

性能与排放

船舶柴油机颗粒物排放法规及控制技术发展

杨子龙

(中国舰船研究院, 北京 100101)

摘要: 介绍了国内外船舶柴油机颗粒物排放标准以及 IMO 黑炭新规的进展, 指出: 船舶柴油机颗粒物排放控制将成为船舶柴油机行业的重点研究方向之一; 黑炭测量方法的研究非常迫切。介绍了可同时降低柴油机 NO_x 和颗粒物排放的 SCRf 技术(即将 SCR 催化剂涂覆在 DPF 上)。对高、中、低速船用柴油机排放颗粒粒径和数量浓度的分布特性进行了研究, 并根据研究结果建议: 在开发船用柴油机颗粒捕集器时, 应根据颗粒粒径分布特性, 适当调整过滤体微孔直径或增加再生频率。

关键词: 船舶柴油机; 颗粒物; 黑炭; 颗粒捕集器

中图分类号: TK423.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2016)06-0001-05

PM Emission Regulations and Controlling Technology Development of Marine Diesel Engines

Yang Zilong

(China Ship Research and Black Carbon Development Academy, Beijing 100101)

Abstract: The PM emission standard of marine diesel engine both home and abroad, as well as IMO new regulations of black carbon are introduced. It is concluded that the PM emission control of marine diesel engines will become one of the key research tendency of marine diesel engine industry, and the research of black carbon measurement method become very urgent. SCRf technology, which coating DPF with SCR catalyst, and could reduce both NO_x and PM of diesel engines are introduced. Moreover, the distribution characteristics of PM diameter and number concentration of high, medium, and low speed diesel engines are studied, and suggestions are given based on the analysis results that in the development of diesel particulate filter (DPF), based on the distribution characteristics of PM diameter, the diameter of filter medium micropore should be adjusted accordingly or regeneration frequency should be increased appropriately.

Key words: marine diesel engine; PM; black carbon; DPF

0 引言

柴油机尾气中的污染物主要是碳氢化合物(HC)、一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM), 其中以 NO_x 和 PM 对人类健康的危害最大; 同时, 船舶柴油机排放的黑炭对大气变暖有

很大的影响。据 2012 年联合国环境规划署公布的《全球环境展望 5》指出: 每年有近 200 万的过早死亡病例与颗粒物污染有关。目前, PM 2.5 对肺病发病率的影响正在持续走高, 加拿大渥太华大学的学者对渥太华地区 18 万非吸烟者的调研发现: 肺癌和 PM 2.5 之间存在比较明显的相关性, PM

收稿日期: 2016-07-09

作者简介: 杨子龙(1980-), 高级工程师, 主要研究方向为船舶动力顶层设计、系统集成、故障诊断、联调试验等, E-mail: CSICYZL@163.com。

2.5 浓度每增加 $10 (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ ，肺癌死亡率将增加 15% ~ 27%。

目前，国内外对道路用机动车尾气中的颗粒物进行了许多后处理方面的研究，诸如颗粒捕集器、颗粒氧化催化转化器等，但是对船舶柴油机颗粒物排放控制的研究相对较少。而船舶柴油机排放的 NO_x 和 PM 在非道路柴油机排放中分别占 13.32% 和 17.63%。由于 NO_x 与 PM 存在 trade-off（折衷）关系^[1-2]，在降低 NO_x 的同时会伴随着 PM 的增加，所以现在有很多学者认为未来对船机颗粒物的排放必将更加严格^[3-5]。本文对国内外船舶柴油机颗粒物排放法规的发展以及黑炭新规定做介绍；探讨颗粒捕集器的研究现状，并介绍船舶柴油机尾气中颗粒粒径和数量浓度的分布特性，为船舶尾气颗粒物处理和净化提供参考。

1 船舶柴油机颗粒物排放法规及黑炭规定的发展

1.1 颗粒物排放法规的现状

美国 EPA 船舶柴油机颗粒物排放法规已发展到 Tier 4 阶段，目前主要在实施的船机排放标准为 Tier 3 ~ Tier 4。表 1 ~ 表 3 是美国 EPA 制定的船机颗粒物 Tier 3 排放标准，已于 2009-2014 年实施。表 4 是船机颗粒物 Tier 4 排放标准，目前仅对功率 $P \geq 600 \text{ kW}$ 的船机做出了规定，其于 2014 ~ 2017 年陆续实施。Tier 3 ~ Tier 4 未覆盖的功率段仍实施 Tier 1 ~ Tier 2 标准。从法规发展来看，Tier 4 颗粒物排放限值相较于 Tier 3 严格了 70% 左右。

表 1 EPA 第 1 类船机 Tier 3 颗粒物排放标准
(功率密度 $\leq 35 (\text{kW} \cdot \text{dm}^{-3})$)

功率 P/kW	单缸排量 D/dm^3	PM/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	执行时间
$P < 19$	$D < 0.9$	0.40	2009 年
$19 \leq P < 75$	$D < 0.9^a$	0.30	2009 年
		0.30 ^b	2014 年
$75 \leq P < 3\ 700$	$D < 0.9$	0.15	2012 年
	$0.9 \leq D < 1.2$	0.14	2013 年
	$1.2 \leq D < 2.5$	0.12	2014 年
	$2.5 \leq D < 3.5$	0.11 ^c	2013 年
	$3.5 \leq D < 7$	0.11 ^c	2012 年

a: $P \leq 75 \text{ kW}$ 、 $D \geq 0.9 \text{ dm}^3$ 机型的标准与 $75 \sim 3\ 700 \text{ kW}$ 的一致

b: 2014 年 PM 排放限值可为 $0.2 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$

c: 2018 年对 $P < 600 \text{ kW}$ 的机型标准限值降为 $0.10 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$

动机排气污染物排放限值，该标准对船舶柴油机颗粒物排放进行了限制。表 5 是第一阶段船机排气颗粒物排放限值，将于 2017 年 7 月 1 日开始实施；表 6 是第二阶段船机排气颗粒物排放限值，将于 2021 年 7 月 1 日开始实施。

表 2 EPA 第 1 类船机 Tier 3 颗粒物排放标准
(功率密度 $> 35 (\text{kW} \cdot \text{dm}^{-3})$)

功率 P/kW	单缸排量 D/dm^3	PM/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	执行时间
$P < 19$	$D < 0.9$	0.40	2009 年
$19 \leq P < 75$	$D < 0.9^a$	0.30	2009 年
		0.30 ^b	2014 年
$75 \leq P < 3\ 700$	$D < 0.9$	0.15	2012 年
	$0.9 \leq D < 1.2$	0.14	2013 年
	$1.2 \leq D < 2.5$	0.12	2014 年
	$2.5 \leq D < 3.5$	0.12	2013 年
	$3.5 \leq D < 7$	0.11	2012 年

a: $P \leq 75 \text{ kW}$ 、 $D \geq 0.9 \text{ dm}^3$ 机型的标准与 $75 \sim 3\ 700 \text{ kW}$ 的一致

b: 2014 年 PM 排放限值可为 $0.2 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$

表 3 EPA 第 2 类船机 Tier 3 颗粒物排放标准

功率 P/kW	单缸排量 D/dm^3	PM/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	执行时间
$P < 3\ 700$	$7 \leq D < 15$	0.14	2013 年
	$15 \leq D < 20$	0.27 ^a	2014 年
	$20 \leq D < 25$	0.27	2014 年
	$25 \leq D < 30$	0.27	2014 年

a: $P < 3\ 300 \text{ kW}$ 的机型标准限值为 $0.34 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$

表 4 EPA 第 1、2 类船机 Tier 4 颗粒物排放标准

功率 P/kW	PM/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	执行时间
$P \geq 3\ 700$	0.12 ^a	2014 年 ^c
	0.06	2016 年 ^{b,c}
$2\ 000 \leq P < 3\ 700$	0.04	2014 年 ^{c,d}
$1\ 400 \leq P < 2\ 000$	0.04	2016 年 ^c
$600 \leq P < 1\ 400$	0.04	2017 年 ^d

a: 单缸排量 D 为 $15 \sim 30 \text{ dm}^3$ 的机型标准限值为 $0.25 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$

b: 开始实施日期可在 Tier 4 实施日期内任选

c: 第 2 类机型可选；Tier 3 标准于 2012 年 PM 限值为 $0.14 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ ，Tier 4 标准于 2015 年开始

d: 此类机型 Tier 3 标准仅在 2014 ~ 2015 年应用

1.2 黑炭规定的发展

黑炭在大气中的寿命大约为 5 ~ 12 天，但其能吸收太阳辐射中的可见光，成为使气候变暖的介质，特别是对北极的影响最为明显。2015 年国际海事组织污染预防及响应分委会第 2 次会议上 (PPR2) 对黑炭的定义达成了一致的意见，分委会

中国环保部于 2016 年 8 月 22 日发布了船舶发

一致同意 Bond 等的观点，描述黑炭为“碳元素的一种独特类型，只在碳基燃料燃烧的火焰中形成”。黑炭与大气气溶胶中的其他碳以及碳化合物的区别是其具有以下特性：（1）能强烈吸收可见光，在 550 nm 波长范围内单位质量吸收横截面至少 5 倍于表面积；（2）很难熔化：在很高的温度下依然能够保持其基本形态，气化温度接近 4 000 K；（3）很难溶于水和有机溶剂，包括甲醇、丙酮，也难溶于大气气溶胶的其他组分；（4）以小碳球体的聚合体存在。

由于其对北极气候的恶劣影响，分委会同时提出了对于黑炭测量方法研究的迫切需要。目前国际组织对于黑炭测量方法还未形成统一的标准，对于测定方法的选定须主要考虑：工业绩效，是否适用于各种燃料类型，是否适用于各种测试条件。目前已有的测定方法包括滤纸式烟度法（FSN）、激光诱导炽光法（LII）、多角度吸收光度法（MAAP）和光声光谱法（PAS）。

表 5 中国船机排气颗粒物第一阶段排放限值

船机类型	单缸排量 $SV/(L \cdot \text{cyl}^{-1})$	额定净功率 P/kW	$\text{PM}/(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$
第 1 类	$SV < 0.9$	$P \geq 37$	0.40
	$0.9 \leq SV < 1.2$		0.30
	$1.2 \leq SV < 5$		0.20
第 2 类	$5 \leq SV < 15$		0.27
	$15 \leq SV < 20$	$P < 3\ 300$	0.50
		$P \geq 3\ 300$	0.50
	$20 \leq SV < 25$		0.50
	$25 \leq SV < 30$		0.50

表 6 中国船机排气颗粒物第二阶段排放限值

船机类型	单缸排量 $SV/(L \cdot \text{cyl}^{-1})$	额定净功率 P/kW	$\text{PM}/(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$
第 1 类	$SV < 0.9$	$P \geq 37$	0.30
	$0.9 \leq SV < 1.2$	0.14	
	$1.2 \leq SV < 5$	0.12	
第 2 类	$5 \leq SV < 15$	$P < 2\ 000$	0.14
		$2\ 000 \leq P \leq 3\ 700$	0.14
		$P < 3\ 700$	0.27
	$15 \leq SV < 20$	$P < 2\ 000$	0.34
		$2\ 000 \leq P < 3\ 300$	0.50
		$P \geq 3\ 300$	0.50
	$20 \leq SV < 25$	$P < 2\ 000$	0.27
		$P \geq 2\ 000$	0.50
	$25 \leq SV < 30$	$P < 2\ 000$	0.27
		$P \geq 2\ 000$	0.50

2 柴油机颗粒捕集器新进展

柴油机颗粒捕集器（DPF）于 1999 年在轻型商用车上被广泛应用，随后于 2005 年在重型商用车上也开始得到广泛的应用。经过近 17 年的发展，目前对其结构进行的改进已经极其微小，近几年的研究热点主要集中在颗粒物捕集及再生原理。值得注意的是，国外越来越多研究者将 SCR 催化剂涂覆在 DPF 上，以研究其同时降低 NO_x 及 PM 的可能。

Kassel 等^[3]分析了美国 EPA 在 2011 年出台的非道路 Tier 4 法规，发现：相较于 0.02（g·（kW·h）⁻¹）的排放限值，采用 DPF 装置的柴油机颗粒物排放水平比限值平均低 0.016 g·（kW·h）⁻¹，即相当于比排放限值还低 75%。可以说 DPF 是满足未来越来越严格的排放法规的行之有效的颗粒物减排装置。Kazuki 等^[4]提出一种非对称孔道结构，用以降低柴油机颗粒捕集器的背压，如图 1 所示。新型八边形非对称结构 OS、VPL 与传统的方形对称结构 SQ 相比，背压要下降很多，这是因为采用新型孔道结构能极大地增加过滤面积，提高颗粒物储存能力。José Ramón Serrano 等^[5]提出：在 DPF 前喷水来降低其背压。试验研究表明：在喷水开始时 DPF 进气孔道温度和背压会急剧下降，背压下降是由于热力瞬变引起的；在喷水结束后，孔道进气温度逐渐回升至正常排气温度，排气背压也随之逐渐回升；但由于喷水会导致孔道内的颗粒物向孔道后端迁移，因此喷水结束后 DPF 背压会下降 1 000 Pa 左右。同时该研究还表明：DPF 前喷水不会影响其主动或被动再生效果。

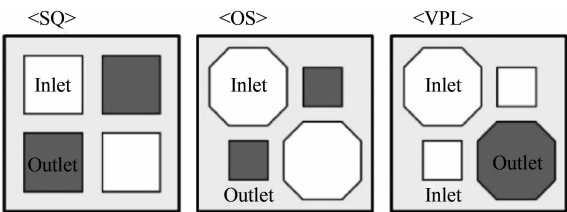


图 1 过滤体非对称孔道结构示意图

随着捕集器颗粒物的积累，背压会越来越高，将会影响柴油机性能，因此很多研究者对捕集器的再生特性进行了研究。Kotrba 等^[6]评估了碳烟被 NO₂ 氧化被动再生的影响因素，研究发现：采用铂族金属涂覆的 DPF 能显著提高被动再生速率，但当铂族金属的涂覆量达到一定程度后再生性能将不再提高；在未涂覆催化剂的 DPF 前安装氧化催化器（DOC），能够提高被动再生性能 5 倍左右，但继续在 DPF 上涂覆催化剂后效果不明显；稳态条

件下排气温度从 300 ℃ 提高至 400 ℃ 能够增加 4 倍左右的碳烟燃烧速率。Li 等^[7]研究了捕集器内碳烟被 NO₂ 氧化的情况, 观察发现: 捕集器孔穴内的碳烟最先被氧化, 能够快速降低背压; 然后是壁面交界面处的碳烟被氧化, 这一阶段 NO₂ 的来源依赖于交界面处在催化剂作用下被氧化的 NO, NO₂ 反向扩散进入碳烟中氧化碳烟。

目前受到研究者们广泛关注的是将 SCR 催化剂涂覆在 DPF 上, 即 SCRf, 如图 2 所示。与 DPF 相比, SCRf 过滤体孔径直径偏大以便于涂覆 SCR 催化剂。Tang 等^[8]模拟了在有尿素喷射和无尿素喷射时 SCRf 过滤体内 NO₂ 的浓度分布, 结果表明: 无尿素喷射时 NO₂ 在滤饼层和壁面处呈现对称均匀分布; 而有尿素喷射时, SCR 过程消耗 NO₂ 的速率要比碳烟消耗的速率快很多, 因此在滤饼层中能被利用的 NO₂ 较少。尽管涂覆的 SCR 催化剂会对碳烟被动再生造成不利的影响, 但 Blake-man^[9]研究发现: 在 SCRf 前安装 DOC, 一定程度上能够有利于碳烟被动再生, 控制碳烟积累速率。Hohl^[10]在非道路柴油机上采用瞬态试验循环量化研究了温度、NO_x: 碳烟比例对被动再生过程的影响, 发现: 排气温度从 225 ℃ 提升至 325 ℃, NO_x: 碳烟的比例从 200 提升至 250, 能够保证足够的被动再生速率以完成碳烟再生过程; 或在 310 ℃ 下通过 DOC 提升 NO_x: 碳烟比例至 150, 也能保证足够的被动再生速率。Kojima 等^[11]对比研究了相同条件下 SCR 和 SCRf 的性能, 结果表明: SCRf 的 NO_x 清除效率要比 SCR 低 10% ~ 20% 左右; 试验中在 SCRf 前增加一个小型 SCR, 结果表明能够有效提升其启动时的减排性能。

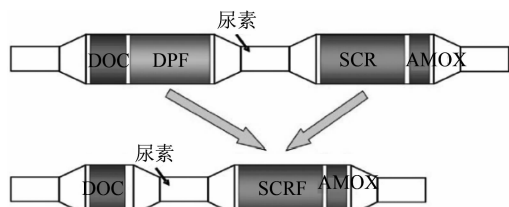


图2 SCRf后处理系统示意图

3 船用柴油机排放颗粒粒径及浓度分布特性

鉴于船用高、中、低速柴油机的转速、缸径差异较大, 有必要关注这三种柴油机排放颗粒粒径浓度分布的情况。数据是采用 ELPI + /ELPI 测量得到。测量过程中, 高速机采用 E3 循环, 中、低速机采用 D2 循环。根据颗粒物粒径不同将其分为三

种: 粒径 < 50 nm 为核态微粒, 粒径为 50 ~ 1 000 nm 为积聚态微粒, 粒径 > 1 000 nm 为粗粒态微粒。

图 3 为高速柴油机排放颗粒数量浓度随粒径分布情况。从图中可以看出: 粒径分布基本呈现双峰趋势, 峰值位于 10 nm 和 100 nm 左右; 粒子数浓度最大值位于 100% 负荷的 10 nm 粒径段, 为 8.43×10^7 ($1 \cdot \text{cm}^{-3}$)。粒径小于 50 nm 时, 随着负荷增加, 粒子数浓度逐渐增加; 而粒径在 50 nm ~ 500 nm 之间, 负荷低时粒子数浓度更大; 粒径大于 500 nm 时粒子数浓度较小。从检测结果可以看出: 粒子数浓度基本在 $10^7 \sim 10^8$ 之间。

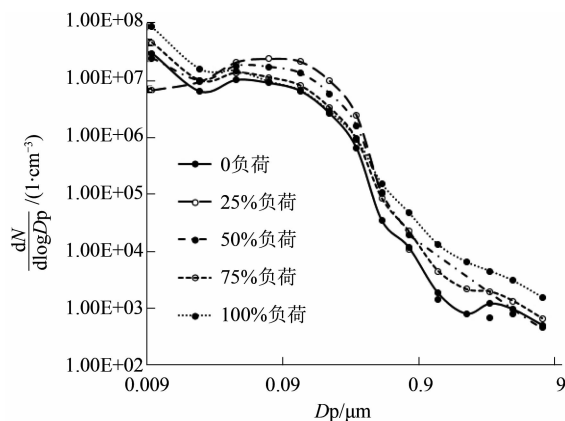


图3 高速机排放颗粒数量浓度分布

图 4 为中速柴油机在转速相同、负荷不同时尾气颗粒粒子数浓度随粒径的变化情况。从图中可以看出, 颗粒分布大致呈现双峰形式, 峰值位于 30 ~ 260 nm 左右。排气颗粒粒径基本在 1 μm 以下, 且大部分集中在 60 ~ 650 nm 之间。由于 ELPI 不能测量 30 nm 以下微粒, 因此对于核态微粒的测量并不准确。负荷越高, 粒子数浓度越大, 100% 负荷时 260 nm 处粒子数浓度最高, 为 1.12×10^8 ($1 \cdot \text{cm}^{-3}$)。在同一转速下, 负荷越高, 喷油量增大, 燃空比增大, 混合变差, 缸内局部过浓区增多, 导致微粒排放增多。在 75%、50%、25% 这三种负荷下, 往小粒径方向粒子数浓度增加, 这是由于中小负荷时燃空比低, 燃油空气混合更均匀, 燃烧更充分。

图 5 为低速柴油机排放颗粒数量浓度随粒径的分布图。从图中可以发现: 颗粒粒径基本小于 1 μm, 并且主要分布在积聚态, 同样呈现双峰分布形式, 峰值位于 30 ~ 260 nm 附近。随着负荷增加, 粒子数浓度逐渐增加, 100% 负荷下 260 nm 粒径段达到最大值, 粒子数浓度为 1.56×10^8 ($1 \cdot \text{cm}^{-3}$)。这是由于高负荷时燃油空气混合相对差一些, 燃烧不充分造成的。

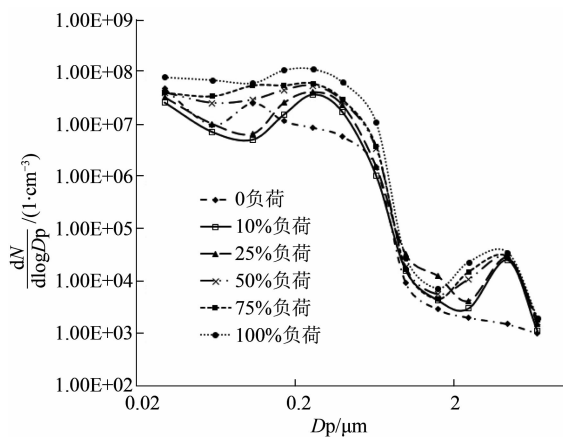


图4 中速机排放颗粒数量浓度分布

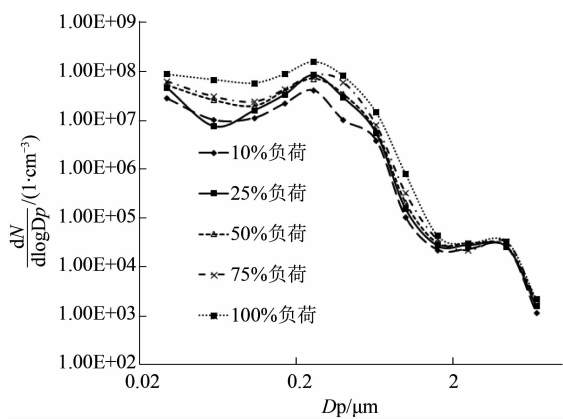


图5 低速机排放颗粒数量浓度分布

从上述分析中可以看出: 船机颗粒排放同样呈现双峰分布形式; 高速机与中、低速机相比, 粒子数浓度相差不大, 但浓度峰值对应的粒径相对偏小; 三者比较, 高、中、低速机的颗粒物排放粒子数浓度最大值逐渐增加, 大粒径颗粒浓度逐渐增大, 由此可以推断: 船机大颗粒浓度相对于车用机要高一些。微粒进入捕集器多孔介质过滤体时, 首先被捕集在过滤壁面内部的上层微孔区域内, 从而导致过滤壁面的上层空穴被迅速堵塞, 于是微粒开始逐渐沉积在过滤体壁面的表面, 形成滤饼层, 背压增加速度开始加快。粒径越大, 越容易使微孔堵塞, 导致背压升高很快。因此, 相对车用柴油机来说, 开发船用柴油机颗粒捕集器时, 应根据其粒径分布特性, 适当调整过滤体微孔直径或增加再生频率。

4 结 论

(1) 依据国内外船舶柴油机颗粒物排放法规的最新进展, 认为船舶柴油机颗粒物排放控制将成为船舶柴油机行业的重点研究方向之一; 黑炭测量方法的研究非常迫切。

(2) 国外柴油机颗粒捕集器的研究热点主要

集中在 SCRF 上, 值得国内研究者加以重点关注。

(3) 高、中、低速船用柴油机排放颗粒数量浓度分布基本均呈现双峰分布形式, 高速机峰值集中在 10 ~ 100 nm 左右, 中、低速机峰值集中在 30 ~ 260 nm 左右; 船机颗粒物粒子数浓度基本处于 $10^7 \sim 10^8$ ($1 \cdot \text{cm}^{-3}$); 高、中、低速机的粒子数浓度最大值逐渐增加; 船机大颗粒浓度相对较高。开发船舶柴油机颗粒捕集器时, 该考虑这些特征。

参考文献

- [1] 许建华. 船用高速柴油机排放研究 [D]. 湖北: 武汉理工大学, 2008.
- [2] 胡必柱. 废气再循环对船用中速柴油机性能及排放的影响研究 [D]. 上海: 上海船用柴油机研究所, 2013.
- [3] KASSEL R, COUCH P, CONOLLY M, et al. Ultrafine particulate matter and the benefits of reducing particle numbers in the united states [R]. report to the Manufacturers of Emission Controls Association (MECA) prepared by Gladstein, Neandross, and Associates, July 2013.
- [4] NAKAMURA K, KONSTANDOPOULDS A, KOSTOGLOU M, et al. New asymmetric plugging layout of diesel particulate filters for the pressure drop reduction [C]. SAE Technical Paper, 2014.
- [5] SERRANO J R, BERMUDEZ V, PIQUERAS P, et al. Application of pre-DPF water injection technique for pressure drop limitation [C]. SAE Technical Paper, 2015.
- [6] KOTRBA A, GARDNER T P, BAIL, et al. Passive regeneration response characteristics of a DPF system [C]. SAE Technical Paper, 2013.
- [7] LI Y, WEINSTEIN M, ROTH S. NO oxidation to NO₂ on catalyzed soot filters (CSF) [C]. 8th International Conference on Environmental Catalysis, August 24-27, 2014, Asheville, NC, USA.
- [8] TANG W, YOUNGREN D, SANTAMARIA M, et al. On-engine investigation of SCR on filters (SCRoF) for HDD passive applications [C]. SAE International Journal of Engines, 2013, 6 (2013-01-1066): 862-872.
- [9] BLAKEMAN B. Catalyzed exhaust filters: future directions [C]. keynote presentation at US Department of Energy Cross-Cut Lean Exhaust Emissions Reduction Simulations (CLEERS) Workshop. 2013.
- [10] HOHL Y. SCR on filter - the future for construction machinery [C]. 10th International CTI Conference, SCR Systems, Stuttgart, July 8, 2014.
- [11] KOJIMA H, FLSCHER M, HAGA H, et al. Next generation all in one close-coupled urea-SCR system [C]. SAE Technical Paper, 2015.