

柴油品质对发动机排放性能影响

陈文森, 吴复甲, 王建昕, 帅石金

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 本文将发动机台架试验得到的柴油品质对欧IV发动机排放性能影响的试验结果同国外相关研究项目发表的柴油品质对发动机排放性能影响数据进行综合分析, 总结得到了柴油主要品质参数: 十六烷值、硫含量、蒸馏特性 T90/T95、芳香烃与多环芳香烃和密度对柴油机排放性能的影响规律。

关键词: 柴油品质; 柴油机; 排放; 影响

1 引言

随着国际范围内排放法规的日益严格, 柴油机除不断进行技术创新外对柴油品质也提出了相应的要求。发动机制造商对燃油品质日益关注, 《世界燃油规范》将世界范围内的燃油分为品质逐渐加严的四类, 用于满足由 Euro1 至 Euro5 不断加严的排放法规要求^[1]。柴油的物理性质(密度、粘度、蒸馏特性等)和化学性质(十六烷值、HC 结构、含硫量等)影响燃烧特性, 对柴油机的原机排放有很大影响。其中最主要的影响因素为十六烷值、硫含量、蒸馏温度 T90/T95、芳香烃含量(单环芳香烃与多环芳香烃)和燃油密度。由于柴油品质各因素之间存在强烈的相关性, 如随着柴油中芳香烃含量增加, 柴油密度增大、十六烷值降低, 在探讨柴油品质对排放影响的实验中必须实现多因素之间的解耦, 即保证单一参数变化时其它参数保持恒定, 否则难以分析数据和给出有效结论。

为了讨论燃油品质对排放的影响, 美国、欧洲、日本均组织了汽车和石油工业携手进行的 Auto-Oil 项目, 其中涉及到柴油的大型项目包括美国 DECSE 项目(Diesel Emission Control - Sulfur Effects)^[2,3]、APBF-DEC 项目(Advanced Petroleum Based Fuel-Diesel Emission Control)^[4,5]、欧洲 EPEFE 项目(European Programme on Emissions, Fuels and Engine Technologies)^[6,7]、日本 JCAP 项目(Japan Clean Air Program)^[8]。除此类超大规模的国家级 Auto-Oil 项目外, 多家中立研究组织、汽车发动机制造商和石油公司也分别就柴油品质对排放影响进行了探讨, 如美国科学研究协作委员会 CRC-APRAC (Coordinating Research Council - Air

Pollution Research Advisory Committee)^[9,10], 美国环保署 HDEWG (Heavy-Duty Engine Working Group)^[11,12,13], 美国西南研究院^[14,15,16], 日本石油能源中心^[17]、康明斯公司^[18,19]、壳牌公司^[20,21,22]、美国石油公司^[23]等。

北京为 2008 年提前全国实施中国第 4 阶段排放法规(相当于欧 4), 必须提前制定与国 4 排放标准相对应的汽油、柴油油品标准。北京市环保局组织石化企业、汽车发动机制造商和中立研究机构共同开展了中国的 Auto-Oil 项目, 分析燃油品质参数对满足欧 IV 排放法规的发动机及其后处理技术的影响。

本文在整理国外油品对排放影响项目数据的基础上, 结合本次项目通过发动机台架试验得到的柴油十六烷值、硫含量和蒸馏特性温度 T90 对欧 IV 发动机排放性能影响的部分研究结果, 归纳得到了柴油主要品质参数: 十六烷值、硫含量、蒸馏特性温度 T90/T95、芳香烃含量与多环芳香烃和密度对发动机排放性能的影响规律。

2 试验方法

发动机台架试验所用柴油机为 Cummins ISBe4 140 直列四缸增压中冷、高压共轨直喷式柴油机, 使用尿素 SCR 后处理技术, 该柴油机满足欧 IV 排放法规。

在发动机不进行任何调整的条件下, 使用具有不同油品参数的柴油进行 ESC 循环对比试验。测量柴油机 SCR 前的气态排放物和微粒样品, 采用萃取法对微粒排放进行 SOF、硫酸盐、DS 三组分分离。

表 1 试验用柴油编号、油品参数

柴油编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
T90, °C	355	318.1	317.5	299.4	330	355	333.8	329
终馏点, °C	365	343.3	343.8	340	342	365	346.5	343
硫含量(ppm)	190	42	111	214	510	520	45	30
十六烷值	51.9	64.3	64.8	65.1	47.9	55.9	50.1	51.2
总芳烃	10	5.8	6.1	5.4	11	11	--	8.5
多环芳烃		2.1	2.5	2.2			4.8	
密度(20°C), kg/m ³	835.0	809.8	809.8	810.0	842.5	832.2	838.4	833.8

试验用油品为八种不同品质参数的柴油, 主要油品参数见表 1, 其中部分柴油实现了十六烷值、T90 同其它参数的解耦。1#、6#柴油除十六烷值和硫含量外其它参数基本相同; 3#、4#柴油除 T90 和硫含量外其它参数基本相同。柴油硫含量主要影响 PM 中的硫酸盐排放量和气态 SO₂ 排放量, 对常规气态排放物无直接影响。据此可以直接分析柴油硫含量、十六烷值和 T90 对欧 IV 柴油机排放性能的影响。

3 分析讨论

3.1 硫含量

硫天然存在于原油中, 如在石油炼制过程中未被除去, 则会被带入车用燃料。一般认为, 硫对发动机的气态排放物没有影响^[16,22]。但柴油中的硫在发动机排气和大气环境中形成硫酸盐, 对微粒排放具有显著贡献。无论柴油硫含量、硫存在形态和发动机类型, 燃料硫均会以约 1%~3%的比例转化为硫酸盐成为微粒的一部分。硫至微粒硫酸盐转化比例在不同文献上存在少许差异:《世界燃油规范》提出转化比例为 1%^[1], J.C.Wall 得到转化比例 3%^[18,24], L.T. Cowley 认为转化效率为 1%~2%^[20]。对所有柴油机, 降低燃料硫含量均会降低 PM 排放。除在发动机排气系统中生成硫酸盐导致微粒排放上升外, 硫燃烧生成的气态 SO₂ 排放又有约 50%在大气中通过化学反应生成二次硫酸盐微粒^[18], 二次硫酸盐微粒的质量为发动机直接派出的硫酸盐排放的约 25 倍。无论从降低柴油机一次微粒排放还是从降低大气环境微粒污染总量角度, 均需降低柴油硫含量。

本研究项目的发动机台架试验数据表明: 欧 IV 柴油机不同工况下柴油中硫至硫酸盐微粒的转化

率在 1%~2%范围内, 且在相同工况下转化率基本恒定。同国外文献调研得到的 1%~3%的转化比例基本吻合。

文献调研认为柴油机微粒中硫酸盐排放的等效存在形态为 H₂SO₄·5.3H₂O^[18], 则可以根据公式 (1) 预测柴油硫含量对 ESC 循环硫酸盐排放影响, 其中 6 为 S 转化为硫酸盐的重量增加因子。假设柴油机 ESC 循环平均比油耗为 250g/kW.h, 取硫至硫酸盐转化率 1%~3%, 计算得到硫对 ESC 循环 PM 中硫酸盐排放量影响预测如图 1 所示。

$$\text{硫酸盐排放} = \text{转化率} \times \text{比油耗} \times \text{硫含量} \times 6 \quad (1)$$

由图 1, 当柴油硫含量达到约 700ppm 时, ESC 循环硫酸盐排放量即达到欧 IV/欧 V 排放法规规定的 PM 限值 0.02g/kW.h。对于硫含量 350ppm 的国 3 柴油, 其 ESC 循环硫酸盐排放量平均约 0.01g/kW.h, 占欧 IV/欧 V 排放限值的 50%, 为柴油机 PM 满足限值要求制造很大困难。硫含量 50ppm 的欧 IV 柴油, 其 ESC 循环硫酸盐排放量约为 0.0015g/kW.h, 占欧 IV/欧 V 排放限值比例小于 10%。

约 98%的燃料硫以气态 SO₂ 形式排入大气, 其中约 50%在大气环境中通过大气化学反应生成二次硫酸盐微粒污染, 二次硫酸盐微粒排放量约为柴油机直接排出的一次硫酸盐微粒排放的 25 倍。二次硫酸盐微粒生成量可以按公式 (2) 进行简单估算。

$$\text{二次硫酸盐排放} = 50\% \times \text{比油耗} \times \text{硫含量} \times 6 \quad (2)$$

仍假设柴油机 ESC 循环平均比油耗为 250g/kW.h, 按公式 (1)、(2) 计算得到柴油硫含量对 ESC 循环的一次、二次硫酸盐排放量影响预测如图 2 所示。如考虑大气二次硫酸盐微粒污染, 硫含量 150ppm 的柴油其硫酸盐微粒排放量即以超过欧 III 排放法规 0.1g/kW.h 的 PM 限值要求。

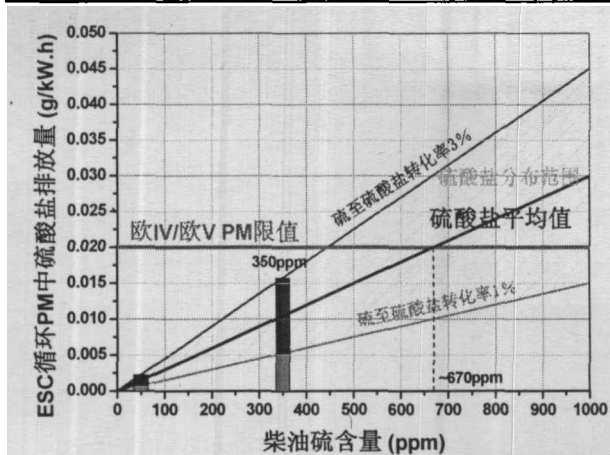


图1 硫含量对ESC循环PM中硫酸盐排放影响

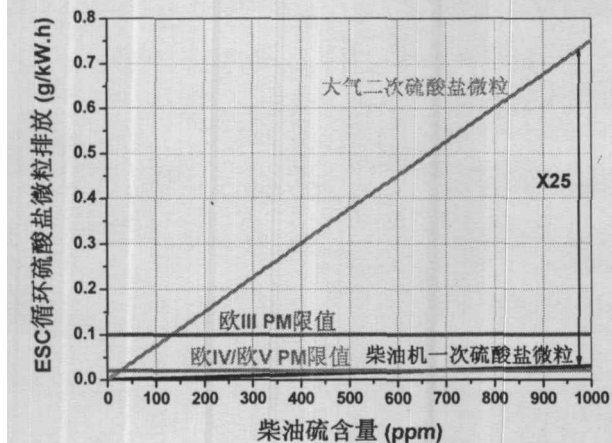


图2 硫含量对ESC循环一次、二次硫酸盐排放影响

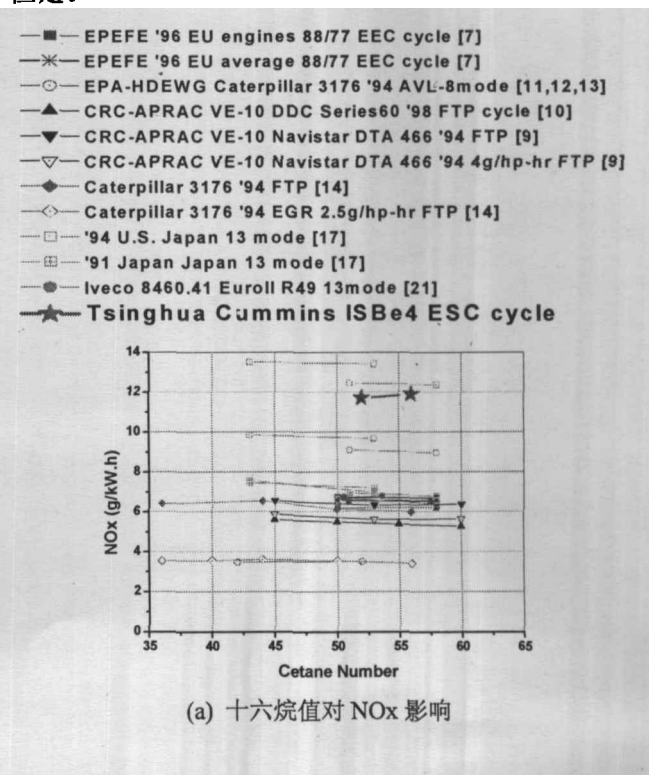
3.2 十六烷值

十六烷值是衡量燃料压缩着火特性的参数。燃料固有十六烷值是燃料自身特性, 在燃料中添加十六烷值改进剂(常用硝基烷烃或过氧化物)后得到燃料的改进十六烷值。大量研究认为固有十六烷值和改进十六烷值对柴油机常规排放影响无显著差异^[6,11,13,15,16,22,23], 部分文献认为使用含氮十六烷值改进剂可能对柴油机 NO_x 排放量有一定影响^[10], 少量文献认为固有十六烷值和改进十六烷值对柴油机性能的影响不同^[1]。

十六烷值主要通过两个途径影响柴油机排放。一, 十六烷值高, 燃料着火特性好, HC 等不完全燃烧产物减少; 二, 十六烷值高, 燃烧滞燃期缩短, 滞燃期内生成的可燃混合气量减小, 使得最高爆发压力和压力升高率降低, 同时预混合燃烧比例降低而扩散燃烧比例相应提高, 造成 NO_x 排放量下降和 PM 排放量上升。

图3为本次项目的发动机台架试验结果和国外不同研究项目得到的柴油十六烷值对柴油机 NO_x、PM、HC 和 CO 排放量的影响数据, 试验用柴油机

和试验测试循环见图例。本次项目使用满足欧 IV 排放法规的 Cummins ISBe4 柴油机按 ESC 循环运行。不同研究项目, 使用不同技术水平的柴油机按不同排放测试循环运行得到的十六烷值对柴油机排放性能影响在趋势和幅度上均存在差异。由图 3 可见, 对于高 NO_x 排放柴油机, NO_x 排放随十六烷值增加而减少^[17,19]; 对于低 NO_x 排放柴油机, 十六烷值对 NO_x 排放影响较小且趋势不明^[7,9,10,12,17,21]; 增加十六烷值对 PM 影响随发动机不同而存在差异, 大多数研究中十六烷值对 PM 无显著影响^[7,9,10,21], 少数研究中 PM 随十六烷值增大而稍有升高^[17]或降低^[9]; 部分研究表明增加十六烷值可以降低 HC 排放^[9,10,17,19], 但有些则无明显效果^[7,12,17,21]; 增加十六烷值造成高 CO 排放柴油机的 CO 降低^[9,10,12,17], 对低 CO 排放柴油机影响不大^[7,21]。本次项目的发动机台架试验数据表明: 十六烷值增加一个单位造成欧 IV 柴油机 NO_x 排放增加 0.5%、PM 排放降低 1%, 同总结国外研究数据得到的十六烷值在 45~60 范围内增加一个单位造成 NO_x 排放平均降低 0.5% (变化范围: 降低 1% 至增加 1%)、PM 平均降低 1% (变化范围: 降低 3% 至增加 2%) 的规律吻合。总体来看, 随着十六烷值增加, HC 和 CO 整体呈下降趋势, NO_x、PM 基本恒定。

(a) 十六烷值对 NO_x 影响

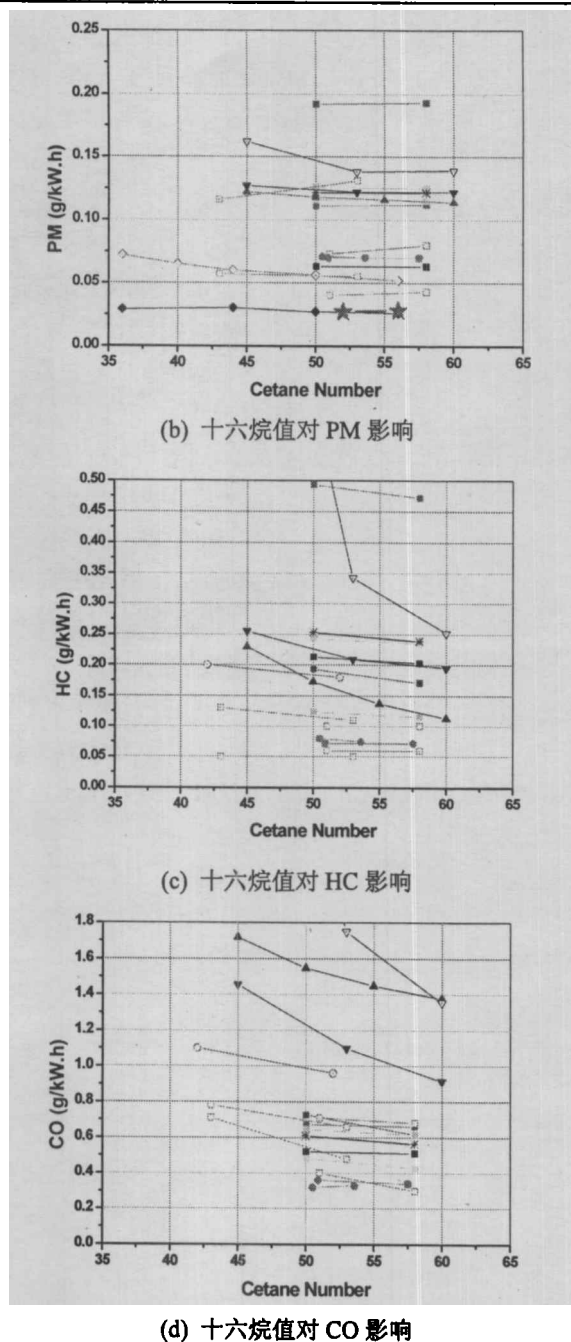


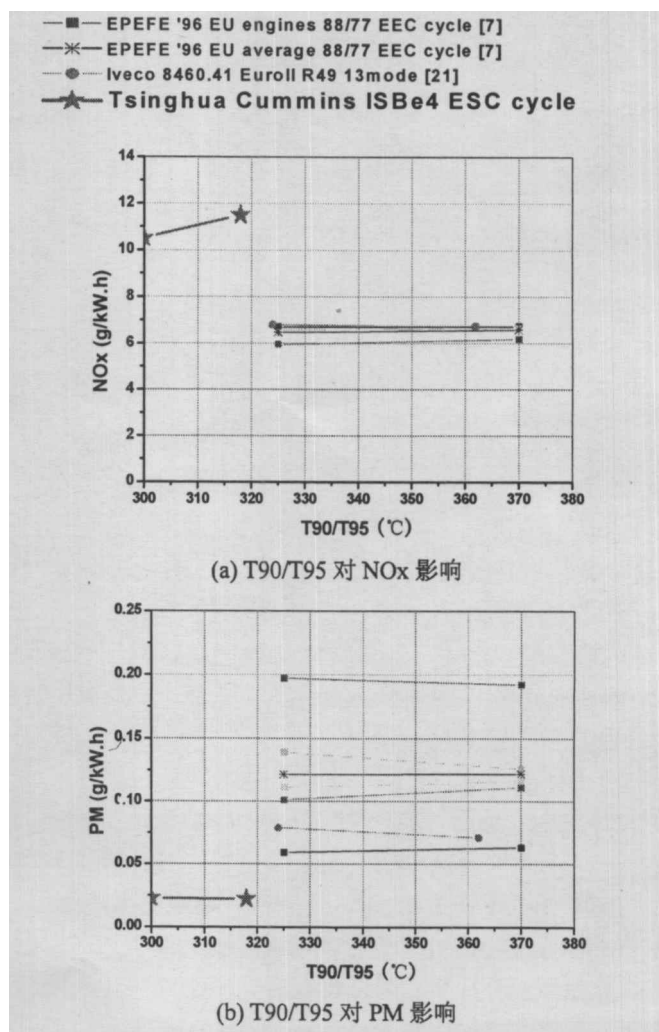
图 3 十六烷值对柴油机排放性能影响数据汇总

3.3 蒸馏特性 T90/T95

柴油的蒸馏特性温度 T90/T95 表征柴油中重质成分的多少, 重质成分难以燃烧完全, 重馏分燃料含量过多会导致炼焦并增加柴油机的碳烟排放、尾气烟度和微粒排放。大量研究项目未能实现 T90/T95 与十六烷值、芳香烃和密度等参数的解耦, 使得研究结果无法进行分析。

图 4 为本次项目发动机台架试验结果和国外不同研究项目得到的柴油蒸馏特性温度 T90/T95 对柴油机 NO_x、PM、HC 和 CO 排放量的影响数据, 试验用柴油机和试验测试循环见图例。随着 T90/T95

降低, NO_x 和 PM 排放随试验用发动机的不同存在下降^[7]、上升^[7,21]和保持恒定^[7]等不同的变化趋势, HC 排放整体升高^[7]但个别项目出现下降趋势^[21], CO 排放整体升高^[7,21]但个别发动机出现降低趋势^[7]。本次项目发动机台架试验数据表明: 柴油蒸馏特性温度 T90 下降 10℃ 造成欧 IV 柴油机 NO_x 排放降低 3%、PM 保持恒定, 同整理国外研究数据得到的蒸馏特性温度 T90/T95 在 320℃~370℃ 范围内每降低 10℃ 造成 NO_x 排放平均降低 0.5% (变化范围: 降低 1% 至增加 1%)、PM 排放平均升高 0.5% (变化范围: 降低 2% 至升高 3%) 的规律基本相符。总体来看, 随着 T90/T95 降低, HC、CO 排放整体增加, NO_x 排放整体稍有降低但变化趋势随发动机不同而存在差异, PM 基本恒定。



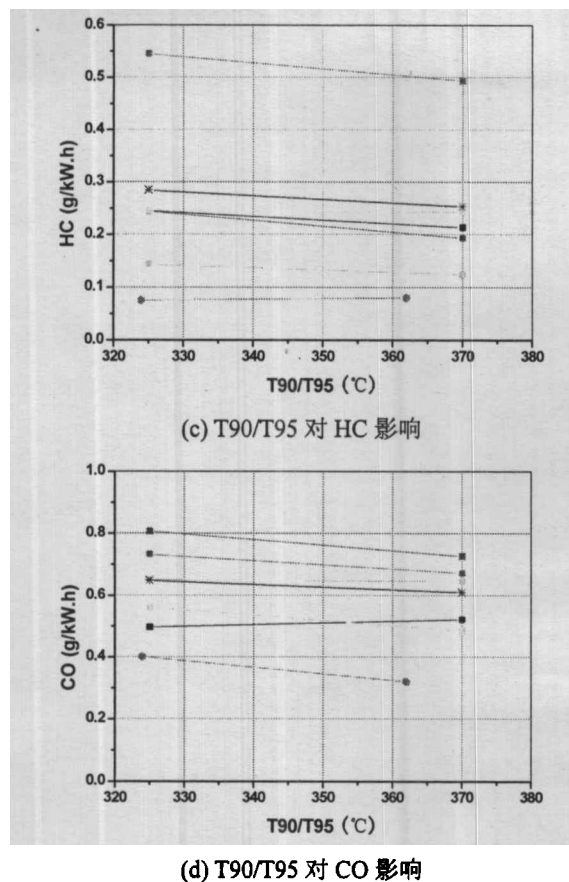


图 4 蒸馏特性 T90/T95 对柴油机排放性能影响数据汇总

3.4 芳香烃与多环芳香烃

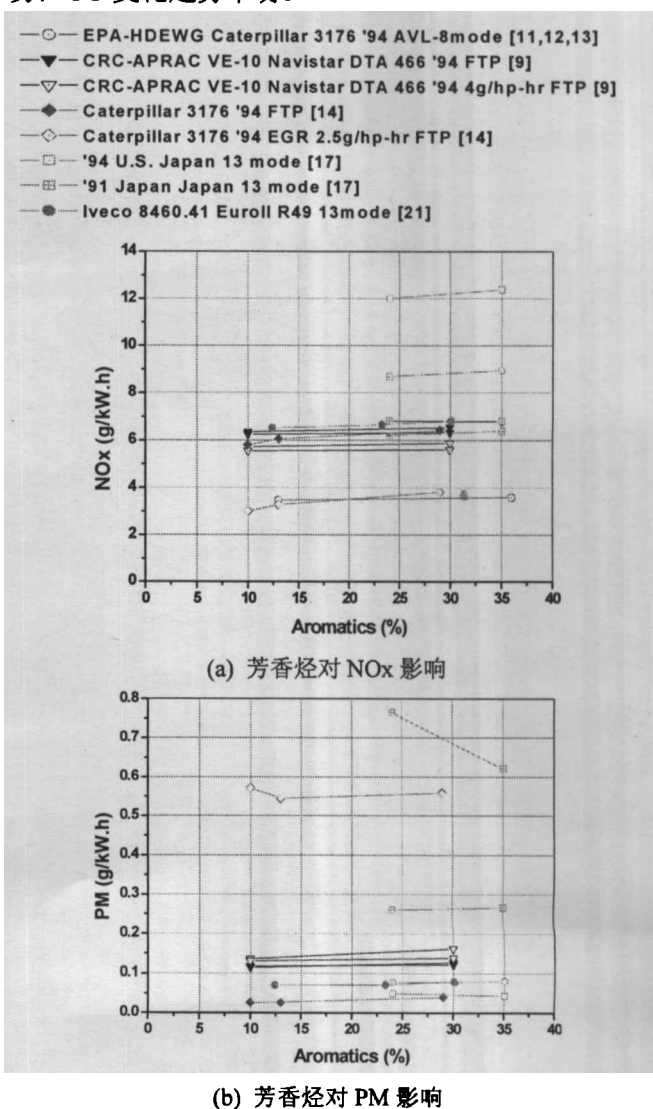
芳香烃是具有至少一个苯环的燃油分子, 其对排放的影响主要有两个方面: 1. 芳香烃碳氢比高, 燃烧火焰温度高, 芳烃含量增加造成 NO_x 排放量上升; 2. 芳香烃 (特别是多环芳香烃) 作为碳烟生成的前驱体, 其含量增加导致 PM 排放上升。大量研究未能实现芳香烃含量和十六烷值、蒸馏特性温度和密度等参数之间的解耦, 使得研究结果无法进行分析; 此外, 多数研究项目主要研究芳香烃含量的影响, 探讨多环芳香烃影响的论文较少。

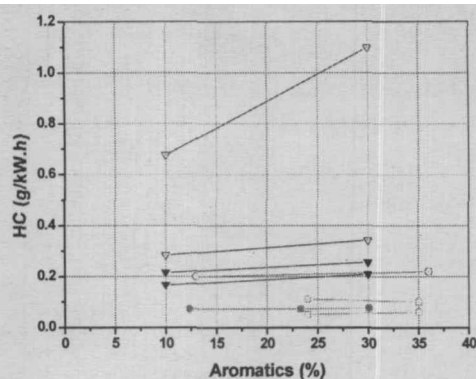
图 5、图 6 分别为国外不同研究项目得到的柴油芳香烃和多环芳香烃含量对柴油机 NO_x、PM、HC 和 CO 排放量的影响数据, 试验用柴油机和试验测试循环见图例。

由图 5 可见, 随着柴油芳香烃含量的增加, NO_x 排放量基本恒定^[9,12,14,17,21], 部分研究中 NO_x 出现上升趋势^[14,17]; PM 排放量基本恒定^[9,12,14,17,21], 部分研究中 PM 稍有增加^[9,14], 个别研究 PM 出现下降^[17]; HC 排放变化规律随研究项目不同存在增加^[9]、降低^[17]和保持恒定^[12,17,21]等不同变化趋势; CO 排放变化规律也存在增加^[9]、降低^[17]和保持恒定

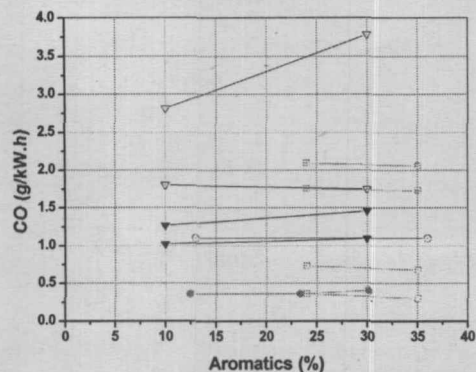
^[9,12,17,21]等不同的变化趋势。柴油芳香烃含量在 10%~35% 范围内变化, 芳香烃每增加 5%, 柴油机的 NO_x 平均增加 3% (变化范围: 增加 0% 至 15%)、PM 平均增加 1% (变化范围: 降低 9% 至增加 15%)。总体来看, 随着柴油芳香烃含量增加, 柴油机的 NO_x、PM、HC 排放均呈上升趋势, CO 变化趋势不明。

由图 6 可见, 随着多环芳香烃含量的增加, NO_x 和 HC 排放呈上升趋势^[7,12,21], PM 排放整体呈上升趋势^[7,21]但个别发动机 PM 保持恒定^[7], CO 规律不明且随研究项目的不同分别存在上升^[7]、下降^[7,21]和保持恒定^[7,12]的变化趋势。柴油多环芳香烃含量在 1%~10% 范围内每增加 1%, 柴油机的 NO_x 平均增加 1% (增加 0.5% 至 2%)、PM 平均增加 2% (增加 0% 至 5%)。总体来看, 随着柴油中多环芳香烃含量的增加, 柴油机的 NO_x、PM、HC 均呈上升趋势, CO 变化趋势不明。





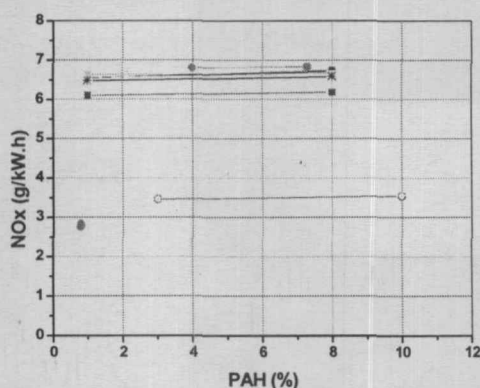
(c) 芳香烃对 HC 影响



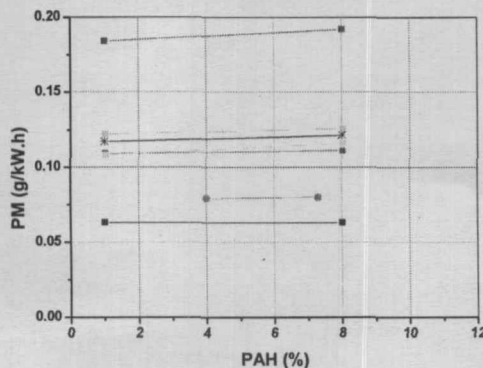
(d) 芳香烃对 CO 影响

图 5 芳香烃含量对柴油机排放性能影响数据汇总

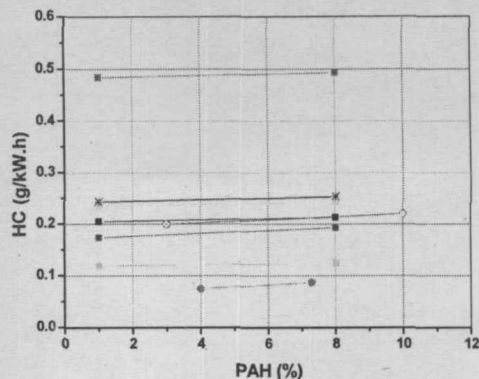
- EPEFE '96 EU engines 88/77 EEC cycle [7]
- *— EPEFE '96 EU average 88/77 EEC cycle [7]
- EPA-HDEWG Caterpillar 3176 '94 AVL-8mode [11,12,13]
- Iveco 8460.41 EuroII R49 13mode [21]



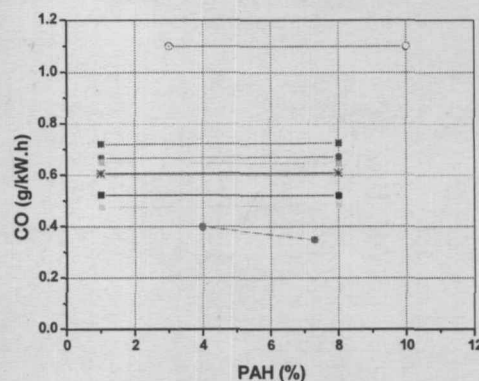
(a) 多环芳香烃对 NOx 影响



(b) 多环芳香烃对 PM 影响



(c) 多环芳香烃对 HC 影响



(d) 多环芳香烃对 CO 影响

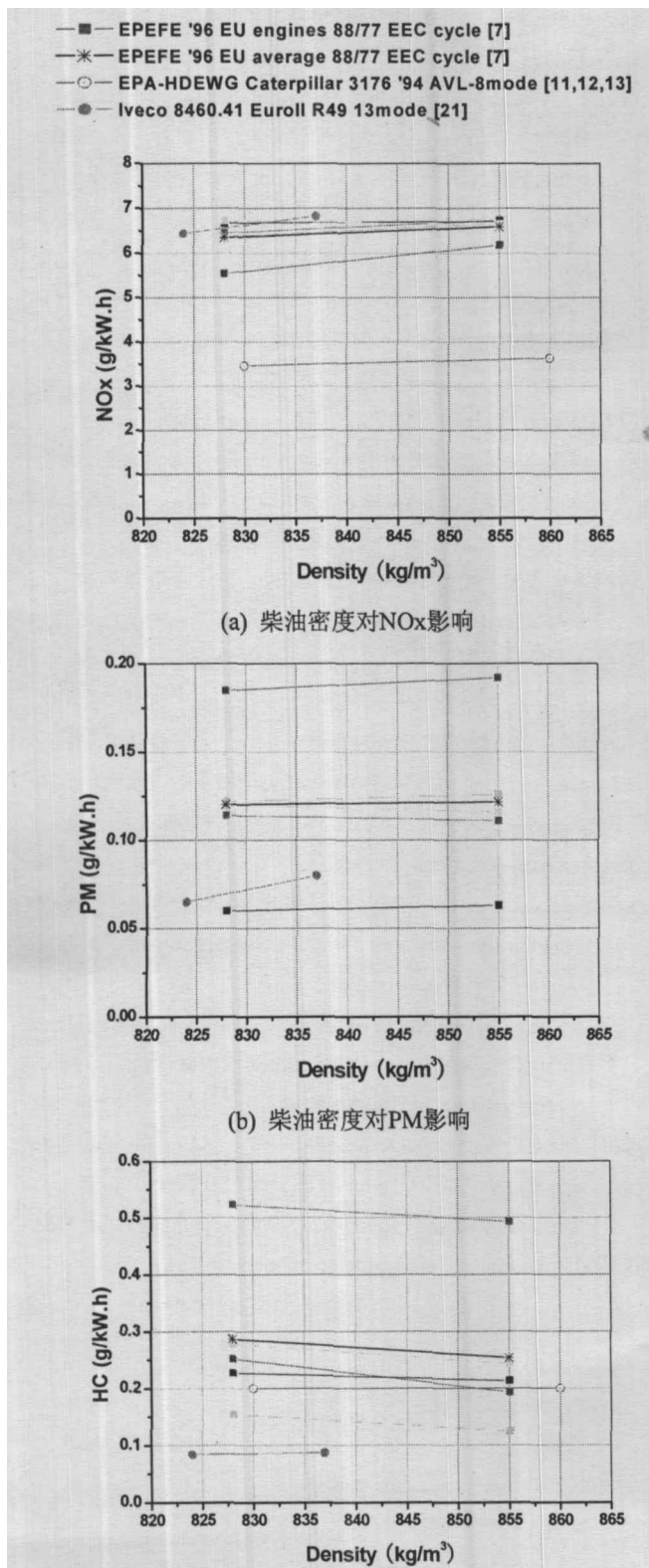
图 6 多环芳香烃含量对柴油机排放性能影响数据汇总

3.5 密度

柴油密度对柴油机的油耗和动力性影响很大,且密度同其它油品参数关系密切,研究中必须实现密度与其它参数的解耦。柴油密度对柴油机的喷油时刻、喷油规律会产生影响,同时柴油密度还会影响喷入缸内油束的喷雾锥角和贯穿距离,从而柴油密度对柴油机的缸内燃烧过程和污染物生成均有所影响。成功实现密度和其它参数解耦的文献较少,也难以得出关于柴油密度对排放影响规律的统一结论。

图 7 为不同研究项目得到的柴油蒸密度对柴油机 NOx、PM、HC 和 CO 排放量的影响,试验用柴油机和试验测试循环见图例。随着柴油密度增加,NOx 和 PM 排放随试验用发动机的不同存在上升^[7,21]、下降^[7]和保持恒定^[7]等变化趋势,HC 排放整体降低^[7]但部分研究项目出现上升^[21]和保持恒定^[12]的状况,CO 规律不明且随试验用发动机的不同存在上升^[7]、下降^[7,21]和保持恒定^[7,12,21]等变化趋势。总体来看,随着密度增加,NOx、PM 排放整体上升,HC 排放下降,CO 变化规律不明。柴油密度在 820~855kg/m³ 范围内每增加 10kg/m³,柴油机的

NO_x 平均增加 1% (变化范围: 降低 0.5%至增加 2.5%)、PM 平均增加 1% (变化范围: 降低 1%至增加 9%)。



(a) 柴油密度对NO_x影响

(b) 柴油密度对PM影响

(c) 柴油密度对HC影响

(d) 柴油密度对CO影响

图7 柴油密度对柴油机排放性能影响数据汇总

4 结论

(1) 不同的研究项目, 使用不同技术水平柴油机按不同排放测试循环运行得到的柴油品质参数对发动机机排放性能影响在趋势和幅度上均存在差异。

(2) 柴油中硫至硫酸盐微粒转化率为 1%~3%, 降低柴油硫含量不但降低柴油机直接排出的硫酸盐颗粒排放, 还可以大幅降低大气中总颗粒物浓度。

(3) 柴油十六烷值增加, 发动机的 NO_x、PM 基本恒定。国外研究数据表明, 十六烷值每增加一个单位, NO_x 和 PM 排放平均分别降低 0.5%和 1%; 本项目发动机台架试验结果表明, 十六烷值每增加一个单位造成欧 IV 柴油机 NO_x 排放增加 0.5%、PM 排放降低 1%。

(4) 柴油蒸馏特性温度 T₉₀/T₉₅ 降低, NO_x 排放稍有降低, PM 基本恒定。国外研究数据表明, T₉₀/T₉₅ 每降低 10℃, NO_x 排放平均降低 0.5%、PM 排放平均升高 0.5%; 本项目发动机台架试验结果表明, 柴油蒸馏特性温度 T₉₀ 下降 10℃造成欧 IV 柴油机 NO_x 排放降低 3%、PM 保持恒定。

(5) 柴油芳香烃和多环芳香烃含量增加, 柴油机 NO_x 和 PM 排放均呈上升趋势。国外研究数据表明, 芳香烃每增加 5%, 柴油机 NO_x 和 PM 排放平均分别增加 3%和 1%; 多环芳香烃含量每增加 1%, 柴油机的 NO_x 和 PM 排放平均分别增加 1%和 2%。

(6) 柴油密度增加, NO_x、PM 排放整体上升。国外研究数据表明, 柴油密度每增加 10kg/m³, 柴油机 NO_x 和 PM 排放均平均增加 1%。

参 考 文 献

- [1] Worldwide Fuel Charter, 4th edition, 2006
- [2] Wendy Clark, George M. Sverdrup, Stephen J. Goguen, "Overview of Diesel Emission Control—Sulfur Effects Program," SAE 2000-01-1879
- [3] U.S. Department of Energy. "Sulfur Effects (DECSE) Program Final Report: Diesel Oxidation Catalysts and Lean-NOx Catalysts," June 2001
- [4] Shawn D. Whitacre, Brad J. Adelman, Mike May, et al, "Systems Approach to Meeting Epa 2010 Heavy-Duty Emission Standards Using a NoDx Adsorber Catalyst and Diesel Particle Filter on a 15l Engine," SAE 2004-01-0587
- [5] Dean Tomazic, Marek M. Tatur, Matthew J. Thornton, "Development of a Diesel Passenger Car Meeting Tier 2 Emissions Levels," SAE 2004-01-0581
- [6] Robert MacKinven, Martial Hublin, "European Program on Emissions, Fuels and Engine Technologies—Objectives and Design", SAE 961065.
- [7] M Signer, P Heinze, R Mercogliano, H-J Stein, "European programme on Emissions, Fuels and Engine Technologies (EPEFE) - Heavy Duty Diesel Study," SAE 961074
- [8] K. Oyama, T. Kakegawa, "Japan Clean Air Program - Step I Study of Diesel Vehicle and Fuel Influence on Emissions," SAE 2000-01-1973
- [9] Kent B. Spreen, Terry L. Ullman, and Robert L. Mason, "Effects of Cetane Number, Aromatics, and Oxygenates on Emissions From a 1994 Heavy-Duty Diesel Engine With Exhaust Catalyst," SAE 950250
- [10] Terry L. Ullman, Kent B. Spreen, and Robert L. Mason, "Effects of Cetane Number on Emissions From A Prototype 1998 Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 950251
- [11] Rafal A. Sobotowski, John C. Wall, Christine H. Hobbs, et al. "EPA HDEWG Program - Test Fuel Development," SAE 2000-01-1857
- [12] Andrew C. Matheaus, Gary D. Neely, Thomas W. Ryan III, et al. "EPA HDEWG Program-Engine Tests Results," SAE 2000-01-1858
- [13] Robert L. Mason, Andrew C. Matheaus, Thomas W. Ryan, III, et al. "EPA HDEWG Program - Statistical Analysis," SAE 2000-01-1859
- [14] Thomas W. Ryan III, Janet P. Buckingham, Cherian Olikara, "The Effects of Fuel Properties on Emissions From a 2.5gm NoDx Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 982491 :
- [15] Terry L. Ullman, Robert L. Mason, Daniel A. Montalvo, "Effects of Fuel Aromatics, Cetane Number, and Cetane Improver on Emissions From a 1991 Prototype Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 902171
- [16] Terry L. Ullman, Kent B. Spreen, Robert L. Mason, "Effects of Cetane Number, Cetane Improver, Aromatics, and Oxygenates on 1994 Heavy-Duty Diesel Engine Emissions," SAE 941020
- [17] Mitsuo Tamanouchi, Hiroki Morishisa, Shigehisa Yamada, et al. "Effects of Fuel Properties on Exhaust Emissions for Diesel Engines With and Without Oxidation Catalyst and High Pressure Injection," SAE 970758
- [18] J. C. Wall, S. A. Shimpi, M. L. Yu, "Fuel Sulfur Reduction for Control of Diesel Particulate Emissions," SAE 872139
- [19] L. C. Broering, L. W. Holtman, "Effect of Diesel Fuel Properties on Emissions and Performance," SAE 740692
- [20] L. T. Cowley, R. J. Shadling, J. Doyon, "The Influence of Composition and Properties of Diesel Fuel on Particulate Emissions From Heavy-Duty Engines," SAE 932732
- [21] Richard Stradling, Paul Gadd, Meinrad Signer, et al. "The Influence of Fuel Properties and Injection Timing on the Exhaust Emissions and Fuel Consumption of An Iveco Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 971635
- [22] Robert Lee, Christine H. Hobbs, Joanna F. Pedley, "Fuel Quality Impact on Heavy-Duty Diesel Emissions: a Literature Review," SAE 982649
- [23] Christopher I. McCarthy, Warren J. Slodowske, Edward J. Sienicki, "Diesel Fuel Property Effects on Exhaust Emissions From a Heavy Duty Diesel Engine That Meets 1994 Emissions Requirements" SAE 922267
- [24] J.C. Wall, S.K. Hoekman, "Fuel composition effects on heavy duty diesel particulate emissions," SAE 841364