

用多元统计回归法预测岩石的可钻性

励 美 恒

(武汉地质学院北京研究生部)

研究岩石可钻性的意义及分类

研究岩石可钻性有两个目的：一是根据岩性合理地选用钻头和最优钻进规程；二是拟定机台的生产指标。只要通过研究工作对岩石的机械性质进行定性分类，即可满足前者的需要；而解决后一个问题，还需有定量的指标，并达到一定的准确程度。岩石可钻性的研究不仅要反映现阶段的设备水平，而且必须考虑施工的技术条件。

国内外探矿界一直重视岩石可钻性的研究，并研究出了一系列测试方法与仪器。这些方法可归纳为以下四大类：

1. 通过测定岩石的物理机械性质来确定岩石可钻性的方法（测力学性质法）；
2. 利用破碎岩石时消耗能量的大小来确定岩石可钻性的方法（能量法）；
3. 利用现场生产实钻效果来确定岩石可钻性的方法（现场实钻法）；
4. 在实验室内利用微型钻台与设备进行模拟钻进来测定岩石可钻性的方法（室内微钻法）。

能量法多用于采矿业，这是因为矿山中多采用冲击式的凿岩方法，所耗能量容易测定。而在较深的钻孔里，由于难以准确地测出井底能量消耗，因而能量法在钻探上迄未采用。

实钻法虽曾被广泛地用于现场生产，并起到了积极作用，但由于条件所限，例如，现场测试各种岩石可钻性时，很难保持同等井深的施工条件，而井深对钻进时效又确有影响；另外，设备条件及现场操作技术水平等因素也直接影响着可比性，所以，实钻法已被淘汰。

力学法与微钻法已成为目前国内地质勘探系统测定岩石可钻性的主要方法。微钻法已作过介绍*，本文着重讨论力学法。

压入硬度与可钻性的关系

在发现了岩石的物理机械性质与其可钻性有密切联系后，许多人便趋向于通过测定岩石的力学性质来确定可钻性。由于岩石的力学性质包括强度、研磨性、塑性系数、压入硬度、弹性模量等，所以，其测试方法也有多种，而以硬度法（包括肖氏法、刻划法、施米特法、摆球法、史氏压入硬度法），尤其是其中的压入硬度法更受重视。

1. 压入硬度与可钻性的一致性 压入硬度法是通过局部压碎岩石来测定岩石硬度的一种方法。从宏观上看，它与钻头钻进地层的破碎形式相似。特别是它模拟了牙轮钻头的碎岩状态，在一定程度上能反映油田钻进的岩石可钻性规律，因而比测定岩石抗压强度（破碎整块岩石）以及不破碎岩石的硬度测定法更有代表性。同时，在钻进中硬与硬岩的实践中，发现压入硬度与可钻性有着一致性。

我们对两批岩样（第一批79种岩样，第二批54种岩样**）进行了试验，也发现压入硬度能反映可钻性的变化规律，即压入硬度越大，岩石越难钻进（图1、图2），但二者的相关性不理想。

用数学方法对第三批（第一批79种，第二批54种，第三批32种）岩样的测试数据进行处理，发现用线性回归法，比用对数及指数法更容易表现出规律性。其线性回归方程如下：

$$V_{m1} = 81.565 - 0.116 R_1$$

$$V_{m2} = 57.14 - 0.0744 R_2$$

$$V_{m3} = 42.78 - 0.0518 R_3$$

式中， V_{m1} ， V_{m2} ， V_{m3} 分别代表第一，第二，第三

* 励美恒、孔健：金刚石钻进微钻法岩石可钻性分级，1978年

** 第二批岩样是在岩石破碎组指导下由研究生完成。

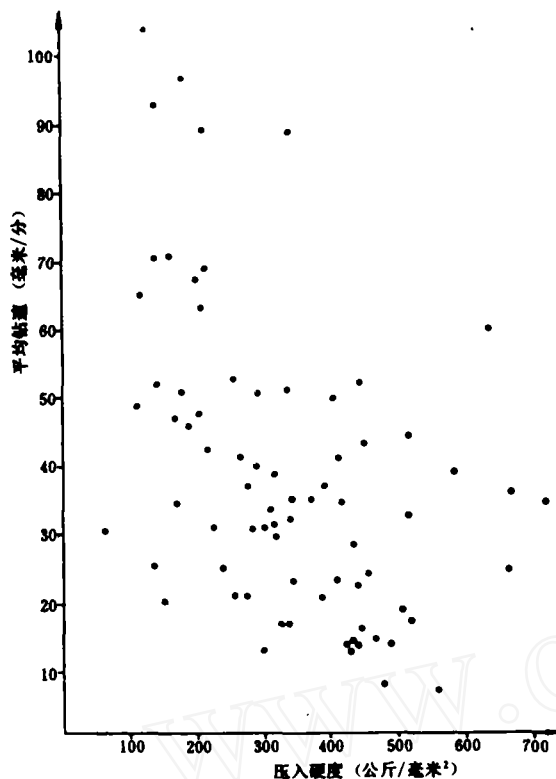


图1 第一批(79种)岩样压入硬度与微钻钻速关系图

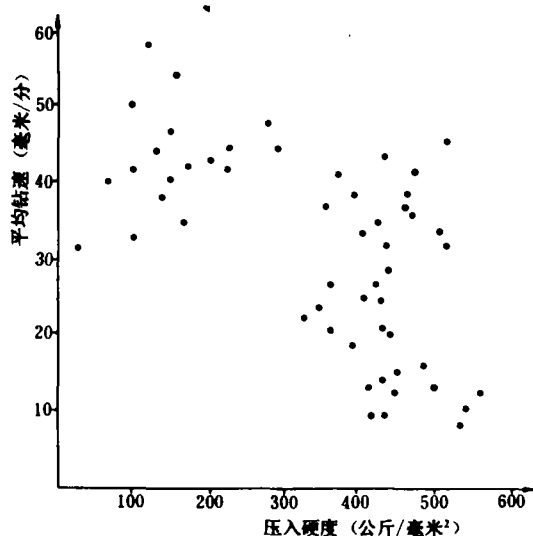


图2 第二批(54种)岩样压入硬度与微钻钻速关系图
三批岩样的微钻平均钻速(毫米/分); R_1 , R_2 , R_3 分别代表各批岩样的压入硬度(公斤/毫米²)。它们的相关系数分别为0.53, 0.61, 0.66, 可见, 虽有一定规律性, 但相关性不太好, 而且, 只有测试大量岩样才有代表性。

2. 压入硬度与可钻性的不一致性 对两批岩样(表1、表2)所进行的试验还发现, 压入硬度相同的岩石, 其钻速可能不同, 甚至相差很大; 也有的岩石, 当其压入硬度增大时, 钻速反而变高。

表1

岩石名称	压入硬度 (公斤/毫米 ²)	钻速 (毫米/分)
浅粒岩	481.7	7.82
黑云闪斜长片麻岩	470.5	14.52
石英闪长玢岩	143.3	70.56
大理岩	143.5	93.20
含铁黑云斜长片麻岩	301.9	37.07
石榴石黑片变粒岩	302.8	12.98
石英脉	557.2	7.05
大理岩	630.4	59.70

表2

岩石名称	压入硬度 (公斤/毫米 ²)	钻速 (毫米/分)
黑云二长混合花岗岩	431	20.3
流纹斑岩	431	34.36
斜长片麻状角闪角闪岩	434	43
石英脉	435	9.01

3. 压入硬度与可钻性不一致的原因 用压入硬度表示可钻性之所以出现许多不相符合的现象, 其主要原因是压入硬度法破碎岩石与切削具钻切岩石的机理和方式等不同。压入硬度法是通过压模在静载作用下破碎岩石的(系单切具作用), 获得压入硬度数值的过程是: 随着压模上静压增大, 开始在压模周围边沿产生载荷集中, 造成首次小块破碎; 压力继续增大, 压模下的载荷处于均布状态, 当载荷增加到使模下主压力锥形体发生体积破碎时, 压模即产生跳跃式吃入。此时, 单位面积上的载荷便是压入硬度值。可见, 压入硬度法碎岩是主压力体四面受夹持条件的限制, 即多向应力状态下发生的。所以, 它表现出的抗压强度要比一般情况下大得多。此外, 由于岩性不同, 其压入硬度也不相同。例如, 具有解理面的粗粒岩石就比无解理、裂隙的细粒致密

岩石硬度低。这是由于岩石被压模压入时，在其解理面及微裂隙的薄弱环节上产生应力集中而首先发生破碎，然后向外延展破碎区，提早进入跳跃吃入阶段，从而表现出较低的压入硬度。

在实钻时，每个切削具都是在轴压和回转（切向）两向合力作用下斜剪岩石的，同时在切具后面还伴随发生张力破碎过程。斜剪切力与岩石夹角的大小随岩性而变化。在一定的轴压力下，随着岩石抗破碎强度增大，此夹角将变小（图3），即切刃碎岩吃入深度变浅。同时，由图3中b、c可见，钻进斜剪切力的影响，使切具下的主压力体受夹持条件得到改善，近似于一侧受力状态。因此，它的碎岩不象测压入硬度那样明显地受岩石致密性与不均匀性的影响。试验证明，岩石在斜剪切力作用下，其破碎强度仅为压模静载破碎强度的1/6~1/12。

正是由于压入硬度法的碎岩，在受力条件、受力种类、以及岩性影响等方面与实钻过程存在上述差别，才导致可钻性与实钻结果有差异。

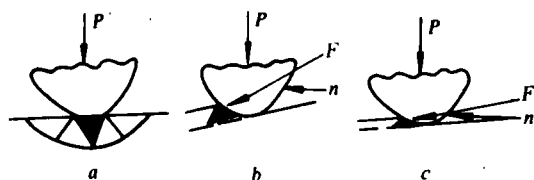


图3 主压力体单向及两向受力条件示意图

▼—主压力体；a—单向受力状态；b—在软岩中两向受力状态；c—在硬岩中两向受力状态；F—斜剪切力

研磨性对可钻性的影响

在实际钻探中，当钻头钻取岩层时，其本身也被逐渐磨钝，在研磨性强的岩层中尤为明显。磨损过程是连续发生的，即钻头开始钻岩时，其切刃未被磨钝，这时影响岩石破碎的主要因素是岩石的硬度。继续钻进，钻刃被逐渐磨钝，致使效率发生变化，这种变化后的新效率可表征研磨性与可钻性间的关系。所以，人们企图通过研究岩石的研磨性来标定岩石的可钻性。

研究工作发现，研磨性对可钻性的影响是复杂的。不同研磨性的岩石影响也不同。如初钻速度同为30毫米/分的三种岩样，经过一段时间的钻

进后，钻刃被磨损，钻速分别为7.82、16.95、30.78毫米/分，即第一种岩石钻速下降最多，第三种岩石钻速反而略有增加。这主要是由于岩石研磨性不同而引起的。

研究还发现，研磨性除受岩石中石英含量控制外，与石英颗粒的大小及其分布方式（结构）也有密切关系。此外，岩石研磨性还受技术条件（如冲洗液介质的形态、质量、数量，切削具的线速度以及钻压大小等）的影响，尤其是当这些技术因素超过常规范围时，对研磨性的影响则更大。所以，在测定岩石的研磨性时，应尽量采用与实钻条件接近的方式方法，才有实际意义。例如，当前钻探生产中正在推广孕镶金刚石钻头，其特点是胎体与金刚石共同被磨损，二者处于相互依存的“自锐”状态。它与别的切削具的磨损形式有很大不同。所以，当前设计的任何一种测定岩石研磨性的方法，均需考虑这一新的技术条件，传统的标准杆、标准盘等测定法，已不适用。

针对上述问题，我们模拟钻头胎体的组成，试制了孕镶金刚石切削具，并用这种切削具在车床（或微钻）上进行钻磨岩样试验。试验中，磨耗量用克拉天秤称量，然后计算出磨取单位体积岩样所耗孕镶切具的重量，用毫克/厘米³表示。对在多参数测试实验台上获得的数据，用线性回归方程求出钻速与研磨性系数关系式：

$$V_m = 38.86 - 0.152W_r$$

式中， V_m —微钻钻速，毫米/分； W_r —相对研磨系数，毫克/厘米³。

其相关系数为0.62。若将其中中硬以上的岩样数量增多，用指数方程求得：

$$V_m = 58.16 \times e^{-0.062W_r}$$

其相关系数达0.82。

由上述两式获得的钻速与研磨性的相关系数范围为0.62~0.82。上述二方程的线性关系较为显著。说明研磨性是可钻性的一个重要表征因素；同时，也说明采用孕镶切削具进行微钻标定研磨性，比传统的测定方法更能反映岩石可钻性的变化。

岩石弹塑性对可钻性的影响

由于岩石的弹塑性对岩石的可钻性具有明显的影响,所以,研究岩石弹塑性形变特点,进而寻求其与可钻性的联系是必要的。

对岩石加载并使之破碎,要经过弹性形变,弹塑性形变,微裂纹发育及解体破碎等过程。对于有明显塑性及明显脆性的岩石而言,其变形特点是不同的。后者的弹性变形随载荷的取消而恢复;前者受载产生的塑性形变则是不可逆的。这样,当载荷消除后,我们就可利用保留下来的残余变形值来表示塑性变形值的大小,也可计算破碎功的利用率。具体测定方法是,在对岩石加载时,利用压力变形曲线,按下式求出塑性系数 K_s 。

$$K_s = \frac{\text{破碎前变形总能量}}{\text{弹性变形总能量}}$$

再用回归方程求出 V_m 与 K_s 的关系式:

$$V_m = 1.92 + 24.53 \ln K_s$$

其相关系数为0.68。

测定发现,当岩石受载时,首先是岩石矿物颗粒间的界面与空隙被压实,这个阶段的应力应变不象金属那样服从虎克定律;同时由于岩石是多矿物组成,各种矿物的弹塑性模量又相差很大,因此,当部分矿物处于弹性形变阶段时,另一些矿物则可能处于塑性变形阶段,所以,在所测的压力变形曲线上,弹塑性变形界限不十分明显。另外,岩石的塑性还会随围岩的压力增加而增加。如美国克里斯坦森能源工具公司所做的高压釜内切岩试验(用复合体切具),在高压条件下可使岩石犹如金属被切一样,卷起连续的岩屑。经实测,灰岩在6000个大气压的条件下,将表现出明显塑性。

上述资料表明,岩石弹塑性与可钻性既有一定的相关性,又有着特殊变化。

三种因素对可钻性的综合影响

在研究岩石物理机械性质与其可钻性的关系时,我们还对岩石的动弹模量、波速和剪切模量

三个因素进行了探求,经用线性、指数、对数等方法对数据进行回归,发现方程的线性关系不显著。可见,只有把岩石的研磨性、塑性系数、压入硬度三个因素作为研究可钻性的主因素才是合理的。

从以上对三个主因素的讨论可知,用其中任何一个因素来表征可钻性,都有其不足之处。这是因为这些因素均受岩石成分、结构以及所处条件的影响。于是就出现了这样一种情况:岩石的某种特性影响着硬度值,另一种性质可能影响其研磨性,而其他性质又可能影响塑性变化,等等。而且,硬度、研磨性、塑性系数之间也不呈线性关系。如硬度大的岩石,研磨性不一定高,研磨性高的岩石,其塑性系数又可能较小。看来,只有将这些与岩石某一侧面的性质相联系的典型因素交织在一起,使其综合地反映岩石的破碎难易程度,才是更合理的。

根据这种分析与推理,试将岩石的这三个典型因素进行多元回归,并利用微机进行数字处理,便可得到三元回归方程:

$$V_m = 40.460 - 0.921W_r + 2.644K_s - 0.0346P$$

式中, V_m 、 W_r 、 K_s 、 P 分别代表机械钻速、相对研磨系数、塑性系数、压入硬度。

该方程的相关系数为0.75,经对方程进行显著性检验,其置信度达95%;利用该方程预测岩石可钻性,其准确性与多参数实验台上的测定结果相符率约为80%。说明用多元统计回归法预测可钻性基本上是成功的。

最后应指出,用该法所求得的可钻性预测精度,尽管不可避免地也会受到岩性多变特点的影响,但将它用于制定生产定额的估算以及对区域性岩石可钻性预测,基本上能满足要求。如能在公司一级实验室配上一台小型微钻仪进行补充校正,则会更臻完善。

主要参考文献

George, B. Clark.: Colokado School of mines quarterly, 1982, v. 27, No. 2