

doi: 10.11720/wtyht.2023.1147

王英梅,焦雯泽,刘生浩,等.含天然气水合物沉积物的电阻率特性及阿尔奇公式的应用进展[J].物探与化探,2023,47(3):782-793.http://

doi.org/10.11720/wtyht.2023.1147

Wang Y M, Jiao W Z, Liu S H, et al. Resistivity characteristics of natural gas hydrate-bearing sediments and the application progress of the Archie equation [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 782-793. http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1147

含天然气水合物沉积物的电阻率特性及 阿尔奇公式的应用进展

王英梅^{1,2}, 焦雯泽^{1,2}, 刘生浩^{1,2}, 王茜^{1,2}, 宋瀚宇^{1,2}

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 天然气水合物饱和度的评价以阿尔奇 (Archie) 公式为核心, 岩电参数为应用基础。针对不同的地质环境匹配相应的岩电参数值, 尤其是孔隙度指数 (m) 和饱和度指数 (n), 是准确计算饱和度的关键。在电阻率测井中, 如何使 m, n 值更适用于天然气水合物的评价仍是一个难题。为了厘清天然气水合物电阻率的相关规律和 Archie 公式中岩电参数值的确定方法, 本文系统调研了相关文献资料, 对天然气水合物的电阻率影响因素进行了总结梳理, 并对如何利用 Archie 公式精准评价天然气水合物的饱和度进行了影响因素的分析。在此基础上, 总结了天然气水合物沉积物的电阻率特性, 提出了 Archie 公式的应用研究方向。

关键词: 天然气水合物; 电阻率测井; 阿尔奇公式; 岩电参数; 饱和度

中图分类号: TE155; P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)03-782-12

0 引言

天然气水合物是由水分子笼和客体分子结合构成的类冰状晶体化合物, 在低温、高压以及孔隙水充足的环境下形成, 一般赋存于水深超过 300 m 的海域和距地表 130 m 以下的陆域冻土区中。鉴于其高能量、高密度、清洁无污染和分布广等特点, 天然气水合物在全球能源利用和环境保护中发挥着重要作用, 是未来人类开发和利用的主要新型能源^[1-2]。针对不同含水合物储层介质的特性差异, 研究其所含天然气水合物的赋存状态对水合物的勘探具有深远意义。现有的探测手段主要为地球物理探测和地球化学探测。近年来, 超声波探测技术、时域反射 (TDR) 技术和阻抗勘测在实验领域不断被深入研究, 同时 X-CT 射线扫描、激光拉曼光谱法、核磁共振等探测技术也在更

新, 但仍需细化和改进。

电阻率法探测技术作为储层测井响应方法之一, 不仅可以确定水合物赋存位置, 还能够探测水合物的成核、生成以及饱和度, 在天然气水合物勘探和开采方面具有不可替代的作用^[3]。阿尔奇 (Archie) 公式作为评价水合物饱和度的重要方式, 其岩性附加导电系数 (a)、岩性比例系数 (b)、孔隙度指数 (m) 和饱和度指数 (n) 的选取, 对 Archie 公式能否准确计算饱和度具有决定性作用, 且 m, n 的影响程度远大于 a 和 b ^[4]。目前, Archie 公式在计算天然气水合物饱和度时更多地依赖于固定的 m, n 值, 很少采用双对数坐标下的非线性计算; 另外, 在不同地区天然气水合物饱和度的研究中, 对不同形成条件下 m, n 的影响因素分析较少。考虑到 m, n 的物理意义以及它们的取值对水合物饱和度计算精度的影响, Archie 公式在天然气水合物饱和度评价中的应用范围还有待进一步扩大。

收稿日期: 2022-04-06; 修回日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41661103); 国家重点研发计划项目 (2017YFC0307303); 中国科学院冻土工程国家重点实验室开放基金项目 (SKLFSE201406)

第一作者: 王英梅 (1987-), 女, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为天然气水合物。Email: wymch@lab.ac

1 含水合物沉积物的电阻率演化规律

1.1 电阻率法探测的基本原理

电阻率探测技术是根据不同物质的导电性能不同而判断的。天然气水合物通常被视为绝缘体,因此电阻率对含水合物储层的敏感度很高^[5];且在水合物形成或分解过程中,离子浓度、迁移速率和各向分布不断发生变化,随之孔隙的连通性改变,从而影响水合物沉积物中的电导率^[6]。因此,进一步探究气源、储层沉积物性质、储层环境以及水合物在地表下的赋存状态等一系列因素对含水合物沉积物电阻率变化的影响,将为天然气水合物数据的准确评估提供理论支撑^[7]。

1.2 影响因素

1.2.1 气源与沉积物性质

气源与含水合物沉积物的数量和种类同样影响水合物的电学性质。研究人员利用四氢呋喃水合物作为水合物的勘测模拟物进行室内模拟实验,结果表明:随着温度和盐度的递增,电阻率逐渐降低,相比之下,声速的变化并不显著^[8]。不同粒径的多孔介质中(砂、黏土、泥砂),不同浓度四氢呋喃体系下的含水饱和度和电性参数是不同的,电阻率会随着压力增加而略有上升,其孔隙流体的导电性与流体体积分数密切相关^[9]。此外,采用电阻率分析二氧化碳水合物的生成过程,不仅能够对气体在溶液中的溶解度做计算,还可以通过具有类似晶体结构或者物理性质的水合物相变化图分析甲烷水合物的性质^[10]。由于四氢呋喃和二氧化碳不能代表所有的水合物结构,且不同影响因素下导致的电学性质变化不同,考虑到甲烷水合物最接近天然气水合物,因此后期更多以甲烷为水合物的主要气体来源。

测井数据显示,近年来在南海水合物钻探区,以水合物富集为主的混合层中粉砂岩的比例逐渐增加^[11-12]。Chen 和 Kim 等^[13-14]的研究成果表明,多数情况下水合物分布于细粒、粗砂或粉砂的沉积物混合层中。水合物在不同形成阶段具有不同的孔隙充填模式,主要分为接触、悬浮和胶结模式,且随水合物饱和度的增加,电阻率的上升趋势变得更陡^[15]。考虑沉积物粒径效应对水合物储层环境中孔径分布的影响,Dufrane 等^[16]以砂子或玻璃珠模拟多孔介质,研究甲烷水合物的动力学过程和稳定性,发现玻璃珠对甲烷水合物电学性能的影响小于砂,且随着砂浓度的增加,活化能降低,电导性增加,符合阿伦尼乌斯(Arrhenius)表达式。但在实际储

层中,杂质的种类以及不同的沉积物含量对电阻率的影响可能不同^[17],从而导致水合物分布与电阻率的测试结果有所差异。

1.2.2 温度、压力

一定的气体含量、适宜的温度和压力是形成水合物的主要条件。依据水合物在生成和分解过程中的温压曲线和电导性分布实验结果,认为电阻率能够作为水合物定性分析的一项指标^[18]。实验证明,粒径为 1~2 mm 的粗砂中水合物的饱和度在 10 °C 温度梯度下率先达到最大值,且更高的温度梯度增加了电阻率的上升时间^[19]。而在分散型沉积物孔隙中,水和冰均能生成水合物,随着温度周期次数的增加电阻率仍有递增趋势^[20-21]。在甲烷、水溶液和多孔介质形成的多成分混合系统中,离子浓度和电阻率随时间和温度的变化而变化,且温度与电导率在形成和解离时均呈指数关系,适用于 Arrhenius 表达式: $\sigma(T) = \sigma_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}$ (σ_0 为孔隙中水的电导率, S/m; E_a 为活化能, kJ/mol; R 为气体常数, 8.314; T 为开尔文温度, K)。但在含盐量高或较高温度的水合物系统中,这种关系式将不再适用^[22]。

相平衡压力是研究水合物性质的一个重要因素,能够进一步验证电阻率的可靠性^[23]。通过回压和分阶段降压二种压降模式分析产气量和产气率时,发现压差是水合物分解过程的主导因素,且压差越大产气率越高^[24]。然而,在水合物形成时,压力随着电阻率的增加而迅速下降,根据电阻率的监测结果,认为水合物更多地形成于注气口。综合考虑水分流失、产气变化以及水合物相平衡,认为相对较小的生产压力更适合开采^[25-26]。

1.3 演化规律

一般情况下,在水合物生成阶段,从诱导成核到生成稳定,水合物的分布模式^[27]不断更替。随着水分迁移、排盐效应、孔隙盐度分布不均^[28]等因素的实时变化,在某个区域电阻率可能会出现显著下降的现象,但总体的电阻率呈上升趋势。而在水合物分解期间,电阻率逐渐下降直至水合物生成结束,但偶尔伴有的吸热反应会引起局部温度下降和产气后的气体流动,导致电阻短暂增加,因此可能会出现分解后的电阻率较之前偏高的情况。另外,由于盐本身具有导电性,特别是在其分布不均匀的情况下,会增大电阻率的测量误差,因此无法获得准确的电阻率变化。

这些基本因素和规律可为复杂储层中水合物非均质分布和运移的分析提供理论依据和定量信息,

而对于整体的天然气水合物或沉积物中电阻率的探究,还需更多的理论和实践分析。

2 电阻率法探测技术在天然气水合物勘探中的应用进展

近些年,依据不同储层天然气水合物勘探的经济价值以及电阻率法探测对水合物的敏感性,学者们在探测储层水合物成核动力学、水合物合成与分解过程、水合物稳定性以及水合物饱和度估算等方面不断研究,并取得了一定的进展(图1、图2)。

2.1 含天然气水合物沉积物的电学特性

Nobes 等^[31]采用海洋水合物区域内粉土和黏土为多孔介质建立了热导率和电阻率二个关系式,指出电阻率对水合物的存在反应比沉积物性质的变化更灵敏,因此认为电阻率法在评估水合物的分布上有一定的潜在价值。到目前为止,几乎所有已知的勘探或开采区域都采用过电阻率法探测技术,这代表了电阻率法在识别含天然气水合物储层及估算水合物饱和度中具有不可替代的作用。

Waite 和 Yousif 等^[32-33]利用 Berea 固结岩心进行了天然气水合物合成分解模拟实验研究,该装置不仅能测量系统压力的变化,还可以通过四电极系

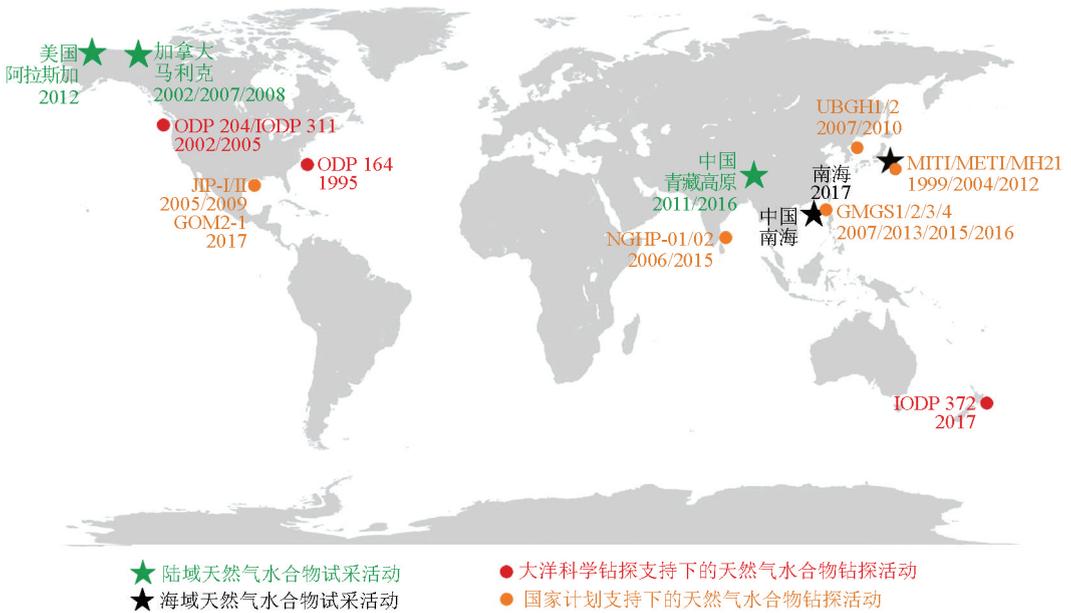


图1 全球主要天然气水合物钻探与试采区域^[29]

Fig. 1 Major gas hydrate drilling and trial production areas in the world^[29]

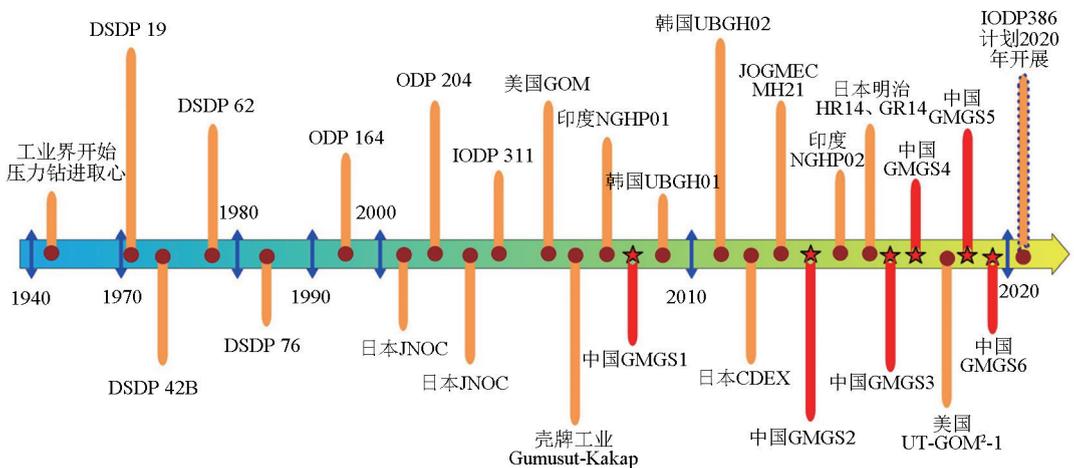


图2 全球主要海域天然气水合物钻探项目时间线^[30]

Fig. 2 Timeline of natural gas hydrate drilling projects in major global sea areas^[30]

统来测量体系电阻率参数,并通过电阻率的变化来识别水合物合成分解的速率,从而确定天然气水合物合成的数量及生成方式。Zatsepina、Yama、Buffet 等^[34-36]通过测量水合物合成分解过程中的电阻率变化,分析了在没有游离气体的多孔介质中水合物的动力学和热力学机理,并建立了溶解气体生成水合物模型,发现对电阻率变化速度规律的研究可量化水合物的成核规模。陈强等^[37]考虑孔隙流体的影响,以二氧化碳、甲烷水合物作对比,发现在垂向上甲烷水合物会受到排盐效应的影响,导致离子分布、盐水浓度和孔隙中水合物的分布模式发生区域性变化,电阻率总体呈现某一处的降低随后逐渐升高。为增加孔隙流体的多种可能性,Lech 等^[38]分别测量黏性和非黏性土壤在不同盐浓度溶液中的电阻率变化,结合孔隙度与弯曲度的函数关系^[39],指出依据孔隙水电阻率,可以分析孔隙度、含水饱和度和相关背景下的水合物饱和度。金学彬等^[40]证实在电容和电阻均存在阻抗系统中,阻抗在高频率下呈现单调增高趋势,低频率下相对现象不明显。对于相角—频率的规律分析,曲线的整体趋势相同,与水合物饱和度关联性较小。由于复电阻率在不同频率下的频散特性不同,利用 Archie 公式进行天然气水合物饱和度的计算后,发现水合物饱和度在不同频率下的变化不同,原因是电性数据提供不够广泛,导致水合物在高饱和度范围内的分析并不充分。该方法仍有待进一步研究,目前不具有普适性^[41]。牛佳乐等^[42]结合对称电极和多频率点(5~400 Hz)发现:阻抗幅值、流体和孔隙壁界面的极化反应均与频率呈反比,且在一定范围内,水合物饱和度指数与频率为线性关系。

Chen 等^[43]利用岩心数据分析孔隙流体对电阻率反演数据的影响,发现当水合物饱和度较低时($\leq 15\%$),孔隙水矿化度增大,电阻率逐渐减小。当饱和度在 50%左右时,沉积物电阻率和孔隙度指数 m 均增加了 2 倍,此时矿化度不再是主导因素。Pandey 等^[44]结合地震反射成像和纵波速度方程就第二次印度远征勘探的富砂层进行深度分析,对比了井下水合物的电阻率测井曲线与压力岩心的饱和度数据的误差,而后以孔隙填充型和裂缝型二种填充方式对水合物—电阻率关系进行孔隙度的细化分析,认为孔隙度密度误差通过影响 Archie 公式的岩性参数间接影响水合物饱和度的评价。但该结论存在一定缺陷,首先设定了储层性质为各向同性,导致成像中的水合物几乎垂直填充高电阻率裂缝;其次,方程中取黏土和砂的体积为具体比例,从而限制了

地层条件。为进一步研究含水合物沉积物中孔隙度对岩电参数及电阻率检测的影响,Feng 等^[45]将 Archie 公式与核磁共振 T_2 时间分布相结合提出了一种修改模型,预测低渗透砂岩中含水饱和度和电阻率指数的变化,将实际测井获得的岩心数据与修改后的 Archie 公式计算结果对比,发现其符合度高且相关性较强,而岩性比例系数 b 和饱和度指数 n 与实验测量相比,相对误差在 5% 以内,表明模型具有较高的可靠性。

2.2 电阻率法测量实验装置的发展

“电极法”经常被用来测量室内砂土的电阻率,其测量电极和供电电极一般布置在一个水平面上。其中,四电极法具有可操作性强、便捷等优点^[46]。赵仕俊等^[47]利用早期的一维装置(图 3a),得到了水合物区域内的电阻率演化规律,验证了电阻率法在一维电极装置下探测水合物动态变化的可行性。杜燕等^[48]围绕电容法对二维模拟装置进行优化(图 3b),发现水合物饱和度增加后,电容量会逐渐减小。而在电极材料的选择上,除恒压恒流的环、点和片状铜电极外,Birkedal 等^[49]利用银滤纸材料结合核磁共振,观察水合物生成中三维空间和微观上的电阻率特征,发现电阻率随频率值的增加而减小,在水合物饱和度接近 20% 时,水合物的形成对沉积物内部的电阻率变化影响不大。由于水合物钻探装置的室内研究对反应釜的要求仅在一维、二维会有所局限,李小森等^[50]引进了一个三维空间反应釜系统(图 3c),是天然气水合物电阻率反演的一大进步。三维反应釜实验揭示了水合物的形成在空间上分布不均匀,在传热效应的影响下,水合物主要沿壁分布,并由于孔隙堵塞、连通性不好等原因,电阻率和水合物饱和度的线性关系有待探究,并指出孔隙流体的流动对于水合物的开采有重要影响。

考虑到电极与砂子之间接触电阻和接触面积的影响,为了减少误差,逐渐引申至小范围内测试水合物的电阻率^[51],尽量采用多接触点、短距离的电极探针和环状电极探测水合物的电阻率,这样不仅能够提高精度,还可以准确测量水合物的生成特性和盐分变化^[52]。Wu 等^[53]在阐述环电极和点电极二种体系对不同粒径砂砾间接接触电阻的影响时,指出环形电极可以监测气体运移的能力和类型,点状电极对于测量气体饱和度更适用,另外,还可通过提高压力密度来保证样品与电极之间的良好接触。陈玉凤等^[54]通过数字交流电桥组成的电阻系统,以降温速率为变化点,指出孔隙水的电阻率基本不变,水合物饱和度在不同含量界限区间内呈非均匀性,且

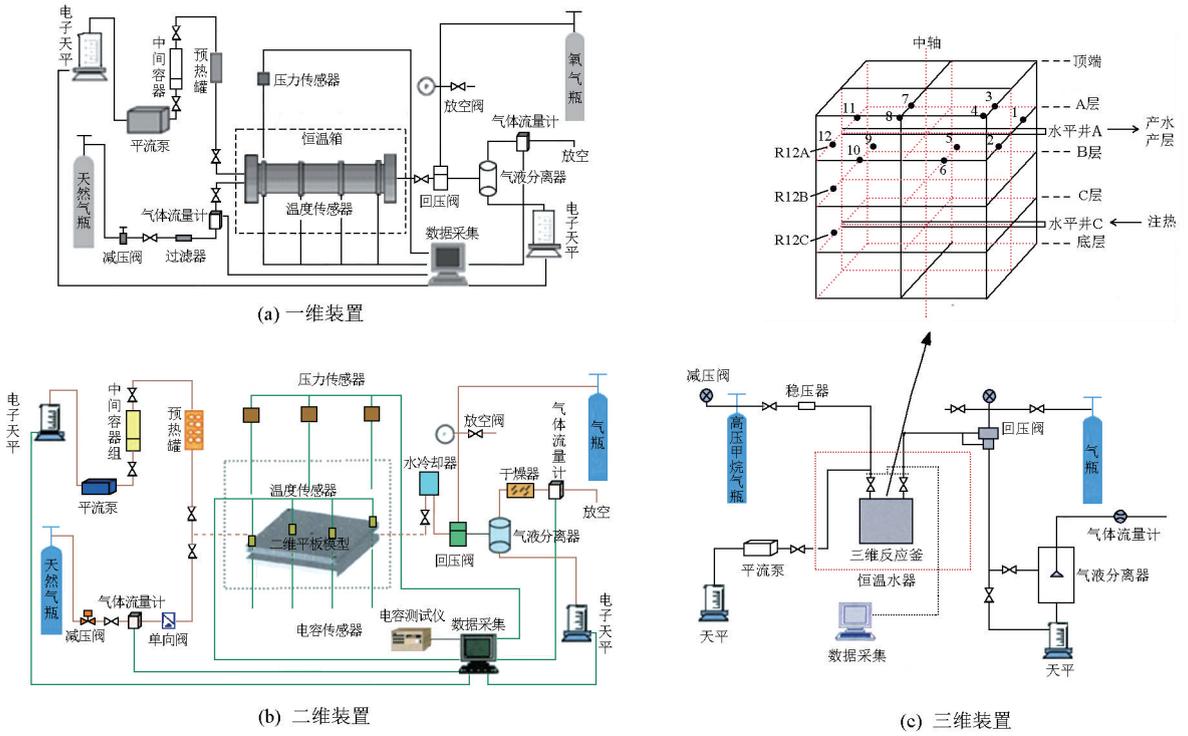


图 3 水合物模拟反应实验装置示意^[47-48,50]

Fig. 3 Schematic diagram of hydrate simulation reaction experimental device^[47-48,50]

与饱和度指数 n 有关。

2.3 数值模拟

含水合物沉积物储层变化不定,水合物填充类型随着颗粒和水合物的反复移动、填充、运移和随后的重新组合而演变,主要分为胶结型、颗粒涂层、预匹配簇和斑块状 4 种赋存状态^[55]。数值模拟主要模拟不同含水合物沉积物中水合物生成过程中孔隙结构的多变、离子的移动以及有效孔隙数目变化等,使水合物生成和分解的现象表述更直观(图 4)。

对于松散的含水合物沉积物模型,考虑到毛细

管力、粒度、湿润性和孔隙度的影响,认为水合物饱和度和指数和模型尺寸呈正相关,与水合物饱和度具有强依赖性^[56]。为研究 Archie 经验公式计算模型对电阻率计算的影响, Dong 等^[57]利用 CT 分别扫描黏附型、胶结式和分散型这 3 种不同的含水合物沉积物,将得到的水合物饱和度与校准岩电参数后的 Archie 公式计算结果进行对比,结果表明,修正后的 Archie 公式比传统 Archie 模型在水合物饱和度计算精度上提高了 20%。若使用纳米聚焦 X-CT 在微观层面探讨 3 种填充模式下的不同边界水

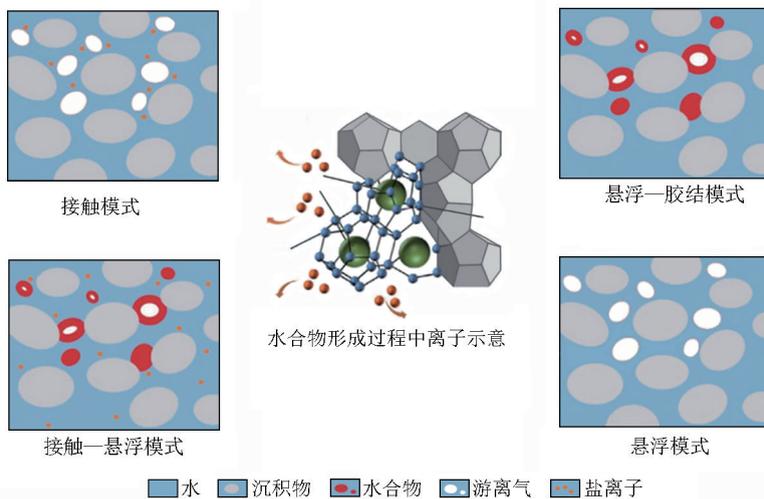


图 4 水合物的形成过程及孔隙中的赋存状态^[7]

Fig. 4 Hydrate formation process and occurrence state in pores^[7]

合物薄膜变化,不仅可以观察到不同水合物饱和度下孔喉的迁移变化,还得到了砂砾—水合物—水之间的有效孔隙度、孔数以及最大孔径等参数随水合物饱和度变化对应的动态图像,这加速了水合物饱和度分析的研究进展^[58]。用分形维数分析各部分电导性的细节变化时,孔隙水电导率和孔隙率的变化趋势相同,而沉积物骨架的电导率在水合物饱和度 $S_h \leq 80\%$ 时为平稳状态,在 $S_h > 80\%$ 时呈指数突增^[59]。结合电极探针,发现不同多孔介质背景下水合物的生成模式、饱和度存在一个与孔隙相关的临界水合物饱和度值,在孔隙堵塞之前电阻率会随水合物饱和度的升高而持续增长^[60]。

从微观上定量分析水、水合物和气体之间的电学性质具有一定的优势,不足之处在于水合物的动态成像变化分析较少。因此,可视化模拟出现在人们的视野中,用来观察砂土中水合物形成过程中的分子簇、薄膜变换、水分迁移的变化,加深对水合物电导性的动态分析。经实验得出,水合物的移动方式、生成过程与颗粒的分布和粒度有关,从而对电阻率的测量产生影响^[61]。李彦龙等^[62-63]对含水合物沉积物的界面成像进行分析,包括水分和气体流动变化均匀程度、盐离子浓度转变趋势以及伴随整个过程的温压曲线,指出水合物饱和度与盐离子浓度有关,且不同区域内水合物饱和度的分布不规律,导致电导率的偏移量有所差异。

基于上述讨论,电阻率不仅受沉积物本身、外在因素(温压条件)、水合物的赋存状态以及孔隙流体的影响,还与外界的传热效应和储层性质各向分布计算等因素有关。目前,电性数据提供不够广泛,基于水合物高饱和度范围内的分析不够充分,应根据电极装置、电极体系以及电性参数进一步优化,从而更好地反演地层水合物的确切状态及储量。对于复杂的砂岩储层,细化含水合物沉积物中天然气水合物的分子运移路径模型,可使得饱和度的定量评价更加明确。微观动力学和可视成像分析应更多结合饱和度评价公式(如 Archie 公式),对多元化储层提供可变的计算拓展式。

3 Archie 公式的应用进展

3.1 Archie 公式研究背景

电阻率测井作为一种探测碳氢化合物的重要手段,早期广泛应用于油气储层中液体和化合物的性质识别,并在储层响应特征的定性评价中占有一席之地。直至 Archie 公式出现,人们逐渐将电阻率法

测井技术作为水合物储层探测手段,同时结合饱和度计算模型对天然气水合物进行定量分析。利用 Archie 公式^[64]计算水合物饱和度由地层因子和电阻率增大指数二部分组成,即

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{a}{\Phi^m},$$

$$I = \frac{R_l}{R_0} = \frac{b}{S_w^n},$$

据此可得出电阻率与含油气饱和度之间的关联式:

$$R_l = \frac{abR_w}{\Phi^m S_w^n}.$$

式中: F 为地层因子; R_0 为饱含水时的地层电阻率, $\Omega \cdot m$; R_l 为地层电阻率, $\Omega \cdot m$; R_w 为孔隙水电阻率, $\Omega \cdot m$; Φ 为储层岩石孔隙度, %; S_w 为含水饱和度, %; a 、 b 、 m 和 n 均为 Archie 经验参数。

Archie 公式的可靠性取决于经验参数 a 、 b 、 m 和 n 的取值,纯砂岩背景下, $a=b=1$, $m=n=2$ 。 a 为岩性附加导电系数,与砂岩成分相关,在 0.6~1.5 之间变化^[65]; b 与岩石属性有关,在绝大部分实验中 $b=1$; m 受储层的孔隙度胶结程度影响,间接代表孔隙的连通性,一般为 1.5~3^[66]; n 表示水合物的微观分布,俗称水合物饱和度指数。鉴于 a 、 b 、 m 和 n 对 Archie 公式准确度的影响,精确的 m 、 n 值有利于改善 Archie 公式的应用效果,对更准确地预测天然气水合物储量具有深远意义。

3.2 岩电参数 m 、 n 的研究现状

近年来,人们常以堆放的纯净散沙孔隙度指数 ($m=1.3$) 作为水合物饱和度计算值^[67]。饱和度指数 (n) 也早在很久之前就被认为与含水量具有一定关联,在过去几十年中,大部分以 $n=1.9386$ 计算砂岩储层中的水合物饱和度^[68]。然而,多年冻土区和海域中的含水合物沉积物内部结构随地质孔隙空间移动路径的多变而呈现出复杂化,外界附加导电因素、有效孔径分布、渗透率和粒度等的影响也导致水合物的分布表现出随机性、不均匀性^[69-71],同时,受温度、盐度变化的影响,沉积物孔隙内部流体流动路径发生变化也将引起含水合物沉积物电阻的变化^[8,72];从 m 、 n 本身的物理意义来看,这些变量因素都会间接影响 m 、 n 的取值。但目前,大多数实验仍采用固定值计算天然气水合物的饱和度,只有少量通过测井或实验模拟数据拟合得出胶结指数和水合物饱和度指数。

针对日益复杂的含水合物沉积物储层,目前正在不断探索适用于泥质砂岩、低渗透砂岩以及复杂孔隙储层等不同地质环境的 m 、 n 值。Shankar 等^[73]

认为在沉积物以黏土为主时, m 的取值在 0.8~1 之间。此外, 颗粒圆润度的降低、孔隙结构连续分形的不断减小等也会使岩层渗透率、电导率等发生变化, 间接影响 m 的取值。Jackson 等^[74]拟合了 8 种球度为 0.8 的天然海沙曲线, 发现 m 在 1.39~1.58 之间, 约为 1.49, 而人工样品砂砾的 m 在 1.2~1.9, 且球度为 0.78 时约为 1.5, 因此指出孔隙度指数受砂粒形状的影响大于砂粒本身的大小和分布。可见降低球形度是增加 m 的一种方式。Anderson 等^[75]通过研究发现, 当含水饱和度 (S_w) 在 30% 左右变化时, 受孔隙连通性或粘度改变的影响, n 值的取值范围将增大到 2~3.5 之间。Spangenberg 等^[56]通过观察水合物在储层内的形成方式, 验证了 n 值可在 0.5~4 之间变化。然而, 当水合物饱和度 (S_h) 较高时 ($S_h > 70%$), 水合物作为沉积物基质起到承载作用, 此时 n 值最高可达 6^[76]。Bahuguna 等^[77]认为同一介质中不同层段内的 m 、 n 值也不同, 上部为 1.89 和 1.46, 中部为 1.88 和 1.4, 计算精度提高了近 10%。Li 等^[78]进一步对孔隙水溶液的影响做了补充, 利用 5 组不同初始盐水饱和度 (12%、20%、30%、40% 和 50%) 形成的甲烷水合物样品进行水合物饱和度—电阻率曲线的岩电参数拟合, 选取水合物饱和度膨胀系数 (K_h) 为 1.25, 确定了 $m = 0.1677$ 、 $n = 1.6019$, 其中水合物膨胀系数随不同储层环境和变量条件而变化, 间接影响 m 、 n 的拟合取值。Moahamad 等^[79]在通过传统的 Archie 公式、三维标准化回归方程和 CAPE 三种方式对砂岩和碳酸盐进行岩电参数的拟合时, 得出传统方法计算中 n 值在 0.84~3.4 之间变化且幅度较大, CPAE 技术由于样本分布的各向异性, 碳酸盐的 m 值在 1.49~2.19 范围内不稳定变化。

综合以上结论, 3D 空间技术最适合实际参考使用, 能够在三维空间上对非均质分布的储层进行水合物饱和度准确计算。对于 Archie 公式的模型架构, 除了孔隙填充、周围胶合和接触胶合模式, Cook 等^[80]采取承载架构结合纵波探讨了适用于粗砂储层的 n 值, 指出 $n = 2.5 \pm 0.5$ 在粗颗粒储层中是可行的, 此时参考数据 $m = 1.7 \pm 0.1$ 。依据天然气水合物自身对电阻率的影响, Jin 等^[81]对比原始多孔介质模型 (OPM) 和演化多孔介质理论模型 (EPM), 非线性回归了地层电阻率、孔隙水电阻率和含水饱和度, 得出 OPM 模型 $m = 1.5$ 、 $n = 2.6$, EPM 模型 $m = 2.0$ 、 $n = 0.9$, 证实了天然气水合物会在实验中部分堵塞通道且增加孔隙弯曲度的观点。

3.3 岩电参数 m 、 n 的影响因素

首先, m 、 n 值变化的主要影响因素就是孔隙度的变化。在早期, 基于电流的有效区域路径, 指出孔隙度与弯曲度、多孔介质与流体的视横截面积、岩石电阻率以及孔隙水电阻率有关^[82]。随着孔隙胶结度的逐渐变化, 学者们开始探究从松动到固结整个过程中孔隙度数值的选取对地层因素的影响, 明确了非零孔隙度 (φ_c) 在曲线上的意义, 当 $0.1 < \varphi_c < 0.25$ 、 $m = 1.3$ 时, Archie 公式数据吻合较好^[83]。

除有效孔径外, Rosales^[84]提出了一个残余孔隙度 (φ_r) 概念: 当孔隙度趋于极限但不等于零时, 取极值为残余孔隙度, 并把孔隙分成有效区域和停滞区域。当残余孔隙度应用到分散或接触的水合物填充模式时, 取 $\varphi_r = 0.02$ 、 $M = 1.64$ (M 为几何参数, 其值随着颗粒球度变小而变大)、 $m = 1.3$ (为固定参数值), 总体变化趋势为 $0.02 < \varphi_r < 0.1$ 时 $M = 1.85$ 。在后期, 人们更多地研究了岩石骨架对孔隙度的影响。解茜草等^[85]通过变换三维空间上岩石的排列和数量, 发现孔隙的复杂程度和弯曲度越大则电阻率越高; 考虑到弯曲度, 对 X-CT 扫描图像进行微观分形切割, 指出孔隙结构的分形不断减小时, 弯曲度增加幅度不等, 导致水合物饱和度指数 (n) 在不同程度上产生差异^[86]。目前, 在研究孔隙影响方面, 关注岩石结构本身变化的模拟较多, 对于含天然气水合物沉积物中随水合物生成孔隙结构与 m 、 n 之间变化的模拟较少, 且一般在实验模拟时均采用定性水膨胀系数计算水合物饱和度。但是, m 、 n 的物理意义分别与孔隙弯曲度和流通性有关; 而随着天然气水合物在孔隙中无规则形成, 孔隙中的水不同程度膨胀成水合物, 多孔介质有效孔隙度将被不同程度地减小、分形, 这些因素间接影响了 m 、 n 值的适用性。

实验数据证实, 与常温、常压相比, 温度、压力升高后, 岩石的孔隙度减小, 通道曲折度变大, 孔隙中的流体因传热温差会重新分布, m 、 b 值增加, a 、 n 值减小, 但变化幅度不等^[87]。熊学川等^[88]探究了围压对岩电参数的影响, 得出 $a = 0.9615$ 、 $m = 1.832$ 、 $b \approx 1.16$ 、 $n \approx 1.156$, 并发现随着围压的增加, a 、 b 基本不变, m 增加幅度明显, n 则缓慢下降。另外, 矿化度也是重要影响因素之一, 若矿化度增加, 导电离子会增多, 电阻率逐渐减小, 此时水合物饱和度逐渐减小, 孔隙流体连通性增强, n 值逐渐增加, 而 m 值对于矿化度的改变会呈现出不规律变化。以频率衡量岩电参数时, 同一砂岩颗粒在不同频率变化下, m 、 n 的变化程度不同, 且频散现象在低饱和度时更

明显^[89-90]。

综上所述,不同方法和影响因素下的岩电参数 m 、 n 的误差程度存在差异,这不仅涉及到孔隙结构、水合物的胶结方式和岩石中含水程度等因素,还与温度、压力及矿化度有关。目前,针对天然气水合物不同形成条件设置的变量较少,对天然气水合物领域中 m 、 n 值的拟合和影响因素研究范围不够。

4 结语

目前,电阻率测井法已经大量应用于天然气水合物领域, Archie 公式的应用范围也变得更加广泛,且围绕水合物饱和度的计算正在向成熟阶段过渡。建议下一步的研究重点在以下几个方面:

1) 电阻率随含天然气水合物饱和度的增加而单调递增,这不仅与沉积物组成和性质有关,还会受到体系温压、孔隙中流体导电性以及测量频率、储层各向电性分布等因素的影响。针对高水合物饱和度沉积物中电阻率测量数据的短缺和误差,未来需提供更多高水合物饱和度范围内的电性数据,从而为分析不同形成条件下含水合物沉积物的电阻率特性提供支撑。

2) 在现有的电阻率钻探装置和工艺上,进一步优化电化学装置、数值模拟软件、可视化装置等测量方式,以便更好地反演地层水合物的确切状态及储量。

3) 应对复杂储层的岩性多样化,需要更多的测井数据、实际案例以及水合物变化分析的模拟软件,为含天然气水合物储层的动态响应分析提供理论依据。从而实现天然气水合物与地层参数的实时关联,进一步提高天然气水合物饱和度的计算精度。

4) 岩电参数需进行细化和完善,特别是 m 、 n 值的选取。应采用不同水合物形成条件下非线性参数的优化值代替定值,通过与实际耗气量计算和直接估算法的天然气水合物饱和度进行对比,从而验证参数的可靠性。这将更准确地反映天然气水合物相应的电学特性,为 Archie 方程在天然气水合物饱和度评估中提供理论数据。

5) 岩电参数 m 、 n 影响因素的优化。由于孔隙度、温度、压力以及多孔介质等不同因素引起的水合物饱和度的变化都间接影响 m 、 n 的取值。因此,建议在非线形计算时选取计算水膨胀系数不要单一,应尽量模拟不同水合物形成条件下多孔介质中水合物的微观填充形态和实时孔隙度变

化;另外,应考虑更多天然气水合形成过程中的变量条件,如不同降温过程、砂土配比含量等条件下 m 、 n 值的拟合和影响。

参考文献 (References):

- [1] 付亚荣,李明磊,王树义,等. 中国陆域冻土层可燃冰勘探开发现状与前景[J]. 工程研究—跨学科视野中的工程, 2018, 10(5):440-450.
Fu Y R, Li M L, Wang S Y, et al. Current situation and prospect of exploration and development of combustible ice in continental frozen soil in China [J]. Engineering Research—Engineering in Interdisciplinary Perspective, 2018, 10(5):440-450.
- [2] Wei J, Fang Y, Lu H, et al. Distribution and characteristics of natural gas hydrates in the Shenhu sea area, South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 98:622-628.
- [3] Song Y, Lei Y, Zhao J, et al. The status of natural gas hydrate research in China: A review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 31(2):778-791.
- [4] 李雄炎,秦瑞宝,刘春成. 岩电参数对储层饱和度计算精度的影响分析[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2014, 36(3):68-74.
Li X Y, Qin R B, Liu C C. Analyzing the effect of rock electrical parameters on the calculation of the reservoir saturation [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2014, 36(3):68-74.
- [5] 范宜仁,朱学娟. 天然气水合物储层测井响应与评价方法综述[J]. 测井技术, 2011, 35(2):104-111.
Fan Y R, Zhu X J. Review on logging responses and evaluation methods of natural gas hydrated reservoir [J]. Well Logging Technology, 2011, 35(2):104-111.
- [6] 郭洋,胡高伟,李彦龙,等. 含水合物沉积物电阻率演化规律实验研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(5):1-13.
Guo Y, Hu G W, Li Y L, et al. Progress in experimental research on resistivity evolution of hydrate bearing sediments [J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(5):1-13.
- [7] 宁伏龙,梁金强,吴能友,等. 中国天然气水合物赋存特征[J]. 天然气工业, 2020, 40(8):1-24.
Ning F L, Liang J Q, Wu N Y, et al. Reservoir characteristics of natural gas hydrates in China [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(8):1-24.
- [8] Pearson C, Murphy J, Hermes R. Acoustic and resistivity measurements on rock samples containing tetrahydrofuran hydrates: Laboratory analogues to natural gas hydrate deposits [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1986, 91(14):14132-14138.
- [9] Lee J Y, Santamarina J C, Ruppel C. Parametric study of the physical properties of hydrate-bearing sand, silt, and clay sediments: Electromagnetic properties [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2010, 115(11):104-112.
- [10] Zatspeina O Y, Buffett B A. Experimental study of the stability of CO₂-hydrate in a porous medium [J]. Fluid Phase Equilibria, 2001, 192(1/2):85-102.
- [11] Heeschen K U, Schicks J M, Oeltzschner G. The promoting effect of

- natural sand on methane hydrate formation; Grain sizes and mineral composition[J]. *Fuel*, 2016, 181(10): 139-147.
- [12] 孙鲁一, 张广旭, 王秀娟, 等. 南海神狐海域天然气水合物饱和度的数值模拟分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(2): 210-221.
- Sun L Y, Zhang G X, Wang X J, et al. Numerical modeling of gas hydrate saturation for the Shenhu area, South China Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 41(2): 210-221.
- [13] Chen L T, Li N, Sun C Y, et al. Hydrate formation in sediments from free gas using a one-dimensional visual simulator[J]. *Fuel*, 2017, 197: 298-309.
- [14] Kim H S, Cho G C, Lee J Y, et al. Geotechnical and geophysical properties of deep marine fine-grained sediments recovered during the second Ulleung Basin Gas Hydrate expedition, East Sea, Korea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47(1): 56-65.
- [15] 陈玉凤, 梁德青, 吴能友. 南海神狐海域水合物对岩心电阻率的影响[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(6): 1241-1246.
- Chen Y F, Liang D Q, Wu N Y. Effect of hydrate on core resistivity in Shenhu area, South China Sea [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(6): 1241-1246.
- [16] Dufrane W L, Stern L A, Constable S, et al. Electrical properties of methane hydrate + sediment mixtures [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(7): 4773-4783.
- [17] Waite W F, Santamarina J C, Cortes D D, et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments[J]. *Reviews of Geophysics*, 2009, 47(4): RG4003.
- [18] 周锡堂, 樊栓狮, 梁德青. 用电导性监测天然气水合物的形成和分解[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(4): 593-595.
- Zhou X T, Fan S S, Liang D Q. Detecting formation and decomposition of NGH by measuring conductivity [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(4): 593-595.
- [19] 王英梅, 吴青柏, 蒲毅彬, 等. 温度梯度对粗砂中甲烷水合物形成和分解过程的影响及电阻率响应[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(1): 19-25.
- Wang Y M, Wu Q B, Pu Y B, et al. Effect of temperature gradient on methane hydrate formation and decomposition process and resistivity response in coarse sand [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(1): 19-25.
- [20] 陈玉凤, 徐宗财, 李栋梁, 等. 温度周期变化下分散型天然气水合物的沉积物电阻率测量[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(7): 18-24.
- Chen Y F, Xu Z C, Li D L, et al. Electricity resistivity measurement of disseminated gas hydrates bearing under cyclic temperature [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(7): 18-24.
- [21] Gabitto J F, Costas T. Physical properties of gas hydrates: A review [J]. *Journal of Thermodynamics*, 2010(7): 1-13.
- [22] Lu R, Stern L A, Du F, et al. The effect of brine on the electrical properties of methane hydrate [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(11): 10877-10892.
- [23] 李淑霞, 夏晔冉, 郝永卯, 等. 电阻率测试技术在沉积物—盐水—甲烷水合物体系中的应用[J]. *实验力学*, 2010, 25(1): 95-99.
- Li S X, Xia X R, Hao Y M, et al. Application of resistivity measure-
- ment in the system of sediment-brine-methane hydrate [J]. *Journal of experimental mechanics*, 2010, 25(1): 95-99.
- [24] 任韶然, 刘建新, 刘义兴, 等. 多孔介质中甲烷水合物形成与分解实验研究[J]. *石油学报*, 2009, 30(4): 583-587.
- Ren S R, Liu J X, Liu Y X, et al. Experimental study on formation and decomposition of methane hydrate in porous media [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(4): 583-587.
- [25] Sung W, Kang H. Experimental investigation of production behaviors of methane hydrate saturated in porous rock [J]. *Energy Sources*, 2003, 25(8): 845-856.
- [26] Huang L, Ping G, Zhan S, et al. Experimental investigation into formation/dissociation characteristics of methane hydrate in consolidated sediments with resistance measurement[J]. *Fuel*, 2018, 234(15): 985-995.
- [27] 胡高伟, 业渝光, 张剑, 等. 松散沉积物中天然气水合物生成、分解过程与声学特性的实验研究[J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 465-474.
- Hu G W, Ye Y G, Zhang J, et al. Experimental study on the formation, decomposition and acoustic characteristics of natural gas hydrate in loose sediments [J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 465-474.
- [28] Ren S R, Liu Y, Liu Y, et al. Acoustic velocity and electrical resistance of hydrate bearing sediments [J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2010, 70(1/2): 52-56.
- [29] 张炜, 邵明娟, 姜重昕, 等. 世界天然气水合物钻探历程与试采进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(5): 1-13.
- Zhang W, Shao M J, Jiang C X, et al. World progress of drilling and production test of natural gas hydrate [J]. *Marine Geology and Quaternary*, 2018, 38(5): 1-13.
- [30] 关进安, 樊栓狮, 梁德青, 等. 自然界天然气水合物勘探开发概述[J]. *新能源进展*, 2019, 7(6): 522-531.
- Guan J A, Fan S S, Liang D Q, et al. An overview on gas hydrate exploration and exploitation in natural fields [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2019, 7(6): 522-531.
- [31] Nobes D C, Villinger H, Davis E E, et al. Estimation of marine sediment bulk physical properties at depth from seafloor geophysical measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1986, 91(14): 14033-14043.
- [32] Waite W F, Winters W J, Mason D H. Methane hydrate formation in partially water-saturated Ottawa sand [J]. *American Mineralogist*, 2004, 89(8/9): 1202-1207.
- [33] Yousif M H, Li P M, Selim M S, et al. Depressurization of natural gas hydrate in Berea sandstone cores [J]. *Journal of Inclusion Phenomena and Molecular Recognition in Chemistry*, 1989, 8(1): 71-88.
- [34] Zatssepina O Y, Buffett B A. Nucleation of CO₂-hydrate in a porous medium [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2002, 200(2): 263-275.
- [35] Yama J A, Hase Y, Torii M. Paleostresses inferred from mesoscale faults in the Late Pliocene Hitoyoshi Formation; implications for the formation of vein-type ore deposits in southern Kyushu [C]// *Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics*, 2009.
- [36] Buffett B A, Zatssepina O Y. Formation of gas hydrate from dissolved gas in natural porous media [J]. *Marine Geology*, 2000, 164

- (1/2):69-77.
- [37] 陈强,刘昌岭,邢兰昌,等. 孔隙水垂向不均匀分布体系中水合物生成过程的电阻率变化[J]. 石油学报,2016,37(2):222-229.
Chen Q,Liu C L,Xing L C, et al. Resistivity variation during hydrate formation inhomogeneous distribution system of pore water [J]. Journal of Oil,2016,37(2):222-229.
- [38] Lech M,Skutnik Z,Bajda M, et al. Applications of electrical resistivity surveys in solving selected geotechnical and environmental problems [J]. Applied Sciences,2020,10(7):2263.
- [39] Perez-Rosales C. On the relationship between formation resistivity factor and porosity [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1982,22(4):531-536.
- [40] 金学彬,陈强,邢兰昌,等. 多孔介质中甲烷水合物聚散过程的交流阻抗谱响应特征[J]. 天然气工业,2016,36(3):120-127.
Jin X B,Chen Q,Xing L C, et al. Response characteristics of AC impedance spectrum during the formation and dissociation of methane hydrate in porous media [J]. Natural Gas Industry,2016,36(3):120-127.
- [41] 王彩程,邢兰昌,陈强,等. 含甲烷水合物多孔介质的复电阻率频散特性与模型[J]. 科学技术与工程,2017,17(18):46-54.
Wang C C,Xing L C,Chen Q, et al. Frequency dispersion characteristics and modeling of complex resistivity of porous medium containing methane hydrate [J]. Science Technology and Engineering,2017,17(18):46-54.
- [42] 牛佳乐,邢兰昌,魏伟,等. 基于宽频电阻抗特性与阿尔奇公式的含水合物饱和度计算模型[J]. 计算机测量与控制,2020,28(8):250-255.
Niu J L,Xing L C,Wei W, et al. Calculation model of hydrate saturation based on broadband electrical impedance characteristics and Archie formula [J]. Computer Measurement and Control,2020,28(8):250-255.
- [43] Chen Y F,Liang D Q,Wu N Y. In situ measurement of electrical resistivity of ocean sediments containing gas hydrates [J]. Applied Mechanics and Materials,2013,2743(432):104-108.
- [44] Pandey L,Sain K,Joshi A K. Estimate of gas hydrate saturations in the Krishna-Godavari basin, eastern continental margin of India, results of expedition NGHP-02 [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019,108(3):581-594.
- [45] Feng C,Yang Z,Feng Z, et al. A novel method to estimate resistivity index of tight sandstone reservoirs using nuclear magnetic resonance logs [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020,79(11):103358.
- [46] 许越,刘兆彬. 四极法电阻率测量在石油管道防腐蚀中的应用[J]. 地质与勘探,2016,52(3):551-555.
Xu Y,Liu Z B. Application of the four-electrode resistivity method to anti-corrosion design of oil pipelines [J]. Geology and Exploration,2016,52(3):551-555.
- [47] 赵仕俊,白云凤,张娟. 基于电阻率测量的一维天然气水合物模拟实验装置[J]. 石油机械,2009,37(3):16-19.
Zhao S J,Bai Y F,Zhang J. One-dimensional gas hydrate simulation experiment device based on resistivity measurement [J]. China Petroleum Machinery,2009,37(3):16-19.
- [48] 杜燕,何世辉,黄冲,等. 水合物合成电容特性与降压开采二维实验研究[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(4):107-111.
Du Y,He S H,Huang C, et al. Two-dimensional experimental study on capacitance characteristics of hydrate synthesis and depressurization mining [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Natural Science Edition,2009,31(4):107-111.
- [49] Birkedal K A, Ersland G, Hauge L P, et al. Electrical resistivity measurements of CH₄ hydrate-bearing sandstone during formation [C]//7th International Conference on Gas Hydrates, Edinburgh, Scotland, United Kingdom,2011:17-21.
- [50] 李小森,冯景春,李刚,等. 电阻率在天然气水合物三维生成及开采过程中的变化特性模拟实验[J]. 天然气工业,2013,33(7):18-23.
Li X S,Feng J C,Li G, et al. An experimental study of resistivity variation in the 3D simulation of methane hydrate generation and production [J]. Natural Gas Industry,2013,33(7):18-23.
- [51] 王炳辉,王志华,姜朋明,等. 饱和砂土不同孔隙率的电阻率特性研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(9):1739-1745.
Wang B H,Wang Z H,Jiang P M, et al. Electrical resistivity characteristics of saturated sand with varied porosities [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(9):1739-1745.
- [52] Li S X,Xia X R,Xuan J, et al. Resistivity in formation and decomposition of natural gas hydrate in porous medium [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering,2010,18(1):39-42.
- [53] Wu J,Guo X,Sun X, et al. Flume experiment evaluation of resistivity probes as a new tool for monitoring gas migration in multilayered sediments [J]. Applied Ocean Research,2020,105(6):102415.
- [54] 陈玉凤,李栋梁,梁德青,等. 南海沉积物天然气水合物饱和度与电阻率的关系[J]. 石油学报,2013,34(3):507-512.
Chen Y F,Li D L,Liang D Q, et al. Relationship between gas hydrate saturation and resistivity in sediments of the South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(3):507-512.
- [55] Wu P,Li Y,Liu W, et al. Cementation failure behavior of consolidated gas hydrate-bearing sand [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,2020,125(1):e2019JB018623.
- [56] Spangenberg E. Modeling of the influence of gas hydrate content on the electrical properties of porous sediments [J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth,2001,106(4):6535-6548.
- [57] Dong H,Sun J,Zhu J, et al. Developing a new hydrate saturation calculation model for hydrate-bearing sediments [J]. Fuel,2019,248:27-37.
- [58] Li C,Liu C,Hu G, et al. Investigation on the multiparameter of hydrate-bearing sands using nano-focus X-ray computed tomography [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,2019,124(3):2286-2296.
- [59] 陈玉凤,吴能友,梁德青,等. 基于分形孔隙模型的含天然气水合物沉积物电阻率数值模拟[J]. 天然气工业,2018,38(11):128-134.
Chen Y F,Wu N Y,Liang D Q, et al. Numerical simulation of resistivity of gas hydrate bearing sediments based on fractal pore model [J]. Natural Gas Industry,2018,38(11):128-134.
- [60] 陈国旗,李承峰,刘昌岭,等. 多孔介质中甲烷水合物的微观分

- 布对电阻率的影响[J]. 新能源进展, 2019, 7(6): 493-499.
- Chen G Q, Li C F, Liu C L, et al. Effect of microscopic distribution of methane hydrate on resistivity in porous media [J]. Progress in new energy, 2019, 7(6): 493-499.
- [61] Chen L T, Li N, Sun C Y, et al. Hydrate formation in sediments from free gas using a one-dimensional visual simulator [J]. Fuel, 2017, 197(1): 298-309.
- [62] 李彦龙, 陈强, 吴能友, 等. 电阻率层析成像技术在岩芯尺度水合物可视化探测中的应用[J]. 地质论评, 2020, 66(S1): 84-86.
- Li Y L, Chen Q, Wu N Y, et al. Application of resistivity tomography in visualization detection of hydrate at core scale[J]. Geological Review, 2020, 66(S1): 84-86.
- [63] 李彦龙, 孙海亮, 孟庆国, 等. 沉积物中天然气水合物生成过程的二维电阻层析成像观测[J]. 天然气工业, 2019, 39(10): 132-138.
- Li Y L, Sun H, Meng Q G, et al. 2-D electrical resistivity tomography assessment of hydrate formation in sandy sediments [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(10): 132-138.
- [64] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the AIME, 1942, 146(1): 54-62.
- [65] 田秘, 侯正猛, 李占东, 等. 变形后阿尔奇公式在特低渗储层解释中的应用[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2017, 31(10): 128-133.
- Tian M, Hou Z M, Li Z D, et al. Application of Archie formula in the interpretation of extra low permeability reservoir after deformation[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2017, 31(10): 128-133.
- [66] 张振城, 孙建孟, 马建海, 等. 阿尔奇公式 a, m 值对饱和度计算结果的影响[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(6): 27-30.
- Zhang Z C, Sun J M, Ma J H, et al. Effect of different values of a and m in Archie formula on water saturation [J]. Journal of the University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2004, 28(6): 27-30.
- [67] 张庚骥. 电阻率测井在确定某些储层特性中的作用[J]. 测井技术, 2007, 31(3): 197-202.
- Zhang G J. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristic [J]. Well Logging Technology, 2007, 31(3): 197-202.
- [68] Pearson C F. Natural gas hydrate deposits; A review of in situ properties [J]. Journal of Physical Chemistry, 1983, 87(21): 4180-4185.
- [69] 黄琴, 张建民, 蔡辉, 等. 基于主控因素识别低阻油层的评价方法[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2017, 32(2): 35-39.
- Huang Q, Zhang J M, Cai H, et al. Evaluation method for identifying low resistance reservoir based on main control factors [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2017, 32(2): 35-39.
- [70] Zhao J, Liu C, Li C, et al. Pore-Scale investigation of the electrical property and saturation exponent of Archie's law in hydrate-bearing sediments [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(1): 111.
- [71] Park T, Lee J Y, Kwon T H. Effect of pore size distribution on dissociation temperature depression and phase boundary shift of gas hydrate in various fine-grained sediments [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(4): 5321-5330.
- [72] Lu R, Stern L A, Du F W L, et al. The effect of brine on the electrical properties of methane hydrate [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019, 124(11): 10877-10892.
- [73] Shankar U, Riedel M. Assessment of gas hydrate saturation in marine sediments from resistivity and compressional-wave velocity log measurements in the Mahanadi Basin, India [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58(7): 265-277.
- [74] Jackson P D, Smith D T, Stanford P N. Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands [J]. Geophysics, 1978, 43(6): 1250-1268.
- [75] Anderson W G. Wettability literature survey-Part 3: The effects of wettability on the electrical properties of porous media [J]. Journal of Petroleum Technology, 1986, 38(12): 1371-1378.
- [76] Spangenberg E. Pore space hydrate formation in a glass bead sample from methane dissolved in water [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(24): 1-4.
- [77] Bahuguna R M, Pabla S S, Lal M, et al. Impact on estimation of water saturation values using laboratory determined a, m & n parameters: A case study [C] // Proceedings of the 6th International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, 2006: 4-6.
- [78] Li F G, Sun C Y, Li S L, et al. Experimental studies on the evolution of electrical resistivity during methane hydrate formation in sediments [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(10): 6210-6217.
- [79] Moahamad A M, Hamada. Determination techniques of Archie's parameters: a, m and n in heterogeneous reservoirs [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2017, 14(6): 1358-1367.
- [80] Cook A E, Waite W F. Archie's saturation exponent for natural gas hydrate in coarse-grained reservoirs [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(3): 2069-2089.
- [81] Jin Y, Li S, Yang D. Experimental and theoretical quantification of the relationship between electrical resistivity and hydrate saturation in porous media [J]. Fuel, 2020, 269: 117378.
- [82] Winsauer W O, Shearin H M, Masson P H, et al. Resistivity of brine-saturated sands in relation to pore geometry [J]. AAPG Bulletin, 1952, 36(2): 253-277.
- [83] Wyllie M R J, Gregory A R. Formation factors of unconsolidated porous media; Influence of particle shape and effect of cementation [J]. Journal of Petroleum Technology, 1953, 5(4): 103-110.
- [84] Rosales P C. Generalization of the Maxwell equation for formation resistivity factors [J]. Journal of Petroleum Technology, 1976, 28(7): 819-824.
- [85] 解茜草, 孙超, 仝杰. 砾岩地层电阻率与孔隙度和孔隙形状关系数值模拟 [J]. 测井技术, 2015, 39(6): 693-697.
- Xie Q C, Sun C, Wu J. Numerical simulation of relationship between resistivity and porosity and pore shape in conglomerate formation [J]. Well Logging Technology, 2015, 39(6): 693-697.
- [86] Zhang Z, Liu L, Li C, et al. Fractal analyses on saturation exponent in Archie's law for electrical properties of hydrate-bearing porous

- media[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196(1):107642.
- [87] 赵发展,蔡敏龙. 不同温压条件下砂岩 m 、 a 、 n 、 b 值的变化特征 [J]. 新疆石油地质, 1998(6):35-37.
Zhao F Z, Cai M L. Characteristics of m , a , n and b values of sandstone under different temperature and pressure conditions [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1998(6):35-37.
- [88] 熊学川,刘向君,梁利喜,等. 围压对页岩电参数的影响研究 [C]//2019 油气田勘探与开发国际会议论文集. 西安石油大学、陕西省石油学会:西安石油大学, 2019:694-700.
Xiong X C, Liu X J, Liang L X, et al. The experimental study of confining pressure effect on shale rock electrical parameters [C]// 2019 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development. Xi'an Shiyou University, Shaanxi Petroleum Society: Xi'an Shiyou University, 2019:694-700.
- [89] 孙建孟,吴金龙,于代国,等. 阿尔奇参数实验影响因素分析 [J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(2):39-41.
Sun J M, Wu J L, Yu D G, et al. Analysis of influencing factors of Archie parameter experiment [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(2):39-41.
- [90] 殷艳玲. 岩电参数影响因素研究 [J]. 测井技术, 2007, 31(6):511-515.
Yin Y L. Study on influencing factors of lithologica-electrical parameters [J]. Well Logging Technology, 2007, 31(6):511-515.

Resistivity characteristics of natural gas hydrate-bearing sediments and the application progress of the Archie equation

WANG Ying-Mei^{1,2}, JIAO Wen-Ze^{1,2}, LIU Sheng-Hao^{1,2}, WANG Qian^{1,2}, SONG Han-Yu^{1,2}

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Studying the occurrence of natural gas hydrates (NGHs) is of profound significance for NGH exploration. The evaluation of the NGH saturation mainly relies on the Archie equation using the electrical parameters of rocks. The key to accurately calculating the NGH saturation is to select corresponding values of rock electrical parameters for different geological environments, especially the porosity index (m) and the saturation index (n). However, it is still a challenge to select the optimal m and n values for NGH evaluation in resistivity logging. To ascertain the relevant resistivity regularity of NGHs and the determination method of rock electrical parameter values in the Archie equation, this study systematically reviewed relevant references and summarized the resistivity influencing factors of NGHs. Moreover, this study analyzed the influencing factors for the accurate evaluation of the NGH saturation based on the Archie equation. Accordingly, this study generalized the resistivity characteristics of NGH-bearing sediments and proposed the application research direction of the Archie equation.

Key words: natural gas hydrate; resistivity logging; Archie equation; rock electrical parameter; saturation

(本文编辑:沈效群)