

文章编号: 0253-9985(2009)02-0223-07

火成岩油气藏储量计算有关问题探讨

张 玲¹, 王志强², 张丽艳², 焦里力³

(1 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

2 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015

3 中国石油化工股份有限公司 华东分公司 研究院, 江苏 南京 210093)

摘要: 针对火成岩油气藏具有岩性和岩相复杂、储层非均性强的特点, 通过分析不同岩相、不同储集类型的岩石物理特点、测井响应特征和油水系统, 提出适合火成岩储层的储量计算单元划分观点。以岩心分析为基础, 充分利用成像与核磁测井识别有效厚度。采用细分储集类型, 并将常规测井、核磁测井、压汞曲线相结合, 建立孔隙度、饱和度参数解释模型。采用地震测井约束反演技术, 定量描述储量单元参数。以上多种方法和综合技术的应用, 可较好地解决缝洞型双重介质火成岩储量参数解释困难、储量计算精度低的难题, 并对类似火成岩油气藏的储量计算评价具有一定指导意义。

关键词: 储层识别; 储量参数评价; 火成岩

中图分类号: TE15 文献标识码: A

A discussion on certain issues concerning reserve calculation of igneous reservoirs

Zhang Ling¹, Wang Zhiqiang², Zhang Liyan², Jiao Lili³

(1 SINOPEC Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083 China;

2 Geological Scientific Research Institute of SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257015 China;

3 Research Institute of SINOPEC East China Company, Nanjing, Jiangsu 210090 China)

Abstract Igneous reservoirs feature in complexities of lithologies and lithofacies and strong heterogeneity. This paper analyzed the petrophysical characters, log responses, and oil-water system of reservoirs with different lithofacies and reservoir types, and proposed a unit division method suitable for reserve calculation of igneous reservoirs. Effective reservoir thickness is recognized through analyzing core, FM I and NMR log data. Models for porosity and saturation interpretation are established through subdivision of reservoir types and integration of conventional log, NMR, and intrusive mercury curve. Parameters of the reserve calculation units are described quantitatively through log-constrained seismic inversion. A comprehensive application of the above-mentioned methods and technologies would solve successfully such issues as difficulties in interpreting reserve parameters of fractured-vuggy igneous reservoirs with dual media and the inaccuracy of reserve calculation. Furthermore, it may help the evaluation of reserve calculation of similar igneous reservoirs.

Key words reservoir identification; reserve parameter evaluation; igneous rock

随着油气勘探开发的进展, 火成岩油气藏已成为一个具有很大潜力的新领域。火成岩储量计算是继砂岩、碳酸盐岩之后又一新的难题。火成岩油气藏以其特有的岩性和储层特征^[1~3], 比碎屑岩和碳酸盐岩具有更复杂的岩电关系、油气水

关系, 因此给储量单元划分、储量参数定量解释和储量计算评价带来很大难度(表 1)。目前, 国内外火成岩油气藏储层评价已从定性评价发展到用岩心刻度测井资料, 再用测井资料定量求取储层参数的阶段。成像、核磁测井资料具有信息量

收稿日期: 2008-12-27。

第一作者简介: 张玲(1962—), 女, 高级工程师, 储量评价及管理。

大、
表 1 砂岩、碳酸盐岩、火成岩油气藏储量计算特点对比

Table 1 Comparison of reserve calculation characteristics among sandstone, carbonate and igneous reservoirs			
分类	砂岩油气藏	碳酸盐岩油气藏	火成岩油气藏
计算单元	平面分块, 纵向分砂层组、油 (气) 水系统	平面分块, 纵向分油 (气) 水系统, 再各细分孔隙、裂缝系统	平面分块、分岩相带, 纵向分岩相带、油 (气) 水系统, 再各细分孔隙、裂缝系统
有效厚度下限	孔、渗、饱下限, 电性下限	分孔隙、裂缝分别制定孔、渗、饱下限, 电性下限	分岩相、再分孔隙、裂缝分别制定孔、渗、饱下限, 电性下限
有效厚度	孔隙型油气层	孔洞型、裂缝型油气层	孔洞型、裂缝型油气层
有效孔隙度	孔隙型储层有效孔隙度	孔洞型、裂缝型储层有效孔隙度	孔洞型、裂缝型储层有效孔隙度
含油气饱和度	孔隙型储层含油气饱和度	孔洞型、裂缝型储层含油气饱和度	孔洞型、裂缝型储层含油气饱和度
储量	有效孔隙含油气储量	有效孔洞含油气储量、裂缝含油气储量	有效孔洞含油气储量、裂缝含油气储量

纵向分辨率高的特点, 经过地质刻度, 在定量识别裂缝、计算裂缝孔、饱参数等方面取得了较好的效果。加强岩石物理基础实验, 研究火成岩油气藏测井机理, 建立多学科、多信息、多种手段的综合解释技术, 将成为火成岩储量计算的发展趋势^[4]。

1 储量计算单元划分

根据 DZ/T 0217-2005《石油天然气储量规范》要求, 储量计算单元一般是单个油气藏。计算单元是平面上受同一构造控制的几个小断块或岩性油气藏, 当油气藏类型、储层性质和流体性质相似, 且含油气连片或叠置时, 可划分为一个计算单元。纵向上不同岩性、储集特征的储层应划分独立的计算单元。

1.1 不同火成岩性、储集类型是计算单元划分的基础

渤海湾盆地商河油田商 741 火成岩主要分布在古近系沙 (河街组) 一段和沙三段地层中, 纵向上分为 4 套。测试资料证实, 沙一段第 I 套火成岩和沙四段第 IV 套火成岩储量为探明储量 (图 1)。第 I 套火成岩体为水下火山爆发作用形成的火山碎屑锥体, 夹于沙一段地层中, 岩性为熔结角砾状玄武岩、火山角砾岩、火山凝灰岩, 上部呈蘑菇状, 下部以火山通道与侵入岩体相连; 储集类型以溶蚀孔、粒间孔、气孔为主, 裂缝次之, 裂缝以垂直缝和高角度缝为主。第 IV 套火成岩体为一套辉绿岩侵入岩体, 穿插于沙三下亚段暗色泥岩中; 储集类型有裂缝、溶蚀孔洞和气孔, 其中以裂缝最为普遍^[5]。

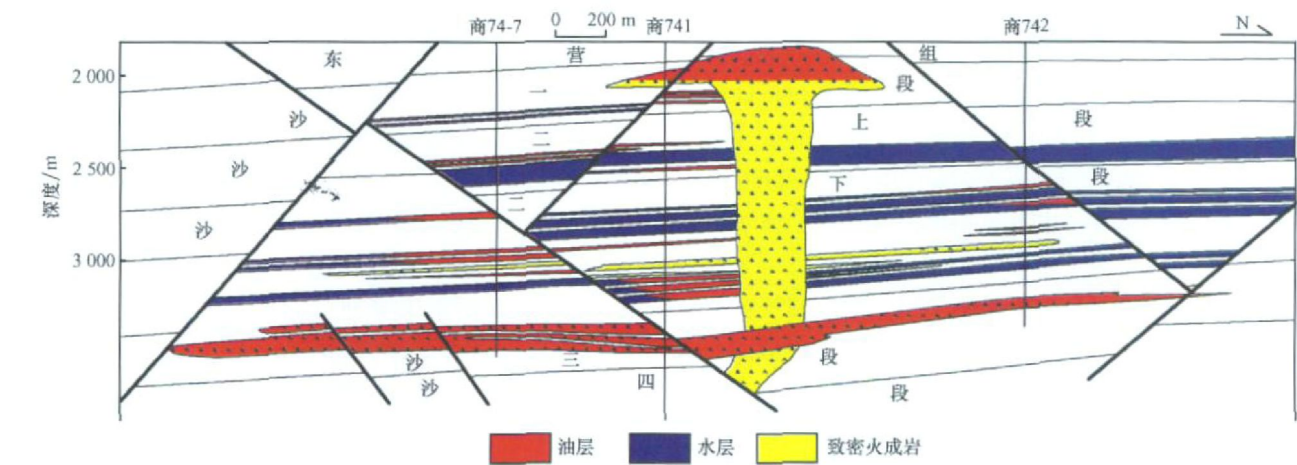


图 1 商 741 火成岩体油藏剖面

Fig. 1 Profile of igneous reservoirs in Well Shang-741

火成岩在录井、测井曲线上均有相应的特征。通过作中子-密度交会图或测井特征参数分析可知,沙一段火成岩具有两低两高的特点,即低密度 ($2.15 \sim 2.40 \text{ g/cm}^3$)、低电阻 ($< 20 \Omega \cdot \text{m}$)、高声波 ($> 80 \mu\text{s/ft}$)、高中子 ($> 25\%$);沙三段侵入岩具有三低两高的特点,即高密度 ($2.80 \sim 2.90 \text{ g/cm}^3$)、高电阻 ($80 \sim 300 \Omega \cdot \text{m}$)、低自然伽马 (30API)、低声波 ($50 \sim 60 \mu\text{s/ft}$)、低中子 ($< 25\%$)。因此,从岩性、储集类型上可将沙一段第 I 套火成岩和沙四段第 IV 套火成岩分为两个计算单元^[6]。

1.2 要重视火成岩岩相带、期次的划分

渤海湾盆地渤南油田罗 151 火成岩油藏,为侵入于古近系沙三段深湖相暗色生油岩-油页岩、灰质泥岩中的辉绿岩体及其上、下的变质岩。不同期次喷发的火成岩所形成的油藏,除了有不同的岩体产状、岩石学特征外,还具有不同的油水系统和压力系统^[7~10]。

依据岩体形态、岩石同位素年代、试井以及微电阻率成像测井等方面资料综合分析,认为罗 151 火成岩辉绿岩体由 3 期侵入组成。第一期与第二期同源或近源侵入岩,分布在火成岩顶面北高点——罗 151 井附近。第一期火成岩,岩石的石英含量为 $0 \sim 5\%$,石英表面平整,长石的次生变化较弱, $\text{K}-\text{Ar}$ 同位素年龄为 27.3 Ma 。第二期火成岩,岩石的石英含量为 $5\% \sim 15\%$,石英遭受溶蚀现象明显,长石及辉石的次生变化较强, $\text{K}-\text{Ar}$ 同位素年龄为 15.8 Ma 。第三期侵入岩分布在义 13 井附近。根据测试压力资料,义 13 与罗 151 火成

岩具有不同的压力系统和悬殊的产液能力。义 13 火成岩为常压系统,压力系数为 $0.90 \sim 1.08$,产液量较低,平均 5 t/d 。罗 151 火成岩为异常高压系统,平均压力系数为 1.40 ,产液能力高,为 $80 \sim 100 \text{ t/d}$ 。

不同期次的火成岩体,因为有不同的油水系统,并且第一期火成岩未获工业油流,第三期火成岩单井产能低,没有取心。第一、第三期火成岩暂时不能计算探明储量;仅第二期火成岩油藏达到探明储量计算标准^[11](图 2)。储量计算单元的划分必须综合其动、静态资料,细分火山岩相带、侵入期及油气水系统,因此只能以第二期火成岩油藏分布为探明储量计算单元。

2 准确识别缝洞型储层有效厚度

2.1 有效厚度划分标准

单井有效厚度取值的准确程度取决于有效厚度标准的制定,对于火成岩储层,有效厚度划分标准要在深入研究储层储集空间特征、储集类型的基础上,分岩相、储集类型确定含油气性、岩性、物性、电性下限标准。

对单一岩性、储集空间的地层,通过建立岩心分析孔隙度与电阻率、声波、密度、中子等测井值的关系,确定各种测井下限值。对岩性、储集空间复杂的地层,用单一测井曲线无法区分,通过建立岩心分析孔隙度与测井解释孔隙度的关系,得到测井解释孔隙度下限值。

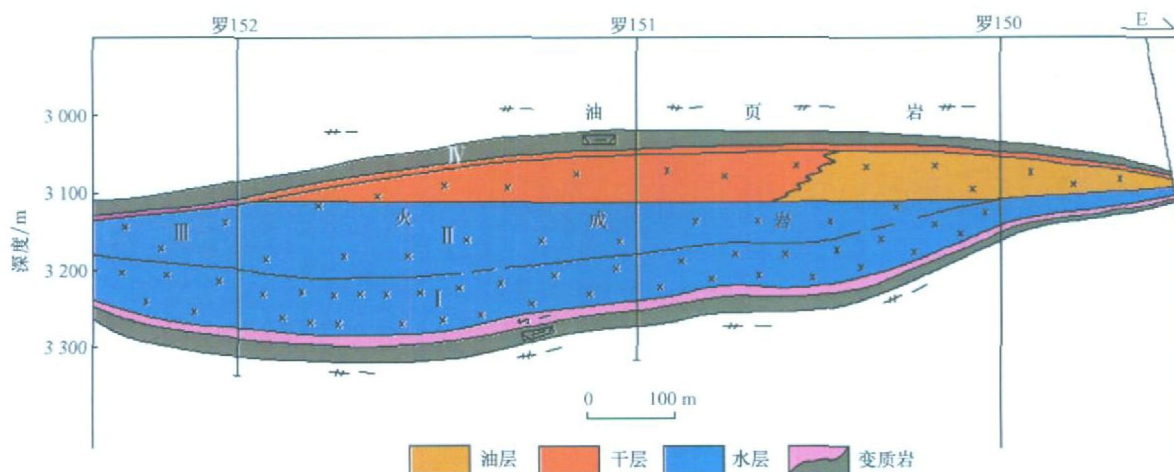


图 2 罗 151 火成岩体剖面

Fig. 2 Profile of igneous reservoirs in Well Lu-151

2.2 有效厚度识别

对于孔隙型的喷发岩和变质岩形成的火成岩油气藏,与常规的砂泥岩孔隙储层类似,储层、油气层易于识别。在裂缝-孔洞或裂缝-孔隙型储层中,由于裂缝常分布在基质电阻率较高的硬地层中,它既是储集空间、又是连通储集空间的通道,裂缝的发育有利于储层的次生改造、对油气的产出具有决定意义,因此裂缝识别是有效厚度划分的关键。

2.2.1 利用密度孔隙度与核磁孔隙度曲线识别气层

核磁共振测井(CMR)可确定与地层岩性无关的孔隙度,避免了火成岩岩相变化带来的测井解

释误差。但当孔隙内含油、气等流体时,使核磁共振孔隙度降低,密度测井曲线值偏低。利用密度测井孔隙度与核磁孔隙度曲线重叠,在核磁共振总孔隙度TCMR(黑色线)和密度孔隙度DPOR(红色线)之间的差异(黄色充填区)为地层含气所致,从而可有效识别气层(图3)。

2.2.2 利用 FM I测井资料识别储层

成像测井识别裂缝技术,实现了对裂缝-孔隙型储层的识别和定量描述技术,可以有效识别火成岩裂缝的类型、有效性、裂缝参数及分布。

在商河油田商741、渤南油田罗151火成岩油藏,利用FM I测井资料描述裂缝的宽度、密度、长度、视孔隙度参数(表2),判断储层的发育段,确定有效厚度^[5,8]。

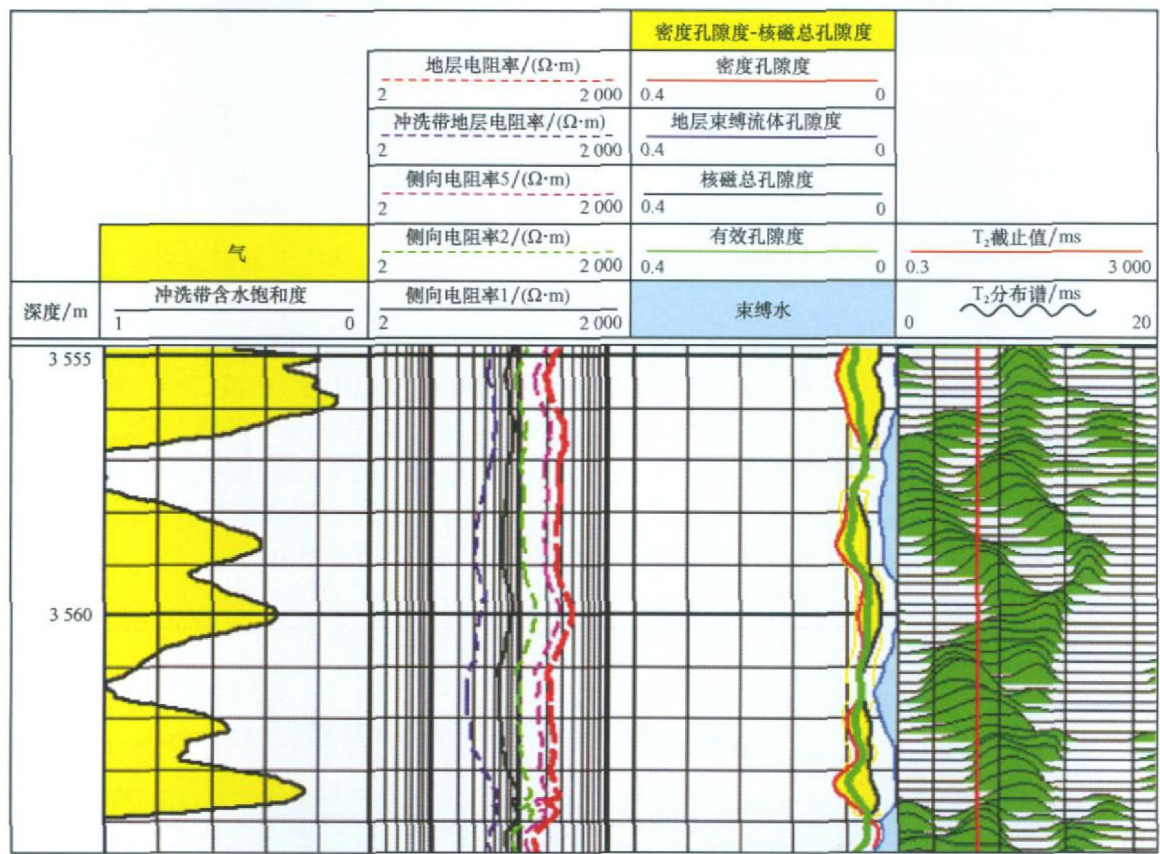


图 3 核磁测井气层解释成果
Fig. 3 Gas layer recognition through CMR log interpretation

表 2 火成岩油藏裂缝参数
Table 2 Fracture parameters of igneous reservoirs

区块	裂缝宽度 /mm	裂缝密度 /(条·m ⁻¹)	裂缝长度 /(m·m ⁻²)	裂缝视孔隙度, %	裂缝发育程度
商 741	0.10~0.20	2~8	2~7	0.02~0.30	发育
罗 151	0.03~0.25	1~2	1~3	0.01~0.07	一般

3 分储集类型、采用多种方法解释论证井点储量参数

由于火成岩油气藏岩性复杂, 原生与次生的孔隙以及裂缝系统形成了缝洞型双重孔隙结构。这种储层取心资料较少且不系统, 储层参数的定量解释主要依靠测井资料。

3.1 孔隙度解释模型

3.1.1 体积模型法

密度测井曲线与核磁共振测井相结合可进行流体校正, 得到地层真实的孔隙度, 建立孔隙度测井解释体积模型^[11]:

$$\rho_b = V_{ma}\rho_{ma} + V_{mf}\rho_{mf} + V_{hc}\rho_{hc} \quad (1)$$

$$TCMR = V_m H I_{mf} + V_{hc} H I_{hc} P_{hc} \quad (2)$$

$$V_{ma} + V_{mf} + V_{hc} = 1 \quad (3)$$

$$DMRP = V_{mf} + V_{hc} \quad (4)$$

式中: ρ_b , ρ_{ma} , ρ_{mf} , ρ_{hc} 分别为地层密度、骨架密度、流体密度、烃密度, g/cm^3 ;

V_{ma} , V_{mf} , V_{hc} 分别为骨架体积、流体体积、烃体积, 小数;

$TCMR$ 为地层核磁孔隙度, 小数;

$H I_{mf}$, $H I_{hc}$ 分别为流体核磁孔隙度、烃核磁孔隙度, 小数;

P_{hc} 为轻烃校正系数, 无量纲;

$DMRP$ 为有效孔隙度, %。

利用元素测井 (ECS) 资料计算地层岩石骨架参数。岩石的骨架物理参数由两个因素决定: 一是岩石的骨架密度; 二是岩石的化学成分, 即各种元素或矿物的含量。建立岩石骨架参数与岩石元素含量的下列关系式:

$$\rho_{ma} = f(W_{si}, W_{ca}, W_{na}, W_{fe}, W_{gd}, W_{k}, W_{ti}) \quad (5)$$

W_{si} , W_{ca} , W_{na} , W_{fe} , W_{gd} , W_{k} , W_{ti} 分别为 ECS 测井得到的硅、钙、钠、铁、钼、钾、钛元素的重量百分比含量。

该方法的优点是充分利用核磁测井不受岩性影响的特点, 消除由于火成岩矿物成分复杂而测井参数难以确定的因素, 可以直接测出不同岩性火成岩地层的有效孔隙度。缺点是对密度测井质

量要求较高, 对由于环境影响造成密度测井曲线失真的井不能应用, 缺少岩心资料对测井资料的刻度过程。

3.1.2 经验公式法

将核磁测井技术引入火成岩储层孔隙度计算, 用岩心分析孔隙度刻度核磁孔隙度, 用刻度后的核磁孔隙度与常规测井孔隙度建立关系, 用建立的关系式在没有核磁资料的井中计算有效孔隙度^[6 11]:

$$\Phi_m = f(\Phi_D) \quad \text{或} \quad \Phi_m = f(\Phi_s) \quad (6)$$

式中, Φ_m , Φ_D , Φ_s 分别为核磁孔隙度、密度孔隙度、声波孔隙度, %。

该方法的优点是岩心分析孔隙度与核磁孔隙度、常规测井孔隙度建立关系, 既用实际资料刻度了测井资料, 又扩大了核磁测井资料的应用范围。不足是必须有大量、有代表性的岩心分析资料。

3.2 饱和度解释模型

火成岩储层含油饱和度计算方法应根据不同的储集类型选择不同的解释模型。

3.2.1 阿尔奇公式法

$$S_w^n = \frac{abR_w}{\Phi^n R_t} \quad (7)$$

式中: S_w 为含水饱和度, 小数;

R_w 为地层水电阻率, $\Omega \cdot m$;

Φ 为有效孔隙度, 小数;

R_t 为地层电阻率, $\Omega \cdot m$;

a , b , m , n 为岩电参数, 无量纲。

如商河油田商 741 井沙一段喷发火成岩可应用该方法。对于孔隙性储层的火成岩, 仍然可以采用阿尔奇公式, 其优点是岩电参数易于求取, 但要求有一定的岩电实验资料。

3.2.2 双孔介质模型法

可利用双孔介质模型法, 建立 $Z-L$ 饱和度方程。

① 水平裂缝-孔隙型地层:

$$C_t = \Phi_b^2 S_{wb}^2 C_w + \Phi_f^m C_m / k_1 + \Phi_{cl}^2 C_{wcl} \quad (8)$$

$$S_w = [S_{wb}(\Phi - \Phi_f) + 0.01\Phi_f] / \Phi \quad (9)$$

②垂直裂缝-孔隙型地层:

$$C_t = \Phi_b^2 S_{wb}^2 C_w + \Phi_f^{mf} C_m + \Phi_{cl}^2 C_{wcl} \quad (10)$$

$$S_w = [S_{wb}(\Phi - \Phi_f) + 0.01\Phi_f] / \Phi \quad (11)$$

③网状裂缝-孔隙型地层:

$$C_t = \Phi_b^2 S_{wb}^2 C_w + 0.01\Phi_f^{mf} C_m + \Phi_{cl}^2 C_{wcl} \quad (12)$$

$$S_w = [S_{wb}(\Phi - \Phi_f) + 0.01\Phi_f] / \Phi \quad (13)$$

式中: C_b , C_w , C_m , C_{wcl} 分别为地层电导率、地层水电导率、泥浆滤液电导率、岩块电导率, S/m;

Φ , Φ_b , Φ_{cl} , Φ_f 分别为地层孔隙度、裂缝孔隙度、泥岩孔隙度、岩块孔隙度, %;

S_{wb} 为岩块含水饱和度, %;

mf 为孔隙度指数, 无量纲;

k_1 为畸变系数, 无量纲。

采用裂缝-孔隙型双重介质模型, 可有效求取裂缝对含油饱和度的贡献, 真实反映裂缝对总含油饱和度的贡献。

3.2.3 毛管压力曲线法

利用压汞样品分析资料, 得出气藏的平均毛管压力曲线, 计算各孔喉分布区的渗透率贡献值。当累计渗透能力达到 99.9% 时, 对应的孔喉半径下限值所对应的汞饱和度值即为该气藏的平均原始含气饱和度。该方法的优点是: 与储层岩性、储集类型无关, 可直接求出油气藏的总饱和度; 不足是压汞资料的代表性较局限。

3.2.4 核磁共振测井法

理论上核磁共振 T_2 分布谱和毛管压力曲线都表示与孔隙尺寸和孔隙吼道相关的孔隙体积分布, 孔隙吼道决定了毛管压力大小和储层饱和度的高低。因此, 利用核磁共振 T_2 分布谱计算地层连续的毛管压力曲线, 可以得到每一深度点的毛管压力曲线, 有利于储层认识和含气饱和度计算。在 A1 井把核磁共振 T_2 分布谱分别以对数和线性刻度投影在毛管压力曲线上, 可以看到核磁共振 T_2 分布谱与毛管压力曲线有很好的-致性, 验证了利用核磁共振 T_2 分布谱计算毛管压力曲线的可行性 (图 4)。岩心毛管压力曲线与核磁共振计算的毛管压力曲线相结合就可以计算储层流体饱和度。

该方法将测井资料与压汞资料建立对应关系, 充分利用了测井资料纵向连续性、平面资料多的特点与压汞资料可求总饱和度的优点; 缺点是核磁共振测井成本太高。

4 储量参数空间展布确定

由于火成岩油藏储层的非均质性较强, 储层的横向分布规律需要充分利用地震资料来预测^[12-13]。商 741 火成岩采用多井测井约束反演技术, 定量描述火成岩的空间分布。由于火成岩与围岩具有较大的波阻抗差, 在测井和地震资料上

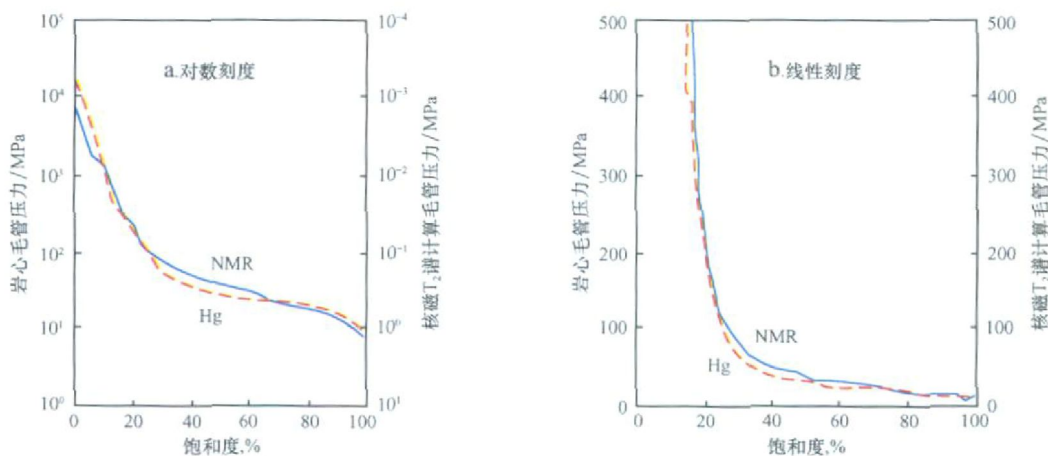


图 4 A1 井毛管压力曲线对比

Fig. 4 Correlation of capillary pressure curves from well A1
(实线为核磁共振 T_2 分布谱计算的毛管压力, 虚线为岩心毛管压力。)

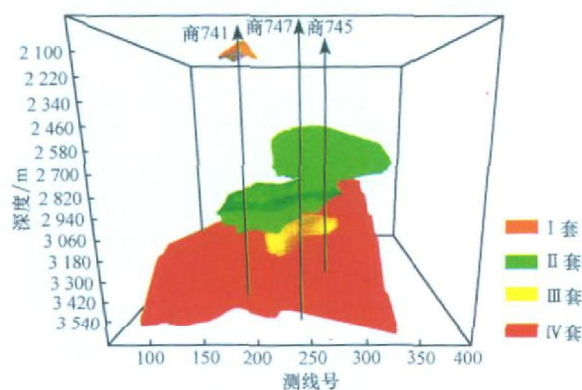


图 5 商 741 火成岩空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of igneous rocks
in Well Shang-741

有明显的特征, 因此可以将地震与测井技术相结合, 通过本区层速度的分析, 确定火成岩的层速度下限。利用测井资料对 Seislog 剖面进行标定, 然后由十字剖面横向外推, 确定第 I—IV 套火成岩的空间展布 (图 5); 再根据各套火成岩储层预测厚度的平面分布, 结合井点测井解释有效厚度, 求取火成岩油藏有效厚度分布。该项技术解决了井点以外储层厚度难确定的问题, 从而为含油面积确定、单元有效厚度取值提供基础。

5 结论

1) 充分利用火成岩油气藏的各种静、动态资料, 在测井参数解释结果的基础上, 结合地震储层描述技术, 进行各种参数的井间横向对比, 分岩性、储集类型、相带、期次、油气水系统合理划分储量计算单元, 是火成岩油气藏储量计算的关键。

2) 从火成岩油气藏的测井响应机理出发, 充分利用各种化验分析资料和测井新技术, 根据油气藏特征建立区域性的岩性及储层识别模式, 从测井属性上定量计算火成岩矿物成分、识别岩性, 是火成岩油气藏储量参数定量评价的前提。

3) 以岩性、物性、电性、含油(气)性 4 性关系研究为基础, 分岩性、分储集类型建立以火成岩特有孔隙结构为基础的测井解释模型, 研究裂缝的测井响应, 对裂缝进行半定量—定量评价, 建立起火成岩储层的分类及评价标准, 准确计算含油面积、有效厚度、孔隙度、饱和度参数, 是火成岩油气藏储量计算的核心。

参 考 文 献

- 1 周海民, 马乾, 南堡凹陷北堡地区火成岩储层特征 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 36~38
- 2 肖尚斌, 姜在兴. 火成岩油气藏分类初探 [J]. 石油实验地质, 1999, 21(4): 324~327
- 3 张新培, 邓宏文, 张吉昌, 等. 辽河拗陷东部凹陷欧—黄地区火山岩储集层特征及有利储层预测 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(3): 370~376
- 4 毛凤鸣. 高邮凹陷北斜坡辉绿岩形成时期的确定及其与油气水的关系 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(6): 19~20
- 5 操应长, 姜在兴, 邱隆伟. 山东惠民凹陷商 741 块火成岩油藏储集空间类型及形成机理探讨 [J]. 岩石学报, 1999, 15(1): 129~136
- 6 许风光, 邓少贵, 范宜仁, 等. 火成岩储层测井评价进展 [J]. 测井与射孔, 2006, 9(2): 1~5, 20
- 7 马乾, 鄂俊杰. 黄骅拗陷北堡地区火成岩储层评价 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4): 337~340, 344
- 8 钱崢. 济阳拗陷罗 151 块火成岩油藏储集层概念模型 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 26(6): 72~74
- 9 谭俊敏, 孙志信. 火成岩侵入形成的构造物理模拟实验及实例 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 324~328
- 10 齐井顺. 松辽盆地北部深层火山岩天然气勘探实践 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 590~596
- 11 高兴军, 冉启全, 肖毓祥, 等. 火成岩双重介质油藏测井参数评价技术 [J]. 特种油气藏, 2006, 13(1): 32~35
- 12 刘为付. 松辽盆地徐家围子断陷深层火山岩储层特征及有利区预测 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 115~119
- 13 赵国连, 张岳桥. 大庆火山岩地震反射特征与综合预测技术 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 44~46

(编辑 李 军)