

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2017.09.005

# 沼气红外燃烧技术在粮食干燥器中的应用研究

□ 南通航运职业技术学院(226010)张洁 袁健

□ 江苏中南建设集团股份有限公司(226001)黄博洲

**摘 要:** 为了降低粮食霉烂损失、解决传统谷物干燥机能耗高、污染大、效率低的问题,本文将红外加热技术应用于粮食干燥领域,设计了一种以沼气为燃料的全预混燃气红外干燥系统,并对该系统的红外燃烧性能展开研究。结果表明:该系统燃烧状态良好,燃烧器的CO、NO<sub>x</sub>排放浓度均低于 $50 \times 10^{-6}$ ,可以满足污染物的排放要求;过剩空气系数和表面热强度对烟气中CO、NO<sub>x</sub>的排放浓度有较大影响;过剩空气系数由1.1增加至1.51时,烟气中CO浓度由 $39 \times 10^{-6}$ 降低至 $14 \times 10^{-6}$ ,NO<sub>x</sub>浓度由 $15 \times 10^{-6}$ 降低至 $6 \times 10^{-6}$ ;表面热强度由 $0.2 \text{ W/mm}^2$ 增加至 $0.4 \text{ W/mm}^2$ ,烟气中CO浓度增加110%,NO<sub>x</sub>浓度增加66.7%。

**关键词:** 红外燃烧 粮食干燥 沼气 全预混

## 1 引言

我国每年收获的粮食中由于干燥不及时而造成的霉烂损失达750万t~1 500万t,约占全年谷物总产量的1.5%~3%,相当于损失145万km<sup>2</sup>~290万km<sup>2</sup>农田,农民减少收入135亿元~270亿元,浪费巨量的劳动力和农业物资,而在南方梅雨季节较长的省份(江苏、浙江、安徽、湖北及上海等),每年粮食霉烂损失更高达10%左右<sup>[1]</sup>。为了降低粮食损失,粮食干燥机械化技术被广泛关注。

目前我国的谷物干燥仍然以传统热风式干燥机为主,而以煤为主要热源的热风炉能耗高、污染大、效率低,已越来越难以满足现代农业发展的要求<sup>[2]</sup>。在世界性节约能耗、开发新能源的趋势下,红外加热技术越来越受到重视。与传导及对流加热相比,红外干燥技术热能利用率高、升温快、加热时间短、物体内外受热均匀等优点。此外,红外干燥设备结构紧凑、无辅助锅炉及管道系统,减少了基建费用<sup>[3]</sup>。

本文将针对村镇粮食干燥不及时、能耗高、效率低等现状,配合小型滚筒粮食干燥机械,研究以沼气为燃料的全预混燃气红外干燥系统,以满足村镇对粮食干燥和沼气充分利用的需求。

## 2 沼气全预混红外燃烧系统设计

一套完整的全预混燃烧系统应包括的主要部件:燃烧器头部、助燃风机、燃气电磁比例阀、混合器、点火器、火焰探测器以及控制系统。本文所设计的全预混红外燃烧系统采用金属纤维燃烧器做头部,采用脉宽调制直流无刷风机和西门子VGU82型燃气比例阀以及DFC-1燃烧控制器。

### 2.1 强制鼓风式金属纤维燃烧器头部

金属纤维燃烧器的头部一般由金属纤维多孔介质、多孔支撑板、气流分配板、壳体、燃气—空气混合物入口等几部分组成。头部设计以保证稳定燃烧为前提,设计合理的燃烧器头部必须使金属纤维多孔介

质网面燃烧均匀，没有明显的暗区和亮区<sup>[4]</sup>。

本文中的金属纤维燃烧器是针对小型滚筒粮食干燥器结构专门设计的，燃烧器设计热负荷为45kW，头部金属纤维表面积为 $1.1 \times 0.1 = 0.11\text{m}^2$ ，其头部结构如图1所示。考虑到小型滚筒粮食干燥器滚筒长1.5m，为使谷物受热均匀，燃烧器头部设计为长条形，而且为了防止谷物烘干过程中谷粒随滚筒转动掉落到燃烧器上，将燃烧器设计成圆筒形，谷物掉落在燃烧器上时，沿燃烧器壁滑落，而不会在燃烧器上累积。为了使燃气—空气混合气在金属纤维表面分布均匀，燃烧器头部结构采用大管套小管的形式，其中小管起到气流分配板的作用，燃气空气混合物经过中间小管上的开孔流到外面大管的大空间壳体上，在金属纤维表面燃烧。

### 2.2 混合器

本文中采用的是风机上游混合式，燃气—空气混合器安装在风机吸入口处。混合器结构如图2所示，风机运行时，在入口处形成负压，燃气依靠自身压力和入口空气负压的双重作用进入燃气—空气混合器，初步混合后进入风机。

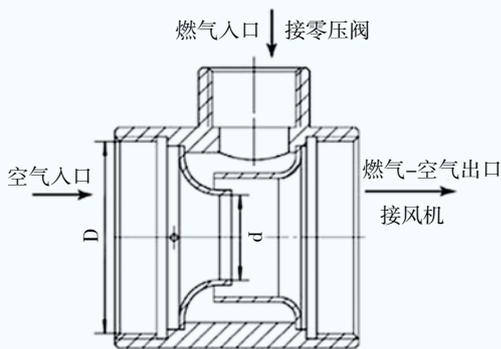
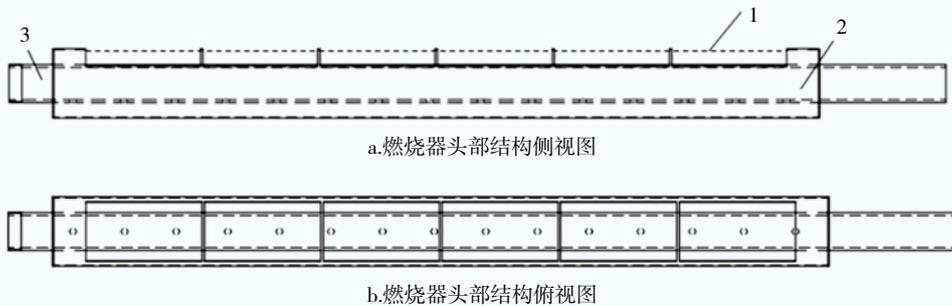


图2 混合器结构示意图



1-金属纤维和多孔支撑板 2-壳体 3-燃气空气混合物入口

图1 燃烧器头部结构示意图

经实验数据回归得到的混合器压降为<sup>[5]</sup>：

$$\Delta P_m = 80.36 \frac{L^2}{d^4} = 0.62\text{kPa}$$

式中：

$\Delta P_m$ —混合器压降，kPa；

$L$ —空气流量， $\text{m}^3/\text{h}$ ；

$d$ —混合器喉部直径，mm。

### 2.3 风机的选型

风机的全压需要克服燃烧器头部的阻力损失、沼气—空气混合装置的阻力损失、风机本身的阻力损失和管路的阻力损失等。燃烧器头部的阻力为230Pa，混合装置的阻力约为620Pa，考虑到系统管路沿程阻力和其它局部阻力，取总阻力为混合器和头部压降之和的1.2倍，则总阻力约为1 020Pa。根据该阻力值以及流量选定配用风机，风机本身的阻力已在安全系数中考虑。

本课题采用的是风机上游混合方式，风机必须具备防热、防爆条件。选用无刷直流离心式风机，型号为RG128/1300-3612，输入功率67W，风压1.6kPa，转速7 400rev/min，风量 $134\text{m}^3/\text{h}$ ，可接受PWM脉宽调节控制信号。

### 2.4 燃气比例阀的选型及工作原理

燃气—空气比例调节的关键部件是燃气比例阀，本课题采用西门子VGU82型组合式比例阀调节空燃比。

该组合式比例阀可在较大的比例范围内保持空气燃气比例值稳定，为全预混燃烧正常进行提供了可靠的保证。

### 2.5 燃烧控制器

全预混燃烧系统的燃烧控制器可以实现燃烧系统

的自动点火控制、防爆安全控制等基本燃烧控制的基本功能,还可以接受外部控制信号,实现负荷的手动及自动控制。

控制器的接线图如图3所示:

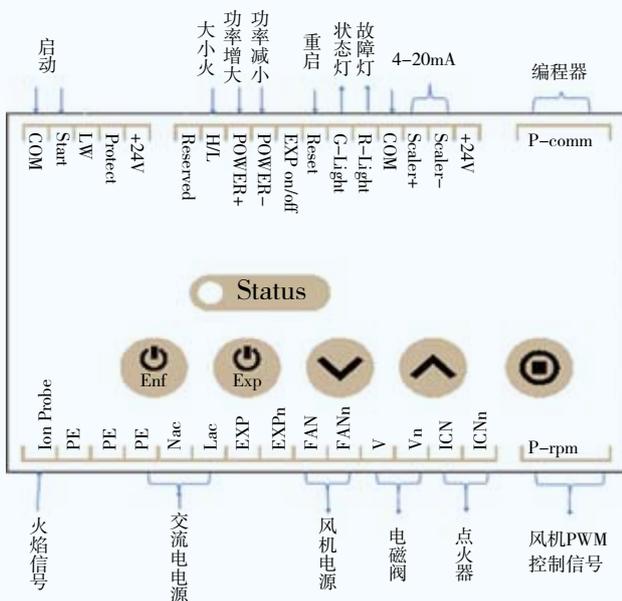


图3 DFC-1燃烧控制器接线图

### 3 全预混红外燃烧特性实验研究

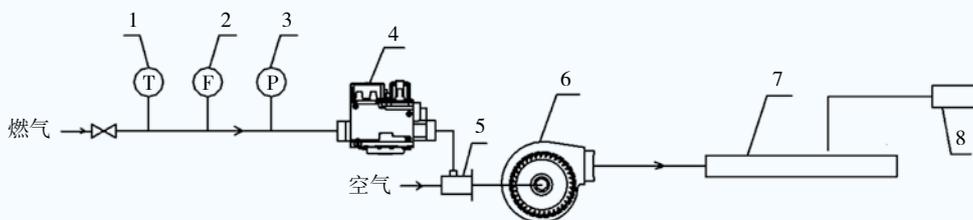
#### 3.1 实验目的

该实验的目的是研究沼气全预混金属纤维燃烧器在红外燃烧工况下,过剩空气系数 $\alpha$ 对燃烧器烟气成分中CO、NO<sub>x</sub>等污染物浓度的影响,从而获得全预混红外燃烧工况下所需的合适的过剩空气系数。在此基础上调节风机PWM占空比,进行不同燃烧热强度下的燃烧器性能实验。

#### 3.2 实验系统与设备

实验系统原理图如图4所示。

实验设备及仪器:(1)PG4(S)脉冲燃气表,流量



1-温度计 2-燃气流量计 3-压力计 4-燃气比例阀 5-混合器 6-直流无刷风机 7-金属纤维燃烧器头部 8-烟气分析仪

图4 实验系统原理图

1.2L/r,量程为6m<sup>3</sup>/h,最小量程为40dm<sup>3</sup>/h,最大承压能力为50kPa;(2)U形管压力计,量程为0mm~1 000mm水柱,最小刻度为1mm水柱,用来测量燃气压力;(3)英国凯恩KM9106综合烟气分析仪;(4)燃烧器表面温度采集系统:燃烧器金属纤维表面温度采用K型热电偶进行测量,测点均匀布置在燃烧器表面。热电偶连接到数据采集模块ADAM4018上,然后与MCGS触摸屏相连,对温度实时采集。

#### 3.3 实验结果分析

##### 3.3.1 全预混金属纤维燃烧器红外燃烧状态分析

利用燃气空气比例调节阀保持空燃比不变时,通过调节风机PWM占空比大小,可以得到在一定的过剩空气系数下,不同燃烧热强度时的燃烧状态。如图5所示为过剩空气系数 $\alpha=1.5$ ,金属纤维表面燃烧热强度 $q=0.27\text{W}/\text{mm}^2$ 、 $q=0.32\text{W}/\text{mm}^2$ 、 $q=0.4\text{W}/\text{mm}^2$ 时的燃烧状态。

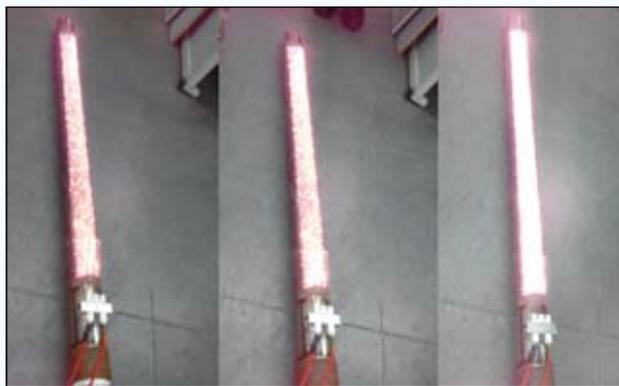


图5 相同过剩空气系数,不同热强度下的燃烧状态

由图5可知,沼气全预混红外燃烧器燃烧状态良好,呈现均匀的红外燃烧状态,燃烧过程中没有出现回火、脱火等现象,燃烧热强度逐渐增大时,燃烧表面由暗红逐渐转变为炽热的燃烧状态,亮度逐渐增加。

### 3.3.2 过剩空气系数对全预混燃烧烟气中CO、NO<sub>x</sub>排放的影响

本文研究表面热强度为0.3W/mm<sup>2</sup>时，过剩空气系数在a=1.1~1.5范围变化，CO和NO<sub>x</sub>的排放规律，实验结果如图6所示。

从图6可知，全预混红外燃烧过程中CO、NO<sub>x</sub>的排放量都很低，在过剩空气系数a在1.1~1.51之间变化时，浓度都在50 × 10<sup>-6</sup>以下，NO<sub>x</sub>的排放量低于CO的排放量。随着过剩空气系数的增加，CO、NO<sub>x</sub>排放量均有降低的趋势，而且CO浓度降低幅度较大。过剩空气系数由1.1增加至1.51时，烟气中CO浓度由39 × 10<sup>-6</sup>降低至14 × 10<sup>-6</sup>，NO<sub>x</sub>浓度由15 × 10<sup>-6</sup>降低至6 × 10<sup>-6</sup>。

在a=1.1~1.5范围内，对于沼气的全预混燃烧，当过剩空气系数a=1.5左右时，烟气中CO、NO<sub>x</sub>的容积

成分达到最小。因此，本课题研究滚筒粮食干燥器的烘干特性的实验中，需调节燃气比例阀使的烟气中含氧量在7%左右，保持比例阀的位置不变，以保证过剩空气系数不变，在此基础上进行小型滚筒粮食干燥器烘干工艺的研究。

### 3.3.3 燃烧器热负荷变化对沼气全预混红外燃烧CO和NO<sub>x</sub>的影响

从上述结论可知，在含氧量为7%左右时，燃烧工况最佳，固定燃气比例阀调节螺丝不动，调节风机PWM占空比，以获得不同燃烧热强度下的污染物排放规律，实验数据如图7所示。

由图7可知，在合适、稳定的过剩空气系数下，燃烧器热负荷增大时，烟气中CO、NO<sub>x</sub>的排放量都很低，基本都在30 × 10<sup>-6</sup>以内，满足污染物排放要求。表面热强度由0.2W/mm<sup>2</sup>增加至0.4W/mm<sup>2</sup>，烟气中CO

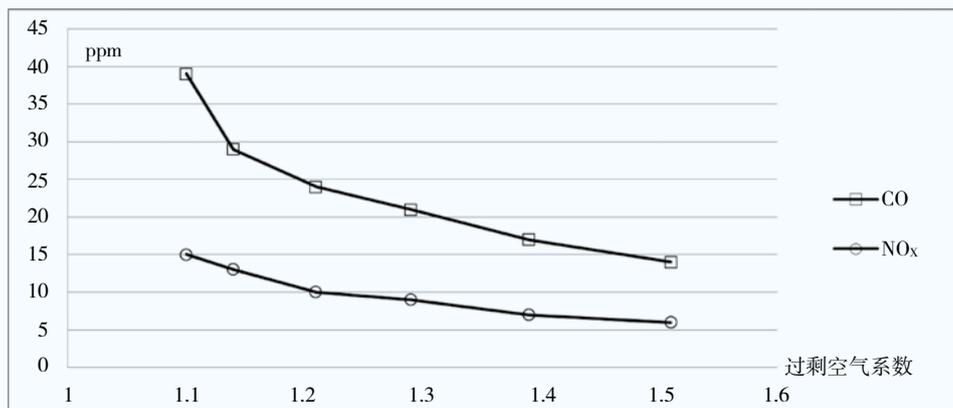


图6 过剩空气系数对烟气中CO、NO<sub>x</sub>排放的影响

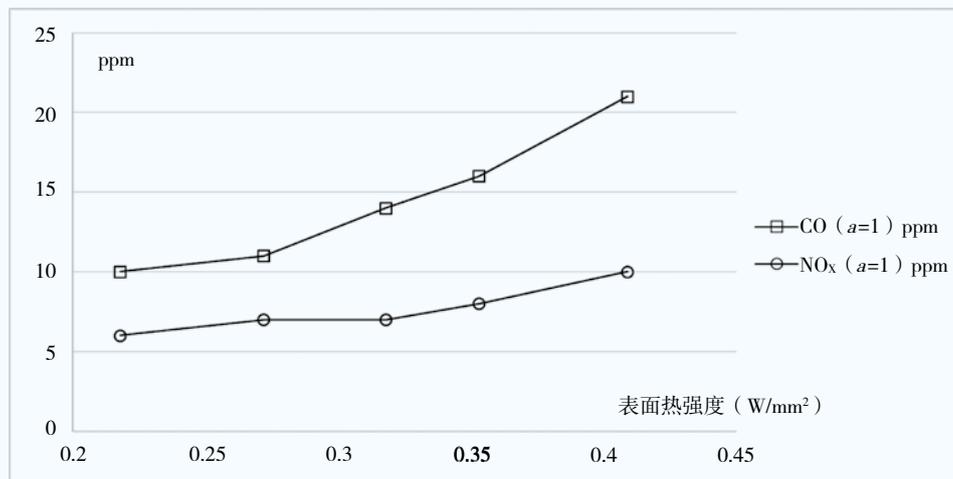


图7 不同表面热强度下烟气中CO、NO<sub>x</sub>的浓度

浓度增加110%，NO<sub>x</sub>浓度增加66.7%。

### 3.3.4 燃烧器红外辐射表面温度的研究

通过对金属纤维表面温度测量可知，在合适的过剩空气系数下燃烧器的红外辐射表面温度变化范围为750℃~980℃，随着燃烧器功率的加大，红外辐射表面温度不断升高。由维恩位移定律：

$$\lambda_m T = 2.9 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{k} \quad (1)$$

可计算得到在表面温度为750℃~980℃变化时，其对应的峰值波长 $\lambda_m$ 在2.86 $\mu\text{m}$ ~2.31 $\mu\text{m}$ 之间变化。从对谷物的红外光谱分析看到在2.6 $\mu\text{m}$ ~4 $\mu\text{m}$ 红外区段，谷物有较大的吸收<sup>[7]</sup>。因此本研究中全预混红外燃烧系统能够辐射的红外线在谷物较强的吸收带内，红外线照射到谷物上会迅速增加谷物的温度，大大减少了能量损失，提高了热能利用率。

## 4 结论

本文将红外加热技术应用于粮食干燥领域，设计了一种以沼气为燃料的全预混燃气红外干燥系统，并对该系统的红外燃烧性能展开研究。主要结论如下：

(1) 该系统燃烧状态良好，燃烧器的CO、NO<sub>x</sub>排放浓度均低于50 $\times 10^{-6}$ ，可以满足污染物的排放要求；

(2) 过剩空气系数和表面热强度对烟气中CO、NO<sub>x</sub>的排放浓度有较大影响；

(3) 过剩空气系数由1.1增加至1.51时，烟气中CO浓度由39 $\times 10^{-6}$ 降低至14 $\times 10^{-6}$ ，NO<sub>x</sub>浓度由15 $\times 10^{-6}$ 降低至6 $\times 10^{-6}$ ；

(4) 表面热强度由0.2W/mm<sup>2</sup>增加至0.4W/mm<sup>2</sup>，烟气中CO浓度增加110%，NO<sub>x</sub>浓度增加66.7%。

### 参考文献

- 1 蓝卫星. 粮食干燥技术、设备现状及其新成果. 广西机械, 2002; 4: 49-51
- 2 任广跃, 张忠杰, 朱文学等. 粮食干燥技术的应用及发展趋势. 中国粮油学报, 2011; 26(2): 124-128
- 3 张忠杰, 任广跃, 尹君等. 粮食节能干燥技术研究进展. 国家粮食局节能减排—粮油仓储行业在行动暨粮油仓储节能减排专题技术会议论文集, 2010: 46-49
- 4 冯良, 谭建新, 全惠君等. 新型燃气红外燃烧器的研制. 上海煤气, 2002; 3: 21-23
- 5 周梅, 冯良, 贺宗彦等. 燃气大锅灶用全预混燃烧器的研制. 上海煤气, 2013; 5: 26-29
- 6 仇中柱. 金属纤维表面燃烧技术的研究与应用. 博士后学位论文, 上海: 同济大学, 2004
- 7 李素云, 夏朝勇. 红外干燥粮食机理浅析. 粮食与食品工业, 2007; 14(4): 43-45

## 工程信息

# 铁岭港华燃气镇西天然气压缩母站建成启用

2017年8月1日，铁岭港华燃气镇西天然气压缩母站建成启用。铁岭市委书记、市人大常委会主任何焕秋，香港中华煤气行政总裁陈永坚出席。

铁岭港华燃气有限公司镇西堡天然气场站位于铁岭县镇西堡镇木厂村，是一处综合性场站，总面积20 055m<sup>2</sup>，分为天然气门站、天然气压缩母站和常规加气站3个区域。门站负责接收中石油输管天然气并输送至铁岭市区，输气能力达50万m<sup>3</sup>/d；

天然气压缩母站将管输天然气压缩运输至市区各汽车加气站，供应能力达20万m<sup>3</sup>/d；常规加气站可为CNG出租车及公交车加注压缩天然气，加气能力2万m<sup>3</sup>/d。铁岭港华燃气镇西压缩母站建成运营后，可为铁岭市城市气源提供充足保证，同时，大幅降低城区汽车加气站运行成本，对完善城市功能、推进节能减排、实现绿色发展起到积极促进作用。

(杨丽)