

TE₁₀₃单模谐振腔的计算模拟及优化

刘 繁,汪建华

(武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北省等离子体化学与新材料重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要:对 TE₁₀₃ 单模谐振腔中电磁波的分布进行了数值计算;推导出了麦克斯韦方程在谐振腔内电磁场分布的数学表达式;采用 Ansoft 软件对腔体中的电磁分布进行模拟并对腔体的尺寸进行优化.根据模拟的电场的形状以及其它相关的数据来判断此时反应器形状和性能.数值模拟结果表明,空腔有三个大小相近的电场均匀区域,在匹配情况下,谐振腔的固有品质因素相对较高.计算模拟结果与实验结果吻合较好,验证了计算和模拟的正确性,为设计高质量的谐振腔提供了参考依据.

关键词:TE₁₀₃单模谐振腔;电磁场;数值模拟;优化

中图分类号:O411.3

文献标识码:A

0 引 言

微波烧结是近年来迅速崛起的一门快速烧结技术.微波烧结系统中高温加热的主体部分,可以采用各种不同类型的单模腔或多模腔.单模腔由于具有功率密度高、损耗小、温度均匀和易于控制等优点,成为国际上主要采用的微波烧结结构的加热腔.在几种流行的单模谐振腔中,如 TE₁₀₃ 矩形单模谐振腔, TM₀₁₃ 圆柱形单模谐振腔, TE₀₁₁ 圆柱形单模谐振腔等,其中又以 TE₁₀₃ 矩形单模谐振腔应用最为广泛,因此弄清楚微波谐振腔中电磁场分布情况,优化反应腔的尺寸、耦合孔的大小等对设计具有高固有品质因素的谐振腔具有指导作用^[1].20 世纪 60 年代以前,电磁理论的分析大多采用解析法或渐近法;20 世纪 60 年代以后,随着计算机的发展和普及,数值方法被广泛的应用于电磁领域^[2,3].数值计算中代表性的方法有属于频域技术的有限元法等,属于时域技术的时域有限差分法等和高频技术的几何光学法等.文中直接运用解析法推导了 TE₁₀₃ 单模谐振腔内电磁场分布的数学表达式,并利用 Ansoft 软件对谐振腔内电磁场分布进行了数值模拟^[4],确定腔体基本尺寸,优化得到最佳耦合孔的尺寸,使谐振腔与传输系统相匹配,为设计具有高固有品质因素的微波烧结谐振腔提供了理论指导.

1 数学模型

图 1 为 TE₁₀₃ 矩形单模微波烧结腔的结构示

意图.选取 BJ-9 标准矩形波导,波导宽边与窄边长度分别为 $a=247.6\text{ mm}$, $b=123.8\text{ mm}$.微波的工作频率选用 915 MHz.微波能量由耦合孔激励到微波烧结腔内.通过调节短路活塞改变腔体长度以及调节耦合孔的大小,使得微波烧结腔与传输线相匹配,从而提高烧结腔的性能.

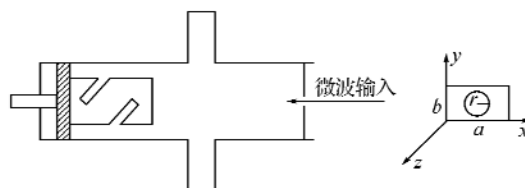


图 1 TE₁₀₃ 矩形单模微波烧结腔的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TE₁₀₃ sing-mode resonance cavity

对短路活塞的基本要求是要尽可能使微波得到全反射,为此必须尽量避免微波能量的损耗,防止其漏出,大功率时还要防止发生打火,此外还要求活塞能尽可能平滑移动以减少磨损.对短路活塞的要求是:在整个移动过程中要有良好的短路,短路面的位置恒定,短路处的电阻损耗应非常小;传输大功率时,应保证接触处不发生打火现象.短路活塞有同轴线型及波导型二种,其中按接触方式又分为弹簧接触式和抗流式两种.此外抗流结构在防止微波功率漏出以及获得良好的电接触方面有很多应用^[5].抗流活塞与接触式活塞相比较,由于无机械接触,故磨损较小,使用寿命可以延长,大功率时也不容易发生打火,因此我们选用的短路活塞为抗流结构短路活塞.本论文选用圆形耦

收稿日期:2008-06-04

作者简介:刘 繁(1983-),女,湖北仙桃人,硕士研究生.研究方向:微波电磁场计算模拟.

指导老师:汪建华,男,教授,博士生导师.研究方向:微波理论与低温等离子体技术应用.

合孔,对其尺寸进行优化。

图2为一种典型的抗流短路活塞的结构示意图。

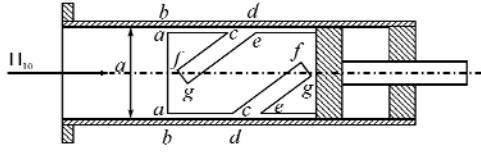


图2 抗流短路活塞的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of anti-flow short piston

从图2中可见,S形活塞与波导内壁并未直接接触,其中有一间隙,但此结构却能保证活塞与导体壁间仍有良好的电接触,微波功率不会从间隙中漏出,从而能保证抗流活塞产生全反射。

2 计算模拟

一个谐振加热结构是由四壁为金属导体所包围的介质媒质组成的,Maxwell方程包含所有在特定情况下建立的驻波图形的各个参量。在谐振腔中,由Maxwell方程可以得到以下波动方程:

$$\nabla^2 E(x, y, z) + \omega^2 \mu \epsilon E(x, y, z) = 0$$

$$\nabla^2 H(x, y, z) + \omega^2 \mu \epsilon H(x, y, z) = 0$$

由以上波动方程,结合边界条件,可知:在TE₁₀₃模谐振腔中,电场只有y方向分量。电场和磁场的计算表达式为:

$$\begin{aligned} E &= E_y a_y = E_m \sin(k_x x) \sin(k_z z) a_y \\ H &= \frac{j}{\omega_0 \mu_0} \nabla \times E = \frac{j E_m}{\omega_0 \mu_0} \left(a_x \frac{\partial}{\partial x} + a_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \times \\ &\quad \sin(k_x x) \sin(k_z z) a_y = \\ &\quad - \frac{j E_m}{\omega_0 \mu_0} k_z \sin(k_x x) \cos(k_z z) a_x + \\ &\quad \frac{j E_m}{\omega_0 \mu_0} k_x \cos(k_x x) \sin(k_z z) a_z \end{aligned}$$

其中: $k_x = \frac{\pi}{a}$, $k_z = \frac{\pi}{l}$,

亦即:

$$\begin{cases} E_y = E_m \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{\pi}{l}z\right) a_y \\ H_x = -\frac{j E_m \lambda_0}{\eta 2l} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{\pi}{l}z\right) a_x \\ H_z = \frac{j E_m \lambda_0}{\eta 2a} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{\pi}{l}z\right) a_z \\ E_x = E_z = H_y = 0 \end{cases}$$

TE₁₀₃模谐振腔中的下标1,0,3分别表示场沿a,b,l三个方向分布的半驻波个数。由TE₁₀₃模谐振腔的场分布表达式可知:TE₁₀₃模只有E_y,H_x和H_z三个分量,且均与y无关。这表明电磁场沿y

方向无变化,其电场只有E_y分量,它沿x方向呈正弦变化,在a边上有半个驻波分布,即在x=0和a处为零,在x=a/2处最大,如图3和4所示;E_y沿z方向按正弦变化。TE₁₀₃模的磁场有H_x和H_z两个分量。H_x沿a边呈正弦分布,有半个驻波分布,即在x=0和a处为零,在x=a/2处最大;H_z沿a边呈余弦分布,在x=0和a处最大,在x=a/2处为零。H_x沿z方向按余弦变化,H_z按z方向按正弦变化。H_x和H_z在xy平面内合成闭合曲线,类似椭圆形状,如图5所示。

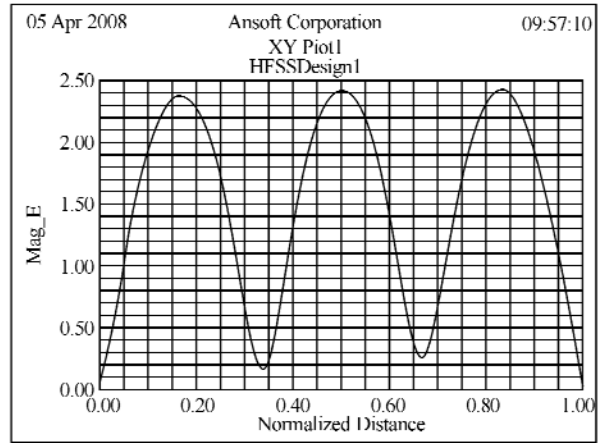


图3 l方向上分布的半驻波数

Fig. 3 The semi-standing wave on the l direction

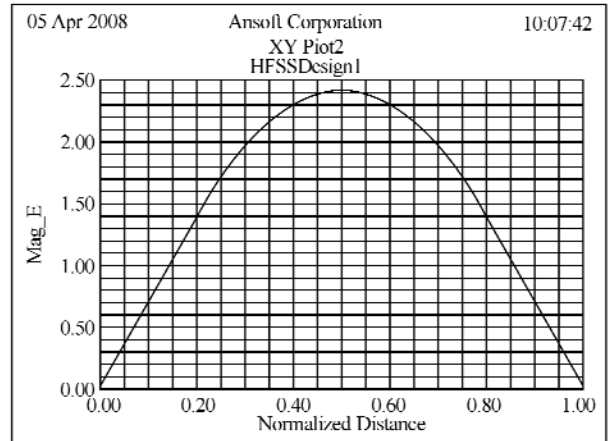


图4 a方向上分布的半驻波数

Fig. 4 The semi-standing wave on the a direction

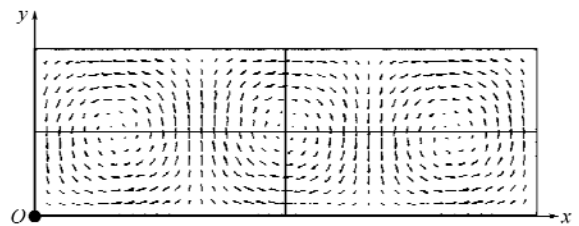


图5 XOY平面上磁场分布示意图

Fig. 5 Diagram showing the electric field on the XOY cross section

3 耦合孔的优化

用 ANSOFT 软件对空腔的内部电磁场分布进行优化. 原采用的耦合孔的半径取为 40 mm, 在微波烧结腔内放置一段相对介电常数为 1 左右的 Si_2O 介质. 为了得到更高性能的微波烧结腔, 使传输线与谐振腔更加匹配, 对耦合孔进行优化. 图 6 所示, 耦合孔在 40~60 mm 之间变化, 步长取为 5 mm, 可以得到对应的反射系数. 再次选取耦合孔的取值范围, 图 7 所示, 为 50~55 mm, 步长取为 1 mm, 则可以得到耦合孔的最佳取值, 如图 8、图 9 和图 10 所示, 对比优化前后的烧结腔内的电磁场分布云图以及反射系数图, 明显可以得到, 优化后的烧结腔具有更好的性能.

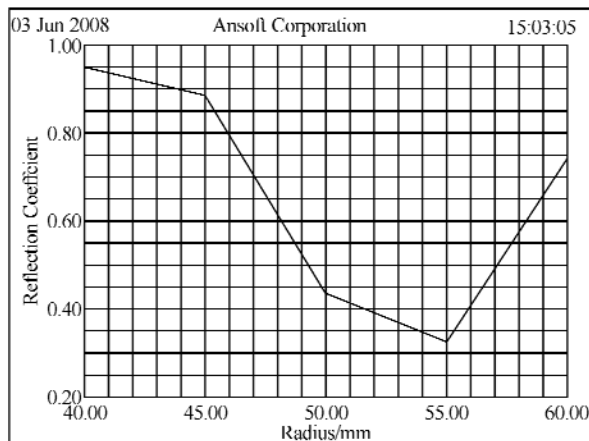


图 6 孔半径取值在 40~60 mm 时的反射系数
Fig. 6 The reflection coefficient at the radius of coupling hole between 40 mm and 60 mm

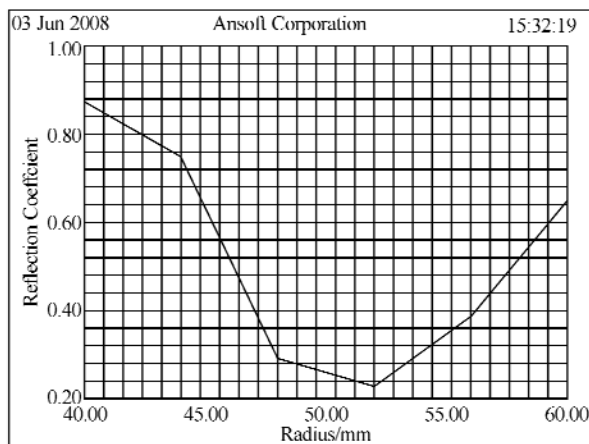


图 7 孔半径取值在 50~55 mm 时的反射系数
Fig. 7 The reflection coefficient at the radius of coupling hole between 50 mm and 55 mm

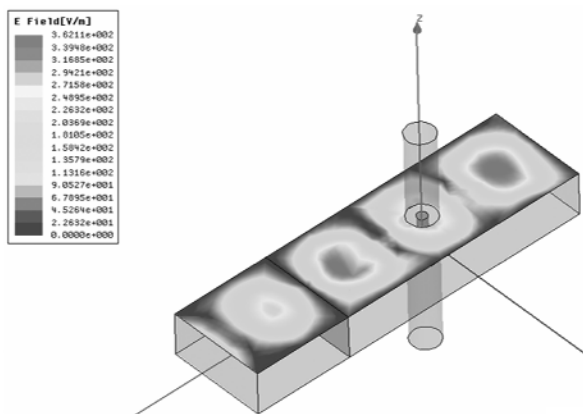


图 8 耦合孔半径为 40 mm 时的电场分布云图
Fig. 8 The field distribution at a radius of coupling hole is 40 mm

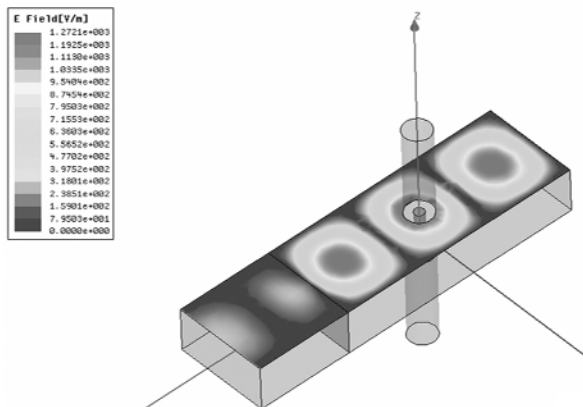


图 9 耦合孔半径为 53 mm 时的电场分布云图
Fig. 9 The field distribution at a radius of coupling hole is 53 mm

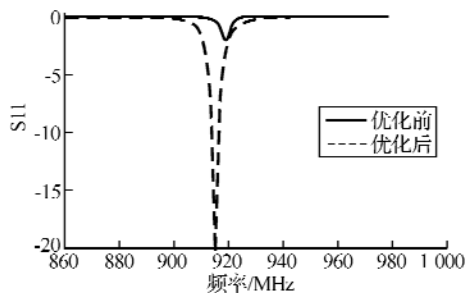


图 10 优化前后反射系数对比图
Fig. 10 The reflection coefficient before and after optimization

4 结 语

在微波技术中, 一般都希望用单模腔, 使得腔内只有一种振荡模式, 而设法滤去其他干扰模式. 本文选用了一种简单的模型, 采用解析法计算了微波谐振腔内电磁场分布的表达式, 得到空腔有三个大小相近的电场均匀区域. 并采用 Ansoft HFSS 软件模拟腔内电磁场分布情况及对耦合孔的大小进行优化. 模拟结果与实验具体放电情况

相符,证明 Ansoft 可以用来数值模拟反应腔内电磁场分布及优化其相关参数,此方法为设计高品质因素的谐振腔提供参考依据,具有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 蔡杰,张留琬. TE₁₀₃单模谐振腔品质因素 Q 值的测量[J]. 中国科学院研究生院学报,1995,12(2):119-125.
- [2] 谢德馨,唐任远. 计算电磁学近年来的若干重要成果

[J]. 电工技术学报,2005,20(9):1-6.

- [3] Rattanadecho P. The simulation of microwave heating of wood using a rectangular wave guide: Influence of frequency and sample size[J]. Chemical Engineering Science,2006,14(61):4798-4811
- [4] 谢拥军,王鹏. Ansoft HFSS 基础及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007:30-96.
- [5] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 北京:国防工业出版社,1984:45-75.

Numerical simulation and optimization of electromagnetic field of TE₁₀₃ sing-mode cavity

LIU Fan, WANG Jian-hua

(School of Material Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology,
Key Laboratory of Plasma Chemical and Advanced Materials of Hubei Province, Wuhan 430074, China)

Abstract: We calculated numerically the distribution of the electromagnetic field in the TE₁₀₃ sing mode resonance cavity. A mathematical expression was deduced to describe the electromagnetic field distribution of the cavity based on the Maxwell Equation. The electromagnetic field distribution in the microwave resonance cavity was analyzed with the Ansoft software. The properties of the cavity were judged according to the distribution of the electromagnetic field and other relevant data. The simulation results show that there are three even electric field regions with the same size in the microwave resonance cavity without load and the cavity has a high quality when matched. The numerical simulation results are in accordance with the experimental results, which prove the correctness of the calculation and simulation and provide the evidence for designing the resonance cavity.

Key words: sing-mode resonance cavity; electromagnetic field; numerical simulation; optimization

本文编辑:萧 宁



(上接第 55 页)

A simple and novel method of preparation carbon encapsulated Co nanoparticles

CHEN Shu-Cun, XUE Jun, LI Jing, TANG Hao-kui, LI Ru, CAO Hong

(School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper used soluble polysaccharides (cellulose, sucrose, etc.) as substrate, cobalt nitrate as source for the metal, through 500 °C carbonation and 700~1000 °C heat to synthesize and characterize carbon-coated metal nanoparticles. By using XRD, HRTEM and other means to study the shape, composition and structure of the particles, the results showed that graphitic carbon-coated cobalt nanoparticles have a perfect structure, with cobalt core / graphite shell, graphite coating layer in a dozen or so, and particles' size between 20~50 nm. And the authors systematically inspected the preparation process and parameters, such as the amount of metal distribution, annealing temperatures and annealing time processing conditions on carbon-coated cobalt nanoparticles forming impact.

Key words: carbon encapsulated; Co nanoparticles; sucrose; cellulose

本文编辑:萧 宁