

# 岩石的渗透特性

(苏) A. A. 培克

目前在综合研究岩石的物理机械性质时确定岩石的孔隙度和渗透率是必要的。孔隙度的大小是单位体积岩石中孔隙的数量特征和统计数据，渗透率是确定气流通过孔隙介质的渗透能力。显然，一般地看来渗透率决定于有效孔隙度的大小和孔隙空间的结构。

现代文献中企图根据岩石的孔隙特征计算岩石的渗透率。从水动力学观点来看水流通过某些导管可以是紊流，层流和絮流(在微毛细管内)。这说明了在分析通过天然孔隙介质——岩石的渗透作用时这些规律是可以应用的。

层流的特征是流线位置是平行的。在定型运动时，流速是按抛物线的形状分布的，这个关系用 Пуазейля 规律表示

$$\frac{\Delta P}{l} = \frac{8\mu}{r^2} V_*^2 \quad (1)$$

$\frac{\Delta p}{l}$ ——渗透管道上单位长度的压降(克/厘米<sup>2</sup>)

$l$ ——管道长度(厘米)

$\mu$ ——渗透液体的粘度(克·秒/厘米<sup>2</sup>)

$V_*$ ——渗透速度(厘米/秒)

$r$ ——管道半径(厘米)

流速增加可由层流变为紊流，而且对于每个管道来说这个转变是明显地突变的，它明显地表现在速度——液压损耗曲线图中(图 1)。

没有任何根据可以认为在天然的孔隙介质中渗透时各个管道(在单位长度  $ds$  上)内的这种转变会变得不十分显著的。同时根据在人工介质内渗透时，从层流变为紊流的大量实验资料也可看出这一点，尤其是在天然孔隙介质的整个样品范围内渗透时递进更明显。取自 Г. Ф. Требин (1959) 的著作里的图表(图 2)明显地说明了这种逐渐过渡的特征，标志液流类型的  $\lambda$  和  $R_0$  具无因次参数。他的结论仅说明二者

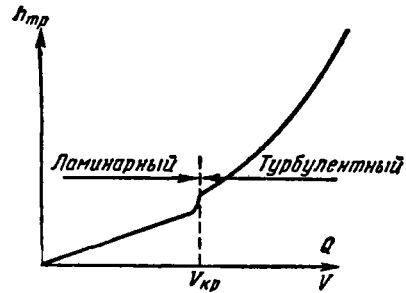


图 1 由于渗透速度的增加，层流过渡到紊流

$V$ : 渗透速度公分/秒。

$Q$ : 液体流量公分<sup>3</sup>/秒。

$hmp$ : 液体的损耗 1/cm。

之间具反比关系:

$$\lambda = \frac{a}{R_0} \quad (2)$$

与管道液流相似通常  $a = 64$

$$\lambda = \frac{64}{R_0} \quad (3)$$

根据本身的物理性质， $R_0$  说明流动压力与应力摩擦的关系，这里  $R_0$  是判断相似性的主要标准。几何学和运动学方面的相似流对流动的相似性来说  $R_0$  数必须相等，因此对一定的管道来说  $R_0$  体的大小可指明紊流与层流的流动特征。使层流变为紊流的  $R_0$  值为  $R_0$  的临界值，当  $R_0 > R_{0\text{临界}}$  则为紊流； $R_0 < R_{0\text{临界}}$  时则为层流。

现在来研究一下偏离线性渗透规律的基本原因。

显然最一般的原因应当是平均渗透速度，也就是每个孔隙通道的渗透速度，在这种情况下流动特征受研究物质的孔隙通道结构的许多因素所影响。这些因素如 Г. Ф. Требин 所指出的可分为四类。

1. 孔隙通道截面与断面的突然变化。

2. 作为层流特征的流速断面呈抛物线形状的段落的存在与否。

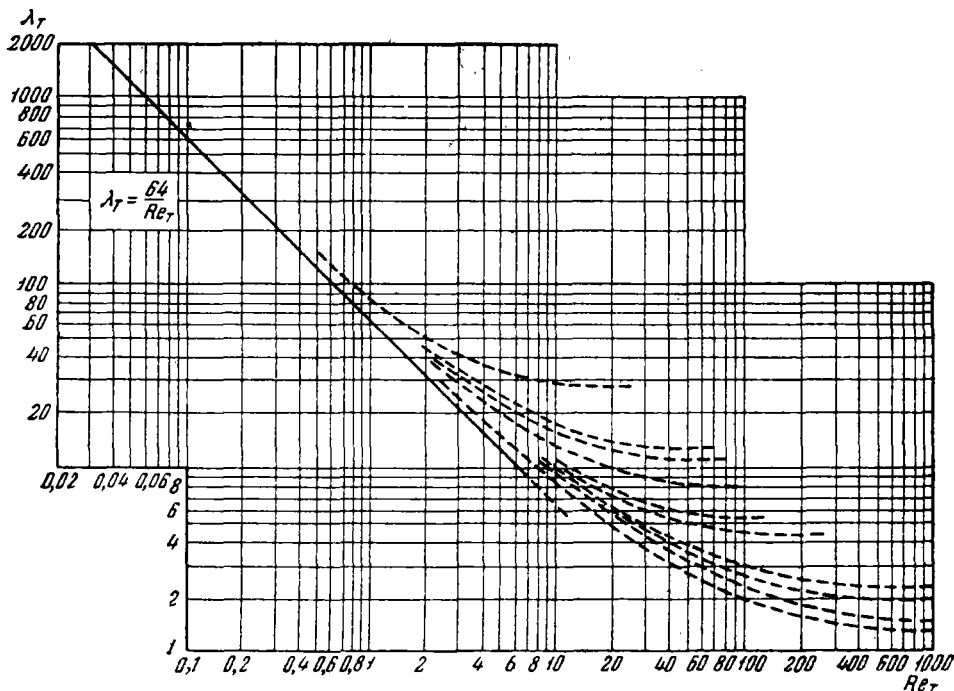


图2 根据液体和气体在孔隙介质中渗滤情况研究的实验资料  $\lambda_r$  和  $Re_\tau$ (管道)的关系 (根据 Г, ф, Мребин1959)

$\lambda_r$ (管道), 水力阻力系数。

$Re_\tau$ (管道), 雷诺数。

3. 在急转弯或突出部分等地方流动, 遭到破坏后所产生的干扰。

4. 介质孔隙大小的不同。

看来最后一个因素是主要的, 因为孔隙度的不同决定了不同孔径的孔隙通道的渗滤速度。

现在可以象 Г. Ф. Требин (1959) 那样把通过孔隙系统的液流看作类似于通过具有接近一个单位粗糙度的粗糙管道系统的液流。粗糙度被理解为管道中凸起部分对管道直径的比值。

即 
$$\frac{k}{d_0}$$

式中  $k$ ——凸起值,  $d_0$ ——管道直径。

在实际计算中运用的天然孔隙介质粗糙度等于 0.9, 没有将由于不同直径孔隙的渗滤速度和“孔隙通道”概念所引起的其余的问题考虑在内, 在这样情况下粗糙度等于一个单位 (见公式 9)。

在水利工程学上已经做了解决粗糙管道流动规律的专门实验, 对于我们特别有意义的是 И. И. Никурадзе 工程师的实验, 他研究了在人工粗糙管道中的流动。他将一定大小的颗粒粘附在管壁上, 其粗糙度变化为  $\frac{k}{d_0} = \frac{1}{30}$  到

$\frac{k}{d_0} = \frac{1}{1000}$ 。获得的结果以  $\lg(1000\lambda) - \lg Re$  为座标构成插图(图3), 从这 И. И. Никурадзе 得出下列结论。

正如 И. И. Никурадзе 指出的可以得出下面结论。

1. 当直线流动时粗糙度对渗滤流动阻力没有影响。
2.  $Re_{临界}$  不取决于粗糙度。
3. 当  $Re_c$  再大时  $\frac{k}{d_0} - \lambda_r$  不再取决于  $Re_c$ ,

$\frac{k}{d_0}$  变成固定的了。

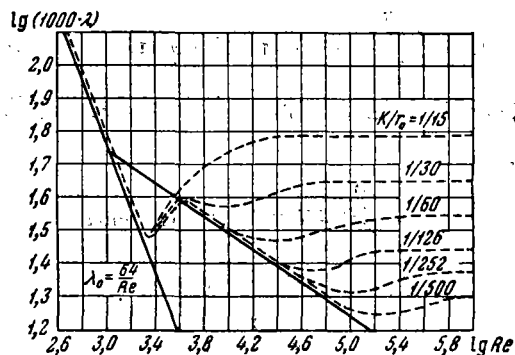


图3 在人工造成粗糙的管道中层流变为紊流的转折点(根据 И. И. Никурадзе)

λ——水力阻力系数, Re——雷诺数,  
R——凸起的高度 cm, r——半径 cm。

根据 И. И. Никурадзе 资料临界雷诺值等于  $R_{e\text{临界}} = 2000$ 。

现在试图探讨一下其实际意义。多孔介质的孔隙直径是在很大的范围内变化的。让我们把样品中每个单位体积内的孔隙特征看作与整个样品是一样的。这样在单位长度上的压力梯度时将是常数

即 
$$\frac{\Delta P}{l} = \text{常数}$$

水力损耗的基本公式为

$$h_{tp} = \frac{\Delta P}{r} = \lambda(T) (\text{Л}) \frac{l}{d} \frac{V_{\phi}^2}{2g} \quad (4)$$

式中  $r$ ——渗滤液的比重  $\text{g/cm}^3$

λ——水力阻力系数

$V_{\phi}$ ——在导体中的流动速度 cm。

$d$ ——管道直径 cm。

$g$ ——重力加速度  $\text{cm/秒}^2$

这个公式在紊流或层流中运用时仅 λ 值不同。对于层流来说就是 Пуазейля 公式

$$\frac{\Delta P}{l} = \frac{8\mu}{r^2} V_{\phi}$$

把  $\frac{\Delta P}{l}$  当作常数, 得出,  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad (5)$

目前, 详细地描述各种类型岩石的孔隙度的区别的文献还不太多。

在一定程度上可以认为管道直径的大小差别接近于:

$$\frac{r_{\text{max}}}{r_{\text{min}}} = 10^3 \sim 10^4$$

$$\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} = 10^6 \sim 10^8$$

考虑到这种关系可以肯定地说在小的直径孔隙中渗滤速度是极小的。如果流过一定直径的毛细管的液流与半径的四次方成正比, 那么

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{r_1^4}{r_2^4}$$

很容易看出孔径小于上述实验的岩石, 实际上不影响岩石渗透率。

这种设想是符合于层流条件的, 但是应该注意到在不同直径孔隙通道中其渗滤速度是十分不同的, 只是在满足于 Пуазейля 定律的部位, 即层流稳定的区域, 这一设想才成立。

让我们把经过孔道半径  $r$  的渗滤看作类似于经过同样半径毛细管的渗滤, 此时  $r < 10^{-5}$  (对气体) 将观察到絮流或分子运动

$$V_{\phi} = \frac{8}{3} \cdot \frac{\Delta P}{l} \cdot \frac{r}{P} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \quad (6)$$

式中  $\rho$ ——渗滤液的密度  $\text{g/cm}^3$

$V_{\phi}$ ——渗滤速度 cm/秒

$l$ ——毛细管长度 cm

$\frac{\Delta P}{l}$ ——渗滤液在单位长度路途中的压力

降  $\text{n/cm}^3$

$M$ ——分子量

$R$ ——气体通用常数 ( $8.314 \cdot 10^4$ )

$T$ ——过程中的绝对温度

$r$ ——毛细管半径 cm

因此在微毛细管中流动速度直接与毛细管半径成正比。对比公式(1)和(6)可看出孔径对于分子流的影响比较小, 尽管还有影响, 但是分子流的速度却比层流大, 这是由于参数的不同。在上述实验条件下对层流来说在  $r > 10^{-5} \text{cm}$  到  $r < r_{\text{临界}}$  的孔隙中是流动稳定的。

当层流运动变成紊流时, 毛细管半径可以找到

$$R_e = \alpha \frac{V_{\phi} \cdot r}{r}; \quad (7)$$

$$V_{\phi} = \frac{\Delta P}{l} \frac{r^2}{8\mu};$$

$$R_0 = \frac{\Delta P}{l} \frac{r^3}{4\mu V} \cdot \text{认为 } R_{e\text{临界}} = 2000$$

$$r_{\text{临界}} = 20 \sqrt[3]{\frac{\mu V}{\Delta P/l}} \quad (8)$$

式中  $\mu$ ——绝对粘度  $\text{cek/cm}^{-2}$   
 $r$ ——运动粘度  $\text{cm}^2\text{cek}^{-1}$

在孔隙中当  $r > r_{\text{临界}}$  流动将是紊流。

从比较简单的 A. Д. Альтшуля 公式求  $\lambda_t$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_t}} = 1.8 \lg \frac{d}{k} \quad (9)$$

将  $\lambda_t$  代入公式(4)中得到

$$h_{tp} = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{1}{\left(1.8 \lg \frac{d}{k}\right)^2} \frac{V_{\phi}^2 \cdot l}{4\gamma g} \quad (10)$$

当粗糙度  $\frac{k}{d_0} = 0.9$  时 得出

$$V_{\phi}^2 = 0.022 \frac{\Delta P}{l} \frac{r g}{\gamma}$$

现在可以写出在极其广范围内的渗滤流动公式从絮流至最终的紊流。可以构成  $Q = f(r)$  与  $\frac{\Delta P}{l}$  的关系图，在一般情况下这种图是三条连续的抛物线，在对数坐标上每个部分成为直线，为此可以获得当渗滤经过  $\frac{\Delta P}{l}$  长样品渗滤液数量，在曲线  $Q = f(r)$  上表示了样品孔隙特征。很容易看出积分所得出在上述实验条件下渗过样品的渗滤液数量，但是为此必须知道孔隙曲线的方程式，而这在一般情况下我们是不知道的。

整个孔隙曲线按半径划分成  $n$  段。将各段与横轴和与纵轴之间的面积乘上每段纵轴的中点至曲线  $Q = f(r)$  的间距。

以  $a_1 a_2 a_3 \dots a_n$  为总面积的长度

$z_1 z_2 z_3 \dots z_{n+1}$  为纵轴与分配曲线的间距

$y_1 y_2 y_3 \dots y_{n-1}$  为纵轴与  $Q = f(r)$  曲线的间距

如果  $a_1 = a_2 = a_3 = \dots = a_n$  则

$$Q = \frac{g}{4} \sum_1^n (z_i + z_{i+1})(y_i + y_{i+1}) \quad (12)$$

当  $n$  值达到足够大时可以简化而保持足够的精度

$$Q = \frac{g}{2} \left( 2 \sum_1^n z_i y_i + z_{n+1} \cdot y_{n+1} - z_1 y_1 \right) \quad (13)$$

这个公式与达西公式对照

$$K_{np} = \frac{Q}{F} \frac{\mu}{\Delta P/l} \quad (14)$$

$K_{np}$ ——样品渗透率

$Q$ ——经过断面  $F$  的液体流量

$\Delta P/l$ ——渗滤所决定的压力降

$\mu$ ——渗滤液的粘度

然后确定样品的渗透率，这是研究的最终目的。

在结论中应该指出，上述讨论没有完全反映在渗滤过程的图片中。

近似于一个单位粗糙度的粗糙系数的引入，在一定程度上接近于真实孔隙介质的模型，但是是否可以在相对低的粗糙度管道中的渗滤规律扩伸到具单位粗糙度的管道中去尚不清楚。

上面没有考虑到孔隙通道的曲折度，它们会显著降低沿着管道轴线的压力梯度，也没有注意从一个接头到另一个接头毛细管剖面的不固定性。

这些因素使本身产生一定偏差，使在小直径孔隙中运动时渗滤数量增加而在大的孔隙中运动时渗滤液数量减小。现在样品微分孔隙度的测定还不够正确，特别是在大直径孔隙方面，在百分含量中有不大的误差，这是影响到样品渗透率的，但是本文所提出的处理办法本身为这些误差的解释提供了一些基础，并可以根据孔隙特征近似定量地评价渗透率的数值。

### 碳酸盐岩石渗透率的计算

虽然上面是极为一般的叙述我们还是试图对一定的样品进行重新计算。样品全为 Самарскдуки 的碳酸岩，测定是在苏联科学院

ИГЕМ. 物理—机械实验室进行的。

岩石样品显微分析的描述见于 Б. В. Залецкого 和 Е. А. Санипил 的《关于灰岩含自由水饱和度和孔隙空间结构对渗透率影响问题》

的论文中,下面只是岩石孔隙空间的简单特征,没有详细的说明岩石成分和结构的相互关系。(图4)

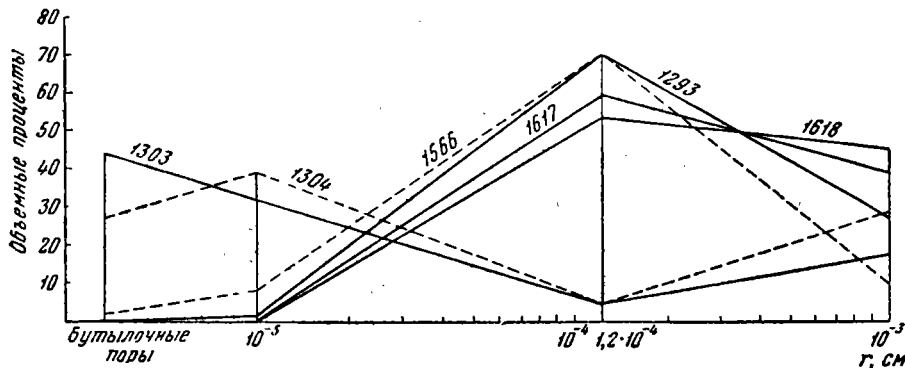


图4 分析样品孔隙特征

- 样品 1303 碎屑状灰岩, 孔隙大小近于颗粒的两倍, 其范围为 0.02~0.2mm。
- 样品 1304 碎屑状灰岩, 孔隙大小为 0.02~3mm。
- 样品 1293 碎屑状灰岩, 粗粒的孔隙大小 0.02~1mm。
- 样品 1618 藻类凝聚的灰岩, 强烈淋蚀孔隙大小为 0.1~1mm, 平均 0.15mm。
- 样品 1617 藻类凝聚的灰岩, 淋蚀孔隙大小 0.05~0.5mm。
- 样品 1566 微粒白云岩, 孔隙大小 0.02~1mm。

在表2中指出在确定样品渗透率过程中收集的参数。根据上述公式8可以确定由层流变成紊流的孔隙半径对样品1303确定渗透率是在最大压力差下进行的(从收集样品数值)上, 得出  $r_{临界} = 2.8 \cdot 10^{-4} \text{cm}$ 。

表2 当测定样品渗透率时确定的参数

实验样品	压力降 am/cm+1	实验时间 秒	液体渗透的数量 cm <sup>3</sup>	样品长度 cm.	样品断面 cm <sup>2</sup>
1303	3.01	600	22	3.72	2.54
1304	3.07	300	80	3.75	2.84
1293	1.17	540	410	3.74	2.84
1618	0.60	420	1480	3.66	2.54
1566	1.00	660	215	3.72	2.70
1617	1.80	300	1160	3.72	2.57

上述具体样品孔隙度渗透率资料见下表(表1):

表1 硫酸岩岩石孔隙度和渗透率特征

实验样品	孔隙度	渗透率 达西	孔隙体积百分差别			
			>0.01 mm	0.01~ 0.00001 mm	<0.00001 mm	玻璃状 孔隙
1303	0.04	0.00001	18	5	33	44
1304	0.10	0.00004	19	5	39	27
1293	0.24	0.00150	28	71	1	0
1618	0.26	0.01840	46	54	0	0
1566	0.14	0.00079	10	71	8	2
1617	0.25	0.00341	40	60	0	0

从这里得出, 当孔隙半径  $r > 10^{-3} \text{cm}$ , 运动具有紊流特征, 孔隙直径  $10^{-3} > r > 10^{-5} \text{cm}$  基本上是层流。

对于平均(等效的)半径为  $10^{-3} > r > 10^{-5} \text{cm}$  一组孔隙通道得出下列公式

$$Q = \int_{10^{-5}}^{10^{-3}} a \cdot r^4 = a \cdot r^4_{等效}$$

式中

$$a = \frac{\lambda}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{l}$$

即Пуазейля定律常数(当按r积分时)显然r等效

等于:  $r_{等效} \approx 1.2 \cdot 10^{-4} \text{cm}$ 。

计算得出当紊流运动在实验时间内流径半径为  $r = 10^{-3}$  和粗糙度  $\frac{k}{d} = 0.9$  均匀孔隙孔道的渗滤液数量, 比之流径  $r = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{cm}$  (层流) 渗滤液近似大 1000 倍, 即  $\frac{Q_t}{Q_n} = 1000$  从这里得出当渗滤经过孔隙半径  $10^{-3} > r > 10^{-5}$  时其渗滤液可能是最小的。与此同时显然必须详细说明孔隙特征。当  $r > 10^{-3} \text{cm}$  时在计算中将会引入较大的错误, 因为这类岩石即使具同样的孔隙度, 其实际平均半径也可以变化非常大。

显微薄片研究提供了每个样品的“平均半径”值, 孔隙通道  $r > 10^{-3} \text{cm}$  岩石)。

在实验时间内经过半径  $r > 10^{-3} \text{cm}$  粗糙度等于  $\frac{k}{d} = 0.9$  均匀孔隙通道的气体量可以按下式确定

$$Q = \frac{P\delta + \frac{\Delta P}{2}}{P\delta} \cdot \pi r^2 t \sqrt{0.022 \frac{\Delta P}{l} r \cdot g \frac{1}{r}}$$

式中  $Q$ ——渗滤气体数量  $\text{cm}^3$

$P\delta$ ——压力表压力  $\text{cm}^2$

$t$ ——实验时间, 秒

在这里变数岩石渗透率的可以下列公式确定

$$K_{np} = kv_n \cdot a \cdot r^2 \sqrt{r}$$

式中  $K_{np}$ ——渗透率

$V_n$ ——总的孔隙度

$a$ ——当半径  $r > 10^{-3} \text{cm}$  的孔隙特征

中孔隙(体积)百分数

$r$ ——采用的平均半径

$K$ ——比例系数

对每一个样品中确定了其比例系数(为了简化起见, 取  $r = 10^{-3} \text{cm}$  等于 1 个单位)。

表3 比例系数值

实验样品	样品渗透率达西	比例系数 $k \cdot 10^{-4}$	采用平均半径 $r \cdot 10^{-3} \text{cm}$
1303	0.00001	13.8	1
1304	0.00004	14.0	1
1293	0.00150	4.0	5
1618	0.01840	4.9	10
1566	0.00079	10.0	5
1617	0.00341	6.1	5

因此样品渗透率的变化达  $1.8 \cdot 10^3$  倍, 即比之比例系数的改变 3.5 倍大三个数量级。

虽然分析数量不多, 仍然可以认为足以证实论文第一部分所叙述的概念。

结 论

1. Пуазейля 规律确定了在地质环境中多孔介质的液流渗滤为层流时的流动特征(在压力梯度不大时絮流只是在孔隙很小的岩石中才有实际意义)。

2. 液流渗滤的数量和孔隙通道的半径关系非常大, 实际上岩石的渗透率只取决于大的孔隙度(相对于岩石的孔隙特征而言)。按照这种关系可以根据孔隙特征近似地评价岩石的渗透率。

(曹慧缙译自 1964 年出版的“岩石物理机械性质”一书。)