

北京室内外 PM_{2.5} 污染状况及过滤器效率调研

赵 力^{1,2} 陈 超² 王亚峰² 万亚丽² 王 平² 陈紫光² 王清勤¹ 路 宾¹ 王亮添³ (1. 中国建筑科学研究院, 北京 100013; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 3. 广东申菱空调设备有限公司, 广东 顺德 528313)

[摘 要] 以北京地区某临街办公建筑为研究对象, 实时监测室内外 PM_{2.5} 的计重浓度。通过对检测结果的分析得出: 室外 PM_{2.5} 污染较为严重; 室内无污染源情况下, 室内外 PM_{2.5} 质量浓度成正相关, 室内 PM_{2.5} 的质量浓度低于室外; 室内外质量浓度比(I/O) 随气象参数变化波动范围较大。根据监测结果, 为了有效解决集中空调系统室内 PM_{2.5} 的污染问题, 本文对现集中空调系统常用的 G4 + F7 以及 G4 + F9 两种不同空气处理机组的过滤器配置方式进行了实验研究。过滤器性能试验表明, G4 + F7 和 G4 + F9 两种组合均可有效去除 PM_{2.5}。

[关键词] PM_{2.5}; I/O 比; 实时监测; 过滤器; 过滤效率
[中图分类号] TU834.8 [文献标识码] A

Research on Beijing –based Indoor/Outdoor PM_{2.5} Pollution and Filter Efficiency

ZHAO Li^{1,2}, CHEN Chao², WANG Yafeng², WAN Yali², WANG Ping², CHEN Ziguang², WANG Qingqin¹, LU Bin¹, WANG Liangtian³ (1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. Guangdong shenling Air-conditioning Ltd, Shunde 528313, Guangdong, China)

Abstract: A real-time monitoring was conducted on a roadside office building to obtain mass concentration of indoor and outdoor PM_{2.5} in Beijing. The analyses of the monitoring results showed that, outdoor PM_{2.5} pollution was more serious; in the absence of indoor pollution source, the mass concentrations of indoor and outdoor PM_{2.5} were positively correlated, and the mass concentration of indoor PM_{2.5} was lower than that of outdoor PM_{2.5}; I/O ratio fluctuated in a wide range with the change in meteorological parameters. According to the monitoring results, in order to effectively address indoor PM_{2.5} pollution problems caused by central air-conditioning system, an experimental study was carried out to investigate the filter configuration of two common air handling units (G4 + F7 and G4 + F9) of central air-conditioning system. Furthermore, filtration efficiencies of PM_{2.5} under these two configuration modes were also explored. Filter performance test showed that the two configuration modes can be effective removal of PM_{2.5}.

Keywords: PM_{2.5}, I/O ratio, real-time monitoring, filter, filtration efficiency

0 引 言

随着工业化的不断发展和汽车的普及, 我国大气环境污染呈现不断加重的趋势, 颗粒物成为目前影响城市空气质量的主要污染物^[1]。据《2014 年 74 城市空气质量状况报告》: 2014 年第 3 季度, 京津冀区域 13 个城市空气质量平均为达标率为

55.4%, 其中主要污染物就是细颗粒物(PM_{2.5})。PM_{2.5}是指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 2.5 微米的颗粒物^[2]。空气中的 PM_{2.5}易携带大量有毒有害物质, 经呼吸道进入人体肺部深处及血液循环, 对人体产生危害^[3-4]。相关研究表明, 由于汽车尾气含有的油烟飞灰以及 PM_{2.5} 的前体物(SO₃、NO₂) , 街道附近 PM_{2.5} 质量明显高于同一地区其它位置^[5-6]。然而, 大气细颗粒物可通过渗透通风、自然通风、机械通风等方式进入室内, 致使室内环境遭受大气细颗粒物的污染^[7-8]。人一天中有 85% ~ 90% 的时间待在室内^[9], 因而开展关于临街建筑室外 PM_{2.5} 污染对室内环境的影响研究具有非

[收稿日期] 2015-02-12 [修回日期] 2015-04-08
[基金项目] “十二五”国家科技支撑项目(2012BAJ02B02、2012BAJ01B03); 国家自然科学基金项目(51378024)
[作者简介] 赵 力(1973-) 男, 在读博士研究生, 高级工程师
[联系方式] chenchaoy@bjut.edu.cn

常重要的意义。

为了应对PM_{2.5}对建筑室内环境的污染,本研究对北京地区某临街办公建筑室内外PM_{2.5}质量浓度水平实时监测,分析了北京地区大气颗粒物粒径分布特性、室外PM_{2.5}浓度水平的变化特点及其对室内PM_{2.5}浓度水平的影响规律;为了解决上述问题,测试了2种常用空气处理机组过滤器配置方式对PM_{2.5}的过滤器效率。研究结果可为建筑室内PM_{2.5}污染控制提供参考。

1 实测方法

1.1 PM_{2.5}浓度实时监测

1.1.1 监测对象

以北京地区某临街办公建筑为监测对象,于2013年7月~2014年6月监测该建筑中一间东向办公室,其面积约30 m²。该建筑外窗为断桥铝平开窗,窗户气密性等级为4级。监测期间,建筑外窗关闭,室内无人办公,可认为室内无污染源。

1.1.2 监测仪器

室内外均采用LD~5C(R) PM_{2.5}质量浓度监测仪器,监测灵敏度为1 μg/m³,每隔5 min自动记录1次数据,并通过无线网络通讯方式将实测数据上传到数据服务器。

计数浓度监测采用BCJ-4激光粒子计数器,采样流量为2.83 L/min。采样粒径:0.3、0.5、0.7、1.0、2.0、5.0 μm,采样周期设定为1 min。

温度、相对湿度、大气压力、风速、风向等气象参数采用位于实测建筑东侧约2 000 m,当地气象站发布的实时数据(每小时更新1次数据),数据连续自动收集。

1.1.3 数据处理

本研究分析数据采用小时算术平均值,即将每5 min采集1次、1 h 12组PM_{2.5}质量浓度采样数据取其算术平均值作为与室外气象参数采样时间对应的小时均值。PM_{2.5}污染程度划分等级参照中国环境监测总站分级方法分为6类^[10],即:优为0~35 μg/m³、良好为35~75 μg/m³、轻度污染为75~115 μg/m³、中度污染为115~150 μg/m³、重度污染为150~250 μg/m³、严重污染为250 μg/m³以上(本文提到的数据区间范围均为大于区间左侧数据,小于等于区间右侧数据)。

1.2 过滤器效率实测

1.2.1 测试方法

实验应用北京工业大学组合式空调机组多功能实验台进行PM_{2.5}计重和计数过滤效率测试,其原理如图1所示。实验过程中,以大气尘为实验尘源;过滤器的过滤风速分别为1.5 m/s、2.0 m/s、2.5 m/s;采样点分别设在过滤器的上游段和下游段,各采样断面设3个采样点,分别用监测仪器,上下游同时采样,同一工况连续测5次,分别测试了组合过滤器前后的计数浓度和计重浓度,根据测试结果分别计算计数过滤效率和计重过滤效率,并取5次的平均值作为第1次测试结果;为了确保实测结果的可靠性,对测试仪器进行自净后,再重复上述过程,得到第2次测试结果,直至前后2次的测试结果相对误差在标准范围内为止。

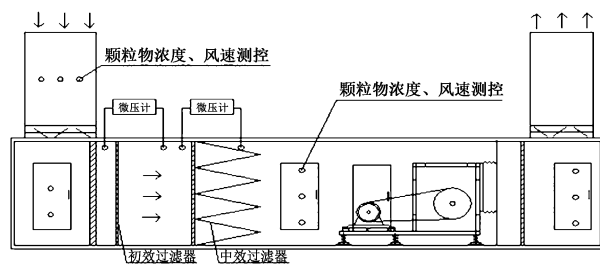


图1 过滤实验台原理图

1.2.2 实测仪器

计重浓度采用LD~5C(R) PM_{2.5}质量浓度监测仪器测量,计数浓度采用BCJ-4激光粒子计数器。

2 实测结果

2.1 大气环境颗粒物粒径分布特点

2.1.1 室外大气尘粒径分布

实测大气尘粒径分布如表1所示。从中可以看出,大气尘中粒径小于1 μm的粒子数约占总粒子的90%,1~2.5 μm粒径段粒子所占比例小于10%。颗粒物粒径越大,质量越大,虽然PM₁数量很多,但是所占颗粒物的质量却很小。根据相关统计,粒径大于1 μm的颗粒物约占总悬浮颗粒物质量的98%^[11]。粗效过滤器主要是过滤5 μm以上悬浮性微粒和10 μm以上沉降性微粒以及各种异物,防止进入系统。在额定风速下,中效过滤器和高、中效过滤器对于0.5 μm以上颗粒物粒径计数效率分别为20%≤η<70%和70%≤η<95%,可见空调机

组中配置粗效过滤器(或中效过滤器)+中效过滤器(或高中效过滤器)是可以有效的控制 $PM_{2.5}$ 污染的。我国国家标准 GB/T 14295—2008《空气过滤器》,中效、高中效过滤器采用效率是计数效率,与计重效率之间存在一定偏差。

表1 大气尘粒径($>0.3\ \mu m$)分布

粒径区间/ μm	相对频率/%	标准差/%
0.3~0.5	29.44	11.19
0.5~0.7	31.92	4.31
0.7~1	34.23	11.66
1~2	3.67	3.08
2~5	4.11	2.44
5以上	1.29	1.08

2.1.2 室外 $PM_{2.5}$ 计重浓度变化

机动车是城市大气中 $PM_{2.5}$ 的主要来源之一,交通源附近的 $PM_{2.5}$ 浓度一般也高于其它地区^[6],受交通源和气象参数变化的影响,临街道路 $PM_{2.5}$ 的变化区间也波动很大。图2为监测期间,该临街建筑室外 $PM_{2.5}$ 频率分布图。从实测结果发现,该临街建筑室外测试点 $PM_{2.5}$ 波动范围在 $0\sim 720\ \mu g/m^3$ 。按我国 $PM_{2.5}$ 标准来衡量,该临街道路污染频率较高,其中约有 47.4% 时刻满足日均值二级标准($<75\ \mu g/m^3$)。轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染所占比例为 11.8%、7.2%、12.5%、21.1%。室外 $PM_{2.5}$ 可以通过渗透、自然通风和机械通风等方式进入室内,当室外 $PM_{2.5}$ 浓度升高,室内浓度也会随之上升。因此,污染天气下,应该关闭门窗,以阻挡室外 $PM_{2.5}$ 的进入。

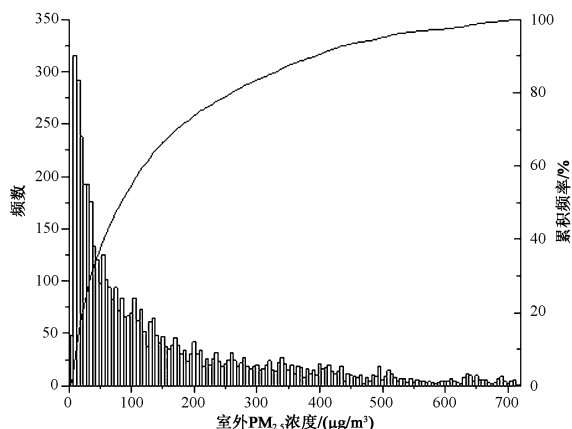


图2 临街建筑室外 $PM_{2.5}$ 分布图

2.2 室内 $PM_{2.5}$ 浓度变化

2.2.1 渗透通风的影响因素分析

室内颗粒物来源主要有两方面,一方面来自于室外,即室外颗粒物通过建筑围护结构渗透进来的,另一方面来自于室内本身,即室内源产生的颗粒物。对于无室内源的房间,根据质量守恒定律,可以得到如下方程模型^[12]:

$$\frac{dC_{in}}{dt} = \alpha p C_{out} - (\alpha + k) C_{in} \quad (1)$$

式中: C_{in} 为室内颗粒物计重浓度, $\mu g/m^3$, 或计数浓度, 个/ m^3 ; C_{out} 为室外颗粒物计重浓度, $\mu g/m^3$ 或计数浓度, 个/ m^3 ; α 为换气次数, h^{-1} ; k 为表面去除

率常数, $K = \frac{\sum_i V_{di} A_i}{V}$; V_{di} 为 i 表面的颗粒沉积

速率; A_i 表示 i 表面面积; V 表示房间体积; p 为颗粒物穿透系数 ($0 \leq p \leq 1$), 表征室外颗粒物通过建筑围护结构能力的无因次参数。 $p = 1$ 表示完全穿透, $p = 0$ 表示室外颗粒物无法穿透。

当室内达到稳定时,可以得到式(2):

$$C_{in} = \frac{\alpha p}{\alpha + k} C_{out} = \frac{p}{1 + \frac{k}{\alpha}} C_{out} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,达到稳态时 I/O 小于 1,即室内 $PM_{2.5}$ 浓度低于室外。影响室内浓度的因素主要是换气次数、颗粒物穿透系数、表面去除率常数。其中与门窗特性有关的是换气次数和颗粒物穿透系数。在相同条件下,门窗的等级越高,门窗对颗粒物的穿透系数越小,室内的浓度越低。对于室内净化器,相当于增加了表面去除率常数,也能降低 I/O ,使室内浓度降低并且稳定在一个数值。因此,针对雾霾天气,有条件的要采取室内净化措施。

2.2.2 室内 $PM_{2.5}$ 浓度变化规律

I/O 比是评价室内外 $PM_{2.5}$ 浓度差异的重要指标之一, I/O 比越小室内 $PM_{2.5}$ 污染受室外影响越小。统计期间 I/O 比分布图3所示,由统计结果可知,在室内无污染源且关闭门窗的情况下,实测房间 I/O 比主要在 $0\sim 1$ 中波动,但各个区间出现的频率并不相等。由此可见,室内 $PM_{2.5}$ 浓度受室外 $PM_{2.5}$ 浓度影响,随着室外浓度的升高而升高,门窗对于

PM_{2.5} 具有“过滤”作用,室内 PM_{2.5} 浓度均值始终低于室外浓度。监测期间 I/O 比均值为 0.58,频率约有 81% 分布在 0.4 以上,在室外 PM_{2.5} 浓度较高时,室内 PM_{2.5} 也达不到二级标准。

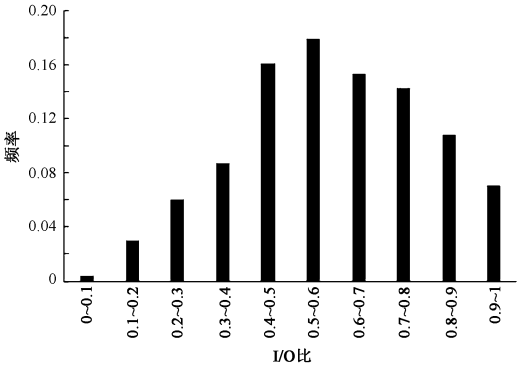


图 3 测试期间 I/O 比分布

图 4 为监测建筑室外 PM_{2.5} 浓度与室内 PM_{2.5} 浓度关系图,从监测数据分析可以看出,在轻度污染(75~115 μg/m³) 状况下,室内浓度为 61 ± 19 μg/m³,基本处在二级标准以内,可见对于监测建筑在室外轻度污染的情况下,关闭门窗可以保证室内 PM_{2.5} 质量浓度满足室内二级标准要求。当室外为中度污染(115~150 μg/m³),所测办公室的浓度为 89 ± 20 μg/m³,其均值已经超过二级标准。随着污染浓度的进一步的加剧,虽然门仍能阻挡一部分 PM_{2.5} 颗粒物的进入,但是已不能保证室内满足二级标准要求。

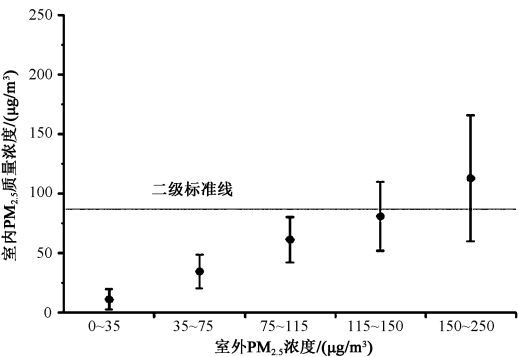


图 4 室外浓度与室内 PM_{2.5} 浓度关系图

结合以上分析,室外为污染天气时,应该关闭门窗,可以阻挡一部分 PM_{2.5} 颗粒物进入室内。但室外 PM_{2.5} 在中度污染及以上时,对于监测建筑,单纯的关闭门窗已经不能保证建筑室内达到二级标准,此时应该采取开净化器等过滤室内空气的措施。

2.3 常用过滤器综合性能分析

1) 过滤器实测

由于过滤器厂家主要参照欧盟标准分级,本次实验研究选取某厂家生产的板式粗效过滤器 G4、袋式高中效过滤器 F7 和 F9 进行实测。G4 相当于国标的 Z3, F7 和 F9 相当于国标的 GZ。板式粗效过滤器规格为 493 mm × 595 mm × 46 mm,袋式高中效过滤器规格为 490 mm × 592 mm × 500 mm。

2) 大气尘源粒径分布

表 2 实测期间大气尘粒径(>0.3 μm) 分布

粒径区间/μm	所占百分数/%
0.3~0.5	39.5
0.5~0.7	33.3
0.7~1	22.8
1~2	3.5
2~5	0.7
5 以上	0.2

此次过滤实验尘源选取大气尘,用激光粒子计数器统计实测期间大气尘粒径分布如表 2 所示,从中可以看出所测粒径中约有 99% 以上粒径小于 2 μm,其所测总粒径(>0.3 μm) 效率可以认为是 PM_{2.5} 粒径效率。

3) 实测条件

分别对 G4 + F7 与 G4 + F9 进行过滤实验,分别测定其面速在 1.5 m/s、2 m/s、2.5 m/s 时的过滤效率,由于实测工况很难保证指定面速,实测期间各种工况参数如表 3 所示。

表 3 过滤器实验工况

参数	风速/(m/s)	温度/℃	相对湿度/%
G4 + F7	工况一	1.52	26.2
	工况二	2.03	26.0
	工况三	2.52	25.8
G4 + F9	工况一	1.52	25.9
	工况二	2.01	26.3
	工况三	2.52	26.1

4) 实测结果

过滤器面速是影响 PM_{2.5} 过滤效率的因素之一,对于测试的过滤器组合, G4 + F7 与 G4 + F9 在不同面速下的 PM_{2.5} 质量效率和所测颗粒物总计数效率如图 5 所示。从图中可以看出, PM_{2.5} 质量效率随着过滤器面速的增加而降低。G4 + F7 在过滤器面速为 2.5 m/s 时 PM_{2.5} 质量过滤效率为 76.3%。对于

测试的过滤器组合 G4 + F7 足以保证室内应对室外严重等级的雾霾天气。采用部分新风的空气处理机组,考虑到空气处理机组的循环风的累计效率,效果将更加明显。相比于 G4 + F7 组合, G4 + F9 组合的 $PM_{2.5}$ 过滤效率有明显提高,当迎面风速为 2.5 m/s 时,其 $PM_{2.5}$ 质量过滤效率为 87.5%,与 G4 + F7 相比提高了 11.2%。总计数效率与 $PM_{2.5}$ 质量过滤效率变化趋势一致,都是随着风速的增大而降低,但是明显低于 $PM_{2.5}$ 质量过滤效率。当风速为 2.5 m/s 时, G4 + F7 与 G4 + F9 对于 $>0.3 \mu m$ 粒子的总计数效率为 47.1% 和 69.0%,与 $PM_{2.5}$ 重效率相差了约 29.2% 和 18.5%。

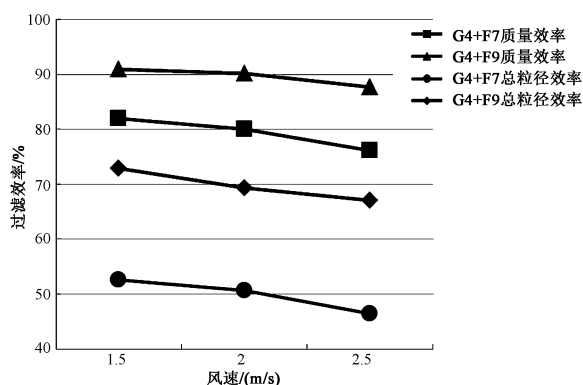


图5 过滤器面速对过滤效率的影响

图6、图7 是对于所测试的 G4 + F7 和 G4 + F9 组合,在不同面速下不同粒径的分级效率。通过实验可以看出,计数效率随着风速的增大而降低,面速变化对 $0.3 \sim 1 \mu m$ 粒径区间的粒子计数效率影响最大。G4 + F7 在 2.5 m/s 风速时, $0.3 \sim 0.5 \mu m$ 粒径区间的计数效率为 11.5%, $0.5 \sim 0.7 \mu m$ 粒径区间的计数效率为 49.3%,而这两个区间的粒子占了实测粒子数目的约为 70%。可见,计数效率对不同

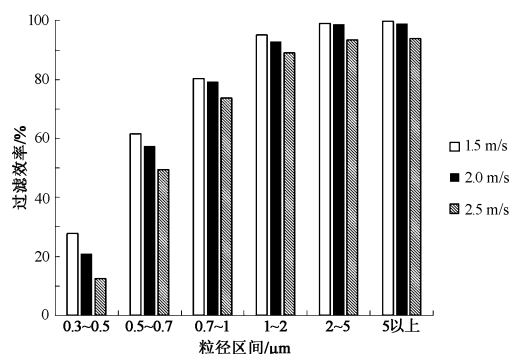


图6 G4 + F7 在不同面速下分级效率

粒径范围差别较大。 $PM_{2.5}$ 是能过直接穿过肺泡进入人体血液的,对人体健康的影响应该是进入血液的颗粒物重量,而不是数量,采取 $PM_{2.5}$ 总计重效率更合理,但 $PM_{2.5}$ 测试仪器除了采取滤膜直接称量的办法,大部分原理也是采用计数乘以 K 值的办法,误差较大。

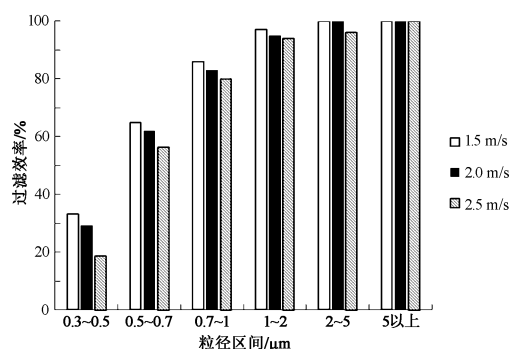


图7 G4 + F9 在不同面速下分级效率

3 结 论

1) 监测期间,室外 $PM_{2.5}$ 浓度波动范围很大,其中约有 47.4% 时刻满足日均值二级标准,轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染所占比例为 11.8%、7.2%、12.5%、21.1%。

2) 对于监测建筑,通过实测 I/O 比发现,关闭门窗、无室内污染源的情况下,室内 $PM_{2.5}$ 浓度始终低于室外,建筑围护结构可以有效阻挡部分 $PM_{2.5}$ 进入室内;但当室外 $PM_{2.5}$ 为中度污染 ($115 \sim 150 \mu g/m^3$) 时,所测建筑 $PM_{2.5}$ 浓度均值已经超过国家二级标准。

3) 对于常用的过滤器组合 G4 + F7 和 G4 + F9 均可有效去除 $PM_{2.5}$, G4 + F9 的质量过滤效率和计数效率明显优于 G4 + F7,选择时可根据当地的气象条件进行选择。

4) $PM_{2.5}$ 计数效率与质量过滤效率存在一定差异,采用计重效率更合理,但受测试条件的限制,两者之间的换算还存在较大误差。

[参考文献]

- [1] 王海东. 通风对室内外颗粒物浓度关系影响的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008
- [2] 郭新彪, 魏红英. 大气 $PM_{2.5}$ 对健康影响的研究进展[J]. 科学通报 2013 (13): 1171-1177

(下转第 175 页)

5 结 论

本文以行业标准的柴灶性能指标及测试方法为基础,对3种不同柴灶进行了详细的性能测试,通过对各性能参数的测试及分析得到以下结论:

1) 2种多功能生物质柴灶的升温供热强度均大于传统生物质柴灶,其中新式多功能生物质柴灶的各项炊事参数大于普通多功能生物质柴灶,综合升温速度及蒸发速度可知,新式多功能生物质柴灶具有较好的起动性能及持久的供热能力。

2) 新式多功能生物质柴灶的水集热器热利用率与普通多功能生物质柴灶相似,新式多功能生物质柴灶的锅水得热率在传统生物质柴灶的基础上提高了3.96%。

3) 在对生物质柴灶的改造中,不能单纯的追求柴灶的热效率,需保证火炕供热能力。新式多功能生物质柴灶与普通多功能生物质柴灶相比更能有效保证火炕的供热能力。

4) 综合生物质柴灶的性能指标可得,新式多功能生物质柴灶在保证火炕表面温度的基础上,比传统生物质柴灶的热效率高30.79%,且其具有比传统生物质柴灶及普通多功能生物质柴灶均好的热工性能,提高了能源利用,适合广大农户的使用。

【参考文献】

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 2012年中国建筑节能年度发展报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
- [2] 郭继业. 北方省柴节煤炕灶技术讲座(一)[J]. 农村能源, 1998(05): 6-8
- [3] 陈晓夫, 张伟豪, 刘广青, 等. 我国户用生物质炉灶的发展和应用[J]. 可再生能源, 2010(02): 118-122
- [4] 赵洋, 端木琳, 王宗山, 等. 火墙式火炕炕体传热特征及内部

烟气流动特性实验研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(04): 17-26

- [5] 郭前辉. 炉灶热性能测试系统设计[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009
- [6] 孙娜. 陕北地区村镇住宅居住热环境及节能技术分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012
- [7] 赵廷林, 侯中兰, 陈夫进, 等. 生物质成型燃料炉具[J]. 可再生能源, 2006(03): 66-67
- [8] 刘和成. 生物质成型燃料在民用生物质炉中燃烧的实验研究与数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2009
- [9] 刘小二, 刘圣勇, 陈芳芳, 等. 生物质成型燃料灶具的设计[J]. 生物质化学工程, 2008(01): 27-30
- [10] 范欣欣, 吕子安, 李定凯, 等. 生物质颗粒燃料炊事炉的性能[J]. 农业工程学报, 2010(02): 280-284
- [11] 谭文英, 许勇, 王述洋, 等. 生物质燃料多功能炉设计与性能测试[J]. 农业工程学报, 2013(15): 10-17
- [12] 刘圣勇, 张飞, 刘小二, 等. 玉米秸秆成型燃料单锅灶的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2009(02): 101-103
- [13] 刘圣勇, 连瑞瑞, 王晓东, 等. 制冷炊事兼用生物质成型燃料炉具的设计[J]. 农业工程学报, 2011(01): 286-290
- [14] Roy M M, Corscadden K W. An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic wood stove[J]. Applied Energy, 2012, 99: 206-212
- [15] Prapas J, Baumgardner M E, Marchese A J, et al. Influence of chimneys on combustion characteristics of buoyantly driven biomass stoves[J]. Energy for Sustainable Development, 2014, 23: 286-293
- [16] 中华人民共和国农业部. NY/T 8-2006 民用柴炉、柴灶热性能测试方法[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006
- [17] NY/T 58-4987 民用灶连炕热性能测试方法[S]. 北京: 中国农业出版社, 1987
- [18] 吴味隆. 锅炉及锅炉房设备[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
- [19] 刘颖. 内置水集热器的生物质柴灶热工性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014
- [20] 陈荣耀, 吕良. 从炕灶测试结果谈炕灶的结构[J]. 可再生能源, 1985(04): 4-7
- [21] 中华人民共和国农业部. NY/T 1001-2006 民用省柴节煤灶、炉、炕技术条件[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006
- [22] 赵洋. 北方村镇火墙式火炕采暖系统热性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009

(上接第144页)

- [3] Maté T, Guaita R, Pichiule M, et al. Short-term effect of fineparticulate matter (PM_{2.5}) on daily mortality due to diseases of the circulatory system in Madrid (Spain) [J]. Science of The Total Environment, 2010, 408(23): 5750-5757
- [4] Pope R C A, Burnett R T, Thun M J, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. JAMA, 2002, 287(9): 1132
- [5] 张振华. PM_{2.5}浓度时空变化特性、影响因素及来源解析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014
- [6] 齐飞艳. 道路大气颗粒物的分布特征及绿化带的滞留作用[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009
- [7] Thornburg J, Ensor D S, Rhodes C E, et al. Penetration of

Particles into Buildings and Associated Physical Factors. Part I: Model Development and Computer Simulations [J]. Aerosol Science and Technology, 2001, 34(3): 284-296

- [8] Chen C, Zhao B. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(2): 275-288
- [9] 邓启红, 吕琪铭. 室内颗粒污染的源辨识与源解析[J]. 建筑热能通风空调, 2006(05): 38-43
- [10] 中国环境科学研究院. GB 3095—2012 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国标准出版, 2012
- [11] 许钟麟. 空气洁净技术原理[M]. 北京: 科学出版社, 2014
- [12] 张寅平, 邓启红, 钱华, 等. 中国室内环境与健康研究进展报告 2012[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012