

波导管隔板对废旧橡胶裂解传输功率的影响

李志华,马 涛,王田荣

(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘要:采用 HFSS 软件模拟分析 2 450 MHz 频率下在波导管中设置石英板对废旧橡胶微波裂解传输功率的影响。结果表明,设置双层石英板且保持合适间距有利于提高波导管能量传输效率,极大地减小能量损耗,解决了废旧橡胶微波裂解中出现的能耗过大及波源易损坏的难题,提高了微波裂解效率以及裂解设备的可靠性和安全性。

关键词:废旧橡胶;微波裂解;波导管;石英板;传输功率

中图分类号:X783.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2015)06-0367-04

微波是指频率在 0.3~300 GHz 范围内的电磁波,工业微波设备应用较多的是 915 和 2 450 MHz 两个频率的电磁波,而以 2 450 MHz 频率应用最多。微波在橡胶工业领域的应用,尤其是废旧橡胶的微波裂解已经引起了业内人士的关注^[1]。其原理是微波发生器发出的微波经过波导管进入裂解腔体内的废旧橡胶内部,使其断键裂解。废旧橡胶在裂解过程中会产生可燃气体,为防止可燃气体从裂解腔体沿波导管进入微波发生器,使其损坏甚至引发火灾,应在波导管的某个截面处设置隔板。最理想的隔板材料应既能阻隔可燃气体通过,又能使微波无损耗透过。虽然石英是非常好的耐高温隔板材料和透波材料,但隔板的设置还是改变了原有波导管的功率传输特性。当然,真正产生影响的是它的一些物理参数,如介电常数、介质损耗因子等^[2]。如果设置不当,造成的后果就是反射功率增大、传输功率减小,影响裂解质量和裂解效率。因此,优化石英板在波导管中的位置及设置数量,达到无反射功率损耗或极小反射功率损耗是废旧橡胶微波裂解研究中需要解决的问题之一。

HFSS(High Frequency Structure Simulator)是当今比较优秀的三维电磁场仿真软件。利用 HFSS 软件可以计算和分析电磁场数值解和边界问题、近远场辐射问题、端口特性阻抗和传输

特性、S 参数(又称散射参数,用以表示功率的传输与损耗)和相应端口阻抗的归一化 S 参数以及结构的本征模和谐振频率等^[3-4]。本研究通过建立波导管三维模型,设定相关边界条件和参数,分析波导管内电磁场分布并得到相应的 S 参数值,以此分析波导管中石英板设置对微波传输功率的影响,找出困扰废旧橡胶微波裂解稳定运行的解决方案。

1 模型建立

1.1 麦克斯韦方程

微波具有自身的一些特点,如可以深入到某些物质的内部并与分子或原子产生相互作用及某些物质吸收微波后会产生热效应等,与普通无线电波之间仅是频率或波长的差异。因此,可以利用麦克斯韦方程进行分析和求解。

麦克斯韦方程有积分方程和微分方程两种形式。积分方程描述某些区域(如闭合回路、闭合曲面)内场量、场源之间的关系,并可用于确定介质分界面处的边界条件,但无法描述区域内各点处场量、场源之间的关系。微分方程描述空间各点处场量(对空间坐标系和时间的变化率)之间以及场量与该点处场源量的密度之间的关系^[5],包括法拉第电磁感应定律、安培环路定律、高斯定律和磁感应强度连续性定律的表达式。

通过对麦克斯韦微分方程和附加条件的运算求解,得到复矢量形式的波动方程。电磁场各分量由波动方程在相应的边界条件和激励条件下求

作者简介:李志华(1964—),男,山东潍坊人,青岛科技大学教授,硕士,长期从事高分子材料加工装备及技术的教学及科研工作。

解所得。复矢量形式的波动方程表达式为

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{H} = 0 \quad (2)$$

式中 $\mathbf{E}$ ——电场强度矢量;

ω ——角频率;

μ ——介质的磁导率;

ϵ ——介质的介电常数;

$\mathbf{H}$ ——磁场强度矢量。

1.2 S 参数

S 参数是建立在入射波、反射波关系基础上的网络参数,适于微波电路分析。用于微波传输的波导管可以等效成一个二端口网络,一端为微波输入端口,另一端为微波输出端口。在本研究中,S 参数可用 S_{11} 和 S_{21} 来描述。 S_{11} 表示反射损耗,即反射回微波输入端口的能量,该值越小越好; S_{21} 表示有效传输,即传输到微波输出端口的能量,该值越大越好,越大表示传输效率越高,最大值是 0 dB。

波导管的 S 参数如图 1 所示。



图 1 波导管 S 参数示意

以 P 表示微波入射功率, P_1 表示端口 1 到端口 2 的微波传输功率, P_2 表示微波反射功率, 则 S_{11} , S_{21} 与 P , P_1 , P_2 的对应关系式为

$$S_{11} = 10 \lg \frac{P_2}{P} \quad (3)$$

$$S_{21} = 10 \lg \frac{P_1}{P} \quad (4)$$

根据式(3)和(4)推导得

$$\eta_1 = \frac{P_2}{P} \times 100\% = 10^{\frac{S_{11}}{10}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\eta_2 = \frac{P_1}{P} \times 100\% = 10^{\frac{S_{21}}{10}} \times 100\% \quad (6)$$

式中 η_1 ——能量反射效率;

η_2 ——能量传输效率。

1.3 建模参数

经查空心金属波导国标^[6]可知,在 2 450

MHz 的频率下,空心矩形金属波导管截面长度为 109.22 mm,宽度为 54.61 mm。

根据废旧橡胶裂解设备的设计,取波导管高度为 300 mm,石英板工作长度为 109.22 mm,工作宽度为 54.61 mm,厚度为 5 mm。

已知石英(SiO_2 质量分数为 0.999)的相对介电常数为 3.8,介质损耗因子为 0.000 1。

波导管侧面设置为理想导体边界条件,假定微波输出口阻抗匹配,设置波导管的两个端面为端口激励,求解频率为 2 450 MHz。

2 HFSS 仿真及分析

2.1 未加石英板

图 2 所示为未加石英板的矩形波导管模型。

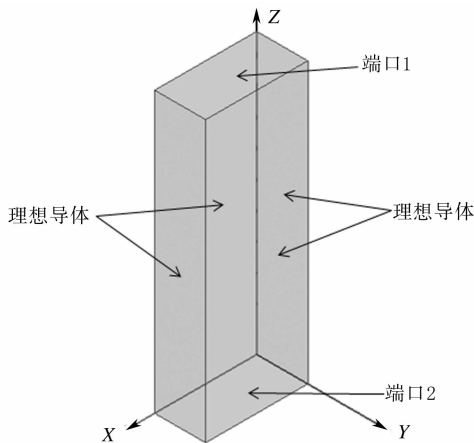


图 2 未加石英板的矩形波导管模型

仿真得到的矩形波导管的 S 参数值(dB)为: $S_{11} = -63.139\ 663$, $S_{21} = -0.000\ 002$ 。将其代入式(5)和(6)计算可知,波导管未加石英板时传输效率约为 100%,反射效率几乎为零。如果忽略波导管自身损耗,未加石英板的波导管可以将能量 100%从端口 1 传输到端口 2。

2.2 设置单层石英板

图 3 所示为设置单层石英板的矩形波导管模型。

为验证石英板处在波导管不同位置是否引起 S 参数值的变化,以石英板到波导管端口 1(XY 平面)的距离(l)为变量进行仿真,变量取值范围为 0~295 mm,每变化 1 mm 仿真一次。图 4 所示为仿真得到的设单层石英板的矩形波导管的 S

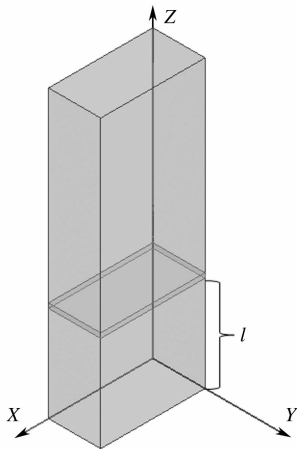


图 3 设置单层石英板的矩形波导管模型

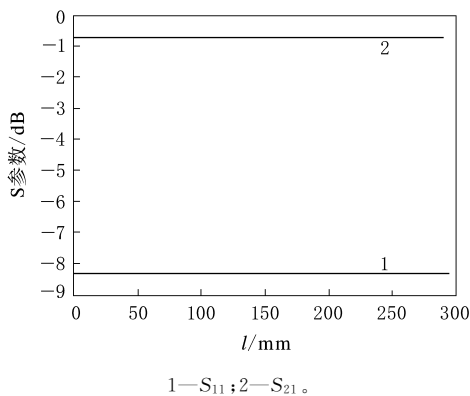


图 4 设置单层石英板的矩形波导管的 S 参数曲线

参数曲线。
从图 4 可以看出, S_{11} 和 S_{21} 几乎不随石英板位置变化而变化, 即不论石英板在何位置, 其反射功率和传输功率基本不变。

当 $l=10\text{ mm}$ 时, 仿真得到的 S 参数值(dB)为: $S_{11} = -8.274\ 549$, $S_{21} = -0.700\ 062$ 。将其代入式(5)和(6)计算可得出, 波导管中的反射效率为 14.88%, 传输效率为 85.11%。

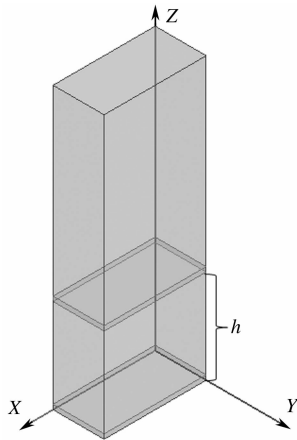
由此可见, 单层石英板的设置产生了较大的反射, 不仅造成了能量浪费, 而且反射回微波发生器后会对其造成很大的损害, 从而影响微波发生器的使用寿命。

随着石英板厚度的加大, 反射效率会进一步增大。虽然减小石英板的厚度可以在一定程度上降低反射效率, 但由于石英板的易碎特性, 其厚度减小受到限制。

2.3 设置双层石英板

为了尽可能减少甚至避免反射功率的产生,

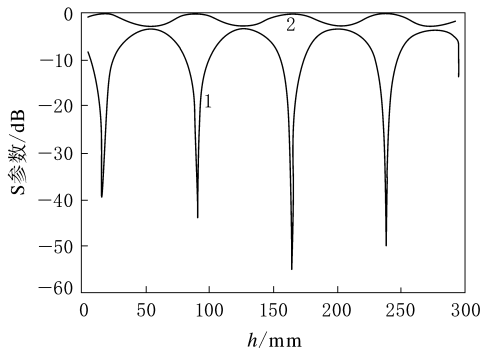
考虑在波导管中设置 2 层厚度为 5 mm 的石英板。第 1 层石英板放置在波导管端口 1 处, 改变两层石英板之间的距离, 通过仿真找到最优值。图 5 所示为设置双层石英板的矩形波导管模型。



h 为石英板之间的距离。

图 5 设置双层石英板的矩形波导管模型

图 6 所示为设置双层石英板的矩形波导管的 S 参数曲线。



同图 4。

图 6 设置双层石英板的矩形波导管的 S 参数曲线

从图 6 可看出, 当两层石英板之间的距离为某一定值时, 波导管的 S_{11} 参数值最小, 而 S_{21} 参数值最大。

表 1 示出了 S 参数的极值以及对应的两石英板间距。

将表 1 数据代入式(5)和(6)计算可以得出, 当 h 为 54, 127, 201 和 275 mm 时, 波导管的传输效率较小, 而反射效率较大; 当 h 为 16, 90, 164 和 238 mm 时, 波导管的传输效率较大, 其中以 $h=164\text{ mm}$ 时最大, 为 99.98%, 反射效率最小, 接近为零。因此在波导管中设两层石英板的最佳布置

表 1 设置双层石英板的矩形波导管的 S 参数值

<i>h</i> /mm	<i>S</i> ₁₁ /dB	<i>S</i> ₂₁ /dB
16	−39.295 20	−0.001 21
54	−3.464 12	−2.600 50
90	−44.034 70	−0.000 87
127	−3.466 54	−2.598 54
164	−54.781 60	−0.000 72
201	−3.463 98	−2.600 64
238	−49.744 40	−0.000 75
275	−3.465 41	−2.599 46

方案为:第 1 层石英板在端口 1 位置,第 2 层石英板应距其 164 mm。

3 结论

HFSS 软件可用来模拟波导管内的电磁场分布,通过求解 S 参数值,分析波导管能量的传输效率和反射效率,进而优化设备结构,提高波导管的能量传输效率,实现能量利用最大化的目的。

本研究针对废旧橡胶微波裂解设备中在波导管内加入石英隔板对传输功率的影响进行模拟和分析,得出以下结论。

(1)当在波导管内加入单层石英板时,能量不能全部从一个端口传输到另一个端口,有一部分能量反射回馈至输入端口,造成能量损失,且无论石英板在波导管中的位置如何改变,这种能量损失一直存在,大小基本不变。

(2)在波导管中加入双层石英板时,两层石英板之间保持合适的间距将提高能量的传输效率。对于本研究仿真的波导管,其最佳间距为 164 mm,此时传输效率可以达 99.98%。

在微波裂解设备中,对于微波传输的波导管有气体或液体隔离要求时,石英板(或其他透波材料)的设置是必需的。通过在波导管上设置合适间距的双层石英板(或其他透波材料),可以达到提高波导管的能量传输效率,减少反射、降低能耗的目的。

根据仿真设计方案完善了废旧橡胶裂解实验设备,相关试验结果已验证了研究成果的准确性。

参考文献:

[1] 袁仲雪,刘川来,李志华. 电磁裂解装置[P]. 中国:CN 202499829U,2012-10-24.

[2] 全毅,周馨我. 微波透波材料的研究进展[J]. 材料导报, 1997,11(3):1-5.

[3] 谢拥军,刘莹,李磊,等. HFSS 原理与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2009:57-62.

[4] 李明洋. HFSS 电磁仿真设计应用详解[M]. 北京:人民邮电出版社,2010:1-3.

[5] 闫润卿,李英惠. 微波技术基础[M]. 北京:北京理工大学出版社,2011:61-62.

[6] GB/T 11450.2—1989,普通矩形波导有关规范[S].

收稿日期:2014-12-18

Effect of Waveguide Clapboard on Transmission Power for Waste Rubber Pyrolysis

LI Zhi-hua ,MA Tao ,WANG Tian-rong

(Qingdao University of Science and Technology,Qingdao 266061,China)

Abstract: Using HFSS simulation software,the effect of quartz clapboard set in waveguide on microwave transmission power at a frequency of 2 450 MHz was analyzed. The results showed that, double layers of quartz clapboards with proper interval distance could improve energy transmission efficiency of waveguide and significantly reduce power loss. With this design the energy consumption was reduced and the issue of easy damage of the wave source for waste rubber pyrolysis was solved. Therefore,the efficiency of waste rubber microwave pyrolysis increased, and the reliability and safety of pyrolysis equipment were improved.

Key words: waste rubber;microwave pyrolysis;waveguide;quartz clapboard;transmission power