

燃气流量对脉动燃烧运行频率的影响*

王莉婷 崔 峰 刘相东
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 利用 Helmholtz 型脉动燃烧器,进行了不同燃气流量条件下的脉动燃烧运行实验,在 3 组不同尾管长度条件下,运行频率都随燃气流量的增大而增大。探究了燃气流量对脉动燃烧频率的影响,根据理论值与实测值的差异,提出 Helmholtz 型脉动燃烧器频率计算的修正公式,并对修正后的公式进行检验,实验值与理论值吻合度较好。

关键词: 脉动燃烧 脉动频率 燃气流量 烟气分析 修正公式
中图分类号: S226.6; TQ038.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)03-0115-05

Gas Flow Rate on Pulse Frequency in Helmholtz Pulse Combustor

Wang Liting Cui Feng Liu Xiangdong
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

In order to further understand the frequency of Helmholtz pulse combustor, a Helmholtz type combustor was used to carry out the experiments in conditions of different gas flow rates. Through the experiments of three lengths tail pipe, frequency was all increased while the gas flow rate increased. The impact of gas flow rate on frequency was investigated, and the modification of theoretic formula was also proposed based on the difference between the theoretical and actual values. Compared with the experimental values, the results showed that the predicted values and the experimental values matched well.

Key words Pulse combustion, Pulse frequency, Gas flow rate, Exhaust gas analysis, Modified formula

引言

脉动燃烧干燥技术是近年来出现的一种新型干燥技术,与传统干燥技术相比,具有能耗低、传热效率高、环境污染小、投资成本低等优点。但至今对脉动燃烧器的驱动机理认识尚不完善,这在很大程度上限制了该技术的发展速度^[1]。脉动燃烧不同于稳定燃烧,它是通过燃气阀和空气阀周期性的打开、关闭而进行的周期性燃烧,这就决定了脉动燃烧装置的运行工况易受频率和振幅等振动特性的影响^[2]。因此,在设计中对频率的估算非常重要。

普特南最早提出 Helmholtz 型脉动燃烧器常用

的频率计算公式^[3],通过一维平面波动理论推导出理论频率公式,但理论值与实测值相差较大。同济大学刘军^[2]就燃烧室容积、尾管长度、直径以及供气压力对频率的影响进行实验,推导出相关的经验公式。同济大学姜正侯^[4]通过对脉冲燃烧器结构参数的反复实验,总结得出经验公式,公式考虑到了气压和热负荷等条件对频率的影响。上述研究,理论公式中忽略了周期性化学反应和能量变化,经验公式则依赖反复实验,适用范围有限。

为深入了解脉动燃烧器的频率特性并修正理论公式,本文利用自行设计的功率为 75 ~ 150 kW 的 Helmholtz 型脉动燃烧器,在不同尾管长度和燃气流

收稿日期: 2010-05-04 修回日期: 2010-06-18
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA05Z217)
作者简介: 王莉婷,硕士生,主要从事农产品干燥技术研究,E-mail: bestwlt2002@yahoo.com.cn
通讯作者: 刘相东,教授,博士生导师,主要从事干燥理论与设备研究,E-mail: xdliu@cau.edu.cn

量下测定频率和进行理论计算,修正普特南频率公式,从而为脉动燃烧的设计和使用提供更准确的数据。

1 实验装置及实验设计

1.1 工作装置

本文研究的脉动燃烧器是自行设计的膜片阀式 Helmholtz 型脉动燃烧器,如图 1 所示,功率范围为 75 ~ 150 kW。燃气阀和空气阀采用单向膜片阀。燃烧室内径为 0.16 m,长为 0.3 m。尾管内径为 0.08 m,长度可分别调至 3.25、3.50 m 和 3.75 m,通过 2 段 1 m、3 段 0.5 m 和 1 段 0.75 m 的独立尾管连接而实现。点火控制系统是通过光电传感器对火焰的循环检测,控制火花塞、风机和燃气电磁阀的开关,从而实现安全点火-熄火保护-重新启动过程。

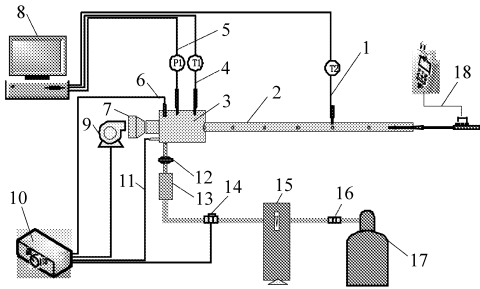


图 1 脉动燃烧实验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of pulse combustion experimental facilities

1. K 型热电偶温度传感器 2. 尾管 3. 燃烧室 4. S 型热电偶温度传感器 5. 压力传感器 6. 火花塞 7. 空气阀 8. 数据采集系统 9. 风机 10. 点火控制系统 11. 光电传感器 12. 燃气阀 13. 去耦室 14. 电磁阀 15. 燃气流量计 16. 压力控制阀 17. 燃气供气系统 18. 烟气检测系统

1.2 燃料、空气供给

所用燃料为液化石油气,由 30 kg 液化石油气气瓶供气,主要成分为丙烷和丁烷,经减压后压力为 120 ~ 140 kPa。空气来自大气,压力为 101.325 kPa。

1.3 实验测量方法

利用压力传感器测压力,选择进口集成全桥硅片刻蚀而成的 JYBK(D)型扩散硅压力变送器,兼顾传感器高精度和快速性的特点,采用半无限管式的安装结构,半无限管内径为 4 mm,管长为 10 m。

利用温度传感器测温度,测量 2 m 处尾气温度为 K 型热电偶即镍铬-镍硅热电偶,测温范围为 -200 ~ 1 300℃,特点是热电动势值直线性良好、耐氧化并且在金属热电偶中稳定性良好;测量燃烧室温度的装置为 S 型热电偶即铂铑 10-铂热电偶,测温范围为 0 ~ 1 600℃,特点是精确度高、再现性良好、同时耐热、耐氧化和耐腐蚀。

燃气流量测量选择普通浮子流量计,测定范围 30 ~ 120 L/min,实验中燃气流量分别为 60、65、70 和 75 L/min,可满足实验需要。

利用 testo350EPA 型烟气分析仪测定烟气成分和尾管温度,可测定成分为 O₂、CO₂、CO、NO、NO_x、SO₂和 H₂S,各成分测定范围、准确度和分辨率如表 1 所示。另外通过烟气分析仪也可以测定尾管出口处的温度。

表 1 testo350EPA 型烟气分析仪测定范围和精度
Tab.1 Range and accuracy of testo350EPA gas analyzer

测定成分	测量范围/%	准确度/%	分辨率/%
O ₂	0 ~ 25	±0.2	0.01
CO ₂	0 ~ 50	±0.3	0.01
CO	0 ~ 1	10 ⁻³	10 ⁻⁴
NO	0 ~ 0.3	5 ⁻⁴	10 ⁻⁴
NO _x	0 ~ 0.05	5 ⁻⁴	10 ⁻⁵
SO ₂	0 ~ 0.5	5 ⁻⁴	10 ⁻⁴
H ₂ S	0 ~ 0.03	2 ⁻⁴	10 ⁻⁵

本系统的数据采集采用 AC6111 中速数据采集卡。AC6111 采集卡的 A/D 转换部分为 12 位 400 kHz 的 A/D 转换器,可以达到最大采样速度。对于频率低于 300 Hz 的脉动燃烧器,完全可以精确显示数据和绘制波形。

1.4 实验设计

将脉动燃烧器的尾管分别连接为 3.25、3.50 和 3.75 m 3 种长度,通过调节供气压力调节燃气流量,在尾管长度一定的条件下,燃气流量分别调节为 60、65、70 和 75 L/min,为了使燃料能够完全燃烧,实验都是在空气过量情况下进行,共 12 组实验。

2 运行频率的理论分析

脉动燃烧是在一定声振条件下形成的周期性燃烧过程。在脉动燃烧器内,声波传播过程与燃烧之间存在着相互作用和联系。一般情况下,燃烧室长度远小于尾管长度,就整个燃烧器而言,可粗略认为脉动压力幅值沿燃烧器轴线分布是按四分之一波长驻波分布^[3]。因此,其频率特性主要取决于其燃烧器的几何结构,但对于同结构的脉动燃烧器,其燃气的性质也会影响燃烧器的运行频率。

平面波动理论是分析气流脉冲的常用方法。普特南通过一维平面波理论,求得脉动燃烧压力的偏微分方程,其压力波表示为叠加后形成的驻波。当脉动燃烧器处于稳定运行状态时,燃烧器内的气柱是共振状态,进而可以通过计算脉动燃烧器的固有频率来计算其运行频率。脉动燃烧的运行频率公

式^[3]为

$$f=\frac{C}{2\pi}\sqrt{\frac{A}{lV}}$$

其中

$$C=(\gamma RT)^{\frac{1}{2}}$$

式中

C ——当地音速,m/s

A ——尾管截面积,m²

l ——尾管长度,m

V ——燃烧室容积,m³

γ ——绝热指数 T ——温度,K

R ——气体常数,J/(kg·K)

但是利用平面波理论计算脉动燃烧频率也存在以下缺陷:第一,脉动燃烧运行是一种不可逆的燃烧反应。将平面波动方程理论应用于脉动燃烧的基本

前提是假定脉动燃烧是一个等熵过程。实际上,脉动燃烧过程是不等熵的压力振荡和温度变化,这使理论值与实际值有一定差距。第二,理论推导中只考虑了几何尺寸对脉动燃烧器频率的影响,实际上燃气进气量会改变能量供给和压力波幅度,对脉动频率也会有小幅度影响。

3 实验结果和分析

如图 2 所示,纵坐标为燃烧室压力,准确度为 ± 1 kPa;横坐标为时间,准确度为 ± 1 ms,图中横线代表大气压力 101. 325 kPa。根据即时显示的燃烧室压力图示读出脉动周期,再计算运行频率。表 2 为实测频率结果的汇总。

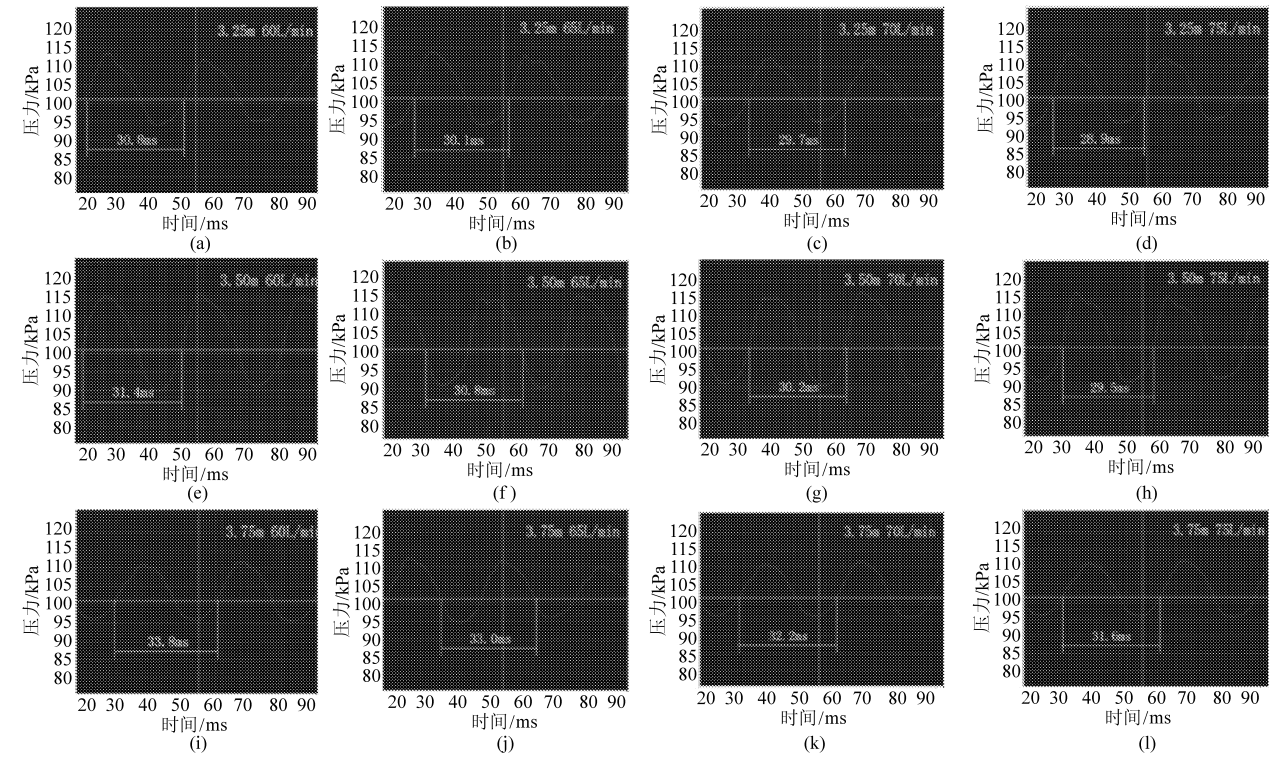


图 2 脉动燃烧运行过程中即时压力测定图

Fig. 2 Chart of pressure measurement in pulse combustion process

- (a) $l=3.25\text{ m}$, $u=60\text{ L/min}$ (b) $l=3.25\text{ m}$, $u=65\text{ L/min}$ (c) $l=3.25\text{ m}$, $u=70\text{ L/min}$ (d) $l=3.25\text{ m}$, $u=75\text{ L/min}$
- (e) $l=3.50\text{ m}$, $u=60\text{ L/min}$ (f) $l=3.50\text{ m}$, $u=65\text{ L/min}$ (g) $l=3.50\text{ m}$, $u=70\text{ L/min}$ (h) $l=3.50\text{ m}$, $u=75\text{ L/min}$
- (i) $l=3.75\text{ m}$, $u=60\text{ L/min}$ (j) $l=3.75\text{ m}$, $u=65\text{ L/min}$ (k) $l=3.75\text{ m}$, $u=70\text{ L/min}$ (l) $l=3.75\text{ m}$, $u=75\text{ L/min}$

表 2 不同实验条件下脉动燃烧频率测试结果				
Tab.2 Results of frequency from the experiments				
Hz				
尾管长度	供应燃气流量 $u/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$			
l/m	60	65	70	75
3.25	32.42	33.20	33.67	34.59
3.50	31.84	32.52	33.12	33.85
3.75	29.61	30.27	31.10	31.65

3.1 燃烧器运行频率随尾管长度的变化

由表 2 可明显看出,在脉动燃烧器燃气流量固定的条件下,随着尾管长度的增长,运行频率随之下降,在燃气流量为 60、65、70 和 75 L/min 4 种实验条件下都有相同变化趋势。根据上述 Helmholtz 型脉动燃烧器的频率计算公式,表明随着尾管的生长,脉动燃烧的运行频率也将减小。本实验证明了频率计算公式中结构参数(尾管长度)对于脉动燃烧频率的影响规律。

3.2 燃烧器运行频率随燃气流量的变化

由表 2 可明显看出,在脉动燃烧器尾管长度固定的条件下,随着燃气流量的增加,脉动燃烧频率也有小幅度增加,尾管长度为 3.25、3.50 和 3.75 m 3 种实验条件下都有相同的变化趋势。根据 Helmholtz 型脉动燃烧器的频率计算公式^[3],脉动燃烧器的运行频率只随脉动燃烧器几何尺寸变化,没有明确体现出随着脉动燃烧燃气流量变化而变化的规律。因此,有必要根据实际测定值对理论值进行修正。

4 理论频率 f 计算

对频率 f 的理论分析可知,当燃烧器结构一定时,频率 f 与音速 C 呈正比,而 C 与燃烧室绝对温度 T 的平方根呈正比。根据文献[3], γ 、 R 与燃烧器内的气流成分有关,在理论计算时,均假定气流成分恒定不变,但实际上从空气和燃气进入燃烧室到烟气排出燃烧器,气流成分是变化的。实际计算时,一般将气流完全视作烟气流,以燃烧室和排烟温度的平均值作为定性温度。

4.1 定性温度 T 的确定

实验中已测定燃烧室平均温度、尾管 2 m 处温度、尾管出口处温度。因此,可以通过拟合已知点温度后,采用积分求平均的方式得到定性温度。图 3 为沿脉动燃烧器轴向的温度分布。各条件下的温度拟合方程分别为 $T_1 = 49.571L^3 - 281.06L^2 + 79.856L + 1\,683.0$; $T_2 = 50.636L^3 - 294.70L^2 + 83.852L + 1\,833.0$; $T_3 = 48.850L^3 - 278.33L^2 + 79.283L + 1\,733.0$ 。其中下角标 1、2 和 3 分别表示尾管长度为 3.25、3.50 和 3.75 m。根据变化趋势,利用三次多项式拟合温度方程,得到当尾管长度为 3.25、3.50 和 3.75 m 时,定性温度分别为 1 198、1 268 和 1 150 K。

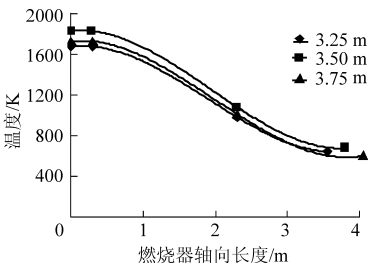


图 3 沿脉动燃烧器轴向的温度分布
Fig. 3 Temperature distribution along the axis of pulse combustor

4.2 气体常数 R 值的确定

根据文献[5]中气体常数计算公式,求得各种条件下的气体常数值,计算公式为

$$R = \frac{8.1343}{\sum_{i=1}^{i=j} M_j v_j} = \frac{8.1343}{M_{CO_2} v_{CO_2} + M_{O_2} v_{O_2} + M_{N_2} v_{N_2} + M_{H_2O} v_{H_2O}}$$

式中 v_j ——混合物内混合组分 j 的体积分数, %
 M_j ——混合物内混合组分 j 分子量, kg/mol

R 值计算时,各组分的体积分数由实验测定如图 4 所示。图 4 为双纵坐标图,其中 CO 、 NO 、 NO_x 、 SO_2 、 H_2S 值根据左侧纵坐标读数, CO_2 、 O_2 值根据右侧纵坐标读数。由图可以观察到,烟气成分中 CO_2 、 O_2 为主要组成成分,其他成分的含量甚微。因此,在计算过程中可忽略 CO 、 NO 、 NO_x 、 SO_2 、 H_2S 成分。另外,根据 C、H 关系和总体积为 100% 关系推算 H_2O 和 N_2 体积分数,结果如表 3 所示,并将体积分数转换成质量分数。

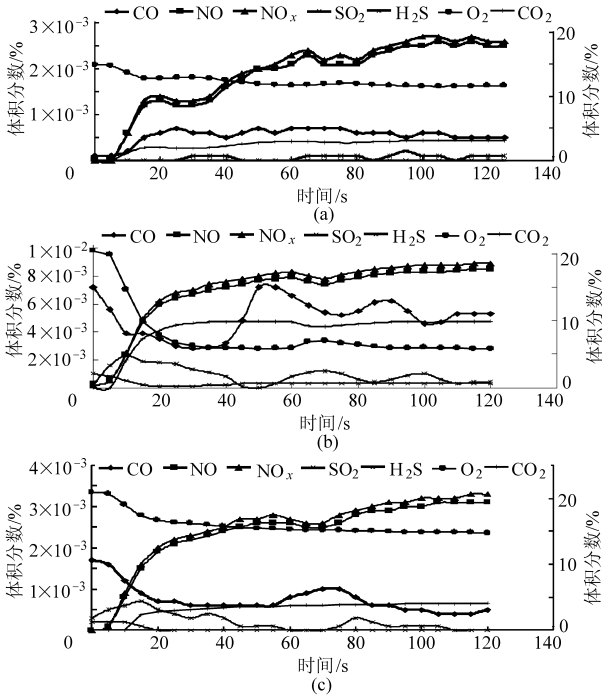


图 4 各尾管长度条件下脉动燃烧烟气成分
Fig. 4 Gas composition analysis under different lengths of tail pipe
(a) 尾管长度 3.25 m (b) 尾管长度 3.50 m
(c) 尾管长度 3.75 m

计算的气体常数 R 结果如表 4 所示,可以看出不同烟气组成的结果对于气体常数的影响很小。计算结果和文献[6]计算的代表性烟气气体常数 279.7 J/(kg·K) 相近。

4.3 绝热指数 γ 值的确定

根据文献[7]中的计算公式,绝热指数的计算结果见表 4。

表 3 脉动燃烧实验测定烟气成分的结果

Tab.3 Results of gas composition by gas analyzer

尾管长度 L/m	体积分数/%				质量分数/%			
	O_2	CO_2	H_2O	N_2	O_2	CO_2	H_2O	N_2
3.25	16.34	3.00	3.86	76.80	18.19	4.59	2.41	74.80
3.50	10.00	5.90	7.59	76.51	11.19	9.08	4.78	74.94
3.75	14.50	4.00	5.14	76.36	16.16	6.13	3.23	74.48

表 4 理论计算值汇总

Tab.4 Theoretical calculation summary

尾管长度 L/m	理论计算量		
	绝热指数 γ	气体常数 R $/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	理论频率 f/Hz
3.25	1.30	282.96	53.49
3.50	1.28	284.57	52.77
3.75	1.30	283.37	48.89

最终得到表 4 所示的理论频率。对比表 4 和表 2 的理论值和实测值,可以看出两者有一定差距。公式修正时,除对理论值和实测值间的差距进行修正外,还需要将燃气流量的影响考虑在内,因此,修正公式设定为 $f=f_0\alpha(1+u)^n$ 。其中, α 表示实际值与理论值的修正, n 表示燃气流量影响的修正。另外, f 表示频率实测值, f_0 表示频率理论计算值, u 为燃气流量,单位由 L/min 转换为 m^3/h 。在拟合过程中,只要能够求出对应的 α 和 n 值,并进行回归检验,就能得到精度较好的修正公式。

5 对于理论频率 f 的修正

5.1 曲线拟合过程

根据实际测定频率值的变化趋势和修正公式 $f=f_0\alpha(1+u)^n$,可求出拟合公式中的 α 和 n 。计算 12 组实验的 f/f_0 和 $1+u$,再根据趋势进行乘幂拟合,结果如图 5 所示。最终得到误差较小的拟合公式 $f=0.3510f_0(1+u)^{0.3565}$ 。

5.2 拟合结果检验

将燃气流量代入修正后的公式进行误差分析。

根据文献[8]中公式求解回归检验 R^2 值,公式为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

式中 y_i ——未经变换的原始数据
 $\hat{y}_i$ ——回归得到的数据
 $\bar{y}$ ——原始数据的平均值

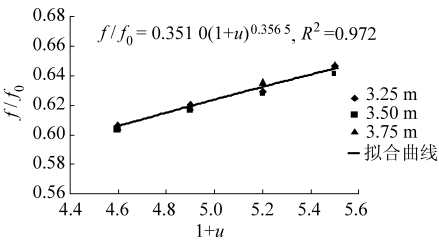


图 5 求解 α 和 n 的拟合结果

Fig.5 Fitting results curve of α and n

回归检验如图 6 所示,根据检验可以看到,3 组实验的 R^2 值都在 0.95 以上(下角标 1、2、3 分别表示尾管长度 3.25、3.50、3.75 m),说明修正后公式可得到精确的计算结果。

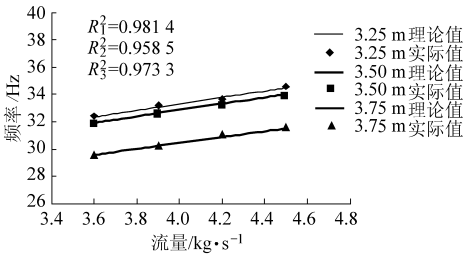


图 6 理论值和实际值差异

Fig.6 Curves of differences between the theoretical and experimental values

6 结束语

在脉动燃烧稳定运行中,当燃气流量供应不变,随着尾管长度的增长,其运行频率逐渐减小;当脉动燃烧器的尺寸参数固定,随着燃气供应流量的增加,其运行频率小幅度增加;最终得到修正公式 $f=0.3510f_0(1+u)^{0.3565}$,经检验修正值在一定程度上能反映实际运行频率。

参 考 文 献

1 程显辰. 脉动燃烧器的设计与研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(2): 241~244.
Cheng Xianchen. Design and investigation of pulse combustors [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 24 (2): 241~244. (in Chinese)

2 刘军,姜正侯. 脉冲燃烧装置运行频率的探讨[J]. 城市公用事业, 1998,12(1): 31~32.

3 周伟国,秦朝葵. 燃气脉冲燃烧技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997:23~27.

4 姜正侯,章成骏. 脉冲燃烧装置的燃烧特性[J]. 煤气与热力, 1992(2): 40~44.

5 杜博夫金 H Ф. 喷气燃料性能手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1990:133.

- Wang Guanghai, Lu Huazhong, Lü Enli, et al. Applied research in fruits and vegetables fresh-keeping with intelligence controlled atmosphere system [C]//2010 International Agricultural Engineering Conference, Shanghai, 2010. (in Chinese)
- 4 杨洲,赵春娥,汪刘一,等. 龙眼果实差压预冷过程中的阻力特性[J]. 农业机械学报,2007,38(1):104~107.
Yang Zhou, Zhao Chun'e, Wang Liuyi, et al. Pressure drop characteristics in forced-air pre-cooling of longan fruits [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1):104~107. (in Chinese)
 - 5 Ferrua M J, Singh R P. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, part I: numerical model [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32: 335~348.
 - 6 谭晶莹, 杨昭. 苹果强制通风预冷试验[J]. 农业机械学报,2008,39(7):95~98.
Tan Jingying, Yang Zhao. Experimental study on forced-air pre-cooling of apples in bulk [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 95~98. (in Chinese)
 - 7 Vigneault C, Thompson J, Wu S. Designing container for handling fresh horticultural produce [M]//Benkeblia N, Shiomi N. Post-harvest Technologies for Horticultural Crops, 2009:25~47.
 - 8 王强,刘凤珍,连添达. 葡萄差压通风预冷影响参数的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(4):212~215.
Wang Qiang, Liu Fengzhen, Lian Tianda. Experimental study on parameters affecting grape pressure pre-cooling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(4): 212~215. (in Chinese)
 - 9 Chau K V, Gaffney J J, Baird C D, et al. Resistance to airflow of oranges in bulk and in cartons [J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(6): 2 083~2 088.
 - 10 Vigneault C, Markarian N R, Silva A, et al. Pressure drop during forced-air ventilation of various horticultural produce in containers with different opening configurations [J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(3): 807~814.
 - 11 闫国琦, 杨洲, 马征. 龙眼压差通风预冷装置风速控制与能耗分析[J]. 农业机械学报,2009, 40(3):125~129.
Yan Guoqi, Yang Zhou, Ma Zheng. Air velocity control and energy analysis in forced-air pre-cooling device of longan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):125~129. (in Chinese)
 - 12 Kan A K, Han H D. Study on temperature field distribution inside reefer containers [C]// International Conference on Cryogenics and Refrigeration Proceedings, 2008: 884~887.
 - 13 Rodríguez-Bermejo J, Barreiro P, Robla J I, et al. Thermal study of a transport container [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 517~527.
 - 14 Moureh J, Flick D. Air flow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(5):464~474.
 - 15 Billing D P, McDonald B, Hayes A J, et al. Temperature characteristics within 20-foot reefer container during export of New Zealand produce [J]. Science et Technique du Froid, 1998(2): 137~147.
 - 16 Punt H, Huysamer M. Temperature variances in a 12 m integral reefer container carrying plums under a dual temperature shipping regime [J]. Acta Horticulturae, 2005, 687: 289~295.
 - 17 Tanner D J, Amos N D. Temperature variability during shipment of fresh produce [C]// Proceedings of the International Conference Postharvest Unlimited, 2003, 599: 193~203.

(上接第 119 页)

- 6 金庆先. 烟气体常数的确定及与监测质量的关系[J]. 上海环境科学,1994,13(6): 30~33.
- 7 魏龙. 热工与流体力学基础[M]. 北京: 化学工业出版社,2007:226.
- 8 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用[M]. 北京: 电子工业出版社,2008:250.
- 9 牛海霞,刘榴,赵文河,等. 脉动燃烧尾气干燥过程的质量传递特性[J]. 农业机械学报,2011,42(1):129~133.
Niu Haixia, Liu Liu, Zhao Wenhe, et al. Mass transfer between materials and unsteady airflow from a Helmholtz type combustor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1):129~133. (in Chinese)
- 10 路倩倩,杨德勇,郎芝花,等. 脉动燃烧干燥换热特性分析与实验[J]. 农业机械学报,2010,41(3):123~127.
Lu Qianqian, Yang Deyong, Lang Zhihua, et al. Analysis and experiment of heat transfer in Helmholtz pulse combustion dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(3):123~127. (in Chinese)
- 11 杨德勇,谢翔燕,刘相东. 料液脉动燃烧尾气雾化试验[J]. 农业机械学报,2009,40(3):90~92.
Yang Deyong, Xie Xiangyan, Liu Xiangdong. Experiment on atomizing properties of Helmholtz pulse combustor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(3):90~92. (in Chinese)