

DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202505050

双层壁内涂层对 GPF 过滤性能影响的模拟

李志军¹, 张时杰¹, 刘明顺¹, 杨绵松¹, 王计广², 李世龙¹

(1. 天津大学先进内燃动力全国重点实验室, 天津 300350; 2. 中汽研汽车检验中心(昆明)有限公司, 昆明 651700)

摘要: 为研究在壁厚方向上不同厚度比例和上、下顺序的双层壁内涂层分布对汽油机颗粒物过滤器(GPF)过滤性能的影响, 假设在过滤壁厚方向上涂敷两层不同涂层量的涂层, 通过改变其上、下顺序和厚度比例形成 6 种不同的双层壁内涂层 GPF. 对这 6 种 GPF 和两种单层壁内涂层 GPF 的过滤性能和过滤终了时刻的颗粒物沉积以及孔隙率分布进行了模拟研究. 结果表明: 涂层量较大涂层的厚度占过滤壁厚度的比例越高, GPF 的初始过滤效率越大, 涂层的上、下顺序对此没有影响. 涂层量较大的涂层在上时, 该涂层厚度比例从 1/4 增加到 3/4, GPF 初始过滤效率提高了 2.50%; 当该涂层在下时, 同样的情况, GPF 的初始过滤效率提高了 2.52%. 将涂层量较大的涂层放置在上方和该涂层的厚度比例较大两者均会提升 GPF 在过滤过程中过滤效率和压降的增长速度, 但是前者的作用比后者明显. 对于双层壁内涂层的设计, 建议将涂层量较大的涂层放在上方并且保持较小的涂层厚度比例, 如 1/4 或 1/2.

关键词: 汽油机颗粒物过滤器; 双层壁内涂层; 过滤性能; 颗粒物沉积分布

中图分类号: TK411

文献标志码: A

文章编号: 1000-0909(2025)05-0443-08

Simulation study of the effect of double-layer in-wall coatings on the filtration performance of GPF

Li Zhijun¹, Zhang Shijie¹, Liu Mingshun¹, Yang Miansong¹, Wang Jiguang², Li Shilong¹

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. CATARC Automotive Test Center (Kunming) Company Limited, Kunming 651700, China)

Abstract: In order to study the influence of the distribution of double-layer in-wall coatings with different thickness ratios and up-down orders in the wall thickness direction on the filtration performance of gasoline particulate filter (GPF), two layers of coatings with different coating amounts were applied in the filtration wall thickness direction, and six different double-layer in-wall coated GPF were formed by changing the up-down orders and thickness ratios. The filtration performance, particle deposition and porosity distribution at the end of filtration of these six GPF and two single-layer in-wall coated GPF were simulated. The results show that the higher the proportion of the coating thickness of the coating with the larger amount of coating to the thickness of the filter wall, the larger the initial filtration efficiency of the GPF, and the upper and lower order of the coatings has no effect on this. The initial filtration efficiency of the GPF increases by 2.50% in the case that the proportion of the coating to the filtration wall thickness increases from 1/4 to 3/4 when a larger amount of coating is located on the top, and the initial filtration efficiency of the GPF increases by 2.52% in the same case when the coating is on the bottom. Both cases of placing a larger amount of coating on the top and having a larger percentage of thickness of this coating enhance the growth rate of filtration efficiency and pressure drop of the GPF during filtration, but the former effect is more pronounced than the latter. For the design of double-layer in-wall coatings, it is recommended to place the larger amount of coating on the top and keep the thickness ratio of the coating smaller, such as 1/4 or 1/2.

Keywords: gasoline particulate filter; double-layer in-wall coatings; filtration performance; particle deposition distribution

收稿日期: 2024-12-15; 修回日期: 2025-04-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976136, 51576140); 清华汽车安全与节能国家重点实验室开放基金资助项目(KF1818).

作者简介: 李志军, 教授, 博士, lizhijundd@163.com.

通信作者: 李世龙, 助理研究员, 博士, lishilong@tju.edu.cn.

与传统的进气道燃料喷射发动机相比,汽油直喷(GDI)发动机的燃油效率和性能都有所提高,并减少了温室气体排放^[1]. GDI 发动机的颗粒物排放很少,大概只有柴油发动机排放的总颗粒物数量的 1%. 但是它的颗粒物尺寸更小,更难从废气中去除,并能更深入地渗透到肺部,所以它的颗粒物危害更大^[2]. 为了应对日益严格的颗粒物数量排放法规^[3],已经将颗粒物过滤器作为柴油车和汽油车废气后处理的标准组件,而汽油机颗粒物过滤器(GPF)相对是一种比较新的技术^[4-5]. 国内也有对 GPF 再生时载体温度分布、灰分对其性能影响等方面的相关研究,但大多数还是对柴油颗粒捕集器(DPF)的研究^[6-7].

近年来,已经开发出了有催化剂涂层的颗粒物过滤器(CPF). 它将催化转化器与颗粒物过滤器的功能结合在一个单一装置上,降低了汽车尾气后处理系统的压降,使其变得更加紧凑、成本更低. 对于柴油发动机的应用,选择性催化还原(SCR)功能被集成到颗粒物过滤器中^[8],而这也促生了对催化型柴油机颗粒捕捉器(CDPF)过滤壁面上碳烟氧化特性的研究^[9]. 而对于 GDI 发动机的应用,三元催化转化(TWC)功能被集成到颗粒物过滤器中^[10]. 催化剂浆液的特性和涂敷方法不同,其沉积位置也不同. 催化剂可以沉积在过滤壁内,也可以沉积在进口或出口通道的过滤壁上,或者同时沉积在壁内和壁上^[11]. 史学刚等^[12]将催化剂在壁内分布和壁上分布的 GPF 性能进行了对比发现,壁内涂层有利于降低气态污染物排放和燃油消耗率,壁外涂层可以提高对颗粒物的过滤效率. Walter 等^[13]通过改变催化剂在壁内、壁上及轴向分区不同位置的沉积,对具有不同催化剂分布的过滤器进行了研究表明,在过滤器后部有小的涂层间隙的壁内涂层过滤器实现了压降和催化转化效率的最佳折衷. 关于 CGPF 有研究比较了 3 种具有不同壁内和壁上涂层分布的堇青石过滤器的过滤和催化剂性能表明,壁内沉积比壁内和壁上混合沉积的渗透性更好^[14]. 还有研究表明,对于上层较稀和下层较密的双层壁内催化层设计,在较密催化层中加入孔隙形成剂,增加第二层的孔隙数量有利于实现过滤器的高过滤效率和低压降^[15]. 催化剂在过滤壁不同位置的沉积对过滤器的过滤性能有较大的影响. 目前还缺少同时讨论双层壁内涂层上、下顺序以及厚度比例对过滤器过滤性能影响的研究.

笔者的研究内容是借助于“一维 + 一维”的流动模型模拟在壁厚方向上不同厚度比例和上、下顺序的双层壁内涂层,对过滤器过滤性能的影响及其过滤终

了时刻颗粒物沉积分布和孔隙率分布. 通过数值模拟找到具有良好过滤性能的双层壁内涂层过滤器的涂层上、下顺序和厚度比例,为过滤器结构的设计优化提供指导.

1 模型建立

采用了“一维 + 一维”的数值模型,分别是一维的通道速度分布模型和一维的过滤模型. 其计算速度快且有足够的准确性. 该模型包括了 CGPF 的一组进口/出口流道和它们之间的过滤壁,如图 1 所示. 其中: v_1 、 v_2 为入口/出口通道速度; v_w 为废气流经过滤壁时的壁流速度.

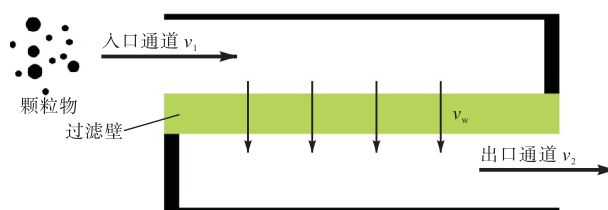


图 1 过滤模型示意

Fig.1 Schematic of filtering model

1.1 过滤壁分类

研究对象是双层壁内涂层过滤器,这两个涂层的催化剂种类是相同的,不同的是涂层含有的催化剂量. 其中一个涂层相对较稀,涂敷的催化剂量为 75 g/L,有助于实现低压降和对废气中 CO、HC 和 NO_x 的高催化转化性能,用 W1 表示涂有该种催化剂的过滤壁部分;另外一个涂层相对较密,催化剂量为 120 g/L,有助于实现高颗粒物过滤效率,用 W2 表示涂有该种催化剂的过滤壁部分. 通过添加增稠剂来提高涂层浆液的黏度,防止它完全渗入过滤壁,可达到调控涂层厚度的目的^[15]. 为了研究双层涂层厚度比例对过滤器过滤性能的影响,选取了 4 种厚度比例. 其中:当 W1 在上层、W2 在下层时, α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 分别表示 W1 层的厚度占过滤壁厚度比例为 1/4、1/2、3/4 和 1 的过滤壁. 当 W2 在上层、W1 在下层时, β_1 、 β_2 、 β_3 和 β_4 分别表示 W2 层的厚度占过滤壁厚度比例为 1/4、1/2、3/4 和 1 的过滤壁. 表 1 为涂敷单种催化剂的过滤壁和裸基质的微观结构参数. 根据对涂层过滤壁的微观研究,催化剂会优先堵塞过滤壁多孔介

表 1 过滤壁的微观参数

Tab.1 Microscopic parameters of filter wall

过滤壁类别	平均孔径/ μm	孔隙率	渗透率/ μm^2
裸基质	22.3	0.632	2.260
W1	23.2	0.464	0.859
W2	20.9	0.450	0.847

质中的小孔隙,随着涂层量的增大,大的孔隙会进一步被堵塞。

1.2 颗粒物分布和质量

为了更好地体现汽油机排气中小颗粒占比较多的情况,采用 Liu 等^[16]的颗粒物分布来模拟过滤壁对颗粒物的捕集过程。平均颗粒物直径为 100 nm,粒径为 20 ~ 300 nm,如图 2 所示。

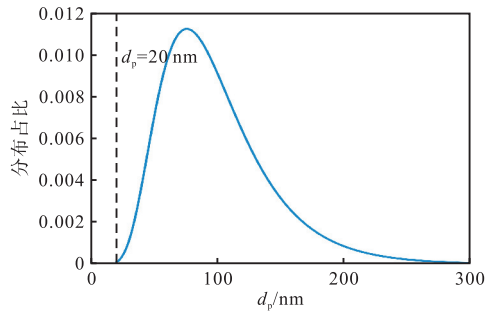


图 2 颗粒物粒径分布

Fig.2 Size distribution of particles

为了模拟颗粒物在过滤壁上的沉积质量分布,使用了颗粒物直径和颗粒质量之间的经验关系。Gong 等^[17]对缸内直喷汽油机 4 种工作条件下(喷油结束角为上止点前 280° CA 和 220° CA、冷启动和重载)测量的颗粒物数据进行函数拟合得到公式为

$$m_p = 10^{-7} d_p^3 + 3 \times 10^{-5} d_p^2 - 3 \times 10^{-4} d_p - 0.0106 \quad (1)$$

式中: m_p 为颗粒物质量; d_p 为颗粒物直径。

1.3 流动模型

入口和出口通道可以被质量、动量和能量的一维守恒方程来描述^[18]。在下面的方程中,进口通道的指数 j 为 1,出口通道的指数 j 为 2。公式(2)将通道速度 v_j 与壁流速度 $v_{w,j}$ 耦合起来。

$$D_j^2 \partial \rho_j v_j / \partial z = (-1)^j 4 D_j \rho_j v_{w,j} \quad (2)$$

式中: D_j 为通道的宽度; ρ_j 为通道中气体的密度。

通道中压力分布由一维动量守恒方程决定,即

$$\frac{\partial p_j}{\partial z} = -\beta_j (Re_w) \frac{\partial (\rho_j v_j^2)}{\partial z} - 2 \frac{\mu_j}{D_j^2} C_{f,j} (Re_w) v_j \quad (3)$$

式中: p_j 为通道中的压力; μ_j 为排气动力黏度; $\beta_j (Re_w)$ 为动量通量系数, $C_{f,j} (Re_w)$ 为摩擦系数,它们可以从 Bissett 等^[19]提供的表格中插值获得。

过滤壁上的压降用达西定律来描述,可以得到 p_1 和 p_2 之间的关系为

$$p_1 - p_2 = \mu v_w h / k_w \quad (4)$$

式中: k_w 为过滤壁的渗透率; h 为过滤壁厚度; μ 为排气动力黏度。

汽油机的排气温度较高,沉积的颗粒物会自动氧化燃烧,过滤器再生会相当频繁和不可预测。而研究

重点为过滤器的过滤性能,所以对再生问题进行了简化。没有考虑 GPF 再生问题,假设过滤壁和气体的温度相同,所以省去了能量守恒方程^[17]。

1.4 过滤模型

将过滤壁的多孔介质被转化为具有与过滤壁孔隙结构相同流体力学直径的球状捕集体的集合。捕集体直径 d_c ^[20]为

$$d_c = 3(1-\varepsilon) d_{\text{pore}} / 2\varepsilon \quad (5)$$

式中: d_{pore} 为过滤壁中微孔直径; ε 为过滤壁孔隙率。

1.4.1 孔尺寸分布

对过滤器的过滤壁进行孔径测量发现,大多数孔径分布都能拟合为对数正态分布^[21]。采用的孔径分布的平均孔径如表 1 所示。通过式(6)可以得到相应的捕集体尺寸分布。

$$p d f_{d_c} = 2\varepsilon p d f_{d_{\text{pore}}} / [3(1-\varepsilon)] \quad (6)$$

式中: $p d f_{d_c}$ 为捕集体直径分布; $p d f_{d_{\text{pore}}}$ 为过滤壁孔径分布。

1.4.2 过滤效率

由直径为 d_c 的捕集体组成的过滤壁对直径为 d_p 的颗粒物的捕集效率 $\eta(d_c, d_p)$ 计算式^[20]为

$$\eta(d_c, d_p) = 1 - \exp \left[-\frac{3(1-\varepsilon)h}{2\varepsilon} \cdot \frac{E(d_c, d_p)}{d_c} \right] \quad (7)$$

$$E(d_c, d_p) = 1 - (1 - E_D)(1 - E_R)(1 - E_I) \quad (8)$$

式中: $E(d_c, d_p)$ 为单个直径为 d_c 的捕集体对直径为 d_p 的颗粒物的捕集效率; E_D 、 E_R 和 E_I 分别为单个捕集体扩散捕集、直接拦截和惯性碰撞 3 种主要捕集机理的捕集效率。

过滤壁由许多不同直径的捕集体组成,通过将所有捕集体的贡献加权相加,可以得到过滤壁总的过滤效率为

$$\eta(d_p) = \int \eta(d_c, d_p) d_c^2 p d f_{d_c} d(d_c) / l_{dc}^2 \quad (9)$$

$$l_{dc} = \left[\int p d f_{d_c} d_c^2 d(d_c) \right]^{1/2} \quad (10)$$

式中: l_{dc} 为整个过滤壁捕集体的长度尺度。

由布朗扩散导致的单个捕集体的捕集效率^[20]为

$$E_D = 2 \left(\frac{3\pi}{4} \right)^{2/3} \left[\frac{\varepsilon}{K(\varepsilon)} \right]^{1/3} P_c^{-2/3} \quad (11)$$

式中: P_c 为量纲为 1 的数,用来表征流体中对流和扩散作用的相对比例; $K(\varepsilon)$ 为孔隙率的函数。

由直接拦截导致的单个捕集体的捕集效率^[22]为

$$E_R = \frac{3(1-\varepsilon)}{2K(\varepsilon)} \cdot \frac{N_R^2}{(1+N_R)^2} \quad (12)$$

式中: N_R 为直接拦截机理捕集效率的量纲为 1 常数。

由惯性碰撞导致单个捕集体的捕集效率^[17]为

$$E_i = St_e^3 / (0.014 + St_e)^3 \quad (13)$$

式中: St_e 为有效斯托克斯数, 表征颗粒惯性作用和扩散作用的比值。

1.4.3 初始条件和求解方法

过滤器的孔道密度为 46.5 个/cm², 壁厚为 300 μm, 直径为 132 mm, 长度为 120 mm. 研究中排气温度的 450 K, 动力黏度为 2.87×10⁻⁵ Pa·s. 颗粒物浓度为 6×10⁷ cm⁻³. 入口流速为 10 m/s, 出口压力为 0.12 MPa. 所有的管理方程都在 matlab2022a 中求解, 求解动量和总体质量平衡采用 bvp4c 求解器。

2 模型验证

图 3 为选用 Marre 等^[23]的试验数据对模型进行验证. 其中: 颗粒物过滤器过滤壁的平均孔径为 10.8 μm, 孔径方差为 2 μm, 平均孔隙率为 0.45, 壁厚为 1.65 mm. 该研究中过滤器分别在 1、2、3 和 4 cm/s 的壁流速度下运行, 使用的颗粒物直径为 100 ~ 700 nm. 直径小于 500 nm 的颗粒物模拟结果和试验数据基本一致, 而对于直径大于 500 nm 的颗粒物, 模拟结果与试验数据存在差异, 这很有可能是因为建模采用的孔径对数正态分布和实际的孔径分布在大孔径处存在不同. 建模采用的孔径分布舍去了一部分大孔径, 这样导致孔径分布中小孔径增多; 而小孔径对直径大于 500 nm 的颗粒物的拦截效率较大, 所以可以看到大颗粒物过滤效率的模拟结果比试验数据大. 但是模拟结果与试验数据的相对误差均不高于 1%, 并且研究的颗粒物粒径小于 300 nm, 所以本模型可以用于模拟研究。

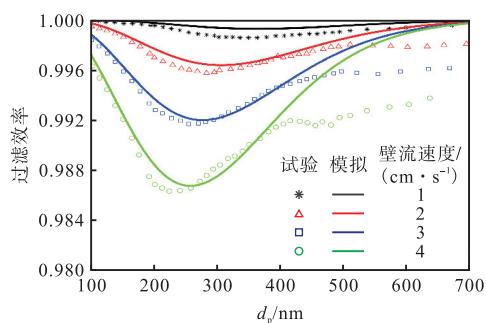


图 3 过滤效率模拟结果与试验对比

Fig.3 Comparison of filtration efficiency between simulation results and experimental data

3 结果与分析

对处在深床过滤状态下的 GPF 的过滤性能进行模拟, 将 GPF 上没有颗粒物沉积的时刻定义为过滤

初始时刻, 而将过滤进行 20 min 的时刻定义为过滤终了时刻。

3.1 双层壁内涂层过滤壁过滤终了时刻状态

探究过滤壁微观结构参数的变化对了解过滤现象是很有帮助, 给出过滤终了时刻颗粒物在过滤壁中的沉积分布和过滤壁孔隙率分布这两者的模拟结果, 并对其进行了分析。

3.1.1 沉积质量

颗粒物在过滤壁中的沉积分布由过滤壁通道方向各处的过滤效率和废气流量决定. 过滤壁初始时刻通道方向各处无颗粒物沉积, 微观结构参数在这个方向上保持一致, 所以废气流量决定了后续颗粒物的沉积分布. 图 4 为过滤终了时刻颗粒物在 8 种过滤壁中的沉积分布大致相似, 在过滤壁靠近入口通道表面附近有很大的颗粒物沉积质量梯度, 大部分颗粒物都沉积在此处. 这是因为当废气通过过滤壁离散化后的各层时, 进入过滤壁下一层的颗粒物数量比上一层的少. 这导致更多的颗粒物沉积在过滤壁顶层的捕集体附近, 所以此处的孔隙率下降得更快, 这反过来又导致顶层附近颗粒物质量沉积率增加得更快. 当废气通过这里后, 颗粒物浓度大幅下降, 只有少部分颗粒物被后面的过滤壁基体捕获. 因而可以看到过滤壁壁厚方向下方的沉积质量少且质量梯度比较小. 另外, 在过滤壁通道方向两端颗粒物沉积质量较多, 这是因为这两处的壁流速度比中间部分大, 相同时间内通过的废气流量比较大, 这两侧过滤壁基体能够捕集更多的颗粒物^[17]。

与图 4(e) ~ 图 4(h) 的颗粒物沉积分布不同, 图 4(a) ~ 图 4(d) 中颗粒物在上层尤其是过滤壁靠近入口通道表面附近相对比较少, 有较多的颗粒物穿过上层渗透到过滤壁的深处被捕获, 这个从下层颗粒物的沉积质量较多就可以看出. 在图 4(a) ~ 图 4(c) 中还可以观察到, 在壁内涂层分层处、紧靠分层处上方颗粒物的沉积质量比下方少, 而不是由多到少的连续分布. 这都是因为 W1 的平均孔径比 W2 大, 而过滤效率与平均孔径呈负相关^[20]. 相同厚度情况下, W1 对颗粒物的过滤效率比 W2 小. 而 W1 在上时, 颗粒物先经过 W1 捕集, 剩下的很多 W1 未捕集到的颗粒物经过 W2 时会再次被捕集, 所以就出现了这种情况. 而在图 4(e) ~ 图 4(g) 中颗粒物沉积质量就是从分层处上方到下方由多到少分布. 因为 W2 已经捕集到了大部分颗粒物, 只有少部分颗粒物突破 W2 到达了 W1, 所以分层处下方捕集到的颗粒物质量会比上方少. 从这两组的对比可以看出, W2 在上时, 颗粒物

更难通过上方涂层渗透到下方。

由图 4 可知,随着上层涂层厚度比例的增大,尤

其是 W1 在上的时候,颗粒物的质量沉积梯度在过滤壁厚方向上变得更缓和,颗粒物的沉积分布更均匀。

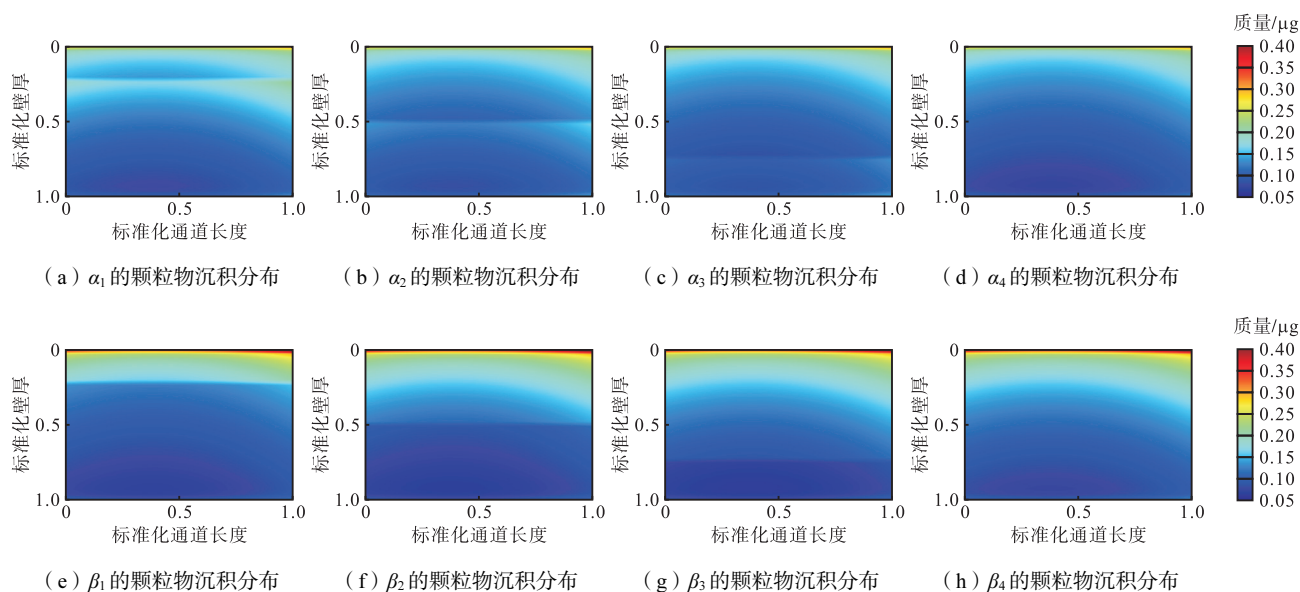


图 4 过滤终了时刻过滤壁上的颗粒物质量分布

Fig.4 Mass distribution of particulate on the filter walls at the end of filtration

3.1.2 孔隙率

图 5 为 8 种过滤壁过滤终了时刻的孔隙率分布. 与图 4 中颗粒物沉积质量分布相对应,过滤壁中颗粒物沉积较多的部分孔隙率较小. 过滤初始时刻,过滤壁入口通道和出口通道表面附近的孔隙率是一致的,但是在过滤终了时刻,因为颗粒物主要沉积在过滤壁入口通道表面附近,此处的孔隙率已经大幅减小,而过滤壁靠近出口通道表面附近的孔隙率基本没有变化. 在通道长度方向上,两端处孔隙率减小的幅度比中间大。

从图 5(a) ~ 图 5(d)可以看出, W1 在上时,因为较多颗粒物可以渗透到过滤壁深处,过滤壁厚度方向上孔隙率的变化比较均匀,而且与 W1 在上时的颗粒物沉积相对应, α_1 、 α_2 和 α_3 中涂层紧靠分层处上方的孔隙率比下方大. 而从图 5(e) ~ 图 5(h)中可以看出, W2 在上时,因为上层沉积了更多的颗粒物,上层的孔隙率比下层减小的更多,可以很明显地看到 β_1 、 β_2 和 β_3 上层的孔隙率分别比 α_1 、 α_2 和 α_3 更小. 随着上层涂层的厚度比例增加,尤其是 W1 在上时,过滤终了时刻过滤壁内各处孔隙率也变得比较均匀。

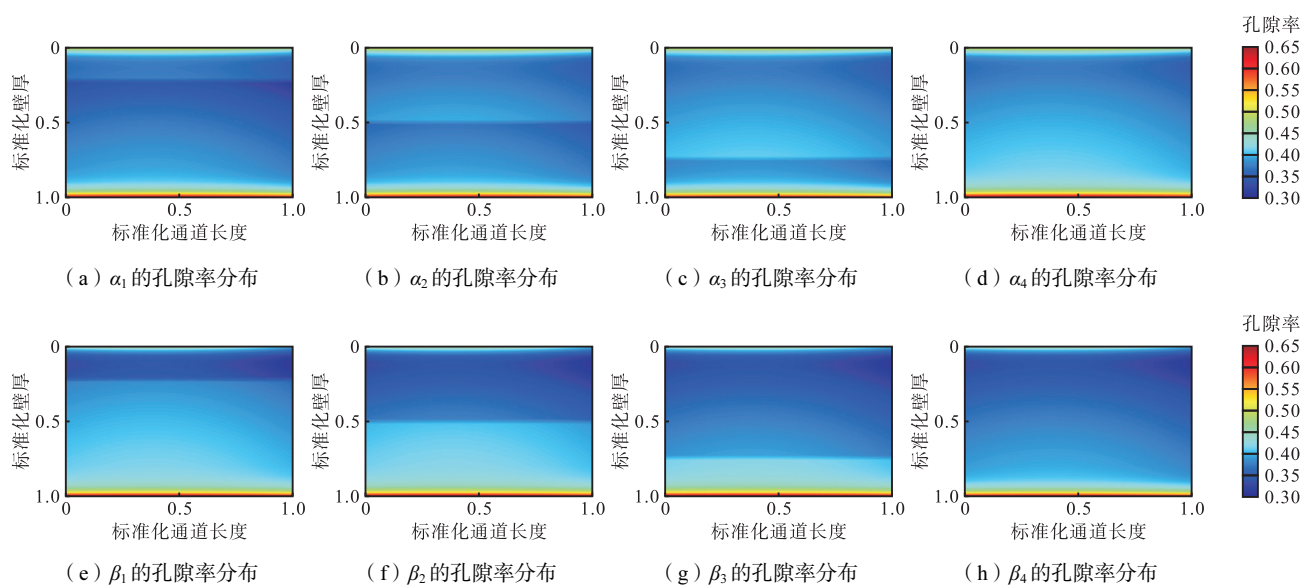


图 5 过滤终了时刻过滤壁孔隙率分布

Fig.5 Porosity distribution of filter walls at the end of filtration

3.2 双层壁内涂层结构对过滤性能的影响

给出了 8 种过滤壁过滤性能随过滤时间变化的模拟结果,并进行了分析。

3.2.1 各粒径颗粒物的过滤效率

图 6 为 8 种过滤壁对各个粒径颗粒物的过滤效率,对于粒径小于 50 nm 的颗粒物,扩散捕集机理起主要作用,不管是在过滤初始时刻还是终了时刻,其过滤效率都在 90% 以上。随着颗粒物粒径的增大,直接拦截和惯性碰撞的作用不足以弥补因为扩散捕集作用减弱而减小的过滤效率,所以看到粒径范围在 50 nm 到 300 nm 之间的颗粒物其过滤效率随着粒径的增大而大幅减小,但是前两者的作用使得过滤效率减小的速度变慢。

图 6(a) 为过滤初始时刻的过滤效率。 α_1 和 β_3 、 α_2 和 β_2 、 α_3 和 β_1 这 3 组过滤壁的初始过滤效率曲线分别重合。这是因为此时过滤壁上没有颗粒物沉积,其过滤效率由初始平均孔径和孔隙率决定。而上述 3 组过滤壁,每组中两个过滤壁的唯一区别是 W1 和 W2 的上、下顺序不同,说明这个因素对过滤壁的初始过滤效率没有影响。上述 3 组的初始过滤效率依次减小,这是因为 W2 的厚度在壁厚中所占比例依次减小。过滤壁的平均孔径和过滤效率呈负相关,而 W2 的平均孔径比 W1 小,所以 W2 厚度在过滤壁厚中所占比例比 W1 所占比例对过滤壁的过滤效率影响大。 α_4 中只有 W1 涂层, β_4 只有 W2 涂层。在 8 种

过滤器中 α_4 对所有颗粒物的过滤效率最小, β_4 过滤效率最大。图 6(b) 为过滤终了时刻的过滤效率。随着颗粒物沉积,所有过滤壁的过滤效率达到 50% 以上,比初始时刻都有所提高。此时在 8 种过滤器中依然是 α_4 对所有颗粒物的过滤效率最小, β_4 过滤效率最大。其中 β_3 、 β_2 和 β_1 的过滤效率依次降低, α_1 、 α_2 和 α_3 的过滤效率依次降低,这种顺序和对应的初始过滤效率的高低顺序一致,原因还是 W2 层的厚度依次降低,它们的初始过滤效率依次降低,所以后续捕集到的颗粒物数量依次减少。捕集到的颗粒物数量少,过滤壁的孔隙率减小的幅度就小,导致后续的过滤效率也小。不同的是 β_3 相对于 α_1 、 β_2 相对于 α_2 、 β_1 相对于 α_3 过滤终了时刻的过滤效率大,这说明 W2 在上比 W1 在上更有利于提高双层壁内涂层过滤器在过滤过程中的过滤效率。这一现象可能是因为 W1 在上时,颗粒物沉积比较均匀,而 W2 在上时,颗粒物主要沉积在上层,使得上层的孔隙率减小幅度更大,对后续过滤效率的提升起到了决定性作用。

W2 在上和 W2 厚度比例较大都有利于提高过滤过程中过滤器的过滤效率,正好可以解释过滤终了时刻 β_3 的过滤效率大于 α_3 、 β_2 的过滤效率大于 α_2 。而 β_1 的过滤效率小于 α_1 是因为 α_1 的 W2 厚度占比达到了 3/4, W2 的厚度对过滤器的过滤效率起到了决定性作用,但是过滤终了时刻和初始时刻相比,两者过滤效率的差距在减小,而这说明了 W2 在上超过了 W2 所占壁厚比例大对过滤效率的提升优势。

综上,6 种双层壁内涂层过滤器对各粒径颗粒物的过滤效率高于以 W1 作为单层壁内涂层的过滤器过滤效率,低于以 W2 作为单层壁内涂层的过滤器过滤效率。双层壁内涂层过滤器的初始过滤效率由 W2 的厚度比例决定, W1 和 W2 的上、下顺序对其没有影响。W2 的厚度比例较大和 W2 在上都有利于过滤器过滤效率在过滤过程中的提高,而 W2 在上比 W2 所占壁厚比例大的效果更加明显。

3.2.2 颗粒物总的过滤效率

图 7 为 8 种过滤器对颗粒物总的数量和质量过滤效率,它们是根据过滤壁捕获的颗粒物占总颗粒物的比例求得。对比图 7(a) 和图 7(b), 每种过滤器的数量过滤效率在过滤过程中都大于自身的质量过滤效率,这是因为过滤器对沉积质量贡献较大的大粒径颗粒物过滤效率较小,而对颗粒物总数中占比较大的小粒径颗粒物过滤效率大。但两种过滤效率随过滤时间的变化趋势一致,都随着颗粒物沉积逐渐变大。

对应于图 6 过滤初期, α_1 和 β_3 、 α_2 和 β_2 、 α_3 和 β_1

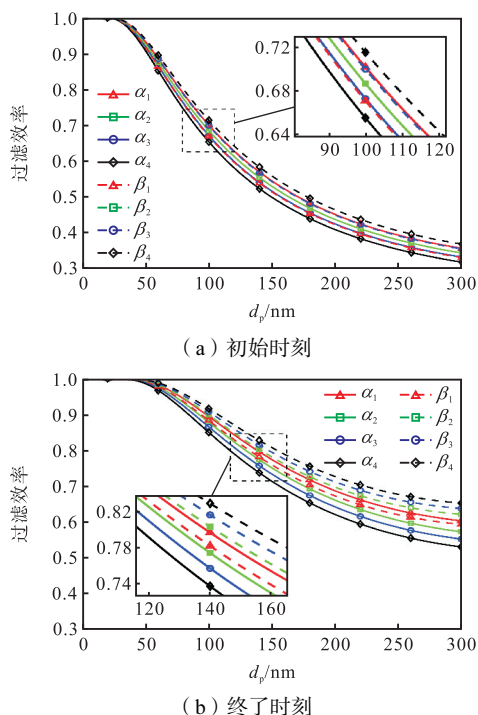


图 6 各粒径颗粒物过滤效率

Fig.6 Filtration efficiency of particles with various sizes

这 3 组过滤壁的过滤效率曲线分别重合, 并依次减小. 以过滤器的颗粒物数量过滤效率为例, 当 W2 在上时, 其厚度比例从 1/4 增大到 3/4, 过滤器初始过滤效率增大了 2.52%, 即 β_3 的初始过滤效率比 β_1 大 2.52%; 当 W2 在下时, 同样, 过滤效率增大了 2.50%, 即 α_1 比 α_3 大 2.50%. 颗粒物质量过滤效率的变化特征与数量过滤效率完全一致, 只是增大数值不同. 所以双层壁内涂层的上、下顺序对过滤器初始过滤效率没有影响, 而是由 W2 在过滤壁中的厚度比决定, 并与其厚度比例呈正相关. α_4 和 β_4 仍然处在最小和最大过滤效率的位置.

随着过滤进行, 各个过滤壁的过滤效率开始出现差异, β_3 、 β_2 和 β_1 的过滤效率分别高过了 α_1 、 α_2 和 α_3 , 再次说明了 W1 和 W2 厚度比例相同时, W2 在上比 W1 在上更有利于提高过滤效率. 当过滤进行到后期可以看到, β_2 、 β_1 的过滤效率分别超过了 α_1 、 α_2 ; 前两者的 W2 厚度比例分别比后两者小, 不同之处就是前两者的 W2 在过滤壁的上层, 这说明了 W2 在上比 W2 所占壁厚比例大, 更有利于提高过滤过程中颗粒物总的数量和质量过滤效率.

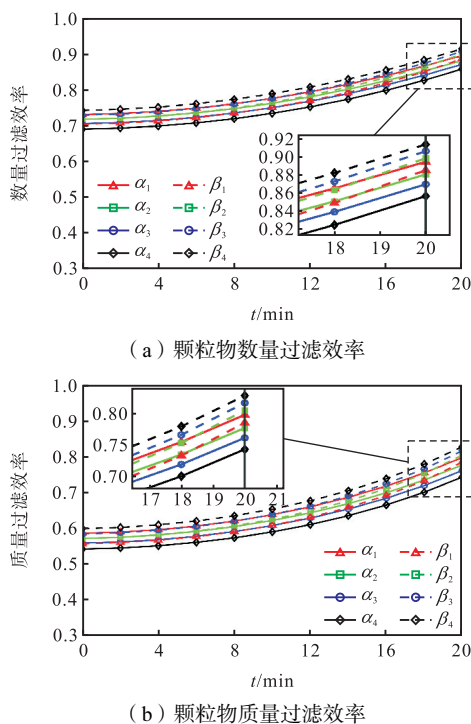


图 7 Total filtration efficiency of particles

3.2.3 压降

图 8 为 8 种过滤壁的压降随过滤时间的变化. 过滤初始时刻, 各种过滤壁的压降基本一致. 随着过滤进行, 各种过滤壁的压降逐渐增大并开始出现差异. 到终了时刻, β_4 、 β_3 、 β_2 、 α_1 、 β_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 的压

降依次减小. 这是因为各种过滤壁的初始渗透率差别不大, 随着颗粒物沉积, 过滤效率越高的过滤壁, 壁内沉积的颗粒物越多, 过滤壁的渗透率降低的幅度越大. 根据达西定律, 过滤壁的压降与其渗透率呈负相关. 同时 β_3 相对于 α_1 、 β_2 相对于 α_2 、 β_1 相对于 α_3 过滤终了时刻的压降大, 说明 W2 在上与 W1 在上相比会加剧过滤壁压降的升高. 而 β_2 相对于 α_1 、 β_1 相对于 α_2 过滤终了时刻的压降大, 说明了 W2 在上比 W2 所占壁厚比例大更会加剧过滤器压降的升高. 这种现象出现的原因和过滤效率可能是一致的, W2 在上引起颗粒物在上层局部大量沉积, 导致上层渗透率降低到对整个过滤壁压降起决定性作用.

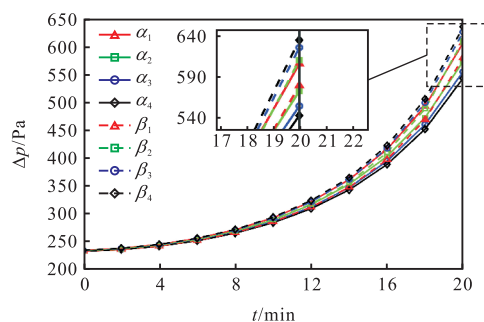


图 8 压降随过滤时间的变化

Fig.8 Change of pressure drop with filtration time

4 结 论

(1) 涂层量较大的涂层在上和涂层量较小的涂层在上相比, 过滤终了时刻颗粒物在双层壁内涂层过滤壁的上层会沉积更多, 上层的孔隙率更小; 上层涂层 (尤其是涂层量较小的涂层) 厚度比例增大会使颗粒物沉积分布和孔隙率分布在过滤壁厚方向上更均匀.

(2) 双层壁内涂层过滤器的初始过滤效率与涂层量较大涂层的厚度比例呈正相关, 涂层的上、下顺序对其没有影响; 涂层量较大的涂层在上和涂层量较小的涂层在上相比, 会增大双层壁内涂层过滤器过滤效率和压降在过滤过程中的提升幅度, 而且涂层量较大涂层的厚度在过滤壁厚中所占比例越大就越会强化这种结果.

(3) 相对于 6 种双层壁内涂层过滤器, 以涂层量较小的涂层为单层壁内涂层的过滤器过滤效率和压降始终最小, 而以涂层量较大的涂层为壁内单层涂层的过滤器始终最大.

(4) 涂层量较大的涂层在上和该涂层厚度比例大都会提高过滤过程中过滤效率和压降的增大幅度, 但是前者比后者作用更加明显, 所以建议选择涂层量较大的涂层在上同时该涂层厚度比例较小 (如 1/4 或

1/2) 的双层壁内涂层结构设计。

参考文献:

- [1] Maricq M M. Engine, aftertreatment, fuel quality and non-tailpipe achievements to lower gasoline vehicle PM emissions: Literature review and future prospects[J]. Science of the Total Environment, 2023, 866: 161225.
- [2] Zinola S, Leblanc M, Boreave A, et al. The particulate number emissions from GDI engines: Advanced characterization and reduction through a gasoline particulate filter with membrane technology[J]. Ingenieurs de L'Automobile, 2013, 6: 1-9.
- [3] Giechaskiel B, Joshi A, Ntziachristos L, et al. European regulatory framework and particulate matter emissions of gasoline light-duty vehicles: A review[J]. Catalysts, 2019, 9(7): 586-596.
- [4] Hu Z, Lu Z, Song B, et al. Impact of test cycle on mass, number and particle size distribution of particulates emitted from gasoline direct injection vehicles[J]. Science of the Total Environment, 2021, 762: 143128.
- [5] Awad O I, Ma X, Kamil M, et al. Particulate emissions from gasoline direct injection engines: A review of how current emission regulations are being met by automobile manufacturers[J]. Science of the Total Environment, 2020, 718: 137302.
- [6] 南征, 李楠, 张秋实, 等. 汽油机颗粒捕集器再生时载体温度特性研究[J]. 内燃机学报, 2022, 40(4): 322-330.
- [7] 汤东, 韩宇彬, 华伦, 等. 润滑油灰分对直喷汽油机颗粒捕集器性能影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2022, 52(11): 2501-2507.
- [8] Giechaskiel B, Valverde V, Kontses A, et al. Particle number emissions of a Euro 6d-temp gasoline vehicle under extreme temperatures and driving conditions[J]. Catalysts, 2021, 11(5): 607-616.
- [9] 欧娟, 孟忠伟, 方嘉, 等. 模拟碳烟在 CDPF 过滤壁面上的氧化演变特性[J]. 内燃机学报, 2021, 39(5): 431-438.
- [10] Richter J M, Klingmann R, Spiess S, et al. Application of catalyzed gasoline particulate filters to GDI vehicles[J]. SAE International Journal of Engines, 2012, 5(3): 1361-1370.
- [11] Blažek M, Žalud M, Kočí P, et al. Washcoating of catalytic particulate filters studied by time-resolved X-ray tomography[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 409: 128057.
- [12] 史学刚, 张萌萌. 涂层分布形式对汽油机颗粒捕集器催化性能的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(3): 15-20.
- [13] Walter R, Neumann J, Hinrichsen O. A model-based analysis of washcoat distribution on zoned coated gasoline particulate filters[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 441: 135615.
- [14] Tanaka A, Miyoshi N, Sato A. Development of low pressure and high performance GPF catalyst[C]// SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 2018, 2018-01-1261.
- [15] Nakayama H, Banno Y, Mochizuki H, et al. Development of GPF using micro-CT measurement and numerical analytical technique[J]. Topics in Catalysis, 2019, 62(1/4): 419-425.
- [16] Liu X, Chanko T, Lambert C, et al. Gasoline particulate filter efficiency and backpressure at very low mileage[C]// SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 2018, 2018-01-1259.
- [17] Gong J, Stewart M L, Zelenyuk A, et al. Importance of filter's microstructure in dynamic filtration modeling of gasoline particulate filters (GPFs): Inhomogeneous porosity and pore size distribution[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 338: 15-26.
- [18] Mitsouridis M A, Karamitros D, Koltsakis G. Model-based analysis of TWC-coated filters performance[J]. Emission Control Science and Technology, 2019, 5(3): 238-252.
- [19] Bissett E J, Kostoglou M, Konstandopoulos A G. Frictional and heat transfer characteristics of flow in square porous tubes of wall-flow monoliths[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 84: 255-265.
- [20] Gong J, Rutland C J. PDF-based heterogeneous multiscale filtration model[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(8): 4963-4970.
- [21] Ogyu K, Ogasawara T, Sato H, et al. Development of high porosity SiC-DPF which is compatible with high robustness and catalyst coating capability for SCR coated DPF application[C]// SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 2013, 2013-01-0840.
- [22] Gong J, Viswanathan S, Rothamer D A, et al. Dynamic heterogeneous multiscale filtration model: Probing micro and macroscopic filtration characteristics of gasoline particulate filters[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(19): 11196-11204.
- [23] Marre S, Palmeri J, Larbot A, et al. Modeling of submicrometer aerosol penetration through sintered granular membrane filters[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 274(1): 167-182.