

# 废旧橡胶微波连续裂解的仿真与试验研究

李志华, 李 勇, 宋应帅, 刘强彩, 刘飞鹏

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

**摘要:**设计了一种废旧橡胶螺旋式微波连续裂解装置。确定了微波发生器的排布方式和裂解腔体的结构尺寸, 并进行了有限元电磁仿真, 得到最佳能量场分布。利用该装置进行了废旧橡胶的连续裂解试验, 基于试验数据, 分析了裂解产物化学成分和比例。该废旧橡胶螺旋式微波连续裂解装置满足节能环保要求。

**关键词:**废旧橡胶; 微波裂解; 仿真; 试验

**中图分类号:** TQ335; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2018)-0000-04

随着我国汽车工业的发展, 轮胎用量逐年增长, 废旧轮胎产生量也随之增大。废旧轮胎长期露天堆放, 带来了严重的环境污染和土地占有等社会问题, 对经济的可持续发展造成威胁。循环能源是缓解资源匮乏、解决环境污染等问题行之有效的途径<sup>[1-3]</sup>。废旧橡胶的资源化利用已成为各国学者研究和社会关注的热点问题<sup>[4]</sup>。

废旧橡胶的微波裂解是近几年发展起来的一种资源转化利用新技术<sup>[5]</sup>。它是在无氧环境下, 将废旧橡胶加热至250~500℃, 使其在短时间内发生断键反应, 生成有机低分子物质<sup>[6]</sup>。橡胶裂解产生的气体经过冷却得到裂解油和可燃气, 产生的固体残余物即为炭黑。与传统的热裂解技术<sup>[2]</sup>相比, 微波裂解具有升温速率快、受热均匀、可以选择性加热等优点。同时微波裂解是一种环境友好型裂解方式, 可实现废旧橡胶的低能耗、无污染循环利用<sup>[7]</sup>。

本工作利用微波的特点, 结合对废旧橡胶的裂解处理要求, 设计了一种螺旋推进式的微波连续裂解装置。

## 1 装置结构组成和工作原理

### 1.1 结构组成

废旧橡胶螺旋式微波连续裂解装置如图1所示。裂解腔外部选用耐高温保温材料包覆。裂解腔横截面下部为圆弧形, 上部为梯形, 裂解腔顶部

沿轴线方向设置了3排共35个微波发生器, 相邻微波发生器正交排列。

裂解腔体和推料螺旋选用耐高温不锈钢材料, 具体参数如下: 螺旋直径 200 mm, 转速 1.5 r·min<sup>-1</sup>, 有效工作长度 2 900 mm, 单个微波发生器功率 1 kW, 工作频率 2.45 GHz, 总功率 35 kW。

### 1.2 工作原理

废旧橡胶经粉碎后变成胶粉, 经加料仓滑落到裂解腔内, 驱动电动机和减速机带动推料螺旋旋转, 将胶粉向前推送。胶粉移动的同时接收来自裂解腔上方微波发生器发出的微波能。由于微波的穿透性, 胶粉无论位于腔体何处, 都能接收到微波能。微波能的作用使橡胶大分子断键裂解成有机小分子, 裂解产生的固体产物直接从炭黑出口导出, 再经后处理可得到品质较高的商用炭黑; 气体从裂解气出口导出, 经过缓冲、冷凝、沉降、分馏等后处理工序可分别得到重油和轻油, 剩余的未冷凝裂解气经脱硫和过滤等工序进入储气罐, 经压缩可成为商用液化气。

## 2 有限元分析

### 2.1 建模

根据装置尺寸分别建立微波裂解腔体、金属螺旋和废旧橡胶的有限元模型, 利用HFSS有限元电磁仿真软件设定相关参数、边界条件和电磁激励<sup>[8-10]</sup>, 即可进行电磁分析。

在裂解腔体上方建立3排微波发生器馈口模

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

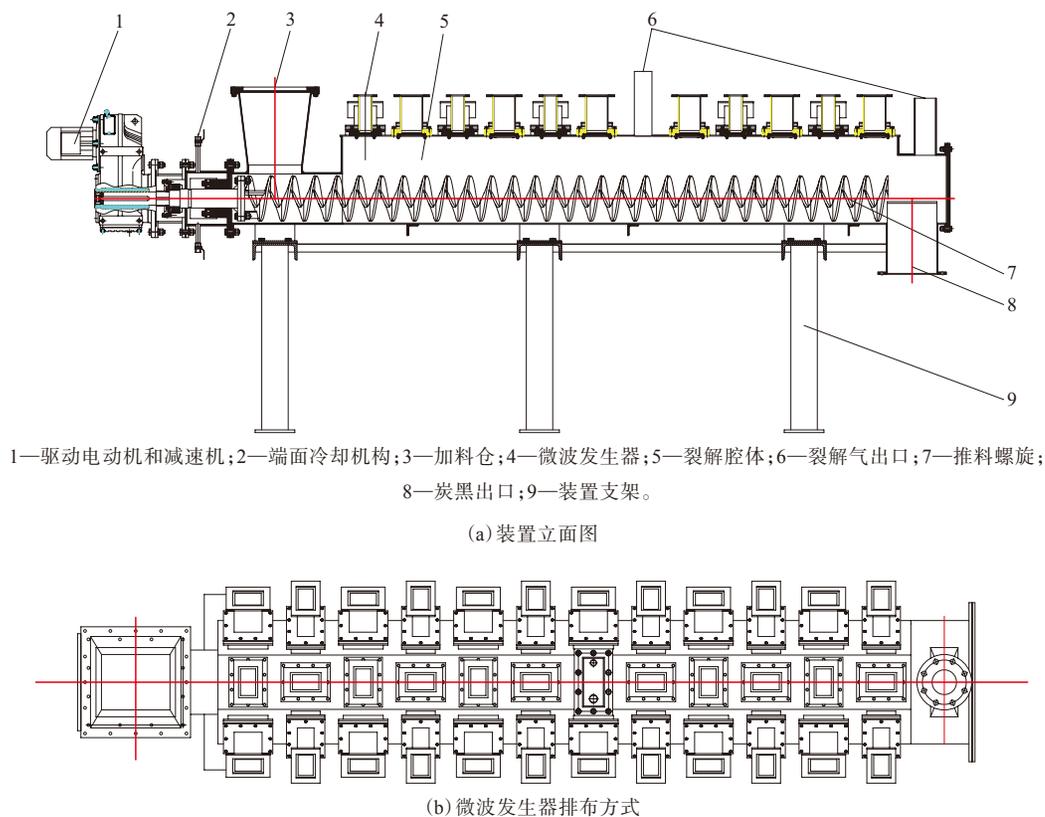


图1 螺旋式微波连续裂解装置结构示意图

型,在馈口处设置波端口激励,裂解腔体的四周均设为理想边界条件,求解频率设置为2.45 GHz。

## 2.2 模型分析

### 2.2.1 裂解腔体微波能量场分布

裂解腔体能量场分布云图如图2所示。

由图2(a)可以看出,在裂解腔体内呈现若干红色团絮状电场分布的均匀区域,微波能量较均匀地分布于裂解腔内,在这些区域内电场的分布范围与强度基本一致,场强范围为 $1\ 600\sim 1\ 973.5\ \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 。由图2(b)可以看出,有6处近似椭圆形的电场强度较大的红色区域,其中5处位于推料螺旋上部,1处接近裂解物料中心,电场分布均匀稳定,场强密度较高,几乎覆盖了整个裂解物料,符合微波裂解电性特质,说明该裂解腔体结构具有很好的微波能量场分布。

### 2.2.2 裂解物料能量场分布

废旧橡胶在裂解腔体内轴线方向上的微波能量场分布如图3所示。

由图3可见,废旧橡胶内部能量场分布较为均匀,整体呈现红色,位于推料螺旋内的废旧橡胶微

波能量场强范围为 $502.3\sim 893.2\ \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ,达到微波裂解废旧橡胶的场强要求,说明金属推料螺旋在裂解腔体内的存在对废旧橡胶微波能量场分布影响可以忽略,可以达到废旧橡胶连续裂解的最佳状态。

## 3 裂解实验

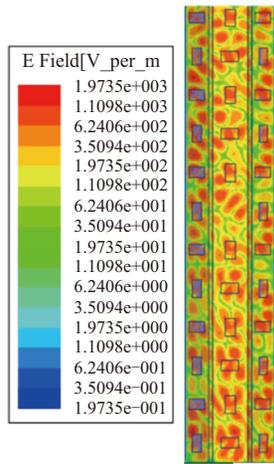
### 3.1 试验方法

采用螺旋式微波连续裂解装置进行试验。废旧橡胶颗粒直径小于5 mm,连续裂解13 h,记录裂解腔体温度和压力、裂解气体管道温度和压力以及加料量。

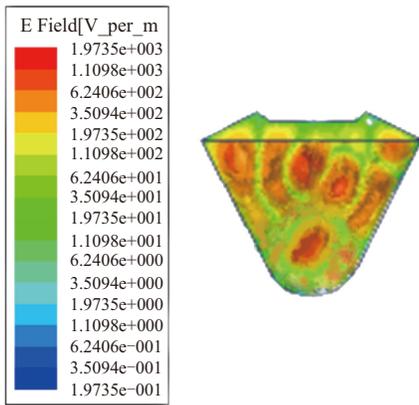
### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 裂解腔体和气体管道温度

裂解腔体和气体管道温度变化曲线如图4所示。由图4可以看出,2 h之前裂解腔体和气体管道温度不断升高,2~13 h时裂解腔体温度在 $375\sim 425\ ^\circ\text{C}$ 范围内,虽有波动但幅度不大,气体管道温度的变化与管道压力和裂解气体引风机转速有关,其变化幅度不会影响裂解的正常进行,对裂



(a) 轴线方向上微波能量场分布俯视图



(b) 微波能量场分布横截面

图2 裂解腔体能量场分布云图

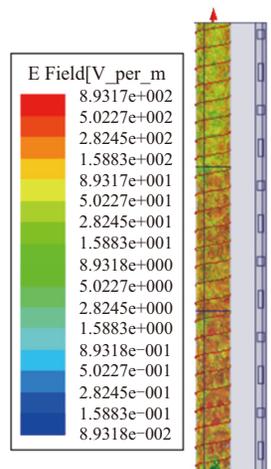


图3 废旧橡胶在裂解腔体内部能量分布  
解产物的品质也不会有影响。

### 3.2.2 裂解腔体和气体管道内压力

裂解腔体和气体管道内压力变化曲线如图5所示。由图5可以看出,压力均在 $-100 \sim +10$  Pa

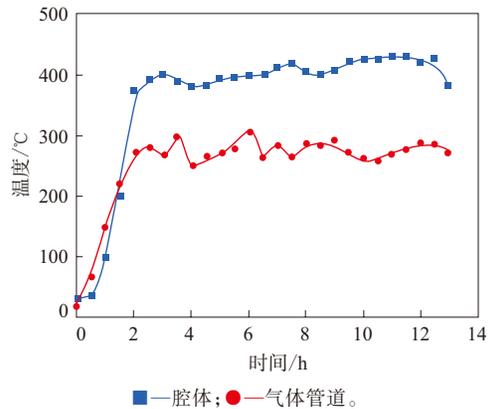


图4 裂解腔体和气体管道温度变化曲线

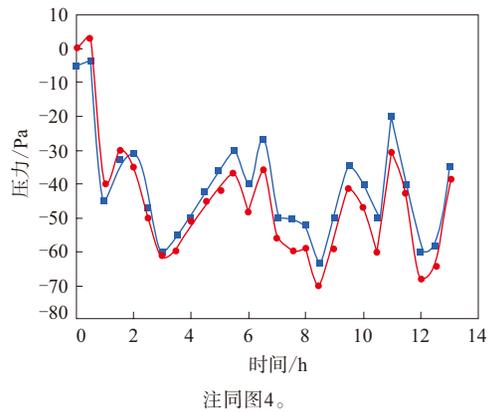


图5 裂解腔体和气体管道内压力变化曲线

正常裂解范围内,腔体压力与气体管道压力之间的差值较小,2 h后腔体压力略高于气体管道压力,说明废旧橡胶在连续裂解过程中裂解气体可顺利导出,管道畅通。

### 3.2.3 裂解产物

废旧橡胶裂解后的产物按照最终物态主要分为炭黑、裂解油和裂解气。

经过测试分析,裂解油主要成分为汽油(C5—C10)、柴油(C14—C18)和重油(>C18),汽油密度为 $0.73 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,所占比例为25%,柴油密度为 $0.85 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,所占比例为50%,重油密度为 $0.93 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,所占比例为25%;裂解气主要成分为乙烷、乙烯、丙烯、异丁烷、正丁烷、丁烯-1、异丁烯、反丁烯-2、顺丁烯-2、异戊烷、正戊烷和总戊烯,异丁烯所占比例最大,为67.78%,其次为异丁烷,占10.08%,丙烯占6.02%,丙烷占5.48%,其余成分所占比例较小。

### 3.2.4 裂解能力和能耗

通电2 h后,各监测点的温度和压力具备加料

条件时开始加料,时间为2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12和13 h时的加料量分别为60,50,50,50,40,40,50,40,50,50,40和25 kg。正常连续裂解11 h,共裂解520 kg,废旧橡胶的平均裂解能力为 $47.27 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。由微波裂解总功率35 kW可以计算出总耗电能为 $385 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,则裂解每千克废旧橡胶平均消耗电能 $0.74 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

#### 4 结论

(1) 针对微波裂解的特点,提出了废旧橡胶螺旋式微波连续裂解方案,分别对裂解腔体和裂解物料进行了微波能量场电磁仿真。

(2) 仿真结果表明,螺旋式微波连续裂解装置的裂解腔内微波能量分布均匀,裂解腔体结构实现了最佳微波能量场分布;废旧橡胶在裂解腔体内部能量场分布均匀,裂解形式合理可行。

(3) 利用该装置进行了连续裂解试验,过程稳定、无泄漏、无污染,达到环保节能要求。3种裂解产物均具有较高的裂解品质。

#### 参考文献:

- [1] 苏瑞景,关杰,梁波. 废轮胎资源化利用现状[J]. 上海第二工业大学学报,2016,33(1):20-26.
- [2] 纪奎江. 我国废旧橡胶再生利用现状及进展[J]. 中国资源综合利用,2001(2):19-23.
- [3] 黄璐,穆江峰. 废旧橡胶再生循环利用技术研究进展[J]. 世界橡胶工业,2015,42(11):1-8.
- [4] 张小杰,李文博,李苗,等. 废旧三元乙丙橡胶胶粉再生效果的研究[J]. 橡胶工业,2016,63(11):666-670.
- [5] 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.
- [6] 李志华,马涛,周云杰. 废旧橡胶裂解方式及其工艺设备[J]. 橡胶工业,2014,61(5):316-319.
- [7] 李志华,马涛,王田荣. 波导管隔板对废旧橡胶裂解传输功率的影响[J]. 橡胶工业,2015,62(6):367-370.
- [8] 周海京,刘阳,李瀚宇,等. 计算电磁学及其在复杂电磁环境数值模拟中的应用和发展趋势[J]. 计算物理,2014,31(4):379-389.
- [9] 陈利祥,初蕾,张宁,等. 微波烧结腔内电场的HFSS仿真与实测分析[J]. 青岛大学学报(自然科学版),2011,24(1):33-37.
- [10] 吕晶,陈利祥,聂贺峰,等. 试样几何参数对微波烧结腔电场分布的影响[J]. 青岛大学学报(自然科学版),2015,28(3):29-34.

收稿日期:2016-08-29

## Simulation and Experiment to Continuous Microwave Pyrolysis for Waste Rubber

LI Zhihua, LI Yong, SONG Yingshuai, LIU Qiangcai, LIU Feipeng

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

**Abstract:** A new type of spiral microwave pyrolysis equipment for waste rubber was designed. According to the magnetron's arrangement and the pyrolysis cavity's configuration sizes, the finite element simulation of electromagnetic was investigated, and summarized the best energy field distribution. By using the spiral microwave pyrolysis equipment, the continuous pyrolysis experiments of the waste rubber had been done. Based on the pyrolysis experimental data, the chemical composition and proportion of cracking products were analyzed. The spiral microwave pyrolysis equipment for waste rubber met the requirements of energy conservation and environmental protection.

**Key words:** waste rubber; microwave pyrolysis; simulation; experiment