

# 双能 $\gamma$ 射线油气水多相流相含率测量技术研究

李东晖, 吴应湘, 李志彪, 钟兴福

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

## 摘要

主要研究了基于放射性同位素镅 ( $^{241}\text{Am}$ ) 及放射性同位素铯 ( $^{137}\text{Cs}$ ) 两种核素的双能  $\gamma$  射线系统, 设计制造了一套多通道前放及脉冲成形放大器、可编程脉冲计数式数据采集系统及探测器高压电源系统, 推导了双能  $\gamma$  射线测量方程, 讨论了双能  $\gamma$  射线测量方程出现线性相关的条件和提高测量精度应采取的测量技术手段。通过实验数据的分析, 发现该双能  $\gamma$  射线系统存在明显的测量误差。在进一步分析实验数据的基础上, 找到了产生误差的物理原因, 即高能级  $\gamma$  射线产生的康普顿散射的影响, 并据此引入了相应的测量修正算法, 该修正算法明显改善了系统的测量误差, 使该双能  $\gamma$  射线多相含率测量系统实现工业应用成为可能。

**关键词:** 多相流; 双能射线; 含率; 测量

## 1 引言

石油工业中的油、气、水多相流的相含率测量问题仍然是一个亟待解决的难题。随着核射线探测技术的发展, 双能  $\gamma$  射线技术使油、气、水多相管流的管截面相含率的测量成为可能, 并且已经开始在一些商业化的多相流量计上应用。但是由于多相流动的复杂性以及双能  $\gamma$  射线测量在技术上的一些局限性, 使相含率测量的精度还存在一些问题, 还需要从测量原理入手进行进一步的研究。

油气水多相混输已经在海洋石油工业中广泛应用, 混输管线的油气水多相流的相含率测量问题仍然是一个亟待解决的难题。国际上相关领域的研究工作始于1980年左右, 使用  $\gamma$  射线进行多相流含率测量是由Abouelwafa和Kendall (1980) 首先提出来的, 到现在已经应用到多个商业化的多相流量计和多相计量系统中。单能  $\gamma$  射线技术用于多相流测量的原理是基于介质密度测量, 如果不考虑管截面的相分布信息, 单能  $\gamma$  射线技术用于两相流的相含率测量已经很成熟了。但是在油气水三相流中, 问题就要复杂得多。为解决三相的问题, 双能  $\gamma$  射线技术近些年发展的很快, 它的原理是基于油气水三相混输管中的三相介质在不同的射线能级下具有不同的吸收特性, 并据此计算出介质的相分率。双能  $\gamma$  射线技术近年来的发展显示出它是一种有前景的技术, 是未来多相流量计和多相成像系统的重要组成部分。

## 2 双能理论

下列吸收定理描述了  $\gamma$  射线源辐射的  $\gamma$  射线强度  $I_0$  与穿过长度为  $L$  和密度为  $\rho$  的物体后的透射强度  $I$  之间的数学关系 (Minder and Liechti 1955; Morneburg 1995):

$$I = I_0 \cdot \exp(-\eta(ZE) \cdot \rho \cdot L)$$

式中吸收系数  $\eta$  是  $\gamma$  射线能级  $E$  和原子数  $Z$  的函数。如果  $\gamma$  射线的能级为  $E$ , 则有:

$$I(E) = I_0(E) \cdot \exp(-\mu(E)L)$$

对于油、气、水三相流, 混合介质的吸收系数可以表示为

$$\mu(E) = \alpha\mu(E)_o + \beta\mu(E)_w + \gamma\mu(E)_g$$

式中  $\mu(E)_o$ 、 $\mu(E)_w$  及  $\mu(E)_g$  分别是油、水、气的线性吸收系数;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  则分别代表了各相的体积相分率。此时, 穿过厚度为  $L$  的油、气、水混合介质的  $\gamma$  射线透射强度  $I$  为

$$I = I_0 \exp[-(\alpha\mu(E)_o + \beta\mu(E)_w + \gamma\mu(E)_g)L]$$

在经过良好准直的  $\gamma$  射线源和探测器的条件下, 如果使用双能  $\gamma$  射线源, 测量到对应  $\gamma$  射线能级  $E_1$  和  $E_2$  的透射强度  $I_1$  和  $I_2$ , 并且各相混合介质的线性吸收系数已知的话, 则油、气、水混合介质的体积相分率可以通过以下方程计算出来:

$$\ln(I/I_0)_1 = -[\alpha\mu(E_1)_o + \beta\mu(E_1)_w + \gamma\mu(E_1)_g]L \quad (1)$$

$$\ln(I/I_0)_2 = -[\alpha\mu(E_2)_o + \beta\mu(E_2)_w + \gamma\mu(E_2)_g]L \quad (2)$$

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (3)$$

上述三个方程中有三个未知数, 即相分率  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ 。实际运算中, 由于气相的密度很低,  $\mu(E_1)_g$  和  $\mu(E_2)_g$  可视为零, 而不会带来明显的计算误差。

水和油在  $\gamma$  射线能量轴的线性吸收系数分布揭示了其光子吸收特性的差异, 这种差异可以被用来区分这两种介质。见图1。水的光子吸收能力强于油这是因为氧比碳有更高的原子数, 并且水 ( $\rho = 1.00 \text{gcm}^{-3}$ ) 比大多数矿物油 ( $\rho = 0.80 \sim 0.90 \text{gcm}^{-3}$ ) 的密度都要大。

由于光子能级和原子数对光电效应的贡献比康普顿效应大, 因而在光电效应主导的  $\gamma$  射线能级区间, 介质中油和水的线性吸收系数的差别较大。图2画出了线性吸收系数的相对差作为光子能级函数的曲线, 它表明了  $\gamma$  射线测量系统依赖油、水的光子吸收来区别两种介质时, 最大分辨能力出现在光子能级低于40keV。

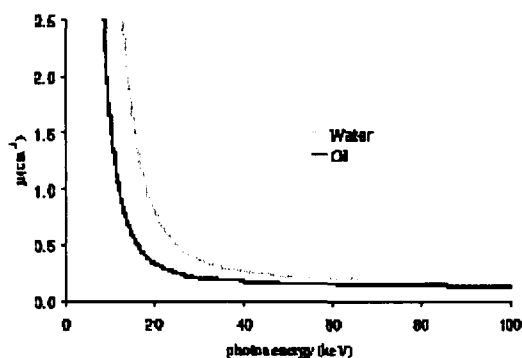


图1 线性吸收系数和光子能级的关系

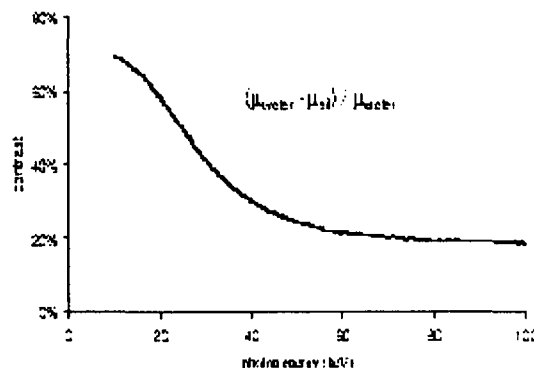


图2 线性吸收系数相对差和光子能级的关系

在本项目中, 主要研究了基于放射性同位素镅 ( $^{241}\text{Am}$ ) 及放射性同位素铯 ( $^{137}\text{Cs}$ ) 两种核素的双能  $\gamma$  射线系统, 其  $\gamma$  射线放射能级分别是59.5 keV及662 keV, 因此两种能级在油和水中的线性吸收系数的相对差较小, 二者的线性吸收系数相当接近, 这就容易导致方程(1)、(2)、(3)出现线性相关或接近线性相关, 使方程(1)、(2)、(3)线性独立的必要条件:

$$\frac{\mu(E_1)_w}{\mu(E_1)_o} \neq \frac{\mu(E_2)_w}{\mu(E_2)_o}$$

但是过于接近的线性吸收系数会导致方程特性变坏, 由透射强度测量导致的小误差被放大、扩散成大的误差, 对测量不利, 这种情况只有合理的选择射线的能级才能避免。

### 3 实验系统的建立

#### 3.1 $\gamma$ 射线源

在本项目中,  $\gamma$  射线源是由放射性同位素镅 ( $^{241}\text{Am}$ ) 及放射性同位素铯 ( $^{137}\text{Cs}$ ) 两种核素组成的双能  $\gamma$  射线系统, 其  $\gamma$  射线放射能级分别是 59.5 keV 及 662 keV。两种放射性同位素置于同一个厚铅罐内以防护放射性同位素铯 ( $^{137}\text{Cs}$ ) 的高能级辐射, 其中放射性同位素镅 ( $^{241}\text{Am}$ ) 的放射性活度为 100 mCi, 放射性同位素铯 ( $^{137}\text{Cs}$ ) 的活度为 20 mCi, 选择  $^{241}\text{Am}$  的活度高于  $^{137}\text{Cs}$  的原因是  $^{241}\text{Am}$  的辐射能级较小, 油气水介质对它的吸收率较  $^{137}\text{Cs}$  高。在铅罐的底部开有直径 20mm 的准直孔, 双能  $\gamma$  射线从这个直径为 20mm 的准直孔输出, 一个机械开关可以打开或关闭射线以保证操作安全。

#### 3.2 闪烁体探测器

设计双能  $\gamma$  射线测量系统的一个重要步骤就是选择射线探测器, 两个参数是重点要考虑的: 探测效率和响应时间。高探测效率可以降低测量系统对  $\gamma$  射线源活度的要求; 快的响应时间可以提高计数率并减少脉冲堆积。NaI (TI) 晶体是最常用的闪烁体探测器, 它有很高的探测效率, 这一点对具有较高辐射能级的  $^{137}\text{Cs}$  的测量尤为重要。

一个尺寸为 40mm (H)  $\times$  40mm (D) 的圆柱型闪烁体晶体和一个光电倍增管组合在一起制成一个闪烁体组合探测器, 见图 3。该组合探测器的外径  $\delta$  55mm, 总长度为 220mm。

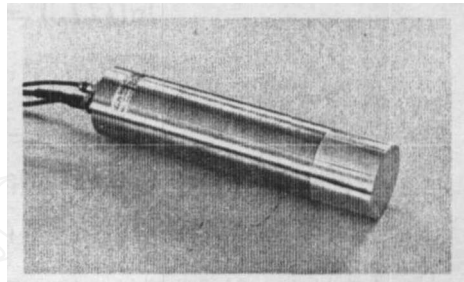


图3 闪烁体组合探测器

#### 3.3 测量电路

本项目中的测量电路设计成一个多通道的测量系统 (20通道)。系统工作在光子脉冲计数方式。它主要是由高压电源、前置放大器、脉冲成形放大器、可编程脉冲计数采集板等部件组成, 见图 4。

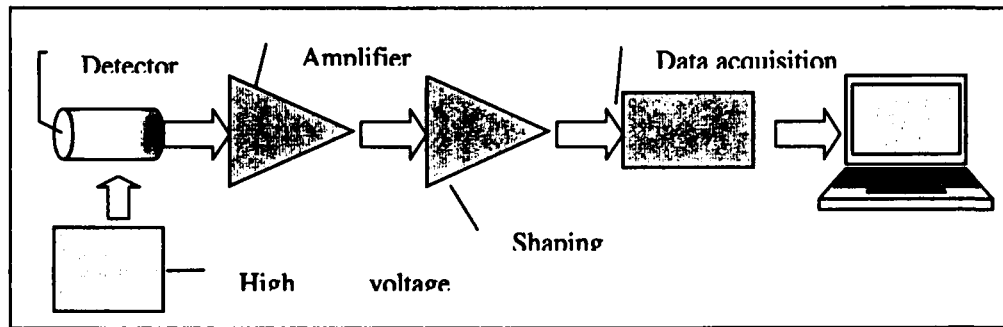


图4 光子脉冲计数电路

#### 3.4 实验支架和测量容器

由于本项目的实验是静态实验, 不能使用实验室的多相流动态模拟实验设备, 因此为此专门设计加工了一个固定的实验台架和 4 个方型测量容器, 见图 5。在后续的工作中, 这个静态实验台架也可以作为射线测量的标定台架使用。

实验台架的高度是 1m, 放射源置于台架的顶部, 射线向下方辐射, 以保证安全。4 个有机玻璃的测量容器用来罐装不同比例的油、气、水三相介质。测量段的尺寸是 100mm (L)  $\times$  100mm (W)  $\times$  600mm (H), 有机玻璃壁厚是 5mm, 测量时, 容器水平放置, 此时容器总厚度是 110 mm, 其中有效空间 100 mm。实验时容器的位置可以在  $\gamma$  射线源和探测器之间根据需要由两只千斤顶调节。

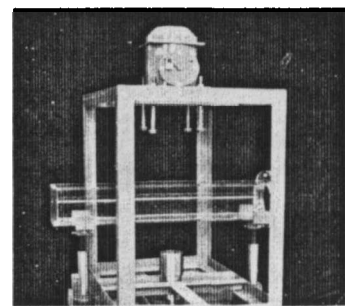


图5 实验支架和测量容器

### 4 实验安排

为了研究介质的射线吸收特性，设计安排了一组实验，见表1。总共安排了22项实验。在容器的100 mm有效空间内，实验的最小步长为10 mm介质厚度变化。

表1 实验项目 (O=油、W=水、G=气)

厚度 (毫米):	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
1											G	
2		W								G		
3			W						G			
4				W				G				
5					W				G			
6						W,G						
7					G			W				
8				G					W			
9			G							W		
10		G									W	
11												W
12												O
13			G						O			
14					G		O					
15					O			G				
16			O						G			
17			W,O					G				
18			O		W,G							
19			O,G					W				
20			W		O,G							
21			G		O,W							
22			W,G				O					

### 5 结果及讨论

表1中的1~11项模拟了气液两相流，尽管这是多相流中比较简单的情况，实验结果显示仍然存在较大的测量误差，见图6。误差曲线见图7。

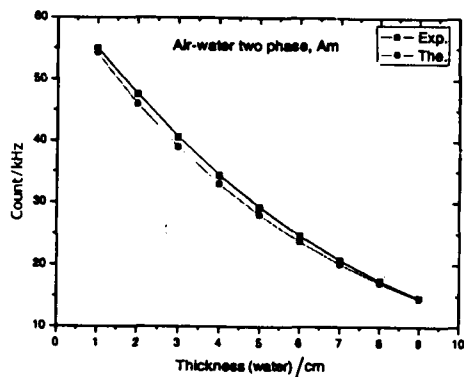


图6 气液两相流吸收曲线

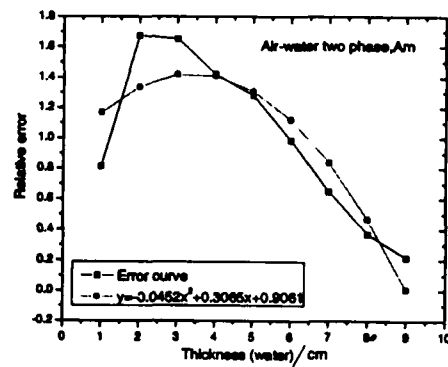


图7 气液两相流误差曲线

在图6中<sup>241</sup>Am的测量曲线可以发现，实验值明显高于理论值，特别是在液相厚度为2cm~6 cm时，误差在曲线的两端逐渐减小，其中最大误差接近+2.6%。然而，<sup>137</sup>Cs的测量误差明显较小，最大误差不大于+1.8%，见图8、图9。

在仔细研究了测量结果后发现：所有实验点的计数率均高于理论值，这表明有额外计数进入了测量通道，并导致实验值总是呈现出正误差。

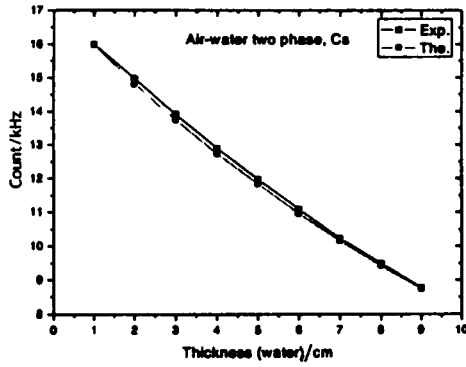


图8 气液两相流吸收曲线

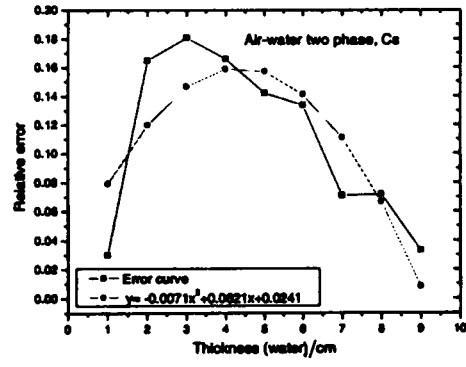


图9 气液两相流误差曲线

康普顿散射可能是出现这种现象的主要原因。<sup>137</sup>Cs 辐射的较高能级的 $\alpha$ 射线作用于介质的截面产生康普顿散射, 由于康普顿散射特征具有广泛分布的连续谱, 部分低端分布的康普顿散射能量进入了<sup>241</sup>Am 的测量通道导致了额外计数的发生。总体来说, 对 $\gamma$ 射线测量系统这种误差是非常有害的, 这意味着测量精度和多相流的流型、流态有关, 即测量精度是流型依赖的。从图8、图9看出, 康普顿散射对<sup>137</sup>Cs 测量通道的影响较小, 这是因为康普顿散射通常产生低一些的辐射到各个方向, 低能级的辐射只有很少部分能够进入<sup>137</sup>Cs 自己的测量通道以引起误差。解决这个问题的主要方法是在射线探测器前加特性良好的准直孔, 或由误差曲线修正测量结果, 根据误差曲线从测量值里减去额外的计数值。

表1中的12~16项模拟了气、油两相流, 测量结果和结论和气、水两相流相同, 见图10。

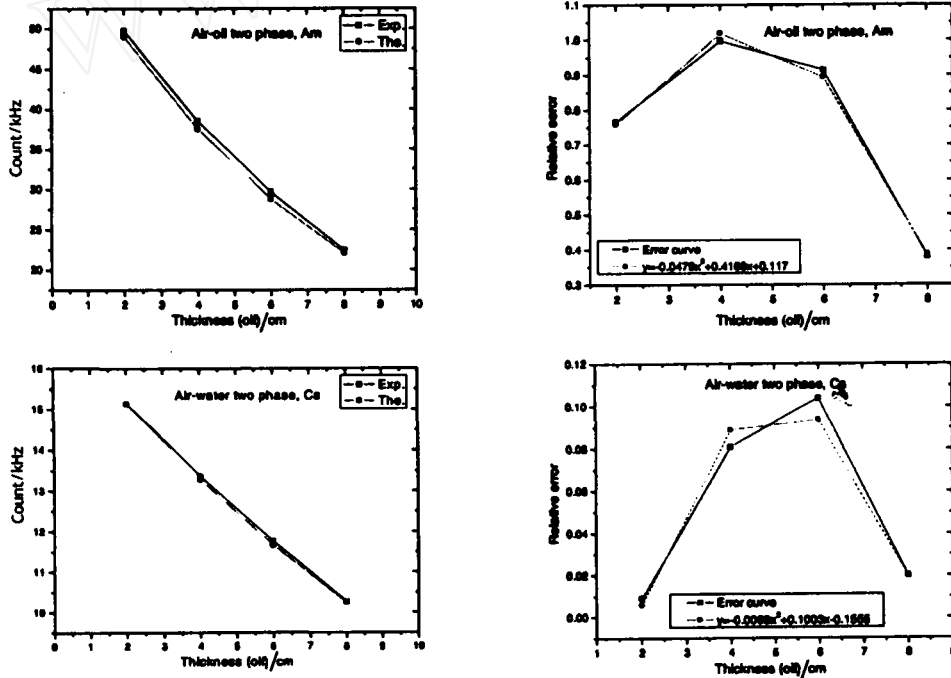


图10 气、水两相流测量曲线

表1中17~22项的静态测量模拟了油、气、水三相流。在三相流的体积含率测量方面, 正如本文第2节所说,  $\gamma$ 射线测量系统依赖油、水的光子吸收来区别两种介质时, 最大分辨能力出现在光子能级低于40keV时。在本项目中, 放射性同位素镅(<sup>241</sup>Am)的 $\gamma$ 射线放射能级是59.5 keV, 明显大于40keV, 因此两种能级在油和水中的线性吸收系数的相对差较小, 二者的线性吸收系数相当接近, 这就导致方程(1)、(2)、(3)接近线性相关。这种过于接近的线性吸收系数会导致方程特性变坏, 由透射强度测量导致的小误差被放大、扩散成大的误差, 对测量不利, 由此提出一种根据误差曲线的修正算法来改善三相测量的精度, 计算结果见图11。

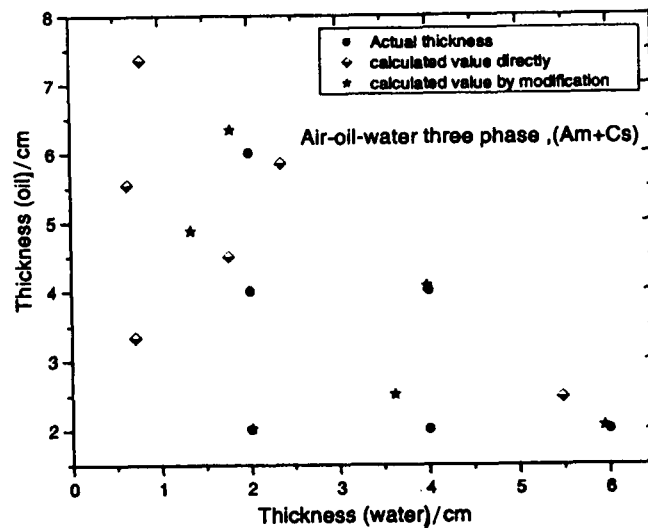


图11 油、气、水三相体积含率测量

相对6个给定的点, 6个从方程(1)、(2)、(3)直接计算的值有很大的偏差。另外一组经过修正计算的值就具有可以接受的误差分布。棒状图显示的测量结果见图12。从条状图可以看出, 经过修正的计算数据具有可以接受的测量精度, 最大误差不超过6% (满度)/每相。

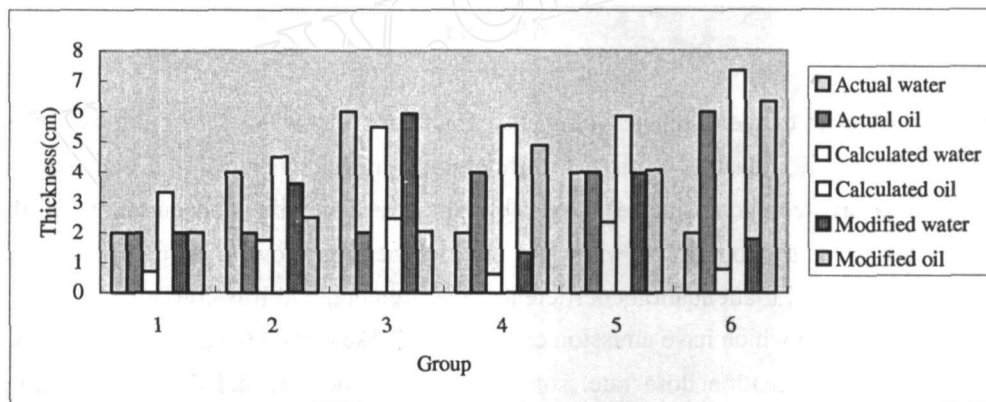


图12 油、气、水三相体积含率测量棒状图

## 6 结论

(1) 双能  $\gamma$  射线技术是基于材料(介质)吸收系数测量的测量方法。在油、气、水三相含率测试中, 最大分辨能力出现在光子能级低于40keV时。当光子能级大于40keV时, 两种能级的射线在油和水中的线性吸收系数的相对差较小, 二者的线性吸收系数相当接近, 这就导致方程(1)、(2)、(3)接近线性相关。这种过于接近的线性吸收系数会导致方程特性变坏, 由透射强度测量导致的小误差被放大、扩散成大的误差;

(2) 根据误差曲线的修正算法来改善三相测量的方法被证明能够有效地提高测量精度;

(3) 一个精心设计的三相含率测试系统有潜力达到一个工业应用可接收的精度, 即优于95%的测量精度。

## 参 考 文 献

- 1 Schena G, C Chiaruttini, Dreossi D, Olivo A, Pani S. Grade of fine composite mineral particles by dual-energy X-ray radiography[J]. Int. J. Miner. Process, 2002,67: 101~122.
- 2 Grassler T, Wirth K E. Dual-Energy X-Ray Tomography in Process Engineering – A Non-Intrusive Technique to Characterize Vertical Multiphase Flows[A]. 2nd World Congress on Industrial Process Tomography[C], Hannover, Germany, 29th ~ 31st August 2001.
- 3 Key M J. Gas Microstructure X-Ray Detectors and Tomographic Multiphase Flow Measurement[D], A thesis of Doctor of University of Surrey.

## A Study On The Measurement Of Volumetric Fraction Of Oil-Water-Gas Multiphase Mixtures

LI Dong-hui, WU Ying-xiang, LI Zi-biao, ZHONG Xing-fu  
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

### Abstract

The problem of how to measure the volumetric fraction of oil-water-gas multiphase flow is still a significant problem in oil industry. With the technological development of nuclear radial inspection, dual-energy Gamma-ray techniques make it possible to investigate the concentration of the different components on the cross-section of oil-water-gas multiphase pipe-flow. The dual-energy Gamma-ray technique is based on material attenuation coefficients measurement, and it is comprised of two radioactive isotopes of  $^{241}\text{Am}$  and  $^{137}\text{Cs}$  which have emission energies at 59.5keV and 662keV in this project. In order to measure the material's attenuation dose rate, some nuclear instruments and data acquisition system are designed; a number of static tests are performed in the Multiphase Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences. There are oil-water-gas three phases of medias which have been investigated to simulate different media volumetric fraction distributions in experimental vessels. The measurement results of attenuation intensities are obtained; the arithmetic of linear attenuation coefficients and the equations of volumetric fractions are studied and an unexpected measurement error from attenuation equations is discussed in this paper as well.

**Key Words:** multiphase flow; dual-energy Gamma-ray; volumetric fraction; measurement