

文章编号: 1000-4734(2016)01-0001-06

# 风化作用对普通球粒陨石物理性质的影响

石峰<sup>1,2</sup>, 李世杰<sup>1\*</sup>, 李雄耀<sup>1</sup>, 王世杰<sup>3</sup>, 刘建忠<sup>1</sup>,  
胡森<sup>4</sup>, 杨本永<sup>5</sup>, 曾小家<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院 地球化学研究所 月球与行星科学研究中心, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;  
4. 中国科学院 地质与地球物理研究所 地球深部研究重点实验室, 北京 100029;  
5. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 陨石的物理性质在陨石母体的演化过程中起到了重要作用。地球上的风化作用也会对陨石的一些物理性质造成显著影响。为了探讨风化对普通球粒陨石物理性质的影响, 本文以库姆塔格普通球粒陨石为研究对象, 使用密度仪、磁化率仪、热导仪、分光光度计等测量了其不同部位的物质性质, 如颗粒密度, 体积密度、孔隙度、磁化率、热导率、反射光谱强度等。研究表明: H型普通球粒陨石的颗粒密度、孔隙度、磁化率以及反射光谱强度会随着风化程度的加深而降低, 而热导率和体密度受风化作用的影响相对较小。

**关键词:** 普通球粒陨石; 物理性质; 风化作用

**中图分类号:** P512.1; P579; P691 **文献标识码:** A **doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2016.01.001

**作者简介:** 石峰, 男, 1989年生, 硕士, 月球与行星科学研究. E-mail: sfivifs@foxmail.com

## Weathering Effects on Physical Property of Ordinary Chondrites

SHI Feng<sup>1,2</sup>, LI Shi-jie<sup>1</sup>, LI Xiong-yao<sup>1</sup>, WANG Shi-jie<sup>3</sup>, LIU Jian-zhong<sup>1</sup>,  
HU Sen<sup>4</sup>, YANG Ben-yong<sup>5</sup>, ZENG Xiao-jia<sup>1,2</sup>

(1. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 55002, China;  
2. University of Chinese Academy of sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 4. Key Laboratory of the Earth's Deep Interior, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of sciences, Beijing 100029, China; 5. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanical, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Physical properties played important roles during evolutionary processes of meteorite parent bodies. Some physical properties of meteorite might be significantly altered due to terrestrial weathering. In order to investigate the influence of weathering on ordinary chondrite physical properties, the physical properties (grain density, bulk density, porosity, magnetic susceptibility, thermal conductivity, and reflectance spectrum) of different depth of a Kumtag meteorite were measured using density analyzer, kappameter, thermal conductivity analyzer and spectral photometer, respectively. The results show that the grain density, porosity, magnetic susceptibility and reflection spectrum of H ordinary chondrite decrease with increasing weathering degree. While the effect on thermal conductivity and bulk density by weathering is not significant.

**Keywords:** ordinary chondrite; physical property; weathering

陨石是指从行星际空间穿过地球大气层烧蚀后到达地表的流星体残余体, 其携带有丰富的有关太

阳系的化学成分、太阳系形成与演化、太阳系空间环境等科学信息, 因此对陨石的研究可提供许多有

收稿日期: 2015-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41273080; 41473067); 国家自然科学基金重大项目(批准号: 41490630)

\* 通讯作者, E-mail: shijie@mails.gyig.ac.cn

关太阳系早期历史的各种信息<sup>[1]</sup>。

陨石的物理性质（密度、孔隙度、磁化率、发射光谱、热导率等）是陨石学研究的重要内容之一。陨石的颗粒密度是区分普通球粒陨石化学群的主要参数之一，被广泛用于陨石的分类工作之中<sup>[2]</sup>。陨石的孔隙度不仅对陨石母体的内部结构、重力场和冲击作用产生不同程度的影响，也能对其它的物理性质产生一定的影响，比如热导率、震波速度、宇宙成因核素产率和电导率等<sup>[3]</sup>。对于陨石的磁化率，一方面，与颗粒密度相结合可以对陨石进行快速、经济、无损的分类工作<sup>[4-7]</sup>，另一方面也能用于分析陨石的成岩过程以及研究陨石母体内部的分异作用等<sup>[6, 8]</sup>。此外，基于陨石的磁性参数，近年来相继开展了大量有关小行星<sup>[9-11]</sup>、月球<sup>[12]</sup>、火星<sup>[13]</sup>等的磁场测量工作。陨石热学性质不仅仅是陨石母体的一个基本物理化学参数，其更是亚尔科夫斯基效应（Yarkovsky effect）的一个重要约束条件<sup>[14, 15]</sup>。陨石的光谱学则是陨石学研究和比较行星学研究的一个重要课题。其反射光谱和红外光谱的实验室测定与小天体望远镜观测光谱的比较研究，可为陨石与其母体的成因联系、小行星的表面物质组成，以及陨石、小行星的热演化历史和化学演化关系的研究提供重要信息<sup>[16]</sup>。

鉴于陨石物理性质在陨石学与比较行星学研究中的重要意义，近年来开展了大量的陨石物理性质的测量分析工作<sup>[2, 7, 14-15]</sup>。然而，目前已收集到的陨石样品中，绝大多数为发现型陨石，在地球上均经历了不同程度的风化作用，陨石中的矿物组分在水、氧气、二氧化碳等的作用下发生变化，使陨石的物理性质发生改变，从而导致实验室中陨石的物理性质测量数据并不能代表陨石本身的物理性质。

Bland 等<sup>[17-19]</sup>选取大量不同时期的陨石样品作为研究对象，开展了陨石风化机制的相关研究。其实验方案探讨陨石物理性质的变化时有很大局限性：（1）陨石之间的物理性质具有一定的差异；（2）降落后的环境有差异，例如：南极陨石与沙漠陨石因所处的环境不同而会导致有不同的风化结果<sup>[20]</sup>；（3）实验过程中取样部位的差异也会对实验结果造成较大影响，例如：表层部分与中心部分的差异<sup>[21]</sup>，上述因素都会导致实验结果的对比性较差。为进一步深入研究风化作用对陨石物理性质的影响，本文利用库姆塔格普通球粒陨石系统地探讨了风化作用对陨石各个物理性质的影响及其程度。

## 1 样品与分析方法

### 1.1 样品

为了更准确的确定风化作用对普通球粒陨石物理性质的影响，本研究使用同一块陨石样品作为实验对象。一块陨石样品降落到地球表面时，其由内到外风化程度是有很大的差异，核部与外层接触空气、雨水的程度不同，风化速率也不尽相同，因此陨石的核部和外层经历了不同程度的风化作用。在研究过程中，将研究对象由核部至外层分别取样。这样就可以研究风化作用对具有相同初始物理性质的样品的影响，同时避免了降落时间差异以及降落时所处环境差异对实验结果造成的不确定性。

目前已收集到的陨石绝大多数为普通球粒陨石（降落型中占 74%，发现型中占 92%<sup>[22]</sup>）。论文选取了新疆库姆塔格（Kumtag）H5 型普通球粒陨石作为研究对象，该陨石属于发现型陨石，风化程度为 W2，冲击程度为 S2，属于常见的类型，使实验结果能够有一定的代表性。

分析之前，取陨石手标本中心的一部分，切割成八块大小相似的一组长方体，从底部到顶部编号分别为 1~8（图 1）。对其各项物理性质进行测定，随后将样品分别切片并制作光片，在扫描电子显微镜（SEM）下观察其矿物变化，为其物理性质的变化提供讨论依据。

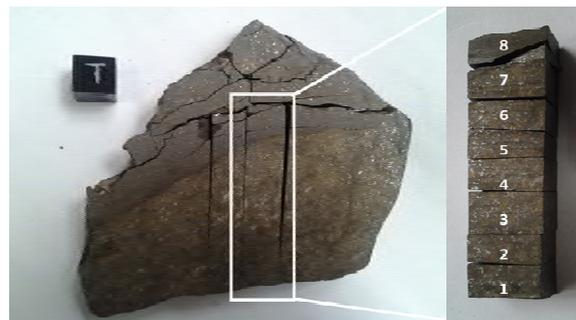


图 1 库姆塔格陨石手标本剖面及 8 块待测样品  
Fig. 1. Profile of Kumtag meteorite and the 8 samples to be tested.

### 1.2 分析方法

本实验中磁化率的测定是在中科院地质与地球物理研究所进行，使用的是 MFK1-FA 卡帕桥磁化率仪。光谱测量在中科院安徽光学精密机械研究所进行，使用的是 Solidspec UV-3700 型分光光度计。密度和孔隙度、热导率均在中科院地球化学研究所进行，其中密度测量使用的是 ULTRAPYC 1200e 型

密度分析仪, 孔隙度也是在此仪器上使用气球包裹法测得<sup>[23]</sup>; 导热率使用的是 HotDisk TPS2500S 型热常数分析仪。以上实验内容均在常温常压下进行。

扫描电子显微镜 (SEM) 使用的是中科院地球化学研究所日本电子 JSM-6460LV 低、高真空数字化扫描电子显微镜, 配装 EDAX 公司生产的 X 射线能谱仪, 分辨率为 3~4 nm, 为区分不同矿物相, 在观察过程中使用的是背散射电子模式 (BSE)。

## 2 实验结果

陨石样品的密度分为颗粒密度与体密度, 体密度为包含孔隙状态下单位体积的质量, 颗粒密度则是排除孔隙后单位体积的质量。在本研究中, 8 号样品的颗粒密度最小, 为 $(3.5152 \pm 0.0098) \text{ g/cm}^3$ ; 4 号样品的颗粒密度最大, 为 $(3.7379 \pm 0.0035) \text{ g/cm}^3$  (表 1)。1 至 4 号样逐渐升高, 而 4 至 8 号样逐渐降低。体密度中最小值为 8 号样品的 $(3.4656 \pm 0.0101) \text{ g/cm}^3$ , 最大值为 4 号样品的 $(3.6895 \pm 0.0047) \text{ g/cm}^3$ , 其变化趋势与颗粒密度相似呈现对称性分部。孔隙度变化则稍有不同, 其中最小值为 1 号样品的 0.2975%, 至 4 号样品孔隙度增大至 1.2924%, 随后开始下降, 与密度变化趋势一致, 然而 8 号样品孔隙度突然增大至 1.4027%, 与密度变化趋势明显不符。

在对陨石样品的磁学性质分析中, 我们将每个样品进行了 3 个维度的测量, 取得其磁化率的平均值, 以排除各向异性的影响。其中 8 号样品最小, 为 $(4.75 \pm 0.8) \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ ; 4 号样品最高, 为 $(5.37 \pm 1.03) \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  (表 1)。可以看出磁化率的变化趋势与陨石颗粒密度的分布趋势相关性极高, 1 至 4 号样逐渐升高, 而 4 至 8 号样逐渐降低, 8 号样品未像孔隙度中出现升高的情况。

样品导热率的变化则与以上性质不同 (表 1), 1 至 7 号样品的均值为 3 W/mK, 整体上变化极小, 只有 8 号样品出现较大的变化, 降低至  $1.67 \pm 0.22$

(W/mK), 可能是短时间内风化作用对陨石的导热率影响较小。

8 块样品的光谱反射率从核心到外壳逐渐降低, 吸收谱特征大体上相似 (图 2)。其基本特征是近紫外吸收边缘较陡, 在 500 nm 处出现第一个较强吸收峰, 650 nm 处出现一个极弱的吸收峰, 它们分别由亚铁和金属铁引起。从反射光谱整体图像上看, 吸收中心位于 980 nm 处, 是橄榄石, 单斜辉石中的  $\text{Fe}^{2+}$  d-d 转换的结果。在接近 1350 nm 处反射光谱反射率达极大值, 其形成的原因在于在 1300 nm 处的长石弯曲, 以及 1400 nm 处辉石的一个弱吸收峰。上述特征与橄榄石—辉石混合物的反射光谱特征一致<sup>[24]</sup>。1800 nm 后的数据噪声较大, 可探讨性不高, 大致能够看出近红外波段反射率趋向平缓。

## 3 讨论

在分析陨石物理性质随风化作用的变化之前, 我们必须了解陨石的风化过程。大量的相关研究表明, 普通球粒陨石风化的过程一般分为 2 个阶段: 第一阶段是金属矿物的氧化过程, 这一阶段风化速率较快, 发生在陨石降落的数百年内; 第二阶段是抗风化能力较强的陨硫铁和硅酸盐矿物的氧化过程, 并且由于这时陨石中的孔隙和裂缝已经被金属的氧化物所填充, 其风化速率更加缓慢<sup>[17-19, 25-27]</sup>。

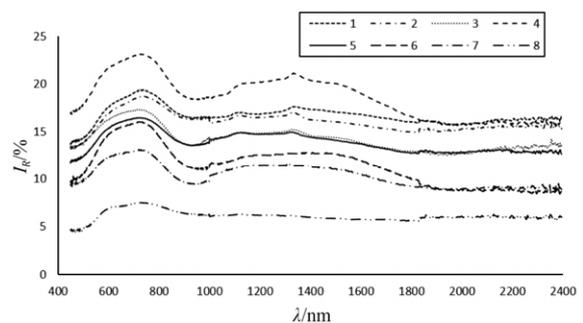


图 2 库姆塔格陨石各样品反射光谱

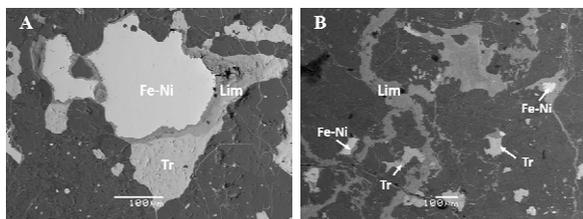
Fig. 2. Reflectance spectrum of Kumtag meteorite.

表 1 库姆塔格陨石各样品的颗粒密度、体密度、孔隙度、磁化率以及导热率

Table 1. Grain densities, bulk densities, porosities, magnetic susceptibilities and thermal conductivities of Kumtag meteorite

样品编号	颗粒密度/(g/cm <sup>3</sup> )	体密度/(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙度/%	磁化率/(10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> /kg)	导热率/(W/mK)
1	3.6439±0.0028	3.6332±0.0034	0.2975±0.0044	5.25±0.09	2.97±0.09
2	3.6823±0.0017	3.6587±0.0029	0.6412±0.0034	5.28±0.12	3.05±0.08
3	3.7139±0.0029	3.6789±0.0021	0.9438±0.0035	5.35±0.09	2.99±0.19
4	3.7379±0.0035	3.6895±0.0047	1.2924±0.0058	5.37±0.11	3.07±0.17
5	3.7111±0.0011	3.6843±0.0016	0.6124±0.0019	5.31±0.11	3.02±0.12
6	3.7007±0.0012	3.6811±0.0014	0.5132±0.0018	5.31±0.09	3.11±0.21
7	3.6331±0.0021	3.6195±0.0035	0.3719±0.0041	5.16±0.08	3.02±0.06
8	3.5152±0.0098	3.4656±0.0101	1.4027±0.0141	4.75±0.07	1.67±0.22

在扫描电镜下观察本实验中陨石矿物的变化, 可以看到在陨石的核部(4号样品)仍存在很多较大的金属颗粒( $>100\ \mu\text{m}$ ), 金属颗粒的边缘有数微米的氧化物环(图3A)。证明其处于风化作用的早期, 依据普通球粒陨石的风化等级划分标准<sup>[28]</sup>, 其风化程度为W1。而陨石的外层(8号样品)只有较少的金属颗粒分布, 且粒径普遍较小, 金属的风化产物已经填充大部分孔隙, 形成相互联通的孔隙结构(图3B), 证明其处于风化第一阶段的后期, 这时风化程度已经到达W3。我们由此证实了实验设计中关于同一块陨石其核心与表层风化程度不同的假设。这种风化程度的差异是其各种物理性质变化的基础。



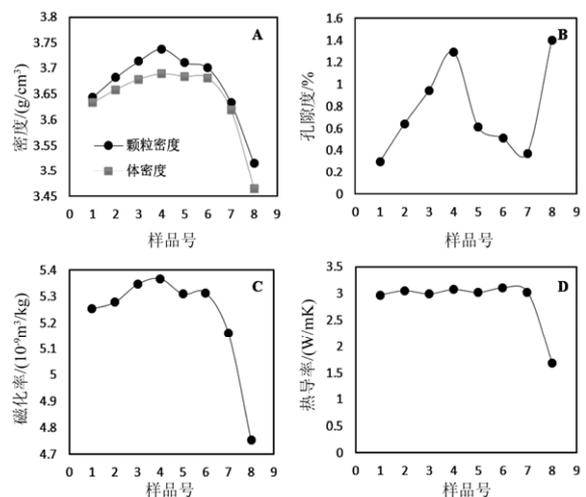
A-4号样品; B-8号样品; Tr-陨硫铁; Lim-风化形成的褐铁矿

图3 库姆塔格陨石核心与外层样品 BSE 图像  
Fig. 3. BSE images for core and outside of the samples.

从体密度与颗粒密度的对比可以看出体密度与颗粒密度整体保持一致的升降趋势, 然而体密度中1至6号样中体密度差异很小, 变化趋势平缓, 远小于颗粒密度的变化幅度(图4A)。孔隙度的变化与颗粒密度保持一致, 但是在8号样品出现明显的升高现象(图4B)。这些现象证明陨石整体上尚处于风化的第一阶段。这一阶段中主要是铁的氧化物填充陨石中的孔隙和裂缝, 整体上的体积变化不大。前人研究证明新鲜陨石中的孔隙和裂缝足够容纳金属的氧化产物, 只有少数富金属的陨石或者孔隙较少的陨石会产生一定程度的膨胀<sup>[26]</sup>, 故体密度相对平缓。而铁镍金属的风化产物, 如褐铁矿, 其密度约为原始金属物质的一半(褐铁矿:  $3.3\sim 4.3\ \text{g}/\text{cm}^3$ , 铁镍金属:  $7.6\sim 7.8\ \text{g}/\text{cm}^3$ ), 故陨石的颗粒密度和孔隙度相较体密度变化更加明显。

孔隙度在前7块样品中与颗粒密度变化一致, 然而8号样品出现明显突变。这是由于更接近样品表层, 其中含有大型裂缝(图5)。处于风化早期的陨石中缝隙一般较细小, 这种宏观裂缝应该是陨石降落到地面时撞击所致, 故不能将其作为风化作用的结果加以探讨。

陨石样品的磁化率的变化趋势与颗粒密度、孔隙度(1~7号样)具有高度一致性(图4C), 1-4号样由  $5.25\times 10^{-9}\ \text{m}^3/\text{kg}$  至  $5.37\times 10^{-9}\ \text{m}^3/\text{kg}$  呈现上升趋势, 5、6号样品出现下降, 它们之间相对持平(均为  $5.31\times 10^{-9}\ \text{m}^3/\text{kg}$ ), 8号样品最低 ( $4.75\times 10^{-9}\ \text{m}^3/\text{kg}$ )。普通球粒陨石中的磁性物质以铁镍合金为主, 其磁化率主要与铁纹石、镍纹石和四方镍纹石等矿物相关<sup>[29]</sup>, 极少数陨石中含有磁铁矿或磁黄铁矿等铁氧化物<sup>[30]</sup>。硅酸盐矿物为顺磁性矿物, 陨硫铁为反磁性矿物, 他们对磁化率的贡献相对较小<sup>[31]</sup>。由图3可以看出, 随着风化程度的增强, 越来越多的铁镍金属转变为铁的氧化物和氢氧化物(褐铁矿等), 造成陨石磁化率的明显降低, 这与前人的研究具有很好的一致性<sup>[4, 6]</sup>。



A. 体积密度与颗粒密度; B. 孔隙度; C. 磁化率; D. 热导率

图4 库姆塔格陨石各项物理性质变化趋势  
Fig. 4. Tendency of each physical parameters of Kumtag meteorite.



图5 库姆塔格陨石8号测试样品上的裂缝  
Fig. 5. Crack on the sample 8 of Kumtag meteorite.

颗粒密度和磁化率可用来划分陨石的化学群。以颗粒密度作为普通球粒陨石的分类标准时, 其缺点在于 L 群与 LL 群之间重合度较大, 无法准确区分; 而以磁化率作为普通球粒陨石分类标准时, 磁化率按照 LL-L-H 型依次升高, H 群与 LL 群、L 群与 LL 群区分度明显, 然而 H 群与 L 群有部分重合 (图 6)。因此有学者提出同时使用颗粒密度和磁化率作为普通球粒陨石的分类标准, 以提高分类的精确度<sup>[2]</sup>。然而在我们的研究中, 库姆塔格虽然是属于 H 群的普通球粒陨石, 在风化程度较高的时候, 其颗粒密度和磁化率强度出现在 L 群或 LL 群范围内 (图 6)。这一点在进行陨石分类时应该引起注意。

普通球粒陨石的反射光谱强度主要取决于其中  $\text{Fe}^{2+}$  的含量<sup>[32]</sup>, 由于星际空间中几乎不含氧, Fe 在新鲜的普通球粒陨石中多以  $\text{Fe}^0$  (铁镍金属) 和  $\text{Fe}^{2+}$  (陨硫铁和镁铁质硅酸盐) 存在,  $\text{Fe}^{3+}$  主要为降落地表后风化作用的产物<sup>[33]</sup>。1~8 号样品的反射光谱测量结果表明: 随着风化程度的增加, 样品的反射率相应降低, 其中最外层风化程度最高的 8 号样品反射率最低, 并且谱线趋近平滑, 未出现明显的吸收峰 (图 2)。这主要是由于: 随着风化程度的增加, 样品中铁镍金属等反射率较高的物质逐渐减少造成的结果。同样, 样品在 980 nm 附近出现的

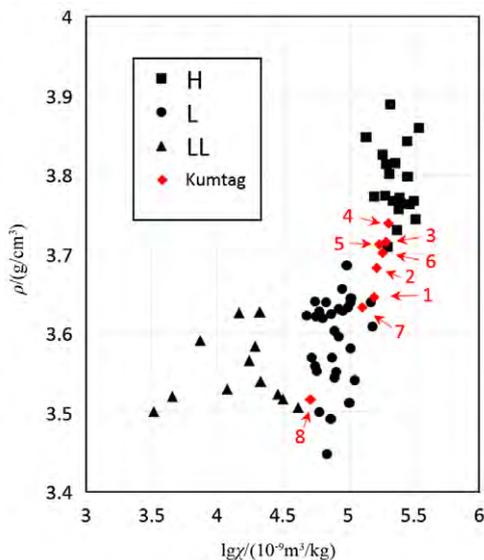


图 6 库姆塔格陨石各样品颗粒密度与磁化率的分布图 (普通球粒陨石数据引自文献[2])

Fig. 6. Grain density and magnetic susceptibility for each samples of Kumtag meteorite.

$\text{Fe}^{2+}$  的吸收峰也表现出: 随着风化程度的增加,  $\text{Fe}^{2+}$  逐渐减少, 对应的吸收深度也有降低的趋势, 吸收中心向红外方向漂移<sup>[34]</sup>。总体上看, 近红外反射谱线是受橄榄石和辉石等主要矿物的控制。其并未显示出典型的铁镍金属反射光谱特征, 主要是由于金属颗粒表面存在一定厚度的氧化铁<sup>[24]</sup>。

前人的研究认为, 陨石的热导率与其孔隙度的倒数有一定的线性关系<sup>[14-15]</sup>, 然而在我们的研究中, 常温环境热导率与孔隙度之前并没有直接的相关性 (图 4B、D)。只有 8 号样品表现出孔隙度与热导率存在负相关性, 造成这种现象的原因在于我们使用的样品本身孔隙度较小, 其变化幅度不明显, 而 8 号样品中存在一条较大的裂隙 (图 5), 对陨石的热导率产生了较大的影响。实验数据表明样品微小的孔隙度变化对样品热导率的影响较小。当然这也有可能是测试仪器的精度不够所致, 因此这个结论需要更进一步的实验进行验证。

## 4 结论

本文基同一陨石的不同风化程度的样品, 探讨了风化作用对陨石物理性质的影响, 得出以下结论:

(1) 陨石处于风化第一阶段时, 体密度与颗粒密度的变化趋势一致, 但是体密度变化幅度要小于颗粒密度, 这可能与鲜样品的孔隙度大小有关。

(2) 孔隙度、颗粒密度、磁化率变化趋势高度一致, 其变化的本质在于普通球粒陨石中的金属物质在风化作用下转变成氧化物和氢氧化物, 体积增大、密度减小、磁性减弱导致的。

(3) 随着风化程度的增加, 普通球粒的反射光谱的反射率逐渐降低, 其中  $\text{Fe}^{2+}$  的吸收深度也随风化程度的增加而降低。

(4) 陨石由于裂隙的存在, 使其孔隙大幅增加, 导致热导率明显降低, 但是, 陨石中孔隙度的微小变化对热导率的影响则相对较小。

(5) 由于风化作用对陨石样品的物理性质 (密度、孔隙度、磁化率、反射光谱等) 具有较大的影响, 在测量陨石物理性质时, 应尽量选取核心部分相对较新鲜的样品, 否则会影响实验结果的准确性。

本次实验中仅使用了 H 型普通球粒陨石样品, 在接下来的实验中应加入 L 及 LL 型普通球粒陨石, 使实验结果有更广泛的适用性。

## 参 考 文 献:

- [1] 欧阳自远. 天体化学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [2] Consolmagno G J, Britt D T, Macke R J. The significance of meteorite density and porosity [J]. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 2008, 68(1): 1-29.
- [3] Britt D T, Yeomans D, Housen K, et al. Asteroid Density, Porosity, and Structure [J]. *Asteroids III*, 1987.
- [4] Rochette P, Sagnotti L, Bourot-Denise M, et al. Magnetic classification of stony meteorites: 1. Ordinary chondrites [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2003, 38(2): 251-268.
- [5] Folco L, Rochette P, Gattacceca M, et al. In situ identification, pairing, and classification of meteorites from Antarctica through magnetic susceptibility measurements [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2006, 41(3): 343-353.
- [6] Smith D L, Ernst R E, Samson C, et al. Stony meteorite characterization by non-destructive measurement of magnetic properties [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2006, 41(3): 355-373.
- [7] 罗红波, 林杨挺, 胡森, 等. 南极格罗夫山陨石的磁化率[J]. 岩石学报, 2009, (5): 1260-1274.
- [8] Rochette P, Gattacceca J, Bourot-Denise M, et al. Magnetic classification of stony meteorites: 3. Achondrites [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2009, 44(3): 405-427.
- [9] Kivelson M, Bargatzte L, Khurana K, et al. Magnetic-Field Signatures Near Galileo Closest Approach to Gaspia [J]. *Science*, 1993, 261(5119): 331-334.
- [10] Richter I, Brinza D E, Cassel M, et al. First direct magnetic field measurements of an asteroidal magnetic field: DS1 at Braille [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(10): 1913-1916.
- [11] Acuna M H, Anderson B J, Russell C T, et al. NEAR magnetic field observations at 433 Eros: First measurements from the surface of an asteroid [J]. *Icarus*, 2002, 155(1): 220-228.
- [12] Hood L L, Zakharian A, Halekas J, et al. Initial mapping and interpretation of lunar crustal magnetic anomalies using Lunar Prospector magnetometer data [J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2001, 106(E11): 27825-27839.
- [13] Acuna M H, Connerney J E P, Ness N F, et al. Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment [J]. *Science*, 1999, 284(5415): 790-793.
- [14] Opeil C P, Consolmagno G J, Britt D T. The thermal conductivity of meteorites: New measurements and analysis [J]. *Icarus*, 2010, 208(1): 449-454.
- [15] Opeil C P, Sj G J C, Britt D T. Stony meteorite thermal properties and their relationship with meteorite chemical and physical states [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2012, 47(3): 319-329.
- [16] McFadden L, Gaffey M, Mccord T. Mineralogical-Petrological Characterization of Near-Earth Asteroids [J]. *Icarus*, 1984, 59(1): 25-40.
- [17] Bland P A, Berry F J, Smith T B, et al. The flux of meteorites and weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(11): 2053-2059.
- [18] Bland P A, Sexton A S, Jull A J T, et al. Climate and rock weathering: terrestrial age dated [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(18): 3169-3184.
- [19] Bland P A. Terrestrial weathering rates defined by extraterrestrial materials [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88(1-3): 257-261.
- [20] 王道德, 林杨挺, 戴诚达, 等. 南极陨石与沙漠陨石的对比研究[J]. 极地研究, 1999, (2): 45-58.
- [21] 王奎仁, 洪吉安. 陨石熔壳研究[J]. 高校地质学报, 1995, (2): 22-28.
- [22] McBride K M. Statistical Comparisons of Antarctic Meteorites and Falls [J]. *Lunar and Planetary Science Conference*, 2002, 33: 1323.
- [23] Li S, Wang S, Li X, et al. A new method for the measurement of meteorite bulk volume via ideal gas pycnometry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(E10).
- [24] Gaffey M. Spectral Reflectance Characteristics of Meteorite Classes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, 81(5): 905-920.
- [25] Lee M R, Bland P A. Dating climatic change in hot deserts using desert varnish on meteorite finds [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 206(1-2): 187-198.
- [26] Lee M R, Bland P A. Mechanisms of weathering of meteorites recovered from hot and cold deserts and the formation of phyllosilicates [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(4): 893-916.
- [27] Lee M R, Smith C L, Gordon S H, et al. Laboratory simulation of terrestrial meteorite weathering using the Bensour (LL6) ordinary chondrite [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2006, 41(8): 1123-1138.
- [28] Wlotzka F. A weathering scale for the ordinary chondrites [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1993, 28: 460.
- [29] Wasilewski P, Acuna M H, Kletetschka G. 433 Eros: Problems with the meteorite magnetism record in attempting an asteroid match [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2002, 37(7): 937-950.
- [30] 纪新林, 潘永信. 吉林陨石中铁镍合金的磁学性质[J]. 地球物理学报, 2012, (6): 1973-1979.
- [31] Knoska S, Krivsky L. Types of Sunspots, Magnetic Classification and Flare Yield in Cycle No-20 [J]. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 1981, 32(5): 292-303.
- [32] 王道德, 等. 中国陨石导论[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [33] Burns R, Burbine T, Fisher D, et al. Weathering in Antarctic H-Chondrites and Cr-Chondrites---Quantitative-Analysis Through Mossbauer-Spectroscopy [J]. *Meteoritics*, 1995, 30(6): 625-633.
- [34] 林文祝, 高来之. 我国新近降落陨石和地球岩石的反射谱研究[J]. 地球化学, 1991, (1): 64-69.