

# 屈服假塑性凝胶模拟液 直圆管流变和流动特性分析

左 博, 张蒙正

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 通过理论分析和试验研究, 进行了某型凝胶模拟液在直圆管内的流变和流动特性研究。研究结果表明: 该凝胶模拟液具有明显的屈服应力; 由于屈服应力的作用, 直圆管中心明显地分为剪切流动区和柱塞流动区, 柱塞流动区半径与屈服应力成正比, 与压力梯度成反比; 当流量恒定时, 沿程压降随屈服应力的增大而增大; 当压力梯度保持不变时, 流量随屈服应力的增大而减小。

**关键词:** 凝胶模拟液; 屈服假塑性流体; 流变特性

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2009) 01-0045-06

## Analysis of rheological properties and flow characteristics of yield pseudoplastic gel simulation in tubes

Zuo Bo, Zhang Mengzheng

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** With theoretical analysis and experimental investigations, the rheological properties and flow characteristics of gelled propellants were analyzed in this paper. The results show that: the experimental gelled propellants have obvious yield stress. There are obvious shear flow and plunger-cylinder flow in the pipe because of yield stress. The radius of the plunger-cylinder is in direct proportion to yield stress and inverse proportion to pressure gradient. When the flux is constant, the pressure drop increases with the increase of yield stress. When the pressure drop is constant, the flux decreases with the increase of yield stress.

**Key words:** gelled propellants; yield pseudoplastic fluid; the rheological properties

收稿日期: 2008-07-29; 修回日期: 2008-10-10。

作者简介: 左博 (1982—), 男, 硕士, 研究领域为火箭发动机推力室设计。

## 0 引言

屈服假塑性凝胶模拟液具有明显的屈服应力, 需要施加一定的启动压力才能从贮箱中流出, 因此可以有效地防止推进剂从贮箱中泄漏。在简单剪切流中, 描述屈服假塑性流体的流变特性方程为 Herschel-Bulkley 模型 (以下简称 H-B 模型)。H-B 模型综合了宾汉和幂律两种流变模型的特点, 能较好地反映某些凝胶模拟液的流变特性。鉴于上述优点, 国外专门针对屈服假塑性凝胶模拟液, 进行了详细的流变和流动特性研究<sup>[1]</sup>, 得出了无量纲速度分布和柱塞流动区域。

## 1 流变特性分析

在非牛顿流体领域, 对屈服应力的测量方法较多, 较为常见的是使用流变仪进行测量。测量原理为: 非牛顿流体内部结构破坏前后, 剪切应力或剪切粘度随剪应变呈现非线性变化, 借此来判断屈服应力的大小十分准确和方便。文献 [1] 采用此方法测定了石蜡凝胶的屈服应力。本研究则采用文献 [2] 介绍的凝胶模拟液流变特性管路测量系统和方法进行了屈服假塑性凝胶模拟液屈服应力及流变参数的测定。

对于屈服假塑性流体剪应力与牛顿剪切速率存在以下关系<sup>[3]</sup>

$$\tau_w = \tau'_y + k'(\dot{\gamma}_{RW})^{n'} \quad (1)$$

式中,  $\tau_w$  为管壁剪应力, Pa;  $\dot{\gamma}_{RW}$  为牛顿剪切速率,  $s^{-1}$ ;  $\tau'_y$ 、 $k'$  和  $n'$  为拟和常数。

又由层流条件下, 幂律流体的壁面剪切速率为

$$\dot{\gamma}_w = \left( \frac{1}{4n} + \frac{3}{4} \right) \dot{\gamma}_{RW} \quad (2)$$

式中

$$n = \frac{d \ln \tau_w}{d \ln \dot{\gamma}_{RW}} \quad (3)$$

由于(1)式不满足(3)式的关系, 所以将(1)式

变形为  $\tau_w - \tau'_y = k'(\dot{\gamma}_{RW})^{n'}$ , 有下面两式成立

$$n' = \frac{d \ln(\tau_w - \tau'_y)}{d \ln \dot{\gamma}_{RW}} \quad (4)$$

$$\frac{d \ln \tau_w}{d \ln \dot{\gamma}_{RW}} = \left( \frac{\tau_w - \tau'_y}{\tau_w} \right) \frac{d \ln(\tau_w - \tau'_y)}{d \ln \dot{\gamma}_{RW}} \quad (5)$$

将(3)、(4)和(5)代入(2)可得屈服假塑性流体的壁面剪切速率计算式

$$\dot{\gamma}_w = \left( \frac{1}{4n'} \frac{\tau_w}{\tau_w - \tau'_y} + \frac{3}{4} \right) \dot{\gamma}_{RW} \quad (6)$$

式中,  $\dot{\gamma}_w$  为管壁剪切速率,  $s^{-1}$ ;  $n$  为流变指数;  $\dot{\gamma}_{RW}$  为牛顿剪切速率,  $s^{-1}$ 。

由(2)和(6)式可见屈服假塑性凝胶模拟液管壁剪切速率除与  $n'$  和  $\dot{\gamma}_{RW}$  有密切关系外, 还与壁面剪应力  $\tau_w$  和常数  $\tau'_y$  有联系。

采用凝胶模拟液流变特性管路测试系统, 进行屈服假塑性凝胶模拟液液流试验。其中试验管径  $d$  (mm) 为 4、6、8、10、12, 管长  $l$  (mm) 为 300、400、600, 试验温度  $t=22^\circ\text{C}$ , 试验测量点如图 1 所示。将试验数据整理成壁面剪应力  $\tau_w$  与牛顿剪切速率  $\dot{\gamma}_{RW}$  的关系, 如图 2 所示。

通过对图 2 中  $\tau_w$  与  $\dot{\gamma}_{RW}$  的关系按照(1)式进行最小二乘拟和, 可以得出:  $\tau'_y=45.66$ ,  $n'=0.291$ 。按照(6)式计算每个测量点的实际管壁剪切速率  $\dot{\gamma}_w$ , 再由壁面剪应力  $\tau_w$  可以得出测量流量条件下的管壁剪切粘度  $\eta_w = \tau_w / \dot{\gamma}_w$ , 对壁面剪切粘度与壁面剪切速率计算点整理如图 3 所示。

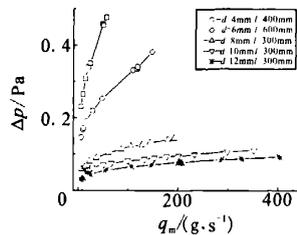


图 1 试验测量点

Fig.1 The experiment data

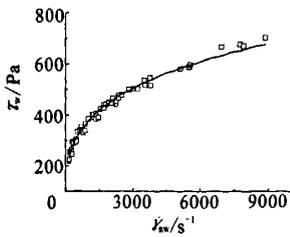


图 2  $\tau_w$  随  $\dot{\gamma}_{RW}$  的变化曲线

Fig.2 Distribution curve of  $\tau_w$  vs  $\dot{\gamma}_{RW}$

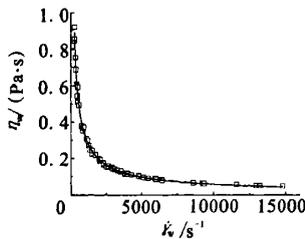


图 3  $\eta_w$  随  $\dot{\gamma}_w$  的变化曲线

Fig.3 Distribution curve of  $\eta_w$  vs  $\dot{\gamma}_w$

对  $\eta_w$  与  $\dot{\gamma}_w$  之间的关系使用最小二乘进行拟合, 可以得出该屈服假塑性凝胶模拟液在室温  $t=22^\circ\text{C}$  条件下的流变特性参数, 如表 1 所示。

表 1 凝胶模拟液流变特性参数

Tab.1 Rheological parameters of gelled propellant

$t/^\circ\text{C}$	$\tau_0/\text{Pa}$	$n$	$k/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	$\dot{\gamma}_w/\text{s}^{-1}$
22	51.36	0.304	33.18	200~15000

## 2 流动特性分析

### 2.1 数学模型的建立

对于幂律性凝胶模拟液, 文献 [4] 详细分析了它在直圆管内的流动特性。下面针对屈服假塑性凝胶模拟液, 分析其在直圆管内的流动特性。首先作以下假设: (1) 流动为轴对称、不可压、等温及定常; (2) 层流充分发展阶段; (3) 无壁面滑移及忽略质量力。采用柱坐标系  $(r, \theta, z)$ , 其中  $z$  为圆管轴线方向,  $r$  为管径方向。

文献 [4] 给出了柱坐标系下, 凝胶模拟液直圆管中一维、定常、稳定流动的动量方程简化式

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial z} (r\tau_r) \quad (7)$$

并且得出了任意半径处的剪切应力为

$$\tau_r = \frac{r}{2} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (8)$$

由 (8) 式可知, 剪切应力在轴线处为零, 管壁处最大, 在半径方向上成线性变化。

上面 (7) 和 (8) 式适用于任何流体。

屈服假塑性流体受力后不能立刻变形, 只有当外力足以克服屈服应力后, 才能发生剪切变形和流动。描述屈服假塑性流体流变特性的方程为 H-B 模型<sup>[5]</sup>, 方程为

$$\text{剪切流动区: } \tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad \tau > \tau_0 \quad (9)$$

$$\text{柱塞流动区: } \dot{\gamma} = 0 \quad \tau \leq \tau_0 \quad (10)$$

式中,  $\tau$  为剪应力, Pa;  $\tau_0$  为屈服应力, Pa;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $n$  为流变指数;  $k$  为稠度系数,  $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ 。

从 (9) 和 (10) 式可见, 在  $\tau \leq \tau_0$  的区域, 凝胶模拟液将不发生相对运动, 即以柱塞状整体向前流动; 所以, 屈服假塑性凝胶模拟液在管道内产生流动的条件为

$$\frac{\Delta p}{l} > \frac{2\tau_0}{R} \quad (11)$$

由 (8) 式可得出柱塞流动区半径  $r_0$  为

$$r_0 = \frac{2\tau_0 l}{\Delta p} \quad (12)$$

由 (8) 和 (12) 式还可得

$$\frac{\tau_0}{\tau_w} = \frac{\Delta p_0}{\Delta p} = \frac{r_0}{R} \quad (13)$$

式中,  $\tau_w$  为管壁剪应力, Pa;  $\Delta p$  为压降, MPa;  $\Delta p_0$  为屈服应力对应的屈服压降, MPa;  $l$  为管长, m;  $R$  为管子半径, m。

从 (12) 式知: 在相同  $\tau_0$  下, 随着压力梯度  $\Delta p/l$  的增大,  $r_0$  将逐渐减小, 剪切流动区范围将逐渐扩大; 在相同压力梯度下, 随着  $\tau_0$  的增大,  $r_0$  将逐渐增大, 柱塞流动区的范围将逐渐扩大。

从 (13) 式可以看出：柱塞流动区半径  $r_0$  和屈服压降  $\Delta p_0$  都正比于屈服应力  $\tau_0$ ；在半径  $R$  和屈服应力  $\tau_0$  不变的条件下，随着  $\tau_w$  的增大，则  $r_0$  逐渐减小，即  $r_0/R$  比值与  $\Delta p/l$  成反比例函数。

### 2.2 速度分布

从 H-B 模型可以看出，屈服假塑性凝胶模拟液在直圆管内流动时存在两个流动状态（即剪切流动区和柱塞流动区），不同流动状态其剪切速率的变化形式也不相同，所以分别对两个流动区内的速度分布进行分析。

(1) 剪切流动区 ( $r_0 \leq r \leq R$ ) 内的速度分布

对于剪切流动区内任意半径处的速度分布为

$$u_r = \int_0^u du = \int_r^R \dot{\gamma}_r dr \tag{14}$$

式中， $\dot{\gamma}_r = -du/dr$ 。

由 (8) 式可得  $\tau = (r/R)\tau_w$ ，对 (14) 式更换积分变量为

$$u_r = \frac{R}{\tau_w} \int_r^R \dot{\gamma}_r dr \tag{15}$$

将 (9) 和  $\tau_w = \Delta p R / 2l$  代入 (15) 式可得

$$u_r = \frac{n}{n+1} \left( \frac{\Delta p}{2kl} \right)^{\frac{1}{n}} \left[ \left( R - \frac{2\tau_0 l}{\Delta p} \right)^{\frac{n+1}{n}} - \left( r - \frac{2\tau_0 l}{\Delta p} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \tag{16}$$

由 (12) 式可将 (16) 式化简为

$$u_r = \frac{n}{n+1} \left( \frac{\Delta p}{2kl} \right)^{\frac{1}{n}} \left[ (R - r_0)^{\frac{n+1}{n}} - (r - r_0)^{\frac{n+1}{n}} \right] \tag{17}$$

当柱塞流动区半径  $r_0=0$ （即  $\tau_0=0$ ）时，上式可简化为幂律流体管内速度分布的计算式。

(2) 柱塞流动区 ( $0 \leq r \leq r_0$ ) 的速度分布

由 (10) 式可知，在柱塞流动区内，剪切速率为零，速度处处相等且等于柱塞区边界上的速度值，而且为管内最大速度  $u_{max}$ 。将  $r=r_0$  代入 (17) 式可得

$$u_{max} = \frac{n}{n+1} \left( \frac{\Delta p}{2kl} \right)^{\frac{1}{n}} (R - r_0)^{\frac{n+1}{n}} \tag{18}$$

由 (17) 和 (18) 式可得屈服假塑性凝胶模拟液管内流动时的无量纲速度分布

$$\frac{u_r}{u_{max}} = 1 - \left( \frac{r - r_0}{R - r_0} \right)^{\frac{n+1}{n}} = 1 - \left( \frac{R}{R - r_0} \right)^{\frac{n+1}{n}} \left( \frac{r}{R} - \frac{r_0}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \tag{19}$$

### 2.3 速度分布的影响因素

在半径为  $R$ 、管长为  $l$  和环境温度不变的条件下，由 (19) 和 (12) 式可见，对屈服假塑性流体无量纲速度  $u_r/u_{max}$  分布有影响的因素为：屈服应力  $\tau_0$ 、压力梯度  $\Delta p/l$  和流变指数  $n$ 。下面分别考察上述三因素对无量纲速度分布的影响。

(1)  $\tau_0$  对  $u_r/u_{max}$  的影响

在半径  $R=2\text{mm}$ ，压力梯度  $\Delta p/l=0.6\text{MPa/m}$ ， $n=0.304$  条件下，考察  $\tau_0=0, 50, 200, 400\text{Pa}$  四种情况下的无量纲速度分布，如图 4 所示。

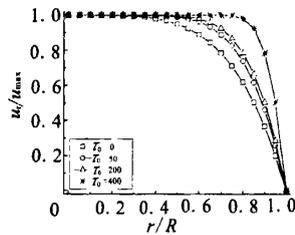


图 4 不同屈服应力下的速度剖面  
Fig.4 Non-dimension velocity profile at different yield stresses

从上图可以看出，随着屈服应力的增加柱塞流动区域更加明显，且当屈服应力增加到 600Pa 时，由 (11) 式可知，管内流动停止。另外，在靠近管壁处，屈服假塑性流体的速度梯度明显大于幂律流体的速度梯度。

(2)  $\Delta p/l$  对  $u_r/u_{max}$  的影响

在半径  $R=2\text{mm}$ ， $n=0.304$ ， $\tau_0=50\text{Pa}$  条件下，考察压力梯度  $\Delta p/l=0.1, 0.2, 0.5, 1.0\text{MPa/m}$  四种情况下的无量纲速度分布，如图 5 所示。

从图 5 可以看出，随着压力梯度  $\Delta p/l$  的减小，屈服假塑性流体的柱塞流动区域半径  $r_0$  在逐渐增大，直至  $r_0=R$ ，管内流动停止；相反，随着  $\Delta p/l$  的增大， $r_0$  在逐渐减小，直至  $r_0=0$ ，此时的速度剖面与幂律流体速度剖面重合。

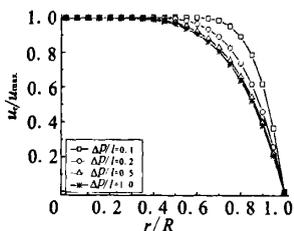


图 5 不同压力梯度下的无量纲速度剖面

Fig.5 Non-dimension velocity profile at different pressure gradients

(3)  $n$  对  $u/u_{max}$  的影响

在半径  $R=2\text{mm}$ ,  $\tau_0=50\text{Pa}$ ,  $\Delta p/l=0.6\text{MPa/m}$  的条件下, 考察  $n=0.1, 0.2, 0.3, 0.5$  和  $1.0$  五种情况下的无量纲速度分布, 如图 6 所示。

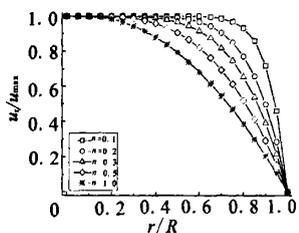


图 6 不同流变指数下的无量纲速度剖面

Fig.6 Non-dimension velocity profile at different rheological indexes

从图 6 可以看出: 随着流变指数  $n$  的减小, 无量纲速度剖面中的柱塞流动区半径  $r_0$  逐渐增大; 当  $n=1$  时, 就为宾汉流体管内流动无量纲速度剖面。

2.4 流阻分析

由于屈服假塑性流体存在剪切流动区和柱塞流动区, 应该分别计算两区域体积流量再相加

$$q_v = \int_{r_0}^R u 2\pi r dr + u_{max} \pi r_0^2 \quad (20)$$

将 (17) 和 (18) 式代入上式可得体积流量为

$$q_v = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{3n+2}{n}} \pi \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\Delta p}{kl}\right)^{\frac{1}{n}} d^{\frac{3n+1}{n}} f\left(\frac{\tau_0}{\tau_w}\right) \quad (21)$$

根据上式可以得出沿程压降为

$$\Delta p = 2^{3n+2} k \pi^{-n} \left(\frac{1+3n}{n}\right)^n l q_v^n \frac{1}{d^{3n+1}} f\left(\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^{-n} \quad (22)$$

其中 (21) 和 (22) 式中因子  $f(\tau_0/\tau_w)$  为

$$f\left(\frac{\tau_0}{\tau_w}\right) = \frac{3n+1}{n+1} \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^{\frac{n+1}{n}} - \frac{2n}{n+1} \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^{\frac{3n+1}{n}} - \frac{2n(3n+1)}{(2n+1)(n+1)} \frac{\tau_0}{\tau_w} \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^{\frac{2n+1}{n}} \quad (23)$$

将 (22) 式与文献 [4] 中的压降损失计算式对比发现, 屈服假塑性流体的压降损失为幂律流体压降损失的基础上乘以因子  $f(\tau_0/\tau_w)^{-n}$ 。 $f(\tau_0/\tau_w)^{-n}$  的存在反映了屈服应力对压降损失的影响。将 (23) 和 (13) 式代入 (22) 式整理后与文献 [5] 中压降计算式相同。在流变指数  $n=0.1, 0.2, 0.3$  条件下,  $f(\tau_0/\tau_w)$  和  $f(\tau_0/\tau_w)^{-n}$  随  $\tau_0/\tau_w$  的变化关系如图 7 和图 8 所示。

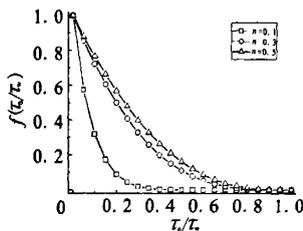


图 7  $f(\tau_0/\tau_w)$  随  $\tau_0/\tau_w$  的变化曲线

Fig.7 Curve of  $f(\tau_0/\tau_w)$  vs  $\tau_0/\tau_w$

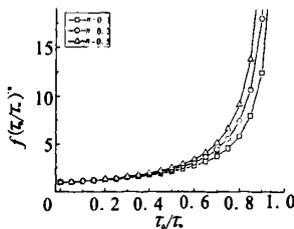


图 8  $f(\tau_0/\tau_w)^{-n}$  随  $\tau_0/\tau_w$  的变化曲线

Fig.8 Curve of  $f(\tau_0/\tau_w)^{-n}$  vs  $\tau_0/\tau_w$

(下转第 58 页)

(2) 选用高铬钢浸酸溶液可有效去除材料表面的氧化物或锈蚀物,且对产品没有明显腐蚀。

(3) 镀覆前增加预镀铜或预镀镍工序,均比直接镀暗镍的镀层结合强度高。从环保角度考虑,宜采用预镀镍工序。

(4) 基体表面通过吹细砂(I组细砂或II组混合砂),使表面充分粗化后,镀层与基体结合强度可显著提高。

## 5 结论

(1) 经过试验,确定的材料TaW10表面镀镍工艺流程为:吹砂(I组细砂或II组混合砂)-化学除油(15~30min)-浸酸-预镀镍-镀镍。

(2) 本工艺流程的产品经过了多次钎焊实践,通过SEM观测钎焊缝完全合格。

## 参考文献:

- [1] 吴全兴. 钎及其合金的用途[J]. 稀有金属快报, 2002, 23(3): 24-25.
- [2] 张强, 张锐. 1J50材料镀镍工艺研究[J]. 涂装与电镀, 2008, 6(3): 39-41.
- [3] 李运刚, 翟玉春, 高玉红. 钢铁材料表面镀钨工艺研究[J]. 材料保护, 2004, 37(7): 23-27.
- [4] 丁旭, 张德尧, 张廷杰. Ta-W合金的密度分析[J]. 中国铝业, 1997, 21(S): 34-36.
- [5] 周长虹, 王宗雄. 实用镀镍及镍合金工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [6] 张允诚, 胡如南. 电镀手册(第二版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [7] 王箴. 化工辞典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.

(编辑: 马杰)

(上接第49页)

从图7和图8可以看出:当 $\tau_0/\tau_w=0$ 时(即 $\tau_0=0$ )时, $f(\tau_0/\tau_w)=1$ , $f(\tau_0/\tau_w)^{-n}=1$ ,此时的体积流量和沿程压降与幂律流体相同;随着 $\tau_0/\tau_w$ 增大, $f(\tau_0/\tau_w)$ 逐渐减小, $f(\tau_0/\tau_w)^{-n}$ 逐渐增大,即流量逐渐减小,且压降逐渐增大;当 $\tau_0/\tau_w=1$ 时, $f(\tau_0/\tau_w)=0$ , $f(\tau_0/\tau_w)^{-n}$ 趋向于无穷大,即流动停止。

## 3 结论

通过对屈服假塑性凝胶模拟液液流试验的流变特性分析,以及屈服假塑性流体直圆管内流动特性的理论分析得出:

(1) 该屈服假塑性凝胶模拟液的流变特性参数为: $\tau_0=51.36\text{Pa}$ ,稠度系数 $k=33.18\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ,流变指数 $n=0.304$ 。

(2) 从无量纲速度分布可以看出,柱塞流动区半径随着屈服应力的增加而增加,随着压力梯

度的增加而减小。

(3) 当流量保持不变时,沿程压降随着屈服应力的增加而增加;当压力梯度保持不变时,流量随着屈服应力增加而减小。

## 参考文献:

- [1] Jens von Kampen, Klaus Madlener, Helmut K Ciezki. Characteristic Flow and Spray Properties of Gelled Fuels with Regard to the Impinging Jet Injector Type [R]. AIAA2006-4573.
- [2] 左博, 张蒙正. 凝胶推进剂直圆管中剪切速率与表观粘性实验研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(4): 12-15.
- [3] 徐桂云, 张永忠, 李浴. 润滑脂在钢管中流动的壁滑移研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(3): 241-246.
- [4] 杨伟东, 张蒙正. 凝胶推进剂模拟液直圆管流动特性初步研究[J]. 火箭推进, 2006, 32(3): 12-23.
- [5] 梁昌华, 张大鹏, 孙涛. 屈服幂律性流体管流流动及传热规律研究[J]. 管道技术与设备, 2004(1): 4-15.

(编辑: 陈红霞)