第 49 卷第 12 期
2021 年 12 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 12
December，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210186

高铝型硅酸铝纤维板介电特性和透波性能

肖利平[1]，尚小标[1,3,4]，刘美红[1]，白永珍[1]，李广超[1]，陈君若[2]

(1. 昆明理工大学机电工程学院，昆明 650500；2. 昆明理工大学城市学院，昆明 650051；
3. 非常规冶金教育部重点实验室，昆明 650093；4. 微波能工程应用及装备技术国家地方联合工程实验室，昆明 650093)

摘　要：采用谐振腔微扰法测量了高铝型硅酸铝纤维板(high–Al aluminum silicate fiberboard，HAF)在 915 MHz 和 2 450 MHz 频率下，25~1 000 ℃温度范围内的介电参数，并基于电磁波传输线理论计算了 HAF 的功率透过系数，进而分析了不同影响因素条件下 HAF 的透波性能。结果表明：在 2 种频率下，HAF 的介电常数和介电损耗因子均在 800 ℃之后明显增大；不同极化模式下，HAF 的透波性能显著不同，其在水平极化下的透波性能优于垂直极化，且水平极化下存在使微波发生全透射的 Brewster 角(50°~53°)；HAF 的透波性能随厚度的增加而波动，其功率透过系数曲线在 0~0.2 m 厚度区间出现多个透波峰。

关键词：高铝型；硅酸铝纤维板；介电特性；透波性能；功率透过系数
中图分类号：TB35　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)12–2621–08
网络出版时间：2021–11–01



Dielectric Properties and Electromagnetic Wave Transmission Performance of High-Al Aluminum Silicate Fiberboard

XIAO Liping[1], *SHANG Xiaobiao*[1,3,4], *LIU Meihong*[1], *BAI Yongzhen*[1], *LI Guangchao*[1], *CHEN Junruo*[2]

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. City College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;
3. Key Laboratory of Unconventional Metallurgy of Ministry of Education, Kunming 650093, China;
4. National Local Joint Laboratory of Engineering Application of Microwave Energy and Equipment Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The dielectric parameters of high-Al aluminum silicate fiberboard (HAF) at 915 MHz and 2 450 MHz and 25–1 000 ℃ were measured by a resonant cavity perturbation method. The power transmission coefficient of HAF was calculated based on an electromagnetic wave transmission line theory, and the transmission performance of HAF at different affecting factors was analyzed. The results show that the dielectric constant and dielectric loss factor of HAF increase at 800 ℃ and the both frequencies. The transmission performance of HAF is different under different polarization modes. Its transmission performance in a transverse magnetic field is better than that in a transverse electric field, and there is the Brewster angle (*i.e.*, 50°–53°), which fully makes the microwave transmitting in transverse magnetic field. The transmission performance of HAF fluctuates with the increase of thickness, and its power transmission coefficient curve has a multiple transmission peak in the thickness range of 0–0.2 m.

Keywords: high-aluminum; aluminum silicate fiberboard; dielectric properties; transmission performance; power transmission coefficient

传统加热方式多为外部热源通过热传导、热对流和热辐射由表及里地进行加热，往往会造成材料外表面加热过度、内部加热不充分等现象[1–2]。随着科技的发展，微波加热技术越来越多地出现在大众的视野中。微波是一种频率范围在 300 MHz~300 GHz 之间，具有穿透特性的电磁波[3]。在工业生产和日常生活中，微波加热的频率主要为 915 MHz 和 2 450 MHz，对应的微波波长为 0.328 m 和 0.122 4 m[4]。

收稿日期：2021–03–19。　修订日期：2021–06–07。
基金项目：国家自然科学基金(51764052)；云南省科技厅重大专项(2018ZE008，2018ZE027)；云南省人才培养项目(KKSY201601045)。
第一作者：肖利平(1994—)，男，硕士研究生。
通信作者：尚小标(1987—)，男，博士，讲师。

Received date: 2021–03–19.　**Revised date:** 2021–06–07.
First author: XIAO Liping (1994–), male, Master candidate.
E-mail: xlp_18Leo@163.com
Correspondent author: SHANG Xiaobiao (1987–), male, Ph.D., Lecturer.
E-mail: shang21st@163.com

微波加热是一种依靠介质材料自身的电磁特性将微波能转换为热能的加热方式，其具有传统加热方式不可比拟的优点，如非接触加热、快速加热、快速启停、选择性加热、体积加热等[5–7]。微波加热不仅在食品工业、化学合成和环境工程等中低温加热领域颇受欢迎[8–10]，而且也在陶瓷烧结、矿物煅烧、火法冶金等高温加热领域应用广泛[11–14]。

微波窑炉是微波加热技术实际应用的设备之一，由于工作环境的特殊性，通常要求微波窑炉的炉衬不仅需具有足够的力学性能和隔热耐火性能，还应具有良好的透波性能[15]。HAF 是一种陶瓷纤维材料，因其导热率低，热稳定性高，耐高温性能良好等特点，常被用作工业炉的耐火保温炉衬[16]。目前，大部分学者对 HAF 等陶瓷材料的研究主要集中在隔热耐火性能上，对介电特性和透波性能的研究还鲜见报道。在加热过程中，微波窑炉内的温度达到几百甚至上千度，温度的变化可能会让炉衬的介电特性和透波性能发生很大的改变，造成炉膛内微波场强度衰减或谐振模式变化，进而影响微波能的利用率，导致加热效果变差。在之前的研究中分别对莫来石陶瓷[17]、氧化铝陶瓷[18]和熔融石英陶瓷[19]等耐火材料的透波性能进行了计算分析，发现微波频率、极化模式、入射角度、温度和厚度等因素对材料有很大的影响。

本研究采用谐振腔微扰法测得了 HAF 在 915 MHz 和 2 450 MHz 2 种微波频率下的介电常数和介电损耗因子，对该材料的介电特性进行了分析研究。结合电磁波传输线理论，对 HAF 受到的微波频率、极化模式、材料厚度、入射角度等因素影响时的透波性能进行了理论分析。

1 HAF 的介电测量与透波理论

1.1 实验材料

高铝型硅酸铝纤维板(1 400 型)因其具有导热系数低、抗热震稳定性好、体积密度小、耐高温等特性适用于本次研究。高铝型硅酸铝纤维板的物理性质和化学成分见表 1。硅酸铝纤维板一般分为普通型、标准型、高纯型和高铝型，其 Al_2O_3 含量分别为 44%~45%、45%~47%、47%~49%和 52%~55%，使用温度为 950、1 000、1 100 ℃和 1 200 ℃，高铝型硅酸铝纤维板是这 4 种材料中 Al_2O_3 含量和使用温度最高的[20]。

表 1 HAF 的物理性质和化学成分

Table 1 Physical properties and chemical composition of high-Al aluminum silicate fiberboard(HAF)

Bulk density/(g·cm^{-3})	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Other
0.3–0.6	52%~55%	44%–47%	0.2%	0.8%

1.2 实验设备及介电参数测量

采用电子科技大学设计制造的复介电参数测试系统，测试样品的介电参数，测试系统模型如图 1 所示，主要包括矢量网络分析仪、计算机、温度控制器、感应加热设备、水冷机、圆柱谐振腔、气泵等。该测试系统测量介电参数主要包括加热、移动和测试 3 个过程，其中，样品的移动和测试过程速度快，时间短(0~1 s)，因样品温度下降造成的误差较小，能满足介电参数测量的精度要求。利用谐振腔微扰法对实验材料的介电参数进行测量，其测试原理是将微波馈入微波谐振型传感器，物质在传感器内与微波相互作用。这种测试方法可以有效提高损耗角的测量精度，并且仪器在测试过程中能耗较低。在进行介电参数测量时，先使用矢量网络分析仪测出圆柱谐振腔空载时的谐振频率和品质因数，当感应加热设备将样品加热到相应温度后，通过气动装置迅速将样品移动至圆柱谐振腔内，再使用矢量网络分析仪测出此时的谐振频率和品质因数，最后，利用计算机的测试系统软件对测量结果进行计算，从而可得到不同温度下的介电常数和介电损耗因子。

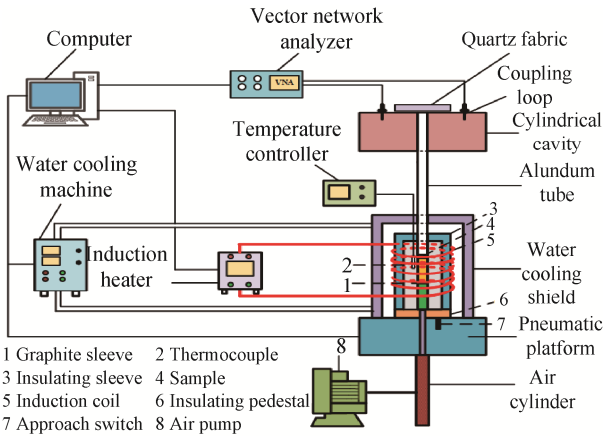


图 1 复介电参数测试系统模型

Fig. 1 Model of complex dielectric parameter test system

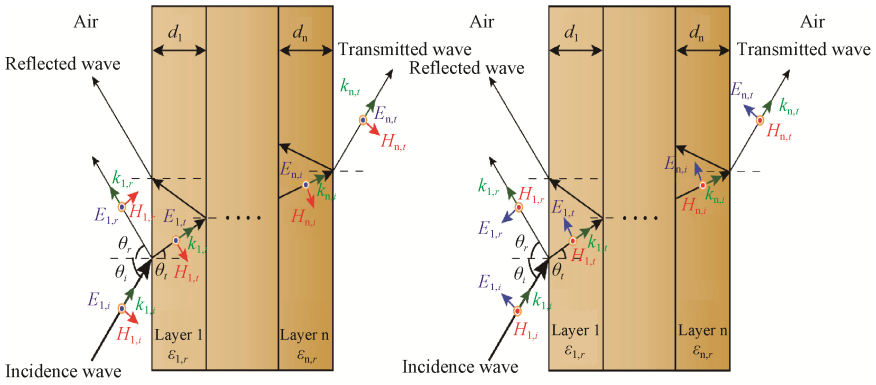
1.3 透波理论

电磁波在介质平板中的传播规律会因极化模式的不同而发生变化。由介质界面的法线方向和电磁波的入射方向所确定的平面为入射平面，电场垂直于

入射平面的极化称为垂直极化(transverse electric，TE)，而电场平行于入射平面的极化称为水平极化(transverse magnetic，TM)，图 2a 和图 2b 分别为 TE 极化和 TM 极化下电磁波在多层介质平板中的传播示意图。图 2 中 E、H、k 分别为电场矢量、磁场矢量和波矢量；下标 i、r、t 分别为电磁波的入射、反射和折射。当电磁波射入介质平板时，由于介质材料与空气阻抗的不同，会使得电磁波的传播路径发生改变，此时会发生透射、反射和吸收 3 种现象，这 3 部分之间的数值关系可用式(1)来表示[21]：

$$T^2+R^2+A=1 \tag{1}$$

式中：T^2 为功率透过系数(透射部分)，T^2 值越大材料的透波性能越好；R^2 为功率反射系数(反射部分)；A 为能量损耗(吸收部分)。



(a) TE　　(b) TM

图 2　2 种极化模式下电磁波传播示意图

Fig. 2　Schematic diagram of electromagnetic wave propagation in two polarization modes

根据电磁波传输线理论，当电磁波在多层介质平板中传播时，可将其等效为多个 4 端口网络的级联形式，其网络总级联矩阵为[22–23]：

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}=\prod_{n=1}^{k}\begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix}=\prod_{n=1}^{k}\begin{bmatrix} \mathrm{ch}jd_n\gamma_n & Z_{\mathrm{cn}}\mathrm{sh}jd_n\gamma_n \\ \mathrm{sh}jd_n\gamma_n/Z_{\mathrm{cn}} & \mathrm{ch}jd_n\gamma_n \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：$\begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix}$ 为第 n 层介质平板的等效传输矩阵；ch 和 sh 分别为双曲余弦和双曲正弦函数；j 为虚部单元，$j^2=-1$；d_n 为第 n 层介质平板的厚度；γ 为传播常数，第 n 层介质平板的传播常数 $\gamma_n=k_0\sqrt{\varepsilon_{n,r}/\varepsilon_0-\sin^2\theta_{n,i}}$，其中：$k_0$ 为自由空间的波数($k_0=2\pi/\lambda_0$)；λ_0 为自由空间波长($\lambda_0=c/f$)，c 为光速，f 为频率；$\varepsilon_{\mathrm{n,r}}$ 为第 n 层介质平板的复介电常数，$\varepsilon_{n,r}=\varepsilon_n'-j\varepsilon_n''$；$\varepsilon_n'$ 和 ε_n'' 分别为第 n 层介质平板的介电常数和介电损耗因子；ε_0 为自由空间的复介电常数($\varepsilon_0\approx8.854\times10^{-12}$ F/m)；$\theta_{n,i}$ 为第 n 层介质平板的电磁波入射角；Z_{cn} 为第 n 层介质平板的等效特征阻抗。Z_{cn} 对应的水平极化和垂直极化分量为：

$$\begin{cases} Z_{\mathrm{cn}}^{//}=Z_0\varepsilon_0\sqrt{\varepsilon_{n,r}/\varepsilon_0-\sin^2\theta_{n,i}}/\varepsilon_{n,r} \\ Z_{\mathrm{cn}}^{\perp}=Z_0/\sqrt{\varepsilon_{n,r}/\varepsilon_0-\sin^2\theta_{n,i}} \end{cases} \tag{3}$$

式中：Z_0 为自由空间的波阻抗($Z_0\approx377\,\Omega$)。

多层介质平板的透过系数 T 和反射系数 R 可分别由式(4)和式(5)计算得到，据此可以求出功率透过系数 T^2 和功率反射系数 R^2[24]。

$$T=\frac{2}{A+B/Z_{\mathrm{c0}}+CZ_{\mathrm{c0}}+D} \tag{4}$$

$$R=\frac{(A+B/Z_{\mathrm{c0}})-(CZ_{\mathrm{c0}}+D)}{(A+B/Z_{\mathrm{c0}})+(CZ_{\mathrm{c0}}+D)} \tag{5}$$

式中：水平极化时，$Z_{\mathrm{c0}}^{//}=Z_0\cos\theta_i$；垂直极化时，$Z_{\mathrm{c0}}^{\perp}=Z_0/\cos\theta_i$。

从式(2)～式(5)可知，功率透过系数 T^2 与介质平板材料的厚度、介电参数、电磁波的频率、极化模式和入射角度紧密相关。根据以上透波理论，本研究对单层 HAF 的介电特性和透波性能进行研究分析。

2　结果与讨论

2.1　实验结果与分析

图 3 为 2 种频率下 HAF 的介电参数随温度的变化曲线。从图 3 可以看出，在微波场中，HAF 的介电参数随温度的增加呈非线性变化。频率为 915 MHz 时，HAF 在 25~1 000 ℃区间内的介电常数从 1.453 增加到 1.643，介电常数的增加速率相对较快；频率为 2 450 MHz 时，HAF 在 25~800 ℃区间内介电常数的增加速率较为缓慢，当温度高于 800 ℃时，介

电常数的增加速率明显变大，如温度从 300 ℃增加到 400 ℃时，介电常数仅变化了 0.06%，但温度从 800 ℃增加到 900 ℃时，介电常数变化了 4.3%。在 25~1 000 ℃区间内 2 450 MHz 对应的介电常数始终大于 915 MHz 对应的介电常数，而介电常数的变大表示 HAF 储存的微波能增多。在 915 MHz 和 2 450 MHz 2 种频率下，HAF 的介电损耗因子随着温度的增加均呈现出先减小后增大的趋势。同时也可以发现，2 种频率下的介电损耗因子在 800~1 000 ℃区间内近似呈指数型增长，介电损耗因子的增加表明 HAF 将吸收的微波能更多地转化为内部的热能。

在温度达到 800 ℃之前，HAF 的介电参数随温度变化的原因在于水的含量和化学组成成分发生了变化。而在 800 ℃之后，HAF 材料发生熔融现象，晶型产生转变，提高了 HAF 材料的致密性，使得介电参数上升的速率明显增大。在不同温度和频率下，HAF 的介电参数有较大的差异，表明温度和频率是影响 HAF 介电特性的 2 个重要因素。

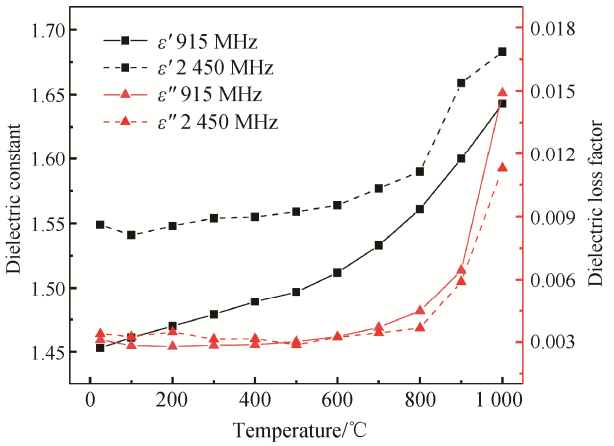
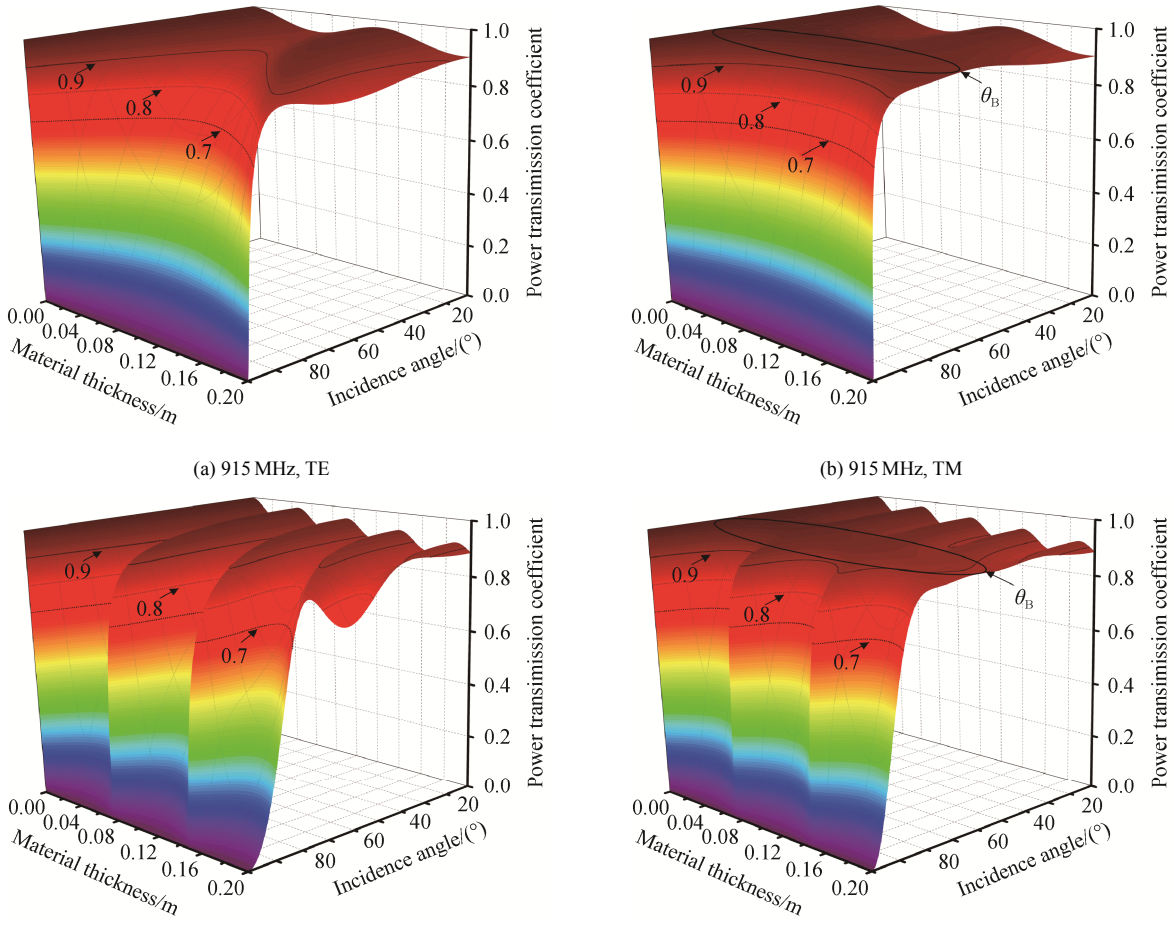


图 3 HAF 的介电参数随温度的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of dielectric parameters of HAF with temperature

2.2 极化模式和频率对透波性能的影响

图 4 为 915 MHz 和 2 450 MHz 频率下 HAF 处于不同极化模式中的 T^2 变化曲线(为便于分析，温度选取 1 000 ℃进行研究)。从图 4 可以看出，不同极化模式下 HAF 的透波性能明显不同，这是由于极



(a) 915 MHz, TE (b) 915 MHz, TM

(c) 2 450 MHz, TE (d) 2 450 MHz, TM

图 4 HAF 在不同极化模式、不同频率下的 T^2 变化曲线

Fig. 4 Variation of T^2 in HAF under different polarization modes and frequencies

化模式的变化使得等效特性阻抗发生改变所导致的。在频率为 915 MHz 时，图 4a 中 T^2 大于 0.7 的面积占比为 76.81%，大于 0.9 的面积占比为 52.62%；图 4b 中 T^2 大于 0.7 的面积占比为 86.85%，大于 0.9 的面积占比为 79%，而且在 2 450 MHz 频率下对应的 T^2 图中也可以发现相同的变化规律。从图 4 还可以发现，在 TM 极化模式对应的 T^2 图中存在一个 Brewster 角 θ_B，当微波以此角度所在范围内入射时，微波几乎全部透过 HAF，此时界面反射系数为零，HAF 的透波效果将会达到最佳。该角度可由 Fresnel 公式求得[25]：

$$\theta_B(\mathrm{TE}) = \arcsin\left(\sqrt{\frac{1-\varepsilon_r/\mu_r}{1-(1/\mu_r)^2}}\right) \tag{6}$$

$$\theta_B(\mathrm{TM}) = \arcsin\left(\sqrt{\frac{1-\mu_r/\varepsilon_r}{1-(1/\varepsilon_r)^2}}\right) \tag{7}$$

式中：μ_r 为复磁导率，$\mu_r=\mu'-j\mu''$；μ' 为磁导率；μ'' 为磁损耗；非磁性材料的 $\mu'=1$，$\mu''=0$[26]。

表 2 为 915 MHz 和 2 450 MHz 下不同温度所对应的 Brewster 角。由表 2 可以看出，HAF 的 Brewster 角始终处于 50°~53°之间。从式(6)可以得出，由于 HAF 为非磁性材料，所以在 TE 极化模式中并不存在 Brewster 角。由上述分析可以发现，在相同条件下，TM 极化模式下 HAF 的透波性能整体上优于 TE 极化模式。

由图 4 还可以看出，当微波频率从 915 MHz 增加为 2 450 MHz 时，HAF 的 T^2 曲线的波峰和波谷数增多，这主要是由于频率的增大使得微波在 HAF 中的波长 λ_d 减小所导致的，波长 λ_d 可由式(8)求得[27]。材料透波性能在一定程度上可以通过微波的穿透深度 D_p 来进行表征。由于频率的改变使得微波在 HAF 中的传播特性发生了变化，从而导致 D_p 也随之发生改变。穿透深度 D_p 可由式(9)计算求得[28]：

$$\lambda_d = \sqrt{2}\lambda_0\{\varepsilon'\mu' - \varepsilon''\mu'' + [(\varepsilon'\mu')^2 + (\varepsilon''\mu'')^2 + (\varepsilon'\mu'')^2 + (\varepsilon''\mu')^2]^{1/2}\}^{-1/2} \tag{8}$$

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi(2\varepsilon')^{1/2}}\left\{\left[1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2\right]^{1/2} - 1\right\}^{-1/2} \tag{9}$$

表 2　HAF 在不同频率、不同温度下的 Brewster 角

Table 2　Brewster angle of HAF at different frequencies and temperatures　　Brewster angle/(°)

Frequency/MHz	25 ℃	100 ℃	200 ℃	300 ℃	400 ℃	500 ℃	600 ℃	700 ℃	800 ℃	900 ℃	1 000 ℃
915	50.32	50.40	50.48	50.57	50.67	50.74	50.80	51.07	51.33	51.67	52.04
2 450	51.21	51.14	51.21	51.26	51.27	51.31	51.35	51.47	51.58	52.17	52.37

图 5 为波长 λ_d 和穿透深度 D_p 在 915 MHz 和 2 450 MHz 频率下随温度变化曲线。由图 5 可以看出，λ_d 和 D_p 在 2 种频率下均随温度的增加而逐渐减小。当频率从 915 MHz 增加为 2 450 MHz 时，微波在 HAF 中的 D_p 减小，微波穿透能力减弱。

2.3　材料厚度对透波性能的影响

图 6 为不同频率下 TM 极化模式和微波垂直入射时 HAF 的 T^2 随厚度变化曲线。由图 6 可以看出，HAF 的透波性能随着厚度的增加整体降低，引起这种变化的原因主要与微波的能量损耗 A 相关，能量损耗 A 的计算可由式(10)得出[29]：

$$A = \frac{2\pi d}{\lambda_d}\left[\frac{\varepsilon'\cdot\tan\delta}{\sqrt{\varepsilon'-\sin^2\theta_i}}\right] \tag{10}$$

式中：$\tan\delta$ 为损耗正切，$\tan\delta=\varepsilon''/\varepsilon'$。由式(10)可以看出，在其他影响因素一定时，随着材料厚度的增大，微波在介质材料中的传播路程增加，能量损耗 A 变大。因此 HAF 若想获得较好的透波效果就需要合理控制材料的厚度。

不同温度条件下 T^2 值随厚度的增加呈现出波动变化，在整个厚度区间内存在多个波峰和波谷，这可由半波长理论进行解释。根据半波长理论，当材料厚度取 $1/2\lambda_d$ 的整数倍时，可取得较好的透波效果，然而当材料厚度取 $1/4\lambda_d$ 的奇数倍时，透波效果则相对较差。如在 2 450 MHz 频率下，温度为 1 000 ℃、材料厚度 d=0.046 m 时，因为所取的厚度值约为 $1/2\lambda_d$ 的整数倍，对应的 T^2 值达到 0.979，而材料厚度取接近 $1/4\lambda_d$ 的奇数倍，如 d=0.025 m，虽然厚度减少，但对应的 T^2 值仅为 0.926。T^2 曲线波峰所对应的厚度值可根据式(2)～式(5)推导求得：

$$d = \frac{n\lambda_0}{2\sqrt{\varepsilon'/\varepsilon_0 - \sin^2\theta_i}} \tag{11}$$

式中：n 为任意正整数。式(11)为在 6 种温度下 0~0.2 m 厚度区间内不同位置的波峰所对应的厚度值，如表 3 所示。由图 6b 可以看出，波峰处对应的透波性能与波谷处对应的透波性能最大相差 13%，但是波谷处对应的功率透过系数最小也在 0.87 以上，这说明在该厚度区间内材料的透波性能整体较好。

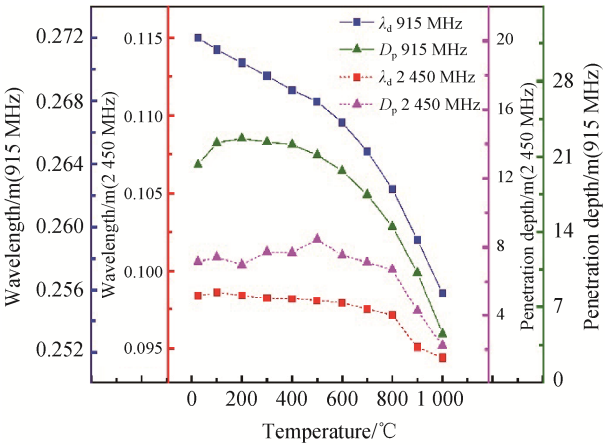


图 5 HAF 的波长和穿透深度随温度变化曲线

Fig. 5 Variation curve of HAF wavelength and penetration depth with temperature

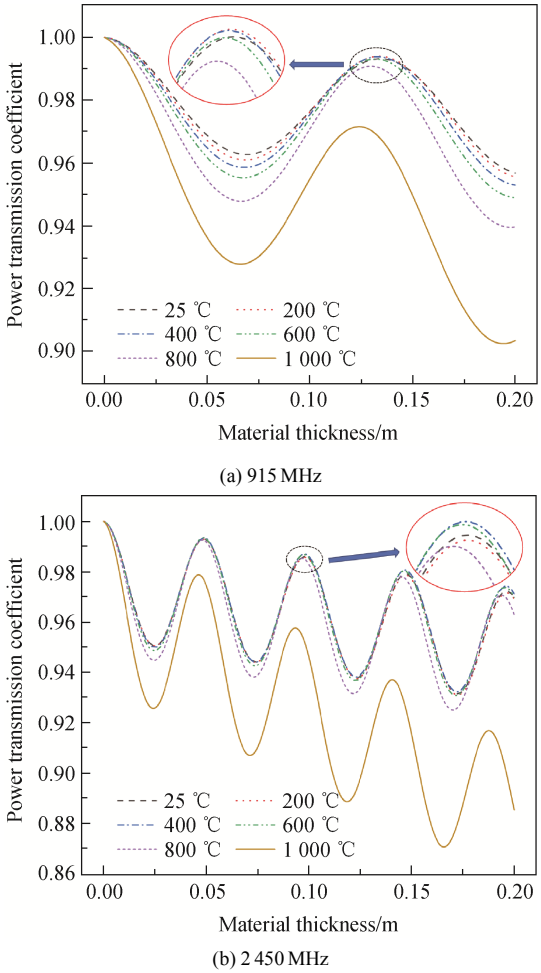


图 6 2 种频率下 HAF 的 T^2 随厚度的变化曲线

Fig. 6 Variation of T^2 of HAF varying with thickness at two frequencies

由图 6 还可以看出，随着温度的增加，HAF 的 T^2 曲线逐渐开始向下偏移，并且温度越高 T^2 曲线偏移幅度越大。如图 6a 第 1 个波谷处，当温度从 25 ℃增加到 600 ℃时，T^2 值下降了 0.007 5，而当温度从 600 ℃增加到 800 ℃以及从 800 ℃增加到 1 000 ℃时，T^2 值分别下降了 0.007 4 和 0.020 1。这是由于温度的增大会导致 HAF 的介电损耗因子变大，进而使得 HAF 的 T^2 曲线向下偏移。此外，T^2 曲线的波峰以及波谷随着温度的增加会向较小厚度方向偏移，但由于介电常数的变化幅度较小，因此偏移幅度较小。

表 3 2 种频率下不同位置的波峰对应的厚度值

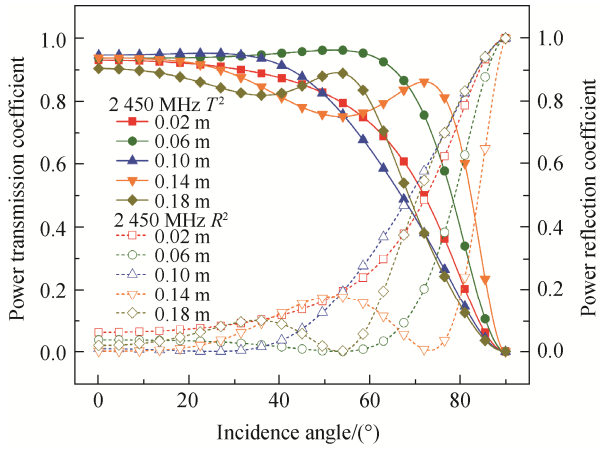
Table 3 Corresponding thickness values of wave crests at different positions at two frequencies

Temperature/℃	915 MHz		2 450 MHz				
	Peak 1/m	Peak 2/m	Peak 1/m	Peak 2/m	Peak 3/m	Peak 4/m	Peak 5/m
25	0	0.136	0	0.049	0.098	0.148	0.197
200	0	0.135	0	0.049	0.098	0.148	0.197
400	0	0.134	0	0.049	0.098	0.147	0.196
600	0	0.133	0	0.049	0.098	0.147	0.196
800	0	0.131	0	0.049	0.097	0.146	0.194
1 000	0	0.128	0	0.047	0.094	0.142	0.189

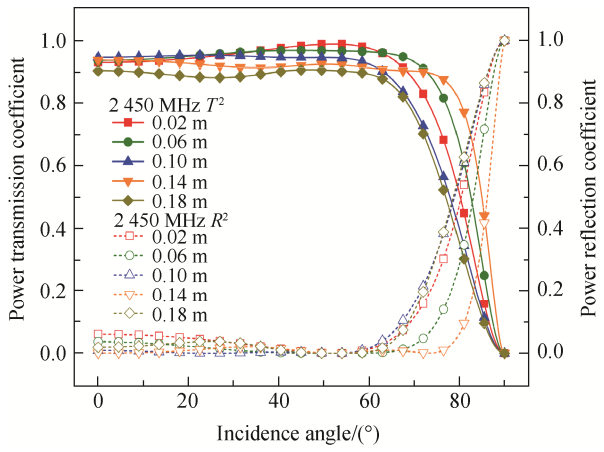
2.4 入射角度对透波性能的影响

图 7 为在 2 450 MHz 频率下不同极化模式条件中 HAF 的 T^2 和 R^2 随入射角度 θ_i 变化曲线(温度为 1 000 ℃)。由图 7 可见，随着 θ_i 的增大，T^2 和 R^2 曲线之间呈现出相反的变化趋势。在 TE 极化中，厚度 d=0.02 m、0.10 m 时，T^2 的变化曲线是单调递减的。当 θ_i≤30°时，微波射入 HAF 的透射和反射情况较为稳定，T^2 值最小为 0.901，说明此时大部分微波能量都可以透射过去。当 θ_i≥30°时，随着入射角度的增大，透射和反射情况开始迅速改变；厚度 d=0.06 m 时，入射角度在 0°~52°范围内，T^2 值变化较小，且在 θ_i=52°时达到极大值 0.962，随后 T^2 迅速减小；厚度 d=0.14 m、0.18 m 时，T^2 和 R^2 随入射角度的增大呈波动变化，都存在极大值和极小值，如 d=0.14 m，入射角度分别为 53°和 72°时，T^2 达到极小值 0.751 和极大值 0.861，R^2 达到极大值 0.177 和极小值 0.003。

在 TM 极化中，当θ_i≤52°时，随着入射角度的增加，T^2 和 R^2 分别递增和递减，但速率较慢；当微波以 Brewster 角入射，即θ_B=52°，此时微波在 HAF 中发生全透射，T^2 和 R^2 分别达到极值；当θ_i≥60°，随着入射角度的增加，T^2 迅速减小而 R^2 迅速增大。



(a) TE



(b) TM

图 7　2 种极化模式下 HAF 的 T^2 和 R^2 随入射角度的变化曲线

Fig. 7　Variation of T^2 and R^2 of HAF with incidence angle under two polarization modes

入射角度的改变会引起 R^2 和能量损耗 A 的变化，进而影响介质材料的透波性能。结合 HAF 的 R^2 曲线和式(10)可知，在其他因素一定时，随着入射角度的增大，R^2 和能量损耗 A 也随之变大，从而使得 T^2 减小。综上可得，在 TE 极化模式和 TM 极化模式下，当入射角度较小时，在材料中传输的微波被反射和吸收的很少，透射的较多。同时，如对材料的厚度有特殊要求且需获得较高的透波性能时，可优先考虑在 TM 极化模式下以 Brewster 角入射。

3　结论

温度和频率是 HAF 介电特性 2 个重要影响因素。随着温度的增加，HAF 的介电参数整体变大，温度越高介电参数变化幅度越大。此外，频率的变化还会影响 HAF 的介电性能，进而改变微波在 HAF 中的穿透特性。HAF 在 TM 极化模式下的透波性能较优异，但在实际工程应用中以 TE 极化模式作为设计标准则更具有普适性。HAF 的功率透过系数曲线在不同厚度处出现极大值，因此可通过调节材料厚度来有效地提高 HAF 的透波性能。合理控制微波入射角度对 HAF 的透波性能至关重要，在 TE 极化模式中应优先考虑微波以较小角度入射，而在 TM 极化模式中建议以 Brewster 角入射。本研究对于微波加热设备炉衬的选材以及工艺参数的优化具有重要的实际指导意义，有助于提高对微波能的利用率。

参考文献:

[1] GAO X, LIU X, YAN P, et al. Numerical analysis and optimization of the microwave inductive heating performance of water film [J]. Int J Heat Mass Tran, 2019, 139: 17–30.

[2] SALAKJANI N K, SINGH P, NIKOLOSKI A N. Acid roasting of spodumene: microwave vs. conventional heating [J]. Miner Eng, 2019, 138: 161–167.

[3] XU L, PENG J, BAI H, et al. Application of microwave melting for the recovery of tin powder [J]. Engineering–prc, 2017, 3(3): 423–427.

[4] 邵珠山, 魏玮, 陈文文, 等. 微波加热岩石与混凝土的研究进展与工程应用[J]. 工程力学, 2020, 37(5): 140–155, 165.
SHAO Zhushan, WEI Wei, CHEN Wenwen, et al. Eng Mech(in Chinese), 2020, 37(5): 140–155, 165.

[5] WEI W, SHAO Z, ZHANG Y, et al. Fundamentals and applications of microwave energy in rock and concrete processing–a review [J]. Appl Therm Eng, 2019, 157: 113751.

[6] HAYAT K, ABBAS S, HUSSAIN S, et al. Effect of microwave and conventional oven heating on phenolic constituents, fatty acids, minerals and antioxidant potential of fennel seed [J]. Ind Crop Prod, 2019, 140: 111610.

[7] 朱伟东, 卢喜瑞, 舒小艳, 等. 微波技术在放射性废物处理中的应用研究[J]. 材料导报: 纳米与新材料专辑, 2016, 30(2): 103–107.
ZHU Weidong, LU Xirui, SHU Xiaoyan, et al. Mater Rep(in Chinese), 2016, 30(2): 103–107.

[8] 付婷婷, 覃小丽, 刘雄. 食品的微波加工研究新进展[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(4): 187–194.
FU Tingting, QIN Xiaoli, LIU Xiong. J Chin Cereal Oil Ass(in Chinese), 2020, 35(4): 187–194.

[9] 陈功, 来水利, 李晨辉, 等. 软膜型煤炭阻燃抑尘剂的微波合成及其应用[J]. 精细化工, 2020, 37(5): 947–954, 1023.
CHEN Gong, LAI Shuili, LI Chenhui, et al. Fine Chem(in Chinese), 2020, 37(5): 947–954, 1023.

[10] FALCIGLIA P P, ROCCARO P, BONANNO L, et al. A review on the microwave heating as a sustainable technique for environmental remediation/detoxification applications [J]. Renew Sust Energ Rev, 2018, 95: 147–170.

[11] 李海涛, 李冉, 王广欣, 等. 钙–硼共掺铌酸钾钠基无铅压电陶瓷的微波制备及性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(9): 1396–1404.

LI Haitao, LI Ran, WANG Guangxin, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(9): 1396–1404.

[12] 殷增斌, 叶佳冬, 朱智勇, 等. 成型压力对微波烧结的复杂 Ti(C,N)基金属陶瓷刀具力学性能和显微结构的影响[J] (Eng). 硅酸盐学报, 2020, 48(12): 1906–1913.
YIN Zengbin, YE Jiadong, ZHU Zhiyong, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(12): 1906–1913.

[13] 赵盘巢, 易伟, 陈家林. 喷雾干燥结合微波煅烧氢还原法制备微米级球形钼粉[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(10): 3123–3128.
ZHAO Panchao, YI Wei, CHEN Jialin. Rare Metal Mater Eng(in Chinese), 2017, 46(10): 3123–3128.

[14] PENG Z, HWANG J. Microwave-assisted metallurgy [J]. Int Mater Rev, 2015, 60(1): 30–63.

[15] BEHREND R, DORN C, UHLIG V, et al. Investigations on container materials in high temperature microwave applications [J]. Energy Procedia, 2017, 120: 417–423.

[16] TAKAHASHI N, HASHIMOTO S, DAIKO Y, et al. High-temperature shrinkage suppression in refractory ceramic fiber board using novel surface coating agent [J]. Ceram Int, 2018, 44(14): 16725–16731.

[17] SHANG X, CHEN J, PENG J. Dynamic Transmission performances of alumina and mullite refractory ceramics in microwave high–temperature heating [J]. High Temp Mater Processes, 2016, 35(1): 113–119.

[18] SHANG X, ZHAI D, ZHANG F, et al. Electromagnetic waves transmission performance of alumina refractory ceramics in 2.45 GHz microwave heating [J]. Ceram Int, 2019, 45(17): 23493–23500.

[19] ZHAI D, WEI C, ZHANG F, et al. Microwave transmission performance of fused silica ceramics in microwave high-temperature heating [J]. Ceram Int, 2019, 45(5): 6157–6162.

[20] 崔之开. 陶瓷纤维[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 30–34.

[21] YAHALOM A, PINHASI Y, SHIFMAN E, et al. Transmission through single and multiple layers in the 3–10 GHz band and the implications for communications of frequency varying material dielectric constants [J]. WSEAS Trans Commun, 2010, 9(12): 759–772.

[22] LOWE M J S. Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media [J]. IEEE T Ultrason Ferr, 1995, 42(4): 525–542.

[23] CHEN F, SHEN Q, ZHANG L. Preparation of silicon nitride multilayer ceramic radome material and optimal design of the wall structure [J]. AIP Conf Proc, 2008, 973(1): 889–894.

[24] SUBRAMANIAN S, PACKIRISAMY T, MAHALINGAM M, et al. Scattering coefficients and pathgain of a multilayer tissue structure using ABCD matrix method [J]. J Amb Intel Hum Comp, 2021, 12(6): 6399–6406.

[25] PENG Z, HWANG J, ANDRIESE M, et al. Absorption characteristics of single-layer ceramics under oblique incident microwave irradiation [J]. Ceram Int, 2014, 40(10): 16563–16568.

[26] JIANG S, XU K. Measurement of the electromagnetic properties of materials based on a refined transmission–reflection algorithm [C] //2007 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Qingdao, China, 2007: 178–181.

[27] ZHANG F, ZHAI D, SHANG X, et al. Electromagnetic wave absorbing performance of aspirin powder during 2 450 MHz microwave drying [J]. Dry Technol, 2021, 39(5): 596–607.

[28] OMRAN M, FABRITIUS T, CHEN G, et al. Microwave absorption properties of steelmaking dusts: effects of temperature on the dielectric constant (ε') and loss factor (ε'') at 1 064 MHz and 2 423 MHz [J]. RSC Adv, 2019, 9(12): 6859–6870.

[29] TAKANO K, TANAKA Y, MORENO G, et al. Energy loss of terahertz electromagnetic waves by nano-sized connections in near-self-complementary metallic checkerboard patterns [J]. J Appl Phys, 2017, 122(6): 63101.