

文章编号: 1009-3850(2006)02-0068-04

深部储层勘探、研究现状及对策

吴富强, 鲜学福

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 本文介绍了深层油气勘探、研究现状, 较系统地阐述了深部储层与中浅部储层质的差异。深部储层主要受地球动力学、热力学控制, 中浅部储层理论也不完全适用于深部储层这一新领域。作者提出了解决问题的技术思维和技术路线。

关键词: 深部储层; 地球动力学; 非线性动力学

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

1 国内外深部储层勘探、研究现状

随着世界各国对油气能源需求量的增加和油气勘探的不断深入, 常规油气勘探已经不能满足经济发展的需要, 非常规油气藏的研究和勘探势在必行, 油气勘探领域向深层进军已大势所趋, 开发盆地的深部资源已成为许多国家扩大油气储量的主要途径之一, 对老油田扩大储量、稳定产量有着非常重要的意义。目前, 世界上已有 70 多个国家开展了深层油气勘探, 其中美国和前苏联所投入的勘探工作量最大、钻探井最多, 取得的效益也最为显著。自美国 1952 年首次发现深层油气田后, 在许多国家掀起了深层油气勘探的热潮, 据不完全统计, 在世界上 199 个含油气盆地中共发现深层油气藏 1000 多个, 深层油气勘探取得了重大突破(表 1)。

特别是前苏联和美国两国已在打超深井、寻找深层油气资源方面展开竞赛。前苏联在科拉半岛打了 SG-3 号科探井, 主要目的是研究深层地壳结构, 历时近 20 年, 井深达 12200m; 美国在俄克拉荷马州打了 Bertha Rogess-1 号科探井, 完钻井深 9583.2m, 获得了许多深层油气生成和储集层性质方面的重要信息^[1]。

表 1 在 4~8km 深度世界油气探明储量的分布(据胡正钦, 1988)

Table 1 Distribution of the world-wide explored reserves at the depth of 4—8 m (after Hu Zhengqin, 1988)

盆地	石油/10 ⁸ t	天然气/10 ⁸ m ³	油气总量/10 ⁸ t
老地台盆地	0.426	36128.54	36.55
年轻地台盆地	27.14	13564.01	47.70
地槽期后盆地	1.4	2393.45	3.79
地台后造山运动盆地	0.02	10000.00	10.02
总计	29.98	62086.00	98.06

国内外勘探实践证明, 在 3500m 以下的地壳深处发育着很好的储集层, 如在南阿拉巴马州埋深处于 6090m 的上侏罗统诺弗利特组(Norphlet)砂岩, 孔隙度(φ) 大于 20%, 渗透率(K) 为 $1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (S. A. Dixon, 1989); 加拿大新斯科舍盆地文图尔气田, 在上侏罗一下白垩统砂岩(Missisauga 组和 MicMac 组)中, 发现了 3 个次生孔隙带, 其深度分别为 2400~2600m、3700~4100m 和 4600m 以下, 其中最深的一个次生孔隙带的孔隙度高达 32% (L. F. Janse 和 V. H. Noguera, 1990), 比中部次生孔隙带高出 6%; 位于墨西哥湾盆地中的华盛顿湖油田, 埋深 6540m 的中

收稿日期: 2005-04-15

第一作者简介: 吴富强, 1964 年生, 博士, 主要研究方向为金属热液矿床与油气之间的成生联系。

新统储集层的孔隙度为35%，渗透率为 $620\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ；美国贾伊费尔德气田，埋深8088m的寒武—奥陶系碳酸盐岩储集层，次生孔、洞、缝大量发育，孔隙度为25%，渗透率为 $1020\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ；俄罗斯科尔文深井在6890~6906m深处志留系复杂结构的碳酸盐岩储集层中，发现了矿化度为190g/l、富含硫化氢的地层水；俄罗斯秋明超深井在5000m以下的沉积岩和6500m以下强烈变形的玄武岩中，也发现了具有高孔隙度(17%~19%)和高渗透率的储集层发育带等(表2)。

表2 国外含油气盆地深层物性特征
Table 2 Physical properties of the deep reservoirs in some petroleum basins abroad

盆地或凹陷	厚度/m	时代	孔隙度/%	渗透率/ 10^{-15}m^2	储集体岩性
特拉华凹陷	4175~7200	Є—O	8~10	120~1000	碳酸盐岩
墨西哥湾外带	6530	N ₂	35	620	碳酸盐岩
西内部盆地	8088	Є—O	35	620	碳酸盐岩
南阿拉巴洲	6090	J ₃	20	1000	砂岩
新斯科舍盆地	4600	K ₁ -J ₃	32		砂岩
华盛顿湖油田	6540	N ₁	35	620	砂岩
阿纳科达凹陷	8088	Є—O	25	1020	碳酸盐岩
秋明超深井	>5000		17~19		

我国从“六五”以来，逐渐开展深层油气勘探工作，先后在塔里木、鄂尔多斯、四川等大型沉积盆地的深层发现了一批大油气田，并在东部油气区的中原、大港、胜利等地区的深层获得了重大进展。沉积厚度大于5km的大型沉积盆地有21个，14个盆地打了深井，其中1998年在塔里木盆地完钻的塔参1井井深7200m，于5059~6930m钻遇12段油气显示层段；我国最深的工业油田为塔里木盆地的东河塘油田，埋深5700~5800m；塔里木目前已测试的156个油气层井段中，58个油气层的底界超过5000m；塔里木轮南地区石炭系的石英砂岩储集层，尽管埋深已达6000m，但仍保持着极高的孔隙度。冀中坳陷从1977年开始进行深层油气藏的勘探，已钻探大于4000m的深井176口(截止1992年)，其中37口获得工业油气流，探井成功率21.4%，发现了13个油气藏，深层探明储量占全坳陷已探明储量的10%。据统计我国深部油气资源占总资源量的28%(李小地，1994)；根据全国二次资源评价结果，整个渤海湾盆地新生界深层剩余石油资源量为45亿吨以上，剩余天然气资源量超过7000亿 m^3 (胡秋平，1998)^[2]。

有关储层研究，绝大部分是论述中浅部储层的

文章，可以说深部储层研究现状不甚乐观。有关深部储层的研究，国内外不少学者曾为此作过许多有益的探索，如V. Schnlidt和D. A. McDonald(1979)发表了题为“砂岩成岩过程中次生孔隙的形成”的著名论文，指出次生孔隙的形成与有机质演化有关，对传统的观念提出挑战，迫使人们以新思维、新观点重新审视深部碎屑储集层的地质分布；有关次生孔隙成因机制的观点有早期的大气降水、CO₂-碳酸盐假说、有机酸假说以及近年来的烃类与硫酸盐热化学氧化还原反应(TSR)假说等；近年来兴起的研究方法有成岩作用模拟实验，碳、氧、锶同位素定量化研究等。

事实上，对次生孔隙的研究可以追溯到上世纪三、四十年代(Shanmugan, 1984)；70年代中期，由于世界能源危机的出现，迫使石油地质学家和沉积学家对深部次生孔隙的研究给予了极大关注(Curtis, 1977; Hower et al., 1976; Schnlidt和D. A. McDonald, 1979)；近20年来，国内外学者对含油气盆地次生孔隙的研究也进行了不懈的探索(McDonald and Surdam, 1984; Wolf and Chilingarian, 1992; 黄思静, 1999; 杨宝星, 1999; 裘亦楠, 1990; 朱国华, 1992; 朱家祥等, 1988; 赵澄林等, 1988; 孙永传等, 1995等)，但由于受到技术条件的限制，深井、超深井数量较少，加之深部储层的复杂性，致使深部储层研究始终未取得突破性进展。

2 深部储层与中浅部储层质的差别

在环境上，深层温度高、盐度高、应力复杂、异常压力普遍。浅部一般以水平应力场为主，纵弯褶皱发育；深部一般以垂直应力场为主，横弯褶皱发育。深层成岩作用强烈，多已进入成岩晚期，有机质演化程度高，多已达到成熟甚至过成熟阶段，油的粘度、密度、表面张力大大下降、重力特性接近、相界面消失，油气藏可存在于压力达100MPa(可能更高，高压延迟了油气的生成和成熟、抑制C₁₅+烃的热破坏性)、温度达350~400℃，以轻质挥发性油藏、凝析油气藏、气藏为特征。Price(1993)从数口深井和模拟实验的研究得出，在R₀为2.0~5.0%的范围内，C₁₅+烃类能保持中等到较高浓度，当R₀为7.0~8.0%时，仍有微量可检验的C₁₅+烃。Burass(1993)指出甲烷不存在其稳定性的温度上限。最近美国联邦地质调查局的一份报告指出，甲烷在R₀大于4%时，还能稳定存在，并有形成商业性气藏的可能，因此油气消亡界限有待重新认识(表3)。

表3 超深井岩芯样品的有机地球化学研究(据胡秋平, 1988)

Table 3 Organic geochemical analyses of the samples from some ultra-deep wells (after Hu Qiuping, 1988)

参数	扎科布斯-1(墨西哥湾盆地)	贝尔塔·罗杰斯(阿纳达科坳陷)	马克·涅尔(西内部含盐盆地)
深度/m	7544	8442~8470	6894~6905
地层时代	K ₁	D ₃ -C ₁	J ₃
温度/℃	296	230	220
有机碳含量/%	0.48	3.59	3.00
镜质体反射率R ₀ /%	4.4~4.8	4~4.5	2.74
藻质体含量/%	80	85	75
C ₁₅ + /10 ⁶	2200	3010	1886
饱和烃	78	48	—
芳香烃	4	23	—
非烃+沥青质	18	28	—
氢指数(I _H)	44	132	157
产油指数(OPI)	0.5	0.5	0.7

深部储层储集性能主要受地球动力学、热力学控制,而不象中浅部储层那样主要受重力作用、大气降水作用控制,某些储层由于强烈的成岩作用和次生变化,会全然失去自身的渗透性,而粘土层由于失水、固化,加上非均匀温度场、应力场、地球化学场使其发生自组织,形成由断裂、次生变化带限制的不同尺寸、不同材料的“砖块”结构,每一“砖块”结构可形成独立圈闭,即区块型层状储集层(硬石膏、钙质泥岩、粉细砂岩),在深部储层中裂隙对油气不仅起着输导作用,而且起着储集作用,是重要的储集空间和渗流通道。由于深的埋藏作用、强烈的成岩作用、巨厚层石膏的屏蔽作用及频繁剧烈的火山、构造作用,导致目前的石油地质和地球物理方法未能达到准确识别和有效地推测深部储层展布规模的程度;再者众所周知储层是个多方位研究课题,受多种因素影响,如构造环境、物源、气候、海平面或湖平面的升降、沉积相、成岩作用乃至成烃作用、深部热流体等,以至于众多学者认为储层,尤其是深部储层形成机理是世界级难题,是油气勘探开发工作的焦点、核心;加上100多年来的石油勘探积累的是大量浅层和中浅层的油气地质资料,在此基础上发展起来的传统石油地质学理论必然具有很大的局限性,象牛顿经典力学不适用于光子运动一样,中浅部储层理论也不完全适用于深部储层;随着非线性科学的发展及其在地学中的应用,人们逐渐认识到深部储层

的复杂性、非线性本质,而以前人们却习惯于把深部储层这一耗散系统误认为是一封闭的、甚至孤立的系统,致使深部储层研究工作陷入误区,滞后于油气勘探^[3~8]。

3 对策与建议

众所周知,我国各大油田中浅层勘探和开发程度已相当高了,已逐渐进入高含水后期开采阶段,后备储量日趋萎缩,稳产面临一定困难,前景不甚乐观;而国民经济对石油资源的需求量日趋增大,我国已成为进口石油大国;这种日趋增大的供需矛盾迫使石油勘探家把目光转向新的勘探领域,从我国实际地质情况出发,深部储层(>3500m)是目前最为现实的油气勘探新领域;面对这一新领域就需要我们用新思维、新观点、新技术、新方法来研究深部储层非常规性油气藏,因此,“深部储层形成演化机理”就不可避免地成为了研究的热点、前缘。

地质研究与油气勘探相辅相成,地质思维的突破是油气勘探成功的前夜,而油气勘探又促进了地质研究。目前油气勘探已为深部储层研究积累了丰富的素材,可以说深层油气勘探的突破促进了深部储层研究的进展,且各种新技术、新方法的出现使得深部储层研究成为可能;而深部储层的研究,又必将冲破过去的思维定势,使油气勘探随之柳暗花明。

总之,深层是一个极富有吸引力的新领域,有可能发展成为能源接替的新战场,但传统的地质学和勘探方法已不适应或无法解释深层所出现的许多地质现象,可以说有关深部储层新理论、新方法、新学说的诞生已经来临,这对我们来说既是挑战,更是机遇。

由于深部储层与中浅部储层有着质的差异,中浅部储层理论不完全适用于深部储层这一新领域,可以说深部储层缺乏一套系统的理论体系,因此应加强深部储层理论上的研究。

由于深度大、成岩作用强烈、巨厚层石膏的屏蔽作用等,导致目前的石油地质和地球物理方法都未能达到准确识别和有效地推测储层展布规模的程度,因此应加强深部地震、测井资料的处理工作。

针对深部储层特征,应重视重、磁、电、化探等传统手段以及地震波层析成像、核磁共振、磷灰石裂变径迹等新方法的应用。

积极开展水-岩反应、动力学实验及数学模拟,探索金属热液矿床与油气藏之间的成生联系,完善深部热流体耗散系统机理。

参考文献:

[1] 妥进才,王先彬,周世新,等. 深层油气勘探现状与进展[J] . 天然气地球科学, 1999, 10(6):
[2] 王秉海, 钱凯, 等. 胜利油区地质研究与勘探实践[M] . 东营: 石油大学出版社, 1992.
[3] 姜振学, 庞雄奇, 张金川, 等. 深盆气研究现状综述. 地球科学进展, 2000, 15(3): 289— 292

[4] 林王子, 张金亮. 陆相储层沉积学进展[M] . 北京: 石油工业出版社, 1995.
[5] 吴富强. 页岩中微裂隙的形成机制[J] . 石油地质信息, 1997, (2): 126— 128.
[6] 冯秀芳. 深层含油气性问题[J] . 国外石油地质, 1999, 21(2): 10— 13.
[7] 段毅, 王先彬. 深层油气形成地若干问题讨论[J] . 天然气地球科学, 1999, 10(6): 22— 26
[8] 吴富强. 500℃井底温度条件下成功地进行了高温高压钻探[J] . 石油钻井工程, 1997, (4): 53— 55.

Current state and countermeasure of deep reservoirs exploration

WU Fu-qiang, XIAN Xue-fu
(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The present paper gives a systematic description of the current state of the research and exploration of deep reservoirs. These deep reservoirs are generally controlled by geodynamics and thermodynamics. The thought and technological processes are proposed in this paper, which are different from those for the moderate and shallow reservoirs.
Key words: deep reservoir; geodynamics; non-linear dynamics

地球上最老的硅质碎屑潮汐沉积中的微生物席状体

南非 3.2Ga 的古太古界 Moodies 群砂岩中新近发现的微生物, 与保存在燧石中的古太古界叠层石和细菌细胞化石的形态和成因完全不同。皱纹构造、泥裂及旋卷构造记录了先前存在有效地将沉积物稳定在已知最古老的硅质碎屑潮坪上的微生物席状体。在薄片 中, 沉积构造显示出微生物席状体呈地毯状、层纹状构造特征。负 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素比值为 $(-20.1 \sim -21.5) \pm 0.2\text{‰}$ 与保存在纹理中碳的生物成因一致。Moodies 群沉积构造的生物成因经整个地球发展史(包括现今) 中类似潮汐环境同样的生物群特征 的比较研究所证实。研究表明, 硅质碎屑潮坪环境曾是至少32亿年的繁盛微生物生态系统的环境。与有争议的硅化微生物化石和叠层石不同, 新近在砂岩中发现的微生物引起的沉积构造, 证实了古太古代细菌生命的存在。

(摘自 Geology, 2006, 34(4) : 253— 256)