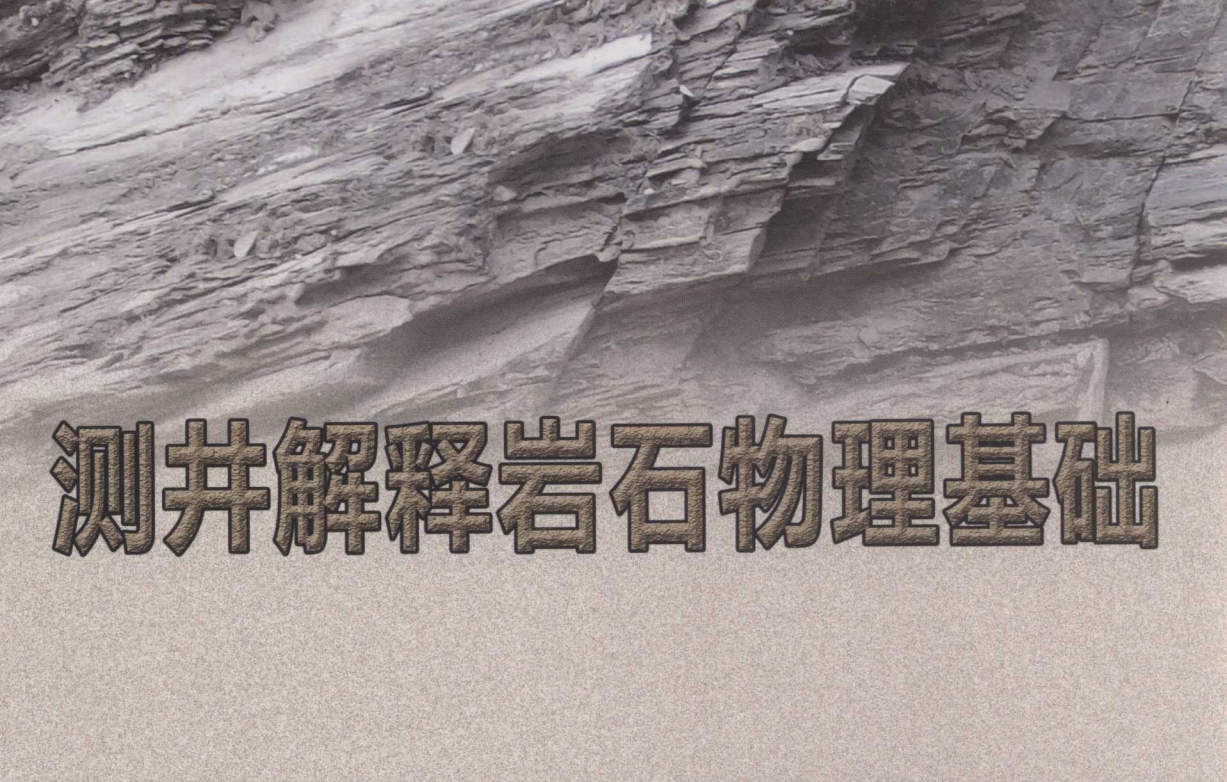
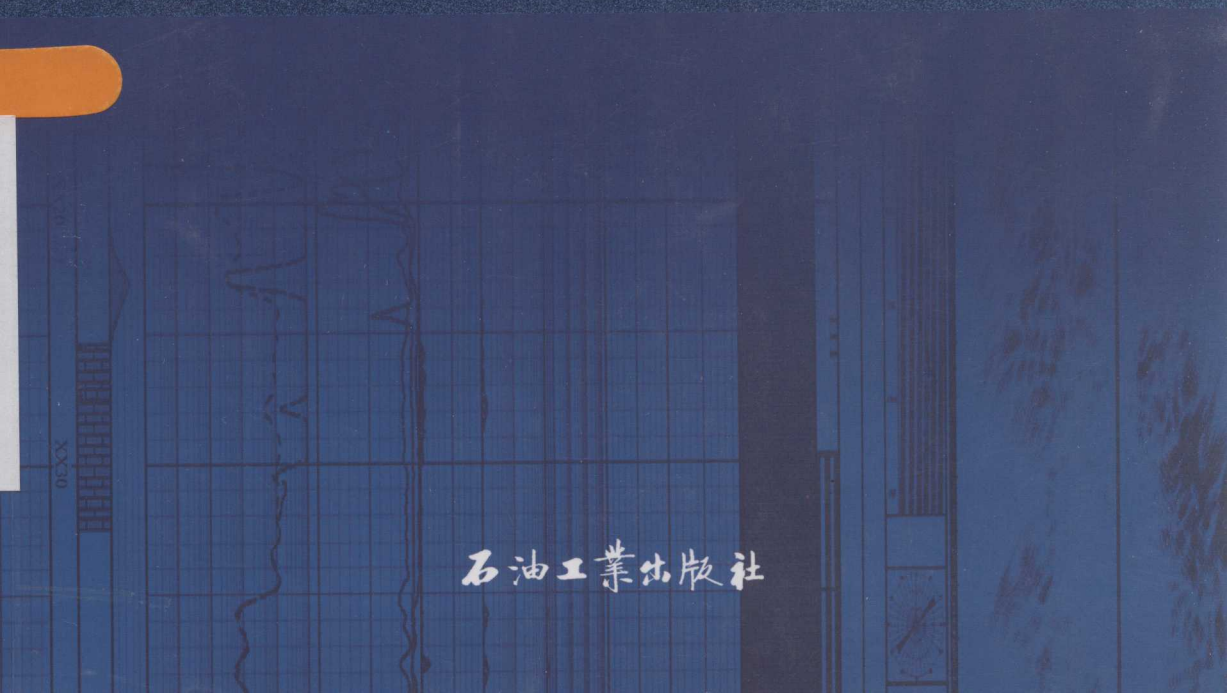




测井解释岩石物理基础

CEJING JIESHI YANSHI WULI JICHU

荆万学 著



石油工业出版社

014308480

P584
05

测井解释岩石物理基础

荆万学 著



石油工业出版社



北航

C1697856

P584
05

083800310

图书在版编目 (CIP) 数据

测井解释岩石物理基础/荆万学著.

北京: 石油工业出版社, 2013. 9

ISBN 978 - 7 - 5021 - 9750 - 6

I. 测…

II. 荆…

III. 测井解释 - 岩石物理学

IV. P584; P631. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 211861 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 8

字数: 150 千字 印数: 1—2500 册

定价: 36.00 元

(如发现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

目

录

录

绪言 /1

一、浅探阿尔奇公式的物理学原型 /3

二、阿尔奇参数 a 和 b 值的理论模型 /8

三、关于测井解释模型问题 /17

四、复杂油气水层测井评价的若干问题 /23

五、常规测井资料计算砂岩储层渗透率的理论思考 /30

六、关于用测井资料评价储层润湿性及相对渗透率 /36

七、泥质砂岩储层注水开发水淹层饱和度理论模型 /69

八、关于自然电位 /76

九、关于孔隙直径与粒度中值 /97

十、结束语 /117

绪 言

迄今为止,世界上已开采出的油气都是在地表以下的岩石中(包括未成岩的沉积砂)存在的。尽管科学探索业已发现在深海海底存在大量可供人类利用的冰絮状天然气水合物,但估计在近20—30年内投入开发利用的可能性很小。对人类而言,油气是非再生的资源,并且储量有限。因此,深入研究支撑世界经济可持续发展的油气资源在岩石中的分布,尤其是深入研究如何提高岩石中已发现的油气储量的采收率,不能不成为石油工作者的重大研究课题。

岩石物理学是支撑石油工业发展的中流砥柱。1982年,R. E. Sheriff(美国)和L. P. Geldart(加拿大)从地震勘探的历史、投资费用,以及与之相关的地球物理学家的数量等方面,全面论述了地震勘探技术的发展对石油工业的决定性促进作用。1990年,P. F. Worthington在所发表的《岩石物理学发展方向:五年展望》论文中,把岩石物理学定义为:一门研究储集岩的物理化学性质以及这些性质的地球科学和工程技术意义的科学。深刻论述了岩石物理学作为石油工业一个组成部分,其发展对于石油工业发展的重要促进作用,强调岩石物理学与勘探开发其他领域的必然联系,并认为自1927年第一次处理录取的测井曲线就进入了“岩石物理学时代”。可见岩石物理学研究与发展的重大现实意义。

不言而喻,我把地震勘探技术归属为岩石物理学,而不是“地球物理学”。这可能与当前人们的普遍看法不同,更可能遭到从事地震勘探技术研究与应用的“地球物理学家”们的强烈反对或不屑,毕竟“地球物理”比“岩石物理”“目标”更远大、“胸怀”更广阔。然而,从目前地震勘探所用的“人为”震源的激发强度和深度来说,与天然地震的能量和深度相比,无论是应用于石油工业领域还是诸如矿藏、环境、工程等其他领域,还远不能实现地球物理学的目的。因此,把其归属为“岩石物理学”可能更恰如其分。我们当然不是要讨论地震勘探该归属哪一学科或“门派”,而是强调其在石油工业中的重要地位。Worthington仅把岩石物理学限定在井眼范围内(包括电缆测井、随钻测井、地层测试、井壁取心,以及相应的资料解释应用),包括岩心分析,而把地震勘探技术排除在外,显然不全面。我们把地震勘探技术纳入岩石物理学,与井筒勘探技术一起就构成了“基础岩石物理学”。那么,相应地,可以把与提高采收率相关的研究与技术归属为“应用岩石物理学”。

这样,就可以形成岩石物理学的完整体系,从而进一步强调和说明,岩石物理学对于石油工业的发展是不可或缺的。

然而,本文集并不包含与地震勘探技术有关的内容。因为要提到岩石物理学,就不能不用上面的文字来阐述自己的观点,表达自己对“岩石物理学”这一概念的理解。至于是否恰当,并未多加详考。

本文集收集了应用测井资料确定储层岩石物理参数的有关内容,都是笔者多年来在科研生产实践中取得的技术成果。以论文或综述的形式出现,未进行分类。其中一小部分在专业杂志上发表过,而绝大部分内容没有公开发表过。整理出版本文集,并不想借此“沽名钓誉”,考虑到这些成果虽然可能“微不足道”,但确实很有用。点滴汇集成细流,细流汇集则成江河。希望文集的内容能对岩石物理学的学科建设起到“添砖加瓦”的作用,能对测井解释工作者有所裨益。

参考文献

- [1] [美] R. E. 谢里夫, [加] L. P. 吉尔达特. 勘探地震学 (第二版) [M]. 初英等, 译. 李承楚等, 校. 北京: 石油工业出版社, 1999. 12.
- [2] P. F. Worthington. 岩石物理学发展方向——五年展望 [J]. 姚俊, 译. 侯哲国, 校. 国外测井技术, Vol. 7, No. 6, DEC. 1992.
- [3] 孙德龙. 中国石油工业测井技术进展与展望 [C] //世界石油大会中国国家委员会中国油气论坛, 2010.
- [4] 陆大卫, 赵培华. 油气勘探与生产需求是促进测井技术持续发展的动力 [J]. 测井技术, 2001, 25 (1): 3-4.
- [5] 陆大卫. 创新驱动跨越发展: 中国测井技术发展对策研究 [J]. 测井技术, 2011, 35 (2): 101-103.
- [6] [美] C. E. 佩顿. 地震地层学 [M]. 牛毓荃, 徐怀大, 陈俊生, 吴律, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1980.
- [7] [美] D. L. 特科特, G. 舒伯特. 地球动力学 [M]. 韩贝传, 詹贤鑫, 等译. 北京: 地震出版社, 1986.
- [8] O. Serra. Advanced interpretation of wireline logs [G]. Schlumberger, ATL Marketing & Technique, 1986.
- [9] [澳] B. E. 霍布斯, [美] W. D. 明斯, [荷] P. F. 威廉斯. 构造地质学纲要 [M]. 刘和甫, 吴正文, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1980.
- [10] 成都地址学院普通地质教研室. 动力地质学原理 [M]. 北京: 地质出版社, 1978.
- [11] [加] 阿德里安·夏德格. 地球动力学原理 [M]. 谢鸣谦, 谢鸣一, 译校. 北京: 科学出版社, 1977.

一、浅探阿尔奇公式的物理学原型^①

摘 要：根据岩石导电形态的基本假设，分析了阿尔奇公式建立的物理学基础及其依据的物理模型。指出阿尔奇公式是一理论公式，而不是人们普遍认为的经验公式， a 、 b 、 m 、 n 值不是固定常数，进一步明确和界定了阿尔奇公式，从而拓宽了阿尔奇公式的应用范围。

主题词：阿尔奇公式 物理学 物理模型 参数 电阻率测井 经验公式

ABSTRACT: On the essential assumption of conducting form in rock, the physical principle and model used for determining Archie formula are analyzed in this paper. It is pointed out that Archie formula is a theoretical formula but not an empirical one as known, and that a 、 b 、 m 、 n are not fixed constants. And the physical significance of the Archie parameters are further explicated and defined so as to widen its application.

Subject Terms: Archie formula physics physical model parameters resistivity logging empirical formula

引 言

阿尔奇公式自 1942 年正式发表，至今已有 54 年，人们一直把阿尔奇公式视为经验公式，很少对其进行理论研究，对公式中的参数（ a 、 b 、 m 、 n ）没有赋予明确的物理意义。尽管阿尔奇公式的建立是有条件的，但公式的基本形式却有普遍意义。因为公式的形式既不是阿尔奇想象出来的，也不是根据实验数据拟合出来的，而是源于一定的物理学模型。他只是通过实际岩样实验确定了校正系数，即 a 、 b 、 m 、 n 值，从而在理论与实践的鸿沟之上建立了相互联系的桥梁。此后，人们只是根据各自的岩样重复阿尔奇的实验或根据经验确定这些校正系数，却没有深入研究这些系数所包含的物理学内涵。当一个地区的岩性变化较复杂时，根据经验确定的一套参数不能满足需要，于是人们就依据地质条件来修正阿尔奇公式的形式，从而派生出各种各样的公式。我们认为，这种进步只是形式上的，而不是本质上的。只有通过

① 本文发表于《测井技术》1997 年第四期。

分析阿尔奇公式来源的物理学模型,明确并界定各参数的物理意义,并通过理论与实验研究确定它们与岩石各种物性参数的内在联系,才能使阿尔奇公式的应用有本质的进步和普遍的适用性。本文就是基于这种思想,作为理论研究的“探路先遣”而出现的。

阿尔奇公式的物理学原型

1941年10月,阿尔奇在美国达拉斯石油工程与矿业学会上宣读了“用电阻率测井确定几个储层特征参数”的讨论基本岩石性质关系的开创性论文,提出了现已成为测井评价工作基础的方程:

$$S_w = (FR_w/R_t)^{-n} \quad (1)$$

其中

$$F = a/\phi^m$$

阿尔奇先生是怎样通过建立如此贴切的公式而把电阻率转换成饱和度的呢?人们一般认为孔隙型岩石导电形态以并联为主。由物理学知道,并联电路的电导率等于各分路电导率之和。但岩石并联导电的假设是以各组成部分为相互分离的独立体积为前提的,其物理模型如图1所示。由此可以得到纯砂岩油层的电导率方程:

$$C_t = (1 - \phi_t)C_{ma} + \phi_t S_w C_w + \phi_t (1 - S_w)C_o \quad (2)$$

式中 ϕ_t ——地层岩石总孔隙度;

C_{ma} 、 C_o 、 C_w ——分别为岩石骨架、烃类和水的电导率, mS/m;

S_w ——含水饱和度;

C_t ——岩石的体积电导率, mS/m。

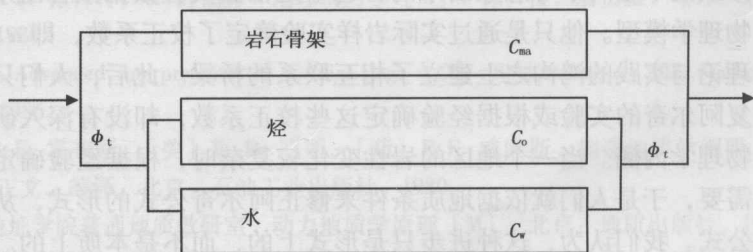


图1 简化岩石电导并联物理模型

一般认为, 岩石骨架和烃类是不导电的, 即 $C_{ma} \approx 0$ 、 $C_o \approx 0$ 。整理式 (2) 得:

$$S_w = R_w / (\phi_t \cdot R_t) \quad (3)$$

比较式 (1) 与式 (3), 若不考虑式 (1) 中的 a 、 m 、 n 参数, 则公式形式完全相同。由此我们认为, 由式 (2) 简化的式 (3) 即是阿尔奇公式的物理学原型。

然而, 用式 (3) 得到的含水饱和度 S_w 要比实际的数值低得多。主要原因是假设组成岩石的各部分以相互分离的体积形式并联导电, 这与岩石骨架和孔隙呈网混存在的实际有着明显的差异, 即由于孔隙的曲折性使实际的电阻率 R_t 高于物理学模型式 (2) 在 $\phi_t \cdot S_w$ 条件下的体积电阻率。每一个电导分路宏观上是并联的, 而微观上却存在串联所导致的 R_t 变化。也就是说, 尽管微观的总体反映了宏观的特性, 但每一个微观细节性质都可能与宏观性质有本质的不同。

因此, 阿尔奇通过实验对式 (3) 进行了校正。但这一校正并没有改变式 (2) 基本物理学原理, 因而, 可以说阿尔奇公式是理论公式, 并不是经验的。

阿尔奇参数的物理意义

当岩石百分之百含水时, 式 (3) 中 S_w 等于 1, 此时式 (3) 即变为 (用符号 R_0 代替 R_t , 表示纯水层的电阻率):

$$R_0/R_w = 1/\phi_t \quad (4)$$

阿尔奇在实验室选择了较纯砂岩 (孔隙度介于 10% ~ 25% 之间), 在饱和和不同矿化度水时分别测量其电阻率, 得到一系列 R_0 与 R_w 的对应值。对实验数据进行统计分析, 从而得到了系数 m 。式 (4) 即变为:

$$R_0/R_w = 1/\phi_t^m \quad (5)$$

式中, m 若被称为孔隙度指数或胶结指数或孔隙结构指数, 似乎都不能明确反映 m 值的真正物理意义。从上述分析我们认识到, m 值是骨架与孔隙网混引起的孔隙曲折性的度量, 孔隙曲折度越高, m 值越大; 反之, 当岩石骨架与孔隙是相互分离的独立部分时, 亦即孔隙没有曲折性时, 则 m 值等于 1, 式 (5) 即变为式 (4)。阿尔奇实验证明, m 值是对实际岩石的孔隙曲折性的校正。

当 $R_0/R_w = 1$ 时, 则 ϕ_t 等于 1, 相当于在一个不导电的容器中测量盛满电阻率为 R_w 的水的电阻率。那么, 当在一个导电的容器中测量盛满电阻率为 R_w 的水的电阻率时, 必然有 $R_0/R_w < 1$ 。由此, 引出了岩性附加导电系数 a 值。对泥质砂岩的实验研究使式 (5) 具有了更为普遍的形式:

$$R_0/R_w = a/\phi_t^m \quad (6)$$

对泥质砂岩, 岩性存在附加导电性, a 值小于 1; 对纯砂岩, 岩性无附加导电性, a 值等于 1。式 (6) 被定义为地层因素 (F)。显然, a 值与泥质的成分、含量及其分布形式是密切相关的。确切地说, a 值是作为除孔隙以外的岩石骨架的附加导电性而出现的。

上述的实验研究对岩石的孔隙曲折性和岩石 (岩石骨架) 的附加导电性进行了校正。接下来阿尔奇用同样的砂岩, 在测得 R_0/R_w 这一岩石电阻率背景值后, 开始用烃类驱替岩样中的水, 测得了不同含水饱和度时的 R_t 的一系列与 S_w 的对应值。由式 (5) 推演式 (3), 由于 R_w/ϕ_t 近似于 R_0 [由式 (4)]。所以式 (3) 变为:

$$S_w = R_0/R_t \quad (7)$$

即
$$R_t/R_0 = 1/S_w \quad (8)$$

对实验数据进行统计分析, 用式 (8) 的形式拟合, 从而得到了 n 值。式 (8) 即变为:

$$R_t/R_0 = 1/S_w^n \quad (9)$$

式中, n 值被称为饱和度指数, 显然没有明确其物理意义。由于孔隙的曲折性, 在驱水过程中, 烃类和水在孔隙中的分布是不均匀的, 并且这种不均匀性随 S_w 而变化。正是由于这种不均匀性, 进一步增大了电流在岩石中流动的曲折性, 致使 R_t 增大的速率比 S_w 降低的速率大, 因此才有校正系数 n 的存在。假定烃类和水在孔隙中的分布是均匀的, 那么 S_w 降低只是降低了电流流动的横截面积, 并未增大曲折性而使 R_t 升高, 则式 (8) 应严格成立, n 值即等于 1。而实验证明 n 值大于 1。因此, 我们可以明确界定 n 值的物理意义, 是对饱和度微观分布不均匀性的校正, 即 n 值应被称为饱和度微观分布不均匀性指数。显然饱和度微观分布不均匀性越严重, n 值越大, 它是孔隙曲折性 (m) 和含水饱和度 (S_w) 的函数; 对泥质砂岩, 还是 a 值的函数。

比较式 (6) 与式 (7), 人们认为式 (9) 亦应具有较普遍形式:

$$R_t/R_0 = b/S_w^n \quad (10)$$

显然, 阿尔奇的实验 $b=1$ 。 b 与 n 之间具有互补性联系, 对不同的驱替过程 (油驱水或水驱油) 要保持 $b=1$, 则必有不同 n 值; 反之, 要保持 n 不变, 则必有不同的 b 值。分析认为, 对于不变的 n 值, 岩石的润湿性是影响 b 值的重要因素。对亲水岩石, 油驱水过程将有残余水存在, 有电流的连续通道, 可能有 $R_t/R_0 < 1/S_w^n$, 要

使式(10)成立必有 $b < 1$ ；对亲油岩石，油驱水过程将是活塞式而没有残余水，可能有 $R_i/R_0 > 1/S_w^n$ ，要使式(10)成立必有 $b > 1$ 。由于润湿性不同，进一步增加了饱和度微观分布的不均匀性，因此， b 值是作为润湿性附加的饱和度微观分布不均匀性的系数而存在。

尽管 b 与 n 之间具有互补性联系，但并不能因此而忽略了对 b 值的深入研究，因为虽然对不同的储层岩石应使用变化的 n 值。但对同一类型储层岩石，已有的实验结果表明，不同的驱替过程有不同 n 值，这给实际应用带来很大困难。若对同一类型储层实际应用固定的 n 值时，就必须使用 b 值来补充校正，才可望得到正确结果。尤其对注水开发的砂岩储层来说，对 b 值得研究尤显重要，尽管 n 值亦受润湿性的影响。再者，对实际储层， R_0 不能直接测得，而用 $(a \cdot R_w) \phi_i^m$ 来替代，必然与实际 R_i 存在某种“非实验性”的不匹配，因而也需要 b 值来补充校正。以往的应用把 b 值视为“近似等于1”来处理，可能是导致阿尔奇公式应用受到限制的原因之一。

结 论

(1) 本文从理论上分析了阿尔奇公式的物理学原型，指出阿尔奇公式应作为理论公式而不是经验公式来看待，并通过分析明确界定了阿尔奇参数(a 、 b 、 m 、 n)的物理意义。同时， a 、 b 、 m 、 n 不能作为固定常数来使用，它们随不同的储层性质而变化，并且相互依赖。

(2) 通过分析，式(2)在实际解释中不能直接应用，若应用也必须进行孔隙曲折性和饱和度微观分布不均匀性等校正。

(3) 本文的分析只借用了已有的实验结论，所提出的观点并没有新的实验数据来证实，因而只是一种理论上的探讨。至于阿尔奇参数之间相互关系及其与其他储层参数之间的关系，还有待于进一步进行理论研究和实验研究来揭示。

参 考 文 献

- [1] Archie G. E. 用电阻率测井曲线确定若干储层特征参数 [J]. 李宁, 译. 地球物理测井, 1991, 第5期.
- [2] Givens W. W., Schmidt E. J. A Generic Electrical Conduction Model for Low Contrast Resistivity Sandstone [J]. SPWLA 29th Annual Logging Symposium. June 5 ~ 8, 1989.
- [3] 曾文冲. 油气藏储集层测井评价技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.

二、阿尔奇参数 a 和 b 值的理论模型

摘 要: 本文依据泥质砂岩并联导电的基本假设, 导出了阿尔奇公式中涉及的参数 a 和 b 值的理论计算模型。结果显示, a 值作为岩性附加导电系数主要与储层的黏土含量及其分布形式有关; b 值作为润湿性附加的饱和度微观分布不均匀性系数主要与储层的润湿性质有关。这两个参数理论模型的建立, 可以为更精确的储层评价提供可靠基础。

主题词: 阿尔奇参数 理论模型 黏土胶体电导率

Abstract: Based on the supposition of Parallel conductive of shaly sand, this paper deduces theory calculation models of parameter “ a ” and “ b ” involved in Archie equation. As a lithology additional conductive coefficient, “ a ” is related to clay volume and its distribution form. As a wettability additional saturation micro distribution heterogeneity coefficient, “ b ” is mainly related to wetting property of reservoir. The theory models establishment of “ a ” and “ b ” provides a reliable base for further accurate reservoir evaluation.

Subject Terms: parameters of Archie theory model clay colloid conductivity

引 言

阿尔奇公式作为储层饱和度解释的基础被广泛应用。但公式中涉及的参数 a 和 b 值的确定, 一直以来都是依靠岩心实验数据。由于岩心数据有极强的区域性和层位性, 不可能适用于所有储层。而应用岩心数据时只能以固定的数值代入, 对不适用的储层就不可避免地导致偏差。要更精确地评价储层, 建立变化的、适用于储层自身性质的“就地”参数的计算方法, 是必要而且必须的。本文将依据泥质砂岩并联导电的基本假设, 来研究阿尔奇公式中涉及的参数 a 和 b 值的“就地”计算的理论模型。

理论基础

对于泥质砂岩纯水层, 除了水导电以外, 还有泥质中的黏土胶体导电。Cremers

和 Laudelout (1966) 用各种电导率的水构成的黏土胶体的电导率测量值, 研究了可交换阳离子的迁移率。在仔细研究黏土水体系的物理化学特性之后, 他们推出了式 (1) 来表达黏土胶体的电导率 C_g 。用该式计算的电导率与实验室测定的电导率对比符合很好。

$$C_g = \frac{C_1 \phi}{\phi + K(1 - \phi)} + \frac{2.5 \lambda_s (1 - \phi) S_0}{\phi + K(1 - \phi)} \quad (1)$$

式中 ϕ ——黏土胶体的孔隙度;

λ_s ——黏土比面电导率, mS/m ;

C_1 ——电解质的电导率, mS/m ;

K ——用于计算地层因素 F 的常数, $F = 1 + K(1 - \phi) / \phi$;

S_0 ——黏土表面积, cm^2/g ;

C_g ——黏土胶体电导率, mS/m 。

我们对式 (1) 进行必要的简化整理, 并设:

$$\lambda = \frac{\phi}{\phi + K(1 - \phi)}, \quad C_{\text{clay}} = 2.5 \lambda_s S_0 / K, \quad C_w = C_1$$

则式 (1) 即可简化为:

$$C_g = \lambda C_w + (1 - \lambda) C_{\text{clay}} \quad (2)$$

分析式 (2) 存在两种情况: 当 $C_w \rightarrow 0$ 时有:

$$C_g = (1 - \lambda) C_{\text{clay}} \quad (3)$$

而当 $C_w \rightarrow \infty$ 时, $C_g \rightarrow \infty$, 这与实验事实严重不符, 即在 C_w 的高值时该式不成立。Hill 和 Milburn (1956) 的电化学实验数据表明, 当电解液的浓度达到足够高时, 即 C_w 达到一定值后, 有最大阳离子交换迁移率, 此时黏土胶体的电导率 (C_g) 有一个最大值, 是一常数。这已由 Waxman 和 Smits (1967) 在“含油泥质砂岩的电导率”的研究报告中进行了详细的阐述, 并研究得出了他们所定义的黏土平衡离子的等效电导 (B)。其与水电导率的关系为:

$$B = [1 - a \exp(-C_w / \gamma)] 0.001 \lambda_{\text{Na}}^e \quad (4)$$

式中 γ ——由平衡离子迁移率增加的速率来确定;

λ_{Na}^e ——最大钠交换离子的等效离子电导, $\text{cm}^2 / (\text{mol} \cdot \Omega)$ 。

a 由在水电导率为零的阳离子交换的迁移率来确定, 即:

$$a = 1 - \frac{(\lambda_{Na}^e)'}{\lambda_{Na}^e} \quad (5)$$

式中, $(\lambda_{Na}^e)'$ 是在 $C_w = 0$ 时阳离子交换的等效离子电导。

按照 Waxman 和 Smits (1967) 的定义, 应有:

$$C_g = BQ_v \quad (6)$$

式中, Q_v 是与黏土有关的钠阳离子交换浓度, mol/L。

显而易见, 式 (2) 应修正为:

$$C_g = C_{clay} [1 - \lambda \exp(-C_w/\gamma)] \quad (7)$$

对比可得:

$$C_{clay} = 0.001 \lambda_{Na}^e Q_v \quad (8)$$

$$\lambda = a \quad (9)$$

在 Waxman 和 Smits 的报告 (1967 年) 中, 用两组泥质砂岩样品给出了两个 a 值的数据为 0.83 和 0.6, 并在之后的有关报告中 (1968) 强调了进一步的工作, 证实了第一组样品得出的 a 值即 0.83 更符合实验结果。但这个 a 值与 Cremers 和 Laudelout 得出的 λ 值有很大的差别。在取 $K=8.6$, 孔隙度从 50% 到 0% 时 (这包括了预计能见到的地下孔隙度范围), λ 值仅由 0.104 变到 0 (Cremers 和 Laudelout (1966))。因 λ 值很小且变化范围狭窄, 这说明, 水的矿化度 (电导率) 对黏土胶

体电导率的贡献是有限的。正如 Wyllie 指出 (1963): 黏土的电导率基本上与水的矿化度 (电导率) 无关。看来, Waxman 和 Smits 所确定的 a 值是大了, 这无疑是放大了水的矿化度 (电导率) 对黏土胶体电导率的贡献。图 1 是黏土胶体电导率与水的矿化度 (电导率) 的关系示意曲线。

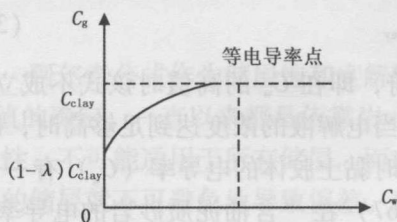


图 1 黏土胶体电导率与水电导率关系

C_{clay} 是具有最大阳离子交换率的黏土表面电导率, 仅取决于温度, 实质上这就是由 Dakshinamurti (1960) 所建立的与阳离子交换量有关的等电导率值, 即在任何孔隙度情况下, 黏土胶体的电导率与水电导率之比均为 1 的电导率。事实上, 最大阳离子交换率也与水矿化度无关, 是黏土矿物固有的特性, 因为交换作用可以在无水的环境中发生 (Grim, 1962)。这似乎与 Waxman 和 Smits 的论述相矛盾。事实上, 等电导

率点就是黏土胶体的最大电导率点，Waxman 和 Smits 在研究中显然没有注意到或发现这个问题。现在，我们来把这个问题阐述清楚：当黏土的孔隙半径大于 Gouy 模型的“扩散层”厚度时，才视为有孔隙存在，否则视为孔隙度为零。因 C_{clay} 与黏土的表面积成正比，当黏土孔隙中水的电导率为零时，起源于阳离子交换的电流不能传导，相当于减小了黏土的表面积，减小的数量由 $(1 - \lambda)$ 确定；随水的电导率增高，传导电流的能力增强，相当于黏土的表面积在增大，实验上表现为阳离子交换率的增大；当水的电导率增大到某一高值时，其传导电流的能力相当于黏土颗粒的直接接触，即相当于孔隙度为零、恢复了黏土的原本的表面积的情况，亦即与阳离子交换有关的电导率与水的电导率相同，这就出现了等电导率点。因此说，等电导率点就是黏土胶体的最大电导率点。阳离子的交换率也是恒定的，并不随水电导率的增大而增大，其所以表现为随水电导率的增大而增大的特征，是由水传导电流的速率决定的。比如，有两个黏土颗粒之间存在水，一个黏土颗粒以恒定的速率向水中发射阳离子，另一个黏土颗粒也以相同的速率接收阳离子，则发射与接收间的时间间隔（即迁移速率）取决于阳离子在水中的传导速率。

以上的讨论不是多余的，是研究泥质砂岩电导率必备的基础。

模型的导出

对于泥质砂岩纯水层，我们同样假定以并联导电为主。设：岩样长度为 L 、横截面积为 A ；岩样中孔隙的总长度为 L_w 、孔隙的平均截面为 A_w ；岩样中泥质部分黏土胶体的总长度为 L_{wb} 、平均截面为 A_{wb} ；孔隙中水的电阻率为 R_w ；黏土胶体的电阻率为 R_g 。应用并联电导模型有：

$$\frac{1}{R_0 L / A} = \frac{1}{R_w L_w / A_w} + \frac{1}{R_g L_{wb} / A_{wb}} \quad (10)$$

因为横截面积乘以长度等于体积。上式可变为：

$$\frac{V}{R_0 L^2} = \frac{V_{\phi_e}}{R_w L_w^2} + \frac{V_{\phi_b}}{R_g L_{wb}^2} \quad (11)$$

等式两端同除以 V 得：

$$\frac{1}{R_0 L^2} = \frac{\phi_e}{R_w L_w^2} + \frac{\phi_b}{R_g L_{wb}^2} \quad (12)$$

式中 ϕ_e ——岩样的有效孔隙度；

ϕ_b ——黏土胶体孔隙度。注意：这里是指被黏土和水占有的那部分泥质，而不是泥质的实际孔隙度（仅被水占据的部分而不包括黏土）。

进一步推演：

$$R_0 L^2 = \frac{1}{\frac{\phi_e}{R_w L_w^2} + \frac{\phi_b}{R_g L_{wb}^2}} = \frac{R_w L_w^2}{\phi_e + \phi_b \frac{R_w}{R_g} \frac{L_w^2}{L_{wb}^2}} \quad (13)$$

我们设岩样的总孔隙度为 ϕ_t 。因 ϕ_b 包含了泥质部分黏土的体积（泥质通常包含有细粉砂），所以，对传导电流来说，其“饱和度”应是黏土胶体的饱和度，而不仅仅是黏土的束缚水饱和度。但是，我们可以设总孔隙度 ϕ_t 包括黏土的体积，因此，束缚水饱和度也包括黏土体积。所以有：

$$\frac{\phi_b}{\phi_t} = S_{wb} \quad (14)$$

那么就有：

$$\frac{\phi_e}{\phi_t} = 1 - S_{wb} \quad (15)$$

将式 (13) 和式 (14) 代入式 (11)：

$$R_0 L^2 = \frac{R_w L_w^2}{\phi_t \left[(1 - S_{wb}) + S_{wb} \frac{R_w}{R_g} \frac{L_w^2}{L_{wb}^2} \right]} \quad (16)$$

$$\text{令：} \quad S_{wb} \frac{L_w^2}{L_{wb}^2} = S_{wb}^x \quad (17)$$

$$\text{则：} \quad \frac{R_0}{R_w} = \frac{L_w^2/L^2}{\phi_t \left[(1 - S_{wb}) + \frac{R_w}{R_g} S_{wb}^x \right]} \quad (18)$$

容易理解， L_w/L 值主要反映孔隙的曲折性，孔隙越曲折， L_w 就越大，则这个比值就越大，与阿尔奇参数 m 有同义（但不等于 m ）。因此，我们可以把式 (16) 变换成地层因数的形式：

$$F = R_0/R_w = \frac{1}{\phi_t^m \left[(1 - S_{wb}) + R_w/R_g \cdot S_{wb}^x \right]^m} \quad (19)$$

则:

$$a = \frac{1}{[(1 - S_{wb}) + R_w/R_g \cdot S_{wb}^x]^m} \quad (20)$$

式中, x 称为泥质分布指数, 且 $x = m/m_b \leq 1$, m_b 为纯泥岩的孔隙曲折度指数。

同理, 对于泥质砂岩油层, 设岩样中含水的骨架微毛细孔隙的总长度为 L_{wa} 、孔隙度为 ϕ_{wa} , 其他参数同纯水层。同样基于并联导电假设, 对于水层, 由式 (13) 有:

$$R_0 = \frac{R_w R_g L_w^2 L_{wb}^2}{(\phi_e R_g L_{wb}^2 + \phi_b R_w L_w^2) L^2} \quad (21)$$

对于油层, 同理有:

$$R_t = \frac{R_w R_g L_{wa}^2 L_{wb}^2}{(\phi_{wa} R_g L_{wb}^2 + \phi_b R_w L_{wa}^2) L^2} \quad (22)$$

则:

$$R_t/R_0 = \frac{(\phi_e R_g L_{wb}^2 + \phi_b R_w L_w^2) L_{wa}^2}{(\phi_{wa} R_g L_{wb}^2 + \phi_b R_w L_{wa}^2) L_w^2} \quad (23)$$

此式右端上、下同除以 ϕ_t , L_{wa}^2 , L_{wb}^2 并应用式 (14)、式 (15) 和式 (17), 整理可得:

$$R_t/R_0 = \frac{R_g(1 - S_{wb}) + R_w S_{wb}^x}{R_g S_{wa}^y + R_w S_{wb}^x} \quad (24)$$

其中: $S_{wa} = \phi_{wa}/\phi_t$, 且设 $S_{wa} \frac{L_w^2}{L_{wa}^2} = S_{wa}^y$ 。

式 (24) 右端上下同除 R_g , 经整理可得:

$$R_t/R_0 = \frac{(1 - S_{wb}) + R_w/R_g \cdot S_{wb}^x}{S_{wa}^y + R_w/R_g \cdot S_{wb}^x} \quad (25)$$

现在显然有: $S_w = S_{wa} + S_{wb}$, S_w 为总含水饱和度。当岩石中的泥质 (黏土) 含量一定时, S_{wb} 的大小是一定的, 因而 S_w 的大小主要决定于 S_{wa} 。 S_{wa} 的大小主要与岩石的润湿性有关, 岩石若是亲水的, 则 S_{wa} 有最大值, 若是亲油的则 S_{wa} 有最小值, 中性润湿则介于二者之间。那么, 我们不妨设:

$$D S_w^n = S_{wa}^y + R_w/R_g \cdot S_{wb}^x \quad (26)$$

D 的大小主要取决于比值 L_w^2/L_{wa}^2 (或取决于 γ , γ 可称为润湿指数), L_{wa} 的大小与润湿性有关, 当水润湿时有 $L_{wa} = L_w$ ($\gamma = 1$), 当油润湿时有 $L_w > L_{wa}$ ($\gamma < 1$)。因