

煤炭地下气化选址决策及地下水污染防控

刘淑琴¹ 周 蓉¹ 潘 佳¹ 赵万争² 潘 霞² 彭 安³

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 新奥气化采煤有限公司, 河北 廊坊 065001;
3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘 要: 为了解煤炭地下气化污染过程并对其进行最终控制, 介绍了煤炭地下气化的选址决策依据, 分析了煤炭地下气化过程地下水污染的途径及特征污染物, 并提出了地下水污染防控的主要措施。地下气化科学选址是地下气化过程稳定控制及污染防控的重要基础, 在选址决策中需要评价的因素包括煤田储量、煤层条件、地质构造、水文地质条件等。地下水污染风险来自于气化过程中污染物随煤气的逸散, 以及气化后污染物随地下水运移而发生的渗透迁移。有机污染物主要包括酚类、苯、少量的多环芳烃及杂环化合物; 无机污染物则主要包括各种有害元素。煤层和围岩的吸附作用限制了污染物的迁移, 地下水污染防控的措施包括: 识别永久不适合地下水区域, 控制气化时的操作压力, 设置地下水屏障, 将煤层污水抽提至地面净化处理, 也可以进行原位污染修复。

关键词: 煤炭地下气化; 选址; 地下水污染; 污染物

中图分类号: TD841.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2013)05-0023-05

Location Selection and Groundwater Pollution Prevention & Control Regarding Underground Coal Gasification

LIU Shu-qin¹ ZHOU Rong¹ PAN Jia¹ ZHAO Wan-zheng² PAN Xia² PENG An³

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Energy ENN Coal Gasification and Mining Company Ltd., Langfang 065001, China;
3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to understand the pollution process of underground coal gasification (UCG) and realize ultimate control, the possible processes of groundwater pollution were analyzed and typical pollutants were identified and several pollution control measures were proposed. Location selection in UCG has important effects on UCG stability control and groundwater pollution control and there are many factors for considering, such as coal reserves, coal seam conditions, geological structure, hydrological conditions. Groundwater pollution is caused by the diffusion and penetration of contaminants generated by UCG processes towards surrounding strata and the possible leaching of underground residue by natural groundwater flow after gasification. Typical organic pollutants include phenols, benzene, minor components such as PAHs and heterocyclics. Inorganic pollutants involve a variety of harmful elements. The extent and concentration of the contaminants decrease over time and with the distance from the burn cavity since the adsorption function of coal and surrounding strata. Possible pollution control measures include identifying a permanently unsuitable zone, setting a hydraulic barrier and pumping contaminated water out for surface disposal. Mitigation measures during gasification processes and groundwater remediation after gasification are also proposed.

Key words: underground coal gasification; location selection; groundwater pollution; pollutants

0 引 言

科学选址是实现煤炭地下气化稳定控制及防治

地下水污染的重要前提, 煤田地质构造、煤质条件、煤层赋存条件、煤层围岩性质及水文地质条件关系到气化区的选址和气化炉的建立^[1], 是影响地下气

收稿日期: 2013-03-11; 责任编辑: 代艳玲

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA050105); 中央高校科研业务专项基金资助项目(2009QH13); 教育部新世纪人才支持计划资助项目(NCET-10-0773); 教育部“大学生创新性实验计划”资助项目(110301g)

作者简介: 刘淑琴(1972—), 女, 山西离石人, 教授, 博士。Tel: 13910526026, E-mail: lsqmary@yahoo.com.cn

引用格式: 刘淑琴, 周 蓉, 潘 佳, 等. 煤炭地下气化选址决策及地下水污染防控[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(5): 23-27.

化工艺及稳定性控制的重要因素。与地面气化不同,煤炭地下气化的反应空间在很大程度上决定于煤层赋存条件^[2],这就使煤炭地下气化的过程比煤炭地面气化发生炉的造气过程复杂困难得多。煤田地质条件不仅影响地下气化的工艺条件,复杂的地质条件还会给气化生产过程带来很多困难,甚至中断气化过程。此外,水文条件也是重要的影响因素之一,在地下气化过程中,地下水可能随时渗入地下煤气发生炉,进而影响地下气化炉的连续稳定运行。实践证明,在地下气化系统中,气化过程突然中断的重要原因有对煤层的地质构造没有充分了解,对断层的判断错误、煤层厚度的变化以及地下水的突然涌入等。此外,前期选址对于地下水污染防控也具有重要意义。地下水污染风险在很大程度上取决于污染物从反应区向含水层迁移的通道赋存及发育的程度,如高温作用下围岩裂隙发育的变化和导通性、围岩的渗透性、气化盘区的地质构造与水文地质条件等。从水文地质条件分析,为确保能够连续、稳定地进行煤炭地下气化生产,同时减少地下水污染风险,气化区煤层的顶底板应具有一定的隔水性,绝不能选择与含水层有较强水力联系的板块,即气化区域在水文地质条件方面应具有一定的封闭性。隔水性良好的顶底板保证了在一定时间内燃空区内污染物不会对邻近的地下水体产生污染。

目前国内外煤炭地下气化关于地下水污染问题的研究还只停留在检测阶段,仅提出初步的污染预测及控制措施,缺乏系统的科学研究。尽管我国已开展了多个煤炭地下气化现场试验,但由于地下取样及经济条件的限制,目前还未对气化燃空区周边的地下水体污染风险进行系统研究。在国家 863 项目的支持下,当前中国矿业大学(北京)与新奥气化采煤有限公司正在进行此项课题的研究。笔者分析了煤炭地下气化过程选址决策的影响因素,辨别了在煤炭地下气化过程中污染地下水的途径,介绍了已识别出的有机和无机污染物,分析了污染物的演化运移特征,并提出了控制地下水污染的具体方法,以期为煤炭地下气化工程的选址及污染控制提供科学依据。

1 煤炭地下气化选址决策依据

煤炭地下气化前期选址的主要任务是,调查气化区域内的水文地质条件,包括煤田储量、煤质、地

质构造、煤层赋存条件、煤田内煤层数量、煤层厚度及煤层间距,气化区域及气化煤床地下水的赋存情况及其特征(水流特征、水的化学特征)。此外,还应了解煤层和矿区总的勘探程度和钻探经验等。依据地下气化炉的稳定运行要求和对地下水污染风险排除,在煤炭地下气化选址决策过程中需要进行评价的因素如下所述。

1) 煤田储量及煤层条件。①首先煤田储量应满足煤炭地下气化企业的设计生产年限,保障其应有的经济效益。依据现有的设备及技术条件,煤炭地下气化企业正常生产年限至少为 9 年。除焦煤之外,其他煤种都适合进行煤炭地下气化。②其次所选煤田煤层结构简单,且达到一定厚度。对于褐煤煤层,厚度至少应为 2.0 m,烟煤以上则至少为 0.8 m。但煤层厚度为 0.8~1.2 m 时,其中夹矸的厚度不得超过 0.2 m。在气化厚煤层时,夹矸层和煤层的厚度之比应不大于 0.5。对于褐煤煤层,矸石层不应超过净煤层厚度的 50%,单层矸石层的允许最大厚度不应超过 0.5 m。干燥基褐煤的平均灰分不能超过 35%,对于整个煤层而言(含夹矸),灰分则不超过 60%。

2) 地质构造。①如果煤层上部有含水层或者透气性很好的岩层,则煤层顶板必须是透气性差的岩层(隔水层),且该岩层的厚度必须大于岩层的冒落高度,即冒落不会影响该岩层的隔水性能。对于褐煤,顶板的黏土厚度至少为煤层燃空区高度的 1.2~1.8 倍。对于烟煤,顶板透气性差的岩层(如泥岩、粉砂岩)厚度决定于煤层厚度,在煤层厚度为 0.8~2.3 m 时,顶板厚度不小于煤层厚度的 0.9~1.8 倍,当煤层厚度为 3.0~9.0 m 时,顶板厚度不小于煤层厚度的 2~4 倍。②在煤层上部如果有破碎岩层或者透气性好的岩层,如石灰岩层等,则煤层顶板必须是透气性差的岩层(隔水层)。对于褐煤,煤层顶板厚度应为煤层厚度的 7~15 倍,而煤层底板的泥岩厚度至少应在 2.0 m 以上。对于烟煤,煤层顶板厚度至少为 7 倍的燃烧高度(主要决定于岩层的物理强度)。③气化水平或倾斜煤层时,安全的煤层厚度(单一煤层的厚度或者多层煤的总厚度)是 15.0 m。在气化倾斜煤层时,上部地层的安全厚度决定了距离地面预留的安全煤柱厚度及气化剂和煤气的密封性。预留煤柱不低于 10 m,但最低限度为 30 m。如果煤层构造的褶皱起伏较大,超过

煤层厚度的一半, 就会对煤炭地下气化过程产生不利影响。如果避开构造后仍然无法设计 1 个单元炉, 则该煤炭资源不适合进行煤炭地下气化。此外, 如果不能防止煤气向邻近矿井泄露, 也不适合采用地下气化技术开采这部分煤炭资源。

3) 水文地质条件。煤田水文条件会对煤炭地下气化产生影响, 若进入气化炉的水超过了煤炭地下气化过程需要的地下水量, 就需要进行排水作业。使用空气作为气化剂, 正常气化的气化炉允许进水量如下: 烟煤 $0.7 \sim 1.5 \text{ m}^3/\text{t}$; 褐煤 $0.3 \sim 1.0 \text{ m}^3/\text{t}$; 高含水褐煤, 不允许气化炉进水。最佳水文地质状况是, 进行煤炭地下气化的煤层与顶板含水层和底板含水层都有隔水层隔开, 即顶板隔水层的厚度足够厚, 顶板塌陷后也没有完全破坏隔水层的隔水功能。底板隔水层的厚度应保障底板含水层不会被加热到 100°C 。对煤炭地下气化不利的水文地质状况有: 顶板或者底板没有隔水层, 并且与之相连的含水岩层透气性很好, 这样气化炉就会涌进大量的水, 因此气化炉需要进行排水作业, 一般来说气化炉进行排水时会伴随大量的煤气漏失。如果煤层上部有很厚的透气性较低且涌水率较大的含水层, 即没有可靠的隔水层, 这样的煤炭资源不适合无井式煤炭地下气化。地下气化区域除了进行普通勘查及详查外, 还需根据地下气化的要求, 进行钻井勘查, 以获取更详尽的煤层水文地质条件, 作为选址决策的依据。

2 地下水污染防控

2.1 气化区地下水污染途径

气化区地下水污染的主要途径包括: 污染物随煤气向周围地层的扩散和渗透, 气化残留污染物在地下水中的浸出及迁移。另外, 二氧化碳、氨和硫化氢等泄漏气体会改变地下水的 pH 值, 进而影响地下水的化学需氧量和生物需氧量。

气化过程中, 如果空气或氧气以不小于煤层静水压的压力注入, 会导致煤气漏失到周围可渗透地层介质中, 如果煤层顶板存在裂隙, 则可能会漏失到上覆岩层中, 如图 1 所示。漏失的煤气中含有煤热解产生的大分子有机物, 生成的挥发性产物越多, 在溶入地下水之前就会向周围煤层或岩层渗透得越远。当气化结束后, 地下水开始进入气化燃空区, 此时燃空区内的温度还很高, 进入的水会转化为蒸气通过工艺井排放至地面, 之后燃空区不断冷却直至

被水充满, 残留的煤灰中碱性氧化物浸出导致水的 pH 增加, 无机组分主要是有害微量元素, 其浓度升高。在此期间, 热对流驱动使一些非挥发性无机污染物从煤灰中转移到周围地层中, 导致气化后燃空区四周的地层中存在此类污染物。之后, 许多污染物会吸附在煤层或岩层中, 不同污染物之间甚至发生反应致使污染物的浓度下降。煤层和岩层在一定程度上充当了地下水的天然净化系统。最后, 经过一段时间后, 随着煤层地下水流的重新建立, 污染物的羽状扩散缓慢形成, 如图 2 所示。污染物羽状扩散的程度和浓度主要取决于污染源的强度、地下水流速、在横向和纵向上的弥散程度以及各种污染物的反应活性和吸附特性。

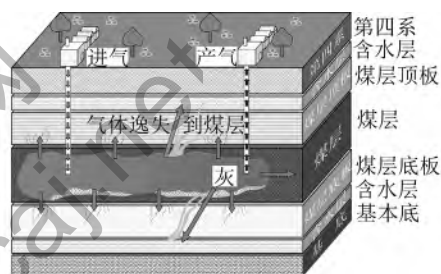


图1 地下气化中地下水污染示意

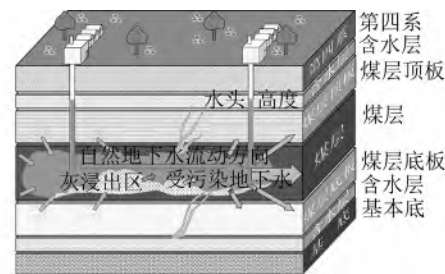


图2 地下气化后地下水污染示意

煤炭地下气化燃空区的顶板塌陷也会造成严重的地下水污染问题。美国怀俄明州 Hoe Creek 煤炭地下气化试验站, 在气化期间顶板塌陷导通了上部含水层, 燃烧产生的污染物沿导水裂隙迁移到上部含水层造成地下水污染。因此该问题应在地下气化区选址时给予充分考虑从而予以避免。

2.2 地下气化特征污染物

1) 有机污染物。煤炭地下气化引起地下水有机污染物中含量最高的是酚类化合物, 最早的相关报道来自前苏联的地下水水质监测结果。德克萨斯州 Fairfield 地下气化试验^[3-4], 燃空区水样分析结果也证实主要有机污染物为酚类化合物, 见表 1, 其中还含有少量的多环芳烃和杂环化合物等有机物。

Campbell 等^[5]发现怀俄明州 Hoe Creek 大规模煤炭地下气化区的地下水含有相近水平的污染物,这些水样取自燃空区以及周围的观测井,在气化结束后持续采样 15 个月。结果表明,污染物有酚类、芳香类羧酸、芳香烃、酮类、醛类、吡啶、喹啉、异喹啉和芳香胺。在酸性、中性和碱性条件下,个别污染物的含量变化比较大。萘、邻二甲苯、2-甲基吡啶和邻甲酚等污染物的含量也很高,因此,将此类化合物作为煤炭地下气化地下水的特征污染物对于水质监测具有重要意义。另外,在许多地下气化试验点发现了致癌物质苯。Hoe Creek 试验区 Felix 1 煤层水中检测到苯的浓度很高,最高质量浓度为 3 000 mg/L。然而,苯在气化燃空区周围水体的影响区域只有 9 m 远,但通过抽取燃空区中的地下水仍难以消除苯污染的影响。

表 1 气化现场附近地下水样中有机物含量测定结果

组分	有机物含量/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)		
	气化前	气化后	气化后 1 年
总酚类	7	100 000	20
总杂环化合物	未检出	2 200	未检出
双环芳烃	2	105	9
三环芳烃	1	22	5
四环芳烃	未检出	7	未检出
五环芳烃	未检出	3	未检出
总有机物	10	103	34

2) 无机污染物。由于气化工艺的不同,地下水中的无机物种类和含量也有所变化。德克萨斯州 Tennessee Colony 气化站气化前后地下水中无机物含量变化见表 2。该数据与其他地下气化数据^[6]相比具有代表性。水溶性灰分的溶出增大了燃空区水中的总溶解性固体含量,无机污染物主要为各种离子,包括钙、钠的硫酸盐和碳酸盐。在地下水中还检测到少量的铝、砷、硼、锌、硒以及放射性物质铀等。

表 2 地下水中无机物的质量浓度变化

组分	无机物含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		组分	无机物含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	
	气化前	气化后		气化前	气化后
TDS	293	1 462	HCO ₃ ⁻	275	385
Na ⁺	78	136	Cl ⁻	9	338
Ca ²⁺	8	94	NH ₃	7	163
SO ₄ ²⁻	5	625	F ⁻	0.2	5.3

注: TDS 为总溶解性固体; B 无机物气化前未检测到, 气化后含量为 2.2 mg/L。

通常认为由于地下气化煤灰的浸出, 地下水中的无机污染物浓度会不断增多, 实验室气化煤灰的浸滤试验^[7-8]进一步佐证了现场的试验数据。由于煤灰组成、气化温度、选样技术和背景水质等条件不同, 试验结果略有不同, 只有 pH 值在试验中变化比较大。来自怀俄明州的次烟煤灰浸滤后 pH 值变化比较大, 而德克萨斯州褐煤灰分浸滤后 pH 值变动不大, 这些差异可能是煤质不同引起的。

2.3 地下水中污染物迁移行为

1) 随地下水流的迁移。气化后地下水会流入燃空区, 浸出煤灰和煤焦中的污染物, 随着燃空区内地下水充满, 地下水流恢复至燃烧前的状态, 燃空区中的污水将随水流迁移到煤层深处。可以采用数学模型预测污染物在较长时间内的迁移和演化。文献[9-10]针对怀俄明州 Hanna 煤炭地下气化试验建立了二维有限元地下水水流模型, 研究了燃空区附近煤层中地下水的运动。通过模型计算获得了地下水充满燃空区所需要的时间, 通过实测和计算比较进行校正, 模拟了地下水进出燃空区的情况。

2) 自我修复。气化结束后, 残留在地下的许多有机污染物可能迁移或转移至地下水中。苯、酚类化合物由于具有较高的水溶性, 成为最典型的有机污染物。前苏联煤炭地下气化现场试验数据表明, 酚类化合物浓度随时间和至燃空区的距离呈下降趋势^[11], 见表 3^[12]。

表 3 气化后地下水中酚类化合物浓度随距离和时间变化

气化后时间/d	酚类化合物质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		
	3 m	15 m	30 m
3	8.00	0.090	0.008
83	0.60	0.030	0.004
182	0.09	0.007	<0.001
280	0.04	0.003	<0.001
762	0.02	0.001	<0.001

注: 3、15、30 m 指污染物至燃空区的距离。

随着时间推移, 无机污染物包括 Na⁺、K⁺、Mg²⁺、NH₄⁺ 等阳离子以及 SO₄²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻ 等阴离子浓度大幅度降低^[5]。前苏联煤炭地下气化试验监测结果认为有机污染物存在的时间很短, 但无机污染物质如硫化氢存在时间则可达 1 年, 水质 2 年后才能恢复^[11]。上述现象可以用自然界的自净化能力予以解释。众多现场试验数据分析认为水体自然净化方式有: 围岩吸附、与围岩进行的离子交换、

沉淀反应、地下水的稀释以及生物净化作用^[11,13]等。值得指出的是生物净化作用在最后分解或将污染物无害化处理是非常有用的。Campbell 等^[5]提出了污染物生成与运输概念模型,假定污染物的迁移是污染物与周围地层特殊作用的函数,因此具有较弱固体表面亲和力的物质就不会在周围地层中存留,而是随地下水流迁移,浓度的降低不明显,而具有中等或较强固体表面亲和力的物质迁移比较慢,浓度下降较为明显。Humenick 等^[14]最先进行了受污染的地下水与煤或地层间的反应研究,结果表明与邻近 2 个黏土层相比,褐煤煤粉对污染物具有更大的吸附作用,通过黏土或煤层吸附有机物是非常有效的去除机制,无机物阳离子的迁移受离子交换作用的强烈影响,二价阳离子从褐煤和黏土上释放后留下的位置很快被一价阳离子占据,褐煤和黏土对氨也表现出极强的吸附作用,而阴离子基本不与黏土和褐煤发生反应,氯化物和硫酸盐是比较稳定的,不易被吸附。地下水与褐煤接触后碱性明显降低,但与黏土接触后碱性降低不明显。

2.4 地下水污染防治与控制

1) 选址控制。英国判断是否存在污染风险的一个重要原则是识别气化区是否可被认为是永久不适合地下水区域,即该区块地下水水质非常差,水量很小,以至于不能从环境学和经济上认为是含水层,其核心理念是气化区附近不存在重要的含水层。

2) 过程控制。煤炭地下气化过程中采取的污染控制措施包括:①利用监测系统探测煤气泄漏,并确保反应压力略低于周围的静水压;②确保运行所用的井和钻孔与含水层之间充分密闭;③维持反应区周围的地下水位呈锥形降落。在 1991—1998 年欧盟地下气化试验中,通过主动控制气化中的操作压力不大于煤层静水压力,取得了良好的效果。试验发现控制操作压力可以大幅降低因煤气泄漏造成的污染扩散。在气化炉运行后期,由于燃空区要重新恢复平衡,压力和污染物扩散增大,此时对于防止地下水污染非常重要,推荐采取以下措施:气化后,通过加快冷却燃空区和抑制压力上升将热解产生的污染物减至最少;通过从燃空区抽水维持地下水涌入燃空区,在反应区内保持一定的水压梯度。

3) 地下水治理。1976—1979 年,美国在怀俄明州东北部进行了浅部煤炭地下气化试验,由于选址错误,苯污染了 3 处含水单元。美国政府于 1995—

1996 年对污染点进行了地下水曝气结合生化修复处理。曝气作为一种方法,可以分离溶解苯,使苯从非溶解性苯源物质中挥发出来,并为好氧菌类提供氧气,本土细菌由磷酸培养。修复的目的是利用其水文地质环境优势,采用比较具有成本优势的方法进行地下水修复。试验中通过抽取地下水促进地下空气流通、营养输送和控制生物量。结果表明,在整个试验区内苯的浓度大幅度降低,在工程实施 2 个月苯的浓度降低超过 80%。

4) 围堵固化。该方法的目的是抑制污染物在煤层中的扩散与迁移。曾有专利报道提出一些污染物控制技术,如:在被污染的区域周围设置液压屏障,在燃空区中充填吸附性黏土,在污染区域周围设置注浆帷幕阻止污染物扩散。然而,因为没有现场试验数据,各种控制技术的实际成本和有效性尚不确定。此外,将燃空区内和周围地层内受污染的水抽提到地面进行处理,对于去除高流动性污染物是非常有效的。这些污染物主要包括煤灰浸出污染物、易溶性有机物和大部分氨。难溶性的、流动性不强的有机物则滞留在燃烧区边缘地带。

3 结 论

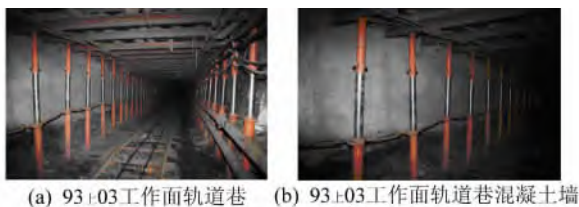
1) 煤炭地下气化前期选址决策对于地下气化炉的稳定运行及地下水污染防控具有重要作用。前期选址决策的主要任务是调查气化区的煤田水文地质条件。

2) 煤炭地下气化污染地下水的风险主要在于高压下煤气向周围可渗透地层的扩散以及气化后残留物在地下水流中的溶解及渗透迁移。已查明的典型污染物包括有机物和无机物,在不同的煤炭地下气化地点污染物含量略有变化。监测结果表明,污染物随时间和至燃空区的距离而减少。燃空区周围的煤层和围岩由于较强的吸附作用,形成了一层天然滤网阻止污染物向更远处迁移。

3) 煤炭地下气化技术可以通过以下措施防止对地下水的污染:识别永久不适合地下水区域;控制气化时的操作压力;设置地下水屏障;将污水抽至地面净化处理。在气化后,对燃空区中的污水进行治理也是一项有效的污染控制措施。此外,通过抽水将水位下降到煤层以下,或选择远离地下含水层的资源区域也可以降低地下水污染风险。

(下转第 62 页)

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.