

一种改进的 PRT 分类方法及测井解释

黎焕兴 冯欢 何梦成 吴小峰 张昌炜

(长江大学地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉 430100)

摘要: 非均质性碳酸盐岩储层岩石分类 PRT (Physical Rock Type) 的影响因素较多且复杂, 以样本井测井解释数据为例。本文选取了 3 个影响非均质性碳酸盐岩储层划分的因素作为训练样本, 基于 Thomeer 函数针对研究区构建一综合孔隙结构参数, 并根据新参数的分布规律进行岩石储层划分。

关键词: 非均质性; 碳酸盐岩; PRT; 储层划分

0 引言

碳酸盐岩储层岩石分类 PRT (Physical Rock Type) 即是在油藏描述阶段, 储层具强非均质性背景下, 将储层进行划分为若干相对均质的类别的过程。研究表明, 全球大部分油气产自碳酸盐岩储集层。然而, 碳酸盐岩结构复杂: 宏观来看, 碳酸盐岩沉积体系多样、成岩作用复杂; 微观来看, 碳酸盐岩孔隙结构复杂, 孔喉分布呈现多个峰值。这些导致了碳酸盐岩储层类型划分困难, 很多方法都有一定的局限性。本次项目旨在寻找一个结合渗透率、孔隙大小、孔喉半径以及非均质性的综合孔隙结构参数, 并综合孔隙结构参数的分布规律进行岩石划分储层类型并预测物性空间分布, 为相关石油研究工作做出一定的贡献。

1 研究方法

现今国内外在非均质性强的碳酸盐岩储层分类可归属于地质、岩石物理、生产动态三大类, 但多受单因素控制。

1.1 基于地质成因的岩石分类

Winland R35 分类方法又称孔喉几何形状法, 是提出的一种利用孔喉半径 R35 来划分和评价岩石物理流动单元的方法。Winland R35 方法描述了地层岩石孔喉尺寸与孔隙度和渗透率的关系, 该方法不考虑地层中岩石的沉积过程, 直接通过岩石孔喉结构划分岩石类型, 反映了不同岩石类型地层在目前状态下的渗流能力。它与孔隙度和渗透率通常具有关系为:

$$\lg R35 = 0.732 + 0.588 \lg K - 0.864 \lg \Phi \quad \text{式 1}$$

式 1 中:

R 35 为压汞实验过程中进汞饱和度为 35% 时对应的孔喉半径, μm ; K 为渗透率, mD; Φ 为孔隙度, %。

按照 winland R35 方法的定义, 岩石孔喉半径分为 5 个级别 (渗流能力): ①巨孔喉: $R35 > 10 \mu\text{m}$; ②大孔喉: $2.0 \mu\text{m} < R35 \leq 10.0 \mu\text{m}$; ③中孔喉: $0.5 \mu\text{m} < R35 \leq 2.0 \mu\text{m}$; ④微孔喉: $0.1 \mu\text{m} \leq R35 \leq 0.5 \mu\text{m}$; ⑤纳米孔喉: $R35 < 0.1 \mu\text{m}$ 。

Winland R35 分类方法的优点是利用了毛管压力这一特征元素与孔喉半径的关系, 划分的岩石能反映不同岩石类型的渗流能力, 并且能通过取心井的测井曲线借

用 KNN 算法判断出未取心井的岩石类型。但是缺点是忽略了毛管压力对应的所有吼道都对对渗透率起作用, 所以划分岩石类型只适用于毛管压力曲线相似的样品 (如图 1 所示)。

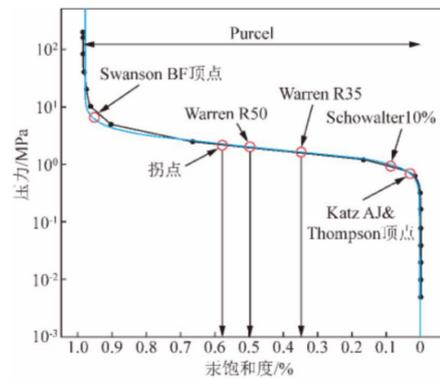


图 1 毛管压力曲线拟合及重要孔喉分布点 (颜其彬等, 2015, 修改)

1.2 基于生产动态的岩石分类

FZI/RQI 分类方法是一个把结构和矿物地质特征、孔喉特征结合起来判定孔隙几何特征的参数, 是反映孔隙对流体渗流影响的关键指标, FZI 值与储层物性呈正相关关系。FZI (流动带指标) 和 RQI (储层品质因子) 是由 Amaefule 等 (1993) 通过大量的研究, 基于渗透率和有效孔隙度的关系提出的两个储层物性分类的指标, 用来评价储层的渗流能力, 二者值与储层岩石渗流能力呈现正相关性。计算 FZI 和 RQI 的计算公式为:

$$FZI = (0.0314 \sqrt{\frac{K}{\Phi_e}}) \times [(1 - \Phi_e) / \Phi_e] \quad \text{式 2}$$

$$RQI = FZI \times \Phi_z \quad \text{式 3}$$

式 2 和式 3 中, Φ_e 表示有效孔隙度, %; Φ_z 表示孔隙体积与杂基质体积之比, 即: $\Phi_e / (1 - \Phi_e)$, % Haro (2004)、Kharrat 等 (2009)、Burrowes 等 (2010) 将 FZI/RQI 应用于中东等地区碳酸盐岩岩石分类中, 流动单元划分如图所示。由公式 $FZI = RQI / \Phi_z$ 可知: 在 RQI- Φ_z 双对数坐标图上, 具有相同 FZI 值的样品点都分布在斜率为 1 的同一条直线上, 它们具有相似的孔喉结构特征, 属于同一类流动单元; 具有不同 FZI 值的样品点分布在相互平行的直线上, 分属于不同的流

动单元（如图 2 所示）。FZI/RQI 分类方法的优点是利用了渗透率和有效孔隙度这两个特征元素，借助同类样品一般具有较好的孔渗关系，无需借助压汞等测试分析手段。其缺点是 FZI 的定义与划分流动单元相矛盾，即孔隙度的变化会引起 FZI 的变化，但是 FZI 在同一流动单元与孔隙度无关，即 FZI 函数建立关系不恰当且没有任何地质意义。

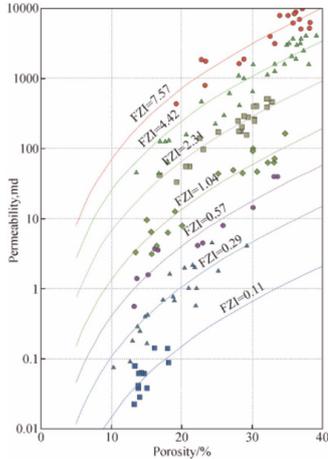


图 2 FZI 法岩石物性分类 (Rebelle, 2014)

1.3 基于 PRT 的岩石分类

Thomeer 函数是依据压汞毛管压力曲线在双对数坐标下，显示一种双曲线的数学关系进行的分类方法（如图 3 所示）。Thomeer 函数表达式为：

$$\frac{S_{Hg}}{B_v} = e^{-\frac{G}{\lg P_c}} \quad \text{式 4}$$

Thomeer 研究不同 G 值下 K 与 G、P_d 和 S_{b∞} 之间的关系，提出经验公式：

$$K = 3.8068G^{-1.3334} \left(\frac{S_{b\infty}}{P_d}\right)^2 \quad \text{式 5}$$

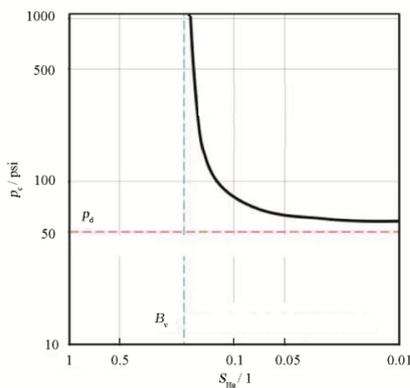


图 3 压汞毛细管压力曲线双曲线形态特征 (Thomeer, 1960)

式 4 和式 5 中：S_{Hg} 为进汞饱和度，1；S_{b∞} 为毛细管压力无穷大时得含汞饱和度，V_{Hg} 为毛细管压力无穷大即曲线接近垂直渐近线对应的进汞体积数，1；B_v 为毛细管压力无穷小即曲线接近水平渐近线对应的进汞体积数，1；P_c 为进汞压力，psi；P_d 为初始排驱压力，psi；G 为孔隙几何因子，描述毛细管压力曲线弯曲的程度，

反映孔喉的形态，1。

2 一种改进的 PRT 分类方法

上述分析得到，孔隙大小、孔喉半径，以及非均质性（孔隙集中分布程度，最大孔喉半径区间）均对 PRT 储层品质有贡献。选取这 4 个影响非均质性碳酸盐岩储层划分的因素作为训练样本，针对研究区构建一综合孔隙结构参数，并根据新参数 mode* 的分布规律进行岩石储层划分。

表征参数的提取。

由 Thomeer 得：

$$B_v = \frac{e^{-\frac{G}{\lg P_c}}}{S_{Hg}} \quad \text{式 6}$$

利用压汞毛管压力曲线提取孔喉的 G₁、P_{d1}、P_c、S_{Hg} 等 Thomeer 参数。

孔喉半径：

$$\text{Mode} = R_p = \exp(-1.15G_1) \times \frac{107}{P_{d1}} \quad \text{式 7}$$

其中 G₁ 表征孔喉均质性，G₁ 越小，均质性越强。

由上式（6）可得大孔喉的孔隙大小 B_{v1}，为了提取综合孔隙结构参数 mode*，利用 739 块岩心数据，建立渗透率（K）与 R_p、G₁、B_{v1} 的统计关系。

$$\ln(K) = 1.428 \ln(R_p) + 0.053 B_{v1} - 0.528 G_1 + 0.019 \quad \text{式 8}$$

$$\ln(K) = 1.428 \ln\left(e^{(0.037 B_{v1} - 1.57 G_1)} \times \left(\frac{107}{P_{d1}}\right)\right) + 0.019 \quad \text{式 9}$$

令 e^(0.037B_{v1}-1.57G₁) 为 mode*，构建渗透率 K 与 mode* 的模型（如图 4 所示）。

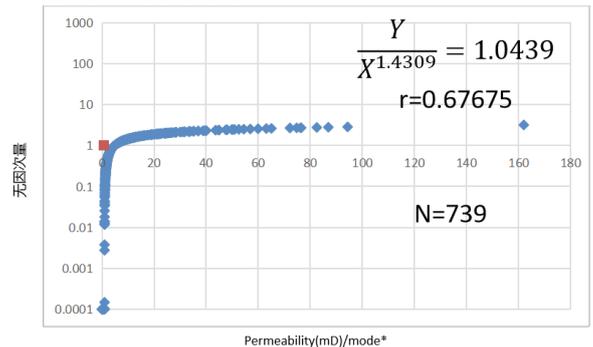


图 4 基于压汞资料的模型建立

由图 4 可知，在强非均质性碳酸盐岩储层，该模型的相关系数 r=0.67675，即可认为综合孔隙结构参数表现为均一性。

3 测井解释及结论

实验样本数据源自样本井解释成果，去除顶深、底深等无用数据，建立渗透率与孔喉半径、孔隙大小以及非均质性（孔隙集中分布程度，最大孔喉半径区间）4 个影响因素的统计关系得到综合孔隙结构参数。将反映储层孔隙结构的参数绘制分布图，在斜率变化处即可划

分储层类型，其中不同斜率代表不同的孔隙结构、不同的储层类型，其对应储层的解释结论作为预测结果进行实验统计分析，下图为 2864-2975m 井段测井曲线（如图 5 所示）。

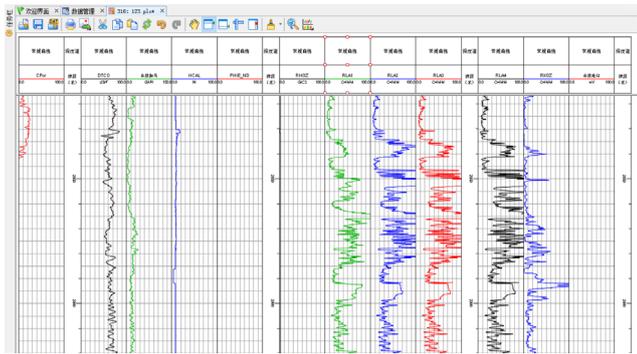


图 5 2864-2975 井段测井曲线

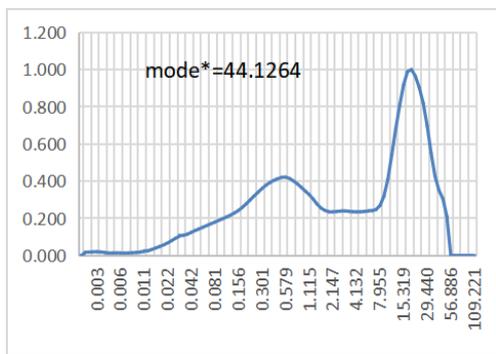


图 6 井深 2978-2982 孔喉贡献曲线

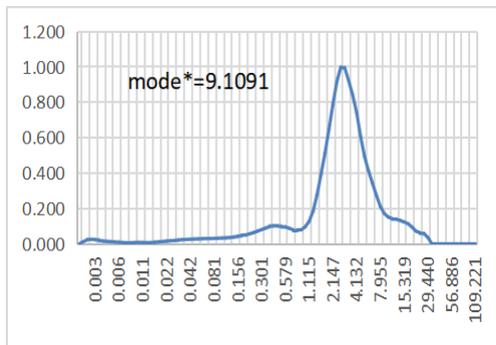


图 7 井深 2969-2972 孔喉贡献曲线

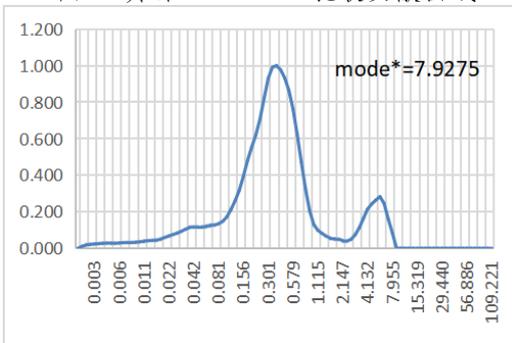


图 8 井深 2860-2864 孔喉贡献曲线

随着 mode* 参数的变化，占孔喉主导贡献率的孔喉半径和均质性不同，即可认为综合孔隙参数 mode* 能反映强非均质性储层的渗透性质，并可依据该参数分布规律进行储层划分（如图 6- 图 11 所示）。相比于传统的分类方法 FZI、R35、Thomeer 的分类方法，它

弥补了 FZI 和 Thomeer 方法中无地质意义的缺点，也解决了 R35 中各孔喉都对渗透率贡献的问题。它继承了 Thomeer 函数法在大量微孔隙的岩石分类精确的优点，但无法解决压汞毛管压力曲线评价参数难获取的问题，其次该模型与岩心数据模拟情况有待改善且未与其他方案进行优劣对比。

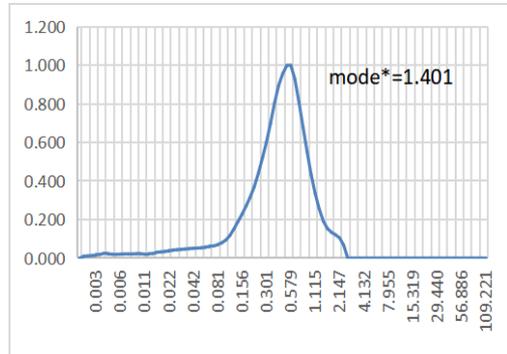


图 9 井深 2971-2975 孔喉贡献曲线

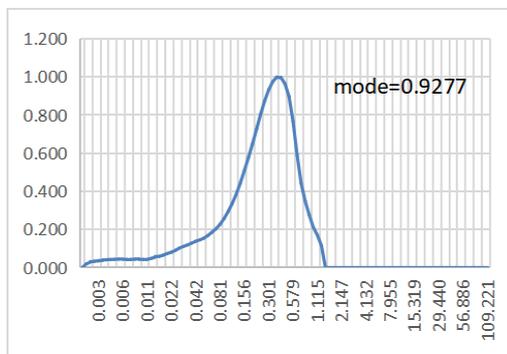


图 10 井深 2896-2900 孔喉贡献曲线

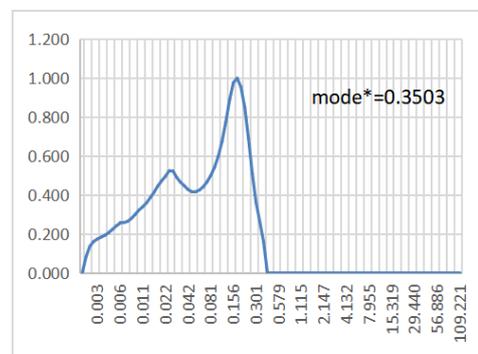


图 11 井深 2891-2895 孔喉贡献曲线

参考文献：

- [1] 谭学群, 廉培庆, 邱茂君, 等. 基于岩石类型约束的碳酸盐岩油藏地质建模方法——以扎格斯盆地碳酸盐岩油藏 A 为例 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(04): 558-563.
- [2] 刘航宇, 田中元, 郭睿, 等. 复杂碳酸盐岩储层岩石分类方法研究现状与展望 [J]. 地球物理学进展, 2017(05): 2057-2064.
- [4] 王裕民. 碳酸盐岩储层的渗透率评价方法对比研究 [J]. 硅谷, 2012(06): 100-100.

作者简介：

黎焕兴 (2000-)，男，汉族，湖北黄冈人，本科在读，主要从事测井方面的研究工作。