

柴油机壁流式过滤体捕集与流阻性能影响规律^{*}

龚金科 刘云卿 龙罡 吴钢 余明果 吁璇

(湖南大学机械与运载工程学院,长沙 410082)

【摘要】 根据气流在柴油机壁流式微粒捕集器内的流动特点,将过滤壁面假设为由若干球状单元组成,建立了壁流式过滤体捕集过程的数学模型。研究了排气特征、过滤体结构参数对壁流式过滤体捕集及流阻性能的影响规律。结果表明,减小排气流量、增大过滤体体积等方法,既能优化捕集性能,又能优化流阻性能;减小过滤体长径比,能优化流阻性能,而对捕集性能没有影响;增大过滤壁厚度,能优化捕集性能,但会使流动性能恶化;改变排气温度和孔道宽度,对捕集性能及流阻性能的影响都较小。最后通过试验验证了数学模型的准确性。

关键词: 柴油机 壁流式 微粒捕集器 性能 影响规律

中图分类号: TK421.5

文献标识码: A

Characteristics of Filtration and Flow-resistance of Wall-flow Diesel Particulate Filter

Gong Jinke Liu Yunqing Long Gang Wu Gang Yu Mingguo Yu Xuan

(College of Mechanical and Vehicle, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract

Based on the air-flow characteristics of diesel wall-flow particulate filter, the mathematical model of loading process for the wall-flow filter was proposed. In this model, the porous wall was assumed to be composed of numerous spherical collectors. The effects of the exhaust-flow characteristic and the structural parameter of filter on the over-all properties of filter were analyzed. The results showed that decreasing exhaust-flow and increasing volume of filter optimize the characteristics of filtration and flow-resistance. Decrease in the ratio of length to diameter of filter optimize flow-resistance, whereas has no influence on filtration. Increment in wall thickness optimizes filtration, whereas deteriorates flow-resistance. Exhaust temperature and channel width both have a minor influence on both filtration and flow-resistance. The experimental results verified the accuracy of mathematical model.

Key words Diesel engine, Wall-flow, Diesel particulate filter, Characteristics, Effect law

引言

近年来,随着汽车排放法规的日趋严格,柴油机微粒排放后处理技术已经成为降低柴油机微粒排放的重要手段。在微粒捕集器中,壁流式过滤体是目前综合性能最优、在国内外研究和应用最广泛的过滤体^[1]。

壁流式过滤体捕集及流阻性能是衡量过滤体工作性能优劣的重要指标,可分别用捕集效率及流动

阻力来评价。捕集效率越高、流动阻力越小,则壁流式过滤体的工作性能越好。但过滤体的捕集性能及流阻性能往往是相互制约的,因此对过滤体捕集性能和流阻性能进行综合优化具有重要意义。以往对壁流式过滤体性能的研究存在诸多局限性:大多数研究者集中在某一方面进行研究,如龚金科^[2]、孟忠伟^[3]仅研究了壁流式过滤体的流动阻力,谭丕强^[4]、宁智^[5]仅研究了壁流式过滤体的过滤系数及过滤效率;大多数研究者在研究壁流式过滤体捕集

收稿日期: 2008-12-17 修回日期: 2009-01-24

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50876027)和国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA11A116)

作者简介: 龚金科,教授,博士生导师,主要从事发动机排放污染与控制研究,E-mail: gongjinke@126.com

性能时,并没有考虑气流在过滤体内的流动特点,并且在建立模型时,都将捕集介质假设为由若干毛细管组成^[4~6]。然而 Konstandopoulos 通过对壁流式过滤体拍摄的 SEM 照片发现,其过滤壁面是一种类似球状填充床的捕集介质,而非毛细管状^[7],因而采用毛细管的假设难免会使计算值与实际值产生偏差。因此,本文根据气流在壁流式过滤体内的流动特点,将过滤体壁面视为由若干球状捕集单元组成,建立一种新的壁流式过滤体捕集过程的数学模型,研究壁流式过滤体捕集性能及流阻性的影响因素,并提出综合优化措施。

1 壁流式过滤体的物理模型及其假设

壁流式过滤体由一系列相邻的交替堵塞的进排气孔道组成。排气从进气孔道进入过滤体后,由于进气孔道末端被堵塞,因此气流必须通过过滤壁面,从相邻的排气孔道流出,于是微粒被捕集在过滤壁面的内部和进气孔道的过滤壁表面。由于壁流式过滤体满足几何模型的重复性,为简化计算,假设所有孔道均相同,且没有相互影响,从而将壁流式过滤体简化为图 1 所示的单孔道结构。

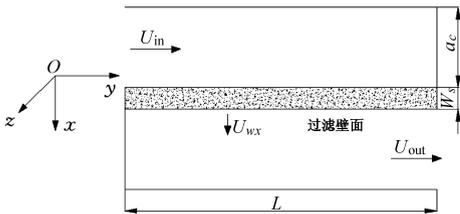


图 1 壁流式过滤体的进出口孔道模型

Fig.1 Model of inlet and outlet of wall-flow filter

在建立数学模型之前,根据过滤壁面捕集微粒的特点进行如下假设:

(1)对于洁净或沉积了少量微粒的过滤体,假定排气在流经过滤壁面时,排气中的微粒浓度并不会随时间改变。

(2)由于排气在流经过滤壁面时,并不会从 y 、 z 方向流出,因而 y 、 z 方向的渗流速度和微粒浓度梯度远远小于 x 方向,因此可假定微粒浓度在 y 、 z 方向上不发生变化。

(3)根据 Bissett 等人的研究^[8],渗流速度在 x 方向的变化非常小,可将其视为常数。

2 捕集过程数学模型

2.1 壁流式过滤体捕集效率数学模型

在过滤壁内取边长为 dx 、 dy 和 dz 的六面体单元作为微粒浓度控制体,如图 2 所示。依照上述假设,并根据质量守恒定律可知:微粒净流入控制体的

体积速率、微粒净扩散入控制体的体积速率以及由源项引起的微粒体积变化速率之和应等于零,即

$$\left[U_{wx} \left(C - \frac{\partial C}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dydz - U_{wx} \left(C + \frac{\partial C}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dydz \right] + \left[-D_p \frac{\partial}{\partial x} \left(C - \frac{\partial C}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dydz + D_p \frac{\partial}{\partial x} \left(C + \frac{\partial C}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dydz \right] + S_c = 0 \quad (1)$$

式中 C ——排气微粒的体积分数

U_{wx} ——过滤壁面内的渗流速度

D_p ——微粒扩散系数

S_c ——控制体内由源项引起的微粒变化速率

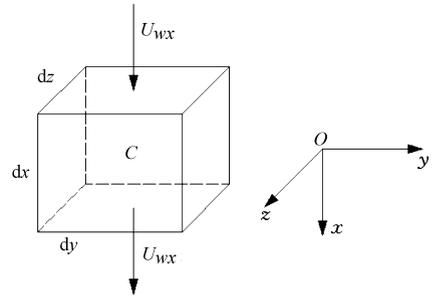


图 2 微粒浓度控制体

Fig.2 Control volume of particle concentration

$$D_p = \frac{k_b T}{3\pi\mu d_p} \quad (2)$$

式中 T ——排气温度 d_p ——微粒直径

k_b ——波尔兹曼常数,取 1.38×10^{-23} J/K

μ ——排气黏度,其大小与温度有关

根据 VDI heat atlas 方法^[9], μ 表示为

$$\mu = 8.32 \times 10^{-15} T^3 - 2.96 \times 10^{-11} T^2 + 6.24 \times 10^{-8} T + 2.31 \times 10^{-6} \quad (3)$$

根据经典的捕集理论^[10], S_c 表示为

$$S_c = -ECU_0 S_M \quad (4)$$

式中 E ——总捕集系数,表征过滤体捕集微粒能力的强弱

S_M ——控制体内垂直于渗流速度方向(x 方向)的过滤面积

U_0 ——微孔内微粒流速

根据多孔介质理论, U_0 可表示为

$$U_0 = \frac{U_{wx}}{\epsilon} \quad (5)$$

式中 ϵ ——过滤壁面孔隙率

研究表明,目前微粒被捕集主要有 3 种机理的作用,即惯性捕集机理、扩散捕集机理和拦截捕集机理。其中,惯性捕集机理的大小主要由 Stokes 数决定。

$$S_{tk} = \frac{(\rho_p - \rho_g) d_p^2 U_0}{18\mu d_c} \quad (6)$$

式中 ρ_p ——微粒的材料密度

ρ_g ——排气密度 d_c ——捕集直径

当 $S_{ik} > 1.211$ 时, 惯性捕集机理占主导作用, 而当 $S_{ik} < 0.4$ 时, 惯性捕集机理的作用非常微弱^[11]。柴油机排气微粒一般不大于 $1 \mu\text{m}$, 壁流式过滤体过滤壁面的微孔流速一般不超过 0.4 m/s ^[7], 微粒密度取 2000 kg/m^3 , 黏度取 $2.5 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 按式(6)可计算出 $S_{ik} = 0.047$, 因此在壁流式过滤体中, 惯性捕集机理的作用可以忽略不计。

当微粒被一种捕集机理捕集后, 就不能被其他机理捕集, 因此总捕集系数表示为

$$E = E_R + E_D - E_R E_D \quad (7)$$

式中 E_R ——拦截捕集系数

E_D ——扩散捕集系数

它们因捕集模型而异。

根据 Konstandopoulos 对壁流式过滤体过滤壁面拍摄的 SEM 照片可知^[8], 壁流式过滤体的过滤壁面是一种类似于填充床的球状捕集介质。因此本文将过滤壁面假设为由若干的球状单元组成, 如图 3 所示。

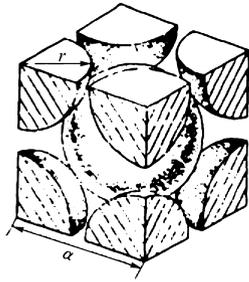


图3 球状单元模型

Fig.3 Model of sphere unit

球状单元的直径为捕集直径 d_c , 由多孔介质渗流理论有

$$d_c = \frac{3}{2} \frac{1-\epsilon}{\epsilon} d_{\text{pore}} \quad (8)$$

式中 d_{pore} ——过滤壁面的微孔直径

填充床捕集模型的扩散捕集系数表示为^[12]

$$E_D = 3.5 \left[\frac{\epsilon}{2-\epsilon-1.8(1-\epsilon)^{\frac{1}{3}}-0.2(1-\epsilon)^2} \right]^{\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}} \quad (9)$$

式中 Pe ——Peclet 数

填充床捕集模型的拦截捕集系数表示为^[12]

$$E_R = 1.5 [2-\epsilon-1.8(1-\epsilon)^{\frac{1}{3}} - 0.2(1-\epsilon)^2] \frac{N_R^2}{(1+N_R)^{\frac{3-2\epsilon}{3\epsilon}}} \quad (10)$$

其中 $N_R = d_p/d_c$

根据球状捕集模型的特点, S_M 可以表示为

$$S_M = \frac{1-\epsilon}{\pi d_c^3} \frac{\pi}{4} d_c^2 dx dy dz = \frac{3}{2} \frac{1-\epsilon}{d_c} dx dy dz \quad (11)$$

将式(11)代入式(4)中可得

$$S_c = -\frac{3E(1-\epsilon)}{2\epsilon d_c} C U_{wx} dx dy dz \quad (12)$$

将式(12)代入式(1), 并化简可得

$$D_p \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U_{wx} \frac{\partial C}{\partial x} - U_{wx} \frac{3E(1-\epsilon)}{2\epsilon d_c} C = 0 \quad (13)$$

方程(13)的边界条件为

$$C = \begin{cases} C_0 & (x=0) \\ 0 & (x \rightarrow \infty) \end{cases} \quad (14)$$

式中 C_0 ——过滤体入口排气流微粒体积分数

根据上述边界条件, 方程(13)的解为

$$C = C_0 \exp \left[\frac{U_{wx} - \sqrt{U_{wx}^2 + \frac{6E(1-\epsilon)D_p U_{wx}}{\epsilon d_c}}}{2D_p} x \right] \quad (15)$$

设过滤壁面的壁厚为 w_s , 则柴油机排气流经过滤壁面后的微粒浓度 C_w 为

$$C_w = C_0 \exp \left[\frac{U_{wx} - \sqrt{U_{wx}^2 + \frac{6E(1-\epsilon)D_p U_{wx}}{\epsilon d_c}}}{2D_p} w_s \right] \quad (16)$$

则壁流式过滤体对微粒的捕集效率为

$$\eta = \frac{C_0 - C_w}{C_0} =$$

$$1 - \exp \left[\frac{U_{wx} - \sqrt{U_{wx}^2 + \frac{6E(1-\epsilon)D_p U_{wx}}{\epsilon d_c}}}{2D_p} w_s \right] \quad (17)$$

根据壁流式过滤体的捕集特点, 过滤壁面的平均渗流速度为

$$U_{wx} = \frac{Q_V}{4NaL} \quad (18)$$

$$N = \frac{\pi D^2}{8(a+w_s)^2} \quad (19)$$

式中 a ——壁流式过滤体入口孔道宽度

L ——壁流式过滤体入口孔道长

Q_V ——柴油机排气体积流量

D ——壁流式过滤体直径

N ——壁流式过滤体的入口孔道数目

则式(18)可变形为

$$U_{wx} = \frac{2Q_V(a+w_s)^2}{\pi a L D^2} \quad (20)$$

将式(20)代入式(5), 则微孔内气流速度为

$$U_0 = \frac{2Q_V(a+w_s)^2}{\epsilon \pi a L D^2} \quad (21)$$

将式(21)代入式(17), 可得壁流式过滤体的捕集效率公式为

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{Q_V(a + w_s)^2 w_s}{\pi a L D^2 D_p} - \sqrt{\frac{Q_V^2(a + w_s)^4 w_s^2}{\pi a^2 L^2 D^4 D_p^2} + \frac{3Q_V(a + w_s)^2 w_s^2 E(1 - \epsilon)}{\pi a L D^2 D_p \epsilon d_c}}\right) \quad (22)$$

2.2 壁流式过滤体流动阻力数学模型

对于洁净或沉积了少量微粒的过滤体,其流动阻力主要来源于3部分^[13]:过滤壁面的渗流阻力 Δp_w 、进排气道内部流动摩擦引起的沿程阻力 $\Delta p_{in\&out}$ 以及在进气道入口处和排气道出口处的局部阻力 $\Delta p_{cut\&exp}$ 。因此其总流动阻力表示为

$$\Delta p = \Delta p_w + \Delta p_{in\&out} + \Delta p_{cut\&exp} \quad (23)$$

Δp_w 满足 Darcy 定律,表示为

$$\Delta p_w = \frac{\mu}{k_w} U_{avr} w_s \quad (24)$$

式中 k_w ——过滤壁面渗透系数

排气在流经进气孔道时,其沿程阻力满足 Darcy-Weibach 公式,即

$$\Delta p_{in} = C_f \frac{L \rho_g U^2}{a} \gamma = C_f Re \gamma \frac{\mu}{a^2} UL = F \gamma \frac{\mu}{a^2} UL \quad (25)$$

式中 C_f ——动量传递系数

Re ——孔道内的雷诺数

γ ——修正系数,根据 Konstandopoulos 的研究^[13], $\gamma = 1/3$

F ——摩擦因子,当气流在正方形孔道内作充分发展的流动时, $F = 28.454$

U ——过滤体孔道内入口气流速度

$$U = \frac{8Q_V(a + w_s)^2}{\pi D^2 a^2} \quad (26)$$

对于洁净或沉积了少量微粒的过滤体,其进排气孔道的沿程阻力是相等的,因此 $\Delta p_{in\&out}$ 表示为

$$\Delta p_{in\&out} = 2F \gamma \frac{\mu}{a^2} UL \quad (27)$$

进气道入口处和排气道出口处的局部阻力 $\Delta p_{cut\&exp}$ 表示为

$$\Delta p_{cut\&exp} = \xi \frac{\rho_g U^2}{2} \quad (28)$$

式中 ξ ——进出口处局部损失系数之和, $\xi = 0.82$

将式(20)代入式(24),式(26)分别代入式(27)和(28),再将最终的结果代入式(23),并化简可得壁流式过滤体的总流动阻力公式为

$$\Delta p = \frac{2\mu Q_V(a + w_s)^2}{\pi D^2 L} \left(\frac{w_s}{k_w a} + \frac{8F \gamma L^2}{a^4} \right) + \frac{32 \rho_g \xi Q_V^2 (a + w_s)^4}{\pi^2 D^4 a^4} \quad (29)$$

3 计算结果及分析

由于捕集系数决定了过滤体捕集微粒能力的大小,因此首先研究过滤体的捕集系数随微粒粒径的变化关系。过滤体的排气特征及过滤体结构的基本参数如表1所示。在研究某一参数对过滤体综合性能的影响时,其余参数恒定不变。

表1 计算参数

Tab.1 Calculation parameters

参数	数值	参数	数值
排气流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	0.236	孔道宽度/mm	2
排气温度/K	483	过滤壁厚度/mm	0.43
过滤体直径/mm	229	孔隙率	0.48
过滤体长度/mm	305	微孔孔径/ μm	12.5
过滤体长径比	1.33	渗透率/ m^2	21.8×10^{-13}
过滤体体积/L	12.56		

图4给出了表1所示的参数下,过滤体捕集系数随微粒粒径的变化关系。从图中可以看到,过滤体对不同粒径微粒的捕集效果差异显著:总捕集系数随微粒粒径的增大,首先迅速减小,并在微粒粒径为 $0.27 \mu m$ 时达到极小值,之后捕集系数又开始迅速增大。这是因为微粒粒径的增大,一方面会使分子的布朗扩散运动减弱,从而使得扩散捕集机理的作用减弱;而另一方面却增强了捕集物对微粒的拦截效果,从而导致拦截捕集机理的作用增强。当微粒粒径小于 $0.27 \mu m$ 时,扩散捕集机理占主导作用;而当微粒粒径大于 $0.27 \mu m$ 时,拦截捕集机理占主导作用。

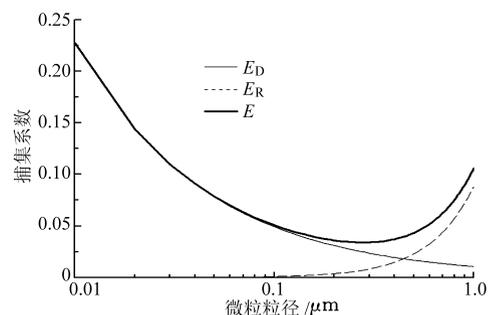


图4 捕集系数随微粒粒径的变化曲线

Fig.4 Filtration coefficients as a function of particle size

排气特征主要包括入口排气流量及排气温度。图5和图6分别给出了排气特征对壁流式过滤体捕集性能和流阻性能的影响。

从图5中可以看到,减小排气流量、提高排气温度都可以显著提高过滤体对小尺度微粒的捕集效率,而对大尺度微粒捕集效率的影响十分有限。这

是因为对于小尺度微粒,扩散捕集机理占主导作用。因而排气流量越小,微粒在过滤壁面内的滞留时间越长;排气温度越高,微粒的布朗扩散运动越剧烈。这两方面因素都能加强扩散捕集机理的作用,从而能显著提高对小尺度微粒的捕集效果。但对于大尺

度微粒,拦截捕集机理占主导作用,扩散捕集机理的作用十分微弱。由式(10)可知,拦截捕集效果的强弱主要由壁流式过滤体的孔隙率及微孔孔径决定,因而排气流量及排气温度对大尺度微粒的影响较小。

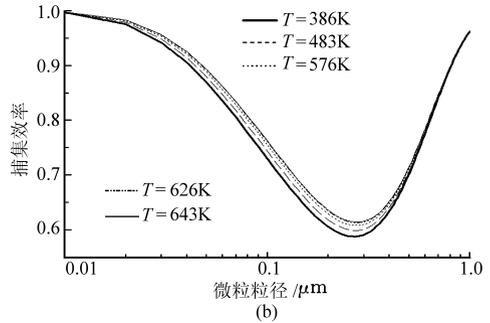
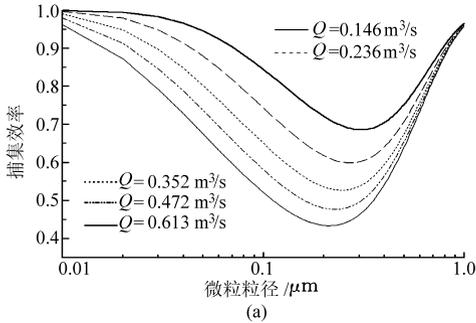


图 5 排气特征对捕集性能的影响

Fig.5 Effect of exhaust characteristic on filtration

(a) 排气流量 (b) 排气温度

从图 6 中可以看到,排气流量越小、排气温度越低,则壁流式过滤体的流动阻力越小。且随着排气流量的减小,排气温度对流动阻力的影响逐渐减弱。当排气流量小于 $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,排气温度对流动阻力的影响可忽略不计。

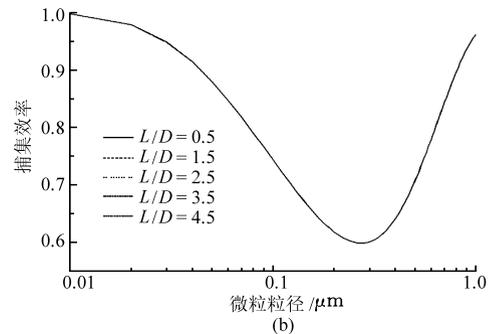
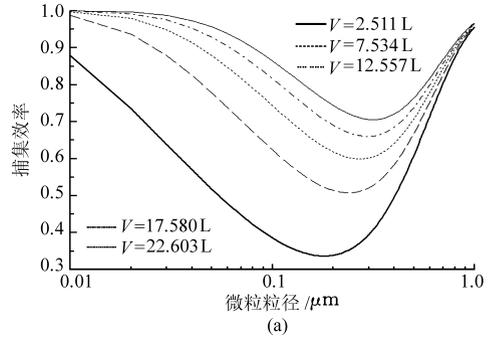


图 7 过滤体体积及长径比对捕集性能的影响

Fig.7 Effects of filter volume and ratio of length

to diameter on filtration

(a) 过滤体体积 (b) 长径比

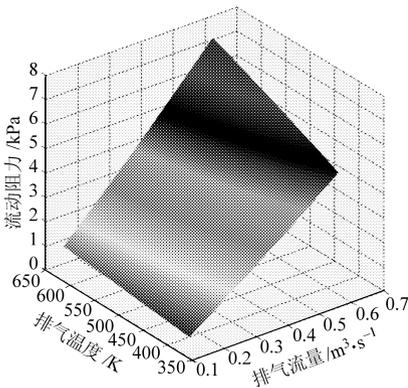


图 6 排气特征对流阻性能的影响

Fig.6 Effect of exhaust characteristic on flow-resistance

图 7 和图 8 分别给出了过滤体的体积及长径比对壁流式过滤体捕集性能及流阻性能的影响。

从图 7a 中可以看到,增大过滤体体积可显著提高捕集效率。这是因为过滤体体积越大,过滤壁内的渗流速度则越小,即微粒在过滤壁面内的滞留时间越长,因而扩散捕集机理的作用越显著。从图 7b 可以看到,改变长径比对壁流式过滤体的捕集性能没有影响。

从图 8 中可以看到,随着过滤体体积的增大,流动阻力首先迅速减小,当过滤体体积超过 10 L 后,继续增大过滤体体积,对优化流阻性能的作用已经不大。从图 8 中还可以看到,长径比越小,壁流式过滤体的流动阻力则越小,但随着过滤体体积的增大,长径比对流动阻力的影响迅速减弱。

图 9 和图 10 分别给出了过滤壁厚度和孔道宽度对过滤体捕集性能及流阻性能的影响。

从图 9a 中可以看到,增大过滤壁厚度,能显著提高过滤体对各粒径微粒的捕集效率。这是因为过滤壁是壁流式过滤体捕集微粒的核心部件,当其厚度增大时,加强了过滤体对各粒径微粒的阻碍作用。从图 9b 中可以看到,减小孔道宽度,能提高小尺度微粒的捕集效率,而对大尺度微粒的捕集效率影响很小。由式(20)可知,增大孔道宽度,能提高过滤壁内的渗流速度,这导致扩散捕集机理的作用减弱,从

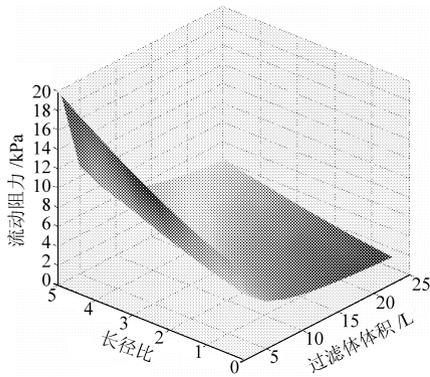


图8 过滤体体积及长径比对流阻性能的影响

Fig.8 Effects of filter volume and ratio of length to diameter on flow-resistance

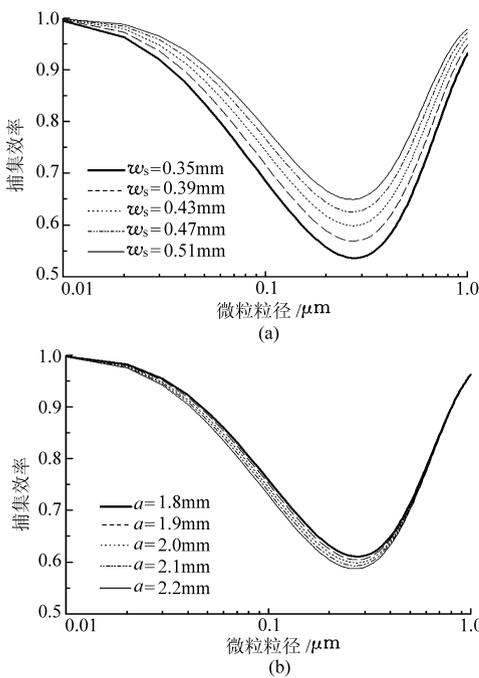


图9 过滤壁厚度及孔道宽度对捕集性能的影响

Fig.9 Effects of wall thickness and channel width on filtration

(a) 过滤壁厚度 (b) 孔道宽度

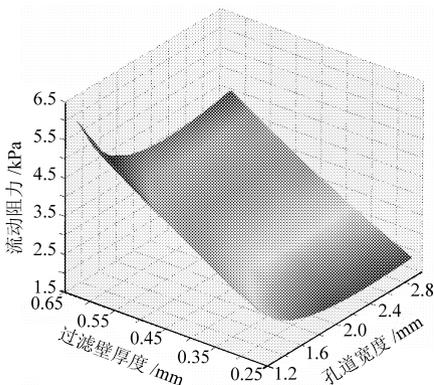


图10 过滤壁厚度及孔道宽度对流阻性能的影响

Fig.10 Effects of wall thickness and channel width on flow-resistance

而使捕集效率降低。与过滤壁厚度相比,孔道宽度对捕集性能的影响十分有限。

从图10中可以看到,随着过滤壁厚度的减小,过滤体的流动阻力迅速减小;随着孔道宽度的增大,过滤体的流动阻力首先迅速减小,然后略微增大。这是由于增大孔道宽度,一方面减小了进排气的沿程阻力;而另一方面增大了过滤壁面的渗流速度,从而增大了渗流阻力。对于孔道较窄的过滤体,前者占主导作用,而对于孔道较宽的过滤体,后者占主导作用。与过滤壁厚度相比,孔道宽度对流阻性能的影响同样十分有限。

4 模型试验验证

为了验证上述数学模型的准确性,进行了如下试验。试验装置简图如图11所示。试验用发动机为YC6M320型柴油机,过滤体为美国Corning公司生产的EX-80堇青石壁流式过滤体,其结构参数如表1所示。

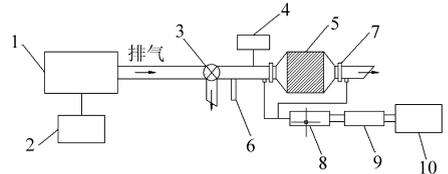


图11 试验装置简图

Fig.11 Schematic of experiment set-up

1. 柴油机 2. 测功器 3. 旁通阀 4. 空气流量计 5. 微粒捕集器 6. 温度计 7. 环形压力计 8. 热蚀溶器 9. 稀释系统 10. SMPS

试验包括:

(1)采用TSI公司的3936型颗粒粒径分析仪(SMPS),测量壁流式微粒捕集器入口和出口的排气微粒体积分数粒径分布特征,假定排气微粒均呈球形,则可得排气微粒的体积分数粒径分布特征。以壁流式过滤体入口排气微粒的体积分数粒径分布的测量值为初始条件,根据式(16)可计算出过滤体出口的排气微粒体积分数粒径的分布特征。将过滤体出口的排气微粒体积分数粒径计算值与测量值对比,验证过滤体捕集效率公式(22)的正确性。试验工况为转速1500 r/min、负荷50%,转速2100 r/min、负荷80%两工况,针对某一工况进行试验时,首先使排气流直接排入大气,待此工况运行10 min后,再使排气流通过过滤体。

(2)通过测量过滤体的流动阻力随流量的变化特性,验证过滤体的流动阻力公式(29)。试验时,将发动机工况设定为转速2100 r/min、负荷80%,通过调节旁通阀开度控制过滤体的入口流量,测量不同流量下,过滤体的流动阻力。

图12和图13分别给出了过滤体出口排气微粒

体积分数分布特征和过滤体流动阻力的计算值与测量值的对比结果。从图 12 和图 13 中可看到, 计算值与测量值整体趋势吻合得较好, 在具体数值上有所偏差, 其原因可能为: ①数学模型是取过滤壁的平均渗流速度及孔道内的平均气流速度作为计算条件, 而实际中这两个物理量是沿孔道长度方向变化的。②试验本身存在误差。

综上可认为本文建立的数学模型可以用于研究

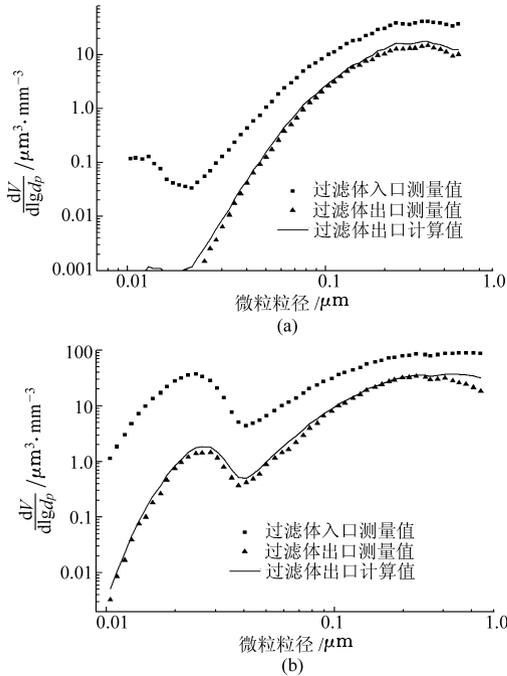


图 12 排气微粒体积分数粒径分布特征的对比结果

Fig. 12 Exhaust particle volume concentration comparison between calculated and experimental values

(a) 转速 1500 r/min, 负荷 50% (b) 转速 2100 r/min, 负荷 80%

壁流式过滤体的捕集性能及流阻性能。

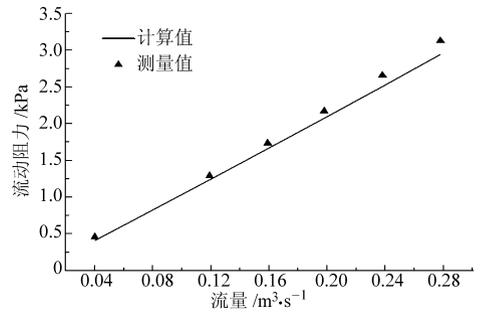


图 13 过滤体流动阻力的对比结果

Fig. 13 Flow-resistance comparison between calculated and experimental values

5 结论

(1) 推导并建立了壁流式过滤体捕集过程的数学模型, 试验结果表明此数学模型可以用于研究壁流式过滤体的捕集性能及流阻性能。

(2) 在柴油机排气微粒粒径范围内, 壁流式过滤体的主要捕集机理为扩散捕集机理和拦截捕集机理: 粒径小于 $0.27 \mu\text{m}$ 时, 扩散捕集机理占主导作用; 粒径大于 $0.27 \mu\text{m}$ 时, 拦截捕集机理占主导作用。

(3) 减小排气流量和增大过滤体体积, 既能提高捕集效率、又能减小流动阻力, 且影响非常显著; 提高排气温度、增大过滤壁厚度, 能提高捕集效率和流动阻力; 减小过滤体长径比, 对捕集效率没有影响, 但能降低流动阻力; 减小孔道宽度, 能提高捕集效率, 而流动阻力随孔道宽度和孔道密度的降低, 先减小、后增大。

参 考 文 献

- 1 龚金科, 赖天贵, 刘孟祥, 等. 柴油机微粒捕集器过滤材料与再生方法分析与研究[J]. 内燃机, 2004, 20(3): 1~4.
Gong Jinke, Lai Tianguai, Liu Mengxiang, et al. Analysis and research of filter materials and its regeneration of diesel particulate filter[J]. Internal Combustion Engines, 2004, 20(3): 1~4. (in Chinese)
- 2 龚金科, 赖天贵, 董喜俊, 等. 车用柴油机微粒捕集器流场的数值模拟与分析[J]. 汽车工程, 2006, 28(2): 129~133.
Gong Jinke, Lai Tianguai, Dong Xijun, et al. Numerical simulation and analysis of the flow-field in a diesel particulate trap [J]. Automobile Engineering, 2006, 28(2): 129~133. (in Chinese)
- 3 孟忠伟, 宋蕾, 姚强, 等. 壁流式过滤体捕集微细颗粒过程的数值模拟[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(5): 678~681.
Meng Zhongwei, Song Qiang, Yao Qiang, et al. Numerical simulation of fine particles trapping process using a wall-flow honeycomb filter[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2006, 46(5): 678~681. (in Chinese)
- 4 谭丕强, 胡志远, 楼狄明, 等. 柴油机捕集器结构参数对不同粒径微粒过滤特性的影响[J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 175~181.
Tan Piqiang, Hu Zhiyuan, Lou Diming, et al. Effects of diesel particulate filter structural parameters on filtration performance of different size particles [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 175~181. (in Chinese)

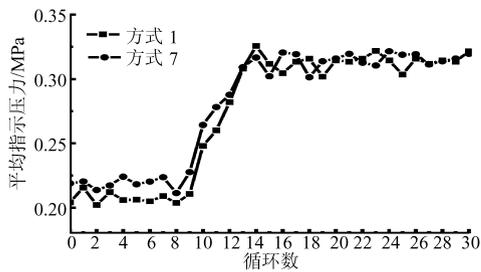


图 13 方式 1 与方式 7 的 IMEP 变化情况比较
Fig. 13 Comparison of IMEP transition between
in case 1 and case 7

4 结论

(1) 在 4VVAS-HCCI 汽油发动机中,进、排气门参数的耦合策略对 HCCI 的燃烧过程有着显著影响。为了减小泵气损失,进、排气门相位应遵循进气门开启相位 IVO 与排气门关闭相位 EVC 关于排气上止点对称的原则。

(2) 进、排气门最大升程的同步改变并配合以排气门相位的协同控制,在获得更快的发动机负荷响应速度的同时也能兼顾到燃油经济性。

渡的响应特性。

参 考 文 献

- Li Jian, Zhao Hua, Nicos Ladommatos, et al. Research and development of controlled auto-ignition (CAI) combustion in a 4-stroke multi-cylinder gasoline engine[C]. SAE Paper 2001-01-3608, 2001.
- Zhao Hua, Li Jian, Tom Ma, et al. Performance and analysis of a 4-stroke multi-cylinder gasoline engine with CAI combustion[C]. SAE Paper 2002-01-0420, 2002.
- Magnus Sjöberg, John E Dec. An investigation of the relationship between measured intake temperature, BDC temperature, and combustion phasing for premixed and DI HCCI engines[C]. SAE Paper 2004-01-1900, 2004.
- Aceves S, Martinez-Frias J, Flowers D, et al. A decoupled model of detailed fluid mechanics followed by detailed chemical kinetics for prediction of iso-octane HCCI combustion[C]. SAE Paper 2001-01-3612, 2001.
- Stanglmaier R H, Roberts C E. Homogeneous charge compression ignition (HCCI): benefits, compromises, and future engine application[C]. SAE Paper 1999-01-3682, 1999.
- Yang Jialin, Todd Culp, Thomas Kenney. Development of a gasoline engine system using HCCI technology—the concept and the test results[C]. SAE Paper 2002-01-2832, 2002.
- Chen Rui, Nesa Milovanovic. A computational study into the effect of exhaust gas recycling on homogeneous charge compression ignition combustion in internal combustion engines fuelled with methane[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2002, 41(9): 805~813.
- Zhao H, Peng Z, Williams J, et al. Understanding the effects of recycled burnt gases on the controlled autoignition (CAI) combustion in four-stroke gasoline engines[C]. SAE Paper 2001-01-3607, 2001.
- 周能辉. 汽油机 HCCI 发动机闭环反馈控制的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
Zhou Nenghui. Study on close loop control of a-stroke gasoline HCCI combustion engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)

(上接第 7 页)

- 宁智, 宋波, 资新运, 等. 柴油机排气微粒壁流式陶瓷过滤体过滤机理及影响因素[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(4): 69~73.
Ning Zhi, Song Bo, Zi Xinyun, et al. Study on the trap mechanisms and effects factors of the diesel ceramic wall flow filter [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 29(4): 69~73. (in Chinese)
- 龚金科, 董喜俊, 赖天贵, 等. 车用柴油机微粒捕集器捕集特性模拟计算与分析[J]. 车用发动机, 2005, 159(3): 24~27.
Gong Jinke, Dong Xijun, Lai Tianguai, et al. Calculation and analyses of trapping characteristic of diesel particulate filters [J]. Vehicle Engine, 2005, 159(3): 24~27. (in Chinese)
- Konstandopoulos A G, John H J. Wall-flow diesel particulate filters-their pressure drop and collection efficiency[C]. SAE Paper 890405, 1989.
- Bissett E J. Mathematical model of the thermal regeneration of a wall-flow monolith diesel particulate filter[J]. Chemical Engineering Science, 1984, 39(7): 1 232~1 244.
- Ober E. Internal combustion engines and air pollution[M]. London: Intext Educational Publishers, 1985.
- Rumpf H, Gupta A. Einfusse und korngrößenverteilung in widerstandsdesetz der porestromnung [J]. Chemie-Ing, Techn., 1971, 43(2): 367~375.
- Orr C. Filtration: principles and practices. Part I [M]. New York: Marcel Dekker, INC, 1977: 25~36.
- Lee K W, Gieseke J A. Collection of aerosol particles by packed beds[J]. Env. Sci. Tech, 1979, 13(4): 466~470.
- Konstandopoulos A G. Inertial contributions to the pressure drop of diesel particulate filters[C]. SAE Paper 2001-01-0909, 2001.