

# 中国移动源下阶段排放法规综述和分析

陈 婷<sup>1</sup>,倪 红<sup>2</sup>,谷雪景<sup>2</sup>,林 赫<sup>1</sup>,湛日景<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

## An Update on China's Mobile Source Emission Regulations

CHEN Ting<sup>1</sup>, NI Hong<sup>2</sup>, GU Xuejing<sup>2</sup>, LIN He<sup>1</sup>, ZHAN Rijing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Based on a brief introduction to China's light-duty vehicle CN 6, heavy-duty engine and vehicle CN VI, non-road mobile machinery stage IV, and marine engine stage I and II emission regulations, the main updates of content of the next generation emission regulations is summarized. The focus is to strengthen real-world emission controls and use regulations to promote the development and applications of "best emission control technologies". At the same time, through the comparative analysis of the relevant regulations in Europe and the United States and the interpretation of the latest regulations in China, the development trend and some suggestions for China's mobile source emission regulations are put forward.

**摘要:** 简要介绍了中国轻型车国 6、重型发动机及车辆国 VI、非道路移动机械第四阶段及船机第一和第二阶段法规内容,总结了下一代排放法规的主要更新内容:加强实际运行中的排放控制,用法规来推动“最好的排放控制技术”的发展和应用。通过与欧洲、美国相关法规的对比分析及对中国最新法规的解读,提出中国移动源排放法规的发展趋势和若干建议。

**关键词:** 排放法规;轻型车;重型发动机及车辆;非道路发动机;船舶发动机

**Key words:** emission regulation; light-duty vehicle; heavy-duty engine and vehicle; non-road mobile machinery; marine engine

**DOI:** 10.13949/j.cnki.nrjgc.2018.06.003

中图分类号: TK421<sup>+</sup>.5

文献标识码: A

## 0 概述

随着中国汽车、船舶等产业的发展和进步及空气质量问题的日益突出,中国在“十三五”期间大幅度加严汽油车、柴油车、非道路移动机械和船舶柴油机等移动源污染物排放标准并升级油品质量。中国是全球最大的机动车市场,中国排放法规的更新换

代是全世界关注的焦点。中国自 2016 年 8 月发布《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第一、第二阶段)》法规后,又陆陆续续发布了《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》和《重型发动机污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》,并正在制定非道路移动机械与其装用的柴油机污染物排放控制技术要求(对非道路第四阶

收稿日期: 2018-07-31

修回日期: 2018-08-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0208006)

Fund Project: National Key R&D Program of China(2016YFC0208006)

作者简介: 陈 婷(1985—),女,博士后,主要研究方向为柴油机尾气净化,E-mail: chen.ting@sjtu.edu.cn;

湛日景(通信作者),E-mail: reggiezhan@sjtu.edu.cn。

段内容进行补充)<sup>[1-5]</sup>。

中国新一代排放法规的重点是生产一致性和在用符合性方面的监管。增加车辆或机械在实际运行情况下的排放控制,将采用便携式排放测试系统(portable emissions measurement system, PEMS),对轻型车、重型车和非道路机械在实际运行中的排放进行测试,从而进行在用车符合性检查。和传统的针对发动机在实验室环境中进行排放测试相比,PEMS 测试直接测试实际情况下的排放,可避免主机厂仅针对发动机认证工况进行排放标定,而忽视实际运行条件下的排放控制。除了 PEMS 测试外,车载诊断系统(on-board diagnostics, OBD)将作为在用符合性检查的一个重要工具。

在排放法规进行大规模升级的同时,中国已经开始加大排放法规的执法和监督力度。整车、机械设备和船舶生产厂,将是排放控制的直接责任方,同时发动机生产厂及排放控制系统的供应商,将根据实际情况承担相应的责任。按照新版《大气法》,对排放违规车辆的罚款金额将会是车辆等设备销售价格的 1~3 倍<sup>[6]</sup>。

关于中国轻型车国 6、重型发动机及车辆国 VI、非道路第四阶段等法规主要情况如表 1 所示。其中,非道路四阶段法规修改稿依然在征求意见之后的修改中,正式文件还没有被生态环境部批准。本文对上述法规内容进行介绍分析,为相关人员认识和了解我国下一代排放法规并制定相应的排放控制技术方案提供参考。表 1 中,WLTC(worldwide harmonized light vehicles test cycle)为全球统一轻型车测试循环,WHTC(world harmonized transient cycle)为全球统一瞬态循环,WHSC(world harmonized stationary cycle)为全球统一稳态循环,NRTC(nonroad transient cycle)为非道路瞬态循环,NRSC(nonroad stationary cycle)为非道路稳态循环,PN(particle number)为颗粒数量,EVAP(evaporative emissions)为蒸发排放控制,ORVR(onboard refueling vapor recovery)为加油过程排放控制,NTE(not-to-exceed)为非标准循环,GPS(global positioning system)为全球定位系统,RDE(real driving emissions)为实际行驶排放,“—”表示不适用,“√”表示适用。

表 1 轻型车、重型发动机及车辆、非道路发动机及机械和船机排放法规概述

| 项目           | 参数                               |                             |                             |              |
|--------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|
| 法规           | 轻型国 6                            | 重型国 VI                      | 非道路第四阶段                     | 船机第一、第二阶段    |
| 环境条件         | 温度不低于-7℃,海拔 0~2 400 m            |                             |                             | —            |
| 测试循环         | WLTC                             | WHTC, WHSC                  | NRTC, NRSC                  | 基于多个稳态工况点的工况 |
| PN 限值        | 6×10 <sup>11</sup> 个/km          | 6×10 <sup>11</sup> 个/(kW·h) | 5×10 <sup>12</sup> 个/(kW·h) | —            |
| EVAP+ORVR 要求 | EPA Tier 2                       | —                           |                             |              |
| NTE 要求       | —                                | √                           | √                           | √            |
| OBD 要求       | OBD II                           | EOBD, 远程 OBD                | OBD, 远程 OBD                 | —            |
| GPS 要求       | —                                | √                           | √                           | —            |
| RDE(PEMS)要求  | √                                | √                           | √                           | —            |
| 耐久性要求        | 6a:12 年/16 万公里<br>6b:12 年/20 万公里 | 7 年/70 万公里                  | 8 千小时(≥37 kW)               | 10 年/1 万小时   |
| 排放质保期        | 3 年/6 万公里                        | 5 年/16 万公里                  | 8 千小时                       | —            |
| 执行日期         | 6a:2020-07-01                    | VIa:2021-01-01              | 2020-01-01                  | 2018-07-01   |
|              | 6b:2023-07-01                    | VIb:2023-07-01              |                             | 2021-07-01   |

1 轻型车排放法规

中国的车辆排放法规一直是参考欧洲相应的排放标准制订和实施。随着中国对排放技术的理解不断加深,中国对轻型车国 5 标准及之前的排放法规实施过程中存在的问题有了进一步的了解。例如国 5 标准的蒸发排放控制不严格,OBD 监测项目较少,缺少高海拔排放控制要求,缺少实际行程工况测试等。事实上,即使是欧 6 法规,目前仍有许多问题有待于解决。比如:(1) NO<sub>x</sub> 减排效果不理想。2016 年哥德堡地区对三万多部轻型车进行遥测,发现从

欧 2 标准到欧 5 标准,轻型汽油车道路 NO<sub>x</sub> 排放量随着法规的加严而减少,但轻型柴油车道路 NO<sub>x</sub> 排放量未发生显著变化。欧 6 标准实施后,轻型柴油车道路排放量降低了约 60%,但仍然明显高于欧 6 标准限值<sup>[7]</sup>。(2)实际道路运行的排放测试结果不理想。国际清洁交通委员会(ICCT)对不同轻型车在实验室和道路测试下的 NO<sub>x</sub> 排放量做过对比,结果表明在实际行驶排放测试中轻型柴油车 NO<sub>x</sub> 排放量远远超过了欧 6 限值(80 mg/km),其中采用稀燃 NO<sub>x</sub> 捕集(lean NO<sub>x</sub> trap, LNT)后处理技术的柴油车在实际运行的排放值要高于采用选择性催化还

原(selective catalytic reduction, SCR)路线的柴油车。轻型汽油车的实际行驶排放结果比较好,能够低于欧 6 限值,但若采用更加动态的驾驶路线,则汽油车的 NO<sub>x</sub> 排放量也会增加,甚至超出欧 6 排放限值<sup>[8]</sup>。

在对欧洲排放法规的缺陷有深刻理解的基础上,中国对轻型车法规进行了全面升级。新的国 6 排放法规虽然在法规体系上采用了欧 6 法规标准,排放物限值参考了欧 6 标准的限值,测试工况也采用 WLTC 测试循环,和欧 6 一样也增加了 RDE 试验,但同时增

加了某些和美国 EPA 第二阶段(Tier 2)相当的关键技术要求<sup>[2]</sup>。这些要求包括燃油中性原则,即:轻型汽油车和轻型柴油车必须满足相同的排放限值;轻型车必须满足与美国 Tier 2 相当的 EVAP 和 ORVR 的要求,以及被实际排放控制证明有效的 OBD II 的内容。轻型车排放法规的具体对比详见表 2<sup>[9-10]</sup>。表 2 中,HWFET(highway fuel economy test)为高速燃油经济性测试工况,PM(particulate matter)为颗粒物,PMP(particle measurement program)为颗粒物测试标准。

表 2 中国、美国和欧洲的轻型车排放法规对比

| 主要内容         | 欧洲                                      | 美国                     | 中国                                                                   |
|--------------|-----------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 测试循环         | WLTC                                    | FTP-75/US06/SC03/HWFET | WLTC                                                                 |
| 排放限值要求       | √                                       | 目前为 Tier 3             | 燃油中性,限值为欧 6 标准中规定的汽油和柴油排放限值中的最低值,增加了 N <sub>2</sub> O 限值             |
| RDE 要求       | √                                       | —                      | 边界条件中的海拔改为 2 400 m                                                   |
| 曲轴箱排放要求      | 封闭式曲轴箱通风                                | 封闭式曲轴箱通风               | 封闭式曲轴箱通风                                                             |
| OBD          | EOBD                                    | OBD II                 | 简化的 OBD II(限值参考欧 6)                                                  |
| 耐久性要求        | 16 万公里/5 年                              | 24 万公里/15 年            | 6a:16 万公里/12 年<br>6b:20 万公里/12 年                                     |
| 燃油硫含量        | ≤10×10 <sup>-6</sup>                    | ≤15×10 <sup>-6</sup>   | ≤10×10 <sup>-6</sup>                                                 |
| EVAP,ORVR 要求 | 比较宽松                                    | 非常严格                   | 严格                                                                   |
| 边界条件         | -7~35 ℃,1 300 m                         | -7~35 ℃,1 620 m        | -7~35 ℃,2 400 m                                                      |
| 生产一致性        | √                                       | —                      | PEMS,OBD 和车辆测试                                                       |
| 在用符合性        | √                                       | √                      | PEMS,OBD 和车辆测试                                                       |
| 测试方法         | 参考 EPA Part 86/1066,PM 及 PN 采用欧洲 PMP 方法 | EPA Part 86/1066       | 参考 EPA Part 86/1066,欧洲 PMP(测量 PN),及 PEMS(欧 6 CO <sub>2</sub> 移动平均窗口) |

另外,对于车内空气质量,国 6 标准里规定所有轻型车都应该符合《乘用车空气质量评价指南》(GB/T 7630—2011)及其后续修订版本的要求。中国于 2016 年 1 月 22 日发布了新的车内空气质量(vehicle interior air quality, VIAQ)标准征求意见稿,新标准中将不仅对苯、甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯、甲醛、乙醛、丙烯醛这 8 种物质给出了明确限值,而且还修订了车内有机污染物的测试方法<sup>[11]</sup>。表 3 为中国、日本和韩国关于车内空气质量标准限值的比较<sup>[12-13]</sup>。

表 3 中国、日本、韩国关于车内空气质量标准限值的比较

| 项目  | 限值/(mg·m <sup>-3</sup> ) |       |      |
|-----|--------------------------|-------|------|
|     | 中国                       | 日本    | 韩国   |
| 苯   | 0.06                     | —     | 0.03 |
| 甲苯  | 1.00                     | 0.26  | 1.00 |
| 二甲苯 | 100                      | 0.87  | 0.87 |
| 乙苯  | 1.00                     | 3.80  | 1.60 |
| 苯乙烯 | 0.26                     | 0.26  | 0.30 |
| 甲醛  | 0.10                     | 0.10  | 0.25 |
| 乙醛  | 0.20                     | 0.048 | —    |
| 丙烯醛 | 0.05                     | —     | —    |

国 6 法规的车内空气质量标准将对直接影响车内空气质量的各种零部件的材料及生产工艺产生巨大的影响。这些零部件包括座椅、地毯、车顶和车门内部包裹件及装饰件、仪表组件、进气新风系统、车窗和车门密封材料及胶粘剂等等。车内空气质量标准的实施将对车辆驾驶员及乘客的健康提供更好的保障。

2 重型发动机和车辆排放法规

国 V 排放法规针对重型发动机,而国 VI 法规涵盖道路用重型发动机,并将重点放在重型车辆及最大设计总质量(gross vehicle weight rating, GVWR)高于 3 500 kg 的道路用车辆。国 VI 法规仅适用于重型柴油机、天然气(压缩天然气 CNG 或液化天然气 LNG)发动机及车辆,重型汽油和液化石油气 LPG 发动机及车辆排放法规在修订 GB14762—2008 的基础上发布。该法规在蒸发排放、ORVR、OBD 及耐久性方面会和轻型车国 6 法规相似,同时会增加 RDE 要求,其适用的边界条件将会和轻型车国 6 标准相同<sup>[3]</sup>。

重型发动机和车辆的国 VI 法规主要参考了相应的欧 VI 排放标准。相对于国 V 法规,国 VI 法规进一

步加严了污染物排放控制(详见表4和表5),增加了NH<sub>3</sub>逃逸控制和PN控制的要求,并且新增了循环外排放的测试及RDE控制要求。在排放测试时,以基于发动机台架的WHSC和WHTC为排放测试工况,而在排放控制区内采用非标准循环(WNTE)进行发动机稳态操作点的排放测试。稳态点随机选择,但范围基本上在发动机功率大于最大功率值30%而转矩高于标定转矩的30%区间。WNTE测试中NO<sub>x</sub>的限值为WHSC中NO<sub>x</sub>限值的1.5倍。

表4 中国和欧洲的重型车排放法规对比

| 项目          | 主要内容 |                                                       |
|-------------|------|-------------------------------------------------------|
|             | 欧洲   | 中国                                                    |
| WHSC/WHTC要求 | √    | 发动机测试循环                                               |
| 排放限值要求      | √    | 与欧Ⅵ相似(CO、THC、NO <sub>x</sub> 、PM、PN、NH <sub>3</sub> ) |
| NTE要求       | √    | 随机挑选认证循环外的稳态工况点                                       |
| OBD、EOBD要求  | √    | 增加远程OBD内容,远程传输数据给主管部门                                 |
| 耐久性要求       | √    | 增加至70万公里                                              |
| 燃油硫含量       | —    | ≤10×10 <sup>-6</sup>                                  |
| 环境条件        | —    | 温度不低于-7℃,海拔0~2 400 m                                  |
| 生产一致性       | √    | 提出中国自己的要求,PEMS、NTE和OBD                                |
| 在用符合性       | √    | 提出中国自己的要求,NTE、PEMS、OBD和车辆测试                           |
| 测试方法        | √    | 参考EPA Part 86/1065、欧洲PMP(测量PN)PEMS                    |
| 整车要求        | 无    | 非常挑战                                                  |

表5 重型发动机车辆主要排放物限值

| 测试循环      | 排放量/(mg·(kW·h) <sup>-1</sup> ) |     |                 |    | 排放量/(个·(kW·h) <sup>-1</sup> ) |
|-----------|--------------------------------|-----|-----------------|----|-------------------------------|
|           | CO                             | THC | NO <sub>x</sub> | PM | PN                            |
| WHSC      | 1 500                          | 130 | 400             | 10 | 8×10 <sup>11</sup>            |
| WHTC(加权值) | 4 000                          | 160 | 460             | 10 | 6×10 <sup>11</sup>            |
| WNTE      | 2 000                          | 220 | 600             | 16 | —                             |
| PEMS      | 6 000                          | —   | 690             | —  | 12×10 <sup>12</sup>           |
| OBD       | —                              | —   | 1 200           | 25 | —                             |

重型车国Ⅵ标准提出通过RDE排放测试(PEMS方法)、更加严格(相对国Ⅴ标准)的OBD等方法来强制实现在用车符合性和生产一致性的监管。PEMS测试结果中NO<sub>x</sub>限值是WHTC限值的1.5倍,OBD的NO<sub>x</sub>限值是WHSC限值的3倍。

对颗粒物(PN)的限制将强制颗粒物过滤器(diesel particulate filter, DPF)的应用。目前,DPF已经在美国、日本及欧洲各国被广泛应用,被证明是控制PM及PN排放最好的后处理技术。增加了对NH<sub>3</sub>浓度的限制,要求使用SCR技术进行NO<sub>x</sub>控制的同时必须精确控制NH<sub>3</sub>或者尿素溶液的喷射

量,避免NH<sub>3</sub>泄漏量超出国Ⅵ限值。

若法规中规定了N<sub>2</sub>O排放限值,将会对SCR催化剂本身提出极高的要求。在柴油发动机正常操作条件下,某些SCR催化剂可能会产生较高浓度的N<sub>2</sub>O,难以达到国Ⅵ法规对N<sub>2</sub>O排放限值的要求。N<sub>2</sub>O作为重要的温室气体,预计在未来的排放法规中将与CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>一起列入温室气体中加以限制。

预计为满足重型国Ⅵ排放法规而采用的典型后处理技术方案将是DOC+DPF+SCR。根据相对成熟的应用经验,如果发动机装有废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)系统,后处理NO<sub>x</sub>的转化效率一般要求在92%~94%左右;如果发动机系统里没有安装EGR,后处理NO<sub>x</sub>的转化效率一般要求在94%~96%。且要求车辆在运行整个寿命(对最重一级车辆为70万公里)中均必须达到的这样高的NO<sub>x</sub>转化率。基于“技术中立”原则,虽然国Ⅵ不会强制发动机必须采用EGR技术,但对于没有EGR的发动机系统,必须对其低温NO<sub>x</sub>控制策略和原机NO<sub>x</sub>排放进行备案,以便进行监管。

DPF再生会产生高温,而且在高海拔运行条件下排气温度会升高,将影响下游SCR催化剂的性能和寿命。考虑到钒会在高温下挥发产生有毒物<sup>[14]</sup>,国Ⅵ法规要求在任何工况下,钒基SCR催化剂的工作温度必须低于550℃,这对钒基SCR催化剂在DOC+DPF+SCR系统中的应用提出了挑战。

国Ⅵ测试的低负荷低温工况比例加大,对SCR系统低温转化效率提出了更高要求。固态氨(固体吸附剂吸附-脱附氨气)技术能够解决SCR催化剂低温环境下的尿素溶液不适用问题,并且可提高发动机冷起动下的NO<sub>x</sub>转化效率,但国Ⅵ法规中对固态氨技术的规定比较笼统,有必要对固态氨提出更详细的法规要求。为了有效控制NO<sub>x</sub>排放,相信后续会出台针对钒基SCR催化剂及固态氨技术的详细要求,特别是更为具体的OBD要求,确保这些技术在实际应用中不会产生其他问题。

3 非道路排放法规

非道路发动机在国内外应用广泛,如起重机、挖掘机、割草机及各种农用机械等等。根据2018年《中国机动车环境管理年报》,2017年的非道路工程机械保有量为720万台,柴油农业机械总动力为76 776.3万千瓦。中国目前处于快速城市化的进程中,大量非道路工程机械在城市环境中运行,而非道路机械的排放控制水平整体落后于道路车辆,这对城市空气质量的影响不言而喻。随着轻型和重型发

动机及车辆排放法规的升级和实施,非道路排放放在移动源排放对大气污染贡献的占比在不断提高,非道路发动机排放控制是今后相当长时间里移动源排放控制的重点之一。

中国于 2014 年 5 月发布了非道路第三、第四阶段法规(GB 20891—2014),于 2018 年 2 月发布了《非道路移动机械及其装用的柴油机污染物排放控制技术(征求意见稿)》,作为非道路第四阶段内容的修改和补充<sup>[5]</sup>。新的非道路第四阶段法规与欧洲、美国非道路法规的对比详见表 6。非道路第四阶段法规的修正主要体现在以下几个方面:(1) 扩大了环境的边界条件,要求环境温度在-7~38℃、海拔在 0~2 400 m 范围内。环境边界条件和轻型国 6 及重型国 VI 的要求一致。(2) 对于标定功率在 37~560 kW 之间的发动机,增加 PN 限值要求,其限值为  $5 \times 10^{12}$  个/(kW·h)。该要求事实上强制应用 DPF 技术。(3) 对于标定功率在 37~560 kW 之间的发动机,要求安装卫星定位系统,如北斗或 GPS。卫星定位系统的安装,将有助于对车辆排放结果进行实时监控。(4) 加严了 OBD 要求,明确了 EGR、SCR 和 DPF 系统的 OBD 要求。(5) 要求发动机制造商提交发动机瞬态工况下尾排中的 NO<sub>x</sub> 浓度值。(6) 需要采用 PEMS 对气态污染物进行测量。

表 6 中国、美国和欧洲的非道路排放法规对比

| 项目                     | 排放法规要求 |    |   |         |          |           |
|------------------------|--------|----|---|---------|----------|-----------|
|                        | 欧洲     |    |   | 美国      |          | 中国<br>四阶段 |
|                        | III B  | IV | V | Tier 4I | Tier 4F  |           |
| 稳态测试                   | ✓      | ✓  | ✓ | ✓       | ✓        | ✓         |
| 瞬态测试                   | ✓      | ✓  | ✓ | ✓       | ✓        | ✓         |
| NO <sub>x</sub> 控制报警系统 | ✓      | ✓  | ✓ | —       | 发文<br>规定 | ✓         |
| NO <sub>x</sub> 控制限扭策略 | —      | ✓  | ✓ | —       |          | ✓         |
| 控制区域                   | —      | ✓  | ✓ | NTE     | NTE      | ✓         |
| 曲轴箱排放                  | —      | ✓  | ✓ | ✓       | ✓        | ✓         |
| CO <sub>2</sub> 排放     |        | ✓  | ✓ | —       | —        | —         |
| 耐久性要求                  | ✓      | ✓  | ✓ | ✓       | ✓        | ✓         |
| 烟度                     | —      | —  | — | ✓       | ✓        | ✓         |
| DPF 控制                 | —      | —  | ✓ | —       | —        | ✓         |
| PEMS                   | —      | —  | ✓ | —       | —        | ✓         |

另外,非道路第四阶段将对生产一致性和在用符合性提出更加严格的要求,明确定义主管部门和主机厂的责任,烟度将通过林格曼法(目测)来监控<sup>[15]</sup>;其信息公开系统将跟轻型车和重型车做法相似;非道路第四阶段也适用于标定功率小于 37 kW 的船机。

表 7 是非道路第四阶段的排放限值,其中移动式发电机组用  $P_{\max} > 900$  kW 的柴油机 NO<sub>x</sub> 限值为

0.67 g/(kW·h)。非道路第四阶段补充标准增加了 PN 的限值要求,明确提出标定功率在 37~560 kW 的非道路柴油发动机必须安装 DPF。对于恒定转速柴油发动机,采用稳态测试循环(NRSC)来测量颗粒数量,非恒定转速柴油发动机则采用瞬态测试循环(NRTC)来测量颗粒数量。另外,DPF 再生时不能出现明显的可见烟。对在用非道路发动机及机械的烟度的测试,将采用操作简便的林格曼方法。

表 7 非道路第四阶段限值

| 标定净功率<br>$P_{\max}/\text{kW}$ | 排放量/(g·(kW·h) <sup>-1</sup> ) |      |                 |                    |       | 排放量/(个·<br>(kW·h) <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------------|-------------------------------|------|-----------------|--------------------|-------|-----------------------------------|
|                               | CO                            | HC   | NO <sub>x</sub> | HC+NO <sub>x</sub> | PM    | PN                                |
| >560                          | 3.5                           | 0.40 | 3.5             | —                  | 0.100 | —                                 |
| [130,560]                     | 3.5                           | 0.19 | 2.0             | —                  | 0.025 | $5 \times 10^{12}$                |
| [75,130]                      | 5.0                           | 0.19 | 3.3             | —                  | 0.025 | $5 \times 10^{12}$                |
| [56,75]                       | 5.0                           | 0.19 | 3.3             | —                  | 0.025 | $5 \times 10^{12}$                |
| [37,56]                       | 5.0                           | —    | —               | 4.7                | 0.025 | $5 \times 10^{12}$                |
| <37                           | 5.5                           | —    | —               | 7.5                | 0.600 | —                                 |

非道路第四阶段标准详细定义了控制区的要求,其中对于标定功率大于等于 19 kW 和小于 19 kW 的柴油机的控制区定义虽然不同,但均要求在控制区内最少选择 3 个随机的负荷和转速点进行试验,每个试验点各种污染物的比排放量都应小于排放限值的 2 倍。为了保证 NO<sub>x</sub> 控制措施正常运行,非道路柴油发动机必须配备 NO<sub>x</sub> 控制诊断系统(NO<sub>x</sub> control diagnostic system, NCD),确保 NO<sub>x</sub> 排放量在寿命周期内不超过该功率段限值的 2.25 倍。NCD 监控内容包括反应剂系统、EGR 系统和 NCD 系统故障,其中反应剂系统包括反应剂防冻、反应剂液位、反应剂质量、反应剂喷射动作监测、与反应剂相关的所有传感器和执行器。其中传感器包括环境温度传感器、反应剂液位传感器、反应剂质量传感器、反应剂流量传感器、NO<sub>x</sub> 浓度传感器。EGR 系统监控内容包含 EGR 阀、EGR 冷却器(如适用)、EGR 相关的传感器和执行器。

为了能够识别颗粒物后处理系统的故障,非道路柴油机要求配有颗粒物控制诊断系统(particulate control diagnostic system, PCD),监控内容包括 DPF 的移除、烧结、堵塞、再生、排气管燃油喷射和燃油催化剂(fuel borne catalyst, FBC)系统(如适用),同时要求配备驾驶员报警系统和性能限制系统。信息公开时,需要上传 PCD 相关信息到信息公开系统,例如用户使用手册、DPF 保养周期、方法等特殊要求。

对于标定功率为 37~560 kW 的非道路机械,在 PEMS 测试时,对 NO<sub>x</sub> 排放提出了限值要求,90%及

以上有效功基窗口的  $\text{NO}_x$  比排放量不超过相应功率段规定限值的 2.5 倍。进行 PEMS 测试时,必须实时测量和记录 4 类重要数据,包括 ECU 数据、环境数据、卫星定位数据和 PEMS 测试结果。具体如下:(1) 通过标准的诊断串行接口(如发动机 ECU 的 CAN 通讯)获取 ECU 数据,包括转速、转矩、发动机冷却液温度(ECT)和燃油消耗速率(或燃油消耗量);(2) 通过传感器获取环境数据,包括温度、大气压和相对湿度;(3) 通过卫星定位系统获取经度、纬度和海拔信息;(4) 通过 PEMS 分析仪,测量  $\text{NO}_x$ 、CO、 $\text{CO}_2$ 、THC、 $\text{O}_2$  浓度,并通过排气流量计获得排气流量和温度。PEMS 试验持续时间为功基窗口循环功(如 NRTC)的 5~7 倍。标准里详细规定了 PEMS 测试期间的有效时间的算法,及非道路柴油发动机在 PEMS 测试时的有效功率最低值(如标定功率的 10%)等。

长期以来,非道路排放的监管最大的弊端在于非道路机械缺乏全国统一的登记注册制度。最近,中国部分地区开始划定针对非道路应用的排放控制区,而且开始了登记注册制度。如北京市自 2017 年 12 月 1 日起,在部分区域禁止使用高排放非道路移动机械(京政发[2017]30 号文件),而且开展了非道路移动机械的登记注册制度。注册登记制度建立后,可对下列违规行为进行监督和执法:使用排放不合格的非道路移动机械,在用重型柴油车、非道路移动机械未按规定加装、更换污染控制装置等。

可以预见,非道路移动机械的登记注册制度将由重点城市及地区开始,逐渐向全国范围扩展。预计在 2020 年前后,非道路移动机械的登记注册将在全国范围完成,为非道路四阶段法规的执行提供制度上的保障。

#### 4 船机排放法规

按照功率及发动机单缸排量,可将船舶用发动机分成三大类:第一类船机,标定净功率大于等于 37 kW 且单缸排量小于 5 L;第二类船机,单缸排量大于等于 5 L 且小于 30 L;第三类船机,单缸排量大于等于 30 L。

作为国际海事组织(IMO)的签约国,中国的第三类船机的排放须满足 IMO 相应的排放法规;而中国第一类和第二类船用发动机排放法规刚于 2018 年 7 月 1 日开始实施。

为了改善沿海、沿江及港口城市的环境空气质量,对于国内航行船舶(包括内河船、沿海船、江海直达船、海峡[渡]船和各类渔船等)用第一、二类发动机,中国于 2016 年发布了《船舶发动机污染物排放

限值及测量方法(中国第一、第二阶段)》标准,第一阶段已于 2018 年 7 月 1 日开始实施,第二阶段将于 2021 年 7 月 1 日实施。对第一类和第二类船机的排放限值要求见图 1 和图 2<sup>[1]</sup>,其中实线为第一阶段限值,虚线为第二阶段限值。

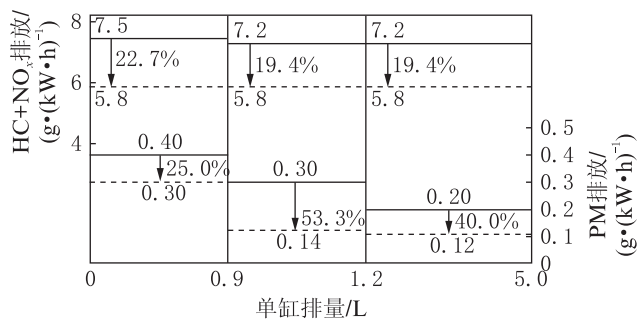


图1 第一类船机排放限值

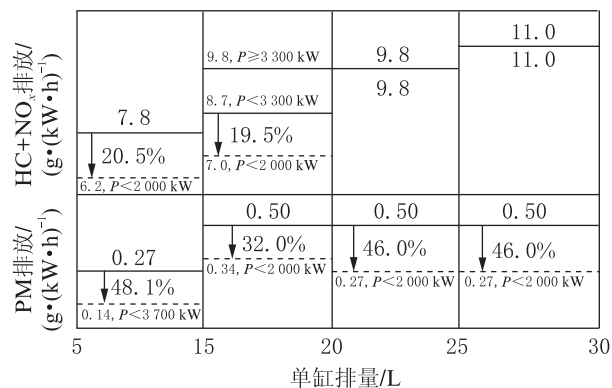


图2 第二类船机排放限值

相比于第一阶段,第一类船机第二阶段的  $\text{HC} + \text{NO}_x$  排放限值比第一阶段加严了 19.4%~22.7%, PM 排放要求更苛刻,排放量要求再降低 25.0%~53.3%。第二类船机从第一阶段到第二阶段:单缸排量(SV)在 5~15 L 之间且功率小于 2 000 kW 的船机,其  $\text{HC} + \text{NO}_x$  限值从 7.8 g/(kW·h)加严为 6.2 g/(kW·h); SV 在 15~20 L 之间且功率小于 2 000 kW 的船机,其  $\text{HC} + \text{NO}_x$  限值从 8.7 g/(kW·h)加严为 7.0 g/(kW·h);另外,SV 在 5~15 L 之间且功率小于 3 700 kW 的船机,PM 排放限值从 0.27 g/(kW·h)调整至 0.14 g/(kW·h);而 SV 在 15~30 L 之间且功率小于 2 000 kW 的船机,PM 排放限值加严了 32%~46%;其他第二类船机的第二阶段  $\text{HC} + \text{NO}_x$  和 PM 排放限值与第一阶段相同,第二类船机的第二阶段排放控制水平已经接近美国 Tier 3 水平。

在欧洲非道路法规里,把耐久性试验考核的时间和发动机功率和排量关联起来,随着发动机功率和排量的加大,耐久性考核时间也会加长。中国船

机第一阶段和第二阶段法规提出的耐久要求如表8所示。除了第一类船机中的娱乐用发动机有特别规定以外,其他第一类和第二类船机的耐久没有做细化规定,都以10 000小时作为有效寿命小时和以10年作为有效寿命年限,以两者中先到者为准。

表8 船机耐久性要求

| 发动机类型      | 有效寿命   |      | 允许最短<br>试验时间/h |
|------------|--------|------|----------------|
|            | 时间/h   | 年限/y |                |
| 第一类和第二类发动机 | 10 000 | 10   | 2 500          |
| 第一类娱乐发动机   | 1 000  | 10   | 500            |

## 5 结论

(1) 在排放法规的制定和实施过程中,加强在用符合性监管,是下阶段法规的核心内容。以技术手段保证监管的有效性,是法规的精髓。比如,在用车符合性检测时,不再对发动机进行测试,而是改为对整车、非道路机械、船舶开展测试实际运行过程中的排放测试。同时,严格的OBD要求将成为在用符合性监管的核心内容。对于重点城市及地区,遥测技术将是筛选严重超标车辆及机械和船舶的有效措施。在京津冀地区,已经安装了280套遥测系统,在排放监管方面,发挥着无可替代的作用,相信遥测系统将在全国范围普及。

对排放状况的实时监测,特别是对非道路四阶段和国Ⅵ重型发动机及车辆的监控,是排放监管的创新。在卫星定位系统和数据传输技术已在全国范围普及的前提下,利用这些新技术对移动源排放进行监管,将达到事半功倍的效果。这种方法也将很快推广到船舶排放控制领域。在本文所论述的排放法规按计划开始执行的同时,必须注意到在某些领域,现有的排放法规不能适应减排要求,如重型汽油机及车辆排放法规;某些领域甚至从未有排放法规,如火车。这些方面的立法工作将很快展开。

(2) 在未来排放法规制定过程中,必须深刻理解排放法规对发动机及车辆、机械、船舶、机车等技术进步的巨大推动作用。在缺乏排放法规制定经验的前提下,适当借鉴国外经验,对中国排放技术的开发及法规制定无疑有积极作用。但在中国已经成为内燃机及车辆第一大市场的情况下,照搬国外法规不利于自主技术的开发及国内巨大市场的保护。在下阶段排放法规实施的同时,需要加强排放控制的技术开发。中国地域宽广,气温及海拔跨度大,排放控制技术是中国建立未来排放法规的基础。中国的城市一般是在以公交和自行车为主要交通工具的背景下形

成的结构和布局。近年来机动车数量的激增造成各城市交通问题突出,给机动车排放控制带来非常不利的影响。冷启动和低负荷运行条件下的排放控制,必然是未来机动车实际运行中排放控制的关键技术。

## 参考文献:

- [1] 中国国家环境保护总局. 船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国一、二阶段):GB15097—2016[S]. 北京:中国环境科学出版社,2016.
- [2] 中国国家环境保护总局. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB18352.6—2016[S]. 北京:中国环境科学出版社,2016.
- [3] 中国国家环境保护总局. 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排放污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB17691—2018[S]. 北京:中国环境科学出版社,2018.
- [4] 中国国家环境保护总局. 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国三、四阶段):GB20891—2014[S]. 北京:中国环境科学出版社,2014.
- [5] 中国国家环境保护总局. 非道路移动机械及其装用的柴油机污染物排放控制技术要求(征求意见稿)[S]. 北京:中国环境科学出版社,2018.
- [6] 国家认监委. 中华人民共和国大气污染防治法[EB/OL]. (2018-01-09)[2017-07-11]. [http://www.cnca.gov.cn/bsdt/ywzl/flyzcj/zcfg/201707/t20170711\\_54705.shtml](http://www.cnca.gov.cn/bsdt/ywzl/flyzcj/zcfg/201707/t20170711_54705.shtml).
- [7] DIMARATOS A, TRIANTAFYLLOPOULOS G, et al. Real-world emissions testing on four vehicles: report of International Council on Clean Transportation[C]. Berlin:ICCT, 2017.
- [8] SJODIN A, JERKSJO M, FALLGREN H, et al. On-road emission performance of late model diesel and gasoline vehicles as measured by remote sensing: report of IVL Swedish Environmental Research Institute[C]. Sweden:IVL, 2017.
- [9] EPA. Control of air pollution from motor vehicles: Tier 3 motor vehicle emission and fuel standards[EB/OL]. (2014-04-28). <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2014-04-28/pdf/2014-06954.pdf>.
- [10] Official Journal of the European Union. Regulation(EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council[EB/OL]. (2007-06-20). <http://data.europa.eu/eli/reg/2007/715/oj>.
- [11] 中国国家环境保护总局. 乘用车内空气质量评价指南(征求意见稿)[S]. 北京:中国环境科学出版社,2016.
- [12] Japan Automobile Manufacturers Association. Guidelines for reducing vehicle cabin VOC concentration levels[S]. [S. l.]: JAMA, 2005.
- [13] Korea's Ministry of Land. Newly manufactured vehicle indoor air quality management standard: 2007-539[S]. [S. l.]: Infrastructure and Transportation Notification, 2007.
- [14] RASMUSSEN S B, ABRAMS B L. Fundamental chemistry of V-SCR catalysts at elevated temperatures[J]. Catalysis Today, 2017,297:60-63.
- [15] SHAFFERNOCKER W M, STANFORTH C M. Smoke measurement techniques[C/OL]. SAE Paper, 1968, 680346. (1968-02-01)[2018-07-11]. <https://saemobilus.sae.org/content/680346>.