

可再生能源丛书

天然气水合物 储存与运输技术

樊栓狮 编著



化学工业出版社

可再生能源丛书

天然气水合物储存 与运输技术

樊栓狮 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

天然气水合物储存与运输技术/樊栓狮编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 1

(可再生能源丛书)

ISBN 7-5025-6419-5

I. 天… II. 樊… III. ①天然气-水合物-油气储存②天然气-水合物-油气运输 IV. TE83

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 130230 号

可再生能源丛书

天然气水合物储存与运输技术

樊栓狮 编著

责任编辑: 侯玉周

文字编辑: 刘维大

责任校对: 周梦华

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市兴顺印刷厂印装

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 14³/₄ 字数 279 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6419-5/TK·17

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

可再生能源，包括太阳能、风能、生物质能、水能、地热能、海洋能、是广泛存在、用之不竭、可以自由索取、最终可依赖的初级能源。直至近二三百化石能源得以大规模开发使用以前，它一直是人类赖以生存与发展的主要能源来源。当前，化石能源与核裂变能已成为最主要的商品能源，可再生能源中只有水能在商品能源中占有明显的份额。自 20 世纪 70 年代开始，人们认识到根据当今化石能源的开发使用力度，它将在几十至一百多年间衰竭，对于人类未来能源可持续供应来说，我们又将重新进入可再生能源为主的新时期。

与化石能源相比，可再生能源具有能量密度低；随着季节、昼夜与气候条件的变化而变化，不连续；难于携带和运输等特点。若要取代化石能源则需解决一系列科学技术问题 and 经济性能问题，整个过程需要长时间的持续努力。可喜的是，近年来，可再生能源的开发利用得到了日益增强的重视与支持，取得了一些重要的进展，大大增强了人类在化石能源衰竭后仍能依赖可再生能源可持续发展的信心。

化学工业出版社组织出版的《可再生能源丛书》，由各领域的知名专家编写，将为广大读者提供有关知识、进展情况和今后工作的方向，动员大家来更好地参与和支持开发利用可再生能源的伟大事业。相信定会受到大家的欢迎，取得预期的效果。

中国科学院院士、中国太阳能学会名誉理事长

严陆光

2004 年 10 月

于北京

前 言

近十余年来,天然气水合物日益受到国际能源界的重视,自1993年以来已召开四次大型国际会议(1993,1996,1999,2002),专门讨论天然气水合物作为潜在新能源和新技术开发的发展前景。 1m^3 的水合物可以储存约 180m^3 (标准状态下)天然气,开发天然气固态(水合物)输送与储存技术是主要的研究方向之一,因其安全、经济的特点,美国、日本、挪威等发达国家已投入了大量的人力、物力进行有关的基础和应用研究,取得了可喜的进展。目前已证实天然气水合物可在常压、 -15°C 的条件下稳定存在15天。经核算,用水合物法将天然气从北海运到欧洲中部地区比液态输送法节省费用24%。

自从1940年以来,人们就一直尝试以水合物的方式来储存天然气,近十年来取得了突破性进展。笔者自1996年开始研究水合物天然气储运技术以来,先后受到中国石油科技中青年创新基金项目、中国科学院院长基金及重点项目、广东省自然科学基金及“百项工程”项目及国家自然科学基金项目等多个项目的资助。本书以笔者承担的这些科研项目为基础,结合国内外研究现状,在介绍天然气水合物概念的基础上较为系统而严谨地论述了天然气水合物储运的基本原理、热力学基础、水合物生长动力学、水合反应器设计、天然气水合物制造技术、增加储气密度的措施和方法及该技术的应用前景等技术问题。

本书共分七章。第一章介绍了天然气水合物概念以及在天然气储运中的作用、应用前景,并对各种储运技术进行了比较,对天然气水合物储运技术的未来发展进行了展望,提出了水合物的大规模快速生成、固化成型、集装和运输过程的安全等关键技术问题,成为今后研究和努力的方向。第二章对天然气水合物的基本特性,如天然气水合物的物理性质、相变及相平衡特性、生成/分解速率、含气率等进行了介绍。第三章对天然气水合物储运的基本原理和技术路线进行叙述,包括天然气水合物生产过程、储运过程、分解(气化)过程与设备以及相应温度/压力条件等,大型、长距离船运“雪球”和“冰浆”流程,天然气水合物汽车,活性炭增强水合物储气密度技术等,分析了水合物储运的技术、经济可行性。第四章分析了气-冰、气-水等反应过程及鼓泡式、连续搅拌式、喷淋式水合反应器的特点,为今后的设计及天然气水合物生产打下基础。第五章探讨了增加水合物储气效率的措施和技术,包括成核和生长促进剂作用、液态烃和多孔介质增加储气密度以及搅拌等操作条件的影响。第六章叙述天然气水合物分解强化技

术,包括物理强化(微波、超声波)、传热强化、传质强化等。第七章介绍天然气水合物储运技术的应用,如在长距离运输天然气、民用天然气调峰、天然气水合物汽车、石油和化学工业生产以及高能量密度燃料等方面的应用。

本书涉及天然气固态储存技术的主要研究与应用领域。虽然开展天然气水合物储存技术的研究已有较长的时间,而且有很好的应用前景,但目前尚没有具体的工业应用实例。由于我国西部和海洋的天然气储量非常丰富,开展对天然气水合物储存工艺的基础及应用研究,对我国宏观能源战略决策有着重要而迫切的现实意义。

本书在编著过程中,考虑到知识的系统性而引用了相关的文献内容,在此对被引文献的作者表示感谢。笔者特别要感谢以下人员:中国科学院广州能源研究所天然气水合物研究中心梁德青副研究员,郑新、唐翠萍、李栋梁等研究助理,郝文峰、章春笋、孙志高等博士,彭浩、周薇、田龙等硕士。中国科学院广州天然气水合物研究中心主任黄宁生博士也非常关心本书的出版。李新军教授对本书第四章提出了很好的建议,在此一一表示感谢。

笔者还要对日本庆应大学森康彦教授表示感谢,他作为会议主席成功举办了第四届国际天然气水合物学术会议,并促进中日天然气水合物研究领域的合作。笔者2002年以访问教授(JSPS)的身份和森教授合作进行了天然气水合物储运方面的传热、传质研究,获益匪浅。此后,森教授又积极为2003年的中国科学院天然气水合物学术研讨会撰文“Recent Advances in Hydrate-based Technologies for Natural Gas Storage—A Review”,此文也成为本书的重要参考。

笔者1996~1998年在石油大学(北京)从事博士后研究,是郭天民教授将我带入天然气水合物领域,他学识渊博,和蔼可亲,令人敬仰。先生不幸于2003年2月去世,令人悲痛,成为水合物界的一大损失。此书付梓之日已是先生逝世一年有余,以纪念之。石油大学(北京)的陈光进教授也为本书做出了贡献,他和笔者共同负责完成了中国石油科技中青年创新基金项目《天然气水合物固态储存天然气新技术研究》,这里笔者表示感谢。也感谢项目组的阎立军、孙长宇、刘攀、王峰等同学。

蔡静、魏艳红等完成了部分文字处理等工作,在此表示感谢。

由于水平有限,书中可能会存在疏漏之处,恳请读者予以批评指正。

樊栓狮

2004年10月23日

内 容 提 要

本书是《可再生能源丛书》中的一本。

本书在介绍固态水合物储存和运输天然气技术 (GtS) 基本知识、基本原理的基础上, 突出介绍水合物储气效率的措施和技术, 着重介绍了 GtS 的工艺流程、应用领域、研究实例和进展。

本书共分七章。第一至第三章介绍了天然气水合物概念、基本特性, 以及天然气水合物储运的基本原理和技术路线; 第四至第六章分析了水合反应器的特点、增加水合物储气效率的措施和技术, 以及天然气水合物分解强化技术等; 第七章介绍了天然气水合物储运技术的应用, 如在长距离运输天然气、天然气调峰、天然气水合物汽车、石油和化学工业生产、民生领域和危险品处理等方面的应用。

本书可供石油、天然气、化工、能源、环境保护等专业技术人员、院校师生和科研人员使用。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 天然气水合物简介	1
第二节 天然气储运技术	3
第三节 天然气水合物储运技术及其发展	5
参考文献	7
第二章 天然气水合物的结构与性能	9
第一节 天然气水合物结构	9
第二节 天然气水合物的基本物理性质	11
第三节 天然气水合物的热导率	12
第四节 四相点	16
第五节 相变焓	17
第六节 天然气水合物的相平衡特性	21
第七节 天然气水合物的储气特性	25
参考文献	28
第三章 天然气水合物储运的基本原理	30
第一节 常用天然气储运方式	30
第二节 NGH 储运基本原理和技术路线	43
第三节 NGH 生产/储运/分解过程及设备	53
第四节 NGH 储运过程中的温压选择	67
第五节 经济分析与评价	70
参考文献	72
第四章 天然气水合物的合成	75
第一节 气体水合物生长动力学	75
第二节 反应器设计原理	84
第三节 天然气水合物合成工艺	88
参考文献	114
第五章 提高水合物储气效率的措施和技术	116
第一节 采用液态烃	116
第二节 采用添加剂	121

第三节 使用多孔介质.....	153
第四节 选择合适的操作条件.....	173
第五节 改变气体成分.....	178
参考文献.....	182
第六章 天然气水合物的分解.....	185
第一节 微波作用下的水合物分解.....	185
第二节 超声波作用下的水合物分解.....	191
第三节 “水合物雪球”在水中的分解	193
第四节 “水合物浆”的分解	197
第五节 活性炭中水合物的分解动力学.....	199
参考文献.....	202
第七章 天然气水合物储运技术的应用.....	204
第一节 长距离运输天然气.....	205
第二节 民用天然气调峰.....	208
第三节 天然气水合物汽车.....	211
第四节 在石油和化学工业中的应用.....	214
第五节 其他应用.....	221
参考文献.....	223
主要符号表.....	225

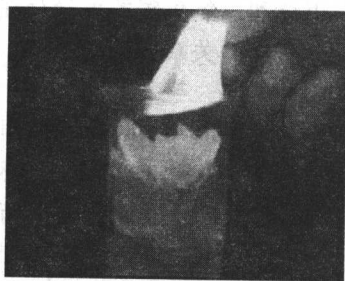
第一章 绪 论

第一节 天然气水合物简介

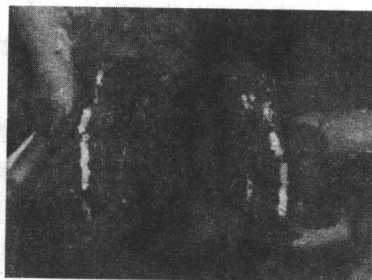
一、天然气水合物的基本概念

早在 1810 年,英国化学家 Humphry Dary 在实验室中首先发现气体水合现象,并提出“气体水合物”(Gas Hydrates)这一概念。气体水合物属于笼形化合物(Clathrate)的一种,因此又被称为笼形水合物(Clathrate Hydrate)。天然气水合物(Natural Gas Hydrate,简称 NGH)是由一种或几种烃类气体在一定的温度和压力下和水作用生成的一种非固定化学计量的笼形晶体化合物。

形成天然气水合物的主要气体为甲烷,当其中甲烷含量超过气体总量的 99.9%时可称为甲烷水合物。标准状态下 1m^3 的 NGH 可储存 $150\sim 180\text{m}^3$ 的天然气。天然气水合物遇火可燃烧,俗称“可燃冰”[见图 1-1 (a)],它在自然界主要储存在大陆边缘海底与永久冻土带沉积物中[见图 1-1 (b)]。



(a) 实验合成的甲烷水合物



(b) 自然界的天然气水合物

图 1-1 天然气水合物

天然气水合物的一个重要特点是它不仅可以在水的正常冰点以下形成,还可以在冰点以上结晶固化。1823 年 Faraday 对天然气水合物的组分进行了研究,认为其组成可由 $M \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 表达,其中 M 表示形成水合物的外来气体分子(客体分子), n 表示每个气体分子为形成一个天然气水合物所需要的水分子(主体分子)数目,但是对于 n 的具体数值,当时学者们所得出的结论差别很大。

1973 年,Davidson 对天然气水合物的研究结果进行了比较全面的总结。要

全面了解天然气水合物的性质、研究现状和发展请参阅斯隆 (Sloan) 教授的“Clathrate Hydrates of Natural Gases” (1990, 1998) 和马库冈 (Makogon) 教授的“Hydrates of Natural Gas” (1997) 等专著。

二、天然气水合物是一种重要的未来能源

天然气水合物在世界范围内广泛存在, 这一点已得到广大研究者的认同。在地球上大约有 27% 的陆地是可以形成天然气水合物的潜在地区, 而在世界大洋水域中约有 90% 的面积也属这样的潜在区域。已发现的天然气水合物主要存在于北极地区的永久冻土区和世界范围内的海底、陆坡、陆基及海沟中。自然界中气水合物的稳定性取决于温度、压力及气-水组分之间的相互关系, 这些因素制约着天然气水合物仅分布于岩石圈的浅部, 地表以下不超过约 2000m 的范围内。由于采用的标准不同, 不同机构对全世界天然气水合物储量的估计值差别很大。但是, 大多数人认为储存在天然气水合物中的碳至少有 $1 \times 10^{13} \text{t}$, 约是当前已探明的所有化石燃料 (包括煤、石油和天然气) 中碳含量总和的两倍。由于天然气水合物的非渗透性, 常常可以作为其层下的游离天然气的封盖层。因而, 加上天然气水合物层下的游离气体量, 这种估计还可能会大些。如果能证明这些预计属实的话, 天然气水合物将成为一种丰富的重要未来能源。斯隆指出, 大规模开采天然气水合物中的甲烷, 在 21 世纪的某个时候将成为现实。

目前大多数科学家也都认识到, 天然气水合物不仅可以作为未来石油和天然气的替代资源, 而且天然气水合物对环境还具有十分重要的意义。最关键的一点是, 由于天然气水合物中两种温室气体——甲烷和二氧化碳的大量存在, 天然气水合物与全球气候变化以及地质灾害有着十分密切的关系。

三、我国天然气水合物的发展历史

我国天然气水合物的研究始于 20 世纪 90 年代初。1990 年, 中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室科研人员成功地进行了天然气水合物人工合成实验, 与此同时, 石油大学郭天民教授改进了水合物相平衡模型。随后, 国家自然科学基金委员会资助了一些项目, 支持天然气水合物基础研究, 中国科学院、中国石油天然气集团公司、广东省等资助了天然气水合物储运技术开发项目。近年来, 国家 863 计划、调查专项等资助了我国海域天然气水合物调查工作。我国已经在天然气水合物的物理化学特性、结构、热物性测试等方面取得成果, 在天然气水合物储存技术方面取得重大进展。同时, 指出了我国西沙海槽、东沙陆坡、台湾西南陆坡、南沙海槽、冲绳海槽等可能存在天然气水合物藏。初步估算水合物气资源量为 $(1 \sim 2) \times 10^{14} \text{m}^3$, 占全球的 1%~2%。按此估算值计算, 在我国 300 万平方公里海域内平均每平方公里有水合物气 $(0.33 \sim 0.66) \times 10^8 \text{m}^3$ 。因此, 我国应同其他国家一样, 进一步加强这方面研究, 重点开展的工作之一即是天然气水合物的开采和运输。

第二节 天然气储运技术

我国天然气分布非常不均衡，存在着天然气的储运问题。我国天然气资源丰富，总储量约为 $3.8 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ，并且我国煤炭资源丰富，还有大量分散、气量不稳定的煤层气资源，储量为 $3.5 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ，到 2000 年底已探明的天然气储量为 $2.56 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。我国天然气资源主要分布在西部和中部地区，而经济发达地区多集中在东部和沿海地区，因而在西部大开发战略中，我国启动了“西气东输”工程，采用铺设天然气管道的方式。

但对于大量的中小城镇和小规模用户而言，管道输送天然气在经济上不可行。另外，我国有大量的分散小气田，加工气量少，液化天然气（Liquefied Natural Gas，简称 LNG）输送法和管道输送法都不经济适用。例如从靖边到西安的 400km 管道需投资 10 亿元，而日产 400 m^3 LNG 的工厂一次投资也在 1 亿元人民币以上，不适合中国国情，特别是对一些分散小气田，地形复杂，加工气量少，无法收回投资，上述两种方法都不适应。

由于天然气是一种轻质气体，其密度小，不易液化，不便储存和运输，限制了其有效利用和应用。另外，我国还有大量零散气田，如果天然气的储运经济性不能得到有效提高，这些气田将无法进行开采和利用。因此，天然气的经济、安全储运技术是天然气推广应用的关键因素之一，也是天然气工业的重要组成部分。陆上及近海天然气的输送一般采用管道输送，对于跨洋长距离天然气输送，当铺设管道难于实施时多采用液化天然气方式进行输送。目前，世界天然气产量的 75% 依赖管线输送，25% 靠 LNG 输送法运输，后者存在运营费用高的问题。

因此急需一种新型的，既安全可靠，又能大幅度降低运输费用的天然气储运方法，以气体水合物的方式储运天然气就是这样一种崭新的方法。

天然气储存大致可分为地面储存和地下储存，具体分类情况如图 1-2 所示。

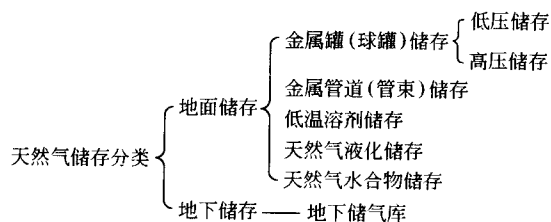


图 1-2 天然气储存的分类

一、管道输送与“西气东输”

长距离输气管道是天然气远距离输送的重要工具。它将经过天然气净化处理

后的符合管输气质标准的天然气输送至城镇及工业企业。它的构成一般包括输气干管、首站、中间气体分输站、干线截断阀室、中间气体接收站、清管站、障碍（江河、铁路、水利工程等）的穿跨越、系统末站（或称城市门站）、城市储配站及压气站，同时还包括与管道系统密不可分的通信系统和自控系统。长距离输气管道与压缩机站组成一个复杂的动力系统，由于输送的气量大、输距长，通常采用高压、大管径的输送系统，这是增加管道输送能力的有力措施。

长距离输气管道的末段（从最后一座压缩机站到终点配气站），在设计时要根据通常日用气量的波动情况赋予一定的储存能力，借以进行负荷调节。当管道的终点压力在一定范围波动时，管内气体的平均压力也相应有一个最高和最低值。

“西气东输”是我国实施西部大开发战略的重要工程项目之一。主要是把新疆塔里木、青海柴达木和陕甘宁等中西部丰富的天然气资源，通过新建一条自新疆塔里木到上海总长 4176km 的输气管道，将天然气输送到我国东部地区的安徽、江苏、上海等省市，“西气东输”管线走向如图 1-3 所示。管道经过陕西靖边，陕甘宁气区的天然气可输入此管道。

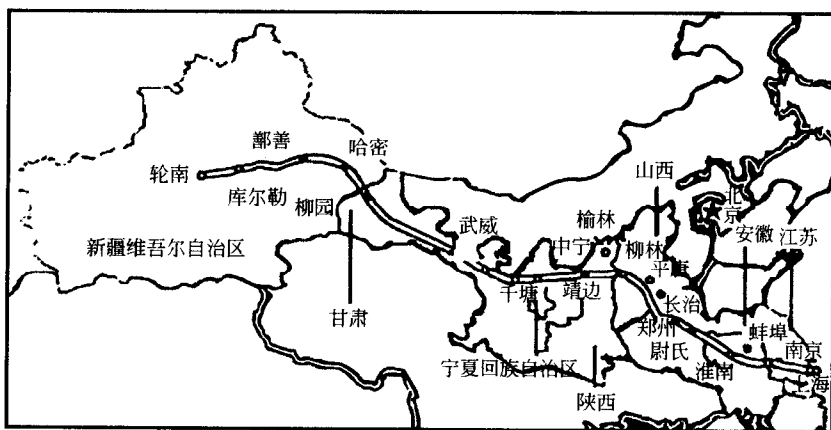


图 1-3 “西气东输”管线走向图

“西气东输”输气管道管径 1016mm，年输气量 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。途经 9 个省市，管道长度 4000 多公里，2004 年全线贯通。第一期工程输气 $120 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。逐步建设中间压气站，将年供气能力增加到 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

二、天然气容器储存

天然气常用的储存方式为容器储存，即用金属罐（球罐）储气。按工作压力高低，可分为低压储气罐和高压储气罐。低压储气罐的工作压力一般为 4~5MPa，国内外较广泛用的球形罐容积在 $5000 \sim 10000 \text{ m}^3$ ，高压储气罐储存的天然

气主要用于城市配气系统作昼夜或小时调峰供气。另一种容积式储气方式是将若干管段构成的管束埋于地下，构成储气设备。与球罐相比，这种储气设施运行压力高于球罐，埋地较安全，建造费用低，占地面积较大。

三、天然气在溶剂中储存

天然气可以溶解在丙烷、丁烷或其混合溶剂中，而且溶解度随着压力的增加和温度的降低而提高。天然气在液化石油气中储存所需的能量比天然气液化后储存所需的能量大大减少，储存能力比气态储存时高 4~6 倍。这种系统操作简单，安全而且经济。管内压力较低，天然气将自动地掺混一部分液化石油气供入管网。这样天然气管道可以长期均衡地供气，提高管道的利用系数。当供气量小于需用量时，将从储罐向外补充供气，直到罐内压力降到 1.0MPa 以下时，储罐内蒸气压减小，液化石油气将自动地掺混到天然气中送入管网。此时燃气的热值将会改变，为保证燃具正常工作，系统设有热值调节器自动掺混空气以调整发热量。可见上述系统具有储存和混气两个功能。这种储气系统储气密度有限，而且需要补充液化石油气，在实际工作中很少使用。

四、地下储气库

地下储气库是天然气储气的最佳方式，是天然气储运系统的一个重要组成部分。世界各主要产气和用气量大的国家都很重视发展地下储气库。近年来，随着我国天然气工业的发展，已开始对地下储气库进行规划研究和建设，为 21 世纪我国天然气工业的发展提供技术支持。

第三节 天然气水合物储运技术及其发展

天然气固态储存，也称为 GtS 技术 (Gas to Solid)，它将天然气在一定的压力和温度下，转变成固体的结晶水合物。利用 1m^3 的天然气水合物可储存 $150\sim 180\text{m}^3$ (标准状态下) 天然气的特性，可以在较低的温度和压力下以水合物的形式储运天然气。

一、GtS 技术的特点和优势

GtS 技术包含：NGH 的生产；NGH 的运输；NGH 的气化等过程。

从技术角度分析，在生产环节中：NGH 可以在 $2\sim 6\text{MPa}$ 、 $0\sim 20^\circ\text{C}$ 下制备，技术难度较低。工厂的建造可以更大限度地利用当地的材料、设备以及人力资源，而 LNG 技术由于其技术难度高而高度专业化，其设备尤其是价格昂贵的液化热交换器只能依靠为数很少的几个生产厂家提供，对设备、生产工艺和人员有很高的要求。在储运环节中：NGH 本身的热导率较低，约为 $0.6\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，因而 NGH 储存容器本身不需要特别的绝热措施。此外 NGH 可以在常压、 -15°C 以上的温度条件下稳定储存，对储罐材料要求不高，还可利用海底的压力和温度

环境，将储油罐建在海洋底部 50~500m 深处，省去制冷和压缩环节。海上运输 NGH 在一定绝热条件下，部分释放的气体（约占运量的 0.94%）还可以作为轮船的燃料。而 LNG 的运输一般采用常压，超低温（-162℃）方式，储存装置材料需要特殊钢材（Ni 钢）且储罐一般做成内外两层，对设备性能的要求高。在气化环节中：NGH 的气化需要加热，并压缩脱水，从而需要附加一些设备和设计流程。LNG 的气化则直接通过常温下液体的蒸发进行，过程简便得多。

GtS 技术的优势如下。

① 由于天然气水合物分解需要较多的能量，因此只要切断传热途径，即可使天然气水合物长期稳定存在，保证了运输过程的安全性。

② 提高天然气储存的可操作性和灵活性，降低天然气储存的成本。挪威 Gudmundsson 等对以天然气水合物形成和液化天然气形成来运输天然气进行了成本比较。在欧洲的条件下，假设处理天然气 $0.1132 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，4 条加工线运输距离 6475km。天然气水合物在陆上生产，配有适合的大型油轮装载设施，专门用来运输固体水合物，GtS 的成本比 LNG 的成本低 24%。对于零散气田，天然气水合物储存和运输技术和管输技术相比优势尤其明显。同时可以扩大天然气的消费群体，将天然气的消费推向偏远乡镇和农村，而靠铺设管网实现这一目的是无法想象的。该技术一旦开发成功必将带来新的经济增长点。

③ 天然气水合物固态储存以及应用作为车用燃料来代替汽油和危险性很大的压缩天然气，对推动环保汽车的发展也是极具吸引力的，美国已在进行这项技术的开发研究。

④ 天然气水合物固态储存技术可以大规模地提高天然气储存的规模、效率，因为水合物化解后几乎可以百分之百的释放出天然气。

二、GtS 技术的发展

早在 20 世纪 40 年代末，GtS 技术就引起了科学工作者的注意，Miller 和 Strong 及 Parent 等人对此进行了一些研究并申请发专利。早期的研究者认为，在生成和运输过程中，利用高压防止水合物分解的设备费用较高，而常压下天然气水合物的大规模储运需要极低的温度（常压下天然气水合物的平衡温度一般为 -76℃），在此温度下运输天然气水合物的成本太高，导致其在实践中不可行。

随着近年来对气体水合物研究的不断深入，挪威科技大学的 Gudmundsson 在 1990 年首先提出：天然气水合物在常压下大规模储存和运输时不必冷却到平衡温度以下，而是将水合物冷冻到水的冰点以下（-15~-5℃），保持完全绝热，水合物就可保持稳定。因此，以水合物形式储存和运输天然气在技术和经济上又都具有可行性。

作为一种在工业上还从没被利用过的潜在的高效储气技术，由于可形成创新性专利成果，日本、美国、英国、挪威等在 21 世纪来临之际加大了该技术的研

发力度。日本三井造船公司宣布在 2008 年造出世界首轮 NGH 运输船, 目前该公司已经拥有运输能力达 600 吨/天的技术, 并获得日本产业技术研究所和大阪大学的支持。美国国家天然气水合物研究中心 (SCGH) 则启动了以使用表面活性剂为主要技术的调峰储气的中试研究项目以及天然气水合物汽车探索项目。英国 BG 公司正在中试的水合物储气装置如图 1-4 所示。

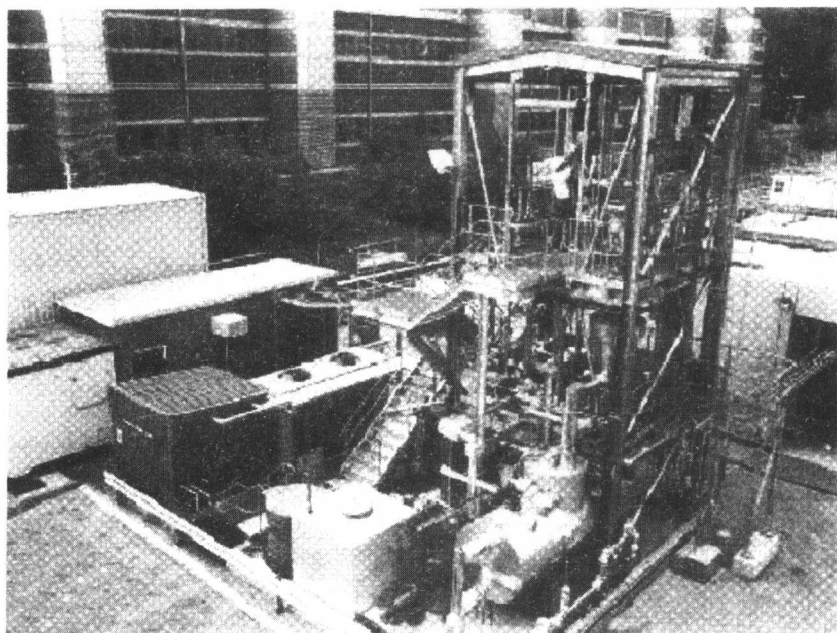


图 1-4 BG 公司水合物储气装置图

参 考 文 献

- 1 Englezos P. Second International Symposium on gas hydrates. Toulouse, 1996. 147~153
- 2 Gudmundsson F H. Transport of Natural Gas as Frozen Hydrate. Proceedings of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference. The Hague, The Netherlands; 1995 (6): 11~16
- 3 Gudmundsson J S. Natural Gas Hydrate-an Alternative to Liquefied Natural Gas. Petroleum Review, 1996 (5): 232~235
- 4 Link D D et al. Formation and dissociation studies for optimizing the uptake of methane by methane hydrates. Fluid Phase Equilibria, 2003, 211 (1): 1~10
- 5 Makogon Y F. Hydrates of Hydrocarbons. Tulas, Oklahoma; 1997. 35~37
- 6 Parent J D. The Storage of Natural Gas as Hydrate. Inst of Gas Techn. Res. Bull. 1948 (1)

- 7 Sloan E D. Clathrate Hydrate of Natural Gases. Marcel Dekker Inc, New York; 1997
- 8 Thomas S, Richard A D. Review of ways to transport natural gas energy from countries which do not need the gas for domestic use. *Energy*, 2003, 28: 1461~1477
- 9 Guo T M, Wu B H, Fan S S et al. A review on the gas hydrate research in China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 41 (1~3): 11~20
- 10 Mori Y H. Recent advances in hydrate-based technologies for natural gas storage—a review. *化工学报*, 2003, 54 (增), 1~21
- 11 陈国邦, 余建平等. 天然气液化技术及其应用. *深冷技术*, 1995, (5): 1~7
- 12 戴金星. 我国天然气资源及其前景. *天然气工业*, 1999, 99 (1): 3~6
- 13 徐文渊, 蒋长安主编. 天然气利用手册. 北京: 中国石化出版社, 2000