

# CT在油气藏储量计算参数测定中的应用

戴贤忠 李小孟 王家新 武珊 刘涛

(胜利石油管理局)

(天津大学)

## 提 要

本文研究了应用第三代医用CT扫描仪进行油气藏储量计算参数测定的可行性,并测定了八块岩心样品的孔隙度及油、水饱和度,证明其结果与常规方法的测定值符合较好。并研制了应用医用CT分析岩心孔隙度和油、水饱和度的配套软件。指出了医用CT在进行岩心分析上的局限性和克服的方法。最后明确了本实验的意义,并展示了裂缝型油气藏储层岩心CT分析的一些情况及其孔隙度测定的数据。

**主题词** CT扫描 裂缝型油气藏 储量计算参数 孔隙度 油饱和度  
水饱和度 “束硬化”效应 像素

## 1 前 言

计算机层析X射线造影术(Computed-Assisted Tomography或Computed Tomography),简称CAT或CT,是1972年由英国的Hounsfield最早提出,并设计出第一台医用CT,它可以产生极其精确的人体断面图像,给医学放射诊断带来了革命性的进展。到了70年代后期,CT技术开始扩展到土壤物理、机械工程、建筑工程、考古学、核科学、金属分析等许多领域,成为应用日益广泛的一种无损探测技术<sup>[1]</sup>。

1982年S. Y. Wang等人将CT引入岩心分析<sup>[2,3]</sup>,给出了非混相驱替过程中油饱和度随时间和岩心不同轴向变化的CT图像,指出了CT在岩心分析上的优越性。从此,石油工程师们在这一领域作了大量的工作,可以说CT在医学上的应用,仅仅是用了它所具备功能的一小部分,它的功能和优越性,在石油工业上可以得到充分的利用。它作为一种非破坏性的测量手段具有如下优点:①精度高: X-CT可以鉴别出0.1%吸收率的差别;②分辨率高: X-CT可分辨亚毫米大小;③成像速度快: 50ms至几分钟给出一幅图像,既可以给出物体任意方向的断面图像,又可以由多个断面图像给出三维的清晰的直观图像;④计算机图像处理功能强: 可贮存、显示、处理、对测量区CT值进行统计和评价,还可进行远距离传递等。

目前CT岩心分析研究工作,大部分是借助于医用CT进行的。专门工业用CT很少,估计

戴贤忠,1936年9月生。1959年9月毕业于西北大学地质系。现任地科院高级工程师。通讯处:山东东营市胜利油田地质科学研究所。邮政编码:257015。

在很长一段时间里,医用 CT 仍是我们进行岩心分析的主要工具。

本文利用 CT 技术测定油气藏储量计算的主要参数——孔隙度、油水饱和度获得了成功。这为解决用常规方法测不出孔隙度、油水饱和度的岩心测定,提供了最新的先进手段,为该类油气藏(例如裂缝型油气藏)的储量计算,提供可靠参数。

## 2 原理

从 1972 年 Hounsfield 研制出第一台 CT 起,到现在医用 CT 已经发展到第五代,在结构功能、扫描时间上都有很大发展。图 1 是一台第三代 CT 扫描仪原理图<sup>[4]</sup>,X 射线管和探测器弧形阵列彼此相对固定,并围绕病人同步旋转。X 射线源以一定角度发出的扇形 X 射线被探测器接收。CT 内的高速计算机对 X 射线的衰减信号进行反投影算法处理,重建出任意方向扫描断面上各点的 X 射线线性衰减系数组成的图像矩阵,可以在电视屏上显示出来或拍成 CT 照片。扫描一个断面的时间可以短到 2s,重建后的图像能够给出每一个像素的 X 射线衰减系数,将其应用于研究裂缝性岩心中裂缝的分布和走向十分有效。

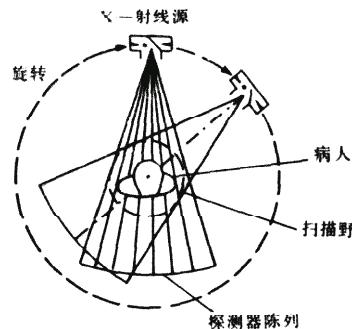


图 1 CT 扫描原理图

Fig. 1 Principle of CT scanning

在 CT 中采用 CT 数代替断面各点的 X 射线线性衰减系数,两者的关系<sup>[4][5]</sup>为:

$$H = K \frac{\mu_{\text{mat}} - \mu_w}{\mu_w} \quad (1)$$

式中  $H$ ——CT 数值, $H$ ;  $\mu_{\text{mat}}$  和  $\mu_w$  分别为被测物体、水有效线性衰减系数; $K$  值一般取 1000。则空气和水的 CT 值分别为  $-1000H$  和 0。

CT 可以在像素点的范围内测定出小至 0.1% 的衰减差异。在 高能条件下,X 射线在样品中主要发生康普顿(Compton)散射,不同分子的物质由此引起的 X 射线衰减受其本身的质量

质 X 射线衰减系数与其含量的加权平均值,从而使 X 射线衰减系数图像能够反映被测物体内部的成分及其含量的变化;在低能条件下,X 射线在样品中主要表现为光电吸收,它与原子序数有关,衰减系数对 X 射线能量的这种依赖关系被用来测定三相流体并存于岩心时的饱和度。利用 CT 扫描测定岩心孔隙度的公式<sup>(6)</sup>为:

$$\mu_j = (1 - \varphi_j) \cdot \mu_r + \varphi_j \cdot \mu_{fj} \quad (2)$$

式中  $\mu_j$ ——像素点  $j$  的线性衰减系数;

$\mu_r$ ——像素点  $j$  中岩心骨架材料的 X 射线线性衰减系数;

$\mu_{fj}$ ——像素点  $j$  中饱和岩心之流体的 X 射线线性衰减系数;

$\varphi_j$ ——像素点  $j$  的岩心孔隙度(%)。

即包括有岩石骨架材料和单一流体的像素点的线性衰减系数,可以表示成两种材料衰减系数之线性组合。用两种不同的流体,如水、煤油或空气,进行相应的衰减测量,并代入(2)式:

$$\left. \begin{aligned} \mu_{j1} &= (1 - \varphi_j) \cdot \mu_r + \varphi_j \cdot \mu_{f1j} \\ \mu_{j2} &= (1 - \varphi_j) \cdot \mu_r + \varphi_j \cdot \mu_{f2j} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中的下角标 1、2 分别代表不同流体饱和和岩心进行的实验。

如果我们用同一单色源,则岩石骨架材料所贡献的衰减成分(等式右第一项),就和孔隙中所占据的液体性质无关,消除这一项,将两式联立,就得到了岩心每个像素点孔隙度的测定公式:

$$\varphi_j = \frac{\mu_{j2} - \mu_{j1}}{\mu_{f2j} - \mu_{f1j}} \quad (4)$$

总孔隙度是岩心所有像素点孔隙度的平均值:

$$\varphi = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \varphi_j \quad (5)$$

式中  $N$ ——岩心断面上总的像素点数。

在实际计算时,用 CT 数代替线性衰减系数,则(4)式可写成:

$$\varphi_j = \frac{H_{rf2j} - H_{rf1j}}{H_{f2j} - H_{f1j}} \quad (6)$$

式中  $r$ ——岩石;

$f$ ——流体;

$H_{rf2j}$ ——岩心全部饱和和流体 2 时,像素点  $j$  的 CT 数值,  $H$ ;

$H_{r1j}$ ——岩心全部饱和流体1时,像素点  $j$  的 CT 数值, H;

$H_{f2j}$ ——像素点  $j$  中流体2的 CT 数值, H;

$H_{f1j}$ ——像素点  $j$  中流体1的 CT 数值, H。

利用 CT 扫描测定岩心油水饱和度的公式<sup>(6)</sup>为:

$$\left. \begin{aligned} \mu_j &= \mu_{roj} \cdot S_{oj} + \mu_{rwj} \cdot S_{wj} \\ 1 &= S_{oj} + S_{wj} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中  $\mu_j$ ——油、水同时占据孔隙体积时像素点  $j$  的线性衰减系数;

$S_{oj}$ ——像素点  $j$  的油饱和度(%);

$S_{wj}$ ——像素点  $j$  的水饱和度(%);

$\mu_{roj}$ ——岩心完全油饱和时像素点  $j$  的线性衰减系数;

$\mu_{rwj}$ ——岩心完全水饱和时像素点  $j$  的线性衰减系数。

$\mu_j$ 、 $\mu_{roj}$  和  $\mu_{rwj}$  分别可以通过 CT 扫描测量出来, 则从(7)式演算就可以得出每个像素点油、水饱和度的测定公式:

$$\left. \begin{aligned} S_{wj} &= \frac{\mu_j - \mu_{roj}}{\mu_{rwj} - \mu_{roj}} \\ S_{oj} &= 1 - S_{wj} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

总油、水饱和度是岩心所有像素点油、水饱和度的平均值:

$$\left. \begin{aligned} S_w &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_{wj} \\ S_o &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_{oj} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

用 CT 数代替线性衰减系数, 则(8)式可写成:

$$\left. \begin{aligned} S_{wj} &= \frac{H_{rowj} - H_{roj}}{H_{rwj} - H_{roj}} \\ S_{oj} &= 1 - S_{wj} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中  $O$ ——油;

$W$ ——水;

$H_{rowj}$ ——岩心同时被油、水饱和时像素点  $j$  的 CT 值, H;

$H_{rwj}$ ——岩心完全水饱和时像素点  $j$  的 CT 值, H;

### 3 仪器设备、实验样品和程序

实验所用 CT 为西门子公司生产的 Somatom CR 型全身扫描仪,属于医用第三代仪器,图 2 是其结构框图。实验条件采用 125KV、

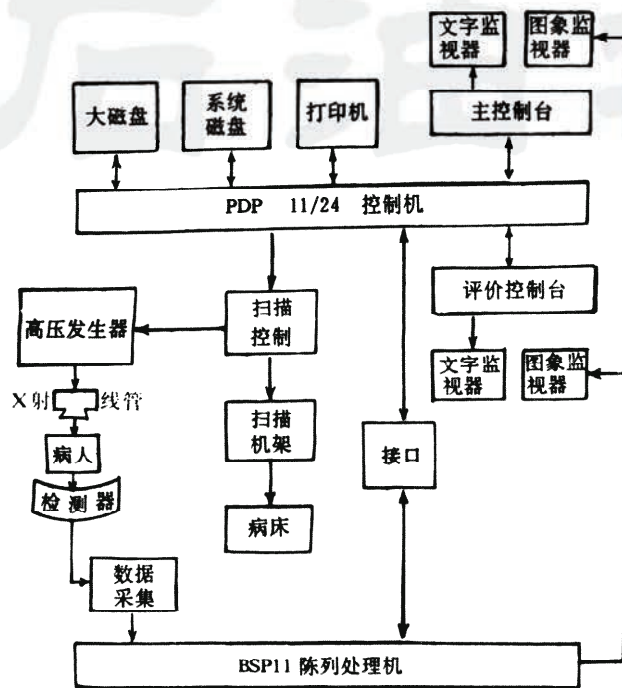


图 2 Somatom CR 型 CT 机的结构框图

Fig. 2 Structure chart of CT scanner of somatom CR type

500mAs。每块岩心以 2mm 的厚度扫 8 个断面,两个断面之间有 1mm 的间隙,单位像素尺寸为 0.25mm×0.25mm×2mm,在重建图像的 CT 数据时,采取了消除束硬化效应的重建算法,重建后的图像具有 256×256 矩阵的底片清晰度。为了保证足够的曝光剂量,扫描时间取 7s。实验样品为八块不同粒径和孔隙度的岩心样品,均为直径 2.5cm、高 2.5cm 的圆柱形。为了安置此岩心柱,采用如图 3 所示的纯铝岩心筒,筒壁厚 0.8cm,筒内可以同时放入四块岩心,筒上半部开有三个窗口,便于调节岩心与筒壁的相对位置。岩心筒固定在一套可以五维调整的采用光学定位调整支架的定位装置上,以便于岩心在扫描野内的重复定位,整个装置的高度由经纬仪测量控制,实验前,CT 机对空气扫描,进行定标。图 4 是样品孔隙度和油水饱和度的实验流程图。共需三次 CT 扫描。实验中用碘化钾

溶液(0.5mol/L)代替纯水,是为了在 CT 数上与煤油拉开距离,便于在图像上更好地地区分煤油和水。用低密度塑料瓶分别装入煤油和碘化钾溶液,放入岩心筒中用 CT 扫描,测得 CT 数值分别为 -311H 和 1595H。为了验证 CT 测定结果的正确性,我们采用煤油法和氮气法作孔隙度的平行测定,采用重量法和干馏法作油水饱和度的平行测定,重量法油水饱和度测定的(图 4 左侧)计算公式为:

$$S_o = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_1} \times 100\% \quad (11)$$

$$S_w = \frac{(m_3 - m_2) / \rho_w}{(m_4 - m_1) / \rho_o} \times 100\% \quad (12)$$

式中  $S_o$ ——油饱和度(%);

$S_w$ ——水饱和度(%);

$m_1$ ——干样重量(g);

$m_2$ ——干样含适量煤油后的重量(g);

$m_3$ —— $m_2$ 继续饱和水后的重量(g);

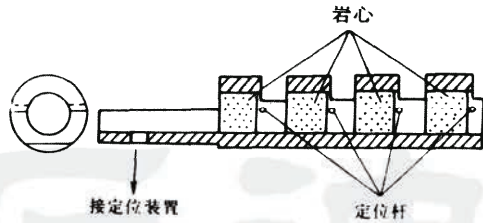


图 3 岩心筒结构示意图

Fig. 3 A Schematic diagram of core barrel

$m_4$  —— 干样饱含煤油后的重量(g);  
 $\rho_w$  —— 水的密度(g/cm<sup>3</sup>);  
 $\rho_o$  —— 油的密度(g/cm<sup>3</sup>).

CT 每次扫描产生大量的图像数据需要进一步处理, 由于医院的 CT 平时临床任务较重, 我们采取了脱机处理方式, 每次扫描完成后, 把岩样的断面图像数据以一定方式拷入磁性存储介质, 再转入一个以 DEC 公司生产的 PDP11/24 小型计算机为主机的工作站上, 数据经过格式转化, 成为 PDP11/24 多用户操作系统下可读取的数据文件。我们编制了 CT 实用软件包, 软件包采用菜单式的工作方式, 可以对 CT 图像进行特殊处理, 并直接求出孔隙度及油水饱和度。各种应用程序采用 FORTRAN77 语言编制, 孔隙度及油水饱和度程序的运行约需 2—3min 时间。

#### 4 实验结果和讨论

我们沿岩心圆截面直径连一直线, 求出了该线上 CT 数的分布, 它反映了在该断面上沿该线密度值的分布, 如图 5 所示, 图 5A、5B 分别是岩心样品饱和水及煤油时的情况, 两边的峰值代表铝筒, 中间较宽的区域为岩心。图 5C 是图 5A 减去图 5B 的结果, 两边的铝筒基本上被减去, 中间区域反映了岩心样品断面上的孔隙分布情况。

表 1、表 2 给出了八块岩心样品孔隙度、油水饱和度的 CT 测定值与煤油法、氮气法、重量法、干馏法测定值的比较, 带 \* 号的数据为干馏法测定的结果。表 1 表明: CT 法测定的岩心孔隙度值与煤油法、氮气法测定的岩心孔隙度值的误差基本上小于煤油法与氮气法两个公认方法测定值之间的误差(如 3 号岩心样品, 二者之间的误差为 2.95%)。表 2 表明: CT 法测定的岩心油饱和度值与重量法、干馏法测定的岩心油饱和度值的误差, 除 2 号岩心样品外, 其余均小于允许误差范围 5%。这说明用 CT 法测定岩心孔隙度及油水饱和度已经基本上获得成功, 只要调整合适的断面密度, 就可以得到理想满意的结果。

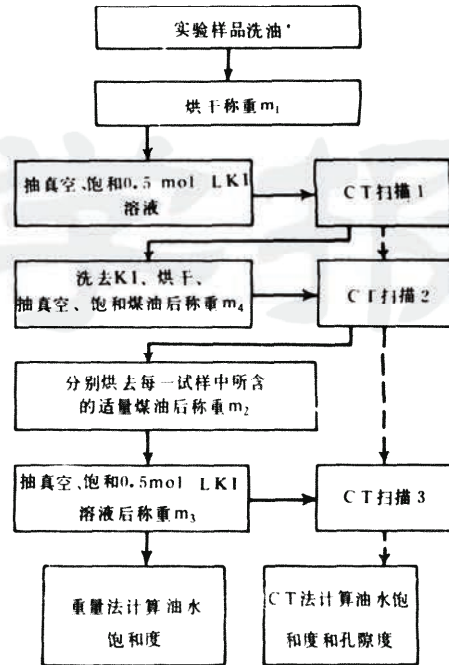


图 4 实验流程图

Fig. 4 Experimental flow chart

注: \* 是用煤油法、氮气法测定孔隙度后的岩心样

表1 CT法与煤油法、氦气法孔隙度测定数据对比

Table 1 Comparison of porosity determinations with CT method, kerosene method and helium method

岩心号	1	2	3	4	5	6	7	8
CT法(%)	5.67	6.23	10.09	11.36	14.27	20.73	21.70	35.33
煤油法(%)	5.10	6.30	12.70	13.00	14.70	19.40	23.90	
氦气法(%)	5.00	6.38	9.75	13.06	14.72	19.48	25.00	37.70

表2 CT法与重量法、干馏法油饱和度测定数据对比

Table 2 Comparison of oil saturation determination with CT method, gravimetric method and dry distillation method

岩心号	1	2	3	4	5	6	7	8
CT法(%)	0.50	90.66	82.48	62.22	46.74	47.62	56.16	3.42
重量法(%)	饱和水	饱和煤油	78.59	66.74	44.66	52.58*	56.40*	饱和水

利用医用CT分析较高密度的岩心样品,要受到束硬化效应的影响,由于吸收介质优先吸收多色X射线束中的低能X射线,使得穿过样品的X光子能量的高能部分相对增强,在CT图像上产生“环状”伪影。目前国外克服束硬化的方法是把岩心包围在砂子里或放入一定浓度的碘化钾溶液中。考虑到实验需要对岩心样品进行多次操作并在扫描野内重复定位,故设计了一个内径2.6cm、壁厚0.8cm的纯铝制岩心筒,岩心筒与岩心紧密偶合,较好地克服了束硬化的影响。在图5中,对于铝筒这样密度较为均匀的物质,其峰值并不是平坦的,外端较高,这是束硬化的“环形效应”。

既然铝筒“滤去”了大部分束硬化的影响,在求解孔隙度和油水饱和度时,就需要去掉外围的铝筒成分。CT实用软件包给出了这一功能。实验中发现束硬化的影响与下述条件关系很大:①岩心样品与铝筒是否紧密偶合,偶合越紧密,束硬化消除的效果越好;②铝筒与所围岩心样品的密度差异越小,束硬化消除的效果越好。

## 5 实验的意义

CT法测定岩心样品孔隙度及油水饱和度比其它方法优越之处在于它是通过每一个基本体积单元(或像素)的CT数参加运算,因此它可以给出每一个体积单元的参数值,这对于观察裂缝性岩心样品内的裂缝分布、走向、以及油水饱和度的变化,并测定其参数,都十分有利。图6和图7是四块岩心样品的孔隙度和油饱和度沿岩心样品柱长轴方向变化的情况,其中每个点代表其断面的平均值。

1990年2月,济阳坳陷罗42井沙河街组第三段下部裂缝型油气藏出油,4mm油咀试油,日产原油81.3m<sup>3</sup>,天然气4220m<sup>3</sup>,从而揭示了胜利油田油气储集的一种新类型,明确了济阳坳陷油气勘探的一个新领域。据研究表明这种类型油气藏在整个济阳坳陷存在3个一类有利勘探区、4个二类有利勘探区、3个三类有利勘探区<sup>[7]</sup>,因此,它的勘探前景是可观的。从那时

起,我们就一直在研究这种类型油气藏勘探的配套技术,本文利用 CT 技术测定油气藏储量计算参数——孔隙度及油水饱和度,就是其中配套技术之一,它解决了其它方法无法测定的裂缝型油气藏储层岩心孔隙度及油水饱和度的测定问题。例如这次我们测定的大 92 井 2730.02~2730.12m 井深全直径岩心样品的裂缝及顺延裂缝的溶洞,其宽度可达 11mm,贯穿整个岩心直径及心长,CT 横向断面图像可以清晰地看出裂缝的走向和分布,裂缝内还有高密度的填充物,该储集岩十分致密,在 CT 上表现出极大的 CT 数,我们用 CT 法测出了它的孔隙度值为 4.2%。若用 CT 法测得的该类储层的储量计算参数对电测资料进行标定,进而标定地震资料,圈出它的分布范围,计算出油气的储量,这就达到了预期的目的。

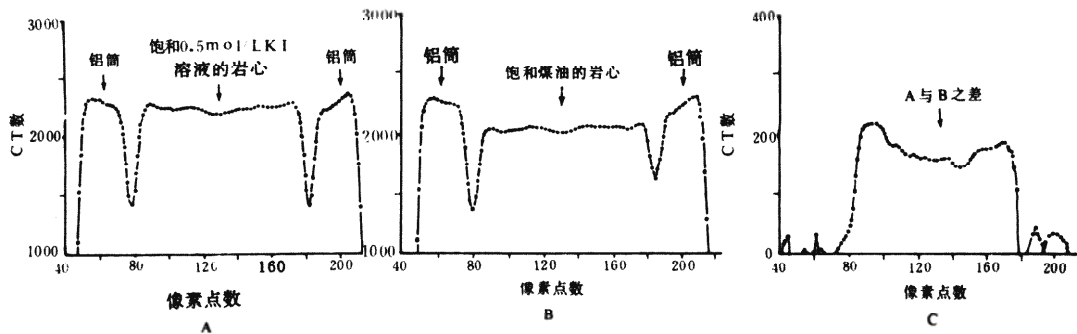


图 5 通过岩心样品直径上 CT 数的分布

Fig. 5 Distribution of CT numbers on diameter through core sample

A—饱和碘化钾溶液;B—饱和煤油;C—A 与 B 之差

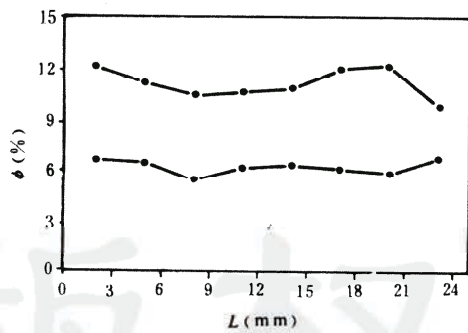


图 6 沿岩心样品柱长轴  $\phi$  的分布

Fig. 6 Distribution of porosity along long axis of core sample cylinder.

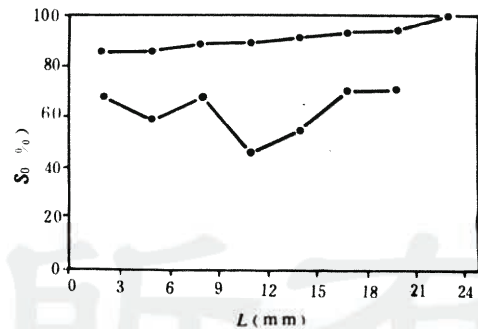


图 7 沿岩心样品柱长轴  $S_o$  的分布

Fig. 7 Distribution of oil saturation along long axis of core sample cylinder.

(本文收到日期 1992. 6. 4)

(修改稿收到日期 1992. 7. 29)

(编辑 廖世芳)



## 参 考 文 献

- [1] Roberto Cesareo. Computed Tomography: Physical principles significant paramaters instrumentation College on Medical Physics, 1990, 9: 10—28. I C T P Italy H4-SMR471/02.
- [2] Wang S Y et al. Computer assisted tomography for the observation of oil displacement in porous media. SPEJ 1984, (2): 53—55.
- [3] Wang S Y et al. Reconstruction of oil saturation distribution histories during immiscible liquid-liquid displacement by computer—assisted tomography. AIChE Journal, 1984, 30(4): 642.
- [4] 杰·亚历山大, 等著. 汪臻, 顾英译. CT 技术及其临床应用. 北京: 中国医药科技出版社, 1988, 10.
- [5] Withjack, E M. Computed tomography for rock—property determination and fluid—flow visualization. SPE 16951, 1987, (9), 27—30.
- [6] Paul J et al. Experimental Measurement of the distribution of residual oil saturation in heterogenous carbonate cores using X—Ray computed tomography. CIM/SPE, 1990, (6): 90—68.
- [7] 戴贤忠等. 济阳坳陷裂缝型纹层状含泥碳酸盐岩夹钙质泥岩油藏储层分析及其预测. 石油勘探与开发, 1991, 18, 增刊, 81—86.

## APPLICATION OF COMPUTER TOMOGRAPHY TO THE DETERMINATION OF POROSITY AND OIL SATURATION IN A CORE SAMPLE

Dai Xianzhong Li Xiaomeng  
(Shengli Petroleum Administration)

Wang Jiaxin Wu Shan Liu Tao  
(Tianjin University)

### Abstract

This paper discusses the feasibility of applying a third generation medical X-ray computerized tomography (CT) scanner to the determination of porosity and oil saturation of cores. The porosities and oil saturations of eight core samples are determined with CT method and the results correspond with conventional method. A set of core analysis methods is developed by using medical CT scanner as well as a special software package. The problems and limitations of this method are described and the ways to solve the problems are given. The significance of this study and CT analysis of a core from reservoir are presented and method of determination of core porosity is given.