

# Diesel Particulate Trap Development Present Situation and Trend Analysis

Qiang Guo\*, Yanping Zheng

College of Automobile & Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing Jiangsu  
Email: \*304874508@qq.com, 2402782773@qq.com

Received: Oct. 21<sup>st</sup>, 2016; accepted: Nov. 5<sup>th</sup>, 2016; published: Nov. 8<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Diesel particulate trap in the aspect of environment protection and low emission plays an important role. The capture efficiency of trap and regeneration is one of the important indicators to measure performance capture. From material selection to trap particles and regeneration of perspective, this paper analyzes the present situation of the diesel particulate trap development, finds out the deficiencies in this field, and discusses the development trend of diesel particulate trap.

## Keywords

Diesel Particulate Trap, Capture Performance, Current Situation, The Development Trend

---

# 柴油机微粒捕集器的发展现状与趋势探析

郭强\*, 郑燕萍

南京林业大学汽车与交通工程学院, 江苏 南京  
Email: \*304874508@qq.com, 2402782773@qq.com

收稿日期: 2016年10月21日; 录用日期: 2016年11月5日; 发布日期: 2016年11月8日

\*通讯作者。

## 摘要

柴油机微粒捕集器在环保问题和低排放方面发挥着重要的作用。捕集器的捕集效率和再生能力是衡量捕集性能的重要指标。本文从微粒捕集器的材料选择和再生的角度出发, 分析了我国柴油机微粒捕集器的发展现状, 找出了在此领域的不足, 并探讨了柴油机微粒捕集器的发展趋势。

## 关键词

柴油机微粒捕集器, 捕集性能, 现状, 发展趋势

## 1. 前言

根据环保和交通部门的调查统计, 发现机动车辆排放的尾气, 在城市地区空气污染物中已经占主要部分[1], 这严重的威胁环境和人类的健康。柴油机以自身的优点(较汽油机而言), 将成为汽车的主要动力[2]。在 CH、CO 的排放量上, 柴油机比汽油机低的多; 两者的 NO<sub>x</sub> 的排量略有不相同, 但差别不大; 在微粒排放量方面, 柴油机却比汽油机高 40~80 倍, 而且柴油机主要的排放物就是微粒, 这更是限制柴油机发展的主要因素之一[3]。柴油机仅仅依靠前处理和机内处理微粒的办法已经无法满足日益严格的排放法规的要求, 所以后处理技术在捕集微粒方面起到了至关重要的作用。因此对于柴油机微粒捕集器的研究成为当今的热点问题, 而捕集器的关键技术就是材料的选择和再生问题。本文将重点介绍国内外柴油机微粒捕集器的材料和再生技术的发展现状。

## 2. 微粒捕集器过滤材料的发展现状

捕集器的关键技术就是对过滤材料的选择和再生技术, 而过滤体是整个结构中最关键的部分, 它决定了捕集器的压力损失、捕集效率、使用寿命、工作可靠性以及再生好坏的关键。因此对过滤材料的设计要满足捕集效率高、排气阻力低、制造工艺简单、热膨胀系数小、抗震性能好、强度高、易再生、价格实惠、使用寿命长等特点。

经过国内外专业机构对过滤材料的不断研究, 目前市场上对过滤材料的制造工艺已经有了很大的提高。当前捕集器的过滤材料应用比较广泛的主要有金属基、陶瓷基和复合基。

### 2.1. 陶瓷基过滤材料

多孔结构的陶瓷基是目前各国使用比较广泛的过滤材料[4], 其主要是由碳化物或氧化物组成。该材料具有良好的热稳定性, 主要的结构形式有: 陶瓷纤维毡、泡沫陶瓷和蜂窝陶瓷。

陶瓷基过滤体的主要材料有堇青石和碳化硅两种。目前市场上使用广泛的蜂窝陶瓷一般是用堇青石制成的, 其热膨胀系数低, 价格实惠, 开发时间也较早; 而碳化硅材料抗弯性能强、抗氧化的能力强、耐高温的能力强、耐腐蚀和磨损的能力强, 但价格相对较高。蜂窝陶瓷按其结构形式可分为壁流式和泡沫式等[5]。

壁流式蜂窝陶瓷相对于其他过滤材料来说是目前综合性能较好的过滤材料, 其是一种多孔的结构, 相邻两个通道作为一个组合, 即一个通道的入口被堵住, 则另一个通道的出口被堵住。因此排出的废气只能从通道的入口进入, 穿过过滤体的壁面, 从相邻的通道出口排出。经过这个过程, 微粒就被捕集在过滤体的壁面上。这种壁流式蜂窝陶瓷捕集器的捕集效率可以达到 90% 以上, 并且也可以降低可溶性有

机成分 SOF (主要是高沸点 HC) 的排放。其过滤机理是深层过滤和表面过滤的综合体。深层过滤是指当废气经过过滤芯体清洁时, 排气中的微粒就会被拦截在蜂窝陶瓷的孔道中; 而表面过滤是指当其孔道中沉积的微粒过多而且基本饱和时, 微粒就开始沉积在蜂窝陶瓷的表面。壁流式蜂窝陶瓷过滤体孔道的容量比较小, 因此在捕集的开始阶段, 表面过滤就处于主导地位, 而且沉积下来的颗粒物又会形成过滤层, 此时其自身也就构成了一层过滤介质, 这个过滤过程又被称为沉积过滤。比沉积层孔直径大的微粒便被拦截在新沉积层的表面, 比其直径小的微粒则会进入沉积层, 在沉积层的内部被过滤, 剩下的微粒则又会被捕集器的过滤壁面过滤。因此, 壁流式蜂窝陶瓷捕集器对微粒的捕集效率是非常高的, 只有很微小的微粒会被排入大气中。但其缺点主要是物理参数的各向异性, 径向膨胀系数是轴向膨胀系数的 2 倍, 微粒易沉积在进气通道内, 若是受热不均, 极易发生热应力损坏。

泡沫式陶瓷的微粒捕集效率大约在 40% 到 70% 之间, 其过滤原理主要是深层过滤, 即依据泡沫之间隙小而密集通道, 使气体流过这个结构, 微粒便被过滤下来, 从而达到捕集微粒, 降低碳烟排放的目的[6]。泡沫陶瓷与蜂窝陶瓷相比, 有很大的可塑性, 孔隙率也大且孔洞曲折。泡沫陶瓷也可改善颗粒物与催化剂的混合程度, 使其可以充分接触, 促进反应; 还具有热稳定性好的特点, 有利于过滤材料的再生, 且再生时产生的热应力较小, 不易造成过滤体热应力损坏, 但其缺点主要是强度低、结构疏松、使用寿命较低、在排气振动和冲击的情况下容易出现毁坏以及烟灰吹除难等[7]。

陶瓷纤维的微粒捕集效率可以达到 90% 以上, 其结构没有尺寸的约束, 孔的分布和过滤腔内孔的形状都有更多的选择空间, 还可以改变各种参数使捕集效果达到最优, 而且陶瓷纤维也能满足使用催化剂的需要[8]。还具有高度表面积化和良好的耐高温性能, 纤维表面都可以作为过滤面积, 因此捕集效率较高, 但由于陶瓷纤维材料具有脆的特点, 所以在制造和使用过程中很容易毁坏, 生产工艺也比较复杂, 再生困难, 且在实际使用过程中其捕集效率和压降之间的矛盾比较突出。

## 2.2. 金属基过滤材料

与陶瓷基过滤体相比, 金属基在材料的韧性、强度、导热性以及耐高温等方面都有很大的优势, 但一般的金属过滤介质都会采用金属蜂窝体的结构, 而构成金属蜂窝体的箔片不是多孔材料, 而且表面平滑, 过滤效率较低, 所以将其在柴油机微粒捕集器上的应用很少[9]。目前技术相对成熟的金属基过滤材料主要有以下几种结构形式: 金属丝网、金属纤维毡、活性炭纤维和多孔碳化硅陶瓷[10]。

金属丝网具有机械强度高、耐热冲击性好、制造简单的特点, 但微粒捕集效率大约在 20% 到 50% 之间, 而且再生效率也较低。但有文献[11]记载, 金属丝网捕集器的丝网上涂有铝和贵金属涂层, 将捕集器安置在靠近发动机的排气歧管上, 这样可利用排气的高温来进行催化反应, 这是利用贵金属催化剂具有降低碳烟点燃温度的特点, 同时可以促进一氧化碳和碳氧化合物的氧化, 放出反应的热量, 使丝网上的碳烟微粒燃烧。

与金属丝网相比, 金属纤维毡具有比表面积大、透气性好和过滤精度高等优点, 特别适用于高温、有腐蚀介质的恶劣条件, 应用前途很广[12], 但其存在亚微米级过滤效率不高和粘性微粒黏附的问题。经过试验表明通过外加粉体助剂后可有效的解决这一问题, 所以不锈钢烧结纤维毡外加粉体助剂大大提高微细烟尘的过滤效率, 有效阻止了粒子黏附和堵塞金属纤维毡, 降低了排气背压[13]。

由于活性炭纤维具有独特的微孔结构以及大的表面积, 从而大大缩短了微粒吸附的行程, 加快了吸附的速率, 是一种很好的吸附剂。同时其不仅具有良好的催化作用, 在低温下可将一氧化氮氧化成二氧化氮, 与水结合形成硝酸; 而且还具有较强的还原能力, 可以直接将氮氧化物还原成氮气, 降低污染。活性炭纤维的吸附和催化作用在尾气排放处理方面具有潜在的应用前景, 但其缺点主要是机械性能、耐高温和抗氧化的能力不足。

多孔碳化硅陶瓷由于具有良好的气体流过性和表面积大的特点, 所以其微粒捕集效率较高。同时具有良好的抗氧化性, 以及在高温条件下保持良好的机械性能和化学稳定性, 也是一种非常具有应用前途的材料。若要增大微粒捕集效率, 就要通过增加开孔率的方法增加多孔材料的表面积, 但开孔率过高, 其的机械性能就会下降。为了克服这一问题, 可在多孔基层表面添加纳米线[14]。虽然碳化硅纳米线具有很多的优点, 但催化剂的使用使处理的步骤更加繁琐, 同时在纳米线生长的过程中易受到金属催化剂的污染, 使其变性。

钛酸铝过滤材料是康宁公司推出的, 并于 2011 年进入市场。由于其具有更高的抗热冲击能力和抗灰分特性, 并且单位体积可以吸收更多的能量, 使得其特性优于碳化硅材料。有报道称, 该过滤材料经过 55 次非可控再生和 90 次可控再生后, 仍然没有损坏, 表现出良好的耐久性(如图 1 所示) [15], 但其机械强度低, 制备不易, 成本较高[16]。

齿形木纤维是一种内部具有中空通道、外部为齿形结构的过滤滤芯。通过实验研究(结构如图 2 所示) [17], 在捕集器过滤室壳体为直径 140 mm, 高 150 mm 时, 木纤维直径为 15  $\mu\text{m}$ 、滤芯填充率为 0.3、滤芯厚度为 12 mm 时, 其过滤效率可达 96%, 排气背压为 3 kPa, 使用寿命可达 60 h, 完全满足国家排放法规的标准, 有效的解决了排气背压和捕集效率矛盾的问题, 具有广泛的应用前景。

根据以上分析, 各种捕集器过滤材料的优缺点如表 1 所示。



Figure 1. Aluminium titanate filtering material  
图 1. 钛酸铝过滤材料



Figure 2. Tooth shape wood fiber filter  
图 2. 齿形木纤维滤芯

**Table 1.** The advantages and disadvantages of all kinds of trap filter materials**表 1.** 各种捕集器过滤材料的优缺点

	陶瓷基				金属基				
	壁流式蜂窝陶瓷	泡沫陶瓷	陶瓷纤维毡	金属丝网	金属纤维毡	活性炭纤维	多孔碳化硅陶瓷	钛酸铝	齿形木纤维
优点	捕集效率 90% 以上, 热膨胀系数低	捕集效率 40%~70%, 可塑性、热稳定性好	捕集效率可达 90% 以上, 耐高温	捕集效率 20%~50%, 强度好, 耐热冲击	捕集效率高, 比表面积大, 透气性好	吸附速率快, 良好的催化作用	捕集效率较高, 良好的机械性能和化学稳定性	高的抗热冲击和抗灰分特性	捕集效率高达 96%。排气背压低
缺点	物理参数各向异性, 径向膨胀系数大	强度低, 寿命低	捕集效率与压降矛盾突出, 再生困难	捕集效率和再生效率低	亚微米级过滤效率不高, 粘性微粒黏附	机械性能、耐高温和抗氧化能力不足	开孔率过高, 机械性能下降; 纳米线易变性	制备难, 成本高, 机械强度低	使用寿命较低

### 3. 微粒捕集器再生技术发展现状

微粒捕集器的再生也就是清理掉积存在过滤体内的微粒, 若清理不及时彻底, 会导致柴油机的排气背压不断升高, 进而影响柴油机的经济性、动力性等性能。因此再生技术是目前面临的最大挑战之一。柴油机微粒捕集器的再生技术应该具备以下要求[18]:

- (1) 能在各种工况下正常工作, 具有较高的捕集效率, 对发动机的影响较小;
- (2) 不对环境产生二次污染;
- (3) 其耐久性和可靠性要好;
- (4) 再生效率高、再生能力强和再生控制操作方便;
- (5) 使用寿命长, 价格低廉。

目前研究的再生系统, 根据原理和再生能量来源的不同主要分为: 主动再生系统和被动再生系统。

#### 3.1. 主动再生系统

主动再生系统是通过外部加热, 提高柴油机排气的温度, 使微粒达到着火点燃烧, 起到过滤体净化再生的目的。主动再生系统的机理是通过传感器得知过滤体内微粒的沉积量和随之产生的背压, 当排气背压超过极限值时就启动再生系统。主动再生的效率高, 但该方法较为复杂, 运行成本相对较高[19]。根据从外部添加能量的不同形式可以分为:

##### (1) 喷油助燃再生系统

在捕集器工作过程中, 当过滤体前后的排气背压超过 ECU 所设定的背压极限值时, 喷油系统和供气系统分别按照指令定时定量向装置在捕集器入口前的燃烧器进行进气和喷油, 并迅速雾化混合, 最后通过高能火花塞在合适的点火时刻点火, 排气的温度被提高到微粒的着火点, 使其迅速燃烧, 从而实现再生过程[20]。但该方法也有缺点, 其使燃料消耗增加, 且在小负荷工况和冷启动时, 燃料的燃烧不完全也会造成二次污染。

##### (2) 电加热再生系统

电加热再生技术是向过滤器前部的电阻丝通电, 从而产生热量点燃过滤器周围的微粒, 再由微粒燃烧后的能量引燃剩余的微粒, 以此达到捕集器再生的目的。电加热再生系统结构简单, 加热的强度容易控制, 但这种技术的电源是 24 V 的蓄电池, 因此会受到电功率的影响, 每次只有过滤器的一小部分被再生, 并且其还具有系统稳定性差、消耗大量的电能和再生速度慢等问题[21]。

##### (3) 红外加热再生系统

过滤器再生分为加热和燃烧两个过程。红外加热再生系统首先用加热器对红外涂层进行加热, 这种红外涂层具有较强的辐射能力, 因此红外涂层会通过辐射的方式对过滤器中的微粒进行加热, 使微粒燃烧达到再生的目的。红外加热兼具电加热的优点, 而且加热效能高, 结构也较简单, 但其径向燃烧不同步, 存在温度梯度; 再生气流对再生过程也有很大的影响[22]。

#### (4) 反吹再生系统

反吹再生是将压缩空气从过滤体的出口处喷入, 将过滤体表面的微粒吹入燃烧器, 使其在燃烧器内燃烧, 这种技术避免了微粒在过滤体内燃烧, 保证了过滤体的可靠性和使用寿命。但目前需要解决的关键问题是高压气体的来源如何解决, 如何进一步减少压缩气体的消耗量, 并且该方法再生不够彻底, 容易造成背压升高, 影响发动机的动力性和经济性[23]。

#### (5) 微波加热再生系统

目前, 微波加热再生系统是研究较多的一种再生技术, 其是利用微波对微粒产生热量, 从而使其燃烧, 以达到再生的目的。微波再生是具有较高实用价值和发展前途的再生技术, 因为红外加热、电加热两种再生技术是分区进行加热的, 所以容易导致过滤体受热不均; 燃油助燃加热再生技术对过滤体加热不完全, 极易由于过滤体局部高温过热而导致裂纹; 丝网捕集器的逆向反吹再生技术, 其过程较繁琐, 捕集效率低而且不彻底。总之, 微波加热再生技术与其他再生方法相比, 没有这些问题的困扰, 而且在再生过程中, 微粒能更快速的加热燃烧, 迅速彻底; 并且该技术再生效率高, 没有二次污染[24]。但由于微波功率源为蓄电池, 易受电功率及发动机工况的影响, 所以龚金科等提出的单元块旋转式过滤体, 有效的实现了连续再生和不受车载电源功率的限制[25]。

### 3.2. 被动再生系统

被动再生是不需要外界提供能量, 完全利用自身的能量使微粒燃烧的方法。实现被动再生的方法主要是依靠化学催化剂等方式使碳烟氧化活化能降低, 使微粒能在柴油机正常的工况下实现燃烧, 以达到再生的目的。主要有两种途径: 一是在过滤体表面涂上催化剂; 二是在燃油中加入催化剂。

#### (1) 在过滤体表面涂上催化剂

当微粒沉积在过滤体表面时, 与催化剂接触, 其氧化活化能降低, 从而使其可以在发动机正常的排气温度下自行的燃烧, 以达到再生的目的。但由于固体微粒与催化剂的接触极不均匀, 所以微粒不能被完全的燃烧尽, 即再生不完全; 另外催化剂的作用也会慢慢的减弱直到完全消失, 也会影响过滤体的再生。同时该技术中的金属元素排入大气也会引起二次污染, 而且还必须使用无硫柴油, 这是为了防止催化剂中毒, 使其失效, 但目前我国对柴油硫含量的控制技术还无法达到这种地步, 因此在过滤体表面涂上催化剂技术在我国的应用还面临着很多的问题。

还有一种再生方法, 是将氧化催化转化器和微粒捕集器结合使用, 氧化催化转化器可以将排气中的一氧化氮与氧气反应生成二氧化氮, 二氧化氮具有很强的氧化能力, 在 250 度左右就可以使微粒发生氧化反应, 来降低微粒的着火点, 使其能在柴油机正常的排气温度下燃烧, 该技术成本低, 有很大的应用前景。但其对柴油中硫的含量也有一定的要求, 过高的排气温度会使 SOF 和柴油中的硫转化成硫酸盐, 使催化器失去活性, 降低了转化效率。

#### (2) 在燃油中加入催化剂

在燃油中加入催化剂是目前研究的热门。该技术是在燃油中直接加入催化剂, 并一起被送入燃烧室进行燃烧, 燃烧后的产物(金属氧化物)对微粒起到催化的作用, 来降低微粒的着火点, 使其可以在正常的排气温度下燃烧, 从而实现再生的目的。此方法可以确保微粒和催化剂的充分接触, 促进发生氧化反应, 操作方便。

**Table 2.** Trap the advantages and disadvantages of various regeneration technology  
**表 2.** 捕集器各个再生技术的优缺点

	主动再生系统					被动再生系统	
	喷油助燃	电加热	红外加热	反吹	微波加热	在过滤体表面涂催化剂	在燃油中加催化剂
优点	再生效率高	结构简单, 加热强度易控制	加热效能高, 结构简单	保证过滤体可靠性和使用寿命	再生效率高、彻底, 无二次污染	方法简单	操作简单
缺点	结构复杂, 小负荷和冷启动燃烧不完全, 二次污染	再生速度慢、不彻底, 系统稳定性差	径向燃烧不同步, 再生不完全	再生不彻底	受电功率及发动机工况影响严重	再生不完全, 引起二次污染	孔道易堵塞, 使用寿命短, 引起二次污染

一般选用可溶性的金属盐或金属作为添加剂, 铈燃油添加剂在目前市场上应用比较多的。由于二氧化铈具有很强的储、放氧气的的能力, 这有利于柴油分子获得氧化, 从而促进柴油的充分燃烧, 对碳烟的排放改善效果明显。但排气中的部分添加剂的燃烧产物金属氧化物会堆积在过滤器中, 使过滤体的孔道堵塞, 因此缩短了过滤器的使用寿命。若堵塞的太多, 将导致排气背压升高, 影响柴油机的性能, 同时也会产生二次污染。通过以上的分析, 捕集器各个再生系统的优缺点如表 2 所示。

实际再生的过程相当复杂, 有很多的因素影响捕集器的再生, 而且这些因素之间又相互关联。再生时间的长短在很大程度上是由过滤体内微粒的燃烧速率来决定的, 而燃烧速率不仅受再生气流氧浓度的影响, 而且还受到气流流动对热量传输快慢的影响, 此外通道中的阻力和微粒沉积量也对再生有一定的影响。

#### 4. 总结与展望

目前我国部分城市对机动车排放污染物的控制指标已经实行了国 V 的标准, 而从 2018 年开始, 全国将普遍实施国 V 的排放标准, 而在短时间内通过机内净化技术来进一步降低微粒的排放仍有一定的困难, 所以机外净化技术是这一时期研究的重点方向。

在微粒捕集器的材料选择上, 由于陶瓷基和金属基过滤体本身材料性能存在的限制, 对微粒的捕集和再生都存在一些不足。为了实现过滤材料的性能提升, 将陶瓷基和金属基相互结合成复合基过滤材料, 充分利用它们各自的优点, 以达到最佳的捕集效果, 综合各种因素, 复合基无疑具有很大的发展潜力。而不锈钢烧结纤维毡外加粉体助剂虽然目前只应用在船舶上, 但经过进一步优化改进, 有望在汽车上得到广泛的应用。东北林业大学的郭秀荣等教授正在研究的以齿形木纤维为滤芯的微粒捕集器已取得了显著的研究成果, 对尾气净化及环境保护具有十分重要的意义。关于捕集器的再生技术问题, 由于微波加热再生系统再生速度快且彻底、再生效率高, 没有二次污染, 并且采用单元块旋转式过滤体, 克服了受车载电源限制的问题, 所以具有很高的实用价值, 同时还将氧化催化转化器和微粒捕集器结合使用, 再生效率高, 成本低, 为柴油机微粒捕集器的研究开辟了一个新的方向。

#### 致 谢

感谢我的硕士研究生导师郑燕萍老师给予我的指导和帮助, 让我在资料的查找和分析上有了很大的进步, 并让我对柴油机微粒捕集器研究方面的认识更进一步。

#### 参考文献 (References)

- [1] 沈迪新, 陈宏德, 田群. 我国汽车尾气污染, 污染控制与对策[J]. 环境科学进展, 1997(6): 23-33.

- [2] 苏万华. 先进柴油机技术的进步与未来展望[C]//中国汽车工程学会. 国际车用柴油机技术研讨会论文集. 北京: 中国汽车工程学会, 2000: 10-15.
- [3] 辛志鹏. 柴油机微粒捕集器的性能仿真与试验研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014: 5.
- [4] 吴晓东, 翁端, 陈华鹏, 徐鲁华. 柴油机微粒捕集器过滤材料研究进展[J]. 材料导报, 2002, 16(6): 28-31.
- [5] 龚金科, 赖天贵, 刘孟祥, 董喜俊, 翟立谦. 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(3): 1-4.
- [6] 杨建华, 龚金科, 吴义虎. 内燃机性能提高技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [7] 资新运, 宁智, 吴良勤, 贺宇, 张春润. 泡沫陶瓷过滤机理的研究[J]. 内燃机学报, 2000, 18(2): 156-160.
- [8] Bloom, R. (1995) The Development of Fiber Wound Diesel Particulate Filter Cartridges. SAE950152, Vol. 104, 373-382.
- [9] 王劲. 柴油机微粒捕集器捕集再生机理及模型研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2005: 3.
- [10] 魏熊武. 柴油机微粒捕集器及其再生技术分析[J]. 重型汽车, 2005(2): 30-32.
- [11] Davies, M.J. (1993) Catalytic Control of Diesel Particulate Emissions. SAE820184, Vol. 81, 754-766.
- [12] 田婵. 旋转径向式微粒捕集器消声特性及流动均匀性分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [13] 包力, 杨国华, 李邯鹏, 等. 不锈钢烧结纤维毡外加粉体助剂过滤烟尘微粒[J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1472-1476.
- [14] 王逢瑚, 郭秀荣, 马岩, 牡丹丰. 柴油车尾气微粒捕集器技术研究现状及发展趋势[J]. 小型内燃机与摩托车, 2010, 39(1): 92-96.
- [15] 杨学易. 柴油机微粒捕集器的净化机理与材料技术[J]. 汽车与配件, 2015(25): 60-61.
- [16] Oguwumi, S., Tepeesch, P., Chapman, T., *et al.* (2005) Aluminum Titanate Compositions for Diesel Particulate Filters. SAE Paper 2005-01-0583.
- [17] 郭秀荣, 牡丹丰, 亓占丰, 梁中钰, 刘跃雄. 齿形木纤维柴油车尾气微粒捕集器过滤效率模型与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 66-71.
- [18] 贺泓, 翁端, 资新运. 柴油机尾气排放污染控制技术综述[J]. 科学环境, 2008, 28(6): 1169-1177.
- [19] 王逢瑚, 郭秀荣, 马岩, 牡丹丰. 柴油车尾气微粒捕集器技术研究现状及发展趋势[J]. 小型内燃机与摩托车, 2010, 39(1): 92-96.
- [20] 龚金科, 吁璇, 伏军, 刘云卿, 余明果. 柴油机喷油助燃再生系统微粒捕集器油气匹配研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 1-5.
- [21] 严降龙, 吴峰, 冯安, 胡章其. 电加热柴油机再生排气微粒过滤器的研制与试验[J]. 农机化研究, 2002(4): 142-145.
- [22] 李忠华. 柴油机微粒捕集器再生技术研究[J]. 人民公交, 2006(2): 61-64.
- [23] 龚金科, 龙罡, 余明果, 王曙辉, 刘云卿. 微粒捕集器连续再生速率与压降特性研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(6): 22-27.
- [24] 李军, 秦大同, 汤文生, 张世艺. 柴油发动机排气微粒过滤器微波再生净化理论分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(3): 170-174.
- [25] 吴凤英, 王占成, 徐斌, 吴健. 柴油机颗粒捕集器(DPF)再生技术分析[J]. 环境工程, 2015, 33(6): 67-70.



**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ojtt@hanspub.org](mailto:ojtt@hanspub.org)