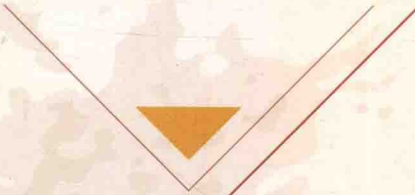




火山岩气藏 储层特征及渗流机理

杨正明 郭和坤 张亚蒲 李海波 晏 军 / 著

HUOSHANYAN QICANG
CHUCENG TEZHENG JI SHENLIU JILI



科学出版社

火山岩气藏储层特征 及渗流机理

杨正明 郭和坤 张亚蒲 著
李海波 晏 军

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对火山岩气藏储层特征及开发特征有关的研究内容,进行全面系统的论述。本书介绍火山岩气藏的微观孔隙结构特征、气体非线性渗流规律、供排气机理等方面的内容,详细系统地阐述相关的研究方法、研究成果,并且介绍每项研究成果在认识火山岩储层特征及开发方案编制中的作用。

本书可供石油工程技术人员、科研人员及石油院校有关专业师生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

火山岩气藏储层特征及渗流机理 / 杨正明等著. —北京: 科学出版社, 2017.1

ISBN 978-7-03-050736-5

I. ①火… II. ①杨… III. ①火山岩-岩性油气藏-储集层特征-研究②火山岩-岩性油气藏-渗流-研究 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 281599 号

责任编辑: 张 展 刘莉莉 / 责任校对: 刘莉莉

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017年1月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 209千字

定价: 118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,在我国松辽盆地、渤海湾盆地、准噶尔盆地和克拉玛依等地先后发现了具有一定储量的火山岩油气藏。其中火山岩气藏的有利勘探面积超过 2 万 km^2 ,地质储量超过 3 万亿 m^3 ,火山岩气藏已成为天然气勘探和开发的主要领域之一。总体来看,由于火山岩气藏储层固有的复杂性,前期的很多研究工作还比较单一,迫切需要有针对火山岩气藏储层特征及渗流机理等方面的系统全面的研究方法,用于指导现场的开发。

本书基于火山岩气藏储层特征认识及渗流机理方面的实际问题,跟踪国内外相关的研究方法及成果,通过多年来大量的室内实验的尝试,形成并总结了火山岩气藏储层特征及渗流机理方面一系列的研究方法及技术。主要成果为:揭示了火山岩气藏微观孔隙结构特征、可动用条件和气水渗流机理;建立了研究火山岩气藏气体分线性渗流规律的实验方法;深入探索了不同作用下的供排气机理及主控因素,为火山岩气藏的合理开发提供了重要理论依据。

全书共分为 7 章。第 1 章由杨正明、郭和坤、张亚蒲、李海波、刘学伟等撰写,第 2 章由杨正明、张亚蒲、郭和坤、刘学伟等撰写,第 3 章由杨正明、郭和坤、李海波、张亚蒲等撰写,第 4 章由郭和坤、李海波、张亚蒲等撰写,第 5 章由杨正明、张亚蒲、霍凌婧、刘学伟、刘超等撰写,第 6 章由杨正明、张亚蒲、郭和坤、刘学伟等撰写,第 7 章由晏军、杨正明、张亚蒲等撰写。

目前,已出版的火山岩气藏储层特征和渗流机理系统的研究方法类图书较少。希望本书对火山岩气藏的开发起到推动作用,并能为相关研究领域的科研人员、高校师生在科研工作及学习中起到参考作用。

本书在撰写过程中得到了中国石油勘探开发研究院廊坊分院渗流流体力学研究所同仁的大力支持和帮助,并得到了国家科技重大专项(2017ZX05016)及国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB209507)的资助。本书对所用的资料和数据列了参考文献,但难免有不尽之处,恳请同行专家和读者谅解。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及目的	1
1.1.1 火山岩气藏资源量	1
1.1.2 火山岩气藏定义	1
1.2 火山岩气藏地质和开发特征	2
1.2.1 火山岩气藏地质特征	2
1.2.2 火山岩气藏开采特征	3
1.3 火山岩气藏储层特征和非线性渗流研究进展	5
1.3.1 火山岩分类研究的历史和现状	5
1.3.2 火山岩储层微观孔隙结构特征	7
1.3.3 多孔介质中气体非线性渗流机理研究现状	8
1.4 国内外典型火山岩气藏勘探开发实例	12
1.4.1 日本的吉井—东柏崎火山岩气田	12
1.4.2 大庆徐深的升平火山岩气藏	13
1.5 火山岩气藏勘探开发技术展望	15
第2章 火山岩气藏微观孔隙结构特征和储层分类研究	17
2.1 恒速压汞微观孔隙结构特征测试原理和实验步骤	17
2.1.1 恒速压汞仪测试原理	17
2.1.2 材料和实验步骤	18
2.2 恒速压汞微观孔隙结构特征测试结果	18
2.3 火山岩气藏岩样微观孔隙结构特征分析	26
2.3.1 不同渗透率条件下孔喉分布特征	26
2.3.2 不同喉道半径对岩心渗透率的贡献率	29
2.3.3 不同渗透率的孔喉半径对比分析	30
2.3.4 不同渗透率的毛管压力对比分析	31
2.4 火山岩气藏储层分类研究	32
2.5 本章小结	36
第3章 火山岩气藏不同岩性核磁共振实验研究	38
3.1 前言	38

3.2 核磁共振可动流体测试原理与测试方法简述	38
3.2.1 核磁共振可动流体的测试原理及分析参数	38
3.2.2 核磁共振可动流体饱和度和束缚水饱和度的测试方法	41
3.3 不同岩性火山岩气藏岩心可动流体截止值研究	41
3.3.1 离心实验最佳离心力确定	42
3.3.2 不同岩性火山岩气藏岩心可动流体截止值研究	45
3.4 不同岩性火山岩气藏岩心可动流体百分数研究	48
3.5 本章小结	49
第4章 火山岩气藏 CT 扫描成像研究	50
4.1 X-CT 岩石图像简介	50
4.2 实验工作量及实验方法	50
4.3 实验结果及分析	57
4.3.1 气孔溶洞、裂缝或微裂缝可视化分析	57
4.3.2 CT 图像定量分析	59
4.4 本章小结	61
第5章 火山岩气藏非线性渗流机理研究	62
5.1 火山岩气藏单相气体非线性渗流机理研究	62
5.1.1 火山岩岩心气体渗流曲线的一般特征	62
5.1.2 火山岩岩心气体滑脱效应渗流机理研究	68
5.2 含水火山岩气藏气体非线性渗流机理研究	74
5.2.1 启动压力梯度的产生机理及实验的意义	74
5.2.2 束缚水条件下全直径岩心真实启动压力梯度测定和分析	75
5.2.3 含水火山岩气藏岩心的气体渗流特征	80
5.2.4 不同含水饱和度下火山岩气藏岩心 NMR 测试研究	90
5.3 本章小结	91
第6章 火山岩气藏应力敏感性实验研究	94
6.1 实验仪器及实验流程	94
6.1.1 全直径岩心火山岩岩样应力敏感性测试流程	94
6.1.2 小直径岩心火山岩岩样应力敏感性测试流程和实验步骤	95
6.2 覆压条件下岩心孔隙度变化规律	96
6.3 有效应力条件下岩心渗透率的变化规律	97
6.3.1 不同围压下岩心渗透率的变化规律	97
6.3.2 不同驱动压力对火山岩气藏储层应力敏感性影响实验研究	103
6.3.3 渗透率应力敏感滞后效应	105
6.3.4 束缚水对气藏储层岩石应力敏感性的影响	106

6.4 本章小结	107
第7章 火山岩气藏供排气机理研究	109
7.1 压差作用下的供排气机理	109
7.1.1 火山岩干岩心供排气实验研究	109
7.1.2 火山岩含水岩心供排气实验研究	116
7.1.3 小结	121
7.2 渗吸作用下的供排气机理	122
7.2.1 渗吸原理	124
7.2.2 实验流程及步骤	125
7.2.3 实验结果分析	126
7.2.4 小结	131
7.3 扩散作用下的供排气机理	132
7.3.1 实验原理	132
7.3.2 实验内容和方案设计	133
7.3.3 实验结果及影响因素分析	136
7.3.4 小结	139
7.4 压实作用下的供排气机理	139
7.4.1 实验内容和方案设计	140
7.4.2 实验结果分析	141
7.4.3 小结	148
7.5 供排气主控因素综合分析	148
7.6 结论与认识	149
参考文献	152

第1章 绪 论

1.1 研究背景及目的

1.1.1 火山岩气藏资源量

近年来,在我国松辽盆地北部(大庆)、南部(吉林)和准噶尔盆地(新疆)先后发现了大量火山岩气藏,其有利勘探面积达 $20\,000\text{km}^2$ 以上,天然气资源量超过 $30\,000\times 10^8\text{m}^3$,三级储量已超过 $9000\times 10^8\text{m}^3$,是目前世界上已发现的规模最大的火山岩气藏^[1,2]。该类气藏具有单个气藏规模较小、差异大、分布零散的特点,储量丰度平均为 $6.4\times 10^8\text{m}^3/\text{km}^2$,气藏储量丰度小于 $8\times 10^8\text{m}^3/\text{km}^2$ 的占 70% 以上,属于典型的大面积分布中、低丰度气藏。在储量分布中,松辽盆地深层天然气资源量达 2 万亿 m^3 以上,准噶尔盆地陆东—五彩湾地区天然气资源量达 5000 亿 m^3 以上,此外在渤海湾盆地南堡和四川盆地周公山等地也有分布。

2007 年,火山岩天然气新增储量占中国石油天然气新增储量的 14%。

1.1.2 火山岩气藏定义

火山岩缘于地下岩浆的喷出活动,它与侵入岩(或称深成岩)构成岩浆岩的两大类别。迄今为止,世界上已发现数量较多的火山岩气藏,几乎遍及各大洲。但大多数火山岩气藏规模不大,储量很小,与世界上占主导地位的砂岩油气藏和碳酸盐岩油气藏相比,砂岩油气藏约占 60%,碳酸盐岩油气藏约占 40%,而火山岩油气藏占不到 1%。

火山岩之所以能成为有商业价值的油集层,主要因素有以下几点^[2~4]:

- (1)火山熔岩中常有发育的气孔。
- (2)火山熔岩中大量发育有收缩裂缝。
- (3)火山碎屑岩中大量发育有粒间孔隙。

(4)火山岩喷出地表后物理化学条件发生巨大变化,其岩石组成和矿物成分极不稳定,易遭受风化、溶蚀、交代等改造而产生大量溶蚀孔、重结晶孔、风化剥蚀裂缝等储渗空间。

(5)火山岩杨氏模量比砂岩高,其中酸性火成岩又比中性及基性火成岩高,表现为脆性强,在构造力作用下,容易碎裂形成构造裂缝。

此外,许多火山岩由于受地壳运动影响出露地表长期遭受风化剥蚀,使得风化淋滤孔隙裂缝大量发育,其储集性能将有根本的改善。正因为如此,许多与火山岩有成因联系或相伴生的超浅层侵入岩(又称次火山岩、潜火山岩)和变质岩亦可因出露地表遭受风化剥蚀而成为油气储集岩层。因此,许多火山岩气藏中常有次火山岩及变质岩出现,人们并不将次火山岩及变质岩储集层单列,而常常将其笼统称为火山岩变质岩类储集层或火成岩储集层^[5,6]。

我国主要的火山岩气田储层地质条件复杂,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,非均质性强,储气量丰富但分布较分散。这些特点使得火山岩气藏开发难度较大。储层岩性复杂和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火山岩气藏难以有效开发的重要原因。

1.2 火山岩气藏地质和开发特征

1.2.1 火山岩气藏地质特征

根据文献资料分析,火山岩气藏主要表现出的基本地质特征如下^[7~29]:

(1)储集层岩性复杂。火山岩储层由安山岩状熔岩、凝灰岩、流纹岩、集块岩、凝灰角砾岩、次火山岩和变质岩等组成,时常夹杂陆源碎屑岩与碳酸盐岩类,反映出火山喷发与火山沉积相间的多期性特征。

(2)储集空间复杂多样。储集空间以低孔低渗透双重介质储层为主,火山岩储层孔隙结构复杂,储集空间多样,非均质性严重。其主要储集空间有大型孔、洞、缝,也有中小型及微型孔、缝;成因上既有原生孔缝(晶间孔、气孔及成岩缝),也有大量次生孔缝(溶蚀孔、屑间孔及构造缝)。一般来说,杏仁状的玄武岩以孔、洞含油气为主;蚀变较强的玄武岩以微裂缝为储集空间;玄武质的角砾岩以裂缝及连通的孔、洞含油气为主;致密的玄武岩以裂缝为主要储集空间,但组成油气藏的整体仍是低孔、低渗的储层。

(3)储层非均质性严重。火山岩储层基质孔隙连通性差别较大,孔隙度为 $0.1\% \sim 32\%$,渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 150 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。岩心分析有效孔隙度与岩心分析渗透率往往很低,但测井解释的孔隙度时常较高,试井解释的有效渗透率常常高出岩心分析渗透率的数倍至数十倍,反映裂缝承担了主要的渗流作用。

(4)具有一定规模的火山岩气藏多与后期构造作用、抬升淋滤改造有关。尽

管火山岩发育有原生、次生的多种类型孔洞缝,但总的看来其孔隙度较小、渗透率不高。工业性火山岩储层多经后期的构造作用和抬升淋滤改造。构造作用尤其是断裂作用及其与之相伴的微裂缝起到疏导油气和改善储层连通性、储层渗透性的作用。

(5)埋深浅、面积小、厚度差异大。火山岩储层集中在白垩系到第四系,埋藏深度超过 3000m 的已很少,多数为 400~2000m。许多火山岩油藏面积较小,不足 1km^2 ,一般小于 10km^2 。火山岩油气藏厚度有仅 4.5m 的,也有厚达 500m 的。

1.2.2 火山岩气藏开采特征

根据国内外多个火山岩气藏的开发资料及报道,火山岩气藏在开采过程中表现出的一般开采特征如下^[30~38]:

(1)气田初始产量低。勘探阶段,对汪家屯气田 16 口井、18 个层进行了系统试气,求得气井无阻流量为 $1.41 \times 10^4 \sim 26.24 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,多数气井单井日产气量在 $10 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 左右,平均无阻流量仅为 $5.25 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。

对昌德气田芳深 1 井 4 个层进行了系统试气,获日产气量为 2000m^3 ,经压裂后,获日产气量为 $40\,814\text{m}^3$ 。芳深 7 井经压裂后,获日产气量为 $42\,361\text{m}^3$ 。

(2)气井产量递减幅度大、地层压力下降快。火山岩储层由于其原生或次生形成的孔、洞、缝的分布不均匀性及其连通性较常规的砂砾岩、碳酸盐岩差,火山岩油气藏通常规模较小,这就决定了火山岩油气藏稳定性差、产量衰竭快的特点。

(3)产能分布复杂,单井产量差异大。火山岩油气藏在平面上含油气不均匀,造成各油气藏间产能差异很大,而且同一油气藏不同部位,甚至相同部位的生产井产能也相差悬殊。例如,阿塞拜疆穆拉德哈雷喷发岩油藏东部地区油井初期产能为 $0 \sim 700\text{t}/\text{d}$;库拉凹陷摩拉特汉喷发岩油藏 48% 的井初期产油 $1 \sim 30\text{t}/\text{d}$, 35% 的井初期产油 $30 \sim 100\text{t}/\text{d}$, 17% 的井初期产油高于 $100\text{t}/\text{d}$ 。

(4)火山岩气藏的气水关系较为复杂。火山岩由于喷发的多期性、各喷发期岩性上的差异性及所处相带不同,导致火山岩气藏的压力系统、气水关系复杂,常有多压力系统,无统一的气水界面,使气藏的开发难度增大。

汪家屯东侏罗系营城组火山岩气藏无统一的气-水界面,气-水分布关系复杂,气-水分布不受构造控制,只受岩性控制。

升平气田在构造高部位的 SS1 井获工业性气流,而位于低部位的 SS3 井气水同产,反映了构造对含气的控制作用,初步推断可形成统一气-水界面的构造气藏,气-水界面深度大约为 -2719m ,有待于进一步认识。

昌德气田气水分布复杂,登三、登四段气层受断层、岩性控制,构造对天然气的储集具有一定的控制作用,气层分布位于构造高部位,水层分布位于构造低部位。

(5)一般存在边、底水,易发生水侵。由于火山岩气藏都不同程度地存在边、底水,且以底水为主,同时气水层间隔层不发育,局部井区隔层还发育高角度裂缝,底水对气田开发效果将有较大的影响。开发过程中可能出现底水锥进的现象,若气藏打开程度过大或采气速度过高,均可能引起底水过早地发生水窜,气井见水后,产量将大幅度下降,严重时将引起水淹停产,降低气藏采收率。

(6)渗流不遵循 Darcy 定律,具有启动压力梯度。火山岩气藏普遍具有低孔、低渗、高含水饱和度的特点,气、水赖以流动的通道很窄,在细小的孔隙喉道处易形成水化膜。地层孔隙中的气体从静止到流动必须突破水化膜束缚,这就需要保持一定的压力梯度,即为气体渗流时的启动压力梯度。实验验证低渗透火山岩气藏存在启动压力。储层渗透率对启动压力梯度有明显的影响,随着岩石空气渗透率的降低,启动压力梯度增大;岩石渗透率越小,启动压力梯度越大。渗流规律不遵循达西定律,在产能预测及计算井距时启动压力梯度有很大影响,预测不当,会给气藏的开发带来一定的影响。

(7)储层物性差,需压裂才能投产。火山岩储层总体上物性差,自然产能低,需压裂才能投产。从兴城气田开发现状来看,气井自然产能很低,绝大多数井射孔后油气显示极差,不经过压裂不能达到投产要求。主要原因是兴城地区储集类型为微裂缝孔隙型,大缝大洞不发育,储层物性差,属低孔低渗储层。其次,由于储层埋藏深,气层压力高,为了避免井喷,在钻井、固井、射孔等作业过程中往往使用密度相对大的压井液,使得井筒与地层压差增大,大量作业颗粒进入井底地层微细裂缝中,使本来裂缝发育程度比较差的储层遭受严重污染,极大地降低了生产能力。

(8)井间干扰严重。火山岩油气藏的裂缝系统保证了储层具有较高的导流能力,使不同距离的生产井之间水动力关系密切,因此形成井间干扰是这类油气藏开发的典型特点,几乎每个油气藏都存在这一问题,即使井距很大也不例外。要提高这类油气藏的整体开发效果,可采用顶部注气或底部脉冲注水的开发方式。

由于火山岩油气藏地层非常复杂,没有固定的开发模式可以借鉴,只能根据油气藏的地质特征,采用相应的开发方式,以提高火山岩油气藏的开发效果。但无论采用何种开发模式,认识清楚火山岩储层是非常必要的。

1.3 火山岩气藏储层特征和非线性渗流研究进展

1.3.1 火山岩分类研究的历史和现状

火山岩熔岩分类有两个基本方向：一是以矿物成分进行分类；二是以岩石化学成分分类。火山岩由于结晶颗粒细小，难以定量统计组成矿物含量。因此，所谓的以矿物成分分类是指用化学成分计算标准矿物组成，然后借用深成岩的矿物成分双三角分类图进行火山岩的分类^[39]。岩石化学成分分类是指用常量元素^[40]或微量元素^①划分火山岩类型。

早在1903年，Cross等^[41]就提出火成岩的定量分类系统(CIPW norm system)。该系统将岩石常量元素百分含量转化成标准矿物组成，再由计算取得的主要造岩矿物含量用投影图确定火山岩类型。其标准矿物计算方法实质上是基于钙碱性和钠系列火山岩的观测结果。问题是计算所求得的标准矿物与实际观察到的矿物并不能够十分吻合，尤其对于不饱和型火山岩会出现异常结果。20世纪30年代，Niggli^[42]和Troeger^[43]提出标准矿物计算的分子数方法，同时将橄榄石、辉石、角闪石和云母及黄长石等铁镁硅酸盐矿物组分考虑在内，通过计算模式与岩石化学成分之间的相互控制，使得计算标准与实际矿物组成趋于一致。但该结果只给出长石平均值，没有火山岩分类所必须的碱性长石与斜长石的比值。1973年，Rittmann^[44]以日本岛633个中酸性火山岩和夏威夷岛232个中基性火山岩为样本，系统论述了火山岩标准矿物成分的求取方法，针对12种常见造岩矿物和12种典型火山岩就标准矿物计算步骤和相关问题进行了详细说明，完善了火山岩的标准矿物分类体系。1968年，Streckeisen^[45]提出火成岩分类的Q-A-P-F双三角图(其中Q代表石英 quartz, A代表碱性长石 alkali-feldspar, P代表斜长石 plagioclase, F代表副长石 feldspathoids)，奠定了火成岩现代分类学的基础，也是用标准矿物判别火山岩类型的主要工具。1985年，邱家骧提出由此确定的火山岩名称与侵入岩对应^[46]，包括：碱长流纹岩、流纹岩、英安岩、石英碱长粗面岩、石英粗面岩、石英粗安岩、钙碱性安山岩、钙碱性玄武岩、碱长粗面岩、粗面岩、安粗岩、橄榄粗安岩、副长石碱长粗面岩、副长石粗面岩、含副长石安粗岩、碱性玄武岩、响岩、碱玄质响岩、响岩质碱玄岩、碱玄岩、响岩质副长石岩，共21种。

火山岩的岩石化学成分分类主要是依据常量元素含量，如全碱-硅质图(total

① Winchester J A, Fwyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20(77): 325-343.

alkali-silica diagram)^[40]。1989年, LeMaitre等^[47]对此进行了详细论述, 并把火山岩分类分为三种情况区别对待: ①矿物含量可确定则用 Q-A-P-F 双三角图进行分类, 方法和结果类似于深成岩; ②若矿物成分不可确定而有岩石化学成分结果则用 TAS 图解分类; ③既无矿物含量又无岩石化学成分结果时则采用“野外用火山岩 Q-A-P-F 初步分类图解”, 将火山岩划分为流纹岩类、英安岩类、粗面岩类、安山或玄武岩类、响岩类、碱玄岩类、副长石岩类, 共 7 种, 通常仅用于野外临时定名。

用 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 等常量元素含量确定火山岩类型的 TAS 图解在国内外被广泛使用^[47~49], 是目前火山熔岩分类的基本依据。TAS 图中用 SiO_2 wt% 和 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ wt% 分别作为横、纵坐标将火山岩分为十五种类型: 流纹岩、英安岩、安山岩、玄武安山岩、玄武岩、苦橄玄武岩、粗面岩(标准矿物石英含量 $< 20\%$) 或粗面英安岩(标准矿物石英含量 $> 20\%$)、粗面安山岩、玄武粗安岩、粗面玄武岩、响岩、碱玄质响岩、响岩质碱玄岩、碱玄岩(标准矿物橄榄石含量 $< 20\%$) 或碧玄岩(标准矿物橄榄石含量 $> 20\%$)、副长石岩。将其中高镁(MgO 含量 $> 18\%$) 火山岩划分为麦美奇岩(TiO_2 含量 $> 1\%$) 和科马提岩(TiO_2 含量 $< 1\%$); MgO 含量 $> 8\%$ 和 TiO_2 含量 $< 0.5\%$ 的火山岩称为玻[质]古[铜]安山岩。根据钾钠相对含量还可划分出夏威夷岩、钾质粗面玄武岩、橄榄粗安岩、橄榄玄武粗安岩、歪长粗面岩与安粗岩等六亚种。根据 Al 和 Fe 的相对含量又分出钠闪碱流质和碱流质两类。

国际地质科学联合会火成岩分类学分会 LeMaitre 等^[47]所定义的火山碎屑岩包括空落、流动和基浪沉积, 还包括地下和火山通道沉积(如玻质火山碎屑岩、侵入和侵出角砾岩、凝灰岩墙、火山角砾岩筒等)。火山碎屑(pyroclasts)专指由火山活动直接结果的碎裂作用而产生的碎屑, 不包括熔岩流自角砾岩化而形成的碎屑颗粒。火山碎屑可以是单晶、晶屑、玻屑或岩屑。火山碎屑的形状是其主要鉴定标志, 其外形是在火山碎裂作用中或碎裂后搬运到第一沉积地点时形成的, 决不能有反映在后期再沉积过程中受到改造的迹象。如果有后期改造, 则应称之为“改造的火山碎屑(reworked pyroclasts)”或“外碎屑(epiclasts)”。火山碎屑包括火山弹(bombs)、火山集块(blocks)、火山角砾(lapilli)和火山灰(ash grains)。①火山弹: 平均粒径 $> 64\text{mm}$, 其形态和表面(如面包壳外表)显示在形成和后续搬运过程中处于全部或部分熔融状态。②火山集块: 平均粒径 $> 64\text{mm}$, 其棱角一次棱角状外形显示它们形成时是刚性的。③火山(角)砾: 任意形态的、平均粒径为 $2\sim 64\text{mm}$ 的火山碎屑。④火山灰: 平均粒径 $< 2\text{mm}$ 的火山碎屑, 可进一步分为粗火山灰(平均粒径为 $1/16\sim 2\text{mm}$) 和细火山灰(平均粒径 $< 1/16\text{mm}$, 也叫火山尘)。LeMaitre 等将火山碎屑体积含量大于 75% 的岩石定义为火山碎屑岩, 其分类按粒度和碎屑成分分别进行。粒度 $> 64\text{mm}$ 的为火山集块岩(agglom-

erate)和火山碎屑角砾岩(pyriclastic breccia);粒度为2~64mm的为火山角砾凝灰岩(lapilli tuff);粒度为1/16~2mm的为粗(火山灰)凝灰岩(coarse ash tuff);粒度<1/16mm的为细(火山灰)凝灰岩或(火山)尘凝灰岩(fine ash tuff or dust tuff)。成分分类是依据玻屑或浮岩、晶屑、岩屑三端元含量分别冠以××凝灰岩,三者相对多者作前缀。例如,以晶屑为主则命名为晶屑凝灰岩。

在国际地质科学联合会推荐分类方案之前,中国学者就结合中国实际探索火山岩分类方案^[50]。王德滋等^[51]依据我国东南地区火山岩研究经验提出了系统详尽的火山岩分类方案,首先把火山岩分为火山熔岩、火山碎屑熔岩、火山碎屑岩和火山碎屑沉积岩四大类。火山熔岩按 SiO_2 (wt%)含量分为五大类:酸性、中酸性、中性、基性和超基性。再根据 SiO_2 与全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)和 CaO 的关系,细分为流纹岩、英安流纹岩、英安岩、安山岩、安粗岩、粗面岩、响岩、拉斑玄武岩、碱性橄榄玄武岩、碧玄岩、苦橄岩、霞石岩、镁绿岩共13种。火山碎屑熔岩、火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩,按粒级(>50mm、2~50mm、<2mm)分为集块、角砾、凝灰三种基本类型。该分类中强调了火山碎屑熔岩,这是十分可取的。

1.3.2 火山岩储层微观孔隙结构特征

火山岩储层是典型的多重孔隙结构储层,孔隙空间包括孔隙、裂缝和发育比较好的气孔溶洞等,同时孔隙和裂缝的匹配关系非常复杂^[52]。实验室岩心分析有效孔隙度与渗透率往往很低,但测井解释的孔隙度时常较高,测井解释的渗透率常常高出岩心渗透率数倍至数十倍,表明裂缝承担了主要的渗流作用^[53]。

根据已有的有关研究结果来看,对火山岩储层储集空间的研究一般是从孔隙空间的匹配关系上进行分类,按照主要的孔隙空间类型进行研究。然后分别研究组成孔隙的各种孔隙空间的特征及在不同岩性储层中的发育情况。例如:胡勇等^[54]认为大庆徐深火山岩气田储层储集空间可以分为孔隙型、裂缝型、致密型三种。

通过岩心和铸体薄片观察,大庆徐深气田火山岩孔隙类型主要包括以下几种^[52]:气孔、气孔被充填后的残余孔、杏仁体内孔、流纹质玻璃脱玻化产生的微孔隙、长石溶蚀孔、火山灰溶蚀孔、碳酸盐溶蚀孔、石英晶屑溶蚀孔、砾内砾间孔等。上述各类孔隙空间一般都是组合出现的,例如,流纹岩主要为气孔和脱玻化孔,其次有少量长石溶蚀孔;流纹质熔结凝灰岩中以气孔和火山灰溶孔为主,并有一定含量的长石溶孔;火山角砾岩以粒内粒间孔为主;粗面岩主要为长石溶蚀,其次是气孔^[52]。庞彦明等^[55]对大庆徐深气田营城组火山岩储层研究后认为孔隙空间类型主要包括气孔和溶孔,但是不同岩性储层中各种成因孔隙比例

不同。石松彦^[56]对新疆塔河火山岩油田的火山岩储层岩心通过岩心观察和薄片分析后认为该区孔隙主要包括原生气孔和次生溶蚀孔、溶蚀洞三种类型,气孔仍然是该区储层主要的储集空间。

火山岩大多属于低孔低渗性质的储层,气孔连通性差,所以裂缝的发育程度对火山岩渗流能力的大小在一定程度上起决定性作用。大庆徐深气田储层裂缝主要以构造裂缝、炸裂缝、冷凝裂缝和溶蚀缝为主,对储层具有改造作用的是构造裂缝和溶蚀裂缝^[52,55]。火山岩储层裂缝平均密度为 3.4 条/m,裂缝平均宽度为 0.09mm,裂缝平均孔隙度为 0.101%,产状主要为高角度裂缝。从岩性上看,熔结凝灰岩、晶屑凝灰岩和角砾熔岩的构造裂缝发育程度较高,熔结凝灰岩的成岩缝最为发育^[52]。塔河油田储层裂缝主要包括原生收缩缝(冷凝收缩缝、收缩节理缝)和次生的溶蚀缝、构造裂缝三种^[56]。构造裂缝以高角度裂缝为主,收缩缝(冷凝收缩缝、收缩节理缝)主要为原生的水平缝和微缝,对储集空间的贡献不大。

1.3.3 多孔介质中气体非线性渗流机理研究现状

多孔介质中气体单相渗流的基本规律是 Darcy^[57] 定律,但研究表明^[58~60]: Darcy 定律应用时有一定的适用条件。对于气体渗流而言,由于气体黏度比液体小,在较高流速下,惯性力起着较大作用,气体在多孔介质中的流动不再是层流, Darcy 定律不再适用;再次,在低密度即低压状态下,气体渗流产生滑脱现象, Darcy 定律也不适用^[58]。由此可见,对气体在多孔介质中的渗流而言,无论是高速渗流还是低孔隙压力渗流,它们均不遵循 Darcy 定律,流动表现出很强的非线性渗流特征。

1. 多孔介质中气体滑脱效应研究

滑脱效应是气体渗流过程中的一个普遍规律,也是气体渗流不同于液体渗流的一个特殊现象,因此要弄清气藏的渗流规律必然要研究气体的滑脱效应。所以,自从 1875 年 Kundt 和 Warburg^[60] 第一次发现气体流动存在滑脱现象以后,很多国内外学者都对其进行了研究,并取得了丰硕的成果。

在滑脱效应的表征上,1934 年 Knudsen^[60] 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,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,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^[61~64], K_n 成为描述气体流动稀薄性的一个非常重要的无量纲数。1941 年 Klinkenberg^[65] 利用 Warburg 的滑脱理论解释了在相同的驱替压力下气测渗透率大于液

测渗透率的原因,推导出了气测渗透率与平均孔隙压力倒数呈直线关系,Klinkenberg 用滑脱因子来描述气体渗流滑脱效应的强弱程度。Ertekin 等^[66]认为气体在低渗多孔介质中的渗流过程可看成受浓度场及压力场两个物理场的耦合,浓度场的不均匀性引起气体分子的扩散作用,对应于 Knudsen 流,可以应用 Fick 定律进行求解;而压力场的不均匀性引起渗流,对应于 Darcy 流,可以用 Darcy 定律求解。这三种表征方式是相互等效的,由于 Klinkenberg 的滑脱表达式是达西定律的修订,形式简洁实用,所以在石油天然气行业中被广泛采用。

在滑脱效应的定量测量上,由于 Klinkenberg 没有给出滑脱因子与渗透率具体的关系式,所以国内外很多学者都对滑脱因子与渗透率的关系式进行了研究,并得出了一系列的经验公式。在国外,1950 年,Heid 等^[67]研究了滑脱因子与绝对渗透率 K 的关系,通过实验得出: $b=0.777K_{\infty}^{-0.39}$; 1975 年, Jones^[68]得到滑脱因子 b 与绝对渗透率 K 的关系: $b=6.9K_{\infty}^{-0.36}$; 1979 年, Jones 等^[69]通过对 100 多块渗透率为 $0.0001\sim 1\text{mD}$ 岩心的实验,得到滑脱因子 b 与绝对渗透率 K 的关系: $b=0.86K_{\infty}^{-0.33}$; 1987 年, Jones^[70]用氦气得到: $b=16.4K_{\infty}^{-0.382}$,他指出绝对渗透率 K_{∞} 的指数代表了孔隙的形态,指数越接近 0.5,表明喉道半径越接近于圆形,接近于 0.33 表明孔隙接近于裂缝。在国内,2005 年,吴英等^[71]通过采集 12 块岩心的实验数据,拟合得出滑脱因子 b 与绝对渗透率 k 的公式为: $b=0.0914K^{-0.3401}$; 2007 年,中国科学院渗流流体力学研究所渗流所的朱光亚博士^[72]通过采集 32 块低渗岩心的实验数据,拟合得出在温度为 105°C ,岩心入口压力为 0.7MPa 条件下,滑脱因子与岩心绝对渗透率 K 的关系式: $b=0.135K^{-0.524}$ 。

在滑脱效应的数值模拟研究上,Ertekin 等^[66]进行了气水两相动态滑脱效应对致密气藏渗流影响的数值模拟,研究表明,如果不考虑气水两相滑脱效应的影响,气藏的采收率将会被高估 $10\%\sim 30\%$,他们的研究结果更适用于渗透率低于 0.01mD 的气藏。Wu 等^[73]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。李铁军^[74]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。2003 年,王茜等^[75]对其建立的考虑滑脱效应的气体渗流方程进行了有限差分求解。在数值方法方面,刘曰武^[76]对气体的滑脱效应进行了 Lattice Boltzmann 模拟的有益尝试。

2. 含水气藏气体渗流研究现状

当油气从生油(气)层运移到储层时,由于油、气、水对岩石的润湿性差异和毛管力的作用,运移的油气不可能把岩石孔隙中的水完全驱替出去,总会有一定量的水残存在岩石孔隙中。这些分布和残存在岩石颗粒接触处角隅和微细孔隙

中,或吸附在岩石骨架颗粒表面的水称为共生水、共存水或同生水^[77]。

在较低含水饱和度下,气体渗流主要受滑脱效应影响,然而含束缚水岩心的滑脱因子与不含水岩心的滑脱因子相差较大。关于束缚水饱和度对滑脱因子的影响,学术界目前分歧较大,有人认为含水饱和度越高,滑脱因子越小,有人则认为含水饱和度越高,滑脱因子越大。Rose 最早在人造材料和天然岩心中研究了含水饱和度对滑脱因子的影响,发现滑脱因子随含水饱和度的增大而减小^[57],这与 Klinkenberg 的理论相矛盾。此后, Fulton^[78]和 Estes 等^[79]都得出了与 Rose 相同的结果。Rushing 等^①通过对实验数据进行回归分析,也得出了滑脱因子随含水饱和度的增大而减小的规律,并指出产生这些分歧是渗透率和含水饱和度的差别造成的。即在 20 世纪 70 年代以前,人们的研究重点是成百上千毫达西的高渗储层,而最近人们研究的多是低渗储层。

对于较高含水饱和度下气体的渗流,2002 年, Newsham^[80]通过实验室和现场观测,发现虽然束缚水不可动,但水的存在确实影响了气体的渗流能力,并且认为含水饱和度大于 40%~60%时,气相相对渗透率大幅度降低。Newsham 还认为隔挡层渗透率界限为 0.001mD,且含水饱和度远超过 60%。

近年来,还有一些学者提出了解除水锁的一些措施和方法。1986 年, Ortiz 等^[81]论证了一种利用低 pH 值甲醇改造污染致密水敏砂岩储层方案的可行性;2000 年, Maggard 等^[82]给出了一些排水采气措施的建议;2003 年, Jagannathan 等^[83]提出从改变岩石润湿性和加速地层水的蒸发两方面解除低渗气藏水锁现象的方案。

国内学者也在这一领域展开了富有成果的研究。1994 年,贺承祖等^[84]曾定性讨论了水锁现象的危害。1997 年,任晓娟等^[85]通过岩心实验,在国内较早地定性研究了岩心中存在残余水时气体的渗流规律。他们认为,低渗岩心中气体流动的渗流形态与岩心渗透率、含水饱和度以及压力梯度的大小有关。当含水饱和度较低时(小于 30%),仅在一定的压力梯度范围内存在达西渗流。当含水饱和度较高时(大于 30%至束缚水饱和度以下),气体的渗流存在非达西渗流的现象。这种非达西流动表现为:在较低的压力梯度下为非线性流动,而在较高的压力梯度下为线性流动,即气体的视渗透率随压力梯度的增大而增大,至一定值后,视渗透率基本保持不变。但此时气体的流动规律同达西线性流相比,气体的流动存在附加压力损失。2000 年以后,低渗气层气、水渗流受到更多国内学者的重视,研究更为广泛和深入。2002 年,周克明等^[86]研究了残余水状态下,亲水低渗储层岩石中的气体低速渗流具有明显的非达西渗流特征;在克氏回归曲线上,存在着界定不同渗流机理影响的临界点。在临界点以下,气体渗流受毛细管阻力影

① Rushing J A, Newsham K E, Van Fraassen K C. Measurement of the two-phase gas slippage phenomenon and its effect on gas relative permeability in tight gas sands [J]. SPE84297, 2003: 1-8.