

旋风式燃气过滤器的冷流实验和内流场模拟^{*}

魏志军, 张 平

(北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081)

摘 要: 为了考察某导弹系统燃气发生器的旋风式燃气过滤器的除尘特性, 对其进行了冷流实验研究, 对除尘效率进行了模拟测量, 并应用多流体模型的 IPSA 算法对其内流场进行了三维两相的数值模拟。计算结果与实验结果较符合, 计算得到的分离界限粒径为 $2\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 。

关键词: 燃气发生器; 过滤器; 冷流试验; 内流空气动力学; 数值仿真

中图分类号: V235.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2003) 02-0138-03

Experimental and numerical simulation on a cyclone filter for gas generator

WEI Zhi-jun, ZHANG Ping

(School of Mechano-Electronics Engineering, Beijing Inst. of Technology, Beijing 100081)

Abstract: To investigate the performance of a cyclone filter for hot gas generator of a missile system, the cold-flow experimental and numerical simulation were given. The IPSA algorithm based on multi-fluid model was used for the numerical simulation of three-dimensional two-phase flow in the cyclone filter. The calculations agree well with the experimental data, the separation limited diameter from calculation is about $2\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$.

Key words: Gas generator; Filter; Cold flow test; Internal aerodynamic; Numerical simulation

1 引 言

燃气发生器产生的燃气在进入一些对洁净度有要求的部件前, 需要进行过滤。最常用的是滤网, 但过滤精度低, 且常发生滤网堵塞和烧穿等故障。旋风式过滤器(旋风除尘器)以其结构简单, 体积小, 过滤精度高, 不易堵塞以及能承受高温高压和长时间工作等特点, 已经在一些较大型、长时间工作的燃气发生器上应用, 并有着明显的应用前景。本文的主要内容就是对用于某导弹制导系统中的旋风式燃气过滤器的内流场和过滤特性进行研究。

2 除尘效率的模拟测量

本文的旋风式过滤器结构简图见图 1。工作时气流经入口支管 2 进入, 通过漏斗体 3 的圆筒部分的圆孔进入衬套 7 上的矩形螺纹槽, 作旋转运动, 并在

轴线方向运动到漏斗体 3 的圆锥部分顶端, 在离心力作用下, 气流中的固体颗粒运动到空心圆锥的内壁, 并多数进入上腔室的空腔内, 这个空腔相当于颗粒收集装置。洁净的气体反转折回, 沿衬套 7 的中心圆孔进入下腔室, 然后经弯管 4 进入出口支管 5。这一过程就完成了对入口含尘气流的过滤。

实验在冷态条件下进行, 气相采用压缩空气, 固相采用各种粒径的 Al_2O_3 颗粒进行模拟。采用专门设计的加料器播入颗粒, 加料器采用螺旋推进方式, 通过控制螺杆旋入量来控制颗粒播入量。颗粒经由加料器进入到气流中, 混合均匀后进入过滤器过滤后气体进入余尘收集装置, 此装置为一细长管状容器, 内含洗涤液(用于使颗粒粘附混合在其中)和多层细孔滤网, 可收集旋风过滤器中未能过滤掉的颗粒。在过滤前和过滤后均测量压力值, 气流的入口速度由所测压力值计算得出。

* 收稿日期: 2002-03-25; 修订日期: 2002-07-03。

作者简介: 魏志军 (1971—), 男, 博士, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。

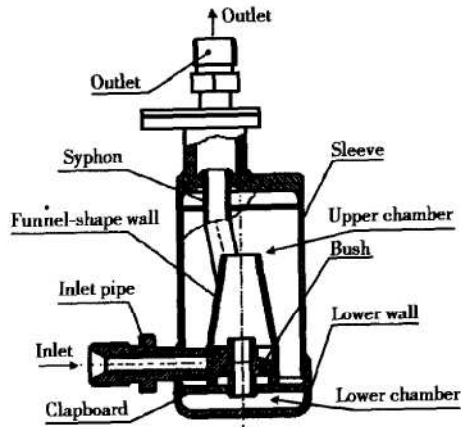


Fig.1 Diagram of cyclone filter

首先用 SA-CP3 型光透离心沉降粒度分析仪测量所加入的颗粒样本中的粒径分布,然后对颗粒样本的粒径分布进行测量,对某一粒径颗粒的前后不同含量进行比较,便可计算出对此粒径颗粒的除尘效率 η

$$\eta = 1 - \frac{\text{过滤后此粒径颗粒质量}}{\text{过滤前此粒径颗粒质量}}$$

3 三维两相内流场数值模拟

两相流的计算采用颗粒拟流体模型^[1],流体相湍流模型采用 Chen 和 Wood^[2]所给出的适合于第二相为颗粒相时的校正形式,颗粒湍流模型采用简单的 Hinze-Tchen 代数模型^[1],计算方法采用以 SIMPLE 算法为基础的求解多相流多流体模型的 IPSA 算法^[1]。本文对所采用的物理模型进行了简化,只对漏斗体部分进行计算,而不考虑入口支管、弯管和出口支管,因此取漏斗体与入口支管相交的部位作为入口,衬套的中心管为出口管。所采用的网格及主要尺寸如图 2 所示,设周向、径向和轴向的网格分别用 i, j 和 k 表示,则所采用的网格数为 $i_{\max} \times j_{\max} \times k_{\max} = 40 \times 40 \times 40$,图中的切向入口与水平面有一倾角 α ,本文中 $\alpha = 10^\circ$,用来模拟矩形螺纹槽引起的倾斜入口。入口气体采用常温状态下的空气,颗粒相采用不同粒径的 Al_2O_3 颗粒,入口处气粒两相的速度相同,均为 7.5m/s ,入口颗粒相的体积分数为 0.05 ,出口压力取外界大气压,圆锥段下端面的边界条件取气流量为 0 ,壁面为无滑移边界,采用 Launder 和 Spalding 的壁面函数^[3]代替湍流模型。

4 结果及分析

4.1 气粒两相流场的计算

图 3 和图 4 分别给出了入口颗粒粒径 $d = 5\mu\text{m}$

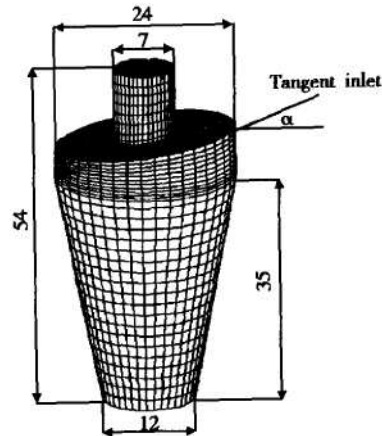


Fig.2 Sketch of three dimensional grid

时,计算所得到的气相场的径向剖面 and 轴向剖面的速度矢量图。由图中可以看出,速度矢量相对于对称轴并不呈对称分布,在出口管插入段附近有旋涡存在。另外可以看出,其径向速度值较大,不能忽略。因此如果将其简化为二维情况来处理,会直接影响数值计算的准确度,这说明进行三维计算是必要的。

比较两相流场内气相运动与颗粒运动的速度图可以看出,两者运动情况相似,数值也比较接近,图 5 和图 6 分别给出了某剖面上沿半径方向气相和颗粒相间的周向速度和轴向速度。由图可见,两相速度的数值较为接近。另外,颗粒相的速度并不总是大于或总是小于气流速度,因此并不能说某一相是完全由另外一相携带进行运动的,它们之间相互影响,相互制约。

图 7 为 $i = 1$ 平面上颗粒相体积分数分布图,可以看出,流场中的颗粒主要分布在壁面附近和图示下方的颗粒收集装置入口附近,而出口管内和气流中心的颗粒分布极少,绝大多数颗粒被留在过滤器内或进入收集装置,只有极少数颗粒经由气流出口排出而未被过滤掉。这也正是过滤器的目的所在。

4.2 除尘效率的计算

为了计算所研究的除尘器的除尘效率,本文对颗粒粒径分别为 $1\mu\text{m}, 3\mu\text{m}, 5\mu\text{m}, 10\mu\text{m}, 20\mu\text{m}, 30\mu\text{m}, 50\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 的两相流场进行了模拟,得到各自的体积分数分布情况,则由出口处的颗粒流量 $\dot{m}_{\text{ex}}$ 和入口处的颗粒流量 $\dot{m}_{\text{in}}$ 可计算出除尘效率 η 的值

$$\eta = \left(1 - \frac{\dot{m}_{\text{ex}}}{\dot{m}_{\text{in}}} \right) \times 100\% = \left(1 - \frac{\sum_{A_{\text{ex}}} (R_2 u dA)_{\text{ex}}}{\sum_{A_{\text{in}}} (R_2 u dA)_{\text{in}}} \right) \times 100\%$$

图 8 绘出了计算得到的除尘效率曲线,并与实验得到的结果进行比较。可以看出,两者之间在总的趋势上符合较好,数值上也相差不大,这验证了本文数值计算的合理性。由计算曲线可以看出,所研究的过滤器对于较大颗粒($20\mu\text{m}$ 以上)的除尘效率可以达到 80%

以上,而对较小的颗粒其除尘效率变化较大。在旋风分离器的研究中,通常用分离界限粒径 d_{50} 来表征其分离粒度,其数值等于除尘效率为 50% 的颗粒粒径,由图中的计算曲线可以看出,本文所研究的过滤器的分离界限粒径 $d_{50} = 2\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 。

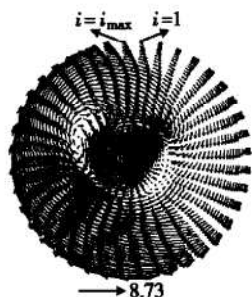


Fig. 3 Gas-phase velocity vector distribution on a radial section ($k = 18$)

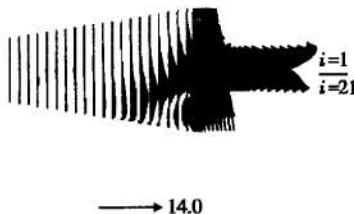


Fig. 4 Gas-phase velocity vector distribution on an axial section ($i = 1$ and $i = 21$)

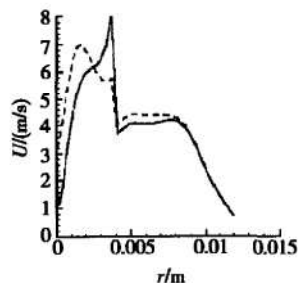


Fig. 5 Comparison between gas-phase circumference velocity (solid line) and particle-phase circumference velocity (dashed) ($i = 1, k = 18$)

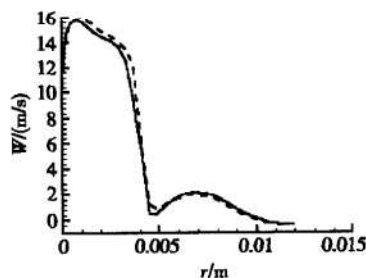


Fig. 6 Comparison between gas-phase axial velocity (solid line) and particle-phase axial velocity (dashed) ($i = 1, k = 18$)

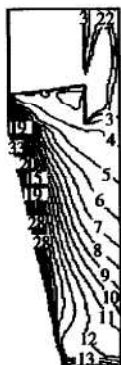


Fig. 7 Particle-phase volume fraction distribution ($i = 1$)

Level	R2
33	0.934284
31	0.871999
29	0.809713
27	0.747427
25	0.685142
23	0.622856
21	0.560571
19	0.498285
17	0.435999
15	0.373714
13	0.311428
11	0.249142
9	0.186857
7	0.124571
5	0.0622856
3	0.0103801
1	0.0044757

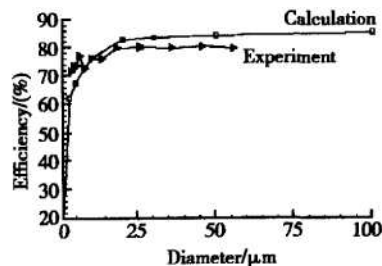


Fig. 8 Comparison between experiment and calculation results of filter efficiency

5 结论

(1)对某导弹系统燃气发生器的旋风式燃气过滤器进行了冷态实验,得到了过滤器的除尘效率。

(2)应用多流体模型的 IPSA 算法对该过滤器的内流场进行了三维两相数值模拟,得到了气相和颗粒相的流动情况。计算出的除尘效率与实验结果比较符合。过滤器的分离界限粒径 $d_{50} = 2\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 。

(3)本文的实验和数值模拟都是在冷态条件下进行,实际的燃气工作特性尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] 周力行编. 湍流两相流动与燃烧的数值模拟[M]. 北京:清华大学出版社,1991.
- [2] Chen C P, Wood P E. Turbulence closure modelling of the dilute gas particle axisymmetric jet[J]. *AICHE J.*, 1986, 32 (1):163.
- [3] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, 3:269 ~ 289.

(编辑:王居信)