

# 润滑脂管道流动阻力的测试研究\*

张晓光

(中国矿业大学机电工程学院 徐州 221008)

徐健键

(南京大学应用物理研究所 南京 210093)

林学栋

(中国矿业大学机电工程学院 徐州 221008)

摘要: 分析了存在壁滑移时的流动阻力测试原理, 对测试系统和阻力计算进行了研究。为了测试润滑脂的阻力特性, 去除壁滑移流动的影响, 根据 Mooney 方法建立了扣除壁滑移后适应任一管径的流动方程; 润滑脂的粘弹性、触变性等其他因素会使流动曲线不重合, 研制了管流流变仪测试系统, 并制定了合理的试验方法, 达到使这些因素的影响降到最低和分离壁滑移流动的试验效果。通过试验验证了所建立的适应任一管径的流动方程, 求解了流动方程的阻力近似解, 并通过三维优化计算降低了近似解与精确解的偏差。润滑脂流动阻力的测试研究, 为集中润滑系统的管路输送提供了理论和试验依据。

关键词: 润滑脂 管道流动 壁滑移 阻力特性 测试系统

中图分类号: TH815 TH117

## 0 前言

润滑脂是由稠化剂和基础油组成的, 通常还加入各种添加剂, 是一种结构分散体系, 属非牛顿流体。润滑脂的组成结构决定了它具有稠度性和触变性, 只有在足够的外力作用下才能产生变形和流动, 具有复杂的流变特性。

为提高设备的寿命, 设备运行时许多部位需要润滑, 特别是大型设备, 脂润滑向着集中润滑系统方向发展, 它是向众多润滑点自动输送润滑脂的整体输送系统, 可为各个润滑部位提供及时的和精确的润滑, 虽然输送设备较复杂, 但对减少润滑的事故率和提高脂润滑的经济性起着日益重要的作用。如何较好地把润滑脂输送到需润滑的部位, 需要对润滑脂的输送特性进行多方面的研究。

阻力特性是当润滑脂通过管道输送时, 其摩擦阻力值随油温、管径、管长、管内壁粗糙度、流速及润滑脂稠度等参数变化的规律。在润滑脂集中润滑管道输送系统设计中, 可通过求给定流量下流动阻力来确定泵的压力。研究流动阻力的方法很多, S. W. Rein<sup>[1]</sup>和 A. Verhoeff<sup>[2]</sup>用图表法、Y. I. Cho<sup>[3]</sup>

用 Hagen-Poiseuille 方程、G. B. Froishteter 等<sup>[4]</sup>用流变模型来研究流动阻力。这里将通过流动方程来研究流动阻力, 研究时发现壁滑移流动, 壁滑移可使流体在管道输送中实现减阻。存在壁滑移的润滑脂阻力特性研究, 可为润滑脂管道输送及泵体设计提供必不可少的依据, 但壁滑移现象使润滑脂管内流动规律更加复杂, 不容易测量, 又由于端口效应显著、测量管路中传感器的布置对测量非常敏感等, 一般的流变仪不适宜用来测量壁滑移速度和扣除壁滑移的流动方程, 以所建立含壁滑移的流动方程为基础, 研究了流动阻力的测试原理, 并设计了测试系统。

## 1 存在壁滑移时的流动阻力测试原理

流体在不同半径  $R$  的管道流动方程

$$4v/R = (4/t_w^3) \int_0^{t_w} t^2 f(t) dt \quad (1)$$

式中  $4v/R$  ——总流名义剪切速率

$t_w$  ——壁面切应力

$t_w = R\Delta p/(2L)$

$\Delta p$  ——管长为  $L$  上的阻力

$f(t) = \mathcal{G} = -du/dr$

$u$  ——瞬时速度

根据 Mooney 方法<sup>[5]</sup>, 在层流条件下, 不论  $f(t)$  取什么形式, 在  $t_w$  一定时所测得的  $4v/R$  应不随管

\* 江苏省博士后科研基金资助项目。20050228 收到初稿, 20050525 收到修改稿

径  $R$  变化, 对式(1)积分得流动方程, 解流动方程可得表示流动阻力的  $t_w$ 。

若测得不同管径的流动曲线不重合, 则不同管径对应不同的流动方程, 求任一管径的流动阻力就应进行对应管径的试验, 在工程计算中不方便, 是否可以建立适应任一管径的流动方程, 应从使流动曲线不重合的原因着手分析。

壁滑移、粘弹性和触变性等引起流动曲线不重合, 经分析壁滑移为主要因素, 而且壁滑移可起到减阻作用, 消除其他因素的影响, 可将壁滑移流动从总流流动分离出来。

若不同管径的流动曲线不重合仅由壁滑移因素引起, 流动方程为<sup>[6]</sup>

$$4v/R = 4v_s/R + (4/t_w^3) \int_0^{t_w} t^2 f(t) dt = 4v_s/R + 4v_c/R \quad (2)$$

式中  $4v_s/R$  ——壁滑移产生的名义剪切速率

$4v_c/R$  ——扣除壁滑移后的名义剪切速率

扣除壁滑移后不同管径的流动曲线重合, 式(2)对  $1/R$  求导, 得

$$\frac{\partial(4/t_w^3) \int_0^{t_w} t^2 f(t) dt}{\partial(1/R)} = \frac{\partial(4v_c/R)}{\partial(1/R)} \Big|_{t_w} = 0 \quad (3)$$

$$\text{常数 } v_s = \frac{1}{4} \frac{\partial(4v/R)}{\partial(1/R)} \Big|_{t_w} \quad (4)$$

下面研究相应测试系统和制定试验方法来消除粘弹性、触变性等其他因素的影响, 以便分离壁滑移, 由式(2)~(4)建立适应任一管径的流动方程, 解流动方程可得  $t_w$ , 并通过实验验证。

## 2 流动阻力测试系统

### 2.1 测试系统总体设计

本测试系统主要由管流流变管路、数据采集两大部分组成, 测试系统如图 1 所示。管流流变管路部分是测试系统的核心, 由低压力波动润滑脂泵、消除孔穴误差的精确测压装置、储能器、润滑脂专用压力表、过滤器、溢流阀、定向溢流阀、高压球阀和管路等组成。被试验管路可以换用不同直径和材质的管子, 进行润滑脂的各种流变测量。

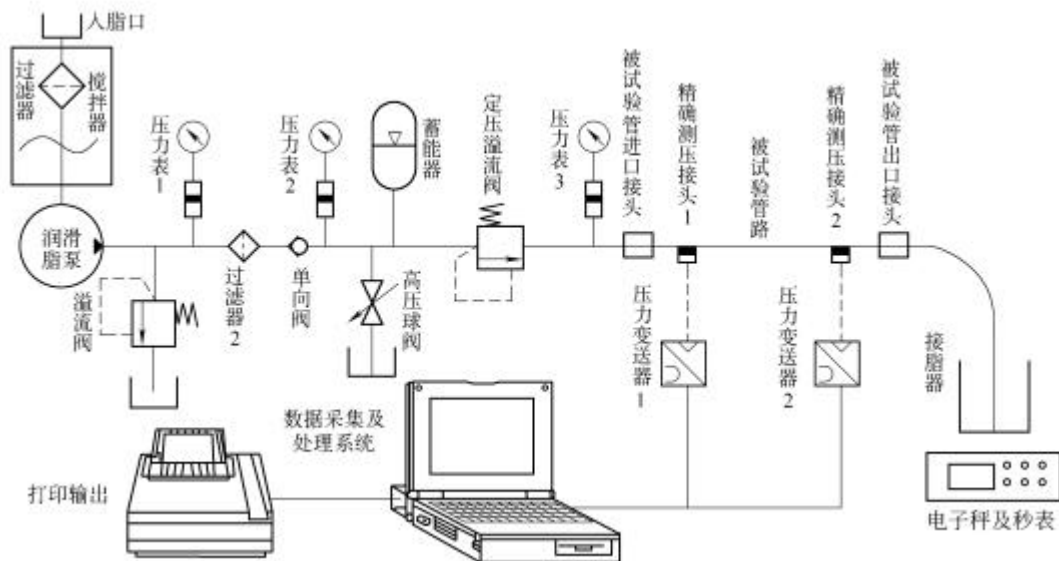


图 1 润滑脂管流变装置

数据采集系统主要采集试验过程中的流量、压力数据, 并对这些数据进行初步处理。数据采集系统由压力传感器及变送器、PCI9118 数据采集卡、计算机、电子秤及秒表和测试软件等组成。为了提高数据采集的准确性, 采用了高精度的压力传感器, 使压力信号可以较好地反映出由于流变差异引起的变化。

该系统采用管流流变检测装置, 可省去端部效应的校正。只要被测直管道水平置于进出口接头之间, 测压点远离进出口接头, 可以达到无端部效应。

### 2.2 测试系统的管路部分设计

管路部分见图 1 中所示。下面按从入脂口到出口脂口的顺序介绍其组成和作用。过滤器 1 为粗过滤器, 主要用于滤掉大颗粒杂质, 选择较大的筛眼。过滤器 2 为细过滤器, 筛眼规格必须按标准选用, 若选的筛眼过小, 从润滑脂中分离出来稠化剂或固体添加剂将不能通过筛眼而被堵塞; 若选的筛眼过大, 则不能过滤碎屑, 本系统按 ASTM E11[18]标准选用 40 筛号规格的滤筛。搅拌器的作用是搅拌润滑脂, 以便被泵吸入。润滑脂泵为定量泵, 设有压

力溢流阀起到泵的过载保护作用，通过脂压表 1 观察泵的压力。由于润滑脂泵均采用柱塞压脂方式，故而测试管路中脂压力和流量波动较大。为此，在泵的进口安装了一个大储能罐，从而减小了试验管路中的压力波动。蓄能器可以得到不同稳定压强下的流量，因润滑脂泵为定量泵，先将定压溢流阀关闭，将泵输出的润滑脂储存到蓄能器中，单向阀的作用是防止蓄能器中的润滑脂倒流，通过脂压表 2 观察蓄能器中的压力，若蓄能器中达到试验所要求的压力，通过调节定压溢流阀和减压阀，并根据脂压表 3 显示的压强值，调定到试验所需的不同压强，从而得到不同的流量。高压球阀的作用是当定压溢流阀万一被堵塞，卸去蓄能器中的压力。试验中的被测管路水平置于两接头之间，测压点置于稳定管流状态的部位，无端部效应，在整个试验范围内，流动呈层流状态。压强的精确测量是使用压力变送器 1 和 2，通过变送器将压力变为 0~5 V 的标准电压信号。

管路部分为适合润滑脂的测量，专门设计了低压力波动润滑脂泵、无孔穴误差的精确测压联接装置和润滑脂专用压力表。低压力波动润滑脂泵有两个主要技术关键：其一是由于润滑脂粘度大，为保证准备吸脂时能形成真空，此时排脂口要及时可靠关闭，为此设计了双机构关闭排脂口；其二是低压力波动是靠两组活塞来保证在一个周期内任一时刻都有润滑脂排出来实现的。滑脂泵结构示意图如图 2 所示。

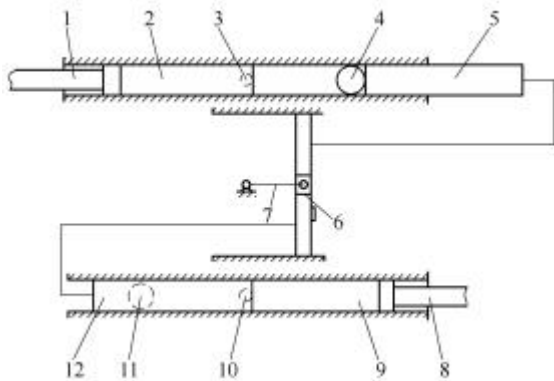


图 2 低压力波动润滑脂泵

1,12. 控制活塞 2,11. 开启活塞 3,10. 排脂口  
4,9. 吸脂口 5,8. 工作活塞 6. 滑块 7. 曲柄

因为第一法向应力差使粘弹性流体孔穴处呈现凹坑流动如图 3a 所示，流线的弯曲引起了弹性张力，这种张力的合力使凹坑底部的压强  $p_m$  减小，为减少这种影响，使活塞与管壁平贴(图 3b)可避免凹坑出现，根据该方法设计使用如图 4 所示的无孔穴误差的精确测压联接装置。

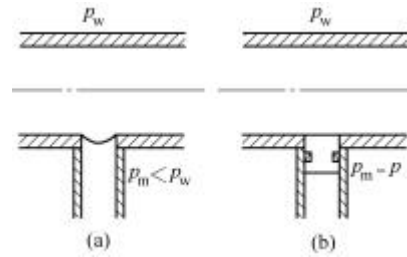


图 3 孔穴误差的产生和消除

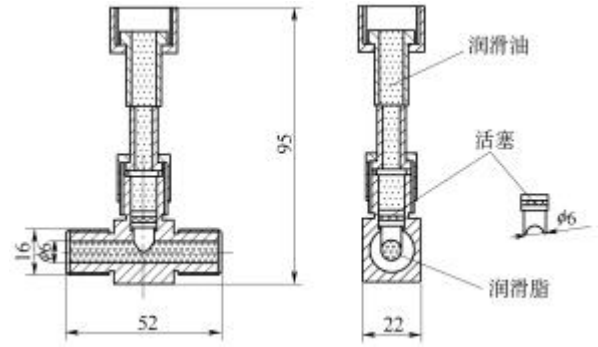


图 4 消除孔穴误差的精确测压接头

润滑油压力表不能直接用于测量润滑脂，为此在润滑油压力表基础上研制润滑脂专用压力表，技术的关键在于将润滑脂的压力传递为润滑油的压力，解决的办法是在润滑脂和润滑油之间设置一过渡件，通过试验确定传压活塞式过渡件较好。

润滑脂粘弹性的第一法向应力差使出口压强大于大气压强，Han 通过试验分析和理论结合的方法提出如下方程<sup>[7]</sup>

$$N_1|_w = p_{lw} + p_{lw} \lg p_{lw} / \lg t_w$$

式中  $p_{lw} = t_{rr}(R, l)$  为出口壁面处的压强。因难以得到  $N_1|_w$  的精确测量值，所以由上式很难得到  $p_{lw}$ 。 $p_{lw}$  虽不能在出口处直接测量，但可以通过间接测量的方法得到。设计研制的出口压力测试装置如图 5 所示，测出沿轴向的三个压力  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ ，外推至出口处求得

$$p_{lw} = p_3 - [(p_1 - p_2) + (p_2 - p_3)] / 2$$

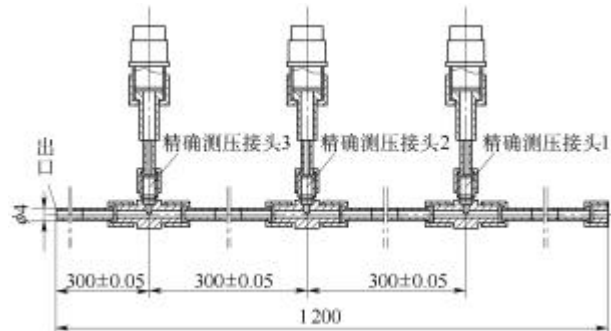


图 5 出口压力测试装置

测压点的选择应远离产生局部阻力的进口和大于大气压强的出口处，确保消除端部效应。测压点

间的管长选取,根据润滑脂应力触变衰减和润滑脂在管中流动的粘性发热特性,应使被测管路的长径比相同,在试验中所选取的长径比约为 400。

### 2.3 测试系统的数据采集

测试系统的数据采集是采用计算机对数据进行存储处理、分析计算以及从测试数据中提取可用信息供显示、记录、打印和描绘的系统。其任务有以下几项。

(1) 数据采集。通过对多路压力传感器和变送器把被测管内脂的压力参数转换为 0~5 V 模拟电量输入给数据采集卡,对转换的标准模拟信号进行必要的转换,使之成为计算机所能接收处理的二进制代码信号;另外,通过对一定时间内润滑脂输送量的测量求取流量。

(2) 数据存储与管理。根据数据采集的任务,计算机直接管理存储和记录采集或大量原始数据的工作,通过建立或使用公用数据库,对数据进行管理和调用。

(3) 数据处理及输出。从原始采集到的数据中,剔除某些非信息量,经过处理提取有用信息数据进行运算和通过多种方式显示、打印。

除流量的采集靠人工输入外,压力参数的采集和处理过程均在计算机控制下进行。下面介绍系统硬件组成和软件设计。

#### 2.3.1 硬件组成与设计

为了完成试验数据的采集与初步处理,设计了以凌华 PCI9118 数据采集卡为核心的试验压力的数据采集系统。应用高精度压力传感器通过精确测压接头测试管道内脂的压力,传感器采用扩散硅压阻原理和微机械加工技术制造,其测量精度为 0.1%,压力传感器输出的信号给压力变送器,压力变送器是将得到的压力信号放大为 0~5 V 的标准电压信号,输出到数据采集卡,采集卡将该模拟信号转换为数字信号,输入计算机然后进行数据的处理与分析。凌华 PCI9118 是 32 位 PCI 总线、即插即用的数据采集卡和 16 路单端输入或者 8 路差分输入,由于具有高达 330 kHz(9118DG/HG)的 A/D 采样频率,16 位的 A/D 转换精度,所以可以不失真地完成数据的采集。

#### 2.3.2 系统软件设计

采用的凌华 PCI9118 数据采集卡提供了通用的驱动和构建不同系统所需要的软件开发包。对于数据采集软件的设计,利用该公司所提供的可应用于 Windows 不同版本的 DLL 库自行开发数据采集处理软件。在软件设计过程中,采用面向对象的程序设计语言 VB 来设计整个应用程序。由于 VB 不能

直接访问数据采集卡,所以 VB 也不能直接用数据采集卡进行数据采集。要进行数据采集,就需要调用数据采集卡的动态链接库中的 API 函数。VB 在使用这些函数之前需要对其进行声明。

系统软件主要由数据采集模块、数据处理模块、图形显示打印模块和文件管理模块组成。数据采集模块主要由系统初始化、数据采集等部分组成。数据处理模块包括:采样数据平均值法处理、参数的计算和性能曲线的绘制等。其中数据采集模块包括接口程序、数据采集程序及数据存储程序。当数据采集进计算机后,该软件需要对数据进行初步的处理。处理内容包括取数据的最大值、最小值及一段时间内的平均值等。通过初步处理,可以确定出来在某一流量下管路的沿程阻力或者局部阻力。通过多次试验,可以得到一系列的流量与阻力的数据。这些试验数据需要进行保存,然后再使用如 MATLAB 这样的数据分析软件再进行最终的分析处理。

### 2.4 测试方法的制定

为可靠、准确地测量,消除误差必须采用正确测量方法,下面是在测量中为消除误差而采用的方法。

(1) 选择同样的试验条件。因润滑脂具有切应力触变衰减性,放置时间越长,屈服应力和相同的剪切速率下切应力越大;随着循环剪切次数的增多屈服应力和相同的剪切速率下切应力逐渐减小;测试温度的变化对测试精度也有影响。为此,在测试过程中必须保证温度基本不变、润滑脂试样放置时间相同和循环剪切次数相同,以提高试验精度和可对比性。

(2) 达到稳定的流动状态进行压力和流量的测定。因润滑脂在开始运动的时刻,会出现应力超越量,应避免这个时刻,达到稳定流动状态时进行测量。

(3) 压力加载。用定量泵加入足够的润滑脂到蓄能器中,以便使同一次储存在蓄能器的润滑脂能够完成一种管道的压力和流量测量;为了避免出现触变迟滞环现象,在试验中采用统一的由高压到低压的加载方式;使用控制切应力的试验方法,避免了最小应力出现。

(4) 压力传感器零点标定。Y. I. Cho 和 E. Choi<sup>[3]</sup>证实润滑脂存在停止屈服应力,即流动停止的时刻,管路中应力不为零。必须在打开润滑脂泵之前完成压力传感器零点标定。另外,压力传感器必须垂直于管壁,且其端面必须与管道平齐。

(5) 试验假设条件。在进行沿程阻力试验时,

假设流动为层流状态；当压力不是很大时，一般  $p < 40 \text{ Pa}$  时，体积随压力的变化较小，不考虑润滑脂的压缩性；在试验过程中，由于润滑脂在管道内输送的时间比较短，而且选取的管道长径比相同，因而在进行计算时不考虑润滑脂的触变特性。

### 3 试验验证

试样为 00 号极压锂基脂，环境温度为  $12^\circ\text{C}$ ，使用三种直径管壁粗糙度相同的无缝钢管管路，试验的测量值  $t_w$ 、 $4v/R$  见表 1。将三种管径的三组点 ( $4v/R$ 、 $t_w$ ) 绘制在图 6 中，三组点对应的三条流动曲线不重合，根据三组点建立流动方程。因  $4v/R$  和  $t_w$  是非线性关系，以 Matlab 为工具，采用了最

小误差的多参数回归拟合法拟合方程，曲线符合 Herschel-Bulkley 流变方程对应的流动方程

$$t = t_y + k \dot{\gamma}^n$$

式中  $t_y$ ——屈服应力

$k$ ——稠度系数

$n$ ——流动指数

代入式(1)积分得 Herschel-Bulkley 流动方程

$$\frac{4v}{R} = \frac{4n}{3n+1} \left( \frac{t_w}{k} \right)^{1/n} \left( 1 - \frac{t_y}{t_w} \right)^{(n+1)/n} \times \left[ 1 + \frac{2n}{2n+1} \frac{t_y}{t_w} + \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \left( \frac{t_y}{t_w} \right)^2 \right] \quad (5)$$

表 1 壁滑移测试与研究数据

直径 $D=4.1 \text{ mm}$			直径 $D=7.8 \text{ mm}$			直径 $D=9.7 \text{ mm}$			直径 $D=5.9 \text{ mm}$		
壁面切应力 $t_w/\text{Pa}$	剪切速率 $4v \cdot R^{-1}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	误差 $w/\%$	壁面切应力 $t_w/\text{Pa}$	剪切速率 $4v \cdot R^{-1}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	误差 $w/\%$	壁面切应力 $t_w/\text{Pa}$	剪切速率 $4v \cdot R^{-1}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	误差 $w/\%$	壁面切应力 $t_w/\text{Pa}$	剪切速率 $4v \cdot R^{-1}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	误差 $w/\%$
1 394	3 348	2.1	983	1 848	0.0	1 080	1 990	0.2	1 412	3 138	0.7
1 296	3 090	1.3	865	1 578	-1.0	904	1 555	1.7	1 293	2 782	-0.8
1 200	2 958	-3.8	784	1 407	-2.7	765	1 279	-1.0	1 149	2 415	-0.6
1 113	2 644	-1.9	705	1 194	-0.6	680	1 062	1.3	1 029	2 127	0.3
1 007	2 329	-1.6	620	998	-0.6	577	844	0.7	884	1 770	0.9
924	2 000	2.7	539	823	-1.4	506	686	2.1	765	1 446	-0.8
822	1 777	-0.5	465	657	-1.4	413	494	3.0	613	1 102	1.6
718	1 481	0.0	370	458	-2.5	314	299	4.5	453	704	-0.2
624	1 200	2.2	324	367	-4.0	317	303	5.1	331	424	-1.5
535	979	1.0	241	202	-4.5	248	193	-0.9	236	214	-5.6
415	637	5.6	203	126	-0.9	217	142	-2.8	154	81	15.5
327	446	2.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
270	319	-0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
197	155	-0.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—

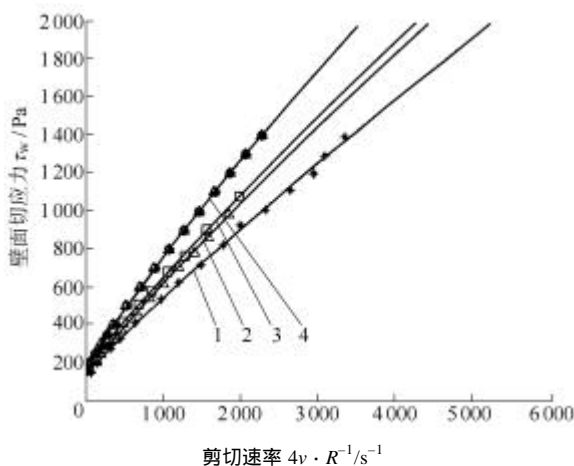


图 6 流动曲线

1.  $D = 4.1 \text{ mm}$ ，实测流动曲线
2.  $D = 7.8 \text{ mm}$ ，实测流动曲线
3.  $D = 9.7 \text{ mm}$ ，实测流动曲线
4. 扣除壁滑移后的流动曲线

将表 1 中的  $4v/R$ 、 $t_w$  代入式(5)中，拟合得参数  $t_y$ 、 $k$ 、 $n$  值见表 2，下面验证是否满足式(3)、(4)的方程。

表 2 实测流变方程的  $t_y$ 、 $k$ 、 $n$  值

直径 $D/\text{mm}$	4.1	7.8	9.7
屈服应力 $t_y/\text{Pa}$	94.48	94.28	103.54
稠度系数 $k$	0.771 7	0.992 9	1.108 5
流动指数 $n$	0.907 2	0.894 9	0.884 7

根据式(5)，取一组  $t_w$  值，可得三种管径的  $4v/R$  值，绘出  $1/R - 4v/R$  的关系曲线如图 7 所示， $1/R - 4v/R$  的曲线近似为直线，说明试验与式(4)吻合，根据式(4)得该组直线斜率的  $1/4$  就是壁滑移速度  $v_s$ 。根据  $(v_s, t_w)$  点的特征，拟合方程式为

$$v_s = [(t_w - t_{wc})/h]^{1/m} = [(t_w - 125.3650)/1.5505]^{1/0.8534} \quad (6)$$

式中  $t_{wc}$ 、 $h$ 、 $m$ ——拟合特征常数

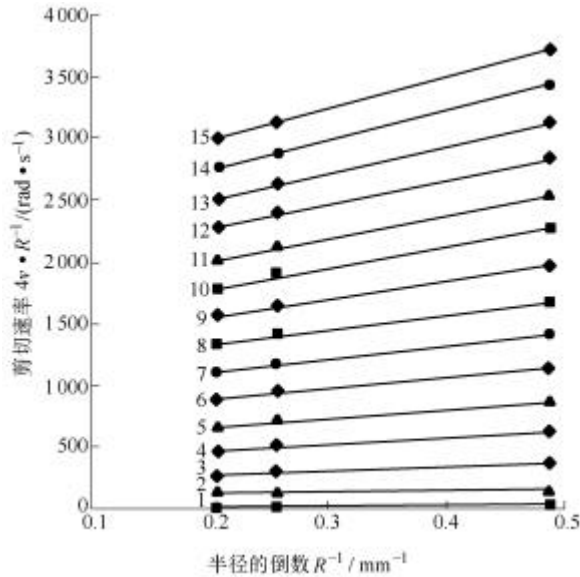


图 7  $R^{-1}-4v/R$  的关系曲线

- 1.  $y = 87.049x + 20.219, t_w=150 \text{ Pa}$
- 2.  $y = 180.03x + 73.662, t_w=200 \text{ Pa}$
- 3.  $y = 366.49x + 211.91, t_w=300 \text{ Pa}$
- 4.  $y = 552.2x + 368.72, t_w=400 \text{ Pa}$
- 5.  $y = 737.23x + 536.24, t_w=500 \text{ Pa}$
- 6.  $y = 921.69x + 711.49, t_w=600 \text{ Pa}$
- 7.  $y = 1105.7x + 892.88, t_w=700 \text{ Pa}$
- 8.  $y = 1289.2x + 1079.4, t_w=800 \text{ Pa}$
- 9.  $y = 1472.2x + 1270.4, t_w=900 \text{ Pa}$
- 10.  $y = 1654.9x + 1465.3, t_w=1000 \text{ Pa}$
- 11.  $y = 1837.2x + 1663.7, t_w=1100 \text{ Pa}$
- 12.  $y = 2019.1x + 1865.4, t_w=1200 \text{ Pa}$
- 13.  $y = 2200.6x + 2070, t_w=1300 \text{ Pa}$
- 14.  $y = 2381.8x + 2277.3, t_w=1400 \text{ Pa}$
- 15.  $y = 2562.7x + 2487.1, t_w=1500 \text{ Pa}$

扣除壁滑移后的流变方程式

$$t = t_{yc} + k_c \dot{\gamma}^c$$

代入式(3), 积分得扣除壁滑移后的流动方程式为

$$\frac{4v_c}{R} = \frac{4n_c}{3n_c + 1} \left( \frac{t_w}{k_c} \right)^{1/n} \left( 1 - \frac{t_{yc}}{t_w} \right)^{(n_c+1)/n_c} \times \left[ 1 + \frac{2n_c}{2n_c + 1} \frac{t_{yc}}{t_w} + \frac{2n_c^2}{(n_c + 1)(2n_c + 1)} \left( \frac{t_{yc}}{t_w} \right)^2 \right] \quad (7)$$

取一组  $t_w$  值, 由式(5)得三种管径的  $4v/R$ , 由式(6)得  $4v_s/R$ , 代入式(2)得三种管径  $4v_c/R$ , 计算得平均值  $(4v_c/R)_{avg}$ , 将  $(4v_c/R)_{avg}$ 、 $t_w$  代入式(7), 拟合得  $t_{yc} = 108.01$ 、 $k_c = 1.4843$ 、 $n_c = 0.8680$  值, 扣除壁滑移后的真实流动为图 6 中的曲线 4, 三种管径对应的三组点  $(4v_c/R, t_w)$  在图 6 中曲线 4 附近。下面求曲线 4 和附近点的误差, 将式(6)和式(7)代入

式(2)得含壁滑移的流动方程式

$$\frac{4v}{R} = \frac{4n_c}{3n_c + 1} \left( \frac{t_w}{k_c} \right)^{1/n} \left( 1 - \frac{t_{yc}}{t_w} \right)^{(n_c+1)/n_c} \times \left[ 1 + \frac{2n_c}{2n_c + 1} \frac{t_{yc}}{t_w} + \frac{2n_c^2}{(n_c + 1)(2n_c + 1)} \left( \frac{t_{yc}}{t_w} \right)^2 \right] + \frac{4v_s}{R} \quad (8)$$

由式(8)得到的称为计算名义剪切速率  $(4v/R)_j$ , 与表 1 中实测的  $4v/R$  相对误差为

$$w = [(4v/R)_j - 4v/R] / (4v/R)_j \quad (9)$$

表 1 中三种管径的误差值  $w$  较小, 由此验证了式(3)即扣出壁滑移后任一管径的流动曲线重合, 建立了适应任一管径的流动方程式(8)。

在润滑脂集中润滑输送系统的设计中, 主要是确定在给定流量(或平均流速)下管路中的流动阻力, 即求式(8)中的  $t_w$  解, 一般有两种方法: 其一是图解法, 该方法偏差较大; 其二是求式(8)方程的解, 从理论上求  $t_w$  的精确解或近似解是可行的, 但实际上很困难。根据以上过程可得出式(5)与式(8)等效, 式(8)是通过壁滑移研究根据式(5)推导出来的, 并通过了试验验证; 反过来, 在试验范围内任取一直径得式(8)的方程, 取  $t_w$  的系列值代入式(8)得对应的  $4v/R$ , 将所得的  $t_w$ 、 $4v/R$  值代入式(5), 可拟合得式(5)的参数值。因此, 求解  $t_w$  问题可转化为求解 Herschel-Bulkley 流动方程式(5)的问题。

下面由式(8)求在 4.1~9.7 mm 管径范围内任一管径的 Herschel-Bulkley 流动方程式(5), 任选 5.9 mm 的管径代入式(8), 按上述方法拟合得式(5)中的参数值  $t_y=92.1357$ 、 $k=0.7996$ 、 $n=0.9156$ 。下面通过试验验证与式(5)的吻合程度, 12 时直径 5.9 mm 管径的实测  $t_w$ 、 $4v/R$  值见表 1, 将  $t_w$  代入式(8)中得计算名义剪切速率  $(4v/R)_j$ , 由式(9)误差值  $w$  见表 1, 可见总体误差较小。求任一管径的流动阻力即求解式(5), 由参考文献[8]的方法求式(5)的近似解, 令

$$f\left(\frac{t_y}{t_w}\right) = \left(1 - \frac{t_y}{t_w}\right)^{\frac{n+1}{n}} \left[ 1 + \frac{2n}{2n+1} \frac{t_y}{t_w} + \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \times \left(\frac{t_y}{t_w}\right)^2 \right] \approx \left\{ b \left[ \sqrt{a^2 + \left(1 - \frac{t_y}{t_w}\right)^2} - a \right] \right\}^{\frac{1}{n}}$$

由 4 个边界条件  $f(1)=0, f(0)=1, f'(1)=0$  和  $f'(0) = -(3n+1)/[n(2n+1)]$  解得  $a = n/\sqrt{(3n+1)(n+1)}$ ;  $b = \sqrt{a^2 + 1} + a$ 。式(5)的近似式为

$$\frac{4v}{R} = \frac{4n}{3n+1} \left( \frac{t_w}{k} \right)^{1/n} \left\{ (\sqrt{a^2+1}+a) \times \left[ \sqrt{a^2 + \left( 1 - \frac{t_y}{t_w} \right)^2} - a \right] \right\}^{1/n} \quad (10)$$

将式(9)化为关于  $t_w$  的一元二次方程

$$t_w^2 - \left( t_y + \frac{a}{b} g_n^2 \right) t_w + t_y^2 - \frac{g_n^2}{b^2} = 0$$

式中  $g_n = k \left( \frac{3n+1}{4n} \frac{8v}{D} \right)^n$

解一元二次方程得

$$t_w = t_y + \frac{a}{b} g_n^2 + \sqrt{\frac{a^2+1}{b^2} g_n^2 + \frac{2a}{b} t_y g_n^2} \quad (11)$$

式(11)是式(5)的近似解，而且与式(10)等同。

因为式(11)和式(10)等同，求近似解式(11)相对精确式(5)的偏差，相当于求近似解式(10)相对精确式(5)的偏差。偏差表示为  $w(n, a, t_y/t_w) = [4v/R - (4v/R)_w] / (4v/R)$ ，式中  $4v/R$  表示式(5)的精确式； $(4v/R)_w$  表示式(10)的近似解。对管径为 5.9 mm 的流动阻力进行验证，偏差值见表 3 ( $D=5.9$  mm,  $t_y=92.14$  Pa,  $k=0.7996$ ,  $n=0.9156$ )，总体偏差较小，但  $t_y/t_w$  接近 1 时偏差较大。由推导过程知近似解中的  $a$  值仅满足边界条件  $t_y/t_w=0$  和  $t_y/t_w=1$ ，在  $0 < t_y/t_w < 1$  开区间内有偏差，改变  $a$  值可改变在  $0 < t_y/t_w < 1$  闭区间内的偏差值，在参考文献[9]中通过三维优化计算，得出了满足工程应用偏差要求的  $a$  值。在  $t_y, k, n, D$  一定时，已知平均速度  $v$ ，由式(11)可方便地求出  $t_w$ 。

表 3 近似解与精确解的误差

壁面切应力 $t_w$ /Pa	误差 $w$ /%	壁面切应力 $t_w$ /Pa	误差 $w$ /%
93	27.01	140	3.34
94	21.23	160	3.07
95	17.67	200	2.13
100	8.28	400	0.48
105	3.54	600	0.20
110	0.72	800	0.11
120	2.09	1 000	0.07

## 4 结论

(1) 为研究润滑脂阻力特性的需要，设计研制了去除壁滑移的润滑脂研究的高精度管流阻力特性测试系统，针对该测试系统制定了合理的测试方法，以便分析影响阻力特性的壁滑移。

(2) 该系统能准确、方便地测试出润滑脂的阻力特性，由三种管径的实测数据验证了壁滑移速度  $v_s$  由管壁的粗糙度和材料决定，在相同管壁情况下不随管径变化；也验证了扣除壁滑移后与管径无关的真实阻力特性，适应于试验范围内任一管径。

(3) 根据润滑脂测量需要，设计研制了无孔穴误差的精确测压接头、传压活塞式脂压表和低压力波动润滑脂泵等，并组成了高精度润滑脂管路输送部分；研制了计算机对测试数据进行存储处理、分析计算以及显示、记录、打印和描绘的系统，通过测试表明其性能稳定、工作可靠和精度高，达到了预期的设计目标。

(4) 该管流阻力特性测试系统可以测得润滑脂的精确的阻力参数，为在集中润滑管道输送系统中，研究阻力特性、壁滑移减阻、合理地选择管径、管壁材料，减小管流阻力提供了理论基础；也为研究润滑脂有壁滑移存在的弹流润滑特性提供了理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 Rein S W. Solution of problems involving grease flow in straight pipe or tubing. NLGI Spokesman, 1967, 31(7): 131 ~ 132
- 2 Verhoeff A. Flow of Greases in pipes :The temperature limit for centralized systems. NLGI Spokesman, 1973, 37(7): 123 ~ 136
- 3 Cho Y I, Choi E. Rheology and hydrodynamic analysis of grease flows in a circular pipe. Tribology Transactions, 1993, 36(4): 545 ~ 554
- 4 Froishteter G B, etc. Calculation of hydraulic resistance in transport of lubricating greases through pipelines. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 1976, 12(1-2): 129 ~ 133
- 5 沈崇棠, 刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应用. 北京: 高等教育出版社, 1989
- 6 Hatzikiriakos S G, Dealy J M. Wall slip of molten high density polyethylenes. : capillary rheometer studies. Journal of Rheology, 1992, 36(4): 703 ~ 741
- 7 刘颖, 陈栋荣, 潘碧莲, 等. 用挤出物胀大等方法测量聚合物熔体的第一法向应力差. 北京化工学院学报, 1991, 18(1): 37 ~ 44
- 8 古宾 B E. 高粘高凝原油和成品油管路输送. 陈祖泽, 译. 北京: 石油工业出版社, 1987
- 9 Xu G Y, Lin X D, Zhang Y Z. The optimism of flow resistant approximate formula of Herschel-Bulkley fluid. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 16(2): 23 ~ 126

## STUDY ON RESISTANCE TEST OF THE FLOWING OF LUBRICATING GREASE IN PIPE

*Zhang Xiaoguang*

*(College of Mechanical & Electrical Engineering,  
China University of Mining & Technology,  
Xuzhou 221008)*

*Xu Jianjian*

*(Institute of Applied Physics, Nanjing University,  
Nanjing 210093)*

*Lin Xuedong*

*(College of Mechanical & Electrical Engineering,  
China University of Mining & Technology,  
Xuzhou 221008)*

**Abstract :** With the existence of the wall slip, the resistance testing principle is analyzed. The testing system and resistance calculation are also studied. To test the resistance characteristic

of lubricating grease and to eliminate the effect of wall slip, the flow equation without wall slip which is independent of pipe diameters is set up by applying the Mooney method. In order to reduce wall slip and non-coincidence of flow curves due to the factors such as viscoelasticity and thixotropy, the tube rheometer testing system and reasonable experimentation are established. Experiments have verified the validity of the flow equation established. The approximate solution for the resistance to the flow equation is obtained. The difference between approximate solution and precise solution is reduced by 3D optimized calculation. The study results will provide an academic and experimental foundation for pipe transportation of centralized lubricating system.

**Key words :** Lubricating grease Pipe-flow Wall slip  
Resistance characteristic Testing system

作者简介: 张晓光, 男, 1963 年出生, 博士后, 副教授, 江苏省仪器仪表学会理事。主要研究方向为智能检测仪器仪表、工业过程检测及控制装置、图像处理与模式识别。获省级科技进步奖 2 项, 专利 3 项, 发表论文 40 余篇, 出版专著 1 部。

E-mail : doctorzxc@163.com