



油气管道科技丛书

3

油气管道流动保障技术

中国石油管道公司 © 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在介绍影响油气干线管道流动安全性主要因素的基础上,着重介绍了近年来国内在油气干线管道流动保障技术方面开展的研究内容和取得的最新成果,主要包括油气管道流动模拟与预测技术和油气管道流动安全性评价技术。其中油气管道流动安全性评价技术将可靠性和风险评价的概念首次引入对油气干线管道流动安全性的定量评价上来,属于油气储运领域的前沿技术。

本书可供管道设计、施工、运营单位与相关工作人员使用,也可供石油工程技术、科研及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气管道流动保障技术/中国石油管道公司编.
北京:石油工业出版社,2010.7
油气管道科技丛书
ISBN 978-7-5021-7844-4

- I. 油…
- II. 中…
- III. ①石油管道-液体流动
②天然气管道-气体流动
- IV. TE973

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第103475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)64523697 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:中国石油报社印刷厂

2010年7月第1版 2010年7月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:12.25

字数:296千字

定价:56.00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

《油气管道科技丛书》编委会

主任：姚 伟

副主任：崔 涛 杨祖佩 赵丑民 艾慕阳 张秀杰

委员：刘玲莉 康力平 权忠舆 佟文强 刘广文

郝建斌 李 立 李 莉 刘建平 张一玲

张惠芬 王禹钦

《油气管道流动保障技术》编写组

编写人：苗 青 姜保良 王玉彬 李 莉 柳建军

徐 波 胡 森 崔秀国 支树洁 李其抚

审核人：艾慕阳 刘广文

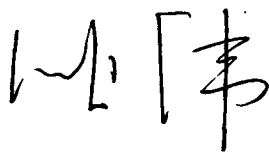
序

今年是“八三”管道建设40周年。40年前的8月3日，经党中央、国务院批准，大庆经铁岭至抚顺和秦皇岛输油管道工程建设领导小组召开了第一次会议，并将这项工程命名为“东北八三工程”。由此，拉开了我国长距离输油气管道建设的序幕，开创了油气管道运输的一个新的时代。40年来，中国的油气管道从小到大、由弱到强，特别是近10年来得到了突飞猛进的发展，现已成为国家能源重要战略基础设施，为国民经济和社会发展做出了巨大贡献。

回顾40年来我国油气管道的发展历程，既是一部艰苦创业史，更是一部科技创新史。自“八三”管道开始，几代管道人以敢为天下先的精神，以大无畏的英雄气魄，迎难而上，努力拼搏，使我国起步较晚的管道事业有了长足进步。其间，科技进步成为发展的助推器。当年在冻土带管道建设、严寒条件下管道防腐、三高原油工艺参数确定等方面开展了大量艰苦细致的科学试验，为管道的顺利建设提供了技术保障，建立了管道勘察、设计、施工及运营的技术标准，为中国管道运输业的发展奠定了基础。此后，在密闭输送、节能降耗、提高效率等技术改造过程中，科技进步始终发挥着支撑和引领作用。

历史表明，科技创新是推进企业发展的巨大动力。随着经济社会发展和国家油气资源战略的实施，油气管道正进入新一轮大发展时期。面对快速发展中的瓶颈技术和当前制约安全生产的难点问题，必须依靠科技进步加以解决。通过科技创新，加快经济发展方式的转变，提高全面协调可持续发展能力，实现管道事业又好又快发展。

为纪念“八三”管道建设40周年，梳理和总结40年来管道科技发展成果，中国石油管道公司组织编写了这套《油气管道科技丛书》。全套丛书共有9个分册，分别对油气管道运行工艺、化学添加剂、流动保障、完整性管理、腐蚀控制、安全预警与泄漏检测、地质灾害风险管理、检测与修复及国内外技术标准等进行了介绍。这套技术丛书，既是对以往管道运行管理技术的回顾和总结，也是对未来管道科技工作的规划和展望。期冀此套丛书成为管道科技发展的新起点，为管道安全运行提供支撑和保障。



2010年5月 于廊坊

前 言

为了纪念“八三”管道建设40周年，总结40年来管道科技成就，为科研、设计、运营管理、领导决策提供参考资料，中国石油管道公司组织专家学者和科技人员共计200余人，历时两年编制了这套油气管道科技丛书。全套丛书共分为9个分册，包括：《油气管道运行工艺》、《油气管道化学添加剂技术》、《油气管道流动保障技术》、《油气管道完整性管理技术》、《油气管道腐蚀控制实用技术》、《油气管道安全预警与泄漏检测技术》、《油气管道地质灾害风险管理技术》、《油气管道检测与修复技术》、《国内外油气管道标准对比分析》。本书是丛书的第3分册。

本书主要介绍了原油和天然气的组成及其与流动有关的性质特点，阐述了因这些特点而影响到干线管道输送油气的流动安全的主要因素，如原油的流变性、原油管道的结蜡与停输再启动过程、油气管道的管路特性以及天然气管道中水合物的形成和生长等。基于油气管道运行过程中存在的流动安全问题，指出了油气管道流动保障技术研究的内容和应用的目标，并着重介绍了近年来国内在油气干线管道流动保障技术方面开展的研究和取得的最新成果，主要包括油气管道的流动模拟与预测技术和油气管道流动安全性评价技术。油气管道的流动模拟与预测技术又分为试验模拟和数值模拟技术，其中包括原油流变性定量模拟、原油管道结蜡与停输再启动模拟、天然气水合物形成和生长模拟等关键试验技术，以及相应的数值模拟技术。油气管道流动安全性评价技术基于流动模拟和预测结果，结合不确定性方法，将可靠性和风险评价的概念引入到对多因素和不确定作用下的油气管道流动安全性整体定量评价上来，体现了国内在流动保障研究方面的最新进展，内容包括油气管道流动极限状态的划分、流动失效模式的确定和失效概率的计算以及流动安全性评价指标的分级等。其中，正在探索并取得一定进展的基于高效数值算法的流动极限状态数值试验在国际上首次开展，属于油气储运领域的前沿技术。在流动安全性分析和评价的基础上，制定和提供安全经济的流动保障技术措施是流动保障技术应用的最终目的，书中详细介绍了这方面的内容，包括基于评价结果的流动保障工艺运行方案的制定以及配套的化学、物理和机械等保障措施的实施等。

本书编者均为长期从事油气长输管道流动保障研究和应用的人员。全书由苗青主笔，除第四章以外，其余各章中涉及天然气管道的部分由王玉彬编写。其余参与编写的人员还有：姜保良、李莉、柳建军、徐波、胡森、崔秀国、支树洁和李其抚等。全书由苗青统稿。

本书在编写过程中参考了许多同领域专家、学者的著作和研究结果，在此表示衷心的感谢。由于编者水平和时间有限，书中难免存在疏漏和错误之处，敬请读者批评、指正。

编者
2010年5月

目 录

第一章 管道输送的原油和天然气的性质	1
第一节 原油的组成及性质.....	1
第二节 天然气的组成及性质.....	5
参考文献	26
第二章 影响油气管道流动安全的主要因素	27
第一节 影响原油管道流动安全的主要因素	27
第二节 影响天然气管道流动安全的主要因素	42
参考文献	45
第三章 油气管道流动模拟和预测	47
第一节 油气管道流动试验模拟	48
第二节 油气管道流动数值模拟和预测	77
参考文献.....	132
第四章 油气管道流动安全性评价	135
第一节 原油管道流动安全性评价.....	135
第二节 天然气管道流动安全性评价.....	155
参考文献.....	160
第五章 油气管道流动保障措施	161
第一节 原油管道流动保障措施.....	161
第二节 天然气管道流动保障措施.....	183
参考文献.....	187



第一章 管道输送的原油和天然气的性质

第一节 原油的组成及性质

一、原油的组成

石油是埋藏在地下的天然矿物，未经炼制的液态石油称为原油。不同油田所产的原油在性质上有较大的差别。原油的组成极为复杂，但其元素组成却较为简单，主要由碳和氢两种元素组成，其含量在原油中占 96% ~ 99%，其他还有硫、氮和氧等元素。上述元素都以化合物的形式存在于原油中。其中，碳和氢按照一定的数量关系结合成多种不同性质的碳氢化合物，简称为烃类；碳、氢两种元素与硫、氮、氧形成的含硫化合物、含氮化合物、含氧化合物及胶质沥青质等，简称为非烃类。烃类化合物主要包括烷烃、环烷烃和芳香烃及少量烯烃等，非烃类化合物主要是胶质和沥青质。另外，原油中还含有微量的金属和非金属元素，如镍、钒、铁、铜、砷、磷和硅等，它们的含量一般只有十万分之几，甚至更低。原油在一定的条件下还溶解有一定量的气态烃类（天然气），有时含有一定量的氮气和少量的二氧化碳。原油中溶解天然气可降低原油的粘度和密度，并使原油的压缩系数增大。

常温常压下，原油是以气、液、固三相共存的胶状悬浮体系，分散相和分散介质的含量之比与外界因素（温度、压力等）有关。当原油中的分散相（或胶凝物）浓度增大时，原油的流变行为呈现非牛顿特性。

二、原油的性质及分类

原油的物理化学性质是评定原油质量、控制原油管道输送工艺参数的重要指标，也是输油管道和站库设计的重要依据。

原油的性质与其化学组成及结构有密切的关系，由于原油是复杂的混合物，所以其性质是组成它们的各种烃类和非烃类化合物性质的综合表现。不同性质的原油，对开发、集输、储存、加工影响较大。原油的性质指的是物理性质和化学性质两个方面。物理性质包括颜色、密度、粘度、凝点、析蜡点（浊点）、闪点、蒸气压、比热容等，流变性也可归属于物理性质；化学性质包括化学组成、含蜡量、含硫量、胶质/沥青质含量、溶解性和燃烧特性等。为了便于比较和对照，原油的物性多采用一些条件性的实验方法来测定，也就是使用规定的仪器，在规定的实验条件、方法和步骤下进行实验。如果改变实验条件，将会得到不同的结果。

以下简单介绍一些与原油管道输送有关的物理性质和化学性质。



1. 颜色

原油一般呈淡黄色、黄褐色、深棕色、黑褐色和黑色等。它的色泽与所含成分有关，通常颜色越深则所含烃组分就越少，相对密度也越大，反之亦然。实际上原油中的纯粹烃类本为无色，原油的颜色是由原油中含有的其他物质所决定的。原油的颜色与其中含有的胶质、沥青质数量的多少有密切关系。常温下流动性较好的原油多呈浅色，甚至无色；而粘性较大的原油，大多色暗，从深褐、黑褐直到黑色。我国玉门、大庆等油田的原油多呈黑褐色；新疆克拉玛依油田原油呈黄褐色；青海柴达木盆地的原油多呈淡黄色；四川、塔里木、东海等盆地的一些凝析气田所产的凝析油颜色从淡黄色到无色。

原油在紫外光照射下受激发还会发出荧光，并在照射后所发光会立即消失。按发光颜色的不同以及分布的情况，大体可推测所显示的石油组分及其百分含量。一般油质的荧光呈天蓝色，胶质呈黄绿色，沥青质呈棕褐色。

2. 气味

气味是由于原油中所含的不同挥发组分而引起的。芳香属组分含量高的原油具有一种馥臭味。含有硫化物较高的原油则散发着强烈刺鼻的臭味。

3. 密度与相对密度

原油的密度是指在地面标准条件下，脱气原油单位体积的质量。以吨每立方米 (t/m^3) 或克每立方厘米 (g/cm^3) 表示。原油相对密度（以往文献曾称为比重）是 15.5℃ 或 20℃ 时原油密度与 4℃ 时水的密度的比值。美国等国常用 API 度表示这一性质。API 度与相对密度的相关关系式为：

$$\text{API 度}(15.5^\circ\text{C}) = (141.5/\text{相对密度}) - 131.5$$

因此，原油的 API 度大，则相对密度小。水的 API 度为 10。密度大小与原油的化学组成、所含杂质数量有关。原油的胶质、沥青质含量高，则密度大、颜色深；原油低相对分子质量烃含量高，则其密度小。不同地区、不同地层所产原油密度有较大的差别。

原油按其密度可分为四类：轻质原油（密度 $< 0.87g/cm^3$ ），中质原油（密度 $\geq 0.87 \sim 0.92g/cm^3$ ），重质原油（密度 $\geq 0.92 \sim 1.0g/cm^3$ ），超重质原油（密度 $\geq 1.0g/cm^3$ ）。我国生产的原油密度差异也较大，大庆（密度多在 $0.8601g/cm^3$ ）、长庆（ $0.8437g/cm^3$ ）和青海尕斯库勒（ $0.8388g/cm^3$ ）等地区所产原油多属轻质原油；胜利（多数在 $0.8873g/cm^3$ 左右）和辽河（ $0.8818g/cm^3$ ）等地区所产原油多属中质原油；胜利孤岛（ $0.9472g/cm^3$ ）、大港羊三木（ $0.9492g/cm^3$ ）、辽河高升（ $0.9609g/cm^3$ ）和新疆乌尔禾（ $0.9609g/cm^3$ ）等油田所产原油则属重质原油。

4. 粘度

简单地讲，流体的粘度是指流体分子间发生相对位移时所引起的内部摩擦阻力的一种宏观度量，其总动力粘度以 $mPa \cdot s$ 表示。粘度和后面将要提到的凝点既是反映原油物性的重要指标，更是反映原油流变性和流动性的重要指标，在原油的管道输送工艺计算和流动保障研究中占有比其他物性指标更重要的地位。粘度（或表观粘度）的大小是决定原油在地下和管道中的流动性能的最重要性质。原油粘度大小与其化学组成、温度、压力和溶解气量等有关。和一般流体一样，原油的粘度严重依赖于温度，温度升高则粘度降低，因而没有注明

温度的粘度数据是没有任何意义的。原油的粘度温度关系在不同温度区间有所不同。在较高温度下可以是线性；到了一定温度以下，会变成非线性，且呈现为不再是温度的单一函数。要掌握这个关系，必须依靠实验。原油的粘度也随压力的增高而逐渐增大，在高压下则显著变大，但是在压力 4.0MPa 以下则影响较小，在进行相关计算和研究时可不予考虑。原油中的溶解气量增加，则其粘度下降；轻质油组分增加，则其粘度降低。一般来说，粘度大的原油密度也较大。

粘度是一种“非加和性”参数。多种不同粘度原油混合后，其混合粘度有着非线性关系，虽然有着许多经验关联式可以用于测算，但最好是通过实验测定。

根据粘度大小，可将原油划分为常规油（ $<100\text{mPa}\cdot\text{s}$ ），稠油（ $\geq 100 \sim <10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ），特稠油（ $\geq 10000 \sim 50000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）和超特稠油或称沥青（ $>50000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）四类。由于测定绝对粘度较繁杂，在研究中常用恩氏粘度计测定相对粘度。相对粘度是指液体的绝对粘度与同温条件下水的绝对粘度之比。

我国所产原油的粘度差异范围较大。大庆白垩系原油（ 50°C ）粘度为 $19 \sim 22\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，任丘震旦亚纪原油（ 50°C ）为 $53 \sim 84\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，胜利孤岛原油（ 50°C ）为 $103 \sim 6451\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

5. 凝点（倾点）

由于原油是多种烃类的混合物，因此不存在纯净物质具有的由液态转变为固态的确定温度，即所谓的“凝固点”。以往有的文献和书中将原油的凝点称为凝固点，并将其定义为“原油冷却到由液体变为固体时的温度称为凝固点”的说法是不准确的。原油的凝点或倾点都是以温度表示的评价原油流动性的条件性指标，可认为是原油物理状态发生转变的条件性温度分界点。凝点是指在规定的热力条件和剪切作用条件下，被测油样刚刚失去流动性时的最高温度。倾点则是指在规定的热力和剪切作用条件下，被测油样能保持流动性的最低温度。对同一油样同样热力条件下的测试结果，按照美国 ASTM D97 规定的标准方法测得的倾点高于我国 GB 510《石油产品凝点测定法》测得的凝点 3°C 左右。如果测试的热力和剪切条件不同，还不能找到两者的精确关联关系。凝点在我国以及前苏联国家比较常用，而倾点在国际上特别是欧美国家被普遍使用。凝点或倾点的高低与原油的组成有很大关系，原油轻质组分含量高，凝点或倾点就低；重质组分含量高，尤其是含蜡量高，凝点或倾点就高。因此，虽然是条件性指标，但由于测量较容易且直观，凝点对不同温度下尤其在低温地区考虑原油的储运条件时是非常重要的指标。凝点也是一个不具加和性的参数，即不同原油混掺后的凝点与各自原来的凝点不是简单的算术平均关系。根据凝点高低，原油可划分为高凝油（ $\geq 40^\circ\text{C}$ ）、常规油（ $\geq -10^\circ\text{C}$ ， $<40^\circ\text{C}$ ）、低凝油（ $< -10^\circ\text{C}$ ）三类。我国多数油田所产原油的凝点，在 $15 \sim 30^\circ\text{C}$ 之间。

6. 析蜡点（浊点）

原油中的石蜡和地蜡在一定温度以上是溶解在其液态组分中的。随着温度降低，蜡会从高碳数到低碳数依次结晶析出。一般把某种实验条件下可以观测到蜡晶析出的起始温度认定为该种原油的析蜡点。析蜡点与原油的含蜡量、液态组分性质有密切关系。析蜡点对于研究含蜡原油的流动性和结蜡规律是个非常关键的参数。在其以上和以下原油会呈现出不一样的流变行为。析蜡点虽然与凝点存在一定的相关性，但目前尚不能确定其精确的数学关系。一般来说，析蜡点在凝点以上 $10 \sim 15^\circ\text{C}$ 。



7. 溶解性

原油作为溶质不溶于水，但可溶于有机溶剂，如苯、香精、醚、三氯甲烷、硫化碳和四氯化碳等，也能局部溶解于乙醇之中。原油作为溶剂又能溶解气体烃和固态烃类以及脂膏-树脂、硫和碘等。原油中溶解的组分和数量会对其流动性有重要影响。

8. 含蜡量

原油中所含的蜡是指碳原子数高于 16 的固态烃类（石蜡和地蜡的统称）。含蜡量是指在常温常压条件下蜡在原油中的质量分数。其中，石蜡又称晶形蜡，主要成分为正构烷烃，也有少量带个别支链的烷烃和带长侧链的环烷烃。其碳原子数为 16 ~ 30（平均相对分子质量为 250 ~ 450）。较纯的石蜡是一种白色或淡黄色固体，熔点为 37 ~ 76℃。地蜡又称微晶蜡，地蜡的成分比石蜡复杂，视原油的不同，除正构烷烃外，还含有不同数量的多支链异构烷烃及环状化合物。其碳原子数为 40 ~ 55（平均相对分子质量大于 450）。石油中的蜡在地下通常为液态或溶解于石油的液态组分中，当压力和温度降低时，可从原油中析出。我国主要油田所产原油的含蜡量均较高（在 20% ~ 30% 之间）。大庆萨尔图油田含蜡量多在 22.6% ~ 24.1%，河南魏岗油田为 42% ~ 52%，江汉王场油田为 2.8% ~ 11.4%，克拉玛依油田仅为 7% 左右。含蜡量高的原油凝点也高。

原油中的烃类成分主要分为烷烃、环烷烃和芳香烃。根据烃类成分含量的不同，原油可分为石蜡基原油、中间基原油和环烷基原油三类。

9. 含硫量

含硫量是指原油中所含硫（硫化物或单质硫分）的百分数。一般来说，原油中含硫量小于 1%，但对原油性质的影响很大，对管道和处理加工装置有腐蚀作用，也对人体健康有害。高含硫原油在加工时，需要增加专门的处理装置而要投入更多的资金。我国主要油田的含硫量较中东地区原油的含硫量（高于 2%）低得多，大庆油田原油含硫量不到 1‰，胜利油田原油含硫量也多不超过 1%。按含硫量分类，原油可分为超低硫原油、低硫原油、含硫原油和高硫原油四类。

10. 胶质和沥青质含量

胶质是指原油中相对分子质量较大（300 ~ 1000）的含有氧、氮、硫等元素的杂环化合物，呈胶体分散于原油中。胶质易溶于石油醚、润滑油、汽油、氯仿等有机溶剂中。原油的含胶量一般在 5% ~ 20% 之间。沥青质是一种相对分子质量更大（> 1000）的具有多环结构的黑色固体物质，不溶于乙醇和石油醚，易溶于苯、氯仿和二硫化碳。沥青质含量增高时，原油质量变坏。原油中沥青质的含量较少，一般小于 1%。从原油流动性角度来看，胶质和沥青质的存在一方面影响其粘度，另外一方面又对蜡晶从原油析出后的分散以及蜡晶相互结合的结构状态有着很大影响，从而也会影响原油的流变行为和结蜡规律。

11. 燃烧特性

原油的可燃程度随温度而异，表现在闪点、燃点和自燃点的差异。“闪点”是指一定测试条件下原油在容器内受热，容器口遇火则发生闪火但随之又熄灭时的温度。“燃点”是指受热温度继续升高，容器口遇火不但出现闪火而且引起了燃烧的温度。“自燃点”是指原油在受热已达到相当高的温度，即便不接触火种也出现自燃现象的温度。石油是由具不同沸点



的烃类化合物组成的混合物，与纯净物不同，没有固定的沸点。其闪点随具不同沸点的烃类化合物的含量比例不同而各有差异。所含高分子烃类的比例越高，闪点也越高，如石油产品中煤油闪点在 40℃ 以上，柴油在 50 ~ 65℃，重油在 80 ~ 120℃，润滑油要达到 300℃ 左右。自燃点却相反，沸点高的成品油，自燃点降低，如汽油自燃点为 415 ~ 530℃，裂化残渣油自燃点约 270℃，石油沥青则降至 230 ~ 240℃。原油作为包含烃类范围最广的一种混合物，其闪点在 -20 ~ 100℃ 之间，而自燃点则在 380 ~ 530℃ 之间。

第二节 天然气的组成及性质

一、天然气的组成及分类

天然气是天然存在于地下的由烃类、非烃类和其他复杂成分组成的气态混合物。

烃类包括烷烃、环烷烃、烯烃、芳香烃，以烷烃为主，其中甲烷 (CH₄) 占绝大多数，其次为乙烷 (C₂H₆)、丙烷 (C₃H₈)、丁烷 (C₄H₁₀) 和戊烷 (C₅H₁₂)，庚烷以上的烷烃含量极少。在常压、20℃ 以下，甲烷、乙烷、丙烷、丁烷呈气态。

非烃类气体一般有二氧化碳 (CO₂)、一氧化碳 (CO)、氮 (N₂)、氢 (H₂)、硫化氢 (H₂S) 和水蒸气 (H₂O)，另外还含有氦 (He)、氩 (Ar) 等惰性气体和硫醇、硫醚类等有机化合物。

天然气的组成可按照体积分数或质量分数来表示，以中原油田伴生气为例，按照体积分数，其组成为：甲烷 93.609%；乙烷 4.1154%；丙烷 1.1973%；其他组分（丁烷、戊烷、氮、二氧化碳等）为 1.0783%。

(1) 按照矿藏特点可将天然气分成纯气藏气、凝析气藏气和油田伴生气（表 1-1）。

表 1-1 天然气矿藏分类表

类 别	说 明
纯气藏气	不论开采的任何阶段，矿藏流体在地层中均呈气态
凝析气藏气	矿藏流体在底层原始状态下呈气态
油田伴生气	在底层中与原油共存，在采油过程中与原油同时被采出

(2) 按烃类组分关系分可分为干气、湿气、贫气和富气（表 1-2）。

表 1-2 天然气烃类分类表

类 别	说 明
干气	在底层呈气态，采出后在一般地面设备和管道中也不析出液态烃
湿气	在底层呈气态，采出后在一般地面设备的温度、压力下即液态烃析出
贫气	丙烷及以上烃类含量小于 100mL/m ³
富气	丙烷及以上烃类含量大于 100mL/m ³



(3) 此外, 还可以按照硫化氢、二氧化碳的含量是否超过一定的标准值将天然气划分为酸性天然气和洁气。

二、天然气的性质

1. 密度

1) 天然气的平均密度

天然气的平均密度是在一定状态参数下, 单位体积天然气的质量, 符号为 ρ , 单位为 kg/m^3 。

设 1kmol 气体质量为 M , 体积为 V_M , 则其密度为:

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

混合气体的密度可根据各组分的摩尔分数或体积分数与各自的千摩尔质量和摩尔体积计算。

$$\rho = \frac{\sum y_i M_i}{\sum y_i V_{M_i}} \quad (1-2)$$

在标准状态下 ($p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 $t = 0^\circ\text{C}$), 对于理想气体, $V_M = 22.414\text{m}^3$, 则:

$$\rho = \frac{1}{22.414} \sum y_i M_i \quad (1-3)$$

气体密度的倒数称为比体积, 用 ν 来表示

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

2) 天然气的相对密度

天然气的相对密度是指在相同的指定压力、温度下, 天然气的密度与干空气密度的比值, 用 Δ 符号表示。

$$\Delta = \frac{\rho}{\rho_a} \quad (1-5)$$

式中 Δ ——天然气的相对密度;

ρ ——天然气的密度, kg/m^3 ;

ρ_a ——干空气的密度, kg/m^3 。

一般所说的天然气的相对密度是指标准状态和工程状态的。

标准状态 $p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$, $T = 273.15\text{K}$ 时, 干空气密度 $\rho_a = 1.293\text{kg}/\text{m}^3$ 。

工程标准状态 $p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$, $T = 293.15\text{K}$ 时, 干空气密度 $\rho_a = 1.206\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2. 粘度

同液体一样, 气体在运动时也表现出粘度的性质, 但形成的内摩擦原因却不尽相同, 两层气体做相对运动时, 气体分子之间不仅具有相对移动造成的内摩擦, 而且由于气体分子无秩序的热运动, 两层气体分子之间可以相互扩散和交换, 也会引起内摩擦。

气体的粘度也受温度和压力的影响。在低压时, 温度升高, 气体分子无序热运动增强,

气层间的加速和阻滞作用增加。因此，气体的粘度随温度升高而增大；压力增高，气体的粘度也增大。随着压力的增加，温度升高对气体粘度的影响逐渐减小，当压力增加到一定程度后，温度对气体粘度的影响接近液体，气体粘度随温度升高而降低。

气体粘度可表示为动力粘度或运动粘度。动力粘度用符号 μ 表示，单位 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ，运动粘度用符号 ν 表示，单位 m^2/s 。动力粘度与运动粘度的关系为：

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-6)$$

3. 湿度（含水量）

天然气中一般含有一定量的水蒸气，天然气中含有水蒸气多少就用湿度或含水量来描述。

1) 绝对湿度和相对湿度

绝对湿度是指单位体积天然气与水蒸气的混合物中含有的水蒸气质量，符号 W_a ，单位 kg/m^3 。

$$W_a = m_w/V \quad (1-7)$$

由气体分压定律可知：

$$p_w V = m_w R_M T / M_w \quad (1-8)$$

于是：

$$W_a = p_w M_w / (R_M T) \quad (1-9)$$

式中 W_a ——天然气的绝对湿度， kg/m^3 ；

m_w ——混合气体中水蒸气质量， kg ；

V ——混合气体体积， m^3 ；

M_w ——水蒸气相对分子质量， $M_w = 18$ ；

p_w ——混合气体中水蒸气分压， Pa ；

R_M ——通用气体常数， $R_M = 8314.3 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ；

T ——混合气体温度， K 。

将 M_w ， R_M 代入式 (1-9) 中得出：

$$W_a = 2.163 \times 10^{-3} p_w / T \quad (1-10)$$

从式 (1-10) 中可以看出，在一定温度下，天然气的绝对湿度只与水蒸气的分压有关。若温度一定，水分增加到天然气被水蒸气所饱和时，混合气体中的水蒸气分压也就达到该温度下的最大值——饱和蒸汽压 p_w^0 。此时的绝对湿度称为饱和湿度，用 W_a^0 表示。

$$W_a^0 = 2.163 \times 10^{-3} p_w^0 / T \quad (1-11)$$

相对湿度就是天然气的实际绝对湿度与同温度下的饱和湿度之比，符号 ϕ 。

$$\phi = W_a / W_a^0 \quad (1-12)$$

由式 (1-11) 和式 (1-12) 得

$$\phi = p_w / p_w^0 \quad (1-13)$$

当天然气中水蒸气达到饱和时， $\phi = 1$ 。

2) 饱和含水量与水露点

含水量是指单位体积干天然气中所含的水蒸气量，符号 W ，单位 kg/m^3 。



$$W = m_{\omega} / V_g \quad (1-14)$$

由气体分压定律, 可知:

$$m_{\omega} = p_{\omega} VM_{\omega} / (R_M T) = \phi p_{\omega}^0 VM_{\omega} / (R_M T) \quad (1-15)$$

$$V_g = m_{\omega} / \rho_g = p_{\omega} VM_{\omega} / (\rho_g R_M T) = (p - \phi p_{\omega}^0) VM_{\omega} / (\rho_g R_M T) \quad (1-16)$$

代入式 (1-14) 得出:

$$W = \frac{M_{\omega}}{(p - \phi p_{\omega}^0) \rho_g} \quad (1-17)$$

当达到饱和时, 天然气的含水量称为饱和含水量, 记为 W^0 。此时有 $\phi = 1$, 即:

$$W^0 = M_{\omega} / [M_g p_{\omega}^0 (p - p_{\omega}^0) \rho_g] \quad (1-18)$$

式中 W ——天然气含水量, kg/m^3 ;

W^0 ——天然气饱和含水量, kg/m^3 ;

m_{ω} ——水蒸气质量, kg ;

V_g ——干天然气体积, m^3 ;

m_g ——干天然气质量, kg ;

M_{ω} ——水蒸气相对分子量;

M_g ——干天然气相对分子量;

p_{ω} ——水蒸气分压, Pa ;

p_{ω}^0 ——水饱和蒸汽压, Pa ;

p_g ——天然气分压, Pa ;

p ——混合气分压, Pa ;

ϕ ——天然气相对湿度;

ρ_g ——天然气密度, kg/m^3 。

在标准状态下, $\rho_g = M_g / 22.414$, 且 $M_{\omega} = 18$, 代入式 (1-18), 得:

$$W^0 = 0.803 p_{\omega}^0 / (p - p_{\omega}^0) \quad (1-19)$$

式 (1-19) 中, 水的饱和蒸汽压 p_{ω}^0 是温度的单值函数。可见, 在标准状态下, 气体的饱和含水量只与气体总压和温度有关, 而与气体种类和组成无关。

水露点也是表征天然气含水量的参数之一。它是指在压力一定的情况下, 逐渐降低温度, 当天然气中水蒸气开始凝结露时的温度。

对于不同温度和压力下的天然气饱和含水量和水露点, 可通过天然气露点图进行查询和计算。

4. 热值和爆炸极限

1) 热值

标准状态下 1m^3 燃气完全燃烧所放出的热量称为燃气的热值, 简称热值, 单位 kJ/m^3 。天然气的热值有高热值和低热值之分。高热值是指在恒定压力 ($1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)、恒定温度 (一般为 25°C) 下燃气完全燃烧, 生成的水蒸气完全冷凝成水所放出的热量; 低热值是



生成的水蒸气以气体排放出去的热量。在实际燃烧中，烟气排放温度比水蒸气冷凝温度要高得多，水蒸气并没有冷凝。所以在工程计算中，一般采用低热值。

天然气热值可由各单一组分气体的热值（表 1-3）根据混合法则计算。

表 1-3 单一组分理想状态下的热值

kJ/m^3

组分	101.325kPa, 273.15K		101.325kPa, 293.15K	
	高热值	低热值	高热值	低热值
甲烷	39829	35807	37033	33356
乙烷	69759	63727	64877	39362
丙烷	99264	91223	92331	84978
正丁烷	128629	118577	119655	110463
异丁烷	128257	118206	119307	110116
正戊烷	158087	146025	147063	136034
异戊烷	157730	145668	146729	135700
己烷	187528	173454	174459	161589
氢气	12789	10779	11889	10051
二氧化碳	12618	12618	11763	11763

理想气体热值方程为：

$$H^0 = \sum y_i H_i^0 \quad (1-20)$$

实际状态下气体热值为：

$$H = H^0 / Z \quad (1-21)$$

式中 H_i^0 —— i 组分的理想状态下的热值， kJ/m^3 ；

H^0 ——理想状态下混合气体的热值， kJ/m^3 ；

H ——混合气体的真实热值， kJ/m^3 ；

Z ——标准状态下燃气的压缩因子。

2) 天然气的爆炸（着火）极限

可燃气体在空气中的浓度低于某一极限时，氧化反应产生的热量不足以弥补散失的热量，使燃烧不能进行，这一极限称为着火下限；当其浓度超过某一极限时，由于缺氧也无法燃烧，该极限称为着火上限（又称爆炸极限）。对于不含氧或惰性气体的燃气，其爆炸极限可按下式估算：

$$L = \frac{100}{\sum_i \left(\frac{V_i}{L_i} \right)} \quad (1-22)$$

式中 L ——燃气的爆炸上（下）限（体积分数），%；

V_i ——燃气中 i 组分的体积分数，%；

L_i ——燃气中 i 组分的爆炸上（下）限（体积分数），%。

对于含有惰性气体的燃气，其爆炸极限范围缩小，可按式估算



$$L' = L \frac{\left(1 + \frac{u_i}{1 - u_i}\right) \times 100}{100 + L \left(\frac{u_i}{1 - u_i}\right)} \quad (1-23)$$

式中 L' ——含有惰性气体的燃气的爆炸上（下）限（体积分数），%；
 L ——不含惰性气体的燃气的爆炸上（下）限（体积分数），%；
 u_i ——惰性气体体积分数。

5. 形成水合物的特性

天然气在一定的温度和压力下可以与水结合形成类似冰的笼形结晶化合物，称为天然气水合物（详细介绍见本书第二章第二节）。

6. 状态方程

从热力学理论可知理想气体的状态方程为：

$$pV = mRT = nRT \quad (1-24)$$

式中 p ——气体压力，Pa；
 V ——气体体积， m^3 ；
 M ——气体质量，kg；
 R ——气体常数， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；
 T ——气体温度，K；
 n ——气体千摩尔数，kmol。

上述 pVT 关系式是经验公式，有两个假设条件：一是气体分子是质点没有体积；二是分子间无作用力。而实际上这样的理想气体是不存在的，只有在气压足够低、温度足够高，即密度足够小的情况下，才可以近似使用理想气体状态方程。

在实际天然气输气干线上，输气压力一般高达几兆帕或更高，此时必须考虑分子体积和分子间作用力。为了考虑这些效应，可以采用范德瓦尔斯在 1873 年提出的定性描述实际气体一般特征的范德瓦尔斯状态方程，以及之后又出现的大量经验或半经验关系式。

1) R-K 方程

R-K 方程是在范德瓦尔斯方程的基础上进行了修改，公式为：

$$p = \frac{R_M T}{V_M - b} - \frac{a}{T^{0.5} V_M (V_M + b)} \quad (1-25)$$

式中 a 、 b 是常数，对单组分气体，应用临界点的热力学稳定判据 $(dp/dc)_{T_c} = 0$ ， $(d^2p/dv^2)_{T_c} = 0$ ，与上式结合，可得到：

$$a = \Omega_a R_M^2 T_c^{2.5} / p_c \quad (1-26)$$

$$b = \Omega_b R_M T_c / p_c \quad (1-27)$$

其中， $\Omega_a = 0.42748$ ； $\Omega_b = 0.08664$ 。

对于混合气体，则常数 a 、 b 可由各组分的摩尔分数 y_i 和其 a_i 、 b_i 求得：

$$a = \left(\sum y_i a_i^{0.5} \right)^2 \quad (1-28)$$