

中国石油天然气集团公司

测井重点实验室第三届学术会议论文集

(2004)

中国石油天然气集团公司测井重点实验室 编



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

中国石油天然气集团公司 测井重点实验室第三届 学术会议论文集 (2004)

中国石油天然气集团公司测井重点实验室 编

石油工业出版社

1. 低
校
比
为

第
一
期
揭

内 容 提 要

本书是中国石油天然气集团公司测井重点实验室第三届学术会议论文集,内容反映了在电、声、核、核磁及光纤光栅测井基础实验及理论方面的最新进展和成果。

本书可供从事测井基础研究和实际应用的工程技术人员参考,同时也可作为大学本科以上学生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中国石油天然气集团公司测井重点实验室第三届学术会议论文集:2004/中国石油天然气集团公司测井重点实验室编.

—北京:石油工业出版社,2005.3

ISBN 7-5021-4929-5

I. C…

II. 中…

III. 油气测井—学术会议—文集

IV. TE151-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第004052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

总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷

2005年3月第1版 2005年3月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:7.5

字数:188千字 印数:1—1000册

定价:20.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

为加强测井应用基础创新研究,提高测井技术发展水平,中国石油天然气集团公司于1998底以江汉测井研究所(现为中国石油测井有限公司技术中心)为主体组建了测井重点实验室,并设石油大学(北京)、石油大学(华东)、江汉石油学院(现为长江大学)三个重点研究室。按照“开放、流动、联合、竞争”的新机制,吸纳大庆油田、辽河油田、大港油田作为重点实验室试验基地,形成了中国石油天然气集团公司测井行业从事测井应用基础研究和学科超前研究的主要研究力量。

六年来,测井重点实验室基本实现了从应用基础和前沿技术研究到仪器研制、软件开发与现场应用的有机结合,加快了科研向生产转化的过程,初步建设成为中国石油天然气集团公司的测井技术创新基地、人才培养基地和学术交流基地。目前,测井重点实验室不仅成为联系测井行业进行学术交流和技术合作的一个重要纽带和桥梁,同时还是出方法、出理论、出人才和为可持续发展提供技术支撑的一个重要基地。

测井重点实验室的目标是以储层岩石物理性质、测井新方法、测井信息处理与应用为主要研究方向,力争建成设备配套、技术先进、具有国际竞争力和自主创新能力的测井研究开发中心,能够承担与中国石油天然气集团公司勘探开发密切相关的测井应用基础研究和学科超前研究,不断探索和发展测井新理论、新方法和新技术,积极为油田勘探开发和中国石油天然气集团公司的发展战略服务。六年来,在基础研究方面已取得如下成果:

1. 储层岩石物理性质研究

针对我国储层非均质特点,通过对储层电、声、核、核磁特性与岩性、孔隙结构、流体分布等的关系及变化机理的研究,探索创建了适用于我国地质特点的新测井方法和解释方法。测井应用基础研究跃上了一个新台阶,形成了一批有较高水平的新方法、新产品和新技术。

在天然气储层岩石物理特性及测井响应研究方面,针对岩石物性、电性、声学特性、核磁和渗流特性,进行了6000余次实验,全面、系统、深入地研究了“四性”关系,建立了地质参数和测井资料之间较为准确的定量和半定量关系,并在实际应用中得到验证,建立的解释方法和解释模型符合研究区块的地质规律。其成果技术水平达到国内先进水平。

2. 测井新方法研究

研制了具有自主知识产权的聚焦型激发极化与自然电位组合测井方法,测井方法和解释方法适用于淡水地区的砂泥岩剖面;能定量求解地层水电阻率;校正储层的粘土矿物对电测井的影响。

复电阻率测井方法研究取得了较好的进展,针对我国地质特点,在数值模拟和实验基础上,研究电法测井在频率域条件下储层岩石性质的变化规律和响应机理,提取多频率下丰富的地层响应信息,建立新的储层评价方法和解释模型。自主研制了实验装置“线圈法岩石复电阻率自动扫频测量的方法及其系统”。

微电阻率扫描成像测井方法研究仪器填补了国内空白,是我国第一支具有自主知识产权的电成像测井仪器。仪器对识别裂缝、溶洞和非均质严重的油气藏,解释地质精细结构,评

价沉积环境等能提供极其有用的信息。

成功建立模拟地层电声成像实验系统，建立油藏条件下的储层参数与成像测井资料的定量关系，为现场的资料定量解释提供方法和依据，不仅对现场实际测井参数的选择起到了关键作用，而且对井下仪器研制和改进，以及新型仪器参数设计也提供了必不可少的实验手段。

3. 测井信息处理与应用

测井解释工作站系统总体上达到了国际先进水平，其中水淹层细分解释技术达到国际领先水平。

网络环境下测井处理解释一体化技术研究，经过近三年的攻关，形成了完整实用的测井网络处理解释程序一体化集成方案和一整套局域网多井数据管理软件。

本论文集内容是测井重点实验室的研究人员及试验基地科技人员在基础研究中建立的新方法和技术创新点，反映了在电、声、核、核磁及光纤光栅测井基础实验及理论方面的最新进展和成果。

目 录

不同粒度人工岩样核磁共振特性实验研究

..... 陈守军 孙宝佃 罗燕颖 王 蕾 杜环虹 张银海 王 玮 (1)

岩石复电阻率影响因素研究 李建军 邓少贵 范宜仁 (9)

地层水矿化度对岩石性质的影响实验研究..... 邓少贵 范宜仁 (16)

砂岩速度各向异性的实验研究..... 李金臣 史 譚 邓继新 (23)

低孔低渗砂岩岩电实验研究及应用..... 王 黎 孙宝佃 万金彬 (27)

充液井孔中的相控线阵声波辐射器在地层中产生的声场..... 车小花 乔文孝 (31)

相控阵技术在分区水泥胶结测井仪 (SBT) 中的应用..... 陈雪莲 (38)

利用交叉偶极资料的频散特性识别各向异性的类型..... 苏远大 (42)

双发双收声系扩径段测井响应特征分析

..... 李洪奇 王玉敏 杜环虹 邵才瑞 张福明 (49)

阵列声波测井技术的研究与应用..... 伍 东 汪 浩 傅永强 (55)

岩石核磁共振弛豫谱反演的一种新算法..... 王忠东 (61)

高分辨率阵列侧向测井方法数字模拟研究..... 朱 军 冯琳伟 阮亦军 贺秋利 (69)

阵列感应测井快速正演与反演研究..... 高 杰 李洪奇 (79)

振动管式流体密度传感器研究..... 谭宝海 鞠晓东 (85)

水平井、斜井两相流动实验分析研究..... 郭海敏 侯月明 戴家才 (90)

USB 在测井模拟信号采集中的应用 鞠晓东 卢俊强 (94)

油气测井分布式光纤光栅智能传感网络系统研究

..... 乔学光 贾振安 付海威 王宏亮 (101)

注蒸汽开发过程中的电各向异性研究 杨春梅 李洪奇 陆大卫 张方礼 (108)

不同粒度人工岩样核磁共振特性实验研究

陈守军 孙宝佃 罗燕颖 王 蕾 杜环虹 张银海 王 玮

(测井重点实验室)

摘 要: 利用可以控制粒度的沙子进行核磁共振实验, 研究岩石粒度对核磁共振测试结果的影响。完成了 $<0.1\text{mm}$ 、 $0.1\sim 0.15\text{mm}$ 、 $0.15\sim 0.3\text{mm}$ 、 $0.3\sim 0.45\text{mm}$ 、 $0.45\sim 0.9\text{mm}$ 、 $0.9\sim 1.8\text{mm}$ 、 $1.8\sim 3.6\text{mm}$ 、 6.5mm 等8种不同颗粒直径沙子的核磁共振实验。经实验分析, 得到了颗粒直径影响核磁共振测试结果的规律以及孔隙半径与核磁共振 T_2 值之间的转换关系。

关键词: 人工岩样 核磁共振 颗粒度 孔隙半径

利用可以控制某些物性参数的人工岩样进行实验室核磁共振测量, 可以进行岩石核磁共振影响因素研究。利用可控粒度的人工岩样饱和水后进行核磁共振测量, 可以分析粒度对于岩石核磁共振测量结果的影响, 还可以研究岩石核磁共振 T_2 测试结果与孔隙半径的关系。

核磁共振测井是近年来迅速发展起来的一种测井技术, 采用该技术不仅可以测到地层孔隙度、渗透率和可动流体百分数等重要物性参数, 可以识别油、气、水层, 还可以进行孔隙结构分析, 获得地层的孔隙半径分布。本文首次在实验室里, 利用可以控制粒度大小的沙子饱和水后进行核磁共振测量, 研究颗粒大小对核磁共振测量结果的影响以及 T_2 测试结果与孔隙半径的关系。

一、实验原理

理论和实验研究都表明, 岩石样品的 T_2 分布可以用于描述岩石的孔径分布。利用核磁共振 T_2 分布表征岩石的孔径分布, 不仅在石油测井中有所应用, 在其他领域, 如材料科学、食品科学和医学等领域, 早已得到广泛应用。这种利用核磁共振 T_2 分布表征孔隙介质的孔径分布有一个重要条件, 即孔隙中只能饱和单相流体。如果孔隙中饱和多相流体, 则 T_2 分布不仅含有孔径分布的信息, 还有流体成分的信息混合在一起。

由核磁共振弛豫机制可知, 在均匀磁场中测量的横向弛豫时间 T_2 为

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right) \quad (1)$$

式中 T_{2B} ——流体的体积(自由)弛豫时间, ms;

S ——孔隙表面积;

V ——孔隙体积;

ρ_2 ——岩石横向表面弛豫率, 是表征岩石性质的一种参数。

T_{2B} 的数值通常在 3000ms 以上, 要比 T_2 值大得多, 即 T_{2B} 远大于 T_2 。因此, (1) 式中右边第一项可以忽略, 于是得到

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right) \quad (2)$$

(2) 式中的的比值 (S/V) 是孔隙的比表面。如果假设孔隙是由理想的球体组成的, 则

$S/V = 3/R$, 其中 R 为孔隙半径; 如果假设孔隙是由理想的圆柱体组成的, 则 $S/V = 2/R$ 。如果再假设孔隙半径与喉道半径成正比, 则 (2) 式可改写为

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left(\frac{F_s}{R} \right) \quad (3)$$

式中, F_s 可称之为孔隙形状因子, 对于球形孔隙, $F_s = 3$; 对于柱状喉道, $F_s = 2$ 。本次实验中, 假设所用实验样品沙粒为球体, 且所形成的孔隙为球形孔隙。则由 (3) 式可得到, 孔隙半径与 T_2 值成正比

$$R = 3\rho_2 T_2 \quad (4)$$

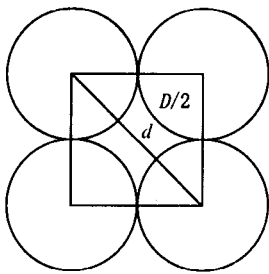
二、实验仪器和方法

本次实验的核磁共振测量使用了英国共振仪器公司 (NuMar) 开发的 MARAN-2 型核磁共振岩心分析仪, 该仪器是中国石油集团测井有限公司技术中心核磁共振实验室于 1998 年引进的。MARAN-2 型仪器是目前国内比较先进的岩心核磁共振分析仪之一。MARAN-2 型核磁共振岩心分析仪主要工作参数为: 测试温度为 30°C , 工作频率为 2MHz , 单个脉冲序列最多可采集 100000 个 CPMG 回波, 磁体有效工作空隙 86mm 。该仪器具有测试速度快、重复测量稳定性好、信噪比高等特点。 90° 脉冲、 180° 脉冲可由宏命令自动搜寻; 回波间隔任意可调, 最小可达 0.2ms ; 等待时间、接收增益、回波串长度等任意可调, 可涵盖现场测井的全部测量范围。

实验所用测试样品为从汉江边 (湖北潜江段) 所取粒度为粗、中、细的河沙。利用每英寸 180 目、120 目、60 目、40 目、20 目、10 目的一套套筛筛取河沙, 将河沙分成颗粒直径分别为 $<0.1\text{mm}$ 、 $0.1\sim 0.15\text{mm}$ 、 $0.15\sim 0.3\text{mm}$ 、 $0.3\sim 0.45\text{mm}$ 、 $0.45\sim 0.9\text{mm}$ 、 $0.9\sim 1.8\text{mm}$ 以及 $1.8\sim 3.6\text{mm}$ 的 7 类沙子。进行单颗粒实验时, 取适量的单颗粒沙子, 饱和蒸馏水后测试其横向弛豫衰减曲线, 解谱得到相应的 T_2 分布。

三、结果和分析

1. 沙子粒度及孔隙模型



假设同一颗粒直径的沙体的孔隙与骨架单元为如图 1 所示的立方体结构 (正剖面为正方形)。设沙子的颗粒直径为 $D\text{mm}$, 则平均孔隙直径为

$$d = \sqrt{2}D - D = (\sqrt{2} - 1)D = 0.414D \quad (5)$$

平均孔隙半径

$$R = \frac{d}{2} = \frac{(\sqrt{2} - 1)}{2}D = 0.207D \quad (6)$$

图 1 沙子粒度及孔隙的立方体模型 (正剖面为正方形)

2. 沙体全饱和水的 T_2 特征

图 2 至图 6 分别为粒度 $<0.1\text{mm}$ 、 $0.1\sim 0.15\text{mm}$ 、 $0.15\sim 0.3\text{mm}$ 、 $0.3\sim 0.45\text{mm}$ 、 $0.45\sim 0.9\text{mm}$ 的沙体在不同含水饱和度时的 T_2 谱, 图 7 为粒度 $0.9\sim 1.8\text{mm}$ 沙体全饱和水时的 T_2 谱, 图 8 为粒度 $1.8\sim 3.6\text{mm}$ 沙体全饱和水时的 T_2 谱, 图 9 为直径 6.5mm 的玻璃球饱和水时的 T_2 谱, 图 10 为蒸馏水的 T_2 谱。

由图 2 至图 10 的 T_2 谱可见, 随着粒度由小 ($<0.1\text{mm}$) 变大 ($1.8\sim 3.6\text{mm}$), 直至 6.5mm (玻璃球), 核磁共振横向弛豫时间 T_2 也由小变大, 表现为 T_2 谱位置在 T_2 时间轴上

的位置从左向右的平移， T_2 几何平均值由小变大（由 41ms 变大到 2738ms），谱峰所对应的 T_2 值也由小变大（由 68ms 变大到 2658ms）。

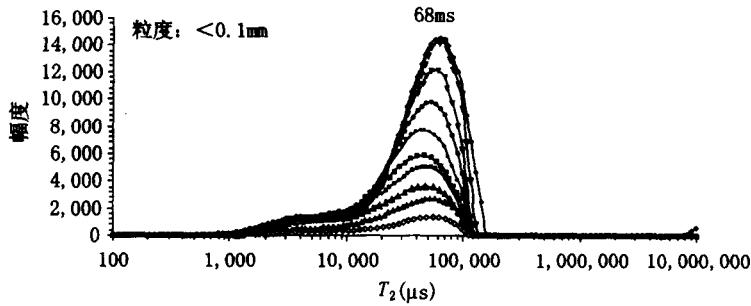


图 2 粒度小于 0.1mm 的沙体在不同含水饱和度时的 T_2 谱

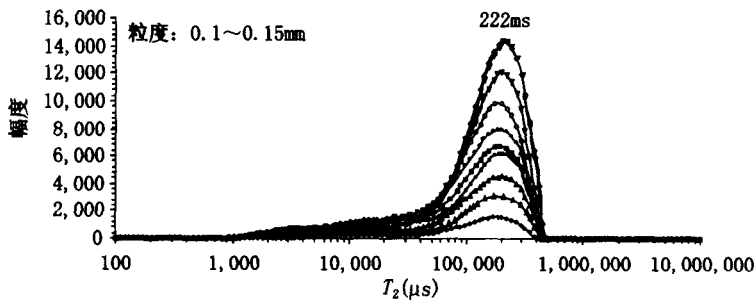


图 3 粒度为 0.1~0.15mm 的沙体在不同含水饱和度时的 T_2 谱

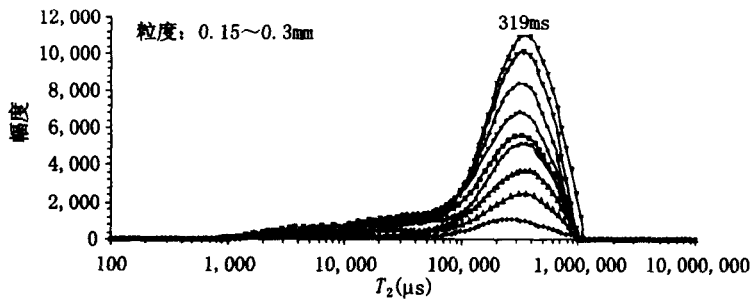


图 4 粒度为 0.15~0.3mm 的沙体在不同含水饱和度时的 T_2 谱

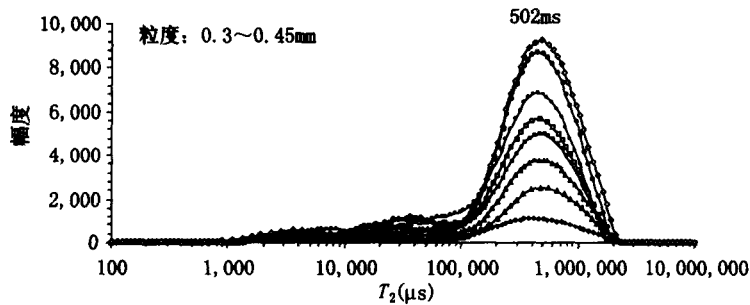


图 5 粒度为 0.3~0.45mm 的沙体在不同含水饱和度时的 T_2 谱

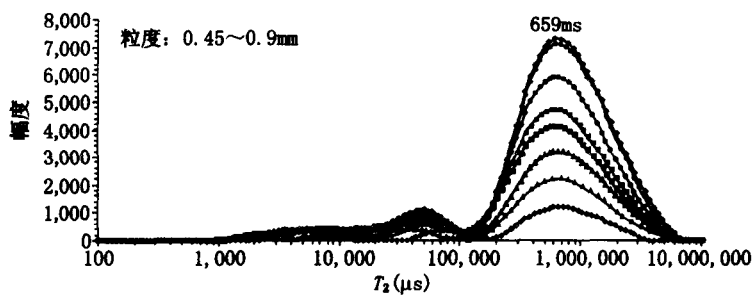


图6 粒度为 0.45~0.9mm 的沙体在不同含水饱和度时的 T_2 谱

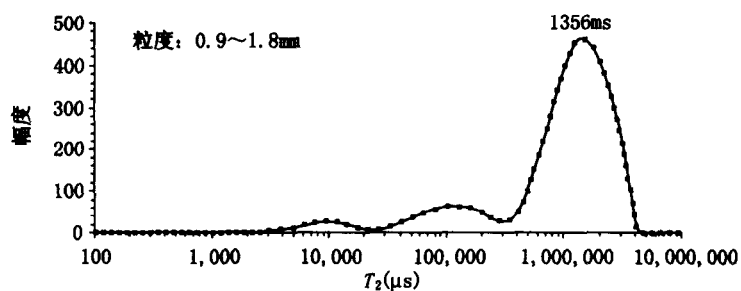


图7 粒度为 0.9~1.8mm 的沙体在全饱和水时的 T_2 谱

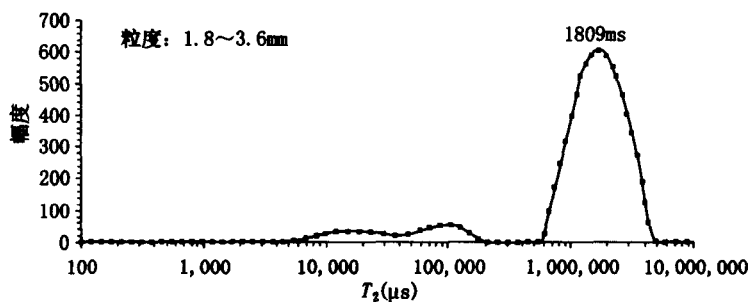


图8 粒度为 1.8~3.6mm 的沙体在全饱和水时的 T_2 谱

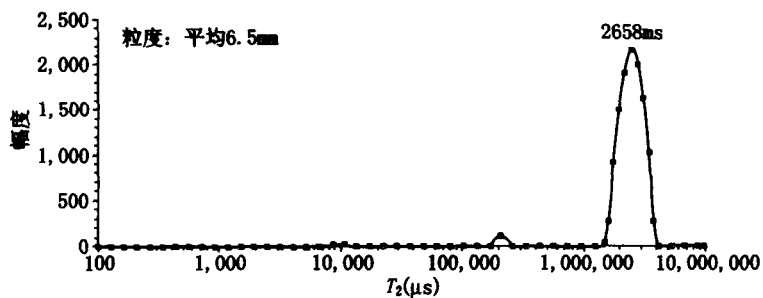


图9 粒度为 6.5mm 的沙体在全饱和水时的 T_2 谱

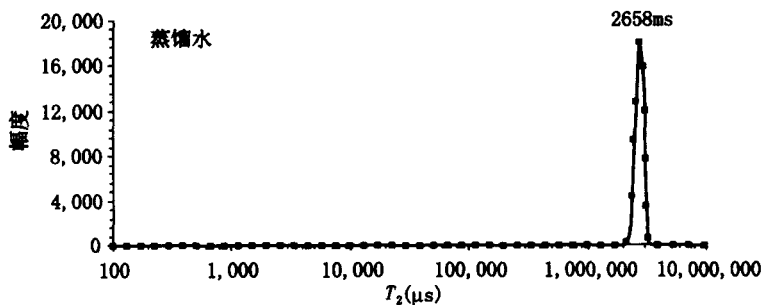


图 10 蒸馏水在 30℃ 的 T_2 谱

3. 颗粒直径、平均孔隙半径与 T_2 谱峰所对应 T_2 值及 T_2 几何平均值的关系 (图 11 至图 16)
下表为 30℃ 时所测试的不同含水饱和度下沙体的 T_2 时间。

30℃ 时所测试的饱和水沙体的 T_2 时间

粒度范围 (mm)	<0.1	0.1~0.15	0.15~0.3	0.3~0.45	0.45~0.9	0.9~1.8	1.8~3.6	6.5	8
粒度平均值 (mm)	0.05	0.125	0.225	0.375	0.675	1.35	2.7	6.5	8
孔隙半径 R (mm)	0.010	0.026	0.047	0.078	0.140	0.279	0.559	1.346	1.656
T_2 (几何平均值) (ms)	41	121	205	304	512	811	1100	2338	2738
谱峰 T_2 值 (ms)	68	222	319	502	659	1356	1809	2658	2658

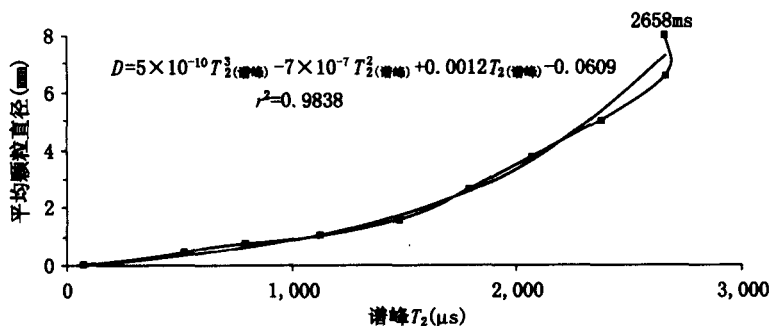


图 11 平均颗粒直径与 T_2 谱峰所对应 T_2 的关系曲线

(1) 颗粒直径 D 与 T_2 谱峰所对应 T_2 值的关系

$$T_{2(\text{谱峰})} = 6.3003D^3 - 134.46D^2 + 995.47D + 93.863 \quad (7)$$

相关系数: $r^2 = 0.9942$

$$D = 5 \times 10^{-10} T_{2(\text{谱峰})}^3 - 7 \times 10^{-7} T_{2(\text{谱峰})}^2 + 0.0012 T_{2(\text{谱峰})} - 0.0609 \quad (8)$$

相关系数: $r^2 = 0.9838$

(2) 颗粒直径 D 与 T_2 几何平均值的关系

$$T_{2(\text{几何平均值})} = 359.31D \quad (9)$$

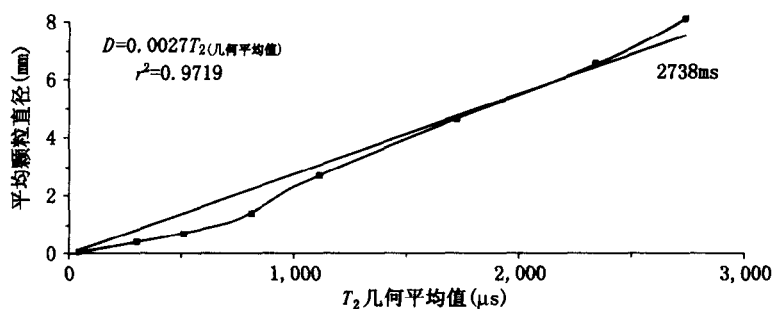


图 12 平均颗粒直径与 T_2 几何平均值的关系曲线

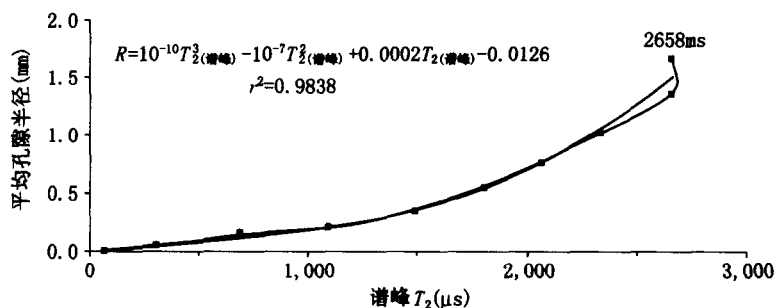


图 13 平均孔隙半径与 T_2 谱峰所对应 T_2 的关系曲线

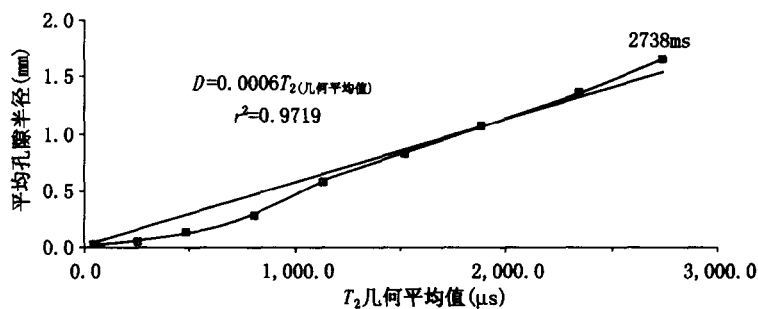


图 14 平均孔隙半径与 T_2 几何平均值的关系曲线

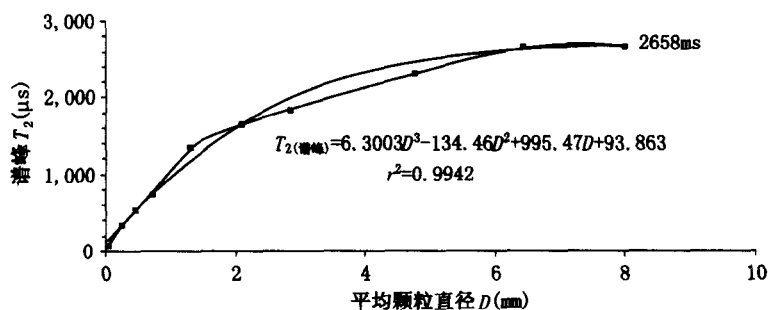


图 15 谱峰 T_2 与平均颗粒直径 D 的关系曲线

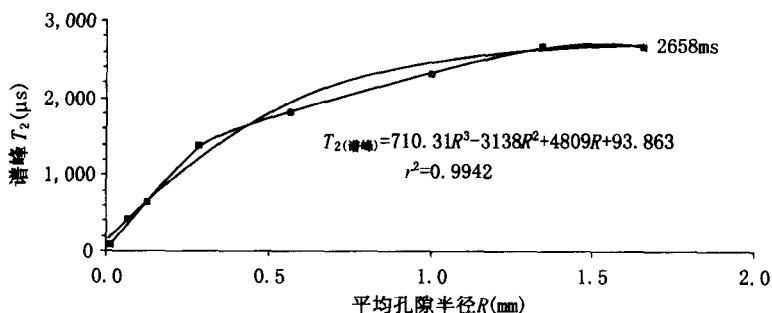


图 16 谱峰 T_2 与平均孔隙半径 R 的关系曲线

相关系数: $r^2 = 0.9662$

$$D = 0.0027T_{2(\text{几何平均值})} \quad (10)$$

相关系数: $r^2 = 0.9719$

(3) 孔隙半径 R 与 T_2 谱峰所对应 T_2 值的关系

$$T_{2(\text{谱峰})} = 710.31R^3 - 3138R^2 + 4809R + 93.863 \quad (11)$$

相关系数: $r^2 = 0.9942$

$$R = 10^{-10}T_{2(\text{谱峰})}^3 - 10^{-7}T_{2(\text{谱峰})}^2 + 0.0002T_{2(\text{谱峰})} - 0.0126 \quad (12)$$

相关系数: $r^2 = 0.9838$

(4) 孔隙半径 R 与 T_2 几何平均值的关系

$$T_{2(\text{几何平均值})} = 1735.8R \quad (13)$$

相关系数: $r^2 = 0.9662$

$$R = 0.0006T_{2(\text{几何平均值})} \quad (14)$$

相关系数: $r^2 = 0.9719$

四、结论

1) 在不考虑胶结因素的影响时, 随着颗粒直径的增大, 岩石饱和水后的核磁共振横向弛豫时间 T_2 逐渐增大。横向弛豫时间 T_2 与颗粒直径的关系为:

$$T_{2(\text{谱峰})} = 6.3003D^3 - 134.46D^2 + 995.47D + 93.863 \quad (\text{相关系数: } r^2 = 0.9942)$$

$$T_{2(\text{几何平均值})} = 359.31D \quad (\text{相关系数: } r^2 = 0.9662)$$

2) 随着孔隙半径 R 的增大, 岩石饱和水后的核磁共振横向弛豫时间 T_2 逐渐增大。横向弛豫时间 T_2 与颗粒直径的关系为:

$$R = 10^{-10}T_{2(\text{谱峰})}^3 - 10^{-7}T_{2(\text{谱峰})}^2 + 0.0002T_{2(\text{谱峰})} - 0.0126 \quad (\text{相关系数: } r^2 = 0.9838)$$

$$R = 0.0006T_{2(\text{几何平均值})} \quad (\text{相关系数: } r^2 = 0.9719)$$

3) 实验证实了横向弛豫时间 T_2 与颗粒大小及孔隙半径成正比例关系, 并给出了 T_2 与颗粒大小及孔隙半径的相互转换关系。

4) 当颗粒直径足够大 (如 6mm), 相应的孔隙半径也足够大 (如 1.25mm) 时, 饱和水沙体的 T_2 谱及 T_2 值接近蒸馏水的 T_2 谱及 T_2 值, 如图 9、图 10 及图 15 和图 16 所示, T_2 谱形变得尖锐狭窄, 谱峰 T_2 —颗粒直径曲线和谱峰 T_2 —孔隙半径曲线均逼近渐近线 $T_2 = 2658\text{ms}$ (蒸馏水的 T_2 值)。

参 考 文 献

- 肖立志著. 1998. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用. 北京: 科学出版社
- 肖立志, 陆大卫等著. 2001. 核磁共振测井资料解释与应用导论. 北京: 石油工业出版社
- 运华云, 周灿灿等. 2001. 利用 T_2 分布进行岩石孔隙结构研究. 测井技术, 24 (4)

岩石复电阻率影响因素研究

李建军^{1,2} 邓少贵¹ 范宜仁¹

(1. 石油大学(华东)地球资源与信息学院;

2. 中国石油物资装备(集团)总公司)

摘 要: 不同的频率范围, 岩心复电阻率频散的机理不同。当频率较低时, 离子和分子的扩散及双电层结构共同影响岩石的复电学性质; 当频率较高时, 分子和电子的极化影响明显增大。本文对不同泥质含量的 20 块泥质砂岩岩样进行不同矿化度、不同含水饱和度的复电阻率测量。实验表明岩石的复电阻率与饱和溶液的矿化度、岩石的阳离子交换量、含水饱和度有关, 并存在第一、第二截止频率。当频率小于第一截止频率时岩心电阻率曲线斜率随含水饱和度降低而增大, 随矿化度增大而减小。岩心的电容率与饱和溶液电导率近似成线性关系, 与 CEC 成指数关系。在低频段, 岩心实饱和度指数 n 随频率的增大而缓慢减小, 虚饱和度指数 n' 缓慢增大; 在高频段, n 和 n' 均迅速降低。

关键词: 复电阻率 双电层 截止频率 电容率 饱和度指数

复电阻率测井, 作为一种新的测井方法, 在低孔、低渗、低阻和水淹油藏等复杂油藏的测井评价中显示出明显的优势。然而, 对复电阻率测井机理的认识仍然不足。岩石的复电学性质来源于存在交变电场中介质的导电性和非导电性响应。导电成分与自由电荷的运移有关, 非导电成分与孔隙和颗粒界面上的激发极化有关, 对在骨架和填充孔隙的流体之间的区域的离子的双电层比较敏感。双电层理论是岩石复电学性质特别是泥质砂岩复电阻率特性的主要理论基础。本文旨在从实验角度去探索岩石的复电阻率特性, 并进行相应的影响因素分析, 以进一步提高对岩石复电阻率的认识, 完善复电阻率测井理论。

一、实验条件

对不同泥质含量的岩心进行不同饱和溶液矿化度、含水饱和度和含油饱和度的复电阻率测量。实验使用 HP4085A RLC 分析仪, 频率范围从 20Hz~1MHz, 饱和 NaCl 溶液矿化度分别为 1g/L、2g/L、4g/L、6g/L、8g/L、10g/L、20g/L。

二、实验结果分析

1. 矿化度对复电阻率的影响

(1) 矿化度对岩心电容率 ϵ 的影响

资料表明(李建军等, 2002), 在低频区, 水溶液电阻率的实部和虚部随频率的增大变化很小, 在高频区复电阻率虚部频散明显, 并且受到矿化度影响, 矿化度低时, 频散剧烈, 随矿化度升高, 频散减小。当水溶液饱和在岩心中后, 与岩石颗粒发生复杂的物理化学反应, 并影响岩石的性质。

实验中测量岩心电容, 由式 $C = \frac{\epsilon A}{L}$ 确定电容率 ϵ 。式中, A 为岩心横截面积, L 为岩心

长度,如图1和图2。图中 ϵ 为饱含水岩心电容率,por为岩样的孔隙度, Q_v 为阳离子交换容量,它是反映岩心附加导电特性的电学参数。研究发现,在低频(<100kHz)条件下,岩心电容率随频率升高而减小,在半对数坐标下,近似呈线性,在高频(>100kHz)条件下,由于岩心中的流体发生高频极化,产生极化电容,使其变化更加复杂(Ali A. Garrouch and Mukul M. Sharma, 1998);将不同浓度下岩心电容率与在1g/L的电容率进行对比,并将浓度转化为电导率,结果显示岩心电容率随电导率变大而增加,与饱和溶液电导率呈近似线性关系,如图3和图4。

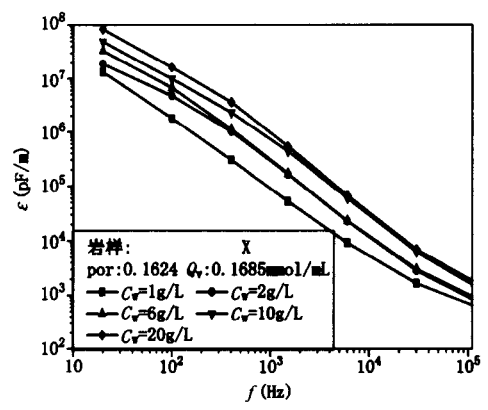


图1 岩样X电容率随频率变化图

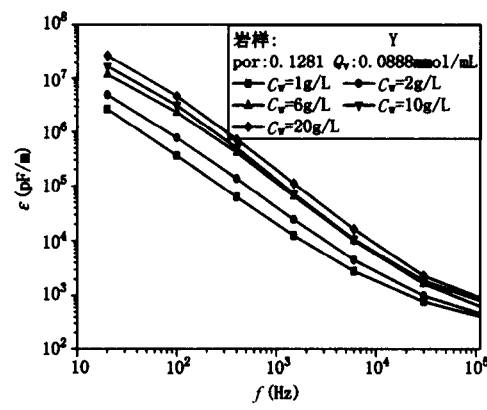


图2 岩样Y电容率随频率变化图

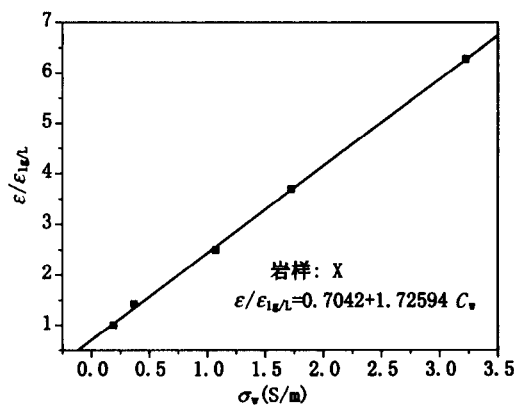


图3 20Hz时岩样X电容率/溶液电导率图

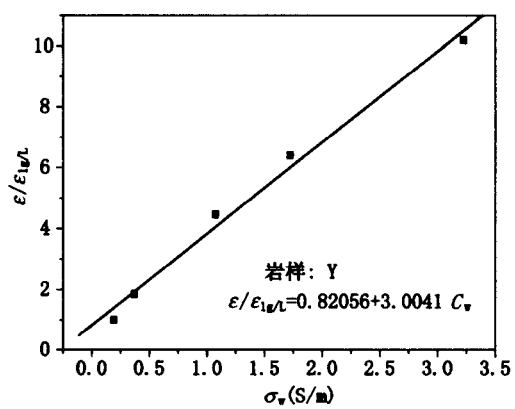


图4 20Hz时岩样Y电容率/溶液电导率图

(2) 矿化度对岩心复电阻率的影响

岩心的复电阻率受饱和溶液矿化度的影响,随矿化度的增加,岩心导电性增强,岩石电阻率降低,频散特性减弱,如图5和图6。岩心的电阻率虚部,在30kHz左右出现第一截止频率(与后面第二截止频率对应,第一截止频率是指在该频率下,离子刚好回到它未被打乱时的状态,一般范围在6kHz到30kHz之间)。第一截止频率的高低与泥质含量有关,当泥质较多时,第一截止频率大,泥质较少时,第一截止频率小。将不同浓度岩心复电阻率与浓度1g/L的复电阻率进行对比,如图7至图10所示(选用频率为20Hz和6kHz),复电阻率实部和虚部在各频率下都与 C_w 成幂指数关系:

$$y = a + bx^r \quad (1)$$

其中, a 、 b 、 r 是与岩石物性有关的参数。

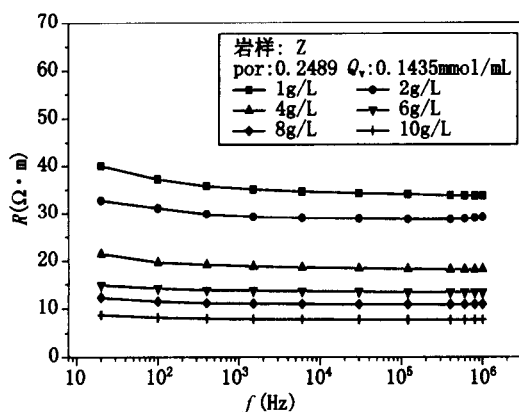


图5 岩样Z电阻率实部 R 随频率变化图

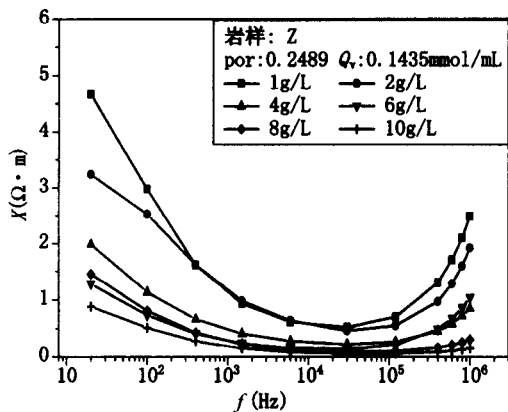


图6 岩样Z电阻率虚部 X 随频率变化图

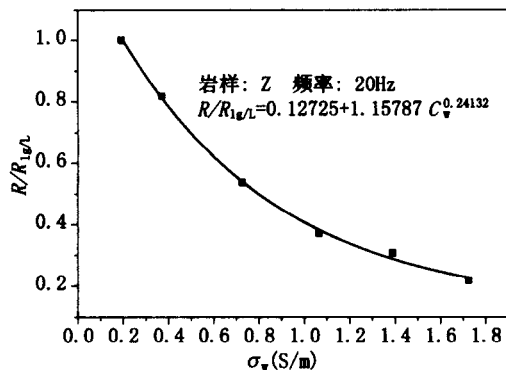


图7 岩样Z电阻率实部与溶液电导率关系图

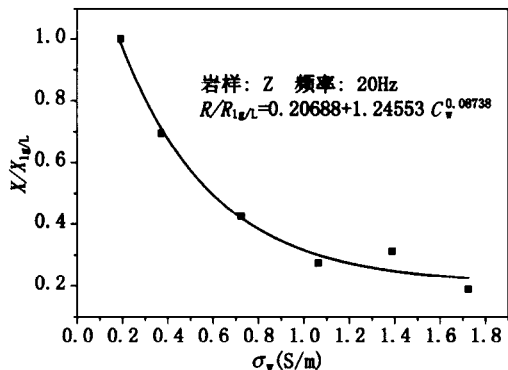


图8 岩样Z电阻率虚部与溶液电导率关系图

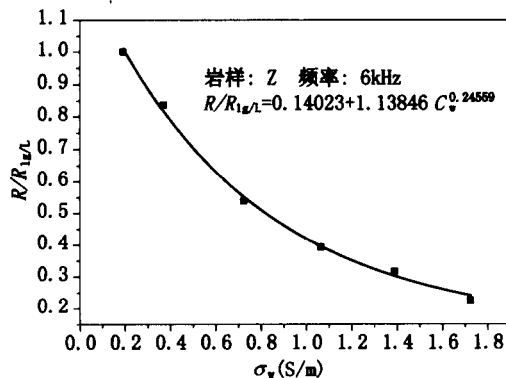


图9 岩样Z电阻率实部与溶液电导率关系图

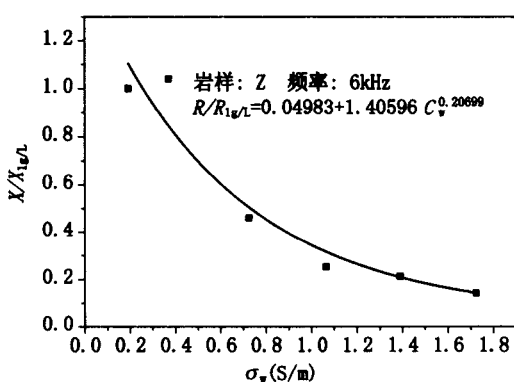


图10 岩样Z电阻率虚部与溶液电导率关系图