

提高 VT500-D100/300 系统测量结果的准确性

陈 俊* 张劲军

(石油大学(北京))

陈 俊 张劲军:提高 VT500-D100/300 系统测量结果的准确性,油气储运,2003,22(3) 35~38。

摘 要 同轴圆筒旋转粘度计平衡法是测定原油粘度的主要方法,但常规的非密闭粘度测试系统在测定轻质原油粘度时,常常由于原油轻组份的挥发导致测试结果偏高,采用密闭系统测试则可解决这一问题,但密闭测试系统常因结构特殊而又产生较大误差。VT500-D100/300 密闭粘度测试系统可测定高温高压下流体的粘度,从系统的结构、测试原理出发,分析其测量误差的来源,提出了用剪切率扫描的方法测试粘度,并进行了实例验证。结果表明,用剪切率扫描方法可明显提高 VT500-D100/300 密闭测试系统测定原油粘度结果的可靠性及重复性。

主题词 粘度计 粘度 测定 原油

原油粘度是原油管输工艺设计及经营管理中不可缺少的基础物性参数,测量的准确性十分重要。目前国内外普遍采用同轴圆筒旋转粘度计平衡法测定原油粘度。常用的粘度测试系统是在常压、非密闭条件下进行粘度测试的,对于轻质原油,测试过程中轻组分的挥发会使测试结果偏高,而使用密闭测试系统则可解决这一问题。

密闭测试系统与常用的非密闭粘度测试系统的结构不同,该系统的转子安装在密闭的定子内,粘度测试系统的旋转驱动力矩是通过一定的方式(如磁耦合)施加在转子上的。由于转子与定子直接接触,在测试过程中就不可避免地产生摩擦阻力,导致测试结果误差较大。VT500-D100/300 密闭粘度测试系统可测定高温高压下流体的粘度。

浮顶起浮时,浸在液体中的浮顶体积为:

$$V_q = \pi r^2 l - \pi r_1^2 h'_1 + \pi r_2^2 h'_2 + \cdots + \pi r_x^2 h'_x \quad (2)$$

式中 $r, r_1, r_2 \cdots r_x$ ——浸没于液体中的各圆柱体的半径;

$h', h'_2 \cdots h'_x$ ——浸没于液体中的各圆柱体的高度。

浮顶起浮时所排开液体的体积为:

$$V_f = G/\rho \quad (3)$$

式中 G ——浮顶的质量;

ρ ——罐内液体的密度。

先假设一个高度 l , 利用式(2)和式(3)求出 V_q 和 V_f , 将 V_q 与 V_f 进行比较, 如此不断地改变假设的起浮点位置, 直到 V_q 与 V_f 近似相等, 此时浮顶的外环底面至液面之间的距离 l 即为所求, 再利用

式(3)求出浮顶起浮高度 H 。

考虑到不同液体密度的影响, 实际浮顶起浮高度在计算值的基础上增加了 50 mm 的裕量, 即起浮高度为 $H+50$ mm。

将浮顶底面起浮高度几何算法与检定规程中的方法进行比较, 发现两种测量方法的结果非常接近, 完全能满足规程中规定的测量精度的要求。虽然该方法增加了计算的工作量, 但该方法对现场检定条件的要求较低, 而且计算可以通过计算机进行, 因此, 该方法具有较好的可操作性。

(修改稿收到日期:2002-12-13)

编辑:陈柱明

一、结构和测试原理

VT500 粘度计由德国 Haake 公司生产,D100/300 密闭测试系统用于测定流体在高温高压(300℃,10MPa)条件下的粘度。VT500-D100/300 粘度测试系统的结构如图 1 所示。

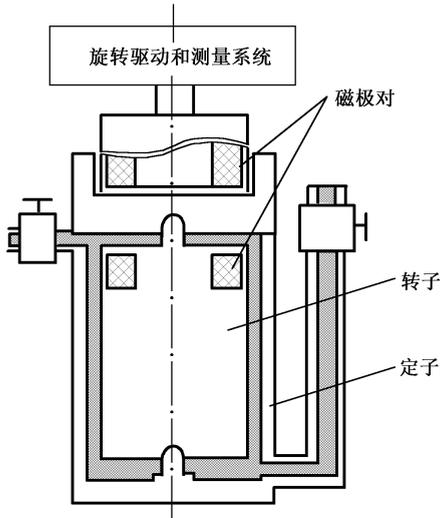


图 1 VT500-D100/300 粘度测试系统

VT500 粘度计的旋转驱动系统通过(磁极对)

磁耦合带动 D100/300 的转子转动,进而带动环空间隙内的流体做稳定的旋转层流,流体的粘性扭矩反作用于转子。流体粘度可采用式(1)计算。

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{A \cdot T_d}{M \cdot \Omega} \tag{1}$$

- 式中 η ——流体粘度,Pa·s;
- T_d ——流体粘性力产生的扭矩,N·m;
- Ω ——转子旋转角速度,rad/s;
- A ——剪切应力因子,与测试系统结构有关;
- M ——剪切率因子,与测试系统结构有关。

二、仪器的标定及误差分析

1、恒剪切率方法标定

采用 GBW13605 号标准粘度液(20℃粘度为 43.736 mPa·s)对 VT500-D100/300 粘度测试系统进行标定,其结果见表 1。

由表 1 可知,采用 VT500-D100/300 粘度测试系统测定 GBW13605 标准粘度液(牛顿流体)时,每次测试结果均不一样,重复性差,而且作为牛顿流体的标准粘度液却出现了随着剪切率增加粘度降低的非牛顿流体假象。因此,直接用 VT500-D100/300 系统按恒剪切率方式进行测定的误差较大。

表 1 VT500-D100/300 粘度测试系统的标定结果

剪切率 (1/s)	测试粘度(mPa·s)										平均值	平均绝对误差	标准偏差	平均相对误差%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
200	61.42	54.61	48.99	60.20	62.39	48.33	57.63	58.84	48.38	58.03	55.882	12.146	5.482	27.77
250	57.55	52.40	47.93	57.55	59.38	47.07	54.63	55.41	47.20	54.89	53.401	9.665	4.563	22.10
300	55.12	50.90	47.26	55.32	57.07	46.26	52.37	53.24	46.32	52.93	51.679	7.943	3.899	18.16
350	53.42	49.77	46.71	53.51	55.29	45.64	51.06	51.56	45.77	51.50	50.423	6.687	3.396	15.29
400					53.86	45.32	49.87	50.44	45.25	50.40	49.170	5.454	3.341	12.47

2、误差来源分析

VT500-D100/300 粘度测试系统是采用磁耦合方式施加旋转扭矩,从而带动转子转动。与 VT500 的其它测试系统不同的是,D100/300 系统带动转子与定子直接接触(见图 1),转子重约 1 kg,转动时需要克服摩擦阻力,测试时该阻力以扭矩的形式出现(数据处理时换算为剪切应力或粘度)。此外,转子和测量驱动系统的磁耦合角度具有一定的随机性,造成测量系统存在一定的初始扭矩,且该扭矩的大小也具有随机性,而“清零”操作只能使仪器显示的初始值复位,并不能消除这一扭矩。这两个阻力导

致表 1 中标定结果出现非牛顿假象和不良重复性。

根据上述分析,VT500-D100/300 系统在进行粘度测试时测到的扭矩包括两部分,即流体粘性阻力产生的扭矩和系统阻力产生的扭矩。因此 VT500-D100/300 同轴圆筒测试系统的剪应力与扭矩的关系可表示为:

$$\tau = \frac{T_{SHC}}{2 \pi R_b^2 h} = \frac{T_Z + T_N}{2 \pi R_b^2 h} = \frac{T_Z}{2 \pi R_b^2 h} + \frac{T_N}{2 \pi R_b^2 h} = \tau_Z + \tau_N \tag{2}$$

- 式中 T_{SHC} ——实测扭矩,N·m;
- T_Z ——系统阻力引起的扭矩,N·m;

- T_N ——流体粘性阻力产生的扭矩, $N \cdot m$;
- τ ——实测剪应力, Pa ;
- τ_Z ——系统阻力产生的剪应力, Pa ;
- τ_N ——流体粘性阻力产生的剪应力, Pa ;
- R_b ——系统定子直径, m ;
- h ——系统定子的长度, m 。

式(2)中 τ_Z 实际上并不存在于流体的试样中。如果用通常的恒剪切率方式测试,则在进行粘度换算时排除不了 τ_Z 的影响,这是导致粘度测试结果存在显著误差的原因所在。

3、 剪切率标定

由式(1)和式(2)可知:

$$\tau = \tau_Z + \tau_N = \tau_Z + \eta\dot{\gamma} \quad (3)$$

对牛顿流体,剪切应力与剪切率成正比,即 τ_N 与 $\dot{\gamma}$ 为线性关系,其斜率即为所测流体的粘度。式(3)中 τ_Z 即为 D100/300 的摩擦阻力引起的附加值和转子初始耦合位置引起的附加值,每次测定时均不同,但在同一次测试过程中 τ_Z 基本为一常数,这表明在同一次测试过程中 τ_Z 的出现并不影响 τ_N 与 $\dot{\gamma}$ 的关系,同样也不影响 τ 与 $\dot{\gamma}$ 的关系。因此,可以通过剪切率扫描的方法进行标定或测试。设定粘度计剪切速率以稳定的速率递增,在剪切率递增的过程中测试其剪切率和对应的剪切应力,在直角坐标系上绘制 τ 与 $\dot{\gamma}$ 图, τ 与 $\dot{\gamma}$ 仍为线性关系(见式(3)),通过其斜率可测得流体粘度。

采用三种标准粘度液对 VT500-D100/300 系统进行标定,其结果见表 2。

由表 2 可知,应用变剪切率方法标定 VT500-D100/300 粘度测试系统,可消除系统摩擦阻力和初始扭矩引起的系统误差和随机误差,标定结果的再现性较好。从测试结果看出,对高粘试样,恒剪切率方式相对误差较小,主要是由于高粘试样 $\tau_N \gg \tau_Z$ 。此外对恒剪切率标定,剪切率越大,误差就越小,这是由于 $\dot{\gamma}$ 和 τ_N 增加以及 τ_Z/τ_N 减小的缘故。

粘度测试系统在使用前都要进行标定和修正。通过对表 2 的标定结果进行分析,可得出 VT500-D100/300 粘度测试系统的修正关系式。修正后仪器的测试相对误差小于 1%。

$$\eta = 0.9394 \eta_0^{1.0252} \quad (4)$$

- 式中 η_0 ——D100/300 粘度测试系统按剪切率扫描方式测试的粘度, $mPa \cdot s$;
- η ——被测流体的实际粘度, $mPa \cdot s$ 。

表 2 VT500-D100/300 测试系统的标定结果

标准油	变剪切率标定		
	剪切率 $\dot{\gamma}$ 扫描范围(1/s)	粘度值 (mPa · s)	相对误差 %
GBW13605 (粘度 43.736 mPa · s)	0~500	42.68	2.41
	0~400	42.63	2.53
	0~300	42.06	3.83
	0~200	42.16	3.60
GBW13606 (粘度 87.059 mPa · s)	0~500	82.88	4.80
	0~400	83.11	4.54
	0~300	82.98	4.69
	0~200	82.60	5.12
GBW13608 (粘度 420.71 mPa · s)	0~100	383.0	8.96
	0~80	388.2	7.73

标准油	恒剪切率标定		
	剪切率 (1/s)	粘度值 (mPa · s)	相对误差 %
GBW13605 (粘度 43.736 mPa · s)	500	45.28	3.53
	400	48.82	11.63
	300	49.79	13.64
	200	51.85	18.55
GBW13606 (粘度 87.059 mPa · s)	500	86.96	0.11
	400	87.83	0.89
	300	89.27	2.55
GBW13608 (粘度 420.71 mPa · s)	200	97.63	12.14
	100	416.3	1.05
	80	415.8	1.17

三、粘度测试方法及实例

1、 测试方法

将流体试样装入 D100/300 粘度测试系统后,控制恒温循环系统至测试温度并恒温 20 min 以上。根据流体粘度的大小和系统量程的大小,设定粘度计扫描剪切率范围,使剪切率在一定时间内以一稳定的速率递增到一定的值,在剪切率递增的过程中测试其剪切率和对应的剪切应力。在直角坐标系上绘制 $\tau \sim \dot{\gamma}$ 图,通过其斜率可得流体粘度 η_0 ,再通过式(4)计算出实际粘度 η 。

2、 测试参数及结果

根据上述粘度测试方法,用 VT500-D100/300 系统对两种原油粘度进行了测试,测试参数及结果见表 3~表 6。

表 3 用剪切率扫描法测试原油 A 在 55℃ 时的粘度

油样号	在不同剪切率范围内测得的粘度 (mPa·s)			粘度总平均值 (mPa·s)	总标准差 (mPa·s)	最大绝对差 (mPa·s)	最大相对差 %
	0~200 s ⁻¹	0~300 s ⁻¹	0~400 s ⁻¹				
1、2、3	14.27	14.18	14.51				
4、5、6	14.15	14.60	13.96	14.339	0.217 2	0.64	4.49
7、8		14.47	14.57				

表 4 用恒剪切率法测试原油 A 在 55℃ 时的粘度

油样号	在不同剪切率范围内测得的粘度 (mPa·s)			粘度总平均值 (mPa·s)	总标准差 (mPa·s)	最大绝对差 (mPa·s)	最大相对差 %
	200 s ⁻¹	300 s ⁻¹	400 s ⁻¹				
1、2、3	28.433	24.081	23.199				
4、5、6	27.786	24.183	21.593	24.39	2.565	7.011	28.1
7、8		24.429	21.422				

表 5 用剪切率扫描法测试原油 B 在 55℃ 时的粘度

油样号	在不同剪切率范围内测得的粘度 (mPa·s)		粘度总平均值 (mPa·s)	总标准差 (mPa·s)	最大绝对差 (mPa·s)	最大相对差 %
	0~200 s ⁻¹	0~300 s ⁻¹				
1、2	19.37	19.53				
3、4	19.13	19.22	19.103	0.320 9	0.86	4.5
5		18.67				
6		18.70				

表 6 用恒剪切率法测试原油 B 在 55℃ 时的粘度

油样号	在不同剪切率范围内测得的粘度 (mPa·s)			粘度总平均值 (mPa·s)	总标准差 (mPa·s)	最大绝对差 (mPa·s)	最大相对差 %
	100 s ⁻¹	200 s ⁻¹	300 s ⁻¹				
1、2		32.622	27.789				
3、4		34.200	30.613	37.310	8.74	22.713	57.3
5	50.502						
6	48.136						

由试验结果可知,VT500-D100/300 系统用剪切率扫描方法测量原油粘度,可消除系统固有阻力和初始剪切应力引起的系统误差和随机误差,测试结果的再现性得到显著的改善。SY/T0520—93 测试规范^[1]规定,对于牛顿流体的测定,同一操作者在同一实验室使用同一仪器,按规定的步骤,在连续的时间里,对同一试样进行两次重复测定的结果之差不得超过其平均值的 6%。该系统对两种原油分别进行了 8 次和 6 次重复测试,用剪切率扫描方法测试结果的最大相对误差分别为 4.49% 和 4.50%,较恒剪切率法测试有显著的改善。

综上所述,可得出以下结论。

(1) 针对 VT500-D100/300 系统结构的特点,采

用剪切率扫描方法测定原油粘度,可消除系统摩擦阻力和初始扭矩引起的系统误差和随机误差,使测试结果的准确性和再现性得以提高。

(2) 由于非牛顿流体 τ 与 $\dot{\gamma}$ 不服从线性关系,如何用 VT500-D100/300 系统提高测定非牛顿流体表面粘度时的准确性与再现性尚需进一步研究。

参 考 文 献

1. 中华人民共和国石油天然气行业标准,SY/T 0520—93《原油粘度测定旋转粘度计平衡法》,石油工业出版社(北京),1993。
2. 罗哲鸣等,原油流变性及其测量,石油大学出版社(北京),1994,8。

(收稿日期:2002-06-26)

编辑:张淑英