

# 旋转圆环流动在测量石油流变特性中的应用\*

钱民全 彭荣蕤 赵笃凤 钱大兴 范 椿

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

张劲军 张 帆

(石油大学石油工程系油气储运研究所 北京 102200)

肖 兰

(北京市第五十六中学 北京 100044)

**摘 要** 本文介绍了测量石油流变特性的已有的两种圆环流动装置: 环管循环流动观测装置和转轮流动模拟器。在仔细分析了圆环内的流动状态以后, 制作了简易垂直旋转圆环流动改进测量装置, 对水进行了初步观测, 得到了圆环管壁上的压力—时间变化曲线, 经分析后认为改进测量装置在测量石油流变特性是可行的。提出两种途径改进已有装置的不足, 使测量更精确, 为制造大型实用的旋转圆环流动测量装置打下了良好的基础。

**关键词** 旋转圆环流动, 测量石油流变特性。

## 1 引言

21 世纪伊始, 以西气东运为序幕, 掀起了西部大开发的高潮。西气东运是在发现西部气田储量足以开发许多年以后, 技术条件和国家经济条件得以保证的情况下进行的。多年来, 有关单位也正为西油东运在作准备, 其中之一就是必须了解石油在输运过程中的流变特性。我们在已有的两种圆环流动装置的基础上, 仔细分析圆环内的流动状态以后, 制作了垂直旋转圆环流动的简易改进测量装置, 并应用此装置对水进行了初步观测, 得到了圆环管壁上的压力—时间变化曲线。经分析后认为改进测量装置在测量石油的流变特性是可行的。我们提出两种途径改进已有装置的不足, 使测量更准确, 为制造大型实用的旋转圆环流动测量装置打下了良好的基础。希望我们的工作能为西油东运作技术储备, 请人家提出宝贵意见, 共同为石油的长距离输运作出贡献。

\* 国家自然科学基金资助项目 (199772061)

## 2 两种圆环流动装置介绍

近年来，人们利用石油在圆环中的流动来测量其流变特性。

### 2.1 环管循环流动观测装置<sup>[1]</sup>

环管循环流动观测装置（图 1）是石油管道研究院 1998 年研制的。在水平圆环管道内安装一个驱动塞，通过环管外的磁铁带动管内的驱动塞，使流体在管内循环流动。整个环管置于控温的水槽内，并通过安装在管壁上的传感器来获取温度和不同驱动速度下压力随时间变化的数据，确定流体的流变参数。

### 2.2 转轮流动模拟器<sup>[2]</sup>

转轮流动模拟器（图 2）是大庆油田建设设计研究院在 1998 年从挪威 Petreco 公司引进的。该装置由轮形钢管、转轮驱动单元、控制室、控温测试室、加热制冷系统等组成。转轮垂直安装，在转轮转动过程中，轮管内的流体可在重力的作用下仍留在底部。由于轮管内壁和液体之间存在摩擦力，轮内液体的重心偏向转轮转动方向，当轮内液体偏心达到一定程度时，重力和摩擦力达到平衡。为维持转轮的转速恒定，需要外界提供给转轮一定的扭矩来平衡轮内液体与轮管内壁间摩擦力产生的摩擦扭矩。通过测定摩擦扭矩，计算出轮内液体相对流动摩擦因子，再根据摩擦因子计算出流动时的原油表观粘度。

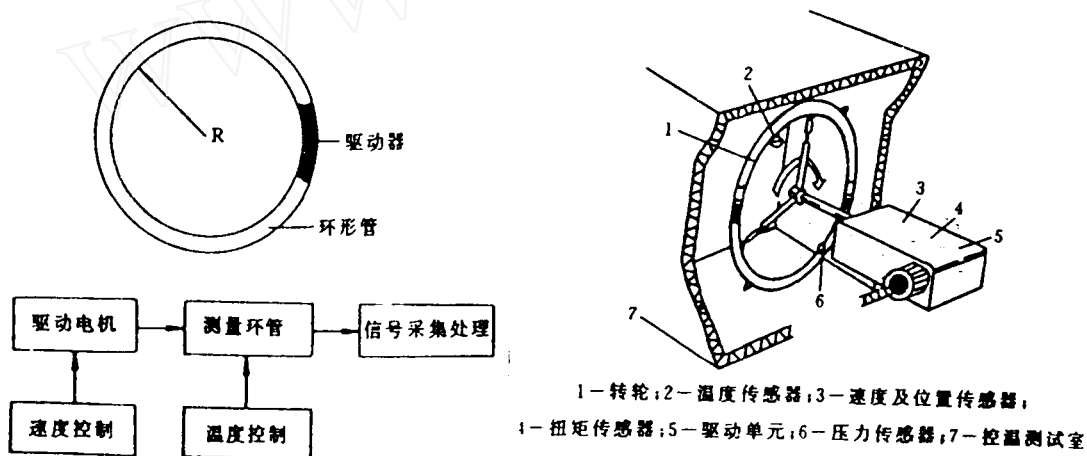


图 1 环管系统示意图及工作原理框图

图 2 转轮流动模拟器示意图

## 3 新型竖直旋转圆环流动测量改进装置<sup>[3]</sup>

上述两种不同的圆环管道流变测量装置是一种创新，但各自也有其不足：

第一种环管，若驱动塞太大，则容易磨损；太小，则管道与驱动塞的缝隙中会产生回流。

驱动塞的存在也影响流场的速度分布，这将对流变特性测定结果产生影响。用于驱动的强大磁场可能会对某些非牛顿流体的流变特性产生影响等等。

第二种环管，转轮转动后，流体会粘附在轮管内壁，而且流体的粘附量除了与转轮速度有关，还与流体粘度有关。这就使液体在圆环内的长度既湿周长度缩短了不少，致使计算摩擦阻力产生很大误差。可惜这种装置没有把这一不足加以克服（因为装置管壁的不透明性——即使管壁透明，石油粘附管壁后也使湿周长度不可见），这样对测量石油流变特性会产生很大误差。

中国科学院力学研究所自 1976 年以来，利用旋转圆环研究体外血栓的形成，对圆环内的流动状态进行了多方面的实验研究和理论分析<sup>[17-20]</sup>，也对流变方面进行过深入研究<sup>[17-20]</sup>；石油大学对石油进行了多方面的研究，对其流变特性十分了解<sup>[29-35]</sup>。为了仔细地、深入地研究石油的流变特性，我们将长期协作，制作大型旋转圆环流动装置并用来进行测量。半年来，我们制作了垂直旋转圆环流动简易测量装置（见图 3 和图 4），经过测量和分析后，提出新的方案来提高测量精度。

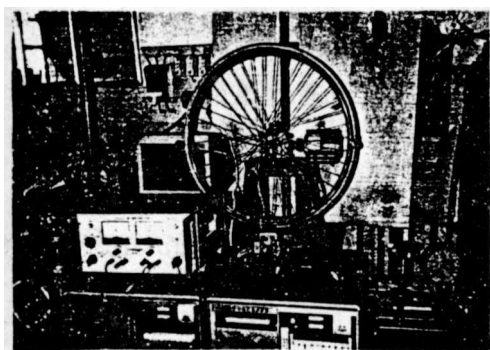


图 3 垂直旋转圆环流动简易测量装置

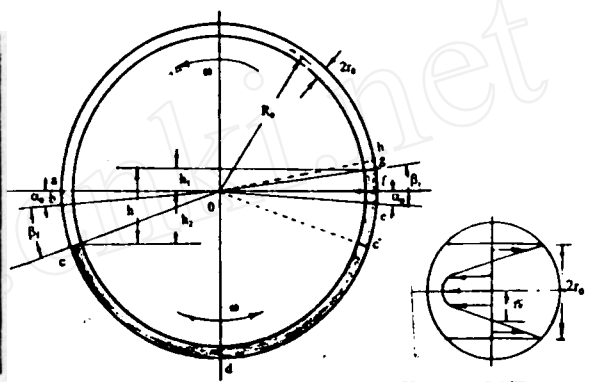


图 4 装置几何尺寸及其特点

### 3.1 旋转圆环内流动分析

因圆管半径  $r_0$  和圆环半径  $R_0$  之比  $r_0/R_0 \ll 1$ ，可以不考虑由于弯管引起的二次流作用。这样可以把圆环内的流动近似地看成直管内的一个均匀平动运动和一个反方向的 Poiseuille 流动的迭加：

$$u(r) = u_{\max} - U_{\max} \left( 1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right)$$

且  $U_{\max} = 2u_{\max}$ ，则

$$u(r) = u_{\max} \left( \frac{2r^2}{r_0^2} - 1 \right)$$

当  $r = r_0/\sqrt{2} = 0.707 r_0$ ，  $u = 0$ ；

当  $0 < r < r_0$ ，靠近圆环中心，  $u = u_{\max}(1 - r^2/r_0^2) < 0$ ；

当  $r_0 < r < r_0$ ，靠近圆环管壁，  $u = u_{\max}(1 - r^2/r_0^2) > 0$ ；

实际上  $u_{\max}$  是圆环的转动线速度。

$$u_{\max} = 2\pi R_0 \omega_s = \frac{\pi R_0}{30} \omega_m$$

其中 $\omega_s$ 和 $\omega_m$ 分别为圆环每秒钟和每分钟转的圈数。这样:

$$u(r) = \pi R_0 \frac{\omega_m}{30} \left( \frac{2r^2}{r_0^2} - 1 \right)$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \frac{2\pi R_0}{15r_0} \omega_m$$

圆环转动以后,前后自由液面产生高度差 $h$ ,它是驱动内部流动的动力。因管子内径 $d_0$ 足够大,可以不考虑两自由面产生的表面张力差。从几何学和动力学上考虑各有:

$$h = h_1 + h_2 = R_0 \sin(\beta_r - \alpha_0) + R_0 \sin(\beta_f + \alpha_0)$$

### 3.2 简易圆环流动测量装置的初步观测

简易装置的几何尺寸:圆环直径 $D_0=2R_0=620\text{mm}$ ;  $d_0=2r_0=20\text{mm}$ 。我们设想可以从安装在

$$h = \frac{4\mu\pi^2 R_0^2 \omega_m}{15\rho g r_0^2} \left( 1 - \frac{\beta_f - \beta_r + 2\alpha_0}{180} \right)$$

圆环管壁上的压力传感器得到压力—时间曲线,如图5所示。设想曲线上的 $a'b'c'd'e'f'g'h'$ 和图4中圆环上的特征点 $abcdefgh$ 是相对应的。

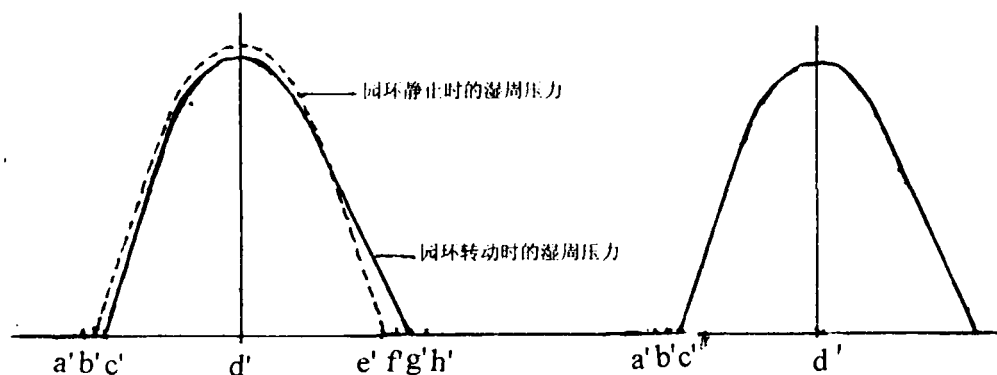


图5  $p-t$  设想示意图

那么实验结果是怎样呢?为此我们利用简易装置用水进行了初步观测。为了保证流动的层流性,使雷诺数

$$R_e = \frac{d_0 \rho u_{cp}}{\mu} = \frac{r_0 \rho u_{max}}{\mu} < 2300$$

其中  $u_{cp}$  为管流的平均速度，是最大速度  $u_{max}$  的一半。取圆环转速每分钟为  $\omega_m=7$ ，由电动机调速用高性能数字式变频器 (SANKEN 电气株式会社，型号 KF-75K-380) 调控。水粘度  $\mu=0.01$  泊，得  $R_e=2272$ 。实验时取  $\omega_m \leq 7$ 。

实验得到的压力  $p$  (纵坐标) 和时间  $t$  (横坐标) 的关系如图 6 所示。

由图 6 可以看出，对水来说要保证流动为层流状态，转速不能很大，由于最大压力点前后湿周长度的不对称性 ( $c'd' < d'g'$  或  $cd < dg$ ) 不明显，得到的前后自由面高度差  $h$  比较小，与从几何学上和动力学上计算得到的  $h$  是一致的。

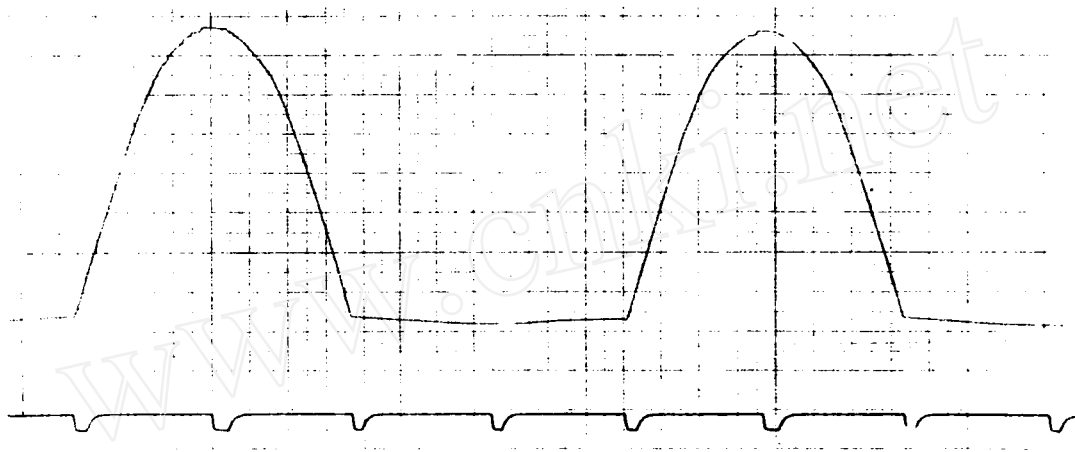


图 6  $p-t$  实测结果

### 3.3 改进圆环装置应用于测量石油流变特性的途径

我们可以证明，图 5 中和图 4 中的特征点相对应的推测是正确的。图 5 中  $d'$  是转动时的压力峰值点，它与圆环不转动时的静水压力峰值点是重合的； $c'$  和  $g'$  点是流体入水点和出水点的位置。

从我们对水进行过的观测可以看出，装置要应用于石油流变特性的测量有必要加以改进。一方面从装置本身加以改进，如尺寸加大、稳定运行状态等等；另一方面为制造大型实用的旋转圆环流动测量装置，我们从动力学测量上提出两种改进途径：

一是由计算机直接测量压力—时间关系，提高判别圆环上特征点位置的分辨率，从而提高测量石油流变特性的精度；

二是仍然利用测定摩擦扭矩，从压力—时间关系图中正确地确定湿周长度，从而提高测量石油流变特性的精度。

## 参 考 文 献

- 1 艾慕阳、王晓梅、孙盛. 一种环管循环流动观测装置. 油气储运. 1998, 17(9)32-34
- 2 林森、吴迪、孟祥春、孙春峰、何怀义. 转轮流动模拟器在原油降凝剂评价中的应用. 油气储运. 1999, 18(11), 47-50
- 3 钱民全、赵笃凤、范椿、张劲军、张帆、肖兰. 新型竖直圆环流动改进测量装置. 待发表
- 4 钱民全、吕恩武. 旋转带环中血栓形成实验研究. 第一届全国生物力学会议. 上海, 1981
- 5 吴望一, 吕恩武, 钱民全. 血栓形成的流体力学方面(英文) Biorheology Oct. 1982. 18 (1): 64~65
- 6 吴望一, 钱民全, 温功碧. 竖直毛细管中有限长液柱的粘性流体运动. 应用数学和力学. 1981. 8, 2 (4): 407~418
- 7 吴望一, 钱民全. 形成人工血栓的 Chandler 圆环内的流动分析. 中国科学. 1981, 1458~1467
- 8 钱民全. Discussion on the thrombus formation in view of hydrodynamics. 国际医学生物流变学和生物物理学讨论会. 论文集. pp100-102, 1995. 9
- 9 刘剑刚, 钱民全等. 体外血栓形成前后血液流变变化及其标准化操作. 第六届全国流变学学术会议. 1999. 11, 武汉, 1999 流变学进展. pp472-474
- 10 钱民全, 刘剑刚等. 血液有形成分对体外血栓形成的影响实验研究初步报告. 第六届全国流变学学术会议. 1999. 11, 武汉, 1999 流变学进展. pp495-496
- 11 钱民全等. 关于 Chandler 圆环中形成血栓检测指标的建议. 第八届全国生物力学和流变学学术会议. 1999. 11, 昆明
- 12 钱民全等. 血液有形成分在转动圆管中形成血栓/血块的实验研究. 全国第三届医学生物物理学学术会议. 1998. 11, 上海
- 13 钱民全等. 固液两相悬浮液在 Chandler 圆环中的多种流动状态. 全国第三届医学生物物理学学术会议. 1998. 11, 上海
- 14 钱民全等. 流速对 Chandler 圆环中形成人工血栓的影响. 第六届全国生物力学学术会议. 2000. 5, 上海
- 15 刘剑刚, 钱民全等. 温度对血栓形成的影响. 第六届全国生物力学学术会议. 2000. 5, 上海
- 16 范椿、罗哲鸣等. 无弹性流体的一些触变模型, 1990 流变学进展. 上海: 华东化工学院出版社, 1990
- 17 Fan Chun (范椿). A new fractional, thixotropic equation of state for structural fluid, Proceedings of the
- 18 钱民全、彭荣葵等. 微量血液直长毛细管粘度计. 第一届全国生物力学会议. 1981, 上海
- 19 钱民全等. 血液和贫血小板血浆在凝固过程中的粘弹性测量. 第五届全国生物物理学学术会议. 1986, 10, 杭州
- 20 韩庆钢、胡青华、庄逢源、曹重华、钱民全、陶祖莱. 抗凝剂对血液凝固过程粘弹性测量的影响. 第五届全国生物物理学学术会议, 1986, 10, 杭州
- 21 钱民全等. 血液凝固过程中挤压流动的粘弹性模量测量. 第二届全国流变学会议. 1987, 成都
- 22 钱民全、陈文芳、黄益民、范椿等. 非牛顿流体的挤压流动实验研究. 第四届全国流体力学学术会议. 1989, 3, 北京 (论文集 p171)
- 23 陈文芳、钱民全、范椿. 挤压流动的线性粘弹性理论分析. 第四届全国流体力学学术会议. 1989, 3, 北京 (论文集 p170)
- 24 钱民全等. 血液凝固过程中综合粘弹性模量  $G^*$  和弹性模量  $G'$  粘弹性模量  $G''$  联合测量. 第三届全国流变学会议. 1990, 10, 上海

- 25 黄益民、钟伟、庄逢源、钱民全、周蓉. 红细胞压积对凝血过程中血液粘弹性模量的影响. 北京生物医学工程. 1990, Vol.9, No.3, pp165-168
- 26 钱民全等. 关于毛细管粘度计测量血液粘度可比性建议. 第八届国际生物流变学大会北京卫星会议. 1992, 8, 论文集 pp361-364, 北京
- 27 钱民全. 关于血液粘度测量几个问题的讨论. 第八次全国生物物理学术会议. 1998, 5, 成都, China-Japan International Conference on Rheology. Peking University Press, Beijing, 1991, 71-74
- 28 张劲军、张帆. 原油流变学研究及应用中的若干问题. 1996 流变学进展. 北京: 化学工业出版社, 1996
- 29 张劲军、严大凡. 原油流动性测量及其管输应用中的若干问题, 油气储运. 1997, 16(4), 5~9
- 30 张劲军、黄启玉. 剪切作用对含蜡原油低温流变性的影响. 油田地面工程. 1993, 12(4), 14~18.
- 31 张劲军、刘忠晖等. 剪切作用对添加降凝剂后新疆原油流变性的影响. 石油大学学报(自然科学版), 1993, 17(6), 74~78
- 32 张劲军、刘忠晖等. 管输剪切作用对加剂原油流动性的影响. 1996, 油气储运. 15(9), 13~17
- 33 Zhang Jingjun et al. Rheology of Waxy Crudes: Shear Effect in Rheological Measurement and Pipeline Transportation, Paper prepared for poster presentation at the 12<sup>th</sup> International Congress on Rheology(Quebec, Canada), 1996.
- 34 张劲军. 含蜡原油添加降凝剂输送中剪切作用的影响和模拟. 石油大学博士学位论文. 1998