

# 微波混合加热技术及应用前景\*

曲世鸣 张明

(青岛大学师范学院物理系, 青岛 266071)

**摘要** 报道了氧化锆和氮化硅陶瓷材料的微波烧结实验结果,并详细讨论了微波混合加热技术在陶瓷材料微波烧结中的应用.

**关键词** 介电损耗,微波混合加热,多模谐振

## MICROWAVE HYBRID HEATING TECHNOLOGY

Qu Shiming Zhang Ming

(Physics Department, Normal College of Qingdao University, Qingdao 266071)

**Abstract** The microwave sintering of ceramics is reviewed and two examples, microwave sintered zirconia and silicon nitride, are reported.

**Key words** dielectric loss, microwave hybrid heating, multi-mode resonant

## 1 前言

微波加热技术,特别是高温微波加热技术的发展,是近一二十年的事<sup>[1]</sup>.与传统加热方法比较,由于具有体内加热效率高,加热均匀等优点,因此受到广泛重视.

微波加热能否成功,取决于材料的介电损耗性质.有些材料在常温条件下,介电损耗因数很小,不能吸收多少微波能量,因而也就不能直接用微波加热.我们可以把这种材料与容易吸收微波的材料放在一起,利用后者在微波场中所产生的热量来加热前者.本文提出了微波混合加热技术,成功地解决了常温下介电损耗因数很小的材料的加热和烧结问题,对于微波加热技术有一定发展.

## 2 微波混合加热原理

材料对微波的反应可以分为4种情况:(1)

反射微波;(2)微波透明;(3)吸收微波;(4)部分吸收微波.多数金属属于第一类,而所有玻璃和陶瓷材料可列入后3种情况.微波与材料是通过形成偶极子和(或)已有的偶极子的重新排列而发生相互作用的.在交变电场中是连续形成和(或)重新排列的.这个极化过程需要从微波场中吸收能量,并最终以热的形式耗散在材料体内.在单位时间内,材料吸收的微波能量,即发热量由下式给出:

$$P_A = \epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}} \frac{E_i^2}{2} V, \quad (1)$$

式中  $\omega$  为角频率(rad/s),  $\epsilon_0$  为真空的介电常数(F/m),  $\epsilon_{\text{eff}}$  为相对有效介电损耗因数(无量纲),  $E_i$  为内电场强度(V/m),  $V$  为试样体积( $\text{m}^3$ ).在微波加热技术中,另一个重要参量是微波对材料的穿透深度  $D_p$ ,其定义为微波进入材料后,能量减为原值的  $1/e$  处到表面的距离,其公式为:

\* 1998-06-01 收到初稿,1998-07-23 修回

$$D_p = \frac{0}{2\sqrt{2}} \cdot \left[ \sqrt{\frac{1}{\epsilon_{\text{eff}}} + \left( \frac{1}{\epsilon_{\text{eff}}} - 1 \right)^2} - 1 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中  $\lambda_0$  为真空中的波长 (在 2.45 GHz 时为 12.2 cm),  $\epsilon_{\text{eff}}$  为有效相对介电常数.

在表 1 中我们给出几种常见材料在不同温度和频率条件下的介电损耗数据<sup>[2]</sup>.

表 1 不同温度和频率条件下一些材料的介电损耗因数

材料	$\epsilon_{\text{eff}}$	温度/	频率/ Hz
水	12	25	$3.00 \times 10^9$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0032	25	$2.45 \times 10^9$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1378	1050	$2.45 \times 10^9$
ZrO <sub>2</sub>	0.0043	25	$2.45 \times 10^9$
ZrO <sub>2</sub>	0.0531	1000	$2.45 \times 10^9$
SiC	1.71	22	$2.45 \times 10^9$
SiC	27.99	695	$2.45 \times 10^9$

微波加热设备中一般采用的频率为 2.45 GHz, 而微波吸收好的介质损耗因数范围为  $10^{-2} < \epsilon_{\text{eff}} < 5$ . 从表 1 可以看出, ZrO<sub>2</sub> 及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在室温下其介电损耗因数均在此范围以外, 这两种材料在室温下很难吸收微波, 进行加热. 当温度升高时, 介电损耗明显增加. 在 1000 以上, 则处于微波吸收好的范围. 另一方面, SiC 在室温下是很好的微波吸收体. 因此, 如果把 SiC 及 ZrO<sub>2</sub> 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 放入同一微波场中, 则有可能利用前者发出的热量去加热后者. 而在 700 左右, 微波对 SiC 的穿透深度只有 0.4 cm, 微波体内加热的效应显著降低, 这时只有靠 ZrO<sub>2</sub> 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的自身微波加热来提高其温度. 以上情况正是微波混合加热技术的依据.

### 3 实验及结果

本实验采用多模式微波加热炉, 它由 3 个主要部分构成 (见图 1): (1) 微波电源, 最大输出功率为 5 kW, 磁控管发射的微波频率为 2.45 GHz. (2) 微波传输及调节装置, 由微波电

源发射的微波通过波导首先进入环形器. 环形器的作用是把从负载上反射回来的反射波送入水负载, 使其不致返回磁控管, 起到保护磁控管的作用. 四柱调谐器可以使装有负载的加热腔调谐到最佳工作状态. 装在定向耦合器上的可变衰减器以及电流表可以显示反射波的大小. (3) 多模式加热腔实际上是一个不锈钢制的箱子, 形状及大小类似于家用微波炉的腔体, 微波经过装在箱子顶部的天线阵进入腔体, 而在箱子底部设有可以转动的托盘, 烧结的样品及辅助介质、保温材料、坩埚和不锈钢环 (见图 2) 等便放在这个托盘之上.

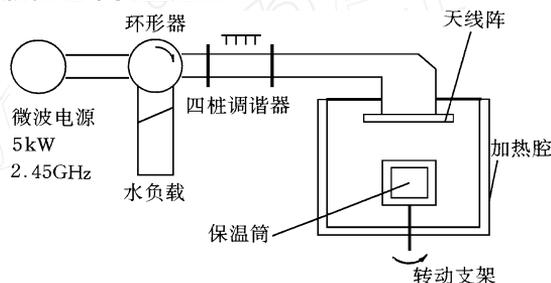


图 1 微波烧结装置示意图

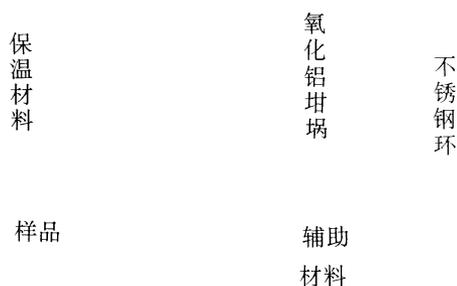


图 2 烧结容器

烧结样品及辅助加热材料一般放入一尺寸适当的氧化铝坩埚中, 在坩埚以外再放置一定的保温材料, 然后再套上一个不锈钢环, 不锈钢环的直径约 18 cm, 高约 12 cm, 把它放入加热腔中的目的在于使烧结样品的周围电场更加均匀. 实验表明, 不锈钢环对保证烧结成功是至关重要的. 以下报告两方面的实验结果.

#### 3.1 氧化锆的微波烧结

ZrO<sub>2</sub> + 12 wt % CeO<sub>2</sub> 粉料, 在 300 MPa 单向

压力下冷压成型,样品的形状为一圆盘,直径约为6cm,厚度为0.6cm.因为 $ZrO_2$ 在常温下介电损耗很小,不易吸收微波,因而对这一材料我们需要采用所谓微波混合加热方法(microwave hybrid heating method).在 $ZrO_2$ 样品周围布置一些SiC棒,因为室温下SiC就可吸收微波能量而迅速加热,可用SiC发出的热量间接地去加热 $ZrO_2$ .当温度升至约800以后, $ZrO_2$ 便开始自身加热,以达到所需要的温度.采用本文的方法,我们成功地用微波烧结成功 $ZrO_2$ 陶瓷,其各项性能均达到标准的指标.微波加热时间约为20min后达到1400左右,然后保温10min,最高微波功率约2kW,总共用时30min.文献[3]中曾报道采用单模谐振腔烧成 $ZrO_2$ ,但是单模法加热温区很小,不适合烧结体积大的样品,而本文则采用多模谐振腔,加热温区很大(直径约为12cm,高度约为12cm的圆柱形体积),可以烧制更大的样品,在技术上是一个重大进展.

### 3.2 氮化硅的微波烧结

$Si_3N_4 + 5wt\% Al_2O_3 + 5wt\% Y_2O_3$ ,先用60MPa单轴压力压缩后,再用275MPa等静压成型.样品的形状为方块,边长约3cm,厚度为1cm左右.一般报道, $Si_3N_4$ 需在氮气保护氛围中进行烧结,但充以一定压力的氮气后用微波烧结,需要很大的设备投资.我们采用氮化硅、碳化硅及氮化硼(按一定比例混料)的混合粉体

做辅助材料,这样,既可以间接加热,同时又可以起化学保护作用,所烧结成的 $Si_3N_4$ 陶瓷性能良好.微波烧结时间为30—120min,依样品多少而定,最高微波功率在2—3kW之间,烧结温度约1600,保温10min.采用微波混合方法,我们在设备投资小的情况下完成了 $Si_3N_4$ 的微波烧结,有很大技术意义.

## 4 结语

(1) 针对室温下介电损耗很小的材料,本文采取的微波混合加热技术是一种有效的方法,成功的烧结成 $ZrO_2$ 及 $Si_3N_4$ 等样品.只要能找到适当的辅助加热材料,本方法是一种可广泛应用的技术.

(2) 微波混合加热技术具有大幅度缩短烧结时间和节约电能的优点,其推广和应用必将带来重大经济效益.

(3) 为了发展微波加热技术,应该配合开展材料介电性能的基础研究,特别要研究介电损耗随温度而改变的情况.

## 参 考 文 献

- [1] W. H. Sutton, *Ceramic Bulletin*, **68**(1989), 376.
- [2] D. E. Clark, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, **14** - 7/8(1992), 3.
- [3] J. Wilson, S. M. Kunz, *J. Am. Ceram. Soc.*, **71**(1988), C-40.

## 1999年第3期《物理》内容预告

### 研究快讯

驾驭斑图(pattern)的新方法——空间微扰法(王鹏业).

### 知识和进展

分数量子霍尔效应——1998年诺贝尔物理奖介绍(郑厚植);

浅谈惯性约束核聚变(张杰);

金属-有机物界面的偶极层(侯晓远);

掺镱硅的发光特性及机理(万钧等);

非易失铁电存储器的进展和若干问题(罗维根).

### 物理学和经济建设

高技术局部战争中的光电子技术(梅遂生);

28卷(1999年)2期

采用最早到达光透过高散射介质成像(侯比学).

### 实验技术

多波长钛宝石飞秒激光技术研究(王水才);

X射线毛细管及其应用(徐向东等).

### 物理学史和物理学家

托马斯·杨与杨氏干涉实验(鲁运庚等).

### 前沿和动态

在重费米子化合物中由磁性中介的超导电性(戴闻);

$C_{36}$ ——富勒烯固体中最小的成员(戴闻);

第9届全国原子与分子物理学术会议简讯(刘玉芳).

· 119 ·