微波裂解腔体波导管馈口分布 对废旧橡胶裂解的影响

苏 昕,李志华,胡立皓,赵宪冰

(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘要:在废旧橡胶的微波裂解腔体上设置4个波源和相应波导管,使用HFSS软件建立微波裂解模型,对裂解腔体上 波导管馈口的分布方式和间距进行电场分布和微波能损耗分析。结果发现,微波裂解腔体上相邻波导管馈口中心间距 为150 mm且波导管馈口呈正交分布时,相邻波源之间相互干涉最小,废旧橡胶裂解的微波能有效利用率最高,微波能反 射损耗最低。本仿真结果可为废旧橡胶微波裂解腔体设计提供依据。

关键词:废旧橡胶:微波裂解:裂解胶体:波导管馈口:微波能:仿真

中图分类号:X783.3 文献标志码:A

随着橡胶工业的快速发展,废旧橡胶产出量 与日俱增^[1-3],对废旧橡胶高值化循环利用的研究 也逐渐深入^[4-8]。废旧橡胶裂解的传统方式为热裂 解,而与其相比,微波裂解具有节能、环保、高效、 可控等优势^[9-10],A.V.YATSUN等^[11-12]利用微波裂 解废旧橡胶得到令人满意的结果。微波裂解废旧 橡胶的处理工艺为:在无氧或充满惰性气体的微 波裂解腔中,波导管馈口将微波能辐射到废旧橡 胶内部,处于电场中的废旧橡胶分子极化并高速 相对运动,在极短的时间内废旧橡胶迅速升温至 裂解温度,从而使废旧橡胶的高分子碳链发生断 链,得到相对分子质量较小的裂解气、裂解油以及 炭黑等可回收再利用的裂解产物^[13-14]。

橡胶制品形状和尺寸各异,原材料和配方不同,有的甚至采用纤维和钢丝等骨架材料,传统的热裂解技术一般预先对橡胶制品进行粉碎切块处理,并且提前将金属骨架去除,这使得其热裂解流程复杂,能耗大,效率低。研究^[15]表明,采

文章编号:1000-890X(2021)05-0369-05 DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2021.05.0369



用微波裂解技术,未去除钢丝的整条废轮胎反而 更易快速裂解,废轮胎的微波裂解相比于热裂解 可以节省人力物力、提高裂解效率、简化裂解工 艺和降低裂解能耗。

微波裂解腔体是通过波导管馈口传递微波能的^[16]。为提高废旧橡胶的裂解效率和降低裂解能耗,必须合理布置微波裂解腔体上的波源及与之相连的波导管。本工作利用电磁仿真软件HFSS, 对微波裂解腔体进行建模,研究裂解腔体上波导 管馈口的分布方式和间距对废旧橡胶裂解的影 响,进而得到最佳的设计参数。

1 仿真模型建立

本工作以废旧橡胶微波裂解腔体为仿真对 象,在裂解腔体上方设置4个波源和波导管,腔体 内置1条废轮胎,简化的仿真模型如图1所示。

仿真微波裂解腔体的长度、宽度和高度分别为700,700和350 mm;废轮胎呈环状,外直径、内直

作者简介:苏昕(1996—),女,山东日照人,青岛科技大学在读硕士研究生,主要研究废旧橡胶和废旧塑料的循环利用。 E-mail:775133124@qq.com

E-mail: //5133124@qq. com

引用本文:苏昕,李志华,胡立皓,等. 微波裂解腔体波导管馈口分布对废旧橡胶裂解的影响[J]. 橡胶工业,2021,68(5):369-373.

Citation: SU Xin, LI Zhihua, HU Lihao, et al. Influence of distribution of waveguide feed ports of microwave pyrolysis cavity on waste rubber's pyrolysis[J]. China Rubber Industry, 2021, 68 (5) : 369–373.





径和高度分别为600,400和200 mm;波源和相应 波导管4个,位于裂解腔体上方,每个波源功率为1 kW,微波频率为2.45 GHz;波导管型号为BJ-26, 截面呈矩形,长度和宽度分别为86.36和43.18 mm;裂解腔体以及波导管内的介质设定为空气 (仿真软件中在"波导管内部以及腔体填补材料特 性"选项中只有"空气"可以选择,不影响仿真结 果),设置边界条件与理想电场条件相同。

矩形截面的波导管与波源直接相连,波导管 馈口有正交分布和同向分布两种分布方式,如图2 所示。其中,L为相邻波导管馈口中心间距。

2 仿真过程与结果分析

对仿真模型裂解腔体上多个波源的波导管馈口的分布方式和间距进行电场分布和微波能损耗分析,通过比较S参数,研究微波能利用率与波导管馈口分布的关系。

S参数指S11和S21参数,计算公式为:

$$S_{11} = 10 \lg \left(\frac{P_2}{P}\right) \tag{1}$$

$$S_{21} = 10 \lg \left(\frac{P_1}{P}\right) \tag{2}$$

式中,P为微波入射功率,P₁为馈电端口1到馈电端口 2的微波传输功率,P₂为微波反射功率。

由式(1)和(2)可以看出,S₁₁指微波能反射损 耗,S₁₁的大小表示微波能反射损耗的高低,S₁₁越小, 说明微波能输出后反射回的微波能越小,微波能损 耗越低,微波能有效利用率越高。S₂₁指微波能输送 效率,S₂₁的大小表示微波能传输效率的高低,S₂₁越 大,说明微波能输出效率越高,微波能有效利用率



(a)正交分布



(b)同向分布

图2 裂解腔体上方波导管馈口分布方式示意 Fig.2 Distribution of waveguide feed ports above pyrolysis cavity

越高。本模型所建裂解腔体密闭,且无输出端馈口,4个输入端波导管馈口为中心对称分布,故只比较Su即可得到微波能利用率与L的关系。

2.1 波导管馈口正交分布

设置裂解腔体仿真模型中4个波导管馈口为 正交分布,基于波源和波导管的尺寸限制,L在 100~600 mm之间变化,计算步长为50 mm。

 S_{11} 与L的曲线如图3所示。

从图3可以看出:*L*为150 mm时*S*₁₁最小,其值 为-21.8,微波能有效利用率最高;*L*为600 mm时 *S*₁₁最大,其值为-8.7,微波能有效利用率最低。

为进一步精确判断,根据图3的推导结果,获取 L为150和600 mm时电场矢量分布图,如图4所示。 图中仅显示电场强度大于3 000 V•m⁻¹的区域。

从图4可以发现,相比L为600 mm,L为150 mm 时废旧橡胶对微波的吸收率明显较高,微波能反射 损耗较低,微波能有效利用率较高,因此L为150 mm



⁽b) L为600 mm



时,废旧橡胶裂解的能耗较低,更节能。

2.2 波导管馈口同向分布

设置仿真模型中4个波导管馈口为同向分 布,L在100~600 mm之间变化,计算步长为50 mm,得到的 S_{11} 与L的曲线与图3基本一致, $@S_{11}$ 普 遍较大,具体结果为:L为150 mm时 S_{11} 最小,其值 为-19.6,微波能有效利用率最高;L为600 mm时 S_{11} 最大,其值为-7.9,微波能有效利用率最低。

2.3 不同波导管馈口分布方式比较

对于不同波导管馈口分布,以S₁₁为微波能有 效利用率参数进行对比得出,波导管馈口同向分 布的微波能利用率的曲线(S₁₁与L的曲线)与波导 管馈口正交分布类似,但是其微波能反射损耗明 显比波导管馈口正交分布高10%左右。

L为200 mm时,不同波导管馈口分布方式的电 场矢量分布如图5所示,图中只显示电场强度大于 3 000 V•m⁻¹的区域。



(a)正交分布



图5 不同波导管馈口分布方式的电场矢量分布 Fig.5 Distributions of electric field vector of different waveguide feed port distribution forms

对比图5(a)与(b)发现,波导管馈口正交分 布的电场分布密度较大,强度分布较均匀。改变 L大小,可得到与图5类似的电场矢量分布图,表明 当输出功率控制不变,采用不同波导管馈口分布 方式,微波裂解废旧橡胶的裂解速度、时间及能耗 相差较大,废旧橡胶能吸收的微波能也有较大差 别。对于废旧橡胶的微波裂解,波导管馈口正交 分布的微波能有效利用率较波导管馈口同向分布 高约10%,说明波导管馈口采用正交分布比采用同 向分布更优。

3 结语

(1)在废旧橡胶微波裂解腔体中,微波裂解能 耗和微波能有效利用率的高低取决于与波源相连 的波导管馈口分布方式和排列间距。

(2)与波导管馈口同向分布相比,波导管馈 口正交分布的废旧橡胶对微波能的有效利用率 高10%左右,微波吸收能力更好,微波能反射损耗 更低。

(3)当L发生变化,裂微波解腔体内电场强 度发生改变,波源之间的相互干涉程度也随之变 化。对于波导管馈口正交分布和同向分布,当L为 150 mm时,微波能有效利用率最高,但相较于波导 管馈口同向分布,波导管馈口正交分布的废旧橡 胶裂解效率更高,微波能反射损耗更低。

参考文献:

凌勇坚,施胜胜,姜宝东,等.废旧橡胶回收和再生利用[J].中国资源综合利用,2017,35(2):33-35.

LING Y J, SHI S S, JIANG B D, et al. Waste rubber recycling and recycling[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2017, 35 (2):33–35.

[2] 庞邦辉. 废旧轮胎橡胶颗粒改良桂林红黏土工程特性研究[D]. 桂林:桂林理工大学,2020.

PANG B H. Study on engineering properties of Guilin red clay improved by waste tire rubber particles[D]. Guilin:Guilin University of Technology, 2020.

[3] 刘潇. 探解再生橡胶变废为宝走俏未来[J]. 乙醛醋酸化工, 2020 (4):25-29.

LIU X. Probe into the future of recycled rubber[J]. Acetaldehyde Acetic Acid Chemical Industry, 2020 (4) :25–29.

[4] 王媛. 橡胶低温复塑(再生)成套设备开发成功[J]. 橡胶工业, 2020,67(2):96.

WANG Y. Successful development of complete set of low temperature rubber plasticizing (regeneration) equipment[J]. China Rubber Industry, 2020, 67 (2):96.

- [5] 程贤甦,宋秋生,姚玉田. 废旧轮胎再生橡胶的氯化改性及其研究 进展[J]. 橡胶科技,2020,18(5):245-249.
 CHENG X S, SONG Q S, YAO Y T. Advance in chlorination of recycled rubber[J]. Rubber Science and Technology, 2020, 18(5): 245-249.
- [6] 孙岳红,雷国安,路丽珠,等.废旧橡胶循环利用技术进展[J].橡胶 科技,2020,18(2):77-80.

SUN Y H, LEI G A, LU L Z, et al. Technology progress of waste

rubber recycling[J]. Rubber Science and Technology, 2020, 18 (2) : 77-80.

[7] 曲锴鑫,李雪,宋鹏豪,等.废旧橡胶轮胎的再利用研究进展[J].化 工科技,2019,27(6):71-75.

QU K X, LI X, SONG P H, et al. Progress in recycling of waste rubber tires[J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2019, 27 (6):71–75.

[8] 李志华,刘飞鹏.废旧橡胶高值化利用裂解技术研究进展[J].特种 橡胶制品,2016,37(1):60-64.

LI Z H, LIU F P. Development of pyrolysis technology of waste rubber[J]. Special Purpose Rubber Products, 2016, 37 (1):60–64.

[9] 张伟燕,刘友春.多模微波加热谐振腔的建模与仿真[J]. 真空电子 技术,2013(5):22-25.

ZHANG W Y, LIU Y C. Modeling and simulation of multimode microwave resonant cavity[J]. Vacuum Electronics, 2013 (5) :22–25.

[10] 李勇. 旋转式废旧橡胶裂解设备的设计与实验研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2019.

LI Y. Design and experimental study of rotary cracking equipment for waste rubber[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2019.

- [11] YATSUN A V, KONOVALOV N P, EFIMENKO I S. Liquid products of the microwave pyrolysis of scrap tires[J]. Solid Fuel Chemistry, 2013, 47 (4):252–254.
- [12] KONOVALOV P N, KONOVALOV N P, YATSUN A V. Gaseous products of microwave pyrolysis of scrap tires[J]. Solid Fuel Chemistry, 2008, 42 (3) :187–191.
- [13] 高腾飞,肖天存,闫巍,等. 固体废弃物微波技术处理及其资源 化[J]. 工业催化,2016,24(7):1-10.
 GAO T F, XIAO T C, YAN W, et al. Treatment and recovery of solid waste by microwave techniques[J]. Industrial Catalysis,2016, 24(7):1-10.
- [14] 于兴智,石灵,张学军,等. 微波能在废轮胎裂解回收中的工程化应用[J]. 真空电子技术,2013(6):83-85.

YU X Z, SHI L, ZHANG X J, et al. The engineering applications of microwave energy pyrolysis in recovery waste tires[J]. Vacuum Electronics, 2013 (6):83–85.

[15] 李志华,郭楠.钢丝对废橡胶微波裂解过程的影响分析[J].橡胶 工业,2018,65(8):948-951.

LI Z H, GUO N. Analysis of effect of steel cord on microwave pyrolysis process of waste rubber[J]. China Rubber Industry, 2018, 65 (8) :948–951.

- [16] 李志华,刘飞鹏.裂解腔内废旧橡胶的位置对裂解速率的影响[J]. 橡胶工业,2017,64(6):354-358.
 - LI Z H, LIU F P. Effect on different position in pyrolysis chamber on the pyrolysis rate of waste rubber[J]. China Rubber Industry, 2017,64 (6) : 354–358.

收稿日期:2020-11-29

Influence of Distribution of Waveguide Feed Ports of Microwave Pyrolysis Cavity on Waste Rubber's Pyrolysis

SU Xin, *LI Zhihua*, *HU Lihao*, *ZHAO Xianbing* (Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Four wave sources and corresponding waveguides were set up on the microwave pyrolysis cavity for waste rubber. The microwave pyrolysis model was established by using HFSS software. The electric field distribution and microwave energy loss of the distribution and spaces of the waveguide feed ports on the pyrolysis cavity were analyzed. The results showed that, when the center distance between adjacent waveguide feed ports was 150 mm and waveguide feed ports were orthogonally distributed, the interference between adjacent wave sources was the smallest, the microwave energy efficiency of the waste rubber pyrolysis was the highest, and the microwave energy reflection loss was the lowest. The simulation results could provide a basis for the design of the microwave pyrolysis cavity for waste rubber.

Key words: waste rubber; microwave pyrolysis; pyrolysis cavity; waveguide feed port; microwave energy; simulation

由安徽华海特种电缆集团有限公司申请的专利(公布号 CN 112037994A,公布日期 2020-12-04)"一种硅橡胶绝缘动力线芯控制线芯光 纤组合移动扁电缆",涉及的组合移动扁电缆包括 动力线、控制线和光纤。动力线芯和控制线芯的 外壁均包覆第一包覆层,光纤的外壁包覆中心包 覆层,中心包覆层的两端均粘接电磁屏蔽条;两个 第一包覆层的一侧均开设有通槽,两个通槽的内 壁分别与中心包覆层的两侧卡合连接,两个第一 包覆层的外壁均包覆第二包覆层,第二包覆层的 底部粘接底加强板,第二包覆层的两侧均粘接侧 加强板。该组合移动扁电缆能够同时进行多种信 号的传输,且电缆整体的抗拉能力强,电缆损坏率 低,安装时稳定性高。

由张丽珠申请的专利(公布号 CN112050600A, 公布日期 2020-12-08)"一种橡胶带干燥机",涉 及的橡胶带干燥机包括移动轮、底座、烘干箱和烘 干机。底座底部安装移动轮,底座上设有烘干箱, 烘干箱侧面与烘干机相连接,烘干箱由箱体、驱动 结构、隔板、滤板、高位辊、低位辊组成,且滤板设 在隔板上方,高位辊和低位辊分别安装在滤板上 方。该发明拉动橡胶带时利用橡胶弹性使橡胶带 呈波浪状前进,从而使橡胶带的每个位置的组织 空隙多次变大,使内部水分具有较大的逸出通道, 提高内部的干燥效率,从而防止发粘现象,且通过 负压方式对橡胶带进行吸附固定,便于带动橡胶 带按轨迹移动。

由沅陵县成瑞祥粉体材料科技有限公司申 请的专利(公布号 CN 112029293A,公布日期 2020-12-04)"一种电子管封装硅橡胶",涉及 的电子管封装硅橡胶配方为:乙烯基甲基苯基硅 油 2~12,甲基苯基硅油 3~15,甲基苯基己 烯基硅树脂 12~24,白炭黑 5~11,抑制剂 2~4,增粘剂 1~5,催化剂 0.5~1.5,交联剂 4~10。该硅橡胶具有强度高、热稳定性好和不 易熔化变质的优点,其封装的电子管不易断裂,使 用寿命长。

(本刊编辑部 赵 敏)