

用主因子分析研究岩石物理机械性质

单志刚

(中国地质大学·武汉)

结合室内模拟钻进试验,运用多元统计中的主因子分析方法,研究了32种岩石的10种岩石物理机械性质,认为岩石的物理机械性质是以综合方式对碎岩效果产生影响,岩石的研磨性、塑性系数和压入硬度是主要因素,其次是弹性模量。

关键词: 主因子分析; 岩石物理机械性质; 碎岩效果; 金刚石钻进

岩石性质对钻进效果有很大影响。以往研究的多半是岩石强度和硬度等单一(或少数)指标,而综合考虑岩石物理机械性质不够。

本文结合室内模拟钻进试验结果,运用多元统计中的主因子分析方法,研究了32种岩石的10种岩石物理机械性质,旨在阐明影响钻进效果的主要岩石性质,作为确定钻进工艺参数、选择设备和合理选用钻头的主要依据。

试验条件

试验在武汉地质学院钻探研究室的多参数模拟回转钻进试验台上进行。该试验台通过压力、扭矩、流量、位移等传感器,可随钻同步测量和记录钻压、扭矩、进尺、冲洗

液量等9个参量。

岩样采自内蒙、山西、山东等11个矿区,共32种有代表性的岩石,测定了每种岩石的压入硬度、塑性系数、弹性模量等10种物理机械性质指标。

试验选用郑州探矿厂的热压人造金刚石孕镶钻头,数据用微机处理。试验过程中还分别用显微镜对钻头唇面状态和孔底形状进行了跟踪观察、测量和照相。

试验结果

钻头的金刚石浓度为80%,粒度8目,胎体硬度30~35HRC。钻进规程: $P=70\sim 80\text{kg/cm}^2$, $n=1500\text{rpm}$, $Q=3\sim 6\text{L/min}$ 。为减少钻头唇面状态对试验结果的影响,每钻进30秒测一次钻速,根据其波动情况,每

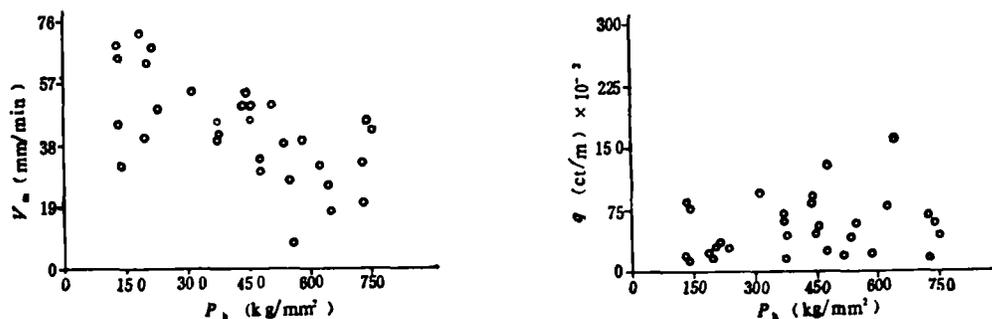


图1 压入硬度与钻速、金刚石耗量的关系

试验条件: $P=70\sim 80\text{kg/cm}^2$; $n=1500\text{rpm}$, 钻头70~80%金刚石, 80目(下同)。

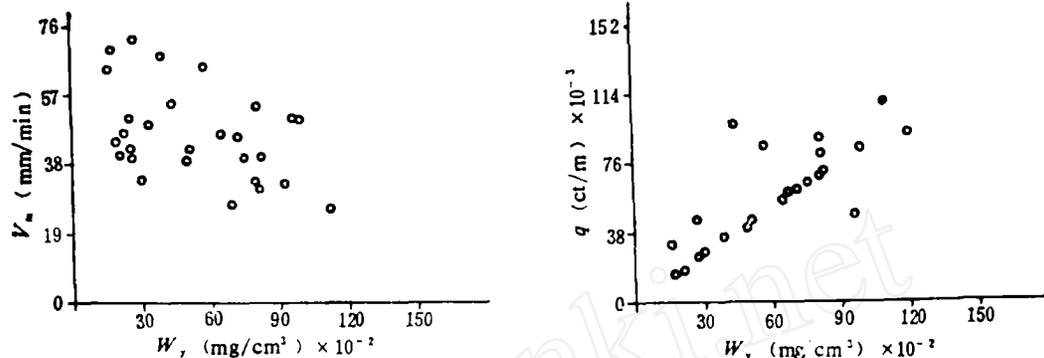


图2 研磨性与钻速、金刚石耗量的关系

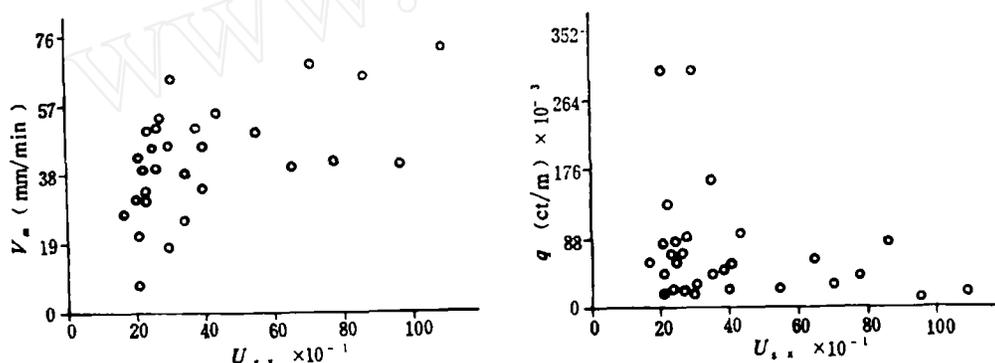


图3 塑性系数与钻速、金刚石耗量的关系

种岩石钻进4~6分钟。每次钻进前，先在镜下观察钻头唇面，并对已磨钝的钻头唇面进行预处理，以保证钻头唇面状态基本保持一致。

图1~3是根据32种岩石的试验结果用计算机打印的散点图，它们展示了10种岩石物理机械性质与平均钻速和金刚石耗量的关系。

从试验结果可以看出，岩石物理机械性质对钻进效果的影响不是孤立的，而是以综合方式表现出来。例如，压入硬度高的岩石，其研磨性未必大；弹性、塑性的变化情况则更为复杂。所以，即使在同样的钻进工艺条件下，硬度相同的岩石所表现的钻进效果也有很大差异。这说明，不是某一种岩石性质对钻进效果有影响，而是诸多性质对其产生综合影响。不过，它们的影响程度不同，并有主、次之分。采用常规方法对这种

影响程度进行定量分析无疑是困难的。笔者借助于多元统计中的主因子分析方法，探讨了岩石物理机械性质对钻进效果的影响。

主因子分析

表1是用JACOBI法求得的10个岩石物

岩石物理机械性质特征 表1

序号	特征值	累积值	累积百分比
1	0.05330	0.05330	45.6
2	0.03438	0.08768	75.0
3	0.01204	0.09972	85.3
4	0.00720	0.10692	91.4
5	0.00479	0.11171	95.5
6	0.00316	0.11487	98.1
7	0.00200	0.11687	99.8
8	0.00022	0.11709	99.9
9	0.00007	0.11716	100
10	0.00002	0.11718	100

岩石物理机械性质因子载荷 表 2

序号	变量	F ₁	F ₂	F ₃
1	ρ	0.016940	0.004913	-0.010360
2	H _γ	-0.104900	-0.038520	-0.006340
3	W _γ	-0.114600	0.141600	-0.024030
4	E _d	-0.002243	0.015110	0.053120
5	G _d	0.000290	0.025340	0.056040
6	U _b	0.005080	-0.047860	-0.049960
7	λ	0.005274	-0.057560	-0.002710
8	K	0.011880	-0.020750	0.032270
9	β	0.012580	-0.018160	-0.037050
10	U ₁	0.168900	0.074620	-0.020930

表中: ρ—岩石密度 (g/cm³); H_γ—压力硬度 (kg/mm²); W_γ—相对研磨性 (mg/cm³); E_d—动弹模量 (kg/cm²); G_d—剪切模量 (kg/cm²); U_b—泊松比; λ—拉梅系数 (kg/cm²); K—体积模量 (kg/cm²); β—纵横系数; U₁—塑性系数

理机械性质指标的特征值; 表 2 是取前 3 个特征值 (λ₁=0.05330, λ₂=0.03438, λ₃=0.01204) 计算出的主因子载荷矩阵。

讨论

1. 3 个主因子总方差贡献为 85.3%, 说明它们基本上可以反映出 10 个岩石物理机械性质指标的信息, 也就是说 10 个岩石物理机械性质可以用 3 个主因子的线性组合来表示, 每个线性组合相当于一个回归方程。表 2 的因子载荷数值即为回归系数。岩石研磨性和塑性系数可分别表示为:

$$W_{\gamma} = -0.1146F_1 + 0.1416F_2 - 0.02403F_3$$

$$U_1 = 0.1689F_1 + 0.07462F_2 - 0.02093F_3$$

因子得分较高的岩石物理机械性质 表 3

F ₁	F ₂	F ₃
U ₁ (0.1689)	W _γ (0.1416)	G _d (0.05604)
W _γ (-0.1164)	U ₁ (0.0746)	E _d (0.05312)
H _γ (-0.1049)	K (-0.04786)	U _b (-0.04996)

2. 在 3 个主因子轴中, 取 3 个比重较大 (按绝对值大小) 的 3 个变量列于表 3。由表可见, 岩石研磨性、塑性系数和压入硬度在前两个主因子轴中比重最大, 在第三个主因子轴中比重较大的是剪切模量和动弹模量。因此, 可以判断出这几个岩石物理机械性质是影响钻岩效果的主要因素。如按 W_γ、U₁ 和 H_γ 的因子载荷数值画在以 F₁、F₂ 和 F₃ 为坐标轴的三维空间中, 它们将分属 3 个不同的象限, 说明这 3 个变量具有相对独立的性质。研磨性对钻头磨损、碎岩能耗及钻速均有较大影响, 而塑性系数只与钻速关系密切。

3. 从图 1~5 可以看出, H_γ、W_γ、U₁ 与 V_m 及 q 的关系有一定的离散性, 但仍可看出 V_m 随 H_γ 和 W_γ 的增加而下降, 随 U₁ 的增加而上升; 而在 E_d、G_d 与 V_m 及 q 的关系图中看不出明显的相关关系, 其离散性非常大。这也说明 H_γ、W_γ、U₁ 对钻岩效果的影响比 E_d、G_d 显著, 这与因子分析结果吻合。

压入硬度增大使得一定轴压下金刚石的“吃入”深度减小, 导致钻速下降。但由于压入硬度是在静压单载条件下测定的, 而孔底碎岩是在轴向和切向力动载作用下进行的, 加之同样的岩石压入硬度其研磨性不同, 故 H_γ 与 V_m 间存在一定离散性; 岩石研磨性的增加导致金刚石磨损加大, 使得钻速下降; 而塑性系数的增大, 使切削具易于“吃入”岩石, 故碎岩效率增加, 但金刚石耗量不一定小, 因为金刚石耗量在很大程度上受岩石研磨性的制约。

岩石弹性模量与钻速及金刚石耗量离散性较大的原因可能是: (1) 文中岩石的弹性指标是用声波法测定的, 而声波在岩石中的传播不仅与岩石的弹性有关, 还与岩石的密度、结构特征、裂隙及矿物组成有关; (2) 岩石的弹性模量只反映产生单位应变所需的力, 而不能完全反映岩石发生破碎时所需的

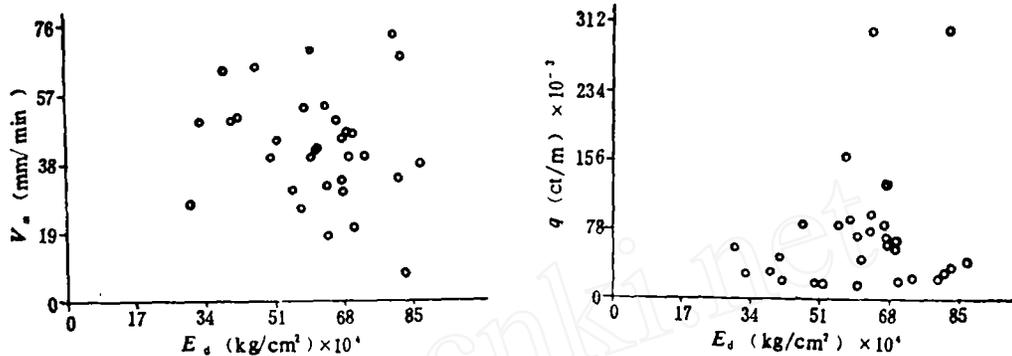


图 4 动弹模量与钻速、金刚石耗量的关系

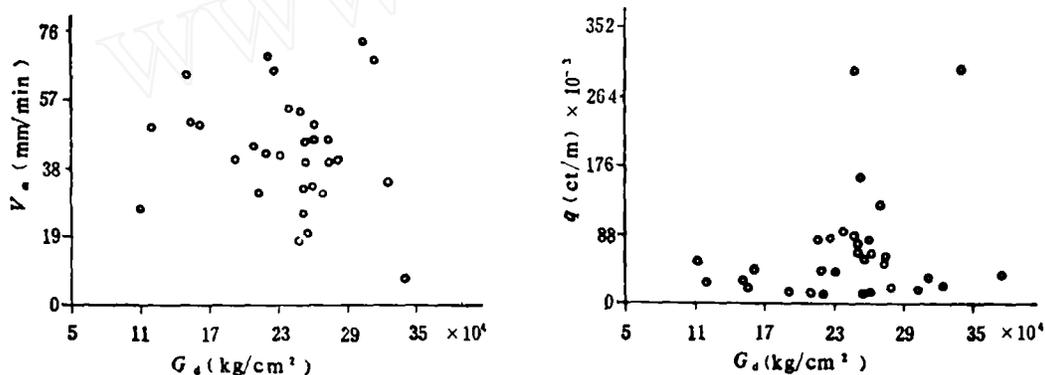


图 5 剪切模量与钻速、金刚石耗量的关系

载荷，弹性模量高的岩石其临界破碎载荷并不一定高。如本试验大理岩的弹性模量比花岗闪长斑岩高20~30%，但前者的抗破碎强度要比后者低得多，这也导致了弹性指标与钻速及金刚石耗量的离散性加大。

结 论

岩石物理机械性质是以综合方式对碎岩效果产生影响，单一的岩石性质指标不能确切反映钻岩的难易程度。在根据岩石物理机械性质确定工艺参数或选用钻头时，应综合

考虑岩石的多种性质指标。

金刚石钻进效果受岩石各物理机械性质影响的程度不尽相同，主因子分析结果表明，在诸多性质中，岩石研磨性、塑性系数及压入硬度是主要因素，其次是弹性模量。

利用主因子分析方法研究岩石物理机械性质，所得结果与实际基本符合。笔者认为主因子分析方法完全可以被钻探技术领域所采用。

本文是在屠厚泽教授指导下完成，谨致谢意！

A Study of Physical-Mechanical Properties of Rocks by Principal Factor Analysis

Shan Zhigang

Ten kinds of physical-mechanical properties of 32 rock types were studied by using the principal factor method of multivariate statistical analysis in combination with model drilling test in laboratory. It is believed that the physical mechanical properties exert an influence on the fragmentation of rocks in a comprehensive way. The wearlessness, plasticity index and press-in hardness of rocks are the principal factors, their elastic modulus being subordinate.