

尘源类型对空气滤料动态过滤性能的影响研究

王智超¹, 吴占松¹, 李剑东², 徐昭炜²

(1. 清华大学 热能工程系, 北京 100084; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘 要: 分别选用火电厂粉尘、500 目滑石粉和 1250 目滑石粉 3 种尘源, 对袋式除尘器用滤料的阻力、平均过滤周期和过滤效率等动态除尘性能指标进行了测试。通过对大量实验数据的统计分析得到: 尘源类型对空气滤料阻力有较大影响, 在相同条件下使用滑石粉测试得到的滤料残余阻力要明显大于使用实际火电厂粉尘得到阻力值; 尘源的差异对空气滤料平均过滤周期也有较大影响, 使用火电厂粉尘、500 目滑石粉和 1250 目滑石粉进行实验, 初始阶段平均过滤周期分别为 28.2、19.0 和 14.5 min, 最终阶段平均过滤周期分别为 28.7、8.3 和 11.3 min, 表明使用滑石粉尘源测试得到的滤料平均过滤周期明显较短, 可以大大缩减实验时间, 但未能客观反映滤料的实际过滤周期特性; 尘源类型的不同对空气滤料过滤效率也有一定的影响, 使用火电厂粉尘、500 目滑石粉和 1250 目滑石粉进行实验得到初始阶段滤料的效率分别为 99.203%、99.642% 和 99.870%, 最终阶段分别为 98.250%、98.996% 和 99.945%。

关 键 词: 尘源; 空气滤料; 动态性能; 过滤周期; 过滤效率
中图分类号: TQ038.7; X701.2 文献标识码: A

引 言

滤料是袋式除尘器的核心部件, 其性能的好坏直接决定了除尘器的除尘效果。近年来, 国家对大气环境保护日益重视, 环保要求的提高使得单纯依靠电除尘器处理排放废气达不到要求, 而袋式除尘器高达 99.99% 的除尘效率以及对电除尘器不易捕集的高比电阻尘粒亦很有效, 已经能使排尘浓度低于 10 mg/m^3 , 有的甚至低于 2 mg/m^3 ^[1], 这些特点使得其在工业除尘领域的应用越来越广泛, 因而人们对袋式除尘器用滤料性能的研究更加重视。

目前, 国内外针对袋式除尘器用滤料过滤性能检测主要采用动态性能测试法, 该方法模拟实际工业应用中袋式除尘器的工作原理, 引入了一套脉冲清灰系统。德国标准 VDI/DIN 3926、美国标准 ASTM D 6830-02、日本标准 JIS Z 8909-1 和中国标准《袋式除尘器技术要求》(GB/T 6719-2009) 中

均对该方法进行了详细描述^[2-5], 但各国标准中所用的测试尘源存在差异: 德国采用的是 Pural NF 尘源, 成份为氧化铝, 质量中值粒径 $5.8 \mu\text{m}$; 美国采用的也是 Pural NF 尘源, 氧化铝质量百分比大于 98.6%, 质量中值粒径 $1.5 \mu\text{m}$; 日本采用的是煤粉灰, 质量中值粒径 $4.8 - 5.7 \mu\text{m}$, SiO_2 含量 45% 以上; 中国使用的尘源为氧化铝粉, 其中 $< 4 \mu\text{m}$ 粉尘占 50%, $< 25 \mu\text{m}$ 粉尘占 90%, $< 100 \mu\text{m}$ 粉尘占 99%。W Peukert 曾分别用 fumed silica 和 quartz 两种尘源对同一种无纺布滤料进行实验^[6], 尽管 fumed silica 浓度远低于 quartz, 但其作用下无纺布滤料的压降却比 quartz 下的压降高了约 1 个数量级, 同时也得出尘源对滤料出口粉尘浓度以及除尘效率都有影响。目前, 文献中关于尘源差异对空气滤料动态性能影响的研究还很少, 由于旧标准中曾采用滑石粉作为标准实验粉尘^[7], 因此, 本研究选用两种不同目数的滑石粉和一种火电厂粉尘, 比较尘源对滤料过滤性能的影响。研究结果对袋式除尘器用滤料性能检测相关标准的制定和修订有非常重要的意义。

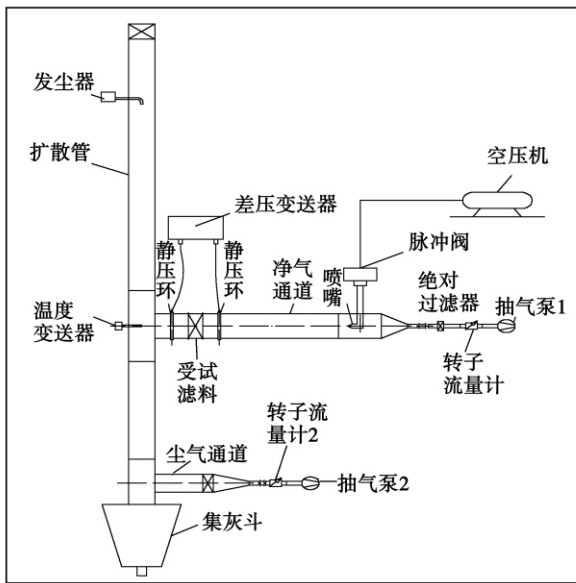
1 实验研究

1.1 滤料性能测试装置

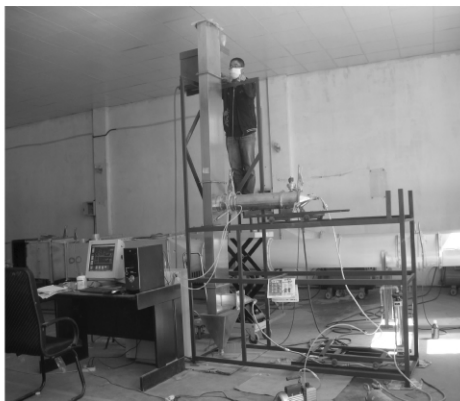
空气滤料动态除尘性能测试装置如图 1 所示, 主要包括发尘器、差压变送器、脉冲反吹清灰系统(空压机、电磁脉冲阀和喷嘴)、绝对过滤器、净气通道(转子流量计 1 和抽气泵 1)、尘气通道(转子流量计 2 和抽气泵 2)。受试滤料安装在净气通道上, 绝对过滤器用来收集透过受试滤料的粉尘; 尘气通道引导发尘气流和反吹后的气流向下流动。该滤料性能测试装置能够实现德国标准、美国标准、日本标准和中国标准中关于滤料动态性能参数的测试, 同时也能够实现发尘浓度可调和抽气流量可调等功能。

收稿日期: 2011-07-19; 修订日期: 2011-09-21

作者简介: 王智超(1972-), 男, 辽宁凤城人, 清华大学博士研究生。



(a) 工艺图



(b) 实物图

图 1 空气滤料动态除尘性能测试装置

Fig. 1 A device for testing the dynamic performance of air filtration materials

1.2 实验方法

本研究中,滤料动态性能测试方法参照国标《袋式除尘器技术要求》进行,有 4 个过程。

1.2.1 初始阶段

初始性能测试阶段包括 30 次滤尘 - 清灰周期,以 1 000 Pa 的压差信号来控制脉冲阀的通断。记录每次清灰后受试滤料的残余阻力值。分别对实验采样前、后受试滤料以及绝对过滤器中高效滤膜进行称重,计算初始阶段除尘效率 C_1 :

$$C_1 = \left[\frac{m_{12} - m_{11}}{(m_{12} - m_{11}) + (m_{22} - m_{21})} \right] \times 100\%$$

式中: m_{11} —采样受滤料称重 g; m_{12} —采样后受滤料称重 g; m_{21} —采样前滤膜称重 g; m_{22} —采样后滤膜

称重 g。

1.2.2 老化阶段

滤尘过程中进行间隔为 3s 的反吹清灰,反复 10000 次。

1.2.3 稳定阶段

按(1)重复 10 次滤尘 - 清灰周期,记录受试滤料的阻力变化。

1.2.4 最终阶段

按(1)重复进行 30 次滤尘 - 清灰周期。记录整个过程受试滤料清灰后的残余阻力变化,并计算最终阶段滤料动态除尘效率 C_2 。

1.3 实验条件

本实验选择了实际收集的火电厂排放粉尘、500 目滑石粉和 1250 目滑石粉 3 种不同的尘源进行比较研究。火电厂粉尘来源于秦皇岛发电厂,燃烧煤种为烟煤,尘源粒径分布情况为: $\leq 1.0 \mu\text{m}$,质量百分比约占 1%, $\leq 5.0 \mu\text{m}$,质量百分比约占 36%, $\leq 10.0 \mu\text{m}$,质量百分比约占 55%, $\leq 30.0 \mu\text{m}$,质量百分比约占 100%;主要化学成份为 SiO_2 ,其次为 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 , MgO 的含量较少。实验过程中各尘源的平均发尘量为 3 g/min。

受试滤料为 PTFE 材质滤料,高效滤膜选择美国 Pall 公司生产的高纯度玻璃纤维滤膜,滤膜直径为 37 mm,孔径大小为 $0.22 \mu\text{m}$ 。实验时受试滤料过滤风速为 2 m/min,脉冲反吹压力为 0.5 MPa,清灰压差触发值为 1000 Pa,脉冲阀通断时间间隔为 50 ms。

2 结果分析与讨论

2.1 阻力

滤料残余阻力变化是滤料性能测试所关注的主要特性。本实验中不同尘源条件下初始阶段和最终阶段滤料残余阻力随清灰次数的变化如图 2 所示。初始阶段 3 种尘源条件下滤料阻力变化趋势相似,随着清灰次数的增加,滤料的残余阻力都是增加的;最终阶段,随着清灰次数的增加,滤料的残余阻力也都增加,但增加的幅度不同,使用 500 目滑石粉和 1250 目滑石粉滤料残余阻力增量要远大于使用实际火电厂粉尘得到的结果。

将不同尘源条件下滤料残余阻力测试数据进行分析处理,得到洁净状态(刚开始实验时)、初始阶段、老化阶段和最终阶段结束后滤料残余阻力值如图 3 所示。洁净状态下 3 片受试滤料的阻力分别为

62、66 和 63 Pa 表明进行 3 种尘源条件实验时各受试滤料的初始性能是基本一致的,从而保证了实验的可比较性。初始阶段结束后,火电厂粉尘、500 目滑石粉和 1250 目滑石粉条件下滤料的阻力分别为 175 216 和 227 Pa; 最终阶段结束后。

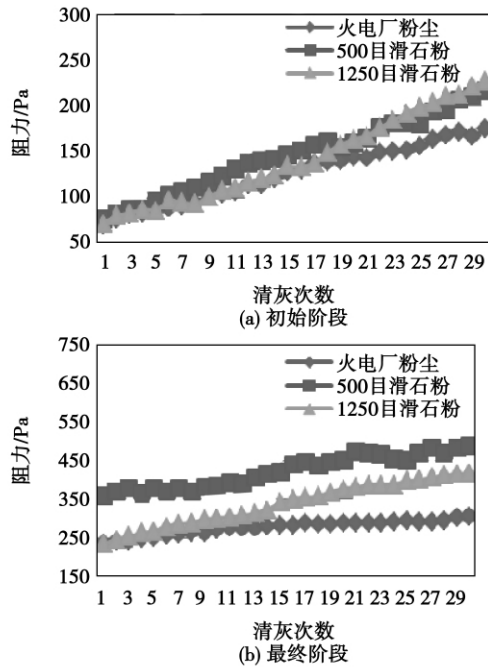


图2 不同尘源条件下初始阶段(a)和最终阶段(b)滤料残余阻力的变化

Fig.2 Change of the residual resistance of filtration materials under different dust source conditions (a) Initial stage (b) Final stage

火电厂粉尘、500 目滑石粉和 1250 目滑石粉条件下滤料的阻力分别为 305 490 和 418 Pa; 表明无论是在初始阶段还是最终测试阶段,使用两种滑石粉尘源得到的滤料残余阻力都要大于使用实际火电厂粉尘得到的值,说明标准中使用滑石粉尘源来检测滤料的性能,可能会高估了滤料的实际阻力特性。从而导致实际应用时风机选型过大,造成设备能耗浪费。

2.2 平均过滤周期

过滤周期(即滤料从开始滤尘到其阻力达到 1 000 Pa 时所用的时间)也是衡量滤料性能的一个重要指标。在相同的条件下,滤料的过滤周期越长,清灰的次数就会越少,对滤料造成的清灰损失越小,寿命也就越长。从图 4 可以看出初始阶段 30 次滤尘-清灰过程该滤料的平均过滤周期长短顺序为火电厂粉尘(28.2 min) > 500 目滑石粉(19.0 min) >

1250 目滑石粉(14.5 min); 最终阶段 30 次滤尘-清灰过程该滤料的平均过滤周期长短顺序为火电厂粉尘(28.7 min) > 1250 目滑石粉(11.3 min) > 500 目滑石粉(8.3 min),说明分别使用实际的火电厂粉尘与滑石粉对相同滤料进行测试,得到的滤料平均过滤周期存在较大差异,使用滑石粉得到的滤料平均过滤周期相对较短,这样虽然可以大大缩短实验所需要的时间,但可能并未客观真实地反映滤料在应用场合中的实际过滤周期性能。

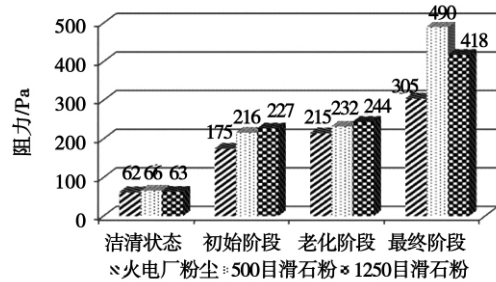


图3 不同测试阶段、不同尘源条件滤料残余阻力的变化

Fig.3 Change of the residual resistance of filtration materials under different dust source conditions in various testing stages

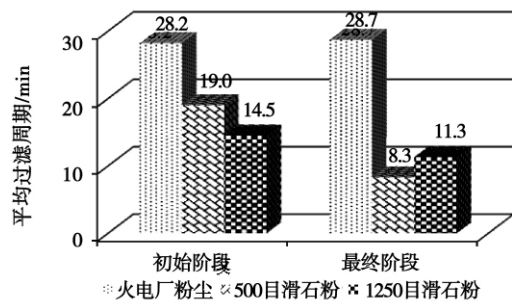


图4 初始阶段和最终阶段不同尘源条件下滤料平均过滤周期的比较

Fig.4 Comparison of the average filtration periods of filtration materials under different dust source conditions in the initial stage and final stage

2.3 过滤效率

不同尘源条件下相同受试滤料过滤效率比较如表 1 所示。初始阶段过滤效率大小依次为火电厂粉尘 < 500 目滑石粉 < 1250 目滑石粉,最终阶段过滤效率大小依次为火电厂粉尘 < 500 目滑石粉 < 1250 目滑石粉,因此,无论是初始阶段还是最终阶段,使用滑石粉测试获得的过滤效率值要略大于在实际电

厂粉尘条件下测得的效率值。

为了确定过滤效率的准确性以及不同尘源条件下过滤效率差异性强弱,对该实验过程中的不确定度进行分析,主要考虑过滤效率测量 A 类和 B 类不

$$u_A(C) = \sqrt{\left[\frac{\partial C}{\partial m_{22}}u(m_{22})\right]^2 + \left[\frac{\partial C}{\partial m_{21}}u(m_{21})\right]^2 + \left[\frac{\partial C}{\partial m_{12}}u(m_{12})\right]^2 + \left[\frac{\partial C}{\partial m_{11}}u(m_{11})\right]^2} \quad (1)$$

(2) B 类不确定度: 考虑到电子天平仪器本身的误差,对过滤效率测量 B 类不确定度进行评价,其计算式为:

$$u_B = \frac{S}{M \times K} \times 100\% \quad (2)$$

式中: S —电子天平最大示值误差; M —对应的示值刻度; K —分布类别,按矩形分布估计,取 $K = \sqrt{3}$ 。

因此,过滤效率测量不确定度进行 B 类评价计算式为:

$$u_B(C) = \sqrt{u(m_{22})^2 + u(m_{21})^2 + u(m_{12})^2 + u(m_{11})^2} \quad (3)$$

(3) 过滤效率测量合成不确定度: 综合考虑 A 类不确定度和 B 类不确定度,得到过滤效率测量合成不确定度式,即:

$$u(C) = \sqrt{u_A(C)^2 + u_B(C)^2} \quad (4)$$

通过计算,得到不同尘源条件下受试滤料过滤效率不确定度比较如表 2 所示。火电厂粉尘、500 目滑石粉和 1250 目滑石粉初始阶段过滤效率对应

确定度评价这两部分^[8-9]。

(1) A 类不确定度: 考虑到多次测量带来的误差, A 类不确定度计算式为:

的合成不确定度分别为 0.092%、0.094% 和 0.087%, 最终阶段对应的过滤效率对应的合成不确定度分别为 0.088%、0.456% 和 0.158%, 总体来说都非常小,表明实验结果比较准确。另外,各合成不确定度也都远小于不同尘源条件下过滤效率值的差值,因此,可以认为尘源类型不同对滤料的过滤效率有一定程度的影响。此外,用滑石粉测试得到的滤料过滤效率相对也要更高。

表 1 不同尘源条件下相同受试滤料过滤效率比较(%)

Tab.1 Comparison of the filtration efficiency and uncertainty of a same filtration material tested under different dust source conditions(%)

	初始阶段	最终阶段
	过滤效率	过滤效率
火电厂粉尘	99.203	98.250
500 目滑石粉	99.642	98.996
1250 目滑石粉	99.870	99.945

表 2 不同尘源条件下相同受试滤料过滤效率不确定度比较(%)

Tab.2 Comparison of the uncertainty of a same filtration material tested at a same filtration efficiency under different dust source conditions(%)

	初始阶段			最终阶段		
	A 类不确定度	B 类不确定度	合成不确定度	A 类不确定度	B 类不确定度	合成不确定度
火电厂粉尘	0.0411	0.0826	0.092	0.0326	0.0817	0.088
500 目滑石粉	0.0462	0.0821	0.094	0.4485	0.0800	0.456
1250 目滑石粉	0.0261	0.0826	0.087	0.1352	0.0821	0.158

3 结 论

通过大量的实验研究,针对尘源类型不同对滤料残余阻力、平均过滤周期和过滤效率等动态性能测试指标的影响进行了深入探讨,得到的主要结论为:

(1) 尘源类型不同对空气滤料残余阻力有较大的影响,使用滑石粉尘源得到的滤料残余阻力要大于实际火电厂粉尘,这说明使用滑石粉作为滤料检

测标准尘源时,会在一定程度上高估该滤料的阻力值,从而会造成袋式除尘器设备风机选型偏大,能耗增加。因此,针对不同应用场合的袋式除尘器,应该选择该场合中实际的粉尘尘源来对滤料阻力性能进行测试,这样可以更准确地得出整套除尘系统的阻力值,有利于设备风机能耗的估算。

(2) 尘源类型不同对空气滤料动态性能测试中的平均过滤周期都有较大影响。初始阶段平均过滤周期火电厂粉尘为 28.2 min,500 目滑石粉为 19.0 min,1250 目滑石粉为 14.5 min,最终阶段平均过滤

周期火电厂粉尘为 28.7 min,500 目滑石粉为 11.3 min,1250 目滑石粉为 8.3 min,表明相对于实际火电厂粉尘尘源而言,使用传统的滑石粉尘源虽然能大大缩短实验测试时间,提高做实验的效率,但是这样也会大大低估滤料的过滤周期,不利于实际应用中滤料的选择,因此,在考察滤料过滤周期特性时选用实际的粉尘也更能反映滤料的真实情况。

(3) 通过计算不同尘源条件下滤料的过滤效率值及其对应的不确定度,得到尘源类型不同对初始阶段和最终阶段滤料的过滤效率有一定程度的影响。用火电厂粉尘、500 目滑石粉和 1250 目滑石粉进行实验得到初始阶段滤料的效率分别为 99.203%、99.642% 和 99.870%,最终阶段分别为 98.250%、98.996% 和 99.945%,表明用滑石粉做检测得到的滤料过滤效率要更高,这样可能导致滤料的实际应用场合中使用不能有效地过滤粉尘,使排放浓度达不到环保的要求。

参考文献:

[1] 蔡纯志. 袋式除尘技术的发展 [J]. 水泥科技, 2007(S): 52 - 54.
CAI Cun-zhi. Development of bag-type dust removal technology [J]. Cement Science and Technology 2007(S): 52 - 54.

[2] VDI 3926 Part 2. Testing of Filter Media for Cleanable Filters under Operational Conditions [S]. 2004.

[3] ASTM D 6830 - 02. Standard Test Method for Characterizing the

Pressure Drop and Filtration Performance of Cleanable Filter Media [S]. 2008.

[4] JIS Z 8909 - 1 (日本) 集尘用滤布性能试验方法-第 1 部分:集尘性能 [S] 2005.
JIS Z 8909 - 1 (Japan). Method for testing the performance of filtration cloth for dust collection-Part No. 1: Dust Collection Performance [S]. 2005.

[5] GB/T 6719 - 2009 中华人民共和国质检总局. 袋式除尘器技术要求 [S]. 北京: 中国标准出版社 2009.
GB/T 6719 - 2009 ,State Quality Inspection Bureau of PRC. Requirements for bag-type dust removal technology [S]. Beijing: China Standard Press 2009.

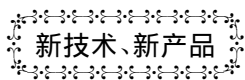
[6] Wolfgang Peukert. High temperature filtration in the process industry [J]. Filtration & Separation ,1998 ,35(5): 461 - 464.

[7] GB 12625 - 90 国家技术监督局. 袋式除尘器用滤料及滤袋技术条件 [S]. 北京: 中国标准出版社 ,1991.
GB 12625 - 90 ,State Technical Supervision Bureau. Filtration materials for use in bag-type dust removal devices and technical conditions for filtration bags [S]. Beijing: China Standard Press ,1991.

[8] 樊高定, 贾磊, 钱雪峰, 等. 空气焓值法测量空调制冷量的不确定度评定 [J]. 流体机械 2007 ,35(5): 62 - 65.
FAN Gao-ding, JIA Lei, QIAN Xue-feng et al. Evaluation of the uncertainty of the refrigeration of an air conditioner by using the air enthalpy value method [J]. Fluid Machinery 2007 ,35(5): 62 - 65.

[9] JJF1059 - 1999 国家质量技术监督局. 测量不确定度评定与表示 [S]. 北京: 中国计量出版社 ,1999.
JJF1059 - 1999 ,State quality and technical supervision bureau. Evaluation of uncertainty of measurements and expression [S]. Beijing: China Metering Press ,1999.

(辉 编辑)



建造世界最大的商船

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2011 年 6 月刊报道, Maersk Line 航运公司正在与韩国 Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co(大宇造船和海洋工程公司) 合作, 开发并建造更大和高效的商船。

400 m 长, 59 m 宽和 73 m 高, Triple-E 是 Maersk 公司当今海洋任何类型船舶中最大型船舶。其设计航速为 42 km/h, 可装运 18 000 个 TEU(20 英尺(6.1 m) 当量集装箱)。如果把这些集装箱放在火车上, 将需要 110 km 长的火车并且如果被此叠放, 其高度几乎要超出同温层(47 km)。

每艘 Triple-E 装有两台超长冲程的低速柴油机, 驱动两个直径为 9.8 m, 并装有 4 个叶片的螺旋桨。

这两台发动机和专业优化后船体(包括双“尾鳍”) 和船首的形状使船舶能以当今标准速度航行于海上。这些发动机每台都装有余热回收系统, 捕获并重新使用来自发动机排气中的能量, 以便增加额外的推进功率并减少燃料消耗和 CO₂ 的排放。

Maersk 已与大宇造船公司签订建造 10 艘 Triple-E 级商船, 这些船舶计划在 2013 年和 2015 年之间交付使用。同时还有一个选项, 再增加建造 20 艘这种商船。这些巨型商船将用于亚洲到欧洲航线。

(吉桂明 摘译)

To develop a high performance adsorbent for adsorption refrigeration by using waste heat ,the dipping method was used to load calcium chloride onto coarse porous silica gel in vacuum and prepare silica gel/calcium chloride compound adsorbent. In this process ,the adsorption isotherms and speed of the adsorbent were tested. The test results show that the compound adsorbent thus obtained by using the dipping method has a greater adsorption capacity to water. At a relative humidity of 20% ,the adsorption quantity of the adsorbent will be 15.64 g/100g adsorbent in 2 hours being 8.06 times as much as that of a single silica gel under the same conditions. The compound adsorbent was used to make a small-sized adsorption refrigeration machine and a test was conducted. When the temperature of the heat source was 90 °C and the cooling water temperature was 35 °C ,during the whole cycle (15 minutes) ,the refrigeration power was 0.705 kW and the refrigeration power of the specific mass adsorbent was 70.51 W/kg with COP (coefficient of performance) reaching 0.25. **Key words:** adsorption refrigeration ,compound adsorbent ,waste heat utilization ,dipping method

尘源类型对空气滤料动态过滤性能的影响研究 = **Study of the Influence of Types of Dust Sources on the Dynamic Filtration Performance of Air Filtration Materials** [刊 ,汉] WANG Zhi-chao ,WU Zhan-song (Department of Thermal Energy Engineering ,Tsinghua University ,Beijing ,China ,Post Code: 100084) ,LI Jian-dong ,XU Zhao-wei (China Architecture Science Research Institute ,Beijing ,China ,Post Code: 100013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(3) . - 372 ~ 376

With the dust in a power plant 500-mesh and 1250-mesh French chalk being chosen as three types of dust source respectively ,tested were such dynamic dust removal performance indexes as the resistance of the filtration material used in a bag-type precipitator ,average filtration cycle and efficiency etc. The statistics and analysis of a large quantity of the test data show that the types of dust sources have a relatively big influence on the resistance of the air filtration materials. Under the same conditions ,the remaining resistance value of the filtration materials tested and obtained by using French chalk is obviously greater than that obtained by using the dust in a practical thermal power plant and the difference of the dust source also has a comparatively big influence on the average filtration cycle of the air filtration materials. A test was performed by using the dust in a thermal power plant 500-mesh and 1250-mesh French chalk respectively ,the average filtration cycles in the initial stage were 28.2 min ,19.0 min and 14.5 min respectively and those in the final stage were 28.7 min ,8.3 min and 11.3 min respectively. These show that the average filtration cycle obtained by using French chalk in the test is obviously shorter and can reduce greatly the test duration ,however ,not yet objectively reflects the real filtration cycle characteristics of the filtration materials. The difference in the types of dust source has a certain influence on the filtration efficiency of the air filtration materials. The filtration efficiencies of the filtration materials in the initial stage obtained through a test by using the dust in a thermal power plant 500-mesh and 1250-mesh French chalk were 99.203% ,99.642% and 99.870% respectively and those in the final stage were 98.250% ,98.996% and 99.945% respectively. **Key words:** dust source , air filtration materials ,dynamic performance ,filtration cycle ,filtration efficiency