

带孔螺旋管的油水分离实验研究^{*}

周永 郑之初 张军 郭军 唐驰

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 为达到高效分离的目的,中科院力学所在“十五”期间,提出研制集重力、离心、膨胀等分离原理于一体的复合式分离器。带孔螺旋管是离心分离的主要部件。本文重点介绍带孔螺旋管油水分离的实验研究工作:对不同旋转半径和管直径的螺旋管,考察其在不同油水配比、不同流量、不同开孔数量及位置下油水分离的效率,为高效分离器关键部件的设计提供理论和实验依据。

关键词 油水分离,螺旋管,实验研究

1 前言

随着石油工业的发展,陆上油田油、气、水、砂分离技术和生产工艺日臻完善。但海洋石油的大规模开采,对油、气、水的多相分离技术又提出了新的挑战。这是因为海上油田油气水分离装置安装在生产平台上,要求三相分离器的结构简单、体积小、重量轻、分离效率高、处理量大、容易安装维护、安全可靠,以减少平台造价和维护费用。这些要求使分离器的研制成为海洋油气开采和输送中亟待解决的关键技术问题^[1,2]。

人们通常采用重力分离(利用各相密度不同产生的浮力)和离心分离(利用物质旋转运动产生的离心力)等原理来实现油、气、水三相介质分离。我们认为要实现海洋石油开采所要求的高效分离,各种分离原理综合使用,取长补短,是行之有效的方法^[3]。为此,我们提出了结合离心、重力、膨胀、振动多种分离原理于一体的高效分离器设计方案(见图1)。此分离器装置主体为一长方体封闭容器,隔板将容器分成两个腔室,用于处理不同比例的油水混合物。容器外环绕T形管装置,油气水混合物由主管入口进入T形管,气体首先经支管聚集到上层管道,并由气体喷嘴射入容器内。油水混合物则进入螺旋管离心分离,在螺旋管外壁适当部位开孔,将螺旋管外侧的水导出到容器中,并在腔室内重力沉降。

为了达到该分离器的性能指标,需要详细研究分离器各部件以及整体设备的分离效果。气液在T形管中的分离,我们早期曾有研究。而带孔螺旋管用于油水分离文献上尚无记载。因此,我们的研究重点放在带孔螺旋管的油水分离机理上,本文主要介绍带孔螺旋管的实验研究。

• 中国科学院与中国海洋石油总公司科技合作项目;中国科学院“十五”重大项目(KJ CX2-SW-L03)

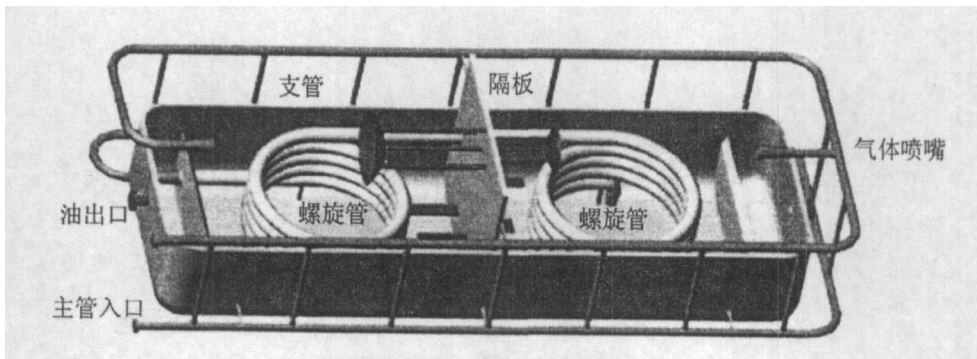


图1 分离器模型

2 实验系统

带孔螺旋管实验的实验系统布置一般如图2所示,实验室照片见图3。储油罐和储水罐中分别存放实验用的白油和自来水,采用潜水泵将油和水通过自行设计的油水射流混合器混合。水中掺入了高锰酸钾,由于无色半透明的白油微溶于水,因此可以观察白油和水的混合与分离。

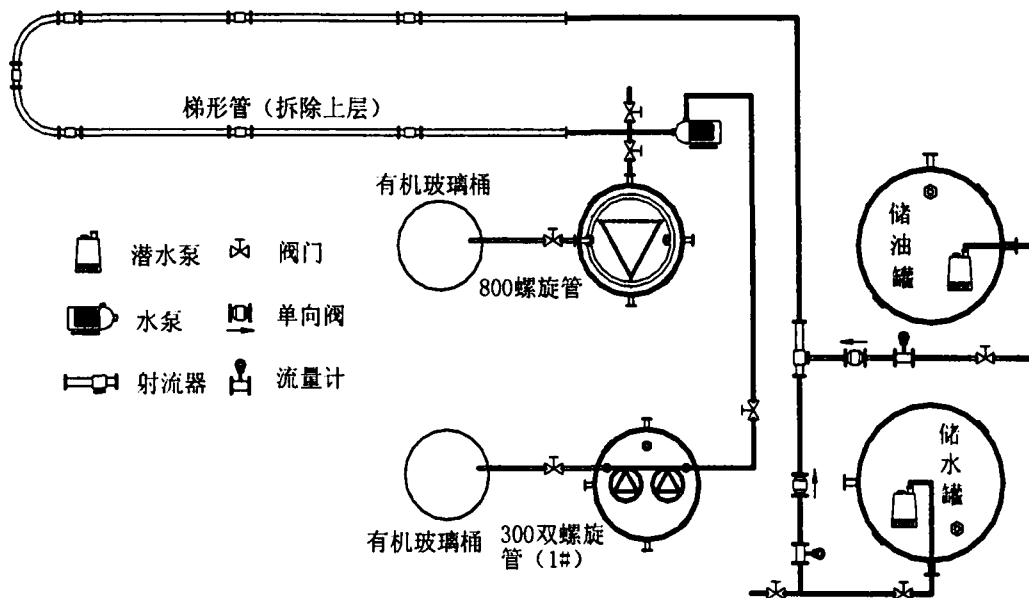


图2 螺旋管油水分离实验系统

油水混合物经过 T 形管后进入带孔螺旋管中离心分离, T 形管是气液预分的关键部件。本文实验中仅为了研究油水分离, 因此拆除 T 形管上层, 作为直管使用, 在管道上设置了有机玻璃管用于观察直管中的油水分层状况。



图 3 螺旋管实验布置

螺旋管外侧孔中射流出的液体留在螺旋管容器中(见图 4), 剩余的混合液则流入有机玻璃筒中。对螺旋管每圈单孔及出口取样, 可以分析螺旋管上孔射流的变化规律; 还可以直观测定容器中混合液的含水率, 考察螺旋管的分离效率。

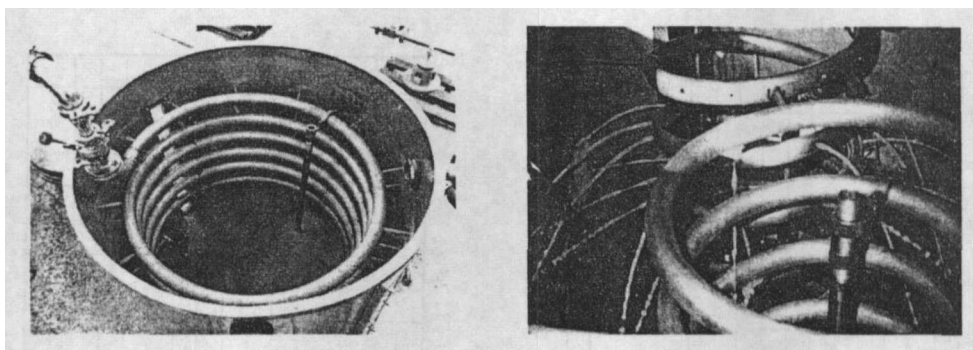


图 4 螺旋管中流动状况

实验设备主管直径 50mm, 管长 15m, 管内混合液最大流速可达 2m/s。实验室准备了燕昌 LP-14、LP-15、PS 三种矿物油, 还从渤海 3-61 油田取得原油样品。本文实验中使用了 LP-14 白油和 PS 白油, 物性参数见表 1。我们使用旋转黏度计自测了白油的黏温曲线, (见图 5)。

表 1 白油物性数据

型号	运动粘度 (mm^2/s)		闪点 ($^{\circ}C$)	凝固点 ($^{\circ}C$)	比色 赛波特	密度 ($20^{\circ}C$) (g/cm^3)	KOH 酸值 mg/g
	37.8 $^{\circ}C$	98.9 $^{\circ}C$					
PS	32~84		-	-	≤ -12	$\geq +30$	0.8532~0.8830
LP-14	14~17		3~5	>160	≤ -12	+26	0.8266~0.8467

注：表中数据为厂方资料。

3 影响带孔螺旋管分离的因素

带孔螺旋管是油水分离的重要部件,影响其分离效率的因素多而且复杂,需要确定的结构参数和流动参数众多。

影响油水分离的流动主要参数如下:

β ——含水率,实验中采用体积含率;

u ——混合物流速,试验中油水混合均匀, m/s ;

μ_o, μ_w ——油、水粘度, $kg/(m \cdot s)$;

ρ_o, ρ_w ——油、水密度, kg/m^3 。

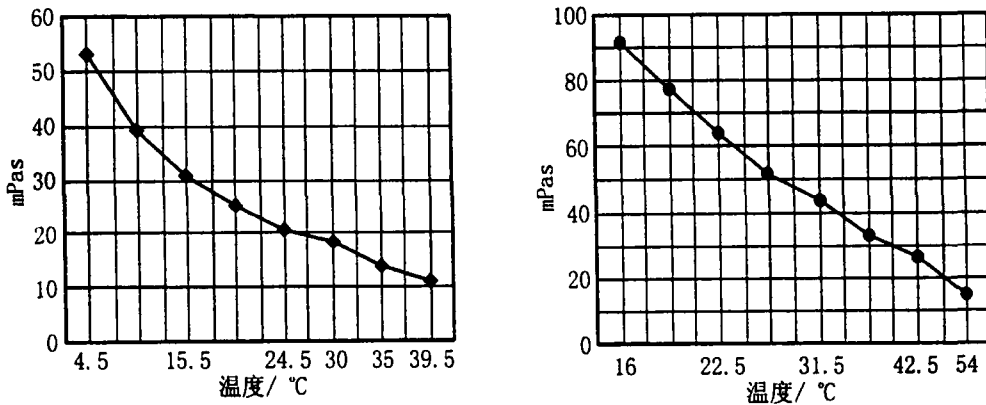


图 5 LP-14 白油(左)和 PS 白油(右)的粘温曲线

影响螺旋管油水分离的结构参数主要为:旋转半径 R 、管径 D 、管长 L ;而对于带孔螺旋管,要增加开孔参数如:孔径的大小、位置数量、方向和形状等。

一般说来,对于确定的流动参数 β, u, μ 和 ρ , 我们希望在开孔处将外侧的水射出去以前,

管道中油水分离比较充分。通常假定油在水中以油滴的形式存在,且分离速度很慢,根据液滴模型公式,油滴在水中上浮速度为^[4]

$$v = \frac{(\rho_w - \rho_o)d^2 a}{18\mu_w} \quad (1)$$

式中: d ——油滴平均直径, m ;

a ——油滴受到的合力加速度的大小, m/s^2 。

由于离心加速度大小为 $\frac{u^2}{R}$,方向垂直于重力加速度, $a = \sqrt{g^2 + \frac{u^4}{R^2}}$ 。假定分离所需要的时间 $\frac{D}{v}$ 。在不考虑湍流脉动影响分离的前提下,完成分离所需要的管道长度则至少为

$$L = u \frac{D}{v} = \frac{18\mu_w}{(\rho_w - \rho_o)d^2 \sqrt{g^2 + \frac{u^4}{R^2}}} \quad (2)$$

为了利用离心力促进分离,我们希望离心力可以比较大。因此,忽略重力加速度 g 对加速度 a 的贡献。上式简化为

$$L = \frac{18D\mu_w R}{(\rho_w - \rho_o)d^2} = \frac{18\mu_w}{(\rho_w - \rho_o)d^2 u} RD \quad (3)$$

螺旋管的圈数则为

$$n = \frac{L}{2\pi R} = \frac{9\mu_w D}{\pi(\rho_w - \rho_o)d^2 u} \quad (4)$$

根据实验室内条件,上式中流动参数数值大致为: μ_w —— $10^{-3} kg/(m \cdot s)$; ρ_w —— $1\ 000 kg/m^3$; ρ_o —— $800 kg/m^3$; d —— $10^{-3} \sim 10^{-4} m$; u —— $3m/s$ 以下。

因为在油水混合物中往往有各种尺度的油滴存在。因此对两种直径螺旋管,按照不同的 d 计算需要的螺旋圈数 n ,结果见表2。根据以上计算结果,结合实验需要和加工工艺限制,我们设计加工的两套螺旋管尺寸见表3。分析可知,设计的D25管可以满足 $0.1mm$ 以上油滴的充分分离;D40管也至少可以满足 $0.2mm$ 以上油滴的分离。

表 2 不同油滴直径需要的螺旋圈数

管径 <i>mm</i>	不同 <i>d (mm)</i> 下的 <i>n</i> 值			
	0.1	0.2	0.5	1.0
40	19.1	4.8	0.8	0.2
25	11.9	3.0	0.5	0.1

表 3 螺旋管的结构尺寸

(单位: *mm*)

螺旋管	旋转半径 <i>R</i>	管径 <i>D</i>	螺距 <i>T</i>	螺旋圈数 <i>n</i>	总高度 <i>H</i>
D40 管	400	40	100	6	600
D25 管	150	25	100	12	600

不难估算,管内流速为 $2m/s$ 时, D40 管可产生约 $1g$ (1 倍重力加速度) 的离心加速度; 等同流量下, D25 管可产生约 $17g$ 的离心加速度。当然, 实验中证明, D25 管内流速一般在 $4m/s$ 内; 因此其离心加速度最大约 $10g$ 。

假设油水混合物在管中分离完成, 外侧的水通过开孔引出螺旋管。由于离心力使得油水界面偏转 θ , 可根据 θ 确定开孔的最佳位置(如图 6)。孔的大小和数量选择的原则是: 其 1, 降低管内油流动的影响; 其 2, 导出尽可能多的水, 相关的计算涉及因素众多, 将是进一步研究的内容。由于初步工作探索油水两相流动在螺旋管中的分离, 我们选择了外侧正中这样的开孔方式。

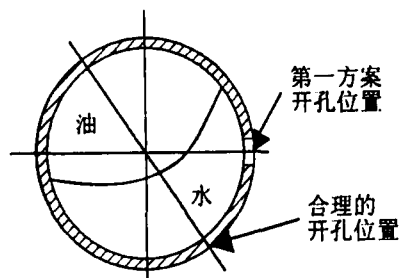


图 6 管壁开孔位置示意图

4 实验结果分析

实验中各参数的实际变化范围如表 3 所示

表 4 实验中参数的变化范围

实验用油	螺旋管	入口流速(m/s)	入口含水率
PS	D25	0.60~3.42	0.147~0.726
PS	D40	0.64~1.48	0.162~0.795
LP-14	D25	0.92~3.91	0.283~0.889
LP-14	D40	0.76~1.59	0.636~0.738

带孔螺旋管中混合液受到重力和离心力共同作用而分离。除了分离速度和分离时间影响分离效果外,其他因素,如混合液的湍流作用,开孔的位置、大小等也会影响分离效率。实验中很难找出一个确切的关键因素。通常我们用 Re 数来表征液体流态,因此本文采用 Re 作为一个参量来描述实验结果。

$$Re = \frac{uD\rho}{\mu} \quad (5)$$

其中 u 、 ρ 、 μ 为混合物的速度、密度、黏性系数。

$$\rho = \beta\rho_w + (1 - \beta)\rho_o \quad (6)$$

$$\mu = \gamma\mu_w + (1 - \gamma)\mu_o \quad (7)$$

γ 为混合液中水的质量含率。

$$\gamma = \frac{\beta\rho_w}{\rho} \quad (8)$$

经过几圈离心分离后,外侧含水率较高,现在已制造的螺旋管在外侧正中开孔,将孔附近的混合液导出,得到的第一个孔中射流混合液的含水率为 β_1 。下面用第一孔含水率增加比 $\frac{\beta_1 - \beta}{\beta}$ 作为衡量分离器分离效率的间接指标。不同螺旋管、不同油品条件下分离效率与 Re 的关系如图 7 所示。

由于 LP-14 白油的粘性系数比 PS 白油小,混合液的 Re 数相对较大。实验结果显示,

LP-14 白油的实验点基本上在 PS 白油实验点的右侧。

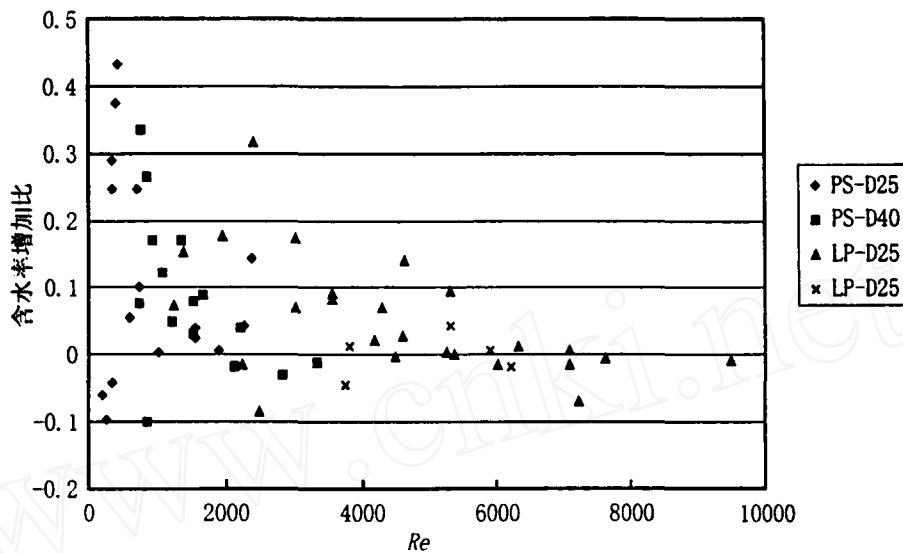


图 7 分离效率与 Re 的实验点

Re 增大的同时,管道内的湍流作用也会加剧。随着 Re 数的增大,分离效率总体呈下降趋势,表明湍流脉动对分离会造成一定的影响。结果显示,PS 白油中油水分离的效果略好于 LP-14 白油。

由图中可以看出,对于同一种实验用油,D25 管比 D40 管的分离效果更明显一些,这是由以下三点原因造成的:① D25 管的管径小,旋转半径也小,在相同 Re 数情况下,可以产生的离心加速度较大,对于促进分离有利;② 根据表 2 计算的结果,现有的 D25 管更能满足充分分离的要求;③ 由于离心力较大,按照图 5 可以分析出,对于“外侧正中”这种开孔方式,D25 管具有较好的分离效果。

带孔螺旋管是高效分离器的主要部件,出口及孔射流的产液性质直接反映分离效率。我们制作的两种螺旋管,在出口附近三圈的管壁外侧正中开孔。D40 管每圈 12 孔,孔径 $5mm$; D25 管每圈 11 孔,孔径由下至上为 $3mm$ 、 $4mm$ 、 $5mm$ 。我们对每排孔及出口取样,测定产液的含水率和流量。有代表性的几个实验结果如表 4 所示。分析可知,现已制造的螺旋管分离器有一定的分离效果,但由于开孔方向不太合理,孔的数量太多而且孔径太大,导致大量的油随水一起从孔中流出,有时甚至在出口没有混合液流出。因此,新设计的螺旋管将根据实验和计算提供的参数重新修正开孔方式。

表 5 带孔螺旋管各孔取样结果(PS 白油)

实验日期	螺旋管	白油	入口 含水率	低孔 含水率	中孔 含水率	高孔 含水率	出口 含水率
2004-05-13	D40	PS	0.513	0.601	0.646	0.311	0.877
2004-04-22	D25	PS	0.401	0.500	0.440	0.250	—
2004-04-01	D25	LP-14	0.761	0.765	0.765	0.759	0.431
2004-03-23	D40	LP-14	0.644	0.649	0.637	0.676	0.642

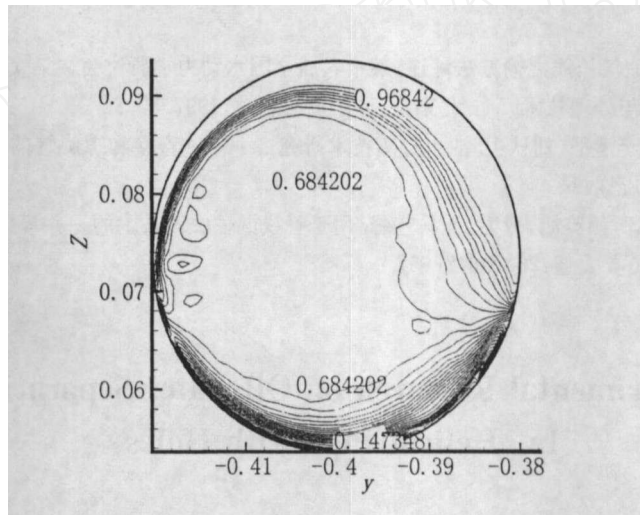


图 8 $d = 2mm$, 第一圈末截面上油的体积组分

5 结论与展望

通过对带孔螺旋管油水分离机理的实验研究,我们得到很多有益的结论。

(1) 螺旋管分离器作为新型的离心分离部件,在适当选择旋转半径、管径,掌握好开孔位置及孔径大小会有很好的分离效果。

(2) 在忽略湍流和液滴碰撞前提下,使用油滴模型推算了螺旋管的设计圈数 n 。实验结果显示,油水混合物经螺旋管离心分离后产生明显的分层。表明这种方法和模型基本上是可靠的。

(3) 湍流脉动对于油水分离会产生负面影响,但并不一定为主要的因素。由于影响带孔螺旋管分离的因素众多,因此必须通过更多实验探索其规律。

(4) 为与实验结果比较,我们使用 *Fluent* 软件进行了一些相关的数值模拟计算^[5]。数值模拟可以方便地给出管中的流场和压力场以及油或者水的体积组分分布。图 8 为 $D40$ 管,设定分散相平均粒径 $d = 2mm$,分离一圈后得管内的油的体积组分分布图。得到的分布对于我们选择合适的开孔方向有直接的指导意义。

(5) 通过数值模拟得到的结果,选择适当的计算模型,可以推算出开孔螺旋管孔中射流的含水率及流量。数值模拟和实验结果的比较可减少实验的工作量,为带孔螺旋管部件的定型提供依据。

参 考 文 献

- 1 郑之初,周永,郭军,张军. 海上油气混输中的分离技术. 见:第十七届水动力学研讨会论文集[C]. 香港: 2004, 830-837.
- 2 郑之初,赖英旭. 海上油气长线混输方法评述. 第十六届全国水动力学研讨会文集[C]. 澳门: 2002. 11.
- 3 苗承武. 高效油气集输与处理技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1997. 57-80.
- 4 周永,吴应湘,郑之初,李清平,刘秋生. 油水分离技术研究之一——直管和螺旋管的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, Ser. A, 已收录.
- 5 郑之初,吴应湘,李东辉,赖英旭,劳力云,马艺馨. 用于管线混输关键技术的一些模拟试验. 中国计量测试学会第七届学术会议[C]. 大连: 2002. 647-657.

Experimental Research on Oil-water Separation in Helical Pipe with Holes

Zhou Yong Zheng Zhi-chu Zhang Jun
Guo Jun Tang Chi
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100080, China)

Abstract: A combined separator based on the theory of gravity, centrifugation and expansion separation is developed at institute of mechanics during the period of the tenth five-year plan to obtain high-efficiency separation. Helical pipe with holes is the mainpart. Some experimental research work on helical pipe is introduced. The research work offers instructive theory for the development of the high-efficiency separator.

Key words: oil-water separation, helical pipe, experimental research