

# 天然气跨音速

# 气水分离技术

王俊奇 著

TIANRANQI KUAYAYINSU  
QISHUI FENLI JISHU

石油工业出版社

# 天然气跨音速气水分离技术

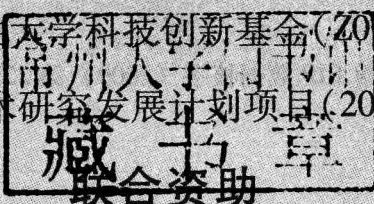
王俊奇 著

本书由

西安石油大学优秀学术著作出版基金

西安石油大学科技创新基金(207006)

陕西省科学技术研究发展计划项目(2009K10-10)



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书从天然气跨音速气水分离技术的实际出发,结合国内外最新进展和成就,反映了天然气跨音速气水分离理论的最新研究成果。全书共分九章,重点论述了收敛-扩张喷管的结构设计,天然气高速流动下饱和水的凝结析出,产生旋流的翼型设计与水洞实验,气水两相旋流的机理与规律,天然气绕三角翼流动的数值模拟以及整个流动过程的数值仿真。

本书的读者对象不仅是油气田开发的科研、生产、设计和管理人员,也可作为从事天然气处理、集输、生产人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

天然气跨音速气水分离技术/王俊奇著.

北京:石油工业出版社,2010.3

ISBN 978-7-5021-7545-0

I. 天…

II. 王…

III. 天然气-跨音速-气液分离

IV. TE645

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 223624 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) 64523612 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

---

2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:14.5

字数:218 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

# 前 言

在天然气工业中，水的存在会对天然气的开采、集输、使用产生不利影响。因此，将天然气中的水进行分离排出是气田开发必须研究和解决的问题。目前的井筒排水采气工艺不能降低天然气的露点；地面集气站或净化厂的脱水设备虽能降低露点，使天然气满足商品气的质量要求，但设备投资大，运行维护成本高。本书提出的天然气跨音速气水分离技术是对上述的缺点加以克服而形成的新技术，它可大大简化地面流程，具有巨大的节约投资与降低运行成本的意义。

本书采用数理建模、数值仿真与水洞实验有机结合的技术路线，系统研究了喷管流动、液滴凝结、天然气绕翼流动、气液旋流、三元回压流动等主要流动过程的规律，构建了关键流动过程的数理模型，完成了气水分离与旋流排液全过程的数值仿真研究，提出了天然气跨音速气水分离的原理和结构设计方法。研究结果无论在理论上还是在实践上，都对该技术的推广应用具有积极的指导意义。

本书主要内容取材于作者的博士论文。感谢我的博士导师徐永高教授对论文的指导，更承蒙他在百忙之中对本书成稿进行了认真审核，特此致谢。

在本书成稿过程中得到西安石油大学石油工程学院、化学化工学院有关领导、专家的大力协助，在此谨向他们表示衷心的感谢！还要感谢西安交通大学的白博峰教授、南京航空航天大学的徐静雷教授和中国石油集团钻井工程技术研究院江汉机械研究所的马卫国副所长为本书提供了帮助，在此表示衷心感谢！

本书的出版得到西安石油大学优秀著作出版基金、西安石油大学科技创新基金研究项目(Z07006)、陕西省科学技术研究发展计划项目(2009K10-10)的共同资助。在此，要特别感谢上述有关基金委员会和部门对作者在天然气跨音速气水分离方面的研究工作提供的资助。

由于作者水平有限，书中如有不妥之处，敬请各位专家、同行和广大读者批评指正。

王俊奇

2009年10月8日于西安

## 目 录

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| <b>1 绪论</b>           | <b>1</b>  |
| 1.1 研究的背景与意义          | 1         |
| 1.2 国内外研究现状           | 4         |
| 1.3 主要研究内容与技术路线       | 10        |
| 1.4 主要成果及创新点          | 12        |
| <b>2 气体动力学基础</b>      | <b>14</b> |
| 2.1 气体一维定常流动的基本方程组    | 14        |
| 2.2 气体的一维定常等熵流动       | 16        |
| 2.3 一维等熵流的三种特定状态      | 17        |
| 2.4 一维等熵流气体参数的各种常用关系式 | 19        |
| 2.5 气流参数与管道截面积的关系     | 21        |
| 2.6 喷管的性能参数           | 26        |
| 2.7 喷管的流动特性           | 28        |
| 2.8 拉法尔喷管流动状态的计算      | 33        |
| 2.9 膨胀波与激波            | 36        |
| <b>3 天然气收敛-扩张喷管设计</b> | <b>58</b> |
| 3.1 收敛-扩张喷管几何结构       | 58        |
| 3.2 天然气焓熵计算           | 60        |
| 3.3 天然气在喷管中的流动模型及求解   | 62        |
| 3.4 实例计算与结果分析         | 66        |
| 3.5 本章小结              | 68        |
| <b>4 天然气高速流动凝结模型</b>  | <b>69</b> |
| 4.1 液滴成核理论及其修正        | 69        |
| 4.2 液滴成长理论            | 75        |
| 4.3 高速天然气在喷管内的凝结      | 78        |
| 4.4 实例计算与结果分析         | 81        |

|      |                  |     |
|------|------------------|-----|
| 4.5  | 本章小结             | 84  |
| 5    | 三角翼参数设计及水洞实验研究   | 86  |
| 5.1  | 大后掠角细长三角翼气动原理    | 86  |
| 5.2  | 三角翼几何参数设计        | 90  |
| 5.3  | 水洞实验             | 96  |
| 5.4  | 本章小结             | 99  |
| 6    | 高速流体绕三角翼流动的数值模拟  | 101 |
| 6.1  | 控制方程             | 101 |
| 6.2  | 求解条件             | 103 |
| 6.3  | 网格划分             | 104 |
| 6.4  | 方程的数值求解          | 104 |
| 6.5  | 模拟结果与分析          | 105 |
| 6.6  | 本章小结             | 116 |
| 7    | 气液两相流体旋流机理与规律    | 118 |
| 7.1  | 液滴受力分析           | 118 |
| 7.2  | 液滴运动方程的建立与简化     | 122 |
| 7.3  | 压降与分离效率模型        | 124 |
| 7.4  | 实例计算与结果分析        | 126 |
| 7.5  | 本章小结             | 132 |
| 8    | 流动全过程的数值仿真       | 133 |
| 8.1  | 几何模型             | 133 |
| 8.2  | 计算网格、边界条件与计算过程   | 137 |
| 8.3  | 系统典型流场的结果分析      | 138 |
| 8.4  | 旋流分离系统中回压段内的流动分析 | 144 |
| 8.5  | 本章小结             | 151 |
| 9    | 结论与建议            | 152 |
| 9.1  | 主要结论             | 152 |
| 9.2  | 进一步研究的建议         | 153 |
| 附录 A | 常规天然气气水分离方法      | 154 |
| A.1  | 低温冷却法            | 154 |
| A.2  | 液体吸收法            | 160 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| A. 3 固体吸附法 .....                    | 179        |
| <b>附录 B 用 M-H 方程计算天然气的焓熵值 .....</b> | <b>207</b> |
| B. 1 实际气体的 M-H 方程 .....             | 207        |
| B. 2 余函数法基本原理 .....                 | 209        |
| B. 3 实际气体的余焓方程 .....                | 210        |
| B. 4 实际气体的余熵方程 .....                | 211        |
| B. 5 天然气混合气体的焓熵计算 .....             | 212        |
| <b>参考文献 .....</b>                   | <b>213</b> |

# Contents

|          |                                                                                         |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>                                                                     | 1  |
| 1.1      | Research Background and Significance                                                    | 1  |
| 1.2      | Current Research Status                                                                 | 4  |
| 1.3      | Main Works and Outline                                                                  | 10 |
| 1.4      | Main Contributings and Innovations                                                      | 12 |
| <b>2</b> | <b>Gas Dynamics Basis</b>                                                               | 14 |
| 2.1      | Basic Equations of Gas One-Dimensional Permanent Flow                                   | 14 |
| 2.2      | Gas One-dimensional Permanent and Isoentropic Flow                                      | 16 |
| 2.3      | There Specific State of One-dimensional Isoentropic Flow                                | 17 |
| 2.4      | Various Commonly Used Relationship of One-dimensional Isentropic<br>Flow Gas Parameters | 19 |
| 2.5      | Relationship Between Flow Parameters and Channel<br>Cross-sectionl Area                 | 21 |
| 2.6      | Noaale Performance Parameters                                                           | 26 |
| 2.7      | Noaale Flow Characteristics                                                             | 28 |
| 2.8      | Calculation of Falar Nozzle Flow State                                                  | 33 |
| 2.9      | Expansion Wave and Shock Wave                                                           | 36 |
| <b>3</b> | <b>Design The Convergent-Divergent Nozzle</b>                                           | 58 |
| 3.1      | The Geometry Structure of Convergent-Divergent Nozzle                                   | 58 |
| 3.2      | Calculation of Entropy and Enthalpy of Natural Gas                                      | 60 |
| 3.3      | Natural Gas Flow Model and Its Solution in Nozzle                                       | 62 |
| 3.4      | Example and Results Analysis                                                            | 66 |
| 3.5      | Brief Summary                                                                           | 68 |
| <b>4</b> | <b>Natural Gas Condensation in High Velocity in Nozzle</b>                              | 69 |
| 4.1      | Liquid Droplet Nucleation Theory and Its Revision                                       | 69 |
| 4.2      | Liquid Droplet Growth Theory                                                            | 75 |
| 4.3      | Natural Gas Condensation in High Velocity in Nozzle                                     | 78 |

|          |                                                                                             |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4      | Example and Results Analysis .....                                                          | 81         |
| 4.5      | Brief Summary .....                                                                         | 84         |
| <b>5</b> | <b>The Delta Wing Parameter Design and Water Tunnel Test .....</b>                          | <b>86</b>  |
| 5.1      | Gasdynamics Theory in Slender Delta Wing With Large<br>Degree Sweep .....                   | 86         |
| 5.2      | The Geometry Parameter Design of Delta Wing .....                                           | 90         |
| 5.3      | Water Tunnel Test .....                                                                     | 96         |
| 5.4      | Brief Summary .....                                                                         | 99         |
| <b>6</b> | <b>Numerical Simulation for Fluid Flow With High Velocity Over<br/>The Delta Wing .....</b> | <b>101</b> |
| 6.1      | Control Equations .....                                                                     | 101        |
| 6.2      | Solution Condition .....                                                                    | 103        |
| 6.3      | Grids Area .....                                                                            | 104        |
| 6.4      | Numerical Solution .....                                                                    | 104        |
| 6.5      | Simulation Results and Analysis .....                                                       | 105        |
| 6.6      | Brief Summary .....                                                                         | 116        |
| <b>7</b> | <b>Swirling Flow Theory and Rules in Gas-Liquid Fluid .....</b>                             | <b>118</b> |
| 7.1      | Droplet Force Analysis .....                                                                | 118        |
| 7.2      | Liquid Droplet Movement Equation .....                                                      | 122        |
| 7.3      | The Model of Preesure Drop and Separation Efficiency .....                                  | 124        |
| 7.4      | Example and Results Analysis .....                                                          | 126        |
| 7.5      | Brief Summary .....                                                                         | 132        |
| <b>8</b> | <b>Numeric Simulation Study on The Whole Process .....</b>                                  | <b>133</b> |
| 8.1      | Entity Model .....                                                                          | 133        |
| 8.2      | Grids, Boundary Condition and Calculation Step .....                                        | 137        |
| 8.3      | The Results Analysis in Typical Section Flow Field .....                                    | 138        |
| 8.4      | The Flow Analysis in Back-Pressure Segment in Cyclone System .....                          | 144        |
| 8.5      | Brief Summary .....                                                                         | 151        |
| <b>9</b> | <b>Conclusions and Recommendation for Further Study .....</b>                               | <b>152</b> |
| 9.1      | Main Conclusions .....                                                                      | 152        |
| 9.2      | Recommendation for Further Study .....                                                      | 153        |

|                   |                                                             |         |
|-------------------|-------------------------------------------------------------|---------|
| <b>Appendix A</b> | <b>Conventional Natural Gas Gas-Water Separation Method</b> | ... 154 |
| A. 1              | Cryogenic Cooling Method                                    | 154     |
| A. 2              | Liquid Absorption Method                                    | 160     |
| A. 3              | Solid Adsorption Method                                     | 179     |
| <b>Appendix B</b> | <b>Calculation The Enthalpy and Entropy of Natural Gas</b>  |         |
|                   | <b>by M-H EOS</b>                                           | 207     |
| B. 1              | M-H EOS of Real Gas                                         | 207     |
| B. 2              | The Theory of Confunction                                   | 209     |
| B. 3              | Con-Enthalpy Equations of Real Gas                          | 210     |
| B. 4              | Con-Entropy of Real Gas                                     | 211     |
| B. 5              | Calculation the Enthalpy and Entropy of Natural Gas         | 212     |
| <b>References</b> |                                                             | 213     |

# 1 绪 论

## 1.1 研究的背景与意义

随着我国工业、人民生活水平的提高以及环境保护的需要,天然气作为一种清洁能源和优质化工原料,对国民经济的发展和大气质量、环境保护与能源结构的改善都在发挥着越来越重要的作用,在当前的能源结构中所占的比例越来越大,天然气将成为 21 世纪的主要能源<sup>[1]</sup>。因此,在提升天然气资源勘探开发程度的同时,必须研究先进的、环保的、节能的开采技术,从而提高气田的开发水平,发挥其经济和社会效益。

在天然气工业中,天然气与水相伴相生,自储集层中采出的天然气中,一般都含有水(包括饱和水与游离水),水是最常见的物质。天然气中的含水量,通常有两种表示方法,即“绝对含水量”及“露点温度”。绝对含水量是指单位体积的天然气中含有水的量;露点温度是指在一定压力下,天然气中的饱和水开始凝结出游离水的温度。由于水是天然气中有害无益的成分<sup>[2]</sup>,它对气田的开发会产生不利影响。因此,利用有效的方法,实现气水分离与排液对天然气的开采、集输和使用产生巨大的影响,伴随着气田开发过程的始终,是气田开发必须研究和解决的问题。

与原油的开采相比,开采天然气与下游用户的关系更为密切。长期以来,为了给用户输送符合商品气质量要求的天然气,从地层到用户的整个过程中对天然气中水的处理要经过三个阶段。

第一个阶段是地质认识阶段。这个阶段特别重视水在地层中的分布,它的特点就是运用先进的技术手段,充分了解地层中水的分布情况。同时,人们可以认识水在地层中的分布状况,却很难改变它,属于不可控因素。但这一阶段是随后制定合理的天然气开采制度的基础。否则,水就成了无源之“水”。

第二阶段就是井筒中的排水采气工艺,主要集中在对井底或井筒中的游离

水进行排水采气。这个阶段人们进行了大量的研究工作,取得了许多成果,为天然气工业的发展作出了积极的贡献。成熟的排水采气工艺有优选管柱法、泡沫法、气举法、电潜泵法、机抽法等,还有井下气液分离技术、气体加速泵技术<sup>[3,4]</sup>、井下节流技术<sup>[5]</sup>等。近年来出现了许多新的排水采气工艺,如球塞气举工艺、超声波排水采气工艺、同心细管技术等。但是,这个阶段无法降低天然气的露点,即无法使天然气达到用户对商品气的质量要求。天然气中仍含有饱和水,随着天然气在地面管线中的流动,压力和温度的降低会使饱和水凝结析

出游离水,影响天然气的集输和用户的使用。所以,要达到商品气的质量要求,还必须进入第三个阶段。

为了脱除天然气中的饱和水,从井口采出的天然气被输送到集气站或净化厂后开始进入第三个阶段。这一阶段对水的处理就是天然气脱水,采用冷却法、吸收法或吸附法等技术,使天然气的露点温度降低,达到商品天然气对含水量的气质要求,符合国家标准《天然气》(GB 17820—1999)的规定,即天然气的水露点在交接点的压力和温度下,应比最低环境温度低 5℃。

采用的天然气跨音速气水分离与旋流排液技术位于井筒与地面管线的连接处,可分为四段:喷管段、旋流段、分离段和回压段,如图 1-1 所示。

天然气气流首先在喷管段实现加速,从亚音速加速到跨音速状态,此时,温度降低到足以使天然气中气态的饱和水凝结为液滴被游离出来后,进入旋流段;

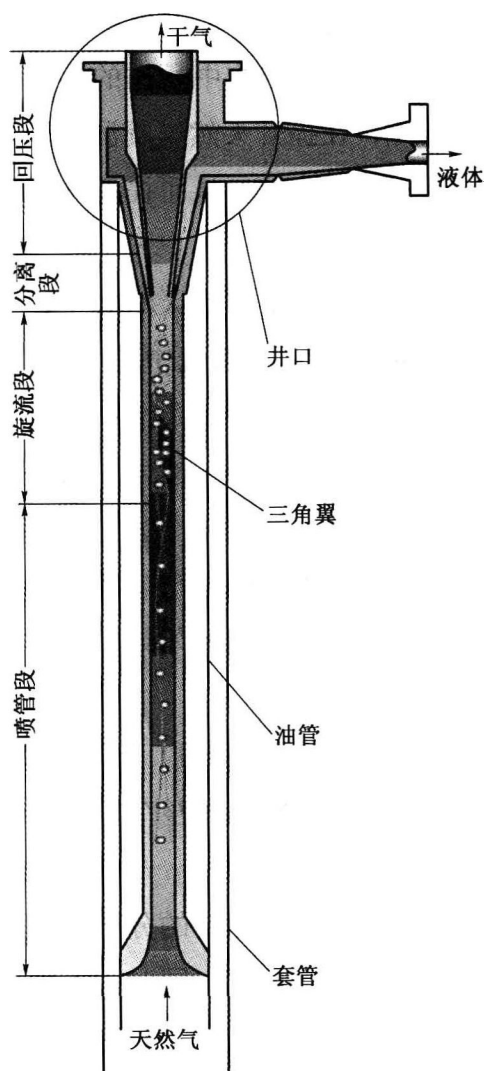


图 1-1 气井井筒跨音速排液技术示意图

旋流段内放置一个三角翼，其作用是使流体诱导产生旋流，将游离水滴甩出，附着在管内壁上，在气体的牵引下向分离段流动，旋流段主要实现气液旋流分离；后面的分离段有两个出口：一个是分离出的液体经集液管线从井口排出，达到排液的目的，一个是干气出口。此时气体中饱和水含量大大减少，露点大大降低；干气紧接着流入回压段，将气体温度和压力进行一定程度的升高，使升高的压力满足管输要求，使降低的露点符合气质标准。因此，天然气便可从井口直接进入输气干线，而不必再去集气站或净化厂进行脱水处理。

上述技术整合了第二阶段和第三阶段的优势，克服了这两个阶段的缺点（第二阶段不能降低天然气露点温度，第三阶段天然气地面脱水工艺的投资和运行成本太高），它是一种高新技术，目前还没有用跨音速技术在井筒中进行气水分离与旋流排液。其主要特点有以下几个方面：

- (1) 利用天然气本身的压能进行启动，不需要电等其他外接能源启动；
- (2) 与节流或膨胀制冷等技术相比，可实现更低的温度，气液分离更加彻底，如图 1-2 所示；

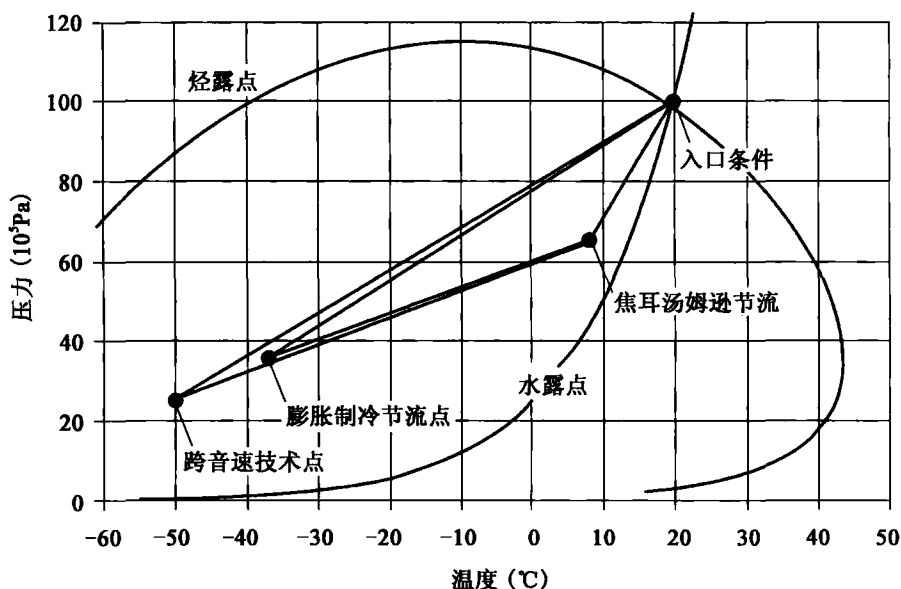


图 1-2 跨音速排液技术与其他技术比较图

- (3) 结构紧凑、无活动零部件，可免维修。

该技术有着强大的工业需求背景，其潜在的经济与社会效益巨大，包括：

(1) 可替代下游集气站或净化厂的脱水功能, 直接由井口进入输气干线, 简化了地面流程, 降低了投资; 且产气量越大, 喷管的喉部直径变大, 有利于机械加工, 投资和运行成本越低, 与传统的地面脱水工艺相反(传统工艺的处理量越大, 投资和运行成本越高);

(2) 可实现无人值守, 大大节约了运行成本;

(3) 通过地面实验证明<sup>[6]</sup>, 由于流速高, 在跨音速状态下流体流经时间极短, 水合物不易形成, 不需加注抑制剂等化学药品, 因此污染少、对环境友好;

(4) 特别适合像长庆苏里格气田这类不含  $H_2S$  和  $CO_2$ 、游离水含量少、地层不出砂的气井, 同时对于边远气井、海上气田的开采具有非常重要的应用推广价值。

天然气跨音速气水分离技术集成了流体力学、气体动力学、工程热力学、多相流热物理等学科的理论与技术研究成果。因此, 研究内容不但工业应用前景巨大, 而且对丰富凝结动力学、受限管内跨音速旋流动力学、跨音速数值仿真技术等也有着重要的学术价值。

## 1.2 国内外研究现状

水对天然气的开采、集输和处理产生巨大的影响, 是气田开发必须研究和解决的问题。

四川气田自 1978 年在威 40 井采用机抽法以来, 先后试验和发展了多种井筒排水采气工艺<sup>[7]</sup>。目前, 成熟的排水采气工艺有优选管柱法、泡沫法、气举法、电潜泵法、机抽法等<sup>[8,9]</sup>。排水采气工艺的发展方向有三个趋势: 一是各种工艺的组合, 以发挥各单项工艺的优势, 如气举与泡排组合; 二是继续发展单项工艺, 使其大型化、复杂化和智能化; 三是发展排水采气新工艺, 如球塞气举工艺<sup>[10,11]</sup>、超声波排水采气工艺<sup>[12,13]</sup>、同心细管技术<sup>[14]</sup>等。

1991 年加拿大率先提出了“井下气液分离器”的新概念<sup>[15]</sup>, 即把水力旋流器与常规井下采气系统相结合, 实现采气、气液分离和采出水同时注入同井地层。1994 年 7 月, 第一套井下气液分离系统进行了现场试验。试验中, 采出的大量水在井下进行分离后, 注入到同井页岩隔层下部的地层中, 而气流和少量

残余水采输到地面。虽然分离系统仅仅运行了数月,但试验的初步结果是非常鼓舞人心的。1995年,加拿大阿尔伯塔省的“N”气田也开展了井下气液分离的现场试验。在安装井下分离器系统之前的一年里,产气量持续下降,产水量大幅度增加。这样,用传统工艺使大量水采出到地面,需要增添地面处理设施,若不考虑系统升举费用,仅考虑增添的设施费用,就比井下气液分离的采气方法多50万加元。此外,井下气液分离可以减少污染,降低开采成本,提高采收率,从而提高经济效益。但是,井下气液分离器位于井底,却增加了故障概率,因此应进一步研究其可靠性,延长其使用寿命。

综上所述,采用排水采气工艺将游离水从井筒排出或回注到地层中,但由于天然气中还含有饱和水,仍会对集输和使用产生影响,为此,通常在地面的集气站或净化厂进行脱水处理,以降低天然气的露点,减小对集输和使用的影

响。

传统的天然气地面脱水方法主要有吸收法、吸附法和冷却法等<sup>[2,10]</sup>。吸收法是采用液体作为吸收剂,常采用甘醇类化合物和氯化物的盐溶液,如氯化钙水溶液作为吸收剂;吸附法是采用固体作为吸附剂进行脱水,常采用氧化铝、硅胶或分子筛等作为吸附剂;冷却法是将天然气的温度降低,使饱和水析出,达到降低露点、分离气水的目的。吸收法和吸附法脱水比较普遍,同时,用膨胀剂制冷的冷却法(低温分离法)也得到了推广。国内从1964年12月在四川圣公山气田沈1井试验低温分离开始,1973年8月在四川卧龙河气田进行低温分离试验,随后在中坝气田建成低温分离集气站。到1985年建成投产的新疆泽普低温分离集气站,2000年建成的新疆牙哈气田低温分离集气站,都是采用节流膨胀进行低温分离,长庆气田于2001—2002年在榆9站也采用节流膨胀进行了低温分离试验。

在地面应用超音速技术进行天然气脱水的研究方面,国外的Twister公司于2003年12月在马来西亚的B11海洋平台现场试验了该项技术<sup>[16]</sup>。目前,除了马来西亚,在荷兰有两套设备(一套用于生产,一套用于试验),在尼日利亚有一台设备(因气源不足现已停用)。由于使用该技术的潜在效益十分巨大,2006年Twister公司在马来西亚的B11平台进行重点试验。国内的杨志毅(2004)叙述

了在地面使用油气超音速旋流分离技术的原理<sup>[17]</sup>，但由于分离技术的复杂性与多学科交叉的特点，该文未能提出流动模型，也未能揭示相应的流动规律。其余的研究人员，有的对国外使用情况进行了翻译<sup>[18,19]</sup>，有的对 Twister 公司的技术报道进行了评述<sup>[20-22]</sup>。

天然气跨音速气水分离技术的实现过程涉及了气体动力学、流体力学、工程热力学、多相流热物理等学科。根据实现该技术的过程，将研究内容可归纳为喷管流动、流体跨音速流动规律、液滴成核与成长机理、流体旋流分离理论、流体流动的数值模拟等五个方面。这五个方面相互依存、相互渗透、相互促进。

### 1.2.1 喷管流动

使流体不断被加速的管道称为喷管，亚音速流体在截面积逐渐缩小的喷管(道)内将不断加速，这种喷管称为收缩喷管或收敛喷管。使流体由亚音速加速到超音速须使用的收敛-扩张喷管，也叫 Laval 喷管。国防科技大学的方丁酉对喷管的设计进行过详细的研究。

目前，收敛-扩张喷管的设计方法很多，归纳起来主要有两种：一是基于工程热力学的方法，将各截面的比热比视为常数进行设计<sup>[23-25]</sup>；另一种是基于流体力学的方法，但建立数学模型时的 N-S 方程难以直接求解，往往先进行简化，如将流体假设为无粘性，进行流场计算，得到型面，然后再修正<sup>[26,27]</sup>。

### 1.2.2 流体跨音速流动规律

人们很早就发现喷管内的跨音速流动，所以跨音速流动的研究已有很长的历史。1945 年以前，大量具有重要贡献的关于单纯亚音速与单纯超音速可压缩流动理论问世，但是关于跨音速流动的理论研究很少。随后由几个发达国家开始设计和建造高速风洞，但在风洞中无实验本体时，流速无法超过音速，放置实验本体时，流速也很少超过马赫数 0.9。1945—1960 年，跨音速气体动力学的各个方面都有了很大的进展，关于气体动力学的首批两本英文著作<sup>[28,29]</sup>在 1947 年问世。亚音速、超音速的薄翼与细长体的线性化理论也在这一时期迅速发展，并且关于一般可压缩流理论的非线性方程的求解也取得显著的进步<sup>[30-33]</sup>。但当时缺乏精确求解椭圆-双曲混合型非线性偏微分方程的一般方法阻碍了理论

的迅速发展。关于三维和非定常流的理论大约到了 1960 年才开始考虑。这些方法的发展同时依赖于数值分析的新概念和功能更强大的计算机。20 世纪 70 年代跨音速气体动力学的发展达到了一个高峰时期。Pearcey 和 Whitecomb<sup>[34,35]</sup> 的无激波超临界翼型及其在低跨音速范围内改善飞行器的气动性能的研究使得人们更加关注跨音速气体动力学。在没有计算机的时期,绝大多数实际研究是依赖风洞实验以及少量的飞行试验。这一时期随着计算机的速度及内存的提高,在许多方面为理论提供了有用的指导。1975 年以后,由于改善和提高新型飞机跨音速性能的迫切需求以及电子计算机技术、数值模拟方法、风洞实验技术的迅速发展,跨音速气体动力学也取得了较大的进步<sup>[36-42]</sup>。

将跨音速用于气液分离并非来源于石油天然气工业,最初是用来进行空气除湿,并于 1989 年以空气旋流分离器的名义申请了专利,主要用在空调上,空气加压后经高速流经喷管,水就从空气中分离出来<sup>[19]</sup>。1996 年,荷兰 Groningen 气田总工程师兼 Shell 开发和采油公司的总工程师,即现任 Twister 超音分离技术项目主任接触到这一技术,并预计该技术在处理天然气方面的应用潜力。1997 年,Shell 公司就获得 Twister 超音分离技术在石油天然气工业中的应用权。自此, Twister 超音速分离技术通过大量的室内研究和地面的现场试验,不断扩大应用范围<sup>[42]</sup>。

该技术在地面使用时,先要用昂贵的高压分离器进行前处理,并且对超音分离后的气水混合物进行二次分离,这些前后处理装置及辅助设备,占整个分离装置总价格的 66%<sup>[16]</sup>。

### 1.2.3 液滴成核与成长机理

在收敛-扩张喷管或风洞实验中,高速流体的凝结往往发生在深入过饱和区的状态上,即存在一定的过冷度,王新月等人认为过冷度在 50℃ 左右会出现显著的凝结现象<sup>[44]</sup>。一旦出现凝结,凝结过程便进行得十分迅速,凝结所占的距离很小,几乎集中在一个截面上完成,这一开始点叫作 Wilson 点,也就是过饱和和膨胀的极限点。

由于各种不同尺寸的液滴都是在小液滴的基础上生长而成的,因此追根溯源弄清小液滴的成核与成长,即小液滴的产生、发展及其给流动所带来的问