

利用月球含氧矿物制取氧气的方法学比较

李 芃^{1,2}, 王世杰¹, 李雄耀¹, 唐 红^{1,2}, 陈 丰¹

1. 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 550002;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

摘 要: 氧气作为人类未来在月球上生存的基本条件, 研究制取方法是月球基地建设中的一个主要目标。本文分类总结了利用月球含氧矿物制氧方法; 就制氧方法适合就地利用月球资源、反应的高效率、反应过程易实现性等方面比较了各类方法的优缺点, 提出就地利用微波能加热、氢气作为还原剂、月壤中钛铁矿作为反应物的月球基地制氧的优选方案。

关 键 词: 就地资源利用; 含氧矿物; 制氧方法; 微波加热; 月球基地

中图分类号: P579 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2009)02-0183-06

Review of Oxygen Production Using Oxygenous Minerals on the Moon

LI Peng^{1,2}, WANG Shi-jie¹, LI Xiong-yao¹, TANG Hong^{1,2}, CHEN Feng¹

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of science, Guiyang 55002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Oxygen is a fundamental requirement for human to live on the Moon. Oxygen preparation is one of the major objectives in lunar resource utilization. It will be a more cost-efficient method to extract oxygen from lunar soil compared with transporting it directly from the Earth. The explorations had showed that there are various metal oxides and silicates with oxygen contents up to about 40% in lunar soil, which makes oxygen extraction from lunar soil possible. This paper summarized different oxygen extraction methods using reduction agents and heating technology. Microwave, which is a rapid and effective heating method, has many advantages over other traditional heating techniques. Therefore, this paper recommended microwave heating as the preferring heating method for speeding reduction reactions of oxygenous minerals to prepare oxygen on the Moon. Further study is much required.

Key words: In-Situ resource utilization; oxygenous mineral; oxygen production; microwave heating; lunar base

在新一轮探月热潮中, 建立月球基地, 开发利用月球资源是各国进行月球探测的目标之一。月球与地球不一样, 没有一个可供人类自由呼吸的含氧环境^[1,2]。因此, 建立月球基地, 首先必须考虑的问题就是氧气的供给。据粗略估算, 月球基地仅用于生命维持所需的氧气就要 10 t/人·a^[3]。氧气可以直接从地球输送, 也可以从月球含氧矿物中提取。从地球向月球运送氧气的成本相当昂贵, 按目前的技术水平估算, 每 kg 的运输成本约为 50 000~ 90 000

美元, 一个 10 人的月球基地, 仅氧气运输的费用就高达 50~ 90 亿美元/a^[3~5]。如此高昂的运输成本决定其不可能成为月球基地氧气供给的主要途径。相反, 利用月球矿物资源生产氧气则能免去昂贵的运输成本, 不失为一种更有效的途径。目前, 不少研究者通过采用不同工艺方法以模拟月壤、岩石矿物原料及月球样品为原料, 进行月球氧气就地制取的模拟实验研究^[3]。本文详细分析现有制氧方法的优缺点, 提出笔者的一孔之见。

收稿日期: 2008-08-01 收到, 2008-11-03 改回

基金项目: 国家 863 项目 (2008AA12A213); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-110); 国家自然科学基金资助项目 (40473053)

第一作者简介: 李芃 (1985—), 硕士研究生, 专业方向: 月球与行星科学。

通讯作者: 王世杰. wangshijie@vip.skleg.cn.

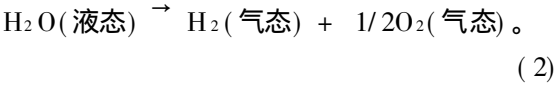
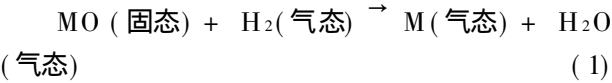
1 现有的月球制氧方法

为达到更高的氧气制取效率,选择了不同的还原剂、不同工艺方法和不同的加热方式进行了模拟实验。根据工艺方法的不同,可将当前认为可能实现的几种月球制氧方法划分为:还原法、高温电解法和等离子高温分解法等。

1.1 还原法

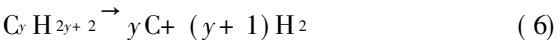
还原法主要利用还原剂的强还原性,将金属氧化物中的金属和氧还原分离。目前采用的还原剂主要有 H₂、C、F₂、Cl₂ 等,分别称为氢还原法、碳还原法、氟还原法、碳热氯化还原法和其他还原法等。

(1) 氢还原法:以氢气作为还原剂,对钛铁矿、模拟月壤、火山玻璃和月球样品进行模拟实验^[3, 6~8]。Gibson 等^[9]以月球玄武岩 70035 为样品,加热至 1173~1323 K,与氢气进行还原反应,得到的氧气质量占反应前样品质量的 4.6%。Allen 等^[10]对 16 种月壤样品和 3 种火成玻璃质月壤进行氢气还原实验,生成的氧气质量占样品的 4.67%。这些模拟实验中氢气作为还原剂主要还原化学键较弱的氧化物(FeO、Na₂O、TiO₂ 和 SiO₂ 等),生成水、金属单质或硅,进一步通过电解水得到氧气和氢气:



其中 M 代表 Fe、Na、Ti 等金属元素。氢还原剂的实验过程简单直接,实验设备相对简单,容易实现^[11~13]。但模拟实验采用传统的加热还原方式升温过程缓慢,能源利用效率和氧气的产率很低。

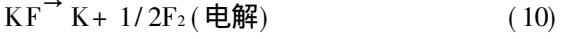
(2) 碳还原法:碳还原剂在地球上极易取得,其还原反应温度也相对较低。Cutler 和 Krag^[14]将月壤加热到 973~1173 K,钛铁矿的反应为:



虽然碳还原法在地球的模拟试验中有很明显的优势:产率高、反应速率快、实验设备研制成熟等;但考虑到月球的特殊条件,碳在月球上难以获取,使碳还原法不易在月球环境下实现^[15]。

(3) 氟还原法。Christiansen 等人^[16]和 Burt^[17]以钙长石(CaAl₂Si₂O₈)与钛铁矿(FeTiO₃)为反应

物进行氟化实验。生成产物主要为氧气、氟化物和二氧化硅:



氟的强还原性可还原月壤中几乎所有的金属氧化物;反应后生成金属氟化物和氧气;金属氟化物与钾蒸汽进一步发生还原反应,得到金属和氟化钾,电解氟化钾可重新生成氟和钾,回收反应试剂。氟还原实验中问题在于氟与钾作为还原剂,试剂的循环利用使反应变得更复杂,需要增加很多实验设备及步骤^[18]。另外,由于氟的强还原性,氟化作用会产生较多的中间产物,不利于氧气和其他所需产物的提取。当反应温度要求升高到 1473 K 时^[3],某些氟化反应消耗能量较多,经济效益较差。

(4) 碳热氯化还原法:指使用 CO-Cl₂ 的混合气体,或通入 Cl₂ 时加入固体碳参与反应,使氯气与金属氧化物更容易直接发生反应。

其原料反应效率高,反应中能产生许多可供利用的副产物。然而,这些副产物会使实验过程更趋复杂,降低了系统的可靠性和还原剂的回收率。实验表明,873~1273 K,由 Ti、Zr、Al 氧化物生成的 G-C-H-O 副产物化合物达 136 种,^[19]使还原剂的回收和氧气的分离成为难题。

(5) 其他还原法:如甲烷、氢氟酸、硫化氢、盐酸、硫酸和金属铝、锂、钠等多种还原法的实验^[3, 16, 20~25]。

以上方法存在的问题。1) 实验过程十分复杂,不能直接得到所需的产物,要经过电解、分离等步骤后才能得到氧气,且分离过程复杂,实验设备复杂。2) 反应的效率较低。一方面反应物的利用率较低,月壤或模拟月壤中只有很少的组分能参与反应;另一方面,由于反应过程复杂,导致氧气的产率较低,且还原剂不易回收循环利用。3) 这些反应中都存在实验设备被腐蚀的问题。

1.2 高温电解法

高温电解法是一种倍受重视的制氧方法。月壤在电解室中熔融,再电解熔体,氧气从熔体中以气泡形式释放。其原理是月壤熔融后,熔体中有可自由移动的阴、阳离子,通电时阳离子会被还原成金属,阴离子则被氧化。其反应步骤简单,无需附加试剂,也不必考虑材料的回收和循环。

电解过程的最大问题是能耗过大,必须保障电能的充分供给^[3]。Boundy^[3]采用该方法电解月壤取氧,在不加助熔剂时,熔融温度需达 1800~2000

K, 这对电解室的材料材质和密封度提出了严格要求; 且整个电解系统的平均温度要保持在 1573 K^[26], 如果熔融产物没有维持在足够高的温度, 会降低熔体的传导性, 影响氧气的产率, 甚至导管中的液体凝固, 堵塞导管系统。

1.3 等离子高温分离法

该方法是在 7000~10 000 K 温度下, 反应原料瞬间被离子化, 利用金属在静电场或磁场中比氧气更容易提取的性质, 使反应物中金属与氧分离。

计算表明, 8000 K 时, 28% 的月壤会转换为氧气, 10 000 K 时, 38% 的月壤转换为氧气^[27]。与前面所述方法相比, 氧气产率明显提高。

该方法存在问题的很多, 首先是能耗大, 生产一吨氧气需耗能 34 500 kWh^[27], 因而无法大规模生产。其次是反应温度过高, 对设备的材料要求十分苛刻。

2 月球基地氧气生产的优选方案

利用月球资源就地生产氧气要充分考虑三个条件: 一是能就地利用月球资源; 一是反应效率高; 三次是反应过程要简单。

2.1 还原剂的选择

上述月球制氧法分析表明, 氢气还原法具有更大的优势。

(1) 氢气还原反应的温度相对较低。与等离子高温分解 (7 000~10 000 K^[26]), 或高温分解法 (1800~2000 K^[3, 27]) 的温度相比, 氢气还原法在 1173~1323 K^[9] 即能获得最佳产率; 反应物转化率与温度关系曲线^[7] 表明, 当温度达到 873 K 时反应物开始转化, 1473 K 为反应过程所达到的最高温度。

氢气还原法的能耗较低。相对较低的反应温度降低了氢气还原反应的能耗需求。等离子高温分离法每产生一吨氧气所需要的能量为 34 500 kWh^[27], 过高的能耗无法进行大规模生产, 只能进行少量生产。高温电解法的电解实验系统反应时的平均温度需保持在 1573 K^[26], 若无持续充分的能量供给, 不仅影响反应产率, 还会造成导管系统的堵塞。

氢气还原反应的过程简单, 技术上容易实现。氟还原法和碳热氯化还原法还原剂的循环使用、副产物的产生和提取都需要增加设备, 反应过程复杂。而氢气还原反应通过对产物水的电解即可同时实现氧气的提取和氢气的循环使用, 且水电解是一种成

熟技术。

(2) 要实现就地利用月球资源, 还原剂氢气在月球上如何获得十分重要。氢在月球表面的主要来源是太阳风离子。太阳风是太阳大气层原子电离而释放出的等离子体, 太阳风的主要成分是 H 和 He; 在代表性月壤中 H 的浓度约为 50 μg/g, 相当于假设密度为 1.75 g/cm³ 的月壤中含有 100 g/m³ 浓度的 H^[28]; 因此与其他还原剂相比, 问题不是月球上是否有足够的氢, 而是如何利用氢资源的问题。另外即使考虑从地球向月球运送氢, 作为火箭推进剂的主要成分, 运输技术很成熟, 运输成本不会太高。

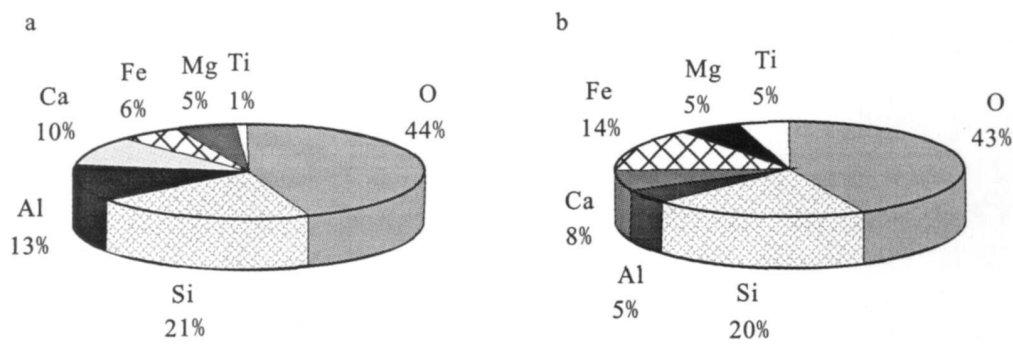
(3) 氢具有较强的还原性, 且其还原性稍弱于氟等强还原剂, 在反应过程中不产生其他副产物, 使反应过程简单; 氢气还原过程不产生腐蚀性产物, 有助于设备的养护。

2.2 原料的选择

原料的选取主要从两个方面考虑。首先是要就地利用月球资源; 月球组成主要元素丰度如图 1 所示, 氧元素在高地和月海两种地理单元内含量均为最大。氧离子与其他阳离子形成复杂的硅酸盐或氧化物矿物, 按含量大小依次为辉石、长石、橄榄石、钛铁矿等^[2, 29~32]。辉石、斜长石和橄榄石是月壳和月幔岩石中含量最高的硅酸盐矿物; 月球高地和月海中斜长石的含量分别约为 70%~90% 和 10%~40%, 橄榄石在月海玄武岩中的含量达 20%, 这使硅酸盐矿物成为月球制氧、实现就地资源利用的一个优先选择^[33~35]。实现硅酸盐矿物的分解有两种方法^[7]: (1) 将硅酸盐矿物熔融并在持续高温下 (1373 K 以上) 进行还原反应; (2) 通过等离子高温分离法在更高的温度下, 达到提取氧气的目的。无论哪种方法对能耗及设备的要求都很高, 不易实现。因此, 含量其次的钛铁矿成为反应原料的新选择。

月壤中钛铁矿含量为 2%~20%^[33~35]。阿波罗 11 宇航员采回的样品中, 高 Ti 月壤中钛铁矿含量达 10%~24%^[36~38]。以钛铁矿为反应原料, 可以在 1273 K (或更低温度) 被还原, 达到较高的氧气产率; 且月壤中钛铁矿的含量达到 5% 就可用选矿方法分离^[7]。

其次是月壤中参与反应的有效成分。氢气还原实验大都采用模拟月壤或真实月壤为反应原料。表 1 是模拟月壤、真实月壤火成玻璃样品及真实月壤样品的氢还原的氧气产率^[28]。



据文献[40]

modified after ref. [40]

图1 高地(a)和月海(b)主量元素丰度

Fig. 1 The major element abundance of high land (a) and lunar mare (b)

表1 氢气还原生成的氧气产率对比

反应物	reduction method		
	模拟月壤	真实月壤火成玻璃	真实月壤样品
	JSG-1	样品 74001, 438	71131, 8
反应温度/ K	1323	1323 ± 5	1323 ± 5
氧气产率/ %	1.92	4.67	3.61

真实月壤的产率比模拟月壤高,月壤玻璃比真实月壤产率高(表1)。研究显示,月壤玻璃中的铁氧化物含量较高,与其他月壤样品相比,在更低的温度下就能发生还原反应释放出氧气^[8]。阿波罗-17的月壤橙色火山玻璃样品(74220)中含17.8%的Fe²⁺,其氧气产率为4.3%;而成分与之相似的月壤黑色玻璃样品(74001)的氧气产率为4.7%,超过了其他所有月壤样品^[39]。岩石矿物所含氧化物的自由能相对强弱顺序为Ca²⁺ > Mg²⁺ > Al³⁺ > Ti²⁺ > Ti⁴⁺ > Si⁴⁺ > Na⁺ > Fe²⁺ > Fe³⁺^[40],说明铁的氧化物相对钙镁氧化物容易被还原而释放出氧气。因此,为达到更高的氧气产率,在选择原料时,钛铁矿作为化学键键强相对较弱的氧化物,是理想的原料。

2.3 加热方式的选择

实验的加热方式分为传统加热法(如火焰、热风、电热、蒸汽等)和微波加热法两种。前者是利用热传导将热量从被加热物外部传入内部,使物体中心温度逐步升高,加热过程对反应的效率和速率影响很大。微波加热是指在300 MHz~ 300 GHz范围内对物体加热^[41, 42],通过微波在物料内部的能量耗散直接加热物料;微波加热是一种更适合月球制氧的加热方法。

与传统加热方法相比,微波加热法有许多优点:1)加热效率高;可以1273 K/min的加热速率加热

到2273 K,加热时间大大缩短;2)反应速率高;微波的穿透能力很强,扩散速度快,能深入到样品内部,使整个样品均匀加热;3)加热过程简单:能量利用率极高。据估计,微波加热与传统加热相比,总能量节约60%^[43~ 45]。

微波能的获取主要通过微波发生器将电能转换为微波能,电能是月球能源的最主要供应方式,具有易存储、易控制、能连续供给等优点。就太阳能而言,由于月球表面大气十分稀薄,大气密度只有大约2×(10⁵~ 10⁴)分子/cm^{3[1]},没有大气的阻隔,月面上日照强度比地球上约强十几倍。直接利用太阳能只能进行传统方式加热,热利用效率很低,同时漫长的月球黑夜将无法为传统加热提供太阳能;而目前的太阳能发电技术已日趋成熟,结合电能的易存储性和月球的强太阳辐射,将太阳能转化为电能是月球能源供给的一个很好选择。研究指出,可以在月球上给定的能量接收区建立太阳能光电池组^[46],它们由能量1000 s We~ 100 s kWe(Watts-electric)的单个太阳能光电池组成,接收太阳能并将其转换为电能;其中能量为100 s kWe的太阳能电池已经在国际空间站上使用。因此,微波加热是月球制氧的一种优先考虑的加热方式。

3 小 结

利用月球含氧矿物就地生产氧气是为了降低月球基地的建设成本。

(1)氢气是一种适合月球特殊环境条件的还原剂,可以通过赋存在月壤中的来自太阳风的氢气直接获取。

(2)月壤中的钛铁矿是进行还原反应的优选矿物,具有易于分选、还原、反应温度低、氧气产率高等

优点。

(3) 微波加热比传统加热更适合于利用月壤制取氧气。利用微波加热的方法实现氢气还原钛铁矿制取氧气的方法还需深入研究。

(4) 月壤中参与氢气还原反应的主要是钛铁矿。钛铁矿的热力学特性和电磁特性在微波场中对氧气产率的影响仍有待进一步研究, 加热过程有待进一步的实验分析, 包括实验过程的相关计算、具体实验方案的确定和实验参数的测定。

参考文献 (References):

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 24– 38, 46– 53.
Ouyang Ziyuan. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005: 24– 38, 46– 53. (in Chinese)
- [2] 中国科学院地球化学研究所. 月质学研究进展[M]. 北京: 科学出版社, 1977: 1– 17
The Institute of Geochemistry Chinese Academy of Science. Progress in the study of geology of Moon [M]. Beijing: Science Press, 1977: 1– 17. (in Chinese)
- [3] Schunk D, Sharpe B, Cooper B, Thangavelu M. The moon resources: future development and colonization, Appendix E [M]. John Wiley & Sons, 1999: 239– 278: 466.
- [4] Taylor L A, Carrier W D. Oxygen production on the moon: an overview and evaluation [A]. Lewis J S, Matthews M S, Guerrieri M L. Resources of Near Earth Space[M]. Space Science Series. Tucson, London: The University of Arizona Press, 1993: 69– 108
- [5] Duke M, Hoffman S, Snook K. The lunar surface reference mission: a description of human and robotic surface activities [M]. NASA, TP-2003-212053, NASA Lyndon B. Johnson Space Center, Houston TX, July 2003.
- [6] Dalton C, Hohmann E. Conceptual design of a lunar colony [R]. NASA CR-129164, Contract N7311236 Houston University, Sep. 1972.
- [7] Gibson M A, Knudsen C W. Lunar oxygen production from ilmenite [A]. Mendell W W. Lunar Bases and Space Activities of the 21th Century [M]. Lunar and Planetary Institute, Houston 1985: 543– 550.
- [8] Carlton C, Allen C C, Bond G G, McKay D S. Lunar oxygen production—a maturing technology [R]. Engineering, Construction and Operations in Space ⑤ Proceedings of Space' 94 held in Albuquerque, New Mexico, February 26–March 3, 1994: 1157– 1166
- [9] Gibson M A, Knudsen C W. Lunar hydrogen recovery process [J]. United States Patent 4,938,946. 1990.
- [10] McKay D S, Allen C C. Hydrogen reduction of lunar materials for oxygen extraction on the moon [J]. Amer. Inst. Aeronautics & Astronautics paper AIAA 96-0488. presented at the 34th Aerospace Sciences Meeting in Reno. NV. 1996: 15– 18.
- [11] Williams R J. Oxygen extraction from lunar materials: An experimental test of an ilmenite reduction process [A]. Mendell W W. Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century[J]. Lunar and Planetary Institute, Houston, TX.
- [12] Gibson M A, Knudsen C W, Brueneman D J, Allen C C, Hiroshi K, McKay D S. Reduction of lunar basalt 70035: Oxygen yield and reaction product analysis [J]. J Geophys Res, 1994, 99: 10,887– 10,897.
- [13] Allen C C, Morris R V, McKay D S. Oxygen extraction from lunar soils and pyroclastic glass [J]. J. Geophys. Res., 1996, 101: 26,085– 26,095.
- [14] Cutler A H, Krag P. A carbothermal scheme for lunar oxygen production [A]. Mendell W W. Lunar Bases and Space Activities of the 21th Century [M]. Lunar and Planetary Institute, Houston 1985: 559– 569.
- [15] McKay D S, Morris R V, Jurewicz A J. Experimental reduction of simulated lunar glass by carbon and hydrogen and implications for lunar base oxygen production [J]. LPI Contributions, 1991: 758.
- [16] Christiansen E L. Conceptual design of a lunar oxygen pilot plant [R]. NAS9-17878, EEI Report No. 88– 182, Eagle Engineering Inc., Houston, Texas. 1988.
- [17] Burt D M. Lunar mining of oxygen using fluorine [J]. Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, Houston, 1988.
- [18] Agosto B. Fluorination of lunar ilmenite for in-situ production of lunar oxygen, iron, and titanium [R]. 31st Annual Lunar and Planetary Science Conference. March 13– 17. 2000.
- [19] Lynch D C. Chlorination processing of local planetary ores for oxygen and metallurgically important metals [J]. Space Engineering Research Center for Utilization of Local Planetary Resources, Annual progress report 1988– 89, The University of Arizona, Tucson. 1989
- [20] Waldron R D. Total separation and refinement of lunar soils by the HF acid leach process [J]. Proc. 7th Princeton Space Manufacturing Conf., AIAA, New York 1985
- [21] Haskin L A, Colson R O, Lindstrom D J, Lewis R H, Semkow K W. Electrolytic smelting of lunar rock for oxygen, iron, and silicon [J], Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century II, Mendell W, ed. NASA Conf. Publ., 3166, 1992, 2:411– 422
- [22] Agosto B. Lunar oxygen production by electrolysis of hydrofluoric acid leachates of lunar mare soils [J], Lunar and Planetary Science XXVIII.
- [23] Welham N J. Novel process for enhanced lunar oxygen recovery [J]. Journal of Materials Science, 2001, 36: 2343– 2348.
- [24] Cardiff E H, Pomeroy B R, Matchett J P. A demonstration of vacuum pyrolysis [R], Space Resources Roundtable VII, 2005.
- [25] Matchett J P, Pomeroy B R, Cardiff E H. An oxygen pro-

- duction plant in the lunar environment: a vacuum pyrolysis approach [R], Space Resources Roundtable VII, 2005.
- [26] du Fresne E, Schroeder J E. Magma electrolysis [J]. Research on the Use of Space Resources, Carroll W F, ed. NASA Jet Propulsion Laboratory Pasadena, 1983.
- [27] Steurer W L, Nerad B A. Vapor phase reduction [A]. Carroll W F Research on the Use of Space Resources [J]. JPL Publication 1983: 83– 36.
- [28] Eckart P, *et al.* Lunar base handbook [M], The McGraw-Hill Companies, Inc. 1999: 123– 125.
- [29] Allen C C, Morris R V, McKay D S. Experimental reduction of lunar mare soil and volcanic glass [J]. J. Geophys. Res., 1994, 99: 23, 173– 23, 185
- [30] Heiken G, Vaniman D, French B M. Lunar sourcebook a user's guide to the moon [M]. Cambridge University Press, 1991: 285– 356.
- [31] Chambers J G, Taylor L A, Patchen A, McKay D S. Quantitative mineralogical characterization of lunar high-Ti mare basalts and soils for oxygen production [J]. J. Geophys. Res., 1995, 100: 14391– 14401.
- [32] Taylor L A. Resources for a lunar base: Rocks, minerals, and soil of the moon [J]. 2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities, 1992: 361– 377.
- [33] Taylor L A. Magnetic beneficiation of high-Ti mare soils: Concentrations of ilmenite and other components. Lunar and Planetary Science Conference XXI, 1990: 1245– 1246.
- [34] Taylor L A, Chambers J G, Allan Patchen. Evaluation of lunar rocks and soils for resource utilization: detailed image analysis of raw materials and beneficiated products [J]. Lunar and Planetary Science Conference XIV, 1993: 1409– 1410.
- [35] Taylor L A, Higgins S J. Lunar mineral feedstocks from rocks and soils: X-ray digital imaging in resource evaluation [A]. Lunar and Planetary Science Conference XXV [C]. 1994: 235– 236.
- [36] Cameron E N. Apollo 11 ilmenite revisited [R]. WCSAR-AR3-9201-3, 1992: 1– 13.
- [37] Taylor G J. Cosmochemistry and human exploration [J]. Planetary Science Research Discoveries, 2004: 1– 12.
- [38] Taylor L A, McKay D S. An ilmenite feedstock on the moon: beneficiation of rocks versus soil [J]. Lunar and Planetary Science Conference XXIII, 1992: 1411– 1412.
- [39] Allen C C. Prospecting for lunar resources with global geochemical and multispectral data [J]. Workshop on New Views of the Moon II. 1999.
- [40] Kulcinski G L. Extraction Techniques Oxygen. <http://fti.neep.wisc.edu/neep533/SPRING2004/lecture13.pdf>. 2004, Feb. 18.
- [41] 黄柱程, 罗勇, 彭虎, 毛晓明, 姜涛. 铁矿石微波热风烧结点火研究 [J]. 材料导报, 2007, 21(11A): 301– 304.
Huang Zhucheng, Luo Yong, Peng Hu, Mao Xiaoming, Jiang Tao. Study on Ignition of Iron Ore Sintering by Microwave Heat Airflow [J]. Materials Review. 2007, 21(11A): 301– 304. (in Chinese with English abstract)
- [42] 刘继胜. 微波烧结工作原理及工业应用研究 [J]. 机电产品开发与创新, 2007, 20(2): 20– 23
Liu Jisheng. Research on Industrial Application and Principle of Microwave Sintering [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2007, 20(2): 20– 23. (in Chinese with English abstract)
- [43] Taylor L A, Meek T T. Microwave processing of lunar soil [R]. Proceedings of the International Lunar Conference, International Lunar Exploration Working Group 5– ILC2003 / ILEWG 5, 2003.
- [44] Allen C C, Hines J A, McKay D S, Morris R V. Sintering of lunar glass and basalt [C]. Engineering, Construction, and Operations in Space III, American Society of Civil Engineers, 1992a: 1209– 1218.
- [45] Taylor L A, Meek T T. Microwave sintering of lunar soil: Properties, theory, and practice [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2005: 188– 196.
- [46] Criswell D R. Lunar solar power system: review of the technology base of an operational LSP system [J]. Acta Astronautica, 2000, 46(8): 531– 540.