

77-80, 封三

岩石分级理论与方法综述

雷少全

(核工业中南勘察技术研究所·长沙)

p588

A

简要介绍岩石分级测试理论与方法,通过对大量的测试数据进行数理统计分析、建立相关的数学模型,求出各项岩石等级数值,并由此制订出一系列岩石分级图表。

关键词 岩石, 分级, 数学模型



钻探设备

岩石分级是制订岩心钻探生产定额的重要依据,许多科研、生产部门为此作了大量的测试工作,并制订了一系列岩石等级分级表及生产定额指标。我所经过 3 年时间的研究和测试,研制出一整套测试系统和测试仪器,进一步论述了岩石等级测试技术理论,通过对大量测试数据进行数理统计分析,建立了具有代表意义的数学模型,求出各变量之间的相关系数和岩石等级数值,并由此制订出适合我局(中南地勘局)系统的一系列岩石分级表。

我们采用的测试系统与方法包括压入硬度测试、摆球硬度测试、 $\varnothing 8$ 微钻测试、 $\varnothing 20$ 微钻测试、超声波检测等项目,岩石等级有单项指标和综合指标之分。

1 岩石等级测试与比较

1.1 压入硬度测试与摆球硬度测试

压入硬度是表征岩石抵抗外力破坏、产生破碎穴的一种力学指标,它虽然不能直接反映岩石的可钻性,但却与之有着密切的关系。这种关系可以借助于某种数学模型间接地反映出来。由于岩石结构、风化程度、矿物成分、胶结物颗粒粗细不同,同一种岩石的测值还是有一定的波动范围,因此在制订岩石

压入硬度等级时,必须依据“细测粗分”的原则,把分级区间确定下来。

摆球硬度主要是通过钢球回弹次数和第一次回弹角度来测试岩石的动弹特性及塑性变形能力。摆球硬度与压入硬度比较,主要存在着测值离散程度偏大,试样尺寸效应明显等问题。尽管如此,摆球硬度计作为一种简易可行的仪器仍有其独特之处,它也能一般地反映岩石的完整性和软硬程度,并与压入硬度测值存在着显著的相关关系。

此外,我们还发现,随着岩石级别的增加,摆球硬度测值的级间区域愈来愈窄,特别是在 X 级以上,岩石级别的“分辨率”不高,级间致密,区间变窄,这也是摆球硬度在岩石分级测试中一个明显的不足。

相对而言,压入硬度作为一种衡量抵抗外力破坏并产生破碎穴的指标,其测值相对稳定,误差主要取决于岩石本身的固有属性,如岩石的隐裂纹、胶结强度、风化蚀变、节理发育程度、矿物成分及晶粒大小等。但是,压入硬度正如摆球硬度一样,因其不能完全模拟钻进岩石的破碎方式而无法准确地表征岩石可钻性的本质。此外,由于仪器的局限性,用压入硬度计测试 V 级以下软弱岩石时,压头需压下一一定深度后压力表才有明显的卸压反映、随着压头的继续压入,压力表指针往往有二次反弹现象,这些都说明岩石从被压入

到产生破碎是分阶段进行的,即是“压实—产生微裂纹(伴有响声)—再压入—裂纹扩展—产生破碎穴(发生爆裂声)”这样一种过程。

同样,摆球硬度亦不能真实地反映岩石可钻性的本质和特征,只能测定岩石的完整程度和软硬程度。与压入硬度比较,摆球硬度测值误差较大,重复性差,主要有几个因素:①岩心尺寸效应明显,粗且长的岩心测值偏大,反之偏小,非标准尺寸的岩心,其测值必须校核,这一点可以从功能原理的角度去解释,即钢球的体积和质量是恒定的,当岩心体积变大时,钢球碰撞岩心后所获取的动能和弹性能随之增大,反之亦然。②岩心测试面的光洁度对测值影响颇大,岩面粗糙,当钢球打击岩石时,实际上形成多点接触,岩石吸收的能量相对增加,相应地,钢球所得到的反弹能减少,即钢球的回弹次数减少。③同一块岩心,不同打击点,钢球的回弹次数亦有差异。对非均质岩心尤其如此。④如果岩石存在隐裂纹等缺陷,尽管其表面硬度大,其摆球硬度测值反而降低,这说明岩石由于裂纹的存在而传递给钢球的反弹能减少。

由此可见,摆球硬度属弹性硬度,它只能反映岩石的弹性和完整程度,以及岩石在受钢球冲击时,接收动能和释放弹性能的交变过程,尽管它与压入硬度的作用机理不同,但两者之间仍存在着较高的相关关系。

1.2 微钻测试

金刚石微型钻头钻进岩石,以钻速(mm/min)作为分级指标,是一种模拟性强、测值数据稳定的分级方法,它弥补了压入硬度和摆球硬度测试方法的不足。微钻测试原理与实际钻进原理一样,其破碎方式包括剪切、磨削、犁入、压入、微冲击等,是一种异常复杂的动态力学综合指标。因此,微钻作为一种新的测试手段,尤其适合进行岩石可钻性分级,严格地说,岩石可钻性等级不能简单地等同于一般意义上的硬度等级,即不等同于压入硬度和摆球硬度指标,但它们之间也确

实存在一定的相关关系。

然而,微钻测值也会因钻头本身的因素(如加工工艺、磨料及配料等)而受到影响,所以在用微钻测试岩石可钻性之前,应该先对微型钻头进行标定,以确定其钻速校正系数。如果发现同一钻头的钻速明显降低,则说明该钻头已磨损严重或出刃不正常,这时须用砂轮磨锐并重新进行标定。

选择人造均质材料作为标准测试块,在一定规程下使钻头钻进标块,测出钻头的钻速,并以其中一个测值作标准值。当其余钻头钻取标块得到相应的测值时,再以此测值除以标准值,所得的比值即是钻头的钻速修正系数。确定钻头的钻速修正系数可以大大减少因钻头本身原因而带来的测试误差。

2 数理统计技术在分级中的应用

2.1 压入硬度与摆球硬度的相关分析

从散点图1看,压入硬度与摆球硬度大致呈抛物线关系,当样本容量 $N=93$ 时,二者关系的直线经验公式为:

$$H_Y = -68 + 9.826H_x, r = 0.762$$

其中, H_Y ——压入硬度(kg/mm^2); H_x ——摆球硬度(弹次); r ——相关系数。

上式说明,压入硬度与摆球硬度存在一定的相关性,但不是很理想,如果二者关系作非线性处理,则 r 可能提高一些,但测值的离散性和不一致性仍不可避免,而且还比较明显。

2.2 压入硬度与摆球硬度的综合定级

同一块岩石,压入硬度与摆球硬度不一定能同时落入同一级别区间,这就给我们提出了如何确定二者的综合评定级别问题。为此,我们应用数理统计技术方法对两种测试数据进行回归分析。回归方程:

$$K_1 = 2.8968 + 0.0107H_r + 0.0168H_n \quad (1)$$

复相关系数: $r_f = 0.97$,说明相关性很

高。

剩余标准差: $S_D = 0.367$ 。说明离散性小, 预报精度高。设置信水平 $\alpha = 0.05$, 试进行 t 检验, 查表知 $t_{0.05} = 1.980$, 检验结果 $t_{HY} = 20 > 1 > t_{0.05}$, $t_{H_1} = 2.6 > t_{0.05}$ 。检验结果说明回归方程高度显著。

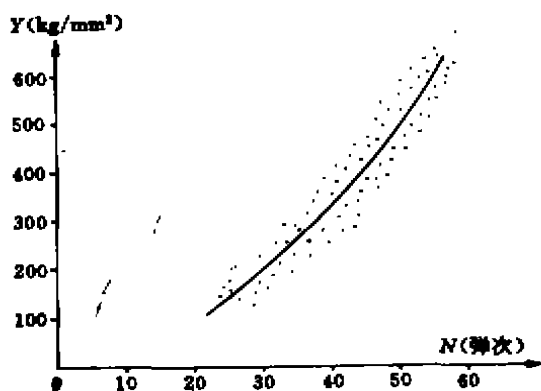


图1 压入硬度与摆球硬度关系散点图

然而, K_1 只反映岩石物理力学性质的一种定级指标, 而不能等同于岩石可钻性等级, 故有必要通过微钻测试来进行岩石可钻性分级。

3 微钻测试方法及其测值的统计分析

3.1 测试方法与测试规程

测试方法和仪器有3种: HW-20(8)型微钻测试台; 定级仪 HD-8 型; HT-8 型可钻度仪。尽管3种测试仪器不同, 但测试原理是一致的。

3种微钻测试仪器都有同一测试规程, 即钻进参数(钻压、泵量、转速)恒定及试验钻头均用人造均质材料作标定校核。

3.2 微钻测试数据的统计分析

对 $\varnothing 8$ 微钻和 $\varnothing 20$ 微钻测值作二元回归分析, 建立以下数学模型(回归方程)。

$$K_2 = 10.0388 - 0.01V_8 - 0.0592V_{20} \quad (2)$$

其中, V_8 —— $\varnothing 8$ 微钻数据 (mm/min); V_{20} —— $\varnothing 20$ 微钻数据 (mm/min); K_2 ——岩石可钻性级别。

偏相关系数: $r_{V_8-K_2} = -0.90$, $r_{V_{20}-K_2} = -0.925$ 。剩余标准差: $S_D = 0.0677$, 说明 K_2 离散程度小, 方程预报精度高。又设置信水平 $\alpha = 0.01$, 查表知 $t_{0.01} = 2.617$, 因为 $t_{V_8} = 21.38$, 且 $t_{V_8} > t_{0.01}$, 说明回归方程高度显著。

以上讨论了对 $\varnothing 8$ 与 $\varnothing 20$ 台微钻测试数据进行回归分析并综合定级的问题, 下面我们再讨论用 HD-8 型岩石可钻性定级仪进行采样, 并通过统计分析所得出的岩石级别计算式:

$$K_D = 5.56 + 0.122T, (T > 8) \quad (3)$$

$$\text{或 } K_D = 5.58 + 0.0293n, (n \geq 48) \quad (4)$$

其中, T ——采样时间 (s); n ——比转数 (r/mm); K_D ——定级仪岩石级别计算值。

上式是指当仪器表压 $P = 0.8$ (MPa), 且钻进 VI 级以下软弱岩石而得出的。当测试钻头钻进软弱岩石时, 岩粉骤然增多, 电磁泵排量相对不足, 钻速反而减慢。因此, 测试软弱岩石时, 必须使表压减至 $P = 0.4$ (MPa), 这时得出的岩石定级公式:

$$K'_D = 2.16 + 0.185T \quad (T \leq 26s) \quad (5)$$

此外, 我们还可以根据采样数据和以上回归方程讨论与之相关的参数, 对式(5)可通过计算和查表验算求出: 剩余标准差 $S_D = 0.62$, 离散系数 $V = 0.38$, 相关系数 $r = 0.80$, 检验参数 $t = 10.5$ 。由此看出, 回归方程高度显著, 用定级仪进行采样, 数据稳定可靠。如果以比转数 n (r/mm) 作变量进行非线性回归分析, 则可以明显地提高回归方程的预报精度, 下面是推导出来的幂函数计算公式:

$$K'_D = 1.796n^{0.342} \quad (6)$$

式中, K'_D ——岩石级别。相关系数 $r = 0.855$, 标准差 $S_D = 0.059$, 这说明式(6)比式(5)更为显著, 相关程度更为密切。

HT-8 型岩石可钻度仪是砝码—杠杆

恒定给压的一种轻便岩石等级测试仪。钻头压力由杠杆力臂长度 L 调节,测试 6.5 级以上岩石时,则规定 $L=280\text{mm}$,6.5 级以下时, $L=140\text{mm}$ 。采样数据是每进尺 0.5mm 钻头的转数,由此可换算为比转数(单位进尺的转数)。

通过大量采样数据的整理分析,得出 HT-8 型岩石可钻度仪如图 2 所示的分级曲线图。

4 各项测值之间的相关分析

$\varnothing 8$ 微钻分级指标 $V_8(\text{mm}/\text{min})$ 在几种微钻测试手段中均作为采样数据,在实际分级中占主导地位,它与 $\varnothing 20$ 微钻、压入硬度、摆球硬度等测试指标存在一定的相关性。这里试以台微钻的 V_8 为因变量作一元回归分析,看看它与其他测试指标的关系。

表 1 V_8 与各测试指标间的关系

回归类型	回归系数 a	回归系数 b	相关系数 r	检验参数 t	剩余标准差 S
V_8-H_n	73.83	-0.95	-0.62	-8.135	10.2
V_8-V_T	65.68	-0.093	0.75	-10.75	9.7
V_8-V_{20}	3.76	0.71	0.82	12.97	7.8

5 岩石等级测试综合分析

由于各自测试方法的作用机理不同,引起的偶然误差和系统误差也有差异。同一块岩石的测值可能落在不同的分级区间,就有必要作多因素的回归分析。

多因素回归分析包括压入硬度、摆球硬度、 $\varnothing 8$ 台微钻和 $\varnothing 20$ 台微钻 4 项指标,综合定级的一个优点是可以兼顾多种测试指标的影响,尽可能少地清除某一测值误差带来的影响,使岩石定级更为精确可靠。

综合定级数学模型:

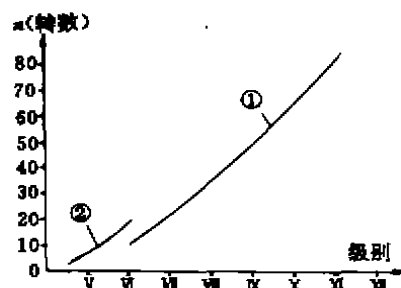


图 2 H1-8 型可钻度仪分级曲线图

曲线①: $L=280\text{mm}$; 曲线②: $L=140\text{mm}$

从表 1 看出,台微钻 V_8 与台微钻 V_{20} 相关程度最高,其次是压入硬度,再次是摆球硬度 H_n ;从剩余标准差 S 的数值看,回归方程的预报精度也是“ V_8-V_{20} ”最高,其次是“ V_8-H_T ”,再次是“ V_8-H_n ”;从 t 值看,所有的回归方程均通过 t 检验。

$$K = 7.6021 + 0.0033H_T + 0.008H_n - 0.0063V_8 - 0.038V_{20} \quad (7)$$

式中: H_T ——压入硬度测值; H_n ——摆球硬度测值; V_8 、 V_{20} —— $\varnothing 8$ 、 $\varnothing 20$ 台微钻; K ——综合级别。

复相关系数 $r=0.946$,剩余标准差 $S_D=0.073$,经 t 检验,回归系数均高度显著。

另外,还可用加权平均方法计算 K 值。

6 岩石等级分级图表

6.1 岩石等级分级曲线(图 3)

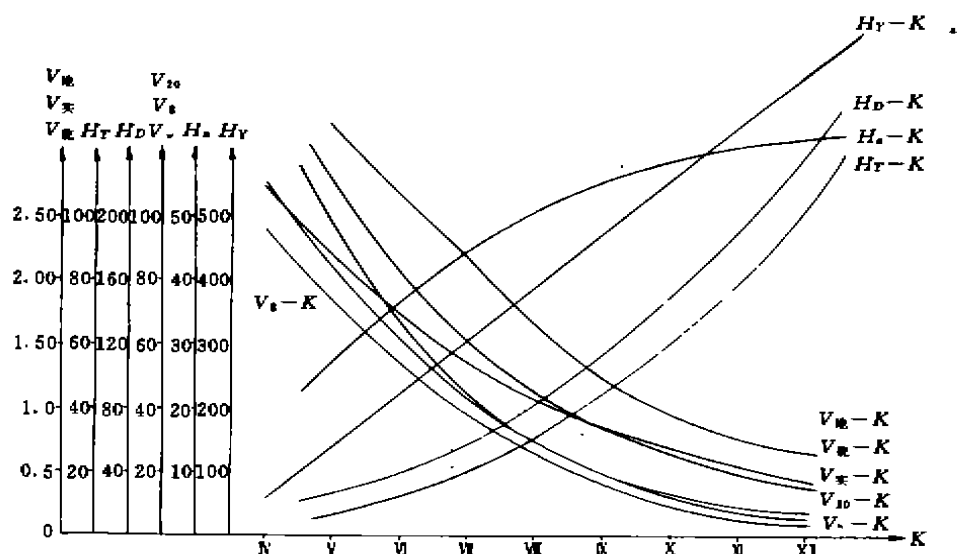


图3 岩石等级分级曲线

H_Y —压入硬度(kg/mm^2); H_S —摆球硬度(弹次); V_8 、 V_{20} — $\varnothing 8$ 、 $\varnothing 20$ 台微钻(mm/min); $V_{地}$ —地矿部统计的微钻钻速(mm/min); H_D —HD-8定级仪指标($\text{mm}/\text{转}$); H_T —HT-8可钻度仪指标($\text{mm}/\text{转}$); $V_{实}$ —室内实钻钻速(m/h); V_{10} —1981年本局统计钻速(m/h); $V_{地}$ —地矿部1984年统计时效(m/h); K —岩石等级

6.2 岩石分级表(表2)

表2 岩石分级表

项目	单位	Ⅳ以下	V	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X	XI	XII
压入硬度	kg/mm ²	<100	90~190	175~275	260~360	340~440	420~520	500~610	600~720	>720
摆球硬度	弹次	<22	22~34	32~42	40~48	46~52	50~56	55~61	59~64	>62
∅20 台微钻	mm/min	100~150	75~100	50~75	34~50	22~34	16~22	10~16	6~10	<6
∅8 台微钻	mm/min	90~140	60~90	42~60	30~42	20~30	14~20	10~14	6~10	<6
定级仪(HD-8型)	s			8~11	12~15	16~22	23~32	33~45	46~58	>58
	n(r/mm)			34~48	48~64	64~90	90~134	134~180	180~230	>230
可钻度仪(HT-8型)	N(转)			6~12	13~23	24~36	37~53	54~70	71~89	>89
超声波检测	m/s									
实钻测试	m/h									

注:HD-8型定级仪与HT-8型可钻度仪V级以下分级数据由于采用不同测试条件而暂略。

A Brief Account on the Theory and Method for Grading Rocks

Lei Shaoquan

A short introduction of the theory and method for the graduation of rocks is given. Based upon a wealth of test data from statistical analysis, correlation mathematical models were established and numerical values for grading different rocks were thus obtained and plotted as a series of graphs and tables for practical uses.