

低温低压条件下辉石粉末的热导率实验分析:对月球及火星表面热环境研究的指示*

于雯¹ 李雄耀^{1**} 王世杰²

YU Wen¹, LI XiongYao^{1**} and WANG ShiJie²

1. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081

2. 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, 贵阳 550081

1. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy, Guiyang 550081, China

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy, Guiyang 550081, China

2015-06-09 收稿, 2015-10-08 改回.

Yu W, Li XY and Wang SJ. 2016. Laboratory thermal conductivity measurement of pyroxene powder under low temperature and atmospheric pressure conditions; Implication for the studies on lunar and Martian surface thermal environment. *Acta Petrologica Sinica*, 32(1):99–106

Abstract Laboratory studies on thermal conductivities of particulate minerals under vacuum condition can provide essential parameters when determining thermal properties and thermal evolution on lunar and planet surface, interpreting microwave and thermal infrared data and designing lunar explorer. Using modified thermal conductivity measuring instrument (HOT DISK TPS 2500S), pyroxenes powder samples are measured for their thermal conductivities under various vacuum degree and temperature conditions. By doing this, we evaluate the effects of vacuum degree and temperature on thermal conductivity of pyroxene powder. The experimental results show, 1) thermal conductivity of pyroxene powder decrease with lower vacuum degree. There is an apparent change of heat conduction mechanism when vacuum degree is around 1000Pa. Under low vacuum degree condition, thermal conductivity changes slowly with atmospheric pressure; 2) Thermal conductivity of pyroxene powder increase with temperature, but in different ways between low and normal atmospheric pressure conditions. With the experimental data, quantitative relationships of thermal conductivity of pyroxene powder and vacuum degree/temperature are given under low atmospheric pressure conditions. Our results imply that vacuum degree and temperature play different roles in thermal conductivity studies on lunar and Martian surface. Thus this study provide a reference for thermal conductivity determination of thermal conductivity in future work.

Key words Moon; Mars; Pyroxene powder; Thermal conductivity; Temperature; Vacuum degree

摘要 在真空条件下矿物粉末热导率的实验测量,可为我们研究月球及行星表面的热属性和热演化,解译热红外和微波探测数据,开展月球及行星探测载荷设计提供重要的数据参数。本研究主要采用改造后的 Hot Disk TPS 2500S 导热仪对辉石粉末的热导率进行测量。同时,分析了真空度、温度对辉石粉末热导率的影响。实验结果表明:1)热导率随着真空度的降低呈下降趋势,大气压力在 1000Pa 时,辉石粉末热传导机制发生明显改变。在低压条件下 (<1000Pa) 热导率随真空度的变化趋于平缓;2)辉石粉末热导率随温度的升高而增大,但是增大的幅度在低压和常压条件下存在明显差异。根据实验结果,提出了低压条件下辉石粉末热导率随真空度和温度变化的关系式。本研究表明,在月球和火星表面热环境的研究中,温度和压力对热导率的影响程度是不同的。上述结果对未来开展地外样品的热导率测量提供了重要的参考。

关键词 月球;火星;辉石粉末;热导率;温度;真空度

中图分类号 P691

* 本文受国家自然科学基金项目(41490630,41373067,41403057)和中国科学院青年创新促进会项目(2014359)联合资助。

第一作者简介:于雯,女,1986年生,博士,工程师,地球化学专业,E-mail: wen_yw@126.com

** 通讯作者:李雄耀,男,1978年生,博士,研究员,从事月球与行星科学研究,E-mail: lixiongyao@vip.skleg.cn

1 引言

随着深空探测的发展,对月球及行星表面热属性和热演化的研究逐渐引起人们的关注。月球及行星表面的热属性可以为研究其表面物质和热结构提供重要的线索。在多种热属性中,其中热导率是影响月球及行星热流和温度的重要因素(Horai, 1971)。以月球为例,月球表面的热导率可以指示月球表面的覆盖物主要是由粉末物质和相对少量的石块组成(Wesselink, 1948; Jaeger and Harper, 1950; Jaeger, 1953)。月球表面物质热导率的大小会对热流的研究结果产生重要的影响(Langseth *et al.*, 1972)。另外,月球表面物质的热导率是月球登陆器的热控设计和热红外及微波探测器的数据解译重要的输入参数。

在对月球及行星表面物质热导率的研究中,其表面矿物成分和结构的不同使得它的热导率也不同,因此对月球及行星表面各种矿物进行热导率的实验研究是非常必要的。研究表明,太阳系内外的许多星体,如月球、火星、金星、彗星和小行星,这些星体的表面由于不受大气层的保护,受到大量陨石的冲击使得其表面覆盖一层颗粒较小的风化层(Huetter *et al.*, 2008),而这些层风化物中均含有辉石粉末。比如, Hudson 和 Ostro 发现 Toutatis 小行星上有一层粉末状的颗粒物覆盖在它的表面,并通过光谱分析发现有辉石存在,同样通过光谱分析发现在月球,金星和火星的表面也存在有辉石粉末(Burns *et al.*, 1990; Bishop and Pieters, 1995; Hudson and Ostro, 1998; Reddy *et al.*, 2012)。因此,有必要对深空环境下辉石粉末热导率进行系统的实验测量。

目前针对辉石热导率的研究还很少,且主要集中在幔岩中辉岩的热导率、影响岩石热导率的因素、不同辉岩类型的热导率变化特征(高温、高压条件下)等关键问题上(欧新功等, 2004),缺少对辉石粉末样品的热导率研究以及行星表面极端环境(低温、低压条件下)辉石矿物热导率的研究。最早对粉末物质的研究是关于绝缘粉末(Fulk, 1959; Cline and Kropschot, 1963)。直到20世纪60年代到70年代,月球探测的兴起使得科学家们开始关注对行星表面颗粒物热导率的研究(Cremers, 1970, 1971; Wechsler *et al.*, 1972; Fountain and West, 1970)。相比之下,国内在这方面的研究十分匮乏,也缺少能够模拟月球及行星表面极端环境测量热导率的仪器。基于目前对辉石矿物粉末热导率的研究的不足,本研究利用 Hot Disk 导热仪并对其进行改造使得它能够模拟月球及行星表面的极端环境,完成对辉石粉末热导率的测量。同时,通过设计特殊的样品池,实现了少量粉末样品热导率的准确测量,因此特别适用于稀少珍贵的地外样品。最后根据测量结果讨论了辉石粉末的热导率随温度、压力因素的变化特征。

表1 本研究所用辉石单矿物粉末的主要化学元素的含量(wt%)

Table 1 The contents of main elements in pyroxene powder in this study (wt%)

元素	Fe	Ca	K	Si	Al	Mg	Na
辉石	7.889	17.982	0.000	50.737	0.442	10.609	0.146

2 实验样品和测试方法原理

本次研究样品选用甘肃小松山地区的辉岩,岩石通过碎样,并将辉石矿物挑出,使用辉石单矿物作为我们测试所需的样品。采用日本 XRF-1800 扫描型 X 射线荧光光谱仪测定其化学元素。取 2~4g 样品放入聚乙烯圆片中,在 37.5t 压力下制成内径约为 30mm,外径约为 40mm 的样片,进行上机测试。测试结果见表 1。

地外样品非常稀少且珍贵,而我国探月工程三期计划采集月球样品。为了实现对稀少样品热导率的准确测量,需要选取一种适用于样品量稀少,损耗小,粉末状的测量方法,而且要求测试过程快速,测试范围能覆盖多种材料、较宽温度和热参数区间。根据这样的测试需要,我们选用了瞬态平面热源技术(Transient Plane Source Method, TPS)。该方法也被称为“Gustafsson”探头法或 Hot Disk 法(陈昭栋, 2004)。它所使用的探头是由导电金属镍经刻蚀处理后形成的连续双螺旋结构的薄片,外层为附有一层保护层,它令探头具有一定的机械强度,同时保持探头与样品之间的电绝缘性。探头既是温度传感器又作为加热源,通常被放在两片样品中间进行测试。在测试过程中,电流通过镍丝时会产生热量,热量会同时向探头两侧样品进行扩散。热量在材料中扩散的速率依赖于材料的热扩散系数和导热系数等热特性。通过记录温度与探头的响应时间,材料的这些特性可以被计算出来。

TPS 方法的原理是建立在样品中三维热流的基础上,如果在热波到达样品边界前,瞬态加热(通电)时间结束,则此样品可认为是一个无穷的媒质。使用恒定电流脉冲使得温度稍微上升时,实验记录下 TPS 元件上的电压变化,瞬态通电期间 TPS 元件阻值随时间变化的表达式为:

$$R(t) = R_0 [1 + \alpha \Delta T(t)] \quad (1a)$$

在加热元件中, $\Delta T(t)$ 也就是元件上温度随时间变化的函数,它取决于 TPS 元件中的输出功率、传感器的设计参数以及样品周围热传输特性。如圆盘形传感器表面温升 $\Delta T(t)$ 的表达式为:

$$\Delta T(\tau) = P_0 (\pi^{3/2} r \lambda)^{-1} \cdot D(\tau) \quad (1b)$$

其中,

$$D(\tau) = [m(m+1)]^{-2} \int_0^\tau \frac{d\sigma}{\sigma^2} \left[\sum_{l=1}^m l \sum_{k=1}^m k \exp \left(\frac{-(l^2 + k^2)}{4m^2 \sigma^2} \right) I_0 \left(\frac{lk}{2m^2 \sigma^2} \right) \right] \quad (1c)$$

式中: P_0 , r , λ 电源总输出功率, 传感器的半径, 样品的热导率。

I_0 瞬时记录的起始电流值。

$D(\tau)$ 是圆盘形传感器取决于温度变化的时间函数, 为方便起见, 传感器温度变化是以无量纲定义的。而 $\tau = \frac{\sqrt{kt}}{r}$

或者 $\tau = \sqrt{\frac{t}{\theta}}$, t 是瞬态开始计时的时间, $\theta = \frac{a^2}{k}$ 是特征时间;

k 是样品的热扩散率, a 是环形热源组最外侧热环的半径。由电路测出 R 随时间变化的 $R(t)$ 代入至公式 1(a, b, c) 中, 求得热导率 λ 的表达式为(何小瓦和黄丽萍, 2006; 王强等, 2009):

$$\lambda = \frac{P_0 D(\tau)}{\Delta T(\tau) \pi^{3/2} a} \quad (1d)$$

3 仪器改造和性能分析

基于瞬变平面热源法, 我们选用瑞典凯戈纳斯公司研发的 Hot Disk TPS2500S 导热仪进行测量实验。它可以用于地球岩石、矿物、土壤在常温常压下的热导率测量, 用于岩石矿物的热液蚀变和成矿过程等研究。然而, Hot Disk 导热仪目前尚不能进行少量粉末样品在低温低压环境下的热导率测量, 这限制了对真空环境中的地外天体表层热传导过程的正确解释。因此我们对 Hot Disk TPS2500S 导热仪进行了改造, 使得实验过程能模拟地外空间的温度和压力变化, 为进一步获得真实可靠的地外样品热导率数据提供实验基础。

3.1 仪器改造

为了模拟地外天体表面的特殊环境, 我们将 Hot Disk TPS2500S 导热仪与 LGJ-10D 普通型真空冷冻干燥机进行结合并加入控制压力的部件, 实现在变温变压条件下的热导率测量。改造后的仪器是将 Hot Disk 探头插入到装有样品的特制样品池中, 并将探头及样品池一同放入真空冷冻干燥机内, 利用专用连接线将导热仪和冷冻干燥机内的探头连接, 如图 1 为仪器改造后的结构示意图。由于 LGJ-10D 普通型冷冻干燥机无法控制压力的变化, 我们在冷冻干燥机和机械泵中间的连接管道上安装了微调阀部件以控制压力的大小, 通过冷冻干燥机自带的温度控制器和后增加的微调阀, 按照所需温度和压力来改变冷冻干燥机的环境, 待温度和压力稳定后, 对样品进行热导率测量。另外, 为了减少测试过程中样品的损失和节约测量时间, 我们利用不锈钢材料设计了相应的样品池。仪器改造前后的技术指标见表 2。

3.2 性能分析

未改造前的 Hot Disk TPS 2500S 导热仪虽然能够测量粉末样品, 但在测试过程中, 样品处于常温常压中, 空气流动和湿度对测试结果造成一定的影响。而改造后的导热仪, 粉末

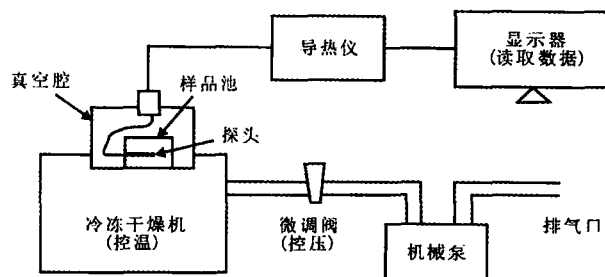


图 1 Hot Disk 导热仪改造后结构示意图

Fig. 1 The structure diagram of Hot Disk after modification

表 2 Hot Disk TPS2500s 导热仪改造前后技术指标对比

Table 2 Comparison of analytical parameters between before and after the improvement of TPS2500s

指标名称	原指标	改进指标
温度范围	室温	233K ~ 313K
压力范围	1atm	1Pa ~ 1atm
测定范围	0.005 ~ 500W/(m·K)	0.005 ~ 500W/(m·K)
测量精度*	±3%	-
实际测量精度	±4.5%	±1.8%

注: * 此测量精度为仪器公司给出的测量精度

表 3 标准不锈钢块(SIS4319)的热导率的测量值(W/(m·K))

Table 3 The thermal conductivity of standard stainless steel block (SIS4319) (W/(m·K))

探头	改造前平均值	改造后平均值	标准值
5501	13.46	13.468	13.31
5465	13.28	13.244	13.31
7577	13.03	13.042	13.31

注: 标准由 Hot Disk 仪器公司标定

样品是处在真空环境中, 使得测量结果受外界环境因素影响很小。我们分别对改造前后的导热仪进行了一系列的性能分析, 评价仪器的稳定性和数据的可靠性。

3.2.1 仪器改造前后可靠性分析

仪器改造前后, 为了验证导热仪所测量数据的可靠性, 我们选用黔源矿业的青石板石材送至贵州省建材质检院, 利用平板热导仪, 根据国家标准方法 GB/T 10294—2008 测量热导率, 检测结果为 2.742W/(m·K)。我们利用改造前后的导热仪对该石材进行测定, 获得的结果分别是 2.733W/(m·K) 和 2.731W/(m·K), 误差为 0.4%, 在仪器误差范围之内, 可认定改造前后的导热仪所测量数据是可靠的。另外, 我们还选用标准不锈钢块 (SIS4319), 分别选用 5501、5465 和 7577 三种探头各进行五次重复测量, 测试结果见表 3。

由数据结果可知, 测试值和标准值相当接近, 且在误差范围允许之内(仪器误差为 3%, 重复性误差 ±1% ~ 2%), 说明仪器测量的准确性较高。

表4 仪器改造前辉石粉末($<100\mu\text{m}$)热导率测量结果($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

Table 4 Thermal conductivities of pyroxene powder ($<100\mu\text{m}$) before instrument modification ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

次数	测量日期 2014. 3. 26	测量日期 2014. 3. 28
	(雷雨)	(多云)
1	0.2043	0.1853
2	0.2009	0.1874
3	0.2011	0.1866
4	0.2051	0.1841
5	0.2019	0.1842
平均值	0.2026	0.1855
标准偏差	0.0087	
相对误差	4.5%	

注:根据仪器公司给出的测试精度($\pm 3\%$),测试结果保留4位有效数据位数

3.2.2 仪器改造前后误差分析

由上3.2.1分析看出,仪器改造前后,块状样品的热导率受测试环境影响较小。然而,测试环境的改变会对粉末样品的热导率产生重要的影响。因此,我们分别利用改造前后的导热仪对辉石粉末($<100\mu\text{m}$)进行热导率的测量,分析不同天气下湿度对热导率测量结果的影响。测量结果表明(表4),在仪器改造前,3月26日为雷雨天气,其湿度较大,测量结果大于3月28日多云天气环境下的测量结果。由于湿度差异的影响,不同时间的测量结果和数据稳定性都相对较差,两次测量的标准偏差为 $0.012092\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,两次测量的相对误差为4.5%。出现这么大的误差的原因主要是,在孔隙率一定时粉末样品的热导率随含水量的增大而增大。当粉末样品中混入水汽后,颗粒表面会形成一层水膜,促进颗粒间的热传导,从而对热导率造成一定的影响(Salomone *et al.*, 1990; 肖琳等, 2008)。

经过改造之后的导热仪在进行样品测量时,样品不暴露于大气中,而是在一个接近真空条件的冷冻干燥机内,利用微调阀和冷冻干燥机自带的温度调节器来控制样品所处环境的温度和压力。我们利用改造后的仪器对相同的辉石样品进行了热导率测量。选择不同天气时对辉石粉末进行测量,冷冻干燥机内气压为10Pa,温度为 25°C ,测量结果见表5。三次测量的标准偏差为 $0.00017\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,三次测量的最大相对误差为1.8%。由此可见,仪器经过改造之后,样品中的水分和空气在抽真空的过程中被带走,样品的测试环境可以得到有效的控制,使得数据结果不再受测试环境变化的影响。对比表4和表5中的数据,仪器改造后对粉末样品测量的相对误差和标准偏差都较改造前小,仪器的测量性能得到了显著提高。

4 测量结果及讨论

我们利用改造后的仪器对所选样品进行测量,排除了湿

表5 仪器改造后辉石粉末($<100\mu\text{m}$)测量结果($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

Table 5 Thermal conductivities of pyroxene powder ($<100\mu\text{m}$) after instrument modification ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

次数	压力:10Pa;温度:298K		
	测量日期 2014. 4. 18 (多云)	测量日期 2014. 4. 23 (阵雨)	测量日期 2014. 6. 22 (阴)
1	0.01165	0.01143	0.01145
2	0.01179	0.01167	0.01168
3	0.01206	-	-
4	0.01207	-	-
5	0.01166	-	-
平均值	0.01185	0.01155	0.01156
标准偏差	0.000214		
相对误差	1.8%		

注:根据仪器公司给出的测试精度($\pm 3\%$),测试结果保留4位有效数据位数

表6 辉石粉末在不同大气压力和温度条件下的热导率($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

Table 6 Thermal conductivities of pyroxene powder under various atmospheric pressure and temperature conditions ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

P-T	233K	253K	273K	288K	298K
10Pa	0.009285	0.009577	0.009765	0.01013	0.01101
50Pa	0.01081	0.01109	0.01069	0.01207	0.01251
200Pa	0.01361	0.01369	0.01404	0.01428	0.01522
500Pa	0.01763	0.01765	0.01821	0.01825	0.01903
$1 \times 10^3\text{Pa}$	0.02342	0.02483	0.02521	0.02688	0.03102
$5 \times 10^3\text{Pa}$	0.05021	0.05501	0.05812	0.05871	0.06401
$10 \times 10^3\text{Pa}$	0.09048	0.09734	0.09804	0.1141	0.1204
$20 \times 10^3\text{Pa}$	0.09926	0.1163	0.1214	0.1309	0.1412
$50 \times 10^3\text{Pa}$	0.1476	0.1767	0.1996	0.2094	0.2202
$80 \times 10^3\text{Pa}$	0.1896	0.2069	0.2304	0.2341	0.2358
$101 \times 10^3\text{Pa}$	0.1993	0.2268	0.2334	0.2371	0.2512

度等外界因素对热导率的影响。为了确保热导率测试结果的稳定性,每个条件下的样品测量均进行5次重复测试,求取平均值作为测试结果,测试时间间隔30min。最后,分析了辉石粉末随温度和压力的变化特征。

4.1 测试结果

根据不同的Apollo登月点所采集的月壤样品,发现月壤的分选性较差,中值粒径约为 $40 \sim 130\mu\text{m}$,平均粒径在 $70\mu\text{m}$ 左右(Carrier, 1973)。而火星壤的粒径主要在 $200\mu\text{m}$ 以下,其中火星表面吹积物的粒径小于 $50\mu\text{m}$ (Christensen and Moore, 1992; Golombek *et al.*, 2008)。因此,综合考虑,我们选择粒径小于 $100\mu\text{m}$ 的辉石粉末在不同温度和真空度条件下进行热导率测量,分析热导率随温度和大气压力的变化,数据结果见表6。

4.2 辉石粉末热导率影响因素分析

4.2.1 真空度对辉石粉末热导率的影响

粉末矿物的热传导主要由三种热传输机理组成: 空气传导(λ_g), 固态传导(λ_s) 和辐射传导(λ_r) (Presley and Christensen, 1997a), 可用公式表达为:

$$\lambda = \lambda_g + \lambda_s + \lambda_r \quad (2)$$

三种热传导过程均与温度有关, 其中空气传导的大小除受温度的影响以外还与大气压力(或所处环境真空度)有关。当所处环境为真空环境时, 有:

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_r \quad (3)$$

目前我们仪器真空腔的真空度能达到 1Pa, 而稳定测试的真空度为 10Pa。为了推演在地外行星表面极低真空条件下的热导率, 我们首先必须分析空气传导受大气压力(或者真空度)影响的变化特征。

我们选取了 11 种大气压条件, 分别为 10Pa、50Pa、200Pa、500Pa、 1×10^3 Pa、 5×10^3 Pa、 10×10^3 Pa、 20×10^3 Pa、 50×10^3 Pa、 80×10^3 Pa、 101×10^3 Pa, 待真空度稳定后进行测量, 测试结果如图 2。

总体来看, 热导率测量值随真空度的降低而减小。在真空度大于 1000Pa 时, 热导率随气压的下降快速降低。而压力小于 1000Pa 左右时热导率随压力的变化趋于平缓。Watson 通过实验测量发现当测试样品在接近真空的状态时, 空气传导部分对热传导的贡献可以忽略(Watson, 1964)。Presley and Christensen (1997b) 在 5torr (约为 600Pa) 大气压

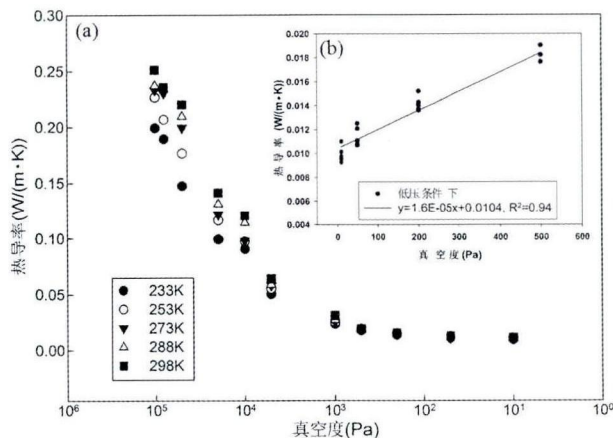


图 2 辉石粉末热导率随真空度的变化(a)和低压条件下(1000Pa 以下)辉石粉末热导率与真空度的关系(b)

图 2b 中实线是该条件下辉石粉末热导率与大气压力的线性拟合线

Fig.2 Plot of thermal conductivity versus vacuum degree for pyroxene powder (a) and the relationship of thermal conductivity of pyroxene powder and vacuum degree under low pressure condition (<1000Pa) (b)

The solid line is the linear regression line of those data in Fig.2b

条件下对玻璃珠进行测量分析, 同样得出在该条件下空气对热导率的影响可忽略不计。因此我们可以推测, 当真空度大于 1000Pa 时, 在热传导的三个机制中空气传导起主要作用; 但当真空度小于 1000Pa 时, 空气传导对热传导的影响几乎可以忽略不计。根据实验数据, 我们给出了在低压条件下(1000Pa 以下), 温度范围为 233 ~ 298K 时, 辉石粉末热导率随真空度变化的定量关系(图 2b):

$$\lambda = 1.6E-05(\pm 9E-07) \times P + 0.0104(\pm 0.0003), \quad R^2 = 0.94, P < 0.0001, n = 20 \quad (4)$$

式中, P 为所处环境的大气压力(或真空度)。根据该公式, 我们可以估算出火星表面环境(133 ~ 920Pa)和月球表面环境(小于 1Pa)下的辉石粉末的热导率的近似值(Presley and Craddock, 2006)。我们并没有拟合真空度在 1000Pa 以上热导率随压力变化的关系式, 主要原因是, 在该压力范围, 温度对热导率的影响较大, 不同温度条件下拟合得到的关系式不同。

总之, 我们的实验结果表明, 辉石粉末的热传导在真空度为 1000Pa 左右发生明显的机理改变, 空气传导的贡献在低压下不再明显。这些结果为以后测量地外样品设定测量环境提供了一个重要的依据, 也为估计地外天体表面环境下(火星和月球)辉石粉末热导率大小提供了实验参考。

4.2.2 温度对辉石粉末热导率的影响

为了研究温度对辉石粉末热导率的影响, 我们分别设定五个温度条件(233K、253K、273K、288K、298K), 待温度稳定后对样品进行测量。

由上一小节的结果可知, 当周围环境逐渐趋于真空条件时, 空气传导对热传导的贡献逐渐变小, 而固体传导和辐射传导则开始体现出来。辉石粉末在低压条件下随温度的变化结果如图 3 所示。总体来说, 在几种压力条件下, 样品的热导率都随着温度的升高而增大, 但两者的关系并不是线性

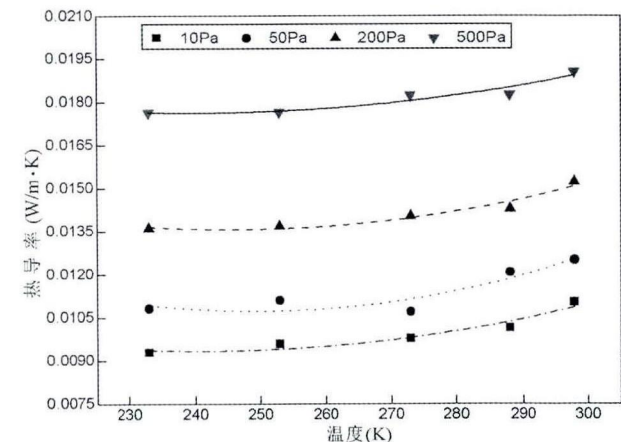


图 3 低压条件下(<1000Pa)辉石粉末热导率与温度的关系图

Fig.3 Plot of thermal conductivity versus temperature for pyroxene powder under low pressure condition (<1000Pa)

表7 低压条件下辉石粉末热导率与温度的函数关系的系数值
Table 7 The coefficients of equation (5) under various pressure conditions

真空度	A	B	C
10Pa	6.02E-10	-1.05E-04	0.026
50Pa	9.79E-10	-1.83E-04	0.041
200Pa	6.92E-10	-1.25E-04	0.034
500Pa	4.78E-10	-8.20E-04	0.031

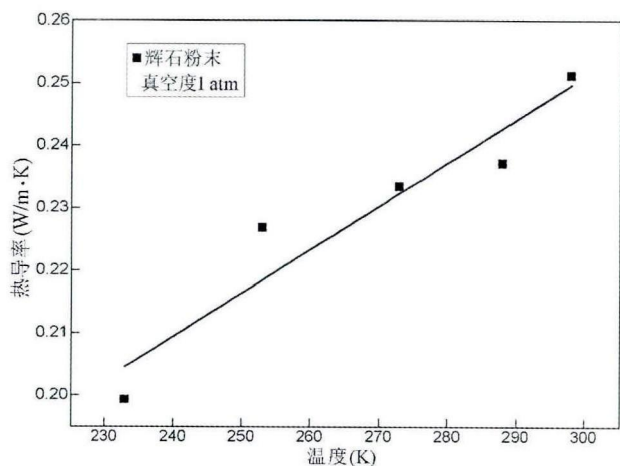


图4 真空度为1atm时辉石粉末热导率与温度间的拟合曲线图

Fig. 4 Plot of thermal conductivity versus temperature for pyroxene powder under 1atm

相关。具体表现为:在 233 ~ 270K 范围内,热导率随着温度缓慢上升,当温度接近 300K 时,热导率出现快速上升。这一现象可能说明在温度接近 300K 时热传导机制中的辐射传导开始产生显著影响。

根据 Wechsler *et al.* (1972) 的实验结果,在真空下,硅酸盐矿物的固体传导和辐射传导随温度的变化基本遵循 3 次多项式的关系 (Wechsler *et al.*, 1972):

$$\lambda = AT^3 + BT + C \quad (5)$$

而本实验的结果也表明,当压力一定时,辉石粉末热导率随温度变化的趋势可以用上述关系定量表示(图 3)。因此,我们根据公式(5),对实验数据进行拟合,得到在温度范围为 233 ~ 298K 时,系数 A、B 和 C 的值如表 7 所示。

同样,我们也分析了在常压下(1atm),辉石粉末热导率随温度的变化特征,结果如图 4 所示。对实验数据进行拟合,发现两者更符合线性的关系(公式 6)。由于此压力条件下,热传导主要体现的是空气传导,因此,这可能说明空气传导与温度主要呈线性相关:

$$\lambda = 6.9E-04 \times T + 0.043, R^2 = 0.91, P = 0.01, n = 5 \quad (6)$$

4.2.3 对月球和火星表面热环境研究的指示

月球表面温度变化范围为 90 ~ 400K,大气压在 1Pa 以下

(Heiken *et al.*, 1991)。由于仪器的限制,我们未能测试在此温压范围内辉石热导率的变化特征。然而,可以根据公式(4)和公式(5)来讨论本实验结果对月表热环境研究的指示意义。由公式(5)可知,在月表环境下,由真空度变化造成的辉石粉末热导率的变化小于 $1.6 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,而在该压力条件下,辉石粉末的热导率在 $0.01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右,因此,真空度的影响可以忽略。虽然我们没有给出在极低和高温下热导率随温度变化的数据,但是对于月壤的次表层(深度在月表 20cm 以下,其温度的变化不大,变幅很少达到 10K 以上),它的温度大约为 255K (Vasavada *et al.*, 1999, 2012),在我们实验的温度范围内。我们知道,在月表热流和次表层温度的研究中,月壤次表层矿物热导率是影响热流大小和次表层温度变化的重要参数。此外,在解译嫦娥探月卫星的微波数据时,对月壤中矿物(包括辉石)热导率的准确估计直接决定了亮温反演的准确性。然而,随着深度的增加,月壤的密度也会增大。研究表明,矿物粉末的热导率会随密度的变化而改变,但是变化趋势与矿物结构和真空度有关 (Presley and Christensen, 2010)。对于辉石粉末来说,其密度对热导率的影响还需要接下来的研究来揭示。

而在火星表面,由于有大气层的存在,其温度变化范围较月表小,为 130 ~ 308K (David and Conway, 2006),大气压力的范围为 133 ~ 920Pa,平均在 700Pa 左右 (Presley and Craddock, 2006)。由公式(4)可得,该大气压力的变化范围可能造成辉石粉末热导率变化达 $0.01277 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,因此,火星表面不同地区真空度的变化对辉石粉末热导率的改变不能忽略。我们分别选取真空度为 200Pa 和 1000Pa 时样品热导率与温度的数据来讨论火星表面低压和高压地区的情况。由表 6 可知,当大气压力为 200Pa,温度范围为 233 ~ 298K 时,辉石粉末样品热导率的变化范围为 $0.01361 \sim 0.01522 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,平均为 $0.01417 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。同样的温度范围,当大气压力为 1000Pa 时,样品热导率的变化范围为 $0.02342 \sim 0.03102 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,平均为 $0.02627 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。通过计算发现,由温度改变造成的热导率变化最高为 30% 左右(气压为 1000Pa 时),远远小于压力改变造成的影响(85%)。因此,我们认为,与月表环境不同,火星表面热环境研究必须考虑大气压力改变对矿物热导率的影响,并且压力可能比温度的影响更为显著。

5 结论

根据地外样品的测试需求,我们对 Hot Disk TPS2500S 导热仪进行了改造,并基于瞬态平面热源法,实现了对变温变压条件下粉末样品热导率的准确测量。对同一样品在不同外界环境的条件下进行重复测量发现,改造后的导热仪较改造之前,粉末样品热导率的测量误差大大降低。在此基础上,我们模拟地外天体的真空度和温度环境的变化,获得了辉石粉末在不同真空度、不同温度条件下的热导率值,并讨

论了本实验结果对月球和火星热环境研究的指示意义, 具体结论如下:

(1) 辉石粉末的热导率在真空度大于 1000Pa 时随真空度的降低显著减小, 此时空气传导在热传导中起主导作用; 在真空度小于 1000Pa 时热导率随真空度的变化趋于平缓, 说明这时空气传导的贡献可以基本忽略。我们进一步给出了低真空度条件下辉石粉末热导率与真空度的定量关系式, 根据该公式, 可以估算出火星表面环境(133 ~ 920Pa) 和月球表面环境(小于 1Pa) 下的辉石粉末热导率的近似值。

(2) 温度对辉石粉末热导率的影响在低真空度和常压条件下存在明显的差异, 具体为: 在低真空度的环境下, 温度对辉石粉末热导率的影响主要是影响固体传导和辐射传导过程, 在 233 ~ 298K 的温度范围内, 热导率随温度升高缓慢增大; 而在常压条件下, 温度对辉石粉末热导率的影响主要是影响空气传导过程, 而后者随温度的升高明显增大。

(3) 本研究的实验结果对于月球和火星表面热环境的研究有一定指示意义。在月表环境下, 大气压力的变化对月壤粉末热导率的影响可以忽略, 而温度的影响占主导, 另外, 本实验结果可为研究月球热流及月球次表层温度提供数据参考; 在火星表面环境下, 不同地区大气压力的改变可能比温度变化对火星壤热导率的影响更为显著。

References

- Bishop JL and Pieters CM. 1995. Low-temperature and low atmospheric pressure infrared reflectance spectroscopy of Mars soil analog materials. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 100 (E3): 5369 - 5379
- Burns RG, Besancon JR and Pratt SF. 1990. Reflectance spectra of Fe^{2+} - Mg^{2+} disordered pyroxenes: Implications to remote-sensed spectra of planetary surfaces. In: NASA, Washington. Reports of Planetary Geology and Geophysics Program, 253 - 255 (SEE N92-10728 01-91)
- Carrier WD. 1973. Lunar soil grain size distribution. *The Moon*, 6(3): 250 - 263
- Chen ZD. 2004. Investigation of transient measurement thermal physics properties by plain thermal source method. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 33(5): 551 - 554 (in Chinese with English abstract)
- Christensen PR and Moore HJ. 1992. *The Martian Surface Layer Mars. Arizona: The University of Arizona Press*, 686 - 729
- Cline D and Kropfchot RH. 1963. The thermal properties of powder insulators in the temperature range 300° - 4° K. In: Blau H and Fischer H (eds.). *Radiative Transfer from Solid Materials*. New York: Macmillan, 61 - 81
- Cremers CJ. 1970. Thermal conductivity of lunar fines from Apollo 11. In: *Proceedings of the 5th Symposium on Thermophysical Properties*. New York: ASME, 391 - 395
- Cremers CJ. 1971. A thermal conductivity cell for small powdered samples. *Rev. Sci. Instrum.*, 42(11): 1694 - 1696
- David CC and Conway L. 2006. Chapter15: Mars atmosphere: History and surface interactions. In: McFadden LA, Weissman PR and Johnson TV (eds.). *Encyclopedia of the Solar System*. 2nd Edition. New York: Academic Press, 301 - 314
- Fountain JA and West EA. 1970. Thermal conductivity of particulate basalt as a function of density in simulated lunar and Martian environments. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 75(20): 4063 - 4069
- Fulk MM. 1959. Evacuated powder insulation for low temperatures. *Progr. Cryog.*, 1: 65 - 84
- Golombek M, Haldemann A and Simpson R. 2008. Martian surface properties from joint analysis of orbital, Earth-based, and surface observations. In: Bell J (ed.). *The Martian Surface: Composition, Mineralogy, and Physical Properties*. Cambridge: Cambridge University Press, 384 - 468
- He XW and Huang LP. 2006. Verification of the measurement accuracy and application range for Thermophysical Properties of Transient-Transieut Plane Source (TPS) method using standard material pyroceram 9606 at room temperature. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 26(4): 33 - 51 (in Chinese with English abstract)
- Heiken GH, Vaniman DT and French BM. 1991. *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*. London: Cambridge University Press
- Horai K. 1971. Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 76(5): 1278 - 1308
- Hudson RS and Ostro SJ. 1998. Photometric properties of Asteroid 4179 Toutatis from lightcurves and a radar-derived physical model. *Icarus*, 135(2): 451 - 457
- Huetter ES, Koemle NI, Kargl G and Kaufmann E. 2008. Determination of the effective thermal conductivity of granular materials under varying pressure conditions. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113(E12), doi: 10.1029/2008JE003085
- Jaeger JC and Harper AFA. 1950. Nature of the surface of the moon. *Nature*, 166(4233): 1026
- Jaeger JC. 1953. The surface temperature of the moon. *Austr. J. Phys.*, 6(1): 10 - 21
- Langseth MG Jr, Clark SP Jr, Chute JL Jr, Keihm SJ and Wechsler AE. 1972. The Apollo 15 lunar heat-flow measurement. *The Moon*, 4(3-4): 390 - 410
- Ou XG, Jin ZM, Wang L, Xu HJ and Jin SY. 2004. Thermal conductivity and its anisotropy of rocks from the depth of 100 ~ 2000m mainhole of Chinese Continental Scientific Drilling: Revelations to the study on thermal structure of subduction zone. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 109 - 118 (in Chinese with English abstract)
- Presley MA and Christensen PR. 1997a. Thermal conductivity measurements of particulate materials; 1. A review. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 102(E3): 6535 - 6549
- Presley MA and Christensen PR. 1997b. Thermal conductivity measurements of particulate materials; 2. Results. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 102(E3): 6551 - 6566
- Presley MA and Craddock RA. 2006. Thermal conductivity measurements of particulate materials; 3. Natural samples and mixtures of particle sizes. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 111(E9), doi: 10.1029/2006JE002706
- Presley MA and Christensen PR. 2010. Thermal conductivity measurements of particulate materials; 4. Effect of bulk density for granular particles. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 115(E7), doi: 10.1029/2009JE003482
- Reddy V, Sanchez JA, Gaffey MJ, Abell PA, Le Corre L and Hardersen PS. 2012. Composition of near-Earth Asteroid (4179) Toutatis. *Icarus*, 221(2): 1177 - 1179
- Salomone LA, Kovacs WD and Kusuda T. 1990. Thermal performance of fine-grained soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(3): 359 - 374
- Vasavada AR, Paige DA and Wood SE. 1999. Near-surface temperatures on mercury and the moon and the stability of polar ice deposits. *Icarus*, 141(2): 179 - 193
- Vasavada AR, Bandfield JL, Greenhagen BT, Hayne PO, Siegler MA,

- Williams JP and Paige DA. 2012. Lunar equatorial surface temperatures and regolith properties from the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 117(E12), doi: 10.1029/2011JE003987
- Wang Q, Dai JM and He XW. 2009. Influence factors analysis of thermal conductivity measurement with Hot Disk technique. *Journal of Tianjin University*, 42(11): 970 - 974 (in Chinese with English abstract)
- Watson K. 1964. I. The thermal conductivity measurements of selected silicate powders in vacuum from 150° ~ 350°K. II. An interpretation of the moon's eclipse and lunation cooling as observed through the Earth's atmosphere from 8 - 14 microns. Ph. D. Dissertation. Pasadena: California Institute of Technology
- Wechsler AE, Glaser PE and Fountain JA. 1972. Thermal properties of granulated materials. In: *Thermal Characteristics of the Moon*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 28: 215 - 241
- Wesselink AJ. 1948. Heat conductivity and the nature of the lunar surface material. *Bull. Astron. Inst. Neth.*, 10: 351 - 363
- Xiao L, Li XZ, Zhao XB, Yu J, Hu ZH and Ji CL. 2008. Laboratory on influences of moisture content and porosity on thermal conductivity of soils. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 9(3):

241 - 247 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈昭栋. 2004. 平面热源法瞬态测量材料热物性的研究. *电子科技大学学报*, 33(5): 551 - 554
- 何小瓦, 黄丽萍. 2006. 瞬态平面热源法热物理性能测量准确度和适用范围的标定——常温下标准 Rycerem 9606 材料热物理性能测量. *宇航计测技术*, 26(4): 33 - 51
- 欧新功, 金振民, 王璐, 徐海军, 金淑燕. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100 ~ 2000m 岩石热导率及其各向异性: 对研究俯冲带热结构的启示. *岩石学报*, 20(1): 109 - 118
- 王强, 戴景民, 何小瓦. 2009. 基于 Hot Disk 方法测量热导率的影响因素. *天津大学学报*, 42(11): 970 - 974
- 肖琳, 李晓昭, 赵晓豹, 俞缙, 胡增辉, 纪成亮. 2008. 含水量与孔隙率对土体热导率影响的室内实验. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 9(3): 241 - 247