

doi: 10.11720/wtyht.2017.4.26

夏培.含泥质致密砂岩储层三孔隙导电模型[J].物探与化探,2017,41(4):748-752.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.26

Xia P. A triple-porosity conducting model for shaly tight sandstone reservoir[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(4): 748-752. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.26

# 含泥质致密砂岩储层三孔隙导电模型

夏 培

(国家知识产权局专利局 专利审查协作湖北中心, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 泥质的存在及复杂的孔隙结构导致致密砂岩储层导电规律的复杂性, 给其饱和度评价带来了极大的困难, 而储层饱和度评价的关键在于岩电参数的准确获取。前人关于储层胶结指数  $m$  的研究大多侧重于复杂孔隙结构的影响, 对泥质影响则涉及较少。笔者基于 Waxman-Smith 泥质砂岩导电模型及 Aguilera 三孔隙导电模型, 利用串并联导电理论建立了含泥质致密砂岩三孔隙导电模型, 提出了准确描述由泥质、裂缝、非连通孔洞构成的致密砂岩导电规律的方法。采用单因素分析法研究泥质及复杂孔隙结构对胶结指数  $m$  的影响, 发现  $m$  随着裂缝孔隙度的增大而减小, 随着孤立孔洞孔隙度的增大而增大, 随着泥质含量的增大而减小。岩芯实验数据验证表明, 文中给出的模型能够准确描述含泥质致密砂岩储层的导电规律以及定量评价胶结指数  $m$ 。

**关键词:** 致密砂岩储层; 孔隙结构; 三孔隙导电模型; 胶结指数

**中图分类号:** P631.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2017)04-0748-05

## 0 引言

近年来, 随着北美致密油气的成功开采, 致密砂岩油气藏勘探开发在全球范围内越来越受重视。就探明储量与技术实力而言, 致密砂岩油气是中国最具现实勘探开发意义的非常规油气资源<sup>[1]</sup>。由于致密砂岩储层经历了非常强的压实、胶结、溶蚀等成岩作用, 储层孔隙类型多样结构复杂, 其可能的孔隙包括原生粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、微裂隙、印模孔等<sup>[2]</sup>。低渗透率的致密砂岩储层往往粘土矿物发育, 使得油气层与水层电阻率差异很小, 储层流体识别难度大。较高的泥质含量以及复杂的孔隙结构对致密砂岩储层的电阻率影响大<sup>[3]</sup>, 使得致密砂岩储层饱和度评价异常困难。国内外许多学者针对多孔隙结构岩石导电模型做了大量的相关工作。1962 年 Towle 运用理论模型验证了孤立孔洞型储层胶结指数  $m$  值相对较大, 变化范围在 2.67~7.3 之间<sup>[4]</sup>; 裂缝型储层胶结指数  $m$  值则小于纯砂岩理论  $m$  值 2.0。1976 年 Aguilera 在 Towle 模型基础上得

出水平裂缝胶结指数  $m$  理论值为 1.0, 并认为复合胶结指数随着裂缝孔隙度的增加而减小<sup>[5]</sup>。1989 年 Serra 分别针对裂缝性储层以及非连通孔洞储层建立胶结指数  $m$  与储层总孔隙度之间的关系<sup>[6]</sup>。2003 年 Aguilera 基于串并联导电理论提出了改进的双孔隙导电模型, 并建立了复合胶结指数  $m$  与总孔隙度之间的关系<sup>[7]</sup>。2004 年 Aguilera 首次提出综合考虑基质孔隙、裂缝以及孤立孔洞的三孔隙导电模型, 用基质孔隙与裂缝并联, 然后再与非连通孔洞串联的导电模型来表征<sup>[8]</sup>。2011 年 Al-Ghamdi 在 Aguilera 三孔隙导电模型基础上改进了基质孔隙度计算方法, 提出了更加精确的三孔隙导电模型<sup>[9]</sup>。2008 年张丽华将 Aguilera 三孔隙导电模型运用到火成岩储层电阻率饱和度评价中<sup>[10]</sup>, 取得了良好的运用效果。2006 年 Berg 以基于麦克斯韦电磁理论的有效介质理论为理论基础, 来研究多孔隙岩石的导电模型, 但模型中的参数需要迭代计算获取, 实际应用实例较少, 该方法还处于理论研究阶段<sup>[11]</sup>。2015 年田瀚利用多种测井技术, 并结合地质、地震等相关手段展开了针对碳酸盐岩缝洞型储层测井评价方法

收稿日期: 2016-09-02; 修回日期: 2017-05-05

作者简介: 夏培(1989-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 毕业于中国石油大学(北京)地球探测与信息技术(测井方向)专业, 现工作于国家知识产权局专利局专利审查协作湖北中心, 研究方向为地球物理领域专利审查、专利分析。

万方数据

的研究<sup>[12]</sup>。

上述学者关于胶结指数的研究大多是侧重于复杂孔隙结构的影响,对泥质影响则涉及较少。笔者基于 Waxman-Smith 泥质砂岩导电模型以及 Aguilera 三孔隙导电模型,利用串并联导电理论建立了含泥质致密砂岩三孔隙导电模型,提出了准确描述由泥质、裂缝、非连通孔洞构成的致密砂岩导电规律的方法。

## 1 含泥质致密砂岩三孔隙导电模型建立

致密砂岩具有以原生孔隙、次生孔隙以及天然裂缝构成的复杂孔隙结构,低渗透率的致密砂岩储层往往含有较重的泥质。致密砂岩孔隙结构如图 1 所示。在本文模型中将骨架、基质孔隙及泥质作为整体—泥质砂岩导电单元,其电阻率通过 Waxman-Smith 模型求得。针对致密砂岩建立泥质砂岩导电单元、裂缝、非连通孔洞构成的三孔隙导电模型。图 2 是岩石各组成部分体积模型。基于串并联导电理论,致密砂岩三孔隙导电模型可模拟成泥质砂岩导电单元和天然裂缝并联导电,此并联网路再与非连通孔洞串联形成导电网络。图 3 表示岩石各部分串并联导电关系。

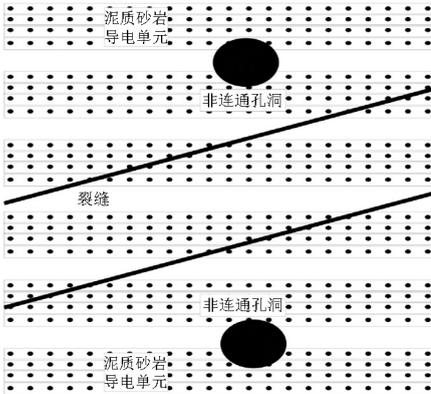


图 1 含泥质致密砂岩孔隙结构示意图

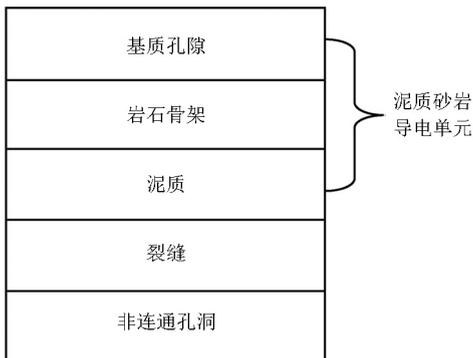


图 2 含泥质致密砂岩体积模型

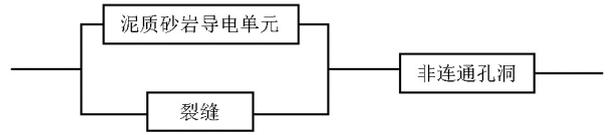


图 3 含泥质致密砂岩串并联导电模型

三孔隙模型总孔隙度为:

$$\phi = \phi_b(1 - \phi_f - \phi_v) + \phi_f + \phi_v = \phi_m + \phi_f + \phi_v \quad (1)$$

其中: $\phi$  为系统总孔隙度; $\phi_b$  为有效基质孔隙度,即基质孔隙体积除以基质孔隙体积与岩石骨架体积之和; $\phi_m$  为总基质孔隙度,即基质孔隙体积除以岩石总体积; $\phi_f$  为裂缝孔隙度,即裂缝体积除以岩石总体积; $\phi_v$  为非连通孔洞孔隙度,即非连通孔洞体积除以岩石总体积。

将骨架、基质孔隙以及泥质作为整体—泥质砂岩导电单元。通过 Waxman-Smith 模型得到计算泥质砂岩导电单元电导率公式<sup>[13]</sup>:

$$C_{\text{osh}} = \frac{1}{F^*} (C_w + BQ_v) \quad (2)$$

其中: $C_{\text{osh}}$  为泥质砂岩导电单元电导率, S/m;  $C_w$  为地层水溶液电导率, S/m;  $F^*$  为总孔隙度与泥质砂岩相等的纯砂岩地层因素;  $B$  为交换阳离子当量电导率, (S/m)/(meq/cm<sup>3</sup>);  $Q_v$  为单位孔隙阳离子交换容量, meq/cm<sup>3</sup>。

将式(2)表示成电阻率形式:

$$R_{\text{osh}} = \frac{F^*}{\frac{1}{R_w} + BQ_v} \quad (3)$$

其中: $R_{\text{osh}}$  为泥质砂岩导电单元电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $R_w$  为地层水溶液电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ 。

当致密砂岩储层同时含有泥质砂岩导电单元、裂缝以及非连通孔洞时,基于串并联导电理论,致密砂岩三孔隙导电模型可模拟成泥质砂岩导电单元和天然裂缝并联导电,此并联网路再与非连通孔洞串联形成导电网络。

三孔隙模型中泥质砂岩导电单元和天然裂缝并联导电方程为:

$$\frac{1}{R_{\text{of}}} = \left( \frac{\phi_f}{1 - \phi_v} \right) \frac{1}{R_w} + \left( \frac{1 - \phi_f - \phi_v}{1 - \phi_v} \right) \frac{1}{R_{\text{osh}}} \quad (4)$$

其中, $R_{\text{of}}$  为泥质砂岩导电单元和天然裂缝的并联导电电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ 。

由式(4)得:

$$\frac{1}{R_{\text{of}}} = \frac{(1 - \phi_v) R_w R_{\text{osh}}}{\phi_f R_{\text{osh}} + (1 - \phi_f - \phi_v) R_w} \quad (5)$$

泥质砂岩导电单元和天然裂缝并联形成的导电网络与非连通孔洞串联导电方程为:

$$R_{ofv} = (1 - \phi_v)R_{of} + \phi_v R_w \quad (6)$$

其中,  $R_{ofv}$  为饱含水时含泥质三孔隙致密砂岩系统电阻率,  $\Omega \cdot m$ 。

根据阿尔奇公式<sup>[14]</sup>, 纯净砂岩地层因素  $F^*$ , 含泥质三孔隙致密砂岩地层因素  $F$  分别为:

$$F^* = R_o/R_w = \phi_b^{-m_b} \quad (7)$$

式中:  $R_o$  为饱含水纯砂岩电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $m_b$  为纯砂岩胶结指数。

$$F = R_{ofv}/R_w = \phi^{-m} \quad (8)$$

式中,  $F$  为含泥质三孔隙致密砂岩地层因素,  $m$  为含泥质三孔隙致密砂岩胶结指数。

将式(3)、(5)、(7)、(8)代入式(6), 等式两边同时除以  $R_w$  可得:

$$\phi^{-m} = \phi_v + \frac{(1 - \phi_v)^2}{\phi_f + (1 - \phi_f - \phi_v)(1 + BQ_v R_w)/\phi_b^{-m_b}} \quad (9)$$

含泥质三孔隙致密砂岩胶结指数  $m$  为:

$$m = \frac{\lg \left[ \phi_v + \frac{(1 - \phi_v)^2}{\phi_f + (1 - \phi_f - \phi_v)(1 + BQ_v R_w)/\phi_b^{-m_b}} \right]}{-\lg \phi} \quad (10)$$

## 2 胶结指数影响因素分析

根据式(10)得到计算含泥质三孔隙致密砂岩胶结指数  $m$  的公式, 假设  $R_w = 0.5 \Omega \cdot m$ ,  $m_b = 2.0$ , 分别讨论了裂缝孔隙度、非连通孔洞孔隙度以及泥质(单位孔隙阳离子交换容量)对胶结指数  $m$  的影响。

式(10)中参数  $B$  确定方法参考 Waxman 和 Smith 提出的经验公式<sup>[13]</sup>:

$$B = 3.83 \times [1 - 0.83 \exp(-0.5/R_w)] \quad (11)$$

### 2.1 裂缝孔隙度

令  $Q_v = 0.5 \text{ meq/cm}^3$ ,  $\phi_v = 0.01$ , 根据式(10)给出裂缝孔隙度  $\phi_f$  分别为 0、0.01、0.02、0.05、0.1 的含泥质三孔隙致密砂岩胶结指数  $m$  与总孔隙度的关系图。从图 4 可以看出裂缝的存在使得  $m$  小于纯砂岩  $m$  值 2.0, 且裂缝孔隙度越大,  $m$  取值越小。

### 2.2 孤立孔洞孔隙度

令  $Q_v = 0.5 \text{ meq/cm}^3$ ,  $\phi_f = 0.01$ , 根据式(10)给出非连通孔洞孔隙度  $\phi_v$  分别为 0、0.01、0.05、0.1 的含泥质三孔隙致密砂岩胶结指数  $m$  与总孔隙度的关系。从图 5 可以看出, 孤立孔洞的存在对胶结指数取值有较大的影响,  $m$  随着非连通孔洞孔隙度增大而增大。万方数据

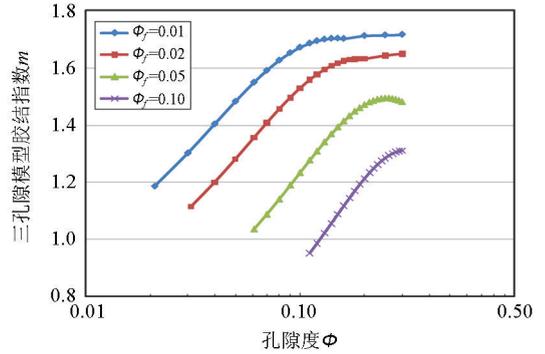


图 4 裂缝孔隙度不同时胶结指数  $m$  与总孔隙度关系

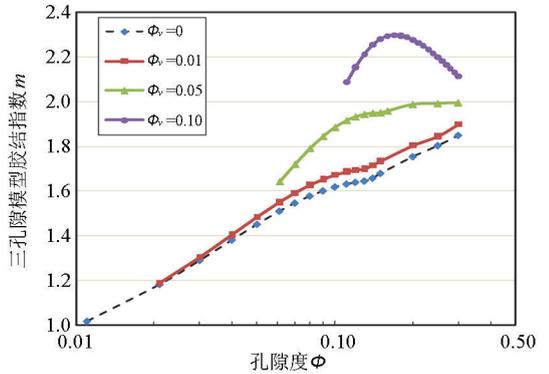


图 5 非连通孔洞孔隙度不同时胶结指数  $m$  与总孔隙度关系

### 2.3 泥质含量

令  $\phi_v = 0.01$ ,  $\phi_f = 0.01$ , 根据式(10)给出单位孔隙阳离子交换容量  $Q_v$  分别为 0、0.1、0.5、1.0、2.0  $\text{meq/cm}^3$  的含泥质三孔隙致密砂岩胶结指数  $m$  与总孔隙度的关系图(图 6)。用单位孔隙阳离子交换容量来表征泥质含量, 单位孔隙阳离子交换容量越大意味着岩石泥质含量越高。从图 6 可以看出,  $m$  随着单位孔隙阳离子交换容量的增大而减小。与前人研究结果<sup>[5,7-9]</sup>一致, 复杂的孔隙结构对胶结指数影响很大; 如此之外, 泥质的存在也对胶结指数有着不小的影响。

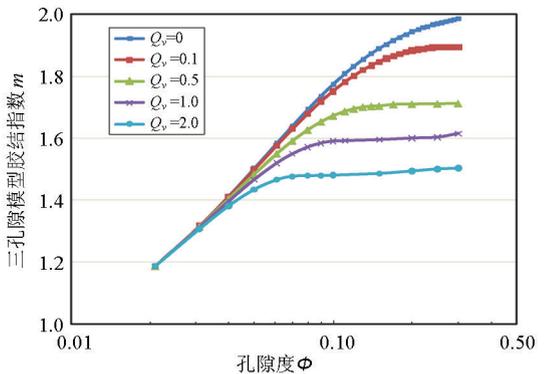


图 6 单位孔隙阳离子交换容量不同时胶结指数  $m$  与总孔隙度关系

### 3 模型验证

将 Byrnes 于 2009 年发表的 Mesaverd 致密砂岩岩芯实验资料<sup>[15]</sup> 作为实例来验证本文理论模型的正确性。北美 Mesaverd 致密砂岩孔隙度在 3% ~ 15% 之间,孔隙结构复杂,裂缝及非连通印模孔隙等次生孔隙发育;储层泥质含量在 5% ~ 20% 之间,属

于含泥质次生孔隙发育的致密砂岩储层。利用建立的含泥质致密砂岩三孔隙导电模型,基于式(10)来计算储层胶结指数  $m$  值,并与岩芯实验  $m$  值进行对比,计算结果如表 1 所示。计算结果表明运用本文模型计算的  $m$  值与岩芯实验的  $m$  值之间误差非常小,相对误差不超过 6%。由此可以验证文中提出的模型能够准确描述含泥质致密砂岩储层导电规律及定量评价储层胶结指数  $m$ 。

表 1 Mesaverd 致密砂岩实例验证

样品	$\frac{R_w}{\Omega \cdot m}$	$\frac{Q_v}{\text{meq/cm}^3}$	$\phi$	$\phi_f$	$\phi_v$	$m_b$	实验 $m$	计算 $m$	$m$ 相对误差/%
1	0.331	1.10	0.064	0.005	0.010	1.69	1.40	1.454	3.82
2	0.175	0.29	0.067	0.003	0.000	1.63	1.57	1.517	3.35
3	0.331	0.32	0.110	0.005	0.005	1.94	1.78	1.758	1.23
4	0.331	0.16	0.164	0.010	0.002	2.04	1.94	1.839	5.22
5	0.175	0.07	0.087	0.005	0.005	1.61	1.59	1.560	1.88
6	0.331	0.67	0.071	0.000	0.003	1.97	1.74	1.802	3.55
7	0.175	0.63	0.105	0.005	0.005	2.08	1.96	1.842	6.03
8	0.175	0.06	0.151	0.004	0.017	1.85	1.84	1.882	2.31
9	0.331	0.35	0.089	0.011	0.000	2.05	1.91	1.811	5.17
10	0.175	0.62	0.070	0.003	0.007	1.91	1.78	1.748	1.81

### 4 结论

1) 基于 Waxman-Smith 泥质砂岩导电模型以及 Aguilera 三孔隙导电模型,利用串并联导电理论建立了含泥质致密砂岩三孔隙导电模型,准确描述由泥质、裂缝以及非连通孔洞构成的致密砂岩导电规律。

2) 致密砂岩储层胶结指数  $m$  不仅受到复杂孔隙结构(裂缝,非连通孔洞)影响,也在很大程度上受到泥质的影响。 $m$  随着裂缝孔隙度的增大而减小,随着孤立孔洞孔隙度的增大而增大,随着泥质含量的增大而减小。

3) 通过岩芯实验数据验证表明,笔者提出的模型能够准确描述含泥质致密砂岩储层的导电规律以及定量评价胶结指数  $m$ 。

### 参考文献:

[1] 石玉江,时卓.苏里格气田致密气层测井精细建模方法[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(5):71-76.  
 [2] Alexandra N G.3D porosity and mineralogy characterization in tight gas sandstones [J].The Leading Edge,2010,29(12):1477-1483.  
 [3] 张明禄,石玉江.复杂孔隙结构砂岩储层岩电参数研究[J].测井技术,2005,29(5):446-448.  
 [4] Towle G.An analysis of the formation resistivity factor-porosity relationship of some assumed pore geometries [C]//Trans:SPWLA

Logging Symposium,1962.

[5] Aguilera R.Analysis of naturally fractured reservoirs from conventional well logs [J].Journal of Petroleum Technology,1976,28(7):764-772.  
 [6] Serra O.Formation microscanner image interpretation[C]//Houston:Schlumberger Educational Service,1989.  
 [7] Aguilera M S,Aguilera R.Improved models for petrophysical analysis of dual porosity reservoirs [J].Petrophysics,2003,44(1):21-35.  
 [8] Aguilera R F,Aguilera R.A triple porosity model for petrophysical analysis of naturally fractured reservoirs [J].Petrophysics,2004,45(2):157-166.  
 [9] Al-Ghamdi,Behmanesh H.An improved triple-porosity model for evaluation of naturally fractured reservoirs [C]//SPE Reservoir Evaluation & Engineering,2011.  
 [10] 张丽华,潘保芝,单刚义.应用三重孔隙模型评价火成岩储层[J].测井技术,2008,32(1):37-40.  
 [11] Breg C R.Dual porosity equations from effective medium theory [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition,2006.  
 [12] 田瀚,杨敏.碳酸盐岩缝洞型储层测井评价方法[J].物探与化探,2015,39(3):545-552.  
 [13] Waxman M H,Smits L J M.Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands [J].Society of Petroleum Engineers Journal,1968,243(6):107-122.  
 [14] Archie G E.The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J].Transactions of the AIME,1942,146:54-67.  
 [15] Byrnes A P,Cluff R.Analysis of critical permeability, capillary pressure and electrical properties for mesaverde tight gas sandstones from western U.S. basins [M].Office of Fossil Energy,2009.

## A triple-porosity conducting model for shaly tight sandstone reservoir

XIA Pei

(*Patent Examination Cooperation Hubei Center of The Patent Office, Wuhan 430070, China*)

**Abstract:** The existence of shale and complex pore structure leads to complexity of electric conductance law in shaly tight sandstone, making it extremely difficult to quantitatively evaluate resistivity and saturation of shaly tight sandstone reservoir. The key to reservoir resistivity evaluation is the accurate acquisition of Archie exponent. Many researchers have studied triple porosity exponent  $m$ , most of these researches focus on the impact of complex pore structure without taking shale affect into consideration. In this paper, based on Waxman-Smith shaly sandstone model and Aguilera triple porosity model, the authors propose a new triple porosity conducting model for shaly tight sandstone, which is composed of shale, fractures and non-connected vugs. In the model the effects of shale and complex pore structure on porosity exponent  $m$  are considered. By single factor analysis, it is found that triple porosity exponent  $m$  decreases as fracture porosity increases, increases as non-connected vug porosity increases, and decreases as shale content increases. The validation of experiment data proves that the proposed model can accurately describe the electrical conducting law of shaly tight sandstone and can quantitatively evaluate the porosity exponent  $m$ .

**Key words:** tight sandstone; pore structure; triple porosity conducting model; porosity exponent

(本文编辑:叶佩)