

国内外混合代用燃料的研究进展

张君涛^{1,2}, 梁生荣², 陈志东³, 冯 霄¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安石油大学 化学化工学院, 陕西 西安 710065; 3. 辽河石油勘探局经营计划部, 辽宁 盘锦 124010)

摘要:介绍了有关矿物油掺水、掺醇及掺生物油等车用混合代用燃料的制备技术、节能降污机理与排放特性。结合我国国情提出, 在基本不改变现有发动机结构的情况下, 研究开发“柴油—生物柴油—醇类”微乳混合燃料是缓解我国目前能源短缺、减轻环境污染、实现生态良性循环和经济可持续发展的行之有效的途径之一。

关键词:代用燃料; 微乳燃油; 醇类燃料; 生物柴油; 混合燃料

中图分类号: U473

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2005)07-0014-04

Domestic and overseas developments in blend alternate fuels

ZHANG Jun-tao^{1,2}, LIANG Sheng-rong², CHEN Zhi-dong³, FENG Xiao¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, China;

3. Management and Project Division, Liaohe Petroleum Exploration Bureau, Panjin 124010, China)

Abstract: The methods of production, mechanism of saving energy and reducing pollution, and characteristics of emission of blend alternate fuels for car-use, such as mineral oil with water, alcohols or vegetable oils, are introduced. At present, development research of the “diesel oil-alcohols-biodiesel” blend fuel is one of the effective ways for China to relieve the energy sources shortage, minimize environmental pollution, realize beneficial ecological cycle and continuable development of economics under conditions of the existing structure of engine unchanged.

Key words: alternate fuel; microemulsion fuel; alcoholic group fuel; biodiesel; blend fuel

2003年我国石油净进口9 739万t, 石油进口依存度已达36%, 据预测^[1-2], 我国石油净进口需求在未来10年将以年均10%的速度增长, 这对我国的能源安全造成了巨大的威胁。另外, 随着汽车保有量的增长, 约占能源总需求量40%的车用燃料的消耗量亦与日俱增, 巨大的燃油消耗不仅对日益枯竭的石油能源造成巨大压力, 同时大量燃油燃烧不当所排放出的污染物已成为威胁人类生存的主要因素。因此, 寻求资源丰富、环境友好和经济可行的代用燃料已成为人类亟待解决的重大问题。目前已开发的代用燃料有天然气、液化石油气、氢能源、二甲醚、醇类燃料及生物燃料等。混合燃油主要有掺水、掺醇和掺生物油等形式。

1 掺水混合燃油

燃油掺水形成的乳化液由于燃烧过程中水的“微爆”现象而具有节能、环保的特点。但一般的乳化油存在稳定性差、储存时间短及燃烧不稳定等缺点, 且适宜的乳化剂价格较高, 另外, 乳化还需大功

率乳化装置, 从而使乳化油的应用受到限制。

微乳化是解决乳化油实用性的一种较好的途径。与一般燃油相比, 微乳燃油不仅可克服乳化燃油的上述缺点, 而且还具有节能、环保、对内燃机无腐蚀和磨损等特点。近年来, 国内外有关矿物油(特别是柴油)—水微乳液的研究非常活跃, 目前掺水微乳燃油的研究重点主要集中在微乳体系的制备技术和节能降污机理的研究等方面。

1.1 制备技术

微乳燃油的制备过程中, 首先要解决的是表面活性剂和助溶剂的选择与复配问题, 其研究方法主要有亲水—亲油平衡(HLB)法、相转变温度法和内聚能比法等, 而以HLB法应用最为普遍。对包括阳离子、阴离子和非离子表面活性剂在内的单一和混合表面活性剂、油、水、助溶剂、甚至电解质组成的微乳燃油, 国内外已进行了深入系统的研究。大量研究表明, 制备油包水(W/O)型微乳燃油时适宜的HLB值为4~6。在不同表面活性剂复配时的协同效应方面, 与混合表面活性剂相比, 采用单一表面活性剂形

收稿日期: 2005-01-20; 修回日期: 2005-05-23

作者简介: 张君涛(1971-), 男, 博士生, 讲师, 从事工业催化和化工节能与优化领域的研究, 029-88382701, zhang.jt@126.com; 冯霄(1953-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事过程集成与化工节能领域的研究。

成微乳燃油时的最佳表面活性剂用量较大,即单一表面活性剂的效率低^[3-4],而混合的阴、阳离子表面活性剂由于其亲水基相互吸引,能够较大地提高微乳燃油的水容量,其效率高于混合的阳(或阴)-非离子表面活性剂,因此制备微乳燃油时宜采用阴、阳离子表面活性剂进行复配^[5-8]。在阴、阳离子混合表面活性剂中,混合脂肪酸盐由于其中的烃基链长不等,具有较好的配伍性效应,故其表面活性剂效率大于单一的脂肪酸盐。

以离子型表面活性剂来制备微乳燃油时,助溶剂(醇)是不可缺少的。应用较多的是C_{4~7}中碳醇,其中效果较好的有正丁醇、正戊醇、正庚醇及正辛醇等。醇主要分布在油-水界面层中,其羟基靠近表面活性剂的极性基,烃基链处于表面活性剂的烃链尾巴之间,其作用是进一步降低界面张力,增加界面膜的流动性,调节表面活性剂的HLB值,从而可促进油和水的混溶,降低表面活性剂浓度,增加油水加容量^[6,9]。张强等^[10]研究了油酸/氨水、燃油、醇、水微乳体系形成过程的热力学,结果表明,微乳燃油形成过程的标准自由能变化 ΔG_s 的绝对值随醇碳链的增长、燃油相对分子质量的减小和燃油含量的增大而增大,即更易形成微乳燃油。另外,C_{4~7}中碳胺和醚类等也可作为助溶剂,如正己胺和乙二醇醚^[9]据报道是非常有效的助溶剂。

微乳状液的形成过程中,电解质(如NH₄NO₃、NaCl等)的适量加入,可以提高胶束的表面膜硬度,降低助溶剂含量,从而降低表面活性剂的浓度,增加表面活性剂效率。但盐类对燃油的燃烧不利,且会加速汽缸等部件的腐蚀。

1.2 燃烧过程的节能降污机理

国内外学者对微乳燃油燃烧机理尚有争论,目

前被普遍接受的是前苏联学者Ivanov提出的“微爆理论”。该理论的核心是W/O型微乳燃油内部水滴受热并汽化,体积急剧膨胀,产生的巨大压力使油滴爆破,形成二次雾化,使油和空气的接触面积大大增加,减少了物理上的不完全燃烧和排烟损失,提高了燃烧效率,从而达到节能降污的效果。

也有文献^[11]认为,燃烧过程中的水煤气反应对节能降污具有重要作用。燃料中由于高温裂解产生的碳粒子,能与水蒸气发生水煤气反应生成CO和H₂,使碳粒子能充分燃烧,提高了燃烧效率,降低了排烟中的烟尘含量。另外,燃油及水在燃烧过程中的高温高压条件下会发生化学反应,促使产生许多OH·活性基团,使消炭反应(CO + OH· → CO₂ + H·)速度加快,从而达到降污的目的。

另外,对于NO_x的排放,一般认为掺水微乳燃油在燃烧过程中,水滴汽化需吸收热量,可防止燃烧火焰局部高温,而且燃油掺水燃烧改善了油与空气的混合比例,减少了过剩空气系数,从而抑制了NO_x的生成。

大量有关微乳燃油排放特性的研究数据表明,微乳燃油的节油率为5%~15%,排气温度可降低20%~60%,烟度下降40%~77%,CO和NO_x排放量约为一般燃油的25%,在-5~40℃可稳定存放3年以上,对汽缸无任何腐蚀。

尽管掺水微乳燃油有上述优点,但还是存在许多有待解决的问题,其中最主要的问题之一是形成微乳状液所需的表面活性剂、助溶剂用量较大,生产成本较高。另外,掺水量较大(>20%)时,燃油热值降低较多,且发动机打火困难,必然影响发动机的动力性能和正常工作。

(上接第13页)

[16] Song Chunshan. [J]. Catalysis Today, 2003, 86(1-4): 211-263.
 [17] 居沈贵, 管国锋, 姚虎卿. [J]. 现代化工, 2002, 22(7): 27-29, 33.
 [18] 居沈贵, 管国锋, 祝宁东, 等. [J]. 化学工程, 2003, 31(6): 51-53.
 [19] Takahashi A, Yang F H, Yang R T. [J]. Ind Eng Chem Res, 2002, 41(10): 2487-2496.
 [20] Yang R T, Hernandez-Maldonado A J, Yang F H. [J]. Science, 2003, 301: 79-81.
 [21] Hernandez-Maldonado A J, Yang R T. [J]. Ind Eng Chem Res, 2003, 42(1): 123-129.
 [22] Hernandez-Maldonado A J, Yang R T. [J]. Ind Eng Chem Res, 2003, 42(13): 3103-3110.
 [23] Velu S, Ma X, Song C. [J]. Ind Eng Chem Res, 2003, 42(21): 5293-5304.
 [24] Ma Xiaoliang, Sun Lu, Song Chunshan. [J]. Catalysis Today, 2002, 77(1

-2): 107-116.

[25] Yazu K, Yamamoto Y, Furuya T, et al. [J]. Energy and Fuels, 2001, 15(6): 1535-1536.
 [26] Yasuhiro S, Kenya T, Takayuki H, et al. [J]. Energy and Fuels, 2003, 17(1): 95-100.
 [27] McMillan S A, Broadbelt L J, Snurr R Q. [J]. J Phys Chem B, 2002, 106(42): 10864-10872.
 [28] McMillan S A, Broadbelt L J, Snurr R Q. [J]. J Catal, 2003, 219(1): 117-125.
 [29] June R L, Bell A T, Theodorou D N. [J]. J Phys Chem, 1992, 96(3): 1051-1060.
 [30] Vlugi T J H, Krishna R, Smit B. [J]. J Phys Chem B, 1999, 103(7): 1102-1118.
 [31] Vlugi T J H, Zhu W, Kapteijn F, et al. [J]. J Am Chem Soc, 1998, 120(22): 5599-5600. ■

2 掺醇混合燃油

醇类(指甲醇和乙醇)是一类含氧燃料,燃烧性能良好,辛烷值高[研究法辛烷值(RON) > 100],储存运输方便,故可单独作为发动机燃料使用。与矿物油相比,醇类存在热值较低、汽化潜热较高、十六烷值低的不足,单独使用时发动机需做较大改动,而当掺烧量较低(一般 < 15%)时,发动机基本上不用改装即可正常使用,因此一般与矿物油掺混使用较多。

2.1 制备技术

醇类与矿物油的互溶性受温度和含水量的影响很大。温度较低(如 M5 汽油低于 20℃)或有痕量水存在都可造成油、醇分相,这给掺醇燃料的正常使用带来了很大的困难。为此在制备掺醇燃油时,通常都要添加一定量的适宜助溶剂以降低分层温度,但对含水量的要求仍然比较严格。燃油使用中难免会混入水分,且无水甲醇和乙醇的生产成本也较高。因此,可加入适宜的乳化剂,经适当搅拌后制成较为稳定的乳状液,同时还可掺入适量的水,利用水分子与醇分子之间的氢键缔合作用,使形成的界面膜更为牢固,进而得到比油-醇乳化液更稳定的油-醇-水三元复合乳化液,且乳化剂用量也可减少^[12],因此可直接掺粗甲醇和粗乙醇。尽管如此,掺醇乳状燃油在实际使用过程中由于复杂而多变的使用条件,仍然易出现分层或破乳现象。因此,筛选适宜的表面活性剂和助溶剂,制成热力学稳定的微乳燃油会更好一些。目前,有关掺醇微乳燃油仅有少量报道。

制备掺醇燃油时,助溶剂的选择是最为关键的。助溶剂的组成及加入量一般随矿物油、醇类的不同及醇类的掺混比例不同有较大差别。据报道^[13-14],柴油与醇类乳化时,最佳的 HLB 值在 3.5 左右,如果掺水成为柴油-醇-水三元乳化燃料,则最佳 HLB 值就会变成柴油-水的最佳 HLB 值,且当含水量较小时,掺水有利于提高乳化燃料的稳定性。谢洁等^[15]以油酸为助溶剂制备了甲醇-柴油微乳燃油,研究发现当油酸与甲醇以 1:1 的体积比混合后,该混合液能够与柴油以任意比例互溶,且异丁醇在较大的温度变化范围具有很好的助溶效果。张润铎等^[16]用不饱和酸、高分子聚合物、卵磷脂按一定的工艺制备了乙醇-柴油微乳燃油助溶剂,在含乙醇 30%、水 0.2% 的分层混合乙醇柴油中加入 2% 的该助溶剂即可使混合液体变得澄清,分层消失。

2.2 节能降污特性

醇类含氧,辛烷值高,这是掺醇燃油能节能降污

的主要原因。其次,研究发现掺醇燃油形成的“油包醇(水)”微小液滴在燃烧过程中也有微爆效应,不过要比“油包水”型弱,掺入适量水可加强微爆效应,提高节能降污效果。醇类的十六烷值和热值较低,掺醇燃油的动力性略低,燃油消耗率(尤其在低负荷下)升高,不过发动机的热效率有所提高^[17]。值得注意的是,由于掺入了醇类,排放物中有未燃的醇类和醛类,但添加非金属离子助溶剂^[16]或十六烷值改进剂可使碳氢化合物(HC)、乙醇、乙醛及 NO_x 排放的浓度明显降低。另外对 HC 和 NO_x 的排放特性,目前的认识还不统一^[16,18-20]。谢洁等^[15]对甲醇-柴油微乳化液的实验结果表明,在对发动机不做任何参数调整的情况下,微乳燃油可以获得与纯柴油相近或略优的发动机动力性和热效率,与燃用柴油时相比,NO_x 排放浓度升高,而碳烟排放浓度降低,另外,在小负荷时喷油量小、缸内温度低,微爆现象较弱,而大负荷时,微爆现象显著。对乙醇汽油的大量研究表明^[21-24],在市售汽油中添加 10%~15% 的乙醇,可以减少 CO 的排放 14%~43%,HC 的排放也可减少 7%~14%,但 NO_x 的排放增加或减少 5% 左右,冷启动性和加速性无明显变化,油耗有所增加。

醇类燃料在使用过程中普遍存在金属腐蚀和供油系统堵塞、橡胶件溶胀、润滑油污染、冷启动困难、易产生气阻及热启动性差等缺点,这也是掺醇燃油今后需要解决的问题。

乙醇在我国主要通过粮食转化获得,原料成本高,且利用率低,能耗很大,因此使乙醇汽、柴油生产成本提高。尽管如此,由于醇类可由煤、天然气及生物质来获得,而我国具有丰富的煤炭、天然气资源,作为农业大国还有大量的生物质原料亟待加工利用,因此,掺烧醇类在节省石油资源、减少环境污染、带动农业以及其他诸多相关产业上具有重要意义。

3 掺植物油及其酯的混合燃料

植物油及其酯可从植物中获取,也可从可再生资源如动物脂肪和已经使用过的油和脂肪中提炼获取。植物油及其酯的性质与普通柴油相当接近,所以主要用在柴油机上。但是,由于生物燃料的成本高,能量消耗高,只能作为补偿能源,多与柴油混合使用。

3.1 植物油-柴油(或醇)混合燃油

植物油单独作为发动机燃料时,因黏度较大、凝点(如棕榈油达 40℃以上)和冷滤点较高及热值较

低,发动机冷启动较困难,动力性也有所下降。另外其燃烧性能较差,不饱和脂肪酸含量高,易发生黏环、喷油器结焦、油路堵塞及润滑油变质等现象,影响柴油机的使用寿命。植物油与柴油或醇直接混合或制成乳状、微乳状液,可降低黏度,提高挥发度,明显改善尾气排放,但长期使用仍会出现润滑油变浑浊甚至凝胶化现象^[19]。因此,直接使用植物油或植物油与柴油混合使用,其结果并不理想。

3.2 生物柴油

一般把植物油经酯化后得到的植物油甲酯称为生物柴油。甲酯燃料是小分子含氧碳氢化合物,与植物油相比,其性质有明显改善,且有些性质如冷滤点、闪点、十六烷值、硫含量、氧含量及生物可降解性等都优于普通柴油。

与普通柴油相比,由于生物柴油含氧量达10%,富氧燃烧对燃油完全燃烧,特别是在高负荷下、高燃料浓度区的燃油完全燃烧有利,可减少CO、HC及碳烟的排放;其次,生物柴油的十六烷值高,燃油着火性能好,滞燃期短,故未燃碳氢和裂解碳氢均少,CO排放量降低;另外,生物柴油几乎不含芳香烃、H/C摩尔比高,故滞燃期短,也使其HC排放降低。因此,生物柴油单独或与普通柴油混合使用,其燃烧和排放性能都是比较理想的。但由于氧原子在燃料燃烧过程中起到了助燃作用,在柴油机结构不改变的情况下,燃烧时的富氧会使NO_x排放增加。

目前,国外对生物柴油的燃烧特性和排放特性已进行了较为系统的研究,结果表明,采用生物柴油的发动机废气排放指标不仅满足目前的欧洲II号标准,甚至满足即将在欧洲颁布实施的更加严格的欧洲III号排放标准。如使用菜籽油甲酯的柴油机,按FTP 75 规程试验时HC排放减少20%,CO排放下降15%,烟度约减少40%,多环芳香烃的排放也减小,而NO_x排放约增加了10%,醛和酮的排放增加了40%^[25]。生物柴油和柴油按一定比例混合后,在柴油机上的使用结果表明:未产生对机器性能的损坏,未增加燃料成本,使用安全性高,排放性能优于纯柴油,完全可以替代柴油^[26-27]。国内对此较为系统的研究报道还较少。袁银南等^[28]的研究表明,与普通柴油相比,燃用纯生物柴油在CO、HC和烟度排放方面分别降低了29.8%、24.98%和43.16%,燃用生物柴油-普通柴油混合燃油时,CO、HC和烟度排放随生物柴油在混合燃料中的掺混比例的增加呈线性关系下降,即生物柴油与普通柴油可以以任意比例混合燃烧而不会改变它们各自的排放特性。葛蕴珊

等^[29]对用色拉油下脚料生产的生物柴油和-20#柴油的研究也得到了类似的结论。生物柴油的主要缺点是甲酯易于氧化和聚合,当它渗入润滑油时会形成堵塞机油泵的油泥。

由此可见,生物柴油是一种清洁燃料,同时由于它可从可再生的植物获得,植物在生长过程中吸收CO₂,这对减少CO₂排放量有重要作用,且植物的生长期远短于石油的生成期,因此,生物柴油是一种极富潜力的绿色、清洁代用燃料,它以其良好的环境效益受到越来越多的关注。我国作为一个动植物资源极为丰富的国家,开展生物柴油的各项研究具有非常重要的意义。今后的重点应放在生物柴油的燃烧和排放特性的研究以及成本低、工艺简单的生物柴油制备技术的开发等方面。

4 结语

矿物油掺烧水、醇类及生物油由于能耗低、污染物排放少,且在掺量不大的情况下无须改动发动机,是当前极具发展潜力的一种代用燃料形式,但上述掺烧形式仍然存在一些不足。结合我国的实际情况,笔者认为,在基本不改变现有发动机结构的情况下,开发“柴油-生物油-醇类(-水)”微乳混合燃料更具有现实意义。因为生物油(如植物油及其酯)与柴油较易混溶,且它们一般含有一OH基团,能和醇类混溶,因此它本身就可以作为柴油与醇类之间的助溶剂,这样在制备微乳燃油时可减少表面活性剂、助溶剂的用量。另外,掺水可加强燃烧过程中的微爆效应,提高节能降污效果。据预测,如在柴油中添加10%的燃料乙醇,并按市场份额的25%~30%计,每年就可以替代大约400万t柴油。如果再掺混10%的生物燃料,则每年就可以替代大约800万t柴油。这样不仅可大大节约石油资源、提高柴汽比、减轻环境污染,同时还可带动煤化工及农业等相关产业,实现生态良性循环和经济可持续发展。

参考文献

- [1] 李文.[J].国际石油经济,2004,12(7):31-36.
- [2] 田春荣.[J].国际石油经济,2004,12(3):9-15.
- [3] 周雅文,张高勇,王红霞.[J].日用化学工业,2002,32(2):1-4.
- [4] 谢新玲,王红霞,张高勇,等.[J].日用化学工业,2004,34(1):13-16.
- [5] 李方,李干佐,房伟,等.[J].化学学报,1996,54(1):1-6.
- [6] Li Xingfu, Wang Jianzhong, Wang Jing.[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 1997, 18(2):108-124.

来这一研究方向的活跃领域。聚二甲基硅氧烷(PDMS)膜以其优异的疏水性、低的渗透阻力以及良好的热力学性质和化学稳定性而被广泛使用,从1981年至今,有学者陆续进行PDMS膜渗透汽化分离有机物的研究, Sampranpiboon等利用PDMS膜从水溶液中分离芳香化合物^[3]; Jiraratananon等利用聚醚共聚乙酰胺(PEBA)分离丁酸乙酯^[4]。最近的工作有刘庆林等利用硅酸盐填充的聚亚酰胺硅氧烯膜从水中分离挥发性有机物^[5]; Lipnizki等考虑到疏水渗透汽化在生物领域中的应用,在从水溶液中分离丙醇时,研究了非渗透组分氯化钠、氯化镁和葡萄糖的影响,这些非渗透组分的加入增加了膜对丙醇的选择性^[6]。

此外,还有Yoshida和Cohen^[7]的研究;She和

Huang研究了原料浓度、浓差极化等的影响,并建立了边界层阻力模型^[8];Liang等在极低的原料体积流量下(0.35~1.0 L/min),从水溶液中分离痕量的1,2-二氯乙烷,建立了阻力模型,并用半经验的Sherwood数关联,实验结果与理论关联一致^[9];Krea等利用厚度仅为10 μm的膜分离乙醇和苯酚^[10];Bowen等使用氧化铝浇铸的多通道整板支撑的沸石膜从水溶液中分别脱出乙醇、甲醇和丙酮等,效果令人满意^[11];Chang等还用多层硅树脂与聚偏二氟乙烯(PVDF)复合膜从乙醇水溶液中分离乙醇,原料中含10%(质量分数)乙醇时,渗透汽化指数达27 900^[12];Gupta等采用羟端基聚丁二烯(HTPB)与聚氨酯脲复合膜从水溶液中渗透汽化脱出苯酚,在60℃下操作,渗透侧苯酚的选择性达到97^[13]。具体参数见表1。

表1 近年在从有机物水溶液中分离有机物的一些主要研究结果

分离对象	膜或膜材料	渗透汽化性能		研究者
		分离因子或富集因子	渗透速率/kg·m ⁻² ·h ⁻¹	
微量甲基叔丁基醚	陶瓷-聚合物膜	68~577	0.31~0.70	Yoshida ^[7]
丁酸乙酯、苯甲醛	聚二甲基硅氧烷-聚偏二氟乙烯复合膜	50	—	She ^[8]
痕量1,2-二氯乙烷	寡硅苯乙烯-聚二甲基硅氧烷复合膜	1000	0.08~0.23	Liang ^[9]
乙醇、苯酚	硅氧烷-共聚聚酰胺	22.0、10.6	2.40、0.56	Krea ^[10]
乙醇、甲醇、丙酮	沸石膜	0.78~8.70	0.17~0.31	Bowen ^[11]
乙醇	硅树脂-聚偏二氟乙烯	31	0.90	Chang ^[12]
苯酚	羟端基聚丁二烯-聚氨酯脲复合膜	97	—	Gupta ^[13]

(上接第17页)

- [7] 吴可克,高学明.[J].节能技术,2003,21(5):14-16.
- [8] 朱步瑶,赵振国.界面化学基础[M].北京:化学工业出版社,1996.115-131.
- [9] Adamy S T.[J].Journal of Dispersion Science and Technology,1994,15(6):727-748.
- [10] 张强,汪晓东,金日光.[J].北京化工大学学报,2001,28(3):24-26.
- [11] 吴生林,朱灵峰,徐翠莲.[J].辽宁化工,1997,26(5):249-252.
- [12] 刘永启,王延遐.[J].淄博学院学报(自然科学与工程版),2002,4(3):32-35.
- [13] 姚胜华,魏建勤,吴楚.[J].浙江大学学报(工学版),2004,38(7):899-901.
- [14] 吴楚,魏建勤,史春涛.[J].内燃机工程,2004,25(2):40-42.
- [15] 谢洁,王锡斌,卢红兵,等.[J].内燃机工程,2004,25(2):1-5.
- [16] 张润铎,贺泓,张长斌,等.[J].环境科学,2003,24(4):1-6.
- [17] 吕兴才,李德钢,杨剑光,等.[J].汽车工程,2004,26(2):131-135.
- [18] 杜德兴,元广杰.[J].环境科学学报,2001,21(6):759-762.
- [19] Altin R, Cetinkaya S, Yucesu H S.[J].Energy Conversion and Management,2001,42(5):529-538.
- [20] Abu-Qudais M, Haddad O, Qudaisat M.[J].Energy Conversion and Management,2000,41(4):389-399.
- [21] 王春杰,王玮,汤大钢,等.[J].环境科学,2004,25(4):113-116.
- [22] Leonga S T, Muttamara S, Laortanakul P.[J].Atmospheric Environment,2002,36(21):3495-3503.
- [23] He Bangquan, Wang Jianxin, Hao Jiming, et al.[J].Atmospheric Environment,2003,37(7):949-957.
- [24] Al-Hasan M.[J].Energy Conversion and Management,2003,44(9):1547-1561.
- [25] Dorado M P, Ballesteros E, Arnal J M, et al.[J].Fuel,2003,82(11):1311-1315.
- [26] da Silva F N, Prata A S, Teixeira J R.[J].Energy Conversion and Management,2003,44(18):2857-2878.
- [27] Wang W G, Lyons D W, Clark N N, et al.[J].Environmental Science and Technology,2000,34(6):933-939.
- [28] 袁银南,江清阳,孙平,等.[J].内燃机学报,2003,21(6):423-427.
- [29] 葛蕴珊,张世鹰,郝利君,等.[J].内燃机工程,2004,25(2):12-14. ■