



基于嫦娥四号任务的月球背面浅层月壤温度原位测量

孙泽洲, 张有为*, 陈向东, 雷英俊, 张焱, 吴学英, 李新立, 李飞, 赫荣伟

中国空间技术研究院, 北京 100094

* E-mail: zyw158@139.com

收稿日期: 2021-09-27; 接受日期: 2021-11-26; 网络版发表日期: 2022-02-23

摘要 嫦娥四号着陆器完成了国际首次月球背面南极-艾特肯盆地内的浅层月壤温度的全周期测量, 本文介绍了嫦娥四号着陆器浅层月壤温度测量的原理和具体实现方式. 嫦娥四号着陆器在转移机构末端布置了能够埋入浅层月壤的测温点, 以及在器表布置了与月球表面有良好视角的测温点, 同时实现了接触式测量和非接触式测量两种测量方式. 本文还给出了在轨三个月球日的测量结果, 并对测量得到的月夜阶段月壤低温数据与NASA给出的基于Apollo 17数据的推算结果进行了比较分析. 该测量结果丰富了月球表面浅层月壤温度的实测数据, 对月球热特性模型的反演和进一步的月壤和月球内部热特性研究提供了重要基础.

关键词 月球背面, 月壤, 温度测量

1 引言

月面环境研究是人类探索月球的重要目标之一. 月面地形地貌、物质组成、力热特性对于月球演化研究与月球资源勘探以及开展人类月面活动都有非常重要的意义^[1,2]. 国际上已完成的月表热环境测量多为遥感探测方式, 通过地基或绕月航天器搭载的遥感设备, 远距离获得来自月球表面的辐射信息, 然后在一定假定参数条件下建立数学模型, 反演得到月表亮温等信息. 而由于在月球表面布置直接测量装置的难度非常大, 目前国际上已获取的月面温度直接测量数据非常少, 最有代表性、也是各类文献中使用最多的即美国Apollo 15和Apollo 17获取的月面温度数据, 大量以亮

温分析为基础的研究工作都是以Apollo 15/17的月面温度数据作为校核模型的基础.

Apollo 15/17和Surveyor 1的着陆点位于月球正面, 目前国际上对于月球背面的直接测量数据还是空白. 中国发射的嫦娥四号探测器于2019年1月3日实现了人类首次着陆月球背面. 嫦娥四号着陆器上安装了月壤温度采集系统, 完成了国际首次月球背面浅层月壤温度的直接测量. 本文对嫦娥四号着陆器的测量系统、测量数据以及初步分析结果进行阐述.

2 月表温度直接测量回顾

美国的Apollo 15/17和Surveyor 1采用不同方式进

引用格式: 孙泽洲, 张有为, 陈向东, 等. 基于嫦娥四号任务的月球背面浅层月壤温度原位测量. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1447-1455
Sun Z Z, Zhang Y W, Chen X D, et al. *In situ* temperature measurement of shallow lunar soil on the far side of the Moon based on Chang'e-4 Mission (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2022, 52: 1447-1455, doi: [10.1360/SST-2021-0451](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0451)

行了月表温度的直接测量: Apollo 15/17采用的是接触式测量,即在月球表面直接布置测温点,获取测温点位置的温度数据; Surveyor 1采用的是非接触式测量,即通过在探测器表面布置测温点,再通过公式反算得到探测器周围局部月表温度的宏观值。

2.1 Apollo 15/17

Apollo 15/17试验装置的设计目的是测量浅层月壤内部的热流^[3,4]。试验装置称为月面试验包(Apollo Lunar Surface Experiments Package, ALSEP)。在登陆舱着陆月球后,ALSEP由宇航员在月面展开。Apollo 15的数据采集持续了3.5年, Apollo 17持续了2年。

ALSEP装置包括两根探针,两根探针在月面上相互之间的距离为10 m左右,电缆与钻杆连接处的热电偶暴露在月壤之外,热电偶并没有直接接触月壤,而是处于距离月球表面一定距离的悬空位置上, Apollo 15为6 cm, Apollo 17为15 cm。热电偶的测量范围为70~400 K,测量精度0.5 K。NASA公布的月壤温度数据是由此热电偶的测量结果进行分析校正后给出的。

Apollo 15测得月昼最高温度为358 K,月夜阶段最低为温度为76 K; Apollo 17测得月昼最高温度为374 K,月夜阶段最低温度为87 K^[3]。NASA根据Apollo 17的电缆与钻杆连接处热电偶的温度对月球表面月壤的温度进行了推算,得到的结果为月球表面月壤温度为月昼最高384 K、月夜最低102 K^[5]。

2.2 Surveyor 1

Surveyor 1采用的是非接触式测量,即在仪器设备舱表面布置测温点,测温点的温度是外热流情况(太阳辐射、月面辐射等)、测温点表面状态(太阳吸收比、发射率)、测温点与舱体之间的热耦合关系共同作用的结果,然后通过反演设计剥离其他因素的影响,获得探测器周围月面环境温度的宏观值^[6]。Surveyor 1在器上共布有75个热敏电阻器温度测点,布置在设备和关键热表面,传感器的系统级测量精度为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

3 嫦娥四号着陆器月壤温度测量系统

在综合比较了各种测量方法后,嫦娥四号着陆器结合自身构型和任务特点,确定了同时采用接触式测量和非接触式测量的方式。接触式测量方式是在转移

机构末端布置4组测温点,通过转移机构的运动,使测温点接触月壤表面;非接触式测量方式是在器表布置2组测温点。

3.1 接触式测量方式

接触式测量的温度采集装置布置在转移机构末端。转移机构是嫦娥四号着陆器着陆月面后,把月面巡视器转移释放到月球表面的一套机构装置,如图1所示。

利用转移机构布置测温点的优点如下。

(1) 有效避免与着陆器本体的热耦合。温度传感器布置在转移机构末端,转移机构末端距离着陆器本体约3.1 m,转移机构为铝合金薄壁结构,热耦合很小。因此温度传感器所处位置的月壤温度受着陆器干扰较小。

(2) 确保与月壤充分接触。嫦娥四号着陆器着陆月面后,根据着陆器着陆的姿态、着陆器周围地形地貌情况,调整转移机构的转动角度,可以确保温度传感器能够直接接触月壤。

温度传感器粘贴在聚酰亚胺材料制作的支架上,由于聚酰亚胺热传导系数很小,能够实现温度传感器与转移机构末端之间的热隔离。支撑座的主截面为“T”形,温度传感器分布在“T”形纵肋的两侧靠下位置。支架粘贴在转移机构悬梯末端,如图2和3所示。这样,转移机构向月面运动时,聚酰亚胺支架首先接触月壤。温度传感器采用了热敏电阻器。根据已有研究资料,浅层月壤温度在一个月球日期间波动幅度可达 300°C 以上,因此每处测温点采用了高温型和低温型两种热敏电阻器配对使用,高温型热敏电阻器的测温范围为 $-50^{\circ}\text{C}\sim+250^{\circ}\text{C}$,低温型热敏电阻器的测温范围为 $-196^{\circ}\text{C}\sim-50^{\circ}\text{C}$,一支高温型热敏电阻器和一支低温型热敏电阻器搭配使用。遥测数据中包括高温型和低温型热敏电阻器两组数据,对于高温型热敏电阻器只保留高于 -50°C 的遥测数据,同样对于低温型热敏电阻器只保留低于 -50°C 的遥测数据,这样就能够覆盖 $-196^{\circ}\text{C}\sim+250^{\circ}\text{C}$ 范围的测量结果。

测温传感器有效接触月壤的标准是月壤应能够将测温传感器完全覆盖。影响测温传感器有效接触月面的因素有:着陆器的着陆姿态、着陆器高度(由着陆姿态和着陆器缓冲机构决定)、转移机构展开角度、转移机构末端与月面接触的局部特性。

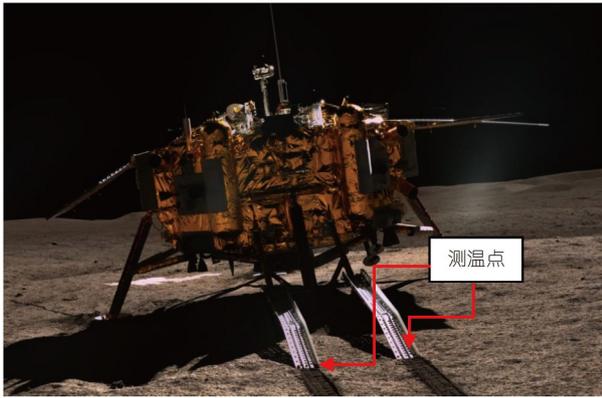


图1 接触式测温点位置
Figure 1 Location of contact temperature measuring point.



图2 温度传感器和支架
Figure 2 Temperature sensor and bracket.

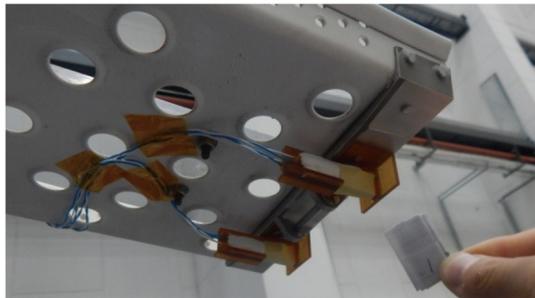


图3 温度测量部件安装在转移机构悬梯末端
Figure 3 Temperature measuring component is installed at the front end of the transfer mechanism ladder.

根据地面试验验证结果, 分析得出了判断测温传感器是否有效与月壤接触的判据, 并根据在轨遥测结果从两个角度确认了传感器与月壤的接触状态:

(1) 根据着陆器顶面法线方向与月面法线夹角为 1° 、着陆缓冲机构主支柱压缩量40~60 mm、转移机

构展开角度应达到 120° 等遥测数据来推算, 理论上测温传感器应当接触到了月面;

(2) 从嫦娥四号巡视器拍摄的照片来看, 转移机构末端接触到了月面, 并且有少量月壤从转移机构末端的圆孔溢出, 如图4所示, 图中左侧悬梯自下往上第一排圆孔溢出的月壤量较多、第二排圆孔被月壤充满但溢出量不多, 第三排圆孔看不到明显的月壤溢出迹象; 右侧悬梯自下往上第一排圆孔被月壤充满并少量溢出, 第二排无法明确判断出是否被月壤充填。

测温传感器位于第一排圆孔之前(靠近悬梯末端边缘)。根据着陆器的着陆姿态可推算出转移机构与月面之间的夹角为 13° , 如图5所示, 再根据转移机构悬梯末端圆孔的位置尺寸可计算得到左侧悬梯测温点插入月壤的深度在11.7~14 mm之间, 右侧悬梯为9.5~11.7 mm之间。

3.2 非接触式测量

非接触式测量的温度采集装置布置在嫦娥四号着陆器面向赤道的舱板和着陆缓冲装置上, 如图6和7所示。

选择这两处位置布置测温点的优点在于:

(1) 着陆器着陆在月球南半球, 面向赤道的舱板和



图4 转移机构末端月壤溢出照片
Figure 4 Photos of lunar soil overflow at the front end of the transfer mechanism ladder.

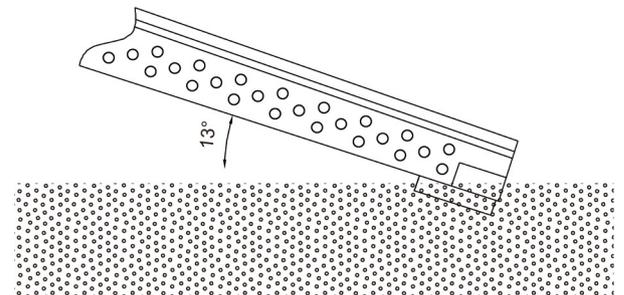


图5 转移机构末端接触月壤示意图
Figure 5 Relation between the front end of the transfer mechanism ladder and lunar soil.

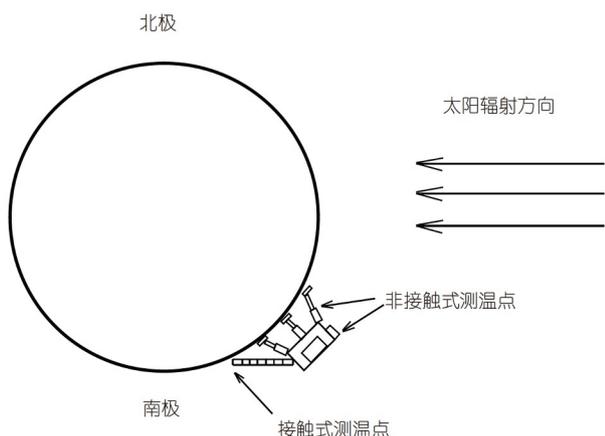


图6 非测温点位置与太阳辐射方向的关系
Figure 6 Relation between location of non-temperature measuring point and solar radiation direction.

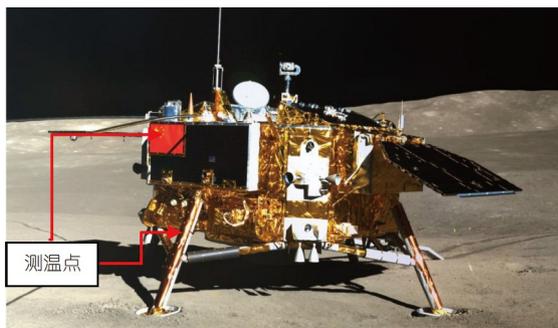


图7 非接触式测温点位置
Figure 7 Location of non-contact temperature measuring point.

着陆装置周围的月壤不会出现着陆器遮挡形成的阴影, 月表温度场不会出现大幅温差, 能够减小反演计算的难度;

(2) 面向赤道的舱板和着陆装置周围没有明显突出器表的设备, 测温点位于整器外形包络的最外边缘, 采集数据时受到其他设备的影响较小.

温度传感器安装时, 先在舱板、着陆装置上包覆多层隔热组件, 然后把温度传感器粘贴在多层隔热组件外表面. 依靠多层隔热组件在真空条件下的隔热性能, 温度传感器与着陆器本身进行热隔离.

采用多层隔热组件进行热隔离后, 仍然会有微量的热流从着陆器透过多层隔热组件影响温度传感器, 在月昼阶段太阳辐射、月表辐射的热流较大, 微量热量的影响可以忽略, 这样的热隔离在月昼阶段非常有效; 而在月夜阶段无太阳辐射, 月表辐射也非常微弱,

这时由多层隔热组件透过的微量热量会对温度传感器产生显著的影响, 使测温结果出现比较大的偏差. 因此非接触式测温只对月昼阶段的数据进行数据分析, 月夜阶段的测量结果只作为辅助判断手段.

3.3 数据采集处理系统

温度采集模块是把来自温度传感器的模拟输入信号转换为数字量后再换算成温度值, 其内部主要包括一个稳定的基准电压和一个作为分压用的基准电阻, 温度传感器的分压与基准电压相比较后转换为数字量.

供电模块使用了太阳电池阵和同位素温差电池两种供电电源, 使用控制电路进行切换. 在月昼阶段有太阳光照的情况下, 使用太阳电池阵能够提供的电能供电. 月夜阶段长达十几个地球日, 采用了同位素温差电池(radioisotope thermoelectric generator, RTG)供电.

3.4 测量误差

数据采集处理系统的精度、着陆器上设备温度变化以及深低温环境下热敏电阻器探头自身发热都会对月壤温度测量结果带来一定影响, 下面分别分析.

(1) 为检验数据采集处理系统的测量精度, 我们通过地面试验进行了标定. 试验时, 温度测量系统采用电性能曲线与真实RTG产品高度一致的仿真RTG进行供电, 并采用液氮环境与加热装置相配合模拟了被测量对象的温度以及测温系统的工作环境. 试验结果表明, 在77.2~400.0 K范围内, 温度测量系统的误差优于0.3 K.

(2) 热敏电阻器导线两端采集电路的电压为4 V, 使热敏电阻器探头产生微量热量, 在高温环境中这部分热量的影响可以忽略, 但在深低温环境中这部分热量会加热被测量对象, 需要分析其影响. 深低温环境中低温型热敏电阻器的电阻值约为30 kΩ, 探头产生的热量为 5.3×10^{-4} W, 使测量数据比被测对象实际温度高约0.16 K.

(3) 月昼工作阶段, 着陆器上设备开关机状态变化时, 设备温度会发生变化, 影响月昼阶段的测量结果. 根据接触式测温点和非接触式测温点与着陆器设备之间的安装位置关系, 可计算出接触式测温点与着陆器设备之间的热阻约为5000 K/W、非接触式测温点约为3500 K/W, 因此着陆器设备温度变化对接触式和非

接触式测量结果带来的影响 ≤ 0.01 K.

另外, 高温型、低温型热敏电阻器的时间常数均 ≤ 10 s, 而月壤温度除了在月昼开始和月昼结束的较短时间会出现剧烈变化外, 其他时段的温度变化较为平缓可不考虑热敏电阻器响应速度的因素.

4 测量结果及分析

4.1 测量结果

嫦娥四号着陆器月壤温度测量系统, 在着陆后并完成了巡视器释放后, 即开始进入工作状态. 在每次进入月夜阶段前, 把月昼期间采集并存储的数据发送回地球, 然后设置为月夜温度采集器利用RTG供电, 月夜温度采集系统自主定时测量并存储温度数据; 进入月昼自主唤醒后, 通过地面指令, 把月夜期间采集和存储的数据发送回地球. 表1统计了2019年2月至2019年4月期间进出月夜的时间(当地太阳高度角降低到 0° 为进入月夜、当地太阳高度角由 0° 逐渐升高为出月夜).

(1) 月昼测量结果

2019年2月月昼期间接触式测温点、非接触式测温点的温度曲线如图8所示. 图中接触式测温点采集到的最高温度为300 K. 这是由于着陆器遮挡太阳辐射形成局部阴影区导致测量得到的温度偏低, 验证了之前的判断.

图8中, 接触式测温点和非接触式测温点所采集到数据曲线出现了短时下降后又快速恢复以及局部下凹的现象. 通过查询曲线上这处位置对应时间嫦娥四号着陆器的指令记录, 在此期间并未进行设备开关机、机构运转等操作; 另外, 连续三个月昼的数据在每个月昼相同的时间点重复出现相同的现象, 也可排除月壤土质松动等偶发性事件的原因. 通过对比太阳入射方向与测温点位置以及着陆器上产品包络尺寸, 可找到出现这些现象的原因均是由于太阳光线被着陆器上的产品遮挡引起的, 如接触式测温点在月昼正午的温

度短时下降是由于地形地貌相机转动机构遮挡造成的; 非接触式测温点在月昼下午及休眠前的温度短时下降是由于一根细长的天线遮挡了太阳光线, 在月昼开始时温度短时下降以及之后的局部下凹也是由于太阳光线被测温点附近的两根天线遮挡造成的.

(2) 月夜测量结果

嫦娥四号着陆器在每个月昼唤醒后, 下传前一个月夜采集的月壤温度数据. 图9为2019年2月至2019年4月接触式测温点和非接触式测温点的温度曲线, 三次月夜采集的数据非常一致, 在进入月夜和出月夜两段时间温度变化剧烈、月夜期间温度变化非常缓慢.

4.2 月昼阶段测量结果分析

嫦娥四号着陆器着陆在月球南半球, 在月昼阶段尤其是靠近月昼正午前后, 着陆器南侧的月面区域会由于太阳辐射被着陆器本体遮挡形成局部阴影区, 阴影区内温度相比外围月壤温度会大幅下降. 而转移机构安装在嫦娥四号面向南极的面, 如图6所示, 在月昼阶段转移机构末端测温点区域容易受到局部阴影区的影响, 测量得到的月壤浅层温度偏低. 本文仅对非接触式测量结果进行分析.

从图8可以看到, 舱板、着陆装置上的非接触式测温点月昼期间最高温度分别为 368 ± 0.3 和 374 ± 0.3 K (0.3 K为测量精度). 从曲线上可以看到, 曲线中两次测温干扰分别出现在月昼下午和休眠前, 均不影响最高温度值结果.

通过非接触式测温点数据反演月壤表面亮温需要知道测温点与月壤表面之间的几何关系. 根据着陆器着陆的姿态实测结果, 舱板和着陆装置上两组测点所在平面与月表法线之间的夹角分别为 $3^\circ 0'$ 和 $48^\circ 0'$. 采用Thermal Desktop软件, 按照舱板和着陆装置以及测温点所在表面与月壤和周围环境的几何关系建立月面热分析模型, 其中着陆器周围的月壤简化为直径100 m的平面. 月壤表面的太阳吸收比取0.93、发射率取0.87^[7-9], 舱板和着陆装置以及测温点表面辐射特性的

表1 2019年2月至2019年4月进出月夜时间

Table 1 Time of entering and leaving the lunar night from February 2019 to April 2019

时间节点	2019年2月月夜	2019年3月月夜	2019年4月月夜
进月夜时间(当地太阳高度角降低到 0°)	2月12日20:53	3月14日11:53	4月13日01:23
出月夜时间(当地太阳高度角由 0° 逐渐升高)	2月27日13:03	3月29日01:33	4月27日14:13

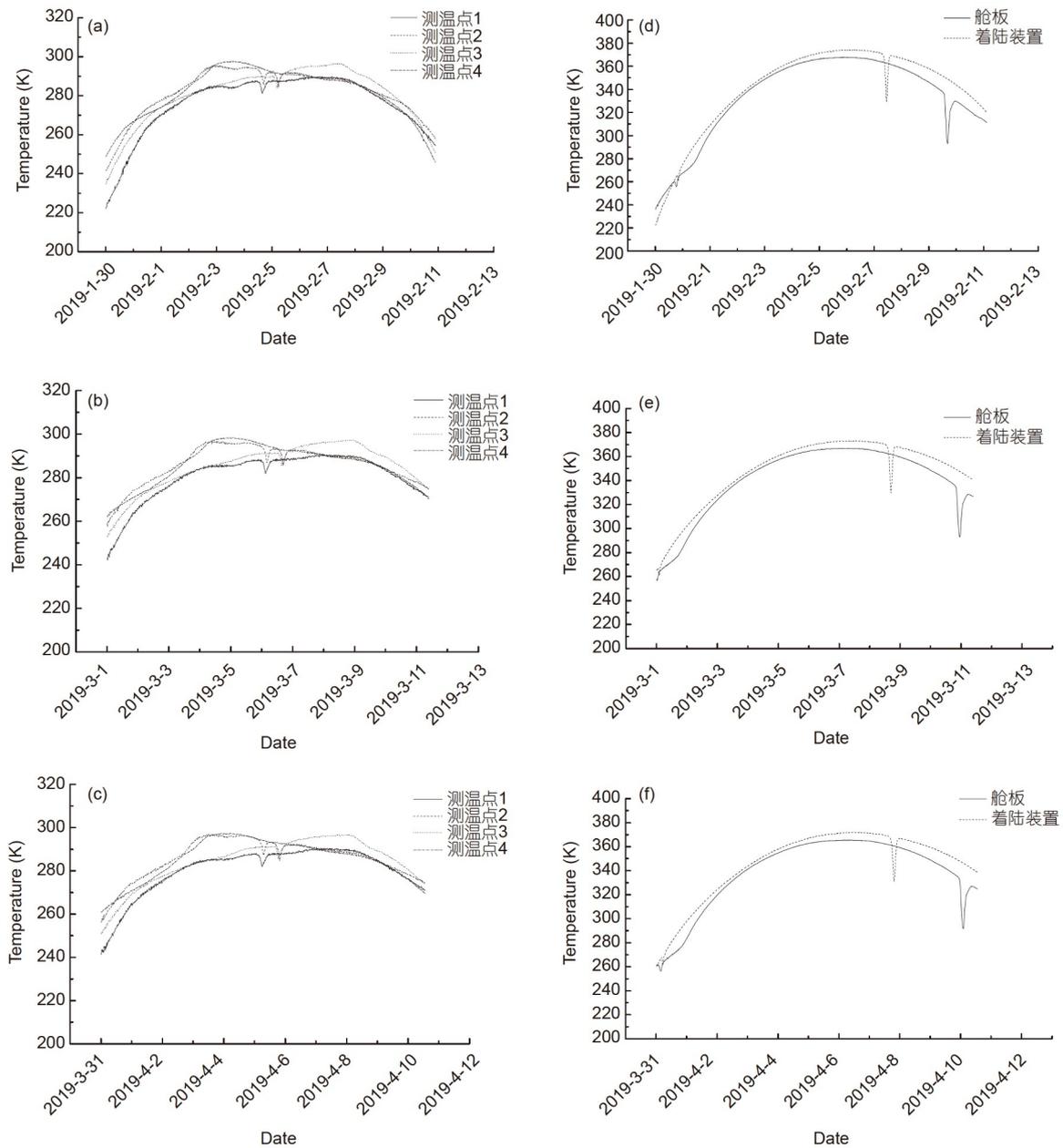


图 8 月昼接触式测温曲线((a)~(c))和非接触式测温曲线((d)~(f)). (a), (d) 2019年2月; (b), (e) 2019年3月; (c), (f) 2019年4月
 Figure 8 Contact temperature measurement curve ((a)~(c)) and non-contact temperature measurement curve ((d)~(f)) on lunar day. (a), (d) February 2019; (b), (e) March 2019; (c), (f) April 2019.

太阳吸收比为0.36、发射率为0.69, 反演得到着陆器月昼期间浅层月壤亮温最大值为 365 ± 0.3 K.

4.3 月夜阶段测量结果分析

从图9可以看到, 进入月夜后月壤温度快速下降, 在太阳高度角刚达到 0° 时浅层月壤温度降为220 K, 此

后1 h内浅层月壤的降温速率达到了30 K/h, 如图10所示; 接下来, 月壤温度不断下降的同时降温速率在不断减小, 在12 h后浅层月壤降低到了120 K, 降温速率减小到1 K/h, 进入了温度缓慢下降的过程, 一直下降到出月夜前, 出月夜前浅层月壤最低温度达到了 78 ± 0.3 K (0.3 K为测量精度). 从趋势上看, 月壤温度

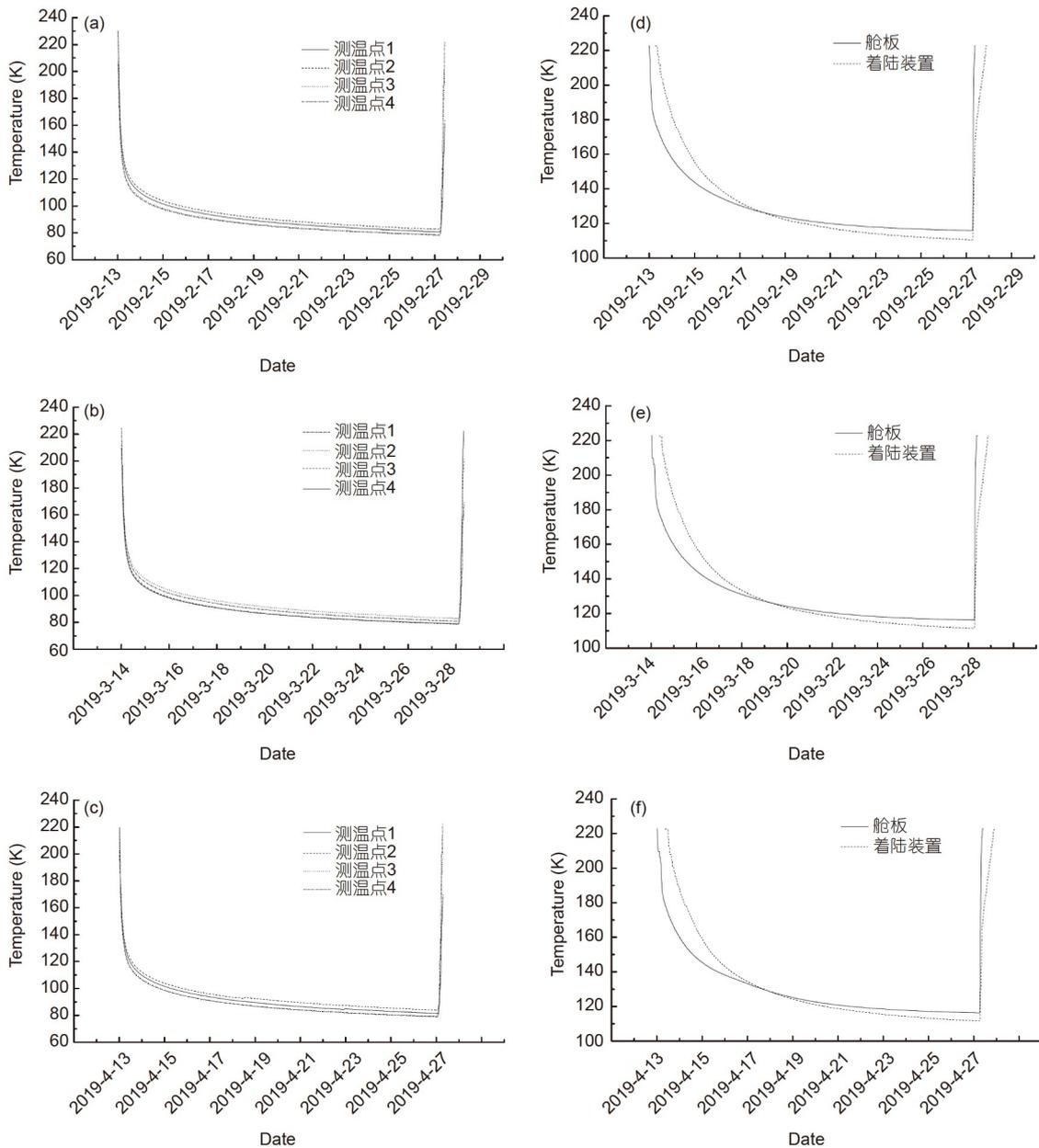


图 9 月夜接触式测温曲线((a)~(c))和非接触式测温曲线((d)~(f)). (a), (d) 2019年2月; (b), (e) 2019年3月; (c), (f) 2019年4月
Figure 9 Contact temperature measurement curve ((a)~(c)) and non-contact temperature measurement curve ((d)~(f)) on lunar night. (a), (d) February 2019; (b), (e) March 2019; (c), (f) April 2019.

没有达到平衡, 仍然在以非常缓慢的速度继续下降, 出月夜前浅层月壤在以每天0.6 K的速率在下降.

嫦娥四号着陆器是国际上首次对浅层月壤温度进行直接测量, 78 K是嫦娥四号着陆器着陆点位置浅层月壤月夜最低温度的实测值. Apollo 15着陆点为北纬26°7', Apollo 17着陆点为南纬17°53', 嫦娥四号着陆器

着陆点为南纬45°46', 按纬度从低到高的顺序依次为: Apollo 17、Apollo15、嫦娥四号着陆器. 从Apollo 15/17、嫦娥四号的测量结果来看, 月夜最低温度水平随纬度的降低而升高, 与NASA基于Apollo 17数据的推算结果做比较, 纬度从45°降低到17°, 月夜阶段月壤浅层最低温度升高了24 K.

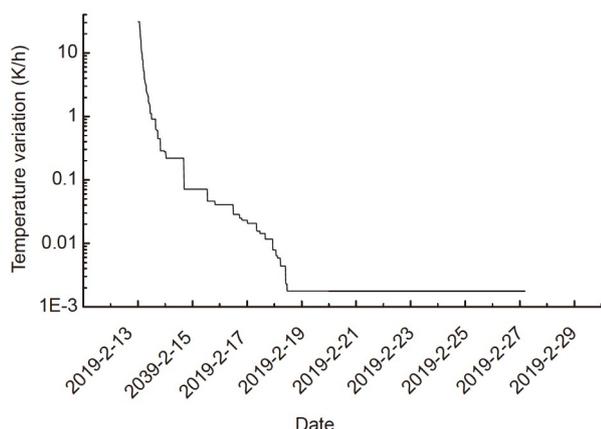


图 10 月夜阶段月壤温度下降速度
Figure 10 Temperature drop rate of lunar soil at lunar night stage.

5 结论

嫦娥四号着陆器完成了国际首次月球背面浅层月壤温度的测量. 在轨遥测结果表明, 这套温度测量装置工作正常, 成功传回了月壤温度数据, 文中给出了典型的测量结果.

本文介绍了嫦娥四号着陆器浅层月壤温度测量的原理和具体实现方式, 给出了在轨三个月球日的测量结果并进行了初步分析. 并对测量得到的月夜阶段月壤低温数据与NASA给出的基于Apollo 17数据的推算结果进行了比较分析. 该测量结果丰富了月球表面浅层月壤温度的实测数据, 对月球热特性模型的反演和进一步的月壤和月球内部热特性研究提供了重要基础.

参考文献

- 1 Heiken G H, Vaniman D T, French B M. Lunar Sourcebook, A User's Guide to the Moon. Cambridge: Cambridge University Press, 1991
- 2 Preter E. The Lunar Base Handbook. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc, 1999. 140–141
- 3 Apollo Lunar Surface Experiments Package. Technical Report. NASA, NASA-CR-128636
- 4 Marcus G L, Stephen J K. *In-situ* measurements of lunar heat flow. In: Cosmochemistry of the Moon and Planets, NASA, 1977. 283–293
- 5 Bauch K E, Hiesinger H, Helbert J, et al. Estimation of lunar surface temperatures and thermophysical properties: Test of a thermal model in preparation of the MERTIS experiment onboard BepiColombo. *Planet Space Sci*, 2014, 101: 27–36
- 6 Jaffe L D, Shoemaker E M, Dwornik S E, et al. Surveyor I Mission Report Part II. Scientific Data and Results. NASA Technical Report No. 32-1023, 1966
- 7 Jaumann R, Hiesinger H, Anand M, et al. Geology, geochemistry, and geophysics of the Moon: Status of current understanding. *Planet Space Sci*, 2012, 74: 15–41
- 8 Kenneth P, Marcus G L. Long Term Temperature Observations On The Lunar Surface at Apollo 15 and 17. 1975
- 9 Ouyang Z Y. Overview of the Moon (in Chinese). Beijing: Astronautics Press, 2005 [欧阳自远. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 2005]

***In situ* temperature measurement of shallow lunar soil on the far side of the Moon based on Chang'e-4 Mission**

SUN ZeZhou, ZHANG YouWei, CHEN XiangDong, LEI YingJun, ZHANG He, WU XueYing, LI XinLi, LI Fei & HE RongWei

China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

The Chang'e-4 lander has completed the first full cycle measurement of lunar soil temperature in the South Pole-Aitken basin on the far side of the Moon. This paper introduces the theory and implementation of measuring the temperature of lunar soil in the shallow layer of the Chang'e-4 lander, as well as the results of three lunar days in orbit and preliminary analysis. The Chang'e-4 lander is outfitted with temperature measuring points that can be buried in the shallow lunar soil at the end of the transfer mechanism. The Chang'e-4 lander surface also has temperature measuring points with a good view of the lunar surface. Furthermore, a comparison was made between the measured low temperature data of lunar soil during the lunar night phase and the calculated results based on NASA's Apollo 17 data. The measured results enrich the measured data about shallow lunar soil temperature on the surface of the Moon and provide an important basis for the inversion of the lunar thermal characteristics model and future study of lunar soil and lunar interior thermal characteristics.

far side of the Moon, lunar soil, temperature measurement

doi: [10.1360/SST-2021-0451](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0451)