



化学工业出版社出版基金资助出版

天然气工业 在线分析技术

王 森 主 编

张继勇 郭 和 聂 玲 副主编

**TIANRANQI GONGYE
ZAXIAN FENXI JISHU**



化学工业出版社



化学工业出版社出版基金资助出版

天然气工业 在线分析技术

王 森 主 编

张继勇 郭 和 聂 玲 副主编

TIANRANQI GONGYE
ZAIXIAN FENXI JISHU



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书全面介绍了天然气工业常用在线分析仪器及其应用技术。全书共 10 章，概要介绍了天然气的组成、分类、质量要求及分析测定方法，重点介绍了在线天然气硫含量分析仪、水露点分析仪、烃露点分析仪、在线气相色谱仪、红外线分析仪的原理、结构、性能、特点及使用维护知识；天然气净化处理、管道输送、液化天然气（LNG）、压缩天然气（CNG）等工艺在线分析仪器的选型技术及样品处理系统设计技巧；分析小屋设计要点及分析仪系统的安装施工技术。

本书内容紧密结合我国天然气工业的实际工况和环境条件，针对在线分析仪器选型、安装、使用、维护中存在的疑难问题，根据现场使用维护人员及有关技术人员及管理人員的实际需要编写而成。

本书主要读者对象为天然气工业在线分析仪器使用、维护人员，与天然气在线分析有关的工艺、自控、质检、管理人员及天然气地面工程设计、建设人员，对在线分析仪器生产厂家和大专院校有关专业师生也有参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

天然气工业在线分析技术/王森主编. —北京：化学工业出版社，2016.10
ISBN 978-7-122-27889-0

I. ①天… II. ①王… III. ①天然气工业-分析仪器 IV. ①TE927

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 197312 号

责任编辑：刘 哲
责任校对：边 涛

装帧设计：史利平

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16 1/4 字数 403 千字 2017 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：68.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

早在杭州工作期间，我就接触过部分天然气在线分析项目。到重庆科技学院任教后，2012年至2015年的四年中，先后为中国石油天然气集团公司及其所属土库曼斯坦阿姆河天然气公司举办过3期“天然气在线分析仪器培训班”，参训学员140多人，编写了3本培训教材，累计字数137万字。我还和重庆科技学院的同事深入西南、长庆、塔里木三大油气田，对天然气在线分析仪器的使用情况和存在问题进行了调研，取得较为丰富的第一手材料。根据调研情况和长庆油田的要求，我们还承接并完成了榆林天然气处理厂陕京一线在线分析系统改造项目。

本书就是在上述培训办班、编写教材的基础上，根据培训班学员、天然气行业技术人员、管理干部的意见及要求，整合天然气在线分析先进技术及工程实践经验，花费了近一年时间编写而成。

本书介绍天然气工业常用在线分析仪器及其应用技术，全书分为10章。第1章概要介绍天然气的组成、分类、质量要求、质量指标及分析测定技术。第2~6章分别介绍在线硫分析仪、水露点分析仪、烃露点分析仪、气相色谱仪、红外线气体分析仪的原理、结构、性能、特点及使用维护知识。第7~9章分别介绍天然气净化处理、硫黄回收、管道输送、液化天然气(LNG)、压缩天然气(CNG)等工艺在线分析仪器的选型及样品处理系统的设计技巧等。第10章介绍分析小屋的设计要点及分析仪系统的安装施工技术。在本书的“绪论”中，还对我国天然气工业发展前景、天然气在线分析仪器发展趋势、使用现状、存在问题及原因作了分析，并提出了改进措施及建议。

本书内容紧密结合我国天然气工业的实际工况和环境条件，针对在线分析仪器选型、安装、使用、维护中存在的疑难问题，根据现场使用、维护人员和工艺、自控、质检、管理人员、天然气地面工程设计、施工人员的实际需要进行编写，具有针对性强、实用性强的特点。

本书由王森任主编，张继勇、郭和、聂玲任副主编，重庆科技学院、北京楚盛科技有限公司、长庆油田、西南油气田天然气研究院、西南油气田输气管理处、重庆气矿、中国石油阿姆河(土库曼斯坦)天然气公司、重庆川仪分析仪器有限公司、天华化工机械及自动化研究设计院的技术人员和教师参加了编写。本书各章编写及审定人员如下：

绪论 王 森

第1章 张友兵 王 森

第2章 张继勇 柏俊杰 杨 波

第3章 王 森 李珍义 曾文秀

第4章 迟永杰 杨君玲

第5章 范 晔 钟秉翔 王 森

第6章 聂 玲 姚立忠

第7章 王 森 杨建明

第8章 郭 和 张文超

第9章 聂 玲 熊斌峰

第10章 王 森 周 谋 张友兵

限于作者的知识面和水平，书中难免存在不当和缺欠之处，敬请广大读者不吝赐教，批评指正。

王 森

2016年6月于重庆

绪论	1
----	---

第 1 章 天然气的质量指标与分析测试技术	6
-----------------------	---

1.1 ▶ 天然气的组成与分类	6
1.2 ▶ 商品天然气质量要求与质量指标	10
1.3 ▶ 商品天然气分析测定技术	15

第 2 章 硫化氢和总硫分析仪	25
-----------------	----

2.1 ▶ 醋酸铅纸带比色法硫化氢分析仪	25
2.2 ▶ 紫外吸收法硫化氢分析仪	32
2.3 ▶ 紫外吸收法硫化氢、二氧化硫比值分析仪	39
2.4 ▶ 醋酸铅纸带比色法总硫分析仪	44
2.5 ▶ 紫外荧光法总硫分析仪	46

第 3 章 微量水分与水露点分析仪	52
-------------------	----

3.1 ▶ 湿度的定义及表示方法	52
3.2 ▶ 微量水分仪的主要类型	58
3.3 ▶ 电解式微量水分仪	59
3.4 ▶ 电容式微量水分仪	65
3.5 ▶ 晶体振荡式微量水分仪	73
3.6 ▶ 半导体激光式微量水分仪	77
3.7 ▶ 近红外漫反射式微量水分仪	83
3.8 ▶ 微量水分仪的校准	85
3.9 ▶ 冷凝露点湿度计	92

第4章 烃露点分析仪

96

- 4.1 ▶ 天然气的烃露点与反凝析现象 96
- 4.2 ▶ 烃露点检测方法 97
- 4.3 ▶ 烃露点分析仪产品简介 98

第5章 在线气相色谱仪

102

- 5.1 ▶ 在线气相色谱仪概述 102
- 5.2 ▶ 恒温炉 108
- 5.3 ▶ 自动进样阀和柱切换阀 109
- 5.4 ▶ 色谱柱和柱系统 114
- 5.5 ▶ 检测器 120
- 5.6 ▶ 控制器和采样单元 124
- 5.7 ▶ 在线色谱仪使用的辅助气体 126
- 5.8 ▶ 标定和日常维护 128
- 5.9 ▶ 天然气分析用小型在线色谱仪 131
- 5.10 ▶ 天然气能量计量与天然气热值色谱仪 136

第6章 红外线气体分析器

143

- 6.1 ▶ 电磁辐射波谱和吸收光谱法 143
- 6.2 ▶ 红外线分析器的测量原理、类型和特点 145
- 6.3 ▶ 光学系统的构成部件 148
- 6.4 ▶ 采用气动检测器的红外分析器 155
- 6.5 ▶ 采用固体检测器的红外分析器 161
- 6.6 ▶ 测量误差分析 164
- 6.7 ▶ 调校、维护和检修 169

第7章 天然气处理、管道输送在线分析技术

172

- 7.1 ▶ 天然气工业产业链 172
- 7.2 ▶ 天然气净化处理在线分析项目及仪器选用 173
- 7.3 ▶ 天然气管道输送在线分析项目及仪器选用 178
- 7.4 ▶ 天然气取样和样品处理技术概述 179

7.5 ▶ 取样与取样探头	182
7.6 ▶ 样品的减压与伴热传输	186
7.7 ▶ 样品的过滤、除尘与除雾	190
7.8 ▶ 取样和样品处理系统设计示例	194

第8章 脱硫酸性气、硫黄回收、尾气处理在线分析技术 200

8.1 ▶ 概述	200
8.2 ▶ 克劳斯法硫黄回收工艺在线分析技术	202
8.3 ▶ 斯科特法尾气处理工艺在线分析技术	209
8.4 ▶ 超级克劳斯硫黄回收工艺在线分析方案	220
8.5 ▶ 国产直接选择氧化工艺在线分析方案	221

第9章 液化天然气(LNG)、压缩天然气(CNG)在线分析技术 226

9.1 ▶ 液化天然气(LNG) 在线分析技术	226
9.2 ▶ 压缩天然气(CNG) 在线分析技术	235

第10章 分析小屋和分析仪系统的安装 240

10.1 ▶ 分析仪的遮蔽物	240
10.2 ▶ 分析小屋的结构和外部设施	241
10.3 ▶ 分析小屋的配电、照明、通风、采暖和空调	242
10.4 ▶ 分析小屋的安全检测报警系统	244
10.5 ▶ 分析仪的安装、配管、布线和系统接地	245
10.6 ▶ 样品处理系统的安装和检验测试	248
10.7 ▶ 天然气工业分析小屋图片示例	249

参考文献 252

绪论



1. 天然气工业发展前景

(1) 天然气将成为世界第一大能源

天然气是清洁能源，具有资源丰富、利用广泛、排放清洁、使用方便等特点，在全球能源需求持续增长、石油产量增长缓慢、碳排放加剧的大环境下，近年来世界天然气产业呈现快速发展的态势。

从资源情况看，据国际能源机构 IEA 评价，世界常规天然气最终可采资源量为 436 万亿立方米，现有探明剩余可采储量为 185 万亿立方米，按当前天然气年产量 3 万亿立方米计算，可供开采 60 年以上。

据专家估计，全球非常规天然气资源量，包括煤层气、致密砂岩气、页岩气等，大体上与常规天然气资源量相当。此外，全球天然气水合物即可燃冰资源蕴藏量更为丰富，其资源总量为全球煤炭、石油、天然气等传统能源总和的 2 倍以上。

从总体看来，全球天然气资源丰富，天然气产量处于快速增长的中期，消费需求旺盛，市场逐步从以管道为主的区域市场过渡到管道与液化天然气（LNG）并进的全球性市场，具有广阔的发展前景。

(2) 中国天然气发展举世瞩目

中国天然气资源探明率低，但其发展空间广阔。最新的评价结果显示，我国天然气资源量为 38.04 万亿立方米，除常规天然气资源以外，中国还有包括煤层气、致密砂岩气和页岩气在内的大量非常规天然气资源，且在东海海域、南海海域和青藏高原有天然气水合物分布的广阔前景。

近 30 年来，我国天然气工业取得了突飞猛进的发展，天然气产量从 20 世纪末的 243 亿立方米/年，上升到 2013 年的 1209 亿立方米/年，天然气在一次能源消费结构中的比例从 2.1% 上升到 3.8%，建成四川、塔里木、陕甘宁和柴达木四大气区。天然气气田建设、输气管道建设、站场及处理厂建设方兴未艾，工业生产初具规模，天然气工业已经成为我国国民经济发展的支柱产业。

进入 21 世纪以来，随着国民经济的快速发展，人民生活水平的提高和一批天然气长输管道的建成投产，中国天然气消费量以年均 16% 的速度递增。2007 年天然气消费量首次超过了天然气年产量，预计 2030 年，中国天然气消费量将达到 5000 亿立方米，相当于 6.9 亿吨标煤，天然气在一次能源消费结构中的比例将从当前的 3.8% 上升到 14%。

为满足迅速增长的天然气需求,中国还将与资源国合作。预计2020年和2030年将分别从国外引进天然气600亿立方米和2000亿立方米。

(3) 以天然气为主,基本改善我国能源结构

从长远出发,天然气将在我国能源建设中发挥极为重要的作用,大力开发和利用天然气,以天然气为主,依靠天然气、核能和可再生能源“三驾马车”,支撑中国可持续发展的能源前景是光明而美好的。到2030年,这三种能源在中国能源消费结构中的比重接近或者达到40%。其中,天然气的比重达到或超过14%,中国的能源结构就可以基本得到优化。再经过20年的努力,预计2050年前后,主要依靠天然气、核能和可再生能源的发展,进一步优化能源结构,中国的经济和社会发展将最终建立在低碳、清洁、高效、安全的新型能源体系之上。

2. 在线分析仪器应用情况及发展趋势

在线分析仪器(on-line analyzers)又称过程分析仪器(process analyzers),是指直接安装在工业生产流程或其他源流体现场,对被测介质的组成成分或物性参数进行自动连续测量的一类仪器。

在线分析仪器是分析仪器的一类,也是过程检测仪表的一个分支。它跨越分析仪器和工业自动化仪表两大专业,具有多学科、高技术特征。

我国石油和化学工业(包括炼油、天然气、石油化工、煤化工、化肥、酸碱盐、合成制药等)和环境保护行业是使用在线分析仪器比较密集的两个领域。

随着我国石油化工装置的大型化和技术装备水平的提高,随着对节能减排、降低成本、提高质量和安全生产的日益追求,在线分析仪器的使用量和重要性与日俱增。目前,新建大型石油化工装置在线分析系统的设备投资已接近自控系统的投资,例如某100万吨/年乙烯装置仪表及自控系统概算中在线分析仪表为3367万元,占设备费的12.57%,而自控系统为3875万元,占设备费的14.47%。

① 目前,过程控制已经从传统的四大参数过渡到温度、压力、流量、物位、质量五大参数。采用在线分析技术,是石油、化工企业实施先进过程控制(APC)和实时优化控制(RTO),节能、降耗、挖潜、增效的需求。

② 采用在线分析技术,是降低人工成本,减员增效,用无人值守的在线实时连续分析取代人工取样化验分析的必然趋势。

国外大型炼油厂手工化验分析人员仅十几人到二十几人,只做出厂油品抽检化验,生产过程和馏出口产品分析全靠在线分析仪器。而我国的炼油厂全靠手工化验分析,一个大型炼油厂手工化验分析人员400~500人,不但人工成本过高,而且劳动强度大,工作环境差(直接接触易燃易爆、有毒有害液体和气体)。

③ 在环境保护、治污减排方面,无论是废气、污水的排放监测和总量控制,还是环境空气、地表水体的质量监控,均大量采用在线分析仪器,彻底改变了以前全部依靠手工化验、费时费力的落后局面。

④ 在安全工程方面,无论是人员、设备安全,还是食品、药品安全,无论是定点监测还是应急检测,都需要大量的在线分析仪器。

在我国的天然气工业中,从天然气采气井场、矿场到天然气净化厂、处理厂,从液化天然气(LNG)工厂到压缩天然气(CNG)加气站,从管道输送中为数众多的输气站、计量

站,到以天然气为原料的化肥厂、化工厂、发电厂,都安装、使用了为数众多的在线分析仪器,这些仪器包括硫化氢、二氧化硫、硫醇和总硫分析仪、微量水分仪和水露点分析仪、烃露点分析仪、色谱仪以及多种光学、电化学、热学、磁学等原理的在线分析仪器。

我国天然气的消费量在未来 15 年中将提高 3~4 倍,根据目前天然气工业在线分析仪器的配置比例,在未来 15 年中其使用数量至少会增加 3~4 倍,天然气工业在线分析仪器的配置数量绝不会停滞在目前的水平上,而会有较大幅度的提升。

3. 天然气工业在线分析仪器使用现状、存在问题和原因分析

2013 年,根据对现场天然气在线分析仪器、样品处理系统及其配套设施进行的调研,在线分析仪器使用情况很不理想,约有 1/3 乃至近半数的仪器处于停运状态。即使那些正在运行的仪器,有的是带病运行,有的故障频发,有些测量数据不准确。

之所以存在上述情况,有多方面原因,主要原因在于使用、维护人员缺乏培训,专业技术素质较低;尚未建立健全管理体系,缺乏有效的管理办法;重仪器、轻配套,系统设计和安装施工问题较多等几方面。

(1) 使用、维护人员缺乏系统培训,专业技术素质较低

从现场调查情况看,在线分析仪器利用率低、存在故障或停运的主要原因并非仪器损坏或质量低劣,而在于使用维护人员不懂得如何正确使用和维护,出现故障无法判断原因和进行处理。

迄今为止,我国大专院校开设在线分析仪器专业的极少(美国部分大学设有这一专业),与其有关的过程控制和分析化学专业也未开设这门课程,现场急需的在线分析专业人才缺乏来源。现有的使用、维护人员也未受过在线分析方面的系统培训,加之多数油气田员工岗位变动较为频繁,致使技术培训无固定对象,维护知识和经验也难以积累和传承。

(2) 尚未建立管理体系和规章制度,缺乏有效管理办法

油田一级没有专门管理处室和二级单位,基层各采气厂、作业区的状况则可用“三无”来概括:无统一管理部门(甚至无管理部门)和固定管理人员;无操作规程、规章制度和有效管理办法;无专职、固定的维护人员。现场仪器出现故障时往往无人处理、无法处理,出现无人监管的现象。

在技术管理方面,缺乏相应的国家标准和行业标准、系统设计及安装规范、设备维护检修规程等规章制度,致使管理部门检查仪器完好情况、考核仪器质量指标、指导维护检修工作、验收在线分析系统缺乏依据。在工程设计和施工中,出现供货厂家和系统集成商各行其是、设计院无所适从、工程验收无据可查的混乱局面。

(3) 重仪器、轻配套,系统设计和安装施工问题较多

从现场调研中发现,现场分析仪器出现的测量误差偏大、停运故障等现象,其原因大多不在分析仪器自身,而出在样品处理和配套设施上。以各油气田使用较多的 AMETEK 3050 水露点分析仪为例,出现测量误差过大等故障,其原因可归纳为以下四点:

① 样气在送入 AMETEK3050 前未将杂质过滤干净,天然气中含有的微量醇类,重烃蒸气污染石英晶体传感器吸湿涂层,造成水露点示值偏高;

② 取样管线裸露安装,未采取伴热保温措施,样气中水分随环境温度的升降,在管壁上吸附、解吸,造成测量值忽高忽低,属于系统设计错误;

③ 样品管线和管件间存在缝隙,环境空气中的水汽侵入,造成测量值偏高,属于安装

施工问题；

④ 缺乏微量水分标准气和标准仪器，无法对水露点分析仪进行校准和标定，属于缺乏配套设施问题。

事实证明，样品处理系统存在的诸多问题，已经成为制约在线分析仪器正常运行的瓶颈环节。除此之外，仪器运行情况的好坏，还受到安装位置、环境条件、配套设施的完善程度及适用性的影响。

4. 改进措施及建议

(1) 将在线分析仪器的运行和维护纳入管理体系，逐步建立专业化技术队伍

由于各油气田、管输公司情况差异较大，很难提出一个统一、具体的管理、运维体系架构方案，下面针对油气田的天然气采气厂、作业区提出一个粗略的方案，供大家参考。

在油气田一级指定一个机关处室，如质量安全环保处，负责在线分析仪器的管理、监督和考核，而在油田下属的天然气采气厂、作业区设置 2~3 人，专门负责全采气厂、作业区所有在线分析仪器的运行与维护，这 2~3 人的编制在采气厂、作业区一级的质量安全环境监测站内，归监测站管理，使在线分析仪器有专门的机构管理、有固定的人员维护。

由于在线分析仪器涉及的知识面广、技术复杂，仅靠设置在基层的 2~3 名运维人员来处理几十台在线分析仪器出现的各种故障是不现实的，他们只能承担日常巡检和简单维护任务（如置换易耗品、易损件、吹扫、除尘、清洗、校准等），复杂故障处理和定期检修则应交由在线分析仪器检维修中心负责。

在油气田一级指定的管理处室下面设置在线分析仪器检维修中心，负责全油田在线分析仪器的检查维修和疑难问题处理。

(2) 分期分批对在线分析仪器使用、维护、管理人员进行培训，提高技术素质

天然气工业中与在线分析仪器有关的人员不仅限于日常使用、维护人员，还涉及工艺、自控、质检、环保、管理人员和地面工程设计、建设人员等，所以，无论仪器的运行维护是否外包，都应重视培训工作，全面提高有关人员的技术素质和管理水平。

① 由相关部门制订培训计划，根据管理人员、技术人员、维护人员的不同需求，进行不同内容、深度和时间的培训，如仪器选型培训、系统设计培训、操作维护培训等。

② 编写、出版培训教材，配备实习设备和实操仪器。

(3) 组织编写《天然气在线分析仪器维护检修规程》

《天然气在线分析仪器维护检修规程》可由相关主管部门和有关专家牵头，提出编写大纲和编写计划，组织仪器生产厂家、油气田技术人员和大专院校教师合作编写，经审查定稿后，作为油气田和有关部门安装、使用、操作、校准、维护、检修在线分析仪器的指南，也是管理部门检查仪器完好情况、考核仪器质量指标、指导维护检修工作、验收在线分析系统的依据。

(4) 组织编写《在线分析仪系统设计和安装规范》

编制《在线分析仪系统设计和安装规范》，使系统设计和安装施工规范化、标准化，克服目前供货厂家和系统集成商各行其是、设计院无所适从、工程验收无据可查的混乱局面，避免或减少由于样品处理和系统配套纰漏造成的各种问题。

(5) 编制天然气在线分析行业标准和国家标准，逐步形成标准体系

由于缺少在线分析仪器及方法方面的标准，有些在线分析方法尚未列入国标，其分析结

果的认可度低,只能作为气质参数变化趋势的参考或用于过程参数的操作控制方面,标准问题已成为制约我国在线分析仪器推广应用的瓶颈之一。

目前,美国、加拿大、德国、俄罗斯等国家在天然气工业中大量采用在线分析仪器,并形成比较完备的在线分析标准体系,我国正进入大规模采用天然气清洁能源的发展阶段,天然气工业也面临着采用在线分析技术取代手工化验、降低人工成本、提高工作效率的要求和压力,因此,组织编制在线分析仪器标准,排除推广应用障碍,应当提到议事日程并付诸实施。

(6) 进行现场整改示范,努力提高在线分析仪器的投用率和完好率

① 研制简易可行的便携式微量水分标气发生装置,以便在现场定期对在线水露点分析仪进行校准,及时纠正仪器由于某种原因出现的系统偏差和零点漂移,切实解决在线天然气水露点分析仪的现场校准和标定问题,同时也提供一种判别不同水露点分析仪测量结果准确与否的手段和尺度。

② 设计制作3~4种适合不同气田工况的样品处理系统,除去天然气中存在的微量液雾蒸气、微小固体颗粒及影响测量的其他杂质,防止出现烃类凝液和冷凝水,防止硫化物的腐蚀,保证天然气气质监测和天然气处理、硫回收工艺监控所用在线分析仪器的准确测量和长周期稳定运行。这几种样品处理系统经现场运行验证后,可作为典型设计样板在油气田推广应用。

③ 设计制作1~2个分析小屋,将安装在现场机柜中因运行环境不良(夏无空调,冬无保温)、系统设计错误、配套设施不全而停运的仪器移入分析小屋,重新进行系统设计和安装施工,恢复正常运行。这几套系统工程经一定时间的运行验证后,作为典型设计样板在油气田推广应用。

第1章

天然气的质量指标与分析测试技术



天然气是指在不同地质条件下生成、运移，并以一定压力储集在地下构造中的气体，它们埋藏在深度不同的地层中，通过井筒引至地面。大多数气田的天然气是可燃性气体，主要成分是气态烷烃，还含有少量非烃气体，是一种洁净、方便、高效的优质能源，也是优良的化工原料。

1.1 天然气的组成与分类

1.1.1 天然气的组成

(1) 天然气的组成成分（组分）

天然气是以低分子饱和烃为主的烃类气体与少量非烃类气体组成的混合气体，是一种低相对密度、低黏度的无色流体。其组成成分超过 100 余种。

在天然气组成成分中，甲烷（ CH_4 ）含量最高，乙烷（ C_2H_6 ）、丙烷（ C_3H_8 ）、丁烷（ C_4H_{10} ）和戊烷（ C_5H_{12} ）含量不多，庚烷以上（ C_6^+ ）的烷烃含量极少，另外，还含有少量非烃类气体，如硫化氢（ H_2S ）、二氧化碳（ CO_2 ）、一氧化碳（ CO ）、氮（ N_2 ）、氢（ H_2 ）和水蒸气（ H_2O ），以及硫醇（ RSH ）、硫醚（ RSR' ）、二硫化碳（ CS_2 ）、羰基硫（或称硫化羰、氧硫化碳）（ COS ）、噻吩（ $\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$ ）等有机硫化物，有的气田天然气还含有微量的稀有气体，如氦（ He ）、氩（ Ar ）等。在有的天然气中，还存在着痕量的不饱和烃，如乙烯（ C_2H_4 ）、丙烯（ C_3H_6 ）、丁烯（ C_4H_8 ），偶尔也还含有极少量的环状烃化合物——环烷烃和芳烃，如环戊烷、环己烷、苯、甲苯、二甲苯等。表 1-1 列出了井口天然气的组成成分。

表 1-1 井口天然气的组成成分

分类	组分		分子式	缩写
烃类	Methane	甲烷	CH_4	C_1
	Ethane	乙烷	C_2H_6	C_2

续表

分类	组分		分子式	缩写
烃类	Propane	丙烷	C ₃ H ₈	C ₃
	<i>i</i> -Butane	异丁烷	<i>i</i> C ₄ H ₁₀	<i>i</i> C ₄
	<i>n</i> -Butane	正丁烷	<i>n</i> C ₄ H ₁₀	<i>n</i> C ₄
	<i>i</i> -Pentane	异戊烷	<i>i</i> C ₅ H ₁₂	<i>i</i> C ₅
	<i>n</i> -Pentane	正戊烷	<i>n</i> C ₅ H ₁₂	<i>n</i> C ₅
	Cyclopentane	环戊烷	C ₅ H ₁₀	
	Hexanes and heavier	己烷和更重组分		C ₆ ⁺
惰性气体	Nitrogen	氮	N ₂	
	Helium	氦	He	
	Argon	氩	Ar	
氧化还原气体	Hydrogen	氢	H ₂	
	Oxygen	氧	O ₂	
酸气	Hydrogen Sulfide	硫化氢	H ₂ S	
	Carbon Dioxide	二氧化碳	CO ₂	
含硫组分	Mercaptans	硫醇	R-SH	
	Sulfides	硫醚	R-S-R'	
	Disulfides	二硫醚	R-S-S-R'	
水气			H ₂ O	
液体	Free water or brine	自由水或卤水		
	Corrosion inhibitors	腐蚀防护剂		
	Methanol	甲醇	CH ₃ OH	MeOH
固体	Millscale and rust	铁锈		
	Iron sulfide	硫化亚铁	FeS	
	Reservoir fines	储层颗粒物		

注：R-代表烷基。

天然气处理产品主要有液化天然气、天然气凝液、液化石油气、天然汽油等。按 GPA（气体加工协会）分类，天然气及其处理产品的组成见表 1-2。

表 1-2 天然气及其处理产品的组成

产物名称	He	N ₂	CO ₂	H ₂ S	RSH	C ₁	C ₂	C ₃	<i>i</i> C ₄	<i>n</i> C ₄	<i>i</i> C ₅	<i>n</i> C ₅	C ₆ ⁺
天然气	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
惰性气体	○	○	○										
酸气			○	○	○								
液化天然气(LNG)		○				○	○	○	○	○			
液化石油气(LPG)							○	○	○	○			
天然汽油								○	○	○	○	○	○
天然气凝液							○	○	○	○	○	○	○
稳定凝析油									○	○	○	○	○

注：○代表有此成分。

(2) 天然气主要组分的物理性质

甲烷 (CH_4)——天然气的主要成分纯甲烷无色, 无味, 比空气轻, 在标准压力 (101.325kPa) 和 15.6℃ 下, $1\text{Sm}^3(\text{GPA})$ ^① 甲烷重 0.6785kg。甲烷具有高的热稳定性和很高的热值 (33904~37668kJ/m³)。

乙烷 (C_2H_6)——在天然气中的含量位居第二。无色气体, 比空气稍重, $1\text{Sm}^3(\text{GPA})$ 重 1.271kg。它的热值在 60345~65946kJ/m³, 其总热值比甲烷高。

丙烷 (C_3H_8)——无色气体, 比空气重, $1\text{Sm}^3(\text{GPA})$ 丙烷重 1.865kg。温度在 20℃ 及压力在 0.85MPa 以上时呈液态。丙烷的热值为 86402.9~93888.9kJ/m³。如果丙烷在原料气中较富, 回收丙烷作为液体燃料, 则具有较大的经济价值。

异丁烷 ($i\text{C}_4\text{H}_{10}$)——是正丁烷的同分异构体, 其物理性质与正丁烷也不相同。在标准压力下, 温度在 -11℃ 以上时呈气态, 温度小于 -11℃ 时呈液态。丁烷的热值为 112294~121685kJ/m³, 为高辛烷值天然汽油组分。

正丁烷 ($n\text{C}_4\text{H}_{10}$)——相对密度比空气大 1 倍, $1\text{Sm}^3(\text{GPA})$ 正丁烷重 2.458kg。在标准压力下, 当温度高于 0.6℃ 时呈气态。在温度为 15℃ 及压力为 0.18MPa 时, 正丁烷呈液态, 其密度为 0.582kg/m³, 作为动力汽油的掺合剂使用。

戊烷 (C_5H_{12})——有两个同分异构体, 即正戊烷和异戊烷。在标准压力下, 正戊烷温度大于 36℃, 异戊烷温度大于 28℃, 均呈气态, 后者为汽油的组成部分。

氮气 (N_2)——氮气是惰性组分。一般天然气都含有氮, 但含量很少超过 30%, 它的存在会降低天然气的热值, 按西方发达国家对商品天然气的最小热值要求, 则应该对氮含量有所限制, 但脱氮需要采用深冷工艺, 且成本较高。因此, 高含氮的天然气经常是不可售的。

硫化氢 (H_2S)——是极臭且有毒的可燃气体。在硫化氢含量为 0.06% 的环境中, 如果人停留 2min 以上时, 将可能导致死亡。因此, 必须从原料气中脱除硫化氢。

二氧化碳 (CO_2)——无色, 具有微弱的气味。 CO_2 不能燃烧, 在管线中二氧化碳的最大含量为 2%。通常只要对热值无太大影响, 可不脱除 CO_2 。

羰基硫 (COS)——羰基硫通常存在于含硫化氢较高的原料气中。它与常用的脱硫溶剂单乙醇胺 (MEA) 反应会形成不可再生的化合物, 这种情况会增加化学溶剂的消耗。

硫醇 (RSH)——硫醇是具有恶臭的化合物, 天然气中主要是甲硫醇和乙硫醇, 常用作城市燃气的加味剂, 但过量的硫醇会损害人体健康。

氦 (He)——属稀有惰性气体, 无色, 无味, 微溶于水, 不燃烧, 也不能助燃。氦是除氢气以外密度最小的气体, 其密度是氢气的 1.98 倍, 与空气的相对密度为 1/7.2。它是最难液化的气体。氦气是贵重的稀有气体, 广泛用于国防、科研领域。天然气中含量甚微, 如果氦含量超过 2‰ (体积比) 具有工业提取价值。

此外, 天然气还含有水或盐水, 也含有固体颗粒, 需要在井口设置分离器而除去。已经发现有些天然气中还含有微量的苯和汞, 在 LNG 装置设计和运行中应予重视, 由于汞对铝制板翅式换热器造成腐蚀, 可用硫饱和的活性炭或分子筛来脱汞。近年来, 还有文献报道, 美国有些天然气中含有砷化合物, 应引起重视。

由于气田开发和生产的需要, 在天然气井中会加入甲醇和防腐剂等化学品, 当气井采气

^① $1\text{Sm}^3(\text{GPA})$ ——根据 GPA (气体加工协会) 规定, 采用 15.6℃ (60°F) 及 101.325kPa 作为天然气体积计量的标准状态条件, 在 15.6℃ 及 101.325kPa 条件下计量的 1m^3 写成 $1\text{Sm}^3(\text{GPA})$ 。

时，这些化学品也会随天然气的开采而进入天然气中，并进入天然气采输系统。

(3) 我国主要气田天然气的组成及各组分的相对含量

组成天然气的组分虽然大同小异，但其相对含量却各不相同。天然气组成分析的数据，常常作为工程师进行地面工程工厂、站场、管道设计的依据。对于含重组分较多的天然气还要回收液烃，潜在可回收的液烃量常用在 1000Sm³(GPA) 气体中所含总液烃量 (m³) 来表达，液烃指 C₂⁺ 或 C₃⁺。表 1-3 为我国主要气田天然气的组成及各组分的相对含量。

表 1-3 我国主要气田天然气的组成及各组分的相对含量 %

气田名称	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	C ₆	C ₇	CO ₂	N ₂	H ₂ S
四川中坝气田	91.00	5.8	1.59	0.13	0.35	0.10	0.28			0.47	0.19	
四川八角场气田	88.19	6.33	2.48	0.36	0.64	0.7				0.26	1.04	
长庆靖边气田	93.89	0.62	0.08	0.01	0.001	0.002				5.14	0.16	0.048
长庆榆林气田	94.31	3.41	0.50	0.08	0.07	0.013	0.041			1.20	0.33	
长庆苏里格气田	92.54	4.5	0.93	0.124	0.161	0.066	0.027	0.083	0.76	0.775		
中原油田气田气	94.42	2.12	0.41	0.15	0.18	0.09	0.09	0.26		1.25		
中原油田凝析气	85.14	5.62	3.41	0.75	1.35	0.54	0.59	0.67		0.84		
海南崖 13-1 气田	83.87	3.83	1.47	0.4	0.38	0.17	0.10	0.11	—	7.65	1.02	70.7(mg/m ³)
新疆塔里木克拉-2 气田	97.93	0.71	0.04	0.02						0.74	0.56	—
青海涩北-2 气田	99.69	0.08	0.02	—	—	—	—	—	—	—	0.2	—
东海平湖凝析气田	77.76	9.74	3.85	1.14	1.19	0.27	0.44	0.34	2.61	1.39	1.27	—
新疆柯克亚凝析气田	82.69	8.14	2.47	0.38	0.84	0.15	0.32	0.2	0.14	0.26	4.44	—
新疆珂河气田	91.46	5.48	1.37	0.35	0.30	0.13	0.08	0.09	0.10		0.66	

1.1.2 天然气的分类

天然气的分类方法繁多，根据不同的分类原则，可将天然气分为不同的类型。在天然气地面工程中常常采用如下三种天然气的分类方式。

(1) 按矿藏特点分类

按矿藏特点可将天然气分为气井气 (gas well gas)、凝析井气 (condensate gas) 和油田气 (oil field gas)。前两者称非伴生气 (unassociated gas)，后者也称为油田伴生气 (associated gas)，简称伴生气。

气井气：即纯气田天然气，气藏中的天然气以气相存在，通过气井开采出来，其中甲烷含量很高。

凝析井气：即凝析气田天然气，在气藏中以气体状态存在，是可回收液烃的气田气，其凝析液主要为凝析油，其次可能还有部分被凝析的水。这类气田的井口流出物除含有甲烷、乙烷外，还含有一定量的丙烷、丁烷及 C₅⁺ 以上的烃类。

油田气：即油田伴生气，它是伴随原油共生，是在油藏中与原油呈相平衡的气体，包括游离气 (气层气) 和溶解在原油中的溶解气，属于湿气。在采油过程中，借助气层气来保持井压，而溶解气则伴随原油采出。油田气采出的特点是：组成和气油比 (gas-oil ratio, GOR，一般为 20~500m³/t 原油) 因产层和开采条件不同而异，不能人为地控制，一般富含丁烷以上组分。油田气随原油一起被采出，由于油气分离条件 (温度和压力) 和分离方式