

导电泡沫陶瓷过滤柴油机排气微粒的研究

杜庆洋

(山东理工大学材料科学与工程学院, 淄博 255049)

摘 要 柴油机排气微粒对环境危害严重, 研究开发排气过滤技术是解决问题的有效措施之一。利用表面密集排列短纤维的导电泡沫陶瓷作为微粒过滤器的滤芯, 对柴油机排气微粒的过滤效率可达 90%, 并可进行原位通电加热再生, 再生后过滤效率不下降。同时, 对表面纤维化导电泡沫陶瓷的过滤机理进行了初步探讨。

关键词 导电泡沫陶瓷 排气微粒 过滤 原位再生

中图分类号 TB32 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2007)10-0086-04

Study on filtering particulates from diesel exhaust by conductive foam ceramics

Du Qingyang

(School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049)

Abstract Diesel exhaust particulates seriously pollute the environment. One effective way to abate particulate pollution is to research and develop filtration techniques for particulates from diesel emission. Conductive foam ceramics covered with short fibre on its surface was used as filtering element of filter in the study. The filtration efficiency for diesel exhaust particulates was 90%. Filter was regenerated in situ with supplying power. Filtration efficiency didn't decrease after regeneration. The filtration mechanism of conductive foam ceramics covered with short fibre was discussed.

Key words conductive foam ceramics; exhaust particulates; filtering; regeneration in situ

柴油机具有生产成本低、能量利用率高和经济效益好等优点, 在内燃机领域占有越来越重要的地位。近几年, 使用柴油发动机的轻型车和轿车车型越来越多, 但随之而来的是柴油机排气对大气环境污染也越来越严重, 排气中主要有害成分是微粒(PM)、NO_x、CO 和 HC, 其中较突出的是微粒问题, 特别是直径 2.5 mm 左右的微粒, 容易被人体吸入, 在肺部沉积, 引起病变, 甚至致癌^[1,2]。以过滤器为核心的排气后处理技术是控制柴油机排气微粒排放的有效措施。目前国外应用的过滤器滤芯材料大多是壁流式堇青石蜂窝陶瓷^[3~6], 对柴油机排气微粒的过滤效率在 60%~90% 之间, 该类过滤器主要存在 3 方面问题, 一是气阻与过滤效率的矛盾, 导致发动机输出功率降低, 制约柴油机动力性能和经济性能的充分发挥; 二是再生系统结构复杂, 增加了净化器成本, 目前燃油或燃气燃烧再生, 利用电阻加热再生, 微波加热再生的方法正在研究之中^[7]; 第三, 抗热冲击性能不理想, 再生条件不当容易造成滤芯损坏。因此, 寻找既能保证柴油发动机充分发挥经济

性能, 又能保证高净化效率, 还能方便再生、长期使用, 比壁流式堇青石蜂窝陶瓷性能更优越的新型滤芯材料和滤芯结构是解决柴油车排气微粒净化问题的有效途径。我们在普通碳化硅泡沫陶瓷制备方法基础上进行两方面的改进工作, 一是陶瓷表面粗糙化提高其过滤能力, 二是提高碳化硅陶瓷的导电性能使其具有直接通电再生能力, 改进之后的泡沫陶瓷除具备高强度、质量轻、抗热冲击强的特点外, 大大提高了它的导电性, 过滤器利用车载电源可以原位通电加热再生, 利用表面密集排列短纤维实现陶瓷表面粗糙化, 具备很强的捕获微粒能力, 用导电泡沫陶瓷为滤芯的过滤器过滤效率可达 90%, 实验多次原位再生后过滤效率不会下降。我们的工作为泡沫陶瓷在柴油机排气微粒过滤方面的应用提供了新思路。

收稿日期: 2006-12-23; 修订日期: 2007-06-07

作者简介: 杜庆洋(1972~), 男, 博士, 主要从事泡沫陶瓷的制备及其应用研究。E-mail: qydsd@sina.com

1 实验部分

1.1 陶瓷抗热冲击性实验

选取制备的导电泡沫陶瓷,并和商品化的壁流式堇青石蜂窝陶瓷作对比,将陶瓷在 1 000 ℃ 高温环境下保温 10 min,再取出迅速投入 20 ℃ 的水中,作为一个循环,直至陶瓷破裂。

1.2 电导率测量

依据欧姆定律 $R = U/I$ 和公式 $\kappa = L/(R \times A)$ 求出。

1.3 烟度测量

由于测试手段所限,本研究使用过滤前后烟度的变化衡量过滤器对柴油机微粒的过滤效率。用导电泡沫陶瓷作为滤芯,装配成微粒过滤器,实验装置如图 1 所示。柴油机启动稳定后,发电机加上负载,将气路切换至过滤器,用烟度计测量排气烟度值,计算机采集数据,以过滤前后排气烟度值之差计算微粒过滤效率,用压差计测量排气背压。过滤器工作一定时间后,接通再生电源,使过滤器原位再生。

实验中所用发动机为 R175A 型柴油机,气缸排量为 0.353 L,额定功率为 4.41 kW,最高转速为 2 600 r/min,配备 3 kW 三相交流同步发电机,烟度计为 Smart 2000 h Opacity Meter(Canada),用作滤芯的导电泡沫陶瓷长为 105 mm,宽为 80 mm,厚为 6 mm 和 10 mm 两种。

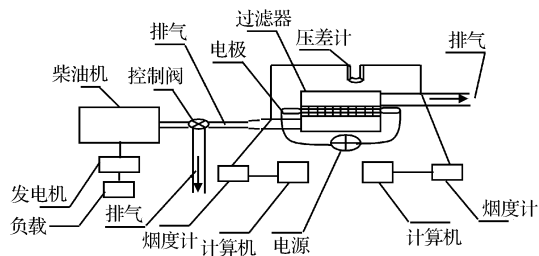


图 1 柴油机排气微粒测量装置图

Fig. 1 Diagram of measurement unit for diesel exhaust particulates

2 结果与讨论

2.1 导电泡沫陶瓷的结构与性能

导电泡沫陶瓷(图 2)具有三维连通网络结构,具有密度小、孔隙率高、强度高和抗氧化性能优良等特点,在三维方向上结构均匀,各向同性,受热时产生的热应力小。表面处理的导电泡沫陶瓷表面密集

排列着短纤维(图 3),增加了陶瓷表面粗糙度和实际体积。

导电泡沫陶瓷经过抗热冲击性实验,10 个循环后仍未破裂,而堇青石蜂窝陶瓷在 4 个循环后破裂。SiC 泡沫陶瓷具有三维连通网状结构,是各向同性结构体,其强度没有方向性变化;而堇青石蜂窝陶瓷在平行方向,垂直方向和斜度方向强度相差很大,所以当其经历温度骤变时,各向异性的陶瓷结构会因为热应力作用而容易产生热震损伤,导致陶瓷体强度下降。SiC 泡沫陶瓷具有优良的抗热冲击性能,更能适应由于车辆行驶状态改变而造成排气温度的骤变,从而延长过滤器的使用寿命。

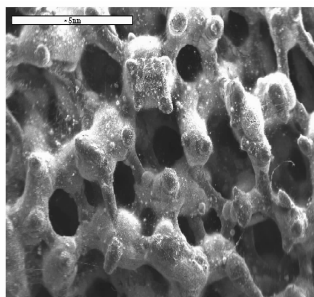


图 2 导电泡沫陶瓷的三维连通网络结构

Fig. 2 3D reticulated structure of conductive foam ceramics

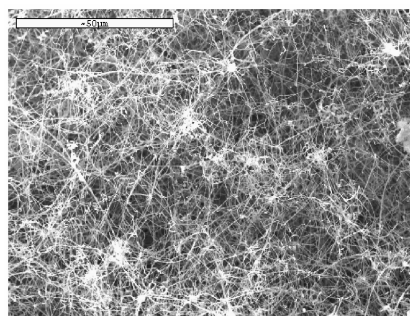


图 3 导电泡沫陶瓷表面的短纤维

Fig. 3 Short fibre on surface of conductive foam ceramics

由图 4 可知,导电泡沫陶瓷的电导率随其温度升高而变大,并且在 250 ℃ 以后,增加得更为迅速,这是碳化硅半导体特性的表现,在低温时它的导电性是由于其杂质能级上的电子受热激活,而进入高温区则是由于其本征载流子的迁移,随着温度升高载流子的数目迅速增多,导致电导率迅速增加^[8]。本研究制备的泡沫陶瓷的导电成分虽然以 SiC 为

主,但是其导电性受微量掺杂金属影响,在一定范围内材料导电能力可以调控。

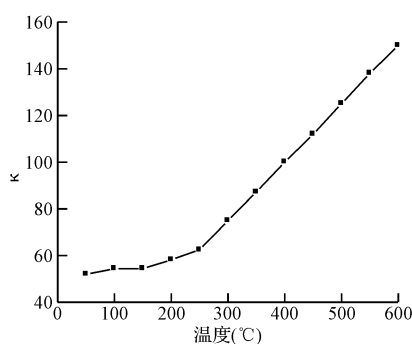


图4 导电泡沫陶瓷的电导率与温度的关系

Fig. 4 Relationship between electric conductivity and temperature of conductive foam ceramics

2.2 表面纤维化导电泡沫陶瓷对柴油机排气微粒的过滤特性及其再生

由图5可知,厚度为6 mm和10 mm的陶瓷滤芯对排气微粒的过滤效率分别为85%和90%,对过滤起主要作用的是导电泡沫陶瓷三维连通网络结构和表面密集排列的短纤维,滤芯三维连通网络结构具有较大的比表面积,增加了微粒与陶瓷表面的接触机会和在陶瓷内部停留的时间,而表面密集排列的短纤维增加了滤芯的过滤体积,并起到对微粒的阻挡和捕获作用,提高了微粒的过滤效率。滤芯越厚过滤效率也越高,但随着厚度增加排气背压也急剧上升,6 mm和10 mm滤芯产生的排气背压分别为500 Pa和900 Pa,所以陶瓷也不是越厚越实用,实验选用厚度为10 mm的泡沫陶瓷,在此实验条件下,过滤器滤芯与柴油机排量比为1:4。

导电泡沫陶瓷滤芯过滤微粒一定时间后,需再生后才能重新过滤,柴油机尾气温度一般在300 °C左右, O_2 浓度在6%~15%之间,接通电源后陶瓷滤芯即可迅速升温,使滤芯表面的微粒燃烧除去。导电泡沫陶瓷在再生方面要比壁流式蜂窝陶瓷滤芯和金属滤芯具有更大优势,壁流式蜂窝陶瓷本身不能导电,再生时需喷入燃油或在陶瓷结构中加入电阻丝,与金属相比,导电泡沫陶瓷的电导率要小得多,在过滤器通电再生时,其电流相对较小,这样对车载电源要求低,所以泡沫陶瓷过滤器更适用于利用车载电源原位再生。我们初步考察了导电泡沫陶瓷滤芯的再生能力(图6),经过20次过滤和原位通电再生后,过滤器过滤效率没有下降。

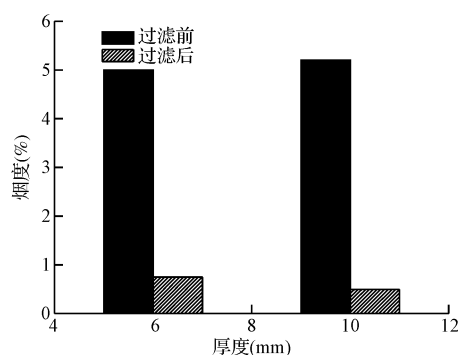


图5 导电泡沫陶瓷的厚度与其过滤能力的关系
Fig. 5 Relationship between thickness and filtration capacity of conductive foam ceramics

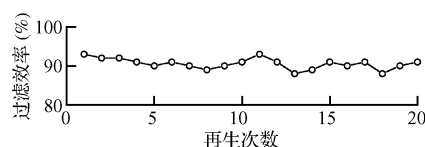


图6 导电泡沫陶瓷再生次数与过滤效率的关系
Fig. 6 Relationship between regeneration times and filtration efficiency of conductive foam ceramics

2.3 导电泡沫陶瓷的过滤机理探讨

一般按照微粒与陶瓷的作用方式,将陶瓷作为滤芯捕集微粒时存在的过滤机理分为3种:即碰撞机理、扩散机理和拦截机理^[9]。这3种过滤机理作用的主次视微粒粒度、微粒密度、气流流速、滤芯孔径和表面不同而异。对表面粗糙化的导电泡沫陶瓷滤芯而言,这3种过滤机理在过滤时同时存在(图7),但过滤过程与壁流式蜂窝陶瓷有较大不同,柴油机排气微粒直径大都在0.1~10 μm范围内,而陶瓷滤芯平均孔径为1 mm,微粒直径相对于滤芯气孔直径要小得多,所以泡沫陶瓷骨架拦截作用效果并不明显,但由于滤芯表面密集排列短纤维的作用,提高了拦截作用效果,如图7中1所示,在过滤器刚开始工作阶段,当微粒大小与短纤维间空隙相比较小时,属于拦截机理。同时排气中较重的微粒,由于惯性作用,会在陶瓷网络结构内部以碰撞方式被吸附,排气微粒在这种“迷宫”式结构中不但能直接与气流正面的陶瓷表面相碰撞,而且当有的微粒与陶瓷发生弹性碰撞时,也可以被反弹到陶瓷骨架背面发生碰撞而被捕获(图7中2所示)。排气中轻质微粒在陶瓷中停留时间较长,以扩散方式为主(图7中3所示)。当泡沫陶瓷表面短纤维被微粒全部覆

盖后,拦截作用将减弱,对过滤起作用的应该是碰撞作用和扩散作用。我们制备的导电泡沫陶瓷过滤效率比一般泡沫陶瓷高的原因就在于对陶瓷进行了表面处理,增加了滤芯过滤体积和滤芯表面短纤维对微粒的拦截作用。

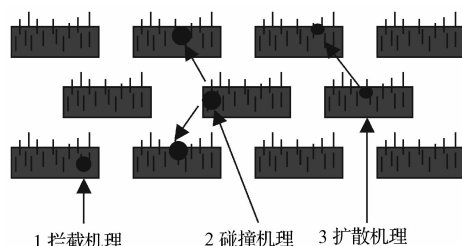


图 7 泡沫陶瓷的过滤机理

Fig. 7 Filtration mechanism of foam ceramics

按照陶瓷的结构可将滤芯划分为表面过滤型和体积过滤型。泡沫陶瓷滤芯属于体积过滤型,表面密布短纤维的导电泡沫陶瓷与一般泡沫陶瓷相比,在相同表观体积情况下,由于表面短纤维存在增大了过滤体积而提高了过滤效率。从这方面考虑,如何使泡沫陶瓷表面粗糙化,增加它的实际过滤体积是提高泡沫陶瓷过滤效率关键所在。我们在泡沫陶瓷表面制备短纤维是对泡沫陶瓷表面粗糙化的一种尝试。

2.4 应用前景分析

可以看出,表面纤维化的导电泡沫陶瓷在对柴油机排气微粒保持较高过滤效率前提下,可以方便地通电原位再生,是其最大优势。如果将其安装到柴油车上实际应用,可能再生装置连接和控制会比普通过滤器的安装和使用复杂些,要对车辆稍加改造,这是它与现用过滤器相比较不利的方面。

导电泡沫陶瓷过滤器如果在柴油车上使用,包括过滤器材料、催化剂、电极制备和智能控制系统,其成本约 3 000 元人民币左右,这与几千美元的进口蜂窝陶瓷和金属过滤器相比,要便宜得多。

从 2004 年 7 月开始,我国在汽车尾气排放控制方面,对轻型柴油车全面实施了 EU-II 标准,而对重型柴油车也将实行更为严格的 EU-III 标准,因此,柴油车尾气排放要符合排放标准,都必须安装微粒过滤器。到 2004 年,我国柴油车保有量已经达到了 120 万辆,并且其增加的速度也越来越快,仅新车对过滤器的年需求来估算,其产值将过亿。因此,导电泡沫陶瓷过滤器将拥有良好的应用前景和市场

价值。

3 结 论

(1)导电泡沫陶瓷具有三维连通网络结构,具有高强度、抗热冲击性能优良和导电性能好等优点,表面纤维化的导电泡沫陶瓷表面密集排列着短纤维,增加了陶瓷表面粗糙度和实际体积,适宜用作柴油车微粒过滤器的过滤材料。

(2)导电泡沫陶瓷用作微粒过滤器滤芯,对柴油机排气微粒的过滤效率可达 90%,可以通电加热再生,再生后过滤效率不下降,适用于利用车载电源进行原位再生。

(3)导电泡沫陶瓷滤芯属于体积过滤型,陶瓷表面密集排列的短纤维增加了滤芯过滤体积,提高了过滤效率。

(4)导电泡沫陶瓷过滤器成本与进口蜂窝陶瓷和金属过滤器相比,要便宜得多。随着我国对柴油车排放的严格要求,导电泡沫陶瓷过滤器将拥有良好的应用前景和市场价格。

参 考 文 献

- [1] Octavio Armas, Rosario Ballesteros, Arantzazu Gómez. Morphological analysis of particulate matter emitted by a diesel engine using digital image analysis algorithms and scanning mobility particle sizer. SAE Paper 2001013618, 2001
- [2] 宋健,叶舜华,祁萍萍. 柴油机排出颗粒提取物潜在致癌性的研究. 中国环境科学, 1996, 16(1): 46 ~ 50
- [3] Shunsuke Ban, Takao Maeda, Hiroshi Yoshino, et al. Particulate trap. Japan: US6024927, 2000-02-15
- [4] Klaus J. Peter, Natick, Osama M. Ibrahim. Self-cleaning and self-sealing particulate filter. USA: US6063150, 2000-05-16
- [5] Jean-Baptiste Dementhon, Brigitte Martin, Saint-Genis Laval, et al. Exhaust gas filtering process and unit with modulable heating. France: US6090172, 2000-08-18
- [6] Towl Ikeda, Takashi Horiuchi. Trap apparatus. Japan: US5819683, 1996-04-26
- [7] 刘巽俊. 内燃机的排放与控制(第一版). 北京:机械工业出版社, 2003. 190 ~ 195
- [8] R. A. Smith, 高鼎三, 张月清, 刘文明, 等翻译. 半导体(第一版). 北京:科学出版社, 1996. 460 ~ 461
- [9] 王建昕, 傅立新, 黎维彬. 汽车排出污染治理及催化转化器(第一版). 北京:化学工业出版社, 2000. 296 ~ 298