

doi: 10. 11720/wtyht. 2021. 1318

张百帆,肖锋,李以科,等. 浸泡与否对岩矿石密度测定的影响[J]. 物探与化探,2021,45(1):173-177. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1318>

Zhang B F, Xiao F, Li Y K, et al. The effect of soaking or not on the density determination of rock and ore [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1):173-177. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1318>

# 浸泡与否对岩矿石密度测定的影响

张百帆<sup>1</sup>,肖锋<sup>1</sup>,李以科<sup>2,3</sup>,柯昌辉<sup>2,3</sup>

(1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院,吉林 长春 130026; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所,北京 100037; 3. 自然资源部 成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037)

**摘 要:** 岩石密度测定是获取准确密度值的重要手段,同时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。密度测定精度越高,利用其进行地质解释的精度也越高,但不同版本的测定规范对岩石密度测定前是否需要浸泡处理存在分歧。本文以白云鄂博矿区 12 种岩(矿)石标本为例,对比浸泡前后的密度变化,得出除云母型铁矿石外,浸泡后的岩石密度均不同程度增大。对于孔隙或裂隙发育的岩(矿)石,浸泡后的密度差百分比大于 0.5%。而结构致密的岩(矿)石,浸泡对密度测定的影响低于 2 倍测定误差,可忽略不计。

**关键词:** 密度;密度测定;浸泡;物性分析

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2021)01-0173-05

## 0 引言

岩石密度是岩(矿)石的一种物理属性,表征单位体积内的质量大小。在地质构造、岩性变化及矿床赋存处通常可以发现明显的密度变化,利用密度参数的变化可为找矿、工程及地质问题研究工作提供参考。密度测定结果在重力勘探中有广泛应用:通过密度测定能提供不同岩(矿)石的密度差,后者是开展重力勘探的前提条件之一<sup>[1]</sup>;密度参数可用于重力异常中的地形校正和中间层校正<sup>[1-4]</sup>,利用不同密度校正获得的布格重力异常,其形态可能完全相反<sup>[5]</sup>;密度分界面上下层的密度差,是界面反演时所需的已知参数<sup>[6]</sup>。在视密度反演和人机交互反演时,也需要提供不同岩性的密度范围<sup>[3-4]</sup>。因此密度参数的正确测定对于获得可靠的地质解释具有重要作用。但一些测定条件,如不同的测定仪器,采样后放置时间及是否浸泡等会影响测定结果。

查看不同时期、不同比例尺的重力调查规范,对岩(矿)石密度测定之前是否需要浸泡存在不同的

规定<sup>[7-10]</sup>。实际密度测定工作中,部分提及对标本进行浸泡处理<sup>[11-12]</sup>,部分选择直接进行测定<sup>[13]</sup>。因此,了解浸泡对密度测定结果的影响非常必要。

笔者选择内蒙古白云鄂博矿区采集的各类岩(矿)石共 565 块,根据岩(矿)石类型将其分为 15 类,并使用 MH-600Z 电子式密度仪测定浸泡前后的密度值。最后对测定结果进行统计分析,为定量分析浸泡对密度测定的影响提供数据支撑。

## 1 不同规范对于密度测定的要求

1997 年发布的《大比例尺重力勘查规范》(DZ/T 0171—1997)和 2006 年发布的《岩(矿)石物性调查技术规程》(DD2006-03)均对密度标本测定时浸泡时间提出具体要求:前者在岩(矿)石密度测定部分要求“在标本测定前,可将标本水浸 24 h 以上,以期类似于深部赋存环境下的岩石”<sup>[7]</sup>。后者同样提到“样品必须在清水中浸泡达到水饱和。固结样品浸泡时间一般为 24 h,半固结的样品约 4 h 左右,以不泡烂为宜”<sup>[8]</sup>。对岩(矿)石样本测定前进行浸泡

收稿日期:2020-06-18;修回日期:2020-08-10

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“异常富集重稀土碳酸岩成因及其对稀土元素超常分异-富集控制机理研究”(42072114);中央级公益性科研院所基本科研业务专项资金项目“复杂地形、强干扰地区无人机航磁勘查技术研究——以白云鄂博矿区为例”(KK1916);科技成果转化项目“包钢白云鄂博主东矿深部矿体相关性探测”(HE1922)、“白云鄂博矿集区成矿作用与深部找矿预测研究”(HE1918)

**作者简介:** 张百帆(1999-),男,山东济南人,吉林大学硕士研究生,主要研究方向为重磁资料处理与解释。Email: Zhangbf2316@163.com

处理,旨在模拟“深部赋存环境下的岩石”<sup>[7]</sup>,减少岩(矿)石因脱离原始的赋存环境而发生的物性变化。

2015 年发布的《重力调查技术规范(1:50 000)》(DZ/T 0004—2015),在密度标本的测定一节中,并未对岩(矿)石密度测定前是否需要浸泡处理提出具体要求,在密度工作、密度标本的采集两章节中,也并未提及浸泡的相关事项<sup>[9]</sup>。

2017 年发布的《大比例尺重力勘查规范》(DZ/T 0171—2017)再次修改了 1997 年规范中对岩(矿)石密度测定的要求,要求“标本采集后 3 天内完成物性参数测定,否则在物性参数测定前,应将标本浸泡 24 h 以上,待标本表面水分风干后进行物性参数测定”<sup>[10]</sup>。

由此可知,对于在岩(矿)石标本密度测定前是否需要浸泡处理,不同规范提出了不同的要求,不同时期的规范也有所修改。具有一定孔隙和渗透性的岩石,浸泡会导致孔隙中的空气逐渐被水替代,直至岩石完全水饱和。在测井资料解释中多利用岩石体积物理模型建立线性回归方程<sup>[14-15]</sup>,以描述密度与岩石含水饱和度、孔隙度和渗透率的关系,如:

$$\rho = a_0 + a_1\phi + a_2\varphi + a_3\phi S_w,$$

(1)

式中: $\rho$  为岩石密度; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为回归系数; $\phi$  为岩石孔隙度; $\varphi$  为渗透率; $S_w$  为含水饱和度。

浸泡会导致岩石具有不同的含水饱和度,从式(1)中可知,除孔隙度、渗透率等岩石本身具有的性  
质外,含水饱和度也可在一定程度上影响岩石的密度。不同行业、不同时期的规范对岩石密度测量前是否需要  
进行浸泡处理提出了不同的要求,但并未说明原因。为此,我们希望通过实测对比,量化浸泡前后岩石密度的变化。

## 2 岩(矿)石密度测定方法

为研究浸泡前后岩(矿)石标本的密度参数变化,在内蒙古白云鄂博矿区进行了岩样采集,并对其浸泡前后的密度进行测定。本次采集岩(矿)石标本共 565 块,并按照岩(矿)石类型划分为 15 类,矿体围岩 8 种,分别为浅变质砂岩、板岩、片麻岩、花岗岩、闪长岩、斑岩、富钾板岩、白云石碳酸岩(无矿化);矿石类型 7 种,分别为赤铁矿型铁矿石、磁铁矿富矿石、闪石型铁矿石、霓石型铁矿石、萤石型铁矿石、云母型铁矿石、鄂博层坡积层铁矿石。在这 15 类岩(矿)石中,12 类标本采集数目超过 30 块,具有统计意义。所有岩(矿)石标本均使用 MH-600Z 电子式密度仪对其浸泡前和浸泡 24 h 后的密

度进行测定,MH-600Z 密度仪技术参数可见于表 1。随机抽取 75 块标本(占总标本数的 13%)进行重复测定,统计测定精度。最后对测定结果进行统计分析,得出各类岩(矿)石标本浸泡前后的密度变化趋势。本次密度测定精度为 $\pm 0.008\text{ g/cm}^3$ ,远高于测定规范要求的 $\pm 0.02\text{ g/cm}^3$ 。

表 1 MH-600Z 电子式密度仪基本技术参数

Table 1 Basic technical parameters of MH-600Z electronic density meter

主要参数	技术指标
质量测量范围/g	0.01~600
质量分辨率/g	0.001
密度精度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$\pm 0.001$
测量时间/s	约 10

## 3 岩矿石密度特征

对 15 类岩(矿)石的密度测定结果进行统计(表 2),浸泡前及浸泡 24 h 后密度的最大值、最小值和平均值详见表 2。一般情况下,测量值的最后一位要与不确定度的最后一位取齐<sup>[16]</sup>。根据本次测定的不确定度( $\pm 0.008\text{ g/cm}^3$ ),表 2 中的密度数据保留小数点后 3 位。除部分钻孔岩心标本(180 块)外,其余露头采集的岩(矿)石标本(385 块)均在采样 3 天内完成密度测定。其中片麻岩、斑岩、闪长岩 3 类岩石因标本数量小于 30 块,不具有统计意义,其他种类岩(矿)石均可用于分析浸泡对标本密度产生的影响。

由表 2 可知,平均密度最大的为浸泡后的赤铁矿,3.906  $\text{g/cm}^3$ ;最小的为浸泡前的鄂博层坡积层铁矿,2.482  $\text{g/cm}^3$ 。密度测定的标准偏差总体较小,最大为 0.347  $\text{g/cm}^3$ ,说明每种岩样的密度测量值比较集中。浸泡后密度变化最大的为鄂博层坡积层铁矿,增大 0.049  $\text{g/cm}^3$ ;密度差减小只有云母型铁矿石,减少 0.008  $\text{g/cm}^3$ 。除鄂博层坡积层铁矿外,密度差百分比均小于 1.00%,绝大多数小于 0.50%。受压实作用的影响,取自钻孔岩心的岩(矿)石的孔隙度很小,浸泡后的密度变化微弱。

根据表 2 绘制岩(矿)石标本平均密度差柱状图(图 1)。如图 1 所示,平均密度的变化说明浸泡引起的密度变化并非随机的。除云母型铁矿石外,其余岩(矿)石的平均密度浸泡后都不同程度地增大。根据浸泡引起的平均密度变化量大小,我们将它们分为两类。

第一类,浸泡后平均密度变化量超过 2 倍测定

表 2 岩(矿)石浸泡前后密度统计

Table 2 Statistical table of density of rock (ore) before and after soaking

岩(矿)石种类	块数	浸泡前密度/(g·cm <sup>-3</sup> )				浸泡后密度/(g·cm <sup>-3</sup> )				密度差/(g·cm <sup>-3</sup> )	密度差百分比/%
		最大值	最小值	平均密度 ρ <sub>0</sub>	标准差	最大值	最小值	平均密度 ρ <sub>0</sub>	标准差	ρ <sub>1</sub> -ρ <sub>0</sub>	(ρ <sub>1</sub> -ρ <sub>0</sub> )/ρ <sub>0</sub>
砂岩	51	2.892	2.556	2.646	0.068	2.888	2.592	2.656	0.065	0.010	0.38
板岩*	98	3.085	2.114	2.687	0.174	3.080	2.201	2.700	0.158	0.013	0.48
片麻岩	28	2.788	2.553	2.641		2.798	2.570	2.649		0.008	0.30
花岗岩	40	2.766	2.494	2.580	0.048	2.767	2.519	2.593	0.051	0.013	0.50
闪长岩	3	2.773	2.712	2.748		2.773	2.712	2.751		0.003	0.11
斑岩	4	2.600	2.528	2.563		2.617	2.561	2.582		0.019	0.74
富钾板岩	31	2.912	2.548	2.666	0.069	2.931	2.549	2.669	0.071	0.003	0.11
白云石碳酸岩*	51	3.319	2.911	3.056	0.100	3.318	2.907	3.059	0.098	0.003	0.10
赤铁矿石	43	4.773	3.064	3.883	0.341	4.782	3.085	3.906	0.347	0.023	0.59
磁铁矿石*	60	4.716	3.409	3.788	0.303	4.758	3.401	3.789	0.324	0.001	0.03
闪石型铁矿石*	31	4.178	3.391	3.816	0.191	4.187	3.389	3.818	0.191	0.002	0.05
霓石型铁矿石	32	3.976	3.260	3.609	0.171	4.000	3.267	3.619	0.170	0.010	0.28
萤石型铁矿石*	32	3.819	2.873	3.291	0.191	3.826	2.875	3.292	0.192	0.001	0.03
云母型铁矿石*	30	4.292	3.025	3.544	0.306	4.277	3.032	3.536	0.305	-0.008	-0.23
鄂博层坡积层铁矿	31	2.762	2.182	2.482	0.125	2.831	2.277	2.531	0.125	0.049	1.97

注:“\*”表示部分岩(矿)石标本取自钻孔岩心。

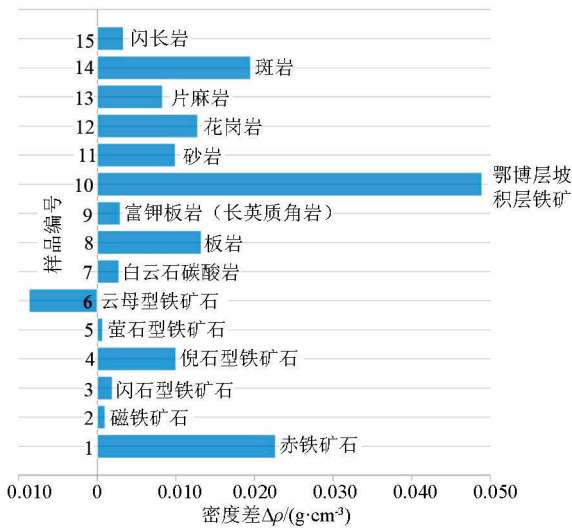


图 1 岩(矿)石标本浸泡后与浸泡前平均密度差

Fig. 1 Average density difference between rock (ore) sample after and before soaking

误差。此处测定误差指标准中的测定误差,是由岩石标本在浸泡 24 h 前、后(干、湿状态下),按照 13% 的比率进行重复测定(大于测量规范中要求的 10% 比率),并依据《岩石矿物物性调查技术规程》中均方误差计算公式,经统计计算得出。

均方误差计算公式为:

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2}{2n}}, \quad (2)$$

式中:ε 为均方误差;n 为检查标本数;A<sub>i</sub> 为第 i 件标

本一次测量结果;B<sub>i</sub> 为第 i 件标本另一次测量结果。

借鉴重力勘探中对“可信重力异常”的定义<sup>[1]</sup>,我们认为该密度变化量为“可信密度异常”。鄂博层坡积层铁矿和赤铁矿这两种岩(矿)石标本浸泡后平均密度明显增大,它们的平均密度差分别达到了 0.049 g/cm<sup>3</sup> 和 0.023 g/cm<sup>3</sup>,密度差百分比分别达到 1.97% 和 0.59%,说明浸泡对这两类岩石的密度产生较大影响,且影响值的可信度很高。

鄂博层坡积层铁矿浸泡前后的密度对比如图 2 所示。从图 2 可以看出,浸泡前与浸泡后样品的密度值绝大多数显著不同,密度点连线也基本无重合,这进一步说明浸泡对其密度测量值有明显的影响。野外地质调查显示,该类岩(矿)石出露于地表,有

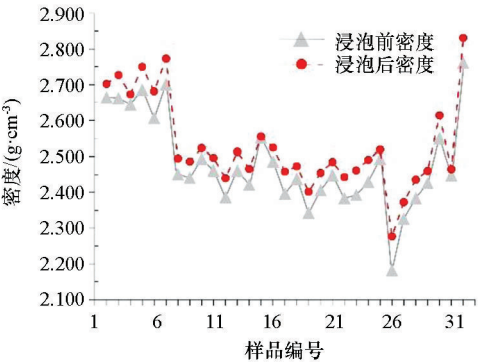


图 2 鄂博层坡积层铁矿浸泡前后密度对比

Fig. 2 Density comparison charts of Obo strata talus accumulation iron ore before and after soaking



图 3 鄂博层坡积层铁矿照片

Fig. 3 The photo of Obo strata talus accumulation iron ore

乳白色风化壳,且肉眼可见孔隙发育(岩样照片如图 3 所示),其平均密度为所有样品中最低,浸泡前仅为 2.482 g/cm<sup>3</sup>,这是因为其孔隙度大,吸水性强,浸水后标本孔隙中饱和含水,因此岩石密度显著增大。

赤铁矿浸泡前后的密度差异相对较小(图 4),但整体上浸泡后的密度略高于浸泡前的密度。赤铁矿的平均密度在所有样品中最高,浸泡后高达 3.906 g/cm<sup>3</sup>。白云鄂博矿区的赤铁矿呈红褐色块状,裂隙较发育,推测与该区断裂活动有关。镜下薄片进一步显示,该区赤铁矿含有萤石,裂隙主要发育在萤石集合体中,受后期脆性挤压应力形成。

岩石体积密度计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$\rho_0 = (1 - \phi)\rho_{ma} + \phi\rho_f, \tag{3}$$

式中: $\rho_0$ 、 $\rho_f$ 、 $\rho_{ma}$  分别指岩石体积密度、孔隙流体(水或空气)密度和岩石骨架密度; $\phi$  指孔隙度。由于测得赤铁矿平均密度为 3.906 g/cm<sup>3</sup>,假设地下水密度为 1.200 g/cm<sup>3</sup>,根据上述公式计算可知,只要裂隙体积能达到岩样体积的 2%,浸泡之后的饱和水会引起赤铁矿密度差百分比增大 0.6%。我们观察了 6 块赤铁矿的薄片,观测结果均显示裂隙发育(图 5)。

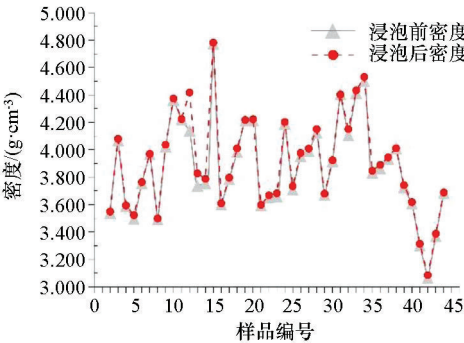


图 4 赤铁矿浸泡前后密度对比

Fig. 4 Density comparison chart of hematite before and after soaking

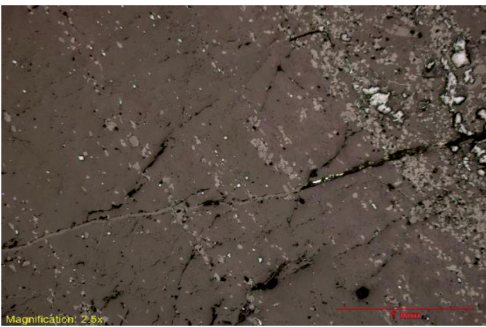


图 5 赤铁矿岩石薄片

Fig. 5 Thin section photo of hematite

第二类,浸泡后平均密度变化量低于 2 倍测定误差。这类岩(矿)石的密度变化较小,可以视为在测定误差范围内。极个别岩石类型(如萤石型铁矿、闪石型铁矿、磁铁矿石)的密度变化甚至小于 1 倍测定误差。因为它们岩石颗粒排列非常紧密,孔隙度极低,基本不具有吸水性,从而岩石密度变化微弱。总体上,这类岩(矿)石浸泡后的密度差百分比均等于或低于 0.50%,浸泡对密度测定值的影响可以忽略。

值得注意的是,只有云母型铁矿石经浸水后平均密度减小,密度差达到-0.008 g/cm<sup>3</sup>,等于 1 倍测定误差。推测在岩石标本混合在一起浸泡以及取放过程中,片状的云母晶体从标本中脱离,导致密度减小。

4 结论

- 1) 对于孔隙度较大或裂隙发育的岩(矿)石,浸泡会显著增大测定的密度,浸泡前后的密度差会超过 2 倍测定误差,密度差百分比达到 0.5%以上。
- 2) 对于致密的岩(矿)石,浸泡对密度测定的影响可忽略不计,密度的变化在 2 倍测定误差范围内,不能视为有效密度变化,其密度差百分比低于 0.5%。
- 3) 对于如云母型铁矿石等半固结标本,按测定标准需在封蜡处理后采用天平法测定密度<sup>[7-10]</sup>。浸泡处理会导致部分晶体脱离,使密度测定结果偏小。
- 4) 岩石密度与地形校正和中间层校正的校正值存在线性关系,若密度测定存在 5%误差,校正值同样会产生 5%的误差。该误差会传递至布格重力异常的计算中,并进一步影响利用布格异常进行的各项反演(如利用布格异常计算视密度),从而对重力解释产生一定的影响。

参考文献 (References):

[1] 焦新华,吴燕冈. 重力与磁法勘探[M]. 北京:地质出版社, 2009.  
Jiao X H, Wu Y G. Gravity and magnetic exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.

[2] Hinze W J, Aiken C, Brozena J, et al. New standards for reducing gravity data: the north American gravity database[J]. Geophysics, 2005, 70(4): J25 – J32.

[3] Blakely R J. Potential theory in gravity and magnetic application [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

[4] Hinze W J, Von F R B, Saad A H. Gravity and magnetic exploration[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

[5] 普加忠,张学良. 山区重力测量中选择校正密度值的一种方法[J]. 物探与化探, 1993, 17(6): 471 – 474.  
Pu J Z, Zhang X L. A method for choosing correction density value in gravity measurement in mountain area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1993, 17(6): 471 – 474.

[6] Oldenburg D W. The inversion and interpretation of gravity anomaly [J]. Geophysics, 1974, 39(4): 526 – 536.

[7] DZ/T 0171—1997 大比例尺重力勘查规范[S].  
DZ/T 0171—1997 Large-scale gravity survey specification[S].

[8] DD2006-03 岩矿石物性调查技术规程[S].  
DD2006-03 Specifications for physical property investigation of rock and ore[S].

[9] DZ/T 0004—2015 重力调查技术规范(1:50 000)[S].  
DZ/T 0004—2015 The technical specification for gravity survey (1:50 000) [S].

[10] DZ/T 0171—2017 大比例尺重力勘查规范[S].  
DZ/T 0171—2017 Large-scale gravity survey specification[S].

[11] 姚玉来,丁秋红,王杰,等. 内蒙古扎鲁特旗地区岩石物性特征[J]. 地质与资源, 2017, 26(4): 407 – 411.  
Yao Y L, Ding Q H, Wang J, et al. Physical properties of rocks in Jarudqi, Inner Mongolia [J]. Geology and Resources, 2017, 26(4): 407 – 411.

[12] 郭友钊,郭心玮,李磊,等. 东昆仑夏日哈木铜镍硫化物矿床岩矿石的密度特征与重力勘探问题[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 1 – 6.  
Guo Y Z, Guo X W, Li L, et al. The density characteristics of rocks from Xiarihamu copper nickel sulfide deposit and problem of gravity exploration deployment in east Kunlun, Qinghai province[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(1): 1 – 6.

[13] 罗方兵,张兵,闵刚,等. 龙门山构造带北段岩石物性研究[J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(2): 191 – 197.  
Luo F B, Zhang B, Min G, et al. The physical properties study of the northern section of Longmenshan tectonic belt[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 38(2): 191 – 197.

[14] 云美厚,高君,贺玉龙,等. 储层速度和密度与孔隙度、泥质含量以及含水饱和度的关系[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(2): 104 – 107.  
Yun M H, Gao J, He Y L, et al. Relations of velocity and density with porosity, clay content and water saturation in reservoirs[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2004, 27(2): 104 – 107.

[15] 雍世和,洪有密. 测井资料综合解释与数字处理[M]. 北京:石油工业出版社, 1982.  
Yong S H, Hong Y M. Comprehensive interpretation and digital processing of logging data[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982.

[16] 张颖. 大学物理实验中测量结果及不确定度的有效位数[J]. 长春大学学报, 2007, 17(4): 24 – 25.  
Zhang Y. Significant figure of measurement result and its uncertainty in physics experiment[J]. Journal of Changchun University, 2007, 17(4): 24 – 25.

The effect of soaking or not on the density determination of rock and ore

ZHANG Bai-Fan<sup>1</sup>, XIAO Feng<sup>1</sup>, LI Yi-Ke<sup>2,3</sup>, KE Chang-Hui<sup>2,3</sup>

(1. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Rock density determination is an important method to obtain accurate density values, and it is also an indispensable parameter for topographic correction and middle layer correction of gravity measurement results. The higher the accuracy of density measurement, the higher the accuracy of geological interpretation. However, there are different opinions on whether soaking treatment is needed before the determination of rock density in different versions of measurement specification. In this paper, we taking 12 kinds of rock (ore) specimens in Bayan Obo mining area as an example, comparing the density changes before and after soaking. It is concluded that the density of rock increases in varying degrees after soaking, except mica-type iron ore. For rocks (ores) with developed pores or fissures, the percentage of density difference after soaking is greater than 0.5%, and the density difference percentage will be greater than 0.5%. However, for the rock (ore) with dense structure, the influence of soaking on the density measurement is less than 2 times of the measurement error, which is negligible.

**Key words:** density; density determination; soaking; physical property analysis

(本文编辑:王萌)