

## 高温微波冶金反应器的研究现状及发展趋势

彭金辉<sup>1,2,3</sup>, 刘秉国<sup>1,2,3</sup>, 张利波<sup>1,2,3</sup>, 周俊文<sup>1,2,3</sup>, 夏洪应<sup>1,2,3</sup>, 张泽彪<sup>1,2,3</sup>

- (1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093;
2. 昆明理工大学 非常规冶金省部共建教育部重点实验室, 昆明 650093;
3. 昆明理工大学 云南省微波能应用及装备技术工程实验室, 昆明 650093)

**摘要:** 在简述微波加热基本原理的基础上, 评述高温微波冶金反应器近年来的国内外研究现状, 分析目前高温微波冶金反应器存在的主要问题, 指出由于高温条件下微波系统的连续稳定性、适用于微波场的大尺寸高温反应内腔及高效的反应工程设计等难题, 除小规模微波设备外, 能够满足高温、高效、大功率的微波冶金反应器仍是空白, 解决高温微波冶金反应器工业化应用在微波高温陶瓷材料、大功率微波发生器和物料温度测试等方面存在的主要问题, 提高微波能的转换效率, 研制、设计连续、稳定的大功率高温微波冶金反应器是微波工业化实践的关键。

**关键词:** 单模微波冶金反应器; 多模微波冶金反应器; 微波; 高温; 研究现状

**中图分类号:** TN05

**文献标志码:** A

## Research status and trend of high-temperature microwave metallurgy reactor

PENG Jin-hui<sup>1,2,3</sup>, LIU Bing-guo<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Li-bo<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Jun-wen<sup>1,2,3</sup>,  
XIA Hong-ying<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Ze-biao<sup>1,2,3</sup>

- (1. Faculty of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Key Laboratory of Unconventional Metallurgy, Ministry of Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
3. Engineering Laboratory of Microwave Energy Application and Equipment Technology, Yunnan Province, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** The research progress of high-temperature microwave metallurgy reactor was reviewed based on the brief account of the theory of microwave. The exiting problems of high-temperature microwave metallurgy reactor were discussed, which include the stability of microwave metallurgy reactor on the conditions of high temperature, large size high temperature cavity to be the same with microwave fields and design of react engineering. So, it is blank to meet the need of high temperature and high power microwave reactor except small scale microwave equipment. To prepare microwave high-temperature special ceramics, the high-power microwave generator and temperature detection are important. It is conducted that the conversion efficiency of microwave energy, high power microwave metallurgy reactor continuous and steady are the key problems to be overcome for improving the industrial applications.

**Key words:** single model microwave metallurgy reactor; multi-model microwave metallurgy reactor; microwave; high-temperature; research status

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(51090380); 国家自然科学基金重点项目(50734007); 云南省科技计划项目(2007GA002); 校企预研基金项目(KKZ4201152010)

**收稿日期:** 2010-05-20; **修订日期:** 2011-07-19

**通信作者:** 彭金辉, 教授, 博士; 电话: 0871-5191046; E-mail: Jhpeng\_ok@Yeah.net

微波加热作为一种绿色高效的加热方法,与常规的加热方法相比,微波加热具有选择性加热、升温速率快、反应时间短、易于自动控制、可降低化学反应温度等优点。微波高温加热技术是指利用微波能量将材料加热到 400 °C 以上,并对材料进行烧结、合成、改性或者热处理的一类技术<sup>[1]</sup>。微波高温加热技术自 TINGA 等<sup>[2]</sup>提出以来,经过数十年的探索和研究,尽管已经在某些领域取得了突破性进展<sup>[3]</sup>,在一些方面也得到了一定程度的产业化应用,并显示出了良好的经济性<sup>[4-5]</sup>。但鉴于高温条件下微波系统的连续稳定工作、适用于微波场的大尺寸高温反应内腔及高效的反应工程设计等难题,目前除了改装的家用微波炉和小规模的微波烧结设备以外,能够满足高温、大功率、连续生产、良好的“三传”性能等的微波冶金反应器还是空白。

尽管改装的家用微波炉能够为研究者在基础理论研究方面提供帮助,但改装的家用微波只是对其进行保温、隔热等改装。这种微波炉存在以下缺点:1) 功率密度较低,对于一些场强要求较高的实验无法实现,而且难以准确测定反应体系的温度;2) 微波加热主要集中在炉腔的底部托盘上,因而对物料的加热不均匀;3) 间歇式加热,仅能进行较短时间的连续工作,不能满足高温冶金过程长时间的持续反应,导致试验的再现性差;4) 功率调节采用档位控制,所谓的低功率工作,实质上是磁控管的间歇式工作,无法达到实验参数的准确控制,因此,采用家用微波炉作为微波反应器,其结果的重复性差、规模小、安全性差、实验规范性低,很难进行经济评价。国外的微波设备生产企业如德国 IBF、英国 e2v、美国 CEM 等公司主要致力于大功率微波元件、射频技术和小型微波实验设备的开发,虽有很强的技术实力,但对于高温、大功率、连续生产的微波冶金反应器的研究尚未见报道。

本文作者在简述微波加热基本原理的基础上,综述了高温微波冶金反应器的国内外研究现状,分析了目前高温微波冶金反应器存在的主要问题,展望了今后的研究、开发方向。

## 1 微波加热的基本原理

微波是一种电磁波,其频率在 300 MHz~300 GHz 之间。微波辐射介质材料时,介质材料与微波电磁场相互耦合,会形成各种功率耗散从而达到能量转化的目的。其中离子传导及偶极子转动是微波加热的主要原理<sup>[6]</sup>。在微波场中,一个极性偶极子分子总是随着

迅速改变的电磁场方向调整其取向,如图 1 所示。

材料能被加热的前提是材料必须具备以下两种特性<sup>[7]</sup>:1) 被加热材料的表面不能反射微波能,即材料的标准阻抗为 1;2) 被加热材料能不可逆地将入射的微波能转化为自身的热能。单位体积材料吸收的微波能( $P$ )可以表示为

$$P = \sigma |E|^2 = 2\pi\epsilon_0\epsilon_c'' |E|^2 = 2\pi f\epsilon_0\epsilon_r' \tan\delta |E|^2 \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为整个材料体系的有效电导率;  $E$  为腔体中的电场强度;  $\epsilon_c''$  为介质在微波场中的有效损耗因子;  $\epsilon_0$  为无外电场时材料的介电常数;  $\epsilon_r'$  为相对介电常数;  $f$  为微波频率;  $\tan\delta$  为介质损耗角正切,反映了介质吸收微波能的能力。可见,材料的介电性质( $\epsilon_r'$ 、 $\epsilon_c''$  和  $\tan\delta$ )在很大程度上反映了其对微波的吸收能力,对高磁敏感性材料,必须考虑磁场的影响,式(1)需校正为<sup>[8]</sup>

$$P = 2\pi f\epsilon_0\epsilon_r' \tan\delta |E|^2 + 2\pi\mu_0\mu_c'' H^2 \quad (2)$$

式中:  $\mu_0$  为自由空间中的磁损耗因子;  $\mu_c''$  为有效磁损耗因子;  $H$  为磁场强度。有研究者<sup>[9]</sup>根据非 Debye 的理论,导出了非 Debye 型弛豫介质吸波特性的计算公式为

$$P = 0.5\omega\epsilon_r'' |E|^2 + 0.5E^2 \left[ \cos^2(\omega t) \frac{\partial \epsilon_r'}{\partial t} + \cos(\omega t) \sin(\omega t) \frac{\partial \epsilon_r''}{\partial t} \right] \quad (3)$$

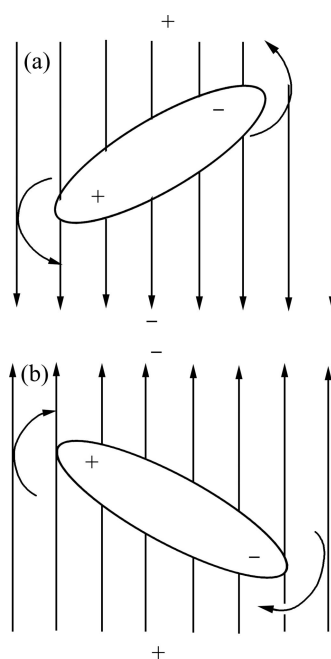


图 1 一个偶极子在电磁场中的取向调整

Fig.1 Realignment of one dipole in electromagnetic field:  
(a) Polar molecules changes in positive electromagnetic field;  
(b) Polar molecules changes in reverse electromagnetic field

式(3)揭示了微波与颗粒物质相互作用的多样性, 可以用来解释微波辐照下物质发生变化的许多特性, 并用式(3)分别仿真了镍铁矿、氧化铝和橡胶的吸波特性。材料吸收微波能转化成热能后的升温速率为

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'_r \tan \delta |E|^2}{\rho c_p} \quad (4)$$

式中:  $T$ 、 $\rho$ 、 $c_p$  和  $t$  分别为材料的温度、密度、恒压质量比热容和升温时间。材料的介电性质对微波在其内部的穿透深度有重要影响, 即:

$$D = \frac{3\lambda_0}{8.686\pi \tan \delta (\varepsilon'_r / \varepsilon_0)^{0.5}}$$

或

$$D = \frac{C}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' [\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1]^{0.5}}} \quad (5)$$

式中:  $\lambda_0$  为入射微波的波长;  $D$  为入射微波能减少一半时的材料深度或  $E$  衰变为  $E^{-1}$  处的距离<sup>[10]</sup>,  $D$  的大小将决定材料加热和熟化的均匀性。可见, 高频率微波能和高介电损耗材料只能加热材料表面, 而低频率微波能和低介电损耗材料将产生体加热。

## 2 微波反应器的基本组成

一般认为, 将由微波功率源经微波传输系统传输而来的微波功率, 以最佳的匹配和最小的反射耦合, 并形成特定的电场分布, 使之能与被加工物质产生最佳相互作用效果的装置或终端相互作用系统称为微波反应器<sup>[11]</sup>。微波反应器主要由微波发生器、波导、微波能应用器、送料系统和控制系统等几部分组成<sup>[12]</sup>。其结构简图如图 2 所示。

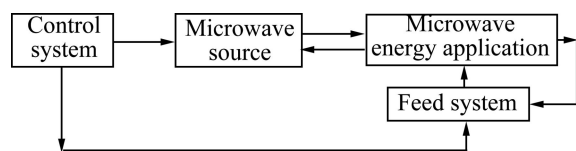


图 2 微波反应器结构简图

Fig.2 Structural diagram of microwave reactor

高温微波反应器中, 样品温度测量是微波应用遇到的一个主要问题。光学高温测量仪和热电偶可用于测量高温。非接触式的红外测温仪测量温度时最大优点是对原温度场不会产生影响, 但该测温方式记录的

是材料表面的温度, 测量温度常低于材料内部的温度。另外, 红外测温仪在温度低于 600 °C 时无法反映被测材料内部的真实温度, 否则只能采用分段测温, 而且不利于组成自动控制温度测量系统。用热电偶测量微波加热样品的温度, 可在关闭微波功率时, 将热电偶直接插入热的材料内部测量, 误差一般可在  $\pm 2\%$  之内<sup>[13]</sup>, 而对微波透明体样品则大于  $\pm 2\%$ <sup>[14]</sup>。也可以采用带屏蔽套的热电偶来在线连续测量样品温度, 但需注意的是若热电偶与样品间起弧, 会导致测量失败<sup>[15-16]</sup>。

## 3 高温微波冶金反应器的研究进展

高温微波冶金反应器是反应温度高于 400 °C<sup>[11]</sup>、能实现微波高温烧结、煅烧分解、还原和合成等作用的系统。高温微波冶金反应器根据反应腔体特点可以分为单模腔式高温微波冶金反应器、波导型高温微波冶金反应器和多模腔式高温微波冶金反应器等<sup>[11]</sup>。目前, 关于模腔式高温微波冶金反应器的研究较多。

### 3.1 单模腔式高温微波冶金反应器

单模腔式微波冶金反应器是基于在标准矩形波导中激起单一基模传输的一种反应器。一个理想的  $TE_{101}$  单模谐振腔(见图 3)做成的微波冶金反应器能够在内腔中心处建立起很高的电场强度, 如果加长波导长度方向的尺寸, 取长度方向上的半波长数为 3, 即可做成一个  $TE_{103}$  矩形单模谐振腔微波冶金反应器。

$TE_{103}$  矩形谐振腔微波冶金反应器是一种结构简单、易调节、易控制、场分布稳定、场强密度较高、空腔品质因数高(腔体损耗小)的单模微波冶金反应器。是目前发展最成熟、应用最广泛的单模腔式微波冶金反应器<sup>[11]</sup>。

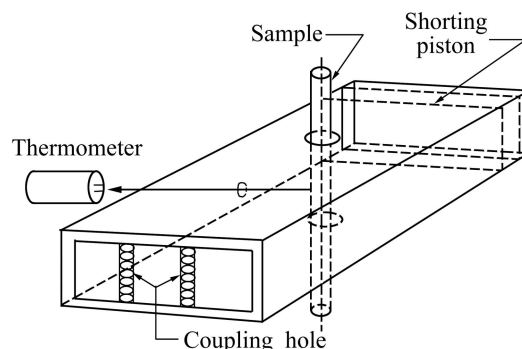


图 3  $TE_{101}$  单模谐振腔简图

Fig.3 Diagram of  $TE_{101}$  single-mode cavity

介于与  $TE_{103}$  矩形谐振腔相匹配的 BJ-22 标准波导构成的  $TE_{103}$  单模腔内的微波场均匀区域太小, 作为微波烧结腔体较难进行较大尺寸试样的烧结试验, 周健等<sup>[17]</sup>设计、研制了改进的  $TE_{103}$  单模腔高温微波烧结炉系统。改进后的  $TE_{103}$  单模腔的空腔尺寸为  $150\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times (160 \sim 200)\text{ mm}$ , 通过计算该腔的均匀场区为长轴为  $41.4\text{ mm}$ 、短轴为  $18.4\text{ mm}$  的椭圆区, 该腔可用于长条形试样烧结。通过微波测量, 该腔的空腔品质因数  $\geq 550$ ,  $Al_2O_3$  陶瓷加载后的腔体品质因数  $Q \leq 250$ , 系统驻波比  $\leq 1.35$ , 升温速率可达  $450 \sim 500\text{ }^\circ\text{C/min}$ , 最高烧结温度可达  $2\,000\text{ }^\circ\text{C}$ , 可实现  $Ar$ 、 $H_2$  和  $N_2$  等多种气氛保护控制, 并在该系统中完成了  $Al_2O_3$  陶瓷材料的烧结试验研究。JANNEY 等<sup>[18]</sup>也对美国橡树岭国家实验室的大型高温微波烧结炉进行了改进。通过功率为  $200\text{ kW}$  的速控管, 将微波频率从原来的  $2.45\text{ GHz}$  提高到  $28\text{ GHz}$ , 使微波波长与体积  $0.56\text{ m}^3$  的腔体尺寸之比从原来的  $1:3$  提高到  $1:100$ , 从而提高了腔内电场的均匀性, 使电场的波动不会超过  $4\%$ 。

另外, 针对单个  $TE_{103}$  谐振腔构成的单模腔式高温微波冶金反应器的加热区域较短的弊端, 研究者将多个单模谐振腔串联起来, 每个单模谐振腔分别用微波源和传输系统馈送和控制微波功率, 构成了一套级联式单模腔式高温微波冶金反应器, 如图 4 所示。该系统适合于中试或连续生产。其特点是模块化结构, 成本较低, 适应性强<sup>[11]</sup>。

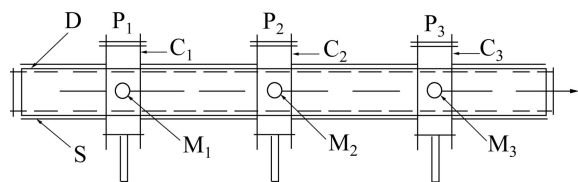


图 4 联级式单模谐振腔系统示意图

**Fig.4** Schematic diagram of union-stage single-mode cavity system:  $P_1, P_2, P_3$ —Microwave source and transmission system;  $C_1, C_2, C_3$ —Different states of single-mode cavity;  $S$ —Shield for choke tube;  $D$ —Medium connecting pipe;  $M_1, M_2, M_3$ —Holes for reference monitor

单模腔式高温微波冶金反应器场强集中, 其谐振腔中心处可建立起很高的电场强度, 功率密度高, 可实现快速升温, 用于小尺寸陶瓷材料的烧结、连接等非常方便。但是由于单模腔式高温微波冶金反应器腔体体积小, 均温区小, 只能进行较小尺寸试样的分批微波处理, 很难用于大尺寸材料的加工和连续生产,

所以其适用范围有限<sup>[11, 19]</sup>。目前, 尽管用单模腔式高温微波冶金反应器成功制备了氧化铝、氧化锆、PZT 和氮化钒等高科技精细陶瓷材料, 但多局限于实验室阶段, 工业化微波反应器尚处于探索和研制阶段。

### 3.2 波导型高温微波冶金反应器

矩形波导谐振腔微波反应器是由矩形波导的一端为耦合膜片, 另一端为短路活塞构成, 如图 5 所示。

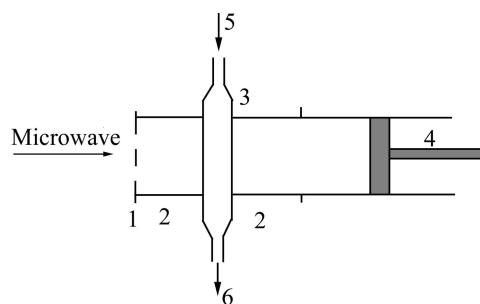


图 5 矩形波导型微波反应器结构示意图

**Fig.5** Schematic diagram of rectangular waveguide microwave reactor: 1—Coupled-mode chip; 2—Rectangular waveguide; 3—Quartz tube; 4—Short piston; 5—Gas inlet; 6—Reaction gas outlet

该反应器包括矩形波导谐振腔、石英反应管以及耦合膜片 3 部分组成。原料气体通过石英管流进反应器, 经过化学反应后流出反应器; 微波能量通过耦合膜片馈入谐振腔, 调节短路活塞可以使谐振腔达到谐振状态, 使得馈入谐振腔的微波能量最大; 馈入谐振腔的微波能量作用于石英管内的原料气体, 使其发生化学反应。

孙永志和杨鸿生<sup>[20]</sup>通过改变矩形波导谐振腔微波反应器的结构尺寸如耦合膜片的形状、尺寸, 反应管的直径、管壁厚度、材料和位置, 利用 HFSS 软件计算不同结构尺寸反应器的  $S$  参数, 得到了最优结构尺寸的反应器。研究表明, 反应管和短路活塞位置会影响反应器内的电磁场分布, 因而直接影响微波反应器的工作。在反应管位置  $Z_0$  为  $106\text{ mm}$ , 短路活塞位置  $L_0$  为  $146\text{ mm}$  的最优结构尺寸反应器中, 反应管以及内部的甲烷气体处在电场最强的位置且场分布均匀。

波导型高温微波冶金反应器的优点是结构简单, 容易制造, 但局限于波导的尺寸, 只能用于处理尺寸较小的细杆或薄带材料, 而且由于波导中的电场在  $Z$  方向按指数规律衰减, 其衰减常数与被处理材料的有效损耗因子有关, 从而导致反应的不均匀性。

### 3.3 多模腔式高温微波冶金反应器

多模腔式微波反应器是应用最广泛、理论和实践最为成熟的微波反应器, 适合于多种块状材料或化学溶液的分批次间隙处理和中试规模的生产应用。反应器的主体是由金属壁封闭的矩形多模谐振腔体, 其三维尺寸主要由被处理物质的尺寸, 功率密度的高低和腔体内模式的多少及分布来确定。

由于材料性能受高温条件的制约, 高温微波冶金反应器的研制开发仍处于发展阶段, 国内外的微波设备生产企业如美国著名的 CEM 微波仪器公司、澳大利亚的 CSIRO 公司、中国的上海新仪公司等多致力于低温微波反应器的研制与开发。目前, 高温微波冶金反应器研究主要集中在高温微波烧结炉、高温微波热分解炉和微波马弗炉等方面。如 JANNE 和 KIMMERY<sup>[21]</sup> 设计出最高频率为 28 GHz 的多模腔式高温微波冶金反应器, 并用于材料烧结, 其场强分布不均匀性小于 4%。加拿大 INDEXABLE TOOLS LTD 研制设计出了多模腔式高温微波冶金反应器, 并用于氮化硅刀具的烧结生产<sup>[22]</sup>。针对传统马弗炉耗时长, 易产生污染烟雾等缺点, 美国 CEM 公司<sup>[23]</sup>开发了 Phoenix 系列微波马弗炉。该高温微波反应器操作温度可达 1 200 °C, 具有升温速度快且易控制的特点, 与传统马弗炉相比可以节约 97% 的时间, 可用于无机物的灰化、熔融、熔合等热处理。

国外企业生产的高温微波冶金反应器尽管性能好, 但价格昂贵, 如德国利恒公司生产的 MKE-2.45/800 型实验室用双频微波加热炉市场价格高达 3 万美元<sup>[14]</sup>。针对上述问题, 我国武汉工业大学、中科院金属研究所、昆明理工大学微波应用研究所、长沙隆泰微波热工有限公司等单位也相继开展了高温微波冶金反应器的研制工作。

中国科学院沈阳金属研究所<sup>[17]</sup>研制出了 MFM-863 系列高温微波烧结炉, 其主要技术指标如下: 电源 380 V; 微波功率 0.5~10 kW 连续可调; 工作频率 2 450 MHz; 工作温度大于 1 800 °C; 烧结区大小 120 mm×120 mm; 每炉平均时耗 0.5~2 h。该设备主要应用于陶瓷烧结、陶瓷/金属焊接、原料合成、超细粉制备、快速充气、热处理等方面。

车磊等<sup>[19]</sup>自行设计了输出功率为 2.4 kW, 频率为 2.45 GHz, 加热腔有效尺寸为 500 mm×500 mm×500 mm 的 YC-II 多模双频高温微波烧结炉, 反应器简图如图 6 所示。该高温微波烧结炉可以实现气氛烧结, 最高温度可以达到 1 800 °C 以上。本文作者利用该微波烧结炉完成了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZrO<sub>2</sub> 和 SiC 等陶瓷材料的微波烧结, 并在比常规合成温度低 200 °C 的条件下完成

了 La<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub> 的高温合成。后来, 针对该高温烧结炉温度无法精确控制, 容易出现过烧等缺陷, 马宁等<sup>[24]</sup>又用单片机实现了该高温微波烧结炉的温度自动控制, 改进后的烧结炉温度的控制精度为 ±1 °C。

邹继兆等<sup>[25]</sup>根据试验条件的需要研制了多功能多模腔式真空高温微波冶金反应器, 设备简图如图 7 所示。该反应器采用多单元微波源的双正交排列、定向聚焦辐射、高场强微波谐振腔, 腔体尺寸为 450 mm×450 mm×400 mm, 微波源功率在 0~6 kW 范围内连续无级可调。在气氛保护下, 该微波反应器碳化

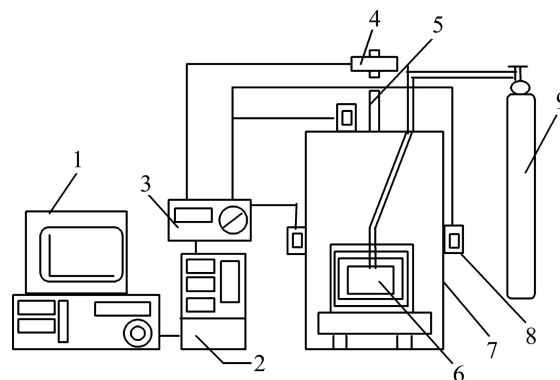


图6 多模腔式高温微波烧结炉结构简图

Fig.6 Schematic diagram of structure of multi-cavity-type high-temperature microwave sintering furnace: 1—Computer; 2—Automatic control panel; 3—Manual control panel; 4—Optical thermometer; 5—Temperature hole; 6—Insulation box; 7—Heating box; 8—Microwave generator; 9—Tank

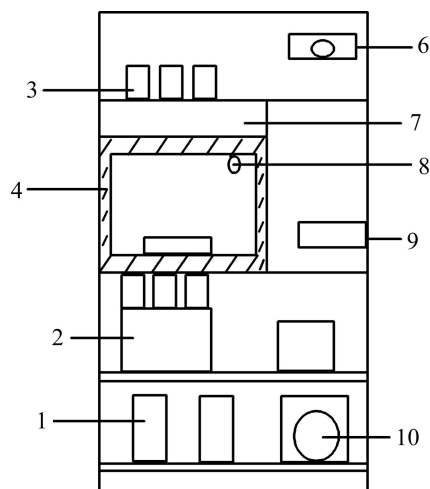


图7 真空高温微波反应器结构简图

Fig.7 Schematic diagram of structure of vacuum high-temperature microwave reactor: 1—Microwave power; 2—Electrical box; 3—Waveguide; 4—Insulation; 5—Cooler; 6—Intake; 7—Microwave cavity; 8—Taken out port; 9—Inlet; 10—Vacuum pump

硅的加热温度在 20 min 内达到 1 700 °C, 碳化钨的烧结致密度达到 96% 以上。微波谐振腔内中心约 150 mm 直径区域内电场分布均匀, 该腔体不但弥补了单模腔式结构尺寸限制的问题, 也改善了多模腔结构电场分布均匀性不高的缺点。另外, 对于如何获得较大较均匀的微波区域问题, 中科院沈阳金属所和七七二厂提出的会聚开线激励介质多模谐振方案尽管在实现高场能密度与场均匀分布统一方面取得了进展<sup>[26]</sup>, 但尚不太完善, 还需要进一步的研究。

多模腔式高温微波冶金反应器由于采用封闭的金属空腔, 因此只能间歇地处理物料, 仅适合于实验室研究或中试批次的小规模生产。根据大规模生产的需要, 研究人员又设计了连续传送箱式多模高温微波冶金反应器, 采用该反应器不仅实现了连续作业, 且其处理的均匀性较单台多模腔式高温微波冶金反应器间断处理方式有较大的改善。连续传送多模腔式高温微波冶金反应器简图如图 8 所示<sup>[11]</sup>。

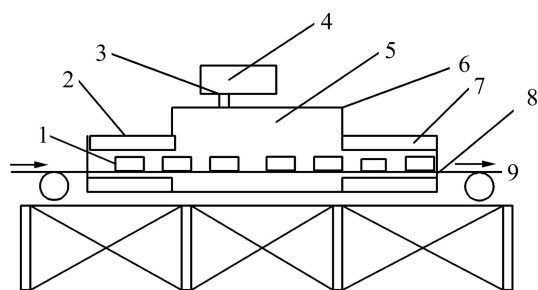


图 8 连续传送多模腔式高温微波反应器简图<sup>[11]</sup>

**Fig.8** Schematic diagram of high temperature continuous transmission multimode cavity microwave reactor<sup>[11]</sup>: 1—Sample; 2—Microwave input suppressor; 3—Microwave feed part; 4—Microwave energy; 5—Cabinet opening; 6—Multimode chamber; 7—Output microwave suppressor; 8—Belt and machinery; 9—Control system

近年来, 随着微波加热技术的发展, 国内外许多企业研制开发了中试多模腔高温微波冶金反应器, 并在一定领域得到了小规模工业化应用。

2000 年, 日本奥村和平等研制开发出可以应用到陶瓷工业的多模高温微波烧结设备, 设备装机容量均大于 20 kW, 最大的 1 台连续式微波高温烧结隧道窑的微波输出功率为 80 kW, 长 14 m, 烧成温度 1 400 °C; 装备多管系统的微波钟罩窑的烧成温度可达到 1 650 °C。长沙隆泰科技有限公司研制开发了一种连续竖式的多模高温微波加热装置, 并用于氮化钒的高温烧结合成。将  $V_2O_5$  和碳素材料的混合物加热到 1 500 °C 以上实现碳热还原反应, 并完成反应物的烧结

过程, 能耗仅相当于传统电阻式加热的 1/3<sup>[27]</sup>。

昆明理工大学微波应用研究所针对微波特殊的能量传递方式要求载体(即冶金物料的容器)具有介电损耗小、抗热震性好和力学性能优良等特点, 而传统冶金物料载体使用温度低、抗热震性差、材料成本高、加工难度大、易破碎等弊端, 选用介电损耗小的  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$  工业陶瓷原料为基体, 采用合理的粒度和成分配比, 特殊的烧结工艺发明了微波冶金物料专用载体, 解决了高温微波冶金反应器的重大瓶颈问题<sup>[28]</sup>。该载体微波介电损耗低、使用温度高(分别达到 1 700 和 1 680 °C)、抗热震性好(1 000 °C 水冷次数分别达到 9.8 和 11 次)、热膨胀率低(20~1 000 °C 系数仅为  $2.5 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ )、抗弯强度高(1 250 °C 下的分别为 12.3 MPa 和 11.5 MPa), 同时具有加工性能优良、价格低廉等特点。通过将该载体应用于微波冶金反应器, 研制了管式、竖式、箱式等 HM 系列高温微波冶金反应器<sup>[29-35]</sup>并用于低品位钛精矿的碳热还原<sup>[36]</sup>、氮化钒的烧结等研究(图 9 所示为用于氮化钒烧结的微

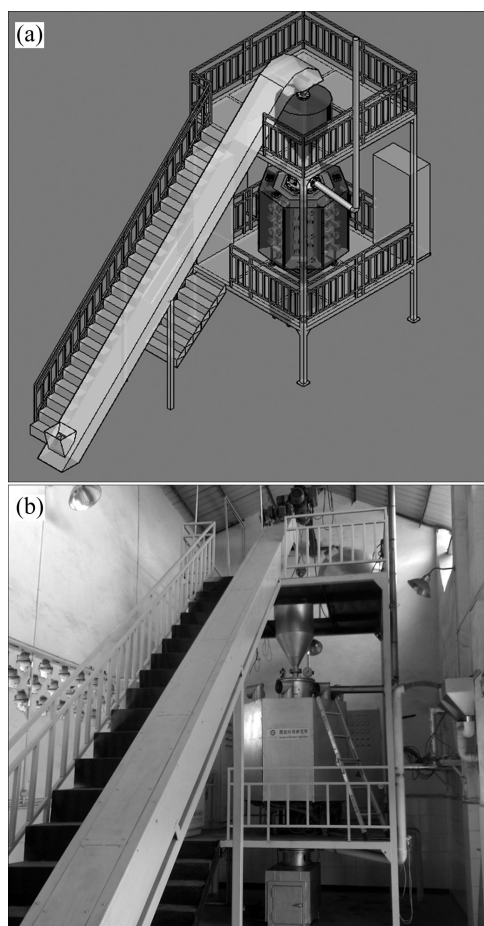


图 9 竖式高温微波反应器三维图和实物图

**Fig.9** Three-dimensional plot(a) and photo of vertical high-temperature microwave reactor(b)

波竖式反应器)。应用生命周期分析方法和绿色评价方法对微波冶金高温反应器的制造、使用及回收利用全过程的资源消耗和环境影响进行分析,从而为减少资源消耗和降低环境污染,为微波高温反应器绿色设计与使用提供参考,找到研制新型微波高温反应器的关键点和突破口。另外,昆明理工大学微波应用研究所针对高温微波冶金反应器难以大型化的现状,提出了多微波源组合的分布耦合技术,建立了多馈口耦合的多维数学模型(馈口位置、方向、互耦、被处理材料特性、腔体形状和大小等),并利用智能算法优化了这些因素对微波场分布和温度场分布的影响,得到了高温微波冶金反应器的放大规律,实现了大功率微波输入,解决了大尺度高温微波冶金反应器设计的技术难题。该技术成果有效减少了反应器常规设计方法出现的微波源的强互耦,得到了能量利用率高、微波源寿命长、温度分布均匀的大型化谐振腔。利用该技术成果,开发了微波推板窑和微波功率0~80 kW连续可调用于铀化学浓缩物煅烧<sup>[37]</sup>、活性炭制备以及废触媒再生的微波回转窑<sup>[38]</sup>。

综上所述,尽管多模腔式高温微波冶金反应器可以用来进行较大尺寸试样的加工,但是其功率密度较单模腔式微波冶金反应器低,要想达到和单模腔式结构同样的效果,就必须提高微波发生器的功率,导致反应器成本增大<sup>[39]</sup>。同时,由于现有高温微波冶金反应器设计研制尚不成熟,设备工业化应用大功率微波发生器和设备的适应性等方面均存在部分尚需解决的问题。

## 4 结论及展望

微波冶金作为新型的绿色冶金方法,已发展成引人注目目前的前沿交叉学科。近年来,尽管微波高温加热领域的研究越来越受到关注,也实现了微波高温加热分解和微波烧结陶瓷材料等,在某些方面也得到了一定程度的产业化应用。但由于高温微波冶金反应器研制的滞后,尤其是高温微波应用设备的研究与开发远未达到产业化程度,目前微波在的高温领域的应用仅限于实验室和小规模的工业化应用。

1) 单模腔式和波导型微波冶金反应器尽管结构简单,但腔体较小,只能进行较小尺寸试样的分批处理,很难用于大尺寸材料的加工和连续生产。

2) 多模腔式微波冶金反应器虽然具有大腔体结构,但其功率密度相对较低,必须通过提高微波冶金发生器的功率来增大功率密度,导致反应器成本较高。

3) 解决高温微波冶金反应器工业化应用在微波高温陶瓷材料、大功率微波发生器、物料温度测试等方面存在的主要问题,提高微波能的转换效率,研制、设计连续,稳定的大功率高温微波冶金反应器是微波工业化实践的关键。

## REFERENCES

- [1] 彭 虎, 李 俊. 微波高温加热技术进展[J]. 材料导报, 2005, 19(10): 100-103.  
PENG Hua, LI Jun. Advance in microwave high-temperature heating technology[J]. Materials Review, 2005, 19(10): 100-103.
- [2] TINGA W R, WAG V. Microwave power engineering[M]. Academic Press New York, 1968.
- [3] Berteavd A J, Badoty J C. High temperature microwave heating in refractory materials[J]. J Microwave Power, 1976, 11(4): 314-320.
- [4] TONG Zhi-fang, BI Shi-wen, YANG Yi-hong. Present situation of study on microwave heating application in metallurgy[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2004, 2(3): 117-120.
- [5] 曲世鸣, 张 明. 微波混合加热技术及应用前景[J]. 物理, 1999, 28(2): 117-120.  
QU Shi-ming, ZHANG Ming. Microwave hybrid heating technology[J]. Physics, 1999, 28(2): 117-120.
- [6] 杨 洲, 段洁利. 微波干燥及其发展[J]. 粮油加工与食品机械, 2000(3): 5-7.  
YANG Zhou, DUAN Jie-li. Development of drying microwave[J]. Machinery for Cereals, Oil and Food Processing, 2000(3): 5-7.
- [7] KATSUMI T, FUMIYASU K, MASASHI K. Development of the microwave heated catalyst system[J]. JSAE Review, 1999, 20(3): 431-434.
- [8] AL-HARAHSHEH M, KINGMAN S W. Microwave-assisted leaching: A review[J]. Hydrometallurgy, 2004, 73(3/4): 189-203.
- [9] 黄 铭. 微波与颗粒物质相互作用的机理及应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2003.  
HUANG Ming. Application research of microwave interaction mechanism with particulate matter[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2003.
- [10] FORD J D, PEI D C T. High temperature chemical processing via microwave absorption[J]. J Microwave Power, 1967, 2(2): 61-64.
- [11] 金钦汉. 微波化学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
JIN Qin-han. Microwave chemical[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [12] 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.  
PENG Jin-hui, YANG Xian-wan. The new applications of

- microwave power[J]. Kunming: Yunnan Science & Technology Press, 1997.
- [13] MINGOS D M P, BAGHURST D R. Application of microwave dielectric heating effect to synthetic problems in chemistry[J]. Chem Soc Rev, 1991, 20: 1-47.
- [14] MCGILL S L, WALKIEWICZ J W, SMYRES G A. The effect of power level on microwave heating of selected chemicals and minerals[C]//SUTTON W H. Materials Research Society Symposia Proceedings. Reno, NV: M4.6, 1988, 124: 247-252.
- [15] WALKIEWICZ J W, KAZONICH G, MCGILL S L. Microwave heating characteristics of selected minerals and compounds[J]. Miner Metall Process, 1988, 5(1): 39-42.
- [16] KINGMAN S W, JACKSON K, CUMBANE A, BRADSHAW S M, ROWSON N A, GREENWOOD R. Recent development in microwave-assisted comminution[J]. Int J Miner Process, 2004, 74: 71-83.
- [17] 周 健, 程吉平, 傅文斌. 2 450 MHz/5 kW 改进的单模腔型微波烧结系统研制[J]. 武汉工业大学学报, 1999, 21(4): 4-6.  
ZHOU Jian, CHENG Ji-ping, FU Wen-bin. Research on improving single mode cavity type microwave sintering system with 2 450 MHz/5 kW[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1999, 21(4): 4-6.
- [18] JANNEY M A, KIMREY H D, MESSING G L, FULLER E R, HAUSNER H. Microwave sintering of alumina at 20 GHz[C]//Ceramic Transactions. Cincinnati: Ceramic Powder Science II, 1988: 919-924.
- [19] 车 磊, 杨 林, 肖德满. 多模腔双频微波烧结炉的设计[J]. 大连轻工业学院学报, 2003, 22(4): 277-280.  
CHE Lei, YANG Lin, XIAO De-man. Design of multimode & dual-frequency microwave sintering furnace[J]. Journal Dalian Institute of Light Industry, 2003, 22(4): 277-280.
- [20] 孙永志, 杨鸿生. 矩形波导谐振腔微波化学反应器的研究[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1708-1710.  
SUN Yong-zhi, YANG Hong-sheng. The research of microwave chemistry reactor made of the rectangular waveguide resonator[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1708-1710.
- [21] JANNEY M A, KIMREY H D. Ceramic powder science II [C]//MESSING G L, FULLER E R, HAUSNER H, MESSING G L. Westerville, Ohio: American Ceramic Society, 1988: 919-924.
- [22] APTE P S, MACDONALD W D. Microwave sintering kilogram batches of silicon nitride[C]//Microwaves: Theory and Application in Materials Processing III. Westerville, Ohio: American Ceramic Society, 1995: 55-58.
- [23] 刘丰秋. 微波化学: 点燃“新化学动力学”希望[EB/OL]. www. Peian. instrument.com.cn.  
LIU Feng-qiu. Micro-wave chemistry[EB/OL]. www. Peian. instrument.com.cn.
- [24] 马 宁, 杨 林, 刘 智. 微波高温烧结自动控制系统设计[J]. 大连轻工业学院学报, 2006, 25(1): 131-134.
- MA Ning, YANG Lin, LIU Zhi. Design of auto-control system for high-temperature microwave sintering[J]. Journal Dalian Institute of Light Industry, 2006, 25(1): 131-134.
- [25] 邹继兆, 曾燮榕, 熊信柏, 梅 成, 唐汉玲, 李 龙. 微波高温加热真空系统的研制[J]. 微波学报, 2006, 22(6): 67-70.  
ZOU Ji-zhao, ZENG Xi-rong, XIONG Xin-bai, MEI Cheng, TANG Han-ling, LI Long. Research on microwave high-temperature heating vacuum system[J]. Journal of Microwaves, 2006, 22(6): 67-70.
- [26] 易健宏, 唐新文, 罗述东, 李丽娅, 彭元东. 微波烧结技术的进展及展望[J]. 粉末冶金技术, 2003, 21(6): 351-354.  
YI Jian-hong, TANG Xin-wen, LUO Shu-dong, LI Li-ya, PENG Yuan-dong. Development and trend of microwave sintering technology[J]. Powder Metallurgy Technology, 2003, 21(6): 351-354.
- [27] 彭 虎, 李 俊. 一种用工业微波炉生产氮化钒的方法: 中国专利, ZL200410023104.0[P]. 2005-07-27.  
PENG Hu, LI Jun. A method to produce the vanadium nitride by Microwave: CN, ZL200410023104.0[P]. 2005-07-27.
- [28] 彭金辉, 郭胜惠, 张世敏, 张利波, 张泽彪. 用于微波加热的陶瓷基透波承载载体及生产方法: 中国专利, ZL200710066041.0[P]. 2008-01-09.  
PENG Jin-hui, GUO Sheng-hui, ZHANG Shi-min, ZHANG Li-bo, ZHANG Ze-biao. Production methods of ceramic matrix carrier for microwave heating: CN, ZL200710066041.0[P]. 2008-01-09.
- [29] 彭金辉, 陈 菓, 郭胜惠, 张世敏, 张利波, 张泽彪. 一种带观察窗的微波管式炉的炉门结构: 中国专利, ZL 200920111951.0[P]. 2010-05-12.  
PENG Jin-hui, CHEN Guo, GUO Sheng-hui, ZHANG Shi-min, ZHANG Li-bo, ZHANG Ze-biao. A kind of microwave tubular oven door structure with observation windows: CN, ZL 200920111951.0[P]. 2010-05-12.
- [30] 彭金辉, 陈 菓, 郭胜惠, 张世敏, 张利波, 张泽彪, 李 军, 支晓洁. 用于微波马弗炉的照明装置: 中国专利, ZL 200920111949.3[P]. 2010-07-21.  
PENG Jin-hui, CHEN Guo, GUO Sheng-hui, ZHANG Shi-min, ZHANG Li-bo, ZHANG Ze-biao, LI Jun, ZHI Xiao-jie. Lighting apparatus for microwave Muffle furnace: CN, ZL 200920111949.3[P]. 2010-07-21.
- [31] 彭金辉, 陈 菓, 郭胜惠, 张世敏, 张利波, 张泽彪, 李 军, 支晓洁. 一种可拆卸的多模微波谐振腔: 中国专利, ZL 200920169456.5[P]. 2010-07-21.  
PENG Jin-hui, CHEN Guo, GUO Sheng-hui, ZHANG Shi-min, ZHANG Li-bo, ZHANG Ze-biao, LI Jun, ZHI Xiao-jie. A removable multi-mode microwave cavity: CN, ZL 200920169456.5[P]. 2010-07-21.
- [32] 彭金辉, 陈 菓, 郭胜惠, 张世敏, 张利波, 张泽彪, 李 军, 支晓洁. 一种微波激励腔装置: 中国专利, ZL 200920169458.4[P]. 2010-07-21.



- PENG Jin-hui, CHEN Guo, GUO Sheng-hui, ZHANG Shi-min, ZHANG Li-bo, ZHANG Ze-biao, LI Jun, ZHI Xiao-jie. A microwave cavity incentive device: CN, ZL 200920169458.4[P]. 2010-07-21.
- [33] 彭金辉, 陈 菓, 郭胜惠, 张世敏, 张利波, 张泽彪. 保护气体微波管式炉的反应腔: 中国专利, ZL 200920253863.4[P]. 2010-09-01.
- PENG Jin-hui, CHEN Guo, GUO Sheng-hui, ZHANG Shi-min, ZHANG Li-bo, ZHANG Ze-biao. Chamber of microwave tube furnace with shielding gas: CN, ZL 200920253863.4[P]. 2010-09-01.
- [34] 彭金辉, 陈 菓, 郭胜惠, 张世敏, 张利波, 张泽彪. 可通入保护气氛微波竖式炉的炉体结构: 中国专利, ZL 200920253864.9[P]. 2010-09-01.
- PENG Jin-hui, CHEN Guo, GUO Sheng-hui, ZHANG Shi-min, ZHANG Li-bo, ZHANG Ze-biao. Vertical microwave furnace structure with protective atmosphere. CN, ZL 200920253864.9 [P]. 2010-09-01.
- [35] 彭金辉, 陈 菓, 郭胜惠, 张世敏, 张利波, 张泽彪. 一种小功率连续微波磁控管阳极冷却水套: 中国专利, ZL 200920253865.3[P]. 2010-09-01.
- PENG Jin-hui, CHEN Guo, GUO Sheng-hui, ZHANG Shi-min, ZHANG Li-bo, ZHANG Ze-biao. A small-power continuous microwave magnetron anode cooling water jacket: CN, ZL 200920253865.3[P]. 2010-09-01.
- [36] 雷 鹰, 李 雨, 彭金辉, 张利波, 张世敏, 郭胜惠. 微波碳热还原攀枝花低品位钛精矿[J]. 钢铁钒钛, 2010, 31(4): 1-6.
- LEI Ying, LI Yu, PENG Jin-hui, ZHANG Li-bo, ZHANG Shi-min, GUO Sheng-hui. Research on the cabothermic reduction of low-grade titanium concentrate by microwave heating[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2010, 31(4): 1-6.
- [37] 彭金辉, 刘秉国, 黄代富, 张利波, 胡锦明, 夏洪应, 孔冬成. 一种微波煅烧三碳酸铀酰铵生产二氧化铀的方法: 中国专利, ZL201010128352.7[P]. 2011-07-21.
- PENG Jin-hui, LIU bing-guo, HUANG Dai-fu, ZHANG Li-bo, HU Jin-ming, XIA Hong-ying, KONG Dong-cheng. A microwave calcination of ammonium uranyl carbonate method for production of uranium dioxide: CN, ZL201010128352.7[P]. 2011-07-21.
- [38] 彭金辉, 刘秉国, 黄代富, 张利波, 胡锦明, 夏洪应, 孔冬成. 一种用于铀化学浓缩物煅烧的微波回转窑: 中国专利, ZL201020136140.9[P]. 2010-12-29.
- PENG Jin-hui, LIU bing-guo, HUANG Dai-fu, ZHANG Li-bo, HU Jin-ming, XIA Hong-ying, KONG Dong-cheng. One microwave kiln for uranium chemical concentrates calcination: CN, ZL201020136140.9[P]. 2010-12-29.
- [39] 刘莲香, 刘平安, 税安泽, 段碧林, 曾令可. 陶瓷材料的微波烧结新技术[J]. 砖瓦, 2005, 7: 19-22.
- LIU Lian-xiang, LIU Ping-an, SHUI An-ze, DUAN Bi-lin, ZENG Ling-ke. New technology on microwave sintering of ceramic materials[J]. Brick and Tile, 2005, 7: 19-22.

(编辑 龙怀中)

## 彭金辉教授简介

彭金辉,男,1964年出生,博士,教授,博士生导师。“新世纪百千万人才工程”国家级人选、教育部跨世纪人才、云南省中青年学术和技术带头人和原中国有色金属工业总公司跨世纪学术带头人,担任中国有色金属学会重有色金属冶金学术委员会主任委员、国家基金委第十一届和十二届工程与材料学部专家评审组成员、云南省科学技术奖冶金与材料科学专业评审委员会主任委员等职,主要从事微波加热在冶金和材料中应用研究。先后主持了国家自然科学基金重大项目、国家自然科学基金重点项目、“973”课题、欧盟项目、国家国际合作项目等60余项科研项目研究,获国家技术发明二等奖1项,云南省自然科学一等奖2项。出版专著4部,发表论文350余篇,被SCI、EI收录100余篇,申请国家专利80余项,授权专利45项。