

文章编号: 1000-4734(2009)02-0229-06

月壤钛铁矿微波烧结制备月球基地 结构材料的初步设想

唐红^{1,2}, 王世杰^{1*}, 李雄耀¹, 李芃^{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, 贵州 贵阳 550002 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:月球基地建设是当前“重返月球”的一个重要目标,为满足其建设需要大量结构材料。部分学者通过对真实月壤样品和模拟月壤进行各种高温烧结实验,分析了就地利用月壤矿物资源制备各种材料的方法。但由于月壤成分较为复杂,烧结产物的性能还很难满足实际需求。微波烧结技术作为一项新技术,具有传统烧结技术无法比拟的优势,更适合作为月球资源利用中的烧结加热技术。结合月壤中钛铁矿的含量,通过热力学分析,作者认为利用钛铁矿进行微波烧结实验来制备月球基地所需结构材料是一个值得深入研究的方案。

关键词:月球基地; 结构材料; 微波烧结; 模拟月壤; 钛铁矿

中图分类号: P184 B79 **文献标识码:** A

作者简介:唐红,女,1984年生,硕士研究生,主要研究方向为月球与行星科学。E-mail: dongtianshixing@163.com

当前“重返月球”的一个主要目标就是要建立一个具有生命保障系统的月球基地。月球基地的建设需要大量的结构材料,同时,由于月球没有大气层,各种宇宙射线可以直接到达月球表面,因此,制备具有一定辐射防护性能的结构材料是建立月球基地所面临的一个重要问题^[1-2]。

月球基地建设所需的结构材料可以通过 2 种可能途径获得: (1) 从地球运送到月球; (2) 月球矿物资源的就地利用。第一种途径的运输成本相当昂贵,根据目前的技术水平估算,每千克的运输成本约在 50000~90000 美元之间^[3-5]。从经济效益方面考虑,这并非是一个行之有效的途径。由于月球本身蕴藏有丰富的资源,就地资源利用能从根本上解决高昂的运输费用,是月球基地建设过程中一个必须考虑的环节。对月球的探测结果表明,月球表面覆盖着一层颗粒细小的月壤,平均粒度约为 100 μm ; 破碎程度高^[6-8]。月壤的基本

组成包括: 矿物碎屑、原始结晶岩碎屑、角砾岩碎屑、各种玻璃、粘合集块岩和陨石碎片等^[9-11]。月壤的矿物成分分析结果表明,它主要由钛铁矿、长石、橄榄石、辉石、尖晶石以及纳米金属铁等组成^[6, 12-13]。月球特殊的环境使得月壤具有与地球完全不同的一种独特矿物组成,即无论在月壤颗粒表面还是在胶结质玻璃中,都存在大量的由空间风化作用形成的纳米金属铁颗粒^[14-16]。探测数据分析结果表明,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小于 20%; 钛铁矿含量在 2%~20% 之间^[17-19]。从 Apollo 采回样品的分析中可得知,高 Ti 月壤中钛铁矿含量可以达到 10.1%~24%^[20-23]。

目前国外部分学者利用月壤样品和模拟月壤进行各种高温烧结实验,研究了制备月球基地所需结构材料的方法。本文按照烧结加热过程的不同作用机理,对比分析了月壤(模拟月壤)的传统加热烧结实验和微波烧结实验,从而探讨利用月壤钛铁矿微波烧结制备月球基地结构材料的可能性。

收稿日期: 2008-08-17

基金项目: 863 项目 (No. 2008 AA12A213); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (No. KZCX2-YW-110); 国家自然科学基金 (No. 40473053)

* 通讯作者, E-mail: wangshijie@vip.skeg.cn

1 月壤(模拟月壤)烧结实验研究现状

1.1 传统加热烧结实验

传统加热法主要是将化学能、电能转化成为热能从而实现对材料的加热,如火焰、热风、电热、蒸汽等,都是利用热传导的原理将热量从被加热物外部传入内部,逐步使物体中心温度升高,又称之为外部加热法。要使中心部位达到所需的温度,则需要一定的时间,而导热性较差的物体所需的时间就更长。这种加热方法会使得物体内外温度梯度随着温度的增高而加大,对材料的结构和性能会产生一定的影响。

Allen等人(1992)在实验高炉中利用 H_2 还原了月球玻璃模拟物 Glass #1(含有较高的 FeO和 MgO以及较低的 Al_2O_3 和 CaO)和 Glass #2(含有较低的 FeO和 MgO以及较高的 Al_2O_3 和 CaO)。烧结温度达到 $1100^\circ C$,并保温 3 小时,样品烧结成为固体状, Glass #1 相对 Glass #2 烧结后单质 Fe 的含量更高;由于氧气的逸出出现了大量的气孔,样品质量明显减小^[24]。而后 Allen^[25]又在实验高炉中分别对 MSL-1和 JSC-1 两种模拟月壤进行了烧结实验。MSL-1 模拟月壤与 Apollo 11 的高 Ti 月海月壤具有相似的组成和性质^[26-29]。JSC-1 模拟月壤的化学成分、矿物组成、粒度分布和力学性质与 Apollo 14 登月点的低 Ti 月海月壤相似^[26-27, 30-31]。样品烧结至 $1100^\circ C$ 并保温 2~2.5 h 后成固体状,MSL-1 出现多条横向和垂向小裂缝,代表了热应力方向;JSC-1 则由于线性硅质结构的出现而对烧结物成型产生了一定的影响。

由此可见在这些实验中,烧结产物均成固体状,经分析发现钛铁矿完全被还原成金属 Fe,部分辉石中的 Fe 被还原,烧结后样品的密度发生了一定的变化,并具有一定的力学强度。但是由于在传统加热过程中热量传递不均匀,造成了局部热应力的集中,使得颗粒间的结合力较低,烧结产物中出现了细小的裂缝,从而达不到建筑材料的性能要求。由于能解决传统加热法在烧结过程中产生的缺陷,微波加热技术作为一种新技术受到了越来越多的重视。

1.2 微波加热烧结实验

微波在物质中传播呈现穿透、反射、吸收三个

特性。对于玻璃、塑料和瓷器,微波几乎是穿越而不被吸收;对于含水物质会吸收微波而使自身发热;而对金属则会反射微波。微波加热烧结是利用微波具有的特殊波段与材料的基本细微结构耦合而产生热量,材料在电磁场中的介质损耗使其材料整体加热至烧结温度而实现致密化。在微波烧结炉中采用微波发生器来代替常规加热源,与传统技术相比较,属于两种截然不同的加热方法,具有其独特的优势。首先微波加热过程简单,可快速加热至高温,它能以 $1000^\circ C/min$ 的加热速率加热到 $2000^\circ C$,加快了烧结动力学,使烧结时间大大缩短;其次增加反应速率,因为微波烧结具有很强的穿透能力,具有更快的扩散速率,它能深入到样品内部,使样品中心温度迅速升高并使烧结沿径向从里到外传播,从而实现整个样品的均匀加热。再次微波可以实现快速均匀加热而不会引起试样开裂或在试样内形成热应力,使得材料内部形成均匀的细晶结构和较高的致密性,从而提高了材料的机械性能。更重要的是微波加热能量利用率极高,比常规加热节能 60% 以上^[15, 32-34]。正是如此,微波加热技术具有广泛的发展前景。在月球上,可将太阳能或核聚变能方便地转化成微波能,因此,微波加热技术将成为月球资源利用中最佳的烧结加热技术工程。

月壤微波烧结实验设备选用的是微波频率为 2.45 GHz 的高温微波烧结炉。目前大多数微波加热烧结实验都是选用各种模拟月壤来进行的。Meek 等^[35]研究了与月壤样品化学成分相似的 2 种模拟物,一种以玻璃质为主,含有少量结晶物质;另一种玻璃和结晶物质几乎等同混合。将这 2 种模拟物分别置于 2.45 GHz 的微波炉中加热,且每种模拟物都分别加热至 4 个不同温度即 $936^\circ C$, $1050^\circ C$, $1150^\circ C$ 和 $1300^\circ C$ 。Allen 等^[1, 23, 36-37]利用模拟月壤 JSC-1 与 MSL-1 在 2.45 GHz 微波炉中进行了多次微波烧结实验。在空气中烧结温度为 $980\sim 1125^\circ C$ 之间,恒温 2~3 h 后缓慢冷却。Hill 等^[38]利用模拟月壤 JSC-1 与 MSL-1 进行了微波烧结实验。他们分别将 JSC-1 和 MSL-1 放置于常规的 2.45 GHz 微波炉中,以 $1000^\circ C/min$ 的加热速率加热到 $1200^\circ C$ 。

上述这些烧结实验都表明这些模拟物得到了有效的烧结,烧结产物中出现了单质铁,且烧结产物结构较均一,具有一定的强度;同时还显示温度越高烧结效果越好。但是,对于烧结过程中的热

效应还存在一些难以解释的地方, 他们试图按照颗粒表面的太阳风辐射孔隙来解释, 却忽略了月壤中大量出现的纳米金属 Fe 颗粒的重要性。

为调查月壤中纳米金属 Fe 颗粒与微波烧结之间的耦合关系, Тауб等^[15]利用 Apollo17 真实月壤进行了微波烧结实验, 并证实了这种相互作用。通过研究发现, 由于月壤中无论在颗粒表面还是在胶结质玻璃中都存在大量的纳米金属 Fe 颗粒, 而这些纳米金属 Fe 颗粒很细小 (3 ~ 33 nm), 表面积大, 因此, 在烧结过程中纳米金属 Fe 颗粒由微波反射体变成了导体, 能吸收微波能并快速产生大量的热能, 在烧结过程中出现了一个“瞬间液相”状态, 这将显著增大烧结产物的粘附力和强度, 使之易于成型。另外, 位于胶结质玻璃中的纳米金属 Fe 颗粒本身是不稳定的, 颗粒之间很容易发生熔融。

2 钛铁矿的微波烧结

通过对前人利用月壤样品或模拟月壤进行高温烧结的实验结果分析发现, 由于月壤样品或模拟月壤的成分复杂, 烧结产物虽然具有一定的强度, 但是其中被还原金属的含量还是相对较少, 烧结产物强度还是较差, 很难满足月球基地建设所需材料的性能要求。而在这些烧结实验中, 钛铁矿是最活跃的反应物质, 在足够高的温度下能够完全还原分解出金属铁。同时, 根据氧化物的自由能可以判断出离子键相对强弱顺序为 $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Al^{3+} > Ti^{3+} > Ti^{4+} > Si^{4+} > Na^{+} > Fe^{2+} > Fe^{3+}$ (图 1), 由此可见钛铁矿相对其他月壤矿物更容易被还原, 且钛铁矿是月壤中含量最高的金属氧化物, 故可作为高温烧结制备材料的首选矿物原料。因此, 结合月球矿物资源的分布, 作者认为利用月壤中富含的钛铁矿作为原料, 通过微

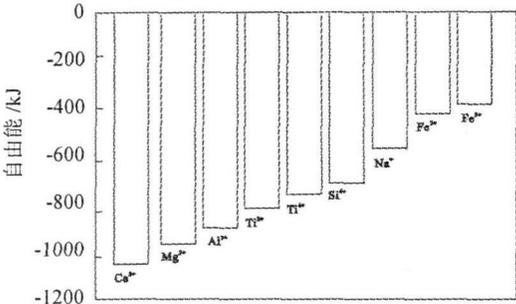


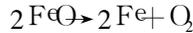
图 1 各氧化物离子键相对强弱比较 (据 Butt 1988)

Fig. 1. Comparison of different oxide electrovalent bonds

波高温烧结制备月球基地所需的建设材料不失为一个行之有效的途径。

2.1 钛铁矿的热力学分析

由于月表没有氧气, 处于还原环境, 铁呈低价态存在于钛铁矿 ($FeTiO_3$) 中^[39,40]。在真空环境中, 通过高温烧结很容易将钛铁矿中的金属铁分解出来, 其反应方程式如下:



根据热力学原理, 在标准状态下, 吉布斯自由能变 (ΔG^\ominus) 与焓变 (ΔH^\ominus), 熵变 (ΔS^\ominus) 以及热力学温度 (T) 之间的关系可表示如下:

$$\Delta G^\ominus = \Delta H^\ominus - T \cdot \Delta S^\ominus \quad (1)$$

非标准状态下的吉布斯自由能的 ($\Delta G_{T,P}$) 可根据化学反应等温方程 (范德霍夫等温式) 通过标准吉布斯自由能、温度以及反应商 (Q) 得出, 即:

$$\Delta G_{T,P} = \Delta G^\ominus + RT \cdot \ln Q \quad (2)$$

根据表 1 中的热力学参数, 通过方程式 (1) 和 (2) 可以计算出: 标准状态下钛铁矿和氧化亚铁的分解温度分别为 3789 °C 和 3674 °C; 在月球 10^{-14} 个标准大气压条件下, 它们的分解温度分别为 1177 °C 和 1068 °C (表 2)。

表 1 钛铁矿分解反应热力学参数^[41]

Table 1. Thermodynamic Parameters for infinite reduced reaction

	$FeTiO_3$	FeO	TiO_2	Fe	O_2
H^\ominus (kJ/mol)	-1246.41	-272.04	-944.75	0	0
G^\ominus (kJ/mol)	-1169.09	-251.5	-889.51	0	0
S^\ominus (J/mol)	105.9	60.75	50.33	27.15	205.04

表 2 不同压力条件下钛铁矿及氧化亚铁的理论分解温度 (°C)

Table 2. Theoretically reduced temperatures of infinite and ferrous oxide (°C)

	压力条件		
	1 atm	10^{-7} atm ^①	10^{-14} atm ^②
$FeTiO_3$	3798	1865	1177
FeO	3674	1728	1068

注: atm 表示标准大气压 $1 \text{ atm} \approx 10^5 \text{ Pa}$; ① 为地面模拟高真空环境的压力条件; ② 为月球的高真空环境。

2.2 钛铁矿的微波特性

目前地球上对钛铁矿进行高温烧结主要是为

了制取钛白 (TiO₂)，工业上广泛采用高炉和电炉两种方法来冶炼钛铁矿，而微波烧结钛铁矿还在实验研究阶段。在有关钛铁矿的微波烧结研究中^[42,44]，主要探讨了在微波场作用下粒度与还原剂对钛铁矿还原效果的影响。研究结果表明^[45,46]，钛铁矿具有很好的吸波特性和微波场中有很高的活性，因此很短的时间内可以将其加热至较高温度；同时，微波场中产生的活化反应能有效促进钛铁矿的烧结。

物质在微波场中的加热特性可以用 3 个基本参数来描述，即功率密度 (P)、半衰深度 (D_H) 和加热速率 (ΔT)。功率密度 P 是指电磁场中单位体积物质所吸收的电磁波能量；半衰深度指电磁场能量衰减为表面的一半时在物质中的穿透深度。在微波加热中它的值通常限定被加热物体的尺寸厚度；加热速率则指被加热物体的温度升高速率。它们与物体本身的介电性质直接相关，可分别表示为：

$$P = K E^2 k' \tan \delta \quad (1)$$

$$D_H = \frac{3\lambda_0}{8.68\pi k' \tan \delta} \quad (2)$$

$$\Delta T \approx (8 \times 10^{-12}) \cdot \frac{E^2 k' \tan \delta}{\rho C_p} \quad (3)$$

其中，K 为常数；f 为频率；E 为电场强度；k' 为相对介电常数；tanδ 是介电损耗；λ₀ 为波长；ρ 为密度；C_p 为热容^[15]。

钛铁矿物理性质的测量结果表明，其密度约

为 4.39 g/cm³，相对介电常数为 54.3 介电损耗为 0.6 热容为 108.9 J/K。若采用频率为 2.45 GHz 的微波烧结炉进行烧结，电场强度为 300 V/cm 时^[15]，其升温速率约为 120 °C/s。

通过以上分析可知，在较低温度下可以很快将钛铁矿中的金属铁还原出来。因此，利用钛铁矿作为原料，通过微波高温烧结制备月球基地所需材料是一个值得深入研究的方案。

3 展 望

利用钛铁矿进行微波烧结是月球矿物材料利用中的一个重要研究问题。为了能够制备可供月球基地建设使用的各种结构材料，就必须对钛铁矿的微波烧结实验进行深入详细的研究探讨。首先，要深入研究钛铁矿的矿物物理性质，特别是热学性质和电学性质与微波之间的关系，以便解析钛铁矿对微波的吸收原理及其微波烧结机理，了解微波烧结过程中的热化学和动力学问题。其次，为了使烧结产物满足月球基地建设所需结构材料的性能要求，必须要详细研究烧结温度和钛铁矿的粒度与烧结工艺条件以及金属还原率之间的关系，并接合月球的实际情况，确定最佳的烧结温度和钛铁矿粒度的选择。最后，对烧结产物进行较详细的化学成分分析和一定的力学、物理性能以及辐射防护能力方面的测试，将能更好的对比说明烧结工艺对烧结材料性能的影响。

参 考 文 献:

- [1] Allen C C. Bricks and ceramics [R]. NASA Technical Report 1998 23-24.
- [2] Lindsey N J. Lunar station protection: Lunar regolith shielding [J]. International Lunar Conference 2003 143-149.
- [3] Duke M B, Blair B R, Diaz J. Lunar resource utilization: Implications for commerce and exploitation [J]. Adv Space Res 2003 31: 2413-2419.
- [4] Kris Zachy, Kenji Huang, Michael McGehee, Adam Neugebauer, Suzy Park, Michael Quayle, Rebecca Sichel, George Cooper. Lunar soil mining using gas flow [C]. RASC-AL 2004 1-15.
- [5] Donald Rapp. The problems with lunar ISRU [J]. The Space View 2006.
- [6] Heiken G, Vaniman D, French BM. Lunar Sourcebook—A User's Guide to the Moon [M]. London: Cambridge University Press 1991 285-356.
- [7] Taylor L A. Resources for a lunar base: Rocks, minerals, and soil of the moon [R]. 2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities 1992 361-377.
- [8] Schmidt W, Koenigs D, Hanovskii N. On the exploitation of lunar material resources [J]. Eum Conf 2000.
- [9] 欧阳自远. 月球科学概论 [M]. 北京: 中国宇航出版社 2005 151-157.
- [10] Taylor L A. Magnetic beneficiation of highlands soils: Concentrations of anorthite and agglutinates [J]. LPSC 1990 XX:1243-1244.
- [11] Haskin L A, Colson R Q. Lunar resources toward living off the lunar land [A]. Lewis J, Triffitt T. Proc First UA/NASA Annual International Sympoq [C]. 1989 11-19.
- [12] Taylor L A, McKay D S,桂花 J, Patchen A, Wemworth S, Oerter R, Jerde E. Magnetic beneficiation of high-Ti mare basalts. Petrographic

- analyses [J. LPSC 1992 XXIII 1415-1416.
- [13] Taylor L A Taylor D S Unique properties of lunar soil for in situ resource utilization on the moon [J. Lunar and Planetary Science 2005 XXXVI 1812
- [14] Taylor L A Hot-pressed iron from soil [J. II Space Resources Roundtable 2000 7005
- [15] Taylor L A Meek T T Microwave sintering of lunar soil Properties theory and practice [J. Journal of Aerospace Engineering 2005 18(3): 188-196
- [16] Eimer B C Taylor L A Lunar regolith soil and dust mass mover on the moon [J. Lunar and Planetary Science 2007 XXXVIII 1662-1663
- [17] Taylor L A Magnetic beneficiation of high-Ti mare soils Concentrations of ironite and other components [J. LPSC 1990 XXI 1245-1246
- [18] Taylor L A Chambers J G Allen Patches Evaluation of lunar rocks and soils for resource utilization Detailed image analysis of raw materials and beneficiated products [J. LPSC 1993 XN 1409-1410
- [19] Taylor L A Higgins S J Lunarm ineral feedstocks from rocks and soils X-Ray digital imaging in resource evaluation [J. LPSC 1994 XXV 235-236
- [20] Cameron E N Apollo 11 ironite revisited [J. WCSAR-AR3-9201-3 1992 3 2423-2433
- [21] Huison H Notes on lunar ironite [J. NASA Space Engineering Research Center for Utilization of Local Planetary Resources 1989 N91-25203 17-25
- [22] Taylor G J Cosmochemistry and human exploration [J. Planetary Science Research Discoveries 2004 4 1-12
- [23] Taylor L A McKay D S An ironite feedstock on the moon beneficiation of rocks versus soil [J. LPSC 1992 XXIII 1411-1412
- [24] Allen C C McKay D S Morris R V Hydrogen reduction of lunar stimulant glass [J. The Lunar and Planetary Science Conference 1992 23 21-22
- [25] Allen C C Graf J C McKay D S Sintering bricks on the moon [A]. ASCE Engineering Construction and Operation in Space [V]. C. New York: ASCE, 1994 1220-1229
- [26] 郑永春. 模拟月壤研制与月壤的微波辐射特性研究 [D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所/中国科学院研究生院(博士论文) 2005 44-51.
- [27] 郑永春, 王世杰, 刘建忠, 李泳泉, 邹永廖. 模拟月壤研制的初步设想 [J. 空间科学学报, 2005 25(1): 70-75.
- [28] Taylor L A McKay D S Carrier W D Carter J L Weiblen P. The nature of lunar soil Considerations for simulants [J. Space Resources Roundtable 2004 VI 6024.
- [29] Taylor L A The need for lunar soil simulants for ISRU studies [J. Space Resources Roundtable 2004 VI 1-4
- [30] Sen S Ray C S Reddy R G Processing of lunar soil simulant for space exploration applications [J. Materials Science and Engineering 2005 A413-414 592-597
- [31] McKay D S Carter J L Boles W W. JSC-1: A new lunar soil simulant [J. Engineering Construction and Operations in Space 1994 N 857-866.
- [32] 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): 20-22
- [33] 马金龙, 童学锋, 彭虎. 烧结技术的革命——微波烧结技术的发展及现状 [J. 新材料产业, 2001 11 30-32
- [34] Taylor L A Hill E Liu Y Unique lunar soil properties for ISRU microwave processing [J. Space Resources Roundtable 2005 VII 2075
- [35] Meek T T Vanman D T Blake R D Godbole M J Sintering of lunar soil simulants using 2.45 GHz microwave radiation [J. Lunar and Planetary Science 1987 XVII 635-636
- [36] Allen C C Morris R V McKay D S Experimental reduction of lunar mare soil and volcanic glass [J. Geophysical Research 1994 99 23173-23185
- [37] Carlton C Hines J A Altmir D A McKay D S Sintering of lunar simulant basalt [J. LPSC 1992 XXIII 19-20
- [38] Hill E Taylor L A Liu Y James M D Microwave processing of lunar soil simulants JSC-1 and MLS-1 [J. 68th Annual Meteoritical Society Meeting 2005 5197
- [39] Niklas Jarvström Cengiz Toklu Design and construction for self-sufficiency in a lunar colony [R]. The International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics 2004 1-12
- [40] Temple D G Goff M T Martin J D Agresti D Boles W W. Microwave induced carbothermic reduction of iron oxides in lunar soil simulant [J. ASCE 2006 1-6
- [41] 王明华, 徐端钧, 周永秋, 张殊佳修订. 普通化学(第五版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002 392-395
- [42] 黄孟阳, 彭金辉, 张世敏, 孙艳, 汪云华, 黄铭, 范兴祥. 微波加热还原钛铁矿制取富钛料新工艺 [J. 钢铁钒钛, 2005 26(3): 24-28
- [43] 黄孟阳, 彭金辉, 黄铭, 张世敏, 李雨, 雷鹰. 微波场中不同配碳量钛铁矿的吸波特性 [J. 中国有色金属学报, 2007 17(3):

476-480

- [44] 黄孟阳, 张世敏, 彭金辉, 雷鹰, 黄铭, 杨坤彬. 微波场中钛精矿不同粒度吸波特性研究[J]. 金属矿山, 2007 373(7): 42-44
- [45] 彭金辉, 杨显万. 微波能技术新应用[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1997.
- [46] Kelly R M, Rowson N A. Microwave reduction of oxidised ilmenite concentrates[J]. Minerals Engineering 1995 8 1427-1438

A PRELIMINARY DESIGN FOR PRODUCING CONSTRUCTION MATERIALS FOR THE LUNAR BASE: MICROWAVE SINTERING ILMENITE OF LUNAR SOIL

TANG Hong², WANG Shi-jie¹, LI Xiong-yao¹, LI Peng², CHEN Feng²

- (1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract To construct the lunar base is an important target of the “Human Returning to moon” program. And a lunar base will require large amounts of construction materials. Some scholars have made various experiments on H-T sintering real lunar soil samples and lunar simulants to analyze different methods of producing the construction materials by utilizing lunar soil mineral resources. But the properties of these sintering products are hard to meet the practice demand due to the complicated composition of lunar soil. In addition, the microwave sintering technique possesses many advantages which can not be compared by those of the traditional sintering techniques. So it is suitable for the lunar resource utilization. Considering the ilmenite content in lunar soil and through the thermodynamics analysis, we put forward a preliminary design of producing construction materials for the lunar base, that is microwave sintering ilmenite of lunar soil.

Key words lunar base; construction materials; microwave sintering; lunar simulant; ilmenite