

柴油机燃用甲醇柴油混合燃料 燃烧与排放性能研究

 周庆辉 著

 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

北京建筑大学学术著作出版基金资助

柴油机燃用甲醇柴油混合燃料 燃烧与排放性能研究

周庆辉 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2015

内 容 提 要

本书介绍了柴油机燃用甲醇柴油混合燃料的燃烧过程和排放特性。从甲醇与柴油混合燃料制取出发,以生物柴油作为助溶剂,分析甲醇与柴油的互溶性,配制出甲醇柴油微乳液的混合燃料;建立甲醇柴油混合燃料在柴油机上燃烧过程的多维数学模型;分析甲醇-生物柴油-柴油混合燃料在柴油机上的燃烧过程;测试在柴油机上燃烧甲醇-生物柴油-柴油混合燃料的常规和非常规排放特性;研究在加速工况下甲醇-生物柴油-柴油混合燃料对柴油机性能的影响等。

本书可供从事柴油机开发和设计的工程技术人员、相关企业和研究所的技术人员阅读,也可供高等院校车辆工程、热能与动力工程等专业本科生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

柴油机燃用甲醇柴油混合燃料燃烧与排放性能研究/

周庆辉著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-5024-7007-4

I. ①柴… II. ①周… III. ①柴油机—混合燃料燃烧
—烟气排放—研究 IV. ①TK421

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 222160 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 廖 丹 美术编辑 杨 帆 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7007-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2015 年 9 月第 1 版, 2015 年 9 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 10.75 印张; 210 千字; 163 页

35.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

近年来，我国在能源领域研究方面的投入不断增加，能源供需矛盾得到有效缓解，但能源结构性矛盾日益明显，我国石油供不应求的问题更为突出。同时，燃料燃烧对环境的影响越来越大，环保法规要求不断提高燃油质量。基于石油能源紧缺和环保的双重压力，寻求替代能源成为未来经济可持续发展的关键。

甲醇是最具有竞争力的可替代燃料之一。它是一种易燃、易挥发的无色透明液体，具有与目前广泛使用的液体燃料极为相近的燃烧性能。甲醇辛烷值高，抗爆性能好，生产原料非常广泛，产品的运输、储存、分装加注和使用与目前市场上供应的内燃机用汽油和柴油极为相似。自20世纪70年代石油危机以来，我国和美国、日本及欧洲许多国家在这方面做了大量的试验并有应用。本书基于此背景，研究利用甲醇作为替代燃料是否能改善柴油机的燃烧和排放特性；通过试验，分析甲醇柴油的互溶性问题，配制甲醇柴油微乳液的混合燃料，利用热力学分析微乳液的形成机理和影响因素；在柴油机结构不改动的条件下，研究混合燃料分别在稳态工况和加速工况下对柴油机性能的影响；在流体力学、热力学和化学反应动力学的基础上，分析混合燃料的燃烧机理和常规排放物生成机理，并对混合燃料进行数值模拟，通过示功图和燃烧与排放试验进行验证；对柴油机燃用混合燃料后的非常规排放物进行台架试验，分析非常规排放物在燃烧化学反应中生成和消耗过程及其影响因素。

本书是作者在甲醇燃料研究方面多年成果的总结，可供从事柴油机开发和设计的工程技术人员、相关企业和研究所的技术人员阅读，也可供高等院校车辆工程、热能与动力工程等专业本科生、研究生参考。

本书在写作过程中得到了中国农业大学纪威教授、中国重汽集团符太军高级工程师、普罗名特流体控制（大连）有限公司张剑锋高级工程师、北京建筑大学杨建伟教授和孙建民教授等的帮助和指点，并得到了北京建筑大学学术著作出版基金的资助，在此表示感谢。

由于时间紧迫，加之水平有限，不当之处在所难免，敬请读者谅解，并欢迎对本书提出宝贵意见。

作 者

2015 年 4 月于北京建筑大学

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价 (元)
化石能源走向零排放的关键——制氢与 CO ₂ 捕捉	乔春珍	18.00
生物柴油科学与技术	舒 庆 等	38.00
生物柴油检测技术	苏有勇 等	22.00
车辆燃料生命周期能耗和排放分析方法	高有山	29.00
钢铁冶金原燃料及辅助材料 (本科教材)	储满生	59.00
大型循环流化床锅炉及其化石燃料燃烧	刘柏谦 等	29.00
燃料及燃烧 (本科教材)	韩昭沧	29.50
燃料电池 (第2版) (本科教材)	王林山	29.00
冶金原燃料生产自动化技术	马竹梧 等	58.00
燃料电池及其应用	隋智通 等	28.00
蓄热式高温空气燃烧技术	罗国民	35.00
高性能复合相变蓄热材料的制备与蓄热燃烧技术	王 华	30.00
烧结烟气排放控制技术及工程应用	朱廷钰 等	89.00
铁矿石烧结过程二噁英类排放机制及其控制技术	俞勇梅	35.00
二噁英零排放化城市生活垃圾焚烧技术	王 华	15.00

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 替代燃料的发展现状与趋势	3
1.1.2 甲醇在替代燃料中的地位	4
1.1.3 甲醇在应用中应解除的疑虑	4
1.2 甲醇在内燃机中的应用与发展	5
1.2.1 掺混方式燃烧甲醇柴油燃料	5
1.2.2 纯甲醇燃烧方式	8
1.3 甲醇燃料在柴油机应用中存在的不足	9
1.4 本书采用的技术路线	9
第2章 甲醇柴油微乳液的制取	11
2.1 微乳液概述	11
2.2 微乳液的形成机理	13
2.2.1 物质互溶的理论基础	15
2.2.2 多液互溶的理论基础	18
2.2.3 表面活性剂理论	21
2.3 微乳液形成热力学	24
2.3.1 微乳液的热力学稳定性	24
2.3.2 微乳液的动力学稳定性	25
2.4 制取甲醇柴油微乳液的试验研究	26
2.4.1 助溶剂的选择与匹配	26
2.4.2 微乳液的制取方法	27
2.4.3 不同助溶剂的试验	28
2.5 乙醇在微乳液中的影响	32
2.5.1 乙醇-生物柴油-柴油三相体系的互溶性	32
2.5.2 甲醇-生物柴油-柴油三相体系的互溶性	35
2.5.3 乙醇-生物柴油-柴油体系与甲醇-生物柴油-柴油体系的对比	37
2.5.4 甲醇-乙醇-生物柴油-柴油四元混合燃料的互溶性	37

2.6 甲醇柴油微乳液形成的热力学函数计算方法及分析	39
2.6.1 计算方法	40
2.6.2 影响因素分析	41
第3章 甲醇柴油微乳液的配制及理化特性研究	44
3.1 试验装置及试验方法	44
3.1.1 试验设备与材料	44
3.1.2 试验试剂	44
3.1.3 试验方法	44
3.2 甲醇柴油微乳化燃料的配制	44
3.3 甲醇-生物柴油-柴油混合燃料的主要理化特性研究	46
3.3.1 冷滤点	46
3.3.2 密度	46
3.3.3 黏度	47
3.3.4 蒸馏特性	48
3.3.5 表面张力	48
3.3.6 十六烷值	49
3.3.7 热值	50
3.3.8 腐蚀性	51
第4章 甲醇-生物柴油-柴油混合燃料燃烧的数学模型	53
4.1 基本控制方程	53
4.2 湍流方程	54
4.2.1 湍流数值模拟方法	54
4.2.2 近壁函数方程	56
4.3 喷雾方程	57
4.3.1 油滴碰撞模型	58
4.3.2 油滴蒸发模型	59
4.3.3 油滴阻力模型	61
4.3.4 油滴喷雾液相模型	61
4.3.5 离散相与连续相联系方程	64
4.4 化学动力学反应	64
4.4.1 基元反应	65
4.4.2 反应机理的敏感性分析	66
4.4.3 热力学-化学动力学反应	67

4.5 排放模型	68
4.5.1 氮氧化物排放模型	68
4.5.2 碳烟排放模型	70
第5章 发动机试验台架测试系统的开发	72
5.1 内燃机测试	72
5.1.1 发动机试验台架简介	72
5.1.2 发动机台架性能试验	72
5.1.3 内燃机性能参数的主要特点	75
5.2 传感器与数据采集系统理论	76
5.2.1 传感器的组成及分类	76
5.2.2 数据采集系统理论	76
5.3 发动机 CAT 系统的设计方案	78
5.3.1 硬件平台	79
5.3.2 软件结构	87
5.4 实验线路抗干扰措施	100
5.4.1 硬件方面	101
5.4.2 软件方面	101
第6章 柴油机燃用甲醇-生物柴油-柴油混合燃料的试验研究	102
6.1 试验设备	102
6.1.1 柴油机	102
6.1.2 测试仪器	102
6.1.3 台架布置示意图	103
6.1.4 发动机 CAT 测试系统	103
6.1.5 试验用燃料的制备	104
6.2 柴油机示功图的测试	104
6.2.1 示功图	104
6.2.2 测试系统缸压数据的采集	105
6.2.3 上止点的测录和标定	106
6.3 试验结果分析	106
6.3.1 混合燃料的外特性比较	106
6.3.2 混合燃料负荷特性分析	107
6.3.3 常规物排放特性分析	109
6.3.4 非常规排放物排放分析	112

6.3.5 混合燃料的燃烧特性分析	113
6.3.6 混合燃料循环变动分析	115
第7章 模型的验证及其应用	119
7.1 数学模型的实现	119
7.1.1 柴油机参数的选取	119
7.1.2 边界条件	119
7.1.3 初始条件	120
7.1.4 网格划分	121
7.2 试验验证	122
7.2.1 甲醇-生物柴油-柴油混合燃料示功图的比较	122
7.2.2 甲醇-生物柴油-柴油混合燃料的 NO_x 排放特性比较	123
7.3 模型的应用与分析	124
7.3.1 混合燃料燃烧与排放的分析	124
7.3.2 不同甲醇含量对燃烧排放的影响	131
7.3.3 不同循环供油量对燃烧的影响	136
第8章 甲醇-生物柴油-柴油混合燃料加速工况的分析与研究	141
8.1 柴油机加速工况与相对应的稳定工况比较	141
8.2 加速工况下柴油机循环指标的理论分析	142
8.3 加速工况的分析方法与求解	143
8.4 加速工况下转速变化分析	145
8.5 加速工况下柴油机每循环供油量变化分析	146
8.6 柴油机自由加速工况下的示功图分析	146
8.7 加速工况下的燃烧过程分析	149
8.7.1 滞燃期	149
8.7.2 燃烧持续期	149
8.7.3 加速过程中的燃烧化学反应机理	150
8.8 加速工况下缸内过程的动力性评价问题	150
8.9 加速工况下碳烟与 NO_x 的预测	151
附录 甲醇-生物柴油-柴油混合燃料简化反应式	153
参考文献	155

第1章

绪 论

1.1 引言

随着世界经济的发展,对石油的需求大量增加。2010 年全球石油日消耗量为 8740 万桶;2014 年全球石油日消耗量为 9050 万桶;各地区经济发展也必将推动能源需求增长。2015 年 1 月加拿大原油日产量达 390 万桶,创历史最高水平,同比增加 20 万桶;2015 年 2 月美国原油日产量为 926 万桶,同比增加 120 万桶,环比增加 8 万桶,创 1973 年以来最高水平。2015 年 1 月欧洲 16 国炼厂原油日加工量达到 1046 万桶,为 2013 年 8 月以来最高水平,同比大幅增加 76 万桶。预计,全球石油消耗量至少每年将日增 100 万桶,到 2025 年石油日消耗量可能达到 1.05 亿桶。图 1-1 所示为全球石油需求增速及石油供给缺口形势图^[1]。

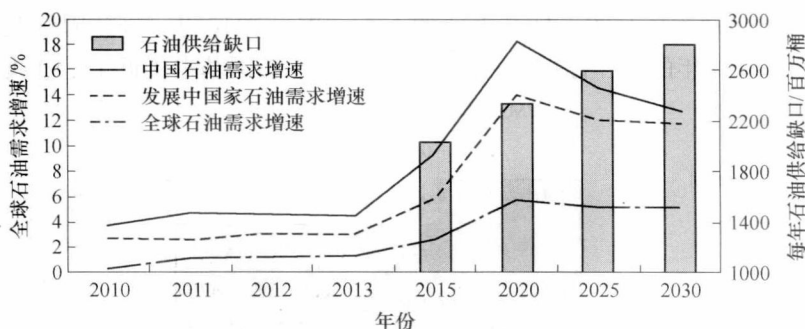


图 1-1 全球石油需求增速及石油供给缺口形势图

我国汽车保有量的增加促进了石油的消耗量,带来了原油短缺的问题。2013 年年末,我国私人汽车拥有量达到 10501.68 万辆,首次突破 1 亿辆,相比于 2012 年年末同比增长了 18.8%。国家统计局公布的《2014 年国民经济和社会发展统计公报》中的数据显示,2014 年年末我国民用汽车保有量达到 15447 万辆(包括三轮汽车和低速货车 972 万辆),比上年末增长 12.4%,其中私人汽车保有量 12584 万辆,增长 15.5%^[2]。原油短缺将导致石油对外依存度提高,成为制约我国经济发展的长期压力。1993 年,我国首度成为石油净进口国,但当年的

石油进口依存度只有 6%，到 2006 年突破 45%，2007 年为 47%，2008 年为 49%，2009 年首度突破 50%，2013 年已超过了 58%^[3]，预计到 2020 年，我国的石油需求将会达到 5 亿吨左右，国内原油最大的产量也只能维持在 1.8~2.0 亿吨，届时我国石油供应对外依存度将超过 60%。石油是不可再生能源，石油的储备量在逐步减少，随着我国汽车保有量的不断增长，汽车燃料消耗量占成品油消耗总量的比例还将继续增加，能源短缺的问题已经成为需要迫切解决的问题。寻求新的能源尤其是可再生资源具有重要的战略意义。

石油燃料燃烧后所生成的有害物质已成为最重要的大气污染源。环境保护部《2013 年中国机动车污染防治年报》称，机动车污染已成为我国空气污染的重要来源，是造成灰霾、光化学烟雾污染的重要原因。2012 年，全国机动车排放污染物 4612.1 万吨，四项污染物排放总量与 2011 年基本持平，其中 NO_x 为 640.0 万吨、PM 为 62.2 万吨、HC 为 438.2 万吨、CO 为 3471.7 万吨^[4]。在我国大中城市空气污染源中，机动车污染占到了 20%~30%，其中上海交通（港口）占 25.8%，北京达到了 31.1%，广州达到了 23.14%^[5]。因此，控制机动车尾气有害物质的排放十分重要。

根据环保与可持续发展的要求，世界各国均以越来越严格的排放法规来限制传统车用动力的排放污染量，或者以政策导向鼓励发展节能绿色燃料。图 1-2 所示为各国重型柴油车排放法规发展示意图。该图表明：2008 年实施的国 III 标准，其 NO_x 排放限值是欧 I 标准限值的 1/4，PM（颗粒物）排放限值是欧 I 标准的 1/8；2010 年的国 IV 标准达到了欧 IV 标准，而美国基本接近于零排放。

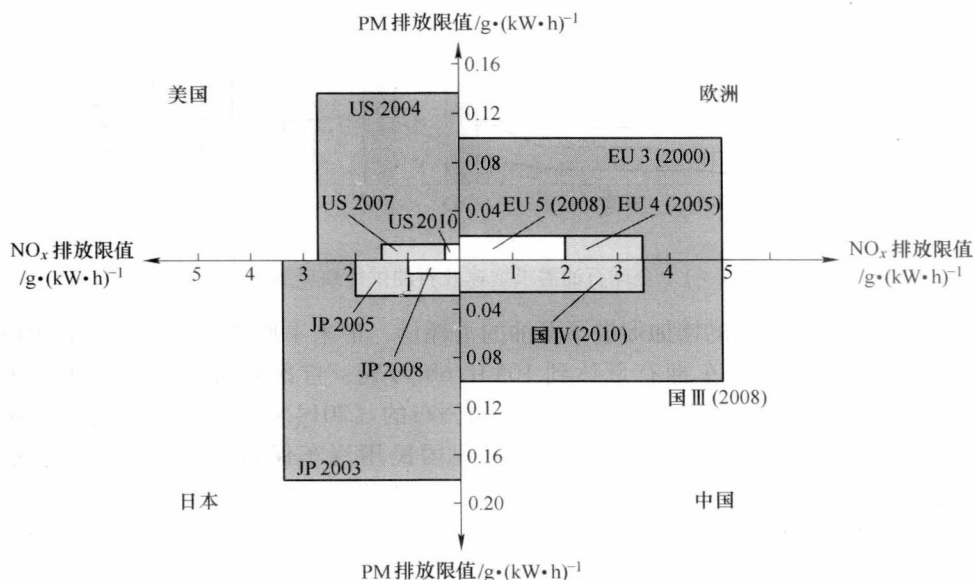


图 1-2 各国重型柴油车排放法规的发展

CO₂ 排放由于与燃料经济性密切相关也受到了世界各国的关注。美国 PNGV 计划中提出的中级轿车每百公里耗油量为 3L 的目标已成为各大汽车概念车和新型车的设计出发点。欧盟委员会也提出了有关 CO₂ 排放控制的指标,要求各生产厂家按销售量加权的汽车,其 2014 年 CO₂ 平均排放量降低至 123.4 g/km, 2021 年的汽车 CO₂ 排放量目标是 95 g/km^[6]。

面临车用燃料日益短缺以及改善排放包括 CO₂ 排放控制等问题,科研人员不断研究各种技术措施来缓解和改善现状。例如,对内燃机进行技术改进,采用良好的进气系统、多点喷射技术,提高燃油喷射压力等来改善燃烧过程;采用电控技术来精确控制怠速、部分负荷和过渡工况的喷油量;采用 EGR 技术等净化措施来改善尾气排放等。单纯依靠改进内燃机燃烧系统还不能同时解决能源短缺和环境污染控制两个问题,采用替代能源是一种有效的技术措施。国内外研究使用的清洁替代燃料主要有压缩天然气 (CNG)、液化石油气 (LPG)、二甲醚 (DME)、碳酸二甲酯 (DMC)、醇燃料、生物柴油及氢。

1.1.1 替代燃料的发展现状与趋势

车用燃料及其来源如图 1-3 所示。图中的左侧是传统内燃机——汽油机和柴油机,燃料主要来源于石油。中间部分是应用和发展的多元化燃料,主要是含氧燃料内燃机和非含氧燃气内燃机,其燃料既可以从煤和天然气中制取,也可以从生物质能中获得。从中长期来看,应开发和应用生物质能及生物燃料。右侧部分是远期着重开发试验的氢燃料,即燃料电池和混合动力系统。以当前的技术水平将传统内燃机改进,可以减少 50% 的能源与环境成本。燃料电池和混合动力系统虽然可以降低更多的能源与环境成本,但还不能弥补制造车辆所花费的成本^[7]。当然,从排放的角度来看, H₂ 是最理想的气体,但是 H₂ 的来源、储存以及汽车本身的重量、成本等问题在短时间内不容易解决。据估计,在美国若要应用 H₂, 其基础设施的投资将高达 4800 亿 ~ 5600 亿美元^[8]。Carlo. N. Hamelinck

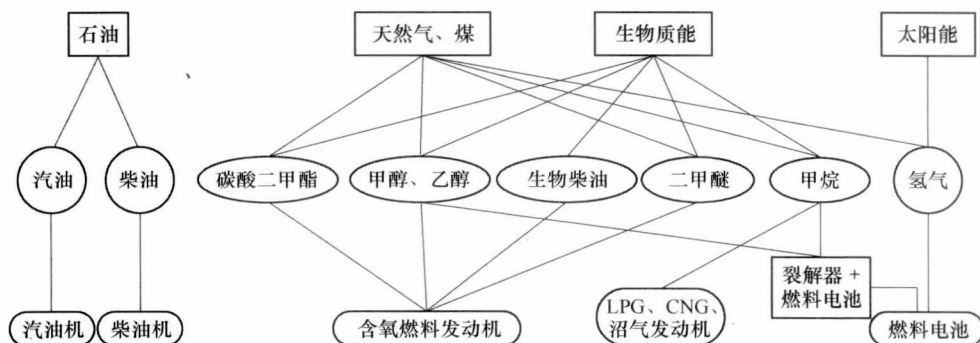


图 1-3 车用燃料及其来源

进行综合分析后也指出,就目前来看,甲醇和 Fischer - Tropsch 法合成燃料是最好的动力燃料;从中期来看,乙醇是有发展的燃料;从长期来看,氢是理想的燃料^[9]。因此,进行常规的内燃机开发和使用替代燃料依然是目前研究的重点。

1.1.2 甲醇在替代燃料中的地位

替代燃料必须具备两个特点:一是资源广泛。燃料的资源要充足并可在广泛的领域内使用,且不会对子孙后代产生巨大的或者不可弥补的危害。二是具有低的含碳量或者不含碳,有利于保护环境。甲醇含氧,碳氢比为 1/4,能够自供氧完全燃烧,从而减少了 CO 生成的条件,使得 CO 和 HC 排放减少,是最有前景的替代燃料之一^[10,11]。

甲醇的原料来源广泛,价格便宜。它可以从煤和木材中制得,也可以用二氧化碳加氢制得,凡是可以得到 CO 和 H₂ 的原料都可以合成甲醇,当前甲醇主要从煤中制取。甲醇还可以从许多化工和制药工业的副产品中获得。生物甲醇也可以从可再生物质中制取,属于可再生能源。甲醇的优点还有其制造工艺十分成熟,与柴油、汽油同属于液体燃料,燃用时内燃机改动较少,还可以和液体石油燃料混合燃用。我国能源的基本国情是富煤贫油,煤资源比天然气的资源丰富得多,发展煤基石油替代燃料是实现能源多样化战略转移、保障汽车工业快速发展的重要举措,与其他国家相比,醇类燃料是车用替代能源的重要选择^[12]。

醇类燃料还能够降低有害排放物及 CO₂ 排放。国际车用燃料发展趋势及我国政策都明确指出,汽车要逐步减少矿物燃料的使用,扩大醇类燃料及生物燃料的用量。多年研究表明,醇类燃料是汽车液体替代燃料的首选^[13]。

1.1.3 甲醇在应用中应解除的疑虑

燃料的毒性和环境安全性以及对生态环境的影响一直是甲醇在推广应用中的疑虑^[14],所以甲醇作为车用燃料没有受到足够的重视^[15]。最近,国内外已有大量权威科学结论证实,甲醇与汽油一样,均属中等毒性燃料,而且甲醇的综合毒性还要低于石油燃料。汽油和醇对生态的影响若用百分衡量,汽油为 100,乙醇为 50,甲醇为 30。在水中,甲醇及乙醇的生物降解过程要比原油或者汽油迅速得多。对陆地生态环境的影响,甲醇也没有汽油的影响严重^[13]。福特汽车公司原负责替代燃料汽车开发的经理 Roberta Nichols 博士认为^[16],虽然甲醇是有毒的,但其他燃料包括汽油也是如此。她又指出,美国国家环保部(EPA)在 20 世纪 80 年代对甲醇及甲醛的毒性进行了研究后认为,甲醇作为运输燃料使用没有潜在的健康危险。在火灾方面,由于甲醇的许多物理特征使得它比汽油更安全。加拿大皇家军事学院的 R. H. Vaivads 也指出,甲醇的危险性和汽油没有太大的差别^[17]。四川大学对全甲醇燃料汽车尾气的生物学效应进行了研究,结果表

明,全甲醇燃料汽车尾气对人体健康可能会有一定影响,但其危害性显著小于汽油燃料汽车尾气。从减少环境污染和可能对人体健康的危害出发,应用全甲醇作为新的取代汽油的汽车燃料,其前景是乐观的^[18]。

1.2 甲醇在内燃机中的应用与发展

20 世纪 70 年代世界第二次石油危机后,世界各国相继开展了甲醇燃料在内燃机中的应用研究,取得了一些重要的研究和实用经验。德国、瑞典、新西兰曾先后推广 M15 甲醇汽油。美国于 1987 年也开始推广 M85 汽油^[15]。1988 年,在排放要求严格的洛杉矶等地的公交车和校车上使用了甲醇燃料^[19]。福特公司和通用公司也于 20 世纪 80 年代中期相继开发了灵活燃料汽车。德国大众汽车公司从 1984 年起对 200 辆燃用 M85 的甲醇燃料汽车进行了试验,之后又对燃用 M100 的甲醇汽车进行了试验^[20]。加拿大政府早在 1985 年就投资 800 万美元用于大型甲醇发动机的研制与开发。瑞典沃尔沃公司开发了二次喷射甲醇发动机。印度技术学院和印度石油学院也较早地研究了甲醇燃料。日本汽车研究所从 1980 年开始进行甲醇燃料的实用性开发研究,1983 年又着手研究重型车用甲醇发动机。欧洲化学技术公司建设的一套位于尼日利亚格拉斯的日产 7500t 甲醇的单系列甲醇装置已于 2006 年投产竣工^[21]。2014 年山西北达发动机制造有限公司启动年产 10 万台发动机(甲醇)项目^[22]。我国的一些研究大部分在汽油机上开展,例如大同汽车制造厂对传统汽油机结构进行重大改革,试制成功了国内第一台全甲醇发动机;山西省交通科学研究所和山西省交通运输管理局通过实地试验指出 M15 满足了汽车的使用要求,具备了推广使用的条件^[23]。这些研究和试验均为甲醇燃料的使用和推广奠定了基础,但还主要应用于汽油机上。由于汽油机的压缩比较小,热效率较差,不能充分发挥甲醇辛烷值高的优点,因此,在柴油机上燃用甲醇的研究一直是替代燃料的研究热点之一^[24~27]。

目前,甲醇在柴油机中的应用,按照燃烧方式不同主要有双燃料掺混燃烧和纯甲醇燃烧两种形式,如图 1-4 所示。

1.2.1 掺混方式燃烧甲醇柴油燃料

根据甲醇掺混方式的不同,掺混燃用甲醇的方法主要有进气道内预混甲醇、燃烧室内喷射甲醇和组合燃烧法。

1.2.1.1 进气道内预混甲醇

进气道内预混甲醇是指甲醇在进气道内与空气预先混合,进入气缸后再由柴油点燃。根据供醇方式不同,可以分为熏蒸法、化醇器法、双燃料法和甲醇蒸气法。

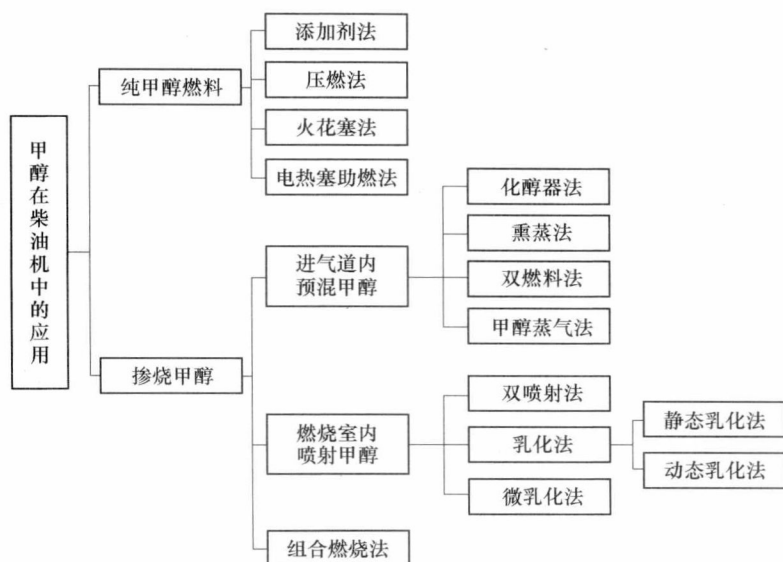


图 1-4 甲醇在柴油机中的应用

熏蒸法和甲醇蒸气法是利用醇燃料表面张力及黏度低的特点，使用排气或循环水余热将醇燃料雾化，并与空气混合后进入气缸。甲醇的蒸发温度、蒸发量对燃料的燃烧状况有着很大的影响，要实现这两个参数的准确控制较为困难^[28]。利用这种方法可以实现不大于 M20 的甲醇柴油混合燃料的燃烧，结果表明甲醇燃料有明显降低燃油消耗率和烟度的作用^[29]。

化醇器法根据化油器原理来实现供醇，即在进气道处安装化醇器，利用进气时的负压将甲醇吸入进气道内，与空气混合后进入气缸。双燃料法是在进气道内安装喷油器，在进气冲程喷射甲醇，与空气雾化混合后进入气缸。显然，双燃料法不受进气负压的影响，比化醇器法准确且能大比例地供给甲醇。还有许多研究者制作了供醇量控制机构^[30]并在台架上进行了预混合甲醇的试验，研究结果表明：在甲醇的吸入量为 22% ~ 56% 的范围内，柴油机的工作性能稳定，动力性和经济性均有提高，排气温度下降，排气烟度明显改善，并在常温下具有良好的起动性能^[31]；在高比例甲醇柴油双燃料工作模式下，柴油发动机的 HC 和 CO 排放有所升高，但 NO_x 和碳烟排放大幅度下降^[32]。进气道口电控喷射甲醇，可以精确控制甲醇喷射量，使燃烧达到最佳状态，其最高爆发压力下降，压力升高率上升，排烟和 NO_x 大幅度下降，但 THC 和 CO 排放均升高^[33]，高负荷时发动机有效热效率增加而 CO 排放与柴油基本相当^[34]。美国环保局在 Volvo 柴油机上进行试验，结果表明，NO_x 减少约 50%，HC 有所减少，CO 基本相当^[35]。双燃料法的研究十分活跃，因为它能精确控制甲醇供给量和供给时间，较好实现柴油引燃甲醇均质预混合气，降低有害物质的排放。这种方法由于需要对发动机结构进行

改造,因而应用上还具有一定的局限性。

1.2.1.2 燃烧室内喷射甲醇

双喷射法是两个燃料喷射系统向燃烧室喷射燃料,一个喷射甲醇,一个喷射柴油,混合气在缸内混合,同时燃烧。这种系统需要在缸盖上布置两个喷油嘴,这对于小缸径柴油机是十分困难的,而且喷油器安装的位置与角度也会影响混合气的形成和燃烧,会造成碳烟、 NO_x 、THC 和 CO 都增加^[36,37]。

如果能不改动发动机的结构就实现燃烧室内喷射甲醇是最理想的办法,乳化法和微乳化法应运而生。

将醇形成细微液体颗粒,分散于油中,可以形成乳化液。乳化液的制备方法有两种:一是稳态乳化液法,二是动态乳化液法。稳态乳化液法是利用乳化剂使甲醇分散到柴油中,并在适当的条件下保持长期相对稳定的状态^[38,39]。动态乳化液法是通过搅拌、超声波等作用使甲醇与柴油充分混合,形成非稳定状态的“油包醇”乳状液。国外进行了乳化液的配制及其在公共汽车、重型车、轻型车等上的应用研究^[40~45],结果表明:在不改动结构的情况下,乳化燃油能同时降低 NO_x 和 PM 的排放^[46~48],且能提高热效率,减少热损失,从而降低油耗^[49,50]。另外,柴油机燃用乳化油时,还与柴油机的运转工况^[51~58]、燃油喷射系统的参数^[59,60]和燃烧室的最佳匹配相关^[61],适当地调整柴油机的结构参数和运转参数,效果将更好。国内很多机构也对乳化燃油进行了深入研究:山东理工大学采用了添加乳化剂并机械搅拌的方法制备了柴油甲醇水乳化液,能使乳化液稳定 35~50 天^[62,63];中国科学院力学所研究了柴油甲醇和水乳化液的流变特性^[64];天津大学对不同配比的柴油甲醇乳化燃料进行了研究,结果表明,D85M7.5W7.5 具有较好的燃烧特性,发动机的动力性、经济性和排放指标都得到了改善,最高有效热效率比燃用纯柴油时提高了 2.82%^[65]。另外,形成乳化液的方法也可以通过随车乳化装置在线实现^[66~68]。

甲醇柴油在一定的助溶剂作用下,可以互溶形成透明溶液,这就是微乳化法。微乳液燃料比较难于实现,所以其研究发展受到局限而滞后于乳化液。由于微乳液比乳化液稳定性好,混合均匀,能改善燃料雾化与燃烧,随着助溶剂技术的发展,国内外对微乳化的研究也越来越深入^[69~76]。微乳液在柴油机上的应用试验表明:随着甲醇添加比例的增加,柴油机的动力性有所下降,柴油机烟度和 CO 的排放量都明显降低,但 HC 和 NO_x 的排放量有所增加^[77]。

1.2.1.3 组合燃烧法

组合燃烧理论的核心是在柴油机起动、暖车以及小负荷工作时,发动机靠纯柴油工作,实行扩散燃烧。而在中高负荷工作时,在发动机进气系统中喷入部分