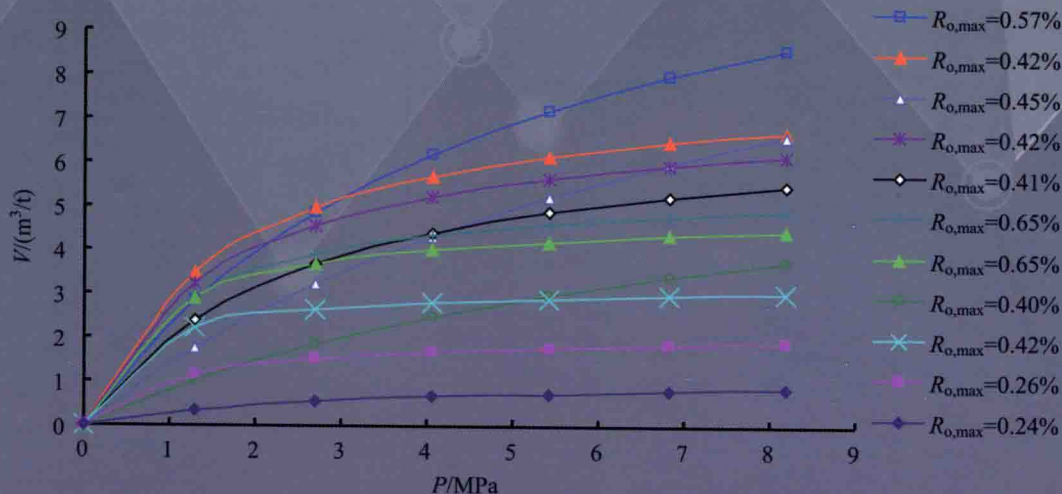


# 低煤化储层三相态 含气量模拟研究

傅雪海 简 阔 丁永明 王可新 著



科学出版社

新疆维吾尔自治区首批引进百名高层次人才基金资助  
科技支疆项目（2013911039）资助

# 低煤化储层三相态含气量模拟研究

Gas Content Simulation of Three-phase State  
in Low Rank Coal Reservoir

傅雪海 简 阔 丁永明 王可新 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是作者近年来研究低煤化煤层气储层的系统总结。基于低煤化储层不同温、压条件下的等温吸附实验,揭示了低煤化储层吸附甲烷的压力正效应与温度负效应关系;物理模拟了低煤化储层水中甲烷溶解度,揭示了甲烷在煤储层水中的溶解度与温度、压力、矿化度、游离 $\text{CO}_2$ 含量的关系;基于煤的视密度、真密度、压汞及覆压下三轴力学试验,物理模拟了围压下低煤化储层的孔隙度,揭示了游离气含量与应力下的孔隙度和气压的关系。以内蒙古海拉尔盆地、新疆阜康矿区为例,数值模拟了埋深2000m以浅煤储层的吸附气、游离气、水溶气含量。

本书可供从事煤层气地质、煤炭地质及石油与天然气地质的教学、科研和生产人员以及高等院校本科生和研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

低煤化储层三相态含气量模拟研究/傅雪海等著. —北京:科学出版社, 2015.11

ISBN 978-7-03-046269-5

I. ①低… II. ①傅… III. ①煤田地质—研究 IV. ①P618.110.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第268481号

责任编辑:罗吉郑昕 崔路凯/责任校对:郑金红

责任印制:赵博/责任设计:许瑞

**科学出版社出版**

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**北京通州皇家印刷厂印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年11月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年11月第一次印刷 印张:10 1/2 插页:1

字数:210 000

**定价:89.00元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

新疆维吾尔自治区首批引进百名高层次人才

科技支疆项目——阜康低煤级储层含气量预测技术开发(2013911039)

国家自然科学基金地区项目——新疆低煤级储层煤层气成藏模式研究(41362009)

新疆大学“天山学者”特聘教授启动基金

国家自然科学基金面上项目——低煤级三相态含气量的物理模拟与数值模拟  
(40872104)

国家自然科学基金面上项目——低煤级储层三级渗流特征及耦合机理(40372074)

新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养工程(杰出青年)——新疆阜康煤区低煤  
阶煤层气富集规律与数值模拟研究(2014711002)

新疆维吾尔自治区青年科学基金项目——基于煤层气排采的水文地质条件评价体  
系的研究(2013211B09)

新疆维吾尔自治区青年科学基金项目——新疆阜西区块煤储层水动力场对煤层气  
排采影响的研究(2015211C281)

新疆维吾尔自治区重大专项——新疆阜康低阶煤煤层气开发关键技术研发与应用  
示范

## 前 言

本书中低煤化储层包括褐煤、长焰煤、气煤。截至 2013 年底,我国探明煤炭资源储量 20 245 亿吨,其中褐煤为 3284 亿吨,占 16.22%,低煤化烟煤 10 541 亿吨,占 52.07%。因此,成功开发低煤化储层煤层气资源是我国煤层气产业持续发展的重要途径。

美国煤层气产量 500 亿  $\text{m}^3$  左右,粉河、尤因塔、拉顿等低煤级储层(本书指褐煤、长焰煤,最大镜质组反射率  $R_{o,\max}$  一般在 0.65%以下)占 50%以上,加拿大煤层气产量 100 亿  $\text{m}^3$  左右,低煤级盆地阿拉伯达占 60%以上,澳大利亚煤层气产量 110 亿  $\text{m}^3$  左右,低煤级盆地苏拉特占 70%以上。

我国新一轮油气资源评价(2005)得出我国低煤级储层煤层气资源量为 14.7 万亿  $\text{m}^3$ ,占全国煤层气资源总量的 40%。尽管我国在鄂尔多斯盆地北部保德及中部焦坪矿区、黑龙江伊兰盆地、内蒙古霍林河、辽宁抚顺等多个低煤级储层盆地取得了煤层气产能的突破,显示出广阔的前景,但仍未能成功地进行商业性开发。加快我国低煤级储层煤层气的开发是提高我国煤层气产量的重要途径。

本书基于低煤化煤层气储层在现有技术条件下含气量测试不准的事实,围绕低煤化储层水溶气、吸附气、游离气三相态含气量预测这一关键科学问题,首次构建了储层条件下低煤化储层游离气、吸附气、水溶气含量预测的理论与方法。

本书是在新疆维吾尔自治区首批引进百名高层次人才、新疆大学“天山学者”特聘教授启动基金和科技援疆项目——阜康低煤级储层含气量预测技术开发(2013911039)、国家自然科学基金地区项目——新疆低煤级储层煤层气成藏模式研究(41362009)、国家自然科学基金面上项目——低煤级三相态含气量的物理模拟与数值模拟(40872104)、国家自然科学基金面上项目——低煤级储层三级渗流特征及耦合机理(40372074)等项目研究成果的基础上撰写的,是以低煤化煤层气储层含气量为研究对象的综合性著作。全书基于低煤化储层不同温、压条件下的等温吸附实验,揭示了低煤化储层在煤岩组成、含水性、孔隙性、吸附性等有别于中、高煤级储层的特有表现形式;物理模拟了低煤化储层水中甲烷溶解度,揭示了甲烷在煤储层水中的溶解度与温度、压力、矿化度及游离  $\text{CO}_2$  含量的关系;基于煤的视密度、真密度、压汞及覆压下三轴力学试验,物理模拟了围压下低煤化储层的孔隙度,揭示了游离气含量与应力下的孔隙度和气压的关系。以内蒙古海拉尔盆地、新疆阜康矿区为例,数值模拟了埋深 2000m 以浅煤储层的吸附气、游离气、水溶气饱和含气量。



感谢参与部分工作的中国矿业大学申建副教授、周荣福副教授、金发礼高级工程师、陈刚博士、孙红明硕士、高鉴东硕士、宋革硕士、乔雨硕士，新疆大学的田继军教授、李升副教授、管伟明副教授、葛燕燕讲师，新疆工程学院的陆卫东副教授、陈志峰讲师、李守平副教授、王辉讲师、赵斐讲师、崔凯讲师、刘英振助教、张峰玮助教。

甲烷溶解度得到了中国石油大学（北京）油气藏流体高压相态及物性研究室的杰青获得者陈光进教授及王秀成博士的帮助，煤的吸附性实验得到了中国石油勘探开发研究院廊坊分院的李贵中高级工程师、王勃博士的帮助，煤岩三轴力学实验得到了中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室刘卫群教授、李玉寿高级工程师的帮助，覆压下的孔隙度物理模拟得到了中国石油勘探开发研究院吕伟峰教授和孙华超硕士的帮助，煤岩、煤质、水质基本物性测试得到了新疆煤田地质局综合实验室张焱高级工程师、赵习民工程师和江苏地质矿产设计研究院张谷春高级工程师、秦云虎教授级高级工程师、徐晓琴高级工程师的帮助，矿井地质调研与采样工作得到了新疆煤田地质局煤层气研究开发中心杨曙光教授级高级工程师、王德利工程师、张娜工程师、新疆科林思德新能源有限责任公司的郜琳董事长、杨雪松副总经理、何茂部长、内蒙古自治区伊敏露天矿的领导和李希耀主任、五牧场通达集团的领导和于成利主任及井下许多煤矿员工的大力支持与帮助，在此一并表示衷心感谢。

感谢煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室的秦勇教授、姜波教授、韦重韬教授、吴财芳教授、朱炎铭教授、郭英海教授、王文峰教授、权彪副教授、郝树青副教授给予的建议、指导和帮助。

鉴于本书篇幅限制且针对低煤化储层研究文献众多，书中引用的大量公开发表的和少量未公开发表的文献和数据，有些未能一一标出出处，在此向所有作者表示感谢。另外，书中难免存在不少错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2015 年 6 月

# 目 录

## 前言

|                    |    |
|--------------------|----|
| 1 绪论               | 1  |
| 1.1 研究意义           | 1  |
| 1.2 研究现状           | 1  |
| 1.2.1 低煤化储层煤层气勘探开发 | 1  |
| 1.2.2 三相态含气量       | 3  |
| 1.3 存在问题           | 8  |
| 1.4 研究内容与研究方案      | 9  |
| 1.4.1 研究内容         | 9  |
| 1.4.2 研究方案         | 10 |
| 2 地质背景             | 11 |
| 2.1 我国低煤级储层分布      | 11 |
| 2.2 我国低煤化储层煤岩、煤质特征 | 12 |
| 2.2.1 褐煤、长焰煤       | 12 |
| 2.2.2 气煤           | 17 |
| 3 吸附态甲烷含量物理模拟研究    | 20 |
| 3.1 吸附理论           | 20 |
| 3.2 实验方法           | 23 |
| 3.2.1 实验装置         | 23 |
| 3.2.2 样品制备及操作步骤    | 25 |
| 3.3 实验成果           | 26 |
| 3.3.1 数据处理         | 26 |
| 3.3.2 成果分析         | 27 |
| 3.4 影响因素           | 45 |
| 3.5 本章小结           | 46 |
| 4 水溶态甲烷含量物理模拟研究    | 48 |
| 4.1 实验方法           | 49 |
| 4.1.1 实验装置         | 49 |
| 4.1.2 实验试剂         | 50 |
| 4.1.3 实验步骤         | 50 |

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| 4.1.4 | 实验参数设置 .....                  | 51  |
| 4.2   | 实验成果 .....                    | 51  |
| 4.2.1 | 煤层水地球化学特征 .....               | 51  |
| 4.2.2 | 煤层气溶解度 .....                  | 53  |
| 4.3   | 影响因素 .....                    | 55  |
| 4.3.1 | 矿化度 .....                     | 55  |
| 4.3.2 | 温度、压力 .....                   | 58  |
| 4.3.3 | 游离 $\text{CO}_2$ .....        | 60  |
| 4.3.4 | 煤粉 .....                      | 60  |
| 4.4   | 甲烷溶解机理探讨 .....                | 61  |
| 4.5   | 水溶气量板 .....                   | 62  |
| 4.6   | 本章小结 .....                    | 64  |
| 5     | 游离态甲烷含量物理模拟研究 .....           | 65  |
| 5.1   | 游离气含量计算方法 .....               | 65  |
| 5.2   | 实验方法 .....                    | 67  |
| 5.2.1 | 真密度 (TRD) 和视密度 (ARD) 测定 ..... | 67  |
| 5.2.2 | 压汞实验 .....                    | 68  |
| 5.2.3 | 应力下的孔隙特征实验 .....              | 69  |
| 5.3   | 数据处理 .....                    | 73  |
| 5.4   | 实验成果 .....                    | 75  |
| 5.4.1 | 低煤级煤的孔隙度 .....                | 75  |
| 5.4.2 | 低煤级煤的孔径结构 .....               | 77  |
| 5.4.3 | 阜康气煤的孔径结构 .....               | 81  |
| 5.4.4 | 应力下的孔隙特征 .....                | 85  |
| 5.5   | 本章小结 .....                    | 92  |
| 6     | 三相态甲烷含量数值模拟研究 .....           | 93  |
| 6.1   | 煤层气含量的测试方法 .....              | 93  |
| 6.2   | 三相态饱和含气量预测的数学模型 .....         | 97  |
| 6.2.1 | 吸附气 .....                     | 97  |
| 6.2.2 | 水溶气 .....                     | 98  |
| 6.2.3 | 游离气 .....                     | 98  |
| 6.3   | 含气饱和度数值模拟 .....               | 99  |
| 6.4   | 煤储层孔隙度数值模拟 .....              | 103 |
| 6.5   | 煤层气溶解度数值模拟 .....              | 107 |
| 6.6   | 实例分析 .....                    | 117 |



---

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 6.6.1 海拉尔盆地 .....       | 117 |
| 6.6.2 阜康矿区 .....        | 125 |
| 6.7 三相态含气量耦合研究 .....    | 139 |
| 6.7.1 耦合数学模型 .....      | 139 |
| 6.7.2 海拉尔盆地三相态含气量 ..... | 140 |
| 6.8 本章小结 .....          | 142 |
| 7 结论 .....              | 143 |
| 参考文献 .....              | 144 |
| 附录 .....                | 154 |
| 彩图                      |     |

# 1 绪 论

## 1.1 研 究 意 义

低煤化储层是煤化作用早期阶段形成的产物，通常指碳含量低、挥发分高、发热量较低的褐煤、长焰煤和气煤，煤层气赋存与中、高煤级储层不同，游离态、吸附态、水溶态甲烷各占有较大比例。

低煤化储层煤层气以有机成因为主，主要包括热成因和生物成因。特别是次生生物成因煤层气是低煤化储层煤层气的重要补充，在美国的粉河和圣胡安盆地（Scott et al., 1994）、澳大利亚苏拉特盆地（Smith et al., 1996）、波兰的 Upper Silesian 和 Lublin 盆地（Kotarba, 2001）、加拿大的 Elk Valley 煤田（Aravena et al., 2003）、中国山西的李雅庄、云南的洪恩、安徽的淮南以及淮北等地（陶明信等，2005；王万春等，2006；Tao et al., 2007, 2012；佟莉等，2013），先后发现次生生物成因煤层气的存在，并多集中于低煤化储层。作为低煤级的粉河盆地早在 1998 年就已经实现了商业开发，并促使美国煤层气当年产量一度达到 337 亿  $\text{m}^3$ ，这种增长势头一直持续到 2004 年（Walter et al., 2002；Snyder, 2005）。进入 21 世纪后，加拿大和澳大利亚等国家也实现了低煤级储层煤层气产量的重大突破。与之相比，当前中国在中高煤级储层煤层气开发过程中已形成以沁水盆地为代表的一定规模商业性开发，而低煤级储层煤层气仍未取得商业意义上的产量突破。

我国学者开展了低煤化储层含气性、吸附性及成藏模拟等研究（李保国，2001；秦长文等，2004；傅雪海等，2005；刘洪林等，2006；傅小康，2006；王勃等，2006；张新民等，2006），但由于我国低煤化储层煤层气基础研究的力度和深度相对滞后，煤田地质勘探阶段煤层气含量测试不准，致使在低煤化储层中的煤层气开发活动具有较大的盲目性。因此，正确认识低煤化储层的含气性，开展低煤化储层中水溶气、吸附气、游离气含量的物理模拟与数值模拟研究，既具有理论意义又具有实际价值。

## 1.2 研 究 现 状

### 1.2.1 低煤化储层煤层气勘探开发

美国最初煤层气产量来源于中高煤化程度的圣胡安和黑勇士盆地，从 1984

年的 2.8 亿  $\text{m}^3$ , 到 1990 年的 55.18 亿  $\text{m}^3$ , 再到 1995 年迅速增加到 265.74 亿  $\text{m}^3$ , 之后增速放缓, 随后由于低煤级的粉河、拉顿、尤因塔盆地煤层气的成功开发, 2000 年煤层气产量为 396.48 亿  $\text{m}^3$ , 2001 年为 480 亿  $\text{m}^3$ , 2004 年后突破 500 亿  $\text{m}^3$ 。1995 年低煤级盆地煤层气产量只占全美煤层气产量的 2%, 2000 年占到总产量的 19%, 2004 年以后占总产量的 50% 以上。

截至 2013 年底, 我国共开辟了 48 个煤层气勘探区, 建立了 6 个开采与试采区, 共钻煤层气井 15 000 余口, 探明煤层气地质储量为 5664.42 亿  $\text{m}^3$ 、技术可采储量 2848.93 亿  $\text{m}^3$ 、经济可采储量为 2336.09 亿  $\text{m}^3$ 。其中低煤化储层仅在辽宁铁法、阜新和安徽宿州获得探明地质储量 90.26 亿  $\text{m}^3$ 、技术可采储量 45.13 亿  $\text{m}^3$ 、经济可采储量为 37.59 亿  $\text{m}^3$ 。2014 年地面煤层气产量为 37.3 亿  $\text{m}^3$ , 其中山西沁水盆地、鄂尔多斯盆地中、高煤级储层占 95% 以上, 除辽宁铁法、阜新外, 低煤化储层仍未能成功地进行商业性开发。

### 1. 褐煤储层

我国在新疆大南湖、沙尔湖、云南昭通、内蒙古海拉尔等褐煤储层煤层气试采结果表明, 这些地区褐煤储层含气量低, 没有形成产能。在内蒙古霍林河霍试 1 井射开 34 m 厚煤层 (埋深 911 m), 最高产气量达 1256  $\text{m}^3/\text{d}$ ; 吉林珲春 (煤层总厚 13 m, 单层厚小于 2 m, 含煤段 100 m 左右, 埋深 450~550 m) 分 4 段压裂合排, 最高单井日产气 3170  $\text{m}^3/\text{d}$ , 日产水 13  $\text{m}^3/\text{d}$ , 套压 0.74 MPa; 辽宁抚顺 (主煤层均厚 50 m 左右, 最厚达 130 m), 6 口井的小井组单井日产气量稳定在 800  $\text{m}^3/\text{d}$  左右。

### 2. 长焰煤储层

长焰煤储层煤层气排采效果好于褐煤储层。辽宁铁法盆地 36 口煤层气井 (煤层厚 40 m, 单层厚 10 m, 埋深 447~1120 m, 含气量 8~12  $\text{m}^3/\text{t}$ ), 多段分压合排, 最高日产气 13 500  $\text{m}^3/\text{d}$ ; 黑龙江省伊兰区块 24 口煤层气井 (煤层厚 16 m, 埋深 700 m 左右, 含气量 8~10  $\text{m}^3/\text{t}$ ), 单井日产气最高 3000~4000  $\text{m}^3/\text{d}$ ; 1993 年, 在准噶尔盆地彩南地区钻探的彩 17 井和彩 19 井对侏罗系八道湾组煤层测试, 日产气 2000~4000  $\text{m}^3/\text{d}$  (王屿涛等, 2002), 彩 504 井 (埋深 2567~2583 m) 压裂后自喷、抽汲 2 天后, 煤层开始产气, 日产气稳定在 7300  $\text{m}^3/\text{d}$  左右; 液氮助排后最高日产气约为 6000  $\text{m}^3/\text{d}$ , 呈现出游离气的特点; 新疆阜康矿区大黄山煤矿侏罗系煤层排采气量达 2000  $\text{m}^3/\text{d}$  (王屿涛等, 2002); 陕西焦坪矿区下石节煤矿 (煤层厚度 8~14 m), 含气量 1.94~4.41  $\text{m}^3/\text{t}$ , 单井日产气量平均为 1000  $\text{m}^3/\text{d}$  以上 (连续生产 450 天), 彬长大佛寺煤层埋深 500 余 m, 煤层厚 12 m, 含气量 5.29~6.29  $\text{m}^3/\text{t}$ , 渗透率  $(5\sim6) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 1 口 U 型井日产气最高 17 000  $\text{m}^3/\text{d}$ ; 山西保德 (鄂尔

多斯盆地东缘北部,煤厚 1.10~11.70 m,埋深 430~950 m),含气量 1.0~8.4 m<sup>3</sup>/t,渗透率  $(0.5\sim12)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,单井最高日产气量达到 5000 m<sup>3</sup>/d。

### 3. 气煤储层

新疆准噶尔盆地南缘阜康矿区科林思德施工直井 40 口,多分支水平井 1 口,投产 24 口井,新疆煤田地质局施工直井 50 多口,煤层平均总厚度为 76.76 m,含气量 5.2~13.8 m<sup>3</sup>/t;渗透率  $(0.2\sim16.4)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,科林思德施工的 CSD01 井连续产气 10 000 m<sup>3</sup>/d 以上达 100 d,最高日产气量达 17 000 m<sup>3</sup>/d;新疆煤田地质局阜康 ZN-01 井小井网产气量也突破 10 000 m<sup>3</sup>/d。准噶尔盆地东南缘的阜参 1 井 42 号煤含气量为 8.69~15.65 cm<sup>3</sup>/g,平均为 13.26 cm<sup>3</sup>/g,44 号煤含气量为 6.47~15.73 cm<sup>3</sup>/g,平均为 13.48 cm<sup>3</sup>/g,最大日产气量达到 1000 m<sup>3</sup>/d,但持续时间较短,衰减很快,洞穴改造储层效果不理想(王彦龙等,2006;杨曙光等,2010)。辽宁阜新刘家区块煤层厚 30~90 m,含气量 7.2~9.8 m<sup>3</sup>/t,渗透率  $0.5\times10^{-3}\mu\text{m}^2$  左右,初期 41 口井单井日产气平均 2500 m<sup>3</sup>/d,最高 16 000 m<sup>3</sup>/d,8 年累计产出 1.6 亿 m<sup>3</sup>。

### 1.2.2 三相态含气量

煤层气主要由煤储层水中的溶解气,煤储层宏观裂隙、显微裂隙、大孔隙(孔直径  $d>1000\text{ nm}$ )、中孔隙( $100\text{ nm}<d<1000\text{ nm}$ )的游离气及过渡孔( $10\text{ nm}<d<100\text{ nm}$ )、微孔( $d<10\text{ nm}$ )中的吸附气共同构成(Ettinger et al., 1966; Crosdale et al., 1998)。鲜学福等(2006)采用 X 射线衍射、电子显微镜等手段对“煤-甲烷-天然湿度”介质系统进行了研究,证实了甲烷是以游离、吸附和吸收态赋存于煤的孔隙和裂隙中。Mavor 等(1991)和 Pratt 等(1999)在储层温度和低于储层温度下进行过平行煤样的自然解吸,发现低于储层温度的煤样损失气被低估了 57%,含气量被低估了 29%。美国粉河盆地 Triton 井的煤心气含量测试结果也显示由于没有将游离气和溶解气计算在内,因而使含气量被低估了 22%。即使采用在储层温度下解吸,损失气量也是根据解吸气量来推导,美国粉河盆地勘探阶段估计的煤层含气量要比煤层气生产后得到的实际含气量低数倍(Bustin et al., 1999; Andrew et al., 2002)。可见游离气和溶解气在低煤化储层中占有相当的比例,要想正确估算含气量,吸附气、游离气以及溶解气三者缺一不可。

#### 1. 吸附气与游离气

吸附气含量计算方法研究也已非常成熟。常用的吸附理论模型和数学表达式有单分子层吸附模型 Langmuir 方程、多分子层吸附模型 BET 方程、Freundlich 方程、3 参数 Langmuir 方程、Polanyi 吸附势理论、微孔填充理论以及



Dubinin-Astakhov (D-A) 方程、Dubinin-Radushkevich (D-R) 方程等(桑树勋等, 2005; 于洪观等, 2004); 利用这些理论建立的模型有 Virial 方程、立方型状态方程、Lattice (格子) 气体状态方程等。目前得到绝对吸附量主要的方法一是通过直接测量, 二是由视吸附量换算(Haydel et al., 1967; Keller, 2003)。要对视吸附量和绝对吸附量进行换算, 有一个重要前提是如何确定吸附相的密度。由于吸附相密度是不可直接测量的, 加之对吸附相的认识存在较大差异, 所以学者们采用的吸附相密度值也不同, 计算出的绝对吸附量结果也不同。另外, 在煤化过程中煤的物理化学性质变化本质上取决于成煤物质的化学组成和化学结构演化(邵震杰等, 1993)。煤的不同演化程度存在不同官能团的差异从而引起煤分子化学结构的差异, 进而影响着煤的亲甲烷能力。因此, 在计算吸附气含量时, 应考虑煤化程度以及相应的储层条件。

影响游离气的含量因素较多, 其中煤中孔隙和裂隙的大小、形态、孔隙度和连通性等决定了游离气的储集运移和产出(王可新, 2010)。陈鹏(2001)研究认为, 煤作为多孔固态物质, 其总孔体积的主要部分是在微孔中, 且煤中孔的体积和孔的大小分布决定着游离气的储集能力。张新民等(2006)通过实验发现褐煤对甲烷的吸附能力很低, 褐煤基质中的游离气含量通常占总气含量的 50% 以上, 并建立了褐煤煤层气含量的确定方法。郑得文等(2008)研究认为, 游离气含量与煤储层平均孔隙度、原始含水饱和度、气体体积系数等因素相关。傅雪海等(2010)估算了我国第一口地面多分支煤层气水平井——QNDN1 井煤层气单井排采范围内的重力水量、水溶气、游离气含量; 董谦等(2012)探讨了页岩气含气量的获取方法, 认为吸附气量的估算需要综合考虑有机碳含量、黏土矿物组分、成熟度、温度和压力等因素对页岩吸附能力的影响, 建立适当的吸附气含量计算模型, 游离气含量估算的关键是确定页岩的有效孔隙度和含气饱和度; 刘爱华等(2012)计算了海拉尔盆地煤样吸附气、游离气、水溶气的含量, 并发现埋深 1000 m 以内, 游离气含量随埋深的增加而增加; 张培先(2012)利用测井技术对页岩气进行了识别与评价, 分别计算出游离气含量和吸附气含量, 并提出了计算页岩游离气含量“四步法”和吸附气含量“三步法”; 徐海霞等(2012)介绍了页岩气中游离气的计算方法——容积法; 宋涛涛等(2013)研究了吸附气和游离气的主控因素及计算方法; 冀昆等(2013)认为储集层在一定物理化学条件下所能容纳的最大气量是有限的, 结合测井解释数据和岩心测试数据, 可求得储层平均孔隙度和含气饱和度, 进而根据储层温度压力条件求得饱和和游离气量, 并建议计算时对获取的源数据进行趋势面分析, 分离出区域性分量, 使数据能代表评价区的整体性质。也有学者认为深部煤层仍然有可能存在游离甲烷。因此, 在计算游离甲烷时, 应考虑到煤层孔裂隙度是受地应力和地温所控制的, 当把煤层中甲烷含量转变为标准状态的甲烷



量时,不能忽略二者存在着温度上的差别(许江等,2004;鲜学福等,2006)。

## 2. 水溶气

煤层气主要以吸附状态赋存于煤储层中这一观点已经为人们普遍接受,但越来越多的研究表明溶解态是煤层气不可忽视的赋存状态(傅雪海等,2005;刘爱华等,2012;Liu et al., 2013)。对于水溶性天然气藏国内外已经做了广泛而深入地研究,煤层气主要成分与天然气相似,煤层气在煤层水中的溶解机理与天然气在地层水中的溶解机理没有区别(傅雪海等,2004),因此煤层气在储层水中的溶解特征、溶解机理可以借鉴天然气在地层水中的溶解的研究成果。国内外不少学者广泛而深入地探讨了不同化学成分组成、不同同位素组成的天然气、煤层气的溶解度与储层水温度、压力、矿化度、储层水离子类型之间的关系。

郝石生等(1993)分别采用生物成因气、伴生气、煤成气三种不同成因类型的天然气在不同矿化度的地层水和自配离子水中进行了天然气的溶解度实验,实验结果表明在温度、压力以及天然气成分相同的情况下,地层水的矿化度对天然气的溶解度有一定影响,天然气在地层水中的溶解度随矿化度的升高而降低,在低压条件下,矿化度对溶解度影响很小,在高压条件下,矿化度对溶解度的影响则较大。付晓泰等(1997)研究了不同矿化度条件下天然气各组分的溶解特征,发现随矿化度增大,除甲烷外,其他气体组分的溶解度都出现先增大后减小的现象,并且气体分子结构的碳链越长的组分,这种趋势越明显,且 $C_3$ 、 $C_4$ 气体组分还观察到溶解度双峰现象。

郝石生等(1993)曾用同一伴生成因的天然气样,分别在矿化度相同的重碳酸钠型、硫酸钠型和氯化钙型的地层水中开展溶解度实验,结果表明:在10~20 MPa压力条件下,天然气在硫酸钠水型比在重碳酸钠水型中的溶解度大;在30~40 MPa压力条件下,天然气在重碳酸钠水型中比在硫酸钠水型中的溶解度大;在温度为60~80℃条件下,一般天然气在重碳酸钠水型中比在氯化钙水型中的溶解度大;在温度为100~120℃条件下,天然气在氯化钙水型中比在重碳酸钠水型中的溶解度大,认为无机盐种类对天然气溶解度的影响相对于总矿化度对溶解度的影响并不明显。傅雪海等(2004)开展 $CH_4$ 在不同矿区煤储层水中的溶解度实验,表明甲烷溶解度受离子类型影响,在 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 含量高的煤层水中,甲烷溶解度较低。

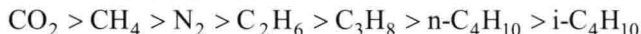
天然气在地层水中的溶解度随压力的增加而增大,但不是线性关系;溶解度随压力变化的曲线具有先陡后缓的特征,即在压力较低时,溶解度变化梯度较大,近似线性关系,在压力较高时,溶解度变化梯度较小,说明在低压条件下,压力的变化对天然气在地层水中的溶解度影响较大,在高压条件下,压力的变化对其溶解度的影响相对变弱,曲线趋于平行压力轴(McAuliffe, 1979;郝石生等,1993)。傅雪海等(2004)实验研究表明甲烷在同一煤层水样中的

溶解度随压力升高而增大。

溶解度与温度的关系比较复杂, McAuliffe (1979) 实验研究发现不同温度下重烃气体的溶解度-分压曲线均有交叉, 提出造成这种现象的原因可能是高温使水的氢键削弱, 有效间隙度增大, 在高压下更有利于重烃气体的溶解。郝石生等(1993) 实验研究表明温度对天然气溶解度的影响主要有以下特征: ①当温度小于 80℃ 时, 随温度的升高, 天然气在地层水中的溶解度逐渐减小; 当温度等于 80℃ 时, 天然气在地层水中的溶解度最小; 当温度大于 80℃ 时, 随着温度的升高, 天然气在地层水中的溶解度逐渐增大。②不同温度条件下溶解度与压力的关系曲线具有随着压力的增大而发散或散开的特征。说明在高压条件下, 天然气的溶解度受温度作用的影响较大, 在低压条件下, 温度的影响相对较小。③天然气在地层水中的溶解度随温度的升高而具有抛物线的特征, 即具有一个极小值, 而且这一特征与压力有关, 即不同的压力条件下, 抛物线的变化趋势不同。在 30~40 MPa 条件下, 曲线变化较快, 抛物线特征更加明显, 在压力小于 20 MPa 条件下, 曲线变化较慢而平缓; 在 5 MPa 时, 曲线更为平缓, 趋近直线; 当压力低于 5 MPa 时, 气体的溶解度随温度的升高而减低, 不再出现先减小后增大的情况。

煤层气、天然气在地层水中的溶解度与其化学成分有关系, 因为不同的气体组分的溶解度不同, 不同成分组成煤层气在地层水中的溶解度也就自然有差异。因此, 煤层气溶解前后的化学成分组成也有一定变化, 即溶解前后各种气体组分的体积分数会发生变化。

McAuliffe (1979) 研究发现常见的天然气组分在地层水中的溶解度的大小具有下列排列顺序:  $\text{CO}_2 > \text{C}_1 > \text{N}_2 > \text{C}_2 > \text{C}_3 > \text{C}_4$ 。付晓泰等(1997) 研究了不同天然气组分的溶解平衡常数  $K_i$ ,  $K_i$  不仅与温度有关, 而且与压力有关, 并且压力增大有利于甲烷的溶解, 温度升高, 有利于重烃的溶解。对某一气体组分而言, 该组分的绝对溶解度不仅与  $K_i$  有关, 而且与组分的分压有关。当各组分的温度和分压均相同时, 溶解平衡常数的大小顺序为:



水是强极性溶剂, 甲烷为非极性分子, 但是  $^{13}\text{CH}_4$  极性大于  $^{12}\text{CH}_4$ , 根据相似相溶理论,  $^{13}\text{CH}_4$  在水中的溶解度大于  $^{12}\text{CH}_4$ , 溶解作用会把较多的  $^{13}\text{CH}_4$  带走, 剩下更多的  $^{12}\text{CH}_4$ 。因此, 溶解作用可以使煤层中甲烷发生碳同位素分馏效应, 甲烷在地下水中的溶解度随埋深增大而增大, 从而造成甲烷碳同位素溶解分馏作用增强(高波等, 2002; 苏现波等, 2006)。

张晓宝等(2002) 用热真空脱气法对水溶气进行研究, 并与同一地区的常规的天然气进行对比, 发现水溶性甲烷碳同位素明显比天然气偏重。刘朝露等(2004) 进行了水溶气运移成藏物理模拟实验, 结果表明水溶气中甲烷碳、氢同位素变化均不明显, 但略具偏正的特征。秦胜飞等(2006) 分别选择高煤级煤和低煤级储



层进行了水动力物理模拟实验,高煤级煤储层气样的  $\delta^{13}\text{CH}_4$  初始值为 $-29.50\text{‰}$ ,随着冲洗实验的进行,在水力冲洗作用下,气样的  $\delta^{13}\text{CH}_4$  变为 $-36.60\text{‰}$ ,说明水动力作用使甲烷碳同位素变轻,而对低煤级储层甲烷进行冲洗实验发现,原始气样  $\delta^{13}\text{CH}_4$  初始值为 $-40.50\text{‰}$ ,经过水洗 5 天后  $\delta^{13}\text{CH}_4$  的值为 $-42.67\text{‰}$ ,水洗 10 天后为 $-45.11\text{‰}$ ,水洗 15 天后为 $-48.26\text{‰}$ ,认为由水溶作用产生的甲烷碳同位素分馏效应非常强烈。此外秦胜飞(2012)实验研究了气层气与水溶气碳同位素组成的差异,无论是油型气还是煤型气,水溶气甲烷碳同位素组成都明显重于气层气,二者之间差值大多在  $10\text{‰}$  以上,有的高达  $20\text{‰}$ ,说明地层水对甲烷碳同位素组成的分馏作用十分明显,实验还发现水溶气不仅甲烷碳同位素组成偏重,其重烃组分碳同位素组成也偏重。

地层水除了含无机盐离子外,还可能含一些可溶于水的有机物,煤层水中还含有一定量的煤粉颗粒,这些物质的存在也将影响到煤层气的溶解度。付晓泰等(1995, 1997)实验研究发现表面活性物质对难溶于水的长链烷烃具有显著的增溶作用。因此,地层水中羧酸类物质含量越高,水溶气中重烃的含量越大。由于低煤化储层中可能含有一定量的腐殖酸,煤层水中也溶解一定量的腐殖酸,将对煤层气中重烃组分起到增溶作用。

付晓泰等(1997)选择苯酚和石油环烷酸为代表进行了物理模拟实验,考察极性可溶有机物对天然气溶解度的影响,研究发现苯酚对天然气总溶解度和各组分溶解度的影响均不明显;环烷酸对天然气总溶解度影响不大,但对重烃气体有明显的增溶作用;而增溶作用的相对强弱为:

戊烷 > 丁烷 > 丙烷 > 乙烷

由于地层水中有机物的浓度很低,如环烷酸通常每升只有几至几十毫克。因此,有机物对天然气总溶解度的影响甚微。

傅雪海(2004, 2005)对山西沁水盆地不同矿区煤储层水样进行了甲烷溶解度实验,实验结果显示甲烷在含矿化度的煤储层水中的溶解度大于去离子水中的溶解度,压力越高越明显,前人的研究成果显示  $\text{CH}_4$  在离子溶液中的溶解度小于纯水中的溶解度。由此可以推断煤储层水中所含的有机质使甲烷在煤储层水中溶解度高于在离子溶液中的溶解度;实验还发现随着压力增大煤层水中的有机质对甲烷的增溶作用变强,并提出产生上述现象的原因是有机质微粒对  $\text{CH}_4$  的吸附作用。

影响煤层气在地层水中溶解度的因素多而复杂,不少学者根据实验现象,提出了煤层气在地层水中溶解度机理,如“Henry 定律”、“气体间隙填充溶解机理”、“气体水合作用溶解机理”等,根据实验数据和理论假设建立了气体溶解度的计算模型(傅广等, 1997; 付晓泰等, 2000; 颜肖慈等, 2005; 宋岩等, 2005; 陈润等, 2007)。

傅雪海(2004, 2005)根据甲烷在煤层水中溶解度的物理模拟实验,建立不

同储层温度、压力下,水溶甲烷含量与矿化度之间的量板,根据不同埋深下的温度和压力,在上述量板上可读出不同埋深下的水溶甲烷含量,建立了不同埋深条件下甲烷溶解度与矿化度的关系;利用平衡水等温吸附曲线推算了不同埋深(温度、压力条件)下的有机质微粒的吸附气量;根据煤岩孔隙度测试结果与煤基块、水、气三相耦合作用下的压缩系数,得出不同埋深下煤岩孔隙度;利用地球物理测井估计水饱和度即可算出原位储层条件下的水溶气含量。王可新(2010)进行了储层温度、压力、矿化度以及游离 $\text{CO}_2$ 影响下的甲烷溶解度物理模拟,煤储层的水溶气含量采用平衡水含量,煤储层原位条件下的孔隙度通过饱和水煤岩的三轴力学实验获得。首先根据物理模拟结果建立不同温度、压力、矿化度甲烷溶解度量板,然后应用插值方法计算不同埋深条件下煤储层中水溶气含量,研究结果表明内蒙古海拉尔盆地褐煤储层400~2000 m范围内,水溶气含量介于 $0.17\sim 0.67 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间,且随煤层埋深的增加而增大。宋岩等(2010)利用付晓泰建立的气体溶解度方程,结合部分实验室实测数据,分别对侏罗纪准噶尔、吐哈盆地的低煤化储层与阳泉矿区的高煤级储层的含气量和煤层气赋存状态进行了分析,结果表明:低煤化储层以吸附气和游离气为主,含有部分溶解气,并且随埋深的增加溶解气赋存状态的重要性增加。

### 1.3 存 在 问 题

低煤化储层中,煤层气赋存形态与高煤化程度储层不同,游离态、吸附态、水溶态甲烷各占有较大比例。我国煤田地质勘探中,现场煤层气含量测定大多是在当时水温、压力条件下测得2 h内的解吸气量,再由解吸气量推算损失气量(MT/T77—84、MT/T77—94)。对于分布在我国东北、西北地区的低煤化储层而言,由于煤孔、裂隙发育,取心过程在地层温度条件下快速解吸,游离气快速逸散,到地面由于温度降低,解吸速度变慢,有的甚至没有解吸气,造成解吸气量低(即使我国现在施工的煤层气井采用美国矿业局的USBM直接法,在储层温度下进行很长时间的解吸气测定,由于其储层物性特征,解吸气量测定值也偏低),尤其是初始几个点解吸气量低,由解吸气推算的损失气也就更低,且不测煤储层水中的水溶气,造成含气量的严重失真。因此,煤层含气量测量值的不准确性仍是目前亟待解决的基础科学问题。

低煤化储层的煤岩组成、孔裂隙结构、吸附特征、含气与含水饱和度与煤化程度较高储层存在明显差异,其对水溶气、吸附气和游离气的影响有待进一步揭示。国内对低煤化储层水溶气、吸附气和游离气含量进行过物理模拟,而对不同埋深条件(地应力、储层温度、压力)的水溶气、吸附气和游离气含量的数值模拟尚不多见。