

# 空气滤清器过滤材料性能仿真与试验研究

卢进军, 孙阳, 李继新, 王建东, 乔梦华, 陈克新

(中国北方车辆研究所, 北京, 100072)

**摘要:** 基于 Darcy 理论模型和 Navier-Stokes 方程, 应用过滤材料微观建模仿真软件 GeoDict, 结合三维电镜扫描设备生成的过滤材料切片照片, 对过滤材料进行三维建模并仿真研究, 研究内容为材料的流场特性、过滤效率与容尘能力, 得到了过滤材料的渗透率、一定流速下的压力降、单次加灰的过滤效率以及多次加灰的效率和压力降变化。仿真结果与过滤材料性能试验结果进行了对比分析, 经分析仿真结果与试验结果具有良好的一致性, 其误差处于可接受的范围内。从而为过滤材料的优化研发开辟了一条新的思路。

**关键词:** 空气滤清器; 过滤材料; 孔隙率; 压力降; 过滤效率; GeoDict

**Abstract:** Based on the Darcy theory model and the Navier-Stokes equation, the filter material micro modeling simulation software GeoDict is applied to the filter material generated by the three-dimensional electron microscope scanning equipment, the three-dimensional modeling and Simulation of the filter material are studied. The research content is the flow field characteristics, the filtration efficiency and the dust capacity of the material. The permeability of filtration material, the pressure drop at a certain velocity, the filtration efficiency of single dust addition, the efficiency and pressure drop of multiple dust addition are also discussed. The simulation results are compared with the performance test results of the filter material. The results of the simulation are in good agreement with the test results, and the error is within the acceptable range. It opens up a new idea for the optimization research and development of filtration materials.

**Key words:** air filter; filtration material; porosity; pressure drop; filtration efficiency; GeoDict

**中图分类号:** TJ18 **文献标志码:** A

特种车辆工作环境恶劣, 主要活动区域内沙尘浓度高, 在无保护情况下, 沙尘颗粒被内燃机吸入进气道, 可对压气机叶轮直接造成严重伤害<sup>[1]</sup>, 严重时会造成活塞环与缸套磨损, 即通常说的“拉缸”。空气过滤技术是目前解决内燃机安全进气的第一选择, 特种车辆发动机进气系统的关键部件为空气滤清器, 空气滤清器的作用在于将含尘空气中的沙尘颗粒过滤掉, 将洁净空气供给内燃机燃烧使用。通常大流量空气滤清器分为两级: 粗滤阶段和精滤阶段, 粗滤阶段通常采用惯性分离技术, 粒径、质量较大的粉尘在粗滤阶段被分离, 精滤阶段通常采用物理过滤, 分为拦截过滤和吸附过滤。过滤材料是精滤阶段的核心部件, 是过滤技术的“心脏”<sup>[1]</sup>。

过滤材料主要有植物纤维、复合材料和功能性材料等。过滤材料过滤的基本机理基于材料对颗粒的拦截效应、惯性效应、静电效应、扩散效应, 或是几种效应的协同与综合。我国空气过滤技术在一些理论研究和应用方面都达到了世界先进国家的水平, 但同世界上工业发达国家相比仍存在一定的差距。目前出现的功能性空气过滤材

料是针对特定行业, 如耐高温、耐腐蚀、抗静电、阻燃、抗菌(病毒)、清除有害气体等, 可反向吹扫自清洁重复利用的材料是近年来空气过滤材料研究领域的一个热点。研究该型过滤材料的重要意义在于, 当车辆处于污染环境, 过滤材料因为灰尘沉积, 压力降迅速升高, 达到极限压力点时, 系统即需要保养, 从而降低过滤材料压力降, 使空气滤清器重新进入工作状态, 通常这一保养过程由人工来完成, 而当采用新型过滤材料后, 保养功能性部件可内嵌入空气滤清器内部, 达到临界阻力时, 系统发出信号, 保养功能部件在滤清器内部对滤芯进行保养(如应用高压气流进行反向吹扫自清洁), 从而延长滤清器人工保养时间间隔, 达到“免维护”的目标。可自清洁过滤材料必须满足三项基本要求: 表面容尘能力高、反向透气性好、压力降升高缓慢<sup>[5]</sup>。

构建新型材料的基础是明晰过滤材料构成, 以及不同要素构成对过滤材料性能的影响, 以便在构造材料时调配材料形成要素, 形成合理有效的过滤材料, 传统研究过程主要依据微观测量与流量测试, 无法建立复杂的基于实际材料结构的

模型，由于材料复杂的构造特性，无法科学解析流体穿过纤维几何体的机理。引入微观建模软件 GeoDict 后，可以形成过滤材料的微观几何模型，应用基于改进的 Stokes-Brinkman 方程的流场计算模块和过滤特性计算模块，可以得到过滤材料的孔隙率、平均纤维直径、流速-压力降曲线和过滤效率，多次累计粒子沉积仿真还可以得到过滤材料容尘能力数值计算结果。本文针对一种防水纤维滤纸，对材料进行三维电镜扫描，切片照片导入建模软件中，形成材料三维的纤维模型，在理论研究的基础上，应用仿真软件对过滤材料进行仿真分析，得到了材料的过滤特性，并与性能测试结果进行对比分析。

## 1 仿真模型的构建与仿真过程

通过扫描电镜设备，生成过滤材料电镜照片组，通过导入模块导入软件中，形成微观过滤材料三维仿真模型。仿真模型在流场特性仿真模块和过滤特性仿真模块中，分别进行流场特性仿真和过滤特性仿真，得到过滤在特定流场中<sup>[2]</sup>。

### 1.1 图像的收集

所选样品为某种防水拒油过滤纸，内部代号为 New-psu。材料扫描采用的是比利时生产的 Sky scan 1074 Portable Micro—CT Scanner 扫描仪，峰值电压为 120kV，电流为 1500 A，功率为 60W，试验中每隔 0.9。对样品进行连续扫描，并进行 MPR 重构得到样品的三维图像，然后在纸张的 z 向层面上进行等间距切割重构，一共得到 200 张 z 向切片图像。

分析软件采用美国 Media Cybernetics 公司的 Image Proclus Version 5.0 版本。将采集好后的扫描图像转换成 TIFF 格式。

### 1.2 模型生成

过滤材料扫描后形成的 TIFF 格式照片组，通过 GeoDict 软件中的 import module 工具导入到软件中，累积形成过滤材料三维模型，生成三维模型后需进行模型图像的处理，首先进行平均滤波，除去噪声，然后用媒体过滤器对图像进行锐化过滤处理，减少背景干扰，提高图像对比度，然后进行高斯处理，进行图像纠正。形成如图 1 所示微观三维模型，并在材料模型的厚度方向加入 100 个空白网格厚度作为流场计算域使用<sup>[3]</sup>。

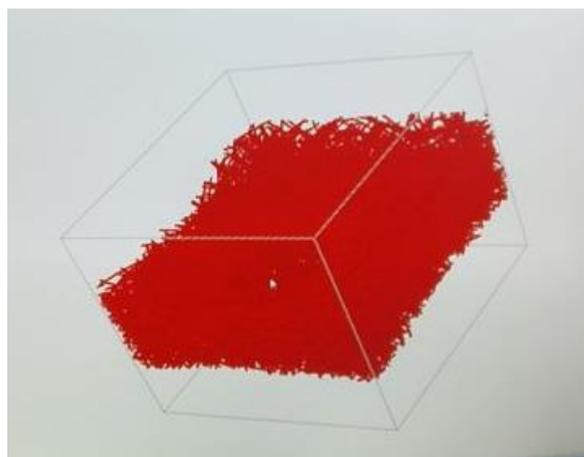


图 1 仿真软件生成的三维模型

### 1.3 仿真流程

仿真模型生成后，首先在软件中应用 CFD 方法求解材料的流场特性计算，通常应用 FlowDict 模块计算流体通过材料模型得到模型的性能参数，如在特定流体介质穿透下的压力降、流阻和渗透率。其次，应用 FilterDict 工具对模型进行流场下加粒子仿真，以期得到过滤材料模型对指定粒子的过滤效率数据，如果多次循环加粒子进行效率仿真，还可以得到模型对粒子的容尘能力仿真结果<sup>[4]</sup>。

在进行材料模型仿真计算之前，应明确计算模型边界条件，如进口或出口流速、粒子直径和质量分布等仿真输入，将空气滤清器的总流量折合到单位面积滤材上，可以计算得到过滤材料的平均面流速，约为 0.055m/s，入流方向为-z 方向，粉尘粒子质量与体积分布采用 ISO12103-A4 coarse dust 粉尘，其分布符合 ISO-12103 标准，过滤材料仿真模型实际面积为 1.46cm<sup>2</sup>，静态表面电量为 1×10<sup>6</sup> C/m<sup>2</sup>，测试灰尘的浓度为 0.001g/l。单次加尘一簇粒子数量为 675453 个，累计加灰数量为 10 簇。边界条件设置完毕后，设定计算精度、迭代次数、解算器种类等，开始计算。

得到过滤材料可视化仿真流程图，如图 2 所示。该流程图包括材料模型的创建、仿真、优化和验证的全过程，是优化开发新型过滤材料的仿真路线图<sup>[5]</sup>。

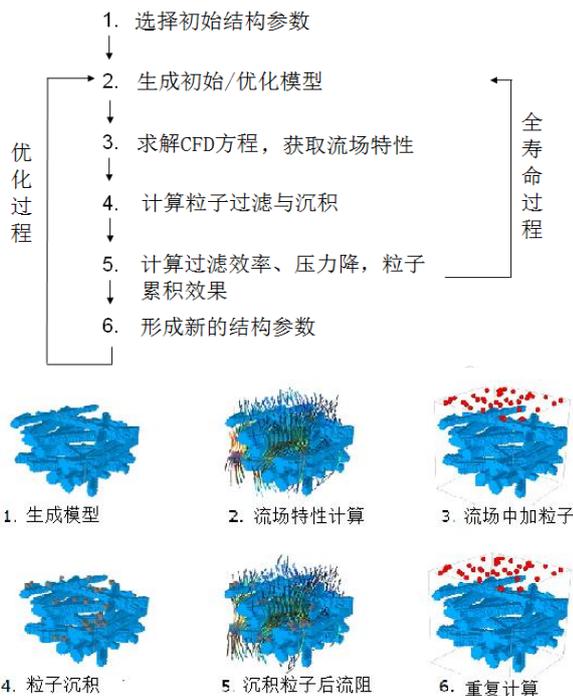


图2 过滤材料可视化设计流程图

## 2 仿真结果

在流场特性仿真过程中，实际仿真滤纸在规定的流速下仿真得到初始压力降为 17.46Pa，经过解算得到的渗透率为 0.99，过滤性能仿真计算后，材料对第一簇粒子的过滤效率即原始过滤效率为 99.51%。

图3为仿真过程中流体通过过滤材料时的速度流线图。从图中可以看出，流体以速度 0.055m/s 从滤材上表面进入滤材，在滤材内部纤维中穿过，由于滤材纤维的排布，流体因不断收到阻挡变向，气流速度不断升高，其最高值达到了 1.5m/s。根据气流速度与流体阻力的关系式，可以反映出材料阻力的变化规律，气流从过滤材料底面流出材料后，根据流体力学仿真计算的第一定律——质量守恒定律，气流恢复均匀，其流速由高降低，最终恢复到 0.055m/s。

图4为单次加灰后流体通过过滤材料的速度曲线。从图中可以看到，过滤效率仿真将不同粒径的粒子以一簇的形式在流体的作用下喷向过滤材料。粒子簇通过过滤材料，其中粒径较大的粒子直接被拦截在率滤材外表面，通常称之为表面过滤状态；粒径较小的一部分进入过滤材料内部，被过滤才来的纤维组织拦截，如图所示，粒径由大到小附着在纤维的表面，这一状态称之为深度过滤状态；粒径更小的一部分粒子，则在气流的

作用下穿过了过滤材料，沉积在了流体仿真区域的底面上，这一部分的粒子则是过滤后的粒子，其质量与粒子总质量之比可以得到单次过滤的质量过滤效率，其数量与单簇粒子总数量之比可以得到单次过滤的颗粒数量过滤效率。

图5单次加灰后过滤材料空间中粒子的分布状态图。该图去除了过滤材料纤维和流线的显示，只留下不同沉积状态的粒子。图纸可以更清晰地看到，粒径由大到小从初始的表面过滤，进入深度过滤，最后一部分小粒径粒子通过过滤材料进入材料后部。

图6为过滤材料多次加粉尘进行过滤过程仿真的效果图。显示了过滤材料模型从无粉尘沉积到堵塞的过程，粒子在模型中的体积分量逐步增大，可以概括出粒子沉积的三个过程：（1）大多数粒子进入过滤材料内部并被捕获，这是深度过滤阶段。（2）滤材表面积聚一层粒子，滤饼开始形成，表面过滤效果增强，滤饼加厚。（3）滤饼过滤效果达到最大，粒子不能通过滤饼进入到模型内部，这时过滤材料阻力进入迅速增长，进入堵塞阶段。三种状态的加灰量-压力降曲线如图7所示：

通过多次过滤过程计算得到了粒子沉积量与过滤效率变化的对应曲线以及粒子沉积量与模型压力降的对应曲线，在后文的过滤材料试验中，要与过滤材料加灰过程的阻力变化与效率变化情况进行对比分析。

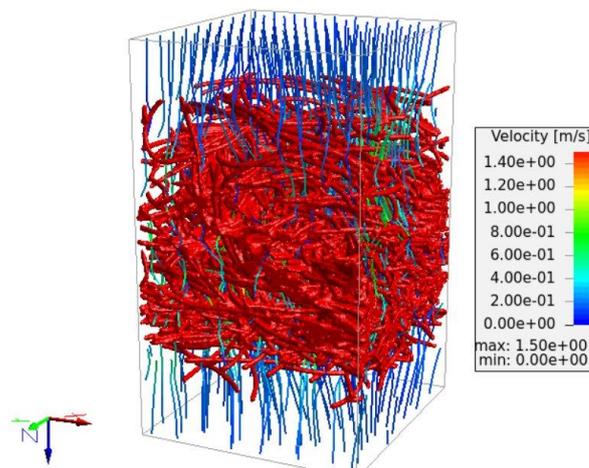


图3 流体通过过滤材料速度流线图

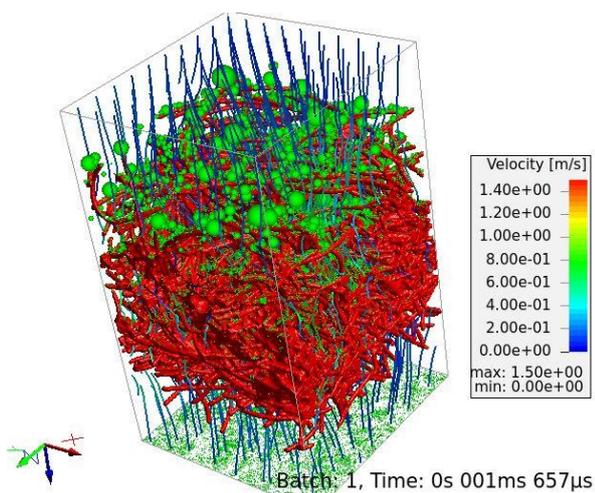


图 4 单次加灰后流体通过过滤材料的速度流线图

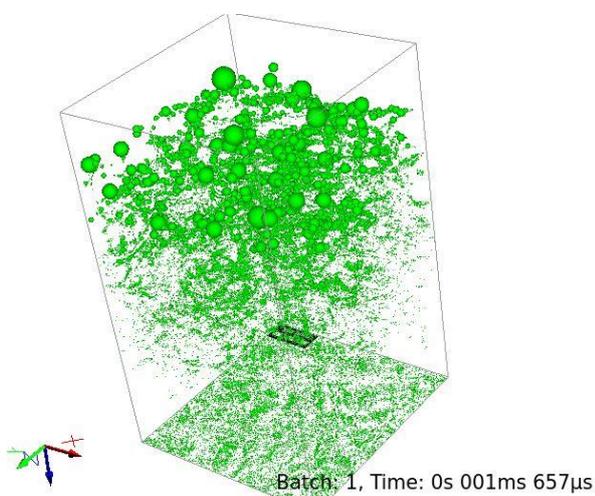


图 5 粒子单次过滤后在过滤材料流场中的分布图

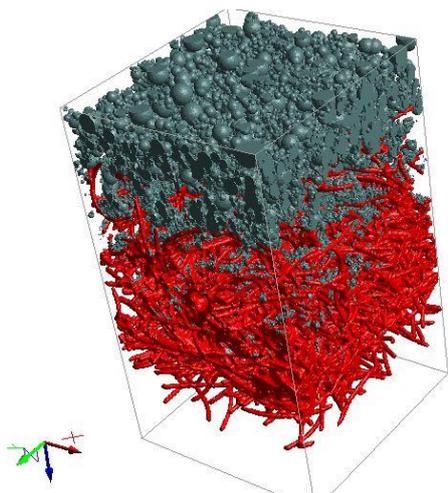


图 6 多次加灰后粉尘在过滤材料表面与内部堆积效果图

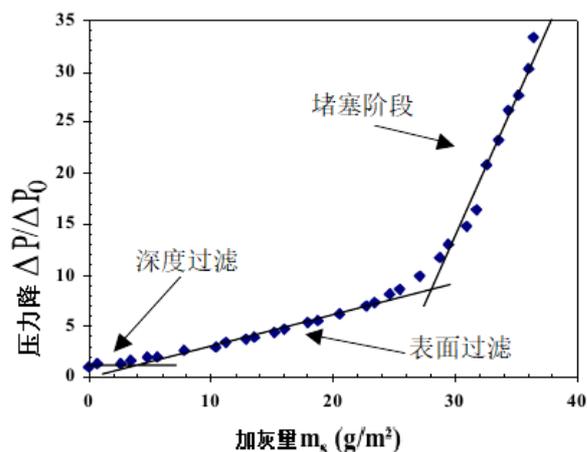


图 7 过滤过程三种状态的加灰量-压力降曲线

### 3 过滤材料性能测试

过滤材料试验过程应用空气滤清器试验室新建设的过滤材料性能试验台完成。

过滤材料性能试验台符合 GB/T 6719:2009, ISO 11057: 2011 等相关标准, 能完成滤料洁净、老化、稳定过程的阻力、效率、容尘能力等综合性能测, 试验台如图 8 所示。



图 8 过滤材料性能试验台

试验过程包括过滤材料流场性能测试、过滤材料针对定量粉尘的过滤效率性能测试和过滤材料在多次给粉尘条件下的容尘能力测试。同样, 设定流速为 0.055m/s, 过滤材料在设定流速下试验得到初始压力降为 19.08Pa, 经过解算得到的渗透率为 0.98, 试验中添加标准 ISO12103-A4 coarse dust 粉尘, 进行过滤性能试验, 经过粒子

数采集分析，可以得到材料对定量 ISO12103-A4 coarse dust 粉尘粒子的过滤效率即原始过滤效率为 99.64%。滤材多次加灰试验，记录滤材两端压力降变化，同时监测滤材试验下游通道中的粒子浓度和粒径分布。

## 4 仿真与测试结果对比分析

过滤材料试验过程中可以得到和仿真分析同类型的灰尘沉积量-压力降曲线和灰尘沉积量-过质量过滤效率以及灰尘沉积量-计数过滤效率曲线。将试验得到的三条曲线与仿真过程得到的同类型曲线进行对比分析，如图 9、10、11 所示：

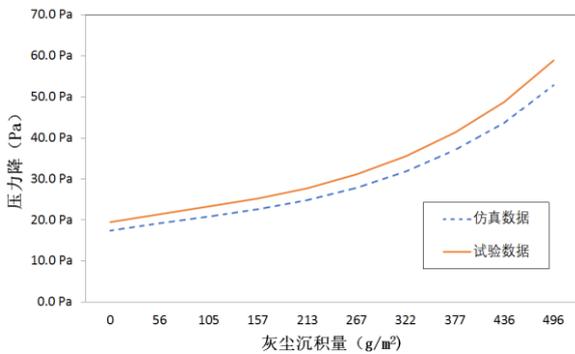


图 9 过滤材料灰尘沉积量-压力降试验数据与仿真数据对比曲线

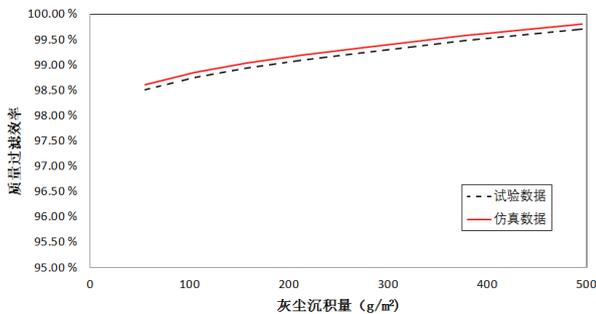


图 10 过滤材料灰尘沉积量-质量过滤效率试验数据与仿真数据对比曲线

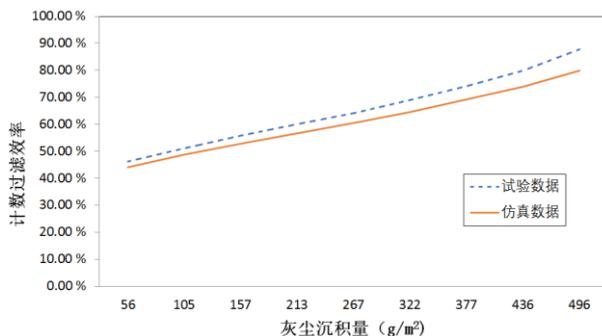


图 11 过滤材料灰尘沉积量-计数过滤效率试验数据与仿真数据对比曲线

图 9 为压力降数值仿真结果与试验结果随灰尘沉积量增加而变化的对比图，数值结果是通过 3 次仿真结果计算平均值得到的。实际测试结果是多点测试并后期曲线拟合得到的，因为在实际试验中，气流不能像仿真过程那样始终保持在一个恒定值，随着粉尘在材料中堆积的越来越多，气流通道越来越窄，单位面积流速升高。所以在对比过程中，对试验压力降数据依据初始与终了气流速率做了处理。在深度过滤与表面过滤阶段，试验结果与仿真结果达到了很好的一致性。在堵塞阶段，试验材料压力降增长速度略高于仿真过程，原因可能在于仿真过程的细微纤维在扫描形成照片后，在图像处理阶段被处理掉了，而在实际材料中这些细纤维是发挥作用的，特别是在堵塞过滤阶段，滤饼过滤后的微小颗粒很容易被细纤维捕获，而这一效应在仿真阶段是被忽略的，所以，试验得到的阻力在堵塞阶段要大于仿真数值，综合分析，实验数据与仿真数据的压力降平均误差低于 10%。

图 10、11 中过滤效率随灰尘沉积量变化，无论是质量过滤效率还是计数过滤效率，其趋势都是随着灰尘沉积量的增加，过滤效率逐步增加。试验数据与仿真数据在趋势是完全一致的，数据上也达到了一定的一致性，具体表现在试验效率略高于仿真数据，这是可以解释的，主要的原因在于为了计算量的考虑，仿真过程的数学模型采用了降噪处理后的照片，使得有一部分细微的材料构造部分被忽略掉了，而在实际过滤过程中，这一部分是起作用的，而且其作用是逐步增强的。因为相对于粉尘颗粒来说，小颗粒更容易被细微的纤维捕集。但是由于仿真模型大部分还原了真实过滤材料结构特性，故试验过程和仿真计算得到的滤清效率值，其误差仍处于可以接受的范围内。

## 5 结论

为了研究过滤材料的构造特性在材料性能中所表现出来的影响，从而在材料结构研究中合理调配材料纤维要素，构造合理有效的过滤材料，满足特殊的使用要求。需要在传统研究过程即微观测量、流量测试和容尘测试之前，构造材料的三维仿真结构模型，应用计算机仿真的方法，对材料的性能进行估计。

依据 SkyScan 电镜扫描设备和 GeoDict 软件建立复杂的基于实际材料结构的三维结构模型,应用流体力学计算模型,科学解析流体穿过纤维几何体的渗透特性和流阻特性,考虑粒子与虚拟纤维的作用模式,计算材料模型在虚拟粒子的作用下,材料的过滤效率特性和容尘能力特性,仿真计算结果与材料的试验室试验结果进行了对比分析,达到了很好的一致性,误差均控制在 10%

## 参 考 文 献

- [ 1 ] NASSEHI V, HANSPAL N S, WAGHODE A N, et al. Finite-element modelling of combined free/porous flow regimes: simulation of flow through pleated cartridge filters[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(4): 995—1006.
- [ 2 ] 罗国华, 梁云, 郑焱嵩, 胡键, 曾靖山.CT扫描技术纸张结构研究中的应用[J]. 造纸科学与技术, 2006, 6.

以下。

另外,通过某一过滤材料特性的建模仿真与试验室试验研究,建立了一种过滤材料可视化优化设计的设计流程。可以在新型高效低阻长寿命周期空气滤清器的研发过程中,突破靠选型进行优化配置过滤材料的困境,这一新型研发流程的建立,可以显著降低材料加工投入和试验成本,加速新材料优化研发进程。

- [ 3 ] R. C. Brown. Air Filtration , an Integrated Approach to the Theory and Application of Fibrous Filters[M] , Pergamum Press. Oxford , 1993
- [ 4 ] J. Ohseru. F. Mücklich . Tatistical Analysis of Microstructures in Materials Science[M] . John Wiley & Sons , 2000
- [ 5 ] A. Lat z, A. Wiegmann . Simulation of Fluid Particle Separation in Realistic Three Dimensional Fibre Structures[J], Filtech Europa , Düsseldorf , 2003