

# 月岩采样及其物理力学特性调研分析

李斌斌<sup>1,2</sup>, 周琴<sup>1,2</sup>, 何录忠<sup>1,2</sup>, 杜焱森<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 国土资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**月岩的存在形式和主要物理力学特性直接关系到月岩的可钻性,是取心钻具设计、钻进工艺确定及可靠取心的基本前提和重要依据。通过大量调研分析,认为:国外历次取心管样品中发现月岩以直径较大的岩石颗粒存在,比例为40%~80%,月岩在月球样品中的比重高达65%;月岩粒径分布广,且随着深度的增加粒径大小呈先减小后增大的趋势。月海玄武岩呈疏松状态,其主要物理力学范围为密度3.26~3.51 g/cm<sup>3</sup>,堆密度3.04~3.34 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度0~10%,抗压强度约200 MPa,动态抗拉强度114~160 MPa。

**关键词:**月岩;物理力学特性;可钻性;取心钻具

**中图分类号:**P634.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)05-0001-07

**Lunar Rock Sampling and the Investigation & Analysis on the Physical and Mechanical Properties/LI Bin-bin<sup>1,2</sup>, ZHOU Qin<sup>1,2</sup>, HE Lu-zhong<sup>1,2</sup>, DU Yao-sen<sup>3</sup>** (1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory on Deep GeoDrilling Technology, Ministry of Land and Resources, Beijing 100083, China; 3. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Existing form and main physical and mechanical properties of lunar rocks are directly related to the drillability, which are the basic premise and important basis for coring drill designing. Through a lot of investigation and analysis, it is found in samples in coring tubes that 40%~80% lunar rocks are in the form of large diameter particle and the proportion of lunar rocks in lunar samplers is up to 65%. The lunar rocks have wide particle size distribution with the tendency of particle size first decreasing and then increasing along with the depth increasing. Mare basalts is loose, the main physical and mechanical properties are density 3.26~3.51g/cm<sup>3</sup>, bulk density 3.04~3.34g/cm<sup>3</sup>, porosity 0~10%, compressive strength about 200MPa and dynamic tensile strength 114~160MPa.

**Key words:** lunar rocks; physical and mechanical properties; drillability; coring drill

## 0 引言

我国月球探测三期工程将进行月球样品的钻进采集及返回地球进行实验室的精确测量分析与研究。月岩的存在特点和物理力学性质直接影响月壤的可钻性,是采样钻具设计及钻进工艺的重要前提和依据。为保障三期取样工程的可靠顺利实施,对月岩存在形式、物理力学特性及其与采样深度关系的研究就显得尤为重要。

本文通过大量调研,以月岩采样数据为基础,得出月海玄武岩的粒径分布、密度、孔隙度、抗压强度等物理力学性质,并对粒径分布其与采样深度的关系展开分析。为取心钻具设计及钻进工艺确定提供

重要依据。

## 1 月岩采样情况分析

目前,地球上研究的月球样品有3个来源<sup>[1]</sup>: Apollo计划带回的381.7 kg月球岩石和月壤;Luna登月计划采集到的321 g月球月壤和小岩屑;美国和日本探险家在南极冰盖收集的月球陨石。本文主要使用前2个来源的数据来对月岩的粒度分布及其性质进行探讨。

美国在1967年7月—1972年12月,通过铲子及采集岩心管等工具依次完成了Apollo 11、12等6次载人登月采样。苏联在1970年9月—1976年8

收稿日期:2014-12-04;修回日期:2015-05-03

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号:2652013045)

作者简介:李斌斌,男,汉族,1987年生,机械工程专业硕士研究生,主要从事钻探机械设计与研究工作,北京市海淀区学院路29号,365059177@qq.com。

通讯作者:周琴,女,河南人,汉族,1970年生,中国地质大学(北京)副教授,主要从事地质钻探机械方面研究及工程制图的教学工作,zhtg@cugb.edu.cn。

月,借助空心钻杆取样器对月球进行 Luna 16、20、24 三次无人登月采样<sup>[2]</sup>。

### 1.1 月表采样

月表采样主要是 Apollo 载人登月计划宇航员通过使用锤子、铲子等工具人工采集月球表面的月岩和月壤。获得的样品数量较多,特别是大块的岩石颗粒。图1、图2为宇航员在月表采样情况。从图片资料可以很清晰的看到,月球表面存在大量的岩石,并且月岩粒径很大。

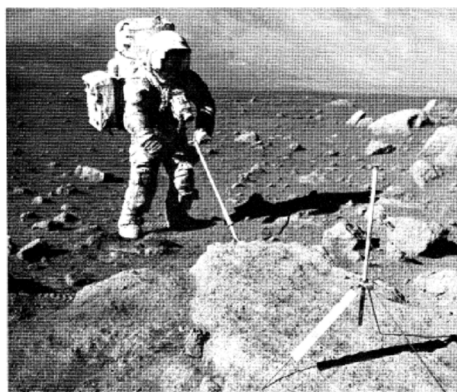


图1 Apollo 17 宇航员采样



图2 Apollo 15 锤子采样

### 1.2 岩心管采样

岩心管采集是借助岩心管对月表以下样品进行采集,是深度采集月球样品的主要形式。岩心样品是研究采样深度与粒径分布关系的依据。

#### 1.2.1 Luna 系列岩心管采样

Luna 系列总共进行了3次无人登月采样,其中有2次(Luna 20 和 Luna 24)直接遇到岩石层<sup>[2]</sup>。

Luna 16 无人探测器是人类第一次成功实现月球软着陆的无人航天器,借助空心钻杆取样器采集样品0.101 kg,钻进深度35 cm。采集到的岩心如图3所示,未显示明显层状结构,由比较均匀的月壤物质组成,但在岩心中下段可以看到一些岩石状颗粒。Vinogradov(1971)对35 cm的岩心进行了详细的描述,根据岩心的特点,将其划分为5个区域,各区域

的粒径及深度如图4所示。认为风化层由不同直径的颗粒粘结而成,颗粒结构和深度有关,从图中可以看出颗粒的大致分布,随着深度的增加,颗粒直径及其分布密度都有明显增加。

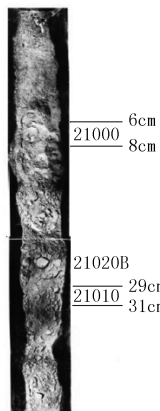


图3 Luna 16 岩心<sup>[3]</sup>

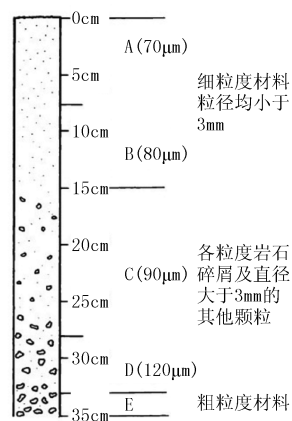


图4 Luna 16 岩心示意图<sup>[4]</sup>

Luna 20 是人类第一次在月球高地采样,钻进深度25 cm,在距离月表10 cm的地方遇到岩石层<sup>[2]</sup>,岩心样品如图5所示,并没有明显层状结构。对岩心成分进行分析发现,其主要成分是冲击角砾岩,而不是像预期的那样出现大量的斜长岩<sup>[5]</sup>。

Luna 24 钻进对象是风化层,从岩心示意图6中可以看出,在浅层50 cm处和150~200 cm深处,岩石颗粒最多,在其他区域相对较少。如图7所示,钻进深度225 cm(与垂线呈30°角,垂直深度约2 m),但实际得到的岩心样品只有160 cm,其中有50~60 cm长的岩心管是空的<sup>[6]</sup>。在170 cm处,发现有2 cm厚的破碎状态的辉长质岩石,在这岩石层上下两端均有明显分界线。



图5 Luna 20 岩心

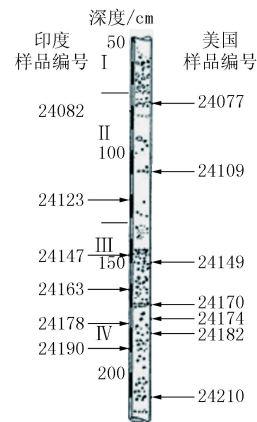


图6 Luna 24 岩心示意图

#### 1.2.2 Apollo 系列岩心管采样

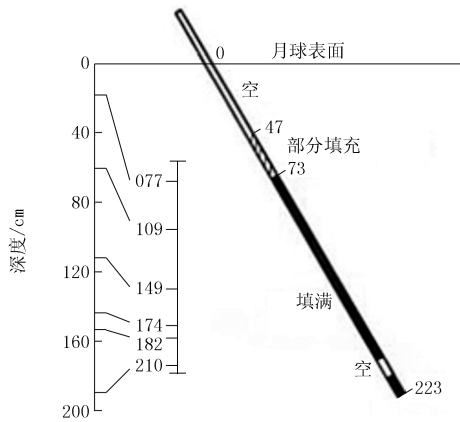


图 7 Luna 24 岩心管示意图

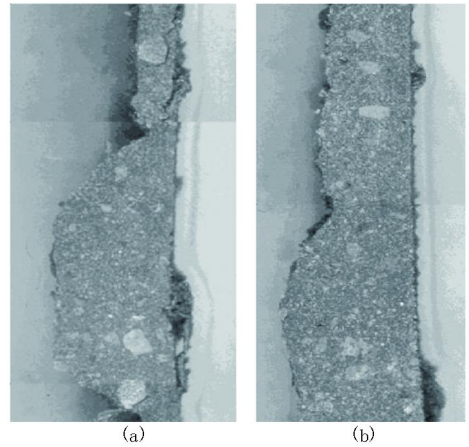


图 9 Apollo 15 岩心的一部分

Apollo 11 ~ 17 历次探月计划,都使用了岩心管进行样品采集,并得到了大量的岩心样品。从岩心中均可以看到月岩颗粒的存在,对样品的分析发现,样品中包含各种月海玄武岩和各种类型的角砾岩等。

图 8 是 Apollo 11 驱动管岩心 10004<sup>[7]</sup>,采集月壤 13.5 cm,质量 44.8 g,在岩心管中部发现了较小的岩石颗粒,其余样品较细。图 9 是 Apollo 15 岩心的一部分<sup>[8]</sup>,从图中可以看出,岩心样品并不是很完整,月壤中夹杂有很多直径较大的岩石颗粒,并且细小颗粒成分也很多,和 10004 岩心样品区别较大。

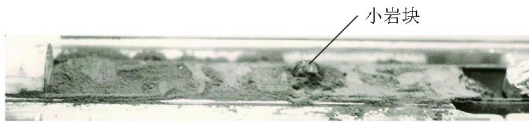


图 8 Apollo 11 驱动管岩心 10004

从岩心样品图片及对岩心的研究中可以看出,月表以下确实存在大量的月岩颗粒。在钻进过程中,如果遇到直径 > 1 cm 的月岩颗粒,或将其碾碎,或挤到岩心管两侧,否则很难继续钻进。随着钻进深度的增加,颗粒直径大小及其分布密度都有明显增加。

### 1.3 采样综合分析

综合分析 Apollo 计划和 Luna 计划的月球样品的采样点、采样质量、主要岩石类型及样品中月岩比例,得出如表 1 所示的结果<sup>[2,9-11]</sup>。

从表 1 可以看出,采样位置集中在月海和高地,月海地势平坦,约占月表面积的 17%,高地高出月球水准线约 2 ~ 3 km,约占月表面积 83%;样品类型主要是各类玄武岩、斜长岩和各种角砾岩。采样深度及月岩比例如图 10 所示。

表 1 Apollo 和 Luna 探月计划采样情况

探月计划	着陆点(地区类型)	钻取深度/cm	取心直径/cm	采样质量/kg	主要岩石类型	月岩比例/%
A11	静海(月海)	—	2	22	玄武岩、角砾岩	44.9
A12	风暴洋(月海)	70	2	34.6	玄武岩、克里普岩	80.6
A14	佛拉摩洛建造(月海区内的高地)	—	2	42.6	复杂角砾岩	67.3
A15	哈德利山谷以北(月海及高地)	236	4	77	月海玄武岩、非月海玄武岩	74.7
A16	德卡尔特撞击坑以北(高地)	218	4	95	斜长岩-辉长岩受冲击作用形成的角砾岩	65.9
A17	利特洛夫撞击坑西南(高地)	305	4	111	玄武岩、桔黄色-灰色的角砾岩	65.9
L16	丰富海(月海)	35	1.8	0.1	玄武岩质火成岩碎屑、熔融玻璃状结构碎屑	—
L20	阿波罗尼厄斯撞击坑西北(高地)	25	1.8	0.05	斜长岩碎片	月表 10 cm 处遇岩石层
L24	危海(月海)	250	8	0.17	长石颗粒	岩心管有 2 cm 岩屑

从图 10 中可以很清晰的看出,最大采样深度 > 4 m,月岩比例大部分集中在 65% ~ 80% 之间。研究表明,月海区月壤平均厚度约 4 ~ 5 m,高地地区平均厚度约 10 ~ 20 m<sup>[12]</sup>,因此目前采集得到的样

品均来自月壤层,月岩占样品的比例较高。

综上对采样情况的分析,可以得到初步的分析结果:月表存在较多的大块岩石,直径从几厘米到几米不等;成熟月壤区中月岩含量较少,是登月舱着陆

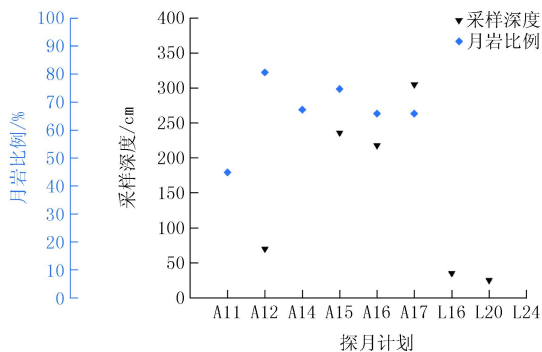


图10 采样深度及月岩比例点状图

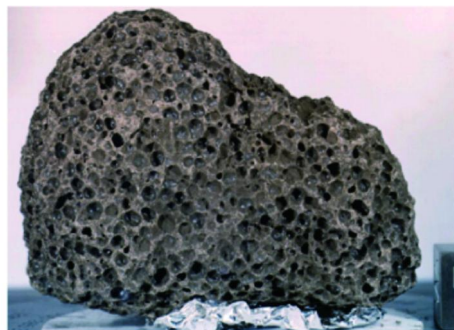


图11 月海玄武岩

和月球基地的理想选址,因此认为在成熟月壤区钻进时遇到月岩的概率基本不会随着孔深的加深而增加;从成功获取的岩心采样结果中,均发现一定数量的岩石颗粒,说明在月表深处存在月岩颗粒,月表钻取采样时遇到月岩可能性大;由于钻进时岩心管尺寸限制,对岩心管中直径 $>1$  cm的月岩颗粒的原始形态很难判定,存在大块月岩颗粒被破碎后形成小颗粒,也有可能是原始颗粒。

## 2 月岩分类

研究表明(Heiken, etal, 1991),月球也是一个物质成分不均一的天体,由不同类型、不同年龄、不同形成方式的各种岩石物质构成<sup>[13]</sup>。一些月球岩石比较相似,如各类玄武岩质熔岩在形成方式和成分特征上等比较相似;而一些岩石差异较大,比如月球上的角砾岩。

根据成因和成分特征及其在月面上的分布区域,将月岩分为4类:(1)月海玄武岩;(2)克里普岩;(3)高地岩石;(4)角砾岩。

我国“嫦娥三号”搭载的“玉兔号”月球车着陆在虹湾地区。该地区地势平坦,是月球雨海西北部延伸出来的一个玄武岩平原,月海玄武岩是其主要的岩石类型。与地球玄武岩相似,月海玄武岩(如图11)由斜长石、辉石和橄榄石组成,但他们比地球玄武岩具有更低的Mg、 $Al_2O_3$ 、K和Na含量,高的FeO含量( $>16\%$ )和变化范围大的 $TiO_2$ 含量(小于1%到大于13%)<sup>[14]</sup>。闫柏琨(2009)<sup>[15]</sup>等通过光谱分析,认为月海玄武岩主要由单斜辉石与钛铁矿组成。

## 3 月岩物理力学性质

### 3.1 月岩的粒径分布及特点

月岩粒度分布较广,从1 cm到几米。虽然在月球样品中月岩都占了很大的比例,但在后期整理和研究中,由于较大颗粒碎片( $>1$  mm)在实验中存在碰撞、不便于分析等原因,在实验前已经被筛选剔除<sup>[16]</sup>,因此对Apollo计划岩石粒径的研究较少,Meyer C. 1994<sup>[17-20]</sup>等对个别的Apollo岩石颗粒粒径做了研究。勘测者计划是研究月岩颗粒较好的数据源,在“勘测者”报告<sup>[21]</sup>中,笔者对9906个样品粒径分布进行研究,并得到粒径分布图,大致的粒径区间如表2所示。

表2 大粒径数据来源

数据来源(粒度分布曲线)	粒度范围/mm	样品个数
Luna 9 (smith 1967, Fig 1) [105]	10 ~ 230	109
Apollo (Luna sourcebook, Fig 7.9) [106]	0 ~ 16	
Apollo (McKay etal. 1988, Fig 2) [97]	0 ~ 16	
Surveyor I (shoemaker and Morris 1969, Fig 3 - 68) [103]	1 ~ 1000	2192
Surveyor III (shoemaker and Morris 1969, Fig 3 - 68)	1 ~ 256	1068
Surveyor V (shoemaker and Morris 1969, Fig 3 - 68)	1 ~ 64	2803
Surveyor VI (shoemaker and Morris 1969, Fig 3 - 68)	2 ~ 64	1766
Surveyor VII (shoemaker and Morris 1969, Fig 3 - 68)	1 ~ 512	2077
Lunar Orbiter III (Cintala etal. 1982) [98]	1000 ~ 3000	
David S. McKay [106]		
其他形式数据		
Apollo 岩心 (Lunar News)	1 ~ 10	
Apollo 岩石	10 ~ 50	

David等<sup>[22]</sup>依据现有数据构造绘制了粒度级配为1000 mm以及细粒的威伯尔图表(见图12)。

从图12中可以看出:

(1)着陆点在高地的Surveyor VII的风化层要比月海风化层更粗糙一些,这正好和月球高地岩屑要比月海岩屑粗糙一些的观点是一致的;

(2)Surveyor I的曲线要粗糙一些,来Surveyor III、V、VI的数据较相似,并且曲线在 $f=0.87$ 和



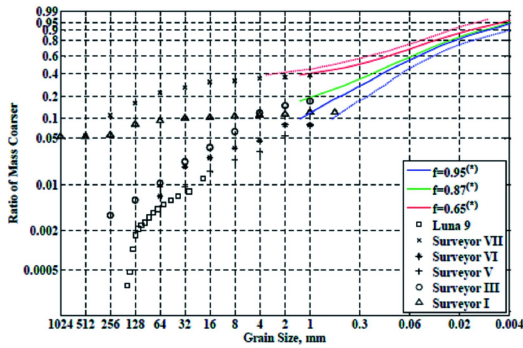


图 12 月球风化层粒径分布威伯尔图表(由数据修正得到<sup>[23]</sup>)

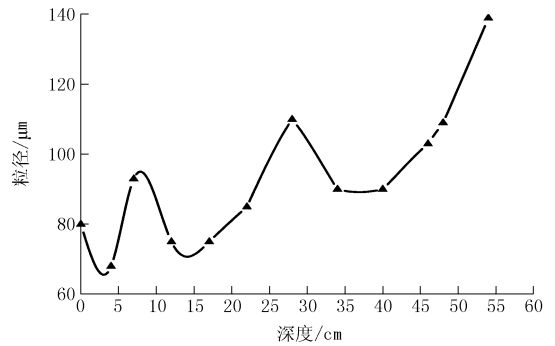


图 14 岩心深度 - 粒径曲线

0.95 时候较为平滑, Surveyor VI 在  $f=0.95$  情况下, 威伯尔图表几乎是一条直线。

这就意味着, 整个分布可由若拉二世分布模型来模仿。月海颗粒分布的威伯尔曲线接近直线, 这和 Murai (1961)<sup>[24]</sup> 的发现正好相反, Murai 认为火山碎屑流的颗粒分布曲线在威伯尔图表下是下凹的较为平滑的曲线。

### 3.2 粒径分布与采样深度的关系

Apollo 岩心样品是研究月岩粒径分布随深度变化的较理想实物。图 13 是 Apollo 16 中月壤颗粒大小分布随着采样深度变化的曲线(据文献[12]绘制), 从中可以看出, 月壤的平均粒径随采样深度似乎有所增加, 但规律性并不明显, 这与月壤的月表的暴露时间有关。由于陨石撞击造成月壤翻腾, 表层月壤的月表暴露时间并不一定大于次表层月壤<sup>[12]</sup>。

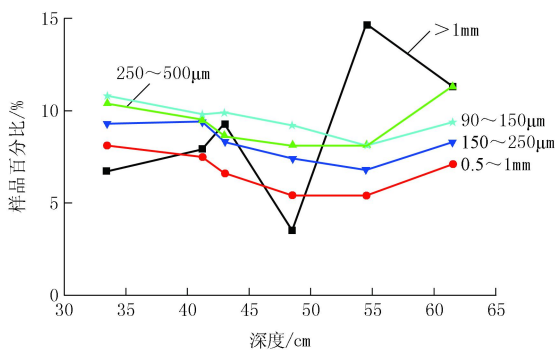


图 13 月壤颗粒深度 - 样品百分比曲线

据对 Apollo 15 岩心(15010/11)<sup>[25]</sup> 不同深度的平均粒径数据的分析可以得到如图 14 所示的曲线。从曲线中可以知道, 随着深度的增加, 粒径大小有一个先下降后上升的趋势。这和 Apollo 16 岩心(6009/10)<sup>[26]</sup> 数据分析结果一致。

由于对月岩(粒径 > 1 cm) 粒径分布与深度研究

资料有限, 并且在钻取采样过程中月岩颗粒很可能被破碎(Luna 20 岩心存在 2 cm 厚破碎状态的岩石), 根据月壤粒径与深度的关系及岩心管的研究得出以下推论: 随着钻进深度的增加, 月岩粒径先减小后增大, 整体呈现增大的趋势。

### 3.3 月岩的堆密度、密度和孔隙率

不同类型的月岩, 由于其自身组成、结构等性质的差异性, 堆密度、密度和孔隙度差异性较大。对月岩进行雷达射线和光度分析表明: 80% 月岩是多孔的。对其进行室内试验, 发现其孔隙率与地球上的同类岩石相似, 但是由于月球周围的磁场强度不及地球磁场强度的千分之一, 其孔隙率与地球上的常见岩石有一定差异性<sup>[27]</sup>。

通过调研, 得出表 3 所示的几种类型月海玄武岩的堆密度、密度和孔隙度。

表 3 部分月海玄武岩堆密度、密度及孔隙率<sup>[28]</sup>

岩石类型	编号	颗粒密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	堆密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	孔隙率/ %
高钛玄武岩	10017	3.42	—	< 10
	70217	3.46	—	< 10
	70,215,312	$3.46 \pm 0.05$	$3.17 \pm 0.08$	$8.3 \pm 2.7$
	12002	3.31 ~ 3.39	—	0 ~ 20
	12051	3.31 ~ 3.39	—	0 ~ 20
	12052	3.31 ~ 3.39	—	0 ~ 20
低钛玄武岩	15555	3.31 ~ 3.39	—	0 ~ 20
	15556	3.31 ~ 3.39	—	26
	12051,19	$3.32 \pm 0.05$	$3.27 \pm 0.03$	$1.8 \pm 1.7$
	15555,62	$3.35 \pm 0.01$	$3.11 \pm 0.03$	$7.1 \pm 0.9$
	12063,74	$3.36 \pm 0.01$	$3.21 \pm 0.03$	$4.7 \pm 1.0$
高铝玄武岩	LAP 02205,51	$3.35 \pm 0.02$	$3.10 \pm 0.04$	$3.4 \pm 3.2$
	MIL 05305,51	$3.36 \pm 0.05$	$3.24 \pm 0.1$	$8.3 \pm 1.9$
	NWA 4898	$3.27 \pm 0.01$	$3.30 \pm 0.04$	$7.2 \pm 1.2$

从表 3 数据可以看出以下规律。

(1) 玄武岩颗粒密度为  $3.26 \sim 3.51 g/cm^3$ , 堆密度为  $3.04 \sim 3.34 g/cm^3$ , 孔隙比为  $0\% \sim 26\%$ , 较

大一部分集中在0%~10%范围内。

(2)高钛玄武岩的密度要比低钛玄武岩及高铝玄武岩略高。这和 Kiefer, Walter S. (2012)<sup>[28]</sup>中提到的月海玄武岩密度范围从3.27(高铝玄武岩)~3.46 g/cm<sup>3</sup>(高钛玄武岩)是一致的。

(3)由于影响岩石孔隙率因素较多,各种玄武岩孔隙率总体差异性不大,都分布在平均值周围。岩样15556号,孔隙比较大,很大程度上是由于内部的囊泡,这些囊泡是裸露在地表的,因此实际值可能比测得的26%要大。

### 3.4 月岩热、磁特性

#### 3.4.1 月岩热特性

为了了解月球热情况,对月表环境下月岩热特性的温度变化研究是必不可少的,而月岩热导和热扩散是最基本的热特性,对认识月岩热特性有很大的参考价值<sup>[29-32]</sup>。

Naoyuki FUJII等<sup>[33]</sup>测量了在不同环境下、不同温度变化下,月球 Apollo 11、14 样品的热导率,并和地球玄武岩的测量值进行比较。对文献[33]中在真空条件下数据进行分析,可得到如图15所示的结果。从图15可以看出,月球玄武岩热导率要比地球玄武岩小一些;月岩真空下热导率大概范围:(0.678~2.87)×10<sup>-3</sup> cal/cm sec deg;对同一岩石而言,热导率随着温度升高而增加。

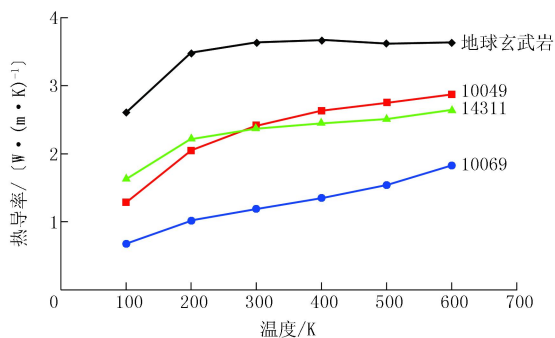


图15 真空条件下不同温度月岩及地球玄武岩热导率曲线

#### 3.4.2 月岩磁特性

月岩磁性由月岩所含铁磁性矿物所产生,它不仅与月岩性质和外磁场有关,也与月岩所处的物理状态及化学过程有关。最能体现月岩磁性的就是磁化率。

表4给出了几个典型月岩的磁化率,并和陨石的磁化率进行比较<sup>[34]</sup>。

表4 月岩和陨石磁化率

岩石编号	类型	质量/g	磁化率 logx
A 12051,19	钛铁矿玄武岩	12.90	2.83 ± 0.08
A 14303,14	角砾岩	22.26	3.37 ± 0.08
A 14321,220	结晶质角砾岩	10.01	3.19 ± 0.08
A 15418,179	粒状角砾岩	28.68	2.95 ± 0.08
A 15555,62	玄武岩	32.98	2.91 ± 0.08
NWA 482	角砾岩(陨石)	9.87	3.41 ± 0.08
NWA 773	角砾岩(陨石)	13.22	3.46 ± 0.08
NWA 5000	角砾岩(陨石)	7	2.73 ± 0.08

注: A 表示来自 Apollo 月岩样品, NWA 表示来自非洲西北部陨石。

## 4 结论

(1)月岩以直径较大的岩石颗粒存在,比例为40%~80%,月岩在月球样品中的比例高达65%,在钻取采样过程中遇到月岩的概率基本不会随着孔深的加深而增加。

(2)月岩粒径分布较广,从1 cm到几米,随着深度的增加,粒径大小呈先减小后增大的趋势。

(3)月海玄武岩呈疏松状态,其主要物理力学范围为密度3.26~3.51 g/cm<sup>3</sup>,堆密度3.04~3.34 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度0%~10%,抗压强度约200 MPa,动态抗拉强度114~160 MPa。

(4)月岩热导率随温度升高而增大,真空下范围:(0.678~2.87)×10<sup>-3</sup> cal/cm sec deg;磁化率的范围:logx=2.8~3.4。

## 参考文献:

- [1] Vaniman D, Dietrich J, Taylor G J and Heiken G. Exploration, samples, and recent concepts of the moon. In: G H Heiken, D T Vaniman and B M French(Editors), Lunar source book: A user's guide to the moon[M]. Cambridge Univ Press, Cambridge, 1991: 5-26.
- [2] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 251-286.
- [3] C Meyer. Luna 16 Drill Core[J]. Lunar Sample Compendium, 2009.
- [4] A. P. Vinogradov. Preliminary data on lunar ground brought to earth by automatic probe "Luna 16"[J]. Proceedings of the second Lunar Science Conference, 1971, (1): 1-16.
- [5] C Meyer. Luna 20 Drill Core[J]. Lunar Sample Compendium, 2009.
- [6] C Meyer. Luna 24 Drill Core[J]. Lunar Sample Compendium, 2009.
- [7] C Meyer. 15001-15006 Deep Drill Core[J]. Lunar Sample Compendium, 2009.

- [8] C Meyer. 10004 Drive Tube [J]. Lunar sample compendium, 2009.
- [9] 沈进进. 多杆组接式月壤钻取采样技术研究[D]. 黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [10] 张禹. 滑轨式月壤钻取采样装置关键技术研究[D]. 黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [11] 王道德. 月球岩石类型简介[J]. 地质地球化学, 1975, (6): 16-22.
- [12] 郑永春, 欧阳自远, 王世杰, 等. 月壤的物理和机械性质[J]. 矿物岩石, 2004, 24(4): 14-19.
- [13] Bradley L. Jolliff & Jeffrey J. Gillis. Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins[J]. Journal of geophysical research, 2000, 105(2): 4197-4216.
- [14] 徐义刚. 月海玄武岩与月球演化[J]. 地球化学, 2010, 39(1): 50-62.
- [15] 闫柏琨, 甘普平, 等. 基于光谱分析的 Clementine UV/VIS/NIR 数据月表矿物填图[J]. 国土资源遥感, 2009, (4): 19-24.
- [16] John C Graf. Lunar soils grain size catalog [J]. NASA reference publication 1265, 1993.
- [17] Charles Meyer. Catalog of Apollo 17 rocks, volume 4 - North Massif [J]. NASA, 1994.
- [18] Clive R. Neal and Lawrence A. Taylor. Catalog of Apollo 17 rocks, volume 2 - central valley, part 1 [J]. NASA, 1993.
- [19] Clive R. Neal and Lawrence A. Taylor. Catalog of Apollo 17 rocks, volume 2 - central valley, part 2 [J]. NASA, 1993.
- [20] Graham Ryder. Catalog of Apollo 17 rocks, volume 1 - station 2 and 3 (South Massif) [J]. NASA, 1993.
- [21] Scaled Experimental Study on Excavation of Lunar Regolith [Z].
- [22] W. David Carrier III, F. ASCE. Particle size distribution of lunar soil [J]. Journal of geotechnical and geo-environmental engineering, 2003, (129): 956-959.
- [23] Isamu Murai. A Study of the Textural Characteristics of Pyroclastic Flow Deposits in Japan [J]. Bulletin of the earthquake research institute, 1961, (39): 133-248.
- [24] Mean Grain Size of Lunar Regolith by Depth [EB/OL]. <http://www.asi.org/adb/m/07/04/mean-grain-size.html>.
- [25] W. David Carrier III, Gary R. Olhoeft and Wendell Medell. Physical properties of the lunar surface [J]. Lunar Source, 475-594.
- [26] Refraction, Reflection and Polarization properties of the Lunar Rocks [EB/OL]. <http://sundaramfield.com/refraction-reflection-and-polarisation-properties-of-the-lunar-rocks/>.
- [27] J. Pohl. 9. I Density and porosity of lunar rocks and soil [Z]. 513-514.
- [28] Walter S. Kiefer, Robert J. Macke. The density and porosity of lunar rocks [J]. Geophysical Research Letters, 2012, (39).
- [29] Horai Ki-Hi, Baldrige Scott. Thermal conductivity of nineteen igneous rocks, I application of the needle probe method to the measurement of the thermal conductivity of rock [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1972, (5): 151-156.
- [30] Thermal conductivity of nineteen igneous rocks, II estimation of the thermal conductivity of rock from the mineral and chemical compositions [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1972, (5): 157-166.
- [31] W. Woodside, J. H. Messmer. Thermal Conductivity of Porous Media. I. Unconsolidated Sands [J]. Journal of applied physics, 1961, 32(9): 1688-1699.
- [32] Naoyuki Fujii. Thermal diffusivity of lunar rocks under atmospheric and vacuum conditions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, (18): 65-71.
- [33] R. J. Macke, W. S. Kiefer, D. T. Britt, et al. Density, Porosity and Magnetic Susceptibility of Lunar Rocks [R]. 41st Lunar and Planetary Science Conference, 2010.
- [34] Macke R J, Kiefer W S, Britt D T, et al. Density, porosity and magnetic susceptibility of lunar rocks [R]. 41st Lunar and Planetary Science Conference. 2010.