

石油石化职业技能培训教程

SHIYOU SHIHUA ZHIYE JINENG PEIXUN JIAOCHENG

# 天然气净化分析工

TIANRANQIJINGHUA FENXIGONG

中国石油天然气集团公司职业技能鉴定指导中心 编



石油工业出版社

石油石化职业技能培训教程

# 天然气净化分析工

中国石油天然气集团公司职业技能鉴定指导中心 编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书是由中国石油天然气集团公司职业技能鉴定指导中心,依据天然气净化分析工职业资格等级标准,统一组织编写的《石油石化职业技能培训教程》中的一本。书中包括天然气净化分析工应掌握的基础知识、专业知识及其相关知识,介绍了天然气净化基础知识、常用分析仪器和分析方法,以及采样、数据处理、化验室建设等内容。

本书语言通俗易懂,理论知识重点突出,实用性和可操作性较强,是天然气净化分析工职业技能培训的必备教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

天然气净化分析工/中国石油天然气集团公司职业技能鉴定指导中心编. —北京:石油工业出版社,2012.11

(石油石化职业技能培训教程)

ISBN 978-7-5021-9283-9

I. 天…

II. 中…

III. ①天然气净化-技术培训-教材

②天然气分析-技术培训-教材

IV. TE64

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第214058号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523585 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2012年11月第1版 2012年11月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:34.25

字数:874千字

---

定价:60.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

# 《石油石化职业技能培训教程》

## 编 委 会

主 任：孙金瑜

副 主 任：向守源 丁传峰

委 员：（以姓氏笔画为序）

仇国光 王子云 王奎一 申 哲 刘小明

孙春梅 纪安德 何 波 宋玉权 张建国

李世效 李孟州 李禄松 杨明亮 杨峰亭

杨静芬 哈志凌 赵宝红 商桂秋 崔贵维

职丽枫 蔡激扬

# 前 言

随着企业产业升级、装备技术更新改造步伐不断加快，对从业人员的素质和技能提出了新的更高要求。为适应经济发展方式转变和“四新”技术变化要求，满足员工培训、鉴定工作的需要，中国石油天然气集团公司职业技能鉴定指导中心坚持动态开发修订技能培训教材和鉴定题库制度，组织力量对“十五”期间开发的第一批职业技能培训教程中的采油工等部分从业人数多的主体工种进行了修订。

本批教程按工种编写，每个工种一本，以新修订颁发的石油石化行业职业资格等级标准为依据，内容范围与鉴定题库基本一致，与公开出版的试题集配套使用。既可用于职业技能鉴定前培训，也可用于员工岗位技术培训和自学提高。

天然气净化分析工职业技能培训教程由西南油气田公司组织编写，傅敬强、唐龙、周廷良任主编，参加编写的人员有任标、杜晓红；参加审定的人员有西南油气田公司唐荣武、岑岭、陈邦海、付适、曾刚、钱友美，长庆油田公司任骏，青海油田公司徐含琳。

由于编者水平有限，书中错误、疏漏之处请广大读者提出宝贵意见。

编者

## 目 录

<b>第一章 天然气净化基础知识</b> .....	1
第一节 天然气的定义和分类.....	1
第二节 天然气的组成及物理性质.....	3
第三节 商品天然气质量指标 .....	12
第四节 天然气净化的目的和意义 .....	14
第五节 天然气脱硫 .....	15
第六节 天然气脱水 .....	27
第七节 硫黄回收和尾气处理 .....	34
思考题 .....	42
<b>第二章 化学基础知识</b> .....	43
第一节 物质结构基础 .....	43
第二节 物质基本概念 .....	47
第三节 无机化合物 .....	51
第四节 卤族元素 .....	53
第五节 氧族元素 .....	56
第六节 氮族元素 .....	59
第七节 碳族元素 .....	62
第八节 金属元素 .....	64
第九节 电离平衡 .....	71
第十节 化学反应速率和化学平衡 .....	77
第十一节 有机化学基础 .....	82
第十二节 化学热力学基础 .....	87
第十三节 化工原理基础 .....	89
思考题.....	117
<b>第三章 常用玻璃仪器和常用电器设备</b> .....	118
第一节 化验室常用的玻璃仪器及石英制品.....	118
第二节 化验室使用的非玻璃器皿与器材.....	124
第三节 分析器具的洗涤和处理.....	133
第四节 常用电器设备.....	142
思考题.....	152
<b>第四章 天平</b> .....	154
第一节 天平的分类.....	154
第二节 天平的计量性能和选用.....	155
第三节 电子天平.....	157

第四节	部分机械加码分析天平	159
第五节	单盘分析天平	162
第六节	台秤	164
第七节	天平的使用规则和称量方法	165
	思考题	166
<b>第五章</b>	<b>分析化学中的计量单位、实验数据处理</b>	<b>167</b>
第一节	计量单位	167
第二节	误差的概念及分类	169
第三节	有效数字及其运算规则	175
第四节	数据处理	178
第五节	提高分析结果准确度的方法	189
	思考题	190
<b>第六章</b>	<b>样品采集</b>	<b>191</b>
第一节	概述	191
第二节	采集天然气样品	192
第三节	采集水样	197
第四节	采集硫黄及其他化工样品	202
	思考题	211
<b>第七章</b>	<b>溶液及其配制</b>	<b>212</b>
第一节	实验室用水	212
第二节	化学试剂	222
第三节	溶液的基本知识	225
第四节	一般溶液的配制	233
第五节	标准滴定溶液的配制与标定	237
	思考题	243
<b>第八章</b>	<b>滴定分析法</b>	<b>244</b>
第一节	滴定分析的原理	244
第二节	滴定分析的基本操作	247
第三节	酸碱滴定法	257
第四节	络合滴定法	278
第五节	氧化还原滴定法	286
第六节	沉淀滴定法	302
	思考题	309
<b>第九章</b>	<b>重量分析法</b>	<b>310</b>
第一节	重量分析法概述	310
第二节	沉淀法对沉淀式的要求及沉淀剂的选择	311
第三节	影响沉淀溶解度的因素	312
第四节	影响沉淀纯度的因素	314
第五节	沉淀的条件	315
第六节	有机沉淀剂	317

第七节	沉淀的过滤、洗涤、烘干和灼烧	318
第八节	重量分析结果计算	319
第九节	重量分析法在天然气净化分析中的应用	321
	思考题	324
<b>第十章</b>	<b>仪器分析法</b>	<b>325</b>
第一节	紫外-可见分光光度法	325
第二节	原子吸收光谱分析法	361
第三节	电化学分析法	381
第四节	气相色谱法	407
第五节	高效液相色谱法	460
	思考题	476
<b>第十一章</b>	<b>在线分析仪</b>	<b>478</b>
第一节	在线分析仪器的的发展及组成	478
第二节	在线分析仪器的分类及性能指标	480
第三节	自动取样和试样预处理系统	483
第四节	在线分析仪器在天然气净化厂的应用	490
	思考题	501
<b>第十二章</b>	<b>化验室建设与标准化</b>	<b>503</b>
第一节	化验室的基本要求	503
第二节	化验室标准化	505
第三节	化验室的管理	513
第四节	天然气净化安全知识	529
	思考题	538
	参考文献	539



# 第一章 天然气净化基础知识

能源是人类生存和发展的基本条件之一，当今世界各国都十分重视能源的开发、利用和对环境的影响。从某种意义上讲，能源的构成、开发利用和人均消费量，标志着一个国家的技术水平、生活水平和文明程度。

我国是开发和使用能源最早的国家之一。早在两千年前，我们的祖先就开始采煤炼铁，用天然气熬盐，当时的钻井采气技术已达到相当高水平。煤、石油和天然气是当今世界能源供应的三大支柱，天然气不但是优质燃料，也是化学工业的重要原料。天然气工业在世界经济格局中占据着特别重要的地位，随着世界经济发展，对能源的需求越来越大，但对大气环境质量的严格要求又制约着煤和石油的发展，这必然引起能源结构的改变，朝着清洁能源的方向发展，如天然气、电力和可再生能源等，这将为天然气工业的发展提供极好的机遇。

## 第一节 天然气的定义和分类

### 一、天然气的定义

从广义来说，天然气是指自然界中一切天然生成的各种气体的混合物，但是从能源的角度来说，通常称的天然气只是指储存在地层中的可燃性气体，即气态化石燃料，而与石油共生的天然气常称为油田伴生气。

天然气是指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。埋藏在深度不同的地层中，通过井筒引至地面。大多数天然气是可燃性气体，主要成分是饱和气态烃类，其中最主要的是甲烷。此外根据不同的地质形成条件，尚有不同数量的乙烷、丙烷、丁烷、戊烷、己烷等低碳烷烃以及二氧化碳、氮气、硫化氢等非烃类气体，有的气田中还含有氦气。甲烷含量高的称为干气或贫气， $C_2$ 以上烷烃含量较高的称为湿气。除了甲烷含量高的气田外，我国的一些特殊气田如高含硫的赵兰庄气田、高含二氧化碳的黄桥气田也属于天然气气田。

### 二、天然气的分类

天然气有多种分类方法：按矿藏特点划分可分为气田气、油田气、凝析气田气、煤成气、生物气；按组成划分可分为烃类气和非烃气，烃类气又可分为干气和湿气、贫气和富气；按酸性气体含量划分可分为洁气和酸性天然气；按天然气来源划分可分为有机来源和无机来源；按天然气相态划分可分为游离气、溶解气、吸附气、固体气（气水化合物）；按有机母质类型划分可分为腐殖气（煤型气）、腐泥气（油型气）、腐殖腐泥气（陆源有机气）；按有机质演化阶段划分可分为生物气、生物—热催化过渡带气、热解气（热催化、热裂解气）、高温热裂解气等。下面介绍前三种分类方法。

#### （一）按矿藏特点分类

按矿藏特点分类，天然气可分为气田气、油田气、凝析气田气、煤成气和生物气。

### 1. 气田气

纯气田中采出的天然气，称作气田气。气田气主要成分是甲烷，含量占 80%（体积分数）以上，乙烷至丁烷含量一般不多，不含戊烷以上的重烃（或含量甚微），不含氧气。我国四川的川南、川东、川西北以及青海的柴达木盆地有很多气田，储藏着极其丰富的气田气。

### 2. 油田气

伴随石油从油井口逸出的天然气，称作油田气或油田伴生气。主要成分是甲烷、乙烷等低分子烷烃，还含有相当数量的丙烷、丁烷、戊烷等。乙烷和乙烷以上的烃类含量较气田气高。

### 3. 凝析气田气

凝析气田是一种经济价值很高的特殊气田，在这类气田中同时采出天然气和凝析油。这种气田中聚集的碳氢化合物在一定温度、一定压力的地层条件下是气态物质。当压力或温度降到某一界限以下时（如采到地面，在常温常压下，或随着地层压力的降低），这种气态化合物的一部分反而变成液体状态。这种现象和一般现象相反（一般气态物质只有压力升高，温度降低时才能凝聚成液态），因此，把这种现象称为“反凝析现象”。这种凝析物称为凝析油。从凝析气田中采出的天然气称为凝析气田气。凝析气田气中除含有大量甲烷外，戊烷（ $C_5H_{12}$ ）和戊烷以上的烃类含量较高，并含有汽油和煤油等成分。凝析油的主要成分是汽油和煤油，质轻而纯净（呈无色透明状或淡黄透明状），采出后甚至不需加工炼制就可以直接利用（四川川东地区的凝析油中含有有机硫，故需要脱臭处理）。凝析气田气是一种很宝贵的地下资源，这种气田在我国也相继发现。

### 4. 煤成气

煤系变质过程中所产生的天然气，称作煤成气。由煤系变质生成的天然气，主要含甲烷，重烃含量较少，含有氧和金属汞。如荷兰格罗宁根气田的煤成气，汞含量达到  $0.18 \times 10^{-3} \text{mg/m}^3$ 。

近几年国外天然气生产发展很快，主要是大型煤成气田的相继发现，目前煤成气已占世界大气田和天然气储量的 70% ~ 80%（体积分数）。而我国的煤炭储量占世界第二位，具有煤成气丰富的物质基础。我国已先后在四川的九龙山、遂宁南、大兴西及银川、东濮等地找到煤成气田。

### 5. 生物气

浅地层中未成熟阶段各种有机物质在一定温度、压力、湿度、酸碱度和隔绝空气的条件下，经过微生物发酵所产生的气体，称作生物气。由于这种气体最先在沼泽中发现，所以俗称沼气。这类天然气的甲烷含量大多在 90%（体积分数）以上，通常含有一定量的  $N_2$ ，有痕量  $C_2$  以上烷烃。我国长江中下游、沪宁杭地区、珠江三角洲、河北临漳一带广泛分布有浅层生物气。

## （二）按烃类组成分类

按烃类组成分类，天然气可分为干气和湿气、贫气和富气。

### 1. 干气和湿气

通常将  $1\text{m}^3$  井口流出物中， $C_5$  及以上烃类的液体含量超过  $13.5\text{cm}^3$  的天然气称作湿气，

而低于  $13.5\text{cm}^3$  的天然气称作干气。干气的成分主要是甲烷（甲烷含量一般高于 80%），湿气的成分除 60% ~ 70% 甲烷外，还有大量的乙烷、丙烷、丁烷和戊烷。气田气、煤成气、生物气均属于干气，只有油田气和部分凝析气田气才可能是湿气。四川气田的天然气大多数是干气。

干气在地下时溶于水中和水共存，所以又称作“共水性天然气”；湿气一般和石油共存，在开采石油时被同时采掘出来。它的成分中含有比原油中的轻质油还低级的碳氢化合物，所以湿气又称作“石油系天然气”。

## 2. 贫气和富气

通常将每一基准立方米井口流出物中， $\text{C}_3$  及以上烃类的液体含量超过  $94\text{cm}^3$  的天然气称作富气，而低于  $94\text{cm}^3$  的天然气称为贫气。在天然气回收和提炼时，可将进入回收加工装置的天然气称作富气，而回收和提炼后的天然气称作贫气。富气一定是湿气，而贫气不一定是干气。

### （三）按酸性气体含量分类

按酸性气体含量多少，天然气可分为洁气和酸性天然气（酸气）两类。通常将硫化物和二氧化碳含量甚微（或不含），而不需要净化处理即可进行管输和利用的天然气，称作洁气。将含有硫化物和二氧化碳等酸性气体，需要进行净化处理后才能达到管输标准的天然气，称作酸性天然气。由于二氧化碳的净化要求不严格，则通常把含硫量高于  $20\text{mg}/\text{m}^3$  的天然气称为酸性天然气。

酸性天然气必须采取适当的净化方法进行脱硫后，才能进行管输和利用。经过脱硫处理后的天然气，称为脱硫天然气，经过脱硫、脱水处理后的天然气，称为净化天然气。

## 第二节 天然气的组成及物理性质

绝大部分天然气是以饱和烷烃为主要成分的可燃性气体混合物。也有一些天然气含饱和烷烃较少，甚至是不可燃的。实验证明天然气含有 100 多种组分，除饱和烷烃外，还含有一定量的硫化氢、二氧化碳、氮气、水蒸气，少量的氧气、一氧化碳、氢气、不饱和烃（烯烃和炔烃）、芳烃、低级含硫有机化合物（硫醇、硫醚、二硫醚、二硫化碳、硫氧化碳、噻吩、硫酚等）及微量的稀有气体氦、氩和痕量元素砷、硒、铀、汞等。从化学组成看，天然气的组分大致可分为三类：烃类化合物、含硫化合物和其他组分。

### 一、烃类化合物

凡含有碳和氢两种元素的有机化合物叫做碳氢化合物，简称为烃。

#### （一）烷烃

在碳氢化合物中，如果碳和碳原子都以单键  $\text{C}-\text{C}$  相连，其余价键被氢原子所饱和，且碳的骨干为链状而不结合成环状，这样的烃称为饱和烷烃，简称烷烃。烷烃的分子通式为  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ，其中  $n$  表示碳原子数目。每两个相邻的烷烃，在组成上都差一个  $\text{CH}_2$ ， $\text{CH}_2$  称为系差。在组成上差一个或多个系差且结构相似的一系列化合物称为同系物。烷烃分子中去掉一个氢原子，所剩的原子团称为烷基（或烃基）。由于饱和烷烃的碳原子之间以单键相连，

故化学性质较稳定，主要发生取代反应、氧化反应和热裂化反应等。

最简单的烷烃是甲烷 ( $\text{CH}_4$ )，为无色、无味，很难溶于水的气体，比空气轻，是可燃性天然气的主要成分。绝大多数天然气中，甲烷 ( $\text{CH}_4$ ) 的含量为 65% ~ 99%，是最多的组分；乙烷 ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )、丙烷 ( $\text{C}_3\text{H}_8$ )、丁烷 ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) 也有一定含量，丙烷和丁烷可适当加压或降温而液化为液化石油气，简称液化气。在常温常压下为液体的戊烷 ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ )、己烷 ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ )、庚烷 ( $\text{C}_7\text{H}_{16}$ )、辛烷 ( $\text{C}_8\text{H}_{18}$ )、壬烷 ( $\text{C}_9\text{H}_{20}$ ) 和癸烷 ( $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ ) 等组分简称为碳五以上的组分 ( $\text{C}_5^+$ )，是汽油的主要成分，包括它们的同分异构体在天然气中通常含量甚微。在常温下，含碳原子数 1 ~ 4 的烷烃为气体，5 ~ 16 的为液体，17 以上的均为固体。

## (二) 烯烃和炔烃

在碳氢化合物中，具有一个碳碳双键 ( $\text{C}=\text{C}$ ) 的开链不饱和烃称为烯烃。烯烃的分子通式为  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ 。天然气中有时含有少量低分子烯烃，如乙烯 ( $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ )、丙烯 ( $\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2$ ) 等。在常温下，乙烯、丙烯和丁烯是气体，从戊烯开始是液体，高级烯烃是固体。

碳氢化合物中，具有一个碳碳三键 ( $\text{C}\equiv\text{C}$ ) 的开环不饱和烃称为炔烃。炔烃的分子通式为  $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$ 。天然气中有时含有极微量的低分子炔烃，如乙炔 ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) 等。在常温下，乙炔、丙炔和丁炔是气体，戊炔以上是液体，高级炔烃是固体。烯烃和炔烃通称为不饱和烃，简记为乙烯以上组分 ( $\text{C}=\text{C}^+$ )。

## (三) 环烷烃和芳香烃

在碳氢化合物中，含有碳环结构的饱和烃称为环烷烃，环烷烃的分子通式为  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ 。天然气中有时含有少量环戊烷 ( $\text{C}_5\text{H}_{10}$ ) 和环己烷 ( $\text{C}_6\text{H}_{12}$ )。在常温下，环丙烷和环丁烷是气体，从环戊烷开始是液体，高级环烷烃是固体。

芳香烃简称芳烃，天然气中的芳烃多为苯 ( $\text{C}_6\text{H}_6$  或  $\text{Ar}-\text{H}$ )、甲苯 ( $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}_3$  或  $\text{Ar}-\text{CH}_3$ ) 和二甲苯 [ $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$ ]。常和凝析油一起从天然气中分离出来。苯及其同系物一般为无色液体，不溶于水，溶于汽油、乙醇、乙醚等有机溶剂。芳烃在二甘醇、环丁砜、N-甲基吡咯烷-2-酮、N,N-二甲基甲酰胺、1,3-二氰基丁烷、N-甲酰吗啉等特殊溶剂中有很好的溶解度。

## 二、含硫化合物

天然气中的含硫组分可分为无机硫化合物和有机硫化合物两类。

### (一) 硫化氢 ( $\text{H}_2\text{S}$ )

天然气中的无机硫化物只有硫化氢。硫化氢是一种具有臭鸡蛋的刺激性恶臭味无色气体，可燃，比空气稍重，较易液化，稍溶于水。由于硫化氢中的硫处于最低氧化态，故具有强还原性，在化工生产中常使催化剂中毒而失去活性，在有氧存在时可以腐蚀金属，硫化氢受热分解。硫化氢的水溶液叫做氢硫酸，具有强还原性和一般酸类的通性，故称硫化氢为酸性气体。有水存在时，硫化氢对金属有强烈的腐蚀作用。

硫化氢为有毒气体，是一种大气污染物。它可以麻痹人的中枢神经并影响呼吸系统，轻微的中毒使人感到头晕和恶心，吸入大量硫化氢会造成昏迷或死亡，经常与硫化氢接触能引起慢性中毒。大多数天然气中都含有硫化氢。有的气田不含，有的气田硫化氢含量很高。在我国华北油田赵兰庄曾钻出一口含  $\text{H}_2\text{S}$  高达 90% 的气井。

## (二) 有机硫化物

有机物分子中含有硫元素的化合物称为有机硫化物。天然气中的有机硫化物常为硫醇、硫醚、二硫醚、二硫化碳、羰基硫、噻吩、硫酚等。

### 1. 硫醇 (RSH)

氢硫基与烷基相连接的有机化合物叫硫醇，通式为 RSH。硫醇分子中的一SH 称为氢硫基，又叫硫基。碳数较低的硫醇为气体，碳数较高的为液体。

天然气中常见的硫醇是甲硫醇 ( $\text{CH}_3\text{SH}$ ) 和乙硫醇 ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{SH}$ ) 等相对分子质量较低的硫醇，其含量大多数低于  $1000\text{mg}/\text{m}^3$ 。硫醇具有强烈的恶臭味，空气中含有  $1\text{mg}/\text{m}^3$  的乙硫醇即可以感觉到它的臭味。相对分子质量较大的硫醇臭味较淡。低级硫醇常用作天然气和煤气的加味剂，可用于检查管线的泄漏处。

### 2. 硫醚 (RSR')

两个一价烷基同时与一个硫原子相连接的有机化合物叫硫醚，其结构式为 RSR'。从硫醚分子中去掉一个烷基后所得的原子团称为硫醚基 ( $-\text{SR}$ )。低级硫醚是无色液体，有臭味，但不如硫醇那样强烈。

天然气中常见的硫醚是甲硫醚 ( $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ ) 和乙硫醚 ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{SCH}_2\text{CH}_3$ ) 等相对分子质量较低的硫醚，其含量大多数低于  $500\text{mg}/\text{m}^3$ 。

### 3. 二硫醚 (RSSR')

两个硫醚基相连接的有机化合物叫二硫醚 (或二硫化合物)，其结构式为 RSSR'。天然气中常见的二硫醚是二硫化二甲基 ( $\text{CH}_3\text{SSCH}_3$ ) 和二硫化二乙基 ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{SSCH}_2\text{CH}_3$ ) 等相对分子质量较低的二硫醚，其含量一般低于  $100\text{mg}/\text{m}^3$ 。

### 4. 二硫化碳 ( $\text{CS}_2$ )

二硫化碳的分子式为  $\text{CS}_2$ ，天然气中二硫化碳含量一般都很少，但个别气田较高，如法国的拉克气田的天然气中二硫化碳含量高达  $2500\text{mg}/\text{m}^3$ 。

### 5. 羰基硫 (COS)

羰基硫可看作是二硫化碳中的一个硫原子被一个氧原子所取代的产物。它又叫氧硫化碳或硫氧化碳，结构式为  $\text{S}=\text{C}=\text{O}$ 。天然气中羰基硫的含量低于  $1300\text{mg}/\text{m}^3$ 。

### 6. 噻吩 ( $\text{C}_4\text{HS}$ )

噻吩又叫硫杂茂，是五员杂茂化合物，有的天然气中含有微量的噻吩。

### 7. 硫苯酚 ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{SH}$ )

硫苯酚是硫酚的一种。硫苯酚是巯基—SH 与芳烃基 Ar—直接相连接的化合物，通式是  $\text{ArSH}$ 。有的天然气中含有微量的硫苯酚。

有机硫化物对金属的腐蚀虽不及硫化氢那样严重，但对催化剂的毒害作用与硫化氢一样大。它们大多有毒性，会污染大气，危害人畜健康。硫化氢、硫醇、硫酚等在常温下化学性质比较活泼 (活性硫化物)，而硫醚、二硫醚、二硫化碳、羰基硫、噻吩等，在常温下化学性质不活泼 (非活性硫化物)。但活性与非活性是可变的，如升高温度中性的二硫醚可分解出硫醇和硫化氢，其化学活泼性可增强。

## 三、其他组分

### (一) 二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )

二氧化碳是一种无色、无臭、不可燃，也不助燃的气体，比空气重，溶于水，也能溶于

乙醇等有机溶剂。二氧化碳分子为直线型，其结构为： $O=C=O$ 。因分子呈直线对称，故不显极性。 $C=O$ 键很强，分子有很高的热稳定性。二氧化碳溶于水生成碳酸，呈酸性，故二氧化碳也是一种酸性气体。碳酸是一个弱二元酸，具有一般二元酸的通性。在有水存在时，二氧化碳对金属的腐蚀相当严重。通常在天然气脱硫过程中将二氧化碳同时脱除。二氧化碳无毒，但空气中含量过高时会刺激呼吸中心引起呼吸加快而产生窒息的危险（即缺氧）。天然气中通常含有相当数量的二氧化碳。四川天然气中二氧化碳含量一般低于10%。个别气田二氧化碳含量高达90%以上。

## （二）一氧化碳（CO）

一氧化碳是无色、无臭、可燃的气体，微溶于水，能溶于乙醇、乙酸等有机溶剂。其化学性质活泼，还原性很强。一氧化碳有毒性，它与血液中的血红素结合形成一种很稳定的化合物，从而破坏血液的输氧能力。长期吸入少量的一氧化碳，也会导致贫血，一氧化碳能麻痹呼吸器官，空气中只要有八百分之一体积的一氧化碳，就能使人在半小时内死亡。一氧化碳在天然气中含量甚微。

## （三）水（H<sub>2</sub>O）

纯水是无色、无味、无臭的透明液体。水是常见的物质，但由于水分子的极性极强，能形成氢键，分子间发生缔合，故它有许多同其他物质截然不同的异常特性，如温度—体积效应异常，热容量最大，溶解及反应能力极强，表面张力极大等。在一定条件下水能跟许多种物质发生化学反应。

从井下采出或脱硫后的天然气，都含有饱和水蒸气，在降温时会冷凝为液态水。液态水会稀释和污染脱硫剂，严重腐蚀设备和管线（特别是有酸气存在时），还能与烃等组分形成水化合物而堵塞管道、设备和仪表。

## （四）氧气（O<sub>2</sub>）和氮气（N<sub>2</sub>）

天然气中含氧气的情况不多见，但是大多数天然气中都含有一定量的氮气。

## （五）稀有气体

稀有气体〔氦（He）、氖（Ne）和氩（Ar）等〕为单原子分子，无色、无味、无毒、不可燃。由于稀有气体原子间存在微弱的色散力，所以它们的熔点和沸点很低，且随着相对分子质量的增大而熔点和沸点升高，在水中的溶解度增大。稀有气体在一般条件下不显化学性质。天然气中稀有气体含量很低，一般低于1.0%，但也有高达7.82%的。天然气中的稀有气体是极为重要的稀有资源，可用深度冷冻法提取。

## （六）汞

有些天然气中含有微量的汞，含量为1~1000mg/m<sup>3</sup>。在常温下能与硫化合生成硫化汞。汞不溶于水，能溶于硝酸，不被盐酸和冷硫酸侵蚀，汞蒸气对人体有毒，汞蒸气会导致铝热交换器和管道严重腐蚀。

## （七）粉尘

天然气在开采、输送和分配管网的腐蚀过程中会夹带固体粒子，主要成分是携入的泥沙、矿物粉尘、因腐蚀形成的氧化铁等。这些粉尘的粒度为1~50μm。粉尘会导致压缩机、控制系统和计量装置出现故障。

#### 四、天然气的物理性质

由于天然气是由互不发生化学反应的多种单一组分组成的混合物，无法用一个统一的分子式来表达它的组成和性质，只能假设它具有平均参数（或视参数）的某一物质。混合物的平均参数由各组分的性质按加合法求得。

天然气的物理性质通常是指天然气的视相对分子质量（或平均相对分子质量）、密度和相对密度、蒸气压、粘度、临界参数和气体状态方程等。

##### （一）天然气的相对分子质量

###### 1. 天然气的视相对分子质量

天然气的视相对分子质量按式（1-1）计算：

$$M = \sum y_i M_i \quad (1-1)$$

式中  $M$ ——天然气的视相对分子质量；

$y_i$ ——天然气中组分  $i$  的摩尔分数；

$M_i$ ——天然气中组分  $i$  的相对分子质量。

###### 2. 天然气凝液的视相对分子质量

天然气凝液的视相对分子质量按式（1-2）计算：

$$M = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{M_i}} \quad (1-2)$$

式中  $M$ ——天然气凝液的视相对分子质量；

$M_i$ ——天然气中组分  $i$  的相对分子质量；

$g_i$ ——天然气凝液中组分  $i$  的质量分数。

【例 1-1】已知天然气各组分的摩尔分数：甲烷为 0.945，乙烷为 0.005，丙烷为 0.015，氮气为 0.02，二氧化碳为 0.015，求天然气的视相对分子质量。

解：按天然气的视相对分子质量计算公式：

$$\begin{aligned} M &= \sum y_i M_i \\ &= 0.945 \times 16.04 + 0.005 \times 30.07 + 0.015 \times 44.1 + 0.02 \times 28.01 + 0.015 \times 44.0 \\ &= 17.19 \end{aligned}$$

【例 1-2】已知液化石油气液相各组分的质量分数：乙烷为 5%，丙烷为 65%，异丁烷为 10%，正丁烷为 20%，求液化石油气液体（天然气凝液）的视相对分子质量。

解：按天然气凝液的视相对分子质量计算公式：

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{\sum \frac{g_i}{M_i}} \\ &= \frac{1}{\frac{0.05}{30.7} + \frac{0.65}{44.1} + \frac{0.10}{58.1} + \frac{0.20}{58.1}} \\ &= 46.5 \end{aligned}$$

## (二) 天然气的视密度和相对密度

### 1. 天然气的视密度

天然气的视密度按式 (1-3) 计算:

$$\rho = \sum y_i \rho_i \quad (1-3)$$

式中  $\rho$ ——天然气的视密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$y_i$ ——天然气中组分  $i$  的摩尔分数;

$\rho_i$ ——天然气中组分  $i$  在标准状态下的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

天然气的视密度也可按式 (1-4) 计算:

$$\rho = \frac{M}{V_m} \quad (1-4)$$

式中  $M$ ——天然气的视相对分子质量;

$V_m$ ——天然气的视摩尔体积,  $\text{m}^3/\text{kmol}$ 。

$V_m$  按式 (1-5) 计算:

$$V_m = \sum y_i V_{mi} \quad (1-5)$$

式中  $y_i$ ——天然气中组分  $i$  的摩尔分数;

$V_{mi}$ ——天然气中组分  $i$  的摩尔体积,  $\text{m}^3/\text{kmol}$ 。

### 2. 天然气的相对密度

天然气的相对密度是指在相同压力和温度条件下, 天然气的密度与干空气密度之比。干空气的组成以摩尔分数表示, 摩尔分数的总和等于 1 ( $\text{N}_2$  为 0.7809,  $\text{O}_2$  为 0.2095,  $\text{Ar}$  为 0.00093,  $\text{CO}_2$  为 0.0003), 密度为  $1.293 \text{kg}/\text{m}^3$ 。天然气的相对密度按式 (1-6) 计算:

$$S = \rho / 1.293 \quad (1-6)$$

式中  $S$ ——天然气的相对密度;

$\rho$ ——天然气的视密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

1.293——标准状态下空气的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

空气的相对密度为 1。

天然气的相对密度也可按式 (1-7) 计算:

$$S = M / 28.964 \quad (1-7)$$

式中  $M$ ——天然气的视相对分子质量;

28.964——干空气的视相对分子质量。

### 3. 天然气凝液的视密度和相对密度

天然气凝液的视密度按式 (1-8) 计算:

$$\rho = \sum x_i \rho_i = 1 / \sum g_i \rho_i \quad (1-8)$$

式中  $\rho$ ——天然气凝液的视密度,  $\text{kg}/\text{L}$ ;

$\rho_i$ ——天然气凝液中组分  $i$  的密度,  $\text{kg}/\text{L}$ ;

$x_i$ ——天然气凝液中组分  $i$  的体积分数;

$g_i$ ——天然气凝液中组分  $i$  的质量分数。

天然气凝液的相对密度是指凝液的视密度对  $4^\circ\text{C}$  时水的密度 ( $1 \text{kg}/\text{L}$ ) 之比, 如式 (1-9) 表示, 则凝液的相对密度与视密度在数值上相等。

$$d = \rho / \rho_w \quad (1-9)$$



式中  $d$ ——天然气凝液的相对密度；

$\rho_w$ ——4℃时水的密度，1kg/L。

在常温下液化石油气的视密度为 0.5 ~ 0.6kg/L（相对密度为 0.5 ~ 0.6），约为水的一半。或者按式（1-10）计算：

$$d = \sum (x_i d_i) \quad (1-10)$$

式中  $x_i$ ——组分  $i$  的体积分数；

$d_i$ ——天然气凝液中组分  $i$  的相对密度。

液体烃类混合物与单一烃类一样，相对密度随温度升高而减小。

### （三）天然气主要组分的蒸气压

蒸气压是指在一定温度下，物质呈气液两相平衡状态下的蒸气压力，也称饱和蒸气压。蒸气压是温度的函数，随着温度的升高而增大。

### （四）天然气的粘度

#### 1. 气体的粘度

气体的粘度表示由于气体分子或质子之间存在吸引力和摩擦力而阻碍质点相互位移的特性。气体粘度包括动力粘度（ $\mu$ ）和运动粘度（ $\nu$ ），两者的关系为式（1-11）：

$$\nu = \mu / \rho_0 \quad (1-11)$$

#### 2. 温度对粘度的影响

气体的粘度随着温度的升高而增加。动力粘度与温度的关系为式（1-12）：

$$\mu_T = \mu_0 + \frac{273 + C}{T + C} \times \left( \frac{T}{273} \right)^{2/3} \quad (1-12)$$

式中  $\mu_T$ 、 $\mu_0$ ——气体在温度  $T$  和 0℃ 时的动力粘度，Pa·s；

$T$ ——气体的温度，K；

$C$ ——温度修正系数。

#### 3. 天然气的粘度

在理想状态下，天然气的动力粘度可按下述近似公式（1-13）计算：

$$\mu = \frac{1}{\sum \frac{y_i}{\mu_i}} \quad (1-13)$$

式中  $\mu$ ——天然气的动力粘度，Pa·s；

$\mu_i$ ——天然气中组分  $i$  的动力粘度，Pa·s；

$y_i$ ——天然气中组分  $i$  的摩尔分数。

天然气的动力粘度随压力升高而升高，而其运动粘度却随压力升高而减小，在绝对压力小于 1.0MPa 的情况下，压力对粘度的影响较小。在工程计算中，往往只考虑温度对粘度的影响。

在低压力下，天然气的粘度可根据各组分在一定温度和压力下的粘度按式（1-14）计算：

$$\mu_L = \frac{\sum y_i \mu_i \sqrt{M_i}}{\sum y_i \sqrt{M_i}} \quad (1-14)$$

式中  $\mu_L$ ——低压力下天然气的粘度，Pa·s；