

船用柴油机陆上试验大气污染物排放标准现状分析

孙 伟,赵同宾,范建新,曾宪友,金 锋

(七一一研究所,上海 200090)

摘 要: 针对船用柴油机在陆上试验时由于没有对应大气污染物排放行业标准因而执行综合性排放标准的现状,通过分析有关大气污染物排放相关标准,如国内相关标准、IMO 排放标准和世界银行集团的《热力发电厂 EFS 指南》的制定目的、使用范围和主要内容,以及船用柴油机陆上试验大气排放物的排放情况,提出了船用柴油机陆上试验排放标准制定的考虑因素。

关键词: 船用柴油机;陆上试验;大气污染物;标准

中图分类号: TK421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)04-0034-05

Analysis of Air Pollutants Emission Standards for Land-based Testing of Marine Diesel Engine

Sun Wei, Zhao Tongbin, Fan Jianxin, Zeng Xianyou, Jin Feng

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: Because of the absence of corresponding national industrial air pollutants emission standard, the land-based testing of marine diesel engines comply with “Integrated Emission Standard of Air Pollutants”. By the analysis of related standards for air pollutants, such as domestic standards, IMO emission standard and World Bank standard “Environmental, Health and Safety Guidelines for Thermal Power Plants”, especially in regard to the standards’ targets, applied range and main content, as well as the conditions of air pollutants emission of land-based testing of marine diesel engines, the factors which need to be considered in the formulating of air pollutants emission standard of land-based testing of marine diesel engines are put forward.

Keywords: marine diesel engine; land-based test; air pollutants; standard

0 引 言

近年来我国抓住世界船舶工业正在加速向劳动力、资本丰富和工业基础雄厚的区域转移的关键时期,大力发展船用柴油机产业,国内船用柴油机产量大幅增长,同时也带动了相关产业链的快速发展。伴随着船用柴油机产业的迅速壮大,其在国家工业体系中的地位也日益重要。由于每个行业都有其行业特点,船用柴油机产业也有其行业的特殊性,需要根据国内外船用柴油机产业发展需要,及时制定、修改我国的船用柴油机相关技术标准。

根据船用柴油机产业的生产工艺和产品的特点,其生产过程中主要污染物为柴油机在出厂前台架试验过程中产生的大气污染物。由于船用柴油机使用场合为各类船舶,在出厂台架试验过程中排放的大气污染物需要符合国际海事组织(IMO)的相关标准,才能被船级社允许上船使用。而对环保部门来说,船用柴油机在陆上试验时大气污染物排放方面没有直接对应的行业标准,目前执行的标准为1996年发布的GB 16297《大气污染物综合排放标准》。由于该标准是综合性排放标准,制定时间较早,且当时我国船用柴油机产业整体规模也较小,

收稿日期:2011-01-05

作者简介:孙伟(1981-),男,工程师,主要研究方向为柴油机及动力装置设计,E-mail:webmastersw@gmail.com。

随着近年来产业的迅猛发展，较难满足新形势下的船用柴油机产业发展的要求。因此，需要科学、合理地制定行业新排放标准，以利于船用柴油机产业可持续健康发展。

1 大气污染物排放相关标准

1.1 国内相关标准

如上所述，船用柴油机装船使用过程中遵循的大气污染物排放标准是 IMO 的《73/78 防污公约》及其修正案。在陆上试验过程中，因没有直接对应的行业标准，遵循的排放标准是 GB 16297-1996《大气污染物综合排放标准》。在该标准中，关于环境空气质量功能区划分和标准分级等规定遵循的标准是 GB 3095-1996《环境空气质量标准》；污染物测定和采样方法遵循的标准是 GB/T 16157-1996《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》；关于大气污染物的最高允许排放速率是根据柴油机试车厂房排气筒高度和区域来限定的；无组织排放时污染物的浓度限值是通过测定周界外浓度最高点来限定的；污染物最高排放浓度是根据类型划分来限定的。根据该标准的规定，柴油机试车厂房排气筒中二氧化硫的最高允许排放浓度限值执行 550 mg/m³，氮氧化物的最高允许排放浓度限值执行 240 mg/m³，颗粒物的最高允许排放浓度限值执行 120 mg/m³。表 1 为 GB 16297-1996《大气污染物综合排放标准》的节选内容，包括船用柴油机陆上试验过程中试车厂房排气筒中二氧化硫和氮氧化物等污染物的排放规定。

1.2 IMO 排放标准

意识到保护整个人类环境特别是海洋环境的需要，IMO 在 1973 年 10 月 8 日至 11 月 2 日召开的国际海洋污染会议上通过《1973 年国际防止船舶造成污染公约》。议定书 I(关于涉及有害物质事故报告的规定)和议定书 II(仲裁)在同一会议上通过。随后该公约经 IMO 在 1978 年 2 月 6 日至 17 日召开的国际油船安全和防污染会议(TSPP 会议)通过的 1978 年议定书的修订。经 1978 年议定书修订的公约称为,《经 1978 年议定书修订的 1973 年国际防止船舶造成污染公约》，简称《73/78 防污公约》(MARPOL 73/78)。涉及船舶造成污染各种成因的规则包括在该公约的五个附则内，并在 1997 年通过了 MARPOL 73/78 附则 VI，即“防止船舶造成大气污染法规”。按照附则 VI 规定，该附则将在不少于 15 个合计商船总吨位不少于世界商船总吨位 50% 的国家接受该议定书之日起 12 个月后生

效。2004 年 5 月 18 日，萨摩亚群岛批准 MARPOL 73/78 附则 VI，因此达到了附则 VI 规定的 15 个国家不少于世界商船总吨位 50% 的生效条件，该法规于 2005 年 5 月 19 日起正式生效。截至 2008 年 10 月 10 日，已有 53 个国家批准了该法规，占世界商船总吨位的 81.88%。

表 1 新污染源部分大气污染物排放限值^[1]

污 染 物	最高允许 排放浓度 /(mg/m ³)	最高允许排放速率 /(kg/h)			无组织排放 监控浓度限值	
		排气筒 高度/m	二级	三级	监控 点	浓度 /(mg/m ³)
二 氧 化 硫	960(硫、二氧化 硫、硫酸和其他 含硫化合物生 产)	15	2.6	3.5	周 界 外 浓 度 最 高 点	0.40
		20	4.3	6.6		
		30	15	22		
		40	25	38		
		50	39	58		
	550(硫、二氧化 硫、硫酸和其他 含硫化合物使 用)	60	55	83		
		70	77	120		
		80	110	160		
		90	130	200		
		100	170	270		
氮 氧 化 物	1400(硝酸、氨 肥和火炸药生 产)	15	0.77	1.2	周 界 外 浓 度 最 高 点	0.12
		20	1.3	2.0		
		30	4.4	6.6		
		40	7.5	11		
		50	12	18		
	240(硝酸使用 和其他)	60	16	25		
		70	23	35		
		80	31	47		
		90	40	61		
		100	52	78		

2008 年 10 月 10 日，IMO 的海洋环境保护委员会(MPEC)会议上通过了 MARPOL 73/78 附则 VI 的修正案，定义了包括三个级别在内的 IMO 船用柴油机排放标准体系，正在执行的附则 VI 的内容被作为 Tier I 标准纳入其中，增加了更加严格的 Tier II/Ⅲ标准，同意通过两阶段实现减排目标：2011 年达到 Tier II 要求，2016 年在排放控制区域(ECAs)达到更严格的 Tier III 要求。IMO 排放标准针对氮氧化物的限值如表 2 所示。

表 2 MARPOL 73/78 附则 VI 中 NOx 限值^{[2] [3]}

	$n_N/(r/min)$	$NO_x/g/(kW \cdot h)$
Tier I (2005 年 5 月 19 日生效，全球实施)	< 130	17.0
	130 ~ 2 000	$45.0 \cdot n_N^{-0.2}$
	> 2 000	9.8
Tier II (2011 年全球实施)	< 130	14.4
	130 ~ 2 000	$44.0 \cdot n_N^{-0.23}$
	> 2 000	7.7
Tier III (2016 年排放控制区域 (ECAs)实施)	< 130	3.4
	130 ~ 2 000	$9.0 \cdot n_N^{-0.2}$
	> 2 000	1.96

MARPOL 73/78 附则Ⅵ中对硫氧化物的排放控制是通过强制规定的燃油最高硫含量来控制的。目前 IMO 规定的燃油最高硫含量为 4.5% (质量百分比)。为降低船舶发动机 SO_x 的排放, IMO 将波罗地海和北海规定为 SO_x 排放控制区域(ECA_s)。在这些区域中, 2010 年 3 月 1 日起仅能使用含硫量不超过 1.0% 的燃油, 2015 年起降至 0.10%。作为替代, 船舶必须通过安装废气后处理系统或采用其它经过核实可行的技术方法来限制 SO_x 排放量, 达到通过控制燃油硫含量相同的效果。MARPOL 73/78 附则Ⅵ中针对燃油硫含量的限值如表 3 所示。

表 3 附则Ⅵ中燃油硫含量限值 ^{[2]~[4]}		
实施区域	实施时间	燃油含硫量
全球	2012 年前	4.50%
	2012 年开始	3.50%
	2020 年开始 ^{注1}	0.50%
排放控制区域 (ECA _s) ^{注2}	2010 年 3 月 1 日前	1.50%
	2010 年 3 月 1 日开始	1.00%
	2015 年开始	0.10%

注 1: 2018 年审查生效之日起实施;
注 2: 允许采用其他经过核实可行的限制 SO_x 排放量的替代方法(如废气后处理系统)。

1.3 世界银行集团——柴油机电厂排放标准

世界银行集团是联合国系统下的多边发展机

构, 也是世界上最大的开发援助机构和国外信贷机构, 它包括五个机构: 国际复兴开发银行、国际开发协会、国际金融公司、多边投资担保机构和国际投资争端解决中心。

《环境、健康与安全指南》(简称《EHS 指南》)是技术参考文件, 包含国际上一般实行的最佳做法以及具体行业的最佳做法(简称 GIIP)。如果一个项目有世界银行集团的一个或多个成员国参与, 则按照成员国政策和标准的要求, 适用《EHS 指南》。《EHS 指南》所规定的指标和措施是通常认为在新设施中采用成本合理的现有技术就能实现的指标和措施。如果项目东道国的规则不同于《EHS 指南》, 世界银行集团要求项目要达到两者中要求较高的指标和措施。如果根据项目的具体情况认为适于采用要求较低的指标和措施, 则在针对该场所进行的环境评估中需要对提出的替代方案做出详尽的论证, 并且该论证应表明修改后的指标能够保护人类健康和环境。

在过去的二十年间, 以柴油机为代表的往返式发动机的固定电站的国际市场份额得到较快增长, 这主要得益于其适用于多种燃油、可靠、快速交付和环境友好等特点。表 4 为本文节选世界银行集团《热力发电厂 EHS 指南》(2008 年 12 月)中关于柴油机作为发电厂原动机时的大气污染物排放限值。

表 4 新建柴油机电厂大气排放指标 ^[5]							单位: mg/m ³
柴油机电厂装机容量	颗粒物 PM		二氧化硫 SO ₂		氮氧化物 NO _x		干气, 过剩氧量 (体积分数)
	NDA	DA	NDA	DA	NDA	DA	
超过 50 MW, 低于 300 MW	50	30	1170 (≤2% S)	0.5% S	1460(缸径 <400mm) 1850(径 ≥400mm)	400	15%
大于或等于 300 MW	50	30	585(≤1% S)	0.2% S	740	400	15%

注: NDA = 未退化空气流域; DA = 已退化空气流域(空气质量不佳); 空气流域退化是指不符合国家法律规定的大气质量标准, 如无国家法律规定的大气质量标准, 则为严重不符合《世界卫生组织大气质量指南》的要求; S = 硫含量(质量百分比); MW 分类标准适用于由可合理认为共用排气烟道的多台机组构成的整个电厂。指标限值适用于年运行时间超过 500 小时的柴油机发电厂。评估排放指标时, 应评估一小时均值, 达标率应达到年运行小时数的 95%。

1.4 排放标准对比

GB 16297-1996《大气污染物综合排放标准》、MARPOL 73/78 附则Ⅵ和《热力发电厂 EHS 指南》(2008 年 12 月)都对柴油机排放作了相应规定, 为了对这些标准作区分, 需要从制定方、制定目的、使用范围和主要内容等方面作对比。

GB 16297-1996《大气污染物综合排放标准》是 1996 年由原国家环境保护局发布的, 1997 年 1 月 1 日起正式实施。制定目的是为了控制我国大气污染物排放。使用范围是按照综合性排放标准与行

业性排放标准不交叉执行的原则, 除若干行业执行各自的行业性国家大气污染物排放标准外, 其余均执行本标准。在该标准实施后再行发布的行业性国家大气污染物排放标准, 按其适用范围规定的污染源不再执行该标准。主要内容是规定了 33 种大气污染物的排放限值, 同时规定了标准执行中的各种要求。在涉及船用柴油机方面, 包括 SO₂、NO_x、非甲烷总烃和颗粒物的排放浓度和排放速率。

MARPOL 73/78 附则Ⅵ是 1997 年由国际海事组织(IMO)制定的, 2005 年 5 月 19 日起正式生

效，并在 2008 年 10 月 10 日通过了附则Ⅵ的修正案。制定目的是在世界范围内控制船舶的大气污染物排放。使用范围是批准 MARPOL 73/78 附则Ⅵ的缔约国，并适用于有权悬挂一缔约国国旗的船舶和无权悬挂一缔约国的国旗但在—缔约国的管辖下进行营运的船舶。不适用于任何军舰、海军辅助船舶或其他国有或国营并暂时只用于政府非商业性服务的船舶。主要内容是防止船舶造成空气污染规则，包括船用柴油机 NO_x（按 NO₂ 的排放总重量计算）排放控制技术规则和 SO_x 控制规则等。

《热力发电厂 EHS 指南》是 2008 年由世界银行集团制定和实施的。制定目的是保护人类健康和环境。使用范围是如果一个热力发电厂项目有世界银行集团的一个或多个成员国参与，则按照成员国政策和标准的要求，适用《EHS 指南》。主要内容是以锅炉、往返式内燃机和燃气轮机为原动机的新建热力发电厂项目环境、健康与安全的管理指南，包括柴油机氮氧化物、二氧化硫和颗粒物大气污染物排放指标要求。

2 船用柴油机陆上试验的大气污染物排放分析

2.1 大气污染物排放总量分析

根据环境保护部、国家统计局、农业部 2010 年 2 月 6 日联合发布的《第一次全国污染源普查公报》的普查成果，2007 年全国废气主要污染物排放总量：（1）二氧化硫排放总量 2 320.00 万吨。其中：工业源 2 119.75 万吨，生活源 199.40 万吨，垃圾、医废和危废焚烧设施 0.85 万吨。电力热力、非金属矿物制品、黑色冶金、化工、有色冶金和石油加工炼焦等六个行业二氧化硫排放量占全国排放总量的 88%。（2）氮氧化物排放总量 1 797.70 万吨。其中：工业源 1188.44 万吨，生活源 58.20 万吨，机动车 549.65 万吨，垃圾、医废和危废焚烧设施 1.41 万吨。电力热力、非金属矿物制品、黑色冶金、化工、石油加工炼焦等五个行业占工业氮氧化物排放量的 91%。

若以国家《船舶工业中长期发展规划》中提出的“2015 年，船用低、中速柴油机年生产能力分别达到 600 万千瓦和 1 200 台”来估算船用低、中速柴油机在陆上试验过程中的大气污染物排放总量，并假定如下估算条件：

- （1）柴油机厂柴油机台架试验的时间（燃用轻柴油 5 h；燃用船用燃料油 45 min）；
- （2）以柴油机都在额定功率工况计算；

（3）轻柴油中硫含量为 0.2%、船用燃料油硫含量为 2%；

（4）低速柴油机油耗为 170 g/(kW·h)、中速柴油机油耗为 200 g/(kW·h)；

（5）IMO Tier III 阶段的氮氧化物排放限值（低速机都以额定转速 130 r/min 时的排放限值 14.4 g/(kW·h) 估算；中速机都以额定转速 500 r/min 的排放限值 10.5 g/(kW·h) 估算）。

计算出船用低、中速柴油机陆上试验过程中氮氧化物的年排放总量约为 814 吨，二氧化硫的排放总量约 111 吨。同全国主要污染物排放总量相比，船用柴油机陆上试验时年排放的大气污染物总量很小。同时考虑到使用场合因素，船用柴油机大气污染物排放也主要集中在船舶行驶过程中产生。

2.2 典型船用柴油大气污染物排放分析

以某船用柴油机有限公司生产的 7RT-FLEX60C 低速柴油机为例，柴油机额定功率为 16 520 kW，转速为 114 r/min。柴油机燃油采用 0[#]轻柴油，检测的硫含量为 0.16%（质量百分比）。表 5 为 Wartsila 7RT-FLEX60C 低速柴油机的母型机排放检测报告中的部分数据。在 E3 试验循环下 NO_x 排放值为 15.89 g/(kW·h)，低于 MARPOL 73/78 附则Ⅵ Tier I 中 NO_x 排放限值为 17 g/(kW·h)。

表 5 7RT-FLEX60C 柴油机排放检测数据

功率/kW	16 461	12 374	8 265	4 137
转速/(r/min)	114	103.9	91.3	71.8
排气质量流量/(kg/h)	134 273	106 946	71 851	29 496
O ₂ 质量流量/(kg/h)	20 248	16 858	11 267	4 006
NO _x 质量流量/(kg/h)	262.5	199.0	172.6	102.8
NO _x 特性/g/(kW·h)	14.67	15.05	19.60	23.32
SO ₂ 质量流量/(kg/h)	9.46	6.89	4.67	2.47
CO质量流量/(kg/h)	5.16	2.55	1.53	0.73
HC质量流量/(kg/h)	21.57	17.72	13.61	5.53

在检测数据中，大气污染物排放最大值出现在柴油机功率 16 461 kW 时，对应 NO_x 质量流量 262.5 kg/h，SO₂ 质量流量 9.46 kg/h，CO 质量流量 5.16 kg/h，HC 质量流量 21.57 kg/h。可以看出船用柴油机排放的主要大气污染物为 NO_x，这主要因为船用柴油机强化程度较高，其 CO 和 HC 排放相对较低，而 NO_x 排放速率相对较高。该型号柴油机排放完全符合 MARPOL 73/78 附则Ⅵ Tier I 规定，满足船舶使用要求。在陆上试验过程中污染物排放若以 GB 16297-1996《大气污染物综合排放标准》为参照，则较难达到该标准中的部分规定。主要集中在试车厂房烟囱中 NO_x 排放速率和排放

浓度较难达到排放要求。根据船用柴油机技术现状,在废气温度为 273 K,压力为 101 325 Pa 的状态下,在 NO_x 排放特性 15.89 g/(kW·h) 时,估算出对应的 NO_x 排放浓度超过了该标准中允许排放浓度的限值 240 mg/m³。在满负荷工况时 NO_x 质量流量也超过了在二级区域内烟囱最高高度 100 m 时允许排放的限值 52 kg/h。而另一方面,一些指标却较容易满足 GB 16297-1996《大气污染物综合排放标准》的规定,例如颗粒物和碳氢排放指标,按照目前船用柴油机技术水平较容易满足要求。而 SO₂ 排放水平和燃油中硫含量密切相关,在船用柴油机陆上试验过程中,当燃用轻柴油时,废气中 SO₂ 排放指标较容易达标,而当燃用含硫量大于 1% (质量百分比) 的燃料油时,SO₂ 排放浓度和排放质量流量则容易超标。

3 陆上试验排放标准的制定考虑因素

结合柴油机大气污染物排放标准对比和排放数据分析情况,并调研目前国内已有、新建和规划试车厂房情况,同时考虑到船用柴油机陆上试验是产品的调试过程,具有阶段性运行的特点。归纳出船用柴油机陆上试验大气污染物排放标准制定过程中需要考虑的因素主要如下。

(1) 编写格式

标准制定的结构和编写格式符合新修订的 GB/T 1.1-2009《标准化工作导则的要求》以及其他相关规定中的规范化要求。

(2) 适用范围

排放标准以船用主机、柴油发电机组和柴油机消防泵组等船舶上使用的柴油机为目标。标准适用于船用柴油机陆上试验阶段大气污染物排放的管理,以及船用柴油机试车厂房建设项目环境影响评价、设计、竣工验收和建成后的排污管理。

(3) 技术要求

标准制定主要依据 IMO MARPOL 73/78 附则 VI 及修正案中规定的 2011 年 1 月 1 日全球范围内开始实施的 Tier II 阶段船用柴油机达到的技术水平;需考虑船用柴油机陆上试验是产品的调试过

程,具有阶段性运行的特点;应兼顾到二冲程低速大功率柴油机陆上试验排放的特点;应参照我国环境标准体系中相关排放标准技术要求制定的方法。

(4) 排放监测

排放监测的采样方法应按 GB/T 16157《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》的规定执行;排放监测的测定方法应按环境保护部发布的相关标准规定执行。

4 结 语

现代环境标准在技术上是需要详细划分的,也就是说所有原动力都需要有各自排放的标准。我国对原动机的环境立法有了较好的发展,但过去主要针对锅炉,现在逐步扩展到针对锅炉、燃气涡轮、车用发动机等原动机,逐步制定了合理的大气污染物排放标准体系。尽管如此,在船用柴油机领域相应的标准还不甚完善,为更好地适应国内外船用柴油机技术现状和产业未来发展需要,需要针对性的制定、修订相应标准。这将有利于规范船用柴油机陆上试验时的大气污染物排放,防治大气污染,改善环境质量,完善船舶行业标准体系,同时有利于提高强制性国家标准的科学性和权威性。

国际海事组织(IMO)的 MARPOL 73/78 附则 VI 及修正案是国际上广泛使用的船用柴油机大气污染物排放标准,代表了目前船用柴油机行业排放控制的发展方向,应该以此标准为基础,并立足我国现有的排放标准体系,尽早制定出船用柴油机陆上试验大气污染物排放行业标准。

参考文献

[1] GB 16297-1996,大气污染物综合排放标准[S].
[2] 冯明志. 船舶柴油机排放控制技术的新发展[J]. 柴油机,2010,32(1):13-17.
[3] Stefan Spindler. NO_x measures for IMO Tier II & III[C]. CIMAC Circle SMM, Hamburg, 2008. 9.
[4] Exhaust emission legislation diesel and gas engines, engines and systems, VDMA, www.vdma.org/motorem, 2008. 9.
[5] 热力发电厂 环境、健康与安全指南,世界银行集团, www.worldbank.org.cn, 2008. 12.