

## 应用漏斗粘度计测定塑性流体的流变参数研究\*

刘孝良<sup>1</sup> 刘崇建<sup>1</sup> 谢应权<sup>1</sup> 陈忠实<sup>2</sup> 严仁俊<sup>2</sup> 熊玉霞<sup>2</sup>

(1. 西南石油学院 2. 四川石油管理局)

刘孝良等. 应用漏斗粘度计测定塑性流体的流变参数研究. 天然气工业, 2004; 24(1): 47~49

**摘要** 为使各类流体能应用漏斗粘度计测量其流变参数, 研究不同流体流动时间与流变参数的数学模型, 是非常重要的问题。作者从塑性流体的本构方程出发, 建立了非恒定静液柱作用下, 该流体垂直下落的流动规律及其管嘴流动时间与流变参数及摩阻的相互关系, 从而为计算漏斗粘度计中塑性流体的流变参数提供了理论依据。文章同样采用幂律流体等比例下降的多点式测量方法及其相关的试验数据, 较简便地求解出塑性粘度和动切力的具体数值。文章最后应用具体实例, 进一步说明测量和计算动切力和塑性粘度的步骤和过程。

**关键词** 漏斗粘度计 塑性流体 动切力 塑性粘度

应用漏斗粘度计测量流体的流变性能<sup>[1]</sup>, 有重要的实际意义。文献[2]中已较好地解决了幂律流体经漏斗粘度计后, 如何应用其自身静液柱下降成比例的测量方法, 该方法通过测量其流动时间, 再根据推导和建立的流变参数显示表达式, 计算该流体的流变参数, 从而为钻井液流变学设计, 提供了基础数据。在漏斗粘度计中, 塑性流体流变参数的测量和计算, 目前仍未得到解决。这也正是本文需要解决的问题。

## 流体在漏斗粘度计中的流动规律

图1、表1为国产和马氏漏斗粘度计的结构示意图和基本参数<sup>[3]</sup>。

在漏斗粘度计中, 塑性流体从任意静液柱高度 $x_i$ 降至 $x_{i-1}$ 时, 其自由下落的时间为:

$$t_{i0} = \frac{0.4E}{\sqrt{2g}} (x_i^{2.5} - x_{i-1}^{2.5}) \quad (1)$$

在漏斗粘度计中, 管嘴内流动的塑性流体因摩阻所消耗的时间, 可采用以下方法求得。

根据任意静液柱压头 $x$ (图1)与管内塑性流体摩阻的平衡关系<sup>[4,5]</sup>, 可求出该流体在管嘴的流速及流动时间的表达式:

\* 本文为中国石油天然气集团公司“九五”重点科技攻关项目“四川地区复杂地质条件下深井、超深井技术”(编号960024)中的部分研究内容。

作者简介: 刘孝良, 1951年生, 副教授; 1973年毕业于西南石油学院石油工程钻井专业, 长期从事石油天然气工程完井、固井教学科研工作。地址: (637001)四川省南充市。电话: (0817)2221585。

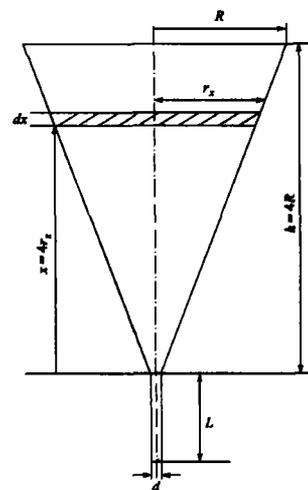


图1 漏斗粘度计结构示意图

表1 漏斗粘度计的基本参数

型号	h	R	L	d	B		E
					(cm)	(Pa·s·cm <sup>-1</sup> )	
国产	22.033	5.508	10	0.5	1280 $\eta_p$	106.67	1
马氏	28.405	7.101	5.08	0.476	717.46 $\eta_p$	56.92	1.1034

$$\gamma x = Bv_x + C\tau_0$$

$$vx = \frac{1}{B}(\gamma x - C\tau_0) \quad (2)$$

$$dt = \frac{BE}{\gamma} \frac{x^2}{x - (C\tau_0/\gamma)} dx$$

上式积分,并当漏斗内流体高度从  $x_4$  降至  $x_3$  时,管嘴流体因摩擦所消耗的时间为:

$$t_{f43} = \frac{BE}{\gamma} \left[ \frac{1}{2} \left( x - \frac{C\tau_0}{\gamma} \right)^2 + \frac{2C\tau_0}{\gamma} \left( x - \frac{C\tau_0}{\gamma} \right) + \left( \frac{C\tau_0}{\gamma} \right)^2 \ln \left( x - \frac{C\tau_0}{\gamma} \right) \right]_{x_3}^{x_4}$$

$$\because \frac{C\tau_0}{\gamma x} \ll 1$$

$$\therefore \ln \left( x - \frac{C\tau_0}{\gamma} \right) \approx \ln x - \left[ \frac{1}{x} \frac{C\tau_0}{\gamma} + \frac{1}{2x^2} \left( \frac{C\tau_0}{\gamma} \right)^2 \right]$$

$$\text{则 } t_{f43} = \frac{BE}{\gamma} \left[ e' + d' \frac{C\tau_0}{\gamma} - \left( \ln \frac{x_3}{x_4} \right) \left( \frac{C\tau_0}{\gamma} \right)^2 - b' \left( \frac{C\tau_0}{\gamma} \right)^3 - a' \left( \frac{C\tau_0}{\gamma} \right)^4 \right] \quad (3)$$

$$e' = \frac{1}{2} x_4^2 \left( 1 - \frac{x_3^2}{x_4^2} \right) \quad d' = x_4 \left( 1 - \frac{x_3}{x_4} \right)$$

$$b' = [(x_3/x_4) - 1]/x_3 \quad a' = [(x_3/x_4)^2 - 1]/2x_3^2$$

式中的  $B$ 、 $C$ 、 $E$  分别为  $B = (32l\eta_p)/d^2$ ,  $C = (16L)/3d$ ,  $E = 0.25d^{-2}$ , 单位采用国际单位制,即塑性粘度  $\eta_p$  为  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ; 动切力为  $\text{Pa}$ ; 长度为  $\text{cm}$ ; 流体重率  $\gamma$  为  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

现将表1中,不同漏斗粘度计的  $B$ 、 $C$ 、 $E$  值代入式(3),则国产漏斗粘度计和马氏漏斗粘度计中,流体静液柱下降任意位置后,管嘴流体摩擦所消耗的时间分别为:

$$t_{f43} = \frac{12.8\eta_p}{\gamma} \left[ e' + 1.0667d' \frac{\tau_0}{\gamma} - 1.13778 \left( \ln \frac{x_3}{x_4} \right) \left( \frac{\tau_0}{\gamma} \right)^2 - 1.2136b' \left( \frac{\tau_0}{\gamma} \right)^3 - 1.2945a' \left( \frac{\tau_0}{\gamma} \right)^4 \right] \quad (4)$$

$$t_{f43} = \frac{7.9165\eta_p}{\gamma} \left[ e' + 0.5692d' \frac{\tau_0}{\gamma} - 0.342 \left( \ln \frac{x_3}{x_4} \right) \left( \frac{\tau_0}{\gamma} \right)^2 - 0.01844b' \left( \frac{\tau_0}{\gamma} \right)^3 - 0.1050a' \left( \frac{\tau_0}{\gamma} \right)^4 \right] \quad (5)$$

### 漏斗粘度计中塑性流体流变参数

应用漏斗粘度计中,管嘴流体摩擦所消耗的时间与流变参数的基本关系式(4)、(5)计算塑性粘度  $\eta_p$  和动切力  $\tau_0$ ,至少需要两组以上该流体流动时间的试验数据,进行方程联解,才能计算出这些参数值。下面应用国产漏斗粘度计所测得流体的三组流动时间数据,求解  $\eta_p$  和  $\tau_0$ 。当流体从初始静液柱高度  $h_4$  降至  $h_3$  时,管嘴流体摩擦所消耗的时间为

$t_{f43}$ 。(公式为式(4),由  $h$  替换  $x$ ,同样有  $t_{f32}$ 、 $t_{f21}$ 。

如仍按测定幂律流体在漏斗粘度计中的测量关系,即  $\frac{h_3}{h_4} = \frac{h_2}{h_3} = \frac{h_1}{h_2}$ ,测定塑性流体在管嘴中流动因摩擦所消耗的时间,将  $t_{f43} - t_{f32}$ ,  $t_{f32} - t_{f21}$  相除得  $F = (t_{f43} - t_{f42}) / (t_{f32} - t_{f21})$ ,即可消去  $\left( \frac{\tau_0}{\gamma} \right)^2$  项和  $\eta_p$ ,得出  $\left( \frac{\tau_0}{\gamma} \right)^4$  的有关参数方程:

$$-0.6473a \left( \frac{\tau_0}{\gamma} \right)^4 - 1.2136b \left( \frac{\tau_0}{\gamma} \right)^3 + 1.0667d \frac{\tau_0}{\gamma} + e = 0 \quad (6)$$

$$a = [1 + (h_3/h_4)]^2 [(h_3/h_4)^2 - F] / h_1^2$$

$$b = [(h_3/h_4)] - F / h_1$$

$$d = h_1 [1 - F(h_3/h_4)]$$

$$e = h_1^2 [1 + (h_3/h_4)] [1 - F(h_3/h_4)] / 2$$

现将两种漏斗粘度计,在静液柱下降成恒定比例的情况下,各静液柱高度测定值  $h$  及管嘴对应范围流出量列于表2中。

表2 满足相邻液柱下降成恒定比例的有关参量

漏斗粘度计类型	$h_4$	$h_3$	$h_2$	$h_1$	$h_3/h_4$	
国产	静液柱高度 (cm)	22.033	19.170	16.679	14.511	0.87006
	流出量 (mL)	239	155	106		
马氏	静液柱高度 (cm)	28.405	25.141	22.252	19.695	0.88509
	流出量 (mL)	460	298	242		

将表2中的有关数据及测得和计算的  $F$  值代入式(6),可求出  $\tau_0$ ,再将  $\tau_0$  代入式(4)解方程,即可求得  $\eta_p$ 。 $t_f$  按流体在漏斗粘度计中,静液柱下降时所测得的总时间  $t_{s43}$  与式(1)所计算的流体自由下落时间  $t_{fa43}$  之差确定,即  $t_{f43} = t_{s43} - t_{fa43}$ 。

### 实例

已知聚丙烯酰胺钻井液  $\gamma = 1.01$ ,试用国产漏斗粘度计,测定和计算该流体的动切力和塑性粘度。

试验和计算步骤及过程:

(1)将聚丙烯酰胺钻井液均匀搅拌,盛放于漏斗粘度计中,其初始液柱高度  $h_4$ ;

(2)用多点连续计时器,测定漏斗粘度计中静液柱下降至  $h_3$ 、 $h_2$ 、 $h_1$  及相邻高度液柱下降的时间,  $t_{s43} = 17.75 \text{ s}$ ,  $t_{s32} = 13.32 \text{ s}$ ,  $t_{s21} = 10.04 \text{ s}$ ;

(3)按式(1)计算流体在对应高度范围内  $h_{43}$ 、 $h_{32}$ 、 $h_{21}$  自由下落的时间  $t_{ia43} = 6.05034$  s,  $t_{ia32} = 4.27218$  s,  $t_{ia21} = 3.01661$  s;

(4)计算管嘴内流体摩阻所消耗的时间及  $F$  值:

$$t_{i43} = t_{s43} - t_{ia43} = 11.70 \text{ s}$$

$$t_{i32} = t_{s32} - t_{ia32} = 9.05 \text{ s}$$

$$t_{i21} = t_{s21} - t_{ia21} = 7.023 \text{ s}$$

$$F = \frac{t_{i43} - t_{i32}}{t_{i32} - t_{i21}} = 1.3074$$

将  $F$ 、 $\frac{h_3}{h_4}$ 、 $h_1$ 、 $h_4$  代入式(6),经整理得:

$$\left(\frac{\tau_0}{\gamma}\right)^4 + 6.182\left(\frac{\tau_0}{\gamma}\right)^3 - 546.24\frac{\tau_0}{\gamma} + 1476.63 = 0 \quad (7)$$

解4次方程  $\tau_0 = 4.397$  Pa

(5)由不同深度代入式(4)得到的多个方程联立求解可得  $\eta_p$ 。

应用  $t_{i43} - t_{i32}$ 、 $t_{i32} - t_{i21}$  消去  $\left(\frac{\tau_0}{\gamma}\right)^2$  项,并计算  $F'$

$$\begin{aligned} F' &= t_{i43} - t_{i32} - (t_{i32} - t_{i21}) \\ &= t_{i43} + t_{i21} - 2t_{i32} \\ &= 0.623 \text{ s} \end{aligned}$$

代入相关数据,经整理后得出  $\eta_p$  的有关方程式:

$$F = \frac{12.8\eta_p}{\gamma} \left[ 3.483 + 0.05156\frac{\tau_0}{\gamma} + 1.835 \right]$$

$$\times 10^{-4} \left(\frac{\tau_0}{\gamma}\right)^3 + 4.41 \times 10^{-5} \left(\frac{\tau_0}{\gamma}\right)^4 \quad (8)$$

代入  $F'$ 、 $\gamma$  及  $\tau_0$  值,  $\eta_p = 0.0132$  Pa·s

## 结 论

如测定的钻井液为塑性液体,并按两参数的宾汉方程描述,可按本文所介绍的方法,测量漏斗粘度计中静液柱等比例下降的时间,应用式(7)和式(8)解出  $\tau_0$  和  $\eta_p$ 。高次方程的解虽然较麻烦,但仍是显示解。如使用一般计算机进行计算,同样是很方便的。

## 参 考 文 献

- 1 Pitt M J. The Marsh Funnel and drilling Fluid Viscosity: A New Equation for Field Use, SPE Drilling and Completion, 2000; 15(1): 3~6
- 2 刘孝良,刘崇建等.应用漏斗粘度计测定幂律流体的流变参数.天然气工业,2003;(4):47~50
- 3 钻井手册(甲方)编写组.钻井手册(甲方)上册.北京:石油工业出版社,1990:666
- 4 刘崇建.准确测定三参数非牛顿液体的流变参数.西南石油学院学报,1984;(4):33~43
- 5 刘崇建,黄柏宗等.油气井注水泥理论与应用.北京:石油工业出版社,2001:266~268

(收稿日期 2003-06-16 编辑 钟水清)

## 世界天然气消费量预测

世界天然气探明储藏量已由1970年39.5万亿立方米增加到2002年155.78万亿立方米;最终可采储量从1970年200~250万亿立方米增加到2001年450~550万亿立方米。

世界各地区2002年天然气储采比分别为:北美9.4年、拉美68.8年、欧洲58.9年(其中俄罗斯为81.2年)、非洲88.9年、中东大于100年(约234年)、亚太地区41.8年。世界平均为60.9年。

据美国《油气杂志》分析报道,世界天然气消费量将从1970年1.008万亿立方米、1980年1.484的万亿立方米、1990年2.044万亿立方米、2000年2.347万亿立方米、2002年2.535万亿立方米增加到2005年2.800万亿立方米、2010年3.192万亿立方米、2015年3.724万亿立方米、2020年4.284万亿立方米、2025年4.928万亿立方米。2001~2005年间,预计世界各地区天然气消费量的增加数分别为:亚洲3640亿立方米、北美5180亿立方米、西欧3080亿立方米、中/南美2100亿立方米、中东1960亿立方米、非洲840亿立方米。

LNG在世界天然气贸易中所占份额将从1990年23.5%、2001年23.1%增加到2010年25%~31%、2020年31%~37%。

(钱伯章 供稿)