

特色专题

甲醇用于热力和动力燃料的技术现状及展望

姚春德¹, 李云强², 姚安仁³

摘要 针对甲醇作为燃料属性的转变,论述了其作为燃料在热力燃烧和内燃动力装置中应用的主要方式,具体包括热力燃烧,直接用于工业窑炉、取暖锅炉、灶具等领域;内燃动力燃烧,主要作为点燃式发动机(替代汽油)或压燃式发动机(与柴油组合)的燃料,用于车辆、船舶等动力装置。重点介绍内燃动力装置中的应用体现在高辛烷值适合点燃、但低蒸发性与腐蚀性带来冷起动挑战,并通过二元燃料技术克服压燃难题,以供甲醇作为燃料进一步高效和清洁应用提供参考。针对中国拥有全球最大的甲醇产能和产量基础,指出在二氧化碳与氢气合成等绿色制取技术上快速发展等优势,从政策上明确管理部门将甲醇燃料与传统燃料并轨;技术上拓宽车船多元应用、完善零部件体系,大力推广应用绿色甲醇燃料。

关键词 甲醇燃料;热力燃烧;动力燃烧

中国是全球最大的工业生产国,每年能源需求量极大,特别是连续多年对进口石油依存度超过 70%,中国能源安全面临挑战。另外,中国又是全球最大的甲醇生产国,产能和产量均占全球的 60% 左右。随着经济的发展和技术的进步,每年的甲醇产能和产量仍在不断增加,2024 年产量达到 8677 万 t,整体产能将达到 1.19 亿 t,其中新增 785 万 t^[1]。2023 年,在中国甲醇的应用中,作为燃料应用约占现有甲醇产量的 15.66%^[2]。因此,积极发展和大力推广应用甲醇燃料,对于缓解国家能源安全压力意义重大。

目前,作为低碳和具有碳中和潜力的甲醇燃料,在全球减碳路线上得到全面认同。中国在 CO₂ 与 H₂ 合成及生物质加氢制取绿色甲醇产业上取得快速

发展,将为全球减碳和减少化石能源消耗作出重要贡献。1994 年诺贝尔化学奖得主,美国南加州大学教授乔治·安德鲁·欧拉(George Andrew Olah)在其《跨越油气时代—甲醇经济》的著作中预言,未来甲醇将会在能源等领域发挥其重要作用^[3]。根据全球的低碳发展需求以及中国在绿色甲醇生产能力方面所具有的优势,积极发展其作为燃料将成为国家未来可持续能源领域发展的重要方向。

1 甲醇燃料的特性

甲醇的化学结构是 CH₃OH,包含 1 个碳原子和 3 个氢原子以及 1 个羟基,属于单一化合物。甲醇作为燃料的特点很突出,主要体现在以下 3 个方面。一是与汽油和柴油一样,甲醇常温和常压下同为液体,这给运输、储存和加注带来方便。其密度介于汽油和柴油之间。二是甲醇的汽化潜热很高,为 1167 kJ/kg。

1. 天津大学机械工程学院,天津 300072

2. 先进内燃动力全国重点实验室,天津 300072

3. 天津大学环境学院,天津 300072

收稿日期: 2025-08-08; 修回日期: 2025-11-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51336005); 科技部 863 课题(2012AA111719)

作者简介: 姚春德,教授,研究方向为内燃机清洁替代燃料,电子邮箱: arcdyao@tju.edu.cn

引用格式: 姚春德, 李云强, 姚安仁. 甲醇用于热力和动力燃料的技术现状及展望[J]. 科技导报, 2025, 43(22): 77-85; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.08.00032

是汽油 3.76 倍和柴油的 4.3 倍。在形成混合气过程中需要消耗较多的外界热量。三是甲醇的热值相比汽油和柴油要低,是汽油的 46.5%,柴油的 46.9%。作为内燃机燃料时,因其热值低,所以直接燃烧时的消耗量较大。另外,甲醇的辛烷值高,适合在点燃式发动机上应用,而难以直接压燃。

综上所述,甲醇作为燃料,其性能与汽油和柴油相比,共性与差异性并存。因此,直接运用到现有的内燃机上,不论是点燃式还是压燃式,都需要在燃烧技术方面做出相应的改变。

2 甲醇燃料的主要应用方式

2.1 甲醇燃料在热力装置上的应用

甲醇作为燃料应用在热力装置上是通过燃烧将其中的化学能转变为热能。目前主要用于民用灶具、取暖锅炉、工业窑炉、农林副产品的干燥、农产品大棚等方面。甲醇常温常压态下是液体,不仅储存和运输十分便利,也常常应用在自动控制中。用作燃料时通过特定装置将其气化后形成的混合气点火能量小,采用普通的电火花即可将其引燃工作。因此,甲醇燃料在热力领域得到广泛应用,每年的甲醇燃料使用量达到数百万吨,在高效清洁燃料方面发挥重要作用。

大型企业用供暖锅炉由原先燃煤锅炉改造而成,将原先由人力补煤改为自动控制甲醇喷射供热,不仅大幅降低了劳动强度,也使燃烧效率得到提高。甲醇是液体,通过高压喷射雾化,使形成的混合气呈气相燃烧,改变了燃煤时气固相燃烧的模式,使排放中的颗粒物和氮氧化物含量极大地减少,燃烧效率提高的同时,也将排气品质大幅提高。不仅如此,取消了大型的煤炭和煤渣的堆积场,减少了煤炭运输量,仅需少量的槽罐车运送甲醇即可,使整个取暖中心的环境得到全面净化。

全国各地广泛使用的甲醇灶具产生的火焰与天然气和液化石油气(LPG)十分类似,不同的是,甲醇灶具使用的甲醇燃料常温是液体,其安全性更高。此灶具在工作中,利用炉灶的余热为进给的甲醇加热,使其快速气化,燃烧得更高效、更清洁。

烧制陶瓷的工业窑炉采用甲醇燃料烧制的陶瓷,可以很好地控制炉温,使烧制的陶瓷表面更加光滑,

色彩更加绚丽,能够烧制一些高质量的产品。2022 年在北京举办的冬奥会的吉祥物“冰墩墩”就是采用甲醇燃料的窑炉烧制而成。

烟叶的干燥现场^[4]的干燥炉是由燃煤干燥炉改制而成。传统的燃煤干燥炉采用反射式热气干燥法,即采用燃煤加热通道,将鲜叶铺设在通道壁面烘烤。这种做法一是能量利用效率低,二是贴在热面的鲜叶容易过度加热而影响质量。改为甲醇燃料后,采用甲醇燃烧的尾气直接加热,使燃烧产生的热量得到充分利用。不仅如此,甲醇燃烧的尾气中含有较多的水,加热时可以有效控制对烟叶鲜叶的脱水速度,大幅提高了烟叶的出场品质。除了以上干燥采用甲醇燃料之外,在植物大棚的温湿度调节中,甲醇燃料也有很多的应用。与其他大棚的调节能源不同,甲醇在大棚的植物生长环境参数调节方面独具特色。除了调温之外,甲醇尾气含水量较高,易于棚内调节湿度;然后甲醇燃烧不同于柴油等燃料,无色无味;再者甲醇尾气含二氧化碳,对植物生长而言是“气肥”,促进植物生长;最后甲醇是液体,便于控制,可以实现无人值守的自动化控制。

中国正在进入农村利用能源方式的转换时期。从早年的直接燃烧农林废弃物,如秸秆类,过渡到煤炭,现正在向新能源时代转换。民用灶具、农林产品干燥、北方地区的冬季取暖、植物大棚等现代化农业都对能源的需求很高,甲醇作为一种新型可持续发展的燃料将为农业振兴发挥重要作用。

2.2 甲醇燃料在内燃动力装置上的应用

国际上甲醇作为车用燃料开发始于第二次世界大战。由于作战国的石油燃料缺乏,便开始以褐煤为原料,经费-托合成生产甲醇以替代汽油燃料。二战结束后,由于石油燃料供应充足,此项工作便相应停止。直到 20 世纪 70 年代在中东爆发了第 4 次战争,产油国对西方工业国实施石油禁运。为了应对由此产生的石油危机,发达国家开启了替代石油的燃料研究。1973 年 12 月,美国麻省理工学院 Reed 等^[5]在《Science》发文,指出甲醇不仅可以作为替代燃料应用以解当前石油短缺的困局,而且甲醇含氧可以大幅度减少汽油的排放。在石油公司的支持下,美国的福特汽车公司为此开发了使用含量 85% 甲醇的 M85 专用车型,开展了为期 10 年的甲醇试用工作^[6]。其后,随

着石油供应的缓和以及汽车尾气控制技术的发展,甲醇作为燃料在美国市场上失去了竞争力。欧洲、日本、韩国在此过程中也开展了一些研究。德国开发的应用甲醇燃料的桑塔纳车在1984年的洛杉矶奥运会上作为大会用车。随着对二氧化碳等温室气体排放的关注,全球对采用甲醇作为低碳燃料的关注也随之提高。发达国家再次开始关注甲醇燃料汽车,但尚未见到产品上市^[7]。

中国将甲醇用作车用燃料的研究工作始于20世纪70年代。由德国和美国福特公司提供甲醇乘用车与中国科学院合作,研究甲醇燃料在车辆上应用的适用性。至21世纪初,在国家科技部门支持下,部分甲醇富产地区如山西等省份,一直在着力推动甲醇燃料在本地地区车辆的应用工作。2012年,中华人民共和国工业和信息化部节能司开展了由山西、陕西、甘肃、贵州以及上海的“四省一市”甲醇汽车的试点工作^[8]。试点工作于2018年底完成并通过了验收。试点的内容主要对车辆应用甲醇燃料时的动力性、经济性、环保性、安全性、可靠性和适用性进行考核。试点的结论不仅证明了甲醇用作汽车燃料是可行的,更重要的是消除了社会上对甲醇作为燃料的担心与认知上的误区。2019年3月19日,工业和信息化部等8个部委联合发布《关于在部分地区开展甲醇汽车应用的指导意见》^[9]。随后,2020年11月,生态环境部发布甲醇汽车尾气的检测方法,同年12月,工业和信息化部发布

了《甲醇汽车纳入国家公告管理的通告》。采用甲醇燃料的汽车在中国的发展已经得到政府政策的全面支持。作为一种有别于汽油、柴油的新型燃料,甲醇在内燃机应用中按照其特性主要有以下类型。

2.2.1 甲醇在点燃式车用动力上应用

由甲醇特性可知,甲醇与汽油的特性比较接近。因此,车用甲醇的主要应用方式是点燃。该工作方式的甲醇发动机呈现以下特点。(1)较高的热效率。甲醇研究法辛烷值高达110,在内燃机上应用时可以采用11:1以上的压缩比,甚至高达12:1,支撑了发动机获得高热效率。(2)排放物清洁。甲醇属含氧燃料,燃烧时无烟、无焰,不含硫,排放物比较清洁。(3)耐低温。甲醇的冰点达到 -96°C ,远低于现有的石油燃料,给高寒、低温环境下的应用带来方便。(4)点火能量低。甲醇的点火能量仅数毫焦,与汽油相近,点火系统简单,以致可以直接采用成熟的汽油机点火系统。(5)混合气形成简单。甲醇在大气压下,相变温度是 64.5°C 。采用成熟的汽油发动机进气歧管低压喷进甲醇技术,便可以吸入的空气形成混合气。基于以上的特点,点燃式甲醇发动机已经得到普遍应用。

图1是已经市场化的几款典型的甲醇燃料车,包括乘用车和轻、中、重型商用车。除此之外,还有大量活跃于矿山的专用工程车。目前甲醇燃料车总保有量已经有数万辆,每年消耗的甲醇已经多达数百万吨。



图1 甲醇燃料汽车

2.2.2 醇氢动力发动机

中国的汽车电动化发展速度快,但是电动车在高寒地区冬季使用时遇到多重挑战,如电池性能下降,行驶里程严重缩短等问题,使用甲醇燃料的内燃动力较好地解决了以上难题。目前应用甲醇燃料醇氢动力的工作模式是由一台甲醇内燃机作为增程发电机组,二氧化碳捕集与封存。甲醇发动机仅作为发电的动力,用于给电池充电。甲醇的冰点温度是 -96°C ,在

高寒地区应用完全不必担心像柴油失去流动性。由于醇氢动力的甲醇发动机始终工作在高效区,发动机工作时用于自身冷却而散发进冷却液中的热量,以及废气排放中所含的废热,可以用于电池的保温和整车的保温,减少了能源消耗。与纯电动车相比,电池由于得到有效的保温,提高了工作活性进而增大了行驶里程,同时也减少了因为加热座舱而耗费的电力。其工作模式与电动车一样,几乎不受环境温度影响。与

汽油发动机的增程式动力相比, 甲醇的低温流动性好, 价格低廉, 运行的经济性凸显。2025 年在中国黑龙江举办的亚洲冬季运动会工作用车就是该类型车辆。

醇氢动力中使用的甲醇燃料发动机其工作原理如图 2 所示。图中的 EMS(electronic management system)是整个甲醇发动机的电子控制系统。该机进气采用增压中冷技术, 燃料有 2 套供应系统, 一套是甲醇, 另一套是汽油。之所以采用这种双燃料方式, 主要是甲醇在 12℃ 以下蒸发性远不如汽油。为了确保发动机在环境温度低于 12℃ 时迅速、可靠启动, 先行往发动机喷进汽油, 当发动机工作并将其机体温度升高至甲醇喷雾容易气化时, 再逐步转化为纯甲醇燃料运行。发动机装有一套点火系统, 用于点燃缸内的汽油或甲醇混合气。膨胀后的燃气废气排出时, 经过三效催化转化器进行处理成对环境无害的 CO₂、H₂O 和 N₂。甲醇发动机在工作中引入了废气再循环(exhaust gas rircirculation, EGR), 就是将部分废气再次引入气缸参加燃烧。一方面, 高温的废气会提高混合气温度, 使点火更加顺利; 另一方面, 废气中的 CO₂、H₂O 和 N₂ 在发动机气缸内参加燃烧, 会因为这些气体自身的惰性, 限制了燃烧的高温及其持续时间, 减少 NO_x 的产生。所有的工作都由电控单元 EMS 统一控制, 使发动机工作处在高效和清洁的模式中。

点燃式的甲醇内燃机已经全面进入车用动力市

场。除此之外, 在小型高速船艇领域也得到一定的应用。例如, 渔业养殖中的巡回船艇和一些湖泊、水库区的旅游和巡护小型船艇。在小型发动机组领域也得到一定的应用。总之, 点燃式甲醇内燃机具有工作可靠、适用等优势, 并行于汽油内燃机领域。同时, 由于中国甲醇在价格上有优势, 甲醇动力运行费用和对环境的友好正在逐步得到显现。

2.2.3 甲醇压燃式应用方式

中国每年的汽油和柴油的消耗量有 3 亿多 t。截至 2024 年 4 月, 汽车的汽油消费量为 1292 万 t, 柴油 1651 万 t^[10]。2024 年 4 月, 中国的商用车保有量为 4150 万辆, 在整个汽车的总保有量占比为 12.5%。但在交通领域排放的占比达 60%, 其中 900 多万辆重卡在总体机动车保有量中“贡献”了 30% 以上的交通碳排放量。中重卡车、工程车是碳排放和能源消耗的重要用户^[11]。如在这些车辆上应用甲醇, 既可以减少柴油消耗, 缓解石油进口的依赖压力, 又可以利用甲醇的清洁燃烧特性解决柴油车工作时的颗粒物和 NO_x 高排放的不足。因此, 商用车应用甲醇燃料将成为主要应用方向。

研究发现, 柴油机在直接应用甲醇燃料中存在 3 大难题。一是柴油是高活性燃料, 具有高十六烷值, 而甲醇却相反, 不易自燃, 十六烷值不到柴油的 16/1; 二是柴油是非极性液体, 甲醇有极性, 两者不互溶; 三是柴油容易蒸发, 而甲醇相反。以上 3 个方面使甲醇

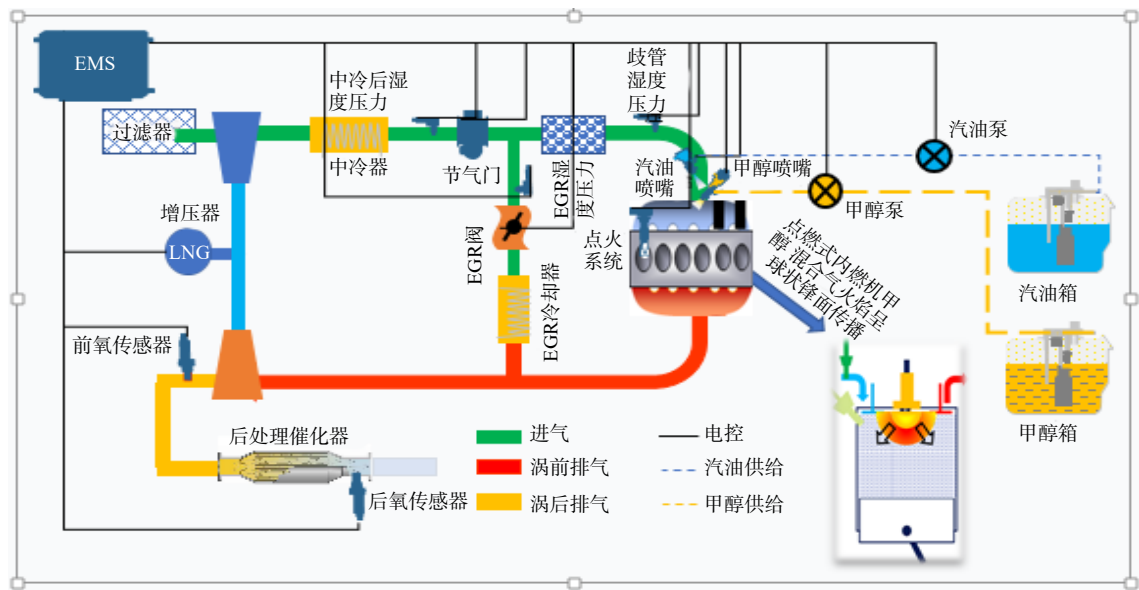


图 2 点燃式甲醇燃料发动机构成

燃料难以在柴油机上直接应用。

经过多年研究,中国学者提出了柴油/甲醇组合燃烧技术。该技术的核心是发动机起动用纯柴油,当发动机机体温度超过一定水平后,再由进气系统喷进甲醇,甲醇形成的混合气在气缸内与喷进的柴油一起工作^[12]。该技术解决了在柴油机压燃方式条件下应用甲醇带来的不能互溶及冷启动困难的问题。该技术的核心是基于柴油和甲醇二元燃料燃烧新模式。图3是该燃烧模式的工作示意,由图可见,与柴油机工作方式不同,柴油喷束是喷进甲醇混合气的氛围中,然后两者一起燃烧。柴油单一燃料燃烧时,油束是喷进经过压缩的热空气氛围里,然后高活性的柴油在高温环境中经柴油蒸发、扩散,然后形成混合气自燃着火。这种油束自然扩散形成的混合气着火和燃烧,必然会存在局部混合气过浓而在燃烧中燃料产生裂解形成的碳粒,又因为油束形成混合气的外围是热空气,丰富的氧气为NO_x的产生提供了条件。空气多,燃料充分燃烧,颗粒物少,NO_x就会多,反之亦然。因此,柴油机在工作中始终存在颗粒物和NO_x生成之间的对立关系。柴油/甲醇二元燃料燃烧则缓和了上述的对立。甲醇具有高汽化潜热,气化过程中会降低混合气温度,降低了压缩功耗以及燃烧高温。在完成同样做功量时,实施扩散燃烧的柴油量减少了。又因甲醇含氧,且具有较高的燃烧速度,快速燃烧减少NO_x的生成时间。因此,二元燃料燃烧使颗粒物和NO_x生成量同时减少。这种柴油/甲醇二元燃料燃

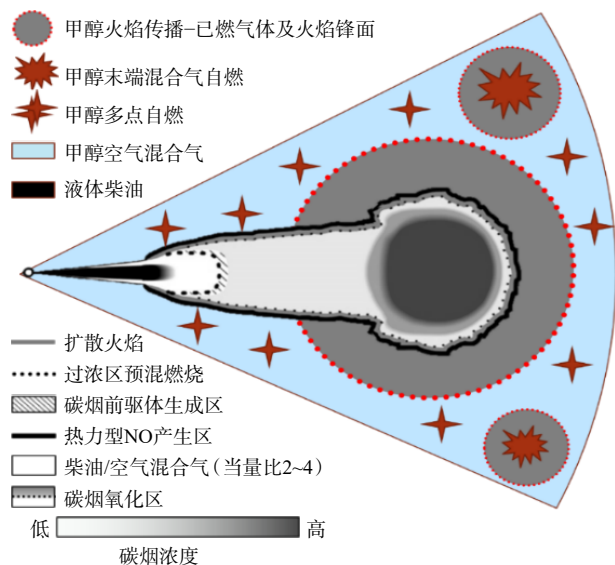


图3 柴油/甲醇二元燃料燃烧示意

烧,改变了柴油机原有的扩散燃烧模式,成为预混合气与扩散燃烧相结合的新模式。

图4是工作在柴油/甲醇二元燃料模式下的碳烟颗粒物和NO_x生成物的改善效果。图中的 R_{MD} 燃料中甲醇对柴油的能量占比,黑色曲线 $R_{MD}0$ 是传统柴油扩散燃烧时碳烟和NO_x之间的关系。随着发动机柴油喷射时刻改变,由上止点后-5.5°CA(曲轴转角,crankshaft angle,负号指活塞上止点前5.5°CA喷射)延迟到上止点后3°CA时,NO_x生成量迅速减少,但同时带来碳烟排放也相应增加。这就是传统柴油机存在的碳烟颗粒与NO_x生成之间的对立关系。但是,当甲醇加入后,其能量比由红色曲线 $R_{MD}0.55$ 到 $R_{MD}1.0$,随着甲醇占比增加,推迟柴油喷射时刻后,NO_x迅速减少,但碳烟排放的增加量逐步减少。当甲醇能量占比 R_{MD} 达到柴油1.54倍时,碳烟与NO_x的关系出现巨大改变。柴油喷射时刻同样由上止点后-5.5°CA改变到上止点后3°CA,NO_x生成量直线减少,而碳烟几乎保持不变。由此可见,有甲醇加入的二元燃料模式改变了单一柴油的扩散燃烧的碳烟与NO_x生成对立关系。因此,甲醇加入压燃式燃烧不仅大幅减少了柴油消耗,此条件下甲醇在总能量占比中达到60%,也大幅减少了碳烟和NO_x的排放^[13]。当该技术结合废气再循环和简单的后处理技术,可以不需要在后处理中喷尿素辅助,便可达到当前的国家机动车标准的国VI排放法规要求^[14]。针对该燃烧模式进一步研究表明,二元燃料燃烧是一种复杂的过程,既有燃料扩散,又有火焰传播,存在着甲醇混合气自燃、柴油引燃、甲醇与柴油一起着火燃烧,也存在甲醇先行着火,柴油再燃烧的多种情况。因此,二元燃料燃烧方式在车辆应用上面临极大的挑战^[15]。

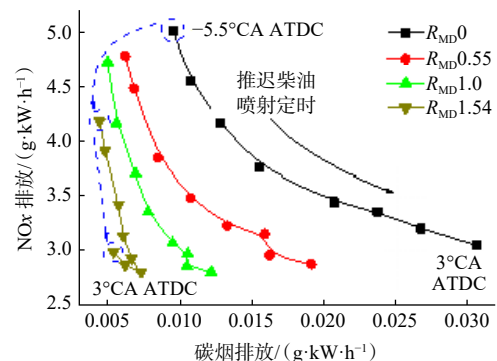


图4 柴油/甲醇二元燃料燃烧条件下的碳烟与NO_x间关系

目前,这种二元燃料燃烧技术在运行工况相对稳定的船舶发动机上得到规模应用。图5是马士基公司远洋货轮上采用的德国曼恩(MAN)低速机燃油/甲醇双燃料微引燃燃烧系统^[16]。甲醇由专用喷嘴直接喷入气缸内,然后与喷进缸内的柴油一起燃烧。该系统的混合气形成方式是采用两燃油外加1~2个甲醇的多喷射器。在排放控制区采用燃油+甲醇的双燃料模式,其余转为纯燃油模式。该机型应用于6G50ME-C9.6-LGIM EcoEGR 低速机上,该机参数为85.0 r/min,功率7500 kW。由图6可见,双燃料发动机一只喷射器喷射燃油,另一只喷射甲醇,以实现双燃料燃烧。

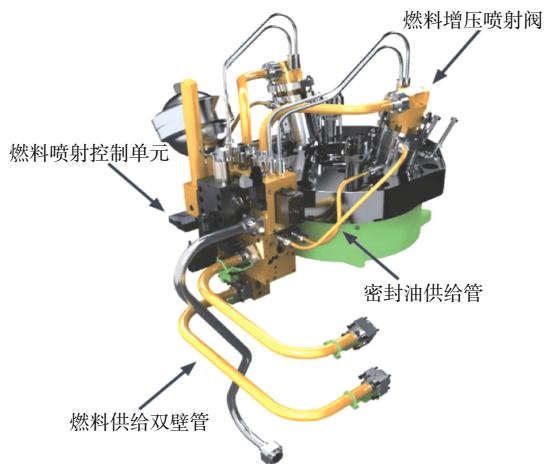


图5 曼恩二冲程低速机缸盖喷射器布置

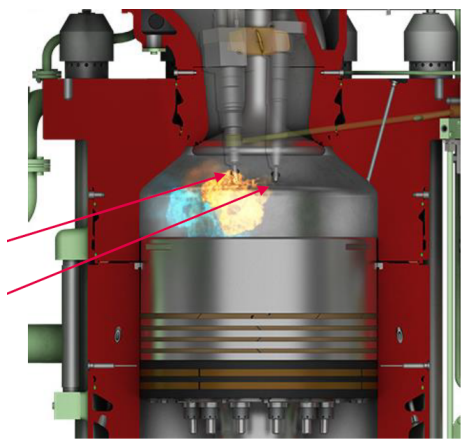


图6 曼恩双燃料发动机工作示意

国内以玉柴YC6MK350DM-C20 船用发动机为原机,在其进气总管上加装甲醇远端喷射装置形成甲醇预混合气,缸内喷进柴油共燃,采用柴油/甲醇二元燃料运行模式(图7)。以双燃料模式运行的发动机排放满足国家船舶动力标准的国II阶段排放限值要

求^[17-18],该机已安装在江龙船艇公司开发的近海集装箱运输船上,于2019年7月下水运行,如图8所示^[19]。类似的甲醇/柴油双燃料船舶还有2024年下水的船舶国能-1号万吨轮^[20]以及民生集团的枝江号轮^[21]。目前,该模式已为船用发动机压燃式运用甲醇燃料提供较好的解决方案。

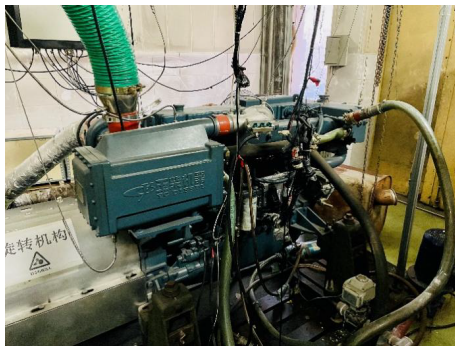


图7 双燃料发动机在台架待标定



图8 安装双燃料的集装箱运输船

2.2.4 甲醇燃料的其他应用方式

为了进一步扩大甲醇的应用范围,多种新的应用技术正在不断涌现。除了柴油与甲醇均质混合气一起燃烧的模式之外,一种采用双燃料喷嘴缸内直喷的方式双燃料甲醇发动机也得到开发应用。图9是山西榆新甲醇发动机有限公司开发的柴油甲醇双燃料发动机。该机的柴油和甲醇采用各自不同的燃料供给系统,通过各自的燃料泵加压,再由各自喷射器加压喷进气缸。其中柴油加压到200 MPa,甲醇加压到60 MPa,将燃料分别直接喷进气缸,然后一起燃烧做功。此外,图10给出了上海夏雪科技研发的纯甲醇压燃发动机,在不调整柴油机本体结构和参数(保留柴油机压缩比)的情况下,采用电控单体泵燃油喷射系统和可控电热塞辅助点火系统,可以使纯甲醇在柴

油机上实现可控直接压燃。发动机可实现 -30°C 直接冷启动,全工况范围内无爆震,发动机动力性与同排量柴油机基本相同。目前已完成 8.8~27 L 排量的系列化产品,应用于发电机组、工程机械等领域。



图9 采用双燃料喷嘴的甲醇压燃式发动机

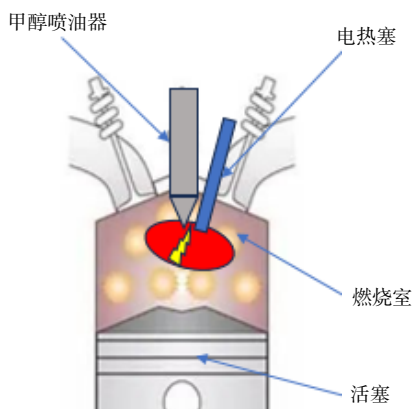


图10 汽油压燃点火辅助热源控制压燃发动机

3 甲醇燃料应用存在的问题

经过数十年的努力,目前甲醇燃料在热力和动力领域都得到一定的规模应用。每年消耗的甲醇已经有千万吨规模,在替代汽油和柴油上发挥了重要作用。在燃烧技术方面主要是以点燃和压燃2种方式,基本可以覆盖汽油和柴油的传统应用范围。同时,因为甲醇具有低温高流动特性,在消除当前电动车在高寒区冬季使用遇到困难方面也发挥其独到的优势。随着中国绿色甲醇产能和产量逐步上升,未来甲醇的应用会在碳中和领域为中国的可持续发展作出重要贡献。但是,就甲醇目前的应用情况而言,还存在一些问题。

1) 增强政策支持力度和宣传普及度。甲醇燃料及其应用的管理归属不明。尽管2019年国家多个部委联合发布在部分地区推广应用甲醇的指导意见,让

甲醇车有了合规的政策通道,但是甲醇燃料应用仍然归属到危化品范畴,在甲醇燃料的加注站建立以及销售方面仍然存在较多的阻碍。另外,甲醇燃料的科学应用宣传不够,缺少在全社会层面的宣传,只要合法合规使用,甲醇作为燃料是完全安全的。

2) 甲醇的高效率运用还有很大空间。目前甲醇燃料在应用中还存在一定问题和挑战。(1) 甲醇消耗率较高。从热值上看,甲醇的热值不足汽油或柴油的1/2,使用中消耗量高,甲醇的应用极大依赖于汽油和柴油与甲醇的差价,严重制约推广应用。(2) 冷启动困难。甲醇蒸发性不及汽油和柴油,一般环境温度低于 12°C 时,甲醇难以直接气化启动。特别是压燃方式应用,还应积极探索甲醇的高效应用方式。

3) 尽快完善甲醇燃料应用的生态环境建设。在目前甲醇车发展中,零部件体系建设还需要完善。在甲醇发展初期,借用原汽油机的部件,如高压泵、滤清器、液位计、喷嘴等,在使用中发现与甲醇的特性要求并不相符,出现早期失效甚至损害的现象^[22-23],严重影响甲醇车推广。

4 结论

随着绿色甲醇的快速发展,甲醇作为可持续发展的燃料已得到全球的共识。中国在甲醇产能和产量上的优势,以及自身的能源禀赋,未来甲醇燃料生产方面必定处于世界领先地位。为了在甲醇燃料应用方面继续保持领先的技术优势,建议今后开展以下3个方面工作。

1) 继续拓宽甲醇燃料的应用范围。热力装置上,围绕乡村振兴的相关政策,实现农村能源转型。在动力装置上,车用要加大发展力度,实现动力多元化。不仅有直驱,也要有增程、插电混合等技术类型。不仅有乘用车也有商用车,如公交车、城市工程车、矿山用车、发电机组等类型,实现动力多元化。

2) 重视船舶动力、内燃机车等甲醇应用技术推广。中国在中高速柴油机上应用甲醇燃料的技术已经成熟,结合国家相应支持政策,加大发展的力度。

3) 尽管绿色甲醇应用前景广阔,但目前其大规模推广仍面临一些挑战。(1) 成本竞争力:是传统煤制甲醇的2倍以上。(2) 原料供应与基础设施:生物质

燃料的收储半径临界点是 50 km, 超过此距离运输成本占比飙升至 35%; 中国约有 60% 的绿色甲醇产能布局在西北地区, 而 70% 的需求在东南沿海, 这种地区错配导致运输成本可能吞噬 15%~30% 的毛利, 加注站、输送管道等基础设施尚不完善。(3) 市场需求与政策依赖: 明确甲醇的管理部门, 将甲醇燃料与汽油、柴油合并管理, 促进加注站建设。(4) 技术与跨行业整合: 侧重新能源发电、化工合成、物流加注等领域, 相信随着实现“双碳”目标的推进, 甲醇具有的减碳和碳中和的作用会逐步得到大家的共识。甲醇作为一种新型低碳和碳中和意义的燃料必将会得到更大更快的发展。

致谢 感谢吉利醇氢公司郭磊博士和夏雪公司齐洪元高级工程师提供的资料支持。

参考文献 (References)

- [1] 2024年中国甲醇市场现状及发展趋势预测分析[EB/OL]. (2024-05-24) [2025-11-01]. <https://www.163.com/dy/article/J2VEHUCL0514810F.html>.
- [2] 2023年甲醇燃料市场规模分析: 我国甲醇燃料市场需求占比为15.66%[EB/OL]. (2023-06-16) [2025-11-01]. <https://www.chinabgao.com/info/1245226.html>.
- [3] 乔治 A. 奥拉, 阿兰·戈佩特, G. K. 苏耶·普拉卡西. 跨越油气时代: 甲醇经济[M]. 2版. 夏磊, 胡金波, 译. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [4] 李峯华. 甲醇燃料燃烧技术在陶瓷烧制领域上的应用[C]//2021年甲醇热力燃烧线上会议集. 上海: 中国内燃机学会, 2021.
- [5] Reed T B, Lerner R M. Methanol: A versatile fuel for immediate use[J]. Science, 1973, 182(4119): 1299-1304.
- [6] California Energy Commission. Transportation technology status report[EB/OL]. [2025-11-01]. <https://catalog.hathitrust.org/Record/101692799>.
- [7] 2018年汉诺威商用车展: 让我们看到了未来卡车的新趋势[EB/OL]. (2018-09-21) [2025-11-01]. <https://www.yoojia.com/article/9257827943732869750.html>.
- [8] 工业和信息化部关于开展甲醇汽车试点工作的通知[EB/OL]. [2025-11-01]. <https://www.waizi.org.cn/law/16691.html>.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部. 八部门关于在部分地区开展甲醇汽车应用的指导意见[EB/OL]. [2025-11-01]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/yj/art/2019/art_f1339d0d67cf45e4960f2292ebeb706.html.
- [10] 中国柴油消费量(研究报告节选)[EB/OL]. [2025-11-01]. <https://www.hangyan.co/charts/3387815912433256111>.
- [11] 2024年商用车行业市场调研报告: 目前国内商用车保有量达4150万辆[EB/OL]. (2024-04-19) [2025-11-01]. <https://www.chinairn.com/hyxx/20240419/175443107.shtml>.
- [12] 姚春德. 柴油/甲醇二元燃料燃烧理论与实践[M]. 天津: 天津大学出版社, 2015.
- [13] Wei L J, Yao C D, Han G P, et al. Effects of methanol to diesel ratio and diesel injection timing on combustion, performance and emissions of a methanol port premixed diesel engine[J]. Energy, 2016, 95: 223-232.
- [14] Qu G F, Yao A R, Chen C, et al. Effect of EGR strategy on combustion and emission of DMDF engine for meeting China VI emission legislation[J]. Fuel, 2021, 299: 120879.
- [15] Wang B, Yao A R, Yao C D, et al. In-depth comparison between pure diesel and diesel methanol dual fuel combustion mode[J]. Applied Energy, 2020, 278: 115664.
- [16] MAN. World-first order for methanol engine within container segment[EB/OL]. [2025-11-01]. <https://www.man-es.com/company/press-releases/press-details/2021/07/27/world-first-order-for-methanol-engine-within-container-segment>.
- [17] Wang H, Yao A R, Yao C D, et al. Investigation to meet China II emission legislation for marine diesel engine with diesel methanol compound combustion technology[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 96: 99-108.
- [18] 姚春德, 王辉, 姚安仁, 等. DMCC技术在高速船用柴油机上的应用研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(1): 112-118.
- [19] 国内首艘!中山造甲醇燃料动力船艇下水[EB/OL]. [2025-11-01]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1639919587409356592&wfr=spider&for=pc>.
- [20] 国内首艘!甲醇双燃料电力推进内河散货船交付[EB/OL]. [2025-11-01]. https://news.sohu.com/a/816430202_155167.
- [21] 我国内河首艘, 在枝江下水![EB/OL]. [2025-11-01]. <http://www.zgzhijiang.gov.cn/content-93-598519-1.html>.
- [22] 韩国鹏, 姚安仁, 姚春德, 等. 甲醇对直流泵的腐蚀及改进建议[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(9): 878-882.
- [23] 姚春德, 赵新峰, 沈恩华, 等. 甲醇汽油对汽车橡胶元件溶胀作用的力学分析[J]. 汽车工程, 2012, 34(10): 909-912.

The current technical status and future prospects of methanol as fuel for thermal and engine usage

YAO Chunde¹, LI Yunqiang², YAO Anren³

1. Department of Mechanical Engineering of Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. State Laboratory of Advanced Internal Combustion Power, Tianjin University, Tianjin 300072, China

3. School of Environmental Engineering of Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Methanol as fuel, particularly for the green methanol by its clean burning characteristics and easy availability with liquified energy as well as abundant application scenarios is assist it transform from shipping, transportation and industry and so on to the global energy transition as well as realization for the goal of "Double Carbon". According to the transformation of methanol from chemical to fuel, the review reports that various forms of methanol as fuel are used in industry and power units respectively, particularly introducing the status of usages in internal combustion engines and their technical characteristics in applications for reference in futural development. Taking the advantage of the huge productive capability of our country, and promoting the green methanol application as well as its development, many proposals are provided based on the following issues such as the policy support and technical improvements and so on.

Keywords methanol fuel; thermal combustion fuel; internal combustion engine combustion ●



(责任编辑 赵庆圆)