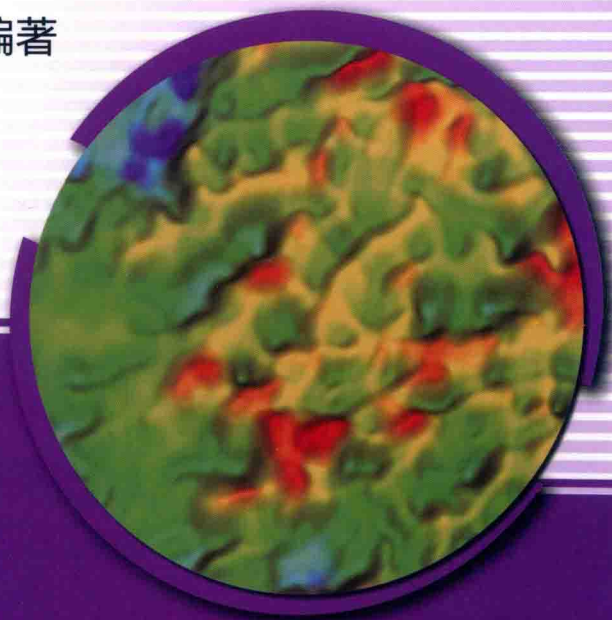


石油地质勘探类系列书

MARINE SHALE GAS RESERVOIR
PREDICTION AND EXPLORATION

海相页岩气储层 预测与勘探

胡伟光 倪楷 范春华◎编著



中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

石油地质学

海相页岩气储层预测与勘探

胡伟光 倪楷 范春华 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书以四川盆地焦石坝页岩气田的勘探实例为基础,系统阐述了海相优质页岩储层预测的原理及详细的技术方法和应用实例。以探索及建立针对海相页岩气储层的综合解释与预测技术流程为目的,研究中采用了地震资料精细构造解释及埋深成图、地震相分析、叠后波阻抗反演、地震属性、裂缝预测及随钻跟踪等技术方法,实施页岩气储层的预测及随钻评价。本书还总结了优质页岩储层预测方法的应用情况及技术特点,提出了优质页岩储层预测的一些关键技术及参数。利用本书的技术方法及成果可实施海相页岩气储层的预测,其相关的应用技术及经验可在页岩气储层预测中进行推广。

本书可供各大石油公司从事页岩气储层、致密砂岩储层类勘探、开发的研究人员参考,也可供高等院校石油地质、地球物理、石油工程等相关专业的师生学习使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

海相页岩气储层预测与勘探 / 胡伟光, 倪楷, 范春华
编著. —北京: 中国石化出版社, 2017. 6
ISBN 978-7-5114-4429-5

I. ①海… II. ①胡… ②倪… ③范… III. ①海相-
油页岩-储集层-预测 ②海相-油页岩-油气勘探
IV. ①P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 082343 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市朝阳区吉市口路 9 号

邮编: 100020 电话: (010) 59964500

发行部电话: (010) 59964526

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

700 × 1000 毫米 16 开本 12.5 印张 216 千字
2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷
定价: 50.00 元

前 言

页岩气(shale gas)是一种重要的非常规天然气类型,与常规天然气相比,其生成、运移、赋存、聚集、保存等过程及成藏机理既有许多相似之处,又有一些不同点。页岩气成藏的生烃条件及过程与常规天然气藏相同,泥页岩的有机质丰度、有机质类型和热演化特征决定了其生烃能力和时间。在烃类气体的运移方面,页岩气成藏体现出无运移或短距离运移的特征,泥页岩中的裂缝和微孔隙成了主要的运移通道,而常规天然气成藏除了烃类气体在泥页岩中的初次运移以外,还需在储集层中通过断裂、孔隙等输导系统进行二次运移。在赋存方式上,二者差别较大。首先,储集层和储集空间不同(常规天然气储集于碎屑岩或碳酸盐岩的孔隙、裂缝、溶孔、溶洞中,页岩气储集于泥页岩黏土矿物和有机质表面、微孔隙中);其次,常规天然气以游离赋存为主。页岩气以吸附和游离赋存方式为主。在盖层条件方面,鉴于页岩气的赋存方式,其对上覆盖层条件的要求比常规天然气要低,地层压力的降低可以造成页岩气解吸和散失。页岩气的成藏过程和成藏机理与煤层气极其相似,吸附气成藏机理、活塞式气水排驱成藏机理和置换式运聚成藏机理在页岩气的成藏过程中均有体现。

作为源岩排烃残余的主要产物,页岩气的存在具有广泛意义。页岩气是美国大规模经济性勘探开发的三大非常规天然气类型(根缘气、页岩气、煤层气)之一,近年来由于相关配套技术的进步而得到了空前的发展,其页岩气年产量相当于目前我国各类天然气年产量的总和。

作为非常规油气资源的一种，页岩气聚集机理特殊，富集条件多样，它使得一大批不曾具备常规油气成藏条件的泥页岩重新变得具有直接勘探意义。高含有机碳泥页岩在中国境内广泛分布，页岩气也因此成为值得我国高度重视且具有重要勘探开发意义的非常规油气资源类型。

依据页岩发育的地质基础、区域构造特点、页岩气富集背景以及地表开发条件等情况，可将中国的页岩气分布有利区域划分为南方、北方、西北和青藏4个大区，其中每个大区又可进一步细分。由于各区页岩气地质条件和特点差异明显，据此又可划分为不同的页岩气富集模式——南方型、北方型和西北型。据专家估算，我国页岩气可采资源量约为 $26 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，与美国大致相当。其中，四川盆地东南及南部地区的志留系龙马溪组、下寒武统筇竹寺组海相黑色页岩发育，页岩气勘探开发潜力巨大。2010年中国石油在四川南部威远地区志留系龙马溪组页岩钻获商业性气流，实现中国页岩气首次工业性突破；2012年中国石化在川东南焦石坝地区的海相页岩气勘探中，在龙马溪—五峰组页岩中也收获商业性气流，证实了四川盆地志留系龙马溪—五峰组页岩是最有利的勘探层系之一。

当下，为了更好地指导及研究页岩储层预测，应石油行业内同行的要求，我们针对川东南地区焦石坝气田的海相页岩储层的综合解释与预测相关成果进行分析研究，编著成书，探索、研究这个页岩气田油气勘探的成功经验，期待对中国的页岩储层预测、勘探实践具有指导和借鉴作用。

本书共分为六章，第一章主要为介绍页岩气勘探开发、储层特征、保存条件及涉及的地球物理技术，有助于读者简略了解相关页岩气勘探开发技术、页岩储层的特点及其相关的地球物理技术。第二章至第四章重点阐述页岩储层预测的地球物理技术、综合解释及储层预测的实践操作、应用情况，利用成熟的商业软件对焦石坝及其邻近气田的页岩储层段进行储层综合解释及预测的成果展示及分析。第五章是随

钻跟踪技术简介,有利于读者了解页岩气勘探中钻井跟踪方面的实际操作,使水平井更好的在优质页岩段中穿行。第六章是对海相页岩储层解释、预测技术的集成总结,结论可以给读者一些启示及思考。

本书是中国石化勘探分公司参与四川盆地焦石坝页岩气田勘探及开发的全体管理及技术人员集体智慧的结晶,从该气田的页岩储层预测研究成果中进行总结,在这项集体劳动成果集结出版的时候,笔者对上述参加人员表示衷心的感谢!同时,也感谢为本书编撰付出辛勤劳动的绘图人员。

由于现阶段我国的油气勘探进程相对较快,本书中相关的海相页岩储层的综合解释与预测成果的分析、认识可能不足,并且本书成果集成总结的时间相对紧张,再加上作者水平有限,书中错误和分析不妥之处望读者不吝赐教。

1.1 构造情势解释方法	(57)
1.2 储层解释方法	(60)
1.3 目的层深度构造图制作	(63)
1.4 目的层及断序深度图绘制	(64)
1.5 几点参考	(65)
2 海相页岩储层预测	(70)
2.1 叠后波阻抗反演技术	(74)
2.2 地质属性分析技术	(85)
2.3 AVO 分析技术	(96)
2.4 构造解释技术	(105)
2.5 层形分类技术	(113)
2.6 地层压力系数预测技术	(115)
2.7 属性指数计算	(119)
3 震源预测	(124)
3.1 基于神经网络	(128)
3.2 遗传技术	(134)
3.3 神经网络技术	(139)

目 录

1 概论	(1)
1.1 页岩气成藏简介	(4)
1.2 四川盆地海相页岩储层特征	(14)
1.3 海相页岩气储层保存特征	(32)
1.4 地球物理技术简介	(46)
2 精细埋深图编制技术	(56)
2.1 构造精细解释方法	(57)
2.2 断层解释方法	(60)
2.3 目的层深度构造图制作	(62)
2.4 目的层实际埋深图绘制	(64)
2.5 几点思考	(65)
3 海相页岩储层预测	(70)
3.1 叠后波阻抗反演技术	(74)
3.2 地震属性分析技术	(85)
3.3 AVO 分析技术	(96)
3.4 约束建模技术	(105)
3.5 波形分类技术	(113)
3.6 地层压力系数预测技术	(115)
3.7 脆性指数计算	(119)
4 裂缝预测	(124)
4.1 相干体技术	(128)
4.2 曲率技术	(134)
4.3 蚂蚁追踪技术	(139)

4.4	方位地震 P 波属性裂缝预测	(140)
4.5	构造应力场模拟	(154)
5	随钻跟踪	(166)
5.1	导眼井跟踪	(167)
5.2	水平井跟踪	(169)
6	结束语	(174)
	参考文献	(177)
(1)	.....	1.1
(2)	.....	1.1
(3)	.....	1.2
(4)	.....	1.3
(5)	.....	1.4
(6)	.....	1.5
(7)	.....	1.6
(8)	.....	1.7
(9)	.....	1.8
(10)	.....	1.9
(11)	.....	1.10
(12)	.....	1.11
(13)	.....	1.12
(14)	.....	1.13
(15)	.....	1.14
(16)	.....	1.15
(17)	.....	1.16
(18)	.....	1.17
(19)	.....	1.18
(20)	.....	1.19
(21)	.....	1.20
(22)	.....	1.21
(23)	.....	1.22
(24)	.....	1.23
(25)	.....	1.24
(26)	.....	1.25
(27)	.....	1.26
(28)	.....	1.27
(29)	.....	1.28
(30)	.....	1.29
(31)	.....	1.30
(32)	.....	1.31
(33)	.....	1.32
(34)	.....	1.33
(35)	.....	1.34
(36)	.....	1.35
(37)	.....	1.36
(38)	.....	1.37
(39)	.....	1.38
(40)	.....	1.39
(41)	.....	1.40
(42)	.....	1.41
(43)	.....	1.42
(44)	.....	1.43
(45)	.....	1.44
(46)	.....	1.45
(47)	.....	1.46
(48)	.....	1.47
(49)	.....	1.48
(50)	.....	1.49
(51)	.....	1.50
(52)	.....	1.51
(53)	.....	1.52
(54)	.....	1.53
(55)	.....	1.54
(56)	.....	1.55
(57)	.....	1.56
(58)	.....	1.57
(59)	.....	1.58
(60)	.....	1.59
(61)	.....	1.60
(62)	.....	1.61
(63)	.....	1.62
(64)	.....	1.63
(65)	.....	1.64
(66)	.....	1.65
(67)	.....	1.66
(68)	.....	1.67
(69)	.....	1.68
(70)	.....	1.69
(71)	.....	1.70
(72)	.....	1.71
(73)	.....	1.72
(74)	.....	1.73
(75)	.....	1.74
(76)	.....	1.75
(77)	.....	1.76
(78)	.....	1.77
(79)	.....	1.78
(80)	.....	1.79
(81)	.....	1.80
(82)	.....	1.81
(83)	.....	1.82
(84)	.....	1.83
(85)	.....	1.84
(86)	.....	1.85
(87)	.....	1.86
(88)	.....	1.87
(89)	.....	1.88
(90)	.....	1.89
(91)	.....	1.90
(92)	.....	1.91
(93)	.....	1.92
(94)	.....	1.93
(95)	.....	1.94
(96)	.....	1.95
(97)	.....	1.96
(98)	.....	1.97
(99)	.....	1.98
(100)	.....	1.99

1 概 论

近 20 年来,随着世界能源消费量的猛增和供需矛盾的日益突出,非常规天然气资源已引起了油气勘探家们的普遍重视,不少国家将页岩气、煤层气、油砂、油页岩等非常规油气资源的勘探开发提上了重要议事日程,并将其列为 21 世纪重要的补充能源,加大了对这些非常规油气资源的勘探开发和综合利用力度。随着油气勘探领域的不断扩大和勘探开发程度的逐步提高,以及相关配套工程技术的进步,多种机理类型的非常规天然气资源不断被发现、探明、开发,其生产成本也大幅下降,尤其是在目前天然气价格较高的情况下,页岩气的勘探、开采更加经济可行,其经济价值和战略意义越来越受到重视。

非常规油气是指成藏机理、赋存状态、分布规律及勘探开发方式等不同于常规油气藏的烃类资源,现阶段非常规油气资源主要指油页岩、油砂、煤层气、页岩气、致密砂岩气等。我国非常规油气总资源量达 $1.9 \times 10^{14} \text{ m}^3$,其中煤层气为 $3.7 \times 10^{13} \text{ m}^3$,位居世界第三,已探明储量 $2.8 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。我国页岩气资源量达 $1 \times 10^{14} \text{ m}^3$,其中可采储量 $2.6 \times 10^{13} \text{ m}^3$,与美国相当。目前,我国页岩气资源仍处于开发萌芽状态,开发潜力巨大。我国致密砂岩天然气资源量约为 $1.48 \times 10^{13} \text{ m}^3$,2010 年全国致密砂岩气产量达到 $3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。我国非常规油气成藏特点、分布状况及其特点如下:①资源储量丰富,分布区域广;②油气类型多样,成藏类型多;③储层非均质性强,受构造、裂缝及孔隙等因素控制;④储层大都表现为低孔低渗特征。可见非常规油气藏与常规油气藏相比,其成藏地质条件更复杂,勘探开发技术要求更高。

页岩气勘探生产和开发研究最早开始于美国,早在 1627 ~ 1669 年,法国的勘测人员和传教士就对阿巴拉契亚盆地富含有机质黑色页岩进行过描述,他们所提到的石油和天然气现在被认为来源于纽约西部的泥盆系页岩。1821 年被公认为是美国的天然气工业的开始,第一口井是在纽约 Chautauga 县泥盆系 Dunkirk 页岩中完井的,它位于天然气苗上方,从大约 27ft (8m) 深处的裂缝中产出了天

然气, 当时仅供当地照明用 (Weeks, 1886; Orton, 1899; Van Tyne, 1983; De-witt 等, 1993), 这口井后来钻至 21m 深度。页岩气的发现, 就此拉开了美国天然气工业发展的序幕。这种发现预计比在宾夕法尼亚石油小溪发现著名的德雷克油井早 35 年。

美国也是最先对页岩气进行开采实验, 并取得巨大成功且具有领先地位的国家。页岩气的商业性开采最早 (1621 年) 始于美国东部, 20 世纪 20 年代步入规模, 主要产于阿拉巴契亚盆地富含有机质的泥盆系页岩中。1914 年在阿拉巴契亚盆地泥盆系页岩钻探中获日产天然气 $2.84 \times 10^4 \text{m}^3$, 由此发现了世界第一个页岩气田——Big Sandy 气田。美国能源部东部天然气页岩研究项目始于 1976 年, 作为地质、地球化学和石油工程的一系列研究项目, 重点在于研究增产措施。20 世纪 50 年代, 大型水力压裂首次在 Texas 州的页岩气田开发, 1986 年首先用于 Barnett 页岩气田, 1992 年水平井也首次用于 Barnett 页岩气田。20 世纪 70 年代中期美国页岩气步入规模化发展阶段, 70 年代末期页岩气年产量约为 $19.6 \times 10^8 \text{m}^3$ 。2000 年以来, 随着页岩气勘探开发技术不断提高, 页岩气得到了广泛应用。同时加密的井网部署使页岩气的采收率提高了 20%, 美国页岩气年生产量迅速攀升。2000 年, 美国页岩气年产量为 $122 \times 10^8 \text{m}^3$, 生产井约有 28000 口; 2004 年的产量已近 $200 \times 10^8 \text{m}^3$, 2007 年达到 $500 \times 10^8 \text{m}^3$ 的水平; 特别是近几年随着国际能源价格快速上涨及持续高位运营, 美国页岩气的产量、储量也随之快速增长, 2010 年仅页岩气的产量就高达 $1378 \times 10^8 \text{m}^3$, 远超中国各类天然气的总产量 $950 \times 10^8 \text{m}^3$, 2011 年超过 $1970 \times 10^8 \text{m}^3$, 2012 年达到 $2300 \times 10^8 \text{m}^3$, 并以产量每年 $300 \times 10^8 \sim 400 \times 10^8 \text{m}^3$ 的数量递增。EIA 在 2012 年 12 月发布的《2013 年能源展望报告》中预测, 2040 年美国页岩气产量将达到 $4729 \times 10^8 \text{m}^3$ 。与此同时, 每年新探明的页岩气储量高达 $7000 \times 10^8 \sim 8000 \times 10^8 \text{m}^3$, 展现了良好的天然气勘探开发前景。

对于我国而言, 自从 1667 年第一次在四川盆地的邛 1 井发现天然气以来, 就不断有页岩气被发现, 尤其是 20 世纪 60 年代以来, 已在松辽盆地、渤海湾盆地、四川、鄂尔多斯、柴达木等几乎所有陆上含油气盆地中发现了页岩气或泥页岩裂缝油气藏。1966 年在四川盆地威远构造钻探的威 5 井, 在 2795 ~ 2798m 的寒武系筇竹寺组页岩中获得日产天然气 $2.46 \times 10^4 \text{m}^3$, 成为中国早期发现的典型的页岩气产气井。

我国页岩气资源调查与勘探开发起步晚, 目前尚处于探索阶段。20 世纪 60 ~ 90 年代, 在常规油气勘探过程中, 部分盆地页岩中发现过泥页岩裂缝油气

藏,如松辽盆地古龙凹陷、辽河拗陷、济阳拗陷沾化凹陷、临清拗陷东濮凹陷、柴达木盆地茫崖拗陷西部凹陷等都相继发现和开采过裂缝性泥岩油气藏,部分学者对此还进行过研究(陈章明等,1988;王德新等,1996;刘魁元等,2001;徐福刚等,2003;张金川等,2004)。近年来,许多研究者逐渐开始注意到了“页岩气”在成藏机理及其分布规律上的特殊性,如张金川、金之钧等《页岩气成藏机理和分布》(2004年),张金川等《页岩气及其成藏机理》(2003年),张杰、金之钧等《中国非常规油气资源潜力及分布》等,认为页岩气介于根状气、根缘气和根远气三大类气藏之间,由于页岩气在主体上表现为吸附或游离状态,成藏过程中没有或仅有极短距离的运移,因此从某种意义上说,页岩气藏具有典型煤层气和典型根缘气的双重机理。普遍认为页岩气是一种极富有勘探潜力和前景的天然气聚集基本类型,但相关的系统性机理研究还未展开。自2004年起,中国国内石油公司及相关高校开始跟踪调研世界页岩气资源发展动态,并对中国页岩油气的资源状况进行初步分析。2007年以来,三大石油公司积极调整结构行业重点,将页岩气勘探开发列为非常规油气资源的首位。中国石油、中国石化等油气巨头继续引领并推进中国页岩气的勘探开发,部分页岩气井投入了商业化生产,并基本掌握了页岩气开发的成套技术,在地质资料和勘探开发技术方面相比国内其他投资者拥有很大优势。

中国石油于2007年与美国新田石油公司签署了《威远地区页岩气联合研究》协议,2008年11月在四川省宜宾市实施了我国首口页岩气取心浅井;2009年又与壳牌公司在重庆富顺—永川区块启动合作勘探开发项目,并于2010年实施钻探了威201井,在下寒武统获得日产 $1.08 \times 10^4 \text{ m}^3$ 工业气流,在长宁和富顺区块下志留统龙马溪组也获得了页岩气的突破。另外,中国石油公司的长宁—威远、昭通2个国家级示范区和富顺—永川对外合作区共完钻页岩气评价井39口,累计实现商品气量 $7000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在页岩气勘探开发过程中发现,部分区块前景远超预期,如贵州省安正县安场镇的安页1井,也在五峰—龙马溪组钻获工业气流。

由中国石油、四川能投和宜宾市国资经营公司等企业合资设立四川长宁天然气开发有限公司于2013年12月正式挂牌,注册资本10亿元。该公司将主要负责长宁区块的页岩气开发,预计2015年的页岩气产能为 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2013年12月,中国石油在长宁区块开展页岩气工厂化压裂先导试验,并在H3平台H3-1井、H3-2井取得成功,中国石油有望到2016年将页岩气单井平均开发成本降低至 $4000 \times 10^4 \sim 6000 \times 10^4$ 元/口。而目前单井的平均开发成本约

为 $8000 \times 10^4 \sim 10000 \times 10^4$ 元/口。

中国石化焦石坝海相页岩气田位于四川盆地川东南高陡褶皱带，为一宽缓的断背斜海相页岩气田。经焦石坝地区的二维地震资料解释结果所得到的等 t_0 构造图，于 2012 年 2 月 14 日在焦石坝断背斜构造高点部位开钻导眼井及 jy1_HF 水平井，在 2012 年 11 月 28 日完成该水平井的龙马溪—五峰组页岩段的压裂试气，获得日产 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产页岩气流，取得海相页岩气勘探的商业突破。

随后，中国石化勘探南方分公司迅速展开焦石坝主体构造的海相页岩气勘探，同时部署页岩气专探井三口、三维地震计 595 km^2 实施对目标区内的龙马溪—五峰组页岩分布情况摸底及甜点预测。其中 jy2、jy3、jy4 井的水平井压裂测试分别获得日产 $35 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $25 \times 10^4 \text{ m}^3$ 页岩气流，实现了焦石坝主体控制。截至 2015 年 10 月底，中国石化在焦石坝区块累计开钻 200 余口，加快了该区的海相页岩气勘探及开发，实现了西气东输的目的。

总的来说，涪陵焦石坝海相页岩气田为不含硫化氢的优质页岩气田。气体成分以甲烷为主，含量约为 $97.221\% \sim 98.410\%$ 。焦石坝海相页岩气田是国内第一个页岩气田，也是国内第一个大型页岩气田，同时是全球除北美以外第一个投入商业开发的大型页岩气田。所以对该气田进行相关的学术研究具有典型意义，可利用该气田相关的勘探经验指导其他地区海相页岩气的勘探开发。

1.1 页岩气成藏简介

页岩 (shale) 主要由固结的黏土级颗粒组成，是地球上最为普遍的沉积岩石。页岩看起来像是黑板一样的板岩，具有超低的渗透率。在许多含油气盆地中，页岩作为烃源岩生成油气，或是作为地质盖层使油气保存在生产储层中，防止烃类有机质逸散到地表。然而在一些盆地中，具有几十到几百米厚、分布几千到几万平方公里的富含有机质页岩层可以同时作为天然气的源岩和储层，形成并储集大量的天然气 (页岩气)。页岩既是源岩又是储集层，因此页岩气是典型的“自生自储”成藏模式。这种气藏是在天然气生成之后在源岩内部或附近就近聚集的结果，也由于储集条件特殊，天然气在其中以多种相态存在。这些天然气可以在页岩的天然裂缝和孔隙中以游离方式存在、在干酪根和黏土颗粒表面以吸附状态存在，甚至在干酪根和沥青质中以溶解状态存在。我们把这些储存在页岩层中的天然气称为页岩气 (shale gas)。总的来说，页岩气是指赋存于暗色泥页岩、高碳泥页岩及其夹层状的粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、甚至砂岩中以自生

自储成藏的天然气聚集。

总的来说,页岩是指由粒径小于 0.0039mm 的细粒碎屑、黏土、有机质等组成的具页理构造的一类沉积岩。富有机质页岩是指富含有机质、总有机碳含量(TOC)大于 0.5% 的暗色页岩。页岩气指主要以吸附或游离状态赋存于富有机质页岩层层系中(包括页岩及粉砂岩、砂岩和碳酸盐岩薄夹层)的天然气,具有自生自储、无明显气水界面的、在空间上大面积连续分布富集的特点。按照国土资源部和国家发改委相关精神,页岩气产层中泥地比要求大于 80% ,且吸附气含量应占到总含气量的 20% 以上。

美国地质调查局油气资源评价组(1995)认为页岩气系统属于典型的非常规天然气藏,即连续性天然气聚集。Curtis(2002)对页岩气进行了界定并认为,页岩气在本质上就是连续生成的生物化学成因气、热成因气或两者的混合,它具有普遍的地层饱含气性、含气面积大、隐蔽聚集机理、多种岩性封闭以及相对很短的运移距离等特点。

我国学者张金川等(2004)认为,页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中,以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚集。在页岩气藏中,天然气也存在于夹层状的粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、甚至砂岩地层中,为天然气生成之后在源岩层内就近聚集的结果,表现为典型的“原地”成藏模式。从某种意义来说,页岩气藏的形成是天然气在烃源岩中大规模滞留的结果。

我们通过对国内外关于页岩气形成及聚集方式描述的分析,从成因、赋存机理两方面说明页岩气的概念、涵义。页岩气是由烃源岩连续生成的生物化学成因气、热成因气或两者的混合,在烃源岩系统(页岩系统:页岩及页岩中夹层状的粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩甚至砂岩)中以吸附、游离或溶解方式赋存的天然气。与常规天然气藏相比,页岩气藏具有以下几个特点:①早期成藏,天然气边形成边赋存聚集,不需要构造背景,为隐蔽圈闭气藏;②自生自储,泥页岩既是气源岩层,又是储气层,页岩气以多种方式赋存,使得泥页岩具有普遍的含气性;③天然气运移距离较短,具有“原地”成藏特征;④对盖层条件要求没有常规天然气高;⑤赋存方式及赋存空间多样,吸附方式(有机质、黏土颗粒表面微孔隙)、游离方式(天然裂缝和孔隙)或溶解方式(在干酪根和沥青质中)均可;⑥气水关系复杂;⑦储层孔隙度较低(通常小于 5%)、孔隙半径小(以微孔隙为主),裂缝发育程度不但能控制游离状页岩气的含量,而且影响着页岩气的运移、聚集和单井产量;⑧在开发过程中,页岩气井表现出日产量较低,但生产年限较长的特点。

现在对页岩气的成藏过程、成藏地质特征详细解读如下。

1) 页岩气的成藏过程

页岩气成藏作用过程的发生使页岩中的天然气赋存相态本身也构成了从典型吸附到常规游离之间的序列过渡，因而页岩气成藏机理研究具有自身的独特意义，它将煤层气（典型吸附气成藏过程）、根缘气（活塞式气水排驱过程）和常规气（典型的置换式运聚过程）的运移、聚集和成藏过程联结在一起。由于页岩气在主体上表现为吸附状态与游离状态天然气之间的递变过渡，体现为成藏过程中的无运移或极短距离的有限运移，因此页岩气藏具有典型煤层气、典型根缘气和典型常规圈闭气成藏的多重机理意义，在表现特征上具有典型的过渡意义。页岩气的成藏过程可以划分为3个成藏阶段。

(1) 第一阶段（页岩气成藏阶段）。该阶段是天然气在页岩中的生成、吸附与溶解逃离，具有与煤层气成藏大致相同的机理过程。在天然气的最初生成阶段，主要由生物作用所产生的天然气首先满足岩石中有机质和黏土矿物颗粒表面吸附的需要，当吸附气量与溶解的逃逸气量达到饱和时，富裕出来的天然气则以游离相或溶解相进行运移逃散，条件适宜时可作为水溶气藏的形成提供丰富气源。此时所形成的页岩气藏分布限于页岩内部且以吸附状态为主要赋存方式，总体含气量有限。

(2) 第二阶段（根缘气成藏阶段）。在热裂解气大量生成过程中，由于天然气的生成作用主要来自于热化学能的转化，它将较高密度的有机母质转换成较低密度的天然气。在相对密闭的系统中，物质密度的变小导致了体积的膨胀和压力的提高，天然气的大量生成作用使原有的地层压力得到不断提高，从而产生原始的高异常地层压力。由于压力的升高作用，页岩内部沿应力集中面、岩性接触过渡面或脆性薄弱面产生微裂缝，天然气与孔隙壁之间所形成的束缚水膜阻断了地层水穿越天然气所在孔隙段的流动（浮力作用），此时页岩气藏的形成在主体上表现为由生气膨胀力所促动的气排水活塞式成藏过程，天然气原地或就近分布，构成了挤压造隙式的运聚成藏特征。在通常情况下，与页岩间互的致密粉砂岩夹层，具有低孔低渗特点，它限定了天然气通过气排水的活塞式运移、聚集逐渐形成根缘气藏。此时的天然气聚集已经超越了页岩本身，表现为无边、底水和浮力作用发生的地层含气特点，从整套页岩层系考察，不论是页岩地层本身还是薄互层分布的粉砂岩储层，在该阶段均表现为普遍的饱含气性，游离相的天然气以裂隙聚集、孔隙为主，页岩地层的平均含气量丰度达到较高水平。

(3) 第三阶段（常规气成藏阶段）。随着更多天然气源源不断地生成，则彼

此连通性较差的裂隙网络组合构成较大的裂缝网络, 可以作为天然气游离赋存场所和运移的高速通道, 由于空间的增大, 天然气的运移方式由活塞式转变为置换式。如果生气量继续增加, 则天然气分布范围进一步扩大, 直到遇常规储层或输导通道后, 天然气受浮力作用而进行置换式运移, 从而导致常规圈闭气藏的大范围出现。

2) 成藏地质特征

与煤层气类似, 富含有机质的页岩本身可以作为页岩气的气源岩, 又可以作为储集层, 页岩气的赋存方式、成藏机理和成藏过程与常规天然气有很大不同, 因此, 页岩气藏具有独特的地质特征。

(1) 页岩气系统自成生储盖体系。

在页岩气藏中, 富含有机质的页岩是良好的烃源岩, 页岩中的有机质、黏土矿物、沥青质等, 以及裂隙系统和粉砂质岩夹层又可以作为储气层, 渗透性差的泥质页岩为页岩气藏充当封盖层。

烃源岩: 含有大量的有机质含量、分布广泛、厚度较大的泥页岩。可以生成大量的天然气, 并且具有供气长期稳定持续的特点。

储集层: 与常规天然气的砂岩储集层不同, 其主要特点为: ①储集岩为泥页岩及其粉砂岩夹层; ②微孔隙、裂缝是页岩气储集的主要空间, 裂缝发育程度和走向变化复杂, 一般页岩裂缝的宽度在 2mm 内, 裂缝密度一般较大; ③天然气的赋存状态具有多变性 (据张金川等, 2003), 吸附、游离是页岩气赋存的主要方式, 少量以溶解方式赋存; ④岩石物性较差, 因为页岩较为致密, 孔隙度、渗透率都比常规储层岩石低, 仅在裂缝发育处, 渗透率才能有所改善, 但对孔隙度的改善不明显。

盖层: 在常规天然气藏中, 因为泥页岩较为致密、渗透率较低, 通常可以作为盖层。虽然页岩气的赋存方式与常规天然气有所不同, 但是致密的泥页岩仍然对页岩气藏具有封盖作用。美国的五大页岩气系统盖层的岩性多变, 包括页岩 (阿巴拉契亚盆地和福特沃斯盆地)、冰碛岩 (密执安盆地)、斑脱岩 (圣胡安盆地) 和页岩/碳酸盐岩 (伊利诺斯盆地) (Curtis 和 Faure, 1997; Hill 和 Nelson, 2000; Walter 等, 2000)。

(2) 页岩气赋存状态具多样性。

页岩气藏中天然气赋存状态有吸附气、游离气、溶解气等, 以吸附气、游离气为主, 溶解气含量所占比例很少。天然气既可吸附在干酪根或黏土颗粒的表面, 也可以以游离气的形式赋存于页岩裂缝和基质 (粒间) 孔隙中。吸附气含

量主要受岩石组成、有机质含量、微观孔隙结构、地层压力、裂缝发育程度等因素影响。从北美 15 个典型页岩的含气特征看,除了 Antrim、Lewis、Woodford 页岩吸附气含量大于游离气含量外,其他页岩则以游离气含量为主或者两者基本相当。

(3) 页岩气储层需要压裂改造才能获得商业产能。

页岩气储层为富有机质页岩及与其薄互层存在的粉砂—极细砂岩、泥灰岩等致密岩类,据 Robert 等的研究,页岩气储层主要发育孔隙直径小于或等于 $0.75\mu\text{m}$ 的微米—纳米孔隙,尤以纳米级孔隙为主要孔隙类型,既有极低的孔隙度和超低渗透率。孔隙度一般小于 $4\% \sim 6.5\%$,未压裂页岩的基质渗透率小于 $100 \times 10^{-6}\mu\text{m}^2$,在断裂或裂缝发育区孔隙度会提高到 10% 、渗透率提高到 $200 \times 10^{-6}\mu\text{m}^2$ 。据对 Barnett 页岩的研究,其孔隙大小比常规砂岩的孔隙小 400 倍,约为 40 个甲烷分子直径大小(甲烷分子直径为 0.38nm),孔隙度 $4\% \sim 10\%$,渗透率 $50 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}\mu\text{m}^2$ 。因此,在北美外无一例外要对页岩气水平井实施大型水力加砂压裂,改善储层渗流条件,获得商业产能。

(4) 页岩气的富集不受构造控制。

由于页岩气藏具有“自生自储”源内成藏的特点,决定了页岩气的富集成藏不受构造控制。富有机质泥页岩往往沉积于盆地凹陷区或盆地斜坡区,如果后期构造活动不强烈,地层变形、抬升幅度较小,则盆地凹陷区和斜坡区的页岩储层中可能存在大量的页岩气原地聚集,进而富集成页岩气藏。近几年的勘探实践表明,获得高产的成功的页岩气井既可能位于现今构造高部位(例如背斜构造高点)、也可能位于向斜区或斜坡区。关键是首先要具有富有机质泥页岩发育作为物质基础,其次后期构造活动弱,具有良好的保存条件。

(5) 页岩气富集带以裂缝发育为特征。

裂缝发育在大部分页岩中,以多种成因(压力差、断裂作用、顺层作用等)的网状裂缝系统为特征。在页岩中裂缝、溶蚀页理缝是主要的储集空间,次要储集空间主要为钙质条带中的溶孔、生物体腔孔、晶间孔、粒间孔等。其中,粒间孔主要是指砂质及泥质的双重孔隙,在钙质泥页岩互层为主的夹薄层砂岩的地层中,具有泥页岩裂缝、层理缝和薄层砂岩孔隙等储集空间。裂缝发育带不但提供了游离态页岩气赋存的空间,而且为页岩气的运移、聚集提供了输导通道,并且对页岩气的开发十分有利。美国页岩气的开发实践证明只有裂缝发育的页岩气藏不需压裂就可以获得工业气流,多数的页岩气藏必须经过压裂才能达到工业产量要求。页岩气虽然具有地层普遍含气性特点,但目前具有工业勘探价值的页岩气

藏或甜点区主要依赖于页岩地层中具有一定规模的裂缝系统。在美国的大约 30000 口钻井中, 钻遇具有自然工业产能的裂缝性甜点的井数只有大约 10%, 表明裂缝系统是提高页岩气钻井工业产能的重要影响因素。除了页岩地层中的自生裂缝系统以外, 构造裂缝系统的规模性发育为页岩含气丰度的提高提供了条件保证。因此, 构造转折带、地应力相对集中带以及褶皱-断裂发育带通常是页岩气富集的重要场所。

1.1.1 页岩气成藏机理

在页岩系统中页岩气不单一是指存在于裂缝中的游离相天然气, 也不单一是服从常规成藏机理的天然气聚集。页岩气成藏与常规气藏有很大的不同, 它属于“连续型”天然气成藏组合。“连续型”天然气成藏组合由美国地质调查所在 1995 年美国油气资源全国评价中提出 (Gautier et al., 1995; Schmoker, 1995), 是在研究非常规油气系统和常规油气系统之间随意性更小、更有地质根据的区别的结果。“连续型”天然气成藏组合, 实际上就是在一个大的区域 (通常是区域范围内) 不是主要受水柱压力的影响天然气成藏组合。根据不同的成藏条件, 页岩气赋存方式表现为吸附方式、游离方式、溶解方式 3 种方式; 成藏机理表现为典型的吸附机理、活塞运聚机理或置换运聚机理; 在成藏特征上介于煤层气、根缘气 (深盆气) 和常规天然气三大类气藏之间。因此, 页岩气成藏体现出非常复杂的多机理、多阶段过程, 是天然气成藏机理序列中的重要组成 (据张金川等, 2003)。页岩气成藏机理按成藏过程可以分成: 生成机理 (主导地位是成因机理)、赋存机理、运聚机理、产出机理。页岩气的生成机理主要如下两点。

(1) 生物成因。在页岩气中有一部分是生物成因气, 通过在埋藏阶段的早期成岩作用或近代富含细菌的大气降水的侵入作用中厌氧微生物的活动形成; 生物成因气, 生成于细菌的甲烷生成作用, 菌生甲烷占世界天然气资源总量的 20% 以上 (Rice, 1993)。微生物成因气最普遍的标志是甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值很低 ($\leq 55\text{‰}$)。此外, 由于一些中间微生物作用产生了 CO_2 副产品, 所以可以根据 CO_2 的存在和同位素成分来判断是否为生物作用形成的天然气。因为微生物作用仅产生了大量甲烷, 一般高链烃类是因热成因而形成, 因此天然气的总体化学特征也可以表明了其成因。由于不同的生烃机理可以导致相似的同位素值和组分值, 所以区分气体成因是非常复杂的。一些次生作用, 如运移、细菌氧化和二者的共同作用由于改变了主要诊断特征而使生气机理的识别变得更加复杂。

(2) 热成因。热成因作用主要是指随着埋深的增加, 地层中的温度、压力