

盐穴地下储气库选址与评价新技术

郑雅丽^{1,2} 完颜祺琪^{1,2} 邱小松^{1,2} 垢艳侠^{1,2} 冉莉娜^{1,2} 赖欣^{1,2} 吴双³

1. 中国石油勘探开发研究院 2. 中国石油天然气集团有限公司油气地下储库工程重点实验室
3. 中国石油川渝页岩气前线指挥部生产运行部

摘 要 为了满足我国南方非油气主产区和天然气主要消费市场寻找有利盐矿建设盐穴地下储气库的需求, 解决盐穴储气库库址筛选条件不清、建库条件评价的内容与深度不一致的问题, 在分析国内外盐穴地下储气库资料的基础上, 提出了地质、地表条件相结合的库址筛选原则, 创建了盐穴地下储气库建库条件评价体系; 然后利用上述筛选原则和评价体系对长江三角洲、中南地区、东南沿海等 3 大天然气主要消费市场的部分盐矿进行了筛选排序; 进而对其中条件较好的淮安盐矿进行了建库条件评价。研究结果表明: ①盐穴储气库库址筛选的原则包括构造、埋深、含盐地层厚度、氯化钠含量、顶板和储量等 6 项地质原则和地表条件、水源与卤水、与管网距离等 3 项其他原则, 利用上述原则可以对筛选目标进行快速地优选排序; ②建库条件评价体系包括对构造、含盐地层特征、密封性与稳固性、可溶性、储气规模以及地表条件等的综合评价。结论认为, 所建立的评价新技术可以有效地指导盐穴地下储气库的选址与评价, 为盐穴储气库的方案设计提供了依据和有利的技术支持, 所提出的厚夹层利用先导性建议现场实施效果好; 该项研究成果对于加快我国地下储气库的建设具有积极的意义。

关键词 盐穴 地下储气库 选址 建库条件 地层特征 评价体系 实例分析 江苏淮安盐矿

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.06.014

New technologies for site selection and evaluation of salt-cavern underground gas storages

Zheng Yali^{1,2}, Wanyan Qiqi^{1,2}, Qiu Xiaosong^{1,2}, Kou Yanxia^{1,2}, Ran Lina^{1,2}, Lai Xin^{1,2} & Wu Shuang³

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang, Hebei 065007, China; 2. CNPC Key Laboratory of Underground Oil/Gas Storage, Langfang, Hebei 065007, China; 3. Production Operations Department, Chuan-Yu Shale Gas Front-line Command Post, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 39, ISSUE 6, pp.123-130, 6/25/2019. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: In order to meet the demand of constructing salt-cavern underground gas storages (UGSs) in favorable salt mines for the regions that are neither major oil and gas production zones nor major natural gas consumer markets in South China, and solve the problems of unclear conditions for selecting salt-cavern gas storage sites and of inconsistent content and depth in evaluating gas storage conditions, based on investigation and analysis of salt-cavern UGS data in China and other countries, we proposed the principles of selecting gas storage sites in combination with geology and ground surface conditions, and developed a set of technologies in evaluating construction conditions for salt-cavern gas storages. By applying the selection principles of salt-cavern USGs, we selected and sorted some salt mines in the three major natural gas consumer markets (the Yangtze River Delta, Central-South China, and Southeast Coast of China), and evaluated the conditions of constructing a gas storage in the Huai'an salt mine with better conditions. The following findings were obtained. First, the principles of selecting gas storage sites can be applied to quickly optimize and sort the selected targets, including 6 items of geological factors such as structure, burial depth, salt-bearing layer thickness, NaCl content, top rock, and reserves, and 3 other items such as ground surface conditions, water source and brine, distance from pipeline networks. Second, the evaluation system of UGS construction conditions integrates features of structure and salt-bearing strata, tightness, firmness, dissolubility evaluation, prediction of gas storage scale, and analysis of cavity making condition. In conclusion, the new evaluation technologies can not only effectively guide the site selection and evaluation of salt-cavern USGs but provide foundation and power support for their scheme designs, and the presented pilot proposal for utilizing thick interlayers has achieved a perfect on-site application effect. This study is of great significance for constructing UGSs in China.

Keywords: Salt cavern; Underground gas storage; Site selection; Storage construction conditions; Strata feature; Appraisal system; Case analysis; Huai'an Salt Mine (Jiangsu)

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司重大科技专项“储气库选址与地质评价技术研究”(编号: 2012B-3309)。

作者简介: 郑雅丽, 女, 1968 年生, 高级工程师, 博士; 主要从事地下储气库地质评价、方案设计、可行性等方面的研究工作。地址: (065007) 河北省廊坊市广阳区 44 号信箱。电话: (010) 83596601。ORCID: 0000-0002-8160-5786。E-mail: zyl69@petrochina.com.cn

0 前言

2018年度世界天然气联盟(IGU)地下储气库(以下简称储气库)工作组年度报告^[1]显示,世界上运行的4种类型储气库合计689座,总工作气量为 $4\,165\times 10^8\text{ m}^3$,高峰日采气量为 $71.6\times 10^8\text{ m}^3$,其中盐穴储气库107座,工作气量为 $355\times 10^8\text{ m}^3$,占储气库总工作气量的9%。虽然盐穴储气库工作气量占比低于气藏型储气库(74%)和含水层储气库的工作气量占比(11%),但是从单位高峰采气速度来看,盐穴储气库为 $510\times 10^{12}\text{ m}^3/\text{d}$,是其他3种类型储气库的3倍左右。由此说明盐穴储气库的采气速度最快,供气能力最高,调峰灵活性最强。

我国已建的储气库主要分布在环渤海湾、东北、西北、西南和中西部地区^[2],而作为天然气主要消费区的长三角、中南和东南沿海地区为非油气产区,由于气藏和油藏储气库的库址资源匮乏,含水层储气库受水层构造地质勘探程度低的限制,盐穴储气库成为这些地区建设地下储气库的首选。

我国唯一的一座盐穴储气库是目前正在建设的、位于长三角地区的金坛储气库,开展了相关先导性试验的有云应和淮安两座盐矿的造腔井,开展了前期评价工作有平顶山、楚州等盐矿。针对金坛储气库层状盐岩的地质特点,自2003年以来的研究成果集中在水溶机理研究^[3-5]、造腔控制^[6-8]、稳定性评价^[9-10]和运行设计^[11-12]等方面;针对云应多夹层、淮安厚夹层、平顶山埋藏深等地质问题开展了双井^[13]、厚夹层^[14]造腔的先导性试验,以及大尺寸造腔方案的研究^[15],但专门针对地质评价的成果^[16-17]相对较少。在气荒引发地下储气库调峰需求迫切,供气企业、地方政府与燃气公司急需寻找有利建库目标的背景下,以国外盐穴储气库建库地质条件为参考,结合我国盐矿的地质条件,提出了我国盐穴储气库选址的基本原则,创建了盐穴储气库建库条件评价技术,并进行实例分析,为满足我国南方非油气主产区和天然气主要消费市场寻找有利盐矿建设盐穴地下储气库的需求提供支持。

1 盐穴储气库选址的基本原则

国外的盐穴储气库多数选择建在分布稳定的盐丘或厚度大的含盐地层中,而我国可供选择建设盐穴储气库的盐矿多数为陆源湖泊相沉积,含盐面积和含盐地层厚度有限,具有盐层层数和夹层层数均较多,

单盐层厚度小、相变大、共生组分多、氯化钠含量低、水不溶物含量高等特点。建库地质条件的差异,需要在对国外盐穴储气库建设地质条件分析的基础上,结合我国盐矿的地质特点,提出适应我国层状含盐地层建设盐穴地下储气库的选址原则。

1.1 国内外盐穴储气库基本情况

我国在建的金坛盐穴储气库距离输气干线分输站35 km,地表有水塘和部分民居,建库层位为古近系阜宁组四段,盐顶埋藏深度介于800~1 200 m,地层厚度为90~290 m,其间稳定分布夹层10个左右,单夹层厚度均小于5 m,一般为1~2 m,含盐率在80%左右,综合氯化钠含量介于82%~94%,造腔淡水来源和卤水出路均有保障。

金坛储气库由中国石油天然气股份有限公司、中国石油化工股份有限公司及港华燃气有限公司三家单位建设,分别为中石油金坛、中石化金坛、港华金坛储气库,其设计的工作气量依次为 $17.0\times 10^8\text{ m}^3$ 、 $6.8\times 10^8\text{ m}^3$ 和 $1.8\times 10^8\text{ m}^3$ 。

世界上运营的盐穴储气库^[1]单座工作气量最小为 $0.05\times 10^8\text{ m}^3$ (美国Lacey Field),最大为 $20\times 10^8\text{ m}^3$ (德国Etzel ESE),平均为 $3.6\times 10^8\text{ m}^3$,其中小于 $5\times 10^8\text{ m}^3$ 的占了71.0%,大于 $10\times 10^8\text{ m}^3$ 的仅占16.8%,说明盐穴储气库以小于 $10\times 10^8\text{ m}^3$ 的中小型储气库为主;埋藏深度最浅的480 m(美国Bethel),最深的2 000 m(英国Aldbrough),埋藏深度介于500~1 500 m的占84.0%,埋藏深度小于500 m及介于1 500~2 000 m的分别为9.9%和6.2%,合计16.0%,说明盐穴储气库建设以中浅层为主;夹层厚度最薄的为40 m(美国Lacey Field),厚度大于200 m的占68.4%,大于300 m的占52.6%,小于100 m与介于100~200 m的比例均为15.8%,说明夹层厚度以大于200 m为主;由1个井腔作为一座储气库的有10个,井腔为1~5个的占63.3%,井腔为6~10个的占21.1%,说明一座盐穴储气库可以有1个或多个井腔构成,并以不多于10个井腔为主,占84.4%。

IGU年度报告数据表中^[1]含盐率与氯化钠含量两项参数基本为空缺,但从以往国外考察与交流的情况来看,国外的盐穴储气库造腔层段的含盐率至少大于80%、综合氯化钠含量至少大于70%。

1.2 我国盐穴储气库选址基本原则

在国外盐穴储气库资料分析的基础上,结合我国盐矿含盐地层层状分布的特点、金坛储气库建库

过程遇到钻井征地和卤水接收等问题,以及储气库建设的经济性等,建议我国盐穴储气库选址的基本原则从地质与地表两方面的条件综合考虑:

1.2.1 地质条件

1) 构造:构造落实且较简单,断层不发育。如果发育断层,建库区应选择至少在远离断层200 m的区域。

2) 埋藏深度:推荐埋藏深度介于500~1500 m,最佳为1000 m左右,既有一定的压力,又可以节约投资,最深不宜超过2000 m。虽然埋深增加可以增加储气量,但一般来说,埋深超过1500 m后,盐岩蠕变速率加快会导致腔体的年收缩率增加,为了控制腔体的年收缩率,势必要提高下限压力,这样运行压力区间变小,工作气量减少,不仅增加了单位建设投资,也会带来地面沉降等安全隐患。

3) 含盐地层厚度:推荐地层厚度大于100 m、含盐率大于70% (含盐率为含盐地层中盐层累计厚度与地层厚度之比);单盐层较厚且分布稳定,夹层层数少且厚度小。

4) 氯化钠含量:以含盐地层中盐层与夹层的氯化钠含量厚度加权平均得到的综合氯化钠含量为筛选指标,推荐综合氯化钠含量大于60%。

5) 顶板:厚度应大于30 m且分布稳定,无含水层和渗水层,采矿过程中无重大地面塌陷或冒顶现象。

6) 储量:含盐地层面积较大、具有一定的规模,保证有一定的储气量,最好有扩建的区域。

1.2.2 地表及其他条件

1) 地表条件:避让工厂、大型建筑物、生活居民区及环保或军事管制的特殊区域。

2) 水源与卤水:造腔用水有充足的水源保障,采出卤水有长期可接受或处理的渠道。

3) 与管网距离等:应考虑距离输气管线或主要用户的距离,且要有调峰需求与气源保障。

储气库选址的关键取决于调峰需求、库址资源及允许的投资。如果某地区的调峰需求必须保障,且资金有保障,但资源紧缺,那么可以适当放宽选址原则中的某项指标。从国外的储气库统计数据亦可以看出,埋藏深度与地层厚度不太理想的盐矿也有成功建成盐穴储气库的,其中埋藏深度小于500 m及介于1500~2000 m的分别为9.9%和6.2%;地层厚度最小的只有40 m,地层厚度小于100 m的占了15.8%。

2 盐穴储气库建库条件评价技术

根据选址原则筛选出拟建储气库的盐矿需要进行建库条件的逐项评价。盐穴储气库建库条件评价技术是在区域地质背景基础上,开展构造、含盐地层特征、密封性与稳固性、可溶性、储气规模及地表等条件的综合评价。

2.1 构造评价

构造评价的目的是为了落实含盐构造形态与断裂分布,精细刻画含盐地层的空间展布与断裂分布特征,推荐有利的建库区域,为建库区的选择和造腔注采井的部署提供科学依据。通常是对地震资料进行重新处理与解释,如果达不到精度要求,需重新采集,重点关注微小断裂,尽量识别断距为5~10 m的小断层和微幅构造。

2.2 含盐地层特征评价

通过剖面与平面特征、隔夹层展布、岩石化学特征等的研究,对含盐地层的埋藏深度、地层厚度、含盐率和氯化钠含量等进行评价。

2.2.1 含盐地层剖面特征

在含盐地层形成的气候、古地貌、物源等研究基础上,利用层序划分的方法,进行含盐韵律分析,对研究区内分属不同盐业公司的单井采用统一的分层标准完成小层划分,编制连井剖面图,统计分析不同层段组合的含盐率和综合氯化钠含量,预测盐岩发育的主力层,推荐有利的建库层段。

2.2.2 含盐地层平面分布规律

利用地震解释与反演成果,结合单井分层资料精细描述含盐地层顶面构造埋藏深度、地层厚度、盐层累计厚度等分布特征,并对盐岩发育的主力层顶面构造埋藏深度、地层厚度、盐层累计厚度分布特征进行重点描述,评价其对建库的影响。

2.2.3 隔夹层分布预测

利用单井与地震反演资料精细描述分布稳定、厚度较大隔层的岩性与厚度变化规律等,并按单井统计夹层的厚度、数量、比例等,结合隔夹层的岩石类型和化学组分含量分析其水溶性及其对造腔的影响。

2.2.4 岩石的化学特征

1) 岩石类型:通过岩心观察、薄片鉴定等方法描述含盐地层包含的岩石类型及其特征,编制不同岩石类型的剖面与平面分布图,预测可溶岩(盐岩NaCl)与部分可溶岩(钙芒硝 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$)的

分布范围,分析对造腔的影响,指导建库层段和区域的选择。

2) 矿物组分:通过化学组成分析的方法获得矿物成分及其含量,为建库层段选择和单腔有效体积的预测提供依据。为了分析结果的准确性通常采用连续取样的方式,即沿岩心轴向方向切割厚度1~2 cm的片状岩样,将岩石类型同一段归为一个样品,粉碎后进行组分测试。如果取心段岩性变化不是很频繁,也可以采用点样的方式进行组成分析,采样密度一般1块/m,样品长度2~5 cm。对于没有取心的井,可以利用测井解释技术,根据取心井建立的岩电关系等,给出不同井段的岩石类型以及矿物组分含量。

2.3 密封性与稳固性评价

2.3.1 顶板的密封性

顶板为建库层段的直接上覆地层。利用地质统计、分析化验及地应力测试等方法,从埋藏深度、岩石类型、厚度与分布的稳定性、含盐率与可溶性、渗透性、承压能力等方面分析顶板的密封性。同时还要结合构造解释成果与岩心观察等分析断裂与裂缝是否会造成与上覆含水层串通。

2.3.2 围岩与含盐地层的稳固性

围岩是指含盐地层的顶板与底板,其稳固性评价通过试验测定、临界深度、环境地质分析等方法综合判断。

1) 试验测定法:利用岩石水理性质与物理力学性质试验获得含水率、耐崩解指数、抗压强度、岩石软化系数、坚固系数等分析岩石的坚固性与稳定性。

2) 临界深度法:当顶板埋藏深度(H)小于临界深度(H_0)时,顶板不稳定;当 $H_0 < H < 1.5 H_0$ 时,顶板稳定差;当 $H > 1.5 H_0$ 时,顶板稳定^[18]。即

$$H_0 = \frac{B}{\tan \phi \left[\tan \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

式中 H_0 表示临界深度, m; B 表示采空区跨度, m; ϕ 表示岩石内摩擦角, ($^\circ$)。

3) 环境地质分析法:对研究区的含水层与隔水层的水文地质特征进行分析,评价上覆含水层对盐矿稳定性的影响。同时对盐矿开采过程中的地面塌陷与冒卤等进行调查分析,评价其对储气库水溶造腔的影响。

2.4 可溶性分析

通过地质统计、分析化验与测井解释、机理研究、

生产测试4种方法综合分析,为建库层段的选择提供依据。

1) 地质统计法:利用含盐地层特征评价的成果,统计隔夹层的岩石类型、厚度及其分布,定性分析可溶性。

2) 分析化验与测井解释法:利用分析化验或测井解释的矿物组分含量计算不同层段综合氯化钠含量或不溶物含量,定量分析可溶性。

3) 机理研究:利用水溶实验研究不同岩石类型的溶蚀速率及其特征、通过水浸实验测定夹层浸泡后的力学参数分析夹层的溶蚀或垮塌机理^[15],为造腔速度的预测和造腔过程夹层垮塌控制提供依据。

4) 生产测试法:利用盐矿开采的静动态资料,从采盐层位、开采方式、年产盐量与累计采盐量预测已形成的地下空间,结合测腔资料中盐腔的位置和大小分析测腔段中夹层的可溶性,计算堆积系数,指导研究区单腔有效体积的估算。

2.5 储气规模预测

储气规模预测是在单腔有效体积估算的基础上,结合建库内部署的井腔数量获得的。

2.5.1 单腔有效体积估算

根据金坛储气库的造腔经验,我国层状盐岩地层单腔的形态设计为梨形,分为底槽、主体及顶部3部分^[14],体积计算时可简化为上下圆锥、中圆台。有效体积与单腔体积、造腔段的不溶物含量相关,其计算公式如下:

$$V_e = V_t(1 - \gamma_{in} c_{in}) \quad (2)$$

式中 V_e 表示单腔有效体积, m^3 ; V_t 表示单腔体积, m^3 ; γ_{in} 表示不溶物含量; c_{in} 表示不溶物堆积系数。其中 γ_{in} 取造腔段不溶物含量厚度加权值; c_{in} 取水溶实验测定值或造腔数据反算值。

2.5.2 单腔库容量与工作气量估算

单腔的库容量与工作气量可以通过气体状态方程^[19]计算获得,关键是上限与下限压力(运行压力)的取值。上限压力和下限压力分别为盐腔注采运行过程中允许的最大压力和最小压力。

2.5.2.1 上限压力的确定

国外运行的盐穴储气库的上限压力梯度均大于1 MPa/100 m,一般为1.5~1.7 MPa/100 m,上限压力梯度最大的是英国的Stublach储气库,其值为2.3 MPa/100 m^[20]。

加拿大Z341.2-10标准^[21]规定了盐穴储气库的最

大内压应不超过上覆地层破裂压力的80%，若无破裂压力数据，则压力梯度不得超过1.81 MPa/100 m。但由于破裂压力随测定时采用的介质与控制的流速的变化而变化，非定值，目前国外大多国家规定盐穴储气库80%以上的井要测地应力，建立地应力剖面进行稳定性评价或取值最小主应力的80%来确定上限压力。

金坛储气库设计与建设之初，国内并未掌握地应力测试技术，其上限压力是根据国外经验、承压试验与稳定性评价相结合的方式来确定。

目前在金坛与楚州等地成功完成了小型压裂地应力测试，因此今后盐穴储气库上限压力的设计应以最小主应力为主要依据，结合稳定性评价来确定。

2.5.2.2 下限压力的确定

下限压力的确定主要是考虑接入输气管网的压力，并结合稳定性评价来确定。

2.5.3 储气库库容量与工作气量

根据稳定性评价确定腔体之间的安全距离来设计井距、部署建库内的井数，结合单腔库容量和工作气量即可得到储气库的库容量与工作气量。

2.6 地表等条件分析

前述的主要是地质条件的评价，也是建库条件评价的主体内容，但全面的评价还需要考虑除地质因素之外盐矿的位置、地表建筑、水源与卤水销售及矿权归属等。

1) 盐矿的位置：通过踏勘和收集相关资料分析盐矿与周边天然气用户以及输气管网之间的相对距离。从经济上考虑，推荐盐矿的位置距主要用户以及可接入输气管网的距离一般不超过100 km。

2) 地表建筑：踏勘调查地表是否有大型工厂、学校等人口密集区，以及军管和环保等特殊区域，分析其对建库的影响。盐穴储气库高低压交替注采运行引起的交变应力可能导致井筒或顶板泄露、井周地面沉降等安全问题，为了规避安全风险，注采气井必须与地面各种设施预留安全区域，如地表存在需要拆迁的建筑或公共设施必将增加投资。

3) 水源与卤水销售：根据金坛的造腔经验，造腔过程中需要的淡水量为造腔体积的7~10倍，产生的卤水量为造腔体积的10倍左右，故为了保证造腔的进度、控制投资，不仅要落实造腔的水源，更要与周边盐化企业协商卤水的接受事宜，或寻找其他的卤水销售或处理途径。

4) 矿权归属：调查建库区内矿权登记情况，与矿权所属企业协商解决矿权使用或合作的方式。

最后总结盐矿的地质、地表等条件，概括评价目标建设地下储气库条件的优缺点，给出结论与下一步工作建议。

3 盐穴储气库筛选与评价

中国盐矿资源丰富，据不完全统计，全国有200余个盐矿，但从建设地下储气库的角度考虑，只有位于输气管线附近、靠近天然气用户区有调峰需求地区的盐矿才有可能成为建库目标。我国中南地区、长江三角洲、东南沿海三大天然气消费市场受地质背景的限制，利用盐矿建设储气库成为了这些地区的首选。通过对这三个地区的盐矿资源调查统计，利用盐穴储气库选址的基本原则初步分析认为，长三角与中南地区盐穴储气库建库资源较多，该地区的淮安盐矿、楚州盐矿、平顶山盐矿建库地质条件相对较好，东南沿海地区的龙归盐矿含盐率低，现有技术水平用来建设储气库投资较高，经济性差（表1）。通过对三大地区盐矿的排序认为，淮安盐矿最优，其次为平顶山、楚州盐矿等。

淮安盐矿位于江苏省楚州市淮阴区，距西气东输与陕京二线的联络线冀宁线楚州分输站30 km左右，靠近天然气消费市场，与输气管网距离较近。地表主要分布着一些村镇、制盐厂等厂矿企业，附近的苏北灌溉总渠、京杭运河可以保障造腔用水来源。已登记矿权采矿企业8家，经协商与部分企业达成了用卤水换取矿区使用权的合作意向，采出卤水有出路，造腔进度有保障。

淮安盐矿含盐地层为古近系阜宁组四段，含盐面积81.96 km²（陆地部分），石盐储量138.85×10⁸ t。

为了满足建设地下储气库条件评价的要求，淮安盐矿已完成2口资料井3400 m的钻探，取心300 m，各类样品试验1200余块。完成34 km²宽方位小面元高精度地震采集与精细处理解释，落实该盐矿构造形态简单，为一向东南倾没的单斜，地层倾角5°~10°，断层不发育，密封性较好。

利用地震解释成果与单井资料分析发现，含盐地层平面分布稳定，埋深比较适中，盐岩顶面埋深1000~2500 m，含盐地层厚度介于40~170 m、平均厚度大于100 m，含盐率为55.4%~86.8%。盐岩呈层状发育，纵向上发育7套盐层，其中第1、3、6盐层较发育，4与6盐层之间局部区域发育10~12 m的厚夹层（5盐层相变为泥岩），对造腔会有一定的影响（图1）。

表 1 三大天然气消费市场部分盐矿基本信息表

地区	盐矿名称	盐顶埋深 /m	含盐地层厚度 /m	含盐率	NaCl 含量	塌陷或冒卤	筛选排序	备注
长三角	江苏省 淮安	1 000 ~ 2 500	40 ~ 170	55% ~ 87%	75% ~ 90%	无	1	面积较大, 埋深 500 ~ 1 500 m、厚度大于 100 m 有可选区域
	楚州	900 ~ 1 800	300 ~ 650	65% ~ 75%	60% ~ 72%	无	3	盐岩集中发育段含盐率大于 75%
	江西省 清江	50 ~ 870	120 ~ 620	40% ~ 50%	65% ~ 70%	无	7	含盐率低
	周田	50 ~ 950	20 ~ 240	78% ~ 91%	平均 60%	无	8	面积小, 仅 2 km ²
	河南省 平顶山	500 ~ 1 700	290 ~ 660	61% ~ 76%	85% ~ 90%	无	2	面积大, 埋深 500 ~ 2 000 m 有可选区域
中南	安徽省 定远	200 ~ 410	40 ~ 190	70% ~ 85%	60% ~ 76%	有	9	埋藏浅、地面塌陷、无未开采区
	湖北省 云应	150 ~ 650	320 ~ 910	60% ~ 80%	55% ~ 77%	有	5	埋藏较浅
	黄场	1 200 ~ 2 200	150 ~ 500	62% ~ 75%	65% ~ 86%	无	4	单夹层较厚
	湖南省 湘澧	150 ~ 440	90 ~ 135	2.0% ~ 2.8%		有	11	含盐率低
	湘衡	200 ~ 1 500	375 ~ 400	65% ~ 84%	50% ~ 60%	无	6	盐层氯化钠含量低
东南沿海	广东省 龙归	480 ~ 640	5 ~ 150	40% ~ 60%	45% ~ 80%	无	10	含盐率低, 夹层厚

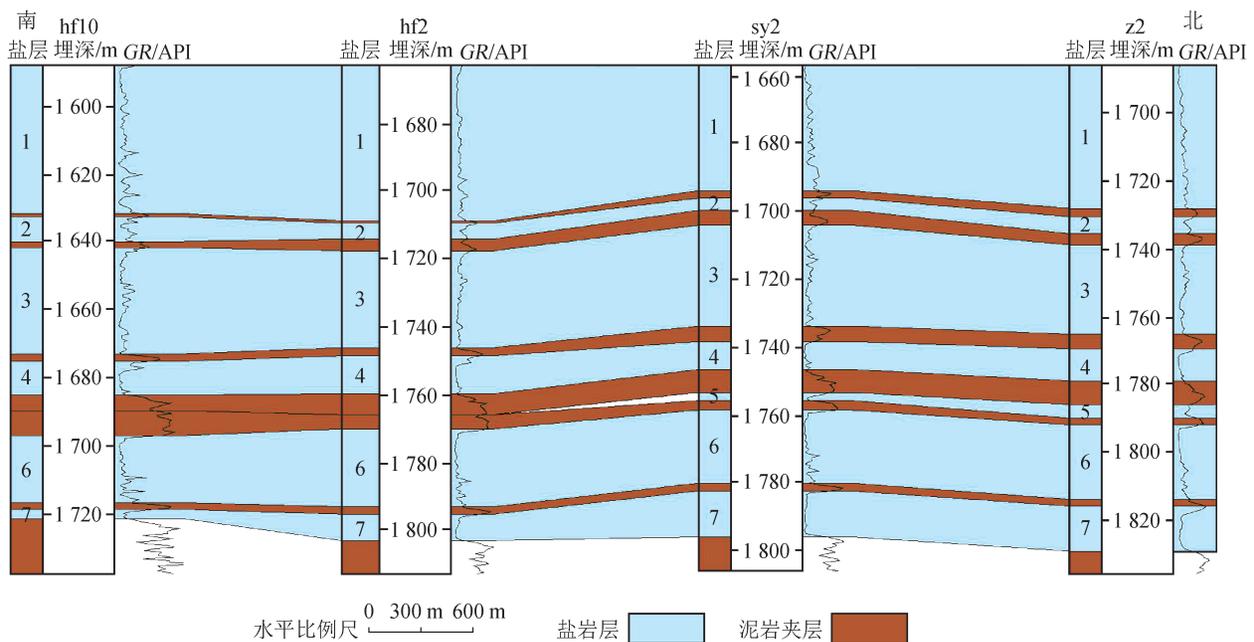


图 1 淮安盐矿南—北东连井对比剖面

盐层内夹层发育数目较少, 单夹层厚度一般小于 2 m, 占全井夹层数的 70.37%, 夹层对盐腔形态及有效体积影响较小。矿物以盐岩为主, 其次为硬石膏、钙芒硝和无水芒硝。盐岩中氯化钠含量较高, 一般大于 75%, 个别超过 90%, Na₂SO₄ 含量较低, 一般小于 4%, 而不溶物含量小于 20%, 有利于水溶造腔。

该地区盐岩直接顶板为阜宁组四段顶部的上硬石膏亚段, 顶界埋深介于 1 354 ~ 2 000 m, 顶板平

均厚度大于 50 m, 岩性以硬石膏岩、泥质硬石膏岩、石膏质泥岩和泥岩为主, 全区横向分布稳定, 裂隙不发育, 抗压、抗剪强度大。实测岩石水理性质表明, 顶板各类岩石岩性致密坚硬, 孔隙率和吸水率较低, 遇水不膨胀, 耐崩解, 为良好的不透水层, 具有良好的密封性。

1989 年 12 月盐矿投入开发, 采卤生产井 80 余口, 采盐深度一般大于 1 300 m。从生产情况来看, 未发现盐腔垮塌现象, 说明含盐地层稳固性好。

根据盐层与夹层的分布规律, 建库层段选择 1~4 层, 预计单腔平均有效体积为 $12.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 淮安两口资料井 4 段承压试验与稳定评价推荐的运行压力为 12~26 MPa, 根据稳定性评价给出的安全矿柱、避让地表建筑等可部署 38 口注采井, 总工作气量为 $6.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

总体来看, 淮安盐矿从构造与埋藏深度、盐层与夹层的展布、密封性与稳固性、储气规模、地表等条件来看, 具备了建设地下储气库的条件, 但由于含盐地层厚度较薄, 导致建腔高度较小, 单腔的工作气量受限, 因此在建库条件评价基础上, 提出了利用 1~7 盐层造腔, 开展厚夹层利用的先导性试验建议, 该建议被采纳, 实施效果显示厚夹层可垮塌, 堆积系数为 1.3, 小于金坛的 1.6, 并增加了 15% 的有效体积, 增加建库区的工作气量 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[15], 以淮安储气库可行性研究投资估算为依据, 预计可节约投资 1.5 亿元左右。

4 结束语

我国南方主要天然气消费市场油气资源匮乏, 水层地质勘探程度低, 利用盐矿建设盐穴储气库成为目前乃至相当长的一段时间内储气库选址与建设的主要方向。盐穴储气库选址原则为优选建库评价目标提供了快速便捷的方法, 建库条件评价技术规范了研究的内容、目的、方法, 解决了盐穴储气库选址条件不清、库址评价研究内容与评价深度不一的问题, 为盐穴储气库的选址与评价, 以及盐穴储气库的建设提供了技术支持。该项技术适用性强, 评价结论可靠, 可有效指导盐穴储气库的选址与评价, 为建库方案设计提供科学依据, 现场应用效果良好, 将继续为同类储气库的选址与评价提供技术保障。

参 考 文 献

- [1] Goryl L. Triennium work reports June 2018: Report of study group 2.1 UGS database[C]//27th World Gas Conference, Washington DC: International Gas Union, 2018.
- [2] 陆争光. 中国地下储气库主要进展、存在问题及对策建议[J]. 中外能源, 2016, 21(6): 15-19.
Lu Zhengguang. Major progress in China's underground gas storage construction, obstacles and countermeasures[J]. Sino-Global Energy, 2016, 21(6): 15-19.
- [3] 班凡生, 朱维耀, 单文文, 高树生. 岩盐储气库水溶建腔施工参数优化[J]. 天然气工业, 2005, 25(12): 108-110.
Ban Fansheng, Zhu Weiyao, Shan Wenwen & Gao Shusheng. Optimization of operating parameters for salt dome gas storages formed by water solution[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(12): 108-110.
- [4] 班凡生, 高树生. 岩盐储气库水溶建腔优化设计研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(2): 114-116.
Ban Fansheng & Gao Shusheng. Research on design proposal optimization of salt cavern gas storage building with water solution[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(2): 114-116.
- [5] 宋先知, 李根生, 王海柱, 袁光杰, 袁进平. 多夹层岩盐自振空化射流造腔技术研究[J]. 石油机械, 2009, 37(12): 20-23.
Song Xianzhi, Li Gensheng, Wang Haizhu, Yuan Guangjie & Yuan Jinping. Research on the technology of multi-interbedded halite cavity construction by self-excited vibration cavitation jet[J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(12): 20-23.
- [6] 袁光杰, 申瑞臣, 田中兰, 袁进平, 高彦尊, 路立君, 等. 快速造腔技术的研究及现场应用[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 139-142.
Yuan Guangjie, Shen Ruichen, Tian Zhonglan, Yuan Jinping, Gao Yanzun, Lu Lijun, et al. Research and field application of quick-speed solution mining technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 139-142.
- [7] 班凡生, 肖立志, 袁光杰, 杨长来. 地下盐穴储气库快速建腔技术及其应用[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 77-79.
Ban Fansheng, Xiao Lizhi, Yuan Guangjie & Yang Changlai. Rapid solution mining technology for underground gas storage in salt caverns and case histories[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 77-79.
- [8] 郭凯, 李建君, 郑贤斌. 盐穴储气库造腔过程夹层处理工艺——以西气东输金坛储气库为例[J]. 油气储运, 2015, 34(2): 162-166.
Guo Kai, Li Jianjun & Zheng Xianbin. Interlayer treatment process in cavity building for salt cavern gas storage—A case study of Jintan Gas Storage of West-to-East Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(2): 162-166.
- [9] 王同涛, 闫相祯, 杨恒林, 杨秀娟. 多夹层盐穴储气库群间矿柱稳定性研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 790-794.
Wang Tongtao, Yan Xiangzhen, Yang Henglin & Yang Xiujuan. Stability analysis of pillars between bedded salt cavern gas storages[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 790-794.
- [10] 时文, 申瑞臣, 徐义, 苏海洋, 杨长来. 盐穴储气库运行压力对腔体稳定性的影响[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(4): 89-92.
Shi Wen, Shen Ruichen, Xu Yi, Su Haiyang & Yang Changlai. Stability analysis of different shaped salt caverns under operation pressure[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(4): 89-92.
- [11] 刘飞, 宋桂华, 李国韬, 温庆和. 含有夹层的薄盐层中盐穴储气库运行压力的确定[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 133-135.
Liu Fei, Song Guihua, Li Guotao & Wen Qinghe. Determination of operating prerrure for gas storage with salt caverns in thin salt beds with inter-beds[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 133-135.
- [12] 杨海军, 李建君, 王晓刚, 何俊, 井岗, 闫凤林. 盐穴储气库注采运行过程中腔体形状检测[J]. 石油化工应用, 2014, 33(2):

22-25.
 Yang Haijun, Li Jianjun, Wang Xiaogang, He Jun, Jing Gang & Yan Fenglin. Shape survey of underground salt cavern gas storage during operation[J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(2): 22-25.

[13] 郑雅丽, 赖欣, 邱小松, 赵艳杰, 完颜祺琪, 屈丹安. 盐穴地下储气库小井距双井自然溶通造腔工艺 [J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 96-102.
 Zheng Yali, Lai Xin, Qiu Xiaosong, Zhao Yanjie, Wanyan Qiqi & Qu Dan'an. Small-spacing twin well natural solution and communication technology for solution mining of salt cavern underground gas storages[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 96-102.

[14] 郑雅丽, 赵艳杰, 丁国生, 武志德, 陆守权, 赖欣, 等. 厚夹层盐穴储气库扩大储气空间造腔技术 [J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 137-143.
 Zheng Yali, Zhao Yanjie, Ding Guosheng, Wu Zhide, Lu Shouquan, Lai Xin, et al. Solution mining technology of enlarging space for thick-sandwich salt cavern storage[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 137-143.

[15] 郑雅丽, 完颜祺琪, 丁国生, 赵艳杰, 李清山. 盐穴地下储气库大尺寸管柱造腔方式效果分析 [J]. 油气储运, 2015, 34(2): 158-161.
 Zheng Yali, Wanyan Qiqi, Ding Guosheng, Zhao Yanjie & Li Qingshan. Effect analysis of cavity building with large-size pipe string for underground salt cavern gas storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(2): 158-161.

[16] 王琴, 徐峰, 杨海军, 张万福. 地震勘探技术在金坛地区盐穴建库中的应用 [J]. 西部探矿工程, 2009(4): 132-134.
 Wang Qin, Xu Feng, Yang Haijun & Zhang Wanfu. Application of seismic prospecting technology in constructing salt cavern gas storages in Jintan[J]. West-China Exploration Engineering, 2009(4): 132-134.

[17] 井文君, 杨春和, 李银平, 杨长来. 基于层次分析法的盐穴储气库选址评价方法研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2683-2690.
 Jing Wenjun, Yang Chunhe, Li Yinping & Yang Changlai. Research on site selection evaluation method of salt cavern gas storage with analytic hierarchy process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2683-2690.

[18] 吴建春, 张定柱. 江苏省某盐矿水溶开采工程效应研究 [J]. 西部探矿工程, 2013(4): 132-137.
 Wu Jianchun & Zhang Dingzhu. Study on engineering effect of water soluble mining in a salt mine of Jiangsu province[J]. West-China Exploration Engineering, 2013(4): 132-137.

[19] 丁国生, 谢萍. 西气东输盐穴储气库库容及运行模拟预测研究 [J]. 天然气工业, 2006, 26(10): 120-123.
 Ding Guosheng & Xie Ping. Forecast study on the salt cavern storage capacity and its operation in the Project of West to East Gas Pipeline[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(10): 120-123.

[20] Goryl L. 2012-2015 triennium work reports: Working committee 2: Underground gas storage[C]//WGC PARIS 2015 World Gas Conference, Paris: International Gas Union, 2018.

[21] Canadian Standards Association. Storage of hydrocarbons in underground formations: Z341 Series-10[S]. Calgary: CSA, 2011.

(修改回稿日期 2019-03-12 编辑 何明)



马永生院士：中国还有大量油气资源待发现

“中国目前发现的石油和天然气仅占我国资源总量的 30% 和 15%，仍有大量资源待发现。”2019 年 6 月 11 日，中国石油化工集团有限公司总经理、党组副书记，中国工程院院士马永生在为四川大学师生讲授国企公开课时做出上述表述。他认为，中国的石油石化仍是朝阳产业而非夕阳产业。

马永生在公开课上剖析了石油作为战略资源的重要性，展示了新中国波澜壮阔的石油石化工业发展历程，分析了全球及我国石油石化未来的发展趋势，介绍了新时代中国石化建设世界一流企业的战略部署。

马永生认为，石油石化不是夕阳产业，而是朝阳产业。全球未来能源将由目前的煤、油、气“三足鼎立”逐步转变为油、气、煤和非化石“四方争霸”。到 2035 年我国将由目前以煤炭为主的能源结构变为煤炭、油气、非化石能源三分天下的格局。到 2050 年，化石能源仍将是能源消费主体，占比 70% 左右，其中石油和天然气占比在 50% 以上，煤炭降至 20% 以下。清洁、低碳、多元是未来能源发展主要趋势。虽然我国油气对外依存度攀升给能源安全带来挑战，但我国油气资源总体丰富。目前，已找到的石油和天然气仅占总量的 30% 和 15%，仍有大量资源待发现，提高能源自主保障能力具有较好的资源基础。

(天工 摘编自《中国电力报》)