

| 中国气田开发丛书 |

ZHONGGUO QITIAN KAIFA CONGSHU

“十二五”国家重点图书出版规划项目

火山岩气田开发

HUOSHANYAN QITIAN KAIFA |



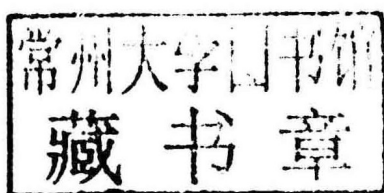
冉启全 任 东 王拥军◎等著

石油工业出版社

中国气田开发丛书

火山岩气田开发

冉启全 任 东 王拥军 等著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了火山岩气藏开发的基础理论和关键技术,重点介绍了火山岩气藏的建筑结构、储层模式、气藏模型及描述技术,火山岩气藏多重介质渗流机理、开发规律、开发动态模型和有效开发技术,并结合典型区块介绍了理论、技术的应用实例。

本书可供从事油气田开发的科技人员及相关高等院校的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

火山岩气田开发 / 冉启全等著.
北京:石油工业出版社,2016.1
(中国气田开发丛书)
ISBN 978-7-5183-0807-1

I. 火…
II. 冉…
III. 火山岩-岩性油气藏-气田开发
IV. TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 251897 号

出版发行:石油工业出版社
(北京安定门外安华里2区1号楼 100011)
网 址:www.petropub.com
编辑部:(010) 64523735 图书营销中心:(010) 64523633
经 销:全国新华书店
印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷
889×1194毫米 开本:1/16 印张:36.25
字数:1010千字

定价:290.00元
(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)
版权所有,翻印必究

《中国气田开发丛书》

编 委 会

顾 问：赵政璋 李鹭光 刘振武

主 任：马新华

副主任：孟慕尧 张卫国 何江川

委 员：（按姓氏笔画排序）

万玉金 马力宁 冉启全 任 东

江同文 杜志敏 李保柱 李海平

张明禄 陆家亮 胡 勇 胡永乐

贾爱林 廖仕孟 谭 健 熊建嘉

主 编：马新华 孟慕尧

副主编：张明禄

《中国气田开发丛书》

专 家 组

组 长：孟慕尧

成 员：（按姓氏笔画排序）

冉隆辉 李士伦 岳清山 袁愈久 钱 凯

《中国气田开发丛书·火山岩气田开发》

编写组

组 长：冉启全

副组长：任 东 王拥军 童 敏 孙圆辉

成 员：闫 林 董家辛 王志平 徐梦雅

李 宁 彭 晖 陈福利 袁大伟

徐 青 王少军 王 强

序

我国常规天然气开发建设发展迅速，主要气田的开发均有新进展，非常规气田开发取得新突破，产量持续增加。2014年全国天然气产量达 $1329 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，同比增长10.7%。目前，塔里木盆地库车山前带克深和大北气田，鄂尔多斯盆地的苏里格气田和大牛地气田，四川盆地的磨溪—高石梯气田、普光和罗家寨气田等一批大中型气田正处于前期评价或产能建设阶段，未来几年天然气产量将持续保持快速增长。

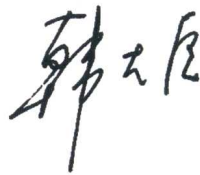
近年来，中国气田开发进入新的发展阶段。经济发展和环境保护推动了中国气田开发的发展进程；特别是为了满足治理雾霾天气的迫切需要，中国气田开发建设还将进一步加快发展。因此，认真总结以往的经验和技术，站在更高的起点上把中国的气田开发事业带入更高的水平，是一件非常有意义的工作，《中国气田开发丛书》的编写实现了这一愿望。

《中国气田开发丛书》是一套按不同气藏类型编写的丛书，系统总结了国内气田开发的经验和成就，形成了有针对性的气田开发理论和对策。该套丛书分八个分册，包括《总论》《火山岩气田开发》《低渗透致密砂岩气田开发》《多层疏松砂岩气田开发》

《凝析气田开发》《酸性气田开发》《碳酸盐岩气田开发》及《异常高压气田开发》。编著者大多是多年从事现场生产和科学研究且有丰富经验的专家、学者，代表了中国气田开发的先进水平。因此，该丛书是一套信息量大、科学实用、可操作性强、有一定理论深度的科技论著。

《中国气田开发丛书》的问世，为进一步发展我国的气田开发事业、提高气田开发效果将起到重要的指导和推动作用，同时也为石油院校师生提供学习和借鉴的样本。因此，我对该丛书的出版发行表示热烈的祝贺，并向在该丛书的编写与出版过程中给予了大力支持与帮助的各界人士，致以衷心的感谢！

中国工程院院士



前 言

火山岩气藏是以火山岩为储层的特殊类型气藏，广泛分布于全球多个国家的沉积盆地中，蕴藏着丰富的天然气资源。但是，火山岩作为储层长期以来未得到足够重视，火山岩气藏一直未成为天然气开发的重点领域。近十多年来，我国松辽盆地、准噶尔盆地陆续发现数千亿方级规模储量，火山岩气藏开发引起了业界的广泛关注，其有效开发对满足日益增长的能源需求、改善能源结构和生活环境具有重要意义。

与常规气藏相比，火山岩气藏的主要特点为：一是储层成因特殊，由火山喷发作用形成；二是具有不同于沉积岩层状分布的多期次叠置非层状建筑结构模式；三是具有不同于沉积岩渐变式分布的强非均质性储层模式；四是具有受构造、内幕结构、多重介质控制的复杂气水系统特征；五是具有特殊的储渗模式和多重介质非线性渗流特征。

火山岩气藏是一个全新的研究领域，火山岩储层分布和开发规律认识不清，井位部署难度大，缺乏配套的有效开发技术，因此开发难度大。近十多年来，针对松辽盆地、准噶尔盆地火山岩气藏，通过室内实验、理论研究、技术攻关、现场试验和生产实践，火山岩气藏开发理论、技术取得创新性成果，实现了规模建产。

本书是对中国火山岩气藏开发成果的提炼和总结，系统介绍了火山岩气藏的开发特点、开发基础理论、特色开发技术和国内外开发实践，填补了火山岩气藏开发的理论和技术空白，对火山岩气藏及类似复杂类型气藏的有效开发具有重要指导作用和借鉴意义。

冉启全教授负责本书体系结构的制定和整体布局，冉启全、任东、王拥军、童敏负责技术思路、提纲制定和章节写作安排。

本书共分八章。第一章“绪论”由任东、冉启全、孙圆辉、闫林等编写；第二章“火山岩建筑结构与层序”由王拥军、孙圆辉、冉启全等编写；第三章“火山岩储层模式”由王拥军、冉启全、闫林、孙圆辉、徐青等编写；第四章“火山岩气藏特征与气藏模型”由孙圆辉、任东、冉启全、徐梦雅、李宁等编写；第五章“火山岩气藏渗流机理与开发规律”由童敏、冉启全、任东、董家辛、王志平、彭晖等编写；第六章“火山岩气藏开发动态描述与预测模型”由冉启全、任东、童敏、王志平、李宁、徐梦雅、王少军等编写；第七章“火山岩气藏开发技术”由冉启全、王拥军、童敏、董家辛、孙圆辉、王志平、彭晖、徐梦雅等编写；第八章“火山岩气田开发实践”由任东、童敏、王拥军、孙圆辉、王志平、陈福利、闫林、董家辛、袁大伟、王强等编写。

本书由冉启全、任东、王拥军、童敏统稿，冉启全、任东定稿。

在本书编写过程中，胡文瑞院士多次组织专家审查提纲，马新华、何江川、孟幕尧、李士伦、岳青山等专家具体组织本书的结构安排与内容审查，提出了很多建设性意见，郭尚平院士、裘怿楠教授多次给予指导，在此表示感谢！书中部分图、表引用了大庆油田有限责任公司、吉林油田公司、新疆油田公司等单位技术人员的研究成果，在此表示感谢！

由于火山岩气藏地质条件的复杂性及特有的开发难度，鉴于作者水平有限，书中疏漏和不当之处在所难免，恳请读者不吝赐教，批评指正。

本书编写组

2015年9月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 21世纪前火山岩气藏开发状况	1
第二节 火山岩气藏地质特点及开发难点	3
第三节 火山岩气藏开发理论和关键技术	5
第四节 火山岩气藏开发前景	10
参考文献	10
第二章 火山岩建筑结构与层序	12
第一节 火山岩建筑结构	12
第二节 火山岩地层层序	44
第三节 火山岩层序对比与层系划分	49
参考文献	55
第三章 火山岩储层模式	59
第一节 火山岩储层类型与储层模式的概念	59
第二节 火山岩储层演化模式	66
第三节 火山岩储层分布模式	84
第四节 火山岩储层储渗模式	103
第五节 火山岩有效储层特征	122
参考文献	129
第四章 火山岩气藏特征与气藏模型	132
第一节 火山岩气藏分类与特征	132
第二节 火山岩气藏构造特征与构造模型	141
第三节 火山岩气藏内幕结构特征与格架模型	145
第四节 火山岩气藏储渗特征与属性模型	151
第五节 火山岩气藏气水分布与流体模型	160
第六节 火山岩气藏模型的应用	165
参考文献	166
第五章 火山岩气藏渗流机理与开发规律	169
第一节 火山岩气藏微观可流动性特征	169
第二节 火山岩气藏非线性渗流机理	179
第三节 火山岩气藏开发规律	200
参考文献	223

第六章 火山岩气藏开发动态描述与预测模型·····	227
第一节 火山岩气藏渗流机理与基本数学模型·····	227
第二节 火山岩气藏动态描述模型与方法·····	231
第三节 火山岩气藏产能预测模型与方法·····	266
第四节 火山岩气藏开发数值模拟模型及方法·····	286
参考文献·····	301
第七章 火山岩气藏开发技术·····	304
第一节 有效储层预测与井位优选技术·····	304
第二节 提高火山岩气藏单井产量技术·····	354
第三节 火山岩气藏产能评价与优化配产技术·····	390
第四节 火山岩气藏动态描述技术·····	418
第五节 火山岩气藏数值模拟技术·····	447
第六节 火山岩气藏开发模式及技术政策优化技术·····	458
参考文献·····	481
第八章 火山岩气田开发实践·····	486
第一节 火山岩气藏类型及开发程序·····	486
第二节 CC/YT火山岩气田开发·····	493
第三节 SS/XX火山岩气田开发·····	515
第四节 DD火山岩气田开发·····	537
第五节 日本火山岩气田开发·····	558
参考文献·····	568

第一章 绪 论

火山岩作为油气储层为人们所认识已有近百年历史,但由于其成因特殊、隐蔽性强、本身不能生成油气等特点,长期以来被看作油气勘探开发的禁区^[1]。早期火山岩油气藏通常是“兼探发现”或“偶然发现”,加之其占有的储量和产量比之沉积岩储层为数甚微,因此长期以来,石油地质学界对其重视和研究程度相对较低,而从油气开发角度的研究程度更低。进入21世纪以来,中国在松辽盆地和准噶尔盆地陆续发现了数个储量规模达千亿立方米的大型火山岩天然气藏,资源量达到数万亿立方米,向世人展现了该类气藏巨大的资源及开发潜力。

由于火山岩天然气藏(以下简称火山岩气藏)成因特殊,储层条件及渗流机理复杂,缺乏成熟的理论、技术指导,因此有效开发面临诸多挑战。近十年来,中国火山岩气藏开发经历了从前期评价到开发调整的多个阶段,通过实践—认识—再实践的探索和逐步积累,比较系统地形成了火山岩气藏开发理论和技术,推动了中国火山岩气藏有效开发和快速上产。

本书是近十年来中国火山岩气藏开发形成的理论、技术和模式的总结,是在开发实践基础上对火山岩气藏储层、渗流机理、开发规律的认识以及配套的火山岩气藏描述、开发技术的总结和提升,目的是抛砖引玉、启发思路,推动火山岩气藏开发技术的进步,并为类似隐蔽性气藏及复杂岩性气藏的有效开发提供借鉴。

第一节 21世纪前火山岩气藏开发状况

火山岩气藏作为一种特殊的气藏类型,广泛分布于世界多个含油气盆地中。全球已发现的与火山岩有关的油气藏多达数百个,广泛分布于中国、日本、美国、澳大利亚、印度尼西亚、刚果、巴西等100多个国家的沉积盆地中^[2, 3](图1-1)。从目前已发现火山岩气藏特点来看,单个气藏储量规模一般较小,地质储量多小于 $300 \times 10^8 \text{m}^3$,但也有大型气藏,例如澳大利亚Browse盆地Scott Reef油气藏天然气地质储量超过 $3000 \times 10^8 \text{m}^3$;储量丰度一般较低,多小于 $2.5 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$,但局部高丰度区可达 $20 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$,如日本Niigata盆地Yoshii-Kashiwazaki火山岩气藏西北高点天然气储量丰度达到 $22 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ 。

火山岩气藏的开发以日本最早。以吉井—东柏崎气田为例,该气田于1968年发现,是一个狭长形背斜圈闭、强水驱的绿色凝灰岩气藏,埋深2310~2720m,储集空间类型以次生溶蚀孔型和裂缝型为主,孔隙度7%~32%,渗透率5~150mD;气藏有效厚度54~57m,叠合含气面积27.8km²,原始可采储量 $118 \times 10^8 \text{m}^3$;气藏开发过程中共钻井46口,其中15口井投入生产,单井日产最高 $50 \times 10^4 \text{m}^3$,已累计产气 $88 \times 10^8 \text{m}^3$ 。该气藏类似于层状构造气藏,分布多以中心式喷发形成的锥状或盾状火山机构为中

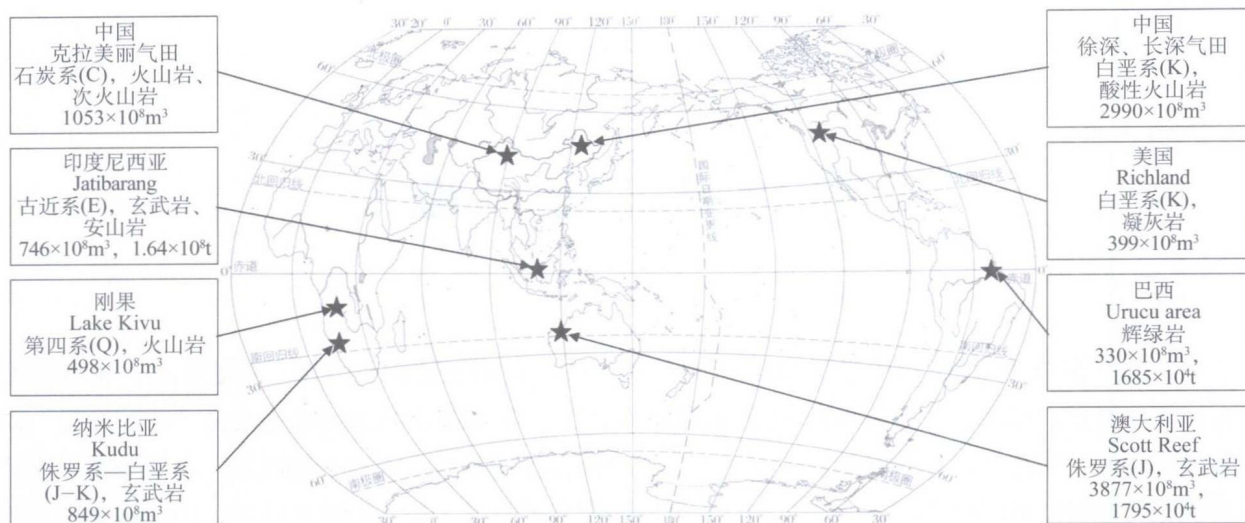


图1-1 全球代表性火山岩气藏分布图

心展布, 储量规模小, 气藏开发以简单满足生产为目的, 未开展相关的开发理论和技术研究。其后虽然在加纳、巴西、澳大利亚、美国等地不断发现火山岩气藏, 但开发效果并不理想。国内的火山岩气藏较早投入开发的是1985年发现的曹家务古近系辉绿岩火山岩气藏和1986年发现的新疆佳木河组火山岩气藏, 其次是1992年发现的周公山玄武岩气藏^[4, 5], 同样由于气藏规模小, 多采用简单方式开发。1993年, 准噶尔盆地陆梁隆起DD5井钻遇石炭系火山岩气层, 但气藏规模总体偏小, 对储量和产量的贡献较为有限^[6]。

因此, 21世纪前对于火山岩气藏开发一直很少进行系统研究, 整体研究程度较低, 更没有形成相关开发理论和开发技术。

纵观国内外火山岩气藏的开发历程, 大致可分为4个阶段:

(1) 未认识阶段(20世纪50年代以前)。基于传统石油地质理论, 认为火山岩与油气是水火不相容的。因此, 火山岩被作为油气勘探开发的禁区。

(2) 发现阶段(20世纪50年代初至60年代末)。在一些偶然发现的火山岩油气藏中出现了日产千吨以上的高产油井, 人们开始认识到火山岩中聚集油气并非异常现象, 从而引起了一定的重视, 并开始局部地区围绕火山岩进行有目的的勘探。

(3) 探索阶段(20世纪70年代至20世纪末)。随着一些火山岩油气藏的陆续发现, 人们开始对此类油气藏的地质和开发特征进行探索性的研究, 但这些研究工作较粗浅, 缺乏系统性^[7]。主要研究工作包括: ①开展地面露头研究; ②进行火山岩岩石类型及岩相分析; ③建立火山岩储层评价方法; ④通过室内实验, 分析储层物性; ⑤对开发特征作初步研究。

(4) 发展阶段(21世纪以来)。伴随着中国松辽盆地深层、准噶尔盆地等火山岩气藏规模性发现, 该类气藏开发已成为国内天然气勘探开发的重要领域。国内针对火山岩气藏开展了系统的研究工作, 通过十多年实践—认识—实践的反复探索、逐步积累, 形成了一套成熟可行的火山岩气藏有效开发理论与技术, 并在火山岩气藏开发中得到了工业化应用, 实现了该类气藏的规模有效开发^[8, 9]。

第二节 火山岩气藏地质特点及开发难点

一、火山岩气藏的地质特点

火山岩气藏储层成因特殊、地质条件复杂,其建筑结构、储层特征和气水分布等与常规沉积岩气藏存在显著差异。

(1) 储层成因特殊,地质条件复杂。由于火山岩本身不能生成油气,火山岩气藏的形成及分布受气源、储层、源储配置等因素的综合控制,具有隐蔽性;同时,火山岩储层成因特殊,其形成受喷发环境(水上喷发、水下喷发等),喷发方式(中心式、裂隙式等),喷发能量(强、弱等),喷发期次(单期次、多期次),熔浆性质(酸性、中性、基性),喷发量(多、少),喷发频率(持续稳定喷发、间歇式喷发),古地形地貌(平缓、陡峭),后期改造(风化、构造碎裂、溶蚀等)等多种因素控制,储层地质条件复杂^[5, 10-14]。

(2) 具有非层状叠置式建筑结构。受多火山口、多期次喷发影响,火山岩建筑结构表现为多级次性特征,从大到小划分为火山岩建造、火山机构、火山岩体、火山岩相、储渗单元等结构单元,各级结构单元形态多样、规模差异大,表现为叠置型、非层状特征^[15-18]。

(3) 孔洞缝均有发育,具有多重介质特征,渗流机理复杂。火山岩储层储集空间类型多,洞、孔、缝均有发育,主要类型包括气孔、粒间孔、溶蚀孔及多种裂缝。不同类型洞、孔、缝形态多样,孔径变化大,喉道类型多、形态复杂、喉道半径变化大,洞、孔、缝与喉道组合关系复杂,储渗模式及渗流机理复杂。

(4) 储层变化快、非均质性强。火山岩储层形态、规模差异大,纵横向变化快、分布零散、连续性差,储层内部孔隙形态、大小及发育程度差异大、变化快,储层平面、层间及层内非均质性强。

(5) 具有多个气水系统,气水关系复杂。火山岩气藏气水分布受构造、内幕结构及多重介质控制,总体表现为“上气下水”的分布特征,但不同火山机构、不同火山岩体的气水界面不尽相同,表现为多个气水系统。在单个气水系统内部,由于储层物性、非均质性、裂缝等的差异,基质和裂缝中的含气饱和度不同,不同物性储层基质中气水界面也存在一定差异,因此,气藏气水关系复杂。

二、火山岩气藏的开发特点

火山岩气藏建筑结构、储层特征、气水分布、储渗模式和渗流机理的复杂性使得该类气藏具有不同于沉积岩的开发特点,主要表现为:

(1) 产能差异大、分布不均衡。火山岩储集岩性多、变化快、物性差异大,非均质性极强,导致气井产能差异大。从物性特征来看,火山岩高孔高渗、中孔中渗、低孔低渗以及致密储层均有发育;从储集岩性来看,火山岩储层分布于熔岩、火山碎屑岩、碎屑熔岩等多种火山岩岩石中,岩性、岩相变化快。对于物性好的储层,采用常规技术就能获得较高的自然产能;对于物性较差的储层,其自然产能低,需要通过压裂改造才能获得工业气流;而对于致密火山岩气藏,基本无自然产能,需要进行体积压裂改造才能解放单井产能。例如XX气田XX21区块,其单井初期稳定日产量从自然产能 $20 \times 10^4 \text{m}^3$ 到压裂后小于 $1 \times 10^4 \text{m}^3$ 的气井都有分布,井距小于500m的两口相邻井其初期稳定产能最高相差5倍以上。由此说明,火山岩不同气藏、同一气藏内的气井产能差异大,变化幅度大。

(2) 产量递减快、稳产难度大。火山岩发育孔隙型、裂缝型、裂缝—孔隙型、孔隙—裂缝型等多种不同类型的储层,其渗流机理和产量动态变化特征不同。对于裂缝型和孔隙—裂缝型储层,生产过程中以裂缝供气为主,气井投产初期产量高,但由于裂缝能量消耗快且供给量十分有限,基质对裂缝的补给严重不足,气井投产初期产量即快速递减;对于裂缝—孔隙型储层,生产过程中裂缝、大孔隙优先向井筒供气,使得气井具有较高的初期产量,但由于大孔隙和裂缝的能量消耗较快,而大量基质小孔的连通及补给能力不足,使得气井产量发生较大幅度的递减;而对于孔隙型储层,生产过程中以孔隙供气为主,稳产能力相对较好,但容易受火山岩储层较强非均质性和较差连通性、连续性的影响。从火山岩气藏实际生产特征来看,气藏的年综合递减率一般在30%以上,最高可达80%。因此,火山岩气藏总体具有产量递减快、稳产难度大的特点。

(3) 井控储量和单井累计产气量变化大。储层的储渗能力、规模大小和内部连通性特征决定了井控储量大小和最大单井累计产气量。火山岩储层连通性差、储渗单元形态与规模、储渗能力变化大,导致火山岩气藏单井控制储量变化大, $(0.001 \sim 20) \times 10^8 \text{m}^3$ 均有分布。据中国目前已投入开发的火山岩气藏统计表明,高效火山岩气藏直井井控储量大,可达 $10 \times 10^8 \text{m}^3$ 以上,一般为 $(4 \sim 6) \times 10^8 \text{m}^3$,该类气藏所占比例较低,仅为20%左右;低效火山岩气藏直井井控储量相对较低,多分布在 $(1 \sim 2) \times 10^8 \text{m}^3$,该类气藏所占比例约为30%;而致密火山岩气藏的井控储量低,直井井控储量多小于 $1 \times 10^8 \text{m}^3$,该类气藏是火山岩气藏的主体,所占比例约为50%。火山岩气藏井控储量差异大、储层非均质性强等导致单井累计采气量变化大, $(0.001 \sim 10) \times 10^8 \text{m}^3$ 均有分布,其中小于 $0.5 \times 10^8 \text{m}^3$ 的井占50%以上。

(4) 出水类型多,裂缝沟通气层和水层,易发生水淹。火山岩气藏通常存在边底水、层间可动水、层内束缚水、气层内凝析水等多种水体形式,气层与水层之间具有直接接触、间接接触、裂缝串通等多种连通方式。加之裂缝发育是火山岩气藏的重要特点之一,由天然裂缝和人工压裂缝组成的缝网系统极易成为边底水上窜通道。因此,气井在生产过程中极易发生水窜、水锥,造成气井产水。

三、火山岩气藏的开发难点

火山岩气藏开发是一个新的研究领域,加之其特殊、复杂的开发地质条件,21世纪初,中国开始规模开发该类气藏时,缺乏成熟的开发理论与技术可供借鉴,如何有效开发该类气藏面临诸多挑战。其开发难点主要体现在:

(1) 储层成因及分布规律复杂,认识难度大。传统的油气开发地质理论多是基于沉积成因、层状储层展开的,难以适应火山岩喷发成因、非层状储层的特点。火山岩储层的分布受火山岩多中心、多期次喷发、快速堆积特点的影响,表现为复杂的多级次非层状叠置型的建筑结构,导致气藏复杂建筑结构特别是低级次结构的认识难度较大。同时,火山岩气孔型、粒间孔型、溶孔型、裂缝型等不同类型储集空间的成因不同、演化过程复杂,缺乏有关火山岩不同类型储层和储集空间分布模式的指导。因此,要发展火山岩气藏开发地质的模式和理论,解决对储层成因和分布规律等的认识问题。

(2) 储层描述和预测困难,井位优选难度大。火山岩骨架参数变化大、孔隙类型多、孔隙中流体分布及赋存状态复杂,岩石导电方式及组合类型多,测井响应机理复杂。同时,火山岩储层岩石类型多、变化快,储集空间及流体性质较为复杂,储层信息难以被地震资料检测和分辨,导致有效储层的预测面临巨大挑战。火山岩气藏具有多级次复杂建筑结构,储层非均质性强,流体分布规律复杂,构造控制及属性建模难度大。储层描述和预测难题加大了火山岩气藏储渗单元评价及预测难度和布井风

险,从而给井位优选带来困难。因此,要发展火山岩气藏储层描述和预测技术,解决储层认识难题,为井位优选和井网部署等提供支撑。

(3) 渗流机理复杂,开发特征和开发规律认识面临挑战。火山岩储层中洞、孔、缝均有发育,且配置类型多、结构复杂,为多重介质储层,渗流机理复杂,常规渗流理论难以适应。由于缺乏适合火山岩气藏地质特点的非线性渗流理论和模型,导致不同类型介质不同开发阶段的流体渗流特征认识、火山岩气藏产能预测、动态储量评价、储层参数动态解释以及开发指标等预测难度大。因此,要发展适合火山岩气藏地质特点的渗流理论和开发模型,解决开发特征和开发规律认识难题。

(4) 缺乏有效开发模式和相应配套技术,火山岩气藏规模效益开发难度大。火山岩气藏分布零散、储量规模及品质差异大,储层连续性差、非均质性强,建立适合火山岩气藏复杂地质条件的井位井网模式、建产模式及开发模式难度大。同时,由于缺乏适合该类气藏的动态描述、产能评价、开发优化等配套技术,导致火山岩气藏开发效果差、方案指标符合率低、气藏开发效益差。因此,要创新火山岩气藏开发模式,发展相应配套技术,解决火山岩气藏规模效益开发难题。

第三节 火山岩气藏开发理论和关键技术

针对火山岩气藏复杂的地质条件、特殊的开发特点和诸多开发难点,在缺乏开发基础理论指导和可借鉴开发技术的情况下,从火山岩气藏开发地质及有效开发理论入手,通过建立适合火山岩气藏特点的有效储层预测与井位优选技术、提高单井产量与开发优化技术,解决火山岩气藏储层认识与井位优选、开发规律与开发模式等难题,指导火山岩气藏规模有效开发。研究思路见图1-2。

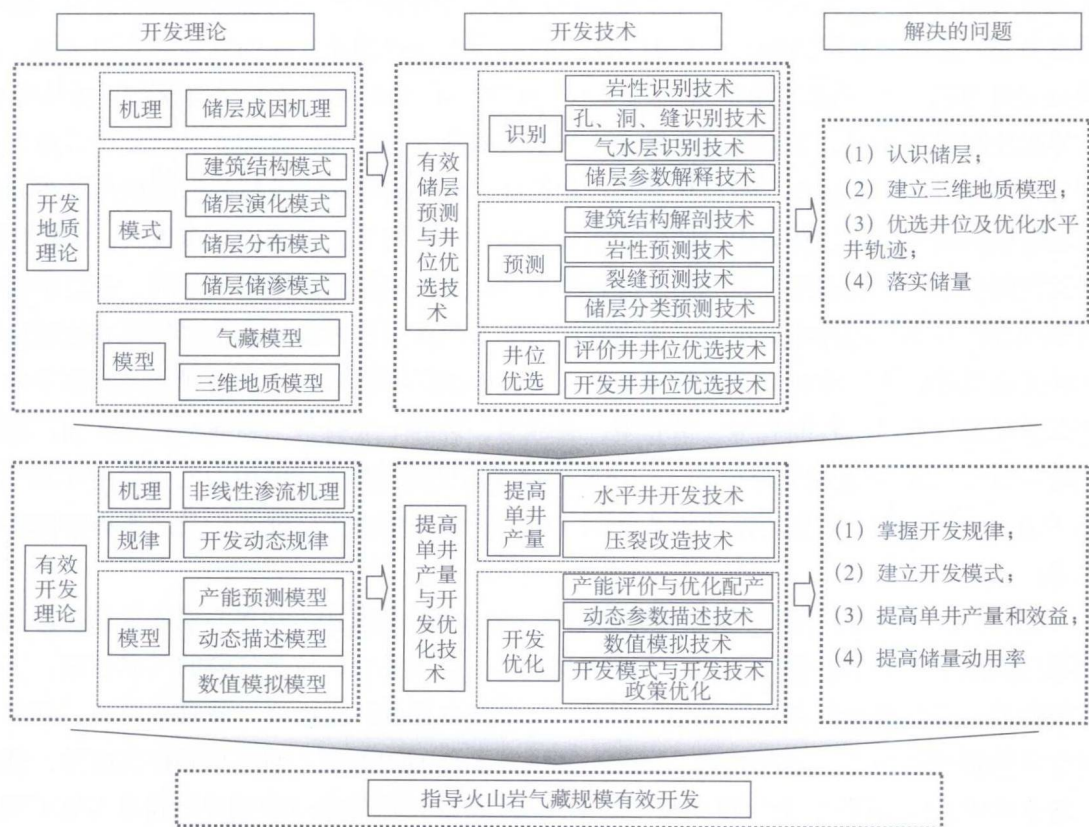


图1-2 火山岩气藏开发研究思路

一、火山岩气藏主要开发理论

火山岩气藏开发理论由开发地质理论和有效开发理论两部分内容构成。其中,火山岩气藏开发地质理论重点介绍火山岩气藏有效储层成因机理与火山岩气藏建筑结构模式、储层演化模式、储层分布模式、储层储渗模式以及火山岩气藏模型与三维地质模型等,其目的是解决火山岩复杂储层成因及其分布模式、模型的认识问题;火山岩气藏有效开发理论主要介绍火山岩气藏非线性渗流机理、开发规律及开发模型等,其目的是解决火山岩气藏渗流及开发规律、开发模型的认识问题。

1. 开发地质理论——储层成因机理、储层模式、气藏模型

(1) 储层成因机理。火山岩储层的成因受火山熔浆挥发分逸散、火山碎屑空落堆积、差异化溶蚀、冷凝收缩、气液爆炸、构造碎裂等作用的影响,而不同类型储层其主要成因机理和发育特点不同。其中,气孔型储层是由高温熔浆冷凝并经各种成岩作用而形成的,主要发育于火山熔岩中,其成因主要受挥发分含量、熔浆内外压差、冷凝速度等的控制;粒间孔型储层是由气液爆炸作用将火山熔浆或围岩炸成碎片,再经堆积作用和成岩作用而形成的,主要发育于火山碎屑岩中,其成因主要受火山爆发能量、火山碎屑大小及堆积方式等控制;溶蚀孔型储层是火山岩在后期成岩作用下不断遭受溶解作用,发育大量溶蚀孔隙而形成的,可发育于各类火山岩中,其成因主要受风化淋滤和埋藏溶蚀作用时间及强度、 CO_2 含量、有机酸类型、易溶组分含量等控制;裂缝型储层是基质孔隙发育程度相对较低而各种成因类型裂缝都较发育的储层类型,可发育于各类火山岩中,其成因主要受构造作用强度、气液爆炸强度、冷凝收缩不均匀性及冷凝速度等控制。

(2) 储层模式。火山岩储层特殊的成因机理使得其建筑结构模式、储层演化模式、储层分布模式、储层储渗模式与常规沉积岩储层存在显著差异。①建筑结构模式。根据火山岩的成因、结构及岩石共生组合关系,火山岩建筑结构从大到小依次可划分为火山岩建造、火山机构、火山岩体、火山岩相、储渗单元等五级。不同级别建筑结构的形态、规模、叠置关系及其对储层展布、流体分布和储层连通性等的控制作用不同。②储层演化模式。火山岩气孔、粒间孔、收缩缝、炸裂缝等原生孔缝的形成、损失、保存机理和溶蚀孔、脱玻化微孔、构造缝、风化缝等次生孔缝的形成机理各不相同,建立不同类型储层的演化模式,对火山岩储层预测具有理论指导意义。③储层分布模式。火山岩溢流气孔型、爆发粒间孔型、溶蚀孔型、裂缝型、混合型等不同类型储层的成因机理不同,储层空间分布模式、储层连续性特征及连通性特点不同。火山岩储层分布模式研究对指导火山岩气藏有效储层分类预测、富集区优选及井位优化设计具有重要指导意义^[19]。④储层储渗模式。火山岩储层发育分单一型、复合型两大类以及气孔型、粒间孔型、微孔型、裂缝型、裂缝—气孔型、裂缝—粒间孔型、裂缝—微孔型、裂缝—溶孔型等8种主要储渗模式,不同储渗模式储层的储集、渗流能力的差异性导致气井产能大小和稳产能力不同。火山岩储层储渗模式的建立对火山岩气藏渗流机理分析及产能影响因素研究具有指导意义。

(3) 气藏模型。火山岩气藏发育火山喷发旋回、火山机构和火山岩体等多层次的构造,具有复杂的气藏内幕结构和多重介质储渗特点,流体性质及气水分布差异大,该类气藏的气藏模型、三维地质模型与常规砂岩、碳酸盐岩气藏均存在较大差异。①模型多样性。火山岩气藏具有原位、异位、复合等多种储层成因类型和构造、内幕结构、岩性、复合等多种圈闭类型,储层品质存在高效、低效和致密之别,流体性质包括含 CO_2 、含凝析油和常规干气气藏等,不同类型气藏的开发技术对策不同。②三维地质模型。真实反映火山岩气藏多级内幕结构、多重介质储层及复杂流体分布的气藏特点。其中,

构造模型反映了火山岩气藏火山喷发旋回、火山机构和火山岩体等多层次构造形态及其变化；格架模型反映了火山岩气藏多级内幕结构的形态、规模、叠置关系及空间分布；属性模型反映了火山岩气藏构造、格架对储层属性的控制作用以及储层基质、裂缝的储集、渗流能力；流体模型反映了火山岩气藏构造、格架、储层属性对流体的控制作用以及气藏内部气水界面、流体组分、饱和度的变化^[20-21]。

2. 有效开发理论——非线性渗流机理、开发规律及开发模型

(1) 非线性渗流机理。火山岩储层发育不同尺度孔、洞、缝，为多重介质储层，孔隙结构复杂，物性差异大，其渗流机理与常规单一介质储层不同。火山岩储层非线性渗流机理主要表现在3个方面：一是不同尺度孔缝介质中流体渗流流态复杂，引起流体渗流呈现非线性特征；二是储层应力敏感引起孔喉变形、裂缝闭合，进而导致流体非线性渗流；三是不同尺度多重介质“接力”排供气特征导致流体渗流呈现非线性渗流特征。

(2) 火山岩气藏开发规律。火山岩气藏开发规律受复杂内幕结构、多重介质储层以及复杂流体分布等内因和开发方式与技术政策、工艺措施等外因的共同影响，使得不同类型气藏的生产动态规律、井控动态储量变化规律、产水规律不同。①火山岩气藏生产动态规律。火山岩气藏发育有1种裂缝型储渗模式、2种孔隙型储渗模式和3种裂缝—孔隙型储渗模式等，不同储渗模式下气井在初期高产阶段、产量递减阶段和低产稳产阶段的产量、压力及其变化特征不同。②井控动态储量变化规律。对于低渗孔隙型储层，由于储层物性相对较差，压力波传播速度慢，随着生产时间的延长，压力波传播范围逐渐扩大，泄气半径增大，气井控制动态储量会逐渐增加；对于多重介质储层，在“接力”排供气机理的作用下，大孔大缝、中孔小缝、小孔微缝中的流体逐级被动用，井控动态储量逐渐升高；对于气藏开发过程中的边底水侵入，由于火山岩气藏普遍发育边底水，气藏开发过程中同时受边底水侵入影响，特别是裂缝性水窜形成水封时，会导致井控动态储量降低。③产水规律。火山岩气藏产水类型主要为凝析水、层间水、可动水及边底水，不同类型水体的产出机理、产出时机、产水特征及对气井生产的影响不同。

(3) 火山岩气藏开发模型。火山岩气藏气井初期产量高、递减快，产能差异大、分布不均衡，多数井需压裂投产。从火山岩气藏非线性渗流机理入手，根据储渗单元类型、形态、叠置关系及孔、洞、缝发育特点，建立火山岩气藏开发模型：一是火山岩气藏直井、水平井自然投产和压裂投产状态下的产能预测模型与方法；二是火山岩气藏不同储层介质、复杂边界形态的直井、水平井储层动态参数描述模型；三是火山岩气藏多重介质非线性渗流数值模拟模型。

二、火山岩气藏开发关键技术

火山岩气藏开发关键技术由有效储层预测与井位优选、提高单井产量与开发优化两部分构成。其中，火山岩气藏有效储层识别与井位优选技术重点介绍有效储层识别、预测和井位优选等，内容涵盖气水层识别、储层参数解释、建筑结构解剖、储层分类预测和井位优化设计等，其目的是解决火山岩气藏储层认识和井位优选、水平井轨迹优选设计问题，并为储量评价提供技术参数；火山岩气藏提高单井产量与开发优化技术由提高单井产量和开发优化两部分构成，内容涵盖水平井开发、压裂改造增产、产能评价与优化配产、动态参数描述、气藏数值模拟、开发模式与开发技术政策等，其目的是提高火山岩气藏单井产量和井控动态储量，并通过开发优化设计提升气藏整体开发效果和效益。