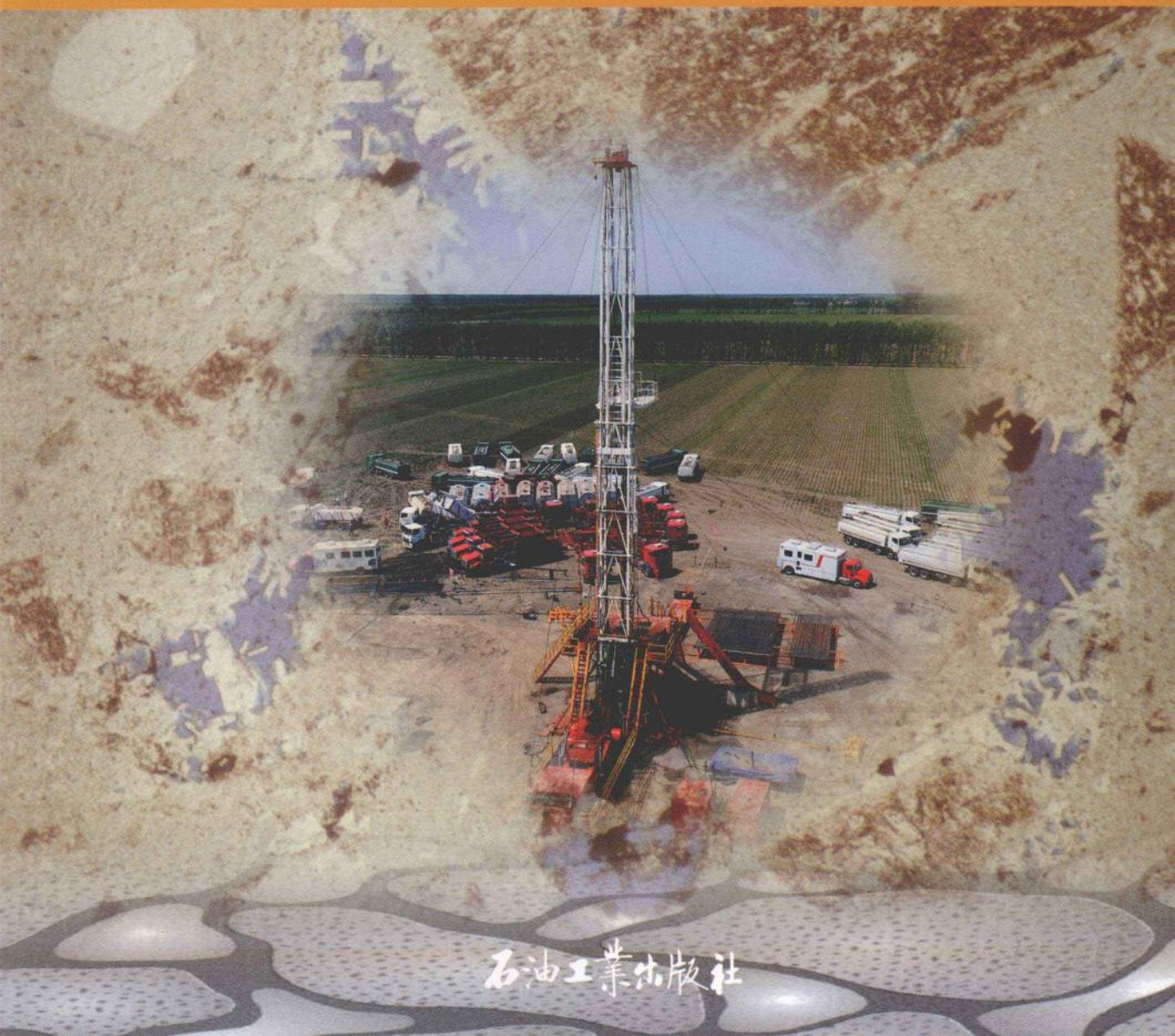


深层火山岩 气藏增产改造技术

刘 合 著



石油工业出版社

深层火山岩气藏增产改造技术

刘 合 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了大庆深层火山岩地质特征与力学特性、水力压裂基础、火山岩水力压裂力学基础及火山岩水力压裂产能预测基础等基础理论；阐述了火山岩水力压裂技术，包括火山岩压裂施工设计、火山岩水力压裂压力诊断和火山岩水力压裂施工控制；阐述了火山岩高温压裂液和压裂工艺管柱研究等火山岩压裂配套技术与应用，详细介绍了深层火山岩气藏压裂技术应用实例，内容翔实准确。

本书可供高等院校油气田开发工程专业的师生以及相关科技人员参考应用。

图书在版编目 (CIP) 数据

深层火山岩气藏增产改造技术 / 刘合著 .

北京 : 石油工业出版社, 2011.3

ISBN 978-7-5021-8190-1

I. 深…

II. 刘…

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 (2010) 第 251490 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) 64523735 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

2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本 : 1/16 印张 : 10.5

字数 : 268 千字

定价 : 40.00 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

序 言

松辽盆地深部火山岩储气层的演化和发展经历了漫长而又非常复杂的历程。由于火山岩成岩受气候、地貌等因素的影响很大，最后形成的储层呈现“三高二低三多”特征，即温度梯度高、岩石硬度高和二氧化碳气体含量高，孔隙度低和渗透率低，岩性、储集类型和流体类型多。自然产能低，不实施有效的增产措施就不具备工业开采价值，常规的增产技术又不适应这类储层。本书针对火山岩地质特征与力学特性，系统地阐述了具有火山岩特点的地质特征、水力压裂基础理论等，以及方案优化、风险预测、测试压裂快速解释、超高温压裂液和超高压压裂管柱等多项技术和相应技术的应用规范，为推动深部火山岩储气层的勘探开发研究提供了思路和借鉴。书中采用曲线、图表等形式生动地介绍了火山岩压裂及配套技术，内容丰富翔实。这些珍贵的资料和经验对今后类似火山岩储气层的开发能提供很好的借鉴。

本书对从事深层气藏增产技术研究和应用的工程科研人员有所裨益，书中的有些章节也可作为对工程技术人员进行专题培训的教材使用。该书的出版，必将给人以启迪，有助于加强与同行之间的交流，是一本指导和规范深部火山岩储气层增产技术研究和应用的具有实用价值的好书。

本书作者刘合同志 1982 年毕业于大庆石油学院，博士生导师，采油工程专业教授级高级工程师。从大庆油田深部火山岩油气藏发现至今，他一直致力于该领域的勘探开发行列之中，特别是在火山岩增产改造技术攻关方面，多年来持之以恒、锲而不舍，取得了一系列骄人的业绩。

时代在发展，技术在进步。我相信，经过广大科技工作者不懈的努力，深部致密火山岩储气层的压裂增产技术必将日臻成熟和完善，推动我国油气田开发水平的不断提高和石油工业的发展。

刘合同
2010.2.22.

前 言

近年来，随着“以气补油”战略在大庆油田的实施，大庆油田火山岩天然气的开发在确保稳产中发挥了一定的作用。火山岩储层一般都是低孔、低渗油气藏，需经过压裂改造后才能获得工业油气流。火山岩压裂技术是一个新的技术领域，具有许多新的特点，给压裂改造实施带来了很大的难度。作者通过对大庆油田火山岩压裂经验整理，形成了一系列具有针对性的技术，对今后火山岩改造能起到一定的促进作用。

火山岩油气藏是经过多期喷发溢流形成的，导致火山岩体的局部构造变化大，因此，火山岩的改造与以往沉积岩不同，压裂施工难度大、风险大。作者通过几年来的实践和研究，运用多种方法，摸索出一些规律，找到了主要矛盾，建立了火山岩知识库，对经验型技术有了更为深入的理性认识，逐步认识到了火山岩压裂改造的难点与关键技术。

作者在火山岩改造方面做了一定的探索与研究，这是一个多学科相互渗透、相互交叉和相互补充的领域，具有很强的知识性、理论性，是方法性和实践性很强的综合技术。作者通过理论与实践的结合，在对火山岩压裂的设计、诊断、控制等方面取得了一定的认识和共识，使火山岩压裂技术从创新前沿技术转变为常规技术，有些技术已达到国际领先水平。但理论技术进步是无止境的，展望压裂未来，我们还需进一步进行深化研究，不断促进火山岩油气藏改造技术的进步。

在编写本书过程中，大庆油田采油工程研究院张玉广总地质师和张永平副总工程师指出了初稿中的若干欠妥之处；大庆油田采油工程研究院油田化学室副主任唐鹏飞、张浩和刘宇等，大庆油田开发部王文军同志帮助提供并完善了相关技术实例，中国科技大学王秀喜老师给予了许多指导并对该书主审，在此一并表示感谢。

由于时间紧迫，还有一些尚不够成熟的技术没有纳入本书中，需进一步探讨和研究。作者水平有限，书中疏漏和不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 火山岩地质特征及流体性质	1
第一节 区域地质简况	1
第二节 徐中火山岩隆起带构造特征	4
第三节 储层特征	5
第四节 气藏特征	10
第二章 火山岩岩石力学特性	13
第一节 火山岩岩体的一般力学特性	13
第二节 徐中地区火山岩岩块的力学特性	14
第三章 水力压裂基础	26
第一节 水力压裂增产机理	26
第二节 水力压裂造缝机理	28
第三节 压裂液	30
第四节 支撑剂	31
第五节 水力压裂施工曲线与分析	33
第四章 火山岩水力压裂力学基础	35
第一节 火山岩力学性能对压裂优化设计影响	35
第二节 火山岩水力压裂的力学模型	38
第三节 火山岩水力压裂裂缝展布特征	40
第五章 火山岩水力压裂产能预测基础	60
第一节 火山岩水力压裂后产能特征	60
第二节 气井压后的产量递减曲线影响因素分析	67
第六章 火山岩水力压裂技术	72
第一节 火山岩压裂施工设计	72
第二节 火山岩水力压裂压力诊断	74
第三节 火山岩水力压裂施工控制	81
第七章 火山岩高温压裂液研究	85
第一节 注入流体化学性质与火山岩的匹配	85
第二节 火山岩裂缝内温度的分布与变化规律	86

第三节	火山岩压裂液耐温性	88
第四节	火山岩压裂液抗剪切性	90
第五节	火山岩压裂液破胶性能	91
第八章	深层火山岩压裂工艺管柱研究	93
第一节	管柱结构及工艺原理	93
第二节	压裂封隔器及主要配套控制工具	98
第三节	压裂管柱的有限元分析	103
第四节	大规模压裂规模下压裂管柱磨蚀规律	106
第五节	现场施工风险控制	109
第六节	现场应用及单井实例	111
第九章	深层火山岩气藏压裂技术应用实例	115
第一节	火山岩压裂控制裂缝高度应用技术实例	115
第二节	火山岩压裂裂缝诊断技术应用实例	117
第三节	深层水平井压裂技术应用实例	137
第四节	酸化技术应用实例	140
附录 1	火山岩压裂测试压裂解释规范	143
附录 2	火山岩压裂方案设计规范及施工质量评价方法	151
附录 3	火山岩压裂现场控制措施规范	160

第一章 火山岩地质特征及流体性质

第一节 区域地质简况

一、区域构造特征

松辽盆地是在 C-P 系基底基础之上从晚侏罗世断陷开始发育,到早白垩世转换为凹陷为主的持续沉降发育起来的中新生代大型盆地,深层共划分 7 个一级构造单元和 18 个二级构造单元,总体特征是周边为斜坡区、断隆区,中央为断陷区,断陷区又被中央古隆起分割为多个断陷,斜坡区和断隆区也分布有小型断陷,使深部呈现断隆相间的构造格局。

徐家围子地区是松辽盆地北部深层天然气勘探的重点地区,在构造上由徐西、宋西两条边界断裂控制形成的箕状断陷,由宋站低隆起和丰乐低隆起将其分割成南北 3 个局部断陷,它们分别是安达次坳、杏山次坳和薄荷台次坳。

徐家围子断陷位于中部徐家围子—北安断陷带上,受徐西和宋西两条边界断裂控制,近南北向展布,长 90km,中部最宽处有 55km,面积约为 4300km²,是松辽盆地北部深层规模较大的断陷。断陷周边 T₃ 反射层海拔高程 -2500 ~ -3500m,断陷内高程低于 -5000m。断陷为西断东超型箕状断陷,西部为断阶带,中部为深凹带,东部为斜坡带。西侧与古中央隆起带结合部为一大型的基底断裂面,该断裂面高差达 3000 ~ 5000m,宽 6 ~ 13km。断陷向东逐步抬升进入肇东—朝阳沟隆起带。

根据徐家围子断陷的构造格局,划分为西部断阶带、徐中火山岩隆起带、东部斜坡带、丰乐低隆起和宋站低隆起等多个正向构造单元。徐深气田主要探明储量区位于徐中火山岩隆起带,该隆起带具有火山活动与构造运动双重成因机制。

二、区域地层与沉积特征

松辽盆地北部深层是指泉头组二段以下地层,主要为古生界地层、上侏罗统一白垩统断陷期地层和下白垩统坳陷期地层。自下而上分别为基底、火石岭组、沙河子组、营城组和登娄库组及泉头组一段、二段地层(图 1-1)。发育的沉积相类型有冲积扇相、河流相、湖漫相、湖泊相、扇三角洲相、三角洲相、湖底扇相。断陷期地层火山岩也十分发育,以爆发相、溢流相和火山沉积相为主。

基底主要为泥板岩、千枚岩等变质岩和花岗岩等侵入岩,局部发育动力变质岩、砂砾岩等。

火石岭组处于断陷盆地形成初期,划分为火石岭组一段、二段,底部沉积一套碎屑岩,中上部发育火山岩及喷发的间歇期间的滨浅湖相沉积。徐深 1 井揭示火石岭组一段为杂色砾岩和黑色、灰黑色泥岩夹煤层,火石岭组二段为中性火山岩,为本区的储集层之一。

沙河子组为断陷盆地发育的鼎盛时期,密集段较为发育,主要形成断陷期烃源岩和局部盖层。徐深 1 井揭示沙河子组地层岩性为杂色砾岩、黑色灰黑色泥岩夹煤层。

地层			岩性剖面	电测曲线	岩性描述	年代 (Ma)
统	组	段				
下白垩统	登娄库组	登二段			黑灰、绿灰色泥岩粉砂岩、泥质粉砂岩互层夹灰白色中砂岩、细砂岩	124.0
		登一段			杂色砂砾岩夹灰色粉砂岩、细砂岩	
	营城组	营四段			杂色砾岩、砂砾岩	128.0
		营三段			安山岩、酸性凝灰岩及酸性喷发岩	
		营二段			杂色砾岩、砂泥岩及含砾砂岩	136.0
		营一段			酸性凝灰岩、流纹岩	
	沙河子组	沙上段			砂泥岩、砂砾岩偶夹煤线	144.0
		沙下段			砾岩、砂泥岩及含砾砂岩	
中侏罗统	火石岭组	火石岭二段			安山岩、安山质角砾岩及凝灰岩	156.0
		火石岭一段			砂泥岩、凝灰岩及砂砾岩等	178.0
基底					片麻岩、片岩、花岗岩、千枚岩、板岩等	

图 1-1 兴城开发区地层综合柱状图

营城组沉积仍然受到边界断层的控制，沉积范围比沙河子组沉积范围扩大，此期内基底断裂活动频繁，火山活动强烈，在断陷内形成了大范围分布的火山岩。营城组分四段，总体上为两套火山岩、两套碎屑岩互层。营一段为深灰色及黑灰色晶屑凝灰岩、灰色及灰白色流纹岩、杂色火山角砾岩；营二段为含凝灰质的砂、泥岩互层；营三段为流纹岩，流纹质凝灰岩，暗紫色、深灰色安山岩，紫红色、灰绿色安山质凝灰岩，安山质玄武岩和蚀变闪长玢岩；营四段为杂色砾岩及含凝灰质的砂、泥岩互层沉积。

徐深气田主要目的层为营城组一段、三段火山岩和营四段砾岩储层。营一段火山岩主要分布于徐深气田南部，以酸性火山岩为主，钻井揭示的火山岩厚度为 77 ~ 989m。营三段火山岩主要分布于徐深气田北部，岩性以中酸性火山喷发岩为主夹少量砂砾岩和凝灰质粉砂岩性，厚度 200 ~ 780m。营四段大部分分布于徐深气田南部，主要为砾岩、砂砾岩储层，钻井揭示营四段地层厚度为 10 ~ 367m。根据本区营四段储层的岩性、电性及其组合

特征及地层沉积结构的旋回性，可将营四段地层划分为上、下两个沉积旋回。每个旋回由下往上岩性由粗变细，不同的旋回具有不同的沉积中心，主要储集层发育于上部旋回地层。

登娄库组为由断陷向坳陷过渡期，与下部地层呈不整合接触。登一段和登三、登四段主要发育扇三角洲、河流三角洲、滨浅湖沉积的碎屑岩储层。登二段为坳陷湖盆发育的鼎盛时期，泥岩等致密层发育，形成深层重要的盖层。

泉一、二段沉积时期，为稳定的坳陷阶段，以滨浅湖、河流相的暗紫色泥岩夹泥质粉砂岩、粉砂岩为主，为两个向上变细的正旋回。地层总厚 300 ~ 500m，泉一段底部有一层 40 ~ 60m 厚的流体系砂岩储层，向上为滨浅湖泥岩、薄层砂岩为主，特别是泉二段泥岩约占地层总厚度的 60% 以上，具有较好的封闭能力，分布稳定，形成深层天然气藏的区域盖层（表 1-1）。

表 1-1 徐深气田深层地层简表

层 位				层位代号	厚度 (m)	岩性描述	
系	统	组	段				
白 垩 系	下 统	泉头组	泉二段	K ₁ q ₂	0 ~ 479	泥岩、泥粉、粉砂互层	
			泉一段	K ₁ q ₁	0 ~ 1181	灰绿杂紫红色砂泥岩互层	
		登娄库组	登四段	K ₁ d ₄	50 ~ 224	粉砂、紫红色泥岩、粉泥互层	
			登三段	K ₁ d ₃	80 ~ 298	紫红色砂泥岩夹粉砂岩、中细砂岩	
			登二段	K ₁ d ₂	100 ~ 271	泥岩、粉砂岩、泥质粉砂岩互层夹中细砂岩	
		营城组	营四段	K ₁ yc ₄	10 ~ 367	杂色砾岩、砂砾岩等	
			营三段	K ₁ yc ₃	200 ~ 780	以厚层中酸性火山岩为主，岩性有流纹岩、流纹质凝灰岩、安山岩、安山质凝灰岩、安山质玄武岩等	
			营二段	K ₁ yc ₂		灰黑色砂泥岩、绿灰和杂色砂砾岩，有时夹数层煤（本区缺失）	
			营一段	K ₁ yc ₁	77 ~ 989	流纹岩、流纹质凝灰岩、火山角砾岩、集块岩，底部发育中基性火山岩	
		沙河子组	沙上段	K ₁ sh 上	0 ~ 214	砂泥岩、砂砾岩、偶夹煤	
			沙下段	K ₁ sh 下	0 ~ 204	砾岩、砂泥岩及含砾砂岩	
侏罗系—白垩系		火石岭组	火二段	(K ₁ +J)h ₂	0 ~ 160	安山岩、安山质角砾岩及凝灰岩	
			火一段	(K ₁ +J)h ₁	0 ~ 266	砂泥岩、砂砾岩、凝灰岩等	
石炭系—二叠系				C—P		泥岩、泥板岩、千枚岩等	
前震旦系				Anz		片麻岩、片岩、花岗岩、千枚岩、变质粉砂岩等	

三、成藏条件分析

徐家围子断陷主要有火一段、沙河子组、营二段 3 套烃源岩，包括湖相泥岩和煤层，有机碳含量比较高，均已达高成熟—过成熟，空间分布不均衡。火一段为含煤碎屑岩段。徐深 1 井于火一段揭示暗色泥岩厚度为 110.5m，煤层厚度为 37.5m，泥质岩有机碳平均值为 0.77%，煤岩样品的有机碳范围为 4.97% ~ 28.76%，平均值为 11%。计算火石岭组泥岩

生气强度为 $8.17 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，煤岩强度为 $97.78 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。沙河子组 (K₂sh) 岩性为灰、灰黑色砾岩与灰黑色泥岩不等厚互层，常夹煤层。沙河子组湖相泥岩分布遍及整个断陷，厚度一般大于 400m，最厚达 1000m。泥质岩有机碳值大多超过 1.0%，煤层有机碳平均值为 29%。营二段烃源岩分布于兴城东部的榆树林西及宋站地区的向斜内，最厚达 1200m，预测具有一定的生烃能力。

营城组火山岩分布稳定，几乎遍及整个徐家围子断陷，厚度大，是断陷中的主要储集层段，直接覆于沙河子、火石岭及基底之上，具备断陷中央最有利的气源。徐深气田北部登娄库组、泉一段砂体以及基岩风化壳形成其他类型的储集空间，凹陷中登二段、泉一段、泉二段的砂泥层分布稳定，成为良好的区域盖层。

贯穿全区、北北西向发育的宋西断裂是工区内最主要的断层，它的活动与该区火山岩发育、徐中火山岩隆起带的形成关系密切，同时也是深部天然气向上运移成藏的主要通道。从成藏时间分析，泉一段以前的局部构造形成早于大量排烃期，烃源岩生成的天然气沿断裂断层运移至局部构造及火山岩圈闭中，形成储集类型丰富的构造、岩性气藏。

第二节 徐中火山岩隆起带构造特征

徐中火山岩隆起带位于徐家围子断陷中部，为一个受宋西断层控制的北北西向延伸的构造带。从主要目的层营城组顶面构造图来看，整体构造表现为北高南低的特征，北部主要为发育于早期基岩凸起上的正向构造。中部受升西断裂逆冲活动的影响，形成升平—兴城隆起带，将徐家围子断陷分为两部分，东西两侧低而中部高，东西部各形成一个深凹区，东部的深凹区更深一些。南部总体上均表现出了不完整的东南高、北西低洼向斜形态，沿升平—兴城鼻状构造隆起发育了一些背斜、断背斜局部构造（图 1-2、图 1-3）。

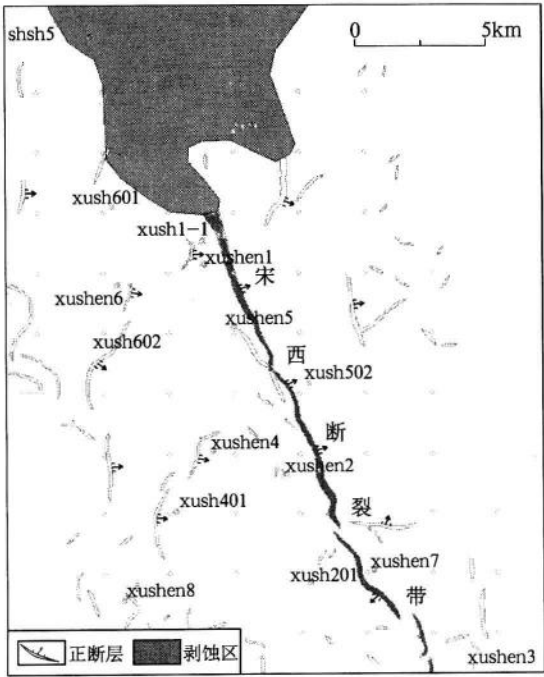


图 1-2 宋西断裂带断裂构造纲要图

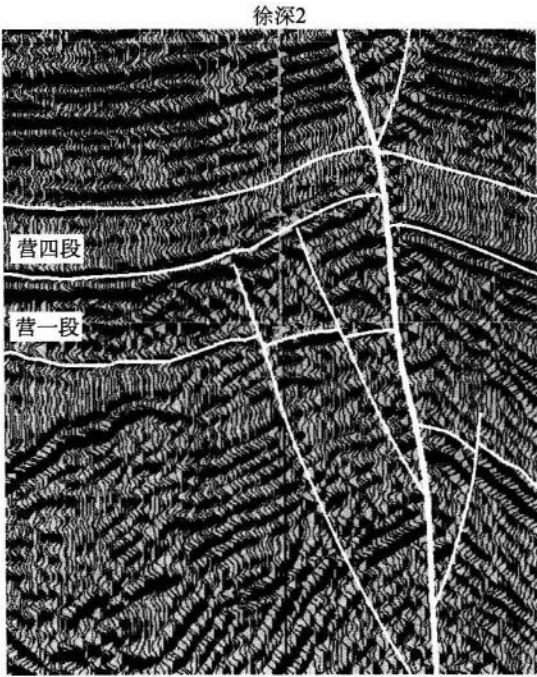


图 1-3 Inline368 测线地震剖面

断层多为北北西向展布，与深层区域构造走向一致。一般延伸长度 2 ~ 9km，断距为 10 ~ 250m。宋西断裂贯穿全区，断层延伸长度大于 25km，走向为北北西向，断距自北向南由 600m 减小到 50m，工区中部断距在 200m 左右。

营城组顶面由北向南发育 5 个局部构造。北部升深 2-1 区块穹隆构造以海拔 -2810m 等深线形成的构造圈闭内，高点海拔为 -2680m，构造幅度为 130m 左右，圈闭面积约为 20.4km²。中部徐深 1 区块所在的鼻状构造以海拔 -3350m 构造线圈闭，高点海拔 -2950m，构造幅度为 400m，圈闭面积约为 10.9km²。徐深 2 井区发育有一穹隆型构造，高点海拔为 -3500m，最低 -3625m，圈闭幅度为 125m，圈闭面积约为 7.27km²。

宋西断裂东侧主要为单斜构造，沿断裂分布两个面积较小的半背斜构造，其中徐深 7 井区所在半背斜构造南北狭长，在火山岩顶面以海拔 -3900m 等深线形成的构造圈闭内，高点海拔为 -3540m，构造幅度为 460m 左右，圈闭面积约为 4.78km²。南部丰乐低隆起，深层 T₃ 至 T₅ 各层构造形态继承性良好，总体上表现出了不完整的东南高，北西低洼向斜形态。最大埋深达 -3800m，位于徐深 7 井西南及东北方向，最浅埋深约 -540m。徐深 9 井区所在半背斜，在火山岩顶面以海拔 -3500m 等深线形成的构造圈闭内，高点海拔为 -3385m，构造幅度为 115m 左右，圈闭面积约为 4.0km²。

第三节 储层特征

徐深气田营城组气藏储集类型主要为火山岩和砂砾岩储层。南部主要发育营城组一段火山岩、营四段砾岩两套储层，北部主要发育营城组三段火山岩储层。

一、火山岩岩性特征

根据岩石化学系列判定图解，本区火山岩以高钾钙碱性系列为主，其次为钾玄岩系列、中钾钙碱性系列，而低钾钙碱性系列则较少。元素常量分析表明，绝大部分营一段、营三段火山岩的 SiO₂ 含量均达到 70% 以上，按照常量元素化学成分分类，岩石名称为流纹岩。

以火山岩岩心系统观察和偏光显微镜薄片鉴定为基础，依据火山岩化学分类命名（国际地科联，1989），确定火山岩岩石类型的定名。对非取心段的岩心标定，利用 ECS、成像和核磁等先进测井技术建立新方法综合判定火山岩岩性。

徐深气田火山岩岩石类型有火山熔岩和火山碎屑岩两大类，火山熔岩主要岩石类型有球粒流纹岩、流纹岩、（粗面）英安岩、粗面岩、粗安岩、玄武粗安岩、安山岩以及玄武岩等，从酸性岩、中酸性岩、中性岩到中基性均有分布。火山碎屑岩主要有流纹质熔结凝灰岩、流纹质（晶屑）凝灰岩、流纹质角砾凝灰岩、流纹质火山角砾岩、火山角砾岩以及集块岩等（图 1-4、图 1-5）。

徐深气田徐深 1 和徐深 8 区块营一段储层以火山碎屑岩为主，尤其是流纹质熔结凝灰岩、流纹质凝灰岩十分发育，徐深 9 区块以球粒流纹岩为主。

徐深气田北部营三段储层主要为流纹岩、球粒流纹岩、流纹质火山角砾岩、流纹质熔结凝灰岩和凝灰岩等。

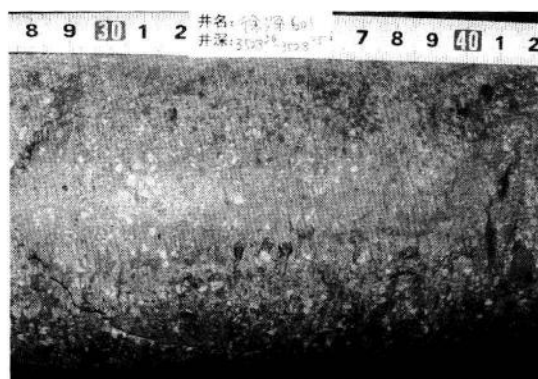


图 1-4 含角砾晶屑熔结凝灰岩
(徐深 601 井, 3528.36 ~ 3528.75 m)

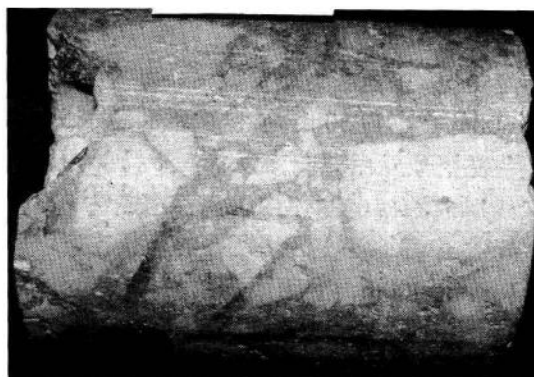


图 1-5 凝灰质支撑火山角砾岩
(徐深 1 井, 3635.66m)

从已有的岩心分析成果可知, 徐深气田深层气藏储层岩性类别多, 岩石孔隙结构复杂, 孔、缝充填严重, 孔隙度、渗透率及面孔率差异大 (表 1-2)。其中, 流纹岩孔隙较发育, 具有较大的孔隙度、渗透率, 而集块岩的孔隙度、渗透率最差。孔隙度、渗透率总体上低, 孔隙度基本上在 4% ~ 10% 之间, 渗透率大多在 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下, 属于低孔、低渗储层 (图 1-6)。

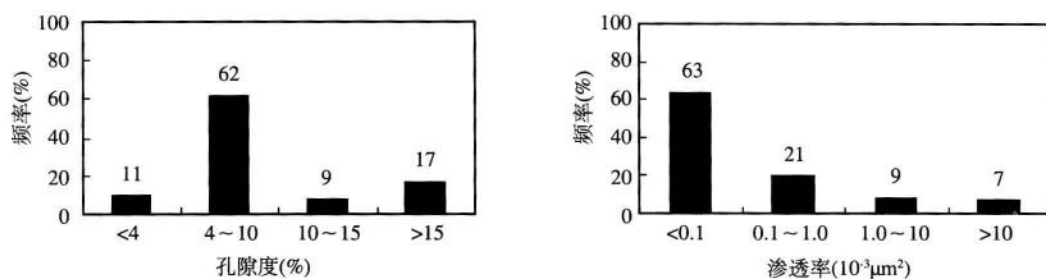


图 1-6 孔隙度、渗透率分布频率图

表 1-2 铸体薄片分析及全直径岩心统计结果

岩性	块数	孔隙度 (%)	渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	面孔率 (%)	全直径岩心平均孔隙度 (%)
流纹岩	6	4.6 ~ 24.5	0.013 ~ 23.3	0.5 ~ 18.0	(19 块) 7.74
角砾岩	4	2.2 ~ 18.2	0.0046 ~ 19.7	0 ~ 15	(3 块) 6.67
凝灰岩	4	2.0 ~ 15.9	0.0038 ~ 0.26	0 ~ 4	(53 块) 4.74
集块岩	3	6.1 ~ 7.5	0.014 ~ 0.045	1 ~ 2	(7 块) 4.23

二、火山岩储集空间类型

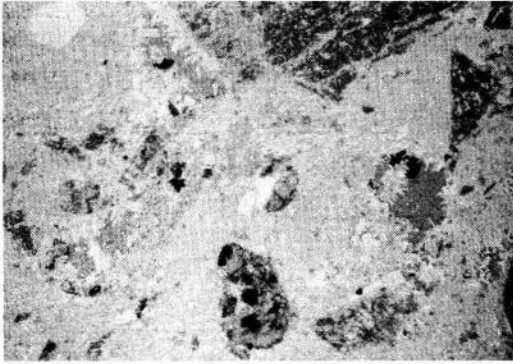
主要储集空间类型有气孔、气孔被充填后的残余孔、杏仁体内孔、球粒流纹岩中流纹质玻璃脱玻化产生的微孔隙、长石溶蚀孔、火山灰溶蚀孔、碳酸盐溶蚀孔、石英晶屑

溶蚀孔、砾间孔、球粒周边及粒间收缩缝以及裂缝及微裂缝等类型。其中，气孔、球粒流纹岩中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、裂缝以及微裂缝等是主要的孔隙类型。以上各类储集空间一般不单独存在，而是以某种组合形式存在。储集空间与储集岩岩石类型有着密切的关系，不同的岩石类型(图 1-7)有着不同类型的储集空间组合。

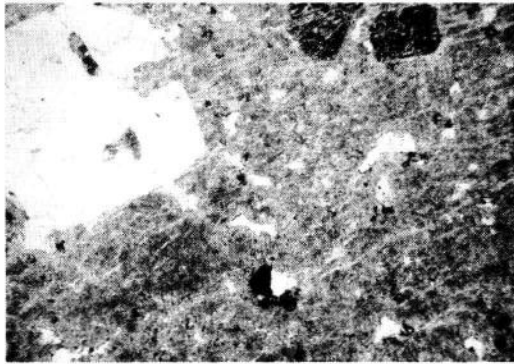
流纹岩、球粒流纹岩的储集空间主要有气孔、气孔被充填后的残余孔和杏仁体内孔、流纹质玻璃脱玻化产生的微孔隙、长石和碳酸盐矿物溶蚀产生的孔隙以及局部发育的微裂缝等。流纹岩的主要储集空间除缺少流纹质玻璃脱玻化产生的微孔隙外，其他与球粒流纹岩相同。

熔结凝灰岩的储集空间主要有火山灰的溶蚀、塑变岩屑和岩屑中存在的气孔、气孔被充填后的残余孔和杏仁体内孔、长石和碳酸盐矿物溶蚀产生的孔隙以及局部发育的微裂缝等。

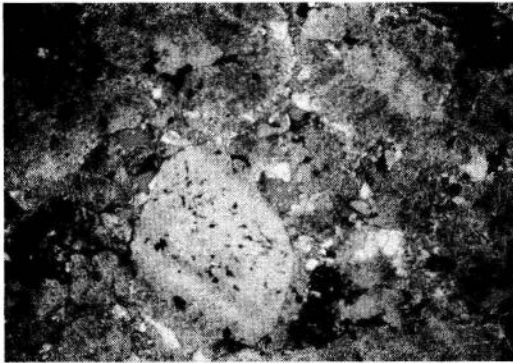
凝灰岩的储集空间除没有塑变岩屑中存在的气孔和杏仁体内孔外，其他均与熔结凝灰岩相同。



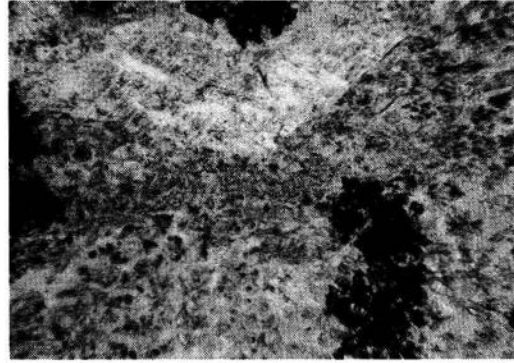
(a) 杏仁体内残留孔，晶屑熔结凝灰岩



(b) 斑晶内熔孔，流纹岩



(c) 砾(粒)间孔，火山角砾岩



(d) 微孔隙，晶屑凝灰岩

图 1-7 火山岩不同的岩石类型

火山角砾岩的储集空间主要有火山灰的溶蚀、岩屑中存在的气孔和杏仁体内孔、长石和碳酸盐矿物溶蚀产生的孔隙以及局部发育的微裂缝及角砾间存在的缝等。

集块岩的储集空间主要取决于岩块及角砾的成分，集块岩的储集空间分别具有岩块及

角砾相应的储集空间。除此之外，还有局部发育的微裂缝、岩块及角砾间存在的缝以及集块岩中填隙物的溶蚀等。

三、火山岩物性特征

徐深气田南部徐深1等区块，营一段火山岩共完成火山岩全直径岩心分析243块，孔隙度主要介于1.8%~18.8%之间，平均孔隙度为5.3%，渗透率主要介于 $(0.01 \sim 13) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间，平均渗透率为 $0.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层平均孔隙度为7.1%。研究和统计结果表明，徐深气田南部营一段火山岩储层的物性变化大，非均质性强。岩性与物性关系密切，熔结凝灰岩的渗透率一般大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，裂缝不发育的集块岩和凝灰岩的渗透率一般则小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

徐深气田北部升深2-1区块营三段火山岩235块岩心样品物性分析统计表明，孔隙度大于10%的样品占样品总数44.69%，渗透率主要介于 $(0.01 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间，占样品总数66.83%，渗透率大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占样品总数26.92%，渗透率小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品只占6.25%。综合分析认为，升深2-1井区营三段火山岩储层属于低孔、低渗储层，储层物性以流纹岩最好，其次为熔结角砾岩。

岩心观察表明，火山岩储层普遍发育裂缝。通过对兴城和升平地区的岩心描述和统计，裂缝发育具有较强的非均质性，发育密度为1~31条/m。为了准确评价裂缝的发育程度和分布规律，开展了专项研究工作，通过岩心描述和标定，建立了利用声电成像和常规测井资料的裂缝评价方法。根据成像测井和常规测井的解释结果，裂缝孔隙度为0.002%~0.07%。裂缝的发育极大地改善了储层的渗流能力，但裂缝孔隙度占总孔隙度的比例小于10%，储层的孔隙类型以孔隙型为主。

四、火山岩岩相特征

通过岩心描述和野外露头观测，建立了松辽盆地北部火山岩喷发模式，认为徐深气田火山岩储层岩相，可分为火山通道相、爆发相、喷溢相、侵出相和火山沉积相5种，徐家围子地区火山岩相模式图如图1-8所示，每一种火山岩相可以进一步划分为3种亚相，共15种亚相。

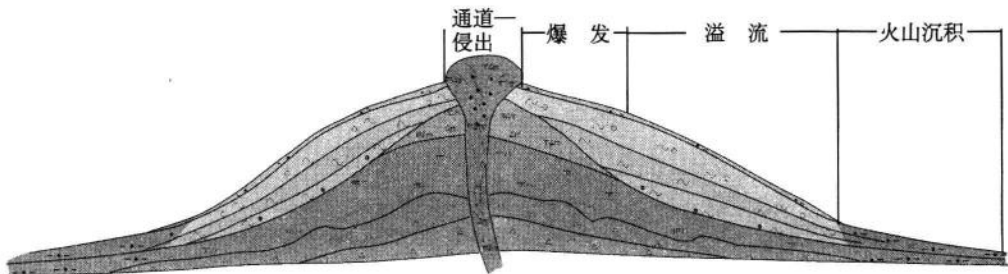


图1-8 徐家围子地区火山岩相模式图

本区储层以爆发相为主，爆发相形成于火山作用的早期和后期，可分为3个亚相：空落亚相、热基浪亚相和热碎屑流亚相。

空落亚相：其主要构成岩性类型为含火山弹和浮岩块的集块岩、角砾岩以及晶屑凝灰

岩。但是,浮岩由于其孔隙过于发育,在成岩过程中,受压实作用影响非常大,而且浮岩还特别易于风化,因而徐家围子地区深层目前还没有发现浮岩层。空落亚相常具有集块结构、角砾结构和凝灰结构,常表现为正粒序,颗粒支撑。空落亚相是固态火山碎屑和塑性喷出物在火山气射作用下在空中做自由落体运动降落到地表,经压实作用而形成的。多形成于爆发相下部,向上粒度变细,有时也呈夹层出现。空落亚相的代表性特征是具有层理的凝灰岩层被弹道状坠石扰动的“撞击构造”。

热基浪亚相:其主要构成岩性为含晶屑、玻屑和浆屑的凝灰岩,火山碎屑结构,以晶屑凝灰结构为主,具平行层理、交错层理、逆行沙波层理,是气射作用的气-固-液态多相体系在重力作用下在近地表呈悬移质搬运,重力沉积,压实成岩作用的产物。多形成于爆发相的中下部,向上变细变薄,或与空落相互层。热基浪亚相的代表性特征是发育构造层理构造,尤其是逆行沙波层理(反丘)构造。

热碎屑流亚相:其主要构成岩性为含晶屑、玻屑、浆屑、岩屑的熔结凝灰岩,熔结凝灰结构、火山碎屑结构,块状,基质支撑,是含挥发分的灼热碎屑-浆屑混合物,在后续喷出物推动和自身重力的共同作用下沿地表流动,受熔浆冷凝胶结与压实共同作用而形成,以熔浆冷凝胶结为主。多见于爆发相上部。原生气孔发育的浆屑凝灰岩是热碎屑流亚相的对比性岩石。

五、火山岩岩相分布特征

应用岩心鉴定和测井解释的岩性识别结果,能够综合确定单井的火山岩岩性。在对岩性组合进行分析的基础上,根据对该区域建立的火山岩模式可以划分火山岩相。

以徐深1井为例,下部爆发相主要有空落亚相组成,夹少量的热碎屑流亚相,岩石类型以凝灰岩和流纹质集块岩为主体,夹有一层流纹质熔结凝灰岩。下部爆发相深度在3705~3602m之间,总厚度为103m。溢流相主要由流纹岩组成,夹有一层厚约2m的热碎屑流亚相的流纹质熔结凝灰岩。其深度在3602~3585m之间,厚度为17m。

上部爆发相发育有空落亚相、热碎屑流亚相和热基浪亚相。空落亚相发育于上部爆发相底部,深度在3585~3565m之间,厚度为20m,由流纹质集块岩、流纹质晶屑凝灰岩和凝灰岩组成,夹有一层厚1.5m的热碎屑流亚相流纹质熔结凝灰岩;热碎屑流亚相发育于上部爆发相中部,深度在3565~3524m之间,厚度为41m。由流纹质熔结凝灰岩和流纹质含凝灰熔结角砾岩组成,夹有一层厚度为4m的热基浪亚相流纹质晶屑凝灰岩。

上部爆发相的上部为热碎屑流亚相和热基浪亚相不等厚互层,热基浪亚相厚度占总厚度2/3以上。由流纹质晶屑凝灰岩、流纹质熔结凝灰岩、流纹质含角砾晶屑凝灰岩和流纹质含角砾熔结凝灰岩等组成。

多期次喷发的火山岩由多次火山喷发叠加形成,火山岩厚度大,爆发相、喷溢相和火山沉积相等各种相带均较发育,并常见多种相带重复出现。

根据预测的结果,兴城地区上部火山岩相展布方向是北西向和近东西向的条带状和块状分布,与深断裂一致,反映出深断裂对岩相分布的控制作用。爆发相主要分布在工区的北部,而喷溢相主要分布在工区的南部。

升平地区岩相分布受宋西断裂控制,主要为中心式喷发,火山口明显。以喷溢相为主,平面上从西向东的相序依次为火山通道(侵出相)—喷溢相—爆发相—火山沉积相。已探明气田含气范围内以喷溢相—爆发相为主。

火山沉积相在第二旋回中出现不多, 仅在徐深 8 和徐深 13 之间的地堑中出现少量。

第四节 气 藏 特 征

徐家围子断陷沙河子组—营城组气源岩在其沉积末期开始达到排气门限向外排气, 在登娄库组沉积时期达到排气高峰期。登二段泥岩盖层在登三段沉积末期开始具备封闭能力。由此看出, 登二段泥岩盖层的封闭能力形成时期早于沙河子组—营城组气源岩的排气高峰期, 可封闭住沙河子组—营城组天然气源岩排出的大量天然气, 有利于沙河子组—营城组天然气在登一段、沙河子组—营城组和基岩风化壳储集层中的聚集与保存 (图 1-9)。

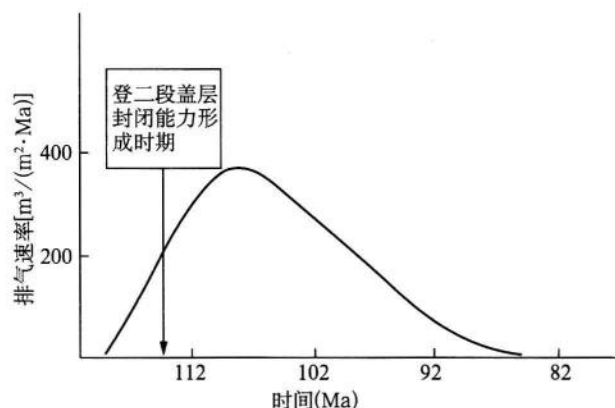


图 1-9 松辽盆地北部登二段盖层封闭能力形成时期与沙河子组—营城组气源岩排气期的配置关系

营城组火山岩气藏流体分布具有明显的气上、下水的特点。在徐深气田已完钻的井中, 除位于构造高部位的徐深 1、徐深 601 和徐深 603 井火山岩储层产纯气外, 其余井在纵向上, 试气或综合解释均为上部产气 (或气水同产)、下部产水。在平面上, 徐深气田南部徐深 1 区块构造位置最高, 产能也最高, 高部位的 3 口井产纯气; 位于低隆起的徐深 8 和徐深 9 井区块构造位置较高, 产能较高, 但下部含水; 中部的徐深 4、徐深 2 等区块构造位置最低, 则产能低, 气水分异差。总之, 整体上具有构造高部位气柱高度大、富集高产, 低部位气柱高度小、气水分异差的特点, 显示出构造对气水分布的控制作用。

徐深气田南部各区块没有统一的气水界面, 含气高度超出构造圈闭, 岩性圈闭是火山岩气藏成藏的主控因素。火山岩储层非均质性强, 横向变化快, 错迭连片, 但连通性较差。徐深 1 井与徐深 1-1 井相距仅 1.2km, 试采结果不能证实其连通。岩性非均质导致气水分异差, 尤其对于构造低部位的井 (如徐深 401 井) 及储层物性差的井 (如徐深 2 井)。各区块间及区块内各井测试结果均表明没有统一的气水界面, 测试结果已证实兴城北部的汽水界面较南部各区块高, 营城组一段火山岩气藏类型为构造—岩性气藏。

徐深气田北部升深 2-1 区块火山岩气藏受构造控制明显, 均具有气上水下的特点, 测井解释及试气结果表明, 各井汽水界面接近一致, 说明构造对含气性起主要控制作用。由于火山岩储层平面相变快, 物性差异较大, 各井汽水界面不完全一致, 综合分析认为, 升深 2-1 区块营城组三段气藏总体上以构造控制为主, 岩性也起一定的控制作用, 气藏类型为岩性—构造气藏。