

重力与固体潮

第四讲 岩矿石的密度
陈涛

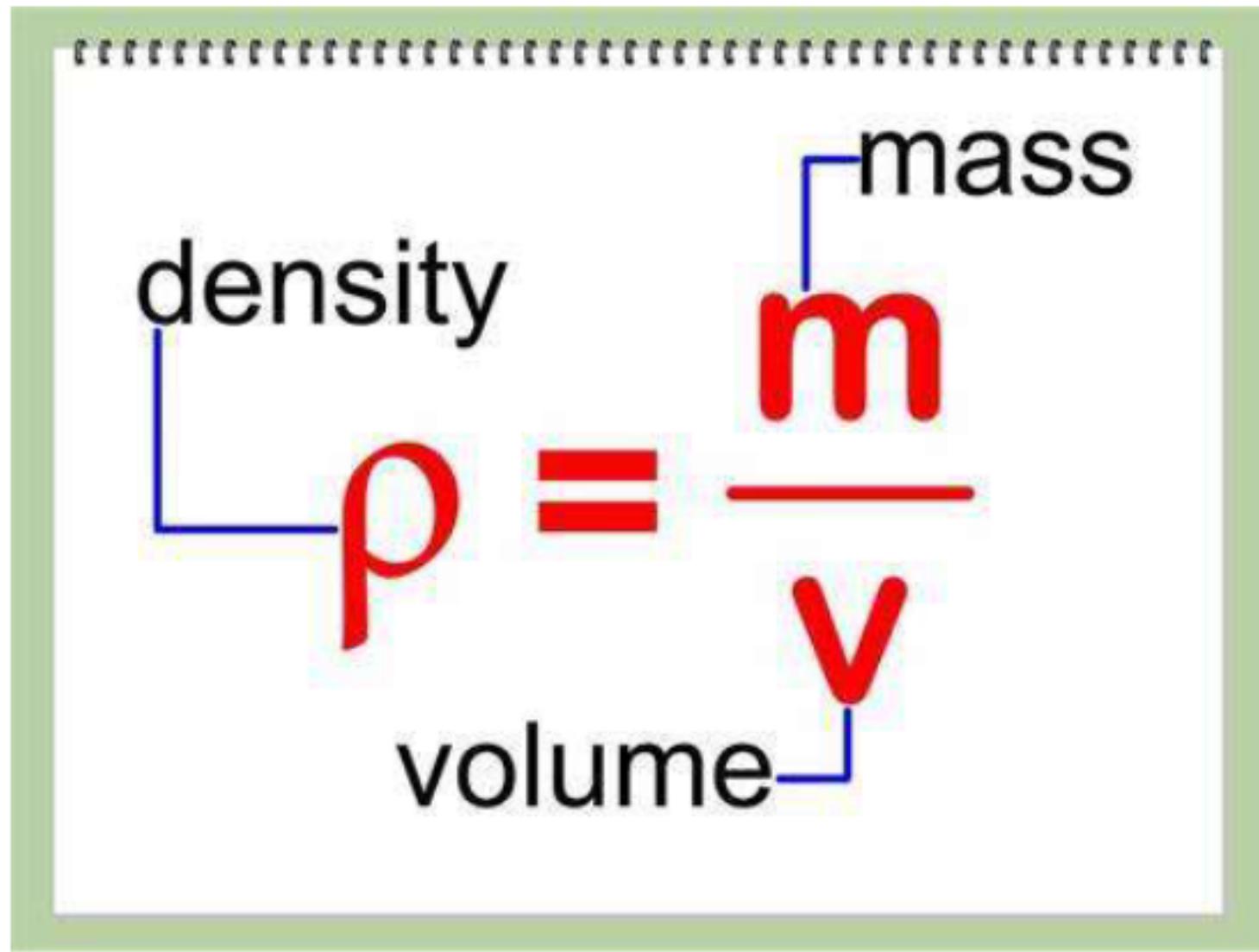
GeoGoku

地球物理学院
中国石油大学（北京）



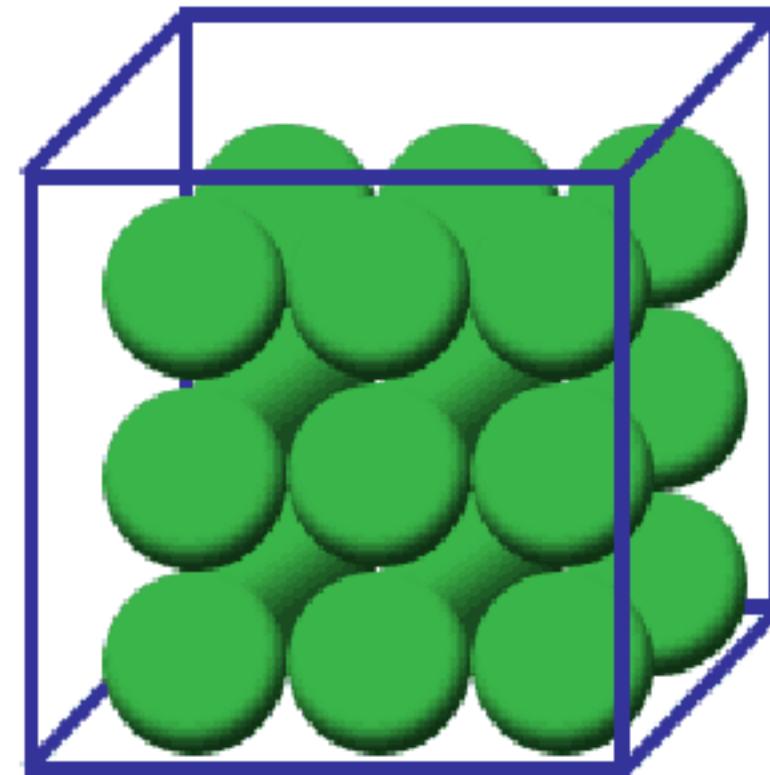
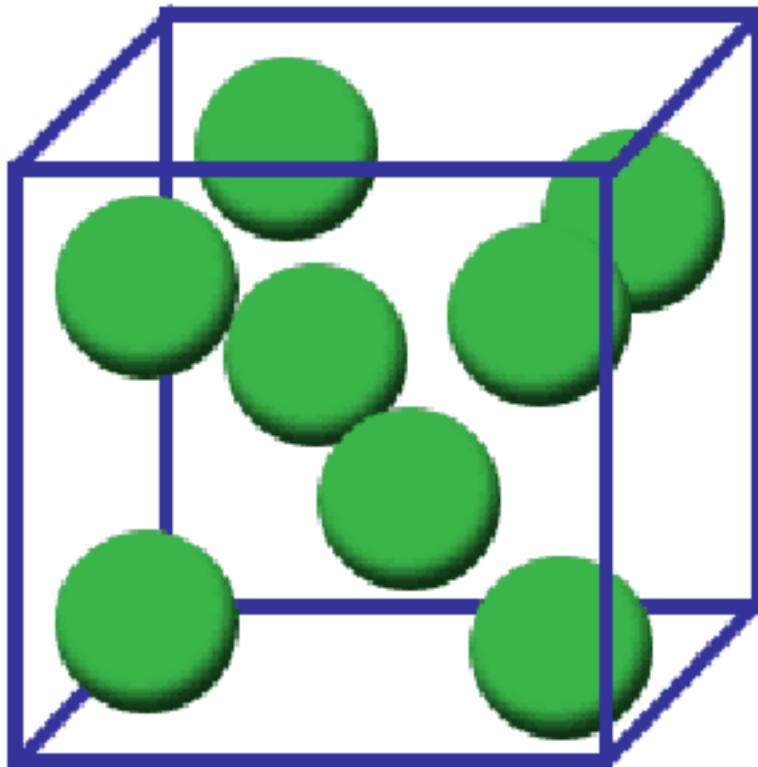
- 起潮力位的拉普拉斯展开
- 刚体地球重力固体潮的计算




$$\rho = \frac{m}{v}$$

The diagram illustrates the formula for density (ρ) as a ratio of mass (m) to volume (v). The word "density" is positioned above the symbol ρ , with a blue bracket-like line pointing to it. The word "mass" is positioned above the letter m , with a blue bracket-like line pointing to it. The word "volume" is positioned below the letter v , with a blue bracket-like line pointing to it.

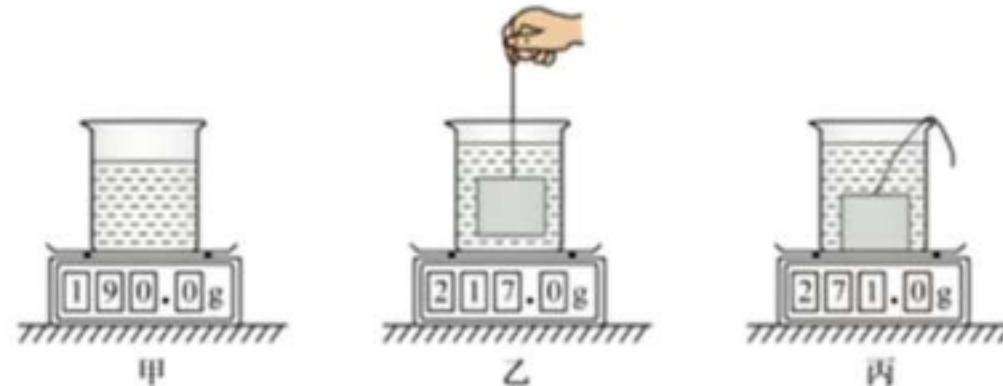
Density



(2020年重庆中考A卷) 妈妈买了一瓶免洗洗手液, 小明利用电子秤、烧杯、细线、实心铝块对这种洗手液的密度进行测量, 已知铝的密度为 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。

步骤如下: ①在烧杯中倒入适量的洗手液放置在电子秤上, 如图甲; ②将系好细线的铝块缓缓浸没到洗手液中保持静止, 洗手液未溢出, 如图乙; ③将铝块缓慢沉底后松开细线, 如图丙。

(1) 图乙中铝块受到的浮力为 _____ N。洗手液的密度为 _____ g/cm^3 。



为什么要研究岩（矿）石密度

- ✓ 重力场是地球内部**物质质量分布**的反映，也就是**物质密度分布特征**的反映。
- ✓ 地下**物质、岩石、矿石的密度**及其分布是重力场分析与解释时的**基本数据和资料**。
- ✓ 密度测定工作的好坏，影响到重力工作中的重力计算、分析的精度，影响到解释结果的可靠性，关系到重力研究成果质量高低的大问题。

第一节 岩矿石的密度

1. 岩矿石的密度

研究意义

GeoGoku

地壳内不同地质体之间存在的**密度差异**，是进行**重力勘查**的**地质-地球物理前提条件**。



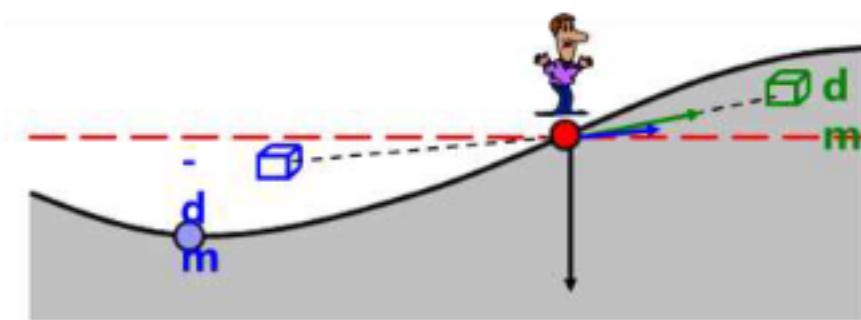


1. 岩矿石的密度

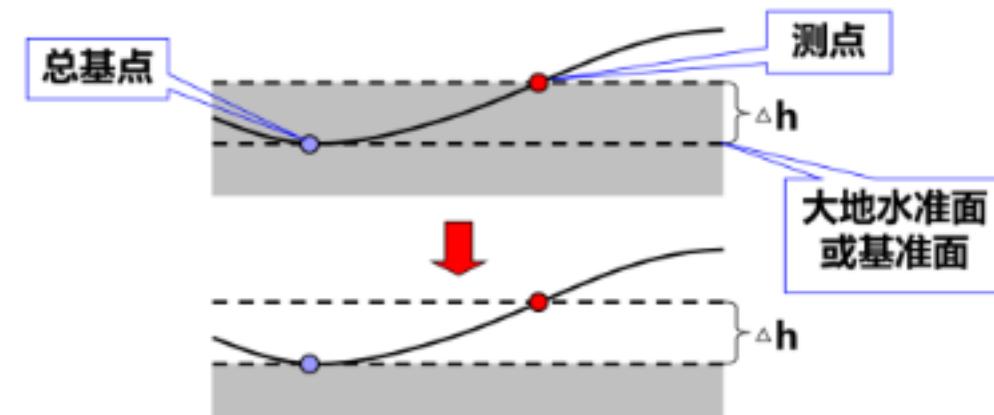
研究意义

GeoGoku

地质体的密度也是对重力测量结果进行**地形校正**和**中间层校正**不可缺少的参数



地形校正



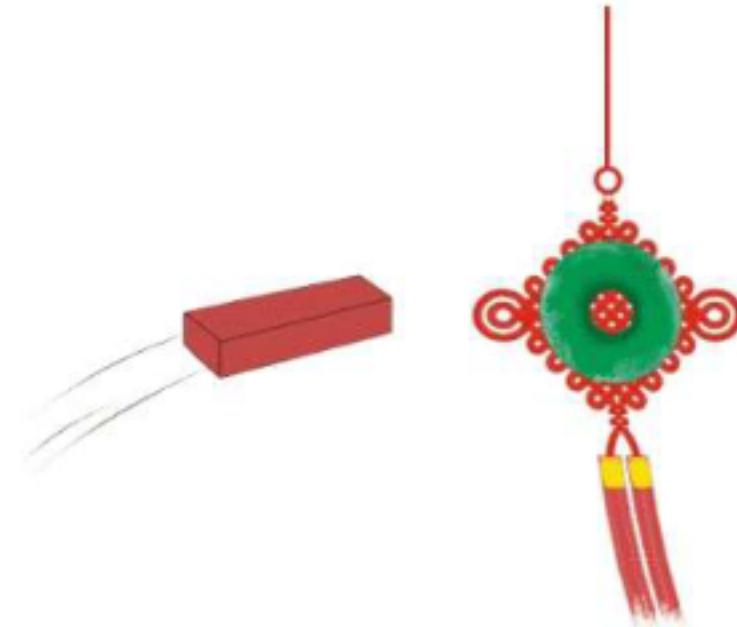
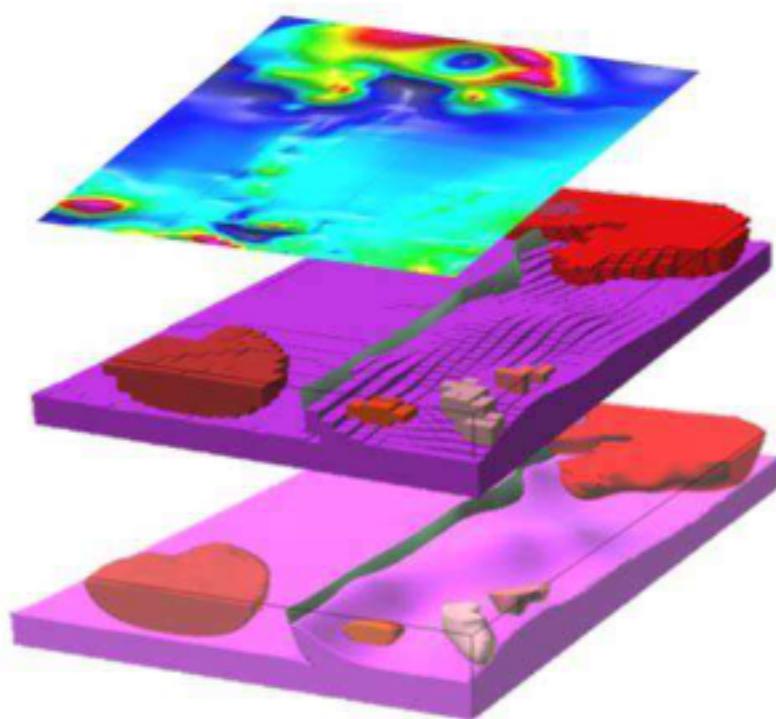
中间层校正

1. 岩矿石的密度

研究意义

GeoGoku

密度资料对于重力异常的正演计算及反演、解释也具有决定性的作用。



1. 岩矿石的密度

研究意义

GeoGoku

对岩石密度的测定以及对测定结果的分析研究是重力勘探工作的一个重要内容。

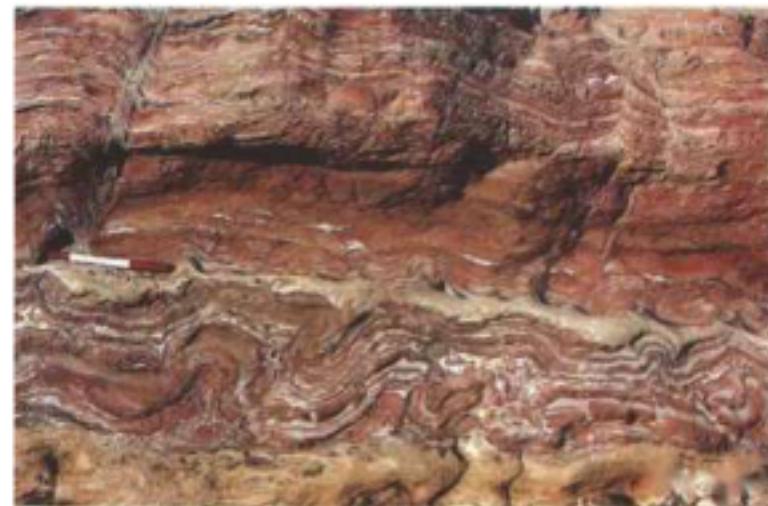


1. 岩矿石的密度

GeoGoku

■ 1.1 沉积岩的密度 ($1.6\text{-}2.7\text{ g/cm}^3$)

- ✓ 主要取决于岩石的孔隙度及岩石所处的构造部位。
- ✓ 沉积岩一般具有较大的孔隙度，密度主要取决于孔隙度大小，随孔隙度减少密度呈线性增大。
- ✓ 孔隙中充填物的成分(如水、油、气等)及充填孔隙的百分比明显影响着密度。
- ✓ 同一成分，时代较老的要比新的密度大些。
- ✓ 同一时代，盆地边缘密度大，向盆地中心密度逐渐减小。 (地质作用)



1. 岩矿石的密度

GeoGoku

■ 1.2 变质岩的密度 ($2.6\text{-}2.8\text{ g/cm}^3$)

- ✓ 密度与矿物的成分、含量和孔隙度均有密切关系，这主要由变质性质和变质程度大小决定。
- ✓ 一般区域变质作用的结果，使变质岩的密度比原岩的密度增大。
- ✓ 动力变质作用使原岩结构遭破坏，矿物被压碎，其密度比原岩密度低。但有时动力变质作用使原岩发生硅化，碳酸盐化以及重结晶，则密度会比原岩大些。

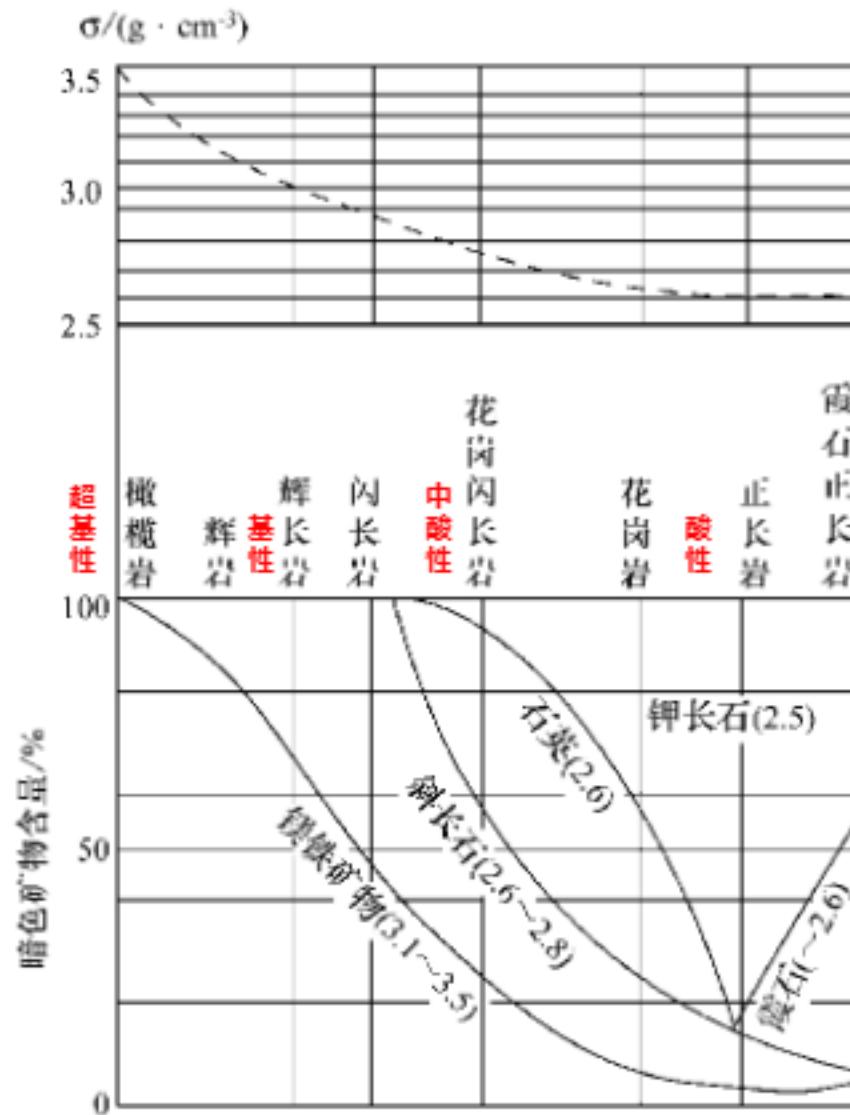


1. 岩矿石的密度

GeoGoku

■ 1.3 火成岩的密度 ($2.5\text{-}3.6\text{ g/cm}^3$)

- ✓ 主要由矿物成分及含量多少来决定。
- ✓ 酸性→基性→超基性岩，随着密度大的**铁镁暗色矿物**含量增多，密度逐渐增大。
- ✓ 成岩过程中的冷凝、结晶分异作用也会造成同一岩体不同岩相带，由边缘相到中心相，密度逐渐增大。
- ✓ 不同成岩环境(如侵入与喷发)也会造成同一岩类的密度有较大差异，同一成分的火成岩密度，喷出岩小于侵入岩。



1. 岩矿石的密度

GeoGoku

火成(岩浆)岩密度



变质岩密度



沉积岩密度

岩(矿)石密度值表

名 称	密 度(g/cm ³)	名 称	密 度(g/cm ³)	名 称	密 度(g/cm ³)
纯橄榄岩	2.5~3.3	大理岩	2.6~2.9	钛铁矿	4.5~5.0
橄榄岩	2.6~3.6	白云岩	2.4~2.9	磁黄铁矿	4.3~4.8
玄武岩	2.6~3.3	石灰岩	2.3~3.0	铬铁矿	3.2~4.4
辉长岩	2.7~3.4	页岩	2.1~2.8	黄铜矿	4.1~4.3
安山岩	2.5~2.8	砂岩	1.8~2.8	重晶石	4.4~4.7
辉绿岩	2.9~3.2	白垩	1.8~2.6	刚玉	3.9~4.0
玢岩	2.6~2.9	干砂	1.4~1.7	盐岩	3.1~3.2
花岗岩	2.4~3.1	粘土	1.5~2.2	硬石膏	2.7~3.0
石英岩	2.6~2.9	表土	1.1~2.0	石膏	2.2~2.4
流纹岩	2.3~2.7	锰矿	3.4~6.0	铝钒土	2.4~2.5
片麻岩	2.4~2.9	钨酸钙矿	5.9~6.2	钾盐	1.9~2.0
云母片岩	2.5~3.0	赤铁矿	4.5~5.2	煤	1.2~1.7
千枚岩	2.7~2.8	磁铁矿	4.8~5.2	褐煤	1.1~1.3
蛇纹岩	2.6~3.2	黄铁矿	4.9~5.2		

■ 1.4 油气层的密度

油气层的密度是指储油气岩层中岩石和流体的平均密度，岩石的密度与其组成矿物的种类和孔隙度关系密切。由于油气层孔隙度的变化范围较大，孔隙中充填的固相、液相和气相的密度差别相当大，储油气层的密度变化较大。通常，石油和天然气的密度小于水的密度，所以含油气层比储层其余部分的密度低。一般含气地层的密度变化范围为 $0.1\sim0.25\text{ g/cm}^3$ 甚至更大，而含油地层的密度变化范围则为 $0.1\sim0.15\text{ g/cm}^3$ 左右。

第一节 岩矿石的密度

第二节 影响岩矿石密度的因素



2. 影响岩矿石密度的因素

GeoGoku

决定岩石密度的主要因素是：

- ✓ 组成岩石的各种矿物成分及其含量的多少；（例如：橄榄石和石英）
- ✓ 岩石中的孔隙大小及孔隙中的充填物成分以及多少；
- ✓ 岩石所受压力大小等。



目 录

GeoGoku

第一节 岩矿石的密度

第二节 影响岩矿石密度的因素

第三节 岩矿石标本的测定



3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.1 岩矿石标本的采集

- ✓ 系统地采集不同构造单元及不同岩性的标本；
- ✓ 浅部（校正使用）、深部（地质解释）都要采集；
- ✓ 每类标本的数量一般为30-50块，每块标本重量一般在300 g左右；
- ✓ 对所采集的标本登记，编号，并注明地点、名称、地质年代及深度等；
- ✓ 考虑其它物性参数测定的要求，将标本价值最大化。

3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.2 标本密度测定 (天平测定法)



致密标本

3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.2 标本密度测定 (天平测定法)

标本密度：



$$\rho = m/V$$

根据阿基米德定律：物体在水中减轻的重量，等于它排开同体积水的重量，则

$$P_1 - P_2 = V \cdot \rho_0 \cdot g$$

空气中重量 $P_1 = mg$

4°C时，水的密度 $\rho_0 = 1 \text{ g/cm}^3$

水中重量 P_2

$$V = \frac{P_1 - P_2}{g}$$

3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.2 标本密度测定 (天平测定法)

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{P_1 - P_2}{g}} = \frac{m \cdot g}{P_1 - P_2} = \frac{P_1}{P_1 - P_2}$$

天平法测定—的精度取决于 P_1 、 P_2 的测定精度。 ρ 的最大绝对误差 ε_ρ ：

$$\varepsilon_\rho = \rho(2\rho + 1) \frac{\varepsilon_P}{P_1}$$

ε_ρ 不仅决定于标本称重误差 ε_P ，同时还与标本自重 P_1 和其实际密度 ρ 大小有关。



3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.2 标本密度测定（天平测定法）

$$\varepsilon_{\rho} = \rho(2\rho + 1) \frac{\varepsilon_P}{P_1}$$

- ✓ 在标本的重量相同、称重的精度也相同的情况下，密度愈大，测定的误差愈大。
- ✓ 若想减小误差，可选重量较大的标本来测定，但称重量大的天平精度又不高。
- ✓ 因此，标本重量既不能太小（轻），也不能太大（重），一般取300 g左右为宜，对于较高密度的标本可适当大些。

3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.2 标本密度测定 (天平测定法)



多孔标本

3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.2 标本密度测定 (天平测定法)

对于多孔的标本，为了防止水分浸入孔隙中而影响测定结果，可涂一层石蜡。

涂蜡后的体积：

$$V'' = \frac{P_2 - P_3}{\rho_0 g}$$

P_1 : 涂石蜡前空气中重量

P_2 : 涂石蜡后空气中重量

P_3 : 涂石蜡后水中重量

石蜡的体积：

$$V' = \frac{P_2 - P_1}{\rho_k g}$$

ρ_k : 石蜡密度

ρ_0 : 水的密度

标本的体积：

$$V = V'' - V' = \frac{(P_2 - P_3)}{\rho_0 g} - \frac{(P_2 - P_1)}{\rho_k g}$$



3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.2 标本密度测定 (天平测定法)

标本密度:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P_1}{\frac{1}{\rho_0}(P_2 - P_3) - \frac{1}{\rho_k}(P_2 - P_1)}$$

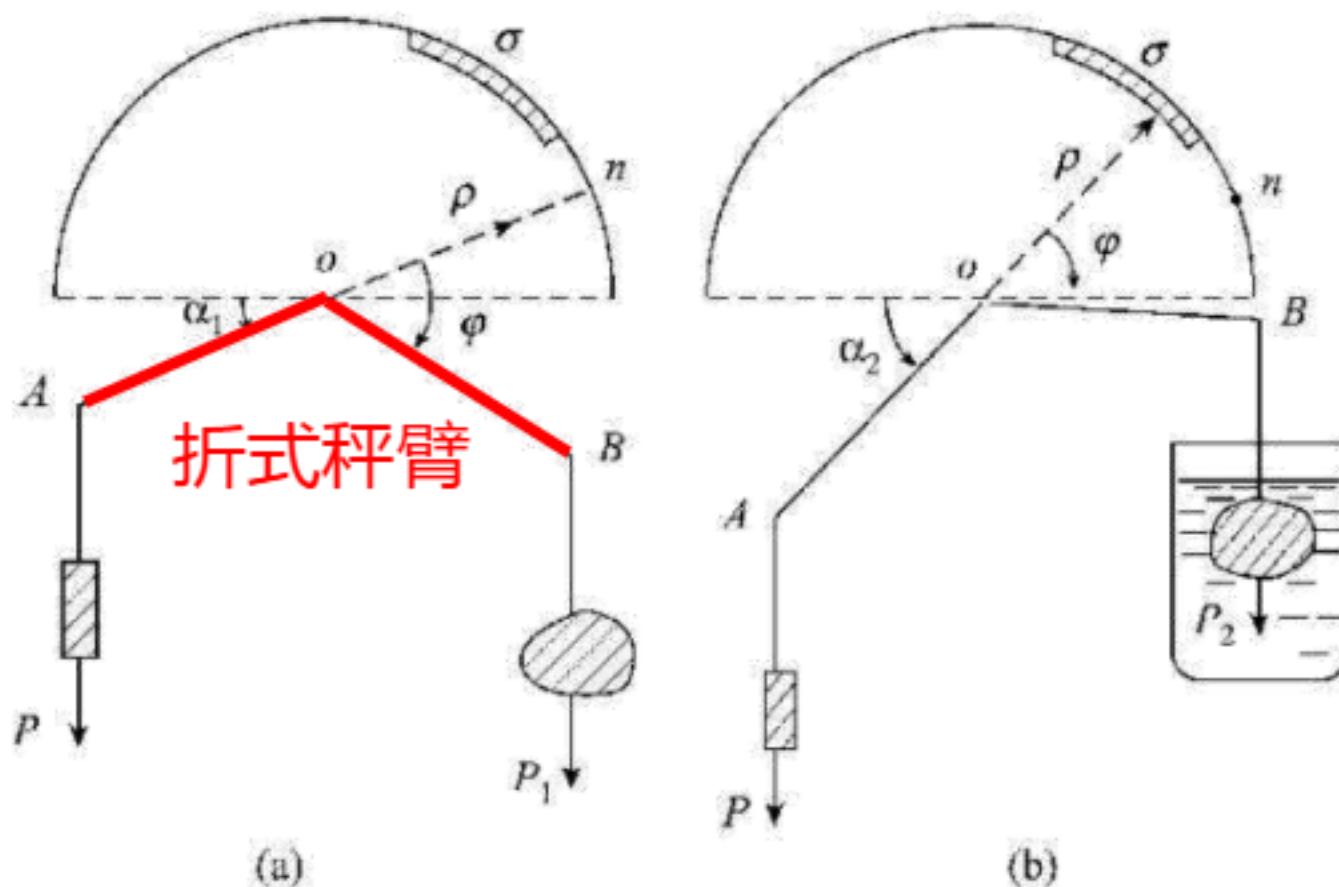
石蜡密度:

$$\rho_k = 0.9 \text{ g/cm}^3$$

3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.2 标本密度测定 (密度仪测定法)



密度仪原理 (前苏联萨姆索夫设计)

3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.2 标本密度测定 (密度仪测定法)

测定密度时，将标本悬挂在秤臂 B 端，调节 A 端悬挂的砝码的重量，使指针与刻度 n 重合，平衡关系式为

$$\text{砝码重量 } P \quad P \cdot r \cos \alpha_1 = P_1 \cdot r \cos(\phi - \alpha_1) \quad \text{标本空气中重量 } P_1$$

将标本浸没在水中，由于标本受到水的浮力使 B 端升高并达到新的平衡位置。这时 AO 与水平面夹角用 α 表示，则平衡关系式为

$$P \cdot r \cos \alpha_2 = P_2 \cdot r \cos(\phi - \alpha_2) \quad \text{标本水中重量 } P_2$$

标本的密度为：

$$\rho = \frac{P_1}{P_1 - P_2} = \frac{\cot \phi + \tan \alpha_2}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1}$$

3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.2 标本密度测定 (密度仪测定法)

$$\rho = \frac{P_1}{P_1 - P_2} = \frac{\cot \varphi + \tan \alpha_2}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1}$$

$$\alpha_2 = \arctan \frac{\cot \varphi + \sigma \tan \alpha_1}{\sigma - 1}$$

α_2 与标本重量无关， φ 、 α_1 为仪器常数，这时密度 ρ 只与 α_2 有单一对关系了。

将这些不同的 α_2 角度在度盘上只标上所对应的密度 ρ 值即可。

所以当标本浸在水中，待平衡后，指针所停留的刻度就直接指示出标本的密度了。

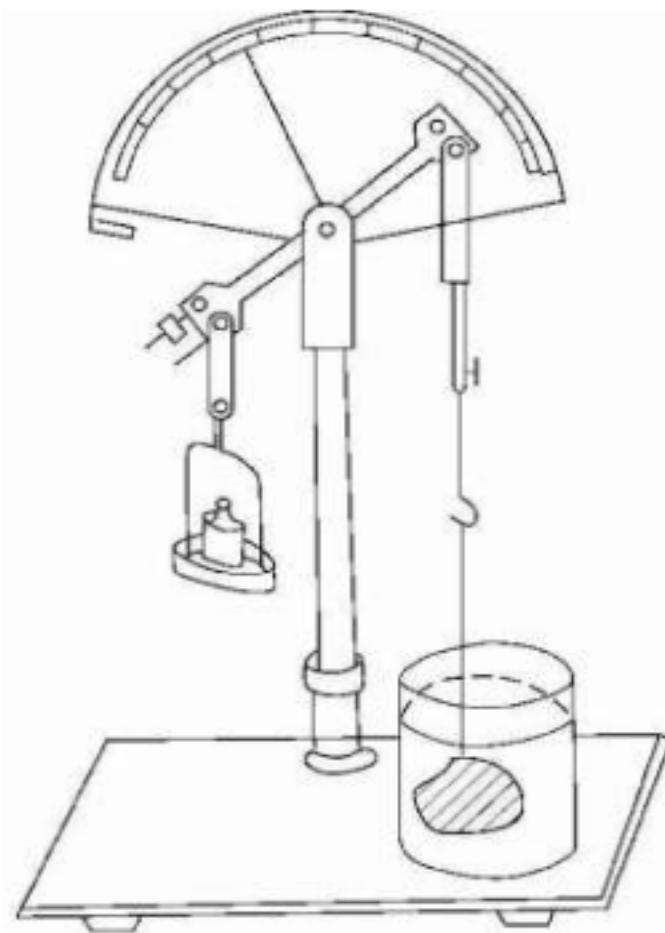
3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.2 标本密度测定（密度仪测定法）

密度仪的使用方法如下：

- a) 仪器调平、刻度盘垂直；
- b) 秤臂B端挂上挂钩，调节A端秤臂上左端配重螺丝，使转动系统处于随遇平衡状态；
- c) B端挂上标本，A端放置砝码，调节砝码重量，使指针指到刻度n；
- d) 将标本浸在水中，待平衡稳定后，指针所示的刻度值就是该标本密度 ρ 值。

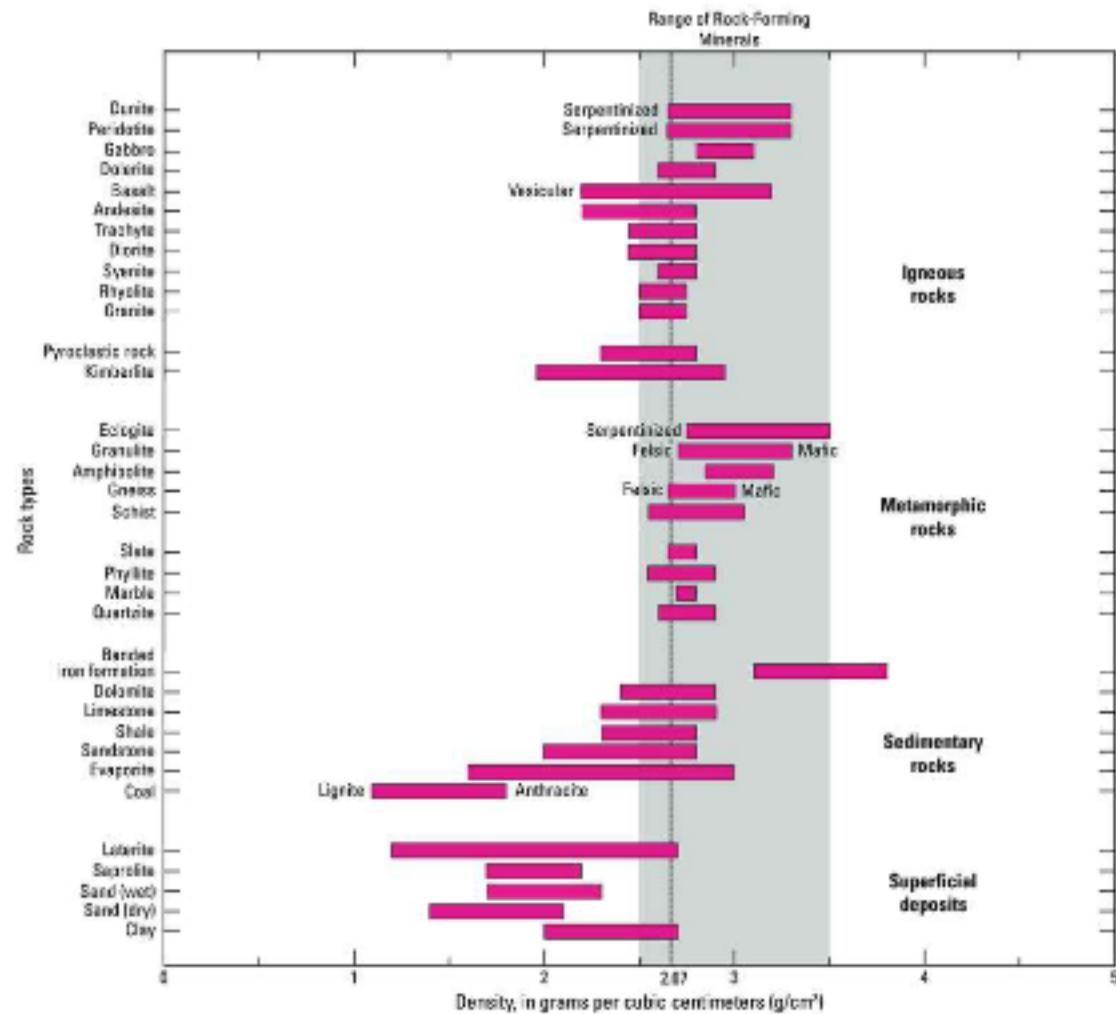


精度可达 $\pm 0.01\text{-}0.02 \text{ g/cm}^3$ ，其效率比天平高3-4倍。

3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.3 密度测定结果的整理





3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.3 密度测定结果的整理

同一类标本数目少于30块时，其**算术平均值**为：

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i}{N}$$

标准差：

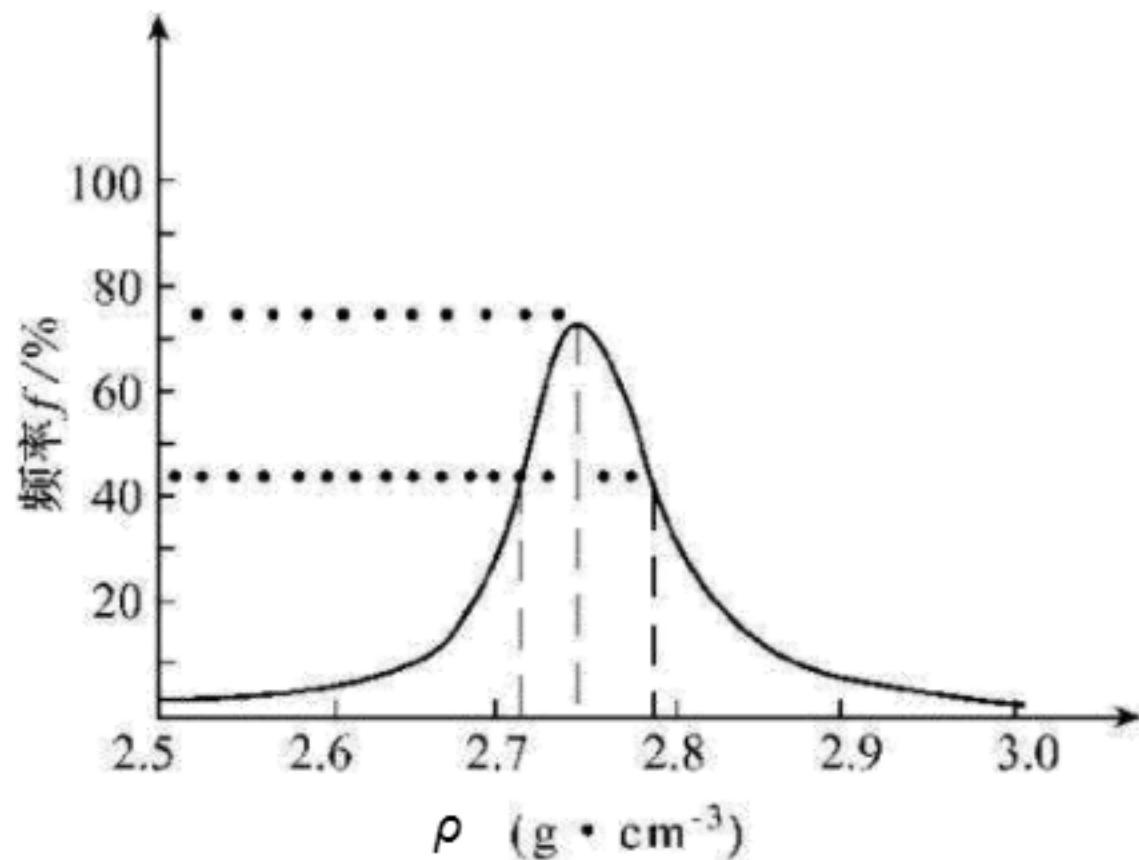
$$D = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^N (\rho_i - \bar{\rho})^2 / (N - 1)}$$

3. 岩矿石标本的测定

GeoGoku

3.3 密度测定结果的整理

同一类标本数目大于30块时，求统计平均值：



3. 岩矿石标本的测定

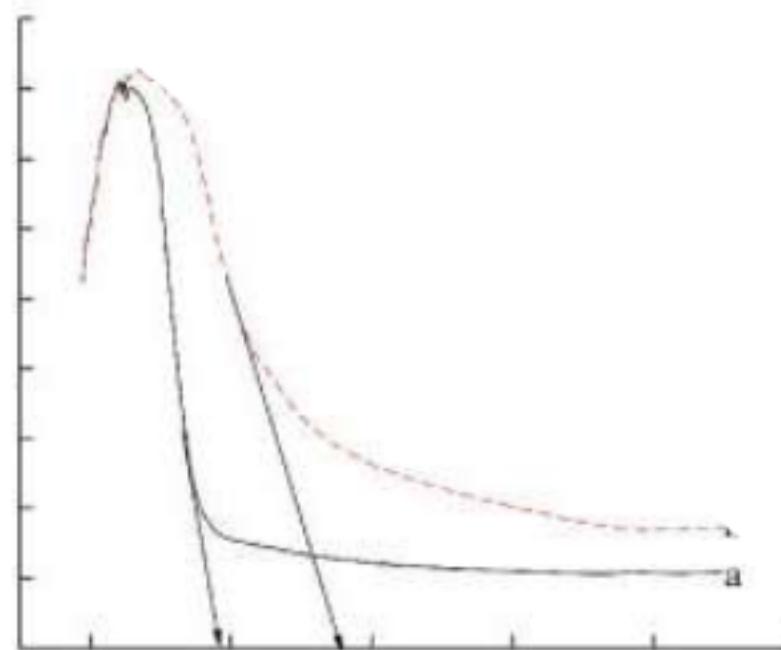
GeoGoku

3.3 密度测定结果的整理

利用频率分布曲线来统计平均密度值有下列优点：

a. 检验野外标本采集的质量。

频率分布曲线上出现半个峰值或者峰值不明显，有可能采集出了问题；



3. 岩矿石标本的测定

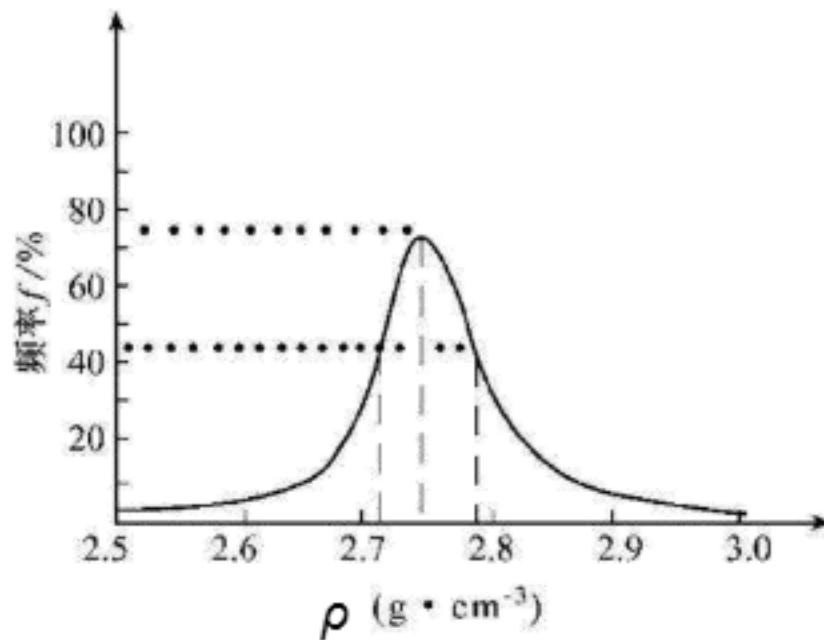
GeoGoku

3.3 密度测定结果的整理

利用频率分布曲线来统计平均密度值有下列优点：

b. 可以鉴定密度测定的质量。

如果得出的频率分布曲线上出现两个或两个以上的峰则表明标本岩性分类可能有差错或是测定时有错误；



3. 岩矿石标本的测定

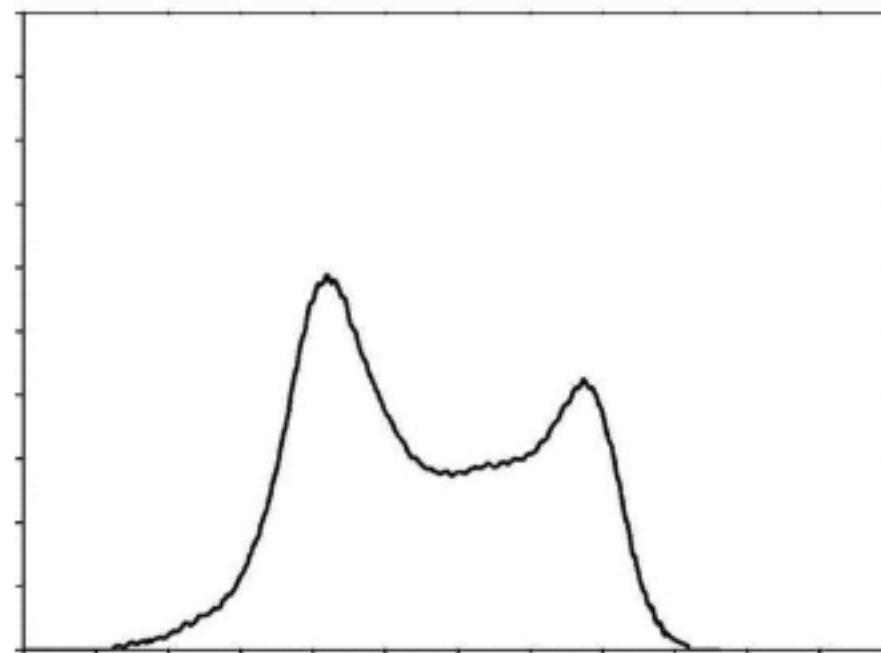
GeoGoku

3.3 密度测定结果的整理

利用频率分布曲线来统计平均密度值有下列优点：

b. 可以鉴定密度测定的质量。

如果得出的频率分布曲线上出现两个或两个以上的峰则表明标本岩性分类可能有差错或是测定时有错误；



3. 岩矿石标本的测定

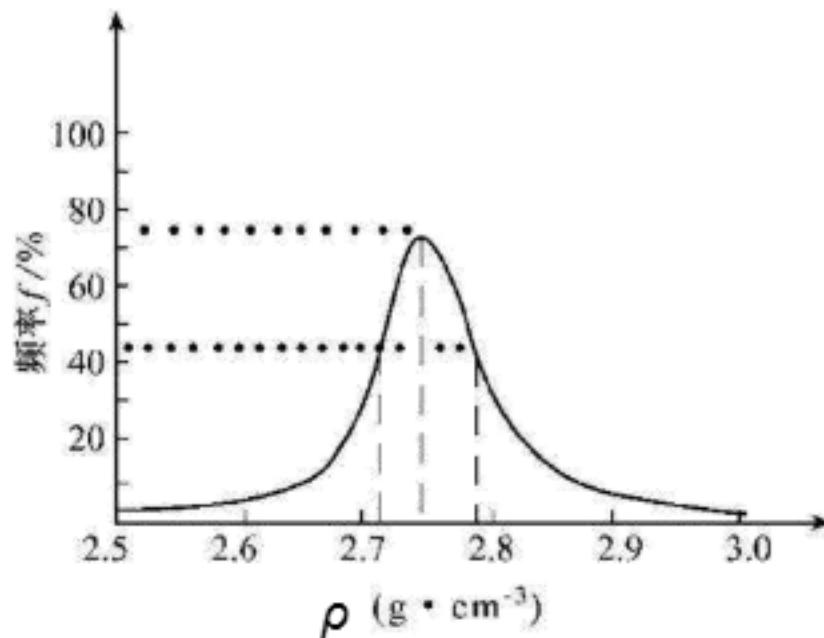
GeoGoku

3.3 密度测定结果的整理

利用频率分布曲线来统计平均密度值有下列优点：

c. 可以鉴定同类岩石密度的稳定性。

曲线峰值明显，两翼对称，表明该类岩石的密度比较稳定；否则若曲线平缓，变化较为杂乱，则表明该类岩石的密度很不稳定。





目 录

GeoGoku

第一节 岩矿石的密度

第二节 影响岩矿石密度的因素

第三节 岩矿石标本的测定

第四节 地层平均密度的估计



4. 地层平均密度的估计

GeoGoku

4.1 重力试验剖面估计中间层密度

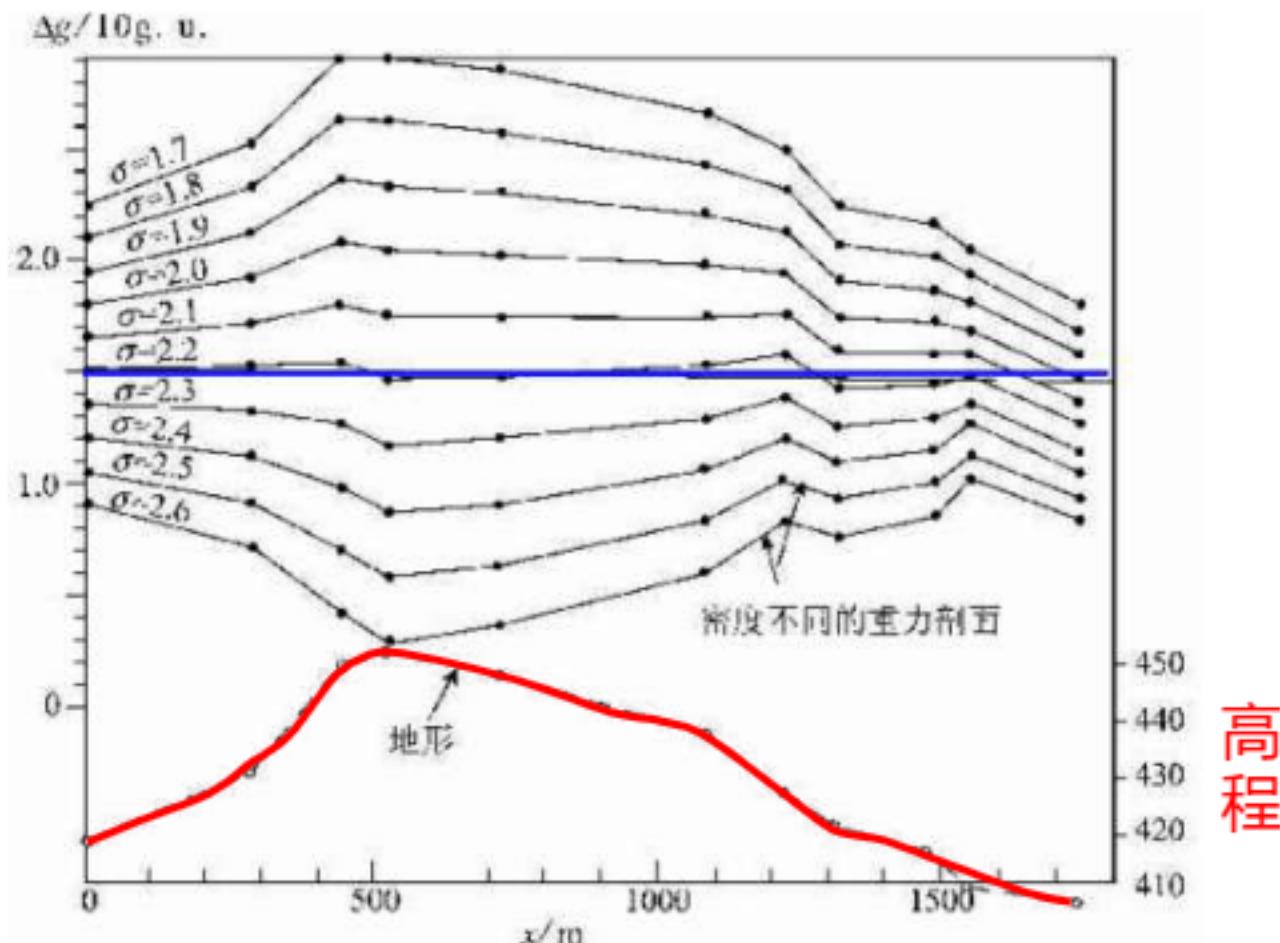
在工区内或附近，选择一个地形**有一定起伏而无局部重力异常的地方**，实测一条重力剖面，**将重力观测结果进行纬度、地形校正后**，用**不同的中间层密度进行布格校正**。这样可得出一族不同的布格异常曲线，从诸条曲线中选出一条**与地形起伏相关最小的曲线**，该曲线所采用的密度就可以确定为该区中间层应采用的平均密度了。

4. 地层平均密度的估计

GeoGoku

4.1 重力试验剖面估计中间层密度

在图中密度定为
2.2 g/cm³较为
适宜



4. 地层平均密度的估计

GeoGoku

4.2 最小二乘法估计中间层密度

假设重力异常呈线性变化

在工区内选择地形有一定起伏的地段，进行剖面测量。实测剖面上任意点的重力值 Δg_i 与前后相邻两点重力值 Δg_{i+1} 、 Δg_{i-1} 的平均值之差 δg_i 表示为

$$\delta g_i = \frac{\Delta g_{i+1} + \Delta g_{i-1}}{2} - \Delta g_i$$

δg_i 只与高度中间层影响有关，由于布格影响表达式为

$$\Delta g_b = (-3.086 + 0.419\rho)\Delta h = b\Delta h$$

4. 地层平均密度的估计

GeoGoku

4.2 最小二乘法估计中间层密度

$$\delta g_i = b \left(\frac{\Delta h_{i+1} + \Delta h_{i-1}}{2} - \Delta h_i \right) = b \cdot \delta h_i$$

根据最小二乘原理， b 需要满足

$$\sum_{i=2}^{n-1} (\delta g_i - b \cdot \delta h_i)^2 = \min$$

$$b = \frac{\sum_{i=2}^{n-1} \delta g_i \cdot \delta h_i}{\sum_{i=2}^{n-1} (\delta h_i)^2}$$



4. 地层平均密度的估计

GeoGoku

4.2 最小二乘法估计中间层密度

$$\Delta g_b = (-3.086 + 0.419 \rho) \Delta h = b \Delta h$$

$$\rho = \frac{b + 3.086}{0.419}$$

4. 地层平均密度的估计

GeoGoku

4.2 最小二乘法估计中间层密度

对某一数据：

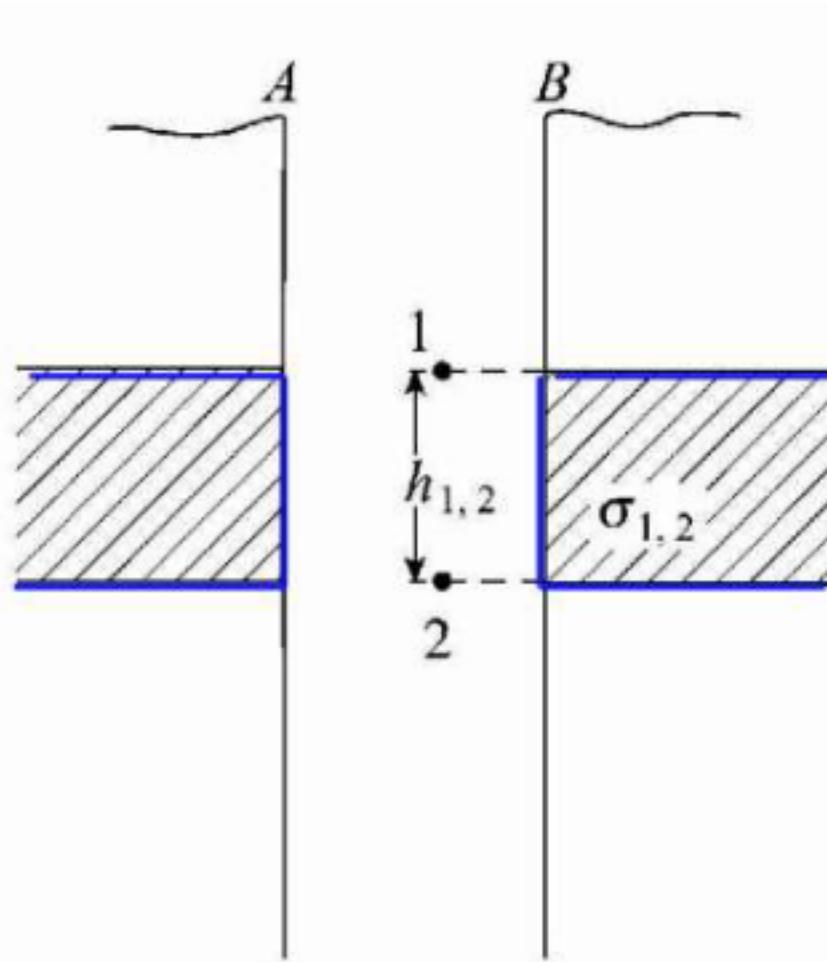
$$b = \frac{\sum_{i=2}^{n-1} \delta g_i \cdot \delta h_i}{\sum_{i=2}^{n-1} (\delta h_i)^2} = \frac{-314.3}{153.35} = -2.050 \text{ (g.u./m)}$$

$$\begin{aligned}\rho &= (b+3.086)/0.419 \\ &= (-2.050+3.086)/0.419 = 2.47 \text{ (g/cm}^3)\end{aligned}$$

4. 地层平均密度的估计

GeoGoku

4.3 利用井中重力测量结果计算地层平均密度



4. 地层平均密度的估计

GeoGoku

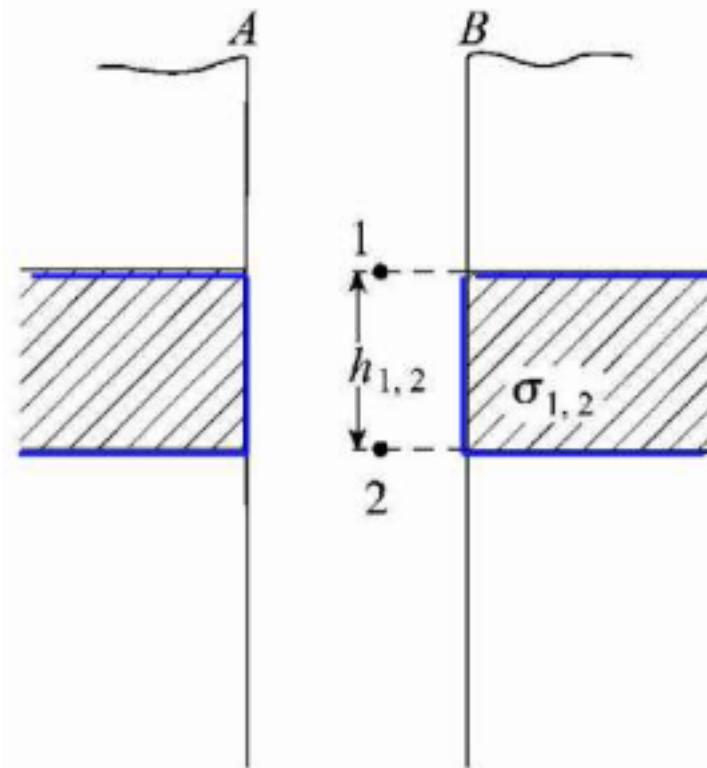
4.3 利用井中重力测量结果计算地层平均密度

$$g_2 + 2\pi G \rho_{12} \cdot h_{12} - \frac{\partial g}{\partial z} \cdot h_{12} = g_1 - 2\pi G \rho_{12} \cdot h_{12}$$

$$g_2 = g_1 + \frac{\partial g}{\partial z} \cdot h_{12} - 4\pi G \rho_{12} \cdot h_{12}$$

$$\rho_{12} = \frac{1}{4\pi G \cdot h_{12}} \left[(g_1 - g_2) + \frac{\partial g}{\partial z} \cdot h_{12} \right]$$

$$\frac{\partial g}{\partial z} = 3.086 \quad \text{g.u./m}$$

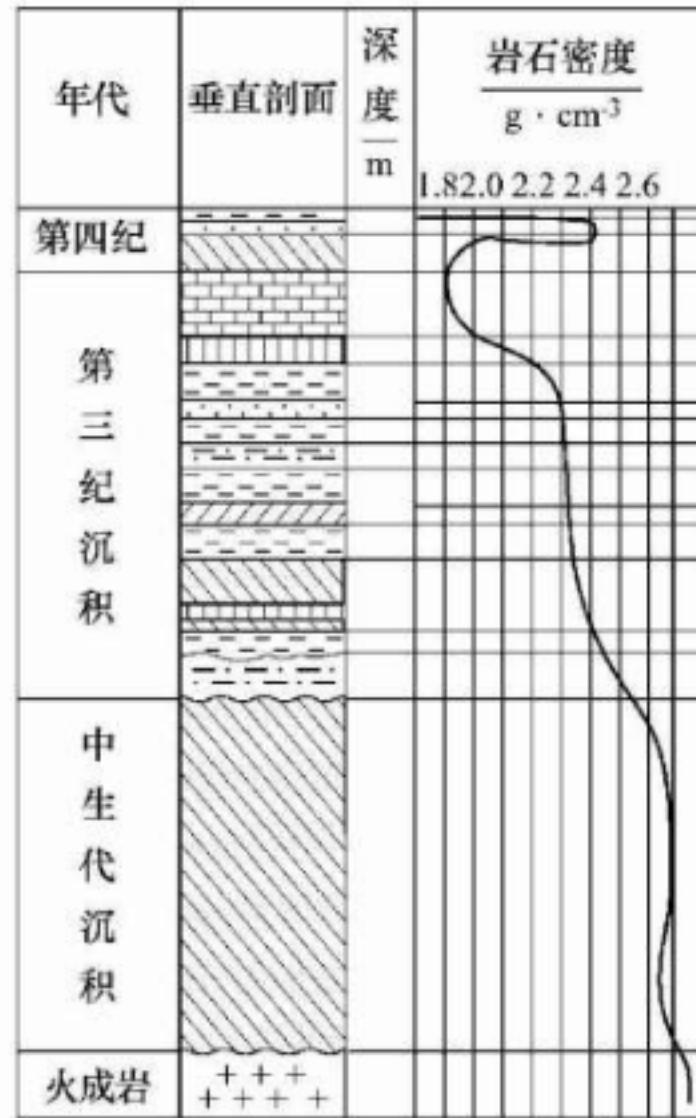


4. 地层平均密度的估计

GeoGoku

4.4 利用岩心密度测量结果表示地层密度

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i h_i}{\sum_{i=1}^N h_i}$$



4. 地层平均密度的估计

GeoGoku

4.5 利用地震波速度估计反射层的密度

弹性波在介质中传播的速度与传播介质的密度及弹性性质有关，其关系为

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

当知道了 V 、 E 和 ν 后，根据上式即可得出该介质的密度值。但通常 E 和 V 值不易获得，此时可根据特定地区某种介质的纵波速度与密度间的关系，来确定 V 与 ρ 间的关系式。

4. 地层平均密度的估计

GeoGoku

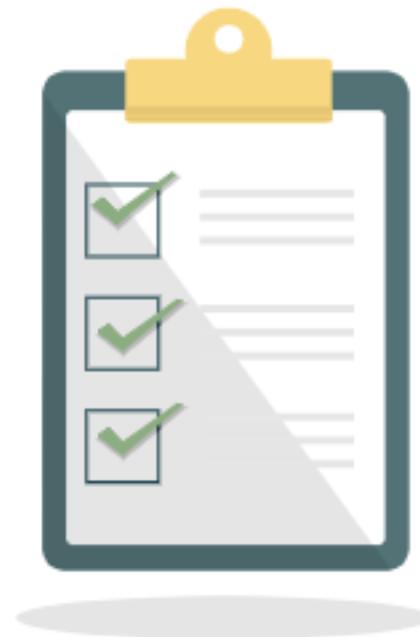
4.5 利用地震波速度估计反射层的密度

例如，根据测定，得出砂泥岩和某些碳酸盐岩的速度 V (km/s)与密度 ρ (g/cm³)间的关系式为

$$\rho = 1.83 + 0.167V$$

只要能测出该类岩石中弹性波的传播速度，即可得出相应的密度值。由于地震波速也是一个近似值，因而用它所求得的密度也是近似的，其近似程度与地震波速的近似程度有关。

- 了解岩矿石密度的意义
- 决定岩矿石密度的主要因素
- 天平测定密度的原理



- 阐述三大岩类岩石的密度特点
- 为什么压力越大，密度越小



课程结束

陈涛

