



中国 探月工程

CLEP

China's Lunar Exploration Project

主编 欧阳自远 执行主编 邱小林 张传军

浙江出版联合集团 浙江科学技术出版社



中国 探月工程

China's Lunar Exploration Project

主编 欧阳自远 执行主编 邱小林 张传军

 浙江出版联合集团 浙江科学技术出版社

书 名 中国探月工程
主 编 欧阳自远
执行主编 邱小林 张传军

出版发行 浙江科学技术出版社

杭州市体育场路 347 号 邮政编码: 310006

办公室电话: 0571-85176593

销售部电话: 0571-85176040

网址: www.zkpress.com

E-mail: zkpress@zkpress.com

排 版 杭州大漠照排印刷有限公司
印 刷 浙江新华数码印务有限公司

开 本 889×1194 1/16 印 张 25

字 数 748 000

版 次 2014 年 10 月第 1 版 2014 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5341-6279-4 定 价 120.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现倒装、缺页等印装质量问题,本社销售部负责调换)

责任编辑 莫亚元

责任校对 张 宁

封面设计 孙 菁

责任印务 崔文红

编委会

主 任	曾金龙					
副 主 任	申行运	徐勇凌	王孝忠	姜 凝		
特约编委	尚庆国	王宗年	余士刚	徐 超	姜 澜	王建中
	施加栋	康建材	田国忠	张祥荣	张建利	邹党如
编 委	(按姓氏笔画排名)					
	丁良喜	于天奇	万 锦	万家全	习建平	王 力
	王 丹	王 玥	王 尚	王 思	王 艳	王云扬
	王玉宝	王永顺	王良妹	历 宁	历运脉	车万颖
	方 峰	石德照	白书华	权伍哲	师海峰	吕传贤
	刘 莎	刘 蒙	刘文举	刘丛梦	刘金亮	刘建华
	刘贵增	刘爱让	刘雪光	次 强	次建功	关 剑
	江 宇	许 影	孙正凯	孙晓军	苏贝贝	李 东
	李 明	李 晶	李文宪	李玉忠	李东丰	李创业
	李萍芳	李颖涵	杨 琳	杨志勇	杨欣荣	杨海东
	杨海凌	肖 非	吴道新	吴禄兵	邱 孜	邱晓健
	何柏青	应振华	辛 文	辛文华	宋 纯	张 宁
	张 宏	张 海	张 辉	张世隆	张朱丽	张传永
	张金华	张树亮	张娇娇	张晓龙	张新辉	陈 洪
	陈亚森	邵芳芳	邵晓虎	武宝亮	欧阳红军	罗 克
	金丽达	金明明	周亦人	郑丽萍	郑建东	郑勇军
	赵 波	赵志红	赵松虎	赵金秋	赵战勇	荣 帅
	胡平国	钟铜铜	段友祥	段继贤	姜 涛	宫志利
	费光生	姚连明	贺 竹	秦天杰	袁智勇	聂平俊
	贾 杰	徐 震	高 铭	高平发	高艳蓉	郭宗帅
	郭鸿霖	郭鹏飞	陶 磊	常建宝	董晓飞	韩 青
	程保荣	焦安超	童 雨	谢 猛	解保新	穆海霞
	戴慰然	藏金玉	魏冬青	魏明明	魏香镜	

主 编 欧阳自远

执行主编 邱小林 张传军

编 著 者 欧阳自远 邱小林 张传军 王玉宝 白书华
沈自才 姜 萌

前 言

实施月球探测是继发射人造地球卫星和突破载人航天之后,中国航天活动的第3个里程碑。中国的探月工程分为“绕”、“落”、“回”3个阶段。第一期绕月工程是发射探月卫星“嫦娥一号”和“嫦娥二号”,对月球表面环境、地貌、地形、地质构造与物理场进行了探测。第二期工程目标是研制和发射航天器,以软着陆的方式降落在月球上进行探测。嫦娥三号落月成功,用安全降落在月面上的巡视车、自动机器人探测着陆区岩石与矿物成分,测定着陆点的热流和周围环境,进行高分辨率摄影和月岩的现场探测或采样分析,为以后建立月球基地的选址提供月面的化学与物理参数。第三期工程目标是月面巡视勘察与采样返回。其中前期主要是研制和发射新型软着陆月球巡视车,对着陆区进行巡视勘察。后期,研制和发射小型采样返回舱、月表钻岩机、月表采样器、机器人操作臂等,采集关键性样品返回地球,对着陆区进行考察,为下一步载人登月探测、建立月球前哨站的选址提供数据资料。此段工程的结束将使我国航天技术迈上一个新的台阶。

目前,中国探月工程进入到核心的第三期工程,需要多学科高技术集成运用,同时也需要对已有的探月技术实现路径以及探月工程中涉及的各类技术的集中阐述、总结和分析。而目前在这方面具有专业性、系统性和高学术价值的书籍几乎没有,有的也只是普及探月知识的科普类图书。因此,我们结合自己的工作实际撰写了本书。本书主要包括:月球概述、月壤物理力学性质研究、月球表面环境测量技术、对探月仪器

设备的影响、月球探测的关键技术、环月飞行器的定弧与运行、月食对环月飞行器运行的影响、月球软着陆技术、巡视探测器、探测的再入与返回技术、探测通信与跟踪技术、月球探测器技术、月球基地的关键技术、载人登月技术途径等。

本书突出实用性、先进性和可操作性的特点,理论叙述从简,侧重于用实例和实用数据说明问题,由浅入深、循序渐进,且图文并茂。本书的出版将对我国月球及深空探测的发展、航天人才的培养及工程技术创新起到一定的推动作用。

由于作者水平有限,文中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

2014年8月

目 录

第 1 章 月球表面环境概述	1
1.1 月球表面环境概述	1
1.2 月球环境影响效应	24
第 2 章 月壤的物理力学性质	28
2.1 月壤的颗粒组成	29
2.2 月壤的容重、颗粒相对密度、孔隙比和孔隙率	34
2.3 月壤的压缩性、抗剪性	37
2.4 月壤的电磁性质	38
2.5 月壤中的气体	41
第 3 章 月尘及其对探月仪器设备的影响	43
3.1 月尘概述	43
3.2 月尘对探月仪器设备的影响	45
3.3 月球粉尘环境污染监测、清除技术	47
第 4 章 月球表面环境测量和模拟试验技术	55
4.1 月球表面环境热测量技术	55
4.2 月球表面力学环境模拟技术	62
4.3 热平衡试验	72
第 5 章 光谱仪探测技术及月样保存装置	78
5.1 光谱仪探测技术	78
5.2 月样的保存装置	85
第 6 章 环月飞行器的轨道设计	93
6.1 深空探测轨道设计方法	93
6.2 环月飞行器的短弧定轨	98
6.3 月食对环月飞行器运行的影响	105
6.4 月球软着陆重力转弯下降轨迹初步设计	112
第 7 章 月球软着陆技术	119
7.1 软着陆探测缓冲方法	119
7.2 软着陆机构的分类	134
7.3 月球软着陆的自主导航与控制技术	140
第 8 章 巡视探测器	147
8.1 概述	147
8.2 巡视探测器分类及组成	149

8.3 各种典型的巡视探测器	150
8.4 巡视探测器子系统综述	160
第 9 章 深空探测再入与返回	179
9.1 国外深空探测再入与返回技术	179
9.2 国内再入与返回技术	189
9.3 总结与分析	197
第 10 章 月球探测空间电源技术	201
10.1 月球探测空间电源系统的组成	201
10.2 月球探测核电推进系统	213
第 11 章 深空探测通信技术	226
11.1 深空通信特点	226
11.2 深空测控通信中的主要技术	233
11.3 差错控制编码技术	237
11.4 激光通信技术	248
11.5 再生伪码测距技术	255
第 12 章 月球探测器技术	266
12.1 系统总体设计	266
12.2 基本结构	270
12.3 运动分系统	273
12.4 电源分系统	280
12.5 热控分系统	286
12.6 制导、导航和控制	292
12.7 指令、通信、控制与遥测	302
12.8 图像分系统	310
第 13 章 载人登月的技术路径	319
13.1 概述	319
13.2 美国载人登月的技术路径	321
13.3 我国载人登月的技术途径	334
第 14 章 月球基地的关键技术	345
14.1 概述	345
14.2 月球基地相关技术	347
14.3 小结	384
主要参考文献	386

第 1 章

月球表面环境概述

1.1 月球表面环境概述

1.1.1 月球的地貌

月球表面总体上可分为月海和高地两大地理单元。月球表面主要由高地、月海和环形坑组成。人类在地球上用肉眼所看到的月球表面的暗黑色斑块,称为月海。月海是月球表面上宽广的平原,约占月球表面面积的 17%。绝大多数月海分布在月球正面即向着地球的一面,约占整个正面半球表面积的一半。北半球的月海分布更为显著,只有东海、莫斯科海和智海位于月球背面。大多数月海具有圆形封闭的特点,大多为山脉(细长伸延的山地)所包围,类似于地球上的盆地。

高地是指月球表面高出月海的地区。高地一般高出月球水准面约 2~3 km,面积约占月球表面面积的 83%。月球表面分布的主要月海如图 1-1 所示。

大大小小的石块和撞击坑分布在月海和高地这两大地理单元上,从而形成了月球表面的复杂地形。撞击坑是指布满月球表面的大大小小、密密麻麻的圆形凹坑构造,包括撞击坑环形山、辐射线以及与撞击坑有关的隆起构造。据统计,月球表面的撞击坑总数在 33 000 个以上,尤以月球高地更为密集。月球上主要的撞击坑统计见表 1-1。大多数撞击坑被环形山包围,高度一般在 300~7 000m。撞击坑底部一般都很平坦,但深度的差别则较大,从几十米到几千米。撞击坑密度最大的地区位于月面中南部,自该地区向北、西、东方向撞击坑密度逐渐变小。月球表面环形坑直径与数量分布的规律如图 1-2 所示。由图中可看出,月球表面环形坑的分布量和坑的直径近似成反比。撞击坑的直径分布范围很宽,小的只有几十厘米或更小,直径大于 1km 的撞击坑的总面积约占整个月球表面积的 7%~10%。环形坑的典型轮廓如图 1-3 所示,一般坑的深度不大于坑直径的 25%,边缘高度不大于直径的 6%,因此环形坑基本上是比较平缓的。

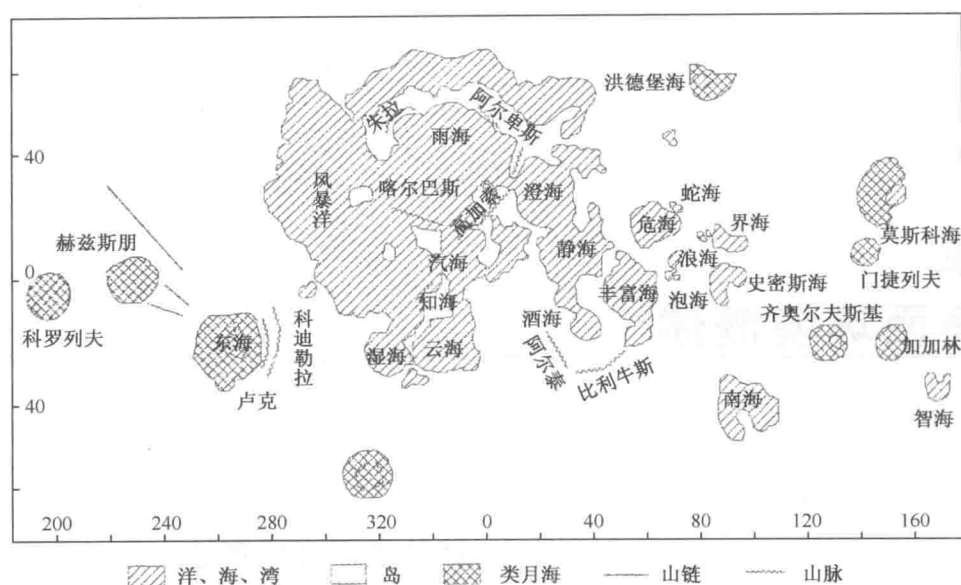


图 1-1 月球表面分布的主要月海

表 1-1 月球上主要的撞击坑统计

撞击坑名称	撞击坑直径/km	辐射线长度/m	撞击坑名称	撞击坑直径/km	辐射线长度/m
阿格里帕	45.6	272	拉兰德	24.3	320
阿尔弗拉格纳斯	20.5	344	兰斯伯格	9.0	43
亚诺萨戈腊斯	51.0	960	郎格林诺斯	131.5	1 520
阿波洛厄斯	48.0	69	利特罗	3.2	25
阿里新塔克	39.5	432	卢比尼耶茨基	16.0	69
阿里斯基尔	56.2	640	梅德勒	28.6	272
奥托利克	39.0	430	马尼利厄斯	38.4	320
博德	18.1	136	马尼勃罗	80.0	51
伯朱新	16.5	156	麦涅劳斯	26.9	432
坎潘努斯	10.9	51	默塞尼厄斯	15.2	78
森索里厄斯	6.7	61	A·默斯廷	13.1	51
克劳默德	13.6	84	C·默斯廷	3.2	18
哥白尼	90.7	1 200	奥尔贝斯	66.9	800
克鲁格尔	43.0	25	皮克林	12.1	160
达尼	14.6	112	普罗克勒斯	30.6	640
狄奥尼修斯	17.1	136	派特厄斯	18.9	51
欧几里得	11.0	112	斯梯文	25.0	640
欧多克苏斯	13.9	104	斯特雷波	54.7	640
尤勒	26.6	208	塔克奎特	74.0	25
弗涅里厄斯	20.0	384	塔朗蒂乌斯	56.5	320
甘巴持	115.0	74	捷奥菲勒斯	102.1	1 080
杰米纳斯	17.3	280	蒂马厄斯	32.5	344
戈丁	35.7	376	提莫恰里斯	35.0	137
欣德	173.0	138	特里斯涅克	26.0	310
克普勒	32.3	640	第谷	85.0	3 000

月球表面的石块覆盖了一个很宽的范围,其表面尺寸可能是圆形的或者矩形的,也可能是有凹痕的、风化的或者泡化的,标准高度为直径的一半。地球上 80% 的陆地表面的地形是在最近 200 万年内形成的,而月球上 99% 的表面地形是在 30 亿年前形成的,其中 70% 的表面地形是在 40 亿年前形成的。

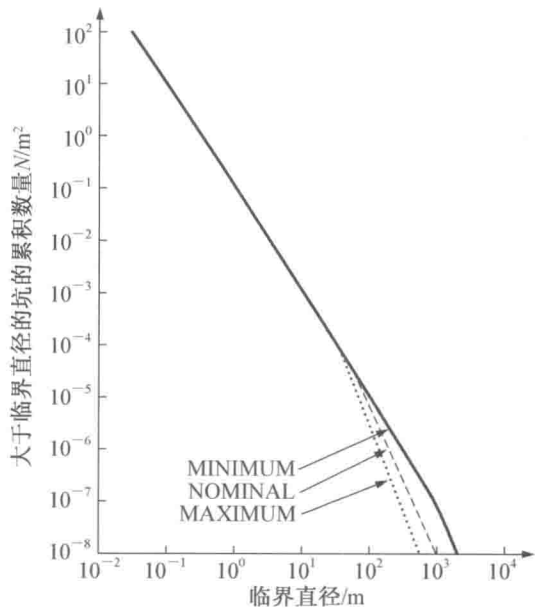


图 1-2 月球表面环形坑直径与数量分布的规律

月海平原相对平坦,大部分坡度在 $0^\circ \sim 10^\circ$,标准方差为 3.7° 。高地地形起伏较月海地区更大,最大坡度约为 34° ,大部分坡度在 $0^\circ \sim 23^\circ$,标准方差为 $4.5^\circ \sim 60^\circ$,甚至更大。

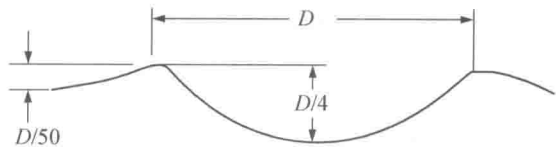


图 1-3 月球表面环形坑的典型轮廓

Apollo 17 着陆的金牛—利特罗峡谷地区的地形总体上较为平缓,但大小不等的岩石块广泛分布(图 1-4),这种地形对月球探测器的避障和越障能力提出了较高的技术要求。

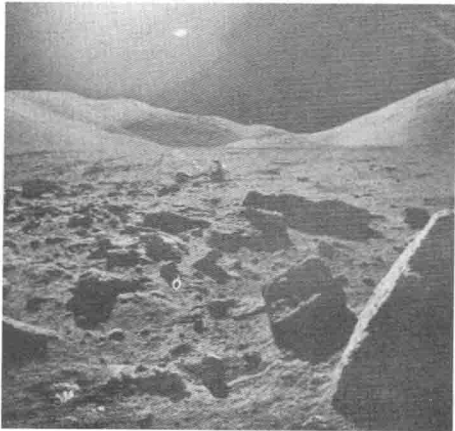


图 1-4 月球上金牛—利特罗峡谷地区(Apollo 17 着陆场)的地形

1.1.2 月球的矿物成分

矿物是组成月球的基本单元,除极少数矿物外,构成月球岩石的绝大多数矿物都没在地球上发现过。通过对月球岩石中矿物的分析与研究,可以确定岩石形成时的压力、温度、冷却速度以及一些气体相,如氧、硫、一氧化碳等的氧逸度等重要参数。岩石的光谱特性实际上是其矿物的集合表现,所以研究月球表面物质的光谱特性是了解岩石的矿物组成及其结构特征的重要手段之一。此外,通过对岩石中高含量的矿物进行机械分离就可以直接提取矿石,对我们认识月球上的矿物资源有重要的实用意义。

月球上硅酸盐矿物的主要特征如下:

- (1) 硅酸盐矿物特别是辉石、斜长石和橄榄石是构成所采集样品中最主要的矿物组分。
- (2) 辉石、斜长石和橄榄石的含量变化都很大,体积含量分别为 8.5%~61.1%、12.9%~69.1%、0.2%~17.5%。
- (3) 相对于辉石和斜长石,橄榄石的硅酸盐含量较低,而在 Lunar 24 采集区硅酸盐含量最高。
- (4) 辉石与斜长石的含量具反相关关系。
- (5) 月海区的钛铁矿含量明显比月陆区的高,但 Apollo 15 采集点月海区的钛铁矿含量明显比 Apollo 17 采集点的低,这也说明同一岩石类型不同区域的矿物含量也有较大的变化。
- (6) 有明显的重结晶现象,而且同一个辉石晶粒成分不均一性很突出。研究表明,这种现象主要是熔浆极为缓慢的冷却过程以及结晶时矿物与熔体之间平衡不稳定性所导致的。
- (7) 月海玄武岩中主要是单斜辉石,是由普通辉石与易变辉石按 001 或 100 的连生体组成,而非月海玄武岩及高地岩石中的辉石主要是斜方辉石。
- (8) 辉石矿物颗粒内、颗粒间的成分是变化的,主要体现在 FeO、MgO、CaO 的变化上。
- (9) 辉石的带状构造较普遍,一般由易变辉石核和普通辉石的边缘组成,两者均富含约 1% 的 Cr_2O_3 ,普通辉石则富含铝和钛。

(10) 与地球上的辉石相比,月球辉石的主要特征是:形成于极度还原、无水作用的环境条件下,Fe/Mg 比值大。

(11) 在月球样品中还发现一种新的辉石族矿物。

1. 辉石

辉石是绝大多数月岩中的主要矿物,其成分变化较大。月海玄武岩中的辉石主要是单斜辉石,非月海玄武岩及高地岩石中的辉石主要是斜方辉石。辉石记录了月球岩石形成的条件和演化的历史,是成分上变化较大的一种固熔体,其晶体结构如图 1-5 所示。

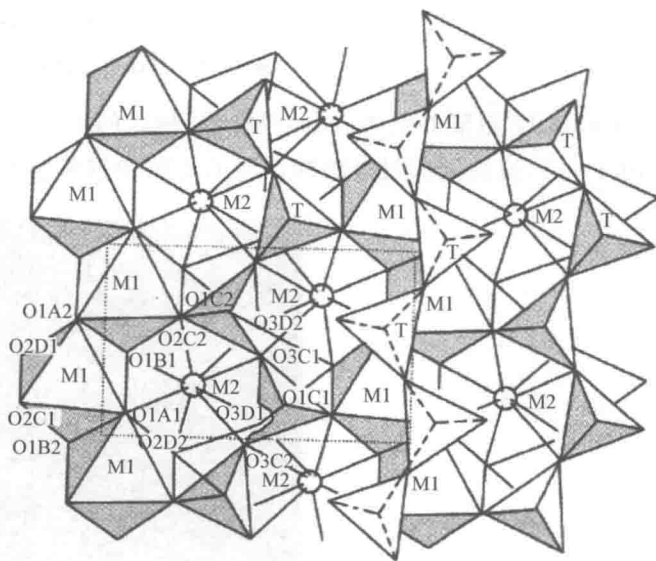


图 1-5 辉石的晶体结构

图 1-6、图 1-7 和图 1-8 所示分别

是月海玄武岩中的辉石成分,高地角砾岩、贫碎屑熔岩、KREEP 岩中的辉石成分,高地粗晶火成岩中的辉石成分变化图。

总的说来,月海玄武岩中辉石有以下主要特征:

(1) 根据化学成分,辉石可分为普通辉石、低钙普通辉石、钛普通辉石、低铁普通辉石、低钙低铁普通辉石、三斜铁辉石、古铜辉石和易变辉石等。

(2) 无论是月海玄武岩中的辉石,还是高地岩中的辉石,其中的铁都是以 Fe^{2+} 的形式存在,而不存在 Fe^{3+} ,这表明辉石是在还原条件下形成的。

(3) 元素 Na 的含量很低,这是由于在月海玄武岩中其整体性含量都很低的缘故。

(4) 由于月海玄武岩在结晶过程中处于低氧逸度状态,因此其他变价元素如 Ti、Cr 等都以低价态赋存于矿物中。根据 Apollo 17 月海玄武岩的分析表明,大约 30%~40% 的 Ti 是以三价钛的形式存在于月海玄武岩中,而且几乎所有的三价钛都赋存于辉石之中。

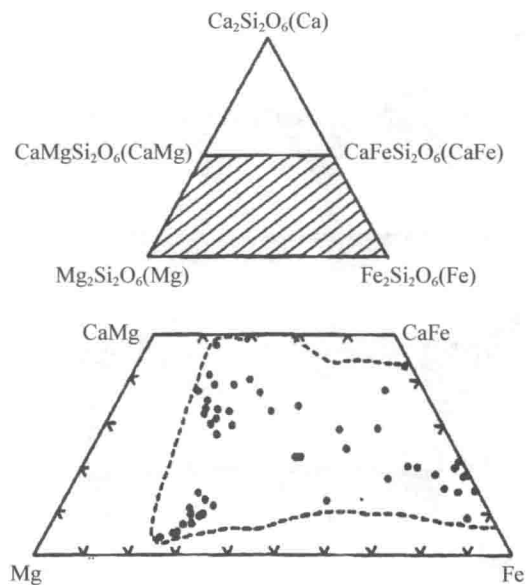


图 1-6 月海玄武岩中的辉石成分

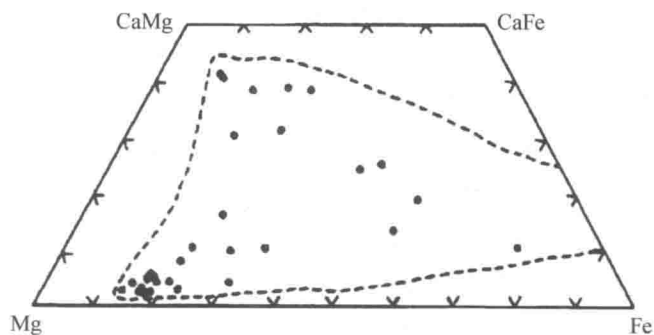


图 1-7 高地角砾岩、贫碎屑熔岩、KREEP 岩中的辉石成分

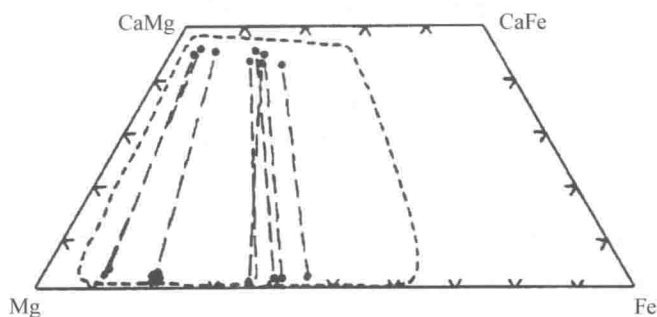


图 1-8 高地粗晶火成岩(铁斜长岩和富镁岩)中的辉石成分

2. 斜长石

斜长石的晶体结构如图 1-9 所示。月球岩石中绝大多数长石矿物都属于斜长石系列。

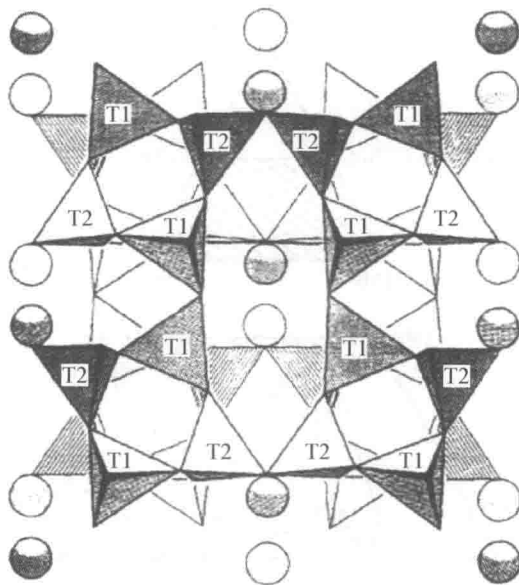


图 1-9 斜长石的晶体结构

斜长石在月球岩石中分布比较普遍,为月海玄武岩及高地岩石的主要矿物,包括从钠长石向钙长石过渡的所有过渡型斜长石系列。斜长石一般呈白色粒状集合体或板晶产出,个别的斜长石晶体长达 1mm,薄片观察无色,一般具钠长石双晶。其成分范围为 $An_{60} \sim An_{90}$,含钾约 0.1%,含铁约 0.5%,含钛约 0.1%。研究表明,斜长石颗粒间的成分变化很小,其范围一般不超过 5% 的钙长石分子,但在角砾岩中斜长石的成分变化则较显著。由于月球上碱性金属较为贫乏,因此相对地球上的斜长石,月球上的斜长石的钠元素含量很低,即以钙长石为主。

根据对月球上不同斜长石的研究发现:

- (1) 钠长石($NaAlSi_3O_8$)与钙长石($CaAl_2Si_2O_8$)的成分差异最大。
- (2) 在月海玄武岩中,钙斜长石的含量与全岩中 Ca/Na 比值成正相关关系。
- (3) 相对于月球上的其他岩石,高地撞击熔岩、角砾岩和 KREEP 岩中的斜长石明显富含 Na,其主要原因是由于 Na 元素具有与 K、Re 和 P 等元素相似的球化学行为。
- (4) 高地粗晶火成岩中斜长石的成分变化较小,而且其碱性金属的含量与斜长石的含量成正

相关关系。

(5) 与辉石一样,月球斜长石也经历了亚固态反应,因此同一矿物其成分的不均匀性也较为明显。

(6) 总的说来,与地球上的长石相比,月球上的长石碱性金属贫乏。

3. 橄榄石

橄榄石的晶体结构呈八面体链状结构,如图 1-10 所示,其中 Fe 和 Mg 随机赋存于 M1 或 M2 晶格点上,而 Ca 只赋存于 M2 晶格点上。

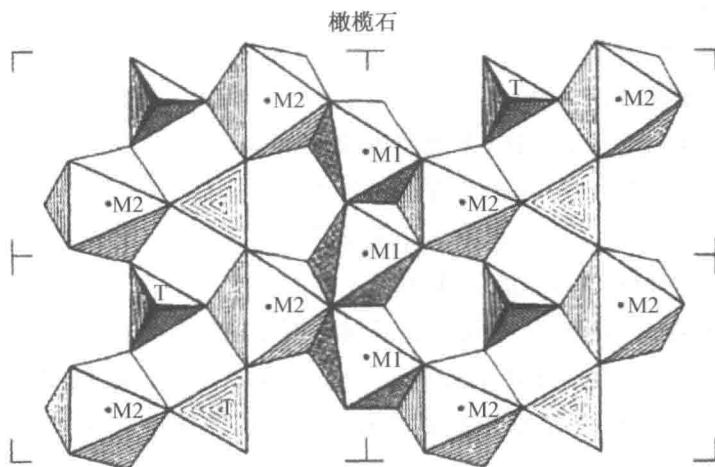


图 1-10 橄榄石的晶体结构

橄榄石在月球岩石中分布广泛。橄榄石在不同岩石中的含量不同,如在月海玄武岩及橄长岩中含量较高,是作为主要的矿物相产出,而在一些岩石中含量较低,是以次要矿物相产出。此外,在岩石中还见到含钴的金属镁—铁与橄榄石共生。橄榄石的二氧化二铬含量比地球火成岩的橄榄石要高,而且二氧化二铬的含量随着镁橄榄石分子减少而减少, MnO 及 TiO_2 的含量则随着镁橄榄石分子减少而增加。

根据对月球不同类型岩石中橄榄石的系统研究发现:

(1) 橄榄石的成分变化完全受到主量元素 Fe 和 Mg 之间的离子交换所制约,即随着 Fe 含量减少, Mg 含量增加,橄榄石的矿物组分从铁橄榄石端元矿物(用 Fa 表示)向镁橄榄石端元矿物变化。

(2) 月海玄武岩中橄榄石的成分绝大多数为 $\text{Fe}_{20} \sim \text{Fe}_{70}$, 很少为 $\text{Fe}_{70} \sim \text{Fe}_{100}$; 但在月海玄武岩熔体残余相中,由钙镁辉石—铁橄榄石—石英处于平衡状态下缓慢结晶而产生的矿物不是富铁橄榄石,而是富镁橄榄石。

(3) 月海玄武岩中橄榄石的其他主量元素,如 Ca、Mn、Cr 和 Al 在月球橄榄石中的含量完全随铁的变化而变化,且这种变化受月海玄武岩熔浆冷却速率所控制。

1.1.3 月球上的化学元素

地球上发现的所有化学元素都已经在月球上找到,只是在月球上的化学元素的组成和分布的特征与在地球上化学元素的组成和分布的特征不同。月球与地球的演化阶段差异很大,月球缺乏

一个像地核一样的铁质月核,月球从内核到表层都几乎缺乏水,几乎没有大气,所以没有任何像地球那样有大气和水体参与的化学和物理风化作用等。

月球元素可分为六大类,即主量元素、不相容微量元素、无规律性微量元素、亲铁元素、挥发性元素和太阳风注入元素。其实月球六大类元素的划分没有绝对的界线,许多元素是跨类别的,如P既属于不相容微量元素范畴,又可属于无规律性微量元素。

月球的主量元素是构成月球物质的主体,其丰度从大至小的顺序为:O、Si、Al、Mg、Fe、Ca、Ti、Na。同地球一样,月亮相对富集Si、Al,而贫Fe、Mg。月核中的主要成分为Fe。

月球上不相容微量元素由于它们特殊的地球化学行为,以及极低的相对宇宙丰度,在月球形成时不可能形成主要矿物,因而常常富集于特有的岩石与矿物中,而在其他岩石、矿物中的丰度极低,稀土元素主要富集在克里普岩中。

与主量元素、不相容微量元素相比,无规律性微量元素在月球上的丰度与分布特征的规律性相对较弱,而且在一些岩石中,它们的含量可以达到主量元素的范畴,而在地球化学行为上又常常具有不相容微量元素的特性。其中,P、K、Ba主要集中于特殊的岩石、矿物中,如克里普岩中,它们在月壤中的丰度与月壤的颗粒大小成反比关系。

月球上的亲铁元素在月壤中的丰度明显比月球岩石中的丰度高。尽管月球中的元素F、S、Cl、Cu、Zn、As、Se、Br、Ag、In、Te在地球化学行为上不像亲铁元素具有相同或相似的亲和力,但这些元素在相对挥发性和丰度上很相似,即它们都具有一定程度的挥发性,在月球岩石中的含量极低,而在月壤中的含量很高。

在月壤样品中,高丰度的不相容元素之间高度相关,如Th与Sm之间的相关系数为0.99,Gd与Sm之间的相关系数为0.998。根据月球表面热流值的测定,月球中的U含量约为33~34 ng/g。月球高地月壳中富集着整个月球60%~70%的U、Th、K,大约50%的Eu富集在高地月壳中,表明月球至少有50%的体积发生过熔融与分异。

1.1.3.1 月球的主量元素

首先,O是月球元素中丰度最高的元素,月球中的60%的原子都是O原子,但是它们都和其他元素结合在一起,形成稳定的化合物。其次,Si占总原子数的16%~17%。Al是丰度第三位的元素,在月球高地中占总原子数的10%,而在月球正面约占20%面积的月海玄武岩分布区中仅占4.5%。Ca和Mg的丰度大致相等,都约占总原子数的5%,其中在月海的丰度约占5%。Fe在高地的原子数约占总原子数的2.5%,而在月海的原子数约占总原子数的6%。

如果把原子百分比转换为质量百分比,O依然是丰度最高的元素,约占45%;Si约占21%;Al在高地约占13%,在月海约占5%;Ca在高地约占10%,在月海约占8%。一般来说,主量元素与O相关的化学成分是已知的,从而计算出元素氧化物的含量。

1. Al_2O_3 —FeO 和 Al_2O_3 —(FeO+MgO)之间的关系

通过检查月球样品中主量元素中的正相关和负相关关系,发现月海和高地的成分差异性极其明显,图1-11(a)所示为FeO与 Al_2O_3 的含量负相关性。绝大多数月球岩石中的主要矿物成分是斜长石和铁镁质矿物(辉石和橄榄石)。斜长石的含量越高,则 Al_2O_3 的含量也越高。岩石中的斜长石的含量越高,则铁镁质矿物的含量越低,从而使FeO的含量也变得更加低。通过粗略估计,这种负相关性简单地反映了斜长石和铁镁质矿物的比例的变化。