

GT-Power 用于柴油机排气颗粒捕集器的仿真研究

Simulation of Diesel Particulate Filters using GT-Power

谭丕强 张瑞峰

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 本文利用 GT-Power 软件进行了柴油机颗粒捕集器 DPF 的仿真研究。建立了柴油机 DPF 的仿真模型, 研究了不同结构参数下 DPF 捕集性能的变化, 以及排气温度对再生性能的影响。

关键词: GT-Power, 柴油机, 颗粒捕集器, 捕集, 再生

Abstract: Diesel particulate filters (DPF) are simulated using GT-Power software in this paper. DPF model is established under GT-Power environment. Trap performance and pressure drop of DPF with different structure parameters are studied, and effects of exhaust temperature on DPF regeneration process are also simulated.

Key words: GT-Power, Diesel engine, DPF, Trap, Regeneration

1 前言

为满足未来更为严格的汽车排放法规, 排气后处理技术是柴油机采用的有效措施之一, 其中颗粒过滤捕集技术 DPF 是最有价值的捕集方式, 得到了较多的研究和应用。DPF 技术主要包括过滤体对颗粒的捕集技术和过滤体自身的再生技术, 前者主要是捕集性能的研究, 后者主要是沉积颗粒的燃烧去除问题。

传统的颗粒捕集器设计往往缺乏有效的仿真手段, 浪费人力物力, 且试验研究周期相对较长。利用仿真手段对 DPF 的捕集和再生性能进行模拟计算, 快速评价设计方案的工作性能, 不仅可减少试验研究周期, 而且可降低开发成本, 对提高 DPF 的设计性能, 具有重要参考价值。

本文利用发动机软件 GT-Power 进行了柴油机 DPF 的仿真研究。建立了柴油机 DPF 的仿真模型, 研究了不同结构参数下 DPF 捕集性能的变化, 以及排气温度对再生性能的影响。

2 DPF 捕集模型的研究

壁流式蜂窝陶瓷捕集器 DPF 的结构简图如图 1 所示, 过滤体内方形通道沿轴向分布, 并间隔地在通道的入口或出口加以堵塞。柴油机排气穿越过滤壁时, 排气中的颗粒就沉积气流入口通道内, 形成颗粒层, 整个过程中在排气入口侧和最终出口侧产生压降。

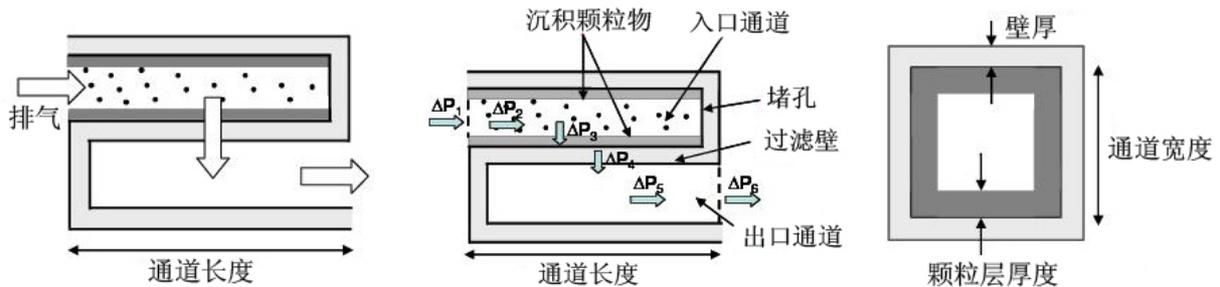


图 1 壁流式颗粒捕集器 DPF 通道示意图

利用 GT-Power 软件建立了颗粒捕集器 DPF 的仿真模型, 通过该模型可以研究 DPF 的捕集效率和压力损失, 如下面的图 2 所示, 该仿真模型也可用来研究 DPF 的再生性能。

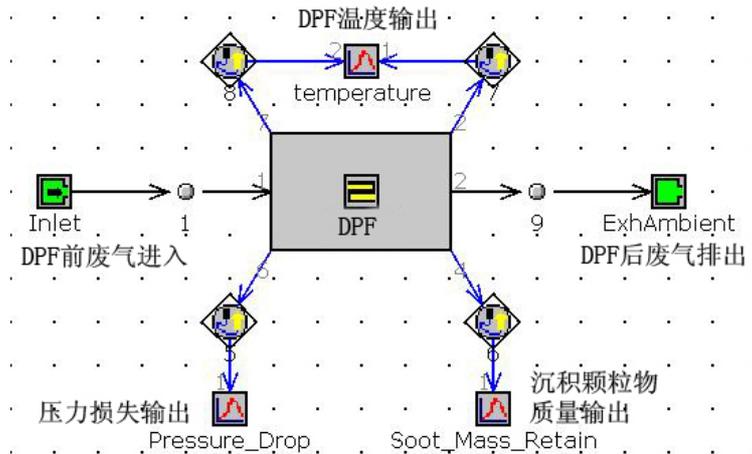


图 2 DPF 仿真模型示意图

2.1 DPF 结构参数对捕集性能的影响

DPF 的主要微观结构参数有孔密度(CPSI)、过滤壁厚度、过滤体微孔直径等, 宏观结构参数有直径和长度等, 这些参数的变化对 DPF 的捕集性能有不同程度的影响。本文对这些微观结构参数进行了模拟计算, 从而给 DPF 参数设计提供依据。计算时, 只改变上述其中一个微观结构参数, 其他保持不变。

(1) 孔密度(CPSI)

孔密度也称通道密度, 是指 DPF 单位截面积上的通道数量。在本文中定义 3 个 CPSI 值: 50、100

和200，计算结果如图3和图4所示。

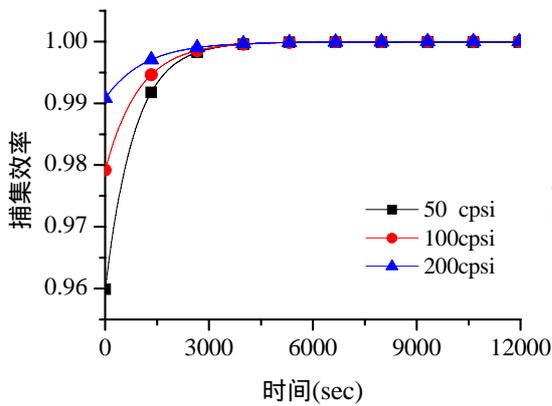


图3 CPSI对捕集效率的影响

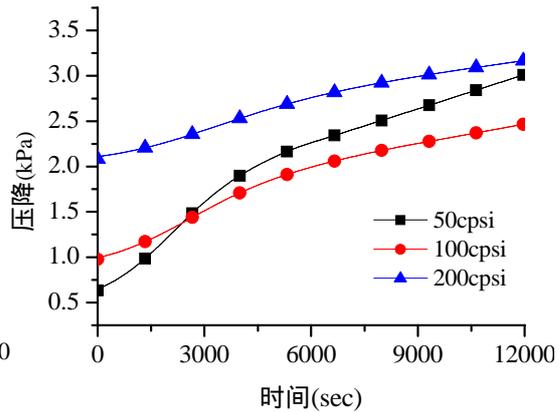


图4 CPSI对压降的影响

从图3可以看出，在过滤体直径及体积相同的情况下，随着CPSI值增加，捕集效率提高。这是因为单位面积内通道数量越多，有效过滤壁面积也就越大，过滤体捕集效率也越高。从图4可以看出，200CPSI的压降要高于100CPSI，因为更多的通道数量对排气造成了更大的通过阻力。但是当CPSI为50时，情况有所不同，虽然其初始压降小于100CPSI，但随颗粒在过滤体上的沉积，其压降上升较快，并超过CPSI为100时的压降。这是因为同样的颗粒沉积速度下，50CPSI过滤壁沉积的颗粒层厚度较大，颗粒层厚度的快速增加导致了压降的上升也较快，所以不宜采用过低的孔密度。

(2) 过滤壁厚度

DPF的过滤壁即为排气气流穿过的微孔壁，本文定义了以下几种过滤壁厚度，分别为：0.15mm、0.20mm、0.25mm、0.30mm和0.35mm，计算结果如图5至图6所示。

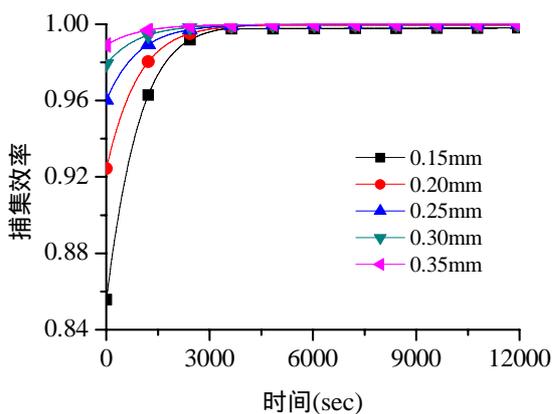


图5 过滤壁厚度对捕集效率的影响

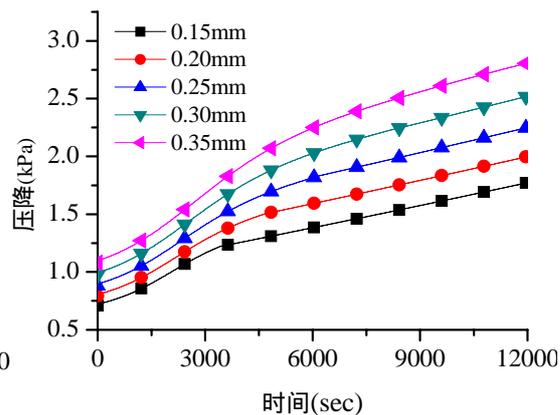


图6 过滤壁厚度对压降的影响

从图5可以看出，随着过滤体壁厚的增加，DPF捕集效率逐渐提高。这是因为壁厚增加使深床过滤面积增大，气流穿越过滤壁的时间增加，过滤体捕集效率也就越高。但从图6也可看出，随着过滤

体壁厚增加，DPF的压降逐渐上升，这对柴油机的工作性能不利。除此之外，同样颗粒沉积速度下，较厚的过滤体壁压降随时间增加的上升速度更快。因此，在设计过滤体壁厚时，要保证过滤效率的前提下，也要考虑柴油机的工作性能。

(3) 过滤体微孔直径

多孔过滤体材料的微孔直径是DPF的重要物理参数之一，本文计算时微孔直径定义分别为：10nm、11nm、12.5nm、13.5nm和15nm。模拟计算结果如图7至图8所示。

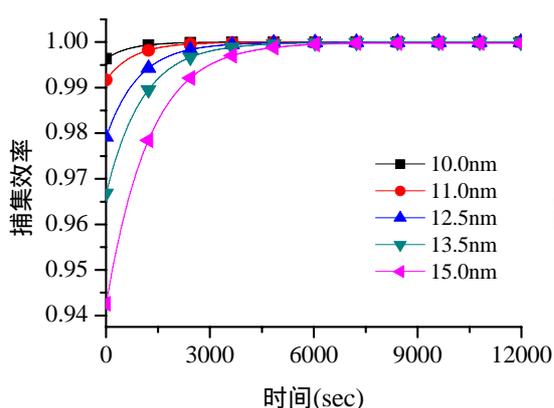


图7 微孔直径对捕集效率的影响

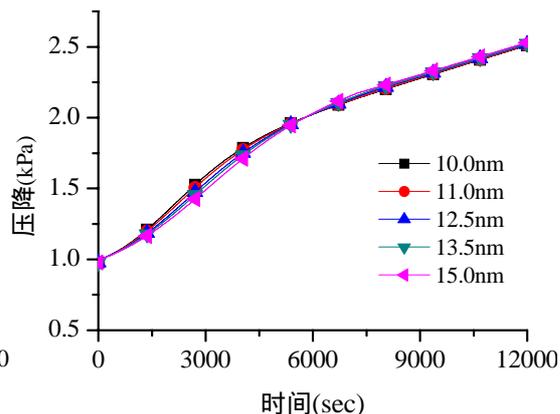


图8 微孔直径对压降的影响

由图7和图8可以看出，过滤体材料微孔直径主要影响捕集效率。微孔直径越小，过滤体的初始捕集效率越高。而对于压降而言，微孔直径改变所带来的变化很小。因此，在其他参数不变的情况下，较小的过滤材料微孔直径具有更好的工作性能，当然更小的微孔直径意味着更高的过滤体材料制造难度和更高成本。

3 DPF 再生模型的研究

无论是主动再生还是被动再生，进入 DPF 的排气温度对其再生过程都有重要影响。排气温度对 DPF 内沉积颗粒的氧化燃烧起决定性因素。如果排气温度没有达到完全再生所需的温度，虽然颗粒也会被氧化，但是其氧化燃烧是不充分的，也是不均匀的。本文对此进行了模拟计算。

针对已经建立的 DPF 仿真模型，在排气流量一定的前提下，本文通过设定不同的最高排气温度进行模拟计算，来分析排气温度对颗粒氧化燃烧的影响。主要研究 DPF 内颗粒氧化燃烧过程，包括通道内不同位置的温度变化和颗粒层厚度的变化。将过滤体通道内沿轴向分为 6 个等间隔分布的点，如图 9 所示。

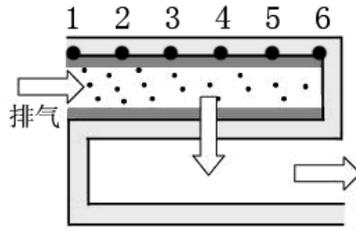


图 9 过滤体通道内位置点的分布

计算时，排气中氧气浓度定义为 11%，排气流量定义为 240kg/hr，其它如颗粒的氧化活化能及过滤体、颗粒层的热传导参数则采用 GT-Power 的默认值，模拟计算时长为 200 秒。本文进行再生计算时，最高排温分别定义为 750K、725K 和 700K。计算结果如图 10-图 15 所示。

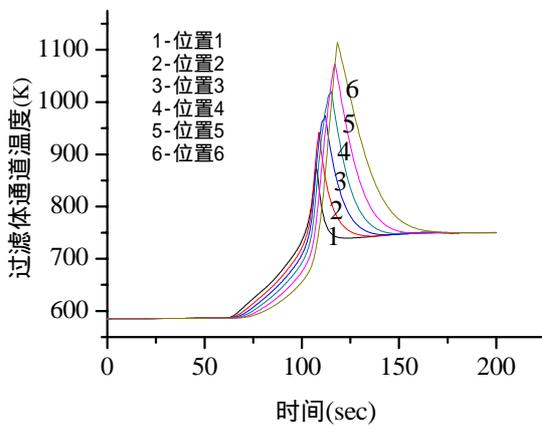


图 10 通道内温度变化 (排温 750K)

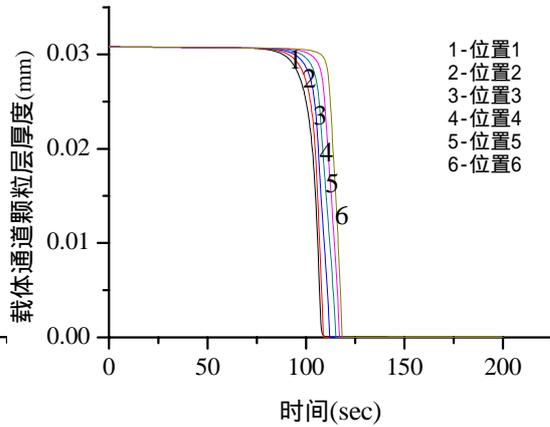


图 11 通道内颗粒层厚度变化 (排温 750K)

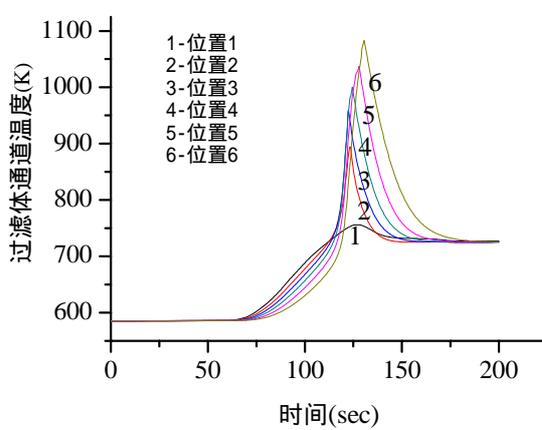


图 12 通道内温度变化 (排温 725K)

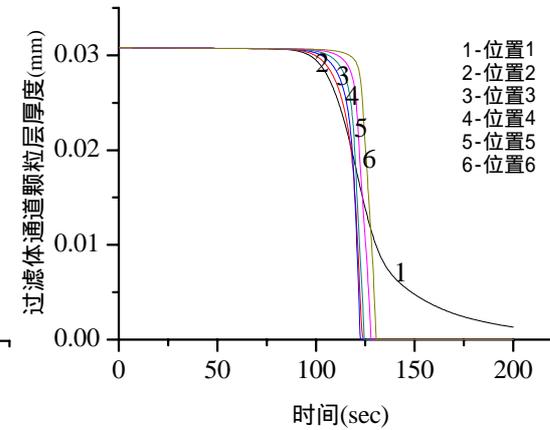


图 13 通道内颗粒层厚度变化 (排温 725K)

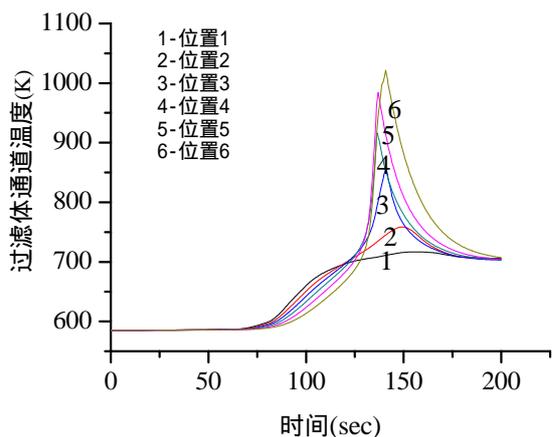


图 14 通道内温度变化 (排温 700K)

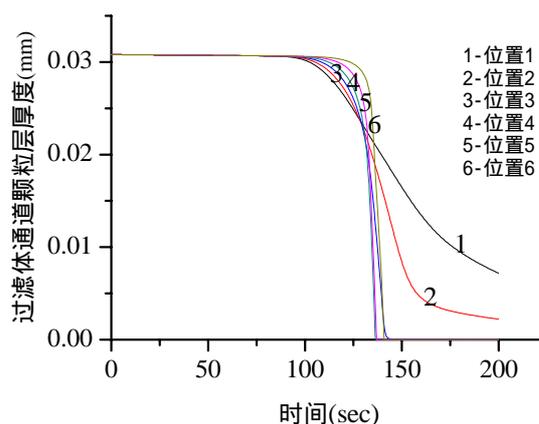


图 15 通道内颗粒层厚度变化 (排温 700K)

从图 10 至图 11 可以看出,在最高排气温度达到 750K 的情况下,DPF 实现了完全再生。随着排气温度逐渐升高达到最大值,过滤体通道内温度沿轴向通道由入口到末端先后达到颗粒的氧化着火点,随颗粒氧化燃烧的进行,释放出大量热量,使通道内温度急剧升高,所以颗粒氧化燃烧反应也因此加剧,直到颗粒氧化燃烧殆尽后,由颗粒层厚度计算结果看出,在不到 125 秒时所有位置的颗粒都燃烧完毕,通道内温度开始下降,此时 DPF 再生完成。在整个过程中,入口处的颗粒最先开始燃烧,但整个过滤体通道内温度最高值出现在通道末端,这是由于通道前端颗粒燃烧所释放热量通过对流和传导的方式向通道末端传输,因此,过滤体通道末端所达到的峰值温度和颗粒氧化速率要明显高于通道内前端位置。

由图 12 至图 15 可知,当排气最高温度分别下降到 725K 和 700K 时,DPF 未能实现完全再生。725K 时,200 秒结束时入口位置 1 处仍残留部分颗粒,未实现完全再生,125 秒内实现完全再生的位置点只有三个,表明整体再生时间延长。700K 时,200 秒结束时入口位置 1 和 2 处都残留部分颗粒,均未实现完全再生,入口位置 1 的温度未出现明显升高,其余四个位置点的颗粒燃烧完全时间都超过 125 秒,整体再生时间进一步延长。这些都表明沉积颗粒没有充分地氧化燃烧。可见,排气温度显著影响 DPF 的再生过程,提高排气温度将有利于 DPF 内颗粒氧化燃烧过程。

4 结论

(1) GT-Power 软件用于柴油机颗粒捕集器 DPF 的仿真计算,具有全面灵活和计算方便的特点。既可以用于研究 DPF 的捕集性能(包括捕集效率和压降),又可以研究 DPF 的再生性能(包括主动再生与被动再生)。

(2) 捕集模型的计算结果对 DPF 微观结构参数孔密度、过滤壁厚度以及过滤体微孔直径的设计具有重要参考意义。

(3) 再生模型的计算表明，排气温度显著影响 DPF 的再生过程，提高排气温度将有利于 DPF 内颗粒氧化燃烧过程。

5 参考文献

- [1] Vogt CD, Ichikawa S, Masukawa N, et al. The Study for Structural Design of the Segmented SiC-DPF. SAE Paper 2006-01-1527
- [2] Konstandopoulos A G, Vlachos N, Stavropoulos I, et al. Study of a Sintered Metal Diesel Particulate Trap. SAE Paper 2005-01-0968
- [3] Gieshoff J, Pfeifer M, Schäfer S A, et al. Regeneration of Catalytic Diesel Particulate Filters[C]. SAE Paper 2001-01-0907.
- [4] Chiew L, Kroner P, Ranalli M. Diesel Vaporiser: An Innovative Technology for Reducing Complexity and Costs Associated with DPF Regeneration. SAE Paper 2005-01-0671
- [5] GT-Power V6.2.0 用户手册