

基于岩石可钻性指标的地层界面识别理论与方法

谭卓英¹⁾ 蔡美峰¹⁾ 岳中琦²⁾ 谭国焕²⁾ 李焯芬²⁾

1) 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083 2) 香港大学土木工程系, 中国香港

摘要 岩石可钻性指标是石油、矿山及地质部门广泛用于钻头选择和制定生产定额的重要参数,但现行可钻性指标的定义及参数获取的实验方法还存在许多问题,通过分析,重新定义了岩石的可钻性,提出了以单位能量下的穿孔速率作为可钻性指标的新概念;基于钻进过程中有效液压、转速、穿孔速率和可钻性指标间的耦合关系,建立了可钻性指标的计算公式.同时,对新的可钻性指标在地层识别中的敏感性进行了分析,阐述了可钻性指标在地层识别中的物理意义.研究表明,新的可钻性指标克服了传统可钻性指标在判层中存在的盲区,并可实现沿钻孔剖面的连续判层.

关键词 岩石可钻性; 地层界面; 识别; 钻孔参数; 耦合关系

分类号 TU 413.6⁺2

1 岩石的可钻性

根据岩石可钻性的定义^[1-2],表征可钻性的指标可以是岩石的物理力学性质(如抗压强度、压入硬度、点载荷强度、弹性模量及声波速率等)、穿孔速率、钻头进尺、破碎单位体积的能量(如普氏捣碎法及巴氏砸碎法)及微钻法的穿孔速率、钻深及钻时等指标.这些指标大体上可归纳为强度指标、位移指标及能量指标.

物理力学性质指标虽然在一定程度上反映了岩石抵抗破坏或被破碎的能力,但它们不能反映钻进时岩石的破碎过程;抗压强度指标,即使是三轴抗压强度指标也不能完全模拟钻孔内实际的围岩应力状态,且岩石取样也具有很大的离散性,加压测试过程及压头与岩石端面的接触情况也与实际的钻凿条件不一致;压入硬度及点载荷强度等指标,由于实验本身的限制,接触面非常狭小,如此小的点、线或面难以代表岩石的整体情况;弹性模量是通过应力-应变曲线间接获得的,同样受到强度指标测试的限制.因而,不考虑岩石结构的复杂性以及脱离孔内围压及温度等环境而进行的不恰当的参数化,对岩石可钻性的反映是极不准确的.

声波速率(严格说,为纵波速率或声波时差)是通过测井数据获得的.由于岩石本身是一种非完全弹性介质,岩石的矿物成分、颗粒大小、胶结状态、孔隙率及松散程度等,会造成声速差异,声波速率也难以反映岩石的实际可钻性.

一定条件下的实际穿孔速率虽然能反映穿透地层的围岩应力状态以及试件的离散性问题,但受地层、钻头类型及钻进参数的影响,条件性很强,度量标准不准确.

破碎比能是指破碎单位体积岩石所需要的能量.一方面,实际岩石钻孔时,钻头、钻杆不仅和孔壁、岩屑存在摩擦,而且还有冲洗液的作用,其能量的传递方式与破碎比能实验模拟条件大相径庭,因而破碎比能实验模拟不能反映孔底岩石的应力状态,同时也不能反映孔内的应力状态;另一方面,无论是捣碎法还是砸碎法^[3],破岩原理均属冲击破碎,而勘探钻进为回转式,其破岩机理完全不同,也难以反映旋转破碎的情况.

微钻法是由 Rollow 提出的一种研究岩石可钻性的方法,20世纪80年代在我国石油行业得到了推广^[4-5].该方法采用微型钻头及实际岩芯,在实验室钻进台上模拟钻进的实际过程.可钻性指标可以是穿孔速率、设定时间内的进尺或设定深度内的时间.但和其他岩芯实验法一样,微钻法脱离了孔内的温度场、应力场等实际环境,无法模拟孔内应力状态,而且,可钻性数据随机、离散、有限,测试工作滞后于实际钻进,不能随钻随测,周期长,费用高^[6].

收稿日期: 2005-06-28 修回日期: 2006-03-06

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No. 50490271)和香港特别行政区政府研究基金和香港赛马会慈善基金(No. HKU7005/01E)

作者简介: 谭卓英(1965—),男,教授,博士

岩屑能量法^[7]是基于能量破碎原理的,其不足与破碎比能实验模拟法相同。

A, B 法则适用于钻头的抗研磨性设计^[8]。实际钻进过程中, 钻具存在磨损不均, 实际钻头磨损量的体积测量也十分复杂, 且在薄层、软地层及磨蚀性差的地层中, 钻具磨损量甚微, 因而分级及级差会受到限制, 从而影响可钻性分级的精度。

此外, 钻孔录井实时数据已被用来优化采矿作业参数, 新的可钻性指标和概念也不断被提出^[9]。

综合分析, 从岩芯实验和原位实测来看, 可钻性指标宜以实际钻凿来衡量。因为实际钻凿与地层、标准的钻凿工具、钻孔方式、孔底环境场以及实际用于钻孔岩石破碎的能量有关, 所以实际钻凿反映了地层岩性、钻头以及环境的关系。

因此, 岩石的可钻性可定义为在一定的外力和钻具条件下岩石抵抗钻头破坏的能力。可钻性指标不仅应反映岩石抵抗尖锐工具入侵的能力, 而且要反映所穿透地层的岩石与钻具间的相互作用关系。无论是冲击还是旋转式破岩, 钻头端面及侧向与岩石间的相互作用最终可通过能量消耗的形式来表现, 因此可钻性指标应为单位能量下的穿孔速率。

事实上, 尽管每种岩石的破碎比功不同, 但在标准条件下特定岩石的破碎比功是不变的。不管采用什么样的凿岩工具, 只要破碎的表面积和粒度分布相同, 破碎单位体积的岩石所需消耗的能量就是一样的。也就是说, 岩石的破碎比功只与输入的能量有关, 与工具无关。不同的钻凿工具, 在同一地层的岩石中具有不同的穿孔速率, 那是因为不同的钻具对能量的传递效率不同。这进一步解析了采用单位能量下穿孔速率作为可钻性指标的科学性。

2 基于轴压—转速—穿孔速率耦合的可钻性指标

根据可钻性指标的定义, 设任意时刻的穿孔速率为 V_p , 钻孔破碎岩石所消耗的能量为 E_s , 则可钻性指标 K_d 可表示为:

$$K_d = \frac{V_p}{E_s} \quad (1)$$

K_d 的物理意义为: 在一定条件下, 岩石吸收 E_s 大小的能量, 破碎单位体积的岩石, 并使钻孔推进一个单位的深度。

若从时刻 t_1 到时刻 t_2 , 钻头位移从 H_1 到

H_2 , 则:

$$V_p = \frac{H_2 - H_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (2)$$

钻头破碎的体积 V_b 为:

$$V_b = \frac{\pi \Delta H}{4} (D_2^2 - D_1^2) \quad (3)$$

式中, 当岩芯钻进时, D_2 为钻孔外径, 与所钻凿地层的岩性有关^[10]; D_1 为岩芯外径, 当为破坏性钻进时, $D_1 = 0$ 。

又设 t 时刻施加在钻具或钻头上的有效轴压为 T_e , 则:

$$T_e = W_{OB} \cos \alpha + T_d - T_u \quad (4)$$

式中, W_{OB} 为 t 时刻钻具的重量; α 为钻孔轴线方向与铅直线的夹角。垂直钻孔时, 钻孔轴线与铅直线重合, $\alpha = 0$; 水平钻孔时, 钻孔轴线与铅直线垂直, $\alpha = 90^\circ$ 。 T_d , T_u 分别为 t 时刻作用于钻具上的下向轴推力及上向调压力。

钻机所产生的能量由两部分组成: 由钻具重力、轴压力及调压力组成的有效轴推力随钻头钻进位移所做的功 E_e ; 由钻机旋转所做的功 E_r 。根据能量守恒原理, 钻机所产生的能量用以克服钻具与孔壁、钻井液及岩屑之间的摩擦阻力; 钻头与孔底岩石、钻头体侧向与孔壁等的摩擦阻力所需要的能量 E_f , 以及破碎岩石所需要的能量 E_p 。用公式表示为:

$$E_e + E_r = E_f + E_p \quad (5)$$

则

$$E_p = E_e + E_r - E_f \quad (6)$$

考虑到能量的传递效率, 上式可进一步简化为:

$$E_p = K_1 E_e + K_2 E_r \quad (7)$$

式中, K_1 , K_2 分别为有效轴推力和转矩所做的功对岩石破碎的贡献率。

从时刻 t_1 到时刻 t_2 的 Δt 时间内, 有效轴推力和转矩用于破碎岩石所消耗的功分别由下式确定:

$$E_T = T_e V_p \Delta t \quad (8)$$

$$E_r = M N_r \Delta t \quad (9)$$

式中, M 为作用于钻头的力矩, N_r 为钻头转速。

将式(8), (9)代入(7), 可得破碎单位体积所需的能量, 即比能公式为:

$$E_s = \frac{4(K_1 T_e V_p + K_2 M N_r)}{\pi(d_2^2 - d_1^2) V_p} \quad (10)$$

式中, d_1 , d_2 为钻头的内直径及外直径。同样, 当

破坏时钻孔时, $d_2 = 0$.

将式(10)代入(1), 得可钻性指标的计算公式如下:

$$K_d = \frac{4(K_1 T_e V_p + K_2 M N_r)}{\pi(d_2^2 - d_1^2)} \quad (11)$$

因为力矩和有效轴压呈线性关系^[11-12], 则可钻性指标可进一步表示为:

$$K_d = \frac{4T_e(K_1 V_p + K_2 K_3 N_r)}{\pi(d_2^2 - d_1^2)} \quad (12)$$

式中, K_3 为力矩与轴压之间的比例系数.

式(12)可进一步用自然对数表示为:

$$\ln(K_d) = \ln\left[\frac{4T_e(K_1 V_p + K_2 K_3 N_r)}{\pi(d_2^2 - d_1^2)}\right] \quad (13)$$

式(12)即是有效轴压、转数和穿孔速率耦合的可钻性指标预测模型. 一旦 K_1 , K_2 及 K_3 确定, 就可直接根据钻进工作参数确定所穿透地层的可钻性指标.

从式(12)可知, 对于一定的钻头而言, 所穿透地层岩石的可钻性由有效轴压、转速和穿孔速率确定. 也就是说, 有效轴压、转速和穿孔速率的变化将反映地层岩性的变化, 根据这些参数的变化, 可以实现对地层的实时识别. 这为 DPM 系统监测数据^[13]的地层识别奠定了重要的理论基础.

3 可钻性指标对地层识别的敏感性

对于标准化的钻具(钻头)和钻凿方式, 在特定的岩石中, 穿孔速率是恒定不变的, 且比功为常量. 两个不变量的比值仍是常量. 说明在特定的地层岩性中, 可钻性指标所反映的特征值是恒定的. 相反, 如果地层岩性发生了改变, 穿孔速率和破碎比能也将随之发生改变. 由于穿孔速率随岩石强度和硬度指标的增高而降低, 破碎比能随岩石强度及硬度指标的增高而增大. 所以, 穿孔速率与比能随地层岩石的物理力学性质的变化是互逆的. 可见, 穿孔速率与比能的比值——可钻性指标的梯度降——将随岩石强度及硬度指标的增大而减小, 敏感性是非常显著的. 可钻性指标对地层识别的分辨能力可由敏感性进行检验.

根据定义, 利用公式(1), 设在深度 H 或 t 时刻, 钻头从 A 地层到 B 地层, 穿孔速率由 V_p 改变为 $V_p + \Delta V_p$, 破碎比能由 E_p 改变为 $E_p + \Delta E_p$, 则敏感性 K_s 为:

$$K_s = \frac{K_{d,B} - K_{d,A}}{K_{d,A}} = \frac{\frac{\Delta V_p}{V_A} - \frac{\Delta E_s}{E_A}}{1 + \frac{\Delta E_s}{E_A}} \quad (14)$$

根据式(14), 若钻凿地层从软地层 A 到硬地层 B, 则 $V_B < V_A$, $\Delta V_p < 0$; 而 $E_B > E_A$, $\Delta E_s > 0$. 所以, 式(14)的分子 $\frac{\Delta V_p}{V_A} - \frac{\Delta E_s}{E_A}$ 恒小于 0, 而分母

$1 + \frac{\Delta E_s}{E_A}$ 恒大于 1. 可钻性指标的敏感性系数恒小于 0.

若钻凿地层从硬(A)到软(B), 则 $V_B > V_A$, $\Delta V_p > 0$; 而 $E_B < E_A$, $\Delta E_s < 0$, 式(14)的分子 $\frac{\Delta V_p}{V_A} - \frac{\Delta E_s}{E_A}$ 恒大于 0, 而分母 $1 + \frac{\Delta E_s}{E_A} = \frac{E_B}{E_A}$ 恒小于 1, 可钻性指标的敏感性系数恒大于 0.

因此, 当地层岩性发生变化时, 可钻性指标的敏感性系数就不可能等于 0. 这意味着只要地层岩性发生改变, 可钻性指标将随之发生改变. 可见, 可钻性指标对地层岩性的识别是显著的.

若在不同岩性的地层中, 具有相同的穿孔速率, 但破碎比能不同(因构成岩石的颗粒或晶格、胶结状态、物质成分及结构不同). 可钻性指标的识别能力同样按上述两种情况进行分析.

若从相似地层 A 到地层 B, 但 $V_B = V_A$, $\Delta V_p = 0$; 如果 $E_B > E_A$, 则 $\Delta E_s > 0$. 所以, 式(14)的分子 $\frac{\Delta V_p}{V_A} - \frac{\Delta E_s}{E_A}$ 还是恒小于 0, 而分母 $1 + \frac{\Delta E_s}{E_A}$ 恒大于 1. 可钻性指标的敏感性系数恒小于 0.

此时, 如果 $E_B < E_A$, 则 $\Delta E_s < 0$. 所以, 公式(14)的分子 $\frac{\Delta V_p}{V_A} - \frac{\Delta E_s}{E_A}$ 恒大于 0, 而分母 $1 + \frac{\Delta E_s}{E_A} = \frac{E_B}{E_A}$ 恒小于 1. 可钻性指标的敏感性系数恒大于 0.

综上所述, 即使穿孔速率相同, 可钻性指标的敏感性系数也不可能等于 0. 可见, 在地层岩性不同, 但物理力学特性相似, 穿孔速率相同的地层中穿孔时, 可钻性指标的敏感性也是显著的, 同样可以对地层进行识别. 以上也进一步说明了用穿孔速率作为可钻性指标在理论和应用上存在的问题.

4 基于可钻性指标的地层识别过程

在地层钻进中, 有效轴压 T_e , 钻头转速 N_b , 穿透速率 V_p 均可以看作是孔深 h 的函数. 因此, 可钻性指标可用钻孔深度 h 的函数表示. 设 $K_d = f(h)$, 则 $f(h)$ 为隐函数.

显然, 可钻性指标变化的程度, 可用其在单位

孔深上的变化率来表征. 在 K_d-h 曲线中, 即为曲线斜率的变化或梯度的改变. 如图 1, 设从孔深 i 位置变化到 $i+1$ 位置, 则变化率为:

$$\frac{\Delta K_{d,i}}{\Delta h_i} = \frac{K_{d,i+1} - K_{d,i}}{h_{i+1} - h_i} \quad (16)$$

当 $\Delta h \rightarrow 0$ 时, 可用 $f(h)$ 的导数 K'_d 表示为:

$$K'_d = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{\Delta K_d}{\Delta h} = f'(h) \quad (17)$$

由于 $f(h)$ 为隐函数, 因此式(17)可进一步用偏导数表示为:

$$K'_d = f'(h) = \frac{\partial T_d}{\partial h} \cdot \frac{\partial N_f}{\partial h} \cdot \frac{\partial V_p}{\partial h} \quad (18)$$

式(18)确定了可钻性指标随钻孔深度变化的梯度. K'_d 的物理意义为: 在某一地层中, 当孔深的变化趋于无限小时可钻性指标的变化. K'_d 的几何意义为: K_d-h 曲线的斜率, 其角度为 $\alpha = \arctan(K'_d)$.

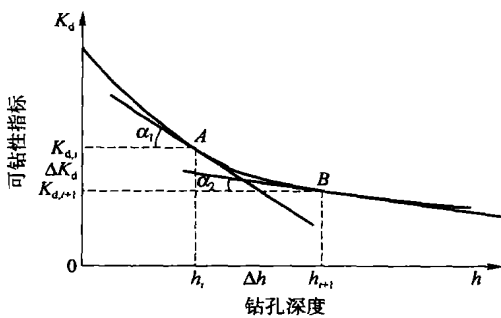


图 1 可钻性指标随孔深变化的几何解析

Fig. 1 Geometrical analytic graphics of drillability index with borehole depth

根据梯度变化的大小可对所钻地层进行区划. 设识别地层的分辨率为 Δh , 同一地层内许可的可钻性指标的变化幅度——级值, 为 ΔG_d , 则由公式(18)得识别公式为:

$$|\Delta K'_d| = |f'(\Delta h)| = |f'(h_i + \Delta h) - f'(h_i)| \geq \Delta G_d \quad (19)$$

这里, 分辨率是指系统能识别的最小厚度. 当 $\Delta h \rightarrow 0$ 时, 为连续、动态识别模式. ΔG_d 的物理意义为: 当孔深发生 Δh 的变化时, 属于同一岩性地层的可钻性指标所允许变化的最大幅度. 若超出了 ΔG_d 值, 则属于另一岩性的地层. 其几何意义为: 在 K_d-h 曲线中, 当自变量发生的变化为 Δh 时, 曲线斜率变化所允许的最大值.

根据图 1, 式(19)可用角度表示为:

$$|\Delta \alpha_d| = |\arctan(\alpha_2) - \arctan(\alpha_1)| \geq \arctan(\Delta G_d) \quad (20)$$

式(20)反映了从孔深 h_i 到 h_{i+1} 时, K_d-h 曲线方向的变化. 如果孔深发生的变化量为 Δh 时, K_d-h 曲线的方向改变了 $\arctan(\Delta G_d)$, 则说明地层的岩性发生了显著变化, 可以判为另一属性的地层.

在地层界面处, 岩性的改变有两种情况: 一是发生根本性的改变, 岩体的物质组成、结构等完全不同, 物理力学性质截然不同. 因此, 在界面处岩体抵抗机械破坏的性质也完全不同. 在 K_d-h 曲线上, 表现为曲线的方向发生突变. 二是渐变形式, 物质分界面并不明显, 在界面附近存在过渡带或区. 在 K_d-h 曲线上, 表现为曲线沿原来的方向走向, 没有明显的改变. 此外, 结构面、滑移面以及水、气、油等的与岩体的分界面, 也可视为物质分界面. 广义地, 可以归为第一种情况.

地层界面识别参数 ΔG_d 的设置必须满足突变界面和渐变界面的有效标识. 理论上, ΔG_d 的设置不受任何限制, 可设置为无限小. ΔG_d 越小, 精度越高. 但从应用的角度, ΔG_d 设置太小, 标识的界面多, 不能把主界面和次界面有效地分开. 因此, ΔG_d 的设置以满足研究目标或工程要求为前提, 通过实际钻进标定后确定.

传统的可钻性分级只针对岩石, 且钻孔的可钻性剖面是间断的和静态的. DPM 系统对岩体的可钻性分级是连续的、动态的, 可以获得钻孔剖面的可钻性曲线.

除了根据可钻性指标及其级值将岩石加以区别外, 还须对物质分界面以外的其他界面进行识别. 这些界面包括结构面、滑移界面以及岩溶空洞、硃室、地下水、石油、天然气等固-液相、固-气相界面, 包括了所有穿透的地层, 如表土层钻进. 因此, 可钻性指标比传统的概念涵盖的范围更宽.

5 结论

通过以上分析可知, 新的可钻性指标对地层物理力学性质、钻具工作参数及比能的变化是敏感的, 其对地层的识别是动态和连续的. 因此, 新的可钻性分级可实现沿钻孔剖面的连续识别.

参考文献

[1] White C G. 岩石可钻性指数. 边蔚奇译. 北京: 煤炭工业出版社, 1980
 [2] 坦加耶夫 И А. 岩石的可钻性和可爆性. 王维俊译. 北京: 冶金工业出版社, 1987
 [3] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学. 北京: 煤炭工业出版社, 1987
 [4] 史晓亮, 段隆军, 王蕾, 等. 微钻法进行岩石可钻性分级.

- 金刚石与磨料磨具工程, 2002(3): 32
- [5] 张厚美, 薛佑刚. 岩石可钻性方法探讨. 钻采工艺, 1999, 22(1): 10
- [6] Spoor J R, Ledgerwood L W, Christensen H, et al. Formation compressive strength estimates for predicting drillabilities and PDC bit selection. *Proc Drilling Conf*, 1995: 569
- [7] 杜镰, 杨世良. 岩石可钻性能量法现场实验研究. 西南石油学院学报, 1994, 16(4): 66
- [8] 张绍和. 一种新的岩石可钻性分析方法研究. 探矿工程, 1999(6): 32
- [9] Liu H, Yin K K. Analysis and interpretation of monitored rotary blasthole drill data. *Intl J Surf Min Reclam Environ*, 2001, 15(3): 177
- [10] 谭卓英, 赖海辉. 冲击回转式凿岩扭矩的分析与计算. 矿业研究与开发, 1993(4): 19
- [11] 徐军, 李春兰, 卢文发, 等. 旋转机械的功率在线测试. 热能动力工程, 1999, 14: 135
- [12] 滕子军. 用钻进参数仪实时判层. 煤田地质与勘探, 2000, 28(2): 58
- [13] Tan Z Y. Report on Field Tests at Lam Tin & Ho Man Tin Sites, Drilling Process Monitor System (DPM) for Hydraulic Drill Rig. Hong Kong: Hong Kong University, Hong Kong Jockey Club, 2002

Theory and approach of identification of ground interfaces based on rock drillability index

TAN Zhuoying¹⁾, CAI Meifeng¹⁾, Z. Q. Yue²⁾, L. G. Tham²⁾, C. F. Lee²⁾

1) State Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mines (University of Science and Technology Beijing), Ministry of Education, Beijing 100083, China

2) Department of Civil Engineering, Hong Kong University, Pokfulam Road, Hong Kong, China

ABSTRACT Rock drillability index is a very key parameter in selection of drill bit type and determination of productivity in petroleum, mining and geology. Unfortunately, there are many limits in the current definition as well as experimental methods. Drillability is redefined and a new concept of drillability index is brought out from analysis. Under the new concept, the drillability index is defined as penetration rate under specific energy. Based on the coupling relationship among effective thrust, rotation speed, penetration rate and drillability index, a calculation formula is established. Besides, the sensitivity of the drillability index in identification of ground layer is analyzed and its physical signification is expatiated also. The result shows that the new index overcomes the blind area in the traditional concept and can be used in continuous identification of ground layer along borehole profile.

KEY WORDS rock drillability; ground interface; identification; drilling parameters; coupling relationship