

王大钧 编译

# 氮气和烟道气在油 气田开发中的应用



石油工业出版社

# 氮气和烟道气在油气田 开发中的应用

王大钧 编译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了国外发展的注氮气、烟道气开发油气田新技术。通过有关的室内模拟试验和十一个典型实例的介绍,探讨了选择注氮气、烟道气的油气藏条件,同时也论述了注氮气、烟道气开发油气田,以及特殊油气田的优越性。通过各种采油方式的对比,对注氮气开发油气田进行了经济分析。

本书对从事油气田开发的决策人员、研究人员和工程技术人员有一定的指导作用。

## 氮气和烟道气在油气田开发中的应用

王大钧 编译

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京海淀昊海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本81/4印张108千字印 1—1,800

1991年1月北京第1版 1991年1月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0455-0/TE·438

定价: 2.55元

# 目 录

|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| 概论.....                              | ( 1 )  |
| 1. 注氮气和烟道气可开发不同类型的油气藏.....           | ( 1 )  |
| 2. 注氮气开发油气田可采取多种开采方式.....            | ( 2 )  |
| 3. 注氮气和烟道气开发油气田的采收率高.....            | ( 3 )  |
| 4. 氮气资源充足、成本低.....                   | ( 3 )  |
| 5. 注氮气开采的副作用小.....                   | ( 4 )  |
| 第一章 注氮气和烟道气的开采机理.....                | ( 14 ) |
| 一、氮气和烟道气的物理化学性质.....                 | ( 14 ) |
| 1. 氮气的一般性质.....                      | ( 14 ) |
| 2. 氮气与驱油有关的特性.....                   | ( 14 ) |
| 3. 烟道气的性质.....                       | ( 19 ) |
| 二、实验室的试验研究工作.....                    | ( 20 ) |
| 1. 试验方法.....                         | ( 20 ) |
| 2. 注氮气混相驱替试验.....                    | ( 21 ) |
| 3. 注氮气保持油气藏压力试验.....                 | ( 26 ) |
| 4. 对重油油藏注氮气的试验.....                  | ( 30 ) |
| 5. 氮气用于驱替二氧化碳混相驱段塞试验.....            | ( 35 ) |
| 6. 高压下氮气的密度测定证实注氮气适用于气顶油田<br>开发..... | ( 39 ) |
| 7. 注烟道气试验.....                       | ( 39 ) |
| 三、注氮气和烟道气的开采机理研究.....                | ( 41 ) |
| 1. 混相驱机理.....                        | ( 42 ) |
| 2. 重力驱机理.....                        | ( 52 ) |
| 3. 凝析气田注氮气开采.....                    | ( 54 ) |

|                                     |         |
|-------------------------------------|---------|
| 4. 注氮气开采裂缝性碳酸盐岩油藏.....              | ( 59 )  |
| <b>第二章 油气藏选择注氮气或烟道气的基本条件</b> .....  | ( 67 )  |
| 一、油层性质.....                         | ( 68 )  |
| 1. 渗透率.....                         | ( 68 )  |
| 2. 油层非均质和裂缝非均质性.....                | ( 68 )  |
| 3. 孔隙度.....                         | ( 74 )  |
| 4. 油层深度.....                        | ( 74 )  |
| 5. 油层温度.....                        | ( 75 )  |
| 6. 油层压力.....                        | ( 76 )  |
| 7. 饱和压力.....                        | ( 76 )  |
| 8. 含水饱和度.....                       | ( 76 )  |
| 9. 含油饱和度.....                       | ( 76 )  |
| 二、构造条件.....                         | ( 80 )  |
| 三、原油性质.....                         | ( 80 )  |
| 1. 原油重度.....                        | ( 80 )  |
| 2. 原油溶解度.....                       | ( 81 )  |
| 3. 原油组分对注气混相驱替效果的影响.....            | ( 81 )  |
| 4. 高粘油藏宜注烟道气.....                   | ( 84 )  |
| 四、注气时机.....                         | ( 85 )  |
| <b>第三章 氮气和烟道气的制造工艺及注氮脱氮方法</b> ..... | ( 89 )  |
| 一、空气冷冻分离制氮原理及工艺.....                | ( 89 )  |
| 二、烟道气的产生.....                       | ( 92 )  |
| 1. 锅炉烟道气的净化.....                    | ( 93 )  |
| 2. 发动机排出气体的净化.....                  | ( 94 )  |
| 三、注氮气的工艺流程.....                     | ( 94 )  |
| 四、注烟道气的工艺流程.....                    | ( 96 )  |
| 五、脱氮装置及工艺.....                      | ( 98 )  |
| <b>第四章 油田试验和开发实例</b> .....          | ( 101 ) |

# I

|                                             |         |
|---------------------------------------------|---------|
| 一、福多奇油田注氮气混相驱.....                          | ( 102 ) |
| 1. 油田地质构造及油藏描述.....                         | ( 103 ) |
| 2. 油田开发情况.....                              | ( 106 ) |
| 3. 油田开发中的模拟研究.....                          | ( 114 ) |
| 4. 油田开发中遇到的问题和解决的措施.....                    | ( 124 ) |
| 二、杰 ( Jay ) 油田交替注水注氮气开发.....                | ( 133 ) |
| 1. 地质情况.....                                | ( 133 ) |
| 2. 油田开发情况.....                              | ( 134 ) |
| 3. 注水动态分析.....                              | ( 137 ) |
| 4. 实验室的试验.....                              | ( 138 ) |
| 5. 混相驱替数值模拟.....                            | ( 140 ) |
| 6. 油田三维模型.....                              | ( 148 ) |
| 7. 油田实际开采效果.....                            | ( 152 ) |
| 8. 方案评价.....                                | ( 160 ) |
| 9. 结论.....                                  | ( 161 ) |
| 三、雷克曼溪(Ryckman Creek) 油田注氮气开发.....          | ( 162 ) |
| 1. 地质情况.....                                | ( 162 ) |
| 2. 油田开发情况.....                              | ( 163 ) |
| 3. 开采方式的评价.....                             | ( 165 ) |
| 4. 驱替天然气方式的选择.....                          | ( 165 ) |
| 5. 注氮气方案预测.....                             | ( 169 ) |
| 四、利角 ( Headlee ) 凝析气田注氮气驱动混相段塞开<br>采.....   | ( 171 ) |
| 1. 地质情况.....                                | ( 171 ) |
| 2. 开采情况.....                                | ( 172 ) |
| 五、安休兹 ( Anschutz ) 凝析气田早期注氮气保持压力<br>开发..... | ( 174 ) |
| 1. 地质构造.....                                | ( 174 ) |

|                                                     |                |
|-----------------------------------------------------|----------------|
| 2. 开采情况.....                                        | ( 175 )        |
| 六、埃尔科盆地恩巴油藏注惰性气体开发.....                             | ( 176 )        |
| 1. 油藏情况.....                                        | ( 176 )        |
| 2. 油田开发情况.....                                      | ( 178 )        |
| 七、马撒 ( Martha ) 油田注惰性气体开发 .....                     | ( 185 )        |
| 1. 地质情况.....                                        | ( 185 )        |
| 2. 油田开发情况.....                                      | ( 185 )        |
| 八、斯劳夫特 ( Slaughter ) 油田注酸性气体和用氮气驱<br>替酸性气体段塞开发..... | ( 191 )        |
| 1. 基本情况.....                                        | ( 191 )        |
| 2. 先导性试验区.....                                      | ( 192 )        |
| 九、库罗姆 ( Coulommas ) 油田注氮气驱动二氧化碳混相段<br>塞开采.....      | ( 196 )        |
| 1. 油层特点.....                                        | ( 196 )        |
| 2. 裂缝地质研究.....                                      | ( 198 )        |
| 3. 油藏研究.....                                        | ( 199 )        |
| 4. 试验研究工作.....                                      | ( 199 )        |
| 5. 模拟工作.....                                        | ( 201 )        |
| 6. 油田试验.....                                        | ( 201 )        |
| 7. 结果.....                                          | ( 202 )        |
| 8. 油田注气分析.....                                      | ( 203 )        |
| 9. 结论.....                                          | ( 207 )        |
| 十、31区块油田注天然气和烟道气开采.....                             | ( 208 )        |
| 1. 地质情况.....                                        | ( 208 )        |
| 2. 油田开发简史.....                                      | ( 210 )        |
| 十一、伊比利亚 ( Iberia ) 油田注烟道气开采 “阁楼” 油... ( 215 )       |                |
| <b>第五章 注氮气和烟道气的经济分析.....</b>                        | <b>( 217 )</b> |
| 一、一般性经济分析.....                                      | ( 217 )        |

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| 1. 注氮气的成本分析.....        | ( 217 ) |
| 2. 注烟道气的成本分析.....       | ( 220 ) |
| 3. 注氮气与注烟道气的成本对比.....   | ( 224 ) |
| 二、凝析气田注氮气开发的经济分析.....   | ( 226 ) |
| 1. 开发特点.....            | ( 227 ) |
| 2. 动态计算方法和计算结果.....     | ( 231 ) |
| 3. 经济分析与对比.....         | ( 232 ) |
| 三、对注氮气、烟道气和二氧化碳的认识..... | ( 245 ) |
| 1. 对比.....              | ( 245 ) |
| 2. 认识.....              | ( 247 ) |
| <b>参考文献</b> .....       | ( 249 ) |
| <b>有关单位换算表</b> .....    | ( 256 ) |

## 概 论

注氮气、烟道气开发油气田是本世纪七十年代中期到八十年代发展起来的油气田开采新技术。特别是1979年以来，采用注氮方式开发的油气田日益增多，美国在这方面处于技术领先的地位，他们不仅在实验室进行了系统的试验研究工作，而且对不同类型油田的不同开采方式成功地进行了注氮气开发。到1985年底，美国和加拿大已有33个油气田注氮气开发，注氮气总量高达6亿英尺<sup>3</sup>/日。法国巴黎盆地库罗姆油田1984年开始注氮气，苏联也在进行注氮气现场试验。

油、气田的注氮气规模发展迅速，开始从日注氮气的量200~400万英尺<sup>3</sup>的小油田逐渐转向在大型的油气藏注氮气开发（日注氮气的量高达1~1.2亿英尺<sup>3</sup>）。开始时注氮气开采的油气藏深度为2500~7000英尺，1985年已达到10000~15000英尺深，注入压力最高达8300磅/英寸<sup>2</sup>。

1976年以前，在美国经营注氮气的石油公司仅有莫比尔、马拉松、阿莫科和阿科四家；到1985年，有14家大石油公司经营了油气田注氮气业务（见表1）。

注氮气开采油气田技术得到了迅速发展，它有以下几方面的特点：

### 1. 注氮气和烟道气可开发不同类型的油气藏

（1）随着各产油国油气资源的开发和利用，难采储量比例愈来愈大。在已探明的油气储量中，由于优先投入开发

中、高渗透性油藏，低渗透性油气田的储量比例相应提高，特别是注水开采效果差的、渗透率低（10毫达西左右）的油气藏适于注气保持压力开发。

（2）由于勘探目的层日益加深，勘探出更多的优质的挥发性油藏、凝析气藏和气藏。对于这些油气藏，采用注气混相驱开发可以获得很高的采收率。

（3）对于气顶油田，注氮气可以同时开采气顶气及油环油，开采期短、经济效益高。

（4）注氮气不仅可用于砂岩油田开发，也可用于开采碳酸盐岩油藏。据统计（见表2）当前注氮气开采的油气田中，砂岩油藏占67%，而碳酸盐油藏占33%。

（5）注烟道气开采稠油有很好的降粘效果。

## **2. 注氮气开发油气田可采取多种开采方式**

（1）用于保持压力、非混相驱开发油田。1973~1985年国外有10个油田进行注氮气保持压力开采（其中4个油田全部地保持压力，6个油田部分地保持压力），注氮气体量为2.05亿英尺<sup>3</sup>/日，约占注氮气及注烟道气（处理后为惰性气体）油田数及总注入量的三分之一。采用这类开发方式的油田为低孔隙性（孔隙度为4~15%）、低渗透性（渗透率1~100毫达西）、原油重度31~60°API和油层深度1200~9000英尺（见表1和表2）。

（2）注氮气或烟道气重力驱开采油气藏。美国先后有10个油田（其中5个油田注氮气，5个油田注惰性气）用重力驱注气开采，注入量1.49亿英尺<sup>3</sup>/日，占总注氮量四分之一。这类油田为孔隙性好（孔隙度25~33%）、渗透性好（渗透率为200~3000毫达西）、油层埋藏较深（5000~17500英尺）

和高闭合差的盐丘或背斜油藏（见表1和表2）。

由于重力驱是一切非混相驱开采方式中原油采收率最高的一种，因此对于有条件进行重力驱开发的油气田是不应忽视的。

（3）混相驱开发油气藏。在1980年前有少数油田开始注烟道气直接进行混相驱，或以烟道气推动二氧化碳混相段塞。但进入80年代后，注氮气进行混相驱方式开发油气藏已成为注气开采的新动向、新技术。已有13个油气田进行注气混相驱（10个油田注氮气，其余3个油田注烟道气），注气量达3.12亿英尺<sup>3</sup>/日，约占总注入量的二分之一。1981年前多用于推动二氧化碳混相驱段塞，1981年后直接注氮气混相驱开发。

这类开采方式的油田油层物性差，孔隙度4~20%，渗透率0.1~38毫达西，原油中含一定溶解气，原油重度为38~51°API，多数高于45°API，多属轻质油或凝析气，油气藏埋藏深，（7350~15800英尺，多数在10000~15000英尺）。

### 3. 注氮气和烟道气开发油气田的采收率高

在高温下对含有溶解气的原油注氮气开采试验表明，采收率可达95%，甚至更高。经多次接触达到混相（包括蒸发混相和凝析混相），驱替效率高；如果是具有较多的中间组分的轻质原油，注氮气很快达到混相，开采原油取得良好的效果。此外，注烟道气可以开采重组分较多的原油，它可起到降粘作用。

### 4. 氮气资源充足、成本低

注氮气及烟道气（防腐处理后为惰性气体）开采油气田

技术发展迅速的重要原因之一是气源充足而价廉。人们早在二十世纪初就利用注天然气保持压力开采，由于国外从60年代到70年代天然气价格不断上涨，转而考虑用非烃气体取代天然气，诸如二氧化碳或烟道气、氮气等。在美国注氮气成本约为注天然气成本的四分之一，是注二氧化碳成本的二分之一到三分之一。而且氮气来源于空气，资源充足且不受地理环境限制。在能源利用上比注天然气更合理。氮气是惰性气体，使用安全可靠。

### 5. 注氮气开采的副作用小

根据实验室和数值模拟研究表明，由于氮气的驱替作用使地层压力降极小，液体最大损失量仅为总液体量的15%。并且证实氮气只略微增加原油密度和粘度。所以注氮气对产量、储量以及经济方面副作用小。

总之，能够以不同方式注氮气和烟道气开发不同类型的油气田，具有采油效果好、注入气源丰富和成本低、经济效益好等非常现实的优越性。

我国注氮气开采工艺发展较晚，直到1986年底，仅华北雁翎油田与法国合作制定了一个注氮气开采试验方案，并计划从美国引进注氮设备。现在正进行方案的实施准备工作。大庆油田、大港油田、中原油田以及青海尕斯库勒油田都曾有过注氮气或注烟道气的协议，但至今大都处于研究和准备阶段。

从我国油气后备资源分析，我国西部最大盆地塔里木以及国内其他各含油盆地加深勘探也将提供一定的储量，并且由于这些地区油气藏埋藏深，从成油门限深度以及热演化条件分析，挥发性油藏、凝析气藏以及气藏在新发现油气田中

将占很大比例。油藏深度大，油层物性相应较差，注氮气开发将比注水开发效果要好得多。

在我国已开发的油气田中，有部分低渗透、稠油和凝析气藏都未能实现充分合理的开发。特别是在目前天然气短缺和成本增高的情况下，如果注氮气或烟道气开采轻质油藏将获得较高的原油采收率。并且这些油藏不宜注水开发，这些油藏是注水开发的难题，除了改善注水工艺外，研究注氮气及烟道气等开采方法就显得格外重要和迫切，其作用决不限于作为三次采油方法，而是在油田开发初期就应作为提高原油采收率的主要开采方式和手段。特别是将要勘探和开发的沙漠等缺水地带，氮气将成为保持压力或混相驱开发轻质油藏和气藏最可靠和最现实的注入剂。在某种意义上讲，在我国及早开展注氮气开发油气田的研究及现场试验，并选择部分油气田注氮气开采将为我国石油工业发展而进行的必要技术准备。

表 1 主要油气田的注氮气情况

| 序号 | 油气田名称                               | 经营者                         | 开始时间         | 注氮量<br>百万英尺 <sup>3</sup> /日 | 压力<br>磅/英寸 <sup>2</sup> | 注气<br>来源   | 开采方式 |
|----|-------------------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|-------------------------|------------|------|
| 1  | 安德克特·伊林伯格<br>(Andector-Ellenberger) | 菲利浦<br>(Phillips)           | 1982         | 2                           | 2000                    | 氮气         | 非混相区 |
| 2  | 雷克曼溪<br>(Ryckman Creek)             | 阿莫科<br>(Amoco)              | 1981         | 24                          | 3000                    | 氮气         | 非混相区 |
| 3  | 里斯本<br>(Lisbon)                     | 联合<br>(Union)               | 1982         | 6                           | 3000                    | 氮气         | 非混相区 |
| 4  | 斯通布鲁夫<br>(Stone Bluff)              | 海湾<br>(Gulf)                | 1981         | 1                           | 100                     | 氮气         | 非混相区 |
| 5  | 文图拉<br>(Ventura)                    | 莫比尔<br>(Mobil)              | 1973         | 17                          | 5500                    | 惰性气        | 非混相区 |
| 6  | 肖-维尔-塔姆<br>(Anschutz)               | Q. Little<br>阿莫科<br>(Amoco) | 1984<br>1982 | 2<br>100                    | 2000<br>6200            | 氮气         | 非混相区 |
| 7  | 安休兹<br>(Anschutz)                   | 阿莫科<br>(Amoco)              | 1982         | 100                         | 6200                    | 氮气         | 保持压力 |
| 8  | 亚泰斯<br>(Yates)                      | 马拉松<br>(Marathon)           | 1976         | 20                          | 700                     | 惰性气<br>或氮气 | 保持压力 |
| 9  | 春丘拉<br>(Chunchulla)                 | 联合<br>(Union)               | 1984         | 18                          | 5000                    | 氮气         | 保持压力 |
| 10 | 潘特东区<br>(E. Painter)                | 雪夫隆<br>(Chevron)            | 1984         | 15                          | 5000                    | 氮气         | 保持压力 |

续表

| 序号 | 油气田名称                     | 经营者             | 开始时间 | 注氮量<br>百万英尺 <sup>3</sup> /日 | 压力<br>磅/英寸 <sup>2</sup> | 注气<br>来源 | 开采方式 |
|----|---------------------------|-----------------|------|-----------------------------|-------------------------|----------|------|
| 11 | 伊莱因<br>(Elaine)           | 德士古<br>(Texaco) | 1977 | 4 (估计)                      | 4000 (估计)               | 惰性气      | 重力驱  |
| 12 | 卡里奥岛<br>(Calliou Island)  | 德士古<br>(Texaco) | 1974 | 1 (估计)                      | 4000 (估计)               | 氮气       | 重力驱  |
| 13 | 伊比利亚<br>(Iberia)          | 德士古<br>(Texaco) | 1977 | 2 (估计)                      | 4000 (估计)               | 惰性气      | 重力驱  |
| 14 | 利维尔<br>(Leeville)         | 德士古<br>(Texaco) | 1979 | 4 (估计)                      | 4000 (估计)               | 氮气       | 重力驱  |
| 15 | 西哈克伯里<br>(West Hackberry) | 阿莫科<br>(Amoco)  | 1979 | 2 (估计)                      | 4000 (估计)               | 惰性气      | 重力驱  |
| 16 | 佩尔托湖<br>(Lake Pelt)       | 德士古<br>(Texaco) | 1979 | 4 (估计)                      | 4000 (估计)               | 氮气       | 重力驱  |
| 17 | 东哈克伯里<br>(East Hackberry) | 阿莫科<br>(Amoco)  | 1974 | 4 (估计)                      | 4000 (估计)               | 惰性气      | 重力驱  |
| 18 | 文奈斯<br>(Venice)           | 盖特<br>(Getty)   | 1978 | 4 (估计)                      | 4000 (估计)               | 氮气       | 重力驱  |
| 19 | 巴里湖<br>(Lake Berre)       | 德士古<br>(Texaco) | 1979 | 4 (估计)                      | 4000 (估计)               | 氮气       | 重力驱  |
| 20 | 豪金斯<br>(Hankins)          | 埃克森<br>(Exxon)  | 1977 | 120                         | 1700                    | 惰性气      | 重力驱  |

续表

| 序号 | 油气田名称                        | 经营者              | 开始时间 | 注氮量<br>百万英尺 <sup>3</sup> /日 | 压力磅/<br>英寸 <sup>2</sup> | 注气<br>来源 | 开采方式                      |
|----|------------------------------|------------------|------|-----------------------------|-------------------------|----------|---------------------------|
| 21 | 双弗里兹<br>(Two Freds)          | HNG              | 1981 | 6                           | 1900                    | 惰性气      | CO <sub>2</sub> 段塞混相驱     |
| 22 | 31 区块<br>(Block 31)          | 阿 科<br>(Arco)    | 1966 | 54                          | 4250                    | 惰性气      | CO <sub>2</sub> 段塞混相驱     |
| 23 | 福多奇<br>(Fordoche)            | 太 阳<br>(Sun)     | 1977 | 10                          | 8300                    | 氮气       | CO <sub>2</sub> , 天然气混相段塞 |
| 24 | 帕拉迪斯<br>(Paradis)            | 德士古<br>(Texaco)  | 1981 | 4                           | 4000                    | 氮气       | CO <sub>2</sub> , 天然气混相段塞 |
| 25 | 莱丰兰德<br>(Levelland)          | 阿莫科<br>(Amoco)   | 1979 | 12                          | 3000                    | 氮气       | CO <sub>2</sub> , 天然气混相段塞 |
| 26 | 威利斯登·格林<br>(Willisden Green) | Dome             | 1981 | 30                          | 4300                    | 氮气       | CO <sub>2</sub> , 天然气混相段塞 |
| 27 | 潘 特<br>(Painter)             | 雪夫隆<br>(Chevron) | 1980 | 94                          | 4800                    | 氮气       | 混 相 驱                     |
| 28 | 东韦尔穆尔<br>(East Vealmoor)     | 盖 特<br>(Getty)   | 1981 | 3                           | 3500                    | 氮气       | 混 相 驱                     |
| 29 | 杰<br>(Jay)                   | 埃克森<br>(Exxon)   | 1982 | 65                          | 7600                    | 氮气       | 混 相 驱                     |
| 30 | 布莱克杰克溪<br>(Blackjack Creek)  | 埃克森<br>(Exxon)   | 1982 | 7                           | 7600                    | 氮气       | 混 相 驱                     |

续表

| 序号 | 油气田名称                   | 经营者               | 开始时间 | 注氮量<br>百万英尺 <sup>3</sup> /日 | 压力<br>磅/英寸 <sup>2</sup> | 注气<br>来源 | 开采方式 |
|----|-------------------------|-------------------|------|-----------------------------|-------------------------|----------|------|
| 31 | 利角北区<br>(North Headlee) | 莫比尔<br>(Mobil)    | 1982 | 3                           | 5000                    | 氮气       | 混相驱  |
| 32 | 东宾格<br>(East Binger)    | 菲利普<br>(Phillips) | 1977 | 24                          | 4500                    | 惰性气      | 混相驱  |
| 33 | 凡尼彻奇<br>(Fanny Church)  | 埃克森<br>(Exxon)    | 1985 | 4                           | 4000                    | 氮气       | 混相驱  |

注：惰性气体指处理后的烟道气。