

# 酸性气体注入和 二氧化碳封存技术

ACID GAS INJECTION AND  
CARBON DIOXIDE  
SEQUESTRATION

【美】John J. Carroll 编著

张煜 张建 王增林 李清方 刘海丽 陆诗建 译

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

# 酸性气体注入和 二氧化碳封存技术

[美] JohnJ. Carroll 编著

张煜 张建 王增林 译  
李清方 刘海丽 陆诗建

中国石化出版社

## 内 容 提 要

酸性气体地下注入技术 (Acid Gas Injection, AGI), 是直接将酸性气体注入适宜的地质构造当中, 是一种处理酸性气和二氧化碳、硫化氢混合气的成熟技术。本书从科学和工程角度介绍了酸性气体注入与二氧化碳地质封存技术的历史背景和现状, 主要介绍了常见酸性气体的基本物性, 深入阐述了相平衡的内涵和酸性气体的脱水方法, 对压缩机选型、管线设计等工程基础进行了详细分析, 引出了二氧化碳地质封存注入区的选择和注入剖面的计算。可供从事节能减排、气体处理及地质封存等相关领域的科技人员和研究人员参考使用。

著作权合同登记 图字: 01-2014-2621

Copyright © 2010 by Scrivener Publishing LLC. All rights reserved.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled <Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration>, ISBN <978-0-470-62593-4>, by <John J. Carroll>, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

版权©2010 归斯克夫纳出版有限责任公司所有, 保留所有权利并授予注册地址在中国北京(100000)安定门外大街58号的中国石化出版社专营权。

本书贴有Wiley公司防伪标签, 无标签者为未授权经营。

### 图书在版编目(CIP)数据

酸性气体注入和二氧化碳封存技术/(美)卡罗尔  
(Carroll, J. J.) 编著;张煜等译. —北京:中国石化出版社, 2014. 4  
书名原文: Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration  
ISBN 978-7-5114-2715-1

I. ①酸… II. ①卡… ②张… III. ①酸性气体-注入  
②二氧化碳-废物综合利用 IV. ①TE37 ②X701.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第055571号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街58号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

http://www.sinopec-press.com

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092毫米16开本12印张278千字

2014年5月第1版 2014年5月第1次印刷

定价:48.00元

# 《酸性气体注入和二氧化碳封存技术》 翻译组成员

成 员 （按姓氏拼音排序）

刘海丽 李清方 陆诗建 陆胤君

孙广领 尚明华 王 翀 王增林

于惠娟 张 建 张 煜 张媛媛

# 致 谢

由衷地感谢对此书付出辛勤劳动的人。首先最重要的是感谢我的雇主——气液工程公司，特别是公司的负责人 Doug Mac - Kenzie 和 Jim Maddoks，以及我的同事 Peter Griffin。他们给我提供介绍这项课程的机会并给我大量的时间撰写手稿。

除此之外，通过在气液工程公司的工作，我有机会参与到全世界很多注酸气项目的工作中。其中有些研究还没有出成果，还有一些已经运行了好多年。本书所介绍的许多内容来自于这些工程中的经验教训。

Alan Mather 一直以来是我的朋友兼导师。他是一个重要的信息来源，经常来自模糊的信息源。同时，他的实验室提供了该领域的有用信息，他领导的小组研究对于气体处理领域的进步至关重要。

本书基于我向全世界介绍的一项关于注酸气的课程。经过参与者多年研究的反馈，本书和课程的质量与内容已得到很大提高。注酸气课程也被译成汉语和波兰语得到应用。我已收到来自波兰翻译者 Eugene Grynia 以及中国翻译者 Ying Wu 的良好的反馈。

# 前 言

酸气注入(以下简称 AGI)已成为一项处理酸性气体的成熟技术;酸气即  $\text{CO}_2$  与  $\text{H}_2\text{S}$  的混合物。AGI 技术尤其适用于对处理  $\text{H}_2\text{S}$  无太多选择的小生产厂家。同时,大的生产厂家也看到了 AGI 的价值,业界认为 AGI 技术是一项环境友好型的难题解决方案。

本书以适合一般工程人员能够接受的方式,从工艺、科学和工程角度介绍了 AGI 技术。本书首先讨论了设计注气项目的基本数据和模型。现场工作人员能很好地理解涉及的相平衡是非常重要的。大多数的操作性问题与无益的相的生成有关系。不可否认的是,其中一些概念颇为复杂,很难用一种适合大众理解的方式将其表述出来。

接下来是对工程方面的介绍。该部分包括压缩机和管线的设计,并特别提到其不同于标准设计之处。最后综述地下地层方面的内容。毋庸置疑的是,本书关注的重点是 AGI 技术的地上方面,但是地下地层方面同样不容忽视,即使工艺工程师也不可忽视。

我们希望,在从事  $\text{CO}_2$  封存技术新型领域中的工程人员,应注意到其相似性,并能够将本书内容成功应用到他们的项目当中。从 AGI 技术中获得的经验可用于碳封存技术。

# 译者的话

天然气中的主要污染物，硫化氢和二氧化碳，常被分离出用于生产可销售的硫黄或气体。由于硫化氢和二氧化碳能溶于水形成弱酸，因此被称为“酸性气体”。

一旦从原料气中分离出这些酸性气体，下一步问题就是如何处理它们。如果存在大量的酸性气体，那么建造一个克劳斯形式(Claus - type)的除硫装置或化学吸收形式的二氧化碳捕集回收装置是一种经济的做法。但对于少量的酸性气体流，建造除硫或除碳装置就不是很适用了。在国际天然气工业中，酸性气体地下注入已经快速成为处理酸性气体的一种方法。

酸性气体地下注入技术(Acid Gas Injection, AGI)，是直接将酸性气体注入适宜的地质构造当中，是一种处理酸性气和二氧化碳、硫化氢混合气的成熟技术。油田、天然气储层、含盐地层和不可采煤层等都适合酸性气体的储存，据估算全球贮量至少可以达到 $2 \times 10^{11}$ t。

AGI技术尤其适合那些没有太多其他选择，而拥有少量硫化氢气源的生产者。同时，拥有大量硫化氢气源的生产者也看到了AGI的价值，目前AGI已经得到工程化应用，成为环境友好型处理酸性气体的一种选择。尤其需要指出的是，AGI与二氧化碳封存具有一定的相似性，从AGI技术中得到的经验教训，可以为二氧化碳封存技术提供借鉴。

为此，组织了相关技术人员将《酸性气体注入和二氧化碳封存技术》(原文名称: Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration)翻译成中文介绍给大家。

本书从科学和工程角度介绍了酸性气体注入与二氧化碳地质封存技术的历史背景和现状，主要介绍了常见酸性气体的基本物性，深入阐述了相平衡的内涵和酸性气体的脱水方法，对压缩机选型、管线设计等工程基础进行了详细分析，最后介绍了二氧化碳地质封存注入区的选择和注入剖面的计算。

本书的翻译出版是中石化胜利油田分公司与中石化石油工程设计有限公司从事酸性气体处理与碳捕集技术研究人员集体智慧的结晶。

李清方、刘海丽、陆诗建、尚明华、张媛媛、孙广领、王翀、于惠娟、陆胤君等同志参与了本书的翻译工作。其中，第1、2章由李清方翻译，第4章由王翀翻译，第5、7章由刘海丽翻译，第3、6、8章由陆诗建翻译，第9、10章由尚明华翻译，第11章由张媛媛翻译，第12章由孙广领翻译，第13章由陆胤君、于惠娟翻译。张煜教授级高工进行了全书统稿，张建、王增林教授级高工

负责了全书的校审工作。

本书的翻译出版得到了“十二五”国家科技支撑计划课题“大规模燃煤电厂烟气二氧化碳捕集、驱油及封存技术开发及应用示范”(2012BAC24B00)的支持,在此表示感谢。

中国石油大学(华东)在中国石化石油工程设计有限公司研究生工作站开展研究课题的2011级研究生同学参与了本书的图表制作及部分章节翻译工作,一并表示感谢。

AGI技术是一个复杂的科学研究领域。本书译著过程中,译者力争准确反映AGI技术的原理和应用,达到科学和实用的目标,但由于水平所限,难免有谬误之处,恳请读者批评指正。



# 目 录

第一章 介绍	( 1 )
1.1 酸性气体	( 1 )
1.2 人类活动产生的二氧化碳	( 3 )
1.3 烟气	( 3 )
1.4 标准体积	( 4 )
1.5 硫的等价物	( 5 )
1.6 脱硫天然气	( 6 )
1.7 注酸气	( 8 )
1.8 谁会使用注酸气?	( 9 )
1.9 总结	( 10 )
参考文献	( 11 )
附录 1A 氮的氧化物	( 12 )
附录 1B 硫的氧化物	( 13 )
第二章 硫化氢和二氧化碳	( 15 )
2.1 二氧化碳的性质	( 16 )
2.2 硫化氢的性质	( 17 )
2.3 物理性质的测定技术	( 19 )
2.4 酸性气体混合物的性质	( 28 )
2.5 碳氢化合物的影响	( 31 )
2.6 总结	( 32 )
参考文献	( 32 )
附录 2A 纯硫化氢的传输特性	( 33 )
参考文献	( 35 )
附录 2B 酸性气体混合物的黏度	( 37 )
参考文献	( 39 )
附录 2C 状态方程	( 40 )
第三章 非水相平衡	( 43 )
3.1 概述	( 43 )
3.2 压力-温度图	( 43 )
3.3 相平衡计算	( 49 )
3.4 总结	( 50 )

参考文献	( 50 )
附录 3A 一些附加的相平衡计算	( 52 )
参考文献	( 55 )
附录 3B 酸性气体混合物中气液平衡的状态方程的准确性	( 59 )
参考文献	( 61 )
<b>第四章 涉及水的流体相平衡</b>	<b>( 62 )</b>
4.1 气态烃中的含水量	( 62 )
4.2 酸性气体的含水量	( 63 )
4.3 估算方法	( 67 )
4.4 酸气溶解度	( 70 )
4.5 总结	( 74 )
参考文献	( 74 )
附录 4A 酸性气体的含水量的实验数据汇编	( 76 )
参考文献	( 77 )
附录 4B 对 Selleck 等人著作的评论	( 80 )
附录 4C 盐水溶液(NaCl)的密度	( 82 )
<b>第五章 水合物</b>	<b>( 84 )</b>
5.1 水合物简介	( 84 )
5.2 酸气的水合物	( 84 )
5.3 水合物形成条件判断	( 86 )
5.4 减缓水合物的形成	( 87 )
5.5 过量的水	( 90 )
5.6 水合物和 AGI(注酸气)	( 91 )
5.7 总结	( 91 )
参考文献	( 91 )
<b>第六章 压缩</b>	<b>( 92 )</b>
6.1 概述	( 92 )
6.2 理论上的注意事项	( 93 )
6.3 压缩机设计和操作	( 94 )
6.4 设计计算	( 94 )
6.5 级间冷却器	( 99 )
6.6 压缩和水分离	( 104 )
6.7 结构材料	( 107 )
6.8 高级设计	( 107 )
6.9 案例分析	( 108 )
6.10 总结	( 110 )

参考文献	(110)
附录 6A 额外的计算	(111)
<b>第七章 酸性气体的脱水</b>	<b>(115)</b>
7.1 乙二醇脱水	(115)
7.2 分子筛	(118)
7.3 制冷	(119)
7.4 注酸气与二氧化碳捕集的研究实例	(121)
7.5 总结	(123)
参考文献	(123)
<b>第八章 管道</b>	<b>(124)</b>
8.1 压降	(124)
8.2 温度损失	(128)
8.3 指导原则	(129)
8.4 测量	(129)
8.5 其他注意事项	(130)
8.6 总结	(130)
参考文献	(131)
附录 8A 样本管道温度损失计算	(132)
<b>第九章 注入剖面</b>	<b>(137)</b>
9.1 注入剖面的计算	(137)
9.2 碳氢化化合物的影响	(143)
9.3 案例研究	(148)
9.4 其他软件	(151)
9.5 总结	(151)
参考文献	(151)
附录 9A 补充示例	(152)
<b>第十章 处理地层的选择</b>	<b>(156)</b>
10.1 包容	(156)
10.2 可注入性	(157)
10.3 与酸性气体的相互作用	(159)
10.4 总结	(160)
参考文献	(160)
<b>第十一章 健康,安全,环境</b>	<b>(161)</b>
11.1 硫化氢	(161)
11.2 二氧化碳	(162)
11.3 应急预案	(163)

参考文献	(168)
<b>第十二章 资本成本</b>	<b>(169)</b>
12.1 压缩	(169)
12.2 管道	(170)
12.3 井	(170)
12.4 总结	(171)
参考文献	(171)
<b>第十三章 附加主题</b>	<b>(172)</b>
13.1 经验法则	(172)
13.2 图解汇总	(174)
13.3 气体的3种类型	(175)

# 第一章 介绍

尽管很多气体都是天然的(比如空气),但是此处的专业术语“天然气”指的是形成于地下、富含碳氢化合物的气体。这些气体本质上都是有机的,与石油、煤、泥煤并称为“化石燃料”。在时间、压力和温度的作用下,原始的生命体转化成了碳氢气体,我们统称为天然气。

天然气大部分由甲烷组成,同时含有少量其他的碳氢化合物,主要是乙烷到己烷之间的碳氢化合物。另外,天然气含有无机污染物,主要是硫化氢和二氧化碳,同时含有氮气、微量氨气和氢气。

存在于地层中的气体绝大部分与水伴生,因此气体通常是水饱和的。水的密度取决于储层的温度和压力,并在某种程度上与气体的成分有关系。

含有硫化氢的天然气被称为“酸性气体”。不含硫化氢或含少量硫化氢的天然气被称为“无硫气”。

天然气中的污染物,比如硫化氢和二氧化碳,常被分离出来用于生产一种可销售气体。由于硫化氢和二氧化碳能溶于水形成弱酸,因此被称为“酸性气体”。

硫化氢气体由于有高毒性和强烈的刺鼻性气味,必须被分离出。而分离出二氧化碳的一个原因是它没有燃烧热。分离出这些气体的另一个原因是它们具有腐蚀性。在阿尔伯塔省,出售的气体中硫化氢的含量一般少于 16ppm<sup>①</sup>,二氧化碳含量少于 2%。当然,不同行政区有不同的标准。

一旦从原料气中分离出这些酸性气体,下一步问题就是如何处理它们。如果存在大量的酸性气体,那么建造一个克劳斯形式(Claus - type)的除硫装置把 H<sub>2</sub>S 转化成良性的硫元素是一种经济的做法。一旦 H<sub>2</sub>S 转化成硫元素,那么剩余的二氧化碳就可以排放到大气中了。克劳斯装置是十分高效的,但即便如此也会释放大量的含硫化合物。比如,一个一天处理  $1000 \times 10^4 \text{ft}^3 \text{H}_2\text{S}$ ,并且可以把其中的 99.9% 转化成硫元素的克劳斯装置(在有尾气净化装置的前提下),相当于每天将  $1 \times 10^4 \text{ft}^3$  或大约 0.4t 的硫排到大气当中。注意,本章后面会对标准体积和硫等价物进一步讨论。

对于少量的酸性气体,克劳斯形式的硫处理装置就不是很适用了。过去,燃烧小部分酸性气体是允许的。但是随着人们环保意识的提高,这种行为已不被法律所允许。

在天然气工业中,注酸气已经快速成为处理酸性气体的一种方法。由于硫市场的波动性,大的生产厂家也在考虑引入此法。

## 1.1 酸性气体

上面提到,硫化氢与二氧化碳被称为酸性气体,溶于水中会发生反应形成弱酸。

---

① 16ppm 的 H<sub>2</sub>S 约为每 100SCF 中有一格令(grain);格令是用来描述气体中 H<sub>2</sub>S 含量的旧单位。

在水中形成弱酸的另一原因是酸性气体经常从天然气中被分离出。酸性溶液有腐蚀性，需要用特殊的工具盛装。

另一方面，酸性气体的酸度有利于它们在处理过程中被分离出。

### 1.1.1 硫化氢

硫化氢是一种二元弱酸(它经历了两次酸性反应)。电离反应如下:



下标(aq)表示反应发生在水相(富水)溶液中。

正是溶液中的氢离子( $\text{H}^+$ )使得溶液呈酸性。硫化氢是二元酸,因为它的两次反应都能产生氢离子。除此之外,当硫化氢溶于水之后,存在3种形态——分子形态( $\text{H}_2\text{S}$ )和两种离子形态:硫氢根离子( $\text{HS}^-$ )和硫离子( $\text{S}^{2-}$ )。

衡量反应过程进行程度的方法是平衡系数。系数如下:

$$K_{1,\text{H}_2\text{S}} = \frac{[\text{H}_{(\text{aq})}^{+}][\text{HS}_{(\text{aq})}^{-}]}{[\text{H}_2\text{S}_{(\text{aq})}]} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ at } 25^\circ\text{C}$$

$$K_{2,\text{H}_2\text{S}} = \frac{[\text{H}_{(\text{aq})}^{+}][\text{H}_2\text{S}_{(\text{aq})}][\text{S}_{(\text{aq})}^{2-}]}{[\text{HS}_{(\text{aq})}^{-}]^2} = 6.0 \times 10^{-16} \text{ at } 25^\circ\text{C}$$

方括号内代表着各个成分的浓度。只有各自的浓度很小时,此关系才成立。系数非常小,代表着反应不会进行的太彻底。因此,在其他的中性溶液中,大多数的硫化氢是以硫化氢分子的形式存在的。离子浓度受碱性物质的影响很大,并且在一定程度上也受酸性物质影响。由于硫化氢是酸性的,因此受碱性的影响非常大。

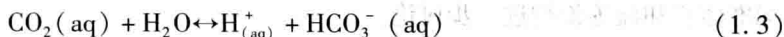
在  $25^\circ\text{C}$ 、 $101.325\text{kPa}$ (标准大气压)条件下,各种物质在水溶液中的组分分布可以通过溶解度和平衡系数计算出来。组分分布为:  $[\text{H}_2\text{S}] = 0.1 \text{ mol/kg}$ ,  $[\text{HS}^-] = 1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/kg}$ ,  $[\text{S}^{2-}] = 6.4 \times 10^{-16} \text{ mol/kg}$ ,  $[\text{H}^+] = 1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/kg}$ ,  $\text{pH}^{\text{①}} = 4.0$ 。

浓度的单位是质量摩尔浓度,即每千克溶液(溶剂为水)所含溶质的摩尔数。

### 1.1.2 二氧化碳

二氧化碳( $\text{CO}_2$ )也是一种二元弱酸,但是  $\text{CO}_2$  的反应稍有不同。

第一个反应是水解反应(和水反应):



第二个反应是简单的形成酸的反应:



同样,这些反应都发生在液相当中。二氧化碳在液相中有3种形态—— $\text{CO}_2$  分子形态和两种离子形态:碳酸氢根离子,也被称为氢碳酸根离子( $\text{HCO}_3^-$ ),和碳酸根离子( $\text{CO}_3^{2-}$ )。

反应的平衡系数如下:

$$K_{1,\text{CO}_2} = \frac{[\text{H}_{(\text{aq})}^{+}][\text{HCO}_3^{-}(\text{aq})]}{[\text{CO}_2(\text{aq})]} = 4.5 \times 10^{-7} \text{ at } 25^\circ\text{C}$$

①  $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$  并且通常  $[\text{H}^+]$  的浓度用每千克水(质量摩尔浓度)的摩尔数表示,但是低 mol/kg 浓度的水溶液与 mol/L 基本相等。

$$K_{2,\text{CO}_2} = \frac{[\text{H}_{(\text{aq})}^+][\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})]}{[\text{HCO}_3^-(\text{aq})]} = 4.7 \times 10^{-11} \text{ at } 25^\circ\text{C}$$

同样的，方括号里面的内容表示各种组分的浓度。与硫化氢一样，这些系数非常小，因此在中性溶液中大多数的二氧化碳是以分子的形态存在的。在 25°C、101.325kPa(标准大气压)条件下，水溶液中各组分的分布如下： $[\text{CO}_2] = 0.033 \text{ mol/kg}$ ， $[\text{HCO}_3^-] = 1.2 \times 10^{-4} \text{ mol/kg}$ ， $[\text{CO}_3^{2-}] = 4.7 \times 10^{-11} \text{ mol/kg}$ ， $[\text{H}^+] = 1.2 \times 10^{-4} \text{ mol/kg}$ ， $\text{pH} = 3.9$ 。

尽管  $\text{CO}_2$  的溶解度非常小，但  $\text{CO}_2$  溶液的 pH 值要稍小于  $\text{H}_2\text{S}$  溶液的 pH 值。这是因为二氧化碳电离度高，导致大量氢离子和酸根离子的生成。

## 1.2 人类活动产生的二氧化碳

人为产生的二氧化碳排入大气正在成为不受欢迎的做法。人们是否相信二氧化碳对环境有害，几乎成了一个有争议的问题。另外，全世界的立法者都认为这确实是个问题。有些国家甚至针对排放二氧化碳征收碳释放税。工程师们将更多地面临处理二氧化碳的问题。

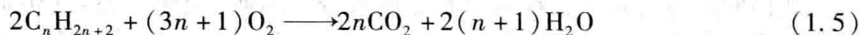
一些处理  $\text{CO}_2$  的技术与注酸气技术是相同的，接下来对这些技术也将展开讨论。

## 1.3 烟气

这里所说的烟气是指燃烧燃料的副产品。通常涉及的燃料包括天然气、油以及石油中的蒸馏物(如汽油)、煤，木材等。

燃烧是有氧气参与的过程。然而空气中只含有 21% 的氧气，这是燃烧所需的，其余 79% 是惰性气体，大部分为氮气。因此在烷烃的燃烧过程中每消耗 1mol 氧气需要多达 9.5mol 的空气。

碳燃料(煤、天然气或者石油)的燃烧都要产生气态的副产品，被称为烟气。首先考虑烷烃的燃烧。



例如，甲烷的燃烧反应过程是：



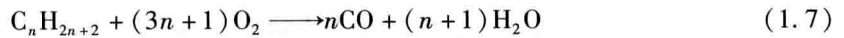
由上式可见，碳氢化合物的燃烧过程要释放二氧化碳和水。另外，每燃烧 1mol 的甲烷需要消耗 2mol 的氧气。

表 1.1 总结了燃烧部分轻组分的烷烃需要的氧气和空气量。有趣的是，随着碳氢化合物分子量的增加，产生的二氧化碳量也随之增加。

从表 1.2 我们可以看出，烟气由大于 75% 的氮气和大约 20% 的二氧化碳构成。除此之外，当在燃烧过程中通入 15% 的过量空气时，烟气中也含有大于 2.5% 的氧气。正如接下来要提到的，烟气中同样含有少量氮的氧化物和硫的氧化物。

试图注入整个烟气流是不适宜的。我们可以看出，处理气流的花费直接与注入气体的体积相关。

在没有足够氧气的情况下，烷烃不完全燃烧就会产生一氧化碳。



一氧化碳是一种非常危险的化学物质。室内条件下，呈气体状态，无色无味，有剧毒性，常被称为“无声杀手”。

表 1.1 每燃烧 1mol 不同的燃料所需要的空气量

燃料	消耗氧气的物质的量	需要的空气的物质的量 (0% 附加)	需要的空气的物质的量 (15% 附加)	产生的 CO <sub>2</sub> 物质的量
甲烷	2.0	9.52	10.95	2.00
乙烷	3.5	16.67	19.17	4.00
丙烷	5.0	23.81	23.81	6.00
异丁烷	6.5	30.95	35.60	8.00
正丁烷	6.5	30.95	35.60	8.00
异戊烷	8.0	38.10	43.81	10.00
正戊烷	8.0	38.10	43.81	10.00

表 1.2 燃烧不同种类的石蜡烃燃料得到的烟气的大致组成(无水的基础上)

燃料	0% 的过量空气		15% 的过量空气		
	氮气	二氧化碳	氮气	二氧化碳	氧气
甲烷	79.0	21.00	79.00	18.26	2.74
乙烷	76.70	23.30	76.99	20.34	2.67
丙烷	75.82	24.18	76.22	21.14	2.64
异丁烷	75.35	24.65	75.81	21.57	2.63
正丁烷	75.35	24.65	75.81	21.57	2.63
异戊烷	75.06	24.94	75.55	21.83	2.62
正戊烷	75.06	24.94	75.55	21.83	2.62

### 1.3.1 硫的氧化物

我们使用的大部分燃料都含有硫的成分。即使“脱硫”天然气仍然有硫的成分在里面。这些硫成分燃烧生成硫的氧化物 SO<sub>x</sub>：二氧化硫(SO<sub>2</sub>)和三氧化硫(SO<sub>3</sub>)。在室内条件下，纯的 SO<sub>2</sub> 是气体，但是纯的 SO<sub>3</sub> 是液体(沸点 45℃)。像二氧化碳和硫化氢一样，这些成分溶于水生成酸性物质。

更多关于硫的氧化物的性质详见附录。

### 1.3.2 氮的氧化物

在燃烧过程中，氮的来源有两个。一个来源是某些燃料(特别是煤和重质油)含有氮元素，在燃烧时，会释放出氮的氧化物。另一个来源是高温下空气中的氮气和氧气的反应。

更多关于氮的氧化物的性质详见附录。

## 1.4 标准体积

在石油行业中，通常用每单位时间内的标准体积来计量流量(流速)。



### 1.4.1 气体体积

气体流量的一般单位是 MMSCFD、Sm<sup>3</sup>/d 或者 Nm<sup>3</sup>/d。它们与气体物质的量的关系如下：

$$1\text{MMSCF} = 2635\text{lbmol} = 1.195 \times 10^6 \text{mol}$$

$$10^3\text{Sm}^3 = 42210\text{mol}$$

$$10^3\text{Nm}^3 = 40874\text{mol} \textcircled{1}$$

在天然气行业中前缀符号 M 的使用经常引起混淆。在标准的 SI 单位中，M 代表百万或 10<sup>6</sup>。因此，在 SI 单位中，1MJ 代表一兆焦或者一百万焦耳。在美国工程单位中，M 取自于罗马数字，指一千。因此 1MSCF 代表着一千标准立方英尺，而不是一百万标准立方英尺。要表示一百万，需要用两个 M (1000 × 1000 = 1000000)，因此，一百万标准立方英尺记作 1MMSCF。尽管会造成混淆，本文中仍然使用这个符号。

### 1.4.2 液体体积

石油行业中，“一桶”是体积单位，表示 42gal，等于 5.61458ft<sup>3</sup> 或 158.99L。液体的密度不如气体受温度的影响明显，但是仍然会有变化。因此，标准的桶是在 60 °F (15.56°C) 下所占的体积。

通过(天然气加工者协会，1996)定义我们知道：

$$1 \text{ bbl of H}_2\text{S} = 280.6 \text{ lb} = 127.3 \text{ kg}$$

$$1 \text{ bbl of CO}_2 = 286.4 \text{ lb} = 129.9 \text{ kg}$$

一标准桶(通常称作一桶)液态的酸性气体质量大约为 280lb(磅)或者 127kg。由于轻烃的存在使得质量略轻。标准桶和标准米的换算是 1bbl(桶) = 0.158 987 Sm<sup>3</sup> 或 6.2898 bbl = 1 Sm<sup>3</sup>。

此外，如前面所讲，1MMSCF 是 1.195 × 10<sup>6</sup>mol，因此 1MMSCF 的压缩 H<sub>2</sub>S 相当于 40728kg/d，即 320bbl/d。同样 1MMSCF 的 CO<sub>2</sub> 是 405bbl/d。尽管一桶 H<sub>2</sub>S 与一桶 CO<sub>2</sub> 的质量相近，但是按标准立方英尺换算时就有显著差距了。这是因为 CO<sub>2</sub> 的分子质量明显大于 H<sub>2</sub>S 的分子质量。因此作为一个近似值，1MMSCFD 的酸性气体相当于 350bbl 的液态酸性气体。

## 1.5 硫的等价物

通常用硫的等价物来表示气流中硫的含量。假设在气流中所有的硫化氢经过反应都被转化成硫元素：



根据这个反应，1mol 的硫化氢转化成 1mol 的硫元素。

如前面所讲，首先要确定气流中硫化氢的物质的量。用上面给出的等价物质的量乘以流量再乘以气流中硫化氢的摩尔分数，就可以得到气流中硫化氢的摩尔流量。

① 石油行业中，标准状态是指在 15.56°C (60°F) 和 101.325kPa 条件下；N 是指在正常状态 20°C 和 101.325kPa 条件下。化学中标准温度和压强(STP)是指在 0°C 和 1atm 条件下，但在石油行业不以此为标准。

以下是标准体积与物质的量之间的转换：379.5std. ft<sup>3</sup> = 11bmol，0.023690Sm<sup>3</sup> = 1mol，0.024465Nm<sup>3</sup> = 1mol