

# 基于城市燃气输配的废弃煤矿井储存天然气方法

涂庆毅

安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 淮南 232001

**摘要** 结合城市燃气输配关键内容, 分析了中国废弃煤矿井资源及利用的现状和特点, 研究了废弃煤矿井永久地下空间作为城市天然气储存空间的限制条件, 提出了废弃煤矿井储存天然气的思路。分析表明, 密封性是废弃煤矿井储存天然气的限制条件, 可根据城市调峰气量的确定, 利用废弃煤矿井井下的永久性地下空间, 并配合井下空间的改造及地面工程建设, 实现废弃煤矿井作为地下储气库, 以有效解决城市不同时间段的天然气供需不平衡问题。

**关键词** 废弃煤矿井; 天然气; 储气库; 系统工程; 工艺设计

煤炭作为中国的主体能源, 长期以来在中国一次能源生产和消费结构中的比例占 65% 以上, 且这种情况在今后的一段时间内仍将保持<sup>[1]</sup>。多年来, 中国原煤年产量在 30 亿 t 以上, 其中 2018 年原煤产量为 36.8 亿 t, 2019 年原煤产量达到 37.5 亿 t<sup>[2-3]</sup>。常年的高强度开采, 使中国部分矿区的煤炭资源面临枯竭的难题, 中国的煤炭资源开采逐步向西北部发展<sup>[4]</sup>。例如, 中国中东部的淮南、淮北、徐州、枣庄等老矿区, 经历数十年甚至上百年的开采后, 可开采的煤炭资源逐渐枯竭, 矿区内部分煤矿已经关闭或者即将关闭。据统计, 2015—2017 年, 国内累计关闭退出煤矿约 4000 处, 加上华东、东北部分煤矿资源枯竭, 预计将有更多煤矿关闭退出<sup>[5-7]</sup>。

随着大量的煤矿矿井的关闭/废弃, 废弃煤矿

井周围的社会、经济和环境问题也越来越凸显, 人员就业、经济衰退、土地破坏、植被退化、水污染等已经成为亟待解决的难题, 废弃煤矿井的再开发利用和战略转型已经刻不容缓<sup>[8]</sup>。废弃煤矿井存在大量的地表建筑物、道路、桥梁、水利设施、管线以及地下空间, 这些资源的充分利用将有助于解决中国废弃煤矿井战略转型过程遇到的瓶颈<sup>[4,9-12]</sup>。尤其是针对永久性地下空间的开发利用, 不仅能变废为宝、提高废弃资源的利用率, 同时可为废弃煤矿井的转型提供一条可持续路径<sup>[13]</sup>。

基于中国废弃煤矿井资源及利用的现状, 并结合中国废弃煤矿井资源的分布特点, 主要研究废弃煤矿井的永久地下空间作为城市天然气储存空间的限制条件, 提出废弃煤矿井储存天然气的思路。

收稿日期: 2021-03-02; 修回日期: 2021-05-10

基金项目: 安徽省自然科学基金青年项目(2008085QE260)

作者简介: 涂庆毅, 讲师, 研究方向为矿井瓦斯防治和废弃矿山资源多元化利用, 电子信箱: 13775889470@163.com

引用格式: 涂庆毅. 基于城市燃气输配的废弃煤矿井储存天然气方法[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 47-51; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.

2021.13.005

## 1 中国废弃煤矿井利用现状及特点

### 1.1 土地资源利用

废弃煤矿井周围原有的土地资源受煤炭开采影响普遍发生破坏,造成土地塌陷,形成各类大小不等的盆地区、积水区、坡地区和裂缝区土地<sup>[1]</sup>。据统计,中国每年平均开采1万t原煤,塌陷的土地达2000 m<sup>2</sup>,近2年来煤炭开采造成的年土地总塌陷面积超过700 km<sup>2</sup><sup>[1]</sup>。由于土地塌陷对原始表土层的破坏,土地资源的原有利用模式遭到破坏,很难对塌陷土地进行复垦利用,这也是废弃煤矿井周围生态环境问题的主要原因之一。

寻求废弃煤矿井周围塌陷土地资源的新利用模式是彻底解决这一问题的根本方法。目前,对于塌陷土地的利用模式主要包括还田复垦、发展水产养殖、打造湿地公园等。抚顺矿区近年来采用煤矸石填埋塌陷区,并在煤矸石上方覆土还田的方法进行农作物种植;淮南和淮北矿区结合当地雨水充沛的特点,在塌陷区发展水产养殖;通过对采煤塌陷区的改造,原徐州矿区的权台煤矿和旗山煤矿的采煤塌陷区域被改造成集生态旅游和休闲娱乐为一体的国家AAAA级潘安湖旅游景区;此外,国内还有部分采煤塌陷区改造成影视基地或深坑酒店的案例。然而,总体上,国内目前对于废弃煤矿井周围采煤塌陷区的土地资源利用率相对较低,仅为30%。

### 1.2 建筑物及地面线性设施利用

为了保障煤矿正常生产需求,目前煤矿工业广场内的建筑物主要包括办公楼、各类矿井生产建筑、职工宿舍、食堂等,而地面线性设施则包括铁路、公路、电力和通信线路等<sup>[1]</sup>。煤矿工业广场建筑物及矿井地面线性设施在煤矿正常生产、加工、运输、销售等环节均起到了至关重要的作用。然而,一旦煤矿关闭,工业广场建筑物及矿井地面线性设施将失去其原有的利用功能,造成大量的建筑物空置或地面线性设施被废弃,显然这是对资源的极大浪费。

由于煤矿开采对工业广场内的建筑物影响较小,因此工业广场内的建筑物在煤矿废弃时依然具

有极高的利用价值。目前对废弃煤矿井建筑物的利用主要从空间重构、功能转化等方面,改变建筑物的原有造型和功能,实现建筑物的二次利用。如开滦矿区的唐山煤矿将废弃厂房改造为“中国音乐城”,荆各庄煤矿将原办公楼更改用途,改为培训教育基地。

### 1.3 地下遗留资源利用

废弃煤矿井地下遗留资源主要为遗留煤资源和遗留煤层气资源<sup>[6]</sup>。煤层开采后,采空区遗煤、保护煤柱、煤层不可采区域、不可采煤层等将在废弃煤矿井地下遗留大量的煤炭资源,这部分煤资源的开发利用将进一步提升国内煤炭资源的开采率<sup>[4]</sup>。目前,对于废弃煤矿井地下遗留煤资源的开采主要是基于流态化开采设想。国内地下煤炭资源流态化开采研究与试验始于20世纪50年代,经历数十年的研究与探索,在地下煤炭流态化开采的基础理论和应用技术方面已经取得一定的成果,并在一些试验矿区开展了小型现场试验。然而,由于地下煤炭资源流态化开采理论基础和技术装备的复杂性,目前该项研究依然处于试验阶段,无法进行大规模的推广应用。

近年来,由于煤层瓦斯危害严重影响煤炭的安全开采,大量的高瓦斯矿井或者突出矿井被关闭。这些废弃的高瓦斯矿井或突出矿井井下不仅遗留大量煤炭资源,同时这些废弃煤矿井的采空区和遗留煤体内存在大量的遗留煤层气资源。据统计<sup>[15-17]</sup>,在1953—1998年的459个废弃国有重点煤矿老空区遗留煤量有300亿t以上,煤层气储量预计为几千亿m<sup>3</sup>。废弃煤矿井地下煤层气开采方法主要包括地面钻井、井下密闭及预留专门管道抽采等。然而,废弃煤矿井地下煤层气由于资源量和浓度明显低于原始煤层气资源量,这种煤层气的开发利用也有别于原始煤层气。普遍地,开发利用废弃煤矿井地下煤层气可以充分利用地下原有的井巷工程降低开发成本;另外,开发利用废弃煤矿井地下煤层气需要进行分离富集以提高煤层气浓度。

### 1.4 地下空间利用

煤矿井废弃后,矿井井筒、井底车场、大巷等永久性地下空间将在很长一段时间内依然可以保存,

这部分地下空间的开发利用是废弃煤矿井资源利用的重要组成部分<sup>[11]</sup>。目前,废弃煤矿井地下空间的开发利用包括井下空间建设蓄能站、井下空间储存天然气、井下空间储存战略石油、特殊物资井下仓储、井下特殊场所与城市建设、井下新农业、井下小型核电站等方面。

井下空间建设蓄能站是利用废弃煤矿井数百米的井筒落差和数十公里的长距离巷道,通过压缩空气蓄能和抽水蓄能等方式,实现大规模储能并高效发电,大幅提高电网的调节能力与容纳能力,同时提高供电质量和电网的调峰能力<sup>[18]</sup>。井下空间储存天然气是利用废弃煤矿井的地下空间以及数百米的埋藏条件,建立地下储气库,解决城市天然气供应和消费之间的均衡关系。井下空间储存战略石油是利用废弃煤矿井的地下空间、稳定的岩层条件及水文条件建设地下石油储备库。

由于废弃煤矿井数百米的埋藏条件,地下空间可作为军用物资、化学物资、工业危险废弃物、对储存环境有特殊要求的物品等井下仓储。中国工程院院士谢和平提出“地下生态城市与深地生态圈”战略构想,利用废弃煤矿井地下空间实现地下城市。利用井下空间养殖或培养不需要或较少需要阳光类的动植物、微生物发展井下新农业是一种新型经济环保生产模式<sup>[11,19]</sup>。此外,刘峰等<sup>[11]</sup>结合废弃煤矿井的矿区地质、采矿条件及井下小型核电站的建设需求,分析废弃煤矿井建设井下小型核电站的可行性,为地下核电站建设提供理论支撑。

然而,由于煤矿井地下空间的特殊性,目前对于废弃煤矿井地下空间资源的利用依然处于理论或试验阶段,各类方法并未大规模得到推广应用。

## 2 废弃煤矿井储存天然气的优势与限制条件

由于城市天然气用气量随时间而变化,每个季度、每个月的用气量都不同,而气源供气量一般较为稳定。因此,城市天然气的供气 and 用气经常发生供需不平衡问题,设置各种储气设施进行输气系统

调峰将有助于解决城市供气 and 用气不平衡问题。

利用废弃煤矿井储存天然气的优势包括空间优势和区域优势<sup>[13,20-21]</sup>。废弃煤矿井井下数十公里的永久性地下空间为天然气储存提供了充裕的储存空间,同时数百米的埋深提供的地层压力可以用于高压天然气的封存,废弃煤矿井的空间优势可以有效地降低天然气储存设施的建造成本。煤炭作为中国城市发展的动力源,在过去的数十年乃至今后的很长一段时期内,城市的发展依然依靠煤炭提供能源。随着数十年的城市发展,中国中东部各矿区的 50 km 范围内均分布着以煤炭开采为特色的能源城市(淮南、淮北、平顶山、徐州、枣庄、焦作等),而矿区 500 km 范围内分布各类大小不等的城市。这些城市为保障居民日常生活和企业正常生产,需要大量的天然气供给。然而,由于中国天然气主要集中于中西部地区,东部城市的天然气通常需要经历数千公里的长距离输送甚至跨国输送,例如西气东输工程是以新疆塔里木为主要气源,以长江三角洲为目标市场,整个输送距离跨越 9 个省市,全长超 4000 km。为保障东部城市的天然气供需稳定,废弃煤矿井作为天然气储存井可以充分发挥中东部矿区废弃煤矿井的区域优势,降低天然气运输和储存成本。

然而,密封性是废弃煤矿井储存天然气的限制条件<sup>[22]</sup>。将废弃煤矿井作地下储气库,必须将原来通向地面的井筒进行严格密封后重新钻生产井和监测井。储气库的注气压力很高,工作量较大,原井筒如果密封不好,存在高压气向地面泄漏而危及安全的危险。由于工艺复杂,目前利用废弃煤矿井作为地下储气库不多,仅在美国、比利时、德国有成功案例。美国利用一座废弃煤矿建成了世界首座废弃煤矿井地下储气库,比利时利用废弃煤矿先后建成了 2 座废弃煤矿天然气地下储存库并投入使用,德国在布伦瑞克利用废弃采矿空间建成了天然气储气。

因此,废弃煤矿井储存天然气的优势在于充裕的地下空间优势和靠近城市的区域优势,而其主要劣势在于废弃煤矿井普遍密封性较差,密封性是废弃煤矿井储存天然气的限制条件。

### 3 废弃煤矿井储存天然气的设计思路

#### 3.1 调峰气量的确定

废弃煤矿井储存天然气的调峰气量需要结合城市用气的变化。城市用气量随着季节、月份和每天时间段的变化而变化,冬季的供暖需求,每日居民生活需求都会导致城市用气量的变化。正是由于这种用气量的变化,需要在城市附近设置天然气存储设备用以调整城市用气在峰值和谷值的平衡问题。

储气设备的储气量是根据用气量随着时间的波动来确定的,依据用气量的波动情况,逐步计算储气设备的累计储气量,画出储气量随着时间的变化曲线,并依据曲线的峰值和谷值得出理论上的储气体积

$$V_s = V_a - V_b \quad (1)$$

式中, $V_s$ 为理论储气体积, $m^3$ ;  $V_a$ 为用气量峰值, $m^3$ ;  $V_b$ 为用气量谷值, $m^3$ 。

此外,确定储气设备的实际体积还需要考虑到供气量的波动、用气负荷的误差、气温等外界因素,还需考虑储气设备的有效体积利用系数,最终在理论体积的基础上乘以富余系数获得实际储气体积。

#### 3.2 废弃煤矿井井下改造

废弃煤矿井改造成地下储气站需要重复结合废弃煤矿井的井下空间特点,依据城市用气量的变化设计井下储气空间,同时要充分考虑到城市的发展规划设计未来井下储气拓展空间。

废弃煤矿井下改造成地下天然气储气站需要解决井筒及地下巷道的密封性问题。井下改造的总体思路是选择主副井、井底车场及车场附近辅运或主运大巷作为改造空间。首先,检查改造空间的完整情况,并对破损区域进行修复;其次,对改造空间进行密闭处理,并利用高压检测改造空间的长时间的密闭性;最后,安装井下储气站的相关设备,包括注气系统、采气系统、管路、阀门、计量设备、检测设备。

#### 3.3 储气库地面工程建设

地下储气库地面工程的建设,除应遵循天然气储运设计将地下储气库作为一个子系统放在整

个天然气输配的大系统中,根据总投资和总消耗功率相对最低的原则,优选大系统中各环节间相互制约的基本参数和储气库地面工程的流程形式。

储气库地面工程建设受多种因素共同影响,包括长距离管道的运行压力、输气量、注采周期、最大注采气量、温度、气体组分等。储气库地面工程主要包含注采气管网、注采气站、压气站、输气管线等。具体设计建设时需要统筹考虑各部分的相互关系,做到各部分的协调运行。此外,储气库地面工程建设同样需要考虑城市的发展规划,预留未来拓展工程。

## 4 结论

研究了废弃煤矿井的永久地下空间作为城市天然气储存空间的限制条件,提出废弃煤矿井储存天然气的思路,得出如下主要结论。

1) 废弃煤矿井存在大量的地表建筑物、道路、桥梁、水利设施、管线及地下空间,这些资源的充分利用将有助于解决中国废弃煤矿井战略转型过程遇到的瓶颈。尤其是针对于永久性地下空间的开发利用,不仅能变废为宝、提高废弃资源的利用率,同时可为废弃煤矿井的转型提供一条可持续路径。

2) 密封性是废弃煤矿井储存天然气的限制条件。根据城市调峰气量的确定,利用废弃煤矿井井下的永久性地下空间,并配合井下空间的改造及地面工程建设,实现废弃煤矿井作为地下储气库,有效解决城市不同时段的天燃气供需不平衡问题。

3) 废弃煤矿井作为地下储气库需要充分考虑储气库地下和地上各部分的协同运行,利用系统工程思想进行布局设计。同时,依据城市发展规划,设计储气库地下和地面的拓展工程。

### 参考文献(References)

- [1] 袁亮,姜耀东,王凯,等.我国关闭/废弃煤矿井资源精准开发利用的科学思考[J].煤炭学报,2018,43(1):14-20.
- [2] 程远平.煤矿瓦斯防治理论与工程应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [3] 袁亮.煤与瓦斯共采[M].徐州:中国矿业大学出版社,

- 2016.
- [4] 胡鑫蒙, 蒋秀明, 赵迪斐. 我国废弃煤矿井处理及利用现状分析[J]. 煤炭经济研究, 2016, 36(12): 33-37.
- [5] 李全生, 李瑞峰, 张广军, 等. 我国废弃煤矿井可再生能源开发利用战略[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(5): 9-14.
- [6] 韩保山. 废弃煤矿井煤层气资源开发潜力评价方法研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2003.
- [7] 霍冉, 徐向阳, 姜耀东. 国外废弃煤矿井可再生能源开发利用现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 267-273.
- [8] 戴家生, 夏明强, 潘磊, 等. 典型废弃煤矿井综合治理分析[J]. 煤炭技术, 2020, 39(6): 97-99.
- [9] 徐潇, 周来, 冯启言, 等. 废弃煤矿瓦斯赋存与运移气-水-岩相互作用研究进展[J]. 煤矿安全, 2016, 47(6): 1-4.
- [10] 罗华明, 张杰, 黄若韬. 高压气地下储气井建造[J]. 中国特种设备安全, 2006, 22(2): 57-59.
- [11] 刘峰, 李树志. 我国转型煤矿井下空间资源开发利用新方向探讨[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2205-2213.
- [12] 徐新亚, 刘道平, 黄文件, 等. 用水合物技术收集废弃煤矿井瓦斯的可行性探讨[J]. 矿业安全与环保, 2005(3): 30-32.
- [13] 方亮. 地下储气库储采技术研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2003.
- [14] 焦民杰. 废弃煤矿井煤层气抽采利用技术政策研究——以晋煤集团为例[J]. 能源与节能, 2018(6): 22-23.
- [15] 崔永君. 废弃煤矿井瓦斯——值得关注的煤层气资源[J]. 中国煤层气, 2005(3): 27-31.
- [16] 刘双林, 任育杰. 废弃煤矿井瓦斯抽采现状分析与探究[J]. 化工管理, 2016(30): 56.
- [17] 张培河. 废弃煤矿井瓦斯资源量计算主要参数确定方法[J]. 中国煤层气, 2007(3): 15-17.
- [18] 赵伟. 基于废弃煤矿井的光伏——抽水蓄能发电系统设计[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [19] 任辉, 吴国强, 张谷春, 等. 我国关闭/废弃煤矿井资源综合利用形势分析与对策研究[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(2): 1-6.
- [20] 刘树明, 蒲建, 贾广雄, 等. 地下储气库设计技术及其应用[J]. 油气储运, 2002(10): 18-21.
- [21] 马小明, 张秀丽, 张雪芳, 等. 地下储气库调峰产量与采气井数设计技术[J]. 天然气工业, 2013, 33(10): 89-94.
- [22] 李建中, 李奇, 胥洪成. 盐穴地下储气库气密封检测技术[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 90-92.

## Discussion on the method of gas storage in abandoned coal mine based on urban gas transmission and distribution

TU Qingyi

State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

**Abstract** Combined with the key knowledge of urban gas transmission and distribution, and based on an in-depth analysis of current situation and characteristics of abandoned coal mine resources and utilization in China, this paper studies the restrictions of the permanent underground space of abandoned coal mine as urban natural gas storage space, and puts forward an idea of natural gas storage in abandoned coal mine. Sealing is the limiting condition of natural gas storage in abandoned coal mines. According to the determination of urban peak shaving gas volume, using the permanent underground space of abandoned coal mine, and cooperating with the underground space transformation and surface engineering construction, the abandoned coal mine well can be used as the underground gas storage, so as to effectively solve the imbalance between natural gas supply and demand in different periods of the city.

**Keywords** abandoned coal mine; gas; gas storage; systems engineering; process design ●



(责任编辑 刘志远)