

水力学

泥漿水力学

苏联 Р.И. 希辛柯著

苏联 Р.И. 希辛柯著

52.76/286

石油工業出版社

泥漿水力学

苏联 Р·И·希辛柯著

石油工业出版社

內 容 提 要

本書系統地闡述泥漿以及物理-力學性質與泥漿性能相似的其
他結構液體的水力學原理。

本書可供鑽井工作者及專門從事研究結構液體的人員參考。

Р. И. ШИЩЕНКО

ГИДРАВЛИКА ГЛИНИСТЫХ РАСТВОРОВ

根據蘇聯國立石油燃料科技書籍出版社阿塞拜疆分社(АЗНЕФТЕИЗДАТ)

1951年巴庫版翻譯

統一書號: 15037·238

泥漿水力学

袁恩熙 陳家瑛譯

石油工業出版社出版 (地址: 北京六鋪炕石油工業部十号楼)

北京市書刊出版業營業證登記證字第083号

北京市印刷一厂排印 新华書店發行

787×1092 $\frac{1}{16}$ 开本·印張5 $\frac{1}{2}$ ·105千字·印1—3,100册

1957年4月北京第4版第1次印刷

定價(1957)0.90元

原 序

本著作力圖系統地敘述关于流变性質服从于施維多夫-宾汉定律的結構液体水力学的一系列的研究。著作的實驗部分主要是用泥漿进行的，并且，除了著者的研究之外，这里也敘述了或注意到很多發表过的与結構液体水力学有关的著作。本著作的所有結論，可应用于其物理-力学性質具有像泥漿一样特征的一切液体。

本著作編写时，工程师蘭采維茨卡和工程师德米特烈夫斯基曾給予大力帮助，本人对他們表示謝意。

Р. И. 希 辛 柯

目 录

原 序

緒 論	1
1. 水力学的定义	1
2. 液体的最重要的物理-力学性質	2
3. 馬克斯威耳摩擦定律	4
4. 非均質液体摩擦定律的实驗关系式	7
5. 作为亲水悬濁液之泥漿的基本概念	10
第一章 液体靜力学	12
1. 流体压力	12
2. 液体平衡方程式	14
3. 結構液体(塑性液体)平衡的个别情况	18
(1) 塑性液体在斜面上的平衡	19
(2) 塑性液体在連通器中的平衡	20
(3) 沉浮在塑性液体中的物体的平衡	21
第二章 塑性液体的流动	24
1. 流动的条件和状态	24
2. 結構液体流动方程式	26
3. 結構流态下水力損失的确定	29
(1) 圓管內的液流	29
(2) 兩平面間的結構液体流动	32
(3) 环形空間的結構液体流动	33
4. 結構液体流动情况下結構流态流动損失的驗證	34
5. 結構液体流动情况下的相似准数	41
6. 結構液体的紊流状态	45
7. 关于确定塑性液体紊流中水力損失的公式	49
8. 計算管路中塑性液体水力損失的新公式	58

9. 环形截面管中的泥浆流动	63
10. 局部阻力	65
11. 泥浆沿溝槽的流动	71
12. 液体经过孔口的湍流	75
13. 泥浆经过侧壁底部管咀的湍流	80
14. 泥浆经过堰的流动	81
15. 水击	83
第三章 塑性液体绕过固体的流动	90
1. 液体和固体的相互作用定律	90
2. 塑性液体绕过固体的流动	97
3. 用泥浆流带出鑽碎的岩屑	106
第四章 泥浆的物理-力学性质及其测定法	109
1. 泥浆的粘度	109
2. 测定常数 η 及 τ_0 的毛细管方法	111
3. 用同轴圆筒仪测定常数 τ_0 及 η	118
4. 基于薄板移动原理的仪器	125
5. 标准野外粘度计 (СПВ)	128
第五章 油井注水泥的水力计算	130
1. 泥浆比重的影响	136
2. 泥浆起始流动性的影响	136
3. 环形空间中流速的影响	138
参考文献	140
中俄技术名词对照表	143

緒 論

1. 水力学的定义

水力学是研究液体的力学性質及其平衡和运动規律的实用科学。水力学作为一种实用技艺來說，产生在很古的时候；但仅在十八世紀丹尼尔·伯諾利和辽奥納达·欧拉的著作奠定了液体力学的理論基础之后，它才开始成为一門科学發展起来。

最初的时候，理論流体力学的發展超过了实用水力学的發展。但是在大多数的情形下，流体力学的理論不能直接地应用于实际。因此，实用水力学就在实验的基础上开始相当快地發展起来了。

大約在一个世紀的期間，水力学虽然順利地發展着，但是还仅限于研究水的运动規律，因为首先引起当时工程上注意的仅仅是广闊散佈着的水。后来，在工程的进展中，由于实际的需要，水力学才漸漸地扩大了研究范围，包括了石油及其他各种油类等粘性液体运动的研究。

牛頓首先研究了粘性液体水力学，并得出了液体内摩擦力（粘度）定律。

由于斯托克斯、納弗埃、雷諾、泊謨叶等人的工作，粘性液体水力学得到了發展。

不久以前，工業上开始了另一类液体的应用。这类液体，就其力学性質来看，与服从牛頓粘度定律的普通粘性液体不同。为了区别于“普通”粘性液体，把这种“異常”粘性液体称之为“非牛頓”液体。这类液体属于兩相液体，如膠体溶液、悬濁液、油膏等。

本著作研究后一种液体的平衡和运动的規律，并且試圖建立

不服从牛頓定律之液体的水力学。著作中的实验部分主要是基于著者在泥漿方面的研究。著作中的所有結論都可以应用到与泥漿粘度有着同样特性的液体中去。

2. 液体的最重要的物理-力学性質

如所週知，組成質点具有極大的流动性且体积几乎不变的物体被称为液体。这两种性質是确定液体自然本性的基本性質；而具有絕對流动性和完全不可壓縮性的理想状态的液体被称为理想液体。

大家知道，几乎所有的平衡情况和許多与液体流动有关的現象，都可以在理想液体的力学理論基础上，很准确地計算出来。

但是，这只限于粘滯性作用(即阻力)不大的情形。而大多数的实际液体流动的情况，是不能在理想液体流动的理論基础上，很准确地計算出来的。它还必須考虑到实际液体流动时所产生的阻力。

实际上，液体質点虽然具有極大的流动性，但是这种流动性并不是絕對的。也就是說，由于質点之間相互的移动，液体要消耗若干能量。

液体的这种性質称为粘滯性或內摩擦，是液体流动时产生阻力的基本原因。

牛頓首先研究了液体的粘滯性問題，并且得出了液体內摩擦的基本定律。定律的內容如下：

1. 具有已知流速的相对流动的兩層液体之間的相互作用力，和液体的种类有关，和液体流动的相对速度成正比，和兩液体層的面积成正比。

2. 兩層液体之間的相互作用力和压力無關。

由于在我們所研究的情况下，液体中的流速由一層到另一層的变化是連續的，所以沿运动的法綫方向的流速梯度可以用来量

度液体層与層之間的相对速度。

令 dn 为法綫增量, du 为流速增量, f 为液体層的面积, 以及 T 为層与層之間的相互作用力。則我們可以写出牛頓 內摩 擦定律的数学表示式

$$T = f\eta \frac{du}{dn}, \quad (0,1)$$

式中 η 为內摩擦系数, 亦被称为液体的绝对粘度系数 (常簡称为绝对粘度或粘度——譯者註), 它和液体的种类有关。

令 式中 $f=1$ 及 $\frac{du}{dn}=1$, 則

$$T = \eta,$$

由此可見, 绝对粘度系数在数值上等于 $\frac{du}{dn}=1$ 时液体層單位面积上的作用力。

如果層与層之間沿流速法綫方向 1 公分距离上的流速变化为 1 公分/秒, 而 1 公分²的液体層面积上的作用力为 1 达因, 則此时的粘滯系数被用来作为绝对粘滯系数的單位。这种粘滯系数的單位称之为泊。

对于大多数的均質液体來說, 公式 (0,1) 所表示的牛頓定律完全被証实了, 至于定律的第二方面, 即液体的粘滯系数与压力無关的說法, 只有在压力变化不大的情况下, 才可近似地認為是正确的, 因为試驗表明, 绝对粘滯系数是随着压力的增加而变大。

对于非均質液体來說, 例如膠体溶液和悬濁液, 由于其中存在着固相, 所以內摩擦現象是相当复杂的, 并且不服从于牛頓定律。

固相的悬濁顆粒影响着整个体系的粘度。体系中單位体积內固相顆粒的含量越大, 則其粘度也越大。以下的情况是特別需要強調的, 即溶液中固相的出現不仅使粘度增加, 而且还要改变表

示这种現象的定律。

由以上的公式(0,1)不难得出如下的結論：一般液体在其他条件相同的情况下，切应力与層与層之間滑动的相对速度成正比。从数学上較准确地來說，这种道理可以被描述为：層与層之間無穷小的相对移动速度对应着無穷小的切应力。

对于均質的粘性液体的緩慢流动來說，基于牛頓定律所得出的水力阻力的理論計算是符合于实验結果的。

而对于非均質液体——悬濁液及膠体溶液——所进行的观察表明，它与均質液体有着显著的区别。其基本差別如下：

1. 非均質液体的粘度似乎随着流动速度的改变而改变，并且当流量增大时，水力阻力的增加較之均質液体来得緩慢。

2. 非均質液体在静止状态时也具有切应力。后一种性質导致出由实验观察而得的一系列重要現象。例如，这种液体的自由表面不仅在流动的时候可以傾斜；同时，在这种液体中，比液体比重大得多的固体也可以处于悬浮状态。

無論这些非均質液体是处于静止状态还是流动状态，研究者们早已把注意力集中在上述問題以及其他許多現象上了。因此，許多作者已經提出了有根据的实验关系，用来确定与之类似的液体的內摩擦特性，并借以代替牛頓定律。

3. 馬克斯威耳摩擦定律

具有彈性并且在静止状态形成結構的液体，可以采用馬克斯威耳的一般关系式[1]。这个式子表示彈性与粘滯系数的关系。

設 τ ——应力， s ——应变，以及 N ——彈性系数。

显然，彈性应力

$$\tau = Ns. \quad (0,2)$$

对于時間微分，得：

$$\frac{d\tau}{dt} = N \frac{ds}{dt}. \quad (0,3)$$

当有粘滯性存在时，馬克斯威耳假設应力要随着時間以某速度減小，該速度与应力成正比，且与物体的性質有关。基于这个假設，并且注意到方程式(0,3)，則应力变化的速度可以表示如下：

$$\frac{d\tau}{dt} = N \frac{ds}{dt} - \frac{\tau}{T}, \quad (0,4)$$

式中 T ——与物体特性有关的常数，被称为馬克斯威耳張弛週期。

对于稳定流动来說：

$$\frac{ds}{dt} = \text{常数}.$$

当 $t=0$ 时， $\tau=\tau_0$ ，將方程式(0,4)进行积分，得：

$$\tau = NT \left(\frac{ds}{dt} \right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}.$$

方程式的兩边各乘以 y ——二液体平行層之間的距离，并且

注意到 $y \frac{ds}{dt} = \frac{dx}{dt}$ ，得：

$$y \frac{ds}{dt} = \frac{dx}{dt} = v,$$

式中 v ——应变速度。

$$\text{最后} \quad \tau y = NT' \frac{dx}{dt} + y \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}, \quad (0,5)$$

乘积 NT' 相当于粘滯系数，即

$$\eta = NT'.$$

利用这个关系可以确定彈性物質的粘滯系数。

將方程式(0,5)对 y 微分，則得摩擦定律的一般表示式：

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}.$$

上式中有三个表示液体物理特性的常量参变数： η ——粘滯系数， τ_0 ——極限剪应力和 T ——張弛週期。

根据以上的一般摩擦定律，所有液体可以按照力学性質分成三类：

1. 牛頓液体，其中 $\eta \neq 0$, $\tau_0 = 0$ 及 $T = 0$ 。在这种情况下，方程式(0,5)得出牛頓定律：

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}.$$

2. 前面討論过的 $\eta \neq 0$, $\tau_0 \neq 0$ 及 $T = \infty$ 的液体，例如形成結構的膠体溶液及悬濁液。在这种条件下，方程式(0,5)得出：

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} + \tau_0. \quad (0,6)$$

宾汉(1919年)根据实验結果得到类似的表示式；布金岡运用它得出了理論上的結論。現在，这个关系式(0,6)常被称为宾汉定律。

但是应该指出，方程式(0,6)可以作为 Ф.И. 施維多夫于1889年^①所得出的一般关系式[8]的个别情况。施維多夫將动物膠的溶液放在同軸圓筒仪中进行試驗，并且在理論的基础上分析了試驗結果。因此，关系式(0,6)最后被称为施維多夫-宾汉定律。

3. 除去上面两种極端的情形以外，还有 $\eta \neq 0$, $\tau_0 \neq 0$ 以及 $T \neq 0$ 的液体。在这种条件下，方程式(0,5)得出了切应力与有关液体特性之参变数的关系。这种液体被称为非牛頓液体。由于該式的复杂性，所以一般并不將其用于理論推导，而代之以更簡單的实验关系式。

① 見 Н.В. Тябин, колл. журн., в VI 1949Г.

4. 非均質液体摩擦定律的實驗关系式

實驗表明，許多懸濁液和膠体溶液的粘滯系数并不像牛頓液体那样保持常数，而是随着流速梯度的增加而变小。

$$\eta = f\left(\frac{dv}{dn}\right). \quad (0,7)$$

直到現在，即使对同一物質的任何濃度范围，人們也还没有找到这个函数的数学表示式以及 η 与分散程度的关系。虽然实验表明相似的关系是存在的，但是由于現象的形形色色和复杂性，看来在目前的科学情况下，想通过理論上的整理而建立一般的理論是不可能的。各研究者所确定出来的公式常常只能适用于一定濃度范围内的某些物質。

下面討論其中几个最有名的关系式。

1. 如上所述，宾汉于 1919 年提出了确定液体流过毛細管的流量公式[2]

$$Q = k(p + p_0) \quad (0,8)$$

式中 Q ——每秒的流量：

k ——比例系数；

p ——压力；

p_0 ——相当于管路中液体开始流动时的压力。

布金岡对这个公式进行了理論分析，結果得出有名的摩擦定律表示式(0,6)

$$\tau = \eta \frac{dv}{dn} + \tau_0, \quad (0,6)$$

如果仿照牛頓定律，則認為：

$$\tau: \frac{dv}{dn} = \eta', \quad (0,9)$$

① 与本書的第31頁公式(2,6)进行比较来看，括号内的加号似乎應該是減号。

式中 η' 可以認為是某一有效粘度。那么在这种情况下，將會很容易获得粘度与流速梯度的关系。因此，把方程式(0,6)除以流速梯度可得：

$$\eta' = \eta + \frac{\tau_0}{\frac{dv}{dn}}$$

显然，随着流速梯度的增加，有效粘度將趋于其極限值 η 。

因此，如果在各种不同的粘度計中測定悬濁液或膠体溶液的粘度时，則所測得的將为有效粘度。而有效粘度的数值是与粘度計的型式及尺寸有关的。

2.同时，在膠体溶液的粘度計中，很通用的公式有奥斯特瓦耳德公式[4]及傑-維耳公式[5]。对于流过毛細管的流量，这些公式有以下形式：

$$Q = k p^m, \quad (0,10)$$

式中 k 及 m ——均为与仪器的尺寸及液体性質有关的常数。

这个公式已經被許多研究者用試驗証实了，它符合于大多数膠体溶液的試驗数据。

在通常的关系式(0,10)中，有效粘度可以用下式表示：

$$\eta' = \frac{k_1}{p^{m-1}}, \quad (0,11)$$

式中 k_1 ——常数。

虽然如此，根据方程式(0,11)表示的摩擦定律仍然不能很完滿地說明相当多的現象。此外，这个表示式还和管路中液体的流动情况有关，并且由此写出作为流速梯度之函数的摩擦定律是很复杂的，因为这必須知道流速沿截面分佈的規律，而流速分佈規律本身又与有效粘度变化的特性有关。

3.菲利波夫[6]和埃伊贊施季茨[7]提出了悬濁液及膠体溶液的摩擦定律如下式：

$$\eta' = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{p^2}{\gamma^2}}, \quad (0,12)$$

式中 η_0 及 η_{∞} ——在流速梯度的作用下，粘度的边界值；

γ ——常量系数。

借助于特殊的圖表，在粘度計中可以測定常数 η_0 、 η_{∞} 及 γ 。

菲利波夫的理论符合于許多“結構液体”的試驗結果，例如潤滑脂等等。但是，由于有效粘度表示式的复杂性，所以將它应用于理論推导是很困难的。

4. 許多研究者，如波尔焦尔[8]及法罗烏[9]等曾經提出，把作为流速梯度之函数的有效粘度表示如下式：

$$\eta' = \eta \left(-\frac{dv}{dn} \right)^{-m},$$

式中 m 及 η ——与液体性質有关的常数。

詳細的試驗研究表明，这个关系式仅仅当某些膠体溶液在濃度較小时才能完滿地符合于試驗。随着濃度的增加，常数 m 及 η 的数值很明显地随着所用粘度計型式及尺寸的不同而發生变化。这說明了这些常数是流速梯度的函数。

对于不服从牛頓定律的液体來說，各个作者所得出来的关系式还远不能完滿地說明摩擦定律。由于这些关系式相当复杂，或者是在許多情况下不能符合于实验，因此在这里就不一一列举了。

对膠体溶液和悬濁液摩擦定律的各个表示式进行了分析，并且將它們与实验結果比較以后，应当承認施維多夫-宾汉摩擦定律較之其他的定律更符合于現象的物理本質。这些現象是形成結構的液体(例如旋轉鑽井时所用的泥漿以及其他亲水悬濁液)在流动和靜止时所發生的。

因此，今后在叙述所有論証的时候，將以方程式(0,6)所表

示的施維多夫-賓漢定律作為基礎。

此後，在敘述實際液體的靜力學和動力學的基本規律以及其力學性質的測定方法時，將要指出選擇賓漢內摩擦定律是有實驗根據的。該定律是結構液體水力學的基础，或者說它是泥漿水力學的基础。

5. 作為親水懸濁液之泥漿的基本概念

如上所述，現在的任务在於敘述其粘度不服從牛頓定律之液體的水力學原理，這種粘度可以相當準確地以施維多夫-賓漢公式表示出來。此種液體中常用的一種就是旋轉鑽井時所用的泥漿。本書以後所敘述的各種試驗，基本上是用這種泥漿進行的。因此，現在先概略地描述一下作為膠體體系之泥漿的現代物理化學概念。

泥漿是粘土顆粒在水中的懸濁液，這些顆粒的粗細程度不同。

眾所周知，懸濁液與膠體溶液的區別僅僅在於其中顆粒的大小，也就是說，在於分散的程度或粉碎的程度。當體系中顆粒的大小為0.2—0.1公厘時，通常被認為是懸濁液。而在膠體溶液中，顆粒大小的範圍則為0.1微米至1.0微微米。當溶液有着更高的分散度時，稱為分子溶液。在這三種分散體系之間並沒有原則上的區別，它們的性質隨着分散度的改變而連續不斷地變化着。因此，在懸濁液和膠體溶液之間並沒有固定的界限。

在一般的鑽井泥漿中，顆粒大小的範圍為200微米（有時甚至更大些）至0.01微米（真正的膠體顆粒的大小）。

在泥漿中，膠體顆粒和近似於膠體的顆粒越多，則泥漿越不易沉淀，並且較多的大顆粒也越容易在泥漿中處於懸浮狀態。

粘土顆粒之親水性，即其與水有很好的濕潤性，是泥漿的穩定性和極少沉淀的基本原因。因為粘土分子與水分子之間的吸引

力大于水分子本身之間的吸引力，因此粘土顆粒在泥漿中为水所湿润，最后水分子被吸附在粘土顆粒的表面上，在每个粘土顆粒的周圍形成了液体薄膜。此液体薄膜的厚度与許多因素有关，如溶液中离子的濃度、离子的种类、以及粘土的种类等。

这样一来，泥漿成分中的液体就可以被分为被吸附着和自由的两种，并且被吸附着的液体按其物理性質有別于自由的液体。

將細小的粉末在不同分散度之液体中进行比重測定时，会得出不同的比重，这与所用的液体有关。并且，在分散度較大的液体中，其比重較大。

今將傑-維耳在不同的液体中（在氫离子濃度 P_H 不同的水中，以及在無水的中性液体中）測定維耳金尼特矿比重[8]的試驗結果列举如下：

$P_H=11.6$ 的水	$P_H=3.4$ 的水	硝基苯
比重——2.85	比重——2.76	比重——2.71

同时，也將作者本人在不同的液体中測定鮑格巴格露天采矿場之高膠質粘土比重的大致試驗結果列举如下：

$P_H=7.9$ 的水	$P_H=5.3$ 的水	苯
比重——2.77	比重——2.65	比重——2.63

这种情况可以被解釋为，由于顆粒边層中的液体挤压得很紧密，以致使得这些液体的比重增大了。顆粒边層处粘度的显著增加也就是由于在其周圍有着較高压力的关系。其吸附边層压力的大小可以达到几千个大气压。此压力随距离而很快地降低（約按七或八次方下降）。虽然，引起粘度增高的边層并不很厚，約为 0.001 公厘，但是边層对于体系中粘度的影响無疑是存在的。

切尔察格的試驗[10]表明，紧靠顆粒边層处的粘度一般要超过水的数百倍。

由于以上所指出的液体形成吸附边層的特点，研究者们[5]