

# 有效的天然气调峰储气技术

## ——地下储气库

周学深

中国石油天然气管道局天津设计院

周学深.有效的天然气调峰储气技术——地下储气库.天然气工业,2013,33(10):95-99.

**摘要** 有效的天然气调峰技术可确保输气干线高效运行,实现安全平稳供气。为此,分析了国内天然气调峰储气技术的发展状况,指出地下储气库调峰具有库容大、安全性好、储转费低等优点,可从根本上解决城市季节性用气调峰问题,是最主要和经济的城市供气调峰方式;地下储气库应距离城市用户及输气干线较近,其中气藏建库是最经济的储气方式。同时介绍了地下储气库地面工艺技术,探讨了地下储气库新技术的发展趋势,提出了对中国地下储气库建设的建议:①继续增大国家整体储气系数,除满足常规调峰外,在条件许可的情况下,扩大应急供气和战略储备系数;②继续优选建库目标及库址,降低储转气成本,提高气库利用率;③尽快形成调峰供气定价机制,实现地下储气库商业化运作,建议研究天然气储气支持政策,按天然气“季节差价”收取调峰储气费;④利用干线气源的高压力,有条件的分输站利用压差设置 LNG 液化装置,实现液化调峰;⑤合理布局 LNG 接受站、LNG 液化厂,增加 LNG 储存及气化设施,实现 LNG 与地下储气库调峰的相互配合,二者优化运行,最大限度地满足用户调峰需求。

**关键词** 输气管网 调峰储气 油气藏型 盐穴型 地下储气库 露点控制 国家整体储气系数 中国

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.10.016

## An effective means of natural gas peak-shaving and storage technologies: Underground gas storage

Zhou Xueshen

(Tianjin Design Institute of China Petroleum Pipeline Bureau, Tianjin 300457, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 1, pp.95-99, 10/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** An effective means for natural gas peak-shaving will help maintain the high-efficiency operation of the arterial lines and guarantee gas supply security in natural gas grid. In view of this, based on the status quo of domestic natural gas peak-shaving and storage technologies, it was pointed out that the underground gas storage (UGS) is the most important and economic way for urban gas supply and peak shaving because of its many advantages like huge storage capacity, reliability and safety, low cost in storage and transportation, etc. In addition, it was also emphasized that UGS should be close to urban users or at least not far from the arterial lines and the oil and gas reservoir type UGS is the most economic one in comparison with other types. Meanwhile, this paper also introduced the UGS ground engineering and techniques and discussed the developing trend of new UGS technologies. On this basis, some proposals were presented for UGS projects and construction in China. a. The overall gas storage fraction should be kept increasing, besides the routine needs for peak shaving, if conditions permit, the fraction of emergency and strategic gas reserves should also be boosted. b. UGS targets and sites should be always optimally selected to reduce the cost of gas to and from storage and improve the UGS utilization efficiency. c. Gas pricing mechanism should be formulated as early as possible for peak-shaving gas supply to achieve commercial operation of UGS. Gas storage associated policies should be studied well to better adopt the way of seasonal variation in gas price. d. Pressure drops occur between the high pressures of the transported gas in arterial lines and those at gas distribution stations, where it becomes possible to build some LNG peak-shaving plants. e. LNG storage and liquefaction facilities should be increased by an overall arrangement of LNG terminals and LNG plants, thereby to fully satisfy the peak-shaving needs through the interaction and optimal operation of both LNG plants and UGS facilities.

**Key words:** natural gas grid, gas storage, peak regulation, oil & gas reservoir type, salt cavern, underground gas storage (UGS), dew point control

**作者简介:**周学深,1970年生,高级工程师,博士;2007年博士毕业于西南石油大学油气储运专业;现任中国石油天然气管道局天津设计院副院长,从事油气加工、油气储运工程的设计和项目管理工。地址:(300457)天津市经济技术开发区洞庭路58号融汇大厦1503。电话:(022)60901577。E-mail:zhouxueshen@cppetj.com

随着“西气东输”和“中缅”油气管道等国家能源通道的陆续建成,中国天然气输气管网已初具规模,天然气工业已进入快速发展期,天然气在一次能源消费中所占比例越来越大,天然气作为绿色能源对促进中国经济发展及减缓雾霾天气将起到重要作用。2012年,中国天然气消费量达  $1\,471 \times 10^8 \text{ m}^3$  (增长 13.0%),其中国内天然气产量为  $1\,077 \times 10^8 \text{ m}^3$  (增长 6.5%),进口天然气量为  $423 \times 10^8 \text{ m}^3$  (增长 31.1%),从趋势上看对进口天然气的依存度将越来越高。输气干线运行要高度依赖地下储气库的调峰来平衡用户用气波动<sup>[1]</sup>,以维持管道系统满负荷稳定高效运行<sup>[2]</sup>,巨大的国内天然气市场需求及进口天然气量大大推动了天然气输气干线及配套调峰地下储气库的发展。

中国能源结构、天然气使用结构均正在发生变化,城镇燃气和发电用气占比大幅上升,预计 2015 年一次能源消费中天然气比重将达到 8% 左右(较世界平均水平 24% 仍有很大差距),年消费天然气  $2\,600 \times 10^8 \text{ m}^3$  左右(其中进口天然气量约  $900 \times 10^8 \text{ m}^3$ )。中国天然气气源主要由国内气田天然气、国内非常规天然气(页岩气、煤层气)、国内煤制天然气、国外管道天然气和国外 LNG 进口气构成。中国天然气生产气源主要在西部,而天然气消费主要在东部和南部,同时城镇燃气、发电用气等均具有用气不均匀性,存在用气峰谷差,需要采取有效的调峰手段来平衡供需矛盾,确保天然气管道系统满负荷高效运行及稳定安全供气,巨大的调峰需求促进了储气设施的快速发展。

## 1 天然气调峰储气技术

天然气储气设施的主要功能是调节用户用气的不均匀性,平衡天然气供需方之间的日、月、季节性用气矛盾,保障输气干线高效经济运行,实现供气的可靠性

和安全性。天然气的储气方式主要有储罐储存、管道储存、液化储存、地下储气库储存等<sup>[3]</sup>,调峰方式主要有气源调峰、储罐调峰、管道调峰、液化调峰、用户调峰、地下储气库调峰等<sup>[4]</sup>,其中储罐调峰和管道调峰能力有限,多用于满足日调峰需求,而地下储气库调峰具有库容大、安全性好、储转费低等特点,是最主要和最经济的城市供气调峰方式。随着输气管网的建设完善,中国地下储气库的建设已进入了快速发展阶段。

地下储气库建设国外已有近百年的历史,而中国尚处于起步阶段。作为陕京输气管道配套工程的大张坨地下储气库<sup>[5]</sup>,是满足首都北京用气调峰的中国第一座城市调峰用地下储气库,该地下储气库 2000 年建成投用,拉开了中国地下储气库建设的序幕。

国外地下储气库按气库作用分为调峰储气库和应急(战略)储气库,按地质条件分为油气藏储气库(占 78%)、水层储气库(占 12%)和盐穴储气库(占 10%),其中油气藏型储气库和水层储气库是将天然气储存在天然的岩石孔隙中,盐穴储气库是将天然气储存在人工溶盐后形成的腔体中。与油气藏气库相比,水层储气库需要更多的垫底气,注气和采气时需要更严密的监控,其储气及调峰能力较低。盐穴储气库垫底气量低、工作气量注采频率高,虽然建设投资高,但每年多个注采循环使天然气的单位注采成本相对并不高。

国内最早建成的地下储气库是中国石油大港油田公司的大港地下储气库群(表 1),包括 6 座地下储气库,均为油气藏型,特点是注采期长、达容周期长,用于满足首都北京用气的季节及月调峰,建库成本较低<sup>[6]</sup>。国内已建成的首座盐穴储气库位于江苏金坛(有效工作气量为  $17.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,日注气能力为  $900 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,日采气能力为  $1\,500 \times 10^4 \text{ m}^3$ ),盐穴储气库的特点是建库周期长,注采期灵活,注采量大,调峰能力强,用于满足日、周、月调峰,建库成本高。

表 1 大港地下储气库群统计表

气库名称	气库类型	设计工作气量/ $10^8 \text{ m}^3$	日注气能力/ $10^4 \text{ m}^3$	日采气能力/ $10^4 \text{ m}^3$	备 注
大张坨	未枯竭凝析油气藏型	6	320	1 000	
板 876	枯竭油气藏型	1.89	100	300	与陕京线配套
板中北	枯竭油气藏型	10.97	150	300	
板中南	枯竭油气藏型	4.7	225	600	与陕京二线配套
板 808	枯竭油气藏型	6.74	360	600	
板 828					
总计		30.30	1 305	3 400	

地下储气库建设是一个系统工程,涉及地质、钻采及地面建设 3 部分,且受气源、储层及用户的多重影响,运行工况较为复杂。地下储气库具有“反复注采”的特点,要能够“注得进、采得出、存得住”。考虑调峰输气,地下储气库应距离城市用户及输气干线较近,利用气藏建设地下储气库是最经济的一种储气方式。而地下储气库的建设决定地上,首先地质构造要落实,盖层封闭性、储层连通性、储层物性(渗透率、孔隙

度、压力区间等)、边水性质、老井封闭性等应符合建库要求<sup>[7-8]</sup>。中国地下储气库建设起步较晚,但近年来发展迅速,储气能力大幅增长。配套“陕京”输气管线建成了大港储气库群及华北储气库群,配套“西气东输”建成了金坛储气库和刘庄储气库。第二批建库(重庆相国寺、新疆呼图壁、长庆靖边、华北苏桥、大港板南、辽河双六、中原文 96 等)也将陆续投用。中国地下储气库建设现状见表 2。

表 2 中国地下储气库建设现状统计表

建设情况	气库类型	气库名称	库容量/ 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	工作气量/ 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	工作压力/ MPa	井数/口	日注气能力/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	日采气能力/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	
已建	油气藏型	大张坨	17.81	6.00	13.0~30.5	19	320	1 000	
		板 876	4.66	1.89	13.0~26.5	7	100	300	
		板中北	24.48	10.97	13.0~30.5	15	300	900	
		板中南	9.71	4.70	13.0~30.5	10	225	600	
		板 808	8.24	4.17	13.0~30.5 15.0~37.0	8	360	600	
		板 828	4.69	2.57	15.0~37.0	6	360	600	
		京 58	8.10	3.90	11.0~20.6	10+3(排液)	210	350	
		京 51	1.27	0.64	8.6~16.5	4	210	350	
		永 22	7.40	3.00	7.0~31.4	5	190	250	
		刘庄	4.55	2.45	7.0~12.0	10	150	204	
在建	油气藏型	相国寺	42.60	22.80	11.7~28.0	10 直+6 平	1 393	2 855	
		盐穴型	金坛	26.38	17.14	7.0~17.0	63(5 老)	900	1 500
		双六	36.00	16.00	10.0~24.0	10 直+10 平	1 200	1 500	
		苏桥库群	67.00	23.00	19.0~48.5	24 直+15 平	1 300	2 100	
		板南	8.00	4.00	13.0~31.0	1 直+1 平	1 550	2 800	
		呼图壁	107.00	45.10	18.0~34.0	24 直+4 平	1 393	2 855	

## 2 地下储气库建设的地面工艺技术

地下储气库地面设施应适应气库运行的特殊工况,注采设备优选及气库优化运行是实现气库高效经济运行的关键。地下储气库具有“反复注采”的特点,运行参数变化范围宽<sup>[9]</sup>,注采设备选型要求高。

### 2.1 地下储气库运行特点

#### 2.1.1 注采气量变化范围宽

为满足用户日、月、季节调峰气量需求,地下储气库采气装置要适应从 1 口井采气到满负荷采气的流量处理要求。根据大港储气库群多年运行经验,采气流量变化范围可达到 30%~120%。而注气流量则既取决于上游天然气管网剩余气量和压力,又取决于下游注入地层的天然气压力。

#### 2.1.2 采气期井流物组分差异大

水层、干气藏型储气库采出井流物主要为天然气和游离水,凝析气藏型储气库采出井流物为天然气、凝

析油和游离水,油藏型储气库采出井流物为天然气、黑油和游离水。由此造成配套地面设施的功能配置不尽相同。

#### 2.1.3 注采气压力变化范围大

注、采气期内井口压力大幅变化,从几十兆帕到十几兆帕,对注气压缩机的适应能力和采气装置的节流、防冻、制冷等工艺提出了苛刻的要求。

### 2.2 地下储气库地面设施关键技术

地下储气库地面设施应适应不同类型地下储气库的特点。

#### 2.2.1 油气藏型储气库

气藏型储气库注入的天然气是干气,采出气中由于地层中含凝析油及地层水,为满足外输气的露点要求,需进行脱水、脱烃处理。实践证明,采气井口采用间歇注醇是解决开井初期井口防冻问题的最佳手段,具有操作简便、运行可靠、成本低等优点;地下储气库采气装置采用 J-T 阀节流+注乙二醇防冻的水烃露点

控制工艺,具有流程简单、操作简便、投资省、能耗低、操作弹性大的优点,并能满足地下储气库采气期压力、流量大幅度波动的工况。地层压力较高时运行J-T阀制冷+注乙二醇(注甲醇)工艺;地层压力较低时,运行丙烷辅助制冷+注乙二醇(注甲醇)工艺。油气藏型储气库地面设施关键技术是井口防冻(防凝)、采出气水烃露点控制、注气压缩机选型匹配等。对于油藏型储气库要考虑井流物中携带的黑油造成管线和露点装置设备堵塞,多采用井口加热的方法防止黑油凝固堵塞管线,露点控制装置进站设置多级分离和过滤系统,防止黑油进入下游低温系统,造成设备堵塞。

### 2.2.2 水层型储气库

注入的天然气是干气,采出气中由于地层中含水,需进行脱水处理。由于地层中不含油和烃,不需要脱烃处理。露点控制装置一般采用三甘醇脱水工艺,流程简单。

### 2.2.3 盐穴型储气库

注入的天然气是干气,采出气中由于初期地层中含水,需要脱水处理,地层中没有油和烃,不需要脱烃处理。建库初期采用三甘醇脱水工艺,后期当盐穴中的水分被置换完全后,三甘醇脱水装置可以搬迁到其他工程使用。

### 2.2.4 注气压缩机选型匹配技术

地下储气库注气压缩机的选型要满足:①压缩机入口压力和流量的波动;②压缩机出口压力变化;③注入地下的气质不会造成地层受机组润滑油污染;④多机组运行的高效性及协调性。机组选型要求高,机组的选型与匹配主要包括确定机组的参数、型式、驱动机型式及台数等。机组设计参数包括入口压力范围、入口流量范围以及出口压力范围等,其中入口参数要综合气源参数、长输管道系统参数、用户系统参数及地下储气库注气期运行参数等进行平衡分析后确定。压缩机出口参数要根据地下储气库库容参数、注气期、地层压力和沿程摩阻确定。

注气压缩机选型应与机组设计参数相匹配,地下储气库注气机组具有高出口压力、高压比、高流量及出口压力波动大的特点。往复压缩机更能适应出口压力高且波动范围大,入口条件相对不稳定的工况,在注气效率、操作灵活性、能耗、建设投资、交货期等方面具有突出优势。目前国内已建及在建地下储气库均选用往复式机组。

压缩机驱动方式要综合外电条件、机组投资、运行管理、能耗费用、维修等多因素后确定,在电力条件允许的条件下,宜优先采用电机驱动方式,机组气缸宜考

虑调节注入气量的灵活性。压缩机组台数匹配的原则是优先选用大功率机组,兼顾小流量工况运行,机组台数不宜少于2台,不设备用机组。部分气库需要考虑采气期反向增压时,注气压缩机应按照注气工况选型,兼顾采气工况运行。

## 3 地下储气库新技术发展趋势

中国最早建成的大港地区6座地下储气库中,只有由未枯竭凝析气田改建的大张坨储气库实现了有效库容等注采设计指标。中国地下储气库建库技术尚不完善,其中气藏改建储气库技术已基本成熟,但在气库达容、气库监测、气库安全管理、大型化、标准化等方面尚有不足;枯竭油气藏改建储气库、盐穴储气库建设经验已初步掌握;水层储气库的建设研究则刚刚起步,技术发展亟待完善。目前急需形成不同类型储气库较完善的建库技术体系。包括建库评价、设计技术体系和运行管理体系、标准规范等。

地下储气库注采压力高达几十兆帕,地层压力在注采期内呈周期性变化,地下储气库的注采井与常规天然气开采井显著不同,在反复注采气过程中,气井和地层受到高压注气、循环载荷、地应力变化及腐蚀环境等多因素作用,气井及地面设施的安全使用寿命是未来气库建设中应重点把握的问题。从国内外地下储气库建库经验及运行实践分析,地下储气库建设需重点把握以下新技术发展趋势。

### 3.1 地下储气库设计新技术

- 1) 配套大型地下储气库注采气能力,开发大规模注采气装置及设备,加大装置操作弹性。
- 2) 注采站推广节能降噪新技术,降低能耗,减轻站场周围噪音污染。
- 3) 完善油气藏型储气库建库技术与黑油处理技术。
- 4) 推广新型注气增压机组,如大排量电驱离心机、节能型自动卸荷往复机等。
- 5) 研究高效多功能分离器,简化流程,提高装置国产化率。
- 6) 减少气库天然气垫气量的惰气垫气技术<sup>[10]</sup>。

枯竭油气藏型及水层地下储气库建库成本中,垫底气费用占最大的比例,一般占到总投资的30%~40%。如果能用某种气体(如CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>等惰性气体)替代天然气作垫底气,将会明显降低建库成本,关键是避免惰性气体与天然气发生混合。

### 3.2 地下储气库运行新技术

- 1) 地下储气库上下游协同,系统优化运行。开发



地面地下一体化模拟软件,实现气库与输气管网一体化系统仿真,优化运行,降低注气机组能耗。

2)实现远程操作、有人值守、地下储气库在线监控及远程控制。

3)全寿命期完整性管理和风险评估。地下储气库具有超高压运行,长寿命期运行,安全性要求高等特点,因此开展全寿命期完整性管理、风险评估和风险评估,提高气库地面和地下设施的安全性意义重大。

4)优化气库日常运行管理,加快达产速度,提高气库利用率。具体措施包括加大气库运行压力区间、优化注采井网与注采量、减少水侵对气库运行的影响、提高最大注采速率、加快建库周期等。

#### 4 国内地下储气库建设建议

目前,欧美国家已建设了 600 多座地下储气库,调峰能力(工作气量)占干线输气能力的 15%~30%,且储气系数还在不断提高。美国拥有地下储气库的数量居世界第一,其工作气量相当于年消费气量的 20.3%。中国天然气工业正处在大发展阶段,国内建库目标资源相对缺乏,建库难度和风险比较大,建库周期比较长。但地下储气库建设关乎天然气稳定供应和战略安全,加速发展刻不容缓,国家已明确支持地下储气库的建设,“十二五”期间将建成  $130 \times 10^8 \text{ m}^3$  商业储备库容,实现调峰能力相当于天然气消费量 10%左右的目标,力争在 2020 年前使中国地下储气库储气系数达到世界平均水平。国内第二批建库目标中库容最大的新疆和长庆储气库由于远离城市用户,气库将主要起到战略储备作用(类似气源调峰),城市调峰作用不强。

1)建议继续增大国家整体储气系数。除满足常规调峰外,在条件许可的情况下,扩大应急供气和战略储备系数。

2)建议继续优选建库目标及库址,降低储转气成本,提高气库利用率。

3)建议尽快形成调峰供气定价机制,实现地下储气库商业化运作。地下储气库投资巨大,运营成本较高,目前中国天然气价格体系中并没有储气价格科目及其定价机制,建议研究天然气储气支持政策,按天然气“季节差价”收取调峰储气费。

4)建议利用干线气源的高压力,有条件的分输站利用压差设置 LNG 液化装置,实现液化调峰。

5)建议合理布局 LNG 接受站、LNG 液化厂,增加 LNG 储存及气化设施,实现 LNG 与地下储气库调峰相配合,二者优化运行,满足用户调峰需求。

#### 参 考 文 献

- [1] 吴忠鹤,贺宇.地下储气库的功能和作用[J].天然气与石油,2004,22(2):1-4.  
WU Zhonghe, HE Yu.Function and effect of underground natural gas storage[J].Natural Gas and Oil,2004,22(2):1-4.
- [2] 王峰,王东军.输气管道配套地下储气库调峰技术[J].石油规划设计,2011,22(3):28-30.  
WANG Feng, WANG Dongjun.Affiliated underground gas storage peak regulation technology of long distance gas transportation pipeline[J].Petroleum Planning and Design, 2011,22(3):28-30.
- [3] 李忠,刘明赐.天然气储存方法及其应用[J].油气储运,2002,21(11):31-33.  
LI Zhong, LIU Mingci.The storage technology of natural gas and its application[J].Oil and Gas Storage,2002,21(11):31-33.
- [4] 吴洪波,何洋,周勇,等.天然气调峰方式的对比与选择[J].天然气与石油,2009,27(5):5-9.  
WU Hongbo, HE Yang, ZHOU Yong, et al.Comparison and selection of natural gas peak shaving mode[J].Natural Gas and Oil,2009,27(5):5-9.
- [5] 周学深,孟凡彬.大张坨地下储气库地面工程设计[J].天然气工业,2003,23(增刊1):139-142.  
ZHOU Xueshen, MENG Fanbin.Da Zhangtuo underground gas storage surface facilities design[J].Natural Gas Industry,2003,23(S1):139-142.
- [6] 郭洁琼,仇晶,杜学平.华北华东地区天然气季节调峰对比分析探讨[J].石油与天然气化工,2012,41(5):488-490.  
GUO Jieqiong, QIU Jing, DU Xueping.Comparative analysis of natural gas season peaking in North and East China[J].Chemical Engineering of Oil & Gas,2012,41(5):488-490.
- [7] 杨琴,余清秀,银小兵,等.枯竭气藏型地下储气库工程安全风险与预防控制措施探讨[J].石油与天然气化工,2011,40(4):410-412.  
YANG Qin, YU Qingxiu, YIN Xiaobing, et al. Discussion on the safety risk and prevention and control measures for dry gas reservoir type of underground gas storage engineering [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas,2011,40(4):410-412.
- [8] 李士富,呼延念超,李亚萍.调峰型天然气液化 HYSYS 软件模型[J].石油与天然气化工,2010,39(1):1-2.  
LI Shifu, HUYAN Nianchao, LI Yaping.HYSYS software model for variable-load natural gas liquefaction processes [J].Chemical Engineering of Oil & Gas,2010,39(1):1-2.
- [9] 孟凡彬,王峰.板桥凝析气田地下储气库建造技术[J].石油规划设计,2006,17(2):20-27.  
MENG Fanbin, WANG Feng.Construction technology of Banqiao condensate gas reservoir underground gas storage[J].Petroleum Planning and Design,2006,17(2):20-27.
- [10] 李娟娟.含水层型地下储气库惰性气体作垫层气的模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.  
LI Juanjuan.Water reservoir type underground gas storage inert cushion gas application simulation study[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2006.