

长径比对颗粒物捕集器压降交点及内部流场的影响

魏明亮^{1,2}, 李志丹^{1,2}, 田波³, 李青³, 颜伏伍³, 王宇³

(1. 智能农业动力装备全国重点实验室, 河南 洛阳 471039; 2. 洛阳拖拉机研究所有限公司, 河南 洛阳 471039; 3. 武汉理工大学汽车工程学院, 武汉 430070)

摘要: 本文通过建立DPF一维及三维1/4孔道离散相模型, 研究了长径比对ACT与SCT载体的压降交点、内部流场及颗粒物沉积迁移规律的影响。结果表明: 灰分量提高、进气流量降低会使ACT与SCT载体的压降交点减小; SCT载体在高长径比(1.6)时压降特性更优, 反之则ACT载体; ACT载体进/出口孔道气流速度均高于SCT载体, 高长径比载体进口孔道气流速度明显高于低长径比载体, 出口孔道气流速度则相反; 颗粒在孔道壁面沉积呈现明显的前少后多不均匀性, 长径比增大可提高载体的颗粒物捕集效率, 本文研究结果可为农用柴油机DPF选型提供科学理论指导, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 动力机械及工程; 柴油机颗粒物捕集器; 压降; 非对称载体; 内部流场; 颗粒沉积

中图分类号: TK421+.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)11-3125-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221648

Effect of length-to-diameter ratio on DPF pressure drop intersection point and internal flow field

WEI Ming-liang^{1,2}, LI Zhi-dan^{1,2}, TIAN Bo³, LI Qing³, YAN Fu-wu³, WANG Yu³

(1. State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Luoyang 471039, China; 2. Luoyang Tractor Research Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, China; 3. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In this study, the influence of aspect ratio on the pressure drop intersection, internal flow field, and particle deposition of ACT and SCT carriers were investigated. 1D and 3D 1/4 orifice discrete phase models of DPF were established. The results showed that with the increase of the ash content and the decrease of the inlet flow rate, the pressure drop intersection point of ACT and SCT carriers decreased. High aspect ratios (1.6) resulted in better pressure drop characteristics for SCT carriers, while low aspect ratios were better for ACT carriers. The airflow velocity in the inlet/outlet orifice of ACT carriers was higher compared to that of SCT carriers. High aspect ratio carriers had significantly higher airflow velocity in the inlet orifice, while the velocity in the outlet was lower. The particle deposition on the wall of the pore

收稿日期: 2023-01-01.

基金项目: 拖拉机动力系统国家重点实验室开放课题项目(SKT2022009); 中国机械工业集团有限公司青年科技基金项目(QNJJ-PY-2022-39).

作者简介: 魏明亮(1988-), 男, 高级工程师. 研究方向: 农用柴油机整机研发及排放控制.

E-mail: weimingliang25@163.com

channel was uneven. Increasing the aspect ratio of the carrier improved the particle trapping efficiency. The results of this paper can provide scientific and theoretical guidance for the selection of DPF for agricultural and have certain engineering application value.

Key words: power machinery and engineering; diesel particulate filter; pressure drop; asymmetric carrier; internal flow field; particle deposition

0 引言

柴油机是农林机械的重要动力源,对促进农林业的现代化发展至关重要^[1]。然而,柴油机的有害污染物尤其是碳烟颗粒物排放对人体健康和环境也造成了日益严重的危害。为此,我国颁布了非道路移动机械第四阶段排放标准(非道路国IV)^[2,3],对相关污染物的排放量进行了严格的限制。目前仅依靠柴油机机内净化技术已经无法满足日益严格的排放法规要求,尾气后处理装置已成必需。已有研究表明通过氧化型催化转化器(Diesel oxidation catalyst, DOC)、柴油机颗粒物捕集器(Diesel particulate filter, DPF)、选择性催化还原技术(Selective catalytic reduction, SCR)的集成化使用可高效地处理柴油尾气中各类污染物,但在实际车载后处理系统的集成安装布局中,需协同优化各装置的空间位置及分布。DPF是后处理系统中重要的组成部分并占据了主要空间^[4,5]。因此,对DPF结构进行优化是实现后处理系统高度集成化的关键。

载体结构对DPF运行特性有着重要影响,文献[6-9]提出了一种通过改变DPF进/出口孔径比例的方法来提高进口孔径,相较于进/出口孔径一致的对称孔结构载体(Symmetrical cell technology, SCT),非对称孔结构载体(Asymmetric cell technology, ACT)由于其较大的进口孔径使得在相同的灰分量时层状灰分更薄,可增加载体的容灰能力。陈贵升等^[10]研究了非对称结构载体不同进/出口孔径比例的压降特性捕集效率,结果表明ACT载体进/出口孔径比例在1.2~1.4时压降和捕集效率综合最优;沈颖刚等^[11]研究了ACT载体不同进/出口孔径比例对柴油机运行特性的影响,结果显示进/出口孔径比为1.3时柴油机综合性能最佳。ACT与SCT载体压降在随碳载量变化时会出现一个相交的点,称之为压降交点;该

点是两者载体容灰性能的分界点,该点数值越小,表明ACT载体较SCT载体的压降特性更优。

一维模拟计算仅能从宏观层面说明DPF运行特性的变化规律,而通过对DPF孔道内部流场和微粒迁移特性研究可进一步从微观上分析DPF压降与捕集效率变化的根本原因。然而DPF结构较为复杂,其内部流场较难直接观察^[12],因此通过构建DPF 1/4孔道模型进行仿真研究可了解其内部的工作状态。朱亚永等^[13]研究了排气流量、进口温度等对微粒沉积特性的影响,结果表明沿轴向方向微粒沉积量呈先减小后增大的趋势;李志军等^[14]构建了洁净DPF 1/4孔道计算模型,研究结果表明沿DPF轴向进气孔道内气流速度逐渐降低,排气孔道内速度逐渐增大。

综合国内外研究现状可以发现目前针对DPF载体结构优化大多集中在壁厚、目数、对称或非对称孔结构等,对其长径比(载体长度/载体直径)的影响却鲜有研究,而长径比对载体在后处理集成系统中的空间布局具有重要影响,同时对其经济性也尤为重要。因此,本文通过耦合排气流量、灰分量探究长径比对ACT/SCT载体压降交点的影响特性,并从微观角度分析了其对DPF孔道流场及颗粒沉积特性的影响规律。

1 模型建立

1.1 DPF一维模型构建及验证

DPF一维热力学模型如图1所示,载体结构参数如表1所示,为便于计算,对模型中载体相关参数做出如下假设:①忽略胶粘区域,载体视为绝

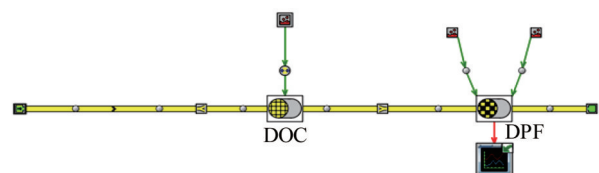


图1 DPF一维模型

Fig. 1 One-Dimensional pressure drop model

表 1 DPF 载体结构参数

Table1 Carrier structure parameters

参数	数值
目数	300
材料	碳化硅
容积/L	4.56
载体长度/mm	203
载体直径/mm	169
壁厚/mm	0.254
对称载体孔径/mm	1.21
非对称载体进口孔径/mm	1.371
非对称载体出口孔径/mm	1.055

热材料;②排气视为理想气体,假设所有排气颗粒物粒径相同且均匀分布;③碳烟层在通道内均匀分布,忽略碳烟迁移作用;④气流进入 DPF 过程视为层流运动^[11,14]。基于前人的研究结果^[11],本文选取进/出口孔径比为 1.3,本文灰分分布系数定义为层状灰分质量/总灰分质量,以下用 M 表示,如式(1)所示。ACT 载体结构如图 2 所示: $D_1 > D_2$;在 SCT 载体中,则 $D_1 = D_2$ 。

$$M = \frac{m_{\text{Layer}}}{m_{\text{Layer}} + m_{\text{Plug}}} \quad (1)$$

DPF 整体压降 ΔP 主要由入口处收缩造成的压降 ΔP_1 、进口孔道摩擦产生的压降 ΔP_2 、碳烟滤饼层压降 ΔP_3 、灰分层压降 ΔP_4 、过滤壁面压降 ΔP_5 、出口孔道摩擦产生的压降 ΔP_6 和出口处扩张造成的压降 ΔP_7 等 7 个部分组成(图 3),服从达西定律^[13]。排气从进口孔道流入,经过滤壁面从相邻的出口孔道流出,在此过程中,排气分别满足质量守恒、动量守恒和能量守恒三大基础定律,如式

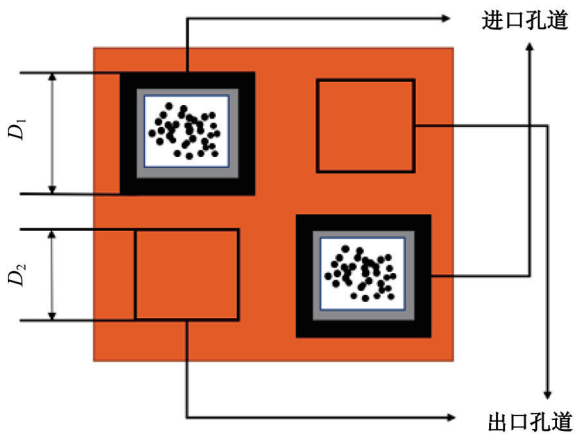
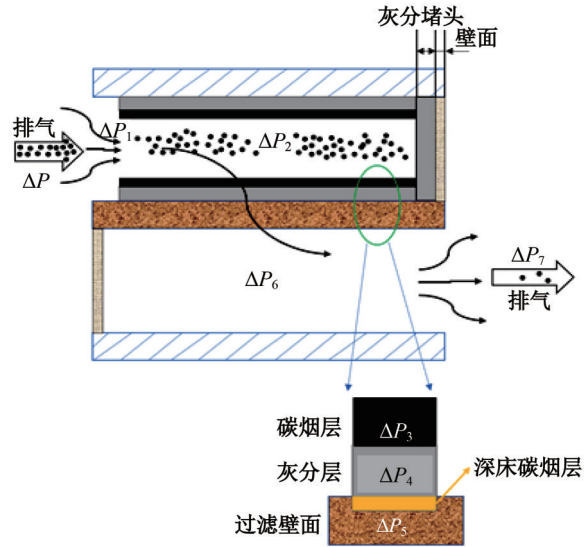


图 2 ACT 载体内部孔道结构

Fig. 2 ACT carrier internal pore structure



$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 + \Delta P_6 + \Delta P_7$$

图 3 DPF 压降组成

Fig. 3 Pressure crop composition of DPF

(2)~(4)所示^[6]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial c}{\partial x} + c \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho c}{F} \times \frac{F}{dx} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + c \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \times \frac{\partial p}{\partial x} + f \frac{c^2}{2} \times \frac{c}{|c|} \times \frac{4}{D} = 0 \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) - a^2 \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \rho (\kappa - 1) \left(q + cf \frac{c^2}{2} \times \frac{c}{|c|} \times \frac{4}{D} \right) = 0 \quad (4)$$

式中: ρ 、 c 、 F 、 p 分别为进口截面的气流密度、流速、孔道截面面积和压力; f 为气体摩擦因数; q 为单质量流体的传热率; D 为当量直径。

DPF 碳载量设置为 2 g/L,发动机转速范围为 1 000~2 400 r/min,柴油机相关技术参数如表 2 所示。由图 4 可知,各个转速下模拟值与试验值误差均较小且变化趋势一致,该模型符合预测要求,可用于 DPF 压降研究。

1.2 DPF1/4 孔道模型构建及验证

流体运动遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒三大基础定律,本文构建 DPF 孔道内壁面由多孔介质构成,理想的流动速度 u_w 与真实流动速度 u 之间满足 Dupuit-Forchheimer 关系,如式(5)所示。气流通过多孔介质壁面的压降满足 Darcy 定律,高速气流需要附加一个动量源项,如式(6)所示。层流运动的气流只考虑黏性损失, β 可视

表 2 D30 TCI 发动机主要参数

Table 2 Main parameters of D30 TCI engine

发动机指标	技术参数
发动机型式	直列 4 缸、增压中冷、高压共轨系统
缸径/mm×行程/mm	95×105
排量/L	2.977
额定功率/kW	110(3 200 r·min ⁻¹)
最大扭矩/(N·m)	400(1 600~2 600 r·min ⁻¹)

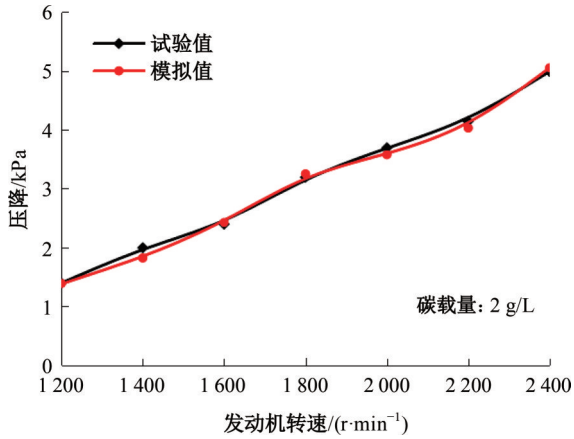


图 4 模型验证结果

Fig. 4 Model validation results

为零。

$$u_w = \delta u \quad (5)$$

$$\Delta p = \underbrace{-\frac{\mu}{k_w} u_w \omega}_{\text{Darcy}} + \underbrace{+\beta \rho u_w^2 \omega}_{\text{Forchheimer}} \quad (6)$$

模型将颗粒视为稀疏的离散相,忽略粒子间的相互作用及粒子体积分数对流体相的影响,离

散相粒子轨迹通过求解拉氏坐标下颗粒作用力的微分方程得到^[15]。

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho_1)}{\rho_p} + F_x \quad (7)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D R_e}{24} \quad (8)$$

$$R_e = \frac{\rho_1 d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (9)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{R_e} + \frac{a_3}{R_e^2} \quad (10)$$

式中: u 为连续相速度; u_p 为颗粒速度; $F_D(u-u_p)$ 为颗粒单位质量曳力; g_x 为 x 方向重力加速度; ρ_p 为颗粒密度; ρ_1 为流体密度; F_x 为 x 方向的其他作用力; R_e 为颗粒相对雷诺数; C_D 为曳力系数; μ 为流体动力粘度; d_p 为颗粒直径。

基于DPF载体构建1/4孔道的三维模型,这里仅展示长径比为1.2的非对称孔结构两种模型(图5),不同参数的载体只需改变模型几何尺寸即可得到,孔道模型网格质量均达到1左右。

模型边界参数设置如表3、表4所示,采用洁净的300目对称结构DPF孔道模型进行可靠性验证,DPF进/排气孔道中心线无量纲速度的模拟值与文献[16]值的对比如图6所示,可知模拟值与文献中值的误差较小,满足仿真预测要求。

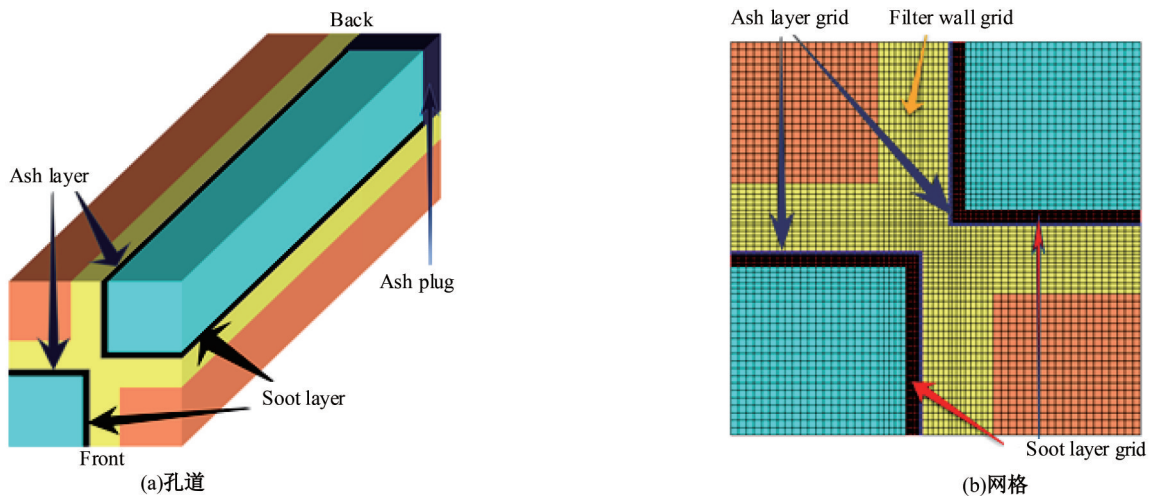


图 5 DPF1/4孔道和网格模型

Fig. 5 DPF 1/4 channel model and grid model

表 3 流动模型相关参数
Table 3 Related parameters of flow model

参数	数值
气相密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.5
气体粘度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	3.3×10^{-5}
孔隙率	0.435 8
壁厚/mm	0.254
入口速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	58.95
颗粒直径/mm	0.000 1
壁面渗透率/ m^2	3.35e^{-13}

表 4 微观孔道流动模型相关计算参数
Table 4 Calculation parameters of microscopic channel flow model

参数	数值
发动机转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	2 000
入口流量/($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	431.9
DPF 入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	474.3
DPF 出口压力/kPa	101
DPF 出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	19.8
颗粒入射速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	58.95

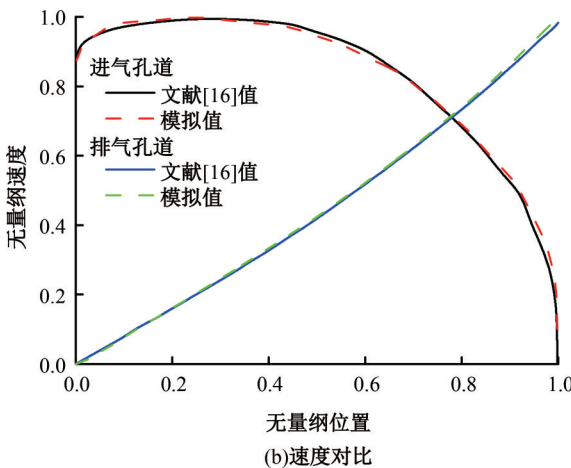
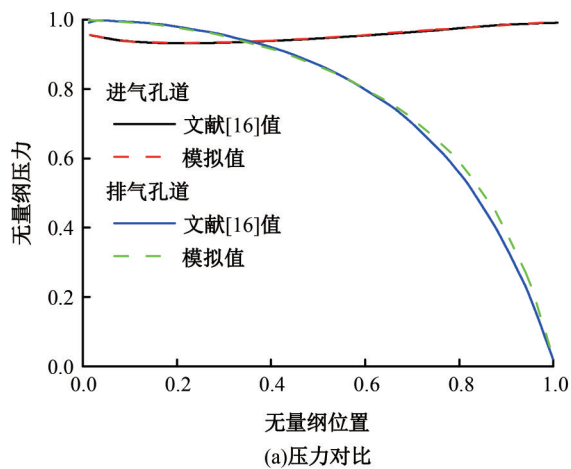


图 6 对称结构进、排气孔道中心线压力及速度模拟值与文献[16]值对比

Fig. 6 Simulation values compared with the literature values[16]

2 DPF 压降交点特性分析

2.1 排气流量对 ACT/SCT 载体压降交点影响

排气流量对 ACT 载体与 SCT 载体压降交点的影响如图 7 所示,可知,随着排气流量升高,压降交点对应的碳载量逐渐增大,说明 SCT 载体的压降特性更优,这是由于 ACT 进口增大使碳烟层变薄可降低压降,但 ACT 出口更小,而进气流量提高后导致其压降升高且占主导作用。增大灰分量后,压降交点整体下降,这是由于灰分量的增加削弱了排气流量对 ACT 载体的影响。由此可知,低排气流量,ACT 载体的压降特性较 SCT 好,灰分沉积量增加会增强该效果;高排气流量时,ACT 载体压降特性更优。

2.2 长径比对 ACT/SCT 载体压降交点的影响

保持载体体积不变并改变载体长度和直径,从而改变长径比,定义为载体长度(L)/载体直径

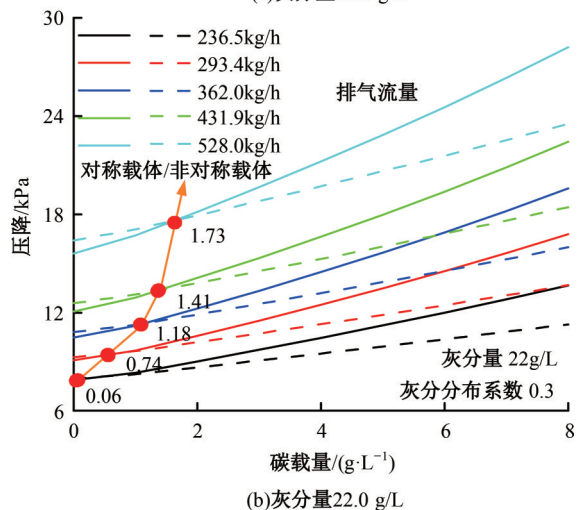
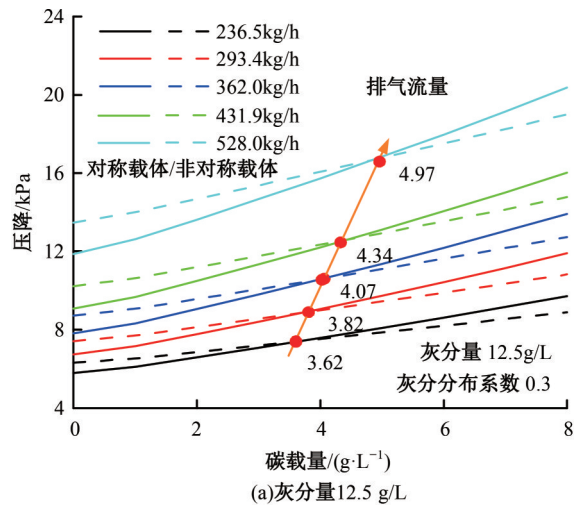


图 7 排气流量对 ACT 与 SCT 压降特性的影响

Fig. 7 Effect of mass flow rate on the pressure drop characteristics of ACT/SCT

(D)。由图8可知,随着长径比的增大,ACT/SCT载体压降交点逐渐升高,说明ACT载体较SCT载体的压降特性优势随着长径比增大而逐渐被削弱,长径比到达2.0时,ACT/SCT载体压降交点对应的碳载量为7.34 g/L,此时已接近载体极限碳载量。增大排气流量,ACT/SCT载体

压降交点整体略有升高,ACT载体较SCT载体的优势进一步被削弱。由于碳载量在6 g/L左右时DPF已触发再生机制,因此长径比小于1.6的载体宜采用非对称结构,长径比大于1.6的载体宜采用对称结构,以充分发挥各自的压降优越性。

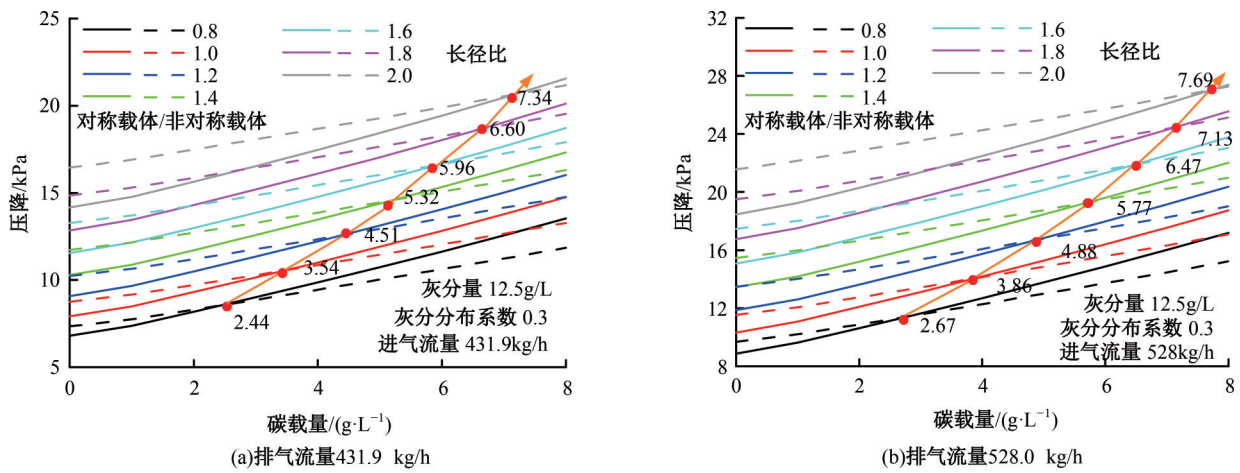


图8 长径比对ACT与SCT压降特性的影响

Fig. 8 Effect of aspect ratios on the pressure drop characteristics of ACT and SCT

3 DPF孔道内部流动特性

3.1 载体结构对DPF孔道内部气流运动的影响

第2节中采用一维仿真研究了ACT载体和SCT载体不同边界参数下的压降交点特性,而压降的实质是载体内部流动特性,本节从微观角度分析载体结构对DPF孔道内气流运动及颗粒迁移沉积规律的影响,详细参数如表5所示。

图9、图10所示为ACT与SCT载体在不同长径比下的内部流场特性,可知,轴向上进口孔道气体速度呈先增加后逐渐减小的趋势,出口孔道速度逐渐增加;径向上进/出口孔道中心处速度均最大,沿孔道壁面方向逐渐减小。这是由于气流在DPF孔道内部的运动受到沿程阻力的影响,使进口孔道在轴向上气流速度逐渐减小,在孔道末

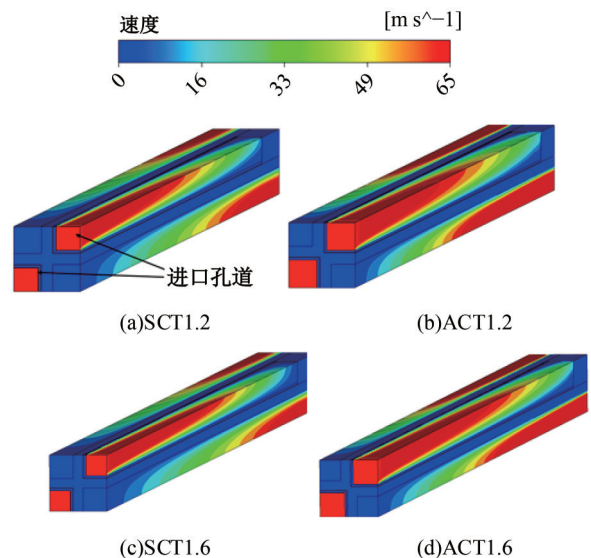


图9 载体结构对孔道气流速度影响

Fig. 9 Effect of carrier structure on air flow movement in DPF channel

表5 三维仿真工况参数

Table 5 Working condition parameter

参数	数值
碳载量/(g·L ⁻¹)	6
灰分量/(g·L ⁻¹)	12.5
灰分分布系数M	0.3
进气流量/(kg·h ⁻¹)	431.9
长径比L/D	1.2 & 1.6
载体结构	对称 & 非对称

端降至0 m/s。同一长径比下,ACT载体出口端面速度要高于SCT载体,这是由于ACT载体进口孔径较SCT载体进口孔径更大,一方面使碳烟层更薄,气流通过碳烟层时损失的势能更小;另一方面,相同的排气温度时,由于SCT载体孔径较小,内部热容低,气流温度略高也增加了孔道气流粘度。随着长径比增大,同一轴向位置处出口孔

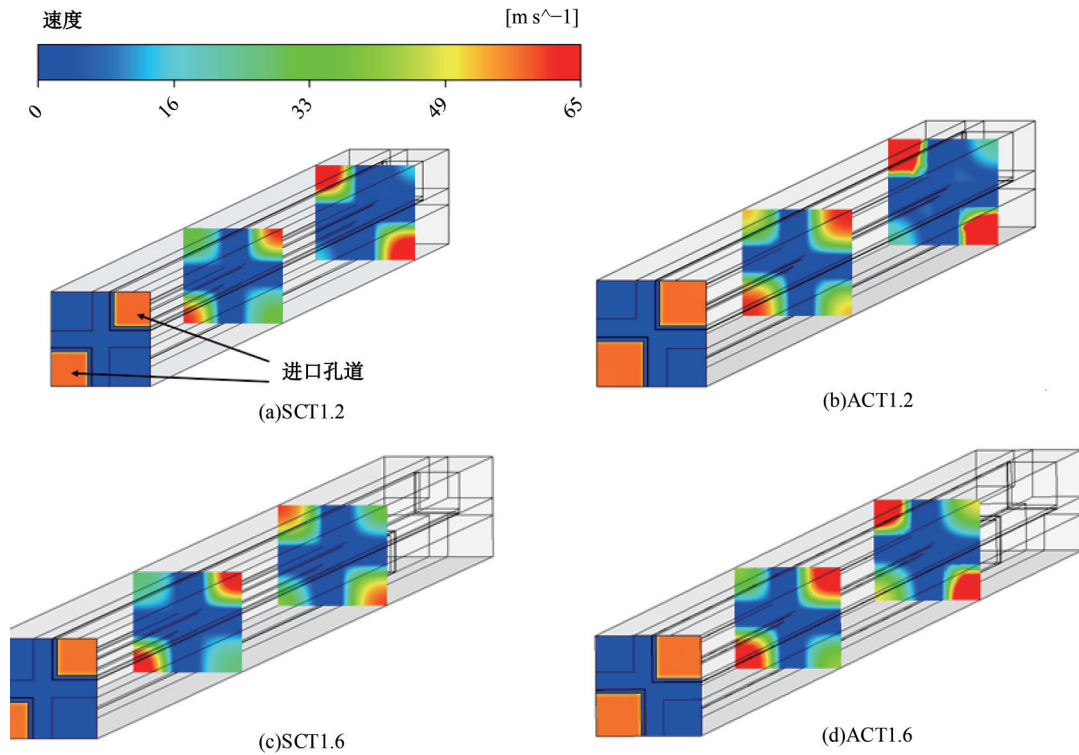


图 10 载体结构对孔道气流速度影响

Fig. 10 Effect of carrier structure on air flow movement in DPF channel

道速度有所下降。这是由于随DPF长径比增加,其孔道长度增大,气流在进口孔道中停留的时间更长,长径比的增大对ACT载体影响相对较小。

分别选择进/出口孔道中心线在轴向方向上的气流速度变化进行分析,由图11可知,各方案下进口孔道中心处在轴向上速度变化均呈先略有增加后逐渐减小的规律,而出口孔道中心处气流速度则逐渐增大,且其增速逐渐提高;两种载体随长径比的增加其进口孔道中心处气流速度有所增

加,而出口孔道中心处气流速度则略有下降;相同长径比时,ACT载体进/出口中心线速度均高于SCT载体。

载体内部的压力分布特性对其压降具有重要影响如图12、图13所示,可知,各方案下进口孔道压力均呈先下降后略有升高的趋势,而出口孔道压力则逐渐减小;这是由于沿轴向上,进口孔道内静压受沿程阻力的影响,静压下降,气流运动至孔道中后端时,由于进口孔道后端为灰分堵头,其渗

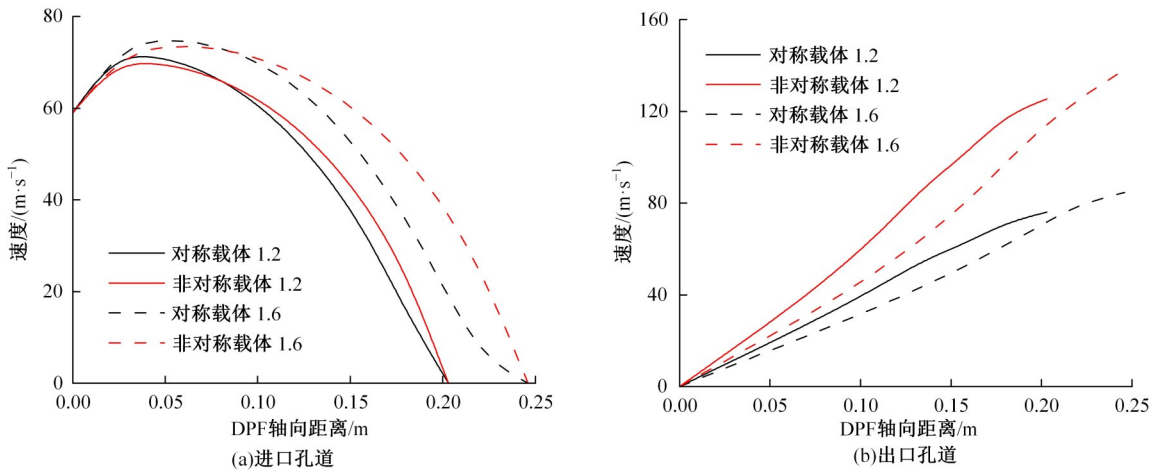


图 11 载体结构对孔道中心线速度的影响

Fig. 11 Effect of carrier structure on velocity at the center of the channel

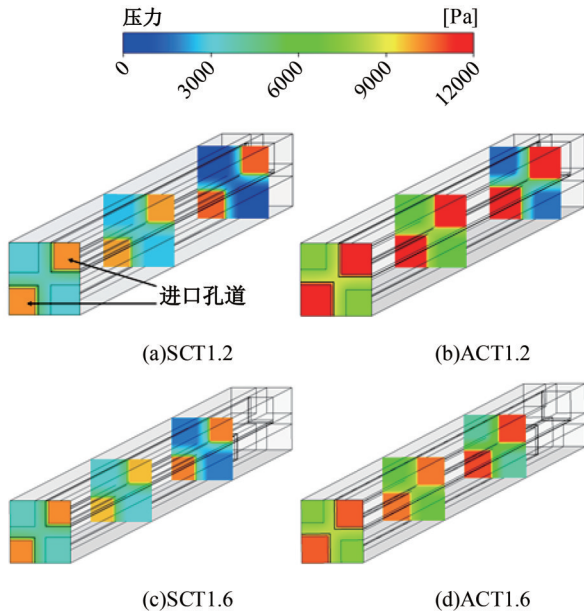


图12 载体结构对孔道气流压力影响

Fig. 12 Effect of carrier structure on air flow pressure in DPF channel

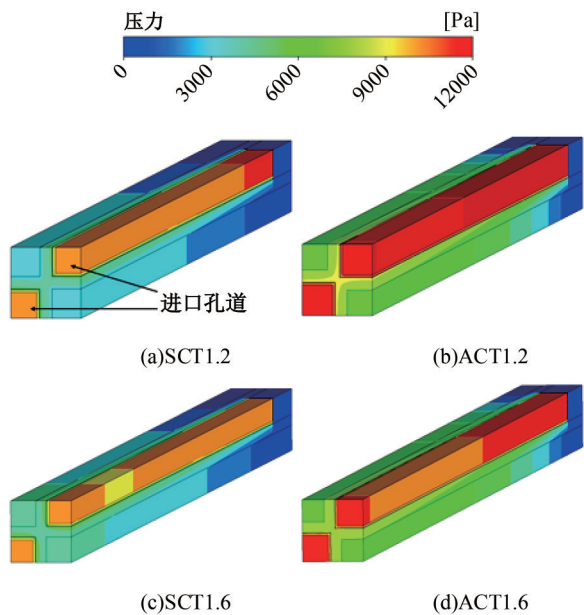


图13 载体结构对孔道气流压力影响

Fig. 13 Effect of carrier structure on air flow pressure in DPF channel

透率很低,因此气流速度急剧降低,势能损失,动压降低,而静压有所升高;由于排气孔道末端压力边界设置相对大气压力为0 kPa,轴向上沿排气孔道其静压逐渐降低,至排气孔道出口时已达到与大气压力平衡。进/排气孔道在径向横截面上静压均无明显变化,相邻孔道壁面内静压有所降低,这是由于气流通过碳烟层及载体壁面时阻力较大,产生较大压降。ACT载体进/出口孔道静压

均高于与SCT载体;两种载体随长径比的升高其进口孔道静压有所降低,出口孔道压力略有增加。

同样选取DPF进/出口孔道中心处轴向方向压力变化进行分析,如图14所示,各方案进气孔道中心处压力沿轴向均呈现先降低后逐渐升高,到达灰分堵头位置后降为0的趋势;随长径比的升高,对称与非对称载体进气孔道内静压均有所降低,而出口孔道压力有所升高。

3.2 载体结构对DPF孔道内部微粒沉积迁移规律的影响

颗粒在DPF孔道内部迁移及沉积特性直接决定了载体的捕集效率。图15所示为微粒在载体内部流场中运动的速度轨迹线,颗粒从进气孔道内以端面形式射入,沿轴向上受沿程阻力的影响,颗粒速度逐渐减小,在壁面表面被捕集下来;在进气孔道后端,低渗透率的灰分堵头使气流产

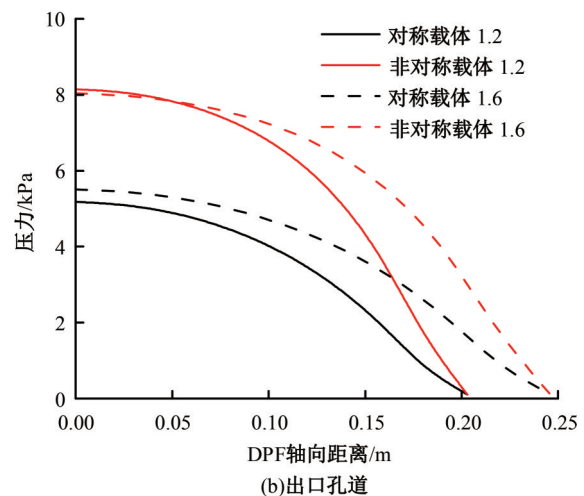
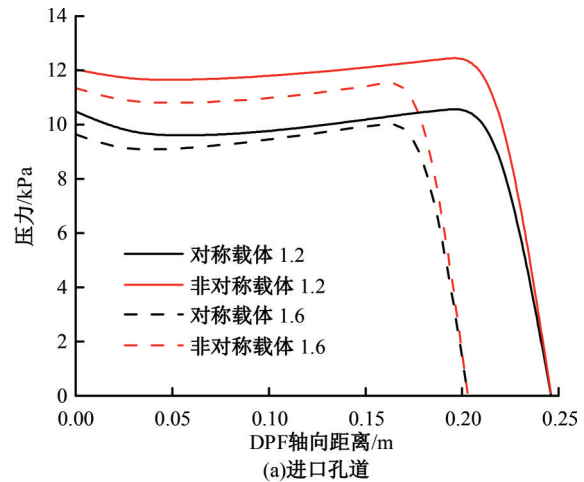


图14 载体结构对孔道中心线压力的影响

Fig. 14 Effect of carrier structure on the pressure at the center of the channel

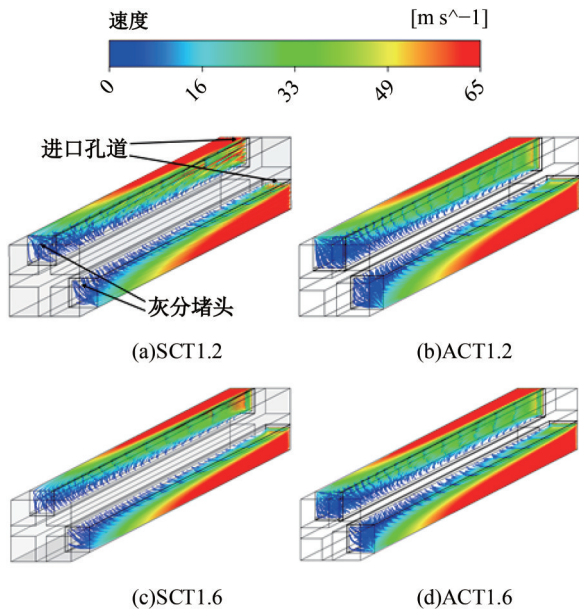


图 15 载体结构对颗粒轨迹速度的影响

Fig. 15 Effect of carrier structure on particle velocity in DPF channel

现象,轨迹杂乱,颗粒数更多在载体中后端被捕集。孔道径向截面上,颗粒越靠近孔道壁面越先被捕集,越靠近进气孔道中心处的颗粒更趋于在载体后端沉积。这是由于颗粒在靠近壁面位置处受沿程阻力影响更大,气流流速下降较快,颗粒更早被过滤壁面捕集。ACT载体与SCT载体相比进口孔道捕集的颗粒运动轨迹更密集,捕集的颗粒数较多。

两种载体孔道内部的颗粒物在轴向上分布呈前段颗粒浓度较低而后段较高的不均匀性(图 16)。这是由于沿载体进口孔道方向,气流在前段速度较大,不易被捕集;之后速度开始下降,在载体后端颗粒物极易被捕集下来,导致颗粒在载体后端浓度较高。SCT载体的颗粒浓度分布比ACT载体更均匀,同一长径比时SCT载体颗粒浓度相对较高,长径比增大导致载体长度增加,气流在孔道中停留的时间相对更长,因而捕集的颗粒更多。

生回流,颗粒运动的速度轨迹线出现明显的脉动

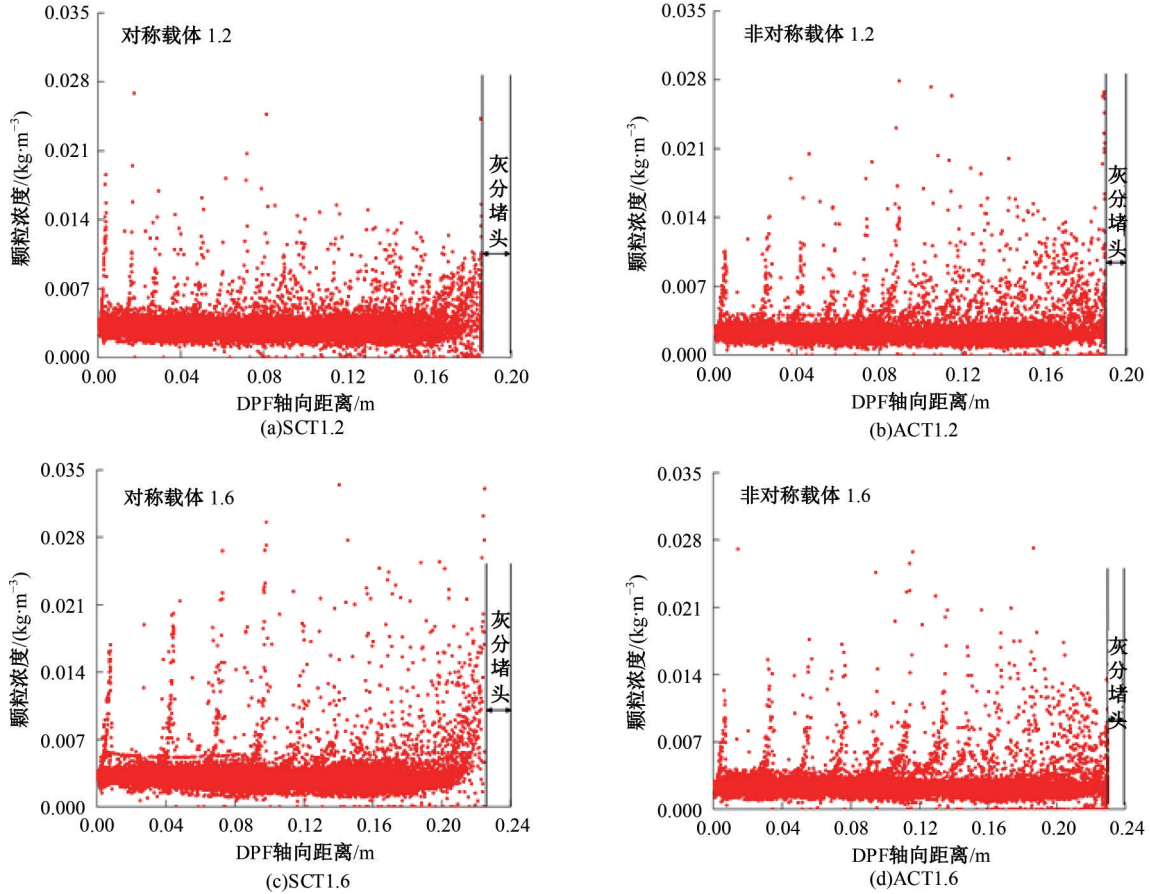


图 16 载体结构对DPF轴向上颗粒浓度的影响

Fig. 16 Effect of carrier structure on particle concentration distribution in axial direction of DPF

4 结 论

(1)灰分量提高、排气流量降低及会使ACT与SCT载体的压降交点减小;SCT载体在高长径比(1.6)时压降特性更优,反之则ACT载体更优。

(2)ACT载体进口孔道气流速度及压力均高于SCT载体;长径比提高可使两种结构载体进口孔道气流速度均增加。

(3)颗粒在孔道壁面沉积呈现前少后多的不均匀性,孔道后端的颗粒运动轨迹更为杂乱,ACT载体孔道内部碳烟颗粒数沉积较多;长径比增大可提高两种结构载体捕集颗粒物浓度。

参考文献:

- [1] Dash S K, Ling F P, Barik D. Combined adjustment of injection timing and compression ratio for an agricultural diesel engine fuelled with nahar methyl ester [J]. *International Journal of Ambient Energy*, 2022, 43(1): 1482-1494.
- [2] Waluś K J, Wargula L, Krawiec P, et al. Legal regulations of restrictions of air pollution made by non-road mobile machinery—the case study for Europe: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(4): 3243-3259.
- [3] Huan X C, Gang L, Ying Y, et al. Review and outlook of China non-road diesel mobile machinery emission standards[J]. *Johns Matthey Technol Rev*, 2020, 64: 76-83.
- [4] 王忠, 李游, 张美娟, 等. 柴油机排气阶段颗粒碰撞过程动力学特征分析[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2021, 51(1): 39-48.
Wang Zhong, Li You, Zhang Mei-juan, et al. Kinetic analysis of particle collision process in diesel engine exhaust stage[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(1): 39-48.
- [5] Li J, Lu C, Tan D. Investigation on gas-soot flow distribution characteristic of soot capture process in the wall-flow diesel particulate filter[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2021: 6638517.
- [6] Mychal T, Atsushi K, Ryuji K, et al. Development of improved SCR on DPF design for future tighter regulations and reduced system packaging[C]// SAE Paper, Michigan, USA, 2018: 2018010344.
- [7] George S, Achim H. Next generation cordierite thin wall DPF for improved pressure drop and lifetime pressure drop solution[C]// SAE Paper, Michigan, USA, 2016: 2016010940.
- [8] Ogyu K, Oya T, Ohno K, et al. Improving of the filtration and regeneration performance by the SiC-DPF with the layer coating of PM oxidation catalyst[C]// SAE Paper, Michigan, USA, 2008: 2008010621.
- [9] Wang Y, Wong V, Sappok A, et al. The sensitivity of DPF performance to the spatial distribution of ash inside DPF inlet channels[C]// SAE Paper, Michigan, USA, 2013: 2013010158.
- [10] 陈贵升, 李青, 吕誉, 等. 灰分及载体结构对DPF内部流场及压降特性的影响[J]. *汽车工程*, 2020, 42(10): 1346-1353.
Chen Gui-sheng, Li Qing, Lyu Yu, et al. Effects of ash and carrier structure on the internal flow field and pressure drop characteristics of DPF[J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(10): 1346-1353.
- [11] 沈颖刚, 吕誉, 陈春林, 等. 非对称孔结构载体对DPF及柴油机性能的影响研究[J]. *内燃机工程*, 2018, 39(6): 31-38.
Shen Ying-gang, Lyu Yu, Chen Chun-lin, et al. Influence of asymmetric cell carrier on DPF and diesel engine performance[J]. *Internal Combustion Engine Engineering*, 2018, 39(6): 31-38.
- [12] Zhang X, Tennison P, Ruona W. 3D numerical study of pressure Loss characteristics and filtration efficiency through a frontal unplugged DPF[J]. *SAE International Journal of Fuels & Lubricants*, 2010, 3(1): 177-193.
- [13] 朱亚永, 赵昌普, 王耀辉, 等. 柴油机DPF流场压降及微粒沉积特性数值模拟[J]. *内燃机学报*, 2017, 35(6): 538-547.
Zhu Ya-yong, Zhao Chang-pu, Wang Yao-hui, et al. Numerical simulation of DPF flow field pressure drop and particle deposition characteristics of diesel engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2017, 35(6): 538-547.
- [14] 李志军, 侯普辉, 焦鹏昊, 等. DPF孔道内流场及微粒沉积特性的数值模拟[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2015, 48(10): 914-920.
Li Zhi-jun, Hou Pu-hui, Jiao Peng-hao, et al. Numerical simulation of flow field and particle deposition characteristics in DPF pores[J]. *Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology Edition)*, 2015, 48(10): 914-920.
- [15] Liu H, Cao C, Huang J, et al. Progress on particulate matter filtration technology: basic concepts, advanced materials, and performances[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(2): 437-453.
- [16] Zhang X, Tennison P, Ruona W. 3D numerical study of pressure loss characteristics and filtration efficiency through a frontal unplugged DPF[J]. *SAE International Journal of Fuels & Lubricants*, 2010, 3(1): 177-193.