁支护作为沿空留巷的一个技术难点,在我国一直没有得到很好解决。传统的巷旁支护存在支护阻力、可

收稿日期:2013-01-20;责任编辑:张 扬

作者简介:贾民(1965—),男,山东邹城人,高级工程师,硕士,现任济宁二号煤矿矿长。

引用格式:贾民,马纪安.煤矿井下巷旁充填早强混凝土沿空留巷技术[J].煤炭科学技术,2013,41(5):58-62.

缩性等力学性能与沿空留巷围岩变形不相适应、密闭性能差和机械化程度低等缺点,不利于巷道维护和防止采空区漏风与自然发火。要发挥沿空留巷的优势,克服目前沿空留巷存在的诸多问题,必须保证以下 2 点:一是沿空侧的巷旁支护必须可靠,除要提供合理的支护阻力外,还应能适应顶板压力的变化,不易变形破坏且不漏风;二是施工要现代化,能适应高效快速的综合机械化回采工艺要求。兖州煤业股份有限公司济宁二号煤矿对井下巷旁充填早强混凝土沿空留巷技术进行实践应用,经济效益显著。

1 工程概况

济宁二号煤矿煤层条件复杂,开采深度大,工作面搬家频繁,采掘接续紧张,工作面孤岛开采问题突出。为解决上述问题,在 93_上02 工作面运输巷和 93_上03 工作面轨道巷进行沿空留巷试验。工作面倾斜长壁俯斜开采。煤层以亮煤为主,厚度变化较大,平均 1.6 m,普氏系数一般在 2.1 左右,为软~中等硬度煤层,煤层倾角 2°~12°,平均 6°,煤层底板标高 -640.9—-739.9 m,平均 -690.4 m;基本顶以灰白色中砂岩为主,工作面大部分直接顶为粉砂岩;煤层底板以泥岩为主,具有膨胀性。

2 沿空留巷理论分析

2.1 巷旁支护阻力计算

已往建立的沿空留巷力学模型^[4-8],在研究巷道“支护—围岩”相互作用关系时,一般只考虑巷旁支护与顶板岩层的相互作用关系,忽视了巷帮煤体对维护巷道的的作用,且未考虑沿空留巷侧采空区顶板活动的影响。实践表明,在沿空留巷侧采空区顶板活动的 3 个阶段中,以顶板过渡期活动对沿空留巷巷旁充填墙体破坏性最大。因此在计算巷旁充填支护阻力时应以顶板的过渡期活动为依据。根据研究和实际观测,结合济宁二号煤矿实际情况,采用如图 1 所示的沿空留巷结构模型^[9]。根据图 1 所示结构建立力学模型,研究采空区顶板在过渡期活动阶

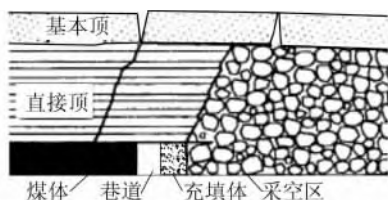


图 1 沿空留巷结构模型示意

段的沿空留巷巷旁支护阻力。用平衡法对力学模型求解并简化后,可得巷旁支护需要的支护阻力 P 为

$$P = k [h_E \gamma_E L/2 + h_z \gamma_z (x_0 + b + d)] \quad (1)$$

$$x_0 = M / (2\xi f) \ln [K\gamma H + C \cot \varphi / (\xi C \cot \varphi)] \quad (2)$$

$$\xi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$$

其中: k 为应力增高系数,取 2; h_E 为基本顶厚度,取 19.4 m; γ_E 为基本顶岩层容重,取 25 kN/m³; L 为周期来压步距,取 20.8 m; h_z 为直接顶厚度,按平均采高 2.2 m、岩石碎胀系数 1.25 计算 $h_z = 8.8$ m; γ_z 为直接顶岩层容重,取 25 kN/m³; x_0 为煤体内极限平衡区宽度, m; b 为巷道宽度,取 4.2 m; d 为巷旁充填墙体宽度,取 1.3 m; M 为开采厚度,取 2.2 m; C 为煤的黏聚力,取 3 MPa; f 为煤层内摩擦因数,取 $\tan 35^\circ$; φ 为摩擦角,取 30° ; K 为应力集中系数,取 $K=2\sim6$,取 4; H 为煤层埋深,取 700 m; γ 为煤层容重,取 13.5 kN/m³。由式(1)和式(2)计算得 $x_0 = 4.08$ m, $P = 14\,303.2$ kN/m。可知,每米巷旁充填支护阻力必须达到 14 303.2 kN 以上。

2.2 巷旁充填墙体(混凝土墙)尺寸确定

巷旁充填墙体形状为矩形直墙,巷旁充填墙体高度一般为 2.2~2.4 m,巷旁充填墙体须具有一定的强度和宽度,使之能承受较大的压力和具有较高的稳定性^[10]。根据国内外研究的结果和经验数据可知,巷旁充填墙体强度随墙体宽高比的增大而增大。宽高比对墙体的影响可以通过式(3)进行修正,该公式是 Bieniawski 于 1981 年提出的。

$$\sigma_p = \sigma_c (0.64 + 0.36W/h)^n \quad (3)$$

其中: σ_p 为巷旁充填墙体实际强度,MPa; σ_c 为巷旁充填墙体单轴抗压强度,MPa; W/h 为巷旁充填墙体宽度和高度, m; n 为常量,当 $W/h > 5$ 时, $n = 1.4$;当 $W/h < 5$ 时, $n = 1.0$ 。如果巷旁充填墙体宽度取 1.3 m,采用 C30 混凝土时,每平方米混凝土墙须承担的压力为 25 MPa。可见混凝土强度为 C30 时可以满足支护要求,墙体充填后沿空留巷巷道宽度 4.2 m(图 2)。在推进过程中,根据现场留巷情况,上述参数可采取增减巷旁充填墙体宽度或减少

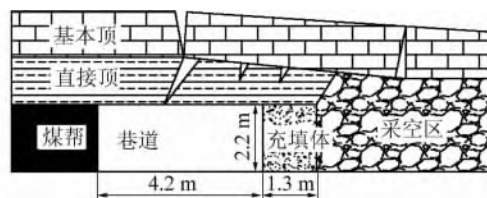


图 2 济宁二号煤矿沿空留巷示意

留巷宽度等措施进行适当调整。

3 沿空留巷关键技术

1) 缓凝早强混凝土制备。井下沿空留巷巷旁充填墙体位置、空间条件受限,充填混凝土只能远距离拌制并通过管道输送,由于混凝土在管道中输送的时间较长,要求混凝土具备一定的缓凝特性。为了及时承受顶板压力,混凝土还应当具有早强特性。世界各国拌制早强混凝土技术途径各不相同,目前,我国普遍使用早强剂及多种外加剂。济宁二号煤矿研制缓凝早强混凝土,首先根据混凝土理论进行配合比计算,再进行试验,试验 8 h 后,可实现拆模,16 h 后强度达到 6.2 MPa,24 h 后强度达到 12 MPa。在实际充填过程中,充填 24 h 后撤出掩体支架,采用单体支柱临时支护直到巷道完全稳定。

2) 充填材料远距离输送。综采工作面自动化程度高,推进速度快,而工作面巷道留巷墙体充填工艺比较复杂,环节多,所需材料多,辅助运输量大,如果施工工艺、充填方式或材料供给任一环节出现问题,对生产都将造成较大影响。由于墙体充填位置空间狭小,而混凝土搅拌、上料及充填等工艺需要较大空间,因此把混凝土搅拌和充填的地点分开是避免相互干扰的最佳选择。墙体充填材料远距离输送,既减少了充填工作对采煤生产的影响,又保证了综采工作面的推进速度。

3) 混凝土墙充填浇筑。设计并开发了自移、可调混凝土墙成型模盒,从而可实现墙体安全高效充填浇筑。混凝土墙在护墙掩体支架的支护下,采用管路泵送并充填浇筑入自移可调墙体成型模盒。墙体成型模盒和掩体支架由综采液压支架拖动前移,安全、方便、合理、快捷,适应综采工作面的快速推进(图 3)。

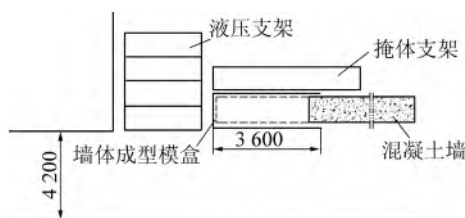


图 3 墙体成型模盒与支架布置示意

4) 沿空留巷顶板围岩控制。回采工作面推过后,按时间划分,顶板活动可划分为前期、过渡期和后期 3 个活动时期^[11]。①顶板前期活动阶段以旋转下沉为主,来压强度较小。如采用适当加强支护,

则能控制直接顶与基本顶同步运动,防止直接顶与基本顶发生严重离层,减小直接顶初期下沉量和下沉速度,为混凝土提供初凝时间。加强支护方案为:巷内采用一字梁配合单体液压支柱支护,顶板运用锚索进行补强支护,巷旁充填墙体上方顶板采用锚杆结合锚索的方式,墙体施工场所由液压自移式掩体支架及液压模具进行临时支护。②顶板岩层过渡期活动阶段,基本顶破断、失稳、旋转下沉剧烈。巷旁支护应具有足够的可缩量以适应基本顶的回转,充分发挥基本顶岩梁及冒落矸石的承载能力。同时,充填体还应具有足够的支护阻力参与顶板运动及平衡,减缓留巷顶板过大下沉。这就要求巷旁充填墙体能够及时承载,越早强越好。③顶板岩层进入后期活动阶段后,巷道支护不能控制由于岩层后期活动而引起的平移下沉。留巷期间需每班派专人观察墙体状况,当墙体出现变形较大或开裂等现象时,要及时采取加强支护措施。

充填体早强、刚度大、承载能力高,能够适应顶板下沉规律,反过来可以促成直接顶沿充填体边缘切顶,使侧向顶板及时及早垮冒,从而使沿空留巷快速进入稳定状态,因此早撑、早强、大刚度的巷旁充填墙体是沿空留巷的关键技术^[12-13]。

4 巷旁充填墙体力学分析数值模拟

4.1 模型建立

工作面开采范围为近似的长方形,工作面倾角不大,可以建立水平模型对实际情况近似模拟。直接顶泥岩随工作面的推进随采随垮。煤层、直接顶采用空单元(null)来模拟,不参与计算。模型几何尺寸 208.4 m × 260.0 m × 51.5 m,模拟开采深度 700 m,模型共计 100 800 个单元,121 847 个节点。采区走向为 X 方向,倾向为 Y 方向,垂直方向为 Z 方向。建模时,设置煤层以上 29 m 为上边界,煤层以下 21 m 为下边界,上边界以上的岩层为作用在模型上边界上的外荷载,并约束左右边界和下边界法向位移。

4.2 数值模拟方案

为了正确模拟分析 3_上煤层在开采过程中巷旁充填墙体的受力与变形情况,设置 4.8 和 1.6 m 两个推进步距,每个推进步距又根据不同参数设计 3 个方案,即 6 个模拟方案(表 1)。为便于分析观察,模型选取 2 个单元进行比较,结果显示,应力受推进步距变化影响不大(图 4a、图 4b),而 X 方向上的位

移随推进步距的增大而增大(图 4c、图 4d), 因而确定推进步距为 1.6 m, 工作面每割 2 刀(推进 1.6 m)进行沿空留巷施工, 即进行混凝土充填。随着工作面的推进, 各单元所对应的 3 个方向的位移也随着工作面的逐步推进而逐渐增大, 当工作面向前推进 96 m 后, 按每天推进 4.8 m(割 6 刀)进行沿空留巷施工, 即进行混凝土充填, 连续推进 20 d, 其相应的位移增幅逐渐趋缓。

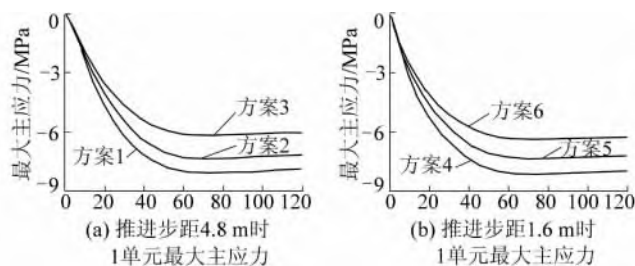


表 1 巷旁充填墙体力学分析数值模拟方案

方案编号	推进步距/m	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗压强度/MPa
1	4.8	27.10	0.28	34.00	8.0	5.42
2	4.8	32.25	0.28	40.80	9.6	6.50
3	4.8	37.90	0.28	47.60	11.2	7.59
4	1.6	27.10	0.28	34.00	8.0	5.42
5	1.6	32.25	0.28	40.80	9.6	6.50
6	1.6	37.90	0.28	47.60	11.2	7.59

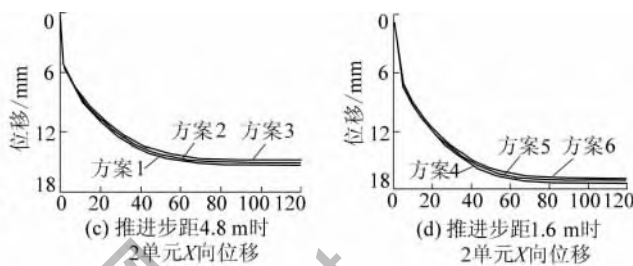


图 4 巷旁充填墙体力学分析数值模拟结果

4.3 数值模拟结果分析

由图 4a、图 4b 可以看出, 在煤层开挖后, 沿空留巷的巷旁充填墙体(混凝土墙)所承受的压力随工作面的逐步推进而增大, 初期增速快, 后期增速慢。按每天推进 4.8 m 计算, 连续推进 10 d, 其相应的应力增幅逐渐趋缓。混凝土墙所受压力初期增速较快, 要求巷旁充填墙体有较快的增阻速度, 及时承受顶板压力。巷旁充填墙体所承受的压力与巷旁充填墙体强度呈反比关系, 巷旁充填墙体强度越高, 则巷旁充填墙体所受压力越小, 越易进入稳定状态。巷旁充填墙体强度高, 则巷旁充填墙体可减小直接顶与上位岩层之间的离层, 缩短剧烈运动的时间。

5 现场工业性试验及应用效果

1) 支护设计。根据理论研究和对其他相似地质条件的煤矿沿空留巷技术运用情况进行调研, 93_上02 工作面沿空留巷采用顶板锚网控制下的泵送早强混凝土墙支护方式, 墙体施工场所由液压自移式掩体支架及液压模具进行临时支护, 以保证施工人员安全并避免墙体胶结前压坏。沿空留巷顶板围岩的控制主要是回采影响期间及留巷期间的顶板围岩控制。回采影响期间超前 20 m, 滞后 60 m 采用 3 趟一字梁进行加强支护, 其中从出口至滞后 20 m 范围内增加 1 趟一字梁, 即采用 4 趟一字梁加强支护。留巷期间巷内顶板采用在运输巷超前支护段提前 30 m 进行补强支护, 在原来锚网支护的基础上, 另打锚索支护; 巷旁充填墙体(混凝土墙)上方顶板补

强采用锚杆结合锚索的方式进行补强支护的方案。

2) 充填工艺。每班安排 1 组沿空留巷施工小组, 进行沿空留巷的施工。巷旁充填工艺基本流程为: 地面碎石及水泥→运至井下→混凝土制作→泵送→充填模具。综合考虑充填材料运输、泵站位置、拌合空间、留巷通风排水、管道铺设及输送等诸多因素, 最终确定泵站及充填线路布置方案如图 5 所示。

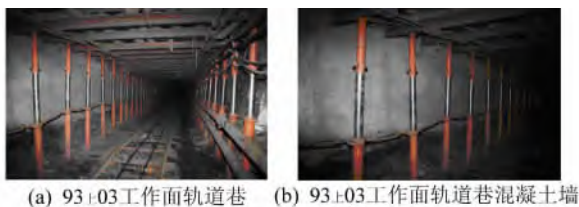


图 5 泵站位置及充填线路布置方案

3) 应用效果。济宁二号煤矿 93_上02 工作面从 2009 年 2 月开始回采、留巷, 运输巷中采用充填混凝土墙进行沿空留巷, 至 2009 年 9 月 30 日 93_上02 工作面留巷施工结束, 沿空保留巷道长度 870 m, 通过计算分析得到, 沿空留巷每米巷道可获得经济效益 7 776.72 元, 总计可获经济效益 676 余万元。

93_上03 工作面自 2010 年 10 月 5 日开始回采, 利用沿空留巷保留巷道成功开采。在 93_上03 工作面回采过程中, 巷道顶板比较完整, 顶板下沉速度和下沉量均较小, 主要变形量来自底鼓。巷旁充填墙体有局部开裂现象, 轨道巷超前工作面 25 m 范围内墙体受超前支承压力影响, 存在片裂现象, 局部片裂厚度达 300~400 mm, 煤帮侧超前约 30 m 范围内两帮移近量达 400~500 mm, 超前 30~60 m 两帮移近

量达 300 mm。但留巷整体保持完整,墙体稳定,完全符合回采需求,取得很好效果,如图 6 所示。该沿空留巷技术近年来又在济宁二号煤矿多个工作面陆续应用,其中,最近一次沿空留巷的 153_上01 工作面于 2012 年成功沿空留巷。



(a) 93_上03 工作面轨道巷 (b) 93_上03 工作面轨道巷混凝土墙

图 6 93_上03 工作面沿空留巷现场

6 结 语

济宁二号煤矿经过探索实践,摸索出一套较为成熟的煤矿井下巷旁充填早强混凝土沿空留巷工艺。设计开发了自移、可调混凝土墙体成型模盒和采空区侧自移护墙掩体支架,实现了墙体充填浇筑和支护随综采工作面液压支架自行移动,墙体高度随采高自行变化,整个充填系统安全、高效,可适应综采工作面的快速推进。现场工业试验表明,采用泵送早强混凝土巷旁充填沿空留巷巷道变形小于煤柱护巷,对于其他矿区深部中厚煤层综采沿空留巷具有一定的借鉴意义。

(上接第 27 页)

参考文献:

- [1] 杨兰和,宋全友,李耀娟.煤炭地下气化工程[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001:25-34.
- [2] 柳迎红,梁新星,梁杰,等.影响煤炭地下气化稳定性生成因素[J].煤炭科学技术,2006,34(11):79-81.
- [3] Humenick M J, Mattox C F. Organic Groundwater Contaminants from Underground Coal Gasification[J]. In Situ, 1980, 4(2): 78-85.
- [4] Stuermer D H, Douglas J N, Morris C J. Organic Contaminants in Groundwater Near an Underground Coal Gasification Site in North-eastern Wyoming[J]. Environmental Science Technology, 1982, 16: 582-587.
- [5] Campbell J H, Wang F T, Mead S W. Groundwater Quality Near an Underground Coal Gasification Experiment[J]. Journal of Hydrology, 1979, 44: 241-266.
- [6] Humenick M J. Water Pollution Control for Underground Coal Gasification[J]. Journal of Energy Engineering, 1984, 110(2): 100-112.
- [7] Dalton V A, Campbell J H. Laboratory Measurements of Groundwa-

参考文献:

- [1] 柏建彪,周华强,侯朝炯,等.巷旁支护技术的发展[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):183-186.
- [2] 付宝杰.巷旁充填体稳定性分析及应用[D].徐州:中国矿业大学,2007.
- [3] 陈全合.我国沿空留巷支护技术发展现状及改进建议[J].中国西部科技,2012(9):37.
- [4] 张东升,茅献彪,马文顶.综放沿空留巷围岩变形特征的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(3):331-334.
- [5] 黄玉诚,孙恒虎.沿空留巷护巷带参数的设计力法[J].煤炭学报,1997,22(2):127-131.
- [6] 李化敏.沿空留巷顶板岩层控制设计[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5):651-654.
- [7] 郭育光,柏建彪,侯朝炯.沿空留巷巷旁充填体主要参数研究[J].中国矿业大学学报,1992,21(4):1-11.
- [8] 苏清政,郝海金.沿空留巷巷旁充填支护阻力计算模型[J].煤矿开采,2002,7(4):32-35.
- [9] 单福利,蒲文龙,毕业武.沿空留巷矿压显现规律与围岩控制技术研究[J].山西煤炭,2009(6):11-12.
- [10] 张东升,缪协兴,冯光明,等.综放沿空留巷充填体稳定性研究[J].中国矿业大学学报,2003,32(3):232-235.
- [11] 任德惠.井工开采矿山压力与控制[M].重庆:重庆大学出版社,1990.
- [12] 张东升,徐金海.矿井高产高效开采模式及新技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [13] 杨百顺,顾桥矿深井开采沿空留巷顶板控制技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2008.

ter Leaching and Transport of Pollutants Produced During Underground Coal Gasification[J]. In Situ, 1978, 2(4): 295-328.

- [8] Humenick M J, Mattox C F. Characterization of Condensates Produced During Underground Coal Gasification[J]. In Situ, 1982, 6(1): 1-27.
- [9] Contractor D N. Finite Element Modeling of Flow in a Coal Seam with Underground Coal Gasification Cavities[J]. Journal of Hydrology, 1988, 98: 1-9.
- [10] Humenick M J, Novak A E. Parametric Analysis of Pollutant Migration Following in Situ Gasification of Lignite[J]. In Situ, 1978, 2(4): 329-352.
- [11] 埃利奥特.煤利用化学[M].北京:化学工业出版社,1991:317-319.
- [12] Humenick M J. Natural Restoration of Ground Water in UCG[J]. In Situ, 1982, 6(2): 107-125.
- [13] Wang F T. The Sorptive Property of Coal[C]//Proceedings of the 5th Underground Coal Conversion Symposium. Alexandria, Virginia, US, June 18-21, 1979: 403-409.
- [14] Humenick M J, Mattox C F. Groundwater Pollutants from Underground Coal Gasification[J]. Water Research, 1978, 12: 463-469.