文章编号: 1000-8608(2007)02-0180-05

柴油机红外再生微粒捕集系统试验研究

王宪成*[1], 孙 坦[1], 高希彦[2]

(1.装甲兵工程学院 机械工程系, 北京 100072;
2.大连理工大学 内燃机研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 开发了采用壁流式蜂窝陶瓷作为过滤材料,利用红外辐射及柴油机废气进行再生的新的柴油机排放微粒后处理系统. 该系统具有结构简单、可靠性高、实用性好的特点. 在6110A柴油机台架上对系统的样机进行了碳烟过滤特性及再生特性的试验研究. 试验结果表明:系统的碳烟过滤效率高达95%,排气背压低,再生效率超过89%,工况适应性好. 后处理系统通过废气流量及再生点背压对红外再生过程进行控制的方法是有效的.

关键词: 柴油机微粒过滤器; 再生; 红外辐射
中图分类号: TK421.5 文献标识码: A

0 引 言

近几年的一系列研究表明柴油机微粒排放可能是对城市污染最严重的污染源之一,柴油机排气微粒特别是亚微米微粒不仅可造成对机体呼吸和免疫系统损伤,对人类健康也具有潜在的致癌作用[1]. 由于各种因素的相互制约,要满足日益严格的柴油机排放法规,单纯依靠机内净化措施是不够的,柴油机排气微粒后处理技术的研究具有巨大的社会效益和经济效益.

近十年来,国内外各研究小组已经开发了多种趋于实用化的柴油机排气微粒后处理系统,主要技术有过滤与再生技术、静电捕集技术、低温等离子体技术、催化转化技术及旋风分离技术等.

从目前国内外发表的研究结果看[2],由于柴油机工作条件苛刻,技术条件复杂,尤其中国等国家的油料含硫量比较大等,以上技术在实用中分别存在各种缺欠,如催化剂中毒、寿命短、系统复杂、可靠性差、耗电量大及对空气有二次污染等.

文献[3]提出采用红外技术对柴油机微粒捕集蜂窝陶瓷进行再生的新方法,对红外再生的机理进行了细致的分析,并对红外再生的过滤体温度分布、温度梯度、红外辐射功率对再生过程的影响及再生效率进行了试验研究. 研究结果表明[3],红外辐射加热方式与其他加热方式(热风导热和微波辐射加热等)相比较,具有选择性加热的特点,能直接加热受热体,缩短受热体加热到所需温度的时间,减少能量消耗;红外再生技术的再生效率高;最高再生温度适宜,过滤体温度梯度小,十分适合蜂窝陶瓷的再生. 本文在前期工作的基础上开发以壁流式蜂窝陶瓷作为过滤介质采用红外辐射加热及柴油机废气对过滤体进行再生的柴油机排放微粒后处理技术系统,并在6110A柴油机台架上对柴油机排气微粒后处理系统的过滤特性、再生特性、控制特性及工况适应性进行研究.

1 红外再生柴油机排气微粒后处理系统

1.1 过滤体

本文选择的过滤体为蜂窝陶瓷,根据国内外的研究结果[4],壁流式蜂窝陶瓷是柴油机排放碳烟微粒最合适的过滤材料. 壁流式蜂窝陶瓷的过滤属于表面过滤方式,表面形成的碳烟微粒层也参与过滤,因而过滤效率高. 由于过滤面积大,其流动阻力较小. 壁流式蜂窝陶瓷体结构密实,抗

收稿日期: 2006-01-08; 修回日期: 2006-12-27.
作者简介: 王宪成*(1964-),男,大连理工大学1999届博士,副教授; 高希彦(1943-),男,教授,博士生导师.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

振性能好,使用寿命长,可以达到 10× 10⁴ km. 蜂窝陶瓷的热膨胀系数低,耐热冲击性好,适合于热再生. 但是,壁流式陶瓷体具有各向异性,其径向热膨胀系数几乎是轴向的 2倍,在微粒燃烧再生时,容易出现热冲击损坏,因而其径向上的温度梯度应尽量小. 根据 Murtagh等[4]的研究,温度梯度保持在 35℃ /cm以下不会导致热应力损伤,这是蜂窝陶瓷热再生的必要条件. 作者前期的研究结果表明[5],红外再生的最大温度梯度小于 10℃ /cm,其径向梯度更小. 因而蜂窝陶瓷过滤与红外再生技术结合是成功的. 本文开发的车用排气微粒后处理系统以 6110A柴油机为依据进行设计,过滤陶瓷采用日本的堇青石蜂窝陶瓷,Φ190. 5 mm× 203. 2 mm. 表 1为所选用陶瓷的物理性能.

表 1　日本 IBIDEN公司的堇青石陶瓷物理性能

Tab. 1　Physical performance of IBIDEN cordierite ceramic

物理性能		数值
抗弯强度 /MPa		1~ 1. 25
抗压强度 /MPa	A轴	0. 85
	B轴	0. 11
	C轴	0. 11
热传导系数 /(W· (m· K)⁻¹)		1. 05
热膨胀系数 /(10⁻⁶℃⁻¹)		1
耐热温度 /℃		1 430

1. 2　系统结构与工作过程

本文所设计的红外再生柴油机后处理系统为双过滤单元系统 (见图 1),系统主要由废气转换阀 V_1、再生阀 V_2、控制单元及双过滤单元组成,每个过滤单元又由进气导管、过滤体、红外辐射器、消音装置组成. 废气转换阀 V_1是三向阀,由双位电磁阀控制废气流经哪个过滤体. 再生阀 V_2是碟阀,由伺服电磁阀控制开度,功用是控制再生时的废气流量. T_1、T_2为分布在过滤体内的温度传感器,N_1、N_2分别为左右过滤单元的背压传感器. 柴油机排气通过废气转换阀进入处于过滤状态的过滤单元,在过滤单元内废气要经过进气导管、红外辐射器后进入过滤陶瓷,净化后废气经过消音装置后排入大气. 当此过滤单元达到再生点,废气转换阀将废气导入另一路的过滤单元,而此路过滤单元进入再生状态. 过滤单元再生时,红外辐射器开启,产生波长为 1~ 5μm的红外辐射,其辐射能对过滤体靠近红外辐射器端面的碳烟进行加热至 580℃ 以上,再生阀开启一定开度,将过滤体上靠近红外辐射器端的碳烟点燃,点燃的碳烟界面在废气、碳烟燃烧放出的热量及红外辐射能量的作用下向另一端迅速移动,将过滤体内的碳烟全部燃烧,再生结束,红外辐射器关闭,此路过滤单元等待进入过滤状态. 控制单元的功用是由排气背压模型控制再生点,由再生废气流量与再生温度模型控制再生过程.

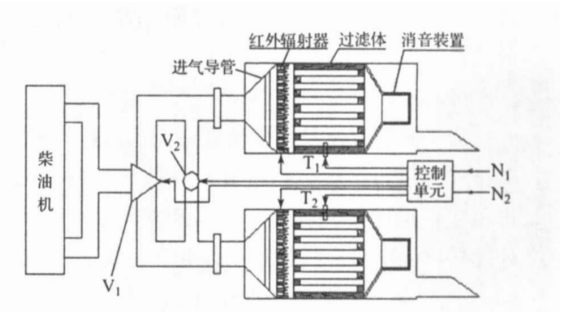


图 1　红外再生柴油机排气微粒后处理系统

Fig. 1　Schematic of the DPF system using infrared regeneration technique

1. 3　红外辐射器

红外辐射器的研究应着眼于如何使热能最有效地辐射,传输损失最小,使受热物吸收效率最高. 因此红外辐射器应具有热惰性小、升温快速、能耗低、热散失小、能效 (辐射能占总功率的比例) 高、加热均匀、辐射温度适宜以及辐射与吸收匹配等特点. 红外辐射器主要由三部分组成: 基体、辐射层和发热体. 红外辐射层是红外辐射器的主要组成部分,经研究红外再生辐射材料的应用要求如下: 在使用温度 800~ 1 200℃ 条件下有高的发射率,而且在短波段发射率高,因为随着温度的提高,黑体的辐射峰值波长向短波迁移;着重波段 0. 8~ 4μm的发射率,使红外再生具有选择性加热的特点;要解决不同成分材料混合后热膨胀系数不同的问题;成分组织结构稳定,在高温使用中发射性能不衰减或慢衰减. 本文的红外涂层为红外材料烧结而成,辐射粉体基料为 NMn_2O_4,其中 N 为 Co、Cu、Fe、Mn, 或为 MFe_2O_4, 其中 M 为 Mn、Co、Cu、Cr、Fe.

2　试验结果与分析

2. 1　试验设备与测试指标

本文试验采用 6110A柴油机台架试验台;

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

MAW D4水力测功仪; U形水银压力计; 6075 AVL DVM波许烟度计. 主要性能指标的测试如下:

(1) 后处理器的微粒过滤效率

由于质量浓度的测量比较困难,本文采用过滤前后排气波许烟度的相对变化量来计算过滤效率. 即

$$Z = \frac{B_{sb} - B_{sa}}{B_{sb}} \times 100\%$$

式中: B_{sb}为过滤前的波许烟度 (Rb); B_{sa}为过滤后的波许烟度 (Rb).

(2) 再生效率

为了测量方便及考虑到在一定的微粒沉积量下排气背压与微粒沉积量有良好的比例关系,这里用在一定的柴油机运行工况及排气温度下,后处理器再生前后排气背压来计算再生效率. 即

$$Z_R = \frac{\Delta p_b - \Delta p_a}{\Delta p_b - \Delta p_o} \times 100\%$$

式中: Δp_b、Δp_a为分别为再生前后的背压降; Δp_o为洁净后处理器的背压降.

2.2 系统的过滤特性

从大量的试验结果看,典型的蜂窝陶瓷过滤曲线呈现 3个基本阶段:① 快速压降上升阶段,但是 d^2p/dt^2呈现负值;② 相对平坦的线性压降变化阶段;③ 快速压降上升阶段, d^2p/dt^2呈现正值. 此 3个阶段的表现机理与文献 [3]所提出的丝网三阶段过滤理论相同. 在过滤的第一阶段,壁流式陶瓷壁面上的孔被颗粒堵塞,废气流通面积快速减少,造成压降快速增加,此阶段主要由壁面微孔起过滤作用;第二阶段对应于壁面碳烟颗粒过滤层的形成阶段,此阶段主要是碳烟微粒层与壁面微孔共同起过滤作用,因此压降增加比较平坦,此过滤阶段比较稳定,是比较好的过滤阶段;在第三阶段,蜂窝陶瓷壁面上的碳烟微粒层已经完全形成,此阶段主要由微粒层起过滤作用,所以压降急剧增加. 第三阶段的过滤对柴油机的副作用相当大,因此不能用第三阶段过滤.

图 2为作者在大量的过滤试验中选中的典型试验结果 (工况 1 200 r/min, 50% 负荷). 从图中及其他试验结果可以得到如下结论: 系统的过滤效率高,蜂窝陶瓷的过滤效率接近 100%,由于波许烟度计的误差范围为 0.1,造成过滤效率的波动;柴油机工况对过滤效率的影响并不大;蜂窝陶瓷的沉积碳烟容量大,背压上升比较缓慢;蜂窝陶瓷过滤只进行到第二阶段.

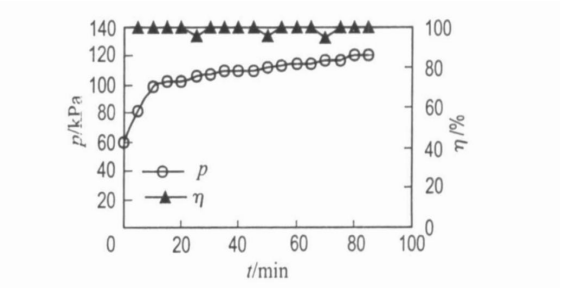


图 2 蜂窝陶瓷过滤特性

Fig. 2 Filtration characteristic of honeycomb ceramic monolith

2.3 系统的再生特性

2.3.1 *再生点压力对再生的影响* 在实际应用过程中,系统的再生点由定工况的排气背压决定,排气背压高则过滤体上沉积的碳烟微粒质量大. 图 3为不同再生点背压对过滤体轴线上两点温度的影响. 实线 CH2、CH6是再生点背压为 25.3 kPa(怠速 610 r/min,排温 145 ℃) 再生时,过滤体轴线上靠近前端 1/5位置及 1/2位置的温度变化; 虚线 CH2-1、CH6-1是再生点背压为 28 kPa(怠速 610 r/min,排温 145 ℃) 再生时,过滤体轴线上靠近前端 1/5位置及 1/2位置的温度变化;试验用红外再生功率为 1 200 W,再生工况为怠速.

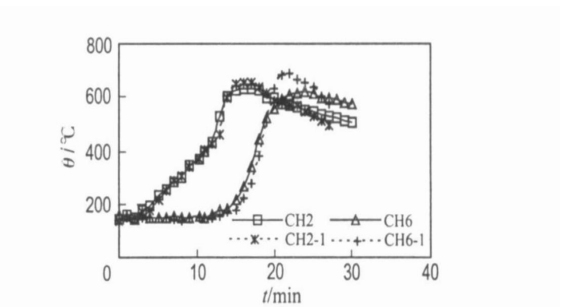


图 3 不同再生点背压对再生的影响

Fig. 3 The effect of different regenerating pressure on regeneration

从图 3可以看出,当再生点背压高时 (见虚线 CH2-1、CH6-1),过滤体轴线上前点及后点的最高温度都比较高,说明碳烟微粒质量大,再生最高温度高;后点最高温度比前点最高温度高,说明碳烟微粒燃烧放出的热量多于废气带走的热量,随

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

着再生的进行,过滤体的温度逐渐升高;虚线 CH2-1与 CH6-1之间的时间差比较大,碳烟燃烧界面由前向后移动稍微慢一点. 而当再生点背压低时其再生规律正好相反. 从试验结果看,通过控制再生点背压可以达到有效控制再生最高温度及再生速度的目的. 相同的再生条件下,再生点背压增加时,再生最高温度升高,再生持续时间较长;再生点背压降低时,再生最高温度降低,再生持续时间较短.

2.3.2　再生废气流量对再生的影响　在实际应用过程中,系统在再生时通过改变再生废气阀的开度控制再生过程的进行,在定工况下主要通过以下两个途径: 一是废气流量增大,参与燃烧的氧含量升高,燃烧速度加快,再生温度增加;二是废气流量增大,带走的热量增加,再生温度降低. 由于废气中的氧含量相对变化量不大,废气流量的影响因素中废气带走热量占主导地位,而氧含量的影响占次要地位.

图 4为不同再生废气阀开度对过滤体轴线上两点温度的影响,实线 CH2及 CH6为再生废气阀开度大(开度为 2/5)时过滤体轴线上靠近前端 1/5位置及 1/2位置的温度变化曲线;虚线 CH2D及 CH6D为再生废气阀开度小(开度为 1/5)时过滤体轴线上靠近前端 1/5位置及 1/2位置的温度变化曲线. 从图中的实线可以看出,再生废气阀开度大,氧量增大,温度升高速度稍快,燃烧界面移动速度加快,但是废气带走的热量增加,最高温度低,温度下降快,轴线后一点的最高温度比前一点的低. 而废气阀开度小时则氧量减少,温度升高速度稍慢,燃烧界面移动速度减慢,但是由于废气带走的热量减少,最高温度稍高,温度下降缓慢,轴线后一点的最高温度与前一点的几乎相同. 因此,废气阀开度对过滤体最高温度及再生时间影响相当大,废气流量的控制对于红外再生后处理系统来说是非常关键的一环.

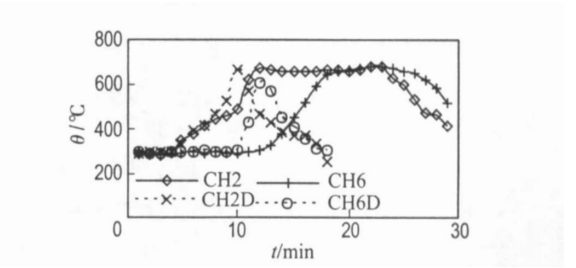


图 4　不同再生废气流量的影响

Fig. 4　The effect of different exhaust flow rate on regeneration

2.3.3　循环测试结果　系统在 6110A台架上进行不同工况的循环过滤与红外再生,循环试验主要考查不同过滤单元、不同再生工况时再生点背压控制及废气流量控制的变化对再生的影响,即整个系统的工况适应性. 表 2为 6110A柴油机台架 3个循环测试时不同工况下的再生点背压及红外再生效率,再生点按 1 200 r/min,30% 负荷时的背压值控制. 从所有的试验结果看,按照压力计算的再生效率都在 89% 以上. 循环测试结果表明,后处理系统在再生条件变化的条件下,再生废气流量的控制能够保持再生正常. 如再生点在 12.0～ 13.2 kPa范围内,工况从怠速至 2 100 r/min,再生的效果都比较好. 总之,不同工况下的过滤体最高温度控制在 900℃ 以下,符合堇青石蜂窝陶瓷的工作条件,系统再生效率在 89% 以上,说明再生点背压及废气阀开度的控制比较成功.

表 2　红外再生试验结果

Tab. 2　Experimental results of infrared regeneration

再生序号	再生工况 r·min⁻¹/N·m	再生点背压 /kPa	排气温度 /℃	最高温度 /℃	再生效率 /%
R1	890/0	13.2	103	660	89.4
R2	1 500/0	12.3	203	993	98.5
R3	2 100/105	12.9	260	903	97.2
R4	1 200/141	12.0	316	712	93.9
R5	1 200/141	12.9	317	731	94.5
R6	1 200/0	12.0	133	703	91.9

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结 论

采用壁流式蜂窝陶瓷作为过滤体,利用 0.8 ~ 4μm波长红外辐射进行再生所开发出的双筒柴油机排气微粒后处理系统,具有很好的实用性.过滤体抗振性能好,使用寿命长,红外再生技术符合蜂窝陶瓷的使用技术要求,系统可靠.台架试验表明,系统的过滤效率为 95% 以上,废气背压低,而再生效率达 89% 以上.使用过程中再生点背压及再生废气阀开度对再生过程的影响非常大.再生点背压高,再生最高温度较高,再生持续时间较长;再生点背压低,过滤体再生温度低,再生时间较短.再生废气阀开度大,再生时间短,最高温度低,温度下降快;再生废气阀开度小,再生时间长,最高温度高.不同工况下循环试验结果说明系统的再生点背压及废气阀开度的控制比较成功.

参考文献:

[1] JOHNSON J H, BAGLEY S T, GRATZ L D, *et al*. A review of diesel particulate control technology and emissions effects— 1992 horning memorial award lecture [R] // SAE Paper 940233. Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, Inc., 1994

[2] NEEFT J P A, MAKKEE M, MOULIJN J A. Diesel particulate emission control [J]. **Fuel Proces Technol**, 1996, **47**(1): 1-69

[3] 王宪成. 一种新的柴油机排气微粒后处理系统的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 1999

[4] MURTAGH M J, SHERWOOD D L, SOCHA L S JR. Development of a diesel particulate filter composition and its effect on thermal durability and filtration performance [R] // SAE Paper 940235. Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, Inc., 1994

[5] 王宪成,高希彦,许晓光,等. 柴油机微粒过滤器红外再生技术研究 [J]. 大连理工大学学报, 2005, **45**(4): 537-541
(WANG Xian-cheng, GAO Xi-yan, XU Xiao-guang, *et al*. Research on infrared regenerating technique for DPF [J]. **J Dalian Univ Technol**, 2005, **45**(4): 537-541)

Experimental research on DPF system using infrared regeneration

WANG Xian-cheng*[1], SUN Tan[1], GAO Xi-yan[2]

(1.Dept. of Mech. Eng., Armored Force Eng. Inst., Beijing 100072, China;
2.Res. Inst. of Intern. Combust. Engine, Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract A new type of diesel particulate filter (DPF) system using honeycomb ceramic filter was developed successfully by utilizing the infrared regeneration technique. The DPF system has features of simple structure, high reliability and good applicability. The characteristics of filtration and regeneration of the DPF system were investigated in a 6110 D.I. diesel engine. The experimental results show that the DPF system has 95% high trapping efficiency, and over 89% high regeneration efficiency, low back pressure, good adaptability to engine operating conditions. The regenerating process of the DPF system was proven effective through controlling the exhaust flow rate and the back pressure of regeneration point.

Key words diesel particulate filter (DPF); regeneration; infrared radiation

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net