

# 天然气水合物相变测试用光纤传感器\*

陈文建 迟泽英 李武森

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

**摘 要** 介绍了一种用于海洋天然气水合物状态变化模拟实验中天然气水合物相变测试的光透射比光纤传感器。利用该传感器探测水合物状态变化过程中光透射比的变化, 来测定水合物的相态变化。为了提高光纤传感器的测量准确度减小测量误差, 在所研制的光纤传感器中采用了双光路结构, 在测量透射光强的同时, 测量参考光强以补偿光源光强的波动。另外, 在光电转换电路中采用双探测器结构来消除光电探测器暗电流的影响。

**关键词** 光纤传感器; 天然气水合物; 相变; 透射比

**中图分类号** TP212.9 **文献标识码** A

## 0 引言

天然气水合物广泛地存在于海洋中, 作为继煤炭和石油之后贮量巨大的战略环保能源而越来越受到人们的重视。由于各国的地质条件不同和天然气水合物的成份不同, 形成机制各异, 所以在实施开发天然气水合物计划前或同时都要进行天然气水合物的模拟实验研究, 以指导勘查。天然气水合物生成和分解(即相变)条件的探测是天然气水合物模拟实验的主要研究内容之一。

近年来, 国内外科学家采用多种检测方法探测水合物的生成和分解, 使海洋天然气水合物的模拟实验取得长足进展<sup>[1~3]</sup>。文献[1]和[2]分别介绍了一种用于获取天然气水合物生成和研究其光散射特性和热动力学特性的实验室装置。文献[3]介绍了采用普通光源作为光透射强度测试光源的天然气水合物模拟实验装置。光纤传感器具有体积小、抗电磁干扰、能在恶劣环境条件下使用等特点, 经过 30 多年的发展, 已在各种领域得到了广泛的应用<sup>[4~7]</sup>。为解决海洋天然气水合物模拟实验研究中<sup>[8]</sup>高压平衡釜内压力、温度变化条件下水合物状态变化光电检测系统必须工作于水下且空间狭小的要求, 本文介绍了一种用于天然气水合物相变测试的光透射比光纤传感器。

## 1 相变测试基本原理

天然气水合物是水和天然气(甲烷)在高压和低温的条件下产生的冰状结晶化合物。当海洋天然气水合物模拟实验装置高压平衡釜中压力和温度达不

到水合物生成条件时, 甲烷溶解于水中, 釜内液体为光透明液体, 透射比高; 当达到生成条件时, 甲烷与水化合形成冰状结晶化合物——天然气水合物, 釜内液体的透射比减小。据此利用检测透射比变化来测定釜内天然气水合物的相变。

## 2 相变测试中光纤传感器设计

### 2.1 状态变化模拟实验光电探测系统组成

为提高天然气水合物低温高压实验的可视化程度和测试准确度, 天然气水合物状态变化光电探测系统由两个功能相对独立的摄像监视系统与光强透射比测试系统组成。其中, 摄像监视系统主要用于在高压平衡釜内压力( $P$ )、温度( $T$ )变化条件下, 对白光照明的天然气水合物的状态变化进行高清晰度的实时摄像记录。光强透射比测试系统的主要功能与技术要求是, 在高压平衡釜内  $P$ 、 $T$  变化条件下, 利用光纤传感器检测白光通过釜内天然气水合物液体后透射强度的变化情况来反映釜内水合物状态变化(相变)的情况与规律。

### 2.2 光透射比检测的光纤传感器原理

光透射比光纤传感器系统组成如图 1。主要包括: 光纤光源、光纤照明系统、光信号接收系统、光电转换电路以及计算机数据采集与处理系统等。其工作原理为: 光纤光源产生的白光分别耦合到参考光纤束与照明光纤束, 其中参考光纤束的光信号直接传输到光电转换信号处理部分, 用于监测光源信号的起伏<sup>[9]</sup>; 照明光纤束将光信号传输到光束发射系统, 照射到随  $P$ 、 $T$  条件变化而状态变化的天然气和水的混合液体, 光束接收系统中的测试光纤束接收到透射光信号, 其强弱大小可反映天然气水合物状态特性的变化。测试光纤束接收到的光信号经光电探测器接收、转换以及信号处理, 产生计算机 A/D 转换所要求的电压信号(0~5 V), 送计算机数据采

\* 中国地质调查局地质调查项目(GZH2001002)和国家高科技研究发展计划(2001AA611020/03)项目  
Tel: 025-84315121 Email: chenwj@mail.njust.edu.cn  
收稿日期: 2005-04-25

集口,经计算机处理后,即可得到天然气水合物状态变化过程中透射比随 $P$ 、 $T$ 变化的数据和特性曲线。

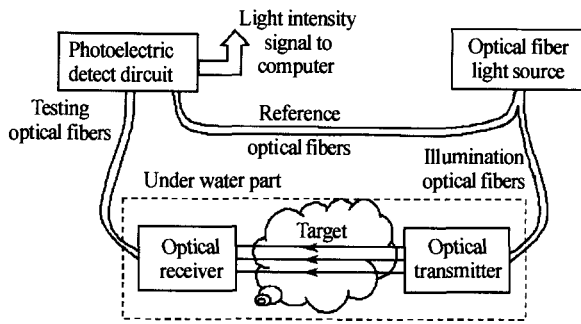


图1 光透射比光纤传感器组成

Fig. 1 Diagram of construction of optical fiber sensor measuring light transmission ratio

## 2.3 系统设计

### 2.3.1 光纤光源的选择及照明光纤束发射端设计

因为光电探测系统中的摄像监视子系统与光透射比光纤传感器根据空间结构及水下密封工作要求,采用两个子系统共用光源的方案,为了保证摄像监视系统的色还原性、目标照度以及满足光纤光强透射比测试系统光强可调节的要求,光电探测系统选择采用了最大功率可达100W、亮度可调节的白光光纤冷光源。

系统中设计采用Y型光纤传光束来耦合光纤光源发出的光信号,Y型光纤传光束的一个输出端(参考光纤束)直接将光纤光源提供的光信号送入参

考光路和光电探测器输入端,用于消除光源起伏变化对测量结果的影响。另一输出端(照明光纤束)输出照明光信号。为了保证光纤光强透射特性测试子系统与摄像监视子系统实现同轴、同向、同时白光照明,两个子系统照明光纤束发射端设计为共用的三点式环状分布的光束照明形式,有效解决了系统中反射光对摄像监视图像清晰度的影响,又为光强透射比测试子系统提供照明测试光信号。

### 2.3.2 光信号接收端设计

为提高接收端光信号收集效率,将光信号接收端设计为带聚光镜的光纤束接收形式。聚光镜将通过水合物液体透射的光信号会聚于测试光纤束入射端,测试光纤束出射端将接收光信号送入光电转换电路的光电探测器输入端,进行光电转换处理。

### 2.3.3 光电转换电路设计

光电转换电路采用双路探测结构,在测量透射光强的同时,测量参考光以补偿光源的波动,从而在一定程度上补偿了光源波动对测试结果的影响。该电路由透射光强测试电路和参考光测试电路两部分组成。两路光电转换电路分别将接收的光信号转换为电信号,并放大为与A/D转换相匹配的0~5V电信号,供A/D采集卡采集数据。两光电转换电路相似(如图2),主要由双光电探测器电桥电路、信号放大电路和输出箝位保护电路等三部分电路组成。

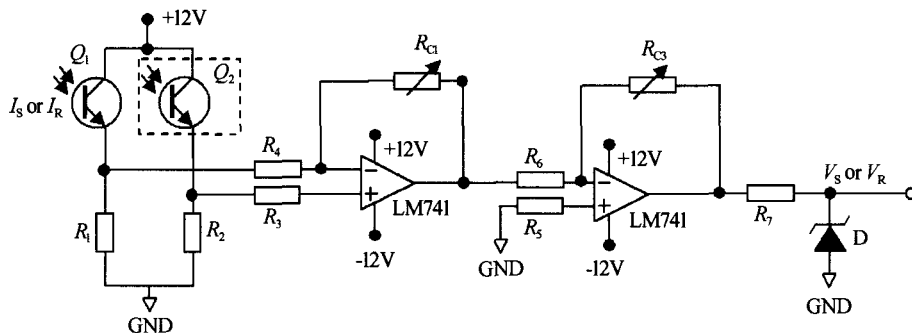


图2 天然气水合物光电转换电路的原理

Fig. 2 Diagram of photoelectric detecting circuit of nature gas hydrates

两光强测试电路中均采用双探测器结构以消除暗电流的影响。双光电探测器电桥电路选用两个相同型号的光敏管 $Q_1$ 和 $Q_2$ 与两个相同阻值的电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 组成差动电桥电路<sup>[10]</sup>,探测光敏管 $Q_1$ 接收透射光信号 $I_S$ 或参考光信号 $I_R$ ,补偿光敏管 $Q_2$ 安装在暗盒中,不接收光信号,用于温度补偿。由于两个光敏管具有相同的暗电流特性,温度变化时,探测光敏管 $Q_1$ 的暗电流被补偿光敏管 $Q_2$ 的暗电流抵消,从而使差动电桥的电路输出只与透射光信号 $I_S$ 或参考光信号 $I_R$ 相关,从而提高了光强测试准确度。放大电路采用两级比例放大,使得电路的放大倍数调节范围

变宽,增强了检测输出驱动能力。输出箝位保护电路由稳压二极管D构成,用于限制最大输出电压,以防过强的光信号导致后级数据采集板的损坏。

## 2.4 计算机数据采集与处理

光电信号转换电路输出的0~5V的测试信号 $V_S$ 与参考信号 $V_R$ 通过数据采集卡转换为数字信号,由计算机采集记录。计算机数据采集与处理过程如下:

在实验开始阶段时,计算机分别采集测试信号 $V_S$ 与参考信号 $V_R$ 的初始值 $V_{S0}$ 和 $V_{R0}$

$$V_{S0} = c_S \cdot I_0 \cdot T_0; V_{R0} = c_R \cdot I_0 \quad (1)$$

式中  $I_0$  表示光源的初始光强值;  $T_0$  表示初始透过率;  $c_S, c_R$  分别表示  $V_S$  和  $V_R$  与光源光强  $I_0$  间的比例关系, 这两个参量与光纤束的分光比、电路放大倍数等参数有关, 对于给定的系统  $c_R, c_S$  为常数.

在实验过程中, 计算机连续不断地采集记录测试信号  $V_S$  与参考信号  $V_R$  的实验值  $V_{Sr}$  和  $V_{Rr}$

$$V_{Sr} = c_S \cdot I_t \cdot T_t; V_{Rr} = c_R \cdot I_t \quad (2)$$

式中,  $I_t$  表示光源的  $t$  时刻光强值;  $T_t$  表示平衡釜内液体  $t$  时刻的透过率.

由式(1)和式(2)可得, 高压平衡釜内液体光强透射特性—相对透射比  $\tau$

$$\tau = \frac{T_t}{T_0} = \frac{V_{Sr}/c_S I_t}{V_{S0}/c_S I_0} = \frac{V_{Sr}}{V_{S0}} \cdot \frac{I_0}{I_t} = \frac{V_{Sr}}{V_{S0}} / c_t \quad (3)$$

式中  $c_t = I_t / I_0$ , 表示光源光强随时起伏变化. 若  $c_t = 1$ , 表明光源光强稳定不变; 如  $c_t$  变化, 表明光源光强随时间而起伏变化. 由式(3)可以看出, 相对透射比  $\tau$  与光源光强变化  $c_t$  有关, 光源光强起伏将影响  $\tau$  的测量准确度.

由式(1)和式(2)可得

$$\frac{V_{Rr}}{V_{R0}} = \frac{I_t}{I_0} = c_t \quad (4)$$

表明参考光信号的变化反映光源光强变化, 为消除光源强度变化影响, 将式(4)代入式(3)得

$$\tau = \frac{T_t}{T_0} = \frac{V_{Sr}}{V_{S0}} / c_t = \frac{V_{Sr}}{V_{S0}} \cdot \frac{V_{R0}}{V_{Rr}} \quad (5)$$

由式(5)可知, 相对透射比  $\tau$  的计算与光源光强变化  $c_t$  无关, 从而消除光源光强起伏对测试结果的误差影响, 提高测量准确度, 同时也可降低对光源光强稳定性的要求.

### 3 实验结果

实验结果表明, 该系统中加入参考光纤束来监测光纤光源强度的变化, 可大大减小光源光强起伏对测试准确度的影响. 当光源光强起伏达  $\pm 5\%$  时, 光透射比测量准确度可控制在  $\pm 1\%$  以内. 该系统已成功地应用于海洋天然气水合物模拟实验研究<sup>[11]</sup>. 图 3 为在高压平衡釜内  $P, T$  变化条件下, 甲烷在纯水中水合物状态变化(相变)时所检测到透射比变化情况. 试验中高压平衡釜内的压力基本保持不变, 通过改变温度的升降来控制水合物的生成和分解. 水合物大量生成和分解时, 光透射比会发生变化. 准确读取水合物开始分解时光透射比开始上升时的拐点处的温度值, 即得该压力条件下水合物体系的相平衡温度. 图 4 给出了利用该系统所测得的甲烷在纯水中相图数据与其它文献及预测值<sup>[12]</sup> 的比较结果, 可以看出, 利用光透射比检测光纤传感

器可以准确地检测出水合物生成和分解状态变化.

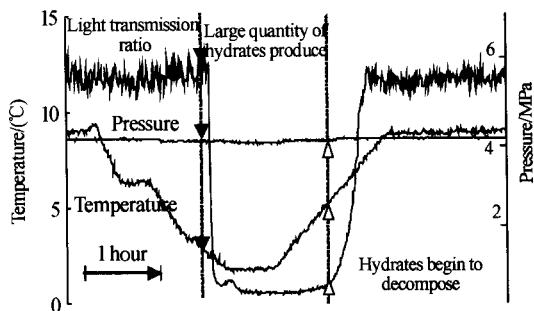


图 3 水合物状态变化过程中透射比曲线  
Fig. 3 Curve of transmission ratio during the state change of nature gas hydrates

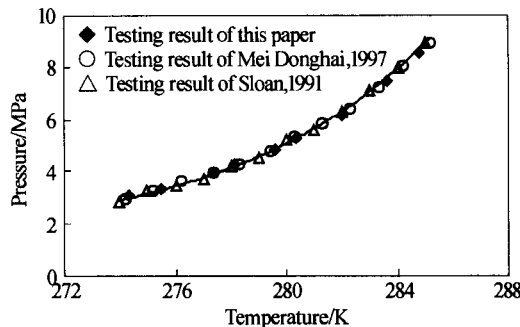


图 4 甲烷在纯水中相图  
Fig. 4 Phase diagram of methane in the pure water

### 4 结论

本光透射比光纤传感器有效地实现了高压平衡釜中天然气水合物状态变化过程与相变的量化连续测量与记录, 为模拟实验研究提供了可靠保证. 天然气水合物光透射比光纤传感器采用双光路结构, 在测量透射光强的同时, 测量参考光强以补偿光源的波动, 另外在光电转换电路均采用双探测器结构以消除光电探测器暗电流的影响, 减小了测量误差, 提高了测量准确度. 利用水合物状态变化(相变)时所检测到透射比变化数据可准确获得天然气水合物相图.

#### 参考文献

- 1 Nesterov A N, Feklistov V V. A setup for light scattering studies of gas-hydrate formation kinetics. *Instruments and Experimental Techniques*, 1999, **42**(2): 265~269
- 2 Prokhorov Y A. A laboratory setup for obtaining Gas hydrates and studying their optical and thermodynamic properties. *Instruments and Experimental Techniques*, 1997, **40**(6): 864~864
- 3 Okuda Y. Introduction to exploration research on gas hydrates in japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 1998, **49**(10): 494~500
- 4 刘惊惊, 殷宗敏, 郭晓金. 一种新型光纤振动传感器. *光子学报*, 2003, **32**(3): 304~306

Liu J J, Yin Z M, Guo X J. *Acta Photonica Sinica*, 2003,

- 32(3):304~306
- 5 佟成国,杨军,刘志海,等. 双弹簧管光纤差压传感器. 光子学报,2004,33(10):1172~1175  
Tong C G, Yang J, Liu Z H, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(10):1172~1175
- 6 邸岳森,肖悦娱,何赛灵. 新颖的微弯结构 Mach-Zehnder 干涉仪型传感器及其优化设计. 光子学报, 2005,34(1):69~72  
Di Y M, Xiao Y Y, He S L. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(1):69~72
- 7 陶发,王惠南. 一种新型 GRIN 透镜光纤加速度计的研究. 光子学报,2005,34(7):1057~1061  
Tao F, Wang H N. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(7):1057~1061
- 8 青岛建成天然气水合物模拟实验室. 化工学报,2002,53(1):65~65  
*Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2002, 53(1):65~65
- 9 汤紫峰,李代生,齐勇,等. 一种光纤位移传感器中的参考光纤. 光子学报,2002,31(022):165~168  
Tang Z F, Li D S, Qi Y. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(022):165~168
- 10 刘迎春,叶湘滨. 传感器原理(第3版). 长沙:国防科技大学出版社,1997. 204~207  
Liu Y C, Ye X B. *Fundamental of sensors and transducers (3rd)*. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1997. 204~207
- 11 业渝光,张剑,刁少波,等. 海洋天然气水合物模拟实验技术. 海洋地质与第四纪地质,2003, 23(1):119~123  
Ye Y G, Zhang J, Diao S B, *et al.* *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(1):119~123
- 12 梅东海,廖健,王璐琨,等. 气体水合物平衡生成条件的测定及预测. 高校化学工程学报,1997, 11(3):225~230  
Mei D H, Liao J, Wang L K, *et al.* *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 1997, 11(3):225~230

## Optical Fiber Sensor for the Measurement of Marine Natural Gas Hydrates Phase Change

Chen Wenjian, Chi Zeying, Li Wusen

*School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094*

Received date:2005-04-25

**Abstract** An optical fiber sensor used in the simulating experiment of marine natural gas hydrates to measure the phase change of marine natural gas hydrates was introduced. The intensity change of transmission light during hydrates states change was measured by the sensor to determine the phase change. Dual optical path construction was employed in the optical fiber sensor in order that a high measuring precision would be obtained. The light intensity of reference beam was measured to compensate the fluctuation of light source while the intensity of transmission light was measured simultaneously. Besides, dual detectors were used in each photoelectric transfer circuit to eliminate the influence of dark current of the photodetector.

**Keywords** Optical fiber sensor; Gas hydrates; Phase change; Transmittance



**Chen Wenjian** was born in October, 1965, Jiangsu Province. He received the B. S. degree in Optical Instrument, M. S. degree in Military Optics and Ph. D. degree in Optical Engineering from Nanjing University of Science and Technology (NJUST) in 1987, 1990 and 1998 respectively. Now he is an associate professor in NJUST. His research interests are the fields of optical fiber sensor, photoelectrical system and optical system design.