

# 新型微波高温热风系统实验研究

刘建华<sup>1,2</sup>, 彭金辉<sup>1,2</sup>, 张利波<sup>1,2</sup>, 郭胜惠<sup>1,2</sup>, 罗会龙<sup>2</sup>,  
陈 菓<sup>1,2</sup>, 李英伟<sup>1,2</sup>, 王红坡<sup>1,2</sup>

(1. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093;  
2. 昆明理工大学非常规冶金省部共建教育部重点实验室, 云南 昆明 650093)

**摘要:**介绍了一种新型的微波高温热风系统, 测试分析了微波功率、风机风速、吸波材料等对热风温度及保温箱内温度分布的影响。研究表明:设计合理的微波高温热风系统结构紧凑、换热强度大、洁净环保, 并能满足各种工业应用对热风温度的要求。

**关键词:**热风系统;微波;高温空气;温度分布

中图分类号:TQ028.677

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2010)09-0068-03

## Experimental investigation on new type high temperature hot air system with microwave heating

LIU Jian-hua<sup>1,2</sup>, PENG Jin-hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Li-bo<sup>1,2</sup>, GUO Sheng-hui<sup>1,2</sup>, LUO Hui-long<sup>2</sup>,  
CHEN Guo<sup>1,2</sup>, LI Ying-wei<sup>1,2</sup>, WANG Hong-po<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Key Laboratory of Unconventional Metallurgy, Kunming University of Science and Technology, Ministry of Education, Kunming 650093, China)

**Abstract:** A new type microwave high temperature hot air system is introduced, the analysis and tests of the hot air temperature and temperature distribution in incubator are carried out under the different conditions including microwave power, air speed and the electromagnetic wave absorbing materials, etc. The results show that the system features compact structure, high heat transfer intensity, cleanliness and environment-friendly, and can meet a variety of industrial application requirement of high temperature hot air.

**Key words:** hot air system; microwave; high-temperature air; temperature distribution

热风系统在烘干、干燥、加热、保温、热风炉(高炉热风炉、竖式热风炉、干燥热风炉)等工艺方法中应用广泛。但目前热风系统的热源大多是以燃煤、燃气、燃油的方式获得<sup>[1-4]</sup>, 对环境造成了较大污染。常见的电阻加热, 反复升温易导致电阻丝脆断, 降低系统使用寿命<sup>[5-8]</sup>。在低碳经济政策下, 低能耗、低污染、低排放已经逐渐成为各行业可持续发展的内在要求。因此太阳能等一系列新能源也被用在热风系统中<sup>[9-10]</sup>, 但太阳能易受气候的影响, 不能全天候运行, 并且供热温度较低。

微波是一种安全、无污染的清洁能源, 微波加热是一种全新的加热方式, 微波在穿透介质的过程中, 介质体将微波能转化为热能而实现加热, 该技术具有高效节能、易于控制、加热设备紧凑、节省空间、清洁卫生等优点, 目前广泛应用于食品、医疗、橡胶、矿产、等离子技术、化学反应等领域<sup>[11-12]</sup>。

根据微波加热的优势, 本文中建立了一种新型

微波高温热风系统。采用微波作热源, 对热风干燥系统进行了不同功率、不同风速、不同结构的空气保温实验研究, 并产生了不同温度的高温热风。

## 1 实验设备及方法

### 1.1 实验设备

微波高温回转炉, 功率连续可调, 最大功率为36 kW; 1个外形尺寸为: 100 mm × 100 mm × 100 mm (L × W × H)的保温箱, 采用离心玻璃纤维棉对保温箱和空气流通管道进行隔热保温; 高温循环风机, 风机功率为250 W, 风量为410 m<sup>3</sup>/h; 高温风机上接1个变压器, 电压在150 ~ 250 V可调。高温风机、保温箱以及微波谐振腔换热结构均采用空气流通管道相连接。

### 1.2 实验原理及方法

通过微波高温回转炉中磁控管将电能转换为电磁波, 对微波谐振腔内的吸波材料进行加热, 使微波

收稿日期: 2010-06-02; 修回日期: 2010-07-05

作者简介: 刘建华(1985-), 男, 硕士生, 研究方向为冶金与能源工程, kmjh0720@163.com; 彭金辉(1964-), 博士, 教授, 主要研究方向为冶金新技术、微波加热在冶金与材料制备中的应用, 通讯联系人, 0871-5191046, jhpeng@kmust.edu.cn.

强化换热装置内的温度升高,产生热量并蓄热,再经过循环风机将空气送入换热装置与高温的吸波材料进行热交换。温度升高后送入保温箱内进行循环。通风到微波换热装置内温度保持平衡时,保温箱内的温度即平衡温度。

微波加热体的通风温度是根据吸波材料的特性和升温时间等因素来确定的。其中微波对物质的加热温度速率与物质的电特性的总关系<sup>[13]</sup>为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k\xi''fE^2}{\rho C_p} \quad (1)$$

式(1)中, $\xi''$ 为介电损耗因子; $k$ 为比例常数, $C_p$ 为物质的热容; $\rho$ 为物质密度。

本实验中选取2种高介电损耗强吸波材料构建不同的微波谐振腔内强化换热结构。在保温箱中间处和微波谐振腔换热结构内各布置了1个热电偶传感器,从而可以测量保温箱和微波谐振腔换热结构内的吸波材料的温度。实验系统构成如图1所示。

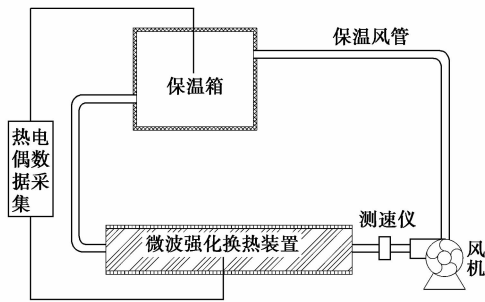
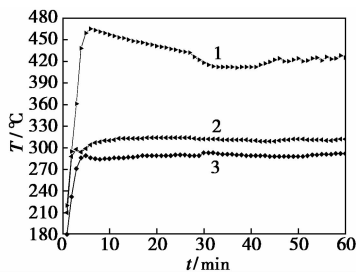


图1 新型微波高温热风系统构成

笔者利用热线风速仪测得强化换热结构入口的风速。热电偶测得微波谐振腔中管内以及保温箱中心的温度。对比了不同风速、不同微波强化换热结构对保温箱中心温度的影响情况,优化了实验的条件以及微波谐振腔内强化换热结构。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 微波功率对热风出口温度的影响



功率/kW:1—33;2—29;3—25

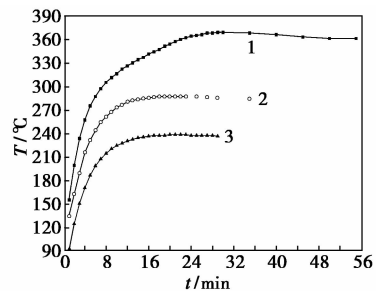
图2 不同微波功率时热风出口温度

图2为风机风速一定,功率分别为25、29 kW和

33 kW时微波强化换热装置热风出口温度随时间的变化曲线图。由图2可以看出,在风速一定情况下,微波强化换热装置热风出口温度随着微波功率的增大而升高。这是因为功率增大后,微波加热体的热量增加,一定风速的空气得到的热量也会增加,空气出口温度就升高。

### 2.2 微波功率对保温箱内升温的影响

图3所示是微波功率分别在9、10、18 kW工况下,当微波加热体温度分别为685、801、900°C时开始通风的保温箱温度随时间变化的曲线关系。由图3可见:①微波功率为18 kW,微波加热体温度为900°C时通风,平衡时保温箱的温度为362°C;②微波功率为10 kW,微波加热体温度为801°C时通风,平衡时保温箱的温度为285°C;③微波功率为9 kW,微波加热体温度为685°C时通风,平衡时保温箱的温度为237°C。因此,随着微波功率和微波加热体的通风温度的不断降低,达到传热平衡时的保温箱的温度也不断降低。同时表明,增大微波功率和提高通风时吸波材料的温度,可以提高保温箱内的温度。



功率/kW:1—18;2—10;3—9

图3 不同微波功率对保温箱温度的影响

### 2.3 吸波材料对保温箱内升温的影响

微波高温加热主要是利用介质材料在微波场中高速极化旋转吸收微波能量使自身温度达到特定高温的目的。表征材料吸收微波能量的主要参数是材料的相对介电常数 $\xi''$ 和介质损耗角 $\text{tg}\delta$ 。一般说来,相对介电常数 $\xi''$ 和介质损耗角 $\text{tg}\delta$ 越大,吸收微波能量的能力越大,宏观温度上升越高<sup>[12]</sup>。

图4、图5为实验所用两种吸波材料构建的微波谐振腔强化换热结构。微波功率为3 kW时,如图6可见:微波谐振腔内强化换热结构2换热效果较好(换热面积较结构1极大地增加),在60 min时保温箱温度上升至约220°C。而微波谐振腔内强化换热结构1,在180 min后保温箱的温度才升至167°C。可见,微波谐振腔内强化换热结构2更加

合理,其换热材料的性能更加良好。

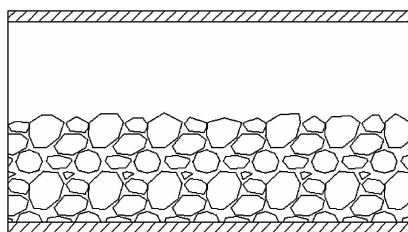


图 4 微波谐振腔内换热结构 1

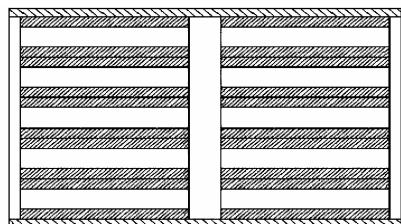
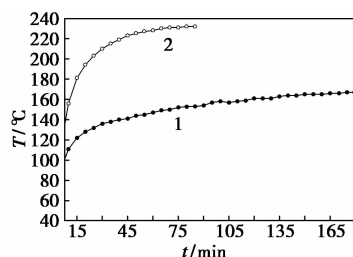


图 5 微波谐振腔内换热结构 2



1—换热结构 1;2—换热结构 2

图 6 不同强化换热结构对保温箱温度的影响

### 2.4 风速对保温箱内升温的影响

不同风速影响空气在强化换热结构中换热效率,从而影响保温箱内温度高低。随着风速增大,换热性能提高,保温箱内的温度随之升高。可当风速过大时,换热装置中的热量不能被完全带出。因此存在 1 个合理的空气流通速度。

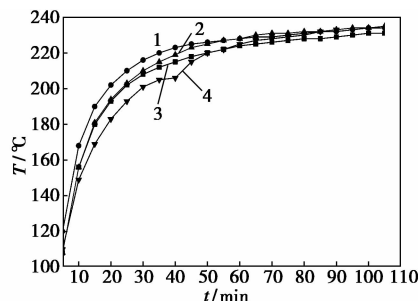
采用微波谐振腔内强化换热结构 2 探求风速对保温箱内温度的影响,通过在风机两端施加不同电压:160、190、220 V 和 250 V,从而改变空气在微波强化换热结构内的流速。空气在微波强化换热结构中风速是通过热线风速仪测量,所得见表 1,将其近似等于热态空气的流通速度。

表 1 不同风机电压条件下的风速(测量值)

风机电压/V	160	190	220	250
测得风速/ $m \cdot s^{-1}$	1.81	2.18	2.33	2.45

如图 7 所示,不同风速情况下,空气均能够将吸热材料吸收的热量有效地带入保温箱内,保温箱的

温度均在 230 ~ 235℃。在风机电压为 190 V、风速为 2.18 m/s 时,保温箱内温度相对上升最为平稳。



风速/ $m \cdot s^{-1}$ :1—2.18;2—2.33;3—1.81;4—2.45

图 7 不同风速对保温箱温度影响

### 3 结语

本文中建立了新型微波高温热风系统,并进行了实验研究,得到了以下结论:

(1)随着微波功率的增大,微波加热体的热量增加,一定风速的空气得到的热量也会增加,空气出口温度就升高。循环风机就能带出更多的热量,保温箱内温度也升高。

(2)微波谐振腔内强化换热结构 2 换热效果较好,在 60 min 左右保温箱温度上升至约 220℃。而微波谐振腔内强化换热结构 1,在 180 min 后保温箱的温度才升至 167℃。可见,微波谐振腔内强化换热结构 2 更加合理,其换热材料的性能更加良好。

(3)实验风机的选型较为合理,在实验中不同风速条件下,保温箱的温度保持在 230 ~ 235℃,在风机电压为 190 V、风速为 2.18 m/s 时,保温箱内温度相对上升较为平稳,说明这一风速下微波谐振腔内换热结构中空气流通速度较为合理。

### 参考文献

- [1] 李清海,张衍国. 燃用玉米芯的循环流化床锅炉热风系统研究与设计[J]. 锅炉技术,2006,37(4):35-39.
- [2] 夏德宏,敖雯青. 紧凑型蓄热式热风炉的开发[J]. 冶金能源,2008,27(6):29-31.
- [3] 陶智麟. 3 种流化床梗丝干燥设备热风系统对比[J]. 烟草科技,2007(2):14-15,19.
- [4] 王良桥,文中. 燃气燃烧器热风系统在高速涂布机中的运用[J]. 造纸科学与技术,2009,28(6):142-144.
- [5] Naji M, Al-Nimr M A. Thermal behavior of a porous electric heater [J]. Applied Thermal Engineering,2002,22(8):449-457.
- [6] 宋岩. 空气电加热器结构原理及性能分析[J]. 南通航运职业技术学院学报,2004,3(2):18-21.

(下转第 72 页)

### 1.3 燃烧法

燃烧法又分为直接燃烧法和催化燃烧法。

#### (1) 直接燃烧法

苯氧化生产顺酐尾气中含有未转化的微量苯和CO,最简单的处理办法是燃烧法。尾气中约13%的O<sub>2</sub>可作为助燃剂,将有机物完全燃烧成CO<sub>2</sub>需要1 000℃以上的高温,只能依靠补充燃料来达到这一温度,我国已有正丁烷法生产顺酐尾气处理装置采用此法,但随着能源价格的不断上升,其运行成本过高,这条路线不可取。

#### (2) 催化燃烧法<sup>[5-6]</sup>

由于具有起燃温度低、节省能源、适用范围广、处理效率高、无二次污染等众多特点,催化燃烧技术是当前VOCs处理技术中最受关注的领域。尤其是催化燃烧系统在大风量、低VOCs浓度的处理和循环处理方式中的应用,相比常规直接燃烧,显示了巨大的优越性。

催化氧化燃烧技术处理顺酐装置尾气在国外已有应用,我国引进万吨顺酐装置也有此系统,但因投资费用等问题未被推广。近年来随着国内自主技术的进一步开发和完善,尾气催化燃烧装置的应用日趋成熟。从顺酐装置出来的尾气,先经尾气换热器预热,再进入装有催化剂的燃烧反应器,将CO和其他有机物等燃烧转化成CO<sub>2</sub>和水。

## 2 催化燃烧法试验

近几年国内丙烯腈、丙烯酸多套工业装置已采纳催化燃烧工艺并取得良好效果。中国科学院山西煤炭化学研究所(简称山西煤化所)和江阴市顺飞精细化工厂从2008年5月开始,联合开发采用了顺酐尾气处理技术,并在该厂顺酐装置上进行了产能3 000 m<sup>3</sup>/h的催化燃烧试验,并取得了较为满意的中试结果。

### 2.1 实验方案

#### 2.1.1 尾气组成

经山西煤化所提供的化验方法,确定产能3 000 m<sup>3</sup>/h苯氧化生产顺酐尾气组成见表1。

表1 顺酐尾气组成

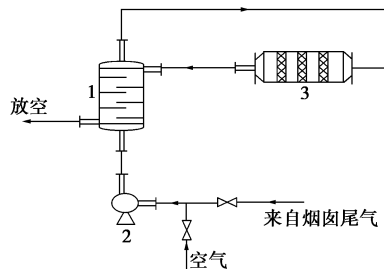
物料名称	体积分数/%	质量分数/%
N <sub>2</sub>	78.20	76.86
O <sub>2</sub>	12.5	14.04
H <sub>2</sub> O	4.77	3.03
CO <sub>2</sub>	2.80	4.33
CO	1.70	1.67
苯	0.0225	0.0680
顺酸、乙酸等有机物	微量	微量
合计质量流量/kg·h <sup>-1</sup>	3815	100
体积流量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	3000	
温度/℃	40	
压力/kPa(G)	2	

#### 2.1.2 催化剂

试验选用陶瓷蜂窝贵金属催化剂,其载体为蜂窝陶瓷,其表面涂有贵金属铂、钯,其小试结果反应温度260℃(苯、一氧化碳转化率99.0%以上,形状为100 mm×100 mm×50 mm),空速10 000~15 000 h<sup>-1</sup>。

#### 2.1.3 实验流程及设备

实验流程示意图如图1所示。尾气经风机增压后进入换热器,与反应器出口热尾气进行热交换后,经电加热后入开工炉,再进入反应器、换热器,换热后出来的尾气排入大气。



1—换热器;2—风机;3—反应器

图1 实验流程示意图

主要设备:风机,12 kPa,3 000 m<sup>3</sup>/h;换热器:利用原有1台80 m<sup>2</sup>冷凝器;开工炉,电加热开工炉,130 kW;反应器:根据催化剂要求设计容量为200 L,催化剂按多层装填,每层催化剂用不锈钢

(上接第70页)

- [7] 孙伯仲,刘洪鹏.电磁感应高温空气加热特性试验研究[J].中国电机工程学报,2009,29(20):30-34.
- [8] 聂欣,周俊虎.新型高温空气加热器的试验研究[J].热力发电,2008,37(8):9-12,16.
- [9] 管华.开封市太阳能热风系统的设计计算及经济评价[J].河南大学学报:自然科学版,1993,23(4):23-30.

- [10] 曲翠萃,高辉.太阳能空气加热系统在我国建筑设计中的应用[J].天津大学学报:社会科学版,2007,9(5):443-446.
- [11] 王绍林.微波加热技术在食品加工中应用[J].食品科学,2000,21(2):6-12.
- [12] 彭金辉,杨显万.微波能技术新应用[M].昆明:云南科技出版社,1997.
- [13] Schroeder R E, Hackett W S. Microwave energy in the foundry[J]. Br Foundryman,1971(8):293-298. ■