

# 机车用折角式过滤器特性的数值模拟

林秀丽<sup>1</sup>, 曹亚平<sup>1</sup>, 董思敬<sup>2</sup>, 柳静献<sup>1</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 大同市赛诚机车设备有限责任公司, 山西 大同 037038)

**摘 要:** 研究了不同风速下通道宽度、折角角度及折角个数对机车用折角式过滤器阻力的影响, 重点分析了高风速( $\geq 5$  m/s)下过滤器的性能. 结果表明: 高风速下, 16 mm 通道宽度过滤器的阻力增加迅速, 对 16 mm 和 20 mm 通道宽度的过滤器而言, 在 6.5 m/s 风速下, 间距增加 25%, 阻力减少 36%. 折角角度的改变会显著影响过滤器的阻力, 在高风速下这一特征更加明显. 在相同通道宽度, 通道长度减少 29% 的情况下, 二折角过滤器的阻力较三折角过滤器平均减少 40%. 在高风速、低阻力使用条件约束下, 可依据研究结果设计过滤器几何参数, 将折角过滤器作为多级过滤的第一级.

**关 键 词:** 折角空气过滤器; 数值模拟; 阻力特性; 过滤效率; 机车

中图分类号: TB 472

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)03-0436-05

## Numerical Simulation on Characteristics of Crankle Air Filter Used in Locomotive

LIN Xiu-li<sup>1</sup>, CAO Ya-ping<sup>1</sup>, DONG Si-jing<sup>2</sup>, LIU Jing-xian<sup>1</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Datong Saicheng Locomotive Equipment Co., Ltd., Datong 037038, China. Corresponding author: LIN Xiu-li, E-mail: linxiuli@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The influence of channel width, crangle angle and crangle number on the pressure drop of crangle air filter used in locomotive was studied. The characteristics of crangle air filter under higher flow velocity ( $\geq 5$  m/s) was analyzed emphatically. The results show that the pressure drop of filter with 16 mm channel width increases fast under higher air flow velocity. The pressure drop decreases 36% if the channel width increases 25% under 6.5 m/s air flow velocity for 16 mm and 20 mm channel width filter. The change of crangle angle affects the pressure drops obviously under higher air flow velocity. The pressure drop decreases 40% when the crangle number decreases from 3 to 2, and the channel thickness decreases about 29%. Under conditions of high wind speed and low pressure drop, the geometrical parameters of the filter can be designed according to the research results, and the crangle filter can be used as the first stage of multi-stage filtration.

**Key words:** crangle air filter; numerical simulation; pressure drop characteristics; filtration efficiency; locomotive

为了保证机车正常工作, 一些发热部件需要采取强迫通风措施冷却降温, 以免部件过热而引发故障. 气流通过发热部件前需要先通过过滤器以除掉大颗粒粉尘及雨水, 但因吸入气流风机性能及空间的局限性, 要求前端过滤器的阻力不能太高, 这与冷却风需求量变大成为矛盾. 相比于传

统的双 V 形结构空气过滤器及管带式空气过滤器, 折角式空气过滤器具有结构简单、免维护拆洗、阻力低效率高等优点<sup>[1]</sup>. 但随着机车性能的不断提高以及应用地域日趋广泛, 折角式过滤器使用环境条件也日趋复杂, 在大风速下保持低阻力的折角式过滤器成为选择折角式过滤器的限制

条件。

机车用空气过滤器的形式主要有 VV 型、管  
韩式、旋风式、纤维过滤式等多种。Baskakov 等对  
U 型冲击过滤器进行了阻力和效率的分析<sup>[2]</sup>。  
Huard 等对离心力作用下的快速分离技术进行了  
综述分析<sup>[3]</sup>。Antonio 等对涡轮增压发动机颗粒物过  
滤进行了研究,但主要针对轴流旋风过滤器<sup>[4]</sup>。  
国外学者对旋风式过滤器研究较多,对折角式过  
滤器研究则很少<sup>[5-8]</sup>。国内有一些学者对机车用  
过滤器进行了模拟研究,但主要涉及管韩式、VV  
型、旋风式等。如冯明坤对管韩式和 VV 型过滤器  
的性能进行了模拟分析<sup>[9]</sup>;张一对管韩式和折角  
式过滤器进行了模拟分析和设计优化,对于折角  
式过滤器而言,仅对较低风速下单一形式的折角  
过滤器阻力特性进行了分析<sup>[10]</sup>。由于折角式过滤器  
是随着国外的机车一起于近年引入我国,所以  
研究者较少,尤其是高风速下折角式过滤器的性  
能尚需进行进一步的研究。

计算流体力学的发展使得 CFD 技术广泛应  
用于涉及流体动力学设计的领域,具有速度快、成  
本低、重复性好等优点。我国折角式过滤器主要引  
进德国技术并进行了生产应用,对其性能缺乏系  
统了解。本文利用模拟分析方法,分析结构因素对  
折角式过滤器阻力的影响,为确定可接受阻力下  
折角过滤器几何参数提供指导。

### 1 折角式过滤器的结构与工作原理

折角式过滤器的结构如图 1 所示。图 1 中显  
示的折角过滤器由 3 个 37°折角,3 个逆气流方向  
弯钩和 16 mm 通道宽度的多个通道组成。含尘及  
雨滴气流由导流口进入折角通道,流线型导流口  
引导气流与侧壁成一定角度进入通道。气流在折  
角通道内做弯转运动,粉尘或雨滴在惯性作用下  
脱离气流被甩向倾斜的折角及弯钩内壁,与折角  
及弯钩内壁碰撞后在重力作用下沿内壁沉降至灰  
斗中,实现了粉尘、雨滴与气流的分离。弯钩可起  
到阻止粉尘或雨滴在气流冲刷下进一步沿通道运  
动的作用,提高了过滤效率。折角式过滤器通常用  
于防止粗颗粒及雨水进入设备区域,影响设备的  
正常工作。

为研究过滤器几何因素对其阻力的影响,本  
研究在原有折角式过滤器结构形式的基础上,通  
过改变通道宽度、折角角度、折角个数的方式,对  
折角式过滤器进行新设计。即将折角角度变为  
30°和 45°,折角个数不变;将三折角变为二折角

过滤器,过滤器厚度由 68 mm 变为 48 mm;改变  
过滤器通道宽度分别为 16,17,18,19,20 mm。对  
不同风速下各结构折角过滤器的阻力进行模拟研  
究,以分析不同结构对过滤器阻力的影响。

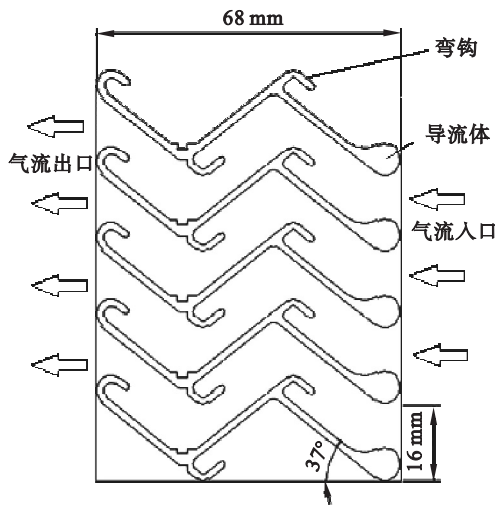


图 1 折角式过滤结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of crankle air filter

## 2 折角式过滤器流场模拟

### 2.1 模拟模型的建立

折角式过滤器二维几何模型如图 2 所示,通  
道左右两侧边界设为周期边界。距过滤器 10 mm  
处设为进口边界,距上部弯钩顶端 20 mm 设为出  
口边界。进口边界条件设定为速度入口,出口为自  
由出流。运用 Gambit 进行网格划分,经检查网格  
质量良好。将网格文件导入流体力学软件中进行  
计算验证,确定网格数目不会对计算结果产生影  
响。

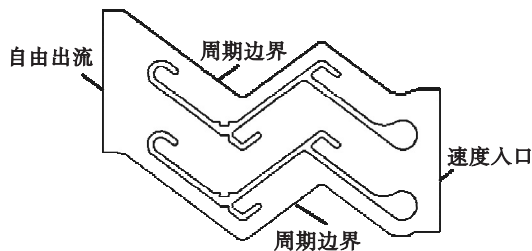


图 2 折角式过滤器二维几何模型  
Fig. 2 2D geometric model of crankle air filter

本文选用标准  $\kappa-\varepsilon$  模型来进行数值计算,  
近壁处理选用标准壁面函数。

在  $\kappa-\varepsilon$  模型中, $\kappa,\varepsilon$  分别用它们的输运方程  
解出,其封闭方程为

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + u_k \frac{\partial \kappa}{\partial x_k} = 2\nu_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( v + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_k} \right] - \varepsilon,$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = C_{\varepsilon 1} \frac{\kappa}{\varepsilon} 2 \overline{\nu_t} S_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] -$$
$$C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i} \right).$$

式中： $\nu$  为流体运动黏度； $\nu_t$  为涡黏性系数；模型常数  $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92$ .

2.2 数值模拟与实验测试的对比

建立 37° 三折角, 18 mm 通道宽度过滤器几何模型, 设定进口风速从 1 m/s 依次递增 0.5 m/s 至 5 m/s. 风速为 5 m/s 时, 过滤器流场的速度云图如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 气流在过滤器内呈“S”形流动. 过滤器弯钩部分风速较低, 有利于粉尘在此部分的捕集与沉降; 转弯处通道变窄, 风速增大, 有利于增加粉尘所受离心力而从气流中分离. 过滤器内的压力分布状态如图 4 所示, 由过滤器实际入口和出口面的平均压力, 可得出过滤器的阻力.

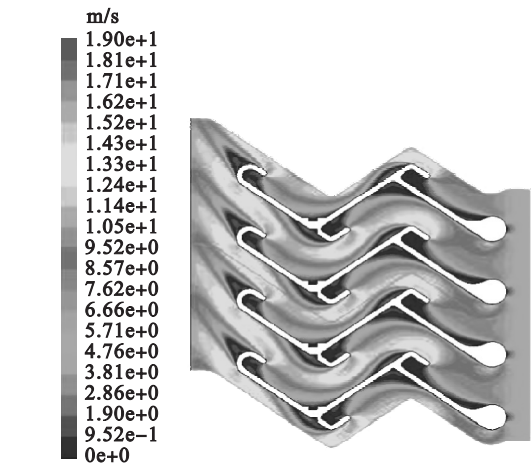


图 3 5 m/s 进口风速下速度云图

Fig. 3 Velocity cloud field under inlet velocity of 5 m/s

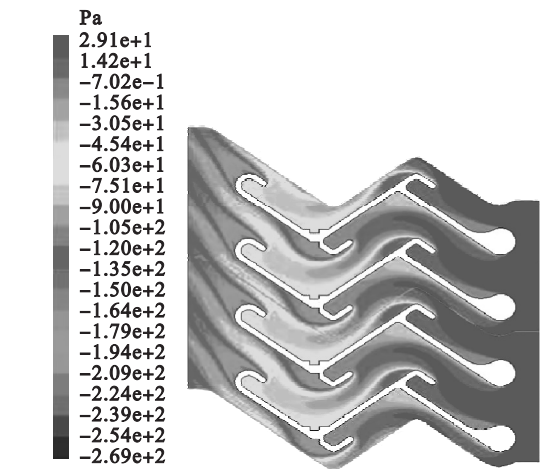


图 4 5 m/s 进口风速下压力云图

Fig. 4 Pressure cloud field under inlet velocity of 5 m/s

将阻力模拟值与实测数据进行对比, 结果见图 5. 实验结果引自文献[10]. 通过对比发现模拟

值比实测值偏低, 可能原因是模拟模型不能完全反映湍流能量损失. 但二者基本趋势一致, 数值接近, 可以为设计提供参考.

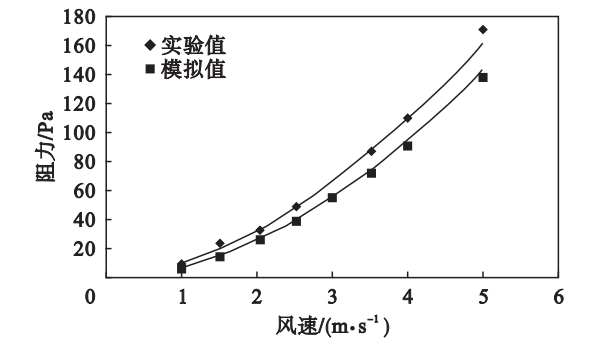


图 5 模拟值与实测阻力值的对比  
Fig. 5 Comparison of simulation and test results

3 模拟结果及分析

3.1 通道宽度对过滤器阻力的影响

对折角角度为 37°, 折角数为 3 的过滤器进行通道宽度分别为 16, 17, 18, 19, 20 mm, 不同入口风速下阻力变化趋势的研究, 所得结果见图 6 和图 7. 由图 6 可以看出, 过滤器的阻力随着风速的增加而增大, 16 mm 间距过滤器的阻力增加迅速, 随着通道宽度的增加, 阻力随风速的增加值逐渐变小. 在 6.5 m/s 的进口风速下, 16 mm 间距过滤器阻力为 287 Pa, 20 mm 间距过滤器阻力为 183 Pa, 即间距增加 25%, 阻力减少 36%. 由图 7 可以看出, 通道宽度为 16 mm 与 17 mm 的过滤器阻力在高风速下差别明显; 随着通道宽度的增加, 不同风速下阻力差变小.

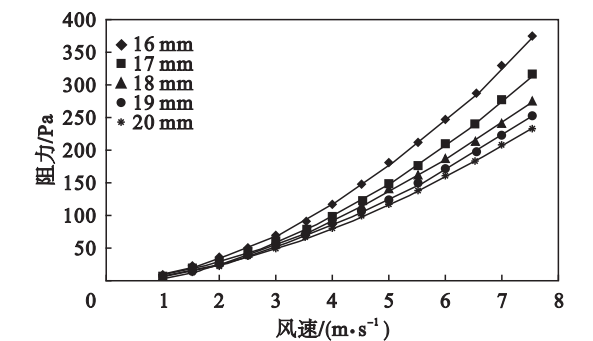


图 6 不同通道宽度下 37° 三折角过滤器阻力特性  
Fig. 6 Pressure drop characteristics under different channel width of 37° three crankles air filter

3.2 折角角度对过滤器阻力的影响

对于三折角过滤器, 分别将过滤器折角角度变为 30° 和 45°, 在通道宽度为 18 mm 的情况下, 对不同风速下折角过滤器的流场进行模拟, 结果见图 8.

由图 8 可看出,过滤器折角角度改变很小的数值时,其阻力特性的改变是很明显的,折角角度由 30° 变为 45° 时,在 6.5 m/s 风速下,阻力由 165 Pa 增加为 303 Pa,且风速越高,这种影响越明显.

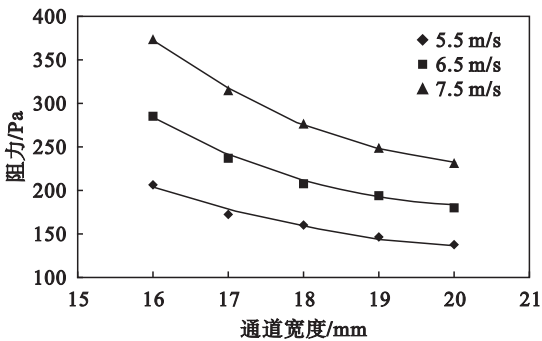


图 7 高风速下不同通道宽度过滤器阻力特性  
Fig. 7 Pressure drop characteristics under different channel width at higher flow velocity

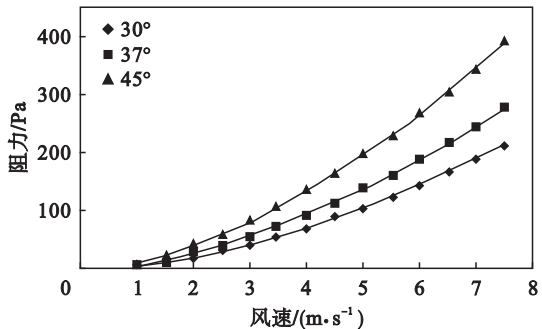


图 8 不同折角角度过滤器的阻力特性  
Fig. 8 Pressure drop characteristics under different crankle angles

### 3.3 折角个数对过滤器阻力的影响

二折角过滤器相对于三折角过滤器而言,只是在三折角的基础上减少了一个折角,即通道长度减少近 1/3,其他尺寸未变. 37° 三折角及二折角过滤器在入口风速为 7.5 m/s 情况下,不同通道宽度过滤器阻力值的模拟结果如图 9 所示. 从图中可以看出,二折角过滤器阻力随通道宽度的变化趋势与三折角过滤器的变化基本一致. 但在通道宽度相同,通道长度减少 29% 的情况下,二折角过滤器的阻力较三折角的减少了 40% .

图 9 中同时比较了折角角度为 30° 和 37° 的三折角过滤器阻力随通道宽度的变化情况,可以看出,通道宽度对 37° 折角过滤器阻力的影响较大,折角为 30° 过滤器阻力随通道宽度的变化较平缓.

由以上研究可知,过滤通道宽度、折角角度、折角个数均能影响其阻力特性,且风速高时这种影响更加明显. 为减小阻力,可考虑适当增大过滤

通道宽度,减小折角角度或减少折角数量. 对于风速 7.5 m/s,如果要求过滤器阻力小于 250 Pa,则通道宽度为 20 mm 的 37° 三折角过滤器、通道宽度大于 17 mm 的 30° 三折角过滤器及通道宽度大于 16 mm 的 37° 二折角过滤器都可以达到要求. 本研究为阻力约束情况下过滤器的设计提供了参考.

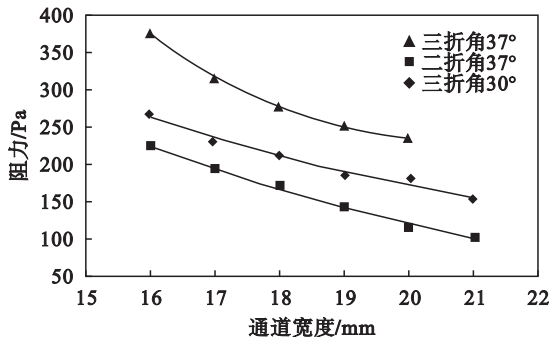


图 9 不同折角个数过滤器阻力特性  
Fig. 9 Pressure drop characteristics under different crankle number

## 4 过滤器除尘效率的数值估算

除过滤器阻力外,过滤效率是过滤器的主要性能指标. 为初步分析折角式过滤器在不同风速下对粗颗粒粉尘的过滤效率,运用数值模拟方法进行了数值估算. 参考过滤器在机车中实际应用的尺寸,构建过滤器的三维模型. 对于折角式惯性过滤器而言,过滤器的阻力与效率变化趋势通常相反. 选择通道宽度为 20 mm 的 37° 三折角过滤器为对象进行模拟研究,过滤器高度为 75 cm,如图 10 所示.

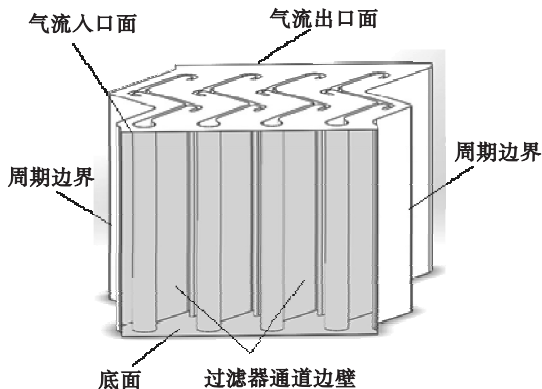


图 10 折角式过滤器三维模型  
Fig. 10 3D geometric model of crankle air filter

根据所创建的三维模型,设定出口面为 escape 类型,底面为 trap 类型,过滤器边壁为 reflect 类型.



选用颗粒物为沙粒,密度  $2\,650\text{ kg/m}^3$ ,考虑沙粒的重力影响,设定沙粒从进口面与气流同时进入过滤器内.考虑到沙粒相对较大,与壁面碰撞后会有一定动量损失,设定切向和法向的恢复系数均为 0.5.沙粒质量载荷设定为  $0.01\text{ kg/s}$ ,因质量载荷相对较小,颗粒相对气流的影响甚微,采用相间非耦合计算.流经折角式空气过滤器的空气中粉尘的体积分数很低,可以认为颗粒与颗粒之间不存在相互作用,用离散相模型(discrete model)进行求解,采用颗粒随机轨道模型对沙粒进行数值计算.

改变进气口气流风速,得到在不同风速下进入过滤器的颗粒物总数及被过滤结构所捕集的颗粒数目,进而即可计算出过滤器对沙粒的除尘效率,所得结果如图 11 所示.

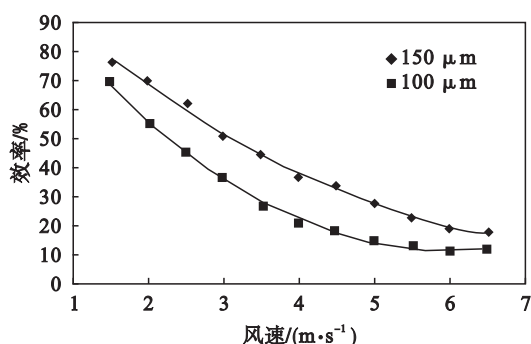


图 11 不同风速下过滤器过滤效率

Fig. 11 Filter efficiency under different inlet air velocity

由图 11 可知,当进口风速小于  $3\text{ m/s}$  时,过滤器对  $150\text{ }\mu\text{m}$  沙粒的效率大于 50%.随着风速的增大以及沙粒粒径的减小,过滤效率会显著降低.这是因为风速越大、沙粒粒径越小越容易被气流夹带出过滤结构,从而导致过滤效率降低.

某机车厂试制了  $21\text{ mm}$  二折角过滤器并进行了实验,结果表明,该过滤器对于粒径为  $150\text{ }\mu\text{m}$  以上的沙尘,在  $7.5\text{ m/s}$  风速下过滤效果不理想,但滤水效果较好.将其与纱网( $210\text{ }\mu\text{m}$ )相结合,可实现高风速下高效、低阻滤尘滤水.可见在高风速下,折角过滤器可作为多级过滤的第一级.

## 5 结论

1) 构建具有周期性边界的二维几何模型,采用标准  $\kappa-\varepsilon$  模型对机车折角式空气过滤器的气相流场进行数值计算,所得的阻力值与实测值趋

势一致,结果接近.此方法可以分析过滤器的阻力特性,并为过滤器的选型提供依据.

2) 折角过滤器的阻力随着风速的增加而增大.通道宽度为  $16\text{ mm}$  的过滤器阻力随风速的增大而迅速增大; $18\text{ mm}$  及以上通道宽度过滤器在相同风速下,阻力差异变小.

3) 折角角度的改变会显著影响过滤器的阻力特性,在高风速下这一特征更加明显.折角个数对阻力影响也较大,在相同风速下,二折角较三折角过滤器的阻力减少约 40%.

4) 过滤器在低风速下对粗颗粒粉尘过滤性能较好,随着风速的提高过滤效率则会显著下降.在高风速下,可将之作为多级过滤的第一级.

## 参考文献:

- [1] 陶景奇,董思敬,李永胜. HX-D2 型机车空气过滤器研发及产业化[J]. 内燃机车, 2011, 451(9): 20-22.  
(Tao Jing-qi, Dong Si-jing, Li Yong-sheng. HX-D2 locomotive air filter development and industrialization[J]. Internal Combustion Locomotive, 2011, 451(9): 20-22.)
- [2] Baskakov A P, Mudrechenko A V, Bubenchikov A M, et al. Modeling of U-beam separator[J]. Powder Technology, 2000, 107(1): 84-92.
- [3] Huard M, Briens C, Berruti F, et al. A review of rapid gas-solid separation techniques[J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2010, 8(1): 47-54.
- [4] Antonio F, Nicholas B. Turboshift engine air particle separation[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2010, 46(5/6): 224-245.
- [5] Maynard A D. Modelling axial flow cyclone performance[J]. Journal of Aerosol Science, 1998, 29(1): S1089-S1090.
- [6] Gimbin J, Chuah T G, Choong T S Y, et al. A CFD study on the prediction of cyclone collection efficiency[J]. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 2005, 6(3): 161-168.
- [7] Hsiao T C, Chen D R, Li L, et al. Development of a multi-stage axial flow cyclone[J]. Aerosol Science and Technology, 2010, 44(4): 253-261.
- [8] Hsiao T C, Chen D R, Greenberg P S, et al. Effect of geometric configuration on the collection efficiency of axial flow cyclones[J]. Journal of Aerosol Science, 2011, 42(2): 78-86.
- [9] 冯明坤. 电力机车用过滤器阻力特性及过滤特性的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.  
(Feng Ming-kun. Research on resistance characteristic and filtration characteristic of filter used on electric locomotive[D]. Changsha: Central South University, 2009.)
- [10] 张一. 机车惯性除尘器风流模拟与结构优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.  
(Zhang Yi. Ventilation simulation and structure optimization for air filter of locomotive[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.)