

中国石油天然气集团公司

测井重点实验室第四届学术会议论文集

(2007)

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

测井重点实验室第四届 学术会议论文集

(2007)

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

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四届学术交流会论文集,是近三年来测井应用基础及前沿技术领域开展的研究成果的交流和展示,论文涉及了测井理论和方法、仪器研究和软件开发,尤其在岩石物理性质实验工艺和方法、高精度探测器、测井数值模拟、测井信息处理与挖掘技术研究等方面作了详细论述。

本书可供石油测井科技工作者使用,也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

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四届学术会议论文集.
2007/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, 2009. 4

ISBN 978-7-5021-7032-5

I. 中…

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 (2009) 第 027992 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

编辑部: (010) 64523736 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 9.25

字数: 232 千字 印数: 1—800 册

定价: 40.00 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

编 委 会

主 任：孙宝佃

委 员：李 宁 鞠晓东 乔文孝 陶 果
范宜仁 郭海敏 张家田

序

前不久，胜利召开的党的“十七”对科学发展、和谐发展提出了更新、更高要求，科技创新在社会生产力发展中的作用越来越重要。

此时此刻，中国石油天然气集团公司测井重点实验室召开了第四届学术论文交流会，就测井应用基础及前沿技术开展交流和展示，这是一次非常难得的机会。

自 1998 年 12 月，中国石油天然气集团公司测井重点实验室成立以来，先后召开过三届学术交流会，三次新技术报告会等。测井重点实验室从应用基础和前沿技术研究出发，将仪器研制、软件开发与现场应用有机结合，加快了科研成果向生产转化的过程，初步建设成为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，取得了一系列成果，在岩石物理性质实验研究、高精度探测器研究、测井数值模拟研究、测井信息处理与挖掘技术研究等方面取得 29 项研究成果。这些成果对推动测井技术进步发挥了至关重要的作用，得到上级主管部门的认可，部分成果已得到了推广使用，正在油田勘探开发中发挥积极作用。从这九年取得的运行成果表明，中国石油集团成立测井重点实验室是一项英明的决策，实验室的建立提高了测井技术整体研究水平，基本避免了以前研究分散、低水平重复、无序申请研究项目、研究周期长、成果转化慢、与实际生产脱节等弊端。

但是，我们必须清楚地认识到：随着油气田勘探、开发的不断深入，测井技术面临十分严峻的挑战。储层岩性复杂化和储集空间复杂化的问题越来越突出，低孔、低渗、低阻和火成岩油气储层十分普遍，大斜度井、水平井测井工作量逐年增加，许多油田已处于高含水开发阶段。常规测井资料解释评价方法时常造成油藏评价失误，使勘探成本增加和勘探进程滞后的事件时有发生，迫切需要加强岩石物理基础研究及测井资料处理解释和评价技术研究。在测井前沿领域上，国外三大公司领先地位仍然没有改变，俄罗斯的测井基础方法研究扎实，思路新，很值得我们借鉴。

针对当前测井实验室的现状，我们应该以科学的发展观为指导，更新观念，迈开大步，依托自身力量，扩大开放研究力度，加大自主创新，努力追赶随钻、核磁等高端技术，使重点实验室在项目研究、学术水平和人才培养等方面再上新台阶。

本次会议共收到论文 21 篇，测井重点实验室学术委员会组织专家对收到的论文进行了认真评审、严格把关、认真筛选，最后确定“人造岩心制作及物理性质研究”等 14 篇论文在大会发言。这些论文是众多应用研究成果的代表，希望通过论文的交流 and 展示，使科研成果在生产中发挥重要作用。

陆大卫

2007. 12. 14

目 录

人造岩心制作及物理性质研究	李 新等 (1)
岩石物理比对实验研究	陈守军等 (19)
岩电参数实验误差影响分析	万金彬等 (27)
粒子群岩心自动归位	李 莉等 (32)
高分辨率双侧向测井和双感应测井联合反演研究	成志刚等 (38)
水平井双侧向测井响应及层厚/围岩影响快速校正方法	邓少贵等 (44)
声波测井相控圆弧阵及其辐射指向性	乔文孝等 (49)
处理声波测井全波列信号的多尺度 STC 方法	何峰江等 (58)
向套管井外地层中定向辐射声场的数值研究	陈雪莲等 (78)
气体钻井条件下中子孔隙度测井的数值模拟研究	张 锋等 (84)
光学法测量井下多相流中气相分相流量的测量方法研究	宋红伟等 (93)
电容阵列仪在水平管油水两相中的实验研究	刘军锋等 (96)
可调谐 F - P 滤波器的高精度大范围实时定标方法研究	乔学光等 (101)
新一代 CifWeb 网络一体化测井平台	王才志等 (106)
过套管电阻率测井微弱信号检测误差分析	张家田等 (113)
P 型核磁共振测井解释处理方法研究与软件开发	伍 东等 (118)
低渗气藏中微裂缝气体流动机理的格子 Boltzmann 研究	朱益华等 (125)
基于串行总线的井下大功率多极子声波激励电路设计	成向阳等 (130)
双侧向测井反演的差分进化方法	陈 华等 (137)

人造岩心制作及物理性质研究

李 新 孙宝佃 杜环虹 罗燕颖 雷芙蓉 陈 渝
(CNPC 测井重点实验室)

摘 要: 采用市售不同粒度石英砂做原料、磷酸二氢铝做粘结剂在实验室制作了人造砂岩岩心,并对所做人造砂岩岩心进行了孔隙度、渗透率、岩电、声波、核磁共振的实验室测量,取得了实验数据。认为此种方法所做纯砂岩岩心可作为地层实际岩心实验室测量的对比资料。富含长石的砂岩储层,电测井时,测井曲线显示为低电阻,一种观点认为是由于长石含量高引起的。在实验室采用市售石英砂和钾钠长石粉,制作了不同长石含量的长石—石英砂岩心,岩心只包含两种成分,即石英砂、长石,岩心中长石的含量从 0~100%变化。对所做人造含长石砂岩岩心进行了实验室孔隙度、渗透率测量及岩电实验,并对测量数据进行了分析。结果表明长石含量的增加没有引起岩心导电性的改变。

关键词: 人造岩心 岩石物理性质 砂岩储层 长石 岩电实验 实验研究

在岩石物理性质实验室研究以及岩石对测井响应研究过程中,有时为了避免其他复杂因素的影响,会用到纯净的石英砂岩岩心,而自然界几乎不可能寻找到纯净的石英砂岩岩心。本文介绍一种实验室制作人造砂岩岩心的方法以及对所做的人造砂岩岩心进行的物理性质研究情况。

另外,我国陆上有些油田储层砂岩主要为长石砂岩,碎屑成分长石占 50%左右。测井时该类储层显示为低电阻,有些测井解释人员认为,电阻低是由于储层中长石含量高引起的。为了验证这个说法,本文在实验室制作了人造含长石砂岩岩心并对其电性进行了研究。

1 人造砂岩岩心制作过程

1.1 制作流程

图 1 是人造砂岩岩心^[1-10]的制作流程图,实验室制作砂岩岩心大体分 6 个步骤。

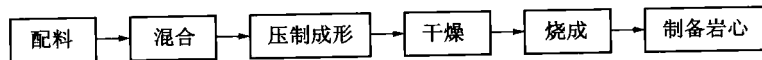


图 1 人造砂岩岩心的制作工艺流程图

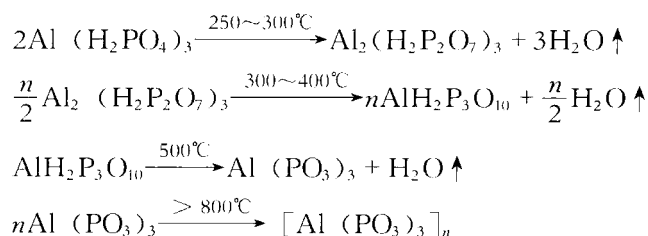
1.2 制作原料及仪器设备

制作人造砂岩岩心原料采用市售不同粒度的石英砂,其二氧化硅含量大于 99%,其他含有少量的 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等杂质,粘结剂采用市售 98%磷酸二氢铝溶液。

主要制作设备有 SX2-8-13 型 1350℃ 高温箱式电阻炉、YG32-40WD 型 400 千牛四柱式液压机、HW-3C 型单联恒温箱、GS-86 型电动震筛机、台式岩心钻取机、岩心切割、磨平机。

1.3 粘结剂磷酸二氢铝的性质

磷酸二氢铝在加热过程中发生脱水、缩聚反应,其反应式如下^[11,12]:



磷酸二氢铝在远高于常温的条件下形成了偏磷酸铝聚合物 $[\text{Al}(\text{PO}_3)_3]_n$ 。由于此种新的化合物的形成和聚合以及同时形成了较强的粘附作用，使结合体获得了强度。本文正是应用了磷酸二氢铝的此种性质采用了称之为“烧结法”的方法来制作人造砂岩岩心。

1.4 制作方法

1.4.1 原料的配比

根据需要，制作人造砂岩岩心可采用一种粒度、两种粒度或三种粒度的石英砂混合。不提倡采用四种或四种以上粒度的石英砂混合来制作人造砂岩岩心。因为当组分大于3时，对制作出来的岩心孔隙度的影响已不显著^[11,12]，而且还增加了工艺难度。粘结剂是未经稀释的，它的加入量与配比的石英砂颗粒的比表面积有关，范围大致在10%~17%之间（质量百分比）。粘结剂加入太少，粘不牢石英砂颗粒；太多，则在压制过程种，粘结剂会从模具中渗出，不便于坯体脱模，加入量多少的原则以能粘牢石英砂颗粒为准。

1.4.2 原料的混合

采用手工搅拌的方式混合石英砂。称取一定量的石英砂倒入塑料搅拌盆，当制作岩心的石英砂粒度超过两种时，搅拌时加入石英砂的顺序对于石英砂颗粒混合的均匀性影响很大。通常先加入粗粒径石英砂，然后加入适量粘结剂，搅拌均匀后，再加入细粒径石英砂搅拌，搅拌均匀后，再加入更细粒径石英砂搅拌。否则，若粗细颗粒同时加入，易出现细粉集中成小团，导致石英砂混合不均匀。混合好的石英砂进行12~24小时困料，便于粘结剂分布更均匀。

1.4.3 混合料的压制成形

采用模压成形的方法。模压成形是将混合好的石英砂原料加入到模具中，在压力机上压成一定形状坯体的方法，如图2所示。在现有条件下，石英砂坯体承受的最大压力可达200MPa。

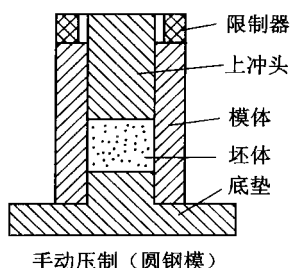


图2 模压成形示意图

石英砂坯体压制好以后，坯体的脱模很关键。因为石英砂属于瘠性材料，本身并无粘性，粘结剂磷酸二氢铝在烘干之前也无粘性。若脱模不好，压制好的坯体易松散，或产生裂纹，造成人造砂岩岩心制作失败。

1.4.4 坯体的干燥

石英砂坯体干燥的目的在于提高其机械强度，并使坯体颗粒表面附着水失去。否则在坯体烧制过程中易引起坯体的炸裂，使岩样烧制失败。压制好的石英砂坯体使用烘箱在110℃温度下烘10~12小时。

1.4.5 坯体的烧成

将烘好的石英砂坯体放入1350℃实验电阻炉中。采用两段升温法烧结。烧结的最高温度设为1000℃。烧制好的石英砂坯体在炉膛中自然冷却至室温。

1.4.6 制备岩心

使用岩心钻取设备、岩心切割设备、岩心端面磨平设备将烧制好的石英砂坯体加工成供研究用的直径为 1in 或 1.5in 的砂岩岩心。本文实验中采用的岩心是直径为 1in，长度为 5cm 左右的岩心。

2 人造砂岩岩心制作过程中的影响因素

2.1 压力对人造砂岩岩心孔渗的影响

在考查了人造岩心配料一致、保压时间一致的情况下，坯体承受压力变化对人造砂岩岩心孔隙度、渗透率^[13]的影响，如图 3 至图 5 所示。

可以看出随着坯体承受压力的变化，孔隙度、渗透率的值在减小，而且孔隙度、渗透率的相关性较好。

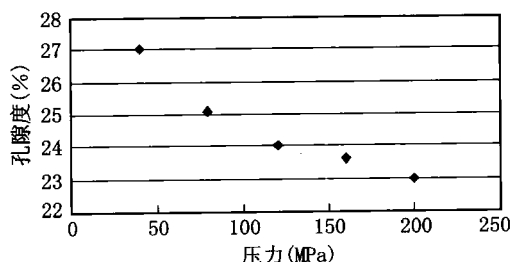


图 3 坯体承受压力与人造岩心孔隙度关系图

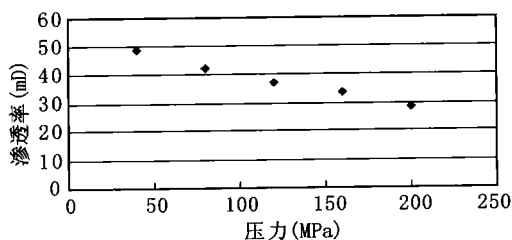


图 4 坯体承受压力与人造岩心渗透率关系图

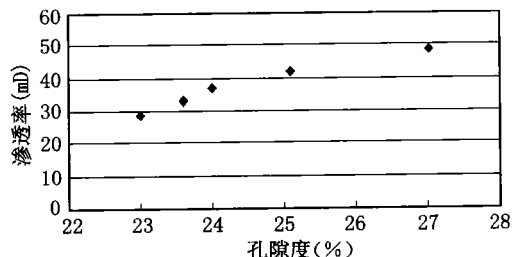


图 5 坯体压力变化下人造岩心孔隙度与渗透率关系图

2.2 不同粒度石英砂的配比对人造砂岩岩心孔渗的影响

采用不同粒度的石英砂在同一压力、同一保压时间下制成的人工岩心孔隙度、渗透率是不一样的。图 6 是采用一种粒度及三种粒度的石英砂制成的人工岩心孔隙度、渗透率变化图，可以看出并不是随着孔隙度的增大，渗透率也增大。笔者认为由于石英砂粒度的变化，配方的不同，孔隙喉道的形成有差异，虽然孔隙度有时大体相同，但渗透率差别较大。

3 人造砂岩岩心岩石物理性质实验

3.1 岩电实验

对 15 块人造砂岩岩心进行了地层因素^[14]测试，矿化度为 4000mg/L。

15 块岩心数据拟合得到：

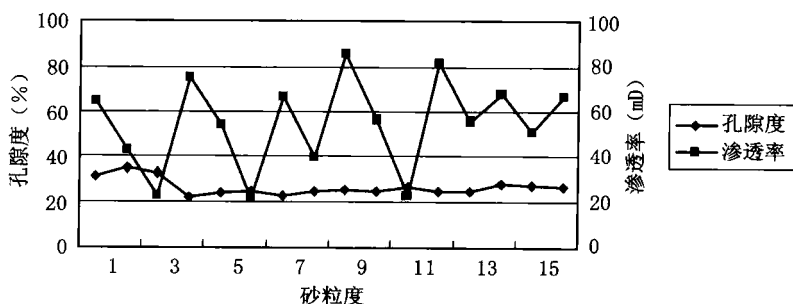


图 6 不同粒度配比制成的人造岩心孔隙度与渗透率变化图

$$F = 0.9947/\phi^{1.5802} \quad m = 1.5802 \quad a = 0.9947$$

图 7 是这 15 块岩心的地层因素与孔隙度关系图。

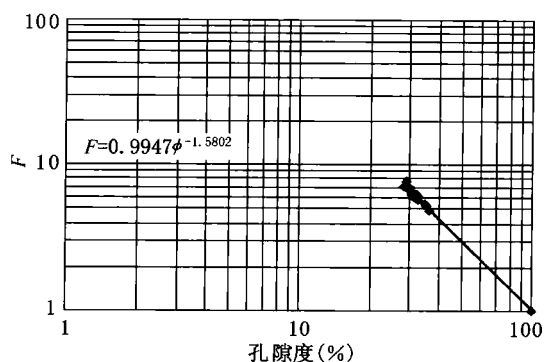


图 7 地层因素—孔隙度交会图

对 15 块人造砂岩岩心进行了电阻增大率的测量，矿化度为 4000mg/L。
15 块岩心数据拟合得到：

$$I = 0.9622/S_w^{1.9497} \quad n = 1.9497 \quad b = 0.9622$$

图 8 是 15 块岩心的电阻增大率与饱和度关系图。

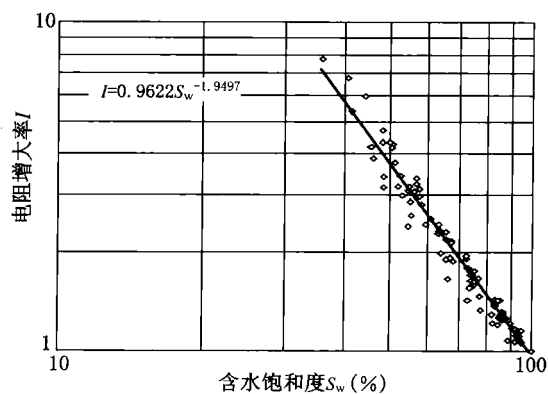


图 8 电阻增大率—饱和度交会图

3.2 声波实验

对 16 块人造砂岩岩心进行了声学参数测量^[15]，饱和盐水矿化度为 4000mg/L。表 1 是声速测量结果。

表 1 人造砂岩岩心声学参数

序号	岩样编号	岩性描述	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	颗粒密度 (g/cm ³)	纵波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)	纵横波速比
1	162	纯净石英砂	21.27	75.22	2.612	2606	1233	2.11
2	165	纯净石英砂	22.39	66.67	2.622	2469	1095	2.25
3	168	纯净石英砂	23.91	56.66	2.619	2555	1199	2.13
4	167	纯净石英砂	23.82	85.18	2.619	2506	1190	2.11
5	169	纯净石英砂	25.46	22.55	2.644	2359	976	2.42
6	175	纯净石英砂	26.25	66.59	2.620	2481	1139	2.18
7	172	纯净石英砂	28.02	68.07	2.679	2477	1114	2.22
8	12_1	纯净石英砂	28.92	629.15	2.575	2433	1028	2.37
9	20_1	纯净石英砂	29.65	444.75	2.600	2394	1166	2.05
10	151	纯净石英砂	29.83	750.20	2.613	2234	1285	1.74
11	15_1	纯净石英砂	30.54	474.07	2.594	2356	1385	1.70
12	18_1	纯净石英砂	30.70	459.34	2.591	2381	1101	2.16
13	13_1	纯净石英砂	31.58	721.95	2.590	2246	1065	2.11
14	10_1	纯净石英砂	31.84	942.89	2.584	2051	1155	1.78
15	11_1	纯净石英砂	32.01	607.32	2.586	2285	946	2.41
16	16_1	纯净石英砂	34.45	489.09	2.598	2133	1136	1.88

图 9 是纵波速度与孔隙度关系图。

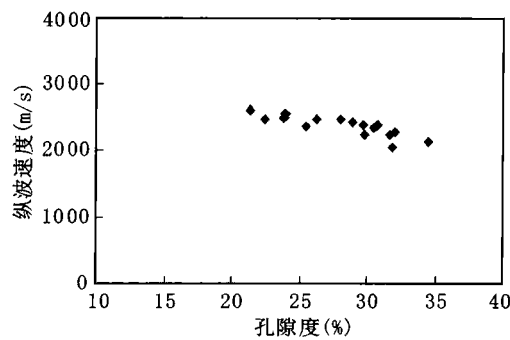


图 9 人造砂岩岩心纵波速度与孔隙度关系

Wyllie (1956) 提出了一个描述波速与孔隙度关系的实验公式，即“时间平均方程”：

$$\frac{1}{v} = \frac{\phi}{v_f} + \frac{1-\phi}{v_{ma}}$$

式中 v ——流体饱和岩石中的波速；

v_f ——孔隙所含流体的波速；

v_{ma} ——岩石骨架波速；

ϕ ——岩石孔隙度。

应用这个公式，砂岩岩石骨架 $\Delta t_{ma} = 182\mu\text{m/s}$ ，盐水 $\Delta t_{ma} = 608\mu\text{m/s}$ ，孔隙度采用上述 16 块岩心的值，可计算出一组纵波速度，见表 2。

表 2 用 Wyllie 公式计算的纵波速度

序 号	岩 样 编 号	孔隙度 (%)	Wyllie 公式计算纵波速度 (m/s)
1	162	21.27	3668
2	165	22.39	3605
3	168	23.91	3523
4	167	23.82	3528
5	169	25.46	3443
6	175	26.25	3404
7	172	28.02	3319
8	12_1	28.92	3277
9	20_1	29.65	3244
10	151	29.83	3236
11	15_1	30.54	3204
12	18_1	30.70	3197
13	13_1	31.58	3160
14	10_1	31.84	3149
15	11_1	32.01	3142
16	16_1	34.45	3042

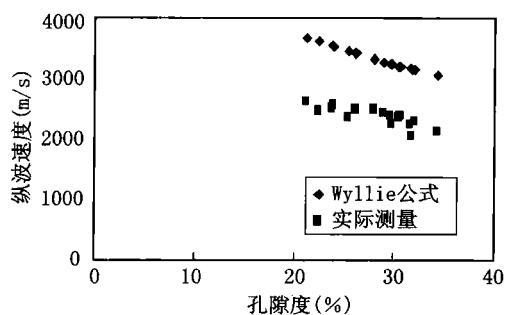


图 10 Wyllie 公式计算的纵波速度与
与 人造岩心实测的纵波速度
与孔隙度关系图

将用 Wyllie 公式计算的纵波速度与孔隙度作的关系图与人造岩心实测的纵波速度与孔隙度关系图叠加在一起如图 10 所示。

由图 10 可见，两列数据变化趋势大体一致。用 Wyllie 公式计算的纵波速度要比人造砂岩岩心实测的纵波速度高 800~1000m/s。究其原因，认为通常纯砂岩的颗粒密度为 2.65g/cm^3 ，而人造砂岩岩心几批岩心测出的颗粒密度都在 2.60g/cm^3 左右，砂子密度的降低直接导致声波传播速度的降低。另外，Wyllie 公式适用于埋藏较深地层的岩石，特别是被盐水饱和的固结良好的岩石。而人造岩心是人工在短时间内做出来的

的，压实情况肯定不如地下埋藏岩石，而且岩心饱和度也很难达到 100%，这也是引起岩心纵波速度偏小的原因之一。

3.3 核磁共振实验

人造砂岩岩心孔隙度、渗透率的变化可以在制作人造砂岩岩心配方不变的情况下，通过在制作过程中改变坯体受压的大小来实现，也可以在坯体压力一致的情况下，通过调整人造砂岩岩心配方的方法来实现。

3.3.1 配方不变，压力改变引起孔渗变化的岩心核磁共振数据^[16]分析

选择了7块制作人造砂岩岩心配方不变的情况下，通过在制作过程中改变坯体受压的大小来实现孔隙度、渗透率变化的岩心。岩心的基本数据见表3。

表3 配方不变，压力改变引起孔渗变化的7块岩心核磁共振数据

序号	岩样号	平均长度 (cm)	平均直径 (cm)	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	坯体受压 (MPa)
1	101	4.063	2.523	31.6981	139.663	40
2	99	3.663	2.515	28.8370	121.945	60
3	98	4.857	2.532	28.2949	74.0134	80
4	100	4.866	2.520	27.2777	72.5924	100
5	103	4.390	2.524	26.3236	44.2973	120
6	104	4.185	2.522	25.7818	52.5703	160
7	105	4.083	2.513	24.5529	29.3398	200

上述7块岩心其他制作条件都一样，唯一不同的就是在制作过程中砂岩坯体受压不一样，压力变化在40~200MPa之间。

这7块岩心饱和状态下的 T_2 谱对比如图11所示。

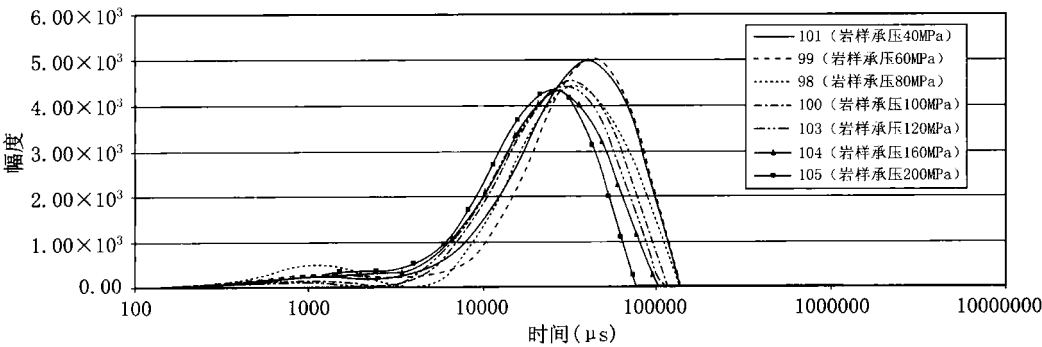


图11 7块岩心饱和状态下的 T_2 谱对比图

从7块岩心的饱和状态下的 T_2 谱对比图上来看，岩心 T_2 谱前峰小，后峰大，说明该组岩心大部分以大孔隙为主。随着制作压力的增大，孔隙度的减小， T_2 谱逐渐前移。

3.3.2 压力不变，配方改变引起孔渗变化的岩心核磁共振数据分析

分为两种情况，一种是用单一粒径的石英砂制成的岩心，另一种是用3种不同粒径的石英砂制成的岩心。它们的核磁谱如下。

3.3.2.1 单一粒径的石英砂制成的岩心

分别用70~100目、100~150目、200目、325目、800目的石英砂在同等压力200MPa下制成了5种单一粒径的石英砂岩心。岩心的基本数据见表4。

表 4 5 种单一粒径的石英砂岩心的基本数据

序号	样号	平均长度 (cm)	平均直径 (cm)	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	粒径
1	151	4. 8720	2. 5170	29. 1	750. 20	70~100 目
2	153	4. 5960	2. 5243	27. 6	261. 15	100~150 目
3	155	4. 8970	2. 5213	29. 9	64. 49	200 目
4	156	2. 5453	2. 5230	33. 8	43. 06	325 目
5	158	1. 6517	2. 5210	32. 5	22. 97	800 目

这 5 块岩心饱和状态下的 T_2 谱对比如图 12 所示。

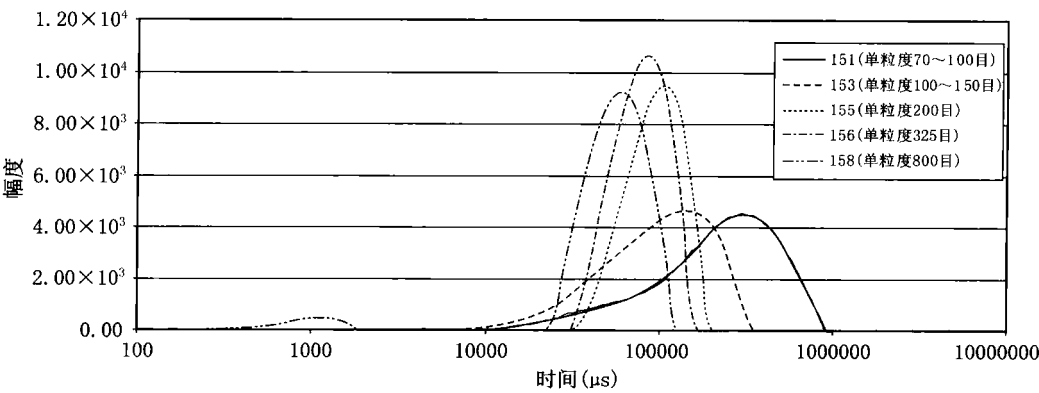


图 12 5 块岩心饱和状态下的 T_2 谱对比图

从 5 块岩心饱和状态下的 T_2 谱对比图上来看，岩心 T_2 谱前峰小，后峰大，说明该组岩心大部分以大孔隙为主。随着制作石英砂颗粒粒径的减小，谱的宽度变窄， T_2 谱逐渐前移。

3. 3. 2. 2 三种粒径的石英砂制成的岩心

选择了 7 块用三种粒径的石英砂，在同等压力 200MPa 下制成的石英砂岩心。岩心的基本数据见表 5。

表 5 7 块三粒径石英砂岩心的基本数据表

序号	样号	平均长度 (cm)	平均直径 (cm)	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	粒径配比 (目)
1	162	4. 7090	2. 5223	21. 3	75. 22	40~70、200、600
2	163	4. 5523	2. 5190	22. 9	54. 11	40~70、325、800
3	166	4. 4570	2. 5193	23. 4	39. 43	40~70、325、1250
4	167	4. 4227	2. 5210	23. 8	85. 18	70~100、200、600
5	169	4. 5630	2. 5210	25. 5	22. 55	70~100、600、1250
6	172	4. 5150	2. 5223	28. 0	68. 07	100~150、200、600
7	175	4. 5467	2. 5217	26. 2	66. 59	100~150、200、800

这 7 块岩心饱和状态下的 T_2 谱对比如图 13 所示。

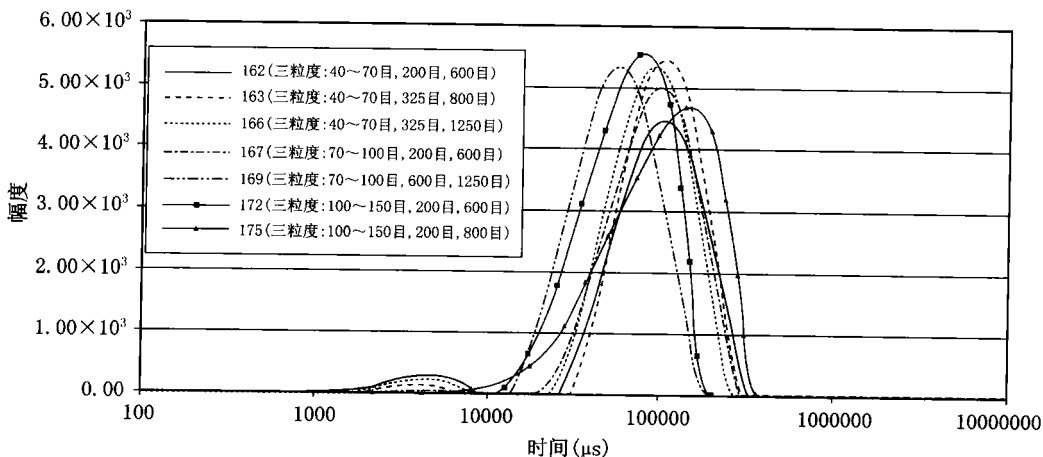


图 13 7 块三粒径石英砂岩心饱和状态下的 T_2 谱对比图

从 7 块岩心饱和状态下的 T_2 谱对比图上来看, 虽然岩心粒径有所改变, 但是岩心 T_2 谱仍是前峰小, 后峰大, 说明该组岩心大部分以大孔隙为主。

选择了其中 3 块岩心的 T_2 谱来进一步说明。这 3 块岩心制作时, 石英砂的配方是 162 号岩心 40~70 目 60%、200 目 25%、600 目 15%, 167 号岩心 70~100 目 60%、200 目 25%、600 目 15%, 172 号岩心 100~150 目 60%、200 目 25%、600 目 15%。它们只改变了其中一种砂子的粒径, 其他情况都一样。

从这 3 块岩心饱和状态下的 T_2 谱对比图 (图 14) 上来看, 随着制作粒径的减小, 孔隙度在增加, T_2 谱逐渐前移。

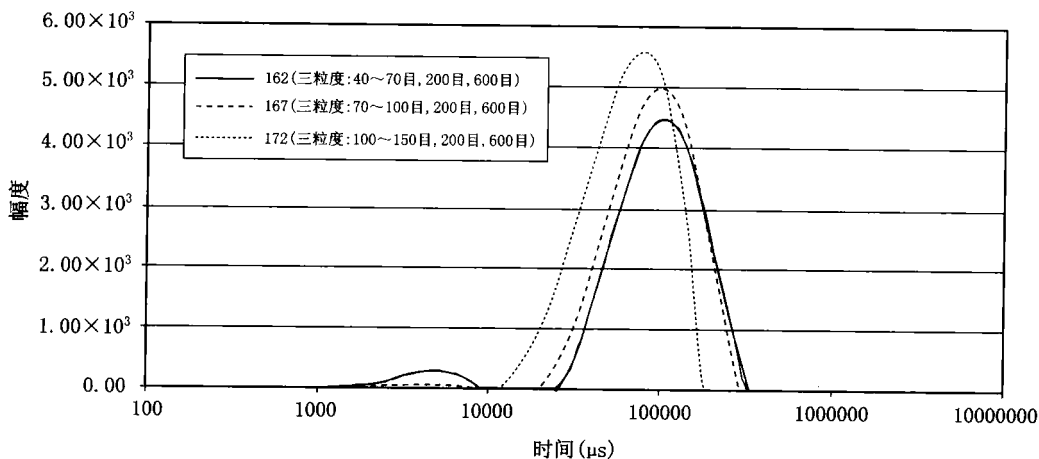


图 14 3 块三粒径石英砂岩心饱和状态下的 T_2 谱对比图

3.3.2.3 3 种单一粒径的石英砂及其混合制成的石英砂岩心 T_2 谱对比

153 号、155 号、158 号岩心是用单一粒径的石英砂制成的人工岩心, 粒径分别是 100~150 目、200 目、800 目, 而 175 号岩心是用这 3 种粒径的石英砂配比制成的人工岩心, 它的组成是 100~150 目 60%、200 目 25%、800 目 15%。岩心的 T_2 谱如图 15 所示。

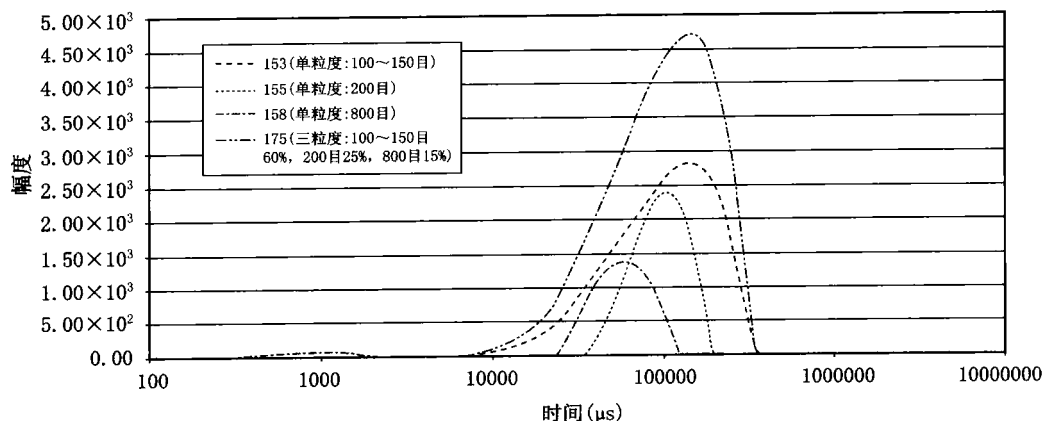


图 15 3 种单粒径的石英砂及其混合制成的石英砂岩心 T_2 谱对比

从图 15 中可看出三粒径混合岩样的 T_2 谱包络了三种单粒径 T_2 谱，三粒径混合后岩样 T_2 谱峰值对应的 T_2 值与最大粒径 100~150 目单粒度岩样 T_2 谱峰值对应的 T_2 值一致。

4 人造含砾砂岩岩心物理性质研究

4.1 概述

陆源碎屑岩分为：

- (1) 砾岩：碎屑直径大于 2mm；
- (2) 砂岩：碎屑直径为 2~0.063mm；
- (3) 粉砂岩：碎屑直径为 0.063~0.004mm
- (4) 泥质岩：碎屑直径小于 0.004mm

其中砾岩是直径大于 2mm 的陆源碎屑，其含量在 50% 以上的沉积岩。按砾石大小又可分为：

- 巨砾岩（角砾岩）：砾石直径大于 256mm；
- 粗砾岩（角砾岩）：砾石直径为 256~64mm；
- 中砾岩（角砾岩）：砾石直径为 64~4mm；
- 细砾岩（角砾岩）：砾石直径为 4~2mm；

本文所做的人造含砾砂岩岩心是在制作砂岩岩心过程中添加砾石直径在 4~2mm 的细砾石。砾石的来源采用河道黄沙，用筛子将符合要求的砾石（鹅卵石）筛出来。砾石其实也是砂岩的一种，只不过粒径大一些而已。因此人造含砾砂岩岩心与人造砂岩岩心的制作方法一样，这里不再赘述。本文所要关心的是添加砾石以后岩心的物理性质。在制作人造含砾石砂岩岩心时，本文采用的配方是粒径 100~150 目的石英砂占 65%、600 目的石英砂占 10%、1250 目的石英砂占 20%、粒径大于 2mm 鹅卵石占 5%（以上百分比皆为重量百分比）。随着砾石的增加，等量减少粒径 100~150 目的石英砂的含量。

4.2 人造含砾砂岩岩心物理性质实验研究

4.2.1 物性测量

制作出的 5 块含砾石英砂岩心的参数见表 6。

表 6 5 块含砾石英砂岩心的参数表

序号	样号	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	砾石含量 (%)
1	42-1	26.7	446.53	5
2	43-1	27.7	413.71	10
3	44-1	22.7	284.26	15
4	45-2	20.1	68.19	20
5	46-1	18.1	35.27	25

图 16 和图 17 分别是孔隙度、渗透率与砾石含量的关系图。

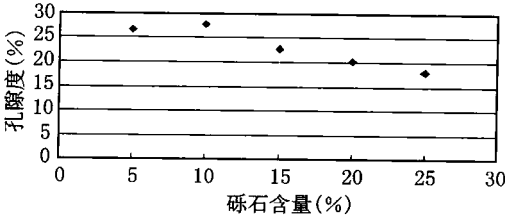


图 16 5 块含砾石英砂岩心
孔隙度—砾石含量关系图

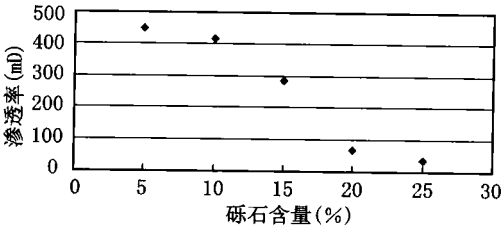


图 17 5 块含砾石英砂岩心
渗透率—砾石含量关系图

从表 6、图 16 和图 17 中可以看出,随着砾石含量的增加,含砾人造砂岩岩心的孔隙度、渗透率均在减小。在绝对值上,同本文做过的人造砂岩岩心相比,含砾人造砂岩岩心的孔隙度在砾石含量为 25%时就小于 20%。这是本文在现有条件下做纯砂岩岩心从未达到的。

4.2.2 电性实验

对 5 块人造含砾砂岩岩心进行了地层因素测试,矿化度为 4000mg/L。

5 块岩心数据拟合得到:

$$F = 0.997/\phi^{1.424} \quad m = 1.424; \quad a = 0.997$$

图 18 是这 5 块岩心的地层因素与孔隙度关系图。

对 5 块人造含砾砂岩岩心进行了电阻增大率的测量,矿化度为 4000mg/L。

5 块岩心数据拟合得到:

$$I = 0.935/S_w^{2.2838} \quad n = 2.2838; \quad b = 0.935$$

图 19 是 5 块岩心的电阻增大率与饱和度关系图。

4.2.3 声波实验

对 5 块人造砂岩岩心进行了声学参数测量,饱和盐水矿化度为 4000mg/L。表 7 是声速测量结果。

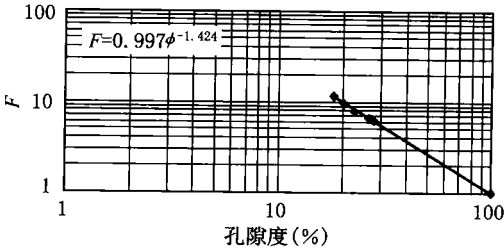


图 18 5 块含砾石英砂岩心
地层因素—孔隙度关系图