

# 天然气

## 地面工程

李允 诸林 穆曙光 王治红 编著



石油工业出版社

# 天然气地面工程

李 允 诸 林 穆曙光 王治红 编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书全面论述了天然气工程的基本原理、工艺过程和设计计算,内容包括从井口开采到用户的全部过程。内容丰富,密切联系实际。可供从事天然气生产和管理、处理和加工、集输工作的工程技术人员、大专院校有关专业师生阅读和参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

天然气地面工程/李允等编著.  
北京:石油工业出版社,2001.5  
ISBN 7-5021-3380-1

I.天…  
II.李…  
III.天然气开采  
IV.TE3

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第26350号

石油工业出版社出版  
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)  
北京密云红光印刷厂排版  
石油工业出版社印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米 16开本 17印张 410千字 印1—1500  
2001年5月北京第1版 2001年5月北京第1次印刷  
ISBN 7-5021-3380-1/TE·2532  
定价:48.00元

## 序

近几年来，世界范围内天然气工业呈加速发展的态势，我国天然气工业探明储量更是以年均  $1200 \times 10^8 \text{m}^3$  的速度增长，产量以年均 10% 的速度快速攀升，天然气地面工程包括输气管线和下游配套设施的建设也出现了可喜变化。天然气在一次能源结构中所占比重不断提升。

随着我国西部大开发战略的实施，以西部地区天然气勘探开发所取得的巨大储量成果为基础而启动的西气东输工程，将把西部丰富的天然气源源不断地送往人口稠密、经济发达的长江中下游地区，给东部地区经济发展注入新的活力，同时我国海上天然气也将登陆上海。天然气工业及其相关产业面临空前的发展机遇，也急需相应的技术人才。为配合我国天然气工业的发展，以天然气勘探开发为特色而在国内石油界享有盛誉的西南石油学院，专门组织了由李允教授为首的《天然气地面工程》编写组，总结和吸收了国内外大量天然气地面工程的丰硕成果，融入了作者多年从事该领域工作的学术见解和部分研究成果。全面论述了天然气从井口到用户的工艺过程、原理、设计计算，涉及传统意义上的矿场处理、脱水、脱硫、硫磺回收、轻烃回收、增压与集输等各个环节。

在内容上，该书在国内首次将天然气矿场处理、加工、集输纳入一个体系处理，符合当前科学发展的趋势。书中有 200 余幅图表，在国内第一次全部用 SI 制刊出，符合国家《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》的规定，避免了读者在使用时不断进行单位换算的麻烦，也为在天然气工业中推广使用 SI 制创造了条件，这些图表基本上能满足现场工程技术人员的需要。因此，该书又可作为从事天然气工业的技术人员的必备手册和工具书。

该书内容丰富、新颖、学术性强，具有较高的理论水平和较强的可读性。我郑重地将它推荐给读者，并希望该书的出版能为促进我国天然气工业的长足发展起到积极的作用。

中国工程院院士



2001 年 4 月

ADD 07/06

## 前 言

天然气是一次能源的重要组成部分，是现代生活中的一种清洁燃料。我国天然气资源丰富，一批新的气田和煤层气田相继投入开发。西部大开发的战略又为西气东输，合理应用天然气创造了良好的条件。随着西气东输的实施，必将刺激天然气的勘探开发，从而进一步促进天然气工业的发展和天然气的利用，促进天然气工业的科技进步。

西南石油学院中加中心就天然气处理与加工曾邀请了加拿大专家来华讲学，并派出了有关专业教师赴加学习，就目前加拿大的气体处理和加工进行了比较广泛的学习交流，从而为编写此书创造了有利条件。

全书共分十章，全面介绍了天然气处理与加工过程原理、工艺和设计计算，可供从事天然气生产和管理、处理和加工、集输工作的工程技术人员阅读，也可供大专院校相关专业作为教学用书。

本书由李允教授担任主编，诸林副教授、穆曙光副教授担任副主编。李允、诸林、王治红、穆曙光共同编写。邓良春同志参编了部分内容，郑悦明副教授清绘了全部图件。

在本书编写过程中刘健博士、Ed. Wichert [加] 教授为我们提供了不少原文资料。袁宗明教授在百忙中审读了全部书稿，并提出了宝贵意见和建议，在此一并致以谢忱！

由于编者水平所限，虽尽全力，仍恐挂一漏万，书中难免存在一些缺点和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者  
2000.10

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| <b>1 概论</b>            | 1  |
| 1.1 天然气组成与分类           | 1  |
| 1.1.1 天然气的组成           | 1  |
| 1.1.2 天然气的分类           | 4  |
| 1.2 天然气处理与加工的范畴与产品质量指标 | 5  |
| 1.2.1 天然气处理与加工的范畴      | 5  |
| 1.2.2 天然气产品质量标准        | 6  |
| 1.3 天然气的用途             | 10 |
| <b>2 天然气的性质</b>        | 12 |
| 2.1 天然气的压缩因子           | 16 |
| 2.1.1 对应状态定律           | 16 |
| 2.1.2 压缩因子             | 17 |
| 2.2 密度与相对密度            | 19 |
| 2.2.1 天然气的密度           | 19 |
| 2.2.2 天然气的相对密度         | 19 |
| 2.3 天然气热力学性质           | 20 |
| 2.3.1 天然气的焓            | 20 |
| 2.3.2 天然气的熵            | 20 |
| 2.4 天然气的粘度             | 26 |
| 2.5 天然气的比热容            | 28 |
| 2.6 轻组分烃类的蒸气压          | 29 |
| 2.7 天然气的热值             | 31 |
| <b>3 天然气体系的相平衡</b>     | 33 |
| 3.1 天然气的相行为            | 33 |
| 3.1.1 相及相态种类           | 33 |
| 3.1.2 天然气相态性质          | 33 |
| 3.2 气液平衡数据             | 35 |
| 3.2.1 相平衡常数            | 36 |
| 3.2.2 理想平衡常数           | 36 |
| 3.2.3 实际平衡常数           | 36 |
| 3.2.4 平衡常数的计算          | 37 |
| 3.3 气液相平衡计算            | 41 |
| 3.3.1 相平衡计算类型          | 41 |
| 3.3.2 相平衡计算中的物料平衡      | 41 |
| 3.3.3 相平衡计算中的热力学平衡     | 42 |
| 3.3.4 常用的相平衡计算模型       | 42 |

|       |                  |     |
|-------|------------------|-----|
| 3.4   | 常用状态方程           | 44  |
| 3.4.1 | SRK 方程           | 44  |
| 3.4.2 | PR 方程            | 46  |
| 3.5   | 多级平衡过程           | 48  |
| 3.5.1 | 多组分精馏过程          | 48  |
| 3.5.2 | 多组分精馏的简捷计算       | 49  |
| 3.5.3 | 多组分吸收与蒸出过程       | 51  |
| 3.5.4 | 多组分物理吸收和蒸出的简捷计算法 | 52  |
| 4     | 烃水体系             | 56  |
| 4.1   | 天然气含水量           | 56  |
| 4.1.1 | 天然气含水量测定方法       | 56  |
| 4.1.2 | 天然气含水量的估算        | 58  |
| 4.2   | 烃水体系平衡计算         | 65  |
| 4.2.1 | 简化计算法            | 65  |
| 4.2.2 | 多组分烃—水系统三相平衡电算模型 | 66  |
| 4.3   | 天然气水合物           | 67  |
| 4.3.1 | 天然气水合物的结构        | 67  |
| 4.3.2 | 天然气水合物生成条件的预测    | 68  |
| 4.4   | 天然气水合物的防止措施      | 78  |
| 4.4.1 | 加热保温法            | 79  |
| 4.4.2 | 化学抑制剂法           | 80  |
| 4.4.3 | 脱水法              | 84  |
| 5     | 天然气脱水            | 85  |
| 5.1   | 溶剂吸收脱水工艺         | 86  |
| 5.1.1 | TEG 法工艺流程        | 88  |
| 5.1.2 | TEG 法脱水的工艺计算与操作  | 91  |
| 5.2   | 固体吸附法脱水工艺        | 104 |
| 5.2.1 | 天然气工业中常用吸附剂      | 105 |
| 5.2.2 | 吸附法脱水工艺流程        | 106 |
| 5.2.3 | 固定床吸附脱水工艺计算      | 107 |
| 5.3   | 其它脱水方法           | 114 |
| 5.3.1 | 氯化钙法             | 114 |
| 5.3.2 | 冷冻脱水法            | 115 |
| 6     | 天然气井场处理          | 116 |
| 6.1   | 天然气开采与取样分析       | 116 |
| 6.1.1 | 气井设备             | 116 |
| 6.1.2 | 气井产能试井           | 116 |
| 6.1.3 | 天然气取样与分析         | 118 |
| 6.2   | 天然气井场分离          | 120 |
| 6.2.1 | 分离方式和压力选择        | 120 |

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 6.2.2 | 两相分离器的基本类型 .....  | 121 |
| 6.2.3 | 两相分离器的结构 .....    | 124 |
| 6.2.4 | 分离器类型的选择 .....    | 125 |
| 6.2.5 | 两相分离器尺寸的确定 .....  | 126 |
| 6.2.6 | 油气水三相分离 .....     | 131 |
| 6.3   | 原油稳定 .....        | 133 |
| 6.3.1 | 原油稳定工艺 .....      | 133 |
| 6.3.2 | 原油稳定工艺计算 .....    | 135 |
| 6.4   | 流体计量装置 .....      | 137 |
| 6.4.1 | 孔板流量计 .....       | 137 |
| 6.4.2 | 双转子流量计 .....      | 138 |
| 6.4.3 | 旋涡流量计 .....       | 139 |
| 6.4.4 | 气体涡轮流量计 .....     | 139 |
| 6.5   | 井场工艺流程 .....      | 140 |
| 6.5.1 | 井场装置 .....        | 140 |
| 6.5.2 | 集气站工艺流程 .....     | 141 |
| 7     | 天然气集输 .....       | 145 |
| 7.1   | 集输管线分类 .....      | 145 |
| 7.1.1 | 集输管线分类 .....      | 145 |
| 7.1.2 | 集气管网类型 .....      | 145 |
| 7.2   | 流体流动理论 .....      | 146 |
| 7.2.1 | 流体流动类型 .....      | 146 |
| 7.2.2 | 流动的基本方程 .....     | 147 |
| 7.2.3 | 水力摩阻系数 .....      | 148 |
| 7.2.4 | 局部阻力损失 .....      | 149 |
| 7.3   | 单相流管线 .....       | 151 |
| 7.3.1 | 液体在管道内的流动 .....   | 151 |
| 7.3.2 | 气体在管道内的流动 .....   | 152 |
| 7.3.3 | 管路计算 .....        | 156 |
| 7.4   | 气液两相流管线 .....     | 158 |
| 7.4.1 | 两相流动类型 .....      | 158 |
| 7.4.2 | 两相流的处理方法 .....    | 159 |
| 7.4.3 | 两相流压降的计算 .....    | 161 |
| 7.4.4 | 液体滞留量 .....       | 167 |
| 7.5   | 天然气增压 .....       | 169 |
| 7.5.1 | 压缩机分类 .....       | 169 |
| 7.5.2 | 压缩机及其驱动机的选用 ..... | 170 |
| 7.5.3 | 压缩机的热力计算 .....    | 173 |
| 7.5.4 | 常用压缩机 .....       | 179 |
| 7.6   | 常用的管子、管件和阀门 ..... | 182 |

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 7.6.1 | 管子、管件和阀门的标准化 .....         | 182 |
| 7.6.2 | 常用的管子和管件 .....             | 184 |
| 7.6.3 | 阀门 .....                   | 184 |
| 7.7   | 集输管道的防腐 .....              | 186 |
| 7.7.1 | 集输管道的腐蚀 .....              | 186 |
| 7.7.2 | 集输管道的防腐 .....              | 187 |
| 8     | 轻烃回收 .....                 | 190 |
| 8.1   | 轻烃回收方法 .....               | 190 |
| 8.2   | 制冷方法 .....                 | 191 |
| 8.2.1 | 蒸气压缩式制冷 .....              | 191 |
| 8.2.2 | 节流膨胀 .....                 | 194 |
| 8.2.3 | 气体作外功的绝热膨胀 .....           | 196 |
| 8.2.4 | 气体向外传热的膨胀过程 .....          | 198 |
| 8.3   | 油吸收法 .....                 | 200 |
| 8.4   | 低温分离法工艺 .....              | 202 |
| 8.4.1 | 冷剂制冷工艺 .....               | 203 |
| 8.4.2 | J-T 膨胀工艺 .....             | 206 |
| 8.4.3 | 膨胀制冷工艺 .....               | 207 |
| 8.4.4 | 复合制冷工艺 .....               | 208 |
| 8.5   | 轻烃回收工艺方法的选择 .....          | 212 |
| 8.6   | 轻烃分馏 .....                 | 214 |
| 8.6.1 | 燃料型轻烃分馏 .....              | 215 |
| 8.6.2 | 燃料—溶剂油型轻烃分馏 .....          | 215 |
| 8.6.3 | 石油化工型轻烃分馏 .....            | 216 |
| 8.6.4 | 分馏稳定系统工艺参数 .....           | 217 |
| 8.6.5 | CO <sub>2</sub> 冻堵问题 ..... | 218 |
| 9     | 酸性天然气脱硫 .....              | 220 |
| 9.1   | 天然气净化方法 .....              | 220 |
| 9.2   | 间歇法脱硫工艺 .....              | 222 |
| 9.2.1 | 海绵铁工艺 .....                | 222 |
| 9.2.2 | 浆法脱硫 .....                 | 223 |
| 9.3   | 胺法脱硫 .....                 | 224 |
| 9.3.1 | 醇胺性质 .....                 | 224 |
| 9.3.2 | 过程的化学原理 .....              | 224 |
| 9.3.3 | 工艺流程 .....                 | 227 |
| 9.3.4 | 醇胺溶液酸气负荷和循环量的计算 .....      | 228 |
| 9.4   | 砒胺法 .....                  | 230 |
| 9.4.1 | 砒胺法吸收溶液的组成 .....           | 230 |
| 9.4.2 | 砒胺法的主要优缺点 .....            | 230 |
| 9.5   | 胺系统设计考虑与操作 .....           | 231 |

|        |                   |     |
|--------|-------------------|-----|
| 9.5.1  | 胺系统设计的一般考虑 .....  | 231 |
| 9.5.2  | 主要运行参数 .....      | 234 |
| 9.5.3  | 胺法的一般操作问题 .....   | 236 |
| 10     | <b>酸气处理</b> ..... | 240 |
| 10.1   | 硫回收 .....         | 240 |
| 10.1.1 | 硫的性质 .....        | 240 |
| 10.1.2 | 硫回收方法与方法选择 .....  | 241 |
| 10.1.3 | 克劳斯硫回收原理 .....    | 246 |
| 10.1.4 | 克劳斯法硫回收工艺流程 ..... | 247 |
| 10.1.5 | 克劳斯硫回收工艺计算 .....  | 249 |
| 10.2   | 酸气回注 .....        | 257 |
|        | <b>参考文献</b> ..... | 260 |

# 1 概 论

## 1.1 天然气组成与分类

广义的天然气是指在自然界中天然生成的气体化合物。而就能源工业而言,天然气也就是气态的石油,是专指岩石圈中生成并蕴藏的以气态烷烃混合物为主的可燃性气体,有时为纯气态气藏,有时与石油伴生,并通过油气井开采出来,是一种洁净、方便、高效的优质能源,也是优良的化工原料。具有明显的社会效益、环境效益和经济效益。

### 1.1.1 天然气的组成

#### 1.1.1.1 天然气的组分

石油和天然气都是以烃类为主,其组成从甲烷( $\text{CH}_4$ )到33个碳原子的石蜡烃和22个或更多碳原子的芳香烃。石油主要是含4个或更多碳原子的液烃,而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、低粘度的无色流体。天然气是一种可燃气体,它与5%~15%的空气混合易燃,具有很高含热量。天然气的化学组成超过100余种。在天然气组成中,甲烷( $\text{CH}_4$ )占有绝大部分,乙烷( $\text{C}_2\text{H}_6$ )、丁烷( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )和戊烷( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ )含量不多,庚烷以上( $\text{C}_7^+$ )的烷烃含量极少,另外,还含有少量非烃类气体,如硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )、二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、一氧化碳( $\text{CO}$ )、氮( $\text{N}_2$ )、氢( $\text{H}_2$ )和水蒸气( $\text{H}_2\text{O}$ )以及硫醇( $\text{RSH}$ )<sup>\*</sup>、硫醚( $\text{RSR}'$ )、二硫化碳( $\text{CS}_2$ )、羰基硫(或硫化羰或氧硫化碳)( $\text{COS}$ )、噻吩( $\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$ )等有机硫化物,有时也含有微量的稀有气体,如氦( $\text{He}$ )、氩( $\text{Ar}$ )等。在大多数天然气中还存在着痕量的不饱和烃,如乙烯( $\text{C}_2\text{H}_4$ )、丙烯( $\text{C}_3\text{H}_6$ )、丁烯( $\text{C}_4\text{H}_8$ ),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列出了井口天然气组分。

按GPA(气体加工协会)分类,天然气及其有关产物的组分如表1-2。

表1-1 井口天然气的组分

| 分 类  | 组 分                 |         | 分 子 式                      | 缩 写            |
|------|---------------------|---------|----------------------------|----------------|
| 烃 类  | Methane             | 甲烷      | $\text{CH}_4$              | $\text{C}_1$   |
|      | Ethane              | 乙烷      | $\text{C}_2\text{H}_6$     | $\text{C}_2$   |
|      | Propane             | 丙烷      | $\text{C}_3\text{H}_8$     | $\text{C}_3$   |
|      | i-Butane            | 异丁烷     | $\text{iC}_4\text{H}_{10}$ | $\text{iC}_4$  |
|      | n-Butane            | 正丁烷     | $\text{nC}_4\text{H}_{10}$ | $\text{nC}_4$  |
|      | i-Pentane           | 异戊烷     | $\text{iC}_5\text{H}_{12}$ | $\text{iC}_5$  |
|      | n-Pentane           | 正戊烷     | $\text{nC}_5\text{H}_{12}$ | $\text{nC}_5$  |
|      | Cyclopentane        | 环戊烷     | $\text{C}_5\text{H}_{10}$  |                |
| 惰性气体 | Hexanes and heavier | 己烷和更高组分 |                            | $\text{C}_6^+$ |
|      | Nitrogen            | 氮       | $\text{N}_2$               | $\text{N}_2$   |

\* R——代表烷基。

续表

| 分 类  | 组 分                  |        | 分 子 式              | 缩 写              |
|------|----------------------|--------|--------------------|------------------|
| 惰性气体 | Helium               | 氦      | He                 |                  |
|      | Argon                | 氩      | Ar                 |                  |
|      | Hydrogen             | 氢      | H <sub>2</sub>     | H <sub>2</sub>   |
|      | Oxygen               | 氧      | O <sub>2</sub>     | O <sub>2</sub>   |
| 酸 气  | Hydrogen Sulfide     | 硫化氢    | H <sub>2</sub> S   | H <sub>2</sub> S |
|      | Carbon Dioxide       | 二氧化碳   | CO <sub>2</sub>    | CO <sub>2</sub>  |
| 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 <sub>2</sub> O   |                  |
| 液 体  | Free water or brine  | 自由水或卤水 |                    |                  |
|      | Corrosion inhibitors | 腐蚀防护剂  |                    |                  |
|      | Methanol             | 甲醇     | CH <sub>3</sub> OH | MeOH             |
| 固 体  | Millscale and rust   | 铁锈     |                    |                  |
|      | Iron sulfide         | 硫化亚铁   | FeS                |                  |
|      | Reservoir fines      | 储层颗粒物  |                    |                  |

表 1-2 天然气及其有关产物的化学组成

| 产物名称        | He | N <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S | RSH | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | iC <sub>4</sub> | nC <sub>4</sub> | iC <sub>5</sub> | nC <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> <sup>+</sup> |
|-------------|----|----------------|-----------------|------------------|-----|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|
| 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       |    |                |                 |                  |     |                | ✓              | ✓              | ✓               | ✓               | ✓               | ✓               | ✓                           |
| 稳定后凝析油      |    |                |                 |                  |     |                |                |                | ✓               | ✓               | ✓               | ✓               | ✓                           |

天然气中各种成分对天然气产生的影响各不相同。

甲烷 (CH<sub>4</sub>) —— 天然气的主要部分：纯甲烷无色，稍有蒜味。它比空气轻，在标准压力 (101.325kPa\*) 和 15℃ 下，1Sm<sup>3</sup> (GPA)\*\* 甲烷重 0.6785kg。甲烷具有高的热稳定性和很高的热值含量 (33904~37668kJ/m<sup>3</sup>)。

乙烷 (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) —— 在天然气中的含量位居第二：无色气体，比空气稍重，1Sm<sup>3</sup> (GPA) 乙烷重 1.271kg。它的热值在 60345~65946kJ/m<sup>3</sup>。它的总热值比甲烷高。

\* 本书中在 kPa 后未注明表压者，均指绝对压力，有时也标出 kPa (abs) 或 kPa (绝)。

\*\* Sm<sup>3</sup> (GPA)：101.325kPa、15℃ 下计量的气体体积，也是 ICAO (国际民用航空组织) 标准。

丙烷 ( $C_3H_8$ ) ——无色气体, 比空气重,  $1Sm^3$  (GPA) 丙烷重 1.865kg。温度在  $20^\circ C$  及压力在 0.85MPa 以上时, 呈液态。丙烷的热值为  $86402.9 \sim 93888.9 kJ/m^3$ 。它是商品管道气的重要组成部分。然而, 如果丙烷在原料气中较富, 达到 2.0% 或更多, 那么回收丙烷作为液体燃料, 则具有较大的经济价值。

异丁烷 ( $iC_4H_{10}$ ) ——是正丁烷的同分异构体, 其物理性质与正丁烷也不一样。在标准压力下, 当温度在  $-11^\circ C$  以下时呈气态, 温度更低时才呈液态。丁烷的热值为  $112294 \sim 121685 kJ/m^3$ 。经常以液体方式提取出来, 用来作为高辛烷值天然汽油的成分。

正丁烷 ( $nC_4H_{10}$ ) ——相对密度比空气大 1 倍,  $1Sm^3$  (GPA) 正丁烷重 2.458kg。在标准压力下, 当温度高于  $0.6^\circ C$  时, 纯正丁烷才呈气态。在温度为  $15^\circ C$  及压力为 0.18MPa 时, 正丁烷呈密度为  $0.582 kg/m^3$  的液体。其经常以液体形式从天然气中提取出来, 通常被当作动力汽油的掺合剂使用。

戊烷 ( $C_5H_{12}$ ) ——与丁烷一样有两个同分异构体, 即正戊烷和异戊烷。在标准压力下, 正戊烷在  $36^\circ C$  以上, 异戊烷在  $28^\circ C$  以上时方为气体。后者为汽油的组成部分, 在凝析气藏中有较高含量的该类组分, 在商品管道气中含量极微。当进处理装置时, 主要是以液体形式存在。

氮气 ( $N_2$ ) ——氮气是一种完全惰性的组分。一般天然气都含有氮, 但含量很少超过 30%, 其存在能减少天然气的热值, 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, 但脱氮需要费用昂贵的深冷法, 因此, 高含氮的天然气经常是不可售的。

硫化氢 ( $H_2S$ ) ——是含硫化物中的主要组成部分, 是极臭且有毒的可燃气体。硫化氢是天然气中的一种酸气。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, 必须从原料气中依靠脱硫过程脱除硫化氢。

二氧化碳 ( $CO_2$ ) ——与  $H_2S$  一样,  $CO_2$  也是一种酸气, 无色, 具有微弱的气味。但它并不是那么不希望存在的。 $CO_2$  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时可不脱除  $CO_2$ 。

羰基硫 ( $COS$ ) ——羰基硫通常存在于含硫化氢较高的原料气中。通常用 ppm 为单位表示它的含量。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 (甲硫醇或乙硫醇) ——硫醇是具恶臭的化合物, 常用作天然气的加味剂, 但过量的硫醇会对人造成损害。

氦 ( $He$ ) ——质谱分析揭示许多天然气中都含有氦, 它属稀有惰性气体, 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, 天然气中含量甚微, 不超过 1% (体积比)。天然气中如果氦含量超过 0.1% (体积比) 时, 就有提氦的工业价值。

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。有报道表明, 有些天然气中还含有微量的汞, 它虽然不引起加工问题, 但会对换热器中的铝制器材造成腐蚀, 可用硫饱和的活性炭或分子筛来脱汞。近年来, 还有文献表明, 在美国有些天然气中含有砷化合物, 应引起重视。

由于开采的需要, 在油气井中会加入甲醇和腐蚀防护剂, 这些也会随天然气的开采而进

入气体中。

### 1.1.1.2 天然气的组成

组成天然气的组分是大同小异的，但其相对含量却各不相同。天然气分析的典型组成数据如表 1-3 所示，这些数据常常可以作为设计工程师进行地面处理装备的设计数据。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  $1000\text{Sm}^3$  (GPA) 气体中所含的总液烃量 ( $\text{m}^3$ ) 来表达，液烃指  $\text{C}_2^+$  或  $\text{C}_3^+$ ，有关计算请见第 8 章。

表 1-3 典型的天然气组成 (摩尔百分数)

| 组 分             | 天 然 气 1 | 天 然 气 2 | 凝 液    | 分离器气相  |
|-----------------|---------|---------|--------|--------|
| $\text{N}_2$    | 0.51    | 4.85    | —      | —      |
| $\text{CO}_2$   | 0.67    | 0.24    | 0.47   | —      |
| $\text{C}_1$    | 91.94   | 83.74   | 82.13  | 59.04  |
| $\text{C}_2$    | 3.11    | 5.68    | 6.37   | 10.42  |
| $\text{C}_3$    | 1.26    | 3.47    | 4.09   | 15.12  |
| iC <sub>4</sub> | 0.37    | 0.30    | 0.50   | 2.39   |
| nC <sub>4</sub> | 0.34    | 1.01    | 1.85   | 7.33   |
| iC <sub>5</sub> | 0.18    | 0.18    | 0.55   | 2.00   |
| nC <sub>5</sub> | 0.11    | 0.19    | 0.67   | 1.72   |
| $\text{C}_6$    | 0.16    | 0.09    | 1.03   | 1.18   |
| $\text{C}_7^+$  | 1.35    | 0.25    | 2.34   | 0.80   |
| $\Sigma$        | 100.00  | 100.00  | 100.00 | 100.00 |

### 1.1.2 天然气的分类

依据不同的原则，有三种天然气的分类方式。

#### 1.1.2.1 按矿藏特点分类

按矿藏特点的不同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)。前两者合称非伴生气 (unassociated gas)，后者也称为油田伴生气 (associated gas)。

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，是具有高含量可回收烃液的气田气，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  $\text{C}_5^+$  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接触的气体，包括游离气 (气层气) 和溶解在原油中的溶解气，从组成上亦认为属于湿气。在油井开采情况中，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：组成和油气比 (gas-oil ratio, GOR，一般为  $20\sim 500\text{ m}^3/\text{t}_{\text{原油}}$ ) 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。当油田气随原油一起被开采到地面后，由于油气分离条件 (温度和压力) 和分离方式 (一级或二级) 不同，以及受气液平衡规律的限制，气相中除含有甲烷、乙烷、丙烷、丁烷外，还含有戊烷、己烷，甚至  $\text{C}_9$ 、 $\text{C}_{10}$  组分。液相中除含有重

烃外，仍含有一定量的丁烷、丙烷，甚至甲烷。与此同时，为了降低原油的饱和蒸气压，防止原油在储运过程中的挥发耗损，油田上往往采用各种原油稳定工艺回收原油中的  $C_1 \sim C_5$  组分，回收回来的气体，称为原油稳定气，简称原稳气。

#### 1.1.2.2 按天然气的烃类组成分类

按天然气的烃类组成（即按天然气中液烃含量）的多少来分类，可分为干气、湿气或贫气、富气。

##### (1) $C_5$ 界定法——干、湿气的划分。

根据天然气中  $C_5$  以上的烃液含量的多少，用  $C_5$  界定法划分为干气（dry gas）和湿气（wet gas）。

干气：指在  $1\text{Sm}^3$  (CHN)\* 井口流出物中， $C_5$  以上烃液含量低于  $13.5\text{cm}^3$  的天然气。

湿气：指在  $1\text{Sm}^3$  (CHN) 井口流出物中， $C_5$  以上烃液含量高于  $13.5\text{cm}^3$  的天然气。

##### (2) $C_3$ 界定法——贫、富气的划分。

根据天然气中  $C_3$  以上烃类液体的含量多少，用  $C_3$  界定法划分为贫气（lean gas）和富气（rich gas）。

贫气：指在  $1\text{Sm}^3$  (CHN) 井口流出物中， $C_3$  以上烃类液体含量低于  $94\text{cm}^3$  的天然气。

富气：指在  $1\text{Sm}^3$  (CHN) 井口流出物中， $C_3$  以上烃类液体含量高于  $94\text{cm}^3$  的天然气。

在北美地区的文献中定义两种气体为贫气：①在天然气加工装置回收天然气液体之后的剩余残气；②几乎不含或无可回收天然气液体的未加工气体。而富气指适合作天然气加工原料并能从中提取产品的气体，这与上述的定义无原则上区别。相反，干气和湿气包括两方面的内容：一则是针对天然气是否含有水分来划分为干、湿气；二则是与贫、富气的划分相类似。因此在阅读外文文献时要特别注意，不要造成歧义。

#### 1.1.2.3 按酸气含量分类

按酸气（acid gas，指  $\text{CO}_2$  和硫化物）含量多少，天然气可分为酸性天然气和洁气。

酸性天然气（sour gas）指含有显著量的硫化物和  $\text{CO}_2$  等酸气，这类气体必须经处理后才能达到管输标准或商品气气质指标的天然气。

洁气（sweet gas）是指硫化物含量甚微或根本不含的气体，它不需净化就可外输和利用。

由此可见酸性天然气和洁气的划分采取了模糊的判据，而具体的数值指标并无统一的标准。在我国，由于对  $\text{CO}_2$  的净化处理要求不严格，而一般采用西南油气田分公司的管输指标即硫含量不高于  $20\text{mg}/\text{Sm}^3$  (CHN) 作为界定指标，把含硫量高于  $20\text{mg}/\text{Sm}^3$  (CHN) 的天然气称为酸性天然气，否则为洁气。把净化后达到管输要求的天然气称为净化气。

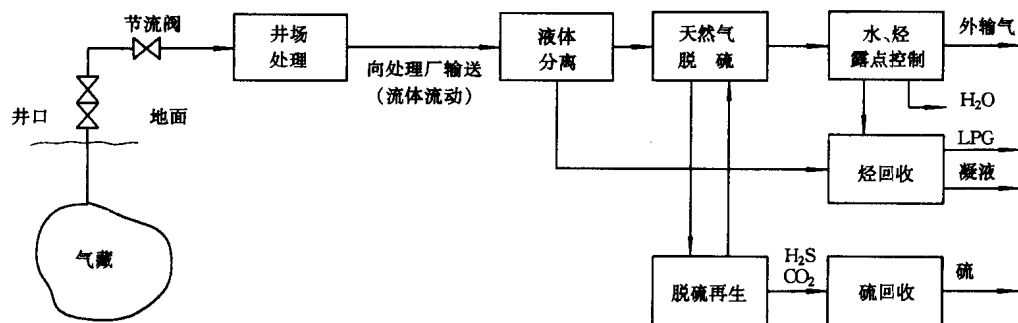
## 1.2 天然气处理与加工的范畴与产品质量指标

### 1.2.1 天然气处理与加工的范畴

天然气是在岩石圈中生成的，必须通过油气井开采出来。所谓天然气处理与加工就是指从井口到输气管网的全部过程。一般经过采气管线、井场分离、集气管线、净化处理、轻烃

\*  $\text{Sm}^3$  (CHN): 101.325kPa、20℃下计量的气体体积，中国气体计量采用的标准，有时又称基方。

处理水饱和的、未加工的、酸性的富气的步骤可以用图 1-1 大概表示出来。原料天然气经过井筒从储层中输送到地面，然后减压到集输管线的操作压力（一般低于 10MPa）。未处理的天然气在减压时，一些饱和水会冷凝出来。类似地，当天然气在输送到加工厂时，如果距离超过 1km，天然气的温度会下降，水也会冷凝出来。这些过程都有助于水合物形成，堵塞输气管线。因此，在井口位置不得不使用水合物防止措施。可把天然气加热到水露点之上，或通过脱水过程除去水。然后，天然气经过管线输送到气体加工厂，流体流动一般为两相。



在进入加工厂时，天然气首先进入一个分离器，让液体分离出来。接着原料进入脱硫单元，通过脱硫溶剂脱除原料气中的酸气，常用的脱硫溶剂有单乙醇胺（MEA）、二乙醇胺（DEA）、砵胺溶液和其它的脱硫剂。从脱硫单元出来的脱了硫的天然气仍然含有饱和水，并且仍含有相当多的重烃，它们都必须脱除，以满足水露点和烃露点标准。这需要通过几个过程来完成。例如，原料可以通过制冷过程降低水露点和烃露点，使水和重烃冷凝出来。

来自分离设备和烃露点控制设备的液烃被送到精馏设备，把液烃分离成单组分化合物或目标产品。

### 1.2.2 天然气产品质量标准

对于天然气加工后所达到的气质指标，各国各地区都不尽相同，这是源于天然气资源、矿场处理的技术水平、供销状况及有关的经济政策等各不相同所造成的。由于化工生产所需的原料气对有害杂质特别是硫及其化合物的含量要求比较严格（硫含量一般为 $1\sim 2\text{mg}/\text{m}^3$ ），通常需经二次处理才能符合要求，而且这部分气量相对较小，故在制定商品天然气气质指标时往往以符合燃料气要求为依据。主要从保证天然气在输配系统中的安全运行，减少设备

管线的腐蚀，满足环境保护和卫生要求以及保持良好的燃烧性能等方面对商品天然气的质量作出严格的要求。随着天然气在能源结构中的比例上升，输气管道压力的升高，距离的增长，对气质的要求也愈来愈严格。在西方发达国家，除了有管输气质指标外，往往还必须根据用户与公司签订的销售合同条款来实行质量标准规定，以满足用户的需要。

商品天然气无规定的化学组成，但有一系列的具体技术指标要求，其主要技术指标如下。

热值 (heat value)：是指单位体积或质量天然气的高发热量或低发热量。为了使天然气用户能恰当地确定其加热设备，确定热值是必要的。天然气质量的一个重要指标就是沃泊数 (Wobbe number)，它是天然气最高热值与相对密度的平方根的比值。

含硫量 (sulfur content)：常以  $\text{H}_2\text{S}$  含量或总硫 ( $\text{H}_2\text{S}$  及其它形态的硫) 含量来表示。为了控制天然气的腐蚀性和出于对人类自身健康和安全的考虑，一般而言， $\text{H}_2\text{S}$  含量不高于  $6\sim24\text{mg}/\text{m}^3$ 。油田气由于往往不含硫，故一般不进行脱硫处理。

烃露点 (hydrocarbon dew point)：即在一定压力下从天然气中开始凝结出第一滴液烃时的温度，它与天然气的压力和组成有关，微量重烃的影响比常量轻组分的影响更突出。为防止天然气在输配管线中有液烃凝结并在管道低洼处积液，影响正常输气甚至堵塞管线，目前许多国家都对商品天然气规定了脱油除尘的要求，规定了在一定压力条件下天然气的最高允许烃露点。

水露点 (water dew point) 与水蒸气含量：在地层温度和压力条件下，水在天然气中通常以饱和水蒸气的形式存在，水蒸气的存在往往给天然气的集输和加工带来一系列的危害，因此，规定天然气的水蒸气含量是十分必要的。天然气的含水量以单位体积天然气中所含水蒸气量的多少来表示，有时也用天然气的水露点来表示。水露点指在一定压力条件下，天然气与液态水平衡时（此时，天然气的含水量为最大含水量，即饱和含水量）所对应的温度。一般要求天然气水露点比输气管线可能达到的最低温度还低  $5\sim6^\circ\text{C}$ 。

表 1-4 列出了我国天然气质量的行业标准 (SY7514-88)。该标准适用于油气田经矿场分离和处理后的管道输至用户，并按产品类别分别作为民用燃料、工业原料和工业燃料使用。

表 1-4 天然气气质标准

| 项 目                                           |     | 质 量 标 准    |      |        |      | 试验方法        |
|-----------------------------------------------|-----|------------|------|--------|------|-------------|
|                                               |     | I          | II   | III    | IV   |             |
| 高发热值<br>MJ/m <sup>3</sup>                     | A 组 | >31.4      |      |        |      | GB11062—89  |
|                                               | B 组 | 14.65~31.4 |      |        |      |             |
| 总硫（以硫计）含量<br>mg/Sm <sup>3</sup> （CHN）         |     | ≤150       | ≤270 | ≤480   | >480 | GB11061—89  |
| H <sub>2</sub> S 含量, mg/Sm <sup>3</sup> （CHN） |     | ≤6         | ≤20  |        |      | GB110602—89 |
|                                               |     |            |      | 实测     | 实测   | GB110601—89 |
| CO <sub>2</sub> 含量, %（V）                      |     | ≤3. 0      |      | —      |      | SY7506—89   |
| 水 分                                           |     | 无 游 离 水    |      | 机械分离目测 |      |             |