

吴岩 郝文阁 杜立宇. 2011. 分室脉冲引射袋式除尘器的清灰机理[J]. 环境科学学报, 31(6): 1187-1191

Wu Y , Hao W G , Du L Y. 2011. Dust-cleaning mechanism of a chamber-type jet injection bag filter[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(6): 1187-1191

分室脉冲引射袋式除尘器的清灰机理

吴岩^{1,*} 郝文阁² 杜立宇¹

1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866

2. 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110004

收稿日期: 2010-08-31

修回日期: 2010-09-26

录用日期: 2010-09-29

摘要: 分室脉冲引射除尘是一种新的除尘方式, 它具有在线清灰、结构简单、运行可靠的优点. 为了揭示分室脉冲引射袋式除尘器的清灰机理, 首先运用可压缩气体绝热流动能量方程推导出喷口的流速和流量, 继而根据自由射流理论推导出不同射流断面的平均动能计算公式, 最终根据反吹风速与平均动能的关系, 得到了反吹风速的计算方法. 同时, 根据实验模型的测定数据, 总结出粉尘清灰力与清灰效率之间的关系式为: $\Phi = 0.79 - \exp[-B(F - C)^A]$. 根据上述结果可以确定在粉尘负荷一定的条件下, 要达到预定的清灰效率所必需的反吹风速和喷口直径. 研究成果可为清灰系统的设计提供理论基础.

关键词: 分室脉冲引射袋式除尘器; 脉冲引射清灰; 清灰效率; 清灰力; 反向风速

文章编号: 0253-2468(2011)06-1187-05

中图分类号: X701.2

文献标识码: A

Dust-cleaning mechanism of a chamber-type jet injection bag filter

WU Yan^{1,*}, HAO Wenge², DU Liyu¹

1. College of Soil and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866

2. College of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004

Received 31 August 2010;

received in revised form 26 September 2010;

accepted 29 September 2010

Abstract: Chamber type jet injection is a new type of dust-cleaning, which has many advantages including an on-line cleaning system, simple structure and reliable performance. In order to demonstrate the mechanism of dust-cleaning, the coercible gas heat insulating energy equation was firstly used to deduce the velocity and air mass and then according to free-jet stream theory, the amount of air and average energy of the injecting profile were deduced. Thus the reversal air velocity was obtained. A bag filter model was suggested according to the theoretical investigation. And the relationship between detachment stress and dust-cleaning efficiency was obtained based on experiments. Accordingly, the reverse air velocity and the diameter required for the predetermined dust-cleaning efficiency could be calculated under a certain dust load. The investigation results provided a reference for the design of dust-cleaning systems.

Keywords: chamber type jet injection bag filter; pulse-jet injection dust-cleaning; dust-cleaning efficiency; detachment stress; reverse air velocity

1 引言(Introduction)

分室脉冲引射袋式除尘器是一种新型高效的除尘器, 具有在线清灰、结构简单、运行可靠的优点. 与气箱式脉冲袋式除尘器相比, 分室引射清灰在清灰的同时除尘器仍可处于工作状态, 省去了各室的气流切换阀及其执行机构, 进一步简化了除尘器结构, 降低了维护管理的工作量和成本. 另外, 脉冲引射清灰的机理是脉冲射流引射其它分室出风箱中的干净气体, 形成 2.5 ~ 5.0 倍的脉冲流量掺

入射流, 这样增大了反向气流对粉尘层形成的清灰力, 提高了清灰效果. 目前, 国内外学者主要对滤袋表面粉尘层的形成过程(Ju *et al.*, 2001) 和内部结构(Schmidt, 1995) 等进行了研究, 而对分室脉冲引射袋式除尘的理论和实验研究还极少(Calle *et al.*, 2002; Kanaoka *et al.*, 2010), 尤其是针对清灰效率及清灰参数设计方面的研究还鲜有报道. 因此, 本研究对分室脉冲引射袋式除尘器的清灰机理进行理论分析和实验研究, 探讨喷吹流速与流量、射流流量与平均动能、反吹风速等参数之间的关系, 得到

基金项目: 国家高新技术研究发展计划项目(No. 2002AA642010)

Supported by the High-tech Research and Development Program of China(No. 2002AA642010)

作者简介: 吴岩(1983—), 女, 助理实验师; * 通讯作者(责任作者), E-mail: wyfish@163.com

Biography: WU Yan(1983—), female, assistant laboratory engineer; * Corresponding author, E-mail: wyfish@163.com

反吹风速的理论计算方法. 同时, 通过实验研究不同粉尘负荷、喷吹压力、喷口直径下的清灰效果, 得到清灰力和清灰效率之间的关系. 旨在为清灰系统的设计与计算提供必要的理论基础.

2 分室脉冲引射袋式除尘器清灰系统和工作原理 (Working principle of chamber type jet injection bag filter)

图1为分室脉冲引射袋式除尘器原理图. 被处理烟气由进风气箱进入袋室, 经滤袋过滤后, 净化后的气体经分室气箱、引射口和引射室进入出风气箱排出. 随着时间的延长, 积附在滤袋上的粉尘越来越多, 增加了滤袋的阻力. 当过滤阻力过高(超过1200~1500 Pa)时, 就需要进行清灰. 清灰时一个分室的电磁脉冲阀启动, 由喷嘴喷出高压气体, 出风气箱中净化后的气体被引射, 与脉冲射流气体一起由引射口进入分室气箱, 在分室气箱中气体膨胀进入各滤袋, 在滤袋内造成反向气流和抖动, 使滤袋外表面的粉尘层脱落, 实现清灰的目的. 脱落的粉尘落入灰斗, 由排灰机排出, 完成一次过滤和清灰过程(郝吉明等, 2002; Simon *et al.*, 2007; Schidermans *et al.*, 2004).

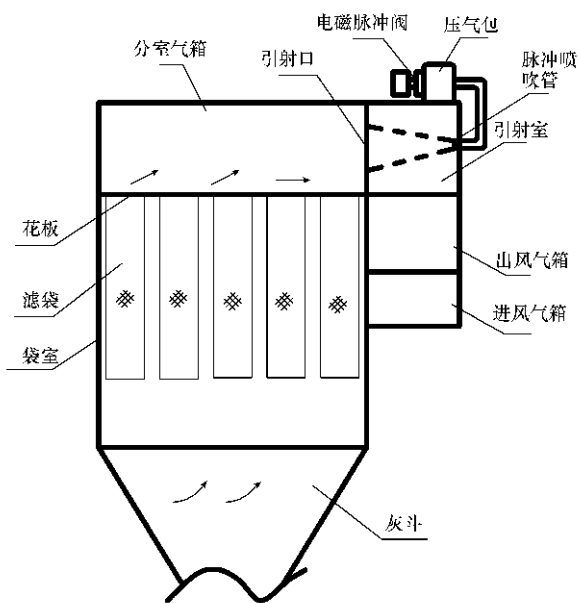


图1 分室脉冲引射袋式除尘器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of chamber type jet injection bag filter

3 分室脉冲引射袋式除尘器清灰的理论研究 (Theoretical study of dust-cleaning for chamber type jet injection bag filter)

分室脉冲引射袋式除尘器的清灰主要依靠脉

冲引射气流. 引射流量的多少与喷口的流速有关, 因此, 首先要研究高压喷嘴喷出气体的质量流量和流速, 继而研究引射断面的流量和平均动能, 最后根据反吹风速与射流断面质量流量、动能之间的关系, 研究反吹风速的计算方法及满足一定的反吹风速需要的引射口直径、喷射距离等参数.

3.1 喷口流速和流量

喷口气流速度 v_0 与当地声速的比值称为马赫数 (Ma). 本文估算得到喷口处的马赫数大于1, 属于超声速流动. 要获得超声速流动, 就必须使亚声速气流在渐缩管道内加速, 当气流达到声速时改用渐扩喷管, 使气流继续加速到超声速流动. 这种先收缩后扩大的几何管道称为拉瓦尔喷管(图2), 气流沿喷管长度方向(x 轴)上的流动始终是加速、膨胀、降压的, 即在收缩段为亚声速, 至喉部断面(即 e 断面)达临界状态, 然后在扩散段继续加速到出口断面(即 s 断面)的设计超声速数值(李诗久, 1980).

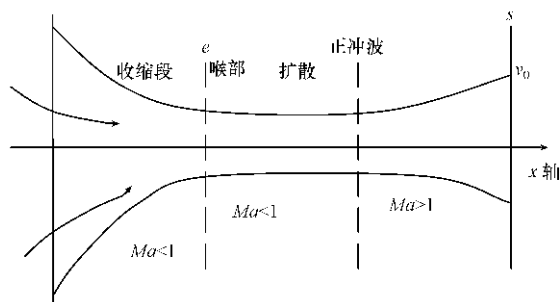


图2 拉瓦尔喷管示意图

Fig. 2 Sketch of contracting-expanding nozzle

喉部断面与滞止断面(流动中速度为零的断面)的绝热能量方程为:

$$\frac{k}{k-1} \frac{p_e}{\rho_e} + \frac{v_e^2}{2} = \frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho} \quad (1)$$

式中 k 为绝热指数(对于空气 $k=1.4$); p_e 为喉部压力(MPa); ρ_e 为喉部气体的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); v_e 为喉部气体流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); p 为工作压力(MPa); ρ 为气包中气体的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), $\rho = p/RT$, 其中 R 为摩尔气体常数, 取值为 $8.3145 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为工作温度(K).

由于喷管较短, 流速较大, 气流来不及与外界进行热交换, 因此, 受摩擦影响很小, 可视为等熵流动. 将等熵方程 $\rho_e = (p_e/p)^{1/k} \rho$ 代入能量方程(1)中, 再依据 $M_e = A_e v_e \rho_e$ 可得出喉部质量流量为:

$$M_e = A_e \sqrt{\frac{2k}{k-1} p \rho \left[\left(\frac{p_e}{p} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_e}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (2)$$

式中 M_e 为喉部质量流量 ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$); A_e 为喉部面积 (m^2).

喉部马赫数为 1 时, 气流速度为声速, 且此断面流量最大. 此时最大流量对应的压强比 (即临界压强比) 的计算式为 $\frac{p_e}{p} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}$, 将压强比的计算式代入式 (2) 可得式 (3).

$$M_e = A_e \sqrt{\frac{k-1}{2} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{2k}{k-1} \rho p} \quad (3)$$

喷口面积和喉部面积的关系式为:

$$\frac{A_0}{A_e} = \frac{\sqrt{\frac{k-1}{2} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}}{\left(\frac{p_0}{p_e}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_0}{p_e}\right)^{\frac{k-1}{k}}}} \quad (4)$$

式中 p_0 为喷口处压力 (MPa); A_0 为喷口面积 (m^2), $A_0 = 0.25\pi d_0^2$.

给定喉部的直径 d_e , 根据 $A_e = 0.25\pi d_e^2$, 可以求出喉部的面积 A_e , 代入式 (4) 即得到喷口的面积 A_0 . 将 A_e 的值代入式 (3) 即得到喉部质量流量 M_e . 由于喷口处和喉部质量流量相同, 因此, 可求出喷口处流速为:

$$v_0 = \frac{M_0}{A_0 \rho_0} = \frac{M_e}{A_0 \rho_0} \quad (5)$$

式中 M_0 为喷口处质量流量 ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$); ρ_0 为喷口处空气的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); v_0 为喷口流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

3.2 射流断面的气体流量和平均动能

清灰时喷吹气流在袋内形成反吹气流, 并需达到一定的反吹风速. 依据质量守恒定律, 射流断面的气体流量与清灰时通过滤袋的气体流量相等, 即

$$Q = n\pi\phi lu \quad (6)$$

式中 Q 为射流断面气体流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); n 为滤袋个数; ϕ 为滤袋直径 (m); l 为滤袋长度 (m); u 为反吹风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

满足清灰所需流量的同时, 射流断面的平均动能也要达到清灰所需要的动能. 由于脉冲引射是在线清灰方式, 因此, 射流断面的动能要克服清灰和过滤两部分能量, 公式如下:

$$E = c_2 mu + c_2 m\omega \quad (7)$$

式中 E 为射流断面平均动能 (Pa); c_2 为粉尘层的阻力系数 (s^{-1}); m 为粉尘负荷 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); ω 为过滤风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

由式 (6)、(7) 可知, 理论计算出射流断面的流量和平均动能, 就可以得到反吹风速的计算式. 应

用自由射流理论的边界条件和流速特征 (赵承庆, 姜毅, 1998) 进行推导计算, 可以得到射流断面流量 Q :

$$Q = n\pi\phi lu = 4.4 \left(\frac{as}{d_0} + 0.147\right) Q_0 \quad (8)$$

式中 a 为紊流系数, 取值为 0.076 (郑洽馥等, 1980); s 为喷口到射流断面的距离 (m); d_0 为喷口直径 (m); Q_0 为喷口的流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), $Q_0 = \frac{1}{4}\xi\pi d_0^2 v_0$, 其中 ξ 为喷口断面的流量系数.

根据自由射流理论进一步推导, 可得到射流断面平均动能为:

$$E = \frac{0.043\rho R^2 v_0^3}{n\phi lu} \cdot \frac{0.48^3}{\left(\frac{as}{d_0} + 0.147\right)} = c_2 mu + c_2 m\omega \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 射流断面的平均动能 E 不仅与喷口直径、喷口流速、射流断面直径有关, 还与反吹风速和过滤风速有关.

3.3 反吹风速

由自由射流理论的边界条件和流速特征推导可得引射口直径 D (m) 为:

$$D = d_0 + 6.8as \quad (10)$$

由式 (8)、(9)、(10) 整理可得

$$d_0 = \sqrt[4]{\frac{(c_2 mu + c_2 m\omega) (\xi n\phi lu)^2}{0.0606 v_0^4 \rho}} \quad (11)$$

上式是喷口直径的计算公式, 在喷口直径已知的条件下, 可以根据上式计算出反吹风速.

4 实验研究 (Experimental study)

4.1 实验系统

实验装置为有机玻璃壳体, 具体如图 3 所示. 滤袋直径为 130 mm, 长度为 800 mm, 滤料为玻纤针刺毡. 配 DMF-2-25 电磁脉冲阀 1 个, 空压机 1 台. 模型袋室尺寸为 300 mm × 300 mm × 960 mm (长 × 宽 × 高), 进、出风口直径为 40 mm. 实验系统配备低流量高压头多段风机和空压机各 1 台. 建立该模型的主要目的在于用其测定净袋阻力、滤袋阻力与滤袋上的粉尘负荷间的关系. 引射箱体的尺寸由理论计算而定, 为 300 mm × 300 mm × 300 mm (长 × 宽 × 高), 并且在引射箱体与分室箱体之间开引射口. 模型的下部灰斗做成可以拆卸的结构, 以便能够放出沉降及清灰后粉尘. 实验用两台倾斜微压计分别测定滤袋两侧阻力和过滤风速.

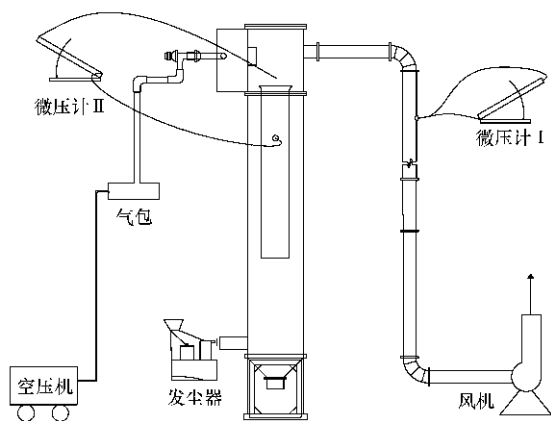


图3 实验装置图

Fig. 3 Experimental facility diagram

在线清灰的引射袋式除尘器所引射的空气为来自其它分室过滤后出风气箱中的干净气体. 在实验模型中由于只有 1 个分室, 因此在引射箱体侧面开口来模拟其它室的过滤后风量, 补给引射气体. 引射气体量为射流断面气体流量 Q 和喷口流量 Q_0 之差, 因此, 引射口直径可按下式计算:

$$d' = \sqrt{\frac{4n\phi lu - \xi d_0^2 v_0}{v'}} \quad (12)$$

式中, d' 为引射口直径 (m); v' 为侧面开口流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). 由于引射的动能与过滤所需动能相等, 因此, $\frac{1}{2} \rho v'^2 \xi = c_2 m \omega$, 其中, ξ 为侧面开口阻力系数, 取值为 2.8.

4.2 清灰实验研究

实验测试了不同粉尘负荷、不同喷吹压力、不同喷口直径下的的清灰前后阻力. 粉尘负荷为:

$$m = (p_1 - p_2) / c_2 \omega \quad (13)$$

式中, m 为粉尘负荷 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); p_1 为喷吹前阻力 (Pa); p_2 为喷吹后阻力 (Pa); c_2 为常数, 取值为 33267 s^{-1} .

粉尘的清灰力 (F) 计算方法如式 (14) 所示, 其中 μ 由理论计算得出 (吴岩等 2008).

$$F = c_2 \mu u \quad (14)$$

粉尘的清灰效率 (Φ) 计算方法为:

$$\Phi = [(p_1 - p_2) / p_1] \times 100\% \quad (15)$$

经过对所有实验数据的分析整理, 并对粉尘清灰力与清灰效率之间进行回归性分析, 可以得到二者的关系如图 4 所示, 可用方程 (16) 描述.

$$\Phi = 0.79 - \exp[-B(F - C)^\lambda] \quad (16)$$

式中, B 、 λ 、 C 为常数, 它们与粉尘的粒径分布、中位

径、粒子形状系数、含湿量和粉尘的黏性等因素有关. 对如飞灰粉尘, $B = 1.8 \times 10^{-4}$, $\lambda = 1.28$, $C = 500 \text{ Pa}$.

如果粉尘负荷一定, 要达到预期的清灰效率, 可以从图 4 中查出对应的清灰力, 根据式 (14) 可求得反向风速, 由式 (10)、(11) 可求得喷口的直径、喷射距离和引射口直径.

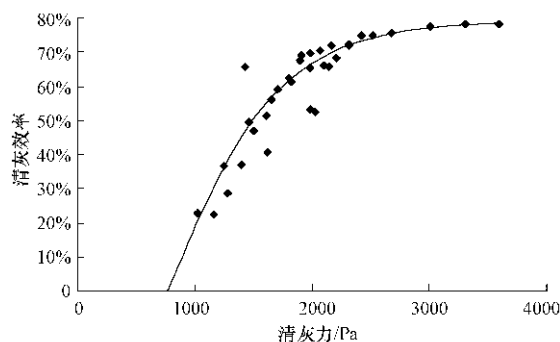


图4 粉尘清灰力与清灰效率的关系

Fig. 4 Relation between detachment stress and dust-cleaning efficiency

5 结论 (Conclusions)

1) 分室脉冲引射袋式除尘器在已知喷口流速和直径的条件下, 可以通过理论计算得出反吹风速.

2) 实验测试了不同粉尘负荷、不同喷吹压力、不同喷口直径下的粉尘清灰效率, 通过对实验数据整理分析, 发现清灰力和清灰效率之间存在较好的相关性, 相关性系数为 0.82. 二者之间的拟合关系式为: $\Phi = 0.79 - \exp[-B(F - C)^\lambda]$.

3) 根据对分室脉冲引射清灰机理的理论和实验研究, 发现粉尘负荷一定时, 运用清灰效率和清灰力之间的关系, 可以确定预期清灰效率下的反吹风速, 从而计算出所需喷口直径、喷射距离和引射口直径, 这为清灰系统的设计奠定了必要的基础.

责任作者简介: 吴岩 (1983—), 女, 助理实验师. 主要从事环境工程及环境科学专业本科实验室管理工作. E-mail: wyfish@163.com.

参考文献 (References):

- Calle S, Cotal P, Tomas D, et al. 2002. Description of the clogging and cleaning cycles of the filter media [J]. Power Technology, 123: 40-52
- 郝吉明, 马广大. 2002. 大气污染控制工程 [M]. 北京: 高等教育出版社. 213-224

- Hao J M , Ma G D. 2002. Air Pollution Control Engineering [M]. Beijing: Higher Education Press. 213-224(in Chinese)
- Ju J , Chiu M S , Tien C. 2001. Further work on pulse-jet fabric filtration modeling [J]. Power Technology , 118: 79-89
- Kanaoka C , Amornkitbamrung M. 2001. Effect of filter permeability on the release of captured dust from a rigid ceramic filter surface [J]. Power Technology , 118: 113-120
- 李诗久. 1980. 工程流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社. 188-196
- Li S J. 1980. Engineering Fluid Mechanics [M]. Beijing: China Machine Press. 188-196(in Chinese)
- Schmidt E. 1995. Experimental investigations into the compression of dust cakes deposited on filter media [J]. Filtration & Separation , (9) : 789-793
- Simon X , Chazelet S , Thomas D. 2007. Experimental study of pulse-jet cleaning of bag filters supported by rigid rings [J]. Power Technology , 172: 67-81
- Schildermans , Baeyens J , Smolders K. 2004. Pulse jet cleaning of rigid filters: a literature review and introduction to process modeling [J]. Filtration & Separation , 41 (5) : 26-33
- 吴岩 , 郝文阁 , 裴莹莹 , 等. 2008. 气箱式脉冲喷吹袋式除尘器清灰系统主要技术参数的确定[J]. 环境科学学报 28(8) : 1593-1598
- Wu Y , Hao W G , Pei Y Y , *et al.* 2008. Establishment of technical parameters for the dust-cleaning system of the air chamber type pulse-jet bag filter [J]. Acta Scientiae Circumstantine , 28(8) : 1593-1598 (in Chinese)
- 赵承庆 , 姜毅. 1998. 气体射流动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社. 72
- Zhao C Y. , Jiang Y. 1998. Gas Jet Dynamics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press. 72(in Chinese)
- 郑洽馥 , 鲁钟琪. 1980. 流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社. 290-292
- Zheng Q Y , Lu Z Q. 1980. Fluid Mechanics [M]. Beijing: China Machine Press. 290-292(in Chinese)