

铁路运输装备用离心沉淀式机械过滤器分析与研究

Analysis and Research on Centrifugal Settling Type Mechanical Filter for Railway Transportation Equipment

战红红

南车青岛四方机车车辆股份有限公司

摘要: 对离心沉淀式机械过滤器的原理、性能进行了分析, 设计了新型结构形式的离心沉淀式机械过滤器。通过运用流体分析软件 STAR-CCM+ 进行仿真计算、制作样件进行试验测试, 对新型过滤器的阻力特性及过滤效率进行了分析与比较, 结果表明, 新开发的过滤器具有备优良的性能。

关键词: 离心沉淀式 机械过滤器 STAR-CCM+ 阻力特性 过滤效率

Abstract : The centrifugal settling mechanical filter with new type of structure has been designed through the analysis of principle and performance of centrifugal settling mechanical filter. With application of fluid analysis software (STAR-CCM+) for simulation calculation and test on the fabricated specimen, analysis and comparison have been done to the resistance feature and filtration efficiency of new type of filter. The result shows the newly developed filter has excellent performances.

Key words : Centrifugal Settling Type Mechanical Filter STAR-CCM+ Resistance Feature Filter Efficiency

1、概述

在铁路运输装备中, 为保证发热设备 (如牵引电机等) 的正常工作, 其通风系统采用强迫通风的方式进行冷却, 以避免发热设备内部出现极高温度, 烧损设备甚至导致运输装备无法正常运行。

铁路运输装备运行区域广泛, 所处运行环境复杂多样, 部分运行区间风沙较大, 空气质量较差。运用于多风沙地区的铁路运输装备, 若直接使用未经处理的空气去冷却发热设备, 必将影响设备的正常工作及使用寿命。为此, 铁路运输装备通风系统的前端一般采取多级过滤措施, 用以过滤进入设备的冷却空气, 以保证设备的正常工作同时延长其使用寿命。

目前, 应用于通风系统一级过滤的方式主要有如下几种: 多层不锈钢丝网、V 形瓦楞窗滤清器、旋风除尘粗滤器、离心沉淀式机械过滤器等。

(1) 不锈钢丝网由三层或四层不锈钢网纵横编织而成, 利用丝网间隙来过滤粉尘, 但实际过滤效果并不理想。另外因其缺乏粉尘自净功能, 运用中极易堵塞, 需要经常维护清洗。

(2) V 形瓦楞窗滤清器 (见图 1-1) 是电力机车车体通风常用的挡板式空滤器, 由 2 排形状和间距相同的 V 形型材交错互扣组成, 利用气流方向改变而产生的离心力, 使粉尘从气流中分离出来。因其通道较短, 且 V 形型材为半敞开式, 过滤效率相对较低, 同时气流通过时方向变化较大, 压力损失较高。

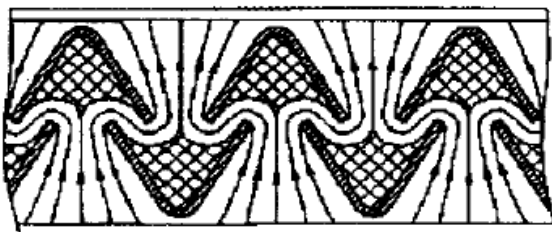


图 1-1 V 形瓦楞窗滤清器结构简图

(3) 旋风除尘粗滤器（见图 1-2）由若干个旋风管组成，工作原理是利用旋转的含尘气体所产生的离心力，使粉尘从气流中分离出来。该过滤器需要具有一定的气流行程，因此体积较大，阻力较高，另外还需配套设置动力排尘装置，整套装置体积较大。

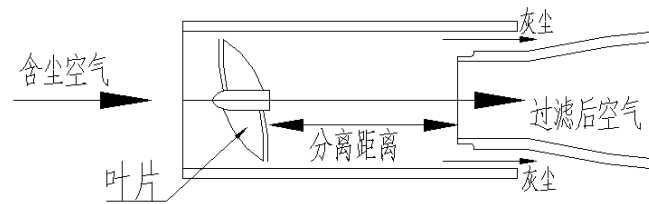


图 1-2 旋风除尘粗滤器结构简图

(4) 离心沉淀式机械过滤器是一种新型的高效过滤器，属于惯性过滤器，目前被越来越多的应用于铁路运输装备。与上述三种传统过滤器相比，该过滤器体积小，压力损失低且过滤效率高。另外该过滤器利用重力直接排尘，基本实现了免维护。

鉴于此，本文借助于仿真计算（计算软件为 IDAJ—China 公司流体分析软件 STAR-CCM+）和试验测试的手段，对离心沉淀式机械过滤器进行分析和研究，优化其结构形式以提高性能，以期探索出更为高效的过滤器，进一步指导设计生产。

2、离心沉淀式机械过滤器原理

离心沉淀式机械过滤器一般由交错排列、不同形状的导流零件组成（如图 2-1 所示），其前部为外凸、封闭、带尾翼的管状导流体，对气流起导向和加速作用；中部为带尾翼的圆缺形管状分离器 1，后部为圆缺形管状分离器 2，均用于收集沙尘。

当含有沙尘的空气通过过滤器时，各元件间的形状使气流流动方向发生改变，沙尘在改变运动方向的过程中产生惯性离心力，利用沙尘密度比空气大的特点完成沙尘与空气的分离；分离出的沙尘被收集、排出。

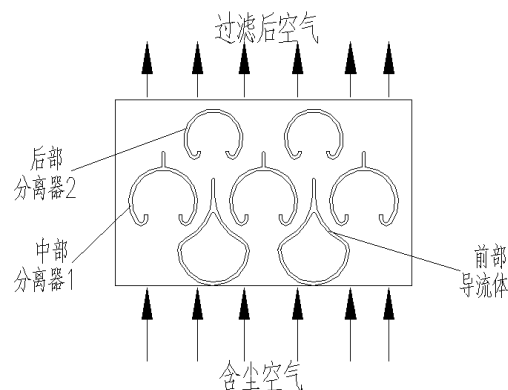


图 2-1 离心沉淀式机械过滤器结构简图

3、离心沉淀式机械过滤器研究及使用现状

目前，实际运用的离心沉淀式机械过滤器均为图 2-1 所示的结构形式，相关的数值研究文献、试验研究文献，也多以图 2-1 所示的结构形式为研究对象，且数量较少。查阅前期的研究资料后发现，较传统过滤器而言，机械过滤器虽具备较为优良的性能，但其结构形式还存在改进空间，可进

一步提高性能:

(1) 机械过滤器前部导流体的背风面有一个截面形状的突变, 在此处会形成旋涡区, 旋涡的出现将会增加湍流的脉动速度, 引起流体机械能的损失, 导致过滤器的压力损失加剧, 因此需探索前部导流体的替代形式;

(2) 后部分离器 2 相对于中部分离器 1 集尘分离性能有所减弱, 而分离器排数的增加则使过滤器压力损失加剧, 因此可尝试减少分离器排数, 以寻求更为经济适用的过滤器。

针对上述不足, 本文将通过优化过滤器的结构形式, 研制开发新型过滤器, 并借助计算流体力学 (CFD) 软件 STAR-CCM+ 及试验测试手段对新型过滤器进行分析研究。

4、 新型离心沉淀式机械过滤器

本文研制了两种不同结构形式的新型过滤器, 如图4-1-b、c所示, a型过滤器为目前运用中的过滤器。

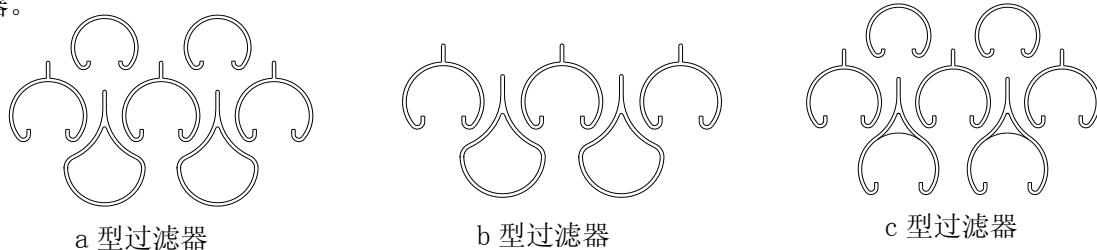


图 4-2 三种结构形式的过滤器

相较 a 型过滤器, b 型取消了后部分离器, 保留了前部导流体和中部分离器, 此结构形式可减弱气流通过时所受干扰, 缩短气流行程, 但集尘分离区有所减少; c 型过滤器采用带有尾翼的圆缺形倒钩分离器替代前部导流体, 其流道过渡较 a 型要平缓, 流道宽度与 a 型基本相同, 而集尘分离区较 a 型有所增多。

5、 仿真计算与试验测试

针对上述三种结构形式的过滤器, 分别运用 CFD 仿真计算及试验测试手段, 研究分析其压力损失及过滤效率, 以验证理论分析的正确性, 并为过滤器结构设计选型提供参考依据。

5.1 仿真计算

5.1.1 选取计算模型

根据精度要求和计算量, 仿真采用 realizable $k-\epsilon$ 模型, 对气相采用 realizable $k-\epsilon$ 湍流模型分析过滤器的压力损失, 在湍流模型加入固体颗粒相计算过滤效率;

根据需求, 计算采用两相流模型。研究两相流的传播与沉积有两种方法, 即欧拉法与拉格朗日法。欧拉法将颗粒相看作是连续介质, 在有限体积元的基础上对其建立浓度守恒方程, 与对流体相的处理方法类似; 而拉格朗日法将颗粒相看作是离散相, 跟踪每一个粒子的运动轨迹。根据沙尘的沉降特性, 设定气体含尘粒径主要分布在 $75 \sim 300 \mu\text{m}$, 属于大颗粒粒径范畴, 欧拉方法收敛难度较大, 因此采用拉格朗日方法进行计算。

为了提高计算的精确度, 以及避免因网格质量不好而带来计算收敛困难的问题, 所有网格均采

用非结构化多面体网格划分。

三种结构形式的过滤器网格划分如图 5-1 所示。

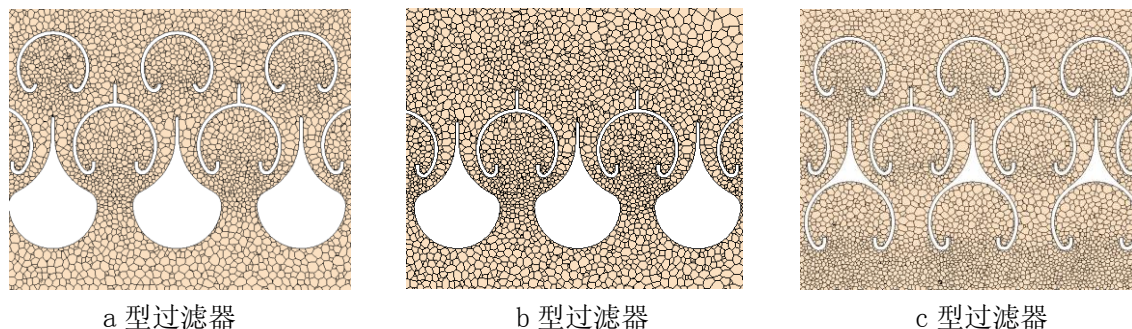


图 5-1 三种过滤器网格图

5.1.2 设定边界条件

(1) 气体相

过滤器入口定义为速度入口，其速度设定为：Y 方向（垂直于过滤器迎风面）速度分量等于给定的风速 V ，X（平行于过滤器迎风面）、Z 向速度分量等于 0；

过滤器出口作为压力出口，相对压强为 0；壁面及导流体、分离器均给定无滑移壁面条件。

(2) 固体颗粒相

设定固体颗粒相粒径主要分布在 $75 \sim 300 \mu\text{m}$ 范围内，与试验用沙尘粒径统一。对于固体壁面，采用了“rebound”边界条件，即认为颗粒在与壁面发生碰撞时被壁面反射；对于出口，采用了“escape”边界条件，认为颗粒到达出口就逃出计算区域，即未被过滤。

5.1.3 计算结果及分析

(1) 气相流场模拟结果与分析

针对上述三种结构形式的过滤器，在 20°C 和一个标准大气压下，对 5 种入口风速（1 m/s, 2 m/s, 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s）下的压力损失值进行了计算。压力损失随入口风速的变化结果如图 5-2 所示。

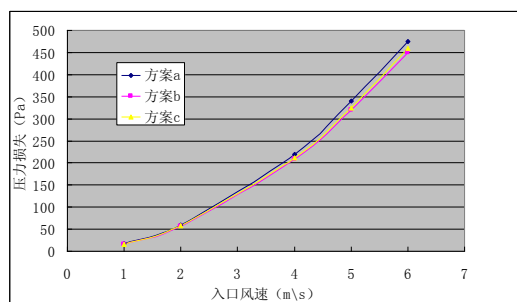
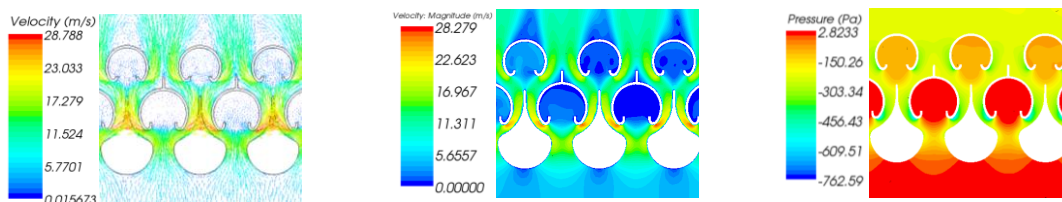


图 5-2 过滤器压力损失计算值随入口风速的变化曲线

由图 5-2 可见，三种结构形式的过滤器压力损失值均随着入口风速的升高而增加。对过滤器压力损失在不同风速下的变化幅值用幂函数曲线拟合，均得到与风速平方近似成正比的关系。

在相同入口风速下，a 型过滤器的压力损失均为最大，b 型、c 型过滤器均要小于 a 型，同时 c 型过滤器压力损失略大于 b 型过滤器。

图 5-3、图 5-4、图 5-5 分别给出了 a 型、b 型、c 型过滤器横截面的流速矢量图、流速分布云图和压力分布云图。



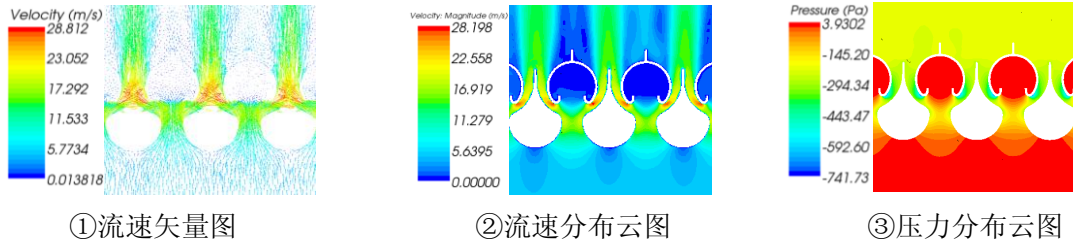


图 5-4 b 型过滤器计算结果显示 (风速 4m/s)

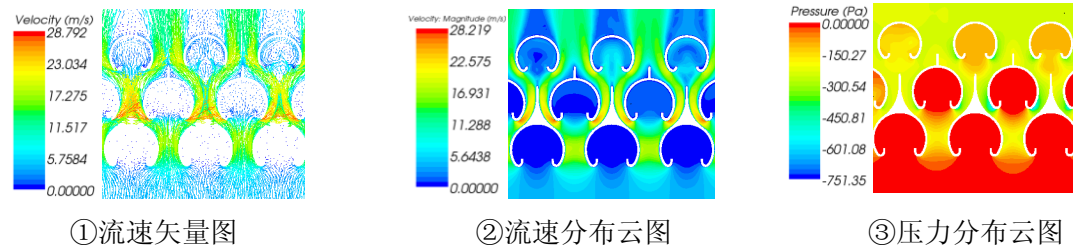


图 5-5 c 型过滤器计算结果显示 (风速 4m/s)

对比图 5-3~图 5-5 各云图, b 型过滤器去掉后部分离器后, 气流通过时所受扰动较 a 型过滤器减弱, 气流行程亦缩短, 因此 b 型过滤器压力损失较 a 型过滤器略小; 空气流经 c 型过滤器时, 流场较 a 型过滤器稳定, 气流多数沿着管状元件表面做弧线运动, 而极少沿与主流通道垂直的方向流动, 相对平稳的流动减小了过滤器的压损, 因此 c 型过滤器压损低于 a 型过滤器。亦说明相同工况下, 带有尾翼的圆缺形倒钩分离器的压损要低于水滴形导流体。

(2) 颗粒相流场模拟结果与分析

表 5-1 给出了三种结构形式的过滤器在 2m/s 入口风速下的过滤效率计算值。

表 5-1 2m/s 时过滤器的过滤效率计算值

风速	a 型过滤器	b 型过滤器	c 型过滤器
2m/s	73.72%	72.92%	75.64%

(注: 本文采用的过滤效率定义如下:

$$\text{过滤效率} = \frac{\text{过滤器捕集粉尘量}}{\text{入口空气含粉尘量}} \quad)$$

由上表可见, 对于粒径在 $75\mu\text{m}$ – $300\mu\text{m}$ 范围内的沙尘, a 型过滤器与 b 型过滤器的滤清效率几乎相同, 表明了颗粒主要被水滴形的前部导流体与带尾翼的圆缺形中部分离器所捕集, 而圆缺形后部分离器对于颗粒捕集效果并不明显; c 型过滤器的滤清效率明显高于 a 型与 b 型, 主要是由于 c 型过滤器的第一排采用了圆缺形分离器, 增加了颗粒的拦截面积。

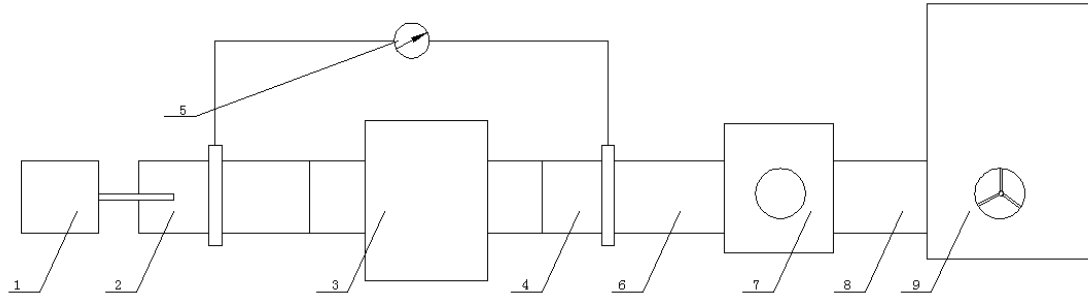
综合上述气相流场、颗粒相流场模拟结果来看, 三种结构形式的过滤器中, c 型过滤器综合性能优于其他两种过滤器。

5.2 试验测试

5.2.1 试验原理及试验设备

通过测量空气流量测量装置前后的压差, 计算得到流经机械过滤器的风量; 同时测量机械过滤器前后的压差, 即可得到过滤器的压力损失。在规定的空气流量下向机械过滤器送灰, 测量送灰量和机械过滤器的排灰量, 计算得到机械过滤器的滤清效率。

试验装置如图 5-6 所示，由自动加灰系统、引风机、流量测量装置、数字式微压计、变频器和风道等组成。风量由变频器和引风机调节，以确保不同工况下的流量。空气流量测量装置设置在引风机之前，用压力测量装置测量喷嘴前后的静压差，以计算空气流量。过滤器滤清效率的计算采用直接称重法，仅需测量试验前后的试件质量和试验总喂灰量。



1— 喷灰器；2— 进口管；3— 过滤器；4— 出口管；5— 压力测量装置；
6— 风道；7— 流量测量装置； 8— 风道； 9— 引风机

图 5-6 试验装置示意图

5.2.2 试验结果与分析

(1) 阻力特性

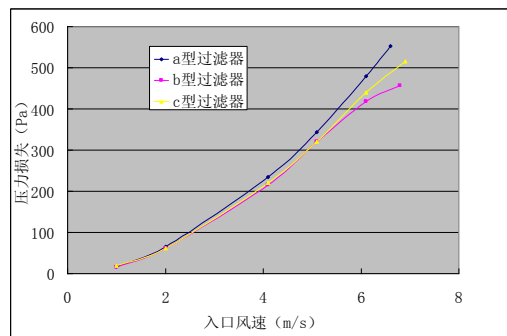


图 5-7 过滤器压力损失试验值随入口风速的变化曲线

由图 5-7 可以看出，三种过滤器的压力损失特性，与仿真计算结论基本相符合。在相同工况下，a 型过滤器的压力损失均为最大，而 c 型过滤器压损略大于 b 型过滤器。

(2) 滤清效率

试验中加入的沙尘浓度为 $1\text{g}/\text{m}^3$ ，沙尘粒径分布于 $75\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$ 之间。入口风速为 $2\text{m}/\text{s}$ 时三种过滤器过滤效率的测试结果如表 5-2 所示：

表 5-2 $2\text{m}/\text{s}$ 时过滤器的过滤效率实测值

风速	a 型过滤器	b 型过滤器	c 型过滤器
$2\text{m}/\text{s}$	65%	61%	84%

由表 5-2 可见，对于粒径在 $75\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$ 范围内的沙尘，a 型过滤器过滤效率略大于 b 型过滤器，但总体相差不大，再次证明后部分离器对于沙尘的捕集效果并不明显，沙尘主要被前部导流体与中部分离器分离捕集；c 型过滤器的滤清效率明显要高于 a 型与 b 型，表明带尾翼的圆缺形分离器替代水滴形的前部导流体后，增加了沙尘的拦截面积，大幅提升了过滤性能。

由上表 5-2 可以看出，三种过滤器滤清效率曲线的变化规律与仿真结果相符，但存在一定的差异。

分析其原因,主要有:①仿真计算产生的误差,颗粒受力的简化、随机轨道模型的假设以及离散相边界条件的设置方法等对仿真计算结果产生一定的影响,进而导致计算值偏离实际值。②试验误差。这主要是由于在被过滤颗粒物的收集过程中,部分颗粒物因粒径小质量轻而产生扬尘现象以至无法收集,同时也有部分颗粒物因收集手段的原因而粘附在分离器等固体壁面上。

综合分析三种过滤器阻力特性与过滤效率的试验结果后可见,c型过滤器的性能优于其他两种过滤器,既具有较低的压力损失又具备较高的过滤效率,工程适用性较高。这与仿真计算的结果是吻合的,亦符合对三种过滤器进行的定性分析,可基本断定该结果是真实可信的。

6、 结论

离心沉淀式机械过滤器作为铁路运输装备通风系统的重要部件,其性能的优劣直接影响到铁路运输装备运行的稳定性。目前而言,对此类过滤器结构形式的研究较少。本文利用CFD仿真技术(应用软件为STAR-CCM+)和试验测试两种手段,研究了过滤器结构形式的改变对其压力损失和过滤效率的影响。从前文中对三种过滤器的分析与比较来看,现有结构形式的过滤器前部导流体用带尾翼的分离器代替后得到的c型过滤器,具备较为优良的性能,压力损失低于现有结构形式的a型过滤器,同工况下的过滤效率亦优于a型过滤器,在特定条件下应该可以替代a型过滤器应用于铁路运输装备。

7、 参考文献

- | | | | | |
|-----|------|-----------|---------|------|
| [1] | 廖艾贤编 | 《流体力学》 | 中国铁道出版社 | 1984 |
| [2] | 孙一坚编 | 《工业通风》 | 中国建筑出版社 | 1994 |
| [3] | 刘大有编 | 《两相流体动力学》 | 高等教育出版社 | 1993 |