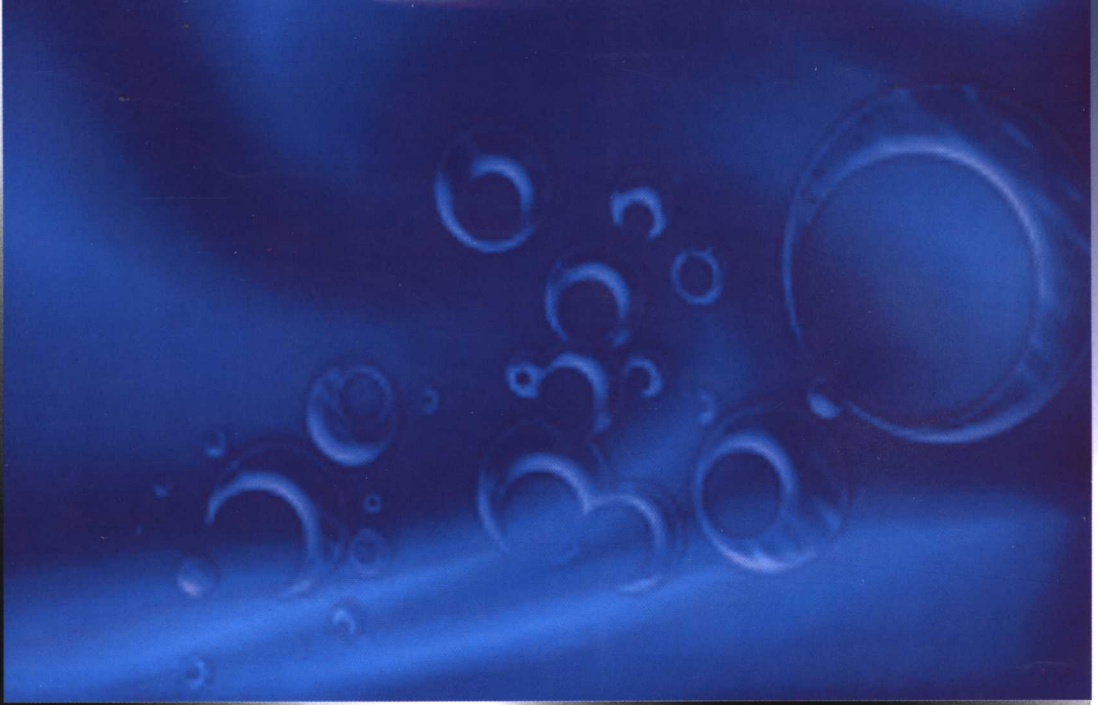




► 锅炉烟气 袋式除尘技术

嵇敬文 陈安琪 编著 ►



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

燃煤锅炉是我国主要的大气污染源之一，而应用除尘设备就是净化锅炉烟气的重要措施之一。作者根据搜集到的资料和从事这方面工作的经验编写了本书。本书内容着重实用，以介绍袋式除尘器的构造和部件、技术数据、运行要点为主，兼及国外应用情况和技术动向，同时精选了一些典型实例进行分析。

本书简明实用，可供袋式除尘设备的设计和制造人员以及电厂的除尘设备运行、检修人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉烟气袋式除尘技术/嵇敬文，陈安琪编著. —北京：中国电力出版社，2006

ISBN 7-5083-4383-2

I. 锅... II. ①嵇... ②陈... III. 燃煤锅炉-
消烟除尘 IV. TK229.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 049879 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 8 月第一版 2006 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 7.5 印张 165 千字

印数 0001—3000 册 定价 13.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

作者简介

嵇敬文教授、陈安琪研究员，现为江苏科林集团除尘专家、技术顾问，长期从事通风除尘方面的工作，曾主持国家环境保护局七五攻关项目“袋式除尘技术研究”

(580008)，出版过《除尘器》、《安全技术手册》、《工厂有害物质通风控制的原理和方法》等著述和译作，近年来专注于锅炉烟气袋式除尘技术的相关工作，积累了丰富的资料和经验，为了推广袋式除尘器在锅炉方面的应用，在江苏科林集团领导的支持下，编写了本书。

前 言



我国的公用事业锅炉和工业锅炉多以煤为燃料，而燃煤锅炉所产生的烟气中含有危害环境的气体和颗粒物，因此，燃煤锅炉是我国主要的大气污染源之一。为了净化锅炉烟气，人们采取了多种技术措施，应用除尘设备就是其中的重要措施之一。

除尘设备有多种类型，它们能够达到的除尘效果各有不同，因而采用什么样的设备须按要求达到的效果来选择。我国的锅炉烟气除尘，在早期使用旋风除尘器、多管除尘器和湿式除尘器的比较多，后来使用电除尘器的逐渐增加。近年来，随着环保要求的进一步提高，不仅低效的旋风、多管除尘器和效果稍好的湿式除尘器远不能满足要求，就是高效的电除尘器也有捉襟见肘之感。在这种情况下，根据国外经验，解决办法就是让袋式除尘器上场。因此，进入 21 世纪以后，我国采用袋式除尘器进行锅炉烟气净化便逐渐增多。

将袋式除尘器用于锅炉除尘，虽然在国外已有三十多年的历史，但在我国还可以说是新生事物，使用锅炉者对之较为生疏。因此，为了让袋式除尘器在我国的锅炉烟气净化方面能够用得好、用得省，普及、推广这方面的技术知识就成为当务之急。有鉴于此，我们根据搜集到的资料和从事这方面工作的经验，编写了本书，目的是想在扶持袋式除尘器应用于锅炉这件事上略尽绵薄之力。

本书内容着重实用，以介绍袋式除尘器的构造和部件、技术数据、运行要点为主，兼及国外应用情况和技术动向。限于作者水平，书中难免有不足之处，切盼读者指正。

编 著 者

2006 年元旦

目 录



前言

第一章 概述	1
--------------	---

第二章 袋式除尘器的技术性能	4
----------------------	---

第一节 除尘率	4
---------------	---

第二节 阻力	4
--------------	---

第三节 影响性能的因素	6
-------------------	---

第四节 用于锅炉烟气除尘的实绩	6
-----------------------	---

第三章 滤料	8
--------------	---

第一节 纤维材料	8
----------------	---

第二节 制造方法	10
----------------	----

第三节 滤料的选择	19
-----------------	----

第四章 脉冲喷吹袋式除尘器	26
---------------------	----

第一节 构造	26
--------------	----

第二节 主要部件	30
----------------	----

第三节 清灰	42
--------------	----

第四节 技术方案有关事项	60
--------------------	----

第五节 运行要点	68
----------------	----

第五章 分室反吹袋式除尘器	73
---------------------	----

第一节 构造	73
--------------	----

第二节 基本技术参数	81
------------------	----

第六章 电与滤袋的结合	83
-------------------	----

第一节 预荷电	83
---------------	----

第二节 外加电场	85
----------------	----

第三节 预荷电与外加电场并用	90
----------------------	----

第四节 紧缩混合型除尘器	91
--------------------	----

第五节 先进混合型除尘器	92
--------------------	----

第七章 应用实例	93
----------------	----

第一节 美国山谷发电厂锅炉烟气 除尘	93
-----------------------------	----

第二节 内蒙古丰泰发电有限公司 锅炉烟气除尘	106
---------------------------------	-----

第三节 无锡友联热电公司锅炉烟 气除尘	111
------------------------------	-----

附录 吴江宝带除尘有限公司 简介	112
---------------------------	-----

第一章

概 述

袋式除尘器是以织物^①为过滤材料（简称“滤料”），做成口袋状，将穿过织物孔隙的气体中所含粉尘捕获的设备。

要使含尘气体被滤袋净化，就须利用通风机将含尘气体经管道吸入或压入装有滤袋的箱体，经滤袋除尘后，干净气体从箱体中排出去。滤料及其捕集的粉尘对气体的流动是有阻力的。滤料上的粉尘积得越多，对气流的阻力也越大，最终通风机所输送的气体流量就会减小到不能满足需要。因此，当阻力大到一定程度就要采取措施将滤袋上的粉尘清除下来，这就是所谓的“清灰”。执行清灰任务的是清灰装置。清除下来的粉尘要从箱体内排走，所以在箱体下面设有上大下小的灰斗，将灰尘集中起来排出去。

由此可知，构成袋式除尘器的基本部件包括箱体、灰斗、滤袋和清灰系统。

袋式除尘器的部件形式、结构及气流在除尘器内的流动路线是多种多样的，施工方式、使用方式也有所不同。根据 GB 6719—1986《袋式除尘器分类及规格性能表示方法》的规定，袋式除尘器按不同的清灰方法分为以下 5 类：①机械振动类；②分室反吹类；③喷嘴反吹类；④振动、反吹并用类；⑤脉冲喷吹类。各类除尘器又可按照某一方面的特征分为不同的型式。例如，滤袋形状有长圆筒形的、有扁平封套状的，前者称为圆袋式，后者称为扁袋式，如图 1-1 所示；除尘器进气口有设在滤袋箱体上部的，也有设在箱体下部或灰斗上的，前者称为上进风式，后者称为下进风式；除尘器内的含尘气流有从滤袋内流向滤袋外，被捕集的粉尘附着在滤袋内侧的，也有从滤袋外流向滤袋内，被捕集的粉尘附着在滤袋外侧的，前者称为内滤式，后者称为外滤式；在整个除尘系统中将有袋式除尘器放在通风机前面的，也有放在通风机后面的，前者称为吸入式，后者称为压入式。当然，还可以有其他的划分，例如，袋式除尘器的建造就有结构式与模块式之分。以前美国工厂中较大的袋式除尘器一般是在现场将各个部件装配而成，这就是结构式的。后来发现，在现场组装与在制造厂组装相比，相同的工作，而且在现场和在制造厂可以做得一样好的，即使现场天气条件好，后者工人的生产率也要比前者的高约 20%，何况不良的现场工作条件、不良的天气条件，还有工人的交通、住宿等问题都要增加现场的劳动费用，应用工具在现场也不如在制造厂中方便。因此，在 20 世纪 70 年代就开始采用模块化设计。所谓模块就是在可能的最大程度上于制造厂组装的袋式除尘器系统中预装配部分。通常，一个模块是能够经济地运往现场的尽可能大的一件货物。当然这样做在运输上会有一

① 这里的“织物”是广义的，不仅包括以经纬纱线纵横交织而成的机织物，也包括由纤维无规则地相互交缠而成的毡子。

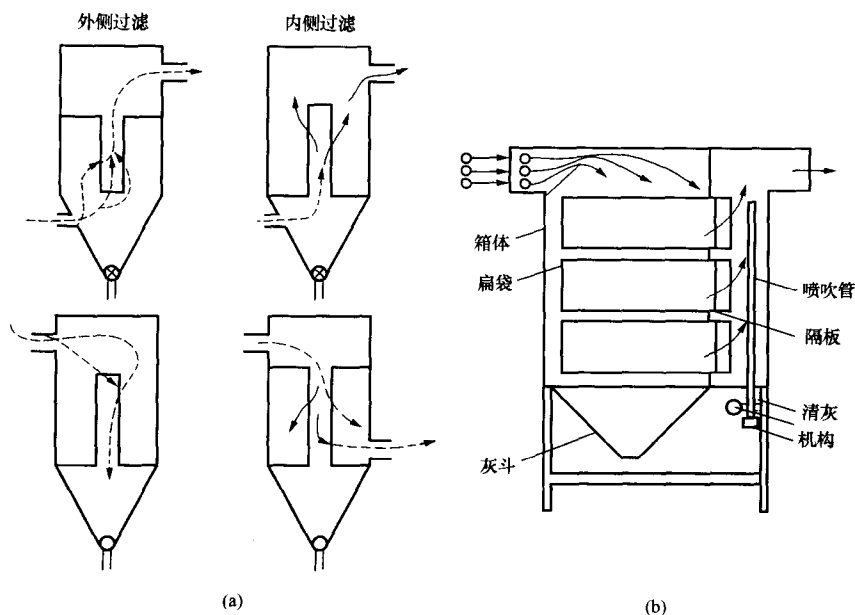


图 1-1 袋式除尘器型式示意

(a) 圆袋式; (b) 扁袋式

定的难度，但是，如果小到在运输上毫无问题，恐怕就会没有竞争性了。通常，所有内部部件如花板、清灰机构，有时甚至滤袋，都是在制造厂中装入模块内的。

工业中应用袋式除尘器已经有一百多年的历史。在这漫长的过程中，它有两方面的发展最为重要：一是开发出多种不同特性的滤料；二是开发出多种不同工作原理、不同结构的清灰装置。

清灰装置虽然花样繁多，但其基本作用不外乎三种，即机械振动、气流反吹和脉冲喷吹。机械振动是最古老的清灰方法，它是利用机械装置使滤袋产生垂直振动、水平振动或扭曲振动而清灰的。气流反吹清灰是以清灰气流逆着过滤气流的方向流过滤袋，使滤袋收缩或鼓胀而清灰的。最晚出现的脉冲喷吹清灰是利用压缩空气的短促发射，瞬间逆着过滤气流向滤袋喷吹，使粉尘脱离滤袋的方法。比较机械振动、分室反吹和脉冲喷吹：前两者的清灰能力弱于脉冲喷吹的，较难清灰的粉尘用后者更适宜；在相同的使用条件下，前两者的压力降常高于脉冲喷吹的；用前两种方法都要在滤袋停止过滤后才能清灰（即“离线清灰”），只能用于间歇工作的除尘器，或增加一部分储备的滤袋，分室轮流清灰，脉冲喷吹则不一定要在停止过滤时清灰（即可以“在线清灰”）；使用脉冲喷吹清灰的除尘器能处理含尘浓度很高的气体，而前两者在含尘浓度很高时则需增加预除尘器；机械振动清灰的运行维护费用较高，脉冲喷吹清灰系统需要有良好的高压气源，阀等部件要注意维修，分室反吹清灰系统结构较简单，运动部件不多，维修工作量较少；在相同的使用条件下，分室反吹的滤袋寿命比脉冲喷吹的长；脉冲喷吹袋式除尘器的最大优点是在处理气体量相同的情况下，它所需要的滤料面积比前两种的少得多，因而设备体积、重量、占地面积都相应的小得多，初投资也就少得

多。由于脉冲喷吹袋式除尘器优点较多,所以应用面日益扩大。

至于滤袋形状,圆袋和扁袋各有优、缺点:①体积相同的除尘器,扁袋比圆袋可多20%~40%的过滤面积;②扁袋可以从除尘器侧面水平抽出,顶部不需要有较高的空间;③在脉冲喷吹清灰时,扁袋比圆袋变形大,因而喷吹后滤袋缩回时与骨架相撞的作用更强烈,产生的漏尘更多,而且清灰时脱离扁袋的粉尘迁移到相邻滤袋上的情况比圆袋的更严重;④扁袋由于封口不好而漏尘的机会比圆袋的多;⑤如果圆袋长度大,则每单位面积地面设置的过滤面积可以多于扁袋的;⑥使用机械振动清灰时,圆袋比扁袋节省动力,但扁袋清灰较均匀;⑦扁袋与扁袋之间的间距较小,如果粉尘量大,或有较粗的纤维状粉尘时,较易堵塞。一般来说,扁袋除尘器宜用于较低的厂房内,或用作插入式除尘器,装在局部吸尘罩中。

将袋式除尘器用于锅炉烟气净化在美国、加拿大、澳大利亚和欧洲都是从20世纪70年代开始的。1973年美国Sunbury电站和西弗吉尼亚州一家化工厂分别安装了第一台用于电站燃煤锅炉和工业锅炉的袋式除尘器。到1995年为止,美国电力工业已经在大约24000MW的发电容量上安装了119台袋式除尘器;应用袋式除尘器的机组规模为6~920MW,平均249MW^①。澳大利亚差不多和美国同时开始在电站燃煤锅炉上应用袋式除尘器,而且还首先采取了利用原有电除尘器外壳改装袋式除尘器的措施。他们之所以应用袋式除尘器,主要是因为燃烧低硫煤所产生的飞灰^②比电阻高,使用电除尘器效果不好,随着对烟尘和SO₂的排放限制愈来愈严,电除尘器难以满足要求。美国电力工业应用袋式除尘器的数量1978年开始急剧上升,就是因为联邦新污染源性能标准NSPS^③在1979年立法之故。

1990年以前美国燃煤锅炉使用的袋式除尘器,脉冲喷吹式的基本上都用于工业锅炉,电站锅炉几乎没有。1996年调查时,美国电站锅炉正在运行着的102台袋式除尘器(119台中有17台已不运行),按总装机容量的百分数统计,分室反吹的占90.1%,机械振动的占9.9%。出现这种情况的原因是,美国电站锅炉起初用了分室反吹的袋式除尘器,效果良好,所以后来就继续采用分室反吹的。而对脉冲喷吹袋式除尘器则担心其机构较复杂,可能会在维护方面出现令人头痛的问题,而且过去没有数据来证明脉冲喷吹袋式除尘器在滤袋使用寿命和控制排放浓度等方面能够满足电站锅炉的要求,所以在差不多20年的时间里几乎没有采用脉冲喷吹袋式除尘器的。但是,后来世界上其他国家许多电站锅炉(包括粉煤炉、层燃炉、沸腾炉、循环流化床锅炉以及各种脱硫脱氮系统)的经验表明,应用脉冲喷吹袋式除尘器能取得成功,所以1990年以后美国电站锅炉采用脉冲喷吹袋式除尘器的也逐渐增多。

近几年我国开始有一些电站锅炉和工业锅炉采用袋式除尘器,有些已经投产。可以预料,随着对环境保护的要求日益提高,将会有更多的燃煤锅炉应用袋式除尘器。

① "Status and Future of Baghouses in the Utility Industry", Journal of the Air and Waste Management Association, 1997, 47 (6)。

② "飞灰"是燃烧化石燃料所产生的烟气中悬浮的固体颗粒物之统称。

③ 锅炉烟尘排放限值为0.03lb/MBtu(大约相当于30mg/Nm³)。

第二章

袋式除尘器的技术性能

第一节 除 尘 率

袋式除尘器在新滤袋开始使用时,是依靠织物孔隙中伸出的纤维与尘粒之间的惯性碰撞、直接截留、静电吸引、布朗扩散等作用捕集粉尘的;当织物上形成一层粉尘层后,则

主要依靠粉尘层的筛分作用捕集粉尘。在现有用于排气净化的各种除尘器中,袋式除尘器的除尘效果是最好的,特别是它捕捉粒径 $1\mu\text{m}$ 以下微细尘粒的能力,较之为高效除尘器的电除尘器 and 高压文丘里除尘器犹高出一筹。

袋式除尘器的除尘率(或称除尘效率)与滤料种类以及滤料上附着粉尘的状况有关。一般地说,新滤袋的除尘率较低。当滤袋上附着的粉尘达到大约 $2\sim 3\text{g}/\text{m}^2$ 时,除尘率就能超过 90%;达到 $150\text{g}/\text{m}^2$ 时,就能超过 99% (按常见的粉尘浓度 $2.5\text{g}/\text{m}^3$ 计,前者约需 1min,后者约需 1h)。滤袋经过清灰后,还残留一些粉尘,经历一段周期性的过滤清灰后,残留粉尘就趋于稳定。这时的除尘率一般将保持大于 99%,如使用得当,甚至可超过 99.9%。在正常状态下,它对粉尘中亚微米

(粒径 $< 1\mu\text{m}$) 部分的除尘率通常是大于 90%。图2-1为某种滤料在不同状态下对各种粒度粉尘的除尘率。

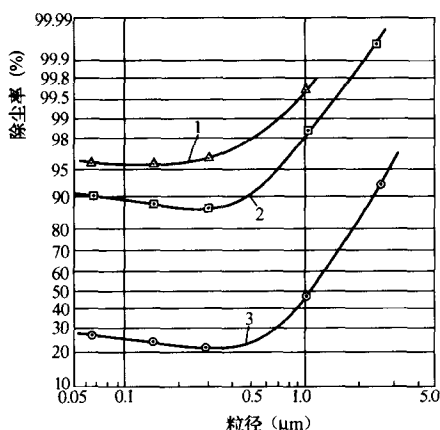


图 2-1 某种滤料在不同状态下
对各种粒度粉尘的除尘率
1—滤料积尘后; 2—滤料
振动清灰后; 3—洁净滤料

第二节 阻 力

袋式除尘器的阻力(或称压力损失、压力降)一般可以通过清灰机构自动保持在设计时者所预定的数值。实际运行的袋式除尘器的阻力大多在 $500\sim 2000\text{Pa}$ 的范围内。

袋式除尘器的最佳阻力应当是兼顾除尘器设备费、运行费、滤袋使用寿命和除尘率等因素的结果。但是,要推算袋式除尘器的最佳阻力是不容易的,因为它的阻力除了与过滤速度、粉尘负荷、清洁织物的透气度等比较容易查明的情况有关外,还与织物的表面状

况、粉尘粒子的特性、气体的温湿度、除尘器的结构以及清灰方法有关。所以，通常多根据用类似的除尘器和类似的织物处理类似的气体与粉尘所取得的实际经验来确定袋式除尘器的最佳运行阻力。

下面介绍一种由 Hemeon 提出的计算机械振动和分室反吹袋式除尘器阻力的方法。

首先将袋式除尘器的阻力分为三部分

$$\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_{fd} + \Delta p_d \quad (2-1)$$

式中 Δp ——袋式除尘器总阻力, Pa;

Δp_c ——除尘器结构阻力, Pa;

Δp_{fd} ——滤料和清灰后残留粉尘的阻力, Pa;

Δp_d ——滤料上能被清灰除去的粉尘层所产生的阻力, Pa。

Δp_c 一般为 200 ~ 500Pa。因为机械振动和分室反吹袋式除尘器的过滤速度较低, 气流穿过滤料时接近层流状态, 故 Δp_{fd} 和 Δp_d 可用式 (2-2) 计算

$$\Delta p_{fd} + \Delta p_d = (\zeta_{fd} + \zeta_d W_d) \mu_f v_s = (K_{fd} + K_d W_d) v_s \quad (2-2)$$

式中 ζ_{fd} ——滤料和残留粉尘的阻力系数, 取决于粉尘特性 (如粒径、黏附性、静电性等) 和滤布材料及织法、清灰方法与能量, m^{-1} ;

ζ_d ——清灰能除去的粉尘层阻力系数, 取决于粉尘特性, m/kg ;

W_d ——清灰能除去的粉尘负荷, MPa;

μ_f ——气体黏度, $Pa \cdot s$;

v_s ——过滤速度, m/s ;

K_{fd} ——滤料刚清灰后的剩余比阻力 (单位过滤速度剩余阻力), $(Pa \cdot s) / m$;

K_d ——清灰能除去的粉尘层比阻力, $(Pa \cdot s \cdot m) / kg$ 。

实际应用式 (2-2) 必须积累 K_{fd} 和 K_d 的数据, 还需要估计在一定时间内可以捕集的粉尘量。确定 K_{fd} 和 K_d 值可以用这样的方法: 先测量经过一段适当的过滤时间后的阻力和气体流量, 然后关掉通风机, 进行清灰, 再从灰斗内取出清除下来的粉尘称重, 接着重新开动通风机, 测量清灰后滤袋的阻力和相应的气体流量, 从而计算 K_{fd} 和 K_d 。

根据式 (2-2) 和式 (2-1) 可以推断, 要保持预定的阻力宜选用多大的过滤速度, 或者选用某一过滤速度时阻力会不会过高。

关于脉冲喷吹袋式除尘器的阻力, Belba 等人曾根据对 35 台粉煤锅炉脉冲袋式除尘器 (包括高压、中压和低压) 实际运行情况的调查提出了一个经验公式如下^①

$$\Delta P = 1390 v_s \pm 40\% \quad (2-3)$$

式中 ΔP ——粉煤锅炉应用的脉冲喷吹袋式除尘器总阻力, Pa;

v_s ——过滤速度, m/min 。

他们还提出下列经验公式, 表示粉煤炉和层燃炉所用脉冲袋式除尘器花板压力降 (即

① “The Potential of Pulse Jet Baghouses for Utility Boilers. Part 1”, Journal of the Air and Waste Management Association, 1992, 42 (2) .

滤袋和悬挂滤袋的花板对气流的阻力) 与过滤速度的近似关系

$$\Delta p_t = 1063 v_s \pm 50\% \tag{2-4}$$

式中 Δp_t ——在花板上下测出的静压差, Pa;

v_s ——过滤速度, m/min。

因为滤袋阻力是变化的, 所以袋式除尘系统最好选用压力—流量特性曲线陡峭的风机, 以减少气体流量的变化。

第三节 影响性能的因素

和袋式除尘器性能有关的因素包括粉尘特性、滤料特性、运行参数、清灰方法等。当气体流量一定时, 某些因素对袋式除尘器技术性能及经济性的影响见表 2-1。

表 2-1 改变某些因素的状态对除尘器的影响

影响因素	阻力减少	除尘率提高	滤袋寿命延长	设备费降低
过滤速度	低 ^①	低 ^①	低 ^①	高 ^①
清灰作用力	大 ^①	小 ^①	小 ^①	小
清灰周期	短 ^①	长	长 ^①	—
气体温度	低	低	低 ^①	低
气体湿度	—	—	低	低
气体密度	(影响小)	(影响小)	(无影响)	(无影响)
粉尘粒度	大 ^①	大 ^①	小	大
入口粉尘浓度	小 ^①	大	小	—

① 影响大。

第四节 用于锅炉烟气除尘的实绩

根据 Cushing 等人^① 和 Merritt 等人对美国电站锅炉分室反吹(包括加声能辅助的)和机械振动袋式除尘器的调查(前者调查了 43 台, 后者调查了 102 台)以及 Belba 等人对各国燃煤锅炉脉冲喷吹袋式除尘器的调查, 分室反吹及机械振动袋式除尘器和脉冲喷吹袋式除尘器的除尘效果不相上下, 大多都能低于美国新污染源性能标准(标准状态下约 30mg/m³), 一部分还能低于标准状态下 10mg/m³。少数排尘浓度比较高的, 主要是早期应用的较老设备以及过滤速度较高、清灰频率较高的设备。

至于除尘器阻力, 1989 年的调查显示, 43 台分室反吹和机械振动除尘器的阻力除个别过滤速度较高者达到 2750~3000Pa 外, 一般是在 1000~2000Pa 的范围内, 其加权平均

① “Operating History and Current Status of Fabric Filters in the Utility Industry”, Journal of the Air and Waste Management Association, 1990, 40 (7)。

值为 1600Pa^①；大部分设备的总阻力与花板压力降之差在 250 ~ 500Pa 的范围内。Belba 报告的脉冲除尘器的总阻力大致也在 1000 ~ 2000Pa 的范围内，但其过滤速度则一般大约为分室反吹的一倍。

除过滤速度外，锅炉形式和滤料对阻力也有影响。一般来说，Belba 等人所调查的脉冲除尘器，在一定的过滤速度下，应用于层燃炉的运行压力降比应用于粉煤炉的低。这是因为层燃炉产生的飞灰颗粒往往比粉煤炉产生的粗，而且更不规则。应用于沸腾流化床锅炉和应用于粉煤炉的脉冲除尘器阻力性能很相似，但是，用于循环流化床锅炉的脉冲除尘器压力降则比用于粉煤炉的高得多（例如在过滤速度为 1.2m/min 时，相差大约 500Pa）。不仅炉型，还有其他上游条件也可能影响颗粒物的性质，从而影响除尘器阻力。例如与喷雾干燥吸收器脱硫以及向管道内和炉内喷吸收剂脱硫相结合的脉冲除尘器和应用于粉煤炉的脉冲除尘器相比，在相同的过滤速度下，前者的阻力往往较低。至于滤料，据调查，在一定的过滤速度下，使用毡滤料的脉冲除尘器压力降比使用玻纤布滤袋的脉冲除尘器压力降低 250 ~ 500Pa。因此，当使用毡滤料取 1.2m/min 的过滤速度时，使用玻纤布滤料只能取 0.9m/min 的过滤速度才可以在大致相同的阻力下运行。

据 Merritt 等人报告，有许多电站锅炉袋式除尘器的管理人员反映，除尘器的阻力会随着使用时间的增长而加大，其原因是清灰后的剩余粉尘层增厚了。为了解决剩余粉尘量逐渐增加的问题，美国宾夕法尼亚电力与照明公司的 Holtwood 电站于 1981 年首先在分室反吹袋式除尘器内应用扬声器来补充清灰能量，其后该国锅炉用的分室反吹除尘器大部分都装了低频气力扬声器，在反吹清灰期间由声能加强反吹造成的滤料振动，而帮助清除粉尘层。据说这样一般可使阻力降低 250 ~ 750Pa。每个分室装的扬声器数量为 1 ~ 8 个，视分室大小以及扬声器规格、煤的种类等因素而定。其应用方法不一样，大部分是在每次清灰时都使用，也有每日只使用一两次，或仅在出现高阻力时使用的，还有的则是使用移动式扬声器，从一个分室到另一个分室轮流帮助清灰。

除应用扬声器外，还有一些电力工业的袋式除尘器利用人工用力振动滤袋，来减少滤袋上不能由正常清灰控制的大量堆积的粉尘。

① 加权平均压力降的定义为

$$\frac{\sum_{i=1}^N (\text{滤袋数量}) \times (\text{压力降})}{\sum_{i=1}^N (\text{滤袋数量})}$$

式中 i 包括报告压力降的每一台设备， N 是该年报告压力降的袋式除尘器总数。

第三章

滤料

袋式除尘器的核心部件滤袋是用各种不同的织物滤料制成的。织物之不同，一在于其所用的纤维材料不同，一在于其制作方法不同。

理想的滤料应当是捕尘能力强，容尘量大，透气性好，容易清灰，尺寸稳定，能在各种不良条件下工作，使用寿命长，造价又不高。但遗憾的是，目前还没有能全面地满足这些要求的滤料。用不同纤维不同制作方法做成的滤料各有其不同的特性，也就是说各有其适用的条件，所以，在应用袋式除尘器时，必须根据要处理什么样的气体和粉尘等具体情况进行选择。

第一节 纤维材料

织物的基本结构单元是单根纤维。可以用来做织物滤料的纤维材料可分为天然纤维和非天然纤维两大类，非天然纤维又可分为化学纤维（包括人造纤维和合成纤维）与无机纤维（包括玻璃纤维和金属纤维）两类。以前一般都用棉花、羊毛、柞蚕丝等天然纤维做滤料，在合成纤维品种增多，日益普及以后，因其具有优于天然纤维的特性，便逐渐改用合成纤维制造滤料，现在几乎已经没有用天然纤维滤料的了。除合成纤维外，在处理高温气体等情况下，使用玻璃纤维滤料的也不少。下面分别介绍这两种纤维。

一、合成纤维

合成纤维是先将简单的化学物质用有机合成方法制得合成高分子化合物，然后经纺丝加工而制成的。现在用于滤料的合成纤维主要有以下几种：

(1) 聚酯（PET——Polyester）。商品名称为涤纶。可在不超过 130℃ 的温度下连续使用，在几分钟的短时间内能耐受 150℃ 的高温。化学稳定性好，但不耐水解。价格较便宜，性价比高。与其他合成纤维滤料相比，聚酯滤料产量最大，应用最广。

(2) 聚丙烯（PP——Polypropylene）。商品名称为丙纶。能在 90℃ 以下连续使用，短时间内可达 100℃。抗酸碱和溶剂腐蚀的性能好。吸湿性极低。软化点低（145 ~ 150℃），有利于丙纶滤料的热轧光处理。黏附力弱，滤料易清灰。

(3) 均聚丙烯腈（PAN homopolymer——Polyacrylonitrile homopolymer）。商品名称为德拉纶 T（Dralon T）^①，是化学纯的丙烯腈。能在 125℃ 以下连续使用，短时间可达 135℃。能

^① T 型德拉纶与普通的德拉纶不同。普通德拉纶是共聚聚丙烯腈（即丙烯腈含量至少 85% 的共聚物），我国的商品名称为腈纶；如用作滤料，只能在 105℃ 以下连续使用。

抗水解，耐磨性较差。

(4) 偏芳族聚酰胺 (m—AR—Meta—Aramide)。商品名称为诺梅克斯 (Nomex)、康纳克斯 (Conex)、凯美尔 (Kermel)、美塔斯 (Metamax)。这些产品性能有不同之处：在耐热性方面，Nomex 优于 Conex 和 Kermel，Conex 又优于 Kermel；在化学稳定性方面，Nomex 和 Conex 的耐碱性好，耐酸性稍差，Kermel 则与之相反；生产成本则以 Kermel 为最低。Metamax 是 Nomex 的另一品牌名。

(5) 聚酰亚胺 (PI—Polyimide)。商品名称为 P84。奥地利 Lenzing 公司生产的 P84 纤维，经湿纺工艺成型后，便具有天然的不规则叶片状中空截面 (见图 3-1)；用它做成的针刺毡捕尘性能很好，粉尘不易渗入滤料内部。关于使用温度，根据德国 BWF 公司的经验，虽然 P84 滤料在实验室条件下，连续使用的温度可达 240℃，短时间可达 260℃，但在实际处理烟气时，由于烟气化学成分的影响，如果要达到 2 年以上的使用寿命，则应在不超过 180℃ 的环境下持续工作^①。另据日本 AMBIC 公司资料，P84 的长期使用最高温度为 200℃，短时间最高温度为 240℃。P84 滤料的使用温度如果超过 140℃，再有一定量的水气，就会出现水解问题。

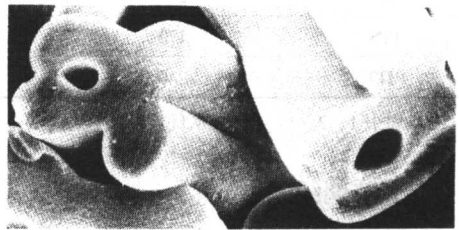


图 3-1 P84 纤维的截面形状

(6) 聚苯硫醚 (PPS—Polyphenylsulfide)。原为美国生产，商品名称是赖登 (Ryton)，后几经转手，现由日本的两家公司生产，商品名称分别为特康 (Torcon)、普抗 (Procon)。化学稳定性好，在温度 200℃ 或低于 200℃ 时，它对有机溶剂、碱和大部分酸 (除了某些氧化剂，如浓硝酸) 都保持稳定的化学抵抗性，但不耐氧化。在力学性能方面，其强度、拉伸与弹性都和聚酯差不多。关于使用温度，根据德国 BWF 公司的经验，虽然 PPS 滤料在实验室条件下，连续使用的温度可达 190℃，短时间可达 200℃，但在实际处理烟气时，如果要达到 2 年以上的使用寿命，则应在 150℃ 以下持续工作，短时间可达 190℃^②。另据日本 AMBIC 公司资料，PPS 的长期使用最高温度为 170℃，短时间最高温度为 190℃。

(7) 聚四氟乙烯 (PTFE—polytetrafluoroethylene)。商品名称为特氟隆 (Teflon)、普罗菲纶 (Profilen)。化学稳定性极好，不老化。物理强度较差。在高温下的尺寸稳定性不够好。可在 240℃ 以下连续使用，短时间可达 260℃。其价格昂贵。

表 3-1 是以上几种纤维理化性能的比较。

表 3-1 合成纤维理化特性比较

纤维名称代号	可以连续使用的最高温度 (℃)	力学性能		化学稳定性				水解稳定性	阻燃性
		抗拉	抗磨	酸	碱	氧化剂	有机溶剂		
PET	130	1	1	3	4	2	2	4	3

① “Filter Media in Waste Incineration”，织物过滤研讨会文集第四卷，2003 年 8 月，无锡 BWF (必达福) 公司。

② “Experience with High Temperature Filter Media”，织物过滤研讨会文集第二卷，2002 年 12 月，无锡 BWF (必达福) 公司。

续表

纤维名称代号	可以连续使用的最高温度 (℃)	力学性能		化学稳定性				水解稳定性	阻燃性
		抗拉	抗磨	酸	碱	氧化剂	有机溶剂		
PP	90	1	1	1	1	4	2	1	4
PAN homopolymer	125	3	3	2	3	2	1~2	1~2	4
m-AR (Nomex)	200	2	1~2	3	2	2	3	3	2
PI	200	2	2	2	3	2	1	2	1
PPS	170	2	2	1	1	3	1	1	1
PTFE	240	3	3	1	1	1	1	1	1

注 表中 1、2、3、4 代表从优至劣的顺序。

二、玻璃纤维

玻璃纤维是由熔融的玻璃液拉制而成的，有不同的化学成分。用于制造滤料的玻纤有两类：一类是铝硼硅酸盐玻璃纤维，即无碱玻璃纤维；另一类是钠钙硅酸盐玻璃纤维，即中碱玻璃纤维。前者可以做得更细。通常，中碱玻纤的单丝直径在 8 μ m 左右，无碱玻纤的单丝直径在 5.5 μ m 左右。纤维直径大小与纱线的屈挠性、强度等性能密切相关，织成布后，有关性能也受其影响。无碱玻纤有很高的强度，新生态单丝强度高达 3500MPa；中碱玻纤新生态单丝强度为 2700MPa。在耐水性方面，无碱玻纤有良好的耐水性，属一级水解级；中碱玻纤有较好的耐水性，属二级水解级。目前，我国多用无碱 12.5tex 玻璃纤维纱（即玻纤单丝直径在 5.5 μ m 左右）和中碱 22.5tex 玻璃纤维纱（即玻纤单丝直径在 8 μ m 左右）制作玻纤滤料。表 3-2 是两种玻璃纤维理化特性的比较。

表 3-2 玻璃纤维理化特性比较

纤维	力学性能			化学稳定性					水解稳定性	阻燃性
	抗拉	抗磨	抗折	无机酸	有机酸	碱	氧化剂	有机溶剂		
无碱玻纤	1	2	4	3	3	4	1	2	1	1
中碱玻纤	1	2	4	1*	2**	2	1	2	2	1

注 表中 1、2、3、4 代表从优至劣的顺序。

* HF 除外。

** 苯酚、草酸除外。

第二节 制 造 方 法

袋式除尘器常用的滤料按其制作方法划分，可分为织造滤料、非织造滤料和覆膜滤料三类，现分别扼要介绍如下。

一、织造滤料

织造滤料是用纤维纺成的纱线按一定的组织形式纵横交错编织而成的织物。其基本组

织有平纹组织、斜纹组织和缎纹组织三种（见图 3-2~图 3-4）。平纹组织是以纵向的经线和横向的纬线一上一下反复交织而成。只要有经线、纬线各两根即可构成一个完全平纹组织。斜纹组织是由经纬线各三根或三根以上交织而成，在布面上有斜向的纹路。缎纹组织是由经纬线各五根或五根以上交织而成，其交织点不连续，有很多经线或纬线浮在布面上。与其他组织相比，平纹织物的经纬线交织点最多，斜纹组织次之，缎纹组织最少。

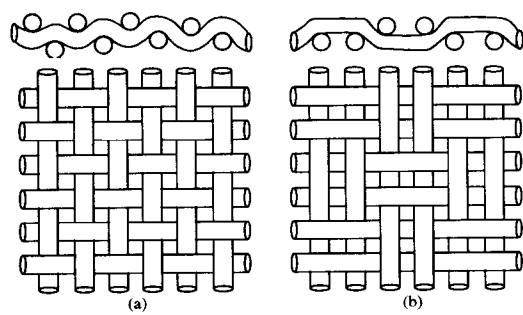


图 3-2 平纹组织
(a) 平纹；(b) 平纹的变化

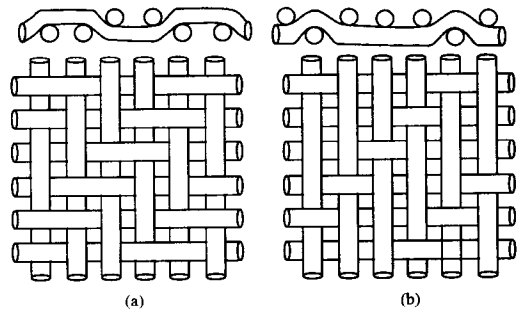


图 3-3 斜纹组织
(a) 2/2 斜纹；(b) 3/1 斜纹

由于平纹组织的交织点多，故其透气性不如其他组织，织得越紧密透气性越差。但如为降低阻力而将织孔放粗，则会增加粉尘的泄漏。缎纹织物交织点最少，透气性最好，其表面光滑，较易清灰，但因纱线浮在表面的长度大，捻度又较小，从而增加破损机会。

制造织物所用纤维的长度有短纤维（长度小于等于 250mm）和长丝（长度远大于 250mm）之分。单根连续的长丝谓之单丝，把若干单丝捻合起来即为复丝。短纤维和单丝、复丝都可以成为制作滤料的原料。长丝织物较用短纤维制成的织物表面光滑，较易清灰，强度也较高。但用短纤维纱线织成的织物有许多纤维端头伸入纱线间的缝隙内，有利于粉尘搭桥，捕尘效果比长丝织物的好；又因其清灰时线间微孔张开得较小，清灰后除尘率的下降比长丝织物的少。如果经纱用长丝、纬纱用短纤维织成滤料，可兼有强度与除尘率均较好的优点。还可以将不同材料的短纤维混和起来制成滤料，以取得比单一材料滤料更多的良好性能。

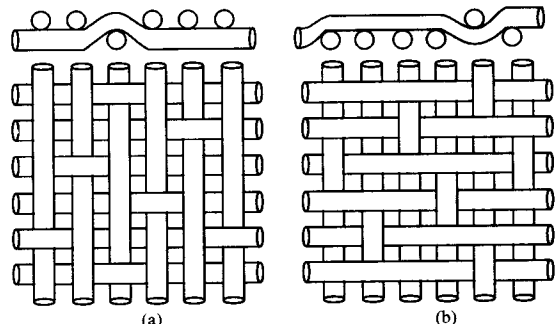


图 3-4 缎纹组织
(a) 经线缎纹；(b) 纬线缎纹

此外，纱线捻得较松的比捻得较紧的除尘性能好；经纬纱粗细和纱线密度对织物的透气性也有影响。从纤维形状^①来看，当滤料上有粉尘层时，除尘率的优劣是，纤维横截

① 化学纤维的截面形状和卷曲度可根据使用要求在纺丝过程中加以控制。

面为异形的优于圆形的,纤维表面粗糙的优于光滑的,纤维卷曲的优于不卷曲的。

织成的织物还可起绒机将其表层纤维扯裂而产生长约3mm的绒毛,形成起绒织物。这种织物的表面绒毛可以遮盖经纬线间的空隙,过滤时绒毛在迎尘面,能阻挡部分尘粒穿透滤料并有助于粉尘层的形成。但是,使用这种滤料要注意防止结露。因为结露时粉尘附着在绒毛及滤料上,难以处理。

我国生产的织造滤料,应用较广的有208滤料和729滤料^①。前者是以涤纶短纤维为原料单面起绒的斜纹织物;后者是涤纶缎纹织物,既有平布,又有圆筒滤布。729圆筒滤布直径有124~423mm六种规格,分别供脉冲喷吹、回转反吹、分室反吹等类型的袋式除尘器使用。在普通729滤料基础上还开发了供特殊应用的MP922消静电滤布、阻燃729滤布和疏水729滤布。

二、非织造滤料

非织造滤料就是用于过滤的非织造布。非织造布品种繁多,其生产技术可分为干法、纺丝成网法和湿法三类。它们的加工程序大体上都是先用各种方法(包括机械、气流、水流)将短纤维或连续长丝铺置成网,然后再通过各种方法(包括机械、化学、热以及自身粘合)加固,使纤网变成非织造布,最后经过整理而得成品。现在袋式除尘器用的非织造滤料基本上都是干法成网机械加固而成的针刺毡。

毡子是较早就有的一种织物,以前都是用天然纤维中的羊毛或其他动物毛,利用热、湿、压力和运动的作用使它们无规则地相互交缠结合而形成毡子,称为压缩毡。但是合成纤维没有羊毛那样的天然毡缩性能,不能制成压缩毡,就得另谋别法制成毡子,于是便出现了针刺毡。

与生产非织造布的其他方法相比,针刺法具有初投资和运行费用较省的优点,用得很多,针刺毡只是其中的一种产品。针刺毡的生产过程一般是先将纤维原料混合开松后经喂料机械进入成网系统。成网系统一般由罗拉梳理机和平铺折叠成网机组成。梳理机的作用是将经过准备工序的纤维原料加工成基本上由单纤维组成的薄网,然后通过成网机将薄网铺叠成一定厚度的纤网(针刺毡滤料一般需要铺网16~20层),再对纤网进行针刺加固。针刺分两步进行:先用预针刺机进行针刺,使纤网初具强力,厚度大为减小,再送至主针刺机加工,使产品具有所需的针刺密度,厚度进一步减小(见图3-5)。因为成网系统产生的纤网十分蓬松,纤维与纤维的抱合力很差,所以纤网几乎没有强力。但当很多带有钩刺的针刺入纤网时,钩刺就带着纤网表面的一些纤维随针穿入纤网,而在刺入一定深度的刺针回升时,不再钩着纤维,这些纤维就近乎垂直地留在纤网内(见图3-6)。如果在1cm²纤网内的针刺数达到数十乃至上百,就会把相当多的纤维束刺进纤网,使纤维与纤维紧紧缠结而产生较大抱合力,由于摩擦作用而压缩的纤网也不再恢复原状,使纤网密度大为提高,这样就形成了具有一定强度的针刺毡。

针刺机的刺针型式与规格、刺针排列、针刺密度和深度等都是决定产品质量和性能的

① 这两种滤料的特性见《袋式除尘器滤料及配件手册》,东北大学出版社,1997。