

声波吹灰器清灰机理研究及应用^{*}

陈国金 张云电

(杭州电子工业学院机电学院 杭州 310037)

2001年1月19日收到

摘要 本文对声波吹灰器的清灰机理进行了分析,并对其在袋滤式除尘器上的应用进行了研究。声波吹灰器作为袋滤式除尘器的辅助清灰装置,可以大大降低设备阻力,提高过滤速度,从而降低运行费用,缩小设备体积,提高滤袋使用寿命。因此,是一种既简单又经济的有效措施。

关键词 声波吹灰器,袋滤式除尘器,清灰机理,声频,声压

Cleaning mechanism and application of sonic cleaners

CHEN Guojin ZHANG Yundian

(Hangzhou Institute of Electronic Engineering, Hangzhou 310037)

Abstract This paper analyzes the cleaning mechanism of sonic cleaners and studies their application to bag dedusters. As an auxiliary means of bag deduster, sonic cleaners may greatly lower the resistance, increase the filter velocity, reduce the operating cost, lessen the volume and prolong the service lifetime of the bags. Therefore, applying sonic cleaners is a simple and economical measure.

Key words Sonic cleaner, Bag deduster, Cleaning mechanism, Audio frequency, Acoustic pressure

1 引言

粉尘排放所造成的大气污染,不仅对人体健康有严重的危害,而且对环境生态平衡以及气候产生不利的影响。为了控制粉尘的排放对大气造成的污染,一方面是合理利用能源,改进生产和燃烧设备;另一方面则是安装废气净化装置,对污染源进行治理。安装除尘设备是保证环境质量的基础,也是实行环境规划等项综合防治措施的前提。

袋式除尘器是广泛应用的一种环保设备,具有除尘效率高且稳定可靠等特点。它的清灰方式和清灰能力直接影响除尘器的除尘效率、设备阻力以及运行工况。在袋式除尘器中,特别是反吹风的大型袋式除尘器中,由于清灰能力不足,使滤料上的积灰不断增加,以致其阻力上升很高,甚至会使袋破坏。国家经贸委对此非常重视,把“袋式除尘器高效清灰设备”列为首批国家鼓励发展的环保产业设备(产品)之一。采用声波吹灰器作为袋滤式除尘器的清

^{*} 浙江省高校中青年学科带头人基金资助项目

灰装置是一项既简单又经济的有效措施, 在国外已得到了广泛的应用, 在国内则刚刚起步。为了使声波吹灰器发挥出更好的清灰能力, 本文对它的清灰机理、影响清灰的因素以及使用情况进行了分析研究, 为声波吹灰器在滤袋式除尘器上的实际应用提供依据。

2 工作原理

声波吹灰器的结构如图 1 所示。压缩空气通过进气管进入气室内, 当气室内的气压达到一定程度时, 使膜片产生振动位移, 从而在气室与膜片之间形成环隙, 空气通过环隙顺着喇叭管冲出, 形成连续的声波向外传播。声波吹灰器的原理就是将一定强度的声波, 送入积灰的空间区域, 通过声能量作用, 使空气分子与粉尘颗粒产生振荡, 阻止粉尘粒子在物体表面或粒子之间结合, 使之处于悬浮状态, 以便使烟气或重力将其带走, 从而使袋滤式除尘器中的过滤元件得到再生。声波传播速度快, 它能较均匀地布满整个空间, 全方位清灰, 防止灰尘结垢。

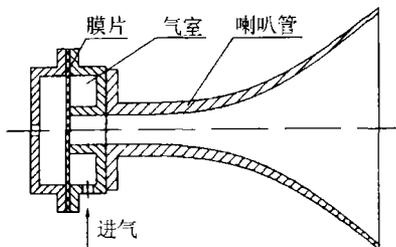


图 1 声波吹灰器的结构示意图

声波吹灰器发出的声波, 使空气中的压力发生变化, 声波清灰的效果取决于滤袋对这种变化的反应。当声波到达滤袋表面时, 由于空气质点的振动, 引起滤袋以声波相同的频率振动。在滤袋特定点上这种诱发的振动大小取决于在该区域内声压的大小及滤料和尘块的机械特性。当声波的频率和声压级合适时, 滤袋上的振动能使其上的积灰剥离而脱落, 从而降低

滤袋的阻力。

3 清灰机理分析

声波清灰效果的好坏与滤料和灰尘的粘着性、滤料的特性、灰尘的质量、声波的频率以及声压有关。对烟气处理量 $60000\text{m}^3/\text{h}$, 采用不锈钢滤网的金属滤袋除尘器, 安装声波吹灰器进行辅助清灰的试验, 结果表明, 声波频率在 $200-250\text{Hz}$ 范围内清灰效果最佳。这是由于在该基频下, 易引起滤料的局部共振所致。同时, 声频愈高, 声压衰减愈大, 清灰范围很小。吹灰器的声压愈高, 清灰效果愈好, 但同时噪声愈大, 压缩空气消耗量也愈大。因此, 在工程上, 有一最佳的声压值。最佳声压值的确定不仅与滤料和灰尘的特性有关, 而且与声波在除尘器内的传播特性有关。除尘器内气尘两相混流, 一般的吹灰器声压较高, 因此, 声波在除尘室内的传播属于粘滞媒质中有限振幅波的传播。为了减少声波吹灰器所产生的噪声对周围环境造成的影响, 防止二次噪声污染, 在除尘器内壁以及进出气口周围附有容重 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 、 50mm 厚的玻璃棉吸声材料, 这样, 可以认为除尘器内壁所产生的反射波以及进出气口对声场的影响不大。为了初步分析声波的各参数对清灰效果的影响, 把除尘器内的声场作为一维行波声场处理以简化分析与计算。在不考虑除尘器内尘粒散射时粘滞媒质中一维非线性波动方程为^[1]:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left[b_1 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + a \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)^2 \right]$$

其中:

$$v = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad b_1 = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{4}{3} \eta' + \eta'' \right)$$

$$a = \frac{\gamma - 1}{2c_0^2}$$

ρ_0 为媒质密度, c_0 为媒质中声速, γ 为理想气体的非线性参量, 对空气 $\gamma = 1.4$, η', η'' 为切变和容变粘滞系数。

应用逐级近似求解法, 可求得满足边界条

件的基波声压 p_1 和二次谐波声压 p_2 为^[1]：

$$p_1 = p_{1A} e^{-\alpha x} \sin \omega \left(t - \frac{x}{c_0} \right)$$

$$p_2 = \frac{(\gamma + 1)p_{1A}^2}{4b\omega} (e^{-2\alpha x} - e^{-4\alpha x}) \sin 2\omega \left(t - \frac{x}{c_0} \right)$$

式中：

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c_0^3} \left[\frac{4}{3}\eta' + \eta'' \right]$$

表 1 基波声压 p_1 和二次谐波声压 p_2 随声频 f 的变化关系
 $x = 2\text{m}$, $p_{1A} = 200\text{N/m}^2$ 即 140dB

$f(\text{Hz})$	200	220	240	260	280	300
$\alpha(1/\text{m})$	8×10^{-7}	9.7×10^{-7}	1.2×10^{-7}	1.4×10^{-7}	1.6×10^{-7}	1.8×10^{-7}
$p_1(\text{N/m}^2)$	200	200	200	200	200	200
$p_2(\text{N/m}^2)$	2.0	2.64	2.88	3.12	3.36	3.60

表 2 基波声压 p_1 和二次谐波声压 p_2 随距离 x 的变化关系
 $f = 220\text{Hz}$, $p_{1A} = 200\text{N/m}^2$ 即 140dB

$x(\text{m})$	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$\alpha(1/\text{m})$	9.7×10^{-7}				
$p_1(\text{N/m}^2)$	200	200	200	200	200
$p_2(\text{N/m}^2)$	1.16	1.75	2.64	2.91	3.49

从理论上来说，对于有限振幅声波，声压随距离的增大而衰减，衰减的快慢程度取决于吸收系数。在声源处，二次谐波声压 p_2 为 0，随着距离的增加有限振幅声波发生畸变，二次谐波成分不断增加，与此同时吸收也逐渐增加，但二次谐波分量随距离增加的效应超过媒质对它的吸收效应，所以 p_2 随距离增加而增加。

从应用试验看，由于 p_2 比 p_1 小二个数量级，而且 p_2 的频率比 p_1 提高一倍，同时，含尘气体和含湿气体媒质比洁净气体媒质的吸收系数要大的多，且存在尘粒引起声波散射现象，因此，声压衰减量比理论计算值要大得多。根据理论分析和实际试验，可以得出：

(1) p_1 比 p_2 大二个数量级，对清灰效果的影响主要是 p_1 值。

(2) 声波的衰减与频率有关。降低 f ，可以减少衰减；对清灰来说，当声频 f 与滤料、灰尘及网架系统的固有频率相近时，易使该系统产生局部共振，提高清灰效果；同时，在除尘

$b = \rho_0 b_1$ ， p_{1A} 为声源处的声压振幅， α 为粘滞媒质中小振幅声波的吸收系数。

根据上述公式，可以计算出在 20°C 干燥空气下，基波声压 p_1 和二次谐波声压 p_2 随声频 f 以及距离 x 的变化结果分别如表 1 和表 2 所示。表中取 $\rho_0 = 1.21(\text{kg/m}^3)$ ， $c_0 = 344\text{m/s}$ ， $\frac{\alpha}{f^2} = 2.0 \times 10^{-11}(\text{s}^2/\text{m})$ ， f 为声频 (Hz)^[1]。

器实际运行时，随着灰尘在滤料上积聚增加，使系统固有频率降低，只有降低声波频率，才能取得较好的清灰效果。

(3) 声波的衰减与距离 x 有关。随着距离 x 的增大，声压减少。但由于所讨论的除尘器内声波吹灰器至滤袋表面的距离较小且变化范围不大，同时，二次谐波声压与基波声压相比小二二个数量级，因此可忽略距离对声波的影响。

为了提高清灰效果，要选择合适的声频和声压作为吹灰器的主要性能参数，同时，要考虑吹灰器在除尘器中的安装位置和数量。根据试验结果，选取声频 200-250Hz，声压 140-150dB 的吹灰器，清灰效果较好。表 3 为商用声波吹灰器的主要性能参数。

4 应用

水泥厂机立窑的烟气除尘系统中新近推出了一种金属滤袋除尘设备。与布袋除尘器相

表 3 声波吹灰器的主要性能参数

频率 (Hz)	声压 (dB)	气压 (MPa)	耗气量 (m ³ /h)	使用温度 (°C)
220	143-145	0.4-0.5	72-144	500

比, 具有除尘效率高、设备阻力小、耐高温、适用范围广、抗结露性能好、体积小、造价低、粉尘可以回收、工作稳定可靠等特点, 因此, 是一种前景广阔的新型环保设备。为了缩小设备体积, 提高过滤速度, 又必须加强清灰效果。声波吹灰器有效作用大, 清灰不留死区死角, 声能量能对各角落、边缘、缝隙等产生作用, 有效地阻止灰尘颗粒的沉积, 可以良好地辅助清灰 [2]。

金属滤袋除尘器采用扁袋结构形式, 声波清灰方式和机械振打清灰方式相结合, 其结构示意图如图 2 所示。声波吹灰器的布置、数量及选型应考虑如下几点原则。

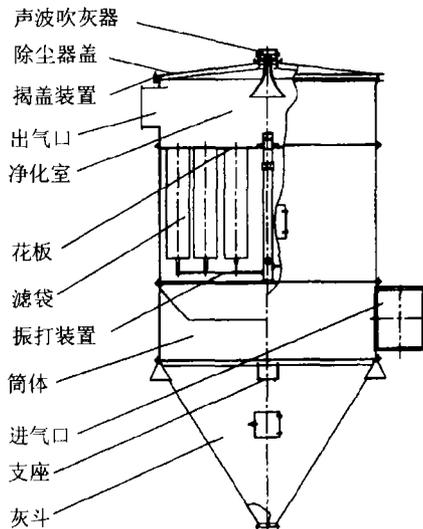


图 2 金属滤袋除尘器结构示意图

(1) 声波在粉尘气体中衰减大, 因此, 声波吹灰器宜安装在除尘器的净化室内。

(2) 滤袋上部清灰效果好, 底部清灰效果略差, 因此, 在滤袋底部辅以机械振打清灰方

式。

(3) 声频范围内的声波吹灰器的有效射程范围通常为: 直径和长度各为 5-6m 的圆柱体空间。对射程要求大的除尘器可选用次声波吹灰器。

(4) 一般一个吹灰器可覆盖的滤袋面积为 200-400m², 对粘性较大的粉尘和声压较小的吹灰器, 可适当增加吹灰器数量。

声波吹灰器清灰的效果与声波的频率、声压以及除尘器滤袋、灰尘、网架系统的参数有关。图 3 表示水泥厂机立窑除尘器中声波吹灰

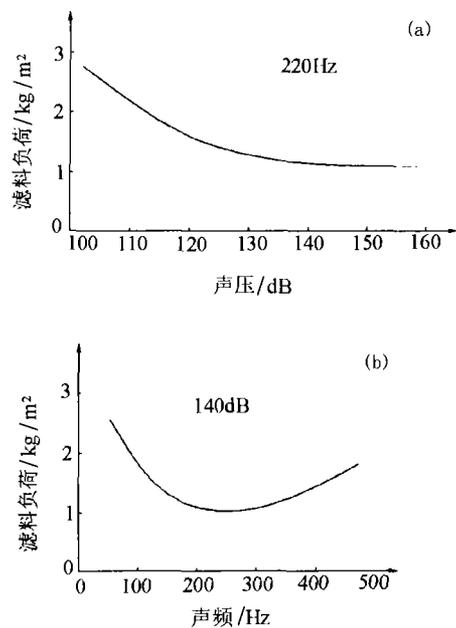


图 3 声波频率及声压对滤料负荷的影响
(a) 声压的影响 (b) 频率的影响

器的声波频率及声压和滤料负荷的关系。提高进气压力, 就可改变声波吹灰器的声压值。调整声波吹灰器的膜片以及改变气压控制单元的脉动频率就可改变声波的频率。当声波频率为 220Hz 时, 随着声压的增加, 滤料负荷逐渐降低, 即清灰效果逐渐增加。当声压大于 140dB 时, 清灰效果增加不太明显, 而耗气量会随之增加。因此, 声波吹灰器的声压在 140-150dB 之间较为合适。当声压为 140dB 时, 开始随声

波频率的增加, 滤料负荷逐渐下降, 即清灰效果逐渐增加。当声波频率达到 220Hz 左右时, 清灰效果最好。再继续增加声波频率, 清灰效果变差。因此, 选择声波频率在 200-250Hz 范围内较为理想。

图 4 表示袋滤式除尘器上采用声波吹灰器进行试验所得的滤袋压力差。从图中可看出, 采用声波吹灰器作为辅助清灰装置, 可以使袋滤式除尘器的滤袋压力差下降达 40%, 而且当声波频率在 200-250Hz 时, 清灰效果最佳。图 4 中的滤袋压力差的周期性变化是由于周期性清灰而造成的。

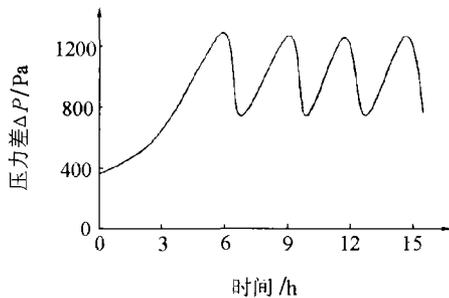


图 4 袋滤式除尘器压力差与时间的关系

某水泥厂 10 万吨 / 年机立窑烟气治理中采用的金属滤袋除尘器, 安装了 IKT230/220 声波吹灰器, 实测结果如表 4 所示。

声波吹灰器作为除尘器的清灰装置, 国外应用较多。但从国外的资料及应用情况报道看, 声波吹灰器在工作过程中采用单一的声压

表 4 除尘器中烟气测试数据

烟气温度 (°C)	水蒸汽百分体积 (%)	烟气流量 (m ³ /h)	设备阻力 (Pa)	
			安装前	安装后
114	9.1	61692	2200	1300

和声频值。根据我们的应用试验及使用情况, 对声波吹灰器的气压控制单元进行了改进。在声波吹灰器的一个工作周期中, 声频由 200Hz 连续变化到 250Hz, 这是因为刚开始吹灰时, 灰尘在滤料上积聚很多, 滤料、灰尘、网架系统质量大, 固有频率低, 用较低声频, 清灰效果好。随着灰尘的清除, 系统的固有频率逐渐提高, 因此, 声频也跟着提高。

综上所述, 声波吹灰器作为袋滤式除尘器的辅助清灰装置, 可以大大降低除尘设备的阻力, 从而可以减少设备的运行能耗, 提高过滤速度, 缩小设备体积, 同时可以提高除尘设备滤袋的使用寿命。

参 考 文 献

- 1 杜功焕等. 声学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1986. 224-246.
- 2 陈国金. 环境工程, 1997, 15(5): 32-37.
- 2 Rokhlin S I, Wang W. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992, 91: 3302.
- 3 许明翔, 毛耀俊. 应用声学, 1996, 15(1): 1.
- 4 Migliori A, Sarrao J L, Visscher W M, et al. *Physica B*, 1993, 183: 1.
- 5 刘胜兴, 王铁海, 王耀俊. 应用声学, 2000, 19(1): 4.
- 6 Thompson W. *J. Appl. Phys.*, 1950, 21: 89.
- 7 王耀俊. 南京大学学报 (自然科学版), 1993, 29: 49.
- 8 周宇峰, 王耀俊. 应用声学, 1999, 18(6): 10.

(上接第 23 页)

的。这时可行的方法是将超声透射频谱技术与声速测量技术^[3]相结合, 因为各向异性板有些弹性常数用声速测量方法是很容易确定的; 另外, 各向异性金属板弹性常数新的反演方法也有待研究^[8]。

参 考 文 献

- 1 Rose J L. *Ultrasonic Waves in Solid Media* (Cambridge University Press, 1999.)