

文章编号: 1000-7466(2009)06-0019-04

# 氧化铝粉尘在布袋除尘器 过滤介质上沉积规律

汪家琼<sup>a</sup>, 刘根凡<sup>b</sup>

(华中科技大学 a. 能源与动力工程学院; b. 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 以氧化铝粉尘为介质,对氧化铝在布袋除尘器过滤面上的沉积规律进行了研究。通过间接方法,主要研究了布袋长度对氧化铝粉尘层在布袋上沉积规律的影响,推导了粉尘层厚度垂直分布模型及过滤压降模型,可为布袋除尘器设计提供依据。

**关键词:** 布袋除尘器; 氧化铝; 过滤; 沉积层; 压降; 模型

**中图分类号:** TQ 051.8

**文献标志码:** A

## Further Study on Alumina Sediment Characteristic on Bag Filter Medium

WANG Jia-qiong<sup>a</sup>, LIU Gen-fan<sup>b</sup>

致实际接触面积增加,相互嵌入和塑性变形程度都加强。空气的导热系数很低,摩擦热在接触表面积累,浸钨石墨表面微凸体由于温升的作用而变软,使得两表面微凸峰之间的啮合程度得到加强。当粘着结点因动环滑动而被剪切时,就产生犁沟磨损。

一般来说,在密封面表面粗糙度很高的情况下,尽管泄漏量很大,但仍会出现严重的磨料磨损。磨损过程中不可避免会产生磨粒,磨粒随着磨损不断产生、移除。当磨损稳定时,磨粒的产生和移除也进入了平衡状态,即产生的磨粒和移除的磨粒相当<sup>[10]</sup>。一旦出现软环颗粒挤压大量剥落,会对密封接触面的平稳工作产生不利影响,才出现干摩擦机械密封泄漏量不稳定的问题。

### 3 结论

(1)设计高压干摩擦机械密封时,应充分考虑载荷系数的影响,优先选取载荷系数约0.85,此时干摩擦机械密封密封效果相对稳定,寿命较长。

(2)干摩擦机械密封受压力锥旋和热锥旋影响较大,工作运行中需尽量保证较大的闭合力 and 压差稳定,以保持端面贴合,克服自适应磨损的不稳定性。应考虑优化端面结构,以达到稳定的密封效果。

(3)选用适宜的干摩擦材料作为摩擦副是设计

干摩擦机械密封的关键之一。浸钨石墨作为一种自适应磨损性能良好的材料,可以广泛应用于高参数干摩擦机械密封。如果有更好的干摩擦材料,将极大拓展干摩擦机械密封的应用范围。

### 参考文献:

- [1] 吴兆山,姚黎明,谷传文,等. 风机用接触式干运转机械密封研制[J]. 流体机械,2006,34(5):18-20.
- [2] 杜保安. 204型机械密封在干摩擦状态下的使用[J]. 流体工程,1993,21(4):29-31.
- [3] 何敏,王启立,孙智. 浸钨石墨摩擦磨损特性研究[J]. 润滑与密封,2006,31(9):155-156.
- [4] 顾永泉. 机械端面密封[M]. 东营:石油大学出版社,1999.
- [5] 顾永泉. 机械密封比压选用原则[J]. 石油化工设备,2000,29(2):21-24.
- [6] 海因茨 K 米勒,伯纳德 S 纳乌. 流体密封技术——原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2002:137-194.
- [7] 奚 羣. 密封装置设计基础[M]. 合肥:安徽科学技术出版社,1987.
- [8] 张永振. 材料的干摩擦学[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [9] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社,2002:271-287.
- [10] 袁春俭. 激光表面微造型在干摩擦条件下的摩擦磨损性能研究[D]. 江苏:江苏大学,2008.

(张编)

收稿日期: 2009-05-29

作者简介: 汪家琼(1974-),女,湖北荆州人,在读博士研究生,研究方向为烟气净化处理。

(Huazhong University of Science and Technology a. The Institute of Energy & Power;  
b. The State Key Laboratory of Coal Combustion, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Characteristic of alumina sediment on bag filter was further studied. The study was focused on the effect of bag length on characteristic of alumina sediment with indirect methods. Model of vertical profile of dust layer and that of filtration pressure drop were developed. This study will provide a basis for bag filter design.

**Key words:** bag filter; alumina; filter; sediment layer; pressure drop; model

在电解氧化铝行业,普遍使用布袋除尘器对铝电解烟气进行过滤。过滤时,布袋上形成的氧化铝粉尘层对净化具有重要影响,粉尘层不但可以过滤细小粉尘,而且具有类似固定床反应器除氟的作用。随着国内外环保要求的提高,传统的净化技术不断改进。在铝电解烟气净化系统中,处于领先水平的有法国的ALSTOM公司和SOLIOS公司等。这些厂家对包括布袋除尘器在内的除尘设备不断进行研究并改进,使净化指标不断降低,氟化物量不大于 $0.8 \text{ mg/m}^3$ (标准状态),而国内氟化物排放指标在 $3\sim 15 \text{ mg/m}^3$ (标准状态)<sup>[1]</sup>。究其差距的根本原因,是因为国内大部分用于电解铝烟气净化的布袋除尘器是在国外早期设备基础上进行适当改变而成,没有基础研究数据和经验规律可参考。为了提高国内除尘器的净化效率且尽量减小阻力损失,必须对该类布袋除尘器进行基础理论研究,为工程设计和工艺操作提供理论参考依据。

对布袋除尘器有两大要求,即节能和减排。操作中,既要保存可接收的压降,又得达到排放标准。这些指标极其依赖于粉尘层的厚度及均匀分布程度。国内外对于过滤粉尘层形成规律及脉冲喷吹清灰规律研究很多。大多数研究者用一维模型描述了粉尘层形成规律,并关联了与压降的关系<sup>[2~4]</sup>。另外一些研究者考虑了粉尘层分布的不均匀性,用概率模型模拟了粉尘层形成及清灰规律<sup>[5~7]</sup>。Kanaoka C和Klingel R等在过滤研究中发现滤饼垂直方向分布不均,底部厚度大,但没有进一步研究<sup>[8,9]</sup>。Wang J Q和Liu G F对高度为1 m的扁平布袋进行了过滤研究,用移动式测量显微镜观测了粉尘层厚度,研究了滤饼厚度及不均匀性与过滤速度、单位过滤面积加料量(以下简称面加料量)及粒子质量浓度的关系。研究表明,粉尘层厚度垂直分布不均匀,呈中间厚两端逐渐减薄的形状,并用峰值函数拟合了粉尘层厚度与操作条件的关系<sup>[10]</sup>。该模型很好描述了滤饼分布情况,并根据滤饼厚度分布预测了

压降变化,但没有考虑布袋长度对粉尘层厚度影响的变化,为此,在前面研究基础上,笔者研究了布袋长度对滤饼厚度分布影响。

## 1 实验研究

### 1.1 实验分析

在氧化铝电解烟气过滤中,常用的过滤布袋长度达6 m甚至更高,用该长度研究布袋长度对过滤粉尘沉积层厚度和不均匀性的影响比较困难。因为在工业现场,布袋上粉尘层厚度测量不方便。而在实验室,因实验空间、测量手段限制更不便于采用。

文献[10]对长度为1 m的扁平布袋进行了过滤研究,对于长度大于1 m的布袋,如果在前面研究基础上,按照相似原则进行简单放大,则会带来较大误差。因为在平均过滤速度不变时,增加布袋长度,则布袋底部气流轴向速度(以下简称轴向速度)增加,被气流曳力带起的粉尘数量增加,导致过滤空间粉尘浓度增加,最终使单位过滤面积上沉积的粉尘层质量增加。如果在按相似原则比例放大前提下,再考虑由于布袋长度增加导致的轴向速度增加及对粉尘沉积层质量的影响,就可以分步考虑布袋长度变化对粉尘沉积规律的影响。假设布袋上沉积的粉尘层质量和面加料量成正比,则在平均过滤速度一定的条件下,布袋长度增加对单位过滤面积粉尘层质量的影响可以看作由面加料量成比例增加导致,其比例系数为 $K_L$ ,用面加料量乘以 $K_L$ ,再带入相应的模型,就可能很好地解决布袋长度对过滤沉积规律影响的问题。以下研究在过滤面速度一定时,轴向速度变化对比例系数 $K_L$ 的影响。

### 1.2 实验装置及步骤

实验装置见图1,主要由透明有机玻璃过滤装置、蒙有涤纶针刺毡过滤介质(厚度2 mm)的垂直放置的框架(过滤介质长1 000 mm,宽150 mm)、微型螺旋加料器(10 kg/h)、气体流量计、U型压差计、风泵、脉冲喷吹系统及厚度测量装置——带摄像头

的移动式显微镜(型号为 MJ-40XK, 测量精度 0.02 mm)组成。进料侧腔体横截面面积 80 mm×140 mm, 出料侧横截面面积 40 mm×140 mm。

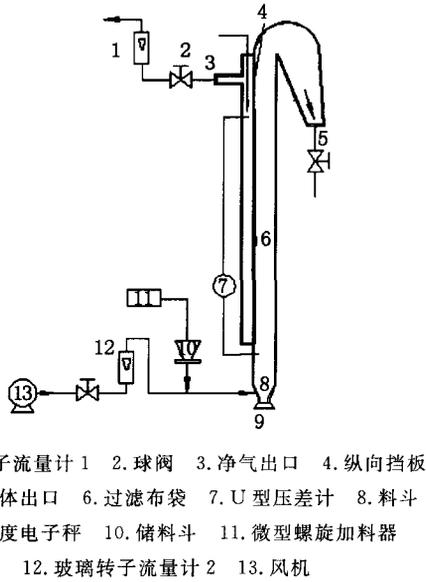


图 1 实验装置示意图

为了保证在过滤面速度不变情况下轴向速度成比例改变,加料时气体体积流量应成比例增加,使通过过滤面的体积流量不变,多余含尘气体通过顶部的弧形出口排出。进、出口气体体积流量通过 2 个玻璃转子流量计和 3 个球阀调节。每次实验前进行预操作,即在实验条件下进行过滤,达到 2 kPa 后脉冲喷吹,喷吹压力为 0.5 MPa,经过 10 个周期形成均匀的初始滤饼层后开始实验。喷吹后初始滤饼层过滤介质内外压差由 U 形压差计测量,落入料斗中的粒子质量由高精度电子秤测量(精确度 0.1 g)。飞灰粒子为氧化铝微粒(平均直径 32.45 μm),由微型螺旋加料器供给,由变频器控制加料速度,粒子用风机分散。在框架外侧通过透明装置测量布袋除尘器粉尘层厚度,测量仪器为移动式测量显微镜,上端装摄像头并与 PC 机相连,由 PC 机控制拍照,图片保存于 PC 机。粉尘层厚度可以从图片中读取。显微镜可以沿过滤器上下移动(手动操作),从而测量过滤介质整个垂直位移上的沉积层厚度。测量厚度时,为了维持稳定的粉尘层厚度,停止氧化铝加料,气流流量体积流量不变。

操作参数为,平均过滤速度 2 cm/s、气流轴向速度 0.25~1.5 m/s(对应的过滤布袋长度为 1~6 m)、氧化铝飞灰质量浓度 80 g/m<sup>3</sup>、面加料量 M=1.71 kg/m<sup>2</sup>。所有操作在室温(大约 25 ℃)、相对湿度 60%下进行。

### 1.3 实验结果

在平均过滤速度为 2 cm/s,氧化铝加料质量浓度为 80 g/m<sup>3</sup>,布袋面加料量为 1.71 kg/m<sup>2</sup> 条件下,改变气流轴向速度,布袋上单位过滤面积沉积层质量  $m$  随轴向速度  $u_v$  变化情况见图 2。可以看出,随着  $u_v$  从 0.25 m/s 逐步增加到 1.5 m/s,  $m$  基本线性增加。不妨把轴向速度增加看作由布袋长度相应增加导致,故在相同过滤速度前提下,随  $u_v$  增加,  $m$  成比例增加,对应的质量比例系数  $K_L$ (量纲一)随布袋长度变化,拟合  $K_L$  与布袋长度  $L$  关系为:

$$K_L = 0.317 + 0.73L \quad R = 0.998 \quad (1)$$

式中,  $R$  为相关系数。

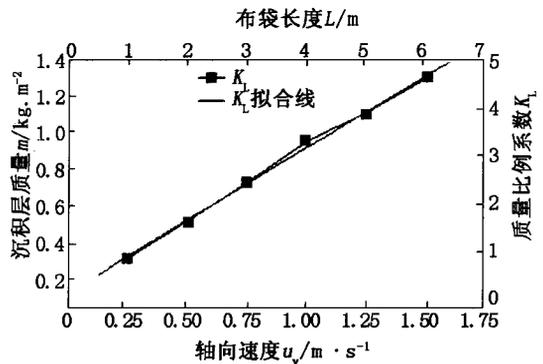


图 2 沉积层质量与轴向速度以及质量比例系数  $K_L$  与布袋长度关系

## 2 模型研究

### 2.1 布袋长度对粉尘层厚度影响

文献[10]中用峰值函数关联布袋除尘器沉积层厚度  $h$  垂直分布与过滤速度  $u$ 、粒子加料质量浓度  $c$  的关系式,厚度峰值函数为:

$$h = Ae^{-\frac{(x-x_c)^2}{2W^2}} \quad (2)$$

式中,  $h$  为沉积层厚度,  $A$  为幅值,  $10^{-2}$  mm;  $x_c$  为峰值坐标,  $W$  为曲线宽度, mm。

在过滤器结构一定的条件下,  $A$ 、 $x_c$ 、 $W$  由平均过滤速度、氧化铝加料质量浓度和面加料量决定,其拟合关系式为<sup>[10]</sup>:

$$x_c = -177.87 + 154.71u - 9.56u^2 + (18 + 2.93u)(M - M_0) \quad (3)$$

$$W = 37.28 + 69.63u - 4.78u^2 + (47.35 - 3.13u)(M - M_0) \quad (4)$$

$$A = \left(\frac{c}{c_0}\right)^{-0.095} [-38.89 + 26.02u + (7.15u - 9.78)(M - M_0)] \quad (5)$$

式中,  $u$  为过滤速度, cm/s;  $c$  为氧化铝加料质量浓

度,  $c_0$  为质量浓度,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $M_0$  为面加料量,  $\text{kg}/\text{m}^2$ 。文中取  $u = 4 \text{ cm}/\text{s}$ ,  $c = 80 \text{ g}/\text{m}^3$ ,  $M_0 = 1.71 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。

高度对布袋粉尘层厚度影响可以分解为两步: ①厚度分布根据布袋长度比例放大,  $x_c$ 、 $W$  前应乘以  $L$ , 幅值  $A$  不变。②布袋长度导致轴向速度和被曳力带起的粉尘质量增加, 在面加料量  $M$  前需乘以质量比例系数  $K_L$ 。峰值函数形式不变, 其参数  $A$ 、 $x_c$ 、 $W$  变为如下形式:

$$x_c = L[-177.87 + 154.71u - 9.56u^2 + (18 + 2.93u)(K_L M - M_0)] \quad (6)$$

$$W = L[37.28 + 69.63u - 4.78u^2 + (47.35 - 3.13u)(K_L M - M_0)] \quad (7)$$

$$A = \left(\frac{c}{c_0}\right)^{-0.095} [-38.89 + 26.02u + (7.15u - 9.78)(K_L M - M_0)] \quad (8)$$

## 2.2 压降模型

过滤总压降包括过滤介质压降  $\Delta p_f$  和通过滤饼层的压降  $\Delta p_c$ , 过滤总压降  $\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_c$ 。

假定布袋阻力仅与过滤速度成正比, 则布袋及原始粉尘层阻力为:

$$\Delta p_f = k_1 u = k_1 \frac{dq_v}{dxl} \quad (9)$$

式中,  $k_1$  为布袋阻力系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$ ;  $q_v$  为过滤总体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $l$  为布袋宽度,  $\text{mm}$ 。

由于粉尘沉积层沿垂直方向分布不均匀, 因此不同垂直位移  $dx$  对应的过滤速度  $du$  和体积流量  $dq_v$  不同, 过滤速度  $du = dq_v / (dxl)$ 。

假设沉积层阻力系数不随时间和厚度变化, 而只与平均过滤速度有关, 则粉尘层压降为:

$$\Delta p_c = k_2 uh = k_2 \frac{dq_v}{dxl} h \quad (10)$$

式中,  $k_2$  为阻力系数, 可以通过实验确定。

文献[10]仅考虑了沉积层对过滤速度的影响, 根据达西定律推导的过滤压降模型为<sup>[10]</sup>:

$$\Delta p_c = \frac{V k_2 A}{l} \int_0^L \exp\left[-\left(\frac{x-x_c}{\sqrt{2}W}\right)^2\right] dx \quad (11)$$

总压降为:

$$\Delta p = k_1 \frac{dq_v}{dxl} + k_2 \frac{dq_v}{dxl} h = (k_1 + k_2 h) \frac{dq_v}{dxl} \quad (12)$$

当  $\Delta p_f$  不能忽略时, 用  $\Delta p$  代替式(10)中的  $\Delta p_c$ , 得到改进的过滤压降公式:

$$\Delta p = \frac{q_v}{l} \int_0^L \left\{ k_1 + k_2 A \exp\left[-\left(\frac{x-x_c}{\sqrt{2}W}\right)^2\right] \right\} dx \quad (13)$$

$x_c$ 、 $W$ 、 $A$  可通过式(6)~式(8)求得。在已知操作条件的情况下, 式(13)可用于预测过滤压降。

## 3 结语

以氧化铝粉末为介质, 在文献[10]基础上, 对粉尘层在布袋过滤面上沉积规律及粉尘层对压降影响进行了进一步研究。笔者采用间接方法, 主要研究了布袋长度对沉积规律的影响, 把布袋长度对沉积规律的影响转化为轴向速度对沉积规律的影响。在实验基础上, 优化了布袋沉积层厚度分布模型, 进一步推导了布袋过滤压降模型。在此基础上, 还需进一步研究氧化铝粉尘层吸附氟化氢的特性, 为用于氧化铝行业烟气净化的布袋除尘器设计提供依据。文中只对一种常规氧化铝粉末进行了研究, 今后需对多种氧化铝粉末及其它微粒进行研究, 并对模型进行适当修正, 使其具有更广泛的应用价值。

## 参考文献:

- [1] GB 9078—1996, 工业炉窑大气污染物排放标准[S].
- [2] Morris K, Allen R W K. The Influence of Dust and Gas Properties on Cake Adhesion in Fabric Filters[J]. Filtration and Separation, 1996, 33(4): 339-343.
- [3] Cheng Y H, Tsai C J. Factors Influencing Pressure Drop Through a Dust Cake During Filtration[J]. Aerosol Science and Technology, 1998, 29(4): 315-328.
- [4] Kaiser S, Weigl K, Spiess-Knafl C, et al. Modeling a Dry-scrubbing Flue Gas Cleaning Process[J]. Chem. Eng. Pro., 2000, 39(4): 425-432.
- [5] Duo W, Kirkby N F, Seville J P K, et al. Patchy Cleaning of Rigid Gas Filters—I. A Probabilistic Model[J]. Chem. Engng. Sci., 1997, 52(1): 141-151.
- [6] Kavouras A, Kramer G. Distributions of Age, Thickness and Gas Velocity in the Cake of Jet Pulsed Filters—Application and Validation of a Generations Filter Model[J]. Chem. Eng. Sci., 2003, 58(1): 223-238.
- [7] Dittler A, Ferer M V, Mathur P, et al. Patchy Cleaning of Rigid Filters—Transient Regeneration Phenomena Comparison of Modelling to Experiment[J]. Powder Technol., 2002, 124(1): 55-66.
- [8] Kanaoka C, Amornkitbamrung M. Effect of Filter Permeability on Therelease of Captured Dust from Arigid Ceramic Filte Surface[J]. Powder Technol., 2001, 118(1): 113-120.
- [9] Klingel R, Loeffler F. Dust Collection and Cleaning Efficiency of a Pulse Jet Fabric Filter[J]. Filtration & Separation, 1983, 20(3): 205-208.
- [10] Wang J Q, Liu G F. Experimental and Modeling Study on Dust Cake Profile and Its Influence on Pressure Drop in Fiber Filter[J]. Journal of Energy and Power Engineering, 2009, 3(3): 5-12.

(张编)