

文章编号: 0253-2239(2004)08-1107-4

注汽油井蒸气汽液比的折射率法测量研究

梁 培 余建军 朱桂荣 沈 阳 李信江 钱 霖 邹丽新
(苏州大学现代光学技术研究所, 苏州 215006)

摘要: 给油田的油井中注入高温高压蒸气时,从井口到井底连续地查明汽液比对节省能源和提高产出率意义重大。由于干蒸气和水的折射率不同,汽液的比例可以从汽液两相流的折射率响应特性反映出来。研制的测量装置采用蓝宝石作为折射率敏感的探测头,直接对汽液两相流的比例变化产生响应,能够应用于高温高压及狭窄工作空间的输汽环境中。装置在锅炉输汽管道中的实测响应曲线反映了输汽过程中汽液比的真实变化。该装置还在井深 800 m,井口蒸气温度 270 °C、压力 10 Mpa 的油田注汽井中进行测量,测得的结果对注汽法采油的井况分析具有一定的作用。

关键词: 光学测量; 折射率响应; 高温高压; 汽液两相流; 汽液比例
中图分类号: O439 文献标识码: A

Vapor-to-Water Ratio Measurement in Steam Injection Oil Well by Refractive Index Method

Liang Pei Yu Jianjun Zhu Guirong Shen Yang Li Xinjiang Qian Lin Zou Lixin
(*Institute of Modern Optical Technology, Suzhou University, Suzhou 215006*)
(Received 4 June 2003; revised 29 September 2003)

Abstract: During injecting high temperature and pressure steam into an oil well, it is important to economize energy and raise yield if the vapor-to-water ratio continuously from the mouth to the bottom of the oil well is known. Because the vapor and water have different refractive indexes, the vapor-to-water ratio can be deduced from the response characteristic of refractive index of two-phase flow. The developed device, which adopts sapphire as the probe, can respond to the change of vapor-to-water ratio directly, and can be used in small working space in the steam with high temperature and pressure. The response curve gained by the test in a boiler pipe is accordant with the real situation of vapor-water ratio of the steam transportation. The device also works in a steam injection oil well with depth of 800 m, temperature of 270 °C and pressure of 10 MPa at well mouth. The experimental result is helpful to analyze the information of steam injection well of oilfield.

Key words: optical measurement; response of refractive index; high temperature and high pressure; vapor-water two-phase flow; vapor-water ratio

1 引 言

我国的稠油矿藏分布广泛,粘度高,流动阻力大,注汽热采是稠油开采的主要方法。为了安全、经济、合理地注汽,需要对注入蒸气中的汽液比进行测量。汽液两相流的流型复杂性和相互之间的相变,

给测量带来了很大的困难^[1]。目前两相流中汽、液相比比例测量的努力多集中在热力学节流和取样分流技术上^[2,3],存在对流动干扰大和量程范围有限的问题。利用汽、液在一定的温度和压力下具有不同折射率的特点,光学传感技术能够直接响应于两相流中的汽液比。这种方法对流动干扰小,适应于高温高压和空间狭小的井下环境。如果通过温度和压力的测量,知道了汽、液的密度值后,还可以根据折射率的响应计算出干蒸气的质量比即干度值。

E-mail: liangpei116@sohu.com

收稿日期:2003-06-04;收到修改稿日期:2003-09-29

2 原 理

汽液双相流中,干蒸气和饱和水由于状态不同,具有不同的光学折射率。图 1 是折射率法测量的原理图。一个光学探测头放置于两相流中,和流体接触的面积为 S 。以 S 为界面,设右面是折射率为 n_1 的探测头,左面是待测的流体。图中的圆柱体表示在采样时间 Δt 内有 L 长的一段流体流经 s 面。设在 t 的一瞬间,探测的面积 S 上,干蒸气所占的面积为 S_g ,则水分的面积为 $S-S_g$ 。在 S 上取小面元 ds ,光线的入射角为 i_1 ,折射角为 i_2 ,那么 ds 上的反射率根据菲涅耳公式可以表示为

$$R_{ds} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i_1 - i_2)}{\sin^2(i_1 + i_2)} + \frac{\tan^2(i_1 - i_2)}{\tan^2(i_1 + i_2)} \right], \quad (1)$$

其中

$$i_2 = \arcsin(n_1 \sin i_1 / n_2), \quad (2)$$

(2) 式中的 n_1 是入射方即探头材料的折射率; n_2 是出射方即流体的折射率。因为 ds 可以取得足够小,所以可认为接触到的是单纯干蒸气或水分。当 ds 接触到的是干蒸气时, $n_2 = n_g$, n_g 为干蒸气 t 时刻状态下的折射率,根据(1)式和(2)式可以计算出干蒸气的反射率 $R_{ds}(g)$;当 ds 外面是水分时, $n_2 = n_w$, n_w 是水分 t 时刻状态下的折射率,计算出的是水分的反射率 $R_{ds}(w)$ 。 t 时刻面积 S 上的平均反射率 R_t :

$$R_t = \frac{1}{S} \left[\int_{S_g} R_{ds}(g) ds + \int_{S-S_g} R_{ds}(w) ds \right], \quad (3)$$

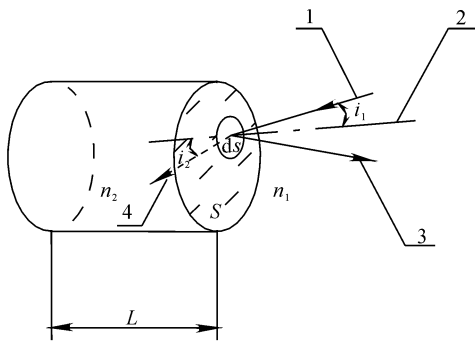


Fig. 1 The principle scheme of characteristic research on refractive index response of steam-water two-phase flow. 1: incident ray, 2: normal to ds , 3: reflecting ray, 4: refracted ray, i_1 : incident angle, i_2 : refraction angle

(3)式中的 $R_{ds}(g)$ 和 $R_{ds}(w)$ 不仅表达式复杂,而且并不确切知道某一时刻 S 面上干蒸气和水分的分布,从而也就无法根据入射角度进行反射率的计

算。如果认为入射角 i 在整个探测面上接近于零,可以采用垂直入射时的简化公式。垂直入射时干蒸气的反射率为

$$R(g) = \left(\frac{n_g - n_1}{n_g + n_1} \right)^2, \quad (4)$$

水分的反射率为

$$R(w) = \left(\frac{n_w - n_1}{n_w + n_1} \right)^2, \quad (5)$$

t 时刻 S 上的平均反射率 R_t 可以写为

$$R_t = \frac{1}{S} [R(g) \cdot S_g + R(w) \cdot (S - S_g)], \quad (6)$$

由于采样时间 Δt 可以取得很短,可以认为 Δt 内流经探头上的汽、水比例恒定,则采样时间内的反射率 $R_{\Delta t}$ 具有体积平均的意义:

$$R_{\Delta t} = \frac{V_g}{V} \cdot R(g) + \left(1 - \frac{V_g}{V} \right) \cdot R(w), \quad (7)$$

(7) 式中, V 为 Δt 内流经探头的流体的体积, V_g 为干蒸气占有的体积。设 $\nu = V_g/V$, 为汽所占的体积比,(7) 式写为

$$R_{\Delta t} = \nu \cdot R(g) + (1 - \nu) \cdot R(w), \quad (8)$$

采样时间 Δt 内,测量装置对汽液两相流的折射率响应为

$$E_{\Delta t} = K \cdot I \cdot R_{\Delta t}, \quad (9)$$

(9) 式中的 K 是比例系数, I 是入射的光强。从(8)式和(9)式仍然无法确定 ν 。考虑一种已知折射率的流体流过探头,其反射率 R_f 可以从垂直入射的简化公式计算出来,此时装置的折射率响应 E_f 为

$$E_f = K \cdot I \cdot R_f, \quad (10)$$

从(8)式、(9)式和(10)式得出两相流中汽所占的体积比 ν 为

$$\nu = aE_{\Delta t} - b, \quad (11)$$

(11) 式中的 $a = \frac{R_f/E_f}{R(g) - R(w)}$, $b = \frac{R(w)}{R(g) - R(w)}$,

折射率响应 $E_{\Delta t}$ 是测量值。(11) 显示了 ν 是两相流折射率响应的函数,利用 $E_{\Delta t}$ 可以表征出 ν 。如果在采样时间 Δt 内能够同时测出两相流的压力和温度,则可以计算出干蒸气和水 t 时刻的密度 ρ_g 和 ρ_w 。采样时间 Δt 内湿蒸气的干度 $X_{\Delta t}$ 等于

$$X_{\Delta t} = \frac{\nu \cdot \rho_g}{\nu \cdot \rho_g + (1 - \nu) \rho_w}, \quad (12)$$

(12) 式中, ρ_g 是采样时间 Δt 内干蒸气的密度, ρ_w 是水分的密度。

从(11)式、(12)式看出,两相流的折射率响应与汽液的比例直接相关,是分析蒸气特性的重要参量。

3 实验装置及应用性能

图 2 为汽液比折射率法测量的实验装置示意图。采用蓝宝石作为光学探测头，蓝宝石的前部和汽液相接触。蓝宝石强度大，耐高温。和非涅耳原理的其他应用^[4]不同，这里有用的是反射辐射。蓝宝石的光学折射率接近 1.77，给出了比较大的可测量范围。发光二极管(LED)发出的辐射经由传导光纤，耦合到蓝宝石上。光线在蓝宝石和汽液的界面上部分反射回来，经过另一根传导光纤耦合到接收用的光电二极管上。光电二极管的输出携带有界面外流体不同折射率的信息，经过放大、处理和数字化后储存。根据光电探测器的输出响应进行计算时，第二节计算中曾作过把所有的光线都近似为垂直入射的假设。将不同的人射角按照垂直入射处理时，产生的影响如图 3 所示。

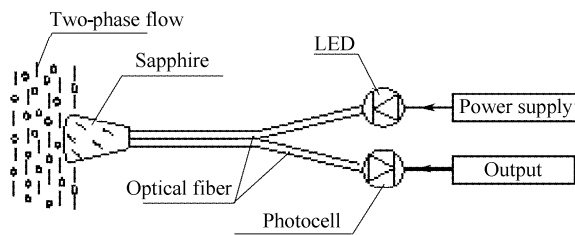


Fig. 2 The diagram of the experimental setup

图 3 中，以小方块表示的曲线是当蓝宝石界面外为水 $n_2=1.3330$ 时，某一角度的入射用垂直代替

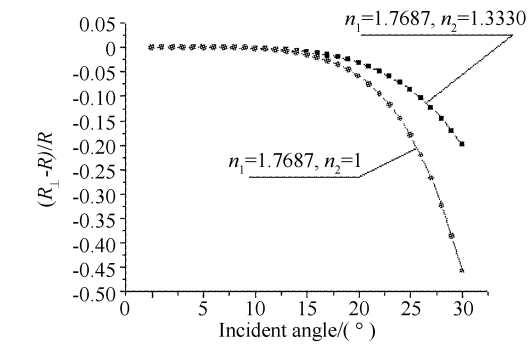
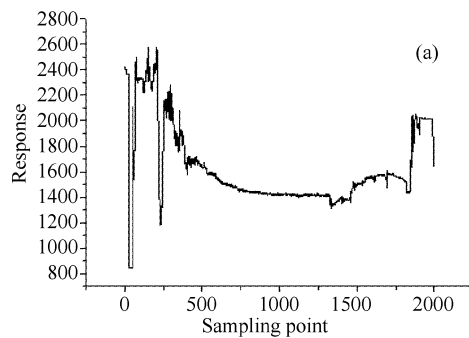


Fig. 3 Relative deviation taking place when R_{\perp} substitutes for R . R_{\perp} : The reflectance of perpendicular incidence,

R : reflectance of non-perpendicular incidence

时所具有的反射率相对误差。用圆点连接的曲线是折射率等于 1 的空气所产生的相对误差。可以看出，界面上折射率相差得越多，反射率的相对误差随入射角的增大发展得越快。汽液混合两相流的折射率介于水和气之间。为了尽可能地满足垂直入射的简化公式条件，可以将接触部分设计为球面，球心置于入射和返回光纤的中间。这样，投射到界面上光线的入射角都可以控制在一个较小的范围内。图 3 上显示了入射角 10° 以内的反射率相对误差很小，不会给近似计算造成太大的影响，这样分析的结果给装置的设计和应用带来了很大的方便。图 4 是锅炉输汽管道中的测量结果，采样点为 2000 个，采样时间每秒一个。

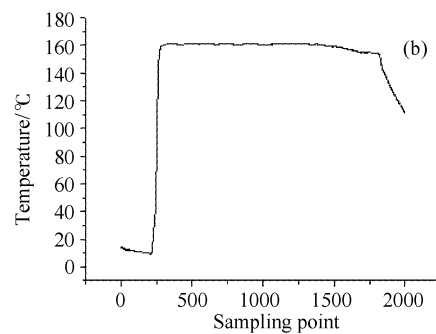


Fig. 4 Output of steam and water in a boiler tube. (a) The response curves on refractivity of two-phase flow, (b) the temperature curves of the two-phase flow corresponding to the response curves

图 4(a)是汽液两相流的折射率响应曲线，图 4(b)是相对应的流体温度曲线。图 4(a)对应于采样起始不久的深凹陷是试验装置未及进入蒸气管道时，先在常温常压下水对装置进行测试的结果，底部平坦，信号值约为 800 多。装置在采样点 250 左右移入输汽管道中，恢复送汽后仪器急剧升温，如图 4(b)所示。图 4(a)对应于送汽的反应是 250 点附近的不规则深凹陷。此时由于热惯性的原因，探测头基本上接触到的是水。对应于输汽管道关汽和装

置移出管道的变化，图 4(a)中 1800 点附近有一个平坦凹陷，之后，折射率响应急速上升，表示探测头恢复了和空气的接触。图 4(b)中，相对应采样点的温度也快速下降，但因为仪器的热容而不可能像图 4(a)的折射率那样急剧变化。在采样点 250 到 1800 之间，对应的是正常输汽过程中汽液两相流的折射率响应。刚开始，信号起伏大，中间的响应基本平稳，反映了输汽过程中汽、液的真实变化。

图 5 是油田注汽井的试验结果，包括了从井口

放入、到达井底部、然后再返回到井口的完整过程。每秒一个采样点,共采样 2000 个点。井口蒸气压力约为 10 MPa,温度 270 °C 左右,井深 800 m。把折射率响应曲线和温度曲线联系起来可以清晰地分析出试验的整个过程。和图 4 的锅炉管道相类似,采样开始时大的抖动对应的是刚放入井口,开始放汽的不稳定状况。之后在井筒里下降,呈现有规律的振荡。在第 600 个采样点附近折射率响应突然下降,进入了油层。由于油层对蒸气的强烈吸收,虽然温度未曾改变,但从响应曲线上可以看出信号变低,表示水的成分大为增加,注入蒸气的干度值降低了。采样点 750 附近的折射率响应到达最低点,试验装置在这前后经历了出油层、到达油井底部和重新上升再次进入油层的过程。采样点 1000 后由于离开油层进入了狭窄井筒的缘故,折射率响应急剧增大。1300 点后升至井口,关闭阀门,取出装置,此时的折射率信号值抖动很大。由于高温高压的输汽停止,仪器通过井口管道回到地面时,探测头蒙上了油污。从温度曲线看,输汽结束后的温度呈线性下降,比较

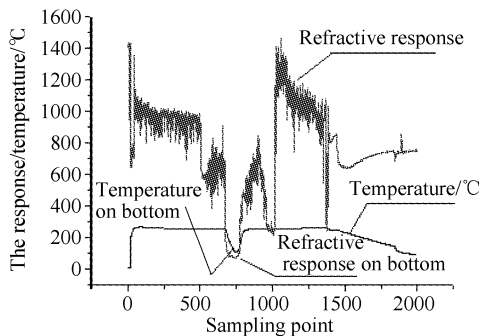


Fig. 5 Refractive index response of high pressure and high temperature steam in a steam-flooding oil well, from mouth to bottom of the oil well, then goes back to the top of the well

缓慢。停汽后仍然存在的高温,使得探测头通过井口时粘上的油污瞬间凝固,折射率信号稳定但偏小,回复不到起始空气的数值,好在这些数据已经对注汽井的性能分析不起作用。可以对探测头进行擦拭,使其恢复原来的响应。如果需要再次进入注汽井,则高温高压的蒸气会自行将探测头冲刷干净。

结束语 油田注汽井的汽、液比井下实际测量历来是一个难度相当大的课题。采用光学折射率调制的方法对汽液两相流的汽液比进行测量,具有灵敏度高,测量范围宽和对流动干扰小的特点。由于采样时间可以很短,有利于减小流层滑动产生的影响,能够适用于复杂的流型。研制的试验装置成功地获取了从井口到井底,然后再返回地面的完整两相流折射率响应曲线,对油田的注汽热采技术提供了有力的佐证,可以帮助分析井下吸汽剖面的真实情况,通过合理注汽提高产油率。

参 考 文 献

- 1 Fu Feng, Zhao Zaisan, Yu Hongling *et al.*. The study and development on steam quality measurement of steam-water two-phase flow. *Power Engineering* (动力工程), 1991, **11**(3): 51~59 (in Chinese)
- 2 Ye Qiang, Chen Tingkuan, Luo Yushan *et al.*. Measurement of two-phase flow quality based on Homogeneous and separated flow models. *Acta Metrologica Sinica* (计量学报), 2001, **22**(3): 215~218 (in Chinese)
- 3 Wang Dong, Lin Yi, Lin Zonghu *et al.*. A ESM Type gas-liquid two-phase flow meter with sampler tubes as distributor. *J. Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), **23**(2): 235~237 (in Chinese)
- 4 Li Hongjun, Lu Zhenwu, Liao Jianghong *et al.*. Effect of surface reflection on fresnel lens. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(9): 1134~1138 (in Chinese)