

复杂天然气藏储层特征 及渗流规律

FUZA TIANRANQICANG
CHUCENG TEZHENG JI
SHENLIU GUIÜ

●雷 群 杨正明 刘先贵 周学民 朱光亚 等著

复杂天然气藏 储层特征及渗流规律

雷 群 杨正明 刘先贵 周学民 朱光亚 等著

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂天然气藏储层特征及渗流规律/雷群等著.

北京: 石油工业出版社, 2008. 10

ISBN 978-7-5021-6809-4

I. 复…

II. 雷…

III. 天然气-油气藏-储集层-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 154028 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

2008 年 10 月第 1 版 2008 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 14

字数: 354 千字 印数: 1—1000 册

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

自从“八五”以来，我国探明的复杂气藏储量越来越多，如何有效动用和开发好复杂气藏的储量是关系到我国天然气工业能否长期稳定发展的关键。

本书研究的复杂气藏主要是指低渗气藏和火山岩气藏。低渗气藏储气量丰富，在世界天然气产量中所占比重呈现逐年上升的趋势。在我国，主要分布在鄂尔多斯盆地、柴达木盆地三湖地区、塔里木盆地库车地区、四川盆地川东和川西地区等。在已探明的气层气储量中，低渗气藏储量约占40%，在大中型气田中，低渗气藏储量约占气藏储量的60%。我国低渗气藏年产量增长迅速，年平均增幅超过20%。我国常规储层气藏数量有限，今后将较多地面临致密深层低渗油气藏。目前火山岩气藏资源量也相对较大，在松辽、准噶尔、渤海湾等都有发现，是当前勘探开发的热点，未来勘探开发潜力巨大。

本书是基于低渗气藏和火山岩气藏这两类复杂气藏在开发中所面临的实际问题，利用核磁共振、恒速压汞、物理模拟实验和气藏渗流理论对上述气藏的微观孔隙结构特征、气体渗流特征和数值模拟进行了系统的论述，取得了一些新认识，为更好地开发好这类复杂气藏提供理论指导。

本书在完成过程中得到了中国石油勘探开发研究院廊坊分院、大庆油田勘探开发研究院和中国石油勘探开发研究院的万玉金、郭和坤、刘学伟、罗瑞兰、庞彦明、冉启全、童敏等各位同仁的大力支持和帮助，并得到了国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB209500)和国家自然科学基金(No.10672187)资助。本书对所用的资料数据尽量作了注明，在此，作者特致以深深的谢意。

复杂气藏的储层特征和渗流特征的研究是一项涉及面很广、技术性很深的复杂工程。由于时间仓促及作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2008年7月

目 录

第一篇 低渗透气藏储层特征及渗流机理

第一章 绪论	3
第一节 国际天然气资源状况	3
第二节 关于低渗气藏的划分界限	3
第三节 低渗透气田的开发特征及研究现状	5
第二章 低渗气藏储层评价参数	19
第一节 低渗气藏微观孔隙结构特征参数	19
第二节 低渗气藏介质变形评价参数	23
第三节 用核磁共振技术测量低渗含水气藏中的束缚水饱和度	28
第四节 临界压力梯度	32
第三章 低渗透气藏单相气体非线性渗流机理	34
第一节 低渗透岩心气体渗流曲线的一般特征	34
第二节 低渗透岩心气体滑脱效应渗流机理	38
第三节 受惯性效应影响的气体渗流机理	48
第四节 本章小结	53
第四章 低渗透气层气相非线性渗流数学模型及应用	55
第一节 低渗气藏气体非线性渗流数学模型	55
第二节 受压力影响下的气体非线性稳态渗流	58
第三节 受惯性效应影响的气体非线性稳态渗流	65
第四节 本章小结	67
第五章 含束缚水低渗气藏气体非线性渗流机理和理论	69
第一节 含束缚水岩心的气体渗流特征	69
第二节 含束缚水低渗气藏气体非线性渗流基本数学模型	78
第三节 考虑惯性效应影响的含束缚水气层气体稳态渗流模型	79
第四节 压力梯度对产能的影响	81
第五节 本章小结	83

第六章 低渗变形介质气藏复杂渗流理论及应用	84
第一节 低渗变形介质气藏应力敏感性	84
第二节 变形介质单相气体稳态渗流产能	94
第三节 考虑惯性效应的变形介质单相气体稳态渗流模型	97
第四节 考虑启动压力梯度的变形介质气井产能	99
第五节 本章小结	102
参考文献	104

第二篇 火山岩气藏储层特征和数值模拟

第七章 火山岩气藏概况	113
第一节 火山岩气藏定义及认识历程	113
第二节 火山岩气藏地质和开发特征	114
第三节 国内外典型火山岩气藏勘探开发实例	117
第四节 火山岩气藏勘探开发技术展望	120
第八章 火山岩气藏微观孔隙结构特征和储层分类	122
第一节 恒速压汞微观孔隙结构特征测试原理和实验步骤	122
第二节 恒速压汞微观孔隙结构特征测试结果	124
第三节 火山岩气藏岩样微观孔隙结构特征分析	131
第四节 火山岩气藏储层分类	136
第五节 本章结论	140
第九章 火山岩气藏不同岩性核磁共振实验研究	157
第一节 核磁共振可动流体测试原理与测试方法简述	157
第二节 不同岩性火山岩气藏岩心可动流体截止值	160
第三节 不同岩性火山岩气藏岩心可动流体百分数	165
第四节 本章结论	166
第十章 火山岩气藏岩石的压力敏感性	177
第一节 有效压力变化对渗透率的影响	177
第二节 有效压力变化对孔隙度的影响	181
第三节 岩石压缩系数变化规律	182
第四节 火山岩储层有效应力往复变化对渗透率的影响	186
第五节 火山岩储层压敏效应对产能的影响	189
第六节 本章结论	190

第十一章	火山岩气藏数值模拟	192
第一节	单井模型	192
第二节	生产井历史拟合	196
第三节	数值模拟内容及结果分析	197
第四节	本章结论	210
参考文献		211

第一篇

低渗透气藏储层 特征及渗流机理

第一章 绪 论

第一节 国际天然气资源状况

世界能源的发展,与工业化进程、环保浪潮、知识经济和可持续发展战略是密不可分的。世界能源结构向低碳化的过程中,天然气无疑是理想选择。预计在 21 世纪 40 年代,天然气将超过石油,成为第一能源^[1]。

根据《BP 世界能源统计 2006》的数据,2005 年世界天然气剩余探明储量为 $179.83 \times 10^{12} \text{m}^3$,其中中东地区为 $72.13 \times 10^{12} \text{m}^3$,占总量的 40.1%;前苏联地区为 $58.32 \times 10^{12} \text{m}^3$,占总量的 32.4%;剩余探明储量位居世界第一的国家是俄罗斯,探明储量为 $47.82 \times 10^{12} \text{m}^3$,占世界总量的 26.6%;2005 年中国天然气剩余探明储量为 $2.35 \times 10^{12} \text{m}^3$,储采比 47 年;美国为 $5.45 \times 10^{12} \text{m}^3$,储采比仅为 10.4 年。2005 年世界天然气产量已达到 $2.763 \times 10^{12} \text{m}^3$,其中俄罗斯产量为 $5980 \times 10^8 \text{m}^3$,占世界产量的 21.6%;美国的产量为 $5257 \times 10^8 \text{m}^3$,占世界产量的 19%,俄美两国的总产量超过了世界总产量的 40%,2005 年中国的天然气产量仅有 $500 \times 10^8 \text{m}^3$,不足俄美两国产量的一成,2006 年,我国天然气产量约为 $595 \times 10^8 \text{m}^3$,年产量位居世界第 11 位。目前中国天然气产量与中国天然气已探明储量远不对称,发展中国天然气产业是非常必要的,也是很急迫的。

第二节 关于低渗气藏的划分界限

低渗气藏是以储层渗透率为指标,根据渗透率的不同级别而划分的气藏类型。它的定义带有一定的人为因素,所以关于低渗气藏的划分,各国有着不同标准。美国联邦能源管理委员会将低渗透气藏定义为:渗透率低(等于或低于 0.1mD)、孔隙度低(一般在 10%)、含水饱和度高(大于 40%)的储集层,或产量低于该委员会规定的各深度层段的产量者,均为低渗透储集层。根据我国的实际情况,一般认为渗透率小于 10mD 的储层为低渗型储层^[2](见图 1-1)。

低渗气藏储气量丰富,在世界天然气产量中所占比重呈现逐年提升的趋势。以美国为例,自 1990 年以来,美国常规气藏产量逐渐下降,低渗气藏天然气产量逐年上升(见图 1-2)。2000 年美国低渗气藏天然气产量约为 $1076 \times 10^8 \text{m}^3$ (约占天然气年产量的 22.8%),到 2004 年美国低渗天然气产量增长到约 $1670 \times 10^8 \text{m}^3$ (约占



天然气年产量的 31.2%)。我国天然气陆上主要分布在鄂尔多斯盆地、柴达木盆地三湖地区、塔里木盆地库车地区、四川盆地川东和川西地区等。在已探明的气层气储量中,低渗透气藏储量约占 40%,在大中型气田中,低渗透气藏储量约占气藏储量的 60%。我国低渗气藏年产量增长迅速,以中石油大中型低渗气田为例,低渗透气藏天然气产量由 1995 年的 $38.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,增长到 2004 年的 $129.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,年平均增幅超过 20%。中国常规储层油气藏数量有限,今后将较多地面临致密深层低渗油气藏。低渗气藏开发难度大,经济有效地开发好低渗气田,不但是关系到我国天然气工业快速发展急需解决的重大课题,更是我国 21 世纪能源得以持续发展的战略问题。

SY/T 6285—1997 油气储层评价方法		SY/T 6168—1995 气藏分类		美国划分标准	
油藏	气藏	气藏	气藏		
$K \geq 2000$ 特高渗	$K \geq 500$ 高渗	$K \geq 50$ 高渗		一般	$K_a > 1.0$
$500 \leq K < 2000$ 高渗	$10 \leq K < 50$ 中渗	$10 \leq K < 50$ 中渗		近致密层	$K_a = 0.1 \sim 1.0$
$50 \leq K < 500$ 中渗	$0.1 \leq K < 10$ 低渗	$0.1 \leq K < 10$ 低渗		致密层	$K_a = 0.005 \sim 0.1$
$10 \leq K < 50$ 低渗	$K < 0.1$ 特低渗	$K < 0.1$ 致密		很致密层	$K_a = 0.001 \sim 0.005$
$1 \leq K < 10$ 特低渗	美国一般将孔隙度低 (10% 左右)、渗透率低 (小于 0.1mD)、含水饱和度 (大于 40%) 的含气层视为致密气藏。			超致密层	$K_a < 0.001$
$0.1 \leq K < 1$ 超低渗					

注: K 为实验室测定地表渗透率, K_a 为地下渗透率。

低渗透气藏是一定资源状况和技术经济条件下的相对概念。

渗透率单位: mD

中美关于低渗气藏界限的划分并不一致。

图 1-1 按储层渗透率划分的气藏类型

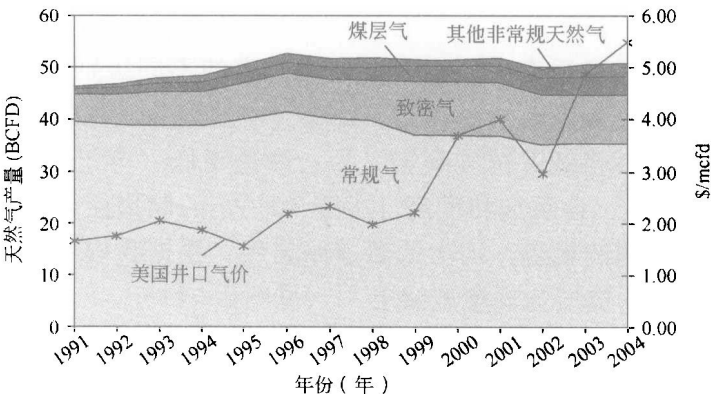


图 1-2 美国天然气日产量逐年趋势 (单位: BCFD)

注: $10 \times 10^8 \text{ ft}^3/\text{d}$ (BCFD) $= 0.2832 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d} = 103.36 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$



第三节 低渗透气田的开发特征及研究现状

我国主要的低渗气田（较为典型的有苏里格气田、迪那2气田等）储层地质条件复杂，渗透率低、孔隙度低，埋藏深度深、应力敏感性强，具有边、底水，含水饱和度较高^[3]，非均质性强，储气量丰富但分布较分散。这些特点使得低渗气藏开发难度较大。对气体渗流理论这一天然气开发的理论基础认识不够深入是低渗气藏难于有效开发的一个重要原因。有关文献表明^[4]国内对低渗透气藏的渗流理论研究最多，其次是储层评价、压裂技术和测试技术等。也就是说，我国目前对气藏的认识科技比较关注，对改造技术相对关注较少。这是因为，天然气渗流理论的作用已经深入到气田开发工作的各个环节。对天然气渗流理论研究的目的是为了把它当做认识气藏、改造气藏的工具，当做气田开发设计、动态分析、气井开采、增产工艺、反求地层参数、提高采收率等的理论基础。而改造储层的技术大多数以天然气渗流理论为基础。

渗流是流体在多孔介质中的流动，渗流特征取决于渗流三大要素的变化^[5]，即多孔介质中的流体本身的性质，主要是流体的组成和物理化学性质；多孔介质的性质，主要是孔隙结构和物理化学特性；流动状况，主要是流动环境、条件和流体与多孔介质之间的相互作用等。这三大要素互相影响，是考虑渗流问题的基本要素。

利用上述思想，分析低渗透气藏气体渗流的特征也取决于储层内天然气的性质，储层的性质以及天然气的流动状况。气体由于本身的可压缩性，使得气体的粘度、密度等参数不能像在液体渗流中那样近似当做常数处理。低渗气藏中天然气渗流的非 Darcy 渗流效应，以及高速渗流时的惯性效应的影响，使得单相气体渗流的偏微分方程的非线性程度更加明显^[6]。由于低渗透气层储层普遍含水饱和度较高，同时在微观上通过流体的多孔介质通道狭窄，低渗含水气藏毛细管压力很高，使得低渗气藏非 Darcy 渗流的阈压效应严重^[7]，弄清这一非线性渗流规律对低渗气藏的有效生产有着至关重要的指导作用。低渗气藏埋深较深，在低渗气藏生产过程中气藏处于应力再分布状态。地层压力快速下降，会产生压敏效应，从而引起岩石孔隙度、渗透率的变化，对储层渗透率和产量产生巨大的伤害^[8]。应力敏感性对气体渗流场的影响使得气体渗流不再遵循传统线性的 Darcy 定律，而表现出较强的非 Darcy 渗流特征。由于低渗气藏天然气渗流的上述特点，使得低渗透气藏天然气的渗流成为复杂的非线性渗流问题。

低渗气藏开发的过程中，气体渗流受到上述多因素的影响，不遵循常规的 Darcy 定律。在井筒附近，气体高速渗流，且地层压力迅速下降，应力敏感性显著；储层渗透率在井筒附近损失严重。由于凝析水、地层水以及外来水侵入气层严重影响气体的相对渗透率，容易造成水锁现象。上述现象伴随而生，在天然气开发过程

中, 由于对天然气的开发基础性理论的缺少, 在气田降压开采过程中产生了各种现象, 不能得到合理解释和充分解决。

因此, 我们试图研究低渗气藏气体非线性渗流的基本规律, 通过对气体非线性渗流机理的分析, 建立低渗气藏气体非线性渗流的数学模型, 形成理论体系, 为指导低渗气藏的开采提供理论支持。这种低渗气藏复杂渗流规律是有效开发气藏和掌握气井动态的重要理论基础。该项研究是一项有广阔应用前景的开创性研究工作, 对低渗透气藏合理高效的开发具有重要的科学指导意义。在当前能源需求持续增长的形势下, 及时进行低渗气藏天然气非线性渗流机理的技术攻关, 对于促进我国低渗天然气资源的开发, 实现我国低渗天然气产能接替具有重要现实和战略意义。

一、低渗气藏储层及开发特征

低渗气藏开发的关键是如何经济有效地提高气藏的采收率。要经济有效地开发低渗气藏, 首先要搞清楚的是储层特征, 因为储层特征是开发地质的一个核心问题, 储层在岩类、物性、储渗空间以及孔隙结构等方面的差异, 都将影响气藏特征、开发布局和开采效果。表征低渗气藏储层特征参数有很多, 这里主要讨论较为重要的孔隙度、渗透率、含水饱和度、毛细管力、地层压力特征和应力敏感性。

低渗透气层的喉道半径一般在 $1\mu\text{m}$ 以下, 孔喉半径与渗透率往往呈非线性函数关系, 渗透率随孔喉半径的减小而急剧下降, 即孔隙结构对渗流过程产生了影响。杨正明等人^[9]利用恒速亚汞仪研究了低渗透气藏微观孔隙结构特征, 研究表明: 不同渗透率的低渗透气藏岩心, 其孔隙半径基本相同, 而喉道半径不同。低渗透气藏中的孔隙类型也较为复杂, 由于矿物颗粒、碎岩片及基质胶结物后期的沉降溶解, 产生大量的次生孔隙, 其次还发育了微孔隙, 同时, 粒间孔隙(连通性最好, 渗滤能力强)、溶解孔隙、裂缝孔隙并存。在低渗砂岩储层中, 微孔隙可占孔隙度总体积的 40%~50%, 个别可高达 80%, 造成束缚水饱和度增加。研究表明, 渗透率的高低与孔隙类型及每种类型的孔隙所占比例有关, 一般来说, 粒间孔隙越小, 微孔隙据点比例越大, 则渗透率越低。次生孔隙通常被看做是孤立的孔隙或微裂纹。由于低渗气层的这种孔隙结构, 而使它较常规气层有很大的孔隙表面积, 导致了地层条件下的高含水饱和度和相当低的气体渗透率。

我国低渗气藏储层中含水饱和度较高^[5], 天然气与地层水对岩石表面的润湿性差异很大, 从而引起毛细管压力的不同作用。水作为岩石中的湿相, 易占据小径孔道, 或分布在大孔道的表面。而天然气作为非湿相, 多存在于大孔道中。更值得注意的是, 低渗砂岩气藏大都为细砂粉砂岩。岩石颗粒直径小, 比表面大, 对其表面上的流体更易呈现强亲强憎性, 这是低渗砂岩地层遇水造成其渗透率显著下降的主要原因。如前所述, 低渗透气层的原生孔隙和次生孔隙分散在整个储层内, 通过细微弯曲的毛细管连接起来, 这些毛细管的直径大都在 $1\mu\text{m}$ 以下, 通常限制了气体的

流动,并引起很高的毛细管压力。在低渗气藏中,毛细管压力较高,通常都大于0.5MPa,且毛细管压力曲线形态多样。

我国低渗气藏一般埋深较深,低渗透气藏储层的地层压力一般为高压或超高压。这是因为低渗透气藏储层物性差,生成的天然气不能在大范围内运移,也不易散失,随着有机质的不断成熟和天然气的不断生成聚集,势必引起储层内流体压力不断升高,从而导致低渗透气藏呈现较高的地层压力。

低渗气层的渗透率对上覆岩层压力相当敏感,换言之,随着上覆岩层压力的增加,渗透率将大幅度下降。因而在地面常规条件下测定的岩石渗透率要比在地层条件下的渗透率大十倍甚至上百倍。应力敏感性是指骨架应力和孔隙流体压力共同作用产生的压差对微观孔隙结构的影响。随着围压的增加,岩石的渗透率明显下降,而且岩石的渗透率越低,应力敏感性越强。应力敏感性实质上是岩石的毛细管和微裂纹在封闭压力的作用下产生闭合的一种特性,所以有人认为天然的毛细管系统是产生应力敏感性的重要因素。

鉴于上述低渗透气藏的各种地层特征,使其在钻井、完井、气藏改造以及测试过程中极易受到伤害,特别是水锁和微粒运移是低渗天然气藏中最为严重和普遍存在的问题。

由于低渗气藏所特有的储层特征使得低渗气藏的开发方式也有异于常规气藏。总结起来主要有以下几个特征。

(1) 低渗透气藏具有边勘探边开发的特征。低渗透气藏的勘探和开发之间并没有一定的界限。低渗透气田,初期大多数是“有气无田”,往往在一口探井中发现工业性气流后,就投入生产。然后在此井的周围布钻加密井,不断扩大含气面积和增加储量,逐步形成井组、区块,最后形成气田。例如,美国的 Carthage 气田,早期分为 36 个区块,直至其发现 30 多年以后才形成气田;瓦腾伯格气田 1970 年投入开发,直至 1994 年前后仍在继续勘探。因此,致密气藏勘探和开发之间没有一定的界限,具有边勘探边开发,即滚动勘探的重要特征。通常,开发低渗透气藏时,其最终井网密度是经过几年生产动态资料的积累,在加深储层认识的基础上,逐渐将井网加密到适度的布局而最终确定下来。因此,气田的井网密度常常表现为不规则布井,井距由开发初期的稀井网到后期的最合适井距。美国的单井控制面积可由 1.295km^2 加密至 0.65km^2 或更小。

(2) 自然能量补给缓慢。由于低渗砂岩气藏岩石孔隙度低,渗透性差,连通性不好,因而边水或底水驱动不明显,整个地层的水动力联系差,自然能量补充缓慢,一次开采期间,驱动类型常常表现为弹性驱动,且一次采收率较低。但实施酸化压裂等增产措施后,产气量可成数倍或数十倍增长,但递减也较快。

(3) 低渗透气井的初期产量高,但产量和压力下降快。

(4) 低渗气藏非均质性比较强。基质孔隙与裂缝之间易出现流体窜流。许多低

渗气藏通常含有高孔隙度和高渗透层、低孔隙度和低渗层以及高孔隙度和低渗层,从而构成了非均质性气藏并具有双重孔隙度、双重渗透率的特点;由于两种介质的渗透性能和储集性能不同,压力传播的速度也不同,因此,在空间的任一点同时引进两个压力,形成两个平行的压力场和渗流场,两个渗流场之间存在着流体交换,即发生窜流。

(5) 水驱气过程较常规气藏更为复杂。致密气藏的孔喉和裂缝导流直径小,毛细管压力高(可达 6.9MPa),含水饱和度高,气相渗透率低,使水驱气的过程比常规气藏更加复杂。前苏联研究人员做了大量的水驱气试验,水驱气后的残余气饱和度高,这是导致致密气藏采收率低的重要原因。

正是由于以上原因低渗储层一般需实施增产措施,达到提高采收率的目的。

二、低渗多孔介质单相气体非线性渗流

多孔介质渗流的基本规律是遵循 Darcy 定律,但是研究表明^[6]Darcy 定律适用条件有限。仅对低渗多孔介质单相气体(可压缩流体)渗流而言,在高流速下($Re > 5$ 左右),渗流方程中的惯性项不能被忽略,Darcy 定律不再适用;而在低压情况下,Darcy 定律还存在密度界限,气体渗流存在滑流现象^[10]。由此可见,对低渗介质而言,无论是高流速还是低压的单相气体渗流均不遵循 Darcy 定律。

(一) 低渗多孔介质气体滑脱效应

当气体在低渗^[11]孔隙介质中“低压”^[12]渗流时,气体渗流的主要物理特征是气体渗流具有“滑脱效应”。气体滑脱流动的本质是由于气体分子与介质孔道壁面的作用,使得气体在孔道壁面附近的各个气体分子都处于运动状态,且贡献一个附加通量^[10],从而在宏观上表现为气体在孔道固壁面上具有一定非零速度,产生滑脱流量。

1875 年 Kundt 和 warburg^[9]第一次发现气体流动存在滑脱现象。Knudsen^[9]曾定义无量纲数 $K_n = \lambda/D$,其中 λ 表示气体分子的平均自由程, D 表示流体连续介质的特征长度。当 $K_n < 0.01$ 时^[10,13](也有学者认为 $K_n < 0.001$,见文献 [14, 15]),可以把流动的流体视为一种能够应用宏观方法的连续介质,当 $K_n > 0.01$ 时(有些学者认为是 $K_n > 0.001$,见文献 [14, 15]),气体渗流就存在滑脱流动。Knudsen 的成果为很多学者所承认和利用^[16,17], K_n 数成为划分气体流动特性区域的一个非常重要的无量纲数。1941 年 Klinkenberg 利用 warburg^[11]的滑脱理论解释了在相同的压力条件下岩心气测渗透率大于液测渗透率的原因,并且用克氏系数 b (也称为滑脱因子)描述气体渗流滑脱效应强弱的程度。

1946 年 Muskat^[18]将气体在多孔介质中流动的理论首次运用到了石油天然气开发领域之后,Klinkenberg 的滑脱理论得到了广泛的认可。在机理研究方面,一些学



者着力于研究滑脱效应受哪些因素控制和影响。Jones 和 Owens 等人^[19]通过大量实验得到了滑脱因子 b 与岩心绝对渗透率的关系,这一观点也与 Heid 等人的研究结果^[20]一致。Rex D. Thomas 等人^[21]研究了上覆压力与水饱和度对致密岩层气体渗透率的影响。其认为气体渗透率随上覆压力的增大而显著地减小,饱和水也会降低气体渗透率。K. Sampath 等人^[22]研究了气体滑脱效应的一些影响因素。他们认为气体的“表观渗透率”受围压的影响非常显著,气体的“表观渗透率”与液体渗透率的差异是细粒移动 (fines movement) 与固气的界面效应所引起的。借鉴 Jones 和 Owens 等人的研究成果,他们研究得到了气体的滑脱因子 b 和渗透率与孔隙度比值的一个表达式。斯坦福大学的 Kewen Li 和 Roland N. Horne (2001)^[23]研究了气液两相流的滑脱效应以及温度对滑脱效应的影响。他们认为气体滑脱效应影响气体的相对渗透率显著,忽略气体滑脱效应将会使气体的相对渗透率偏大。克氏系数随岩心含水饱和度的增加而增加,但在岩心含水饱和度小于 18% 时,滑脱因子 b 值可以认为是常数;对同一种气体而言,在同一压力下,气体的“表观渗透率”随着温度的升高而增大。而绝对渗透率在不同温度下趋于一致。姚约东等 (2004)^[24]探讨了不同气体在低压条件下滑脱效应的变化规律,以及滑脱效应的一些影响因素。邓英尔等 (2005)^[25]认为低渗气层气体与液体渗流遵循同一形式的运动规律。

在滑脱效应的理论研究方面,Turgay Ertekin (1986) 等人将气体在低渗多孔介质中的渗流过程看成受浓度场及压力场两个物理场的耦合^[26],其中,浓度场对应于 Knudsen 流,可以应用 fick 定律进行求解;而压力场对应于 Darcy 流,可以用 Darcy 定律求解。上述耦合两场严格遵循一个由组分、压力、饱和度、滑脱因子组成的函数关系。Yu-Shu Wu 等人^[18] (1998) 研究了结合滑脱效应的稳态气体渗流方程,并对该方程的一维、二维、三维问题进行了数值模拟研究。W. Kast 等人 (1999)^[16] 用实验结合理论的办法论述了气相在多孔介质中不同压力下,运输过程中存在三种流态,粘性流、扩散流、Knudsen 流。Faruk Civan (2002)^[27] 也讨论了低渗透气藏的流体动力弥散机理,他把致密储层内流体的流动分为三种流态,粘性流态、Knudsen 流态、滑脱流态,分析了 Darcy 定律失效的原因,并且建立起考虑滑脱效应的数学模型。J. Chastanet 等人^[17] 用摄动的方法分析了表观渗透率依赖于 K_n 数的大小,在 K_n 数较小时,表观渗透率遵循 Klinkenberg 方程。

国内的学者在理论方面也有很多优秀的成果,王勇杰等人 (1995)^[28] 对低渗透多孔介质中的气体滑脱行为进行了研究。给出了气体表观渗透率 (K_g) 与绝对渗透率的二次滑脱关系式,即认为 K_g 与平均压力倒数不是简单的线性关系。由于实验数据过少 (仅有 5 个实验点),这一论点没有引起后人较多的关注。

陈代询 (2002)^[29] 研究了当 $0.01 < K_n < 1$ 时,气测渗透率与滑脱流动的关系,建立了考虑滑脱效应的气体渗流方程,并进行了实验验证。王茜 (2003)^[30] 也建立了考虑滑脱效应的气体渗流方程。上述两位学者的研究成果与 Turgay Ertekin

(1986)^[26]研究本质上是一致的。不同的是前者把浓度场控制的 Knudsen 流方程,与压力场控制的 Darcy 流方程简单线性叠加起来,组成气体渗流方程。国内还有一些学者如王彬 (2004)^[31]等也基本采用了相同的思路建立起这样的气体渗流方程。

(二) 多孔介质气体高速渗流惯性效应

气体在中高渗多孔介质中高速渗流时表现出类似存在阻力使得气测渗透率随流速升高而迅速下降的现象,有些学者如 Cornell 和 Katz^[32]将其类比流体力学中区分层流和紊流^[33]的方法来区分线性和高速非线性渗流, J. 贝尔在其著作中明确提出基于这种认识所产生的问题,即实际紊流发生的雷诺数要比观测到的偏离 Darcy 定律的雷诺数至少大一个数量级^[10]。这里我们采用的是另一种解释,即这是由于高速时,渗流方程中的惯性项不能忽略所造成的,所以气体渗流过程中它是研究气井附近由于压降漏斗而造成的流速急剧增加现象的物理机制。为了说明这种非达西流动的特征, Forchheimer (1901)^[10]提出了修正的方法即所谓的二项式渗流定律,它和单相连续性流动方程的结合,得到了一个非线性的流动方程即高速非达西渗流方程。其后作者 Forchheimer (1930)^[10]还给出了一个更广义的非线性渗流方程,即认为惯性项是流速的 n 次方。Scheidegger 也持与 J. 贝尔相同的观点,介绍了类似于 Forchheimer 二项式渗流定律^[9]。Ramey (1965)^[34]借助于修正解而不是修正描述方程的方法,即在压降方程中引入大家熟知的视表皮系数和从中包含的惯性—湍流效应的流动系数的概念; Al Hussainy 等人 (1966)^[35]又引进了真实气体拟压力函数,避免了数学上的复杂性,消除了流动方程的非线性,并使得流动方程在许多情况下有足够的工程精度,从而为形成目前流行于石油工业界传统的和现代的气井解释方法打下了坚实的基础。

气体即使在低渗介质中高速渗流时,其惯性效应也是非常明显的^[36]。目前关于气体高速非线性渗流的主流认识还是基于二项式定律发展而得来的。有一些学者提出了指数形式的非线性渗流定律^[12],这种指数渗流定律实际上是 Forchheimer (1930)^[10]广义非线性渗流方程的一个特例,但其表达式的物理意义并不如后者清晰。

(三) 数值方法以及非线性渗流研究的趋势

由于低渗气藏气体渗流方程的非线性,国内还有不少学者从数值模拟的角度进行了研究。比较有代表性的是吴小庆 (1999)^[37]对该非线性偏微分方程反问题的数学模型进行了研究,论证了其适定性,并证明了拟解的存在性。这为数值模拟解的存在性、适定性和唯一性奠定了理论基础。李铁军 (2000)^[38]从低渗透储层气体渗流的特性出发,建立相应的数学模型,模型及其算法都能较好地拟合气井的实测数据。张力 (2002)^[39]考虑了气体的扩散效应对气体渗流的影响并对气体渗流方程进行数值模拟。王茜 (2003)^[30]对其建立的考虑滑脱效应的气体渗流方程进行了有限