

高温陶瓷过滤器反向脉冲过程过滤管瞬态流场分析

邱继峰, 徐廷相, 章利特, 惠 晶

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 建立了高压陶瓷过滤器反向脉冲清洗的数学模型, 得到了反向脉冲清洗的一维非稳态的压力分布解析解, 进而得到了反向脉冲过程中的管内动态压力分布曲线, 证实了负压区的存在. 分析了反吹过程的正压峰值和负压峰值与渗透率、脉冲宽度和喷吹压力之间的关系. 分析指出, 负压区的存在不仅与反向脉冲系统的结构有关, 而且和多孔介质本身的性质有关, 这对于优化脉冲清洗系统设计具有一定的意义. 结果表明, 在保证脉冲反吹效果的前提下, 应该选择较小的喷吹压力和脉冲宽度.

关键词: 高温陶瓷过滤器; 反向脉冲清洗; 负压区

中图分类号: TK121 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2004)01-0015-04

Transient Flow Model Solution of Reverse Jet Pulse Cleaning System in High Temperature Ceramic Filter

Qiu Jifeng, Xu Tingxiang, Zhang Lite, Hui Jing

(School of Energy and Power Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: A mathematic model of reverse jet pulse cleaning system was established. An analytic solution of pressure distribution of one dimension unsteady state was obtained by using the methods of separating-variables and Bessel function. On the base of this solution, the dynamic pressure distribution curves were computed for the reverse jet cleaning in the ceramic element, and the existence of negative pressure zone was confirmed. The dependence of the peak value both of the positive pressure and of the negative pressure on the permeability, impulse duration, and impulse pressure was analyzed. Further more, it comes to the conclusion that the existence of negative pressure zone is related to not only the structure of reverse jet pulse cleaning system but also the property of the porous media itself. This conclusion is useful for the optimization design of reverse jet pulse cleaning system.

Keywords: ceramic filter; reverse jet pulse cleaning; negative pressure zone

当陶瓷过滤管用于高温煤气净化时, 高温煤气中的部分尘粒逐渐堆积在过滤管的外表面上而形成灰饼, 随着灰饼厚度的增加, 灰饼上的压降增大. 因此, 需要用反向脉冲喷射冷态气体的办法, 将灰饼周期性地从陶瓷过滤管的表面消除, 实现陶瓷过滤管的在线再生. 这样, 才能保证陶瓷过滤管继续有效地过滤高温煤气, 消除尘粒^[1].

国内外学者对陶瓷过滤器反向脉冲过程进行了大量的研究, 但主要集中于实验研究. 本文通过建立

数学模型并求解, 得到脉冲反吹过程的一维瞬态流场分布的解析解, 这对于深入研究脉冲反吹过程和开发新型脉冲反吹装置具有一定的指导意义.

高温煤气及反向脉冲气体在过滤元件和灰饼内的流动, 属于多孔介质内流动. 气体流量与多孔介质之间的关系由下式表示, 它首先是由 Darcy 提出来的, 即

$$Q = \frac{kA}{\mu} \frac{dp}{dl} \quad (1)$$

收稿日期: 2003-05-07. 作者简介: 邱继峰(1977~), 男, 博士生; 徐廷相(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家“八六三”计划资助项目(2001AA333040); 国家自然科学基金资助项目(59776025).

式中: Q 为气体流量 (m^3/s); k 为多孔介质的渗透率; A 为流体的粘性系数; dp/dl 为流体沿流动方向上的压力梯度.

1 建立模型

为了建立一维的陶瓷管反向脉冲非定常流动模型, 首先假定在反吹过程中气流是成辐射状流动的, 因而适于采用圆柱坐标. 还假定:

- (1) 陶瓷过滤元件为刚性, 不发生弹性变形;
- (2) 认为陶瓷管是各向同性, 因而流动是径向的;
- (3) 不考虑高度及重力的影响;
- (4) 流体是粘性系数为常数的不可压缩流体.

如图 1 所示, 假设在某一时间 t , 距陶瓷管中心距离 r 处的压力为 p , 通过单位厚度周长 ($2r$) 的流量为 Q_r , 该流量经过厚度为 dr 的微分单元体, 获得的增量为 $\frac{\partial Q_r}{\partial r} dr$.

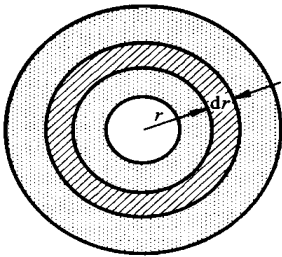


图 1 陶瓷管一维非定常流动模型

根据 Darcy 流量公式有

$$Q_r = 2r \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (2)$$

则

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_r}{\partial r} dr &= 2 \frac{k}{\mu} \left[\frac{\partial(r \frac{\partial p}{\partial r})}{\partial r} \right] dr \\ &= 2 \frac{k}{\mu} \left[r \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial p}{\partial r} \right] dr \end{aligned} \quad (3)$$

那么在 dt 时间内由此获得的流量总增量为

$$\begin{aligned} dQ_1 &= \frac{\partial Q_r}{\partial r} dr dt = \\ &2 \frac{k}{\mu} \left[r \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial p}{\partial r} \right] dr dt \end{aligned} \quad (4)$$

在非定常的情况下, 由于气体不断流出, 势必带来流量的变化, 在如图 1 所示的微分体中, 这种增量为

$$dQ_2 = (2r dr) \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) dt =$$

$$2r \frac{\partial p}{\partial r} dr dt \quad (5)$$

根据流量平衡原理, 即

$$dQ_1 = dQ_2$$

则

$$\begin{aligned} 2 \frac{k}{\mu} \left[r \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial p}{\partial r} \right] dt dr = \\ 2r \frac{\partial p}{\partial t} dr dt \end{aligned} \quad (6)$$

整理得

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \left[\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right] \quad (7)$$

式中: $\mu = \frac{k}{\mu}$.

以上就是陶瓷管的一维非定常反向脉冲流动模型的偏微分方程式, 在一定的定解条件下, 就可以得到反向脉冲流动的解析解.

对于本文中的反向脉冲定解问题, 可以归结为如图 2 所示的边界条件和初始条件:

边界条件

$$r = r_0, \quad p = f(t) \quad (8)$$

$$r = r_w, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

初始条件

$$\begin{aligned} t = 0 \\ p = p_0 \\ f(t) = \begin{cases} f = p_d & t \leq t_0 \\ f = p_0 & t > t_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

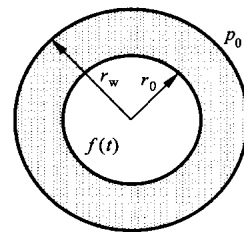


图 2 边界条件和初始条件

初始条件 $f(t)$ 描述的就是一个宽度为 t_0 、峰值为 p_d 的方波, 如图 3 所示.

2 求解方程

求解方程 (7), 在定解条件式 (8)、式 (9) 以及式 (10) 下的解用到了分离变量法、贝塞尔函数以及迪尤阿梅尔定理^[2,3].

如果令

$$\frac{r_0}{r_w} = x_0, \quad \frac{r}{r_w} = x, \quad \frac{t}{r_w^2} = \quad (11)$$

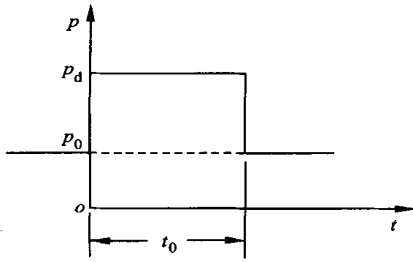


图 3 脉冲反吹方波

则方程(7)变为

$$\perp \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (12)$$

最后,得到了如下便于实际计算的形式

$$p(x, t) = p_d + S_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\lambda_n x_0) J_1(\lambda_n) h(\lambda_n x) e^{-\lambda_n^2 t}}{J_0^2(\lambda_n x_0) - J_1^2(\lambda_n)} \quad (13)$$

$$p(x, t) = p_0 + S_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\lambda_n x_0) J_1(\lambda_n) h(\lambda_n x) e^{-\lambda_n^2 t}}{J_0^2(\lambda_n x_0) - J_1^2(\lambda_n)} \cdot (1 - e^{-\lambda_n^2 t_0}) \quad t > t_0 \quad (14)$$

式中: $S_0 = p_d - p_0$; λ_n 是方程

$$h(\lambda_n x) = J_0(\lambda_n x) Y_1(\lambda_n) - J_1(\lambda_n) Y_0(\lambda_n x) = 0 \quad (15)$$

的根。

由于贝塞尔函数收敛较快,因而就实际需要而言,只要取式(13)及式(14)中级数的前 4 项,也就是相应于从 λ_1 计算到 λ_4 ,便可满足计算精度的要求。

求出在给定内外径比的 λ_1 到 λ_4 后,代入式(13)以及式(14),就可以计算出在不同半径处压力随时间的分布,从而得到过滤管内动态压力 p_t 的分布。

在本文中,内径 $r_0 = 0.02 \text{ m}$, 外径 $r_w = 0.03 \text{ m}$, 对应的 λ_1 到 λ_4 为

$$\lambda_1 = 4.334; \lambda_2 = 14.097; \lambda_3 = 23.560; \lambda_4 = 32.98$$

3 过滤管内的动态压力分析

3.1 渗透率对过滤管内压力波形的影响

对于不同的渗透率,过滤管内的动态压力波形的变化是很明显的,图 4 表示的是在不同渗透率下过滤管内的动态压力波形。

由图 4 可以看到,在较大的渗透率下,过滤管内的动态压力波形存在着 2 个波峰。第一个波峰为正

压段,由于在反吹开始就在内壁建立了喷吹压力,所以不存在上升阶段。在脉冲时间内,基本保持了一个比较高的压力差,喷吹气体主要依靠这一段的作用来清除过滤管外壁上的粉尘层。在喷吹结束后,由于过滤管的渗透率比较高,过滤管内的压力回落到初始压力,这时动态压力迅速下降,并形成一个负的波峰,这段时间比较长,对反吹的效果亦有着比较大的影响。

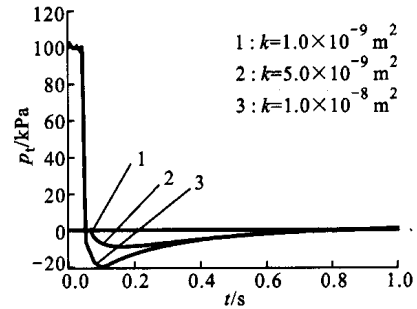


图 4 不同渗透率下过滤管内的动态波形

计算表明,负压段的形成不仅与反吹系统的结构有关,而且与多孔介质本身的因素有一定的关系。在脉冲结束后,过滤管内的压力恢复到初始压力,但是在较大的渗透率下,气体会由于惯性继续向过滤管外流动,造成外壁的压力继续增大,故而出现负压段。而且从图 4 也可以看出,随着渗透率的增大,负压段的波峰也在增大。

在反吹快要终止和过滤开始的这一段过渡过程中,正是因为过滤管内压力场和过滤管外压力场的不平衡,导致已被吹离过滤管表面的细粉尘由于惯性小而重新沉降到过滤管壁上,甚至穿嵌在过滤管壁内,堵塞过滤管,这很可能就是影响陶瓷过滤器不能长周期稳定运行的重要原因^[4]。

3.2 喷吹压力对过滤管内压力波形的影响

喷吹压力是指本文中的脉冲压力 p_d 。

图 5 表示的就是喷吹压力分别为 0.20、0.25、0.30 MPa 时过滤管内的动态压力波形。文献[5]通过实验测出的不同喷吹压力下过滤管内的动态波形与图 5 基本相同。从图 5 可看出,随着喷吹压力的增大,正压波峰和负压波峰都增大了,此时气体耗气量也提高了。喷吹压力越大,正压峰值越大,清灰效果就越好。但是,负压峰值和耗气量也增大了,因此喷吹压力并不是越大越好。在过滤器工作时应该选择一个合适的喷吹压力,使其既能够达到清灰要求,又能够使负压峰值和耗气量维持在一个可以接受的范围内^[6]。

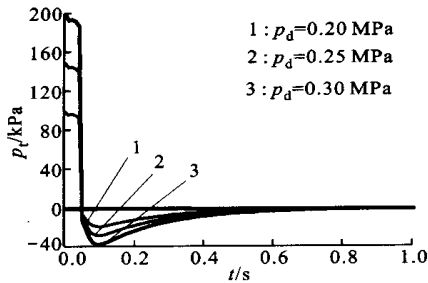


图5 不同的喷吹压力下过滤管内的动态波形

3.3 脉冲宽度对过滤管内压力波形的影响

脉冲宽度指的就是在一次反吹过程中喷吹压力维持的时间.图6表示的是脉冲宽度分别为46、100、146 ms时过滤管内的动态压力波形.从图中可以看出,随着脉冲宽度的增加,正压波峰维持的时间增加了一些,但负压峰值也随着脉冲宽度的增加而增大,这显然对反吹是不利的.脉冲宽度的增加又带来了耗气量的增大.因此,在过滤器工作时,在满足反吹要求的情况下,应该尽可能减小脉冲宽度.

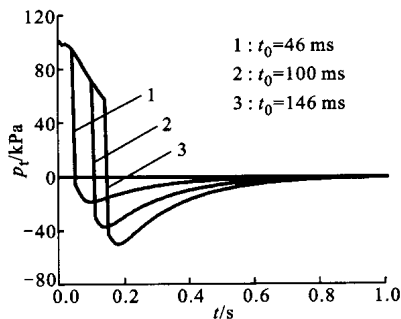


图6 不同的脉冲宽度下过滤管内的动态波形

4 结论

(1) 对于刚性陶瓷过滤器,评价其脉冲反吹效果的好坏应综合考虑正压峰值、负压峰值和耗气量3个因素.正压峰值越大,负压峰值越小,耗气量越小,说明此系统的脉冲反吹效果就越好.

(2) 随着喷吹压力的增大,在过滤管内动态压力峰值增加的同时,负压峰值也在增大,并且带来能耗的增加,所以应选择合适的喷吹压力.

(3) 随着脉冲宽度的增加,过滤管内的动态压力峰值基本不变,而负压峰值显著增大,在这种情况下,应选择满足反吹要求的最小脉冲宽度.

参考文献:

- [1] 焦树建.整体煤气化燃气-蒸汽联合循环[M].北京:中国电力出版社,1996.12.
- [2] 高应才.数学物理方程及其数值解法[M].北京:高等教育出版社,1983.
- [3] 李佩成.地下水非稳定渗流解析法[M].北京:科学出版社,1990.
- [4] 姬忠礼,时铭显.高温陶瓷过滤技术的进展[J].动力工程,1997(3),17(3):59~67.
- [5] 高铁瑜.先进燃煤联合循环高温陶瓷过滤器研究[D].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2003.
- [6] 姬忠礼,孟祥波.脉冲反吹过程中陶瓷过滤器滤管内流场的测定与分析[J].石油大学学报,2000,24(3):73~76.

(编辑 王焕雪)

西安交通大学俞炳丰教授受聘担任国际制冷学会科技理事会副主席

近日,从中国制冷学会获悉,我校俞炳丰教授受聘担任国际制冷学会科技理事会副主席.国际制冷学会成立于1908年,是一个政府间的国际科技组织.我国于1978年加入该学会,为二级会员国.国际制冷学会每4年召开一次大会,进行学术交流并更换各级领导班子.2003年8月17~22日在美国华盛顿召开了第21届国际制冷大会,大会期间召开了会员国代表大会,会上聘任我校俞炳丰教授为国际制冷学会科技理事会副主席,任期4年(2004~2007年).俞炳丰教授是我国第一位担任此重要职务的学者.

(科技处 谢海波)