

碳中和甲醇发动机概念构建与分析

王俊昌

(安阳工学院机械工程学院, 安阳 455000)

【欢迎引用】王俊昌. 碳中和甲醇发动机概念构建与分析[J]. 汽车文摘, 2023(7): 9-17.

【Cite this paper】WANG J C. Construction and Analysis on Methanol Engine Concept for Carbon Neutrality[J]. Automotive Digest (Chinese), 2023(7): 9-17.

【摘要】为实现内燃机碳中和, 将内燃兰金循环、工质移缸、燃料改质、气体储能技术相融合, 提出主缸和副缸组合工作的新型甲醇发动机概念与构架。运用文献研究法, 分析废气活化氛围下甲醇热化学重整过程, 通过内部废气再循环, 甲醇在主缸内被改质为 H_2 、 CO 、 CH_4 , 实现醇氢融合燃烧; 同时甲醇汽化吸热, 将废气热量转换为甲醇燃烧能; 主缸燃烧废气导入副缸再燃烧, 副缸既延续主缸燃烧做功, 又起到主缸燃烧后处理器作用, 燃烧能量多级回收利用, 实现发动机高效、清洁燃烧。

关键词: 甲醇发动机; 架构; 碳中和; 热效率; 排放

中图分类号: TK464; U464.178 文献标识码: A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20230004

Construction and Analysis on Methanol Engine Concept for Carbon Neutrality

Wang Junchang

(School of Mechanical Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000)

【Abstract】In order to realize carbon neutrality of automotive engine, a new methanol engine concept and framework with the master cylinder and auxiliary cylinder working cooperated with each other is proposed, it integrates internal combustion Rankin cycle, charge transit between cylinders, store energy in gas and fuel reforming technologies. The literature research method is used to analyze the thermo-chemical reforming process of methanol in the activated atmosphere of exhaust gas. With internal Exhaust Gas Recirculation (EGR), the methanol is reformed to H_2 , CO and CH_4 in the main cylinder to realize the mixture combusts in fusion of methanol and hydrogen. At the same time, the heat of exhaust gas, absorbed by the methanol, is converted into methanol combustion energy. The exhaust gas of the master cylinder is introduced into the auxiliary cylinder to continue combusting. The auxiliary cylinder not only continues the combusting of the master cylinder, but also acts as the post processor of the master cylinder combustion, and the combustion energy is recycled in multiple stages, so as to achieve efficient and clean combusting of the engine.

Key words: Methanol engine, Architecture, Carbon neutrality, Combustion thermal efficiency, Exhaust emission

缩略语

EGR	Exhaust Gas Recirculation
RCCI	Reactivity Controlled Compression Ignition
ICRC	Internal Combustion Rankine Cycle
JCCI	Jet Controlled Compression Ignition
CTBC	Charge Transit Between Cylinders
DME	Dimethyl Ether
ECU	Electronic Control Unit

0 引言

为实现碳达峰、碳中和目标, 国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》, 提出交通运输绿色低碳行动等十大行动指南, 推进绿色低碳科技创新, 促进废物综合利用, 使用可再生能源, 构建清洁低碳安全高效的能源体系。回顾历史, 交通工具的变革往往带来社会大发展, 在构建绿色低碳可持续发展体系进程中, 交通运输行业面临着严峻挑战。

虽然电动车发展迅速,但电能碳排放降低之前,其降碳效果有限^[1],且供电网络安全始终是影响能源安全的重大因素,战争、地震等各种自然灾害,对电网的打击都是致命的。在电能存储技术没有解决之前,如何应对电力供应“高峰和低谷”,也是制约电动车发展因素之一。一旦解决发动机排放问题,剩余电能转化为可再生燃料,既可以解决发动机燃油供给问题,也可以作为载体进行长期存储和运输,再生燃料将是一种具有强大生命力的解决方案^[2]。2023年3月28日,欧盟正式通过了汽车碳排放法案,即2035年欧盟区域内销售的新车必须实现零碳排放,其中法案包含了以德国、意大利为首提出的“允许销售仅使用eFuels的新型内燃机汽车”。eFuels是将水电解生成H₂与工业排放中或空气中的CO₂进行催化反应,合成一种可再生的液体碳氢燃料,燃烧eFuels所释放的碳小于等于eFuels制造中收集的碳,在保持传统产品链稳定的同时,实现碳中和。但因制造成本高,其应用受到严重制约。氢燃料电池反应生成水,被给予降碳厚望,但氢燃料电池对氢的纯度要求较高,其发展受到加氢基础设施匮乏的制约,并且燃料电池全工况平均发电效率在50%左右,单体电压在0.650~0.717 V之间时,效率为51.83%~57.18%,额定工况电压为0.616 V,热效率仅为48.88%^[3]。提高热效率是内燃机发展的关键,美国超级卡车计划发动机热效率达到55%,潍柴也宣布其天然气发动机热效率达到54.16%,国内已有多家车企混合动力汽车发动机热效率接近45%,比亚迪DMI系统发动机热效率为43%^[4],吉利雷神智擎Hi·X热效率也达43.32%,内燃机与电机结合,整体热效率可超过65%^[5]。排放对环境零影响是内燃机生存的基础,发动机排放处理装置日趋复杂,其成本已占发动机总成本的40%~70%^[6],严重制约了内燃机行业发展,要降低发动机排放污染、实现碳中和,需要对发动机做结构性创新。

本文将多种先进发动机燃烧理论和技术有机融为一体,从我国能源资源禀赋出发,合理选择燃料,结合相关专利^[7]提出高效、清洁燃烧的新型发动机架构,以甲醇为车用替代燃料,构建可持续发展、低碳循环经济产业,以期在稳定产品供应链的同时,实现发动机碳中和。

1 燃料的选择

1.1 零碳燃料分析

燃料的选择对发动机性能起到决定性作用。H₂

燃烧速度快,氢内燃机在一定工况可提高热效率,但易产生爆震燃烧,高负荷时排放NO_x浓度高^[8]。同时,H₂具有易燃性、点火能量低,会导致氢内燃机出现回火、早燃问题^[9]。缸内直喷氢内燃机虽解决了回火问题,但H₂混合时间短,影响排放和效率稳定性^[10]。采用较稀H₂混合气体,可防止回火和早燃、减少NO_x排放,但发动机动力性会随之降低。此外,H₂密度低、储运成本高、氢脆等问题制约了氢内燃机应用。氨(NH₃)燃料有异味、燃烧活性低,点火能量高,需要其它燃料引燃才能在缸内燃烧,同时还面临NO_x等燃烧污染物排放控制技术难题,目前不具有大规模应用的条件。

1.2 立足我国能源资源禀赋

各类醇、醚和生物燃料可通过捕集的CO₂和H₂合成获得,也可利用生物质材料获得,是实现碳中和有效燃料。在车用替代燃料选择过程中,应从国家能源安全、全生命周期碳排放、能源转化效率、储存安全性、运输便捷性、环境友好性、资源丰富性多维度进行综合评价,立足于我国“富煤、少气、贫油”的能源资源禀赋,循序渐进推进碳达峰。我国煤炭资源丰富,且具有成熟的煤化工制取甲醇工艺,全国每年富余炉煤气约240亿m³,可生产甲醇约1 200万t^[11],开发使用甲醇有助于提高废弃物资源化的循环经济效用。我国正在进行“光伏发电→电解水制氢→H₂与CO₂反应生成甲醇”技术路线研究,探索以甲醇为载体,将太阳能转化为化学能,实现光能储存。以甲醇为燃料,内燃机将焕发新的活力,利用成熟的产业链、完备的基础设施,可以构建低碳循环产业体系。

1.3 综合考虑使用成本、性价比

从储运角度看,常温下液态的甲醇(CH₃OH)远比天然气、电能合理,对现有燃料供给体系进行改造,即可实现基础设施覆盖,避免投入高昂费用去建设新的能源基础设施。通过合成甲醇消纳CO₂,把氢能、燃油替代技术和低碳技术结合在一起实现碳中和。甲醇还是理想的氢能载体燃料,单位体积甲醇中H含量是液氢的1.4倍,是70 MPa压力下氢气的2.8倍。将车载甲醇裂解制氢,随制随用,不存在H₂运输及存储问题。将裂解气与甲醇混掺燃烧,可解决H₂燃烧温度高和回火问题。姚春德等^[12]对甲醇高效清洁燃烧方法研究中指出,利用排气余热将甲醇裂解制氢,与燃用纯汽油相比,其当量燃料消耗率降低26.8%,相应负荷下其HC排放降低10%~40%,可见,甲醇裂解气可显著提高发动机经济性、降低排放污染。汽油终端用户价约为8 000元/t,甲

醇终端用户价在2 000~3 000元/t,有较高的价格优势;甲醇辛烷值(112)高,有较高的抗爆震性能;甲醇燃烧速率高,有助于提高热效率。甲醇主要缺点是腐蚀性强,燃烧热值低,其点燃燃烧热效率不高。甲醇腐蚀性已基本解决,燃烧热效率可通过改进着火方式、改善燃烧技术而得到有效提升。综上所述,甲醇是最合理的车用燃料之一。

2 甲醇发动机基本架构

2.1 技术基础

伴随着内燃机发展,涌现出许多先进的燃烧理论和控制技术。在国家973计划项目支持下,苏万华等^[13]在“均质压燃、低温燃烧”基础上提出了燃烧路径控制理论,通过混合气体组分、浓度、温度和压力与燃料理化特性协调控制,实现“燃烧速率和方向控制”,从而实现对燃烧效率和燃烧产物的控制。

秦静等^[14]、易林等^[15]在可控压缩燃烧技术基础上,通过内部废气再循环(Exhaust Gas Recirculation, EGR)控制燃料低温活化反应,余留热废气不仅加热新鲜充量,而且所含活性物质促进燃料低温反应,进而影响到压缩过程气压和温度,实现压燃着火燃烧,故称为反应控制压缩燃烧技术(Reactivity Controlled Compression Ignition, RCCI)。

吴志军等^[16]和于潇^[17]基于内燃兰金循环(Internal Combustion Rankine Cycle, ICRC),引入EGR控制纯氧燃烧速度,同时缸内喷水混合气吸收利用废气热量,使混合气继续膨胀做功,提升发动机热效率。

孟相宇等^[18]、祝佩等^[19]基于复合热力循环提出射流控制压缩着火方式(Jet Controlled Compression Ignition, JCCI),在压缩终了时刻,通过喷入适量高压空气,对缸内柴油混合气体产生冲击压缩,触发混合气体多点自燃,实现低压缩比、高膨胀比的热力循环。王志等^[20]对气相射流点火进行研究,研究表明射流点火产生的多火焰面传播,提高了火焰传播速度,缩短燃烧持续期,降低爆震倾向。

裴普成等^[21]、卢勇^[22]对工质移缸技术(Charge Transit Between Cylinders, CTBC)进行深入研究,提出发动机压缩与燃烧过程在不同气缸内进行,可缓解压缩气缸热应力,适应更高压缩比,同时发动机膨胀比大于压缩比,实现性能优于阿特金森-米勒循环(Atkinson Cycle-Miller Cycle)的充分膨胀热力循环,提升发动机热效率5%~20%。

本文将上述技术与甲醇理化特性相结合,有机融

为一体,提出新构型发动机。

2.2 基本方案

基于传统发动机供应链,提出主缸和副缸分级燃烧、组合工作方案。主缸采用浓甲醇混合气体内燃兰金循环、氧气射流控制混合气体着火技术以及甲醇重整改质技术,燃烧做功后的废气一部分留在主缸,另一部分导入副缸再燃烧。甲醇以较大提前角喷入主缸,利用缸内富含活性物质的燃烧废气进行活化重整反应^[14],将低焓值废气热量转换为高焓值的甲醇燃烧能。利用氧气射流控制混合气体着火燃烧,形成具有压燃和扩散燃烧特征的复合燃烧。主缸燃烧废气压入副缸后,与进入副缸的增压空气混合再燃烧,副缸通过控制燃烧温度,既拓展了主缸燃烧做功过程,又起到主缸燃烧处理器作用。主缸生成的CO、CH₂O等中间产物被完全氧化,并制约生成NO_x污染物,实现发动机近零污染排放。

新概念发动机结构如图1所示。该发动机延续传统发动机主体结构,主要对进、排气系统和燃油供给系进行重构。主缸有燃料喷嘴、氧气喷嘴、排气门,取消进气门,用氧气喷嘴向缸内喷射O₂,无进气节流损失,提高主缸热效率;副缸无燃料喷嘴,设有主进气门、副进气门、排气门;主缸与副缸之间有连接通道,主缸废气通过连接通道导入副缸,主缸排气门控制连接通道主缸端的开闭,副缸副进气门控制连接通道副缸端的开闭;副缸排气门控制燃烧废气导入涡轮增压器,增压器为副缸提供具有一定压力、温度的新鲜空气。

主缸不对外排气,以提升热效率为主、减少排放污染物为辅,用O₂代替空气作为氧化剂形成富燃功率混合气体,从源头上消除NO_x。传统燃料功率混合气体燃料空气当量比为1.10~1.25^[23],由于甲醇自含氧,因此主缸燃料氧气当量比取1.40~1.50,主缸燃烧速率、压力、温度均达到最大值,在ICRC基础上实现热效率最优。副缸混合气体过量空气系数为1.20左右,以净化排放为主、提升做功能力为辅,净化副缸排放即实现发动机排放零污染。

2.3 进气系统

该发动机采用电控液压可变气门结构,按设定的配气正时柔性控制气门开、闭,设有平衡轴以降低发动机振动。主缸氧气喷射系统包括:氧气喷嘴、氧气稳压装置、氧气温度检测传感器、氧气预热装置、氧气存储罐。电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU)根据工况参数控制氧气喷嘴适时向主缸喷入适量氧气。主缸废气经一定压缩、升压后,导入副缸继续燃

烧,提升副缸做功能力。副缸进气通路如图2所示,由变频电动增压器和废气涡轮增压器等组成,正常工况时二位三通电磁阀3断电,电动增压器2出口与副缸进气口接通,由电动增压器2为副缸提供增压的新鲜空气。

涡轮增压器6工作,实现副缸进气二级增压。发动机起动时二位三通电磁阀3通电,电动增压器2出口与副缸进气口接通,由电动增压器2为副缸提供增压的新鲜空气。

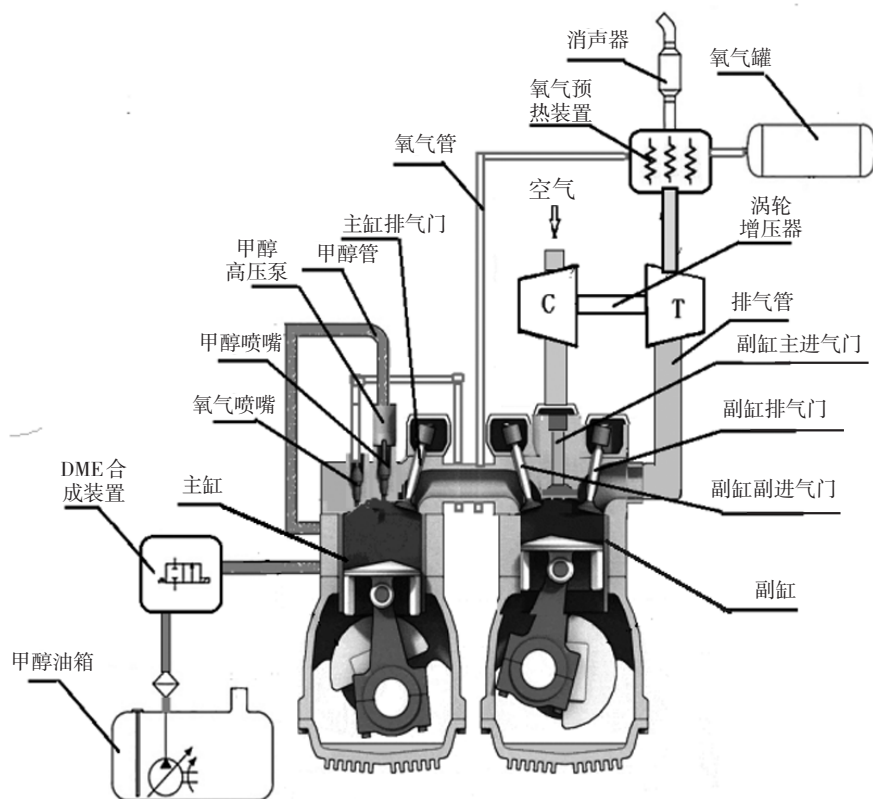


图1 新概念发动机结构

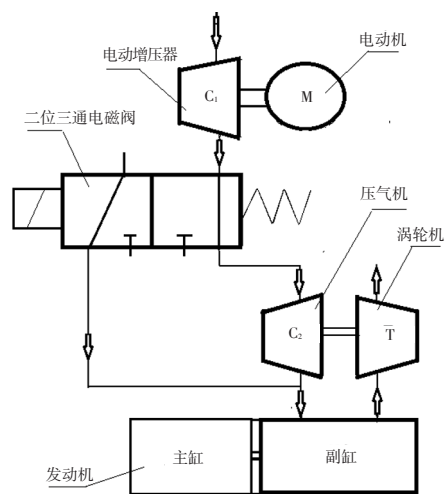


图2 发动机副缸进气通路

氧气预热装置分为排气管预热和主缸与副缸连接通道预热2部分,利用O₂回收涡轮增压器排出废气的能量和主缸与副缸之间连接通道散失的热量,提升O₂射流温度。ECU根据空气流量传感器、氧传感器等参数,控制电动增压器及氧气喷嘴通电时刻和时长,

优化混合气浓度。

2.4 燃料供给系统

燃料供给系包括燃料喷嘴、低压泵、高压泵、甲醇稳压管、甲醇预热管、甲醇储存罐以及为起动工况提供燃料的二甲醚(Dimethyl Ether, DME)合成装置。甲醇预热管利用冷却液热量预热甲醇,高压泵提供可靠的喷射压力。ECU控制燃料喷嘴,适时向主缸内喷入适量、一定压力的燃料。

DME合成装置如图3所示,包括电加热催化剂3、甲醇通道电磁阀4(常开电磁阀)和DME通道电磁阀2(常闭电磁阀)。发动机起动时,电加热催化剂3、甲醇通道电磁阀4和DME通道电磁阀2通电,关闭甲醇通道、开启DME通道,甲醇在催化剂3中转换为DME,然后进入稳压管、喷入气缸。当起动工况向正常工况过渡时,甲醇通道电磁阀4断电,甲醇通道和DME通道同时开启,DME和甲醇混合喷入气缸,待发动机工作温度正常后,电加热催化剂和DME通道电磁阀断电,DME通道关闭,发动机进入正常工况。

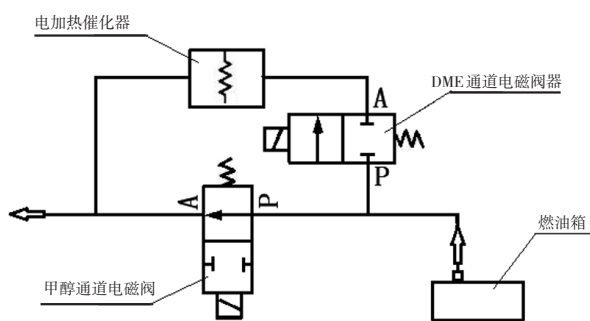


图3 DME合成控制

3 发动机工作原理

3.1 发动机工作过程分析

3.1.1 主缸工作过程

发动机正常工况使用甲醇M100燃料,主缸工作相位如图4所示,活塞从下止点上行对缸内废气预压缩,当上行至 α_1 时主缸排气门开启,开始排气;当主缸活塞向上运动 α_2 时关闭主缸排气门,排气结束,开始压缩行程。当主缸活塞运动至上止点前 α_3 时,第一次向主缸喷射甲醇,甲醇在缺氧氛围中吸热、气化,与热废气中的 HO_2 、 H_2O_2 、 H 等活性物质进行脱氢反应;当

主缸活塞运动到上止点前 α_4 时,第二次喷射甲醇,甲醇在活化氛围中发生重整反应;当主缸活塞上行至上止点前 α_5 时,向主缸喷入高压氧气。主缸混合气体在氧气射流作用下自燃、燃烧做功至下止点。主缸如此循环往复运转。

3.1.2 副缸工作过程

如图4所示,副缸工作相位落后于主缸 210° 曲轴转角,副缸活塞上行至上止点前 α_6 时,副缸进气门提前打开,经电动增压器和废气涡轮增压器增压的热空气进入副缸;活塞下行至副缸上止点后 α_7 时,副缸排气门关闭,排气结束;副缸活塞下行至上止点后 α_8 时,副缸副进气门开启,主缸燃烧废气进入副缸;副缸活塞下行至上止点后 α_9 时,副缸主进气门关闭;副缸活塞下行至上止点后 α_{10} 时,副缸副进气门关闭;副缸副进气门比主缸排气门晚关闭,有利于利用主缸废气气流惯性,降低主缸与副缸连接通道内残余气压、减小主缸排气负功。当副缸活塞做功下行至下止点前 α_{11} 时,副缸排气门提前开启,副缸燃烧废气进入废气涡轮增压器,带动涡轮增压器工作;副缸如此循环往复运转。发动机工作相位参数见表1。

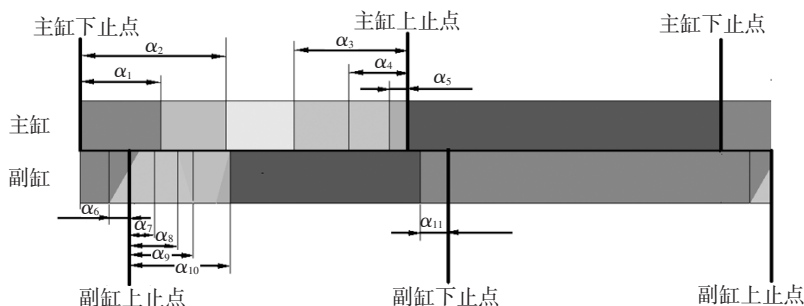


图4 发动机工作循环相位

表1 发动机工作相位参数 ($^\circ$)曲轴转角

参数	取值	参数	取值	参数	取值	参数	取值
α_1	45~60	α_4	30~45	α_7	10~15	α_{10}	50~60
α_2	80~90	α_5	5~10	α_8	20~30	α_{11}	15~30
α_3	60~75	α_6	10~15	α_9	30~40		

3.2 发动机燃烧过程

3.2.1 主缸混合气体燃烧路径

根据苏万华等^[13]提出的柴油机燃烧过程及燃烧路径控制理论,该发动机通过控制可燃混合气形成时间和燃烧反应时间实现燃烧路径控制。用 O_2 代替空气做氧化剂,用远超传统发动机EGR的缸内余留燃烧废气弥补循环工质不足,改变了混合气体组分和浓度,并通过控制 O_2 喷射正时,控制混合气体形成过程。余留热废气不仅是发动机做功工质,而且提供甲醇汽化所需能量、充当减缓放热速率的稀释剂,同时热废气

还提供促进甲醇活化重整的活性物质,改变了甲醇燃烧路线:甲醇先被改质为 H_2 、 CO 、 CH_4 等小分子结构燃料,再与 O_2 混合燃烧。甲醇重整后的燃烧转化为醇、氢、氧融合燃烧,实现对混合气体燃烧反应速率控制。

3.2.2 主缸混合气体燃烧过程

该甲醇发动机主缸采用高压氧气射流控制甲醇混合气着火。主缸复合燃烧过程分为3个阶段:

(1) 甲醇活化重整阶段

基于ICRC和缸内EGR技术构建甲醇无氧活化重整反应氛围,利用浓甲醇混合气燃烧废气中富含H的活性物质特点,改变甲醇脱氢反应路径;通过控制混合气中氧浓度,控制甲醇活化重整程度,避免燃料过度重整,减少重整过程中热量损失,提升主缸热效率。

(2) 燃料压燃着火阶段

基于JCCI原理,在高压氧气射流冲击下, H_2 与 O_2

混合发生氧化反应,局部高氧浓度使O自由基作用增强,激发如下链式反应:



链式反应产生大量活性基OH,触发缸内混合气体多点自燃^[14],形成多火核着火燃烧。

(3)富燃混合气体扩散燃烧阶段

高压氧气射流沿活塞顶面流动与缸内混合气体快速混合,自燃的混合气对未燃混合气加热、加压,火焰急速传至整个燃烧室,形成醇、氢、氧融合燃烧。该燃烧速率取决于氧气射流扩散速率、甲醇重整率和混合气当量比,放热率呈现前低后高特点^[15],既不同于传统柴油机前高后低的放热率,也不同于汽油机预混合燃烧的单峰放热率,有效避免富氧、掺氢混合气因燃烧速率过高造成燃烧粗暴。

3.2.3 副缸燃烧过程

来自主缸富燃混合气的可燃废气,富含H高活性自由基和可燃的CO、甲醛等中间燃烧产物,具有一定燃烧热值,为与副缸新鲜空气混合再燃烧奠定基础。主缸废气以一定压力(0.4~0.5 MPa)和温度(>1 100 K)被压入副缸,副缸进气系统适时提供经过电动增压器和废气涡轮增压器二级增压的具有一定压力(0.4~0.5 MPa)和温度(400~500 K)的新鲜空气,二者混合燃烧。由于主缸废气再燃烧所需空气量较少,增压空气不进行中冷,也可提供充足的进气量保证“主缸废气”完全燃烧,有利于充分利用增压空气的内能,提高副缸混合气温度,改善副缸混合气燃烧过程。

4 发动机可行性分析

4.1 燃烧过程控制的可行性

4.1.1 甲醇缸内无氧氛围活化重整改质

文献[24-25]负阀重叠期燃料重整改质试验,间接验证了无氧氛围下甲醇改质的可行性。本文新型发动机主缸利用内部EGR,将废气中 CH_2O 、 HO_2 、 H_2O_2 、H等活性物质一同留在缸内,活化重整反应取决于燃料产生的自由基浓度,混合气体当量比不同,则“燃烧废气”中所含燃烧产物及活化基团成分和浓度也不同。混合气越浓,燃料产生的自由基越多,氧化速度越快;燃空当量比为1的甲醇混合气体,低温时主要是 HO_2 和OH参与氧化反应;燃空当量比为1.4时,甲醇大约有35%与H发生反应,剩余甲醇与 HO_2 等自由基

反应^[26-27]。浓甲醇混合气燃烧废气中含有大量H、 HO_2 活化基,在甲醇低温反应中起主要作用,而O活化基的作用基本消失^[28]。本发动机主缸燃料氧当量比取1.43,随甲醇混合气体浓度提高,甲醇与H反应变得更为重要,H自由基相对分子质量小,扩散速率高,最为活跃^[26],形成了甲醇无氧活化重整氛围。

4.1.2 混合气着火燃烧正时控制

可控压缩燃烧着火时刻及燃烧速率控制涉及到温度、压力、混合气成分因素。新型发动机通过控制氧气射流温度、压力、喷射量和喷射正时,实现对发动机主缸着火正时和燃烧过程控制,当主缸活塞运动至上止点附近时,由于缺少 O_2 ,混合气体经活化重整后,处于接近自燃又不能自燃的临界状态; O_2 喷入主缸后,射流外围处于临界状态的混合气体受到 O_2 射流挤压后温度迅速上升,触发氢氧链式反应,形成缸内混合气体多点自燃。甲醇活化重整反应中积累的大量 H_2O_2 等活性物质在高温条件下发生支链反应,促进燃烧急速扩展。

文献[29-30]将改质缸中富燃混合气体燃烧废气作为改质燃料,输送到非改质缸内燃烧做功,提高了非改质缸燃烧热效率;蒸汽动力装置中的“再热循环”,工质做功后温度降低,再次被加热后继续膨胀做功,均为该发动机副缸燃烧提供借鉴。具有一定压力和温度的主缸燃烧废气中累积了大量活性物质,当被压入副缸时,与副缸中新鲜空气混合,发生氧化反应:



氧化反应产生高活性基团 HO_2 ,后续链传播反应的能量壁垒相对较小,形成如下反应:



上述反应形成气相射流多点着火,实现副缸可靠燃烧。

根据刘敬平等^[31]研究,燃烧放热面心值并不是越靠近上止点越好,当50%燃烧量所处位置在上止点后 $7 \sim 10^\circ$ 曲轴转角、最高爆发压力在上止点后 $13 \sim 17^\circ$ 曲轴转角、面心值出现在上止点后 $9.5 \sim 11^\circ$ 曲轴转角时热效率最高。该位置与混合气燃烧速率及等容度有关,考虑到纯氧甲醇混合气燃烧速率极高,在混合气着火和燃烧等容度有保证的前提下,利用氧气射流正时适当推迟混合气着火时间,优化燃烧放热面心值,提高发动机热功转换效率。

4.1.3 工作循环稳定性分析

为减小发动机工作循环波动,需维持混合气体当

量比稳定性。主缸余留废气率 γ_{rg} 定义为:主缸排气结束时主缸内余留废气量占主缸开始排气时缸内总气体量的比值。假设燃烧后产物分布均匀,针对主缸余留废气中CO量,增加相应喷氧量。

设主缸甲醇(CH_3OH)喷射量为 n ;取混合气体过量氧气系数为0.7,氧气含量为 $0.7 \times 1.5n$;燃烧主要产物CO、 CO_2 、 H_2O 分别为: x 、 y 、 z ;则其总包反应方程式表示为:



根据物质守恒定律则有:

$$\text{C}: n = x + y \quad (10)$$

$$\text{H}: 4n = 2z \quad (11)$$

$$\text{O}: n + 0.7 \times 3n = x + 2y + z \quad (12)$$

联解式(10)、式(11)和式(12)得: $x=0.9n$, $y=0.1n$, $z=2n$ 。

CO氧化反应为:



为确保主缸混合气过量氧气系数不变,第 i 循环在喷射 $0.7 \times 1.5n \text{O}_2$ 的基础上,再根据 $(i-1)$ 循环增加喷氧量: $0.5x\gamma_{rg}$,即喷氧量与喷甲醇量的关系为:

$$m_{i\text{O}_2} = m_i \frac{1.05M_{\text{O}_2}}{M_{\text{CH}_3\text{OH}}} + m_{i-1} \frac{0.9M_{\text{O}_2}}{M_{\text{CH}_3\text{OH}}} \times 0.5\gamma_{rg} \quad (14)$$

式中, $m_{i\text{O}_2}$ 为第 i 次循环喷氧质量; m_i 为第 i 次循环喷甲醇质量; m_{i-1} 为第 $i-1$ 次循环喷甲醇质量; γ_{rg} 为主缸余留废气率; $M_{\text{CH}_3\text{OH}}$ 为甲醇摩尔质量; M_{O_2} 为氧气摩尔质量。

整理式(14)得喷氧量与甲醇喷射量的关系为:

$$m_{i\text{O}_2} = 1.05m_i + 0.45\gamma_{rg}m_{i-1} \quad (15)$$

从(15)式看出, γ_{rg} 高低,不仅影响甲醇活化重整和燃烧温度,还影响喷氧量,ECU接受缸压传感器信息,根据主缸排气门开、闭时曲轴转角和缸压变化,判别 γ_{rg} 是否合理,然后控制气门电控控制阀,调整主缸排气门开、闭时刻,实现对 γ_{rg} 控制,提高工作循环稳定性。

4.2 发动机热效率定性分析

4.2.1 压缩比对热效率的影响

发动机有效热效率为指示热效率和机械效率的乘积,发动机指示热效率与发动机压缩比(气缸总容积与燃烧室容积之比)成正比。主缸混合气体中氧气的组分与燃料混合过程得到有效控制,解决了压力升高率过高问题,避免了发动机爆震燃烧;同时,压缩行程与膨胀行程相分离,大幅度缩小了压缩行程,提高了做功膨胀比。该发动机压缩行程显著小于活塞总行程,压缩比增加幅度大于压缩负功增加幅度,因此,发动机压缩比可提升到18以上。而发动机压缩比由

10:1提升至15:1,则理论热效率至少提升9%^[32],可见,该新型发动机热效率将得到显著提升。

4.2.2 机械效率对热效率的影响

机械效率取决于机械摩擦功、泵吸损失功和附件消耗功。该发动机实现了二冲程工作循环,机械摩擦功将降低约50%,提升发动机热效率5%左右;由于取消了主缸进气门,泵吸损失功也减少50%以上,同时降低了驱动进气门所消耗功,综合效果可提升发动机热效率3%左右;此外由于甲醇重整改质为富含 H_2 等小分子燃料,混合气在纯氧氛围中掺氢燃烧,燃烧速率显著提升,燃烧等容度超过柴油机,将使发动机热效率提升3%左右。

4.2.3 废气热能利用对热效率的影响

该新概念发动机主缸工作循环与蒸汽动力“抽气回热循环”原理相似,主缸将一部分燃烧废气留在缸内,利用甲醇气化潜热值高特点,吸收缸内余留废气热量而汽化,在降低压缩负功的同时,提升甲醇混合气体内能,提高了甲醇混合气燃烧温度,从而提高了燃烧热效率。副缸类似蒸汽动力“再热循环”,主缸做功后的工质在副缸内“再燃烧”、膨胀做功,提高了废气能量利用。此外,利用涡轮增压器回收利用副缸废气能量,提高副缸进气压力能;利用氧气气流回收利用排气管中废气热量,提升氧气射流内能;多项技术并举、综合施策,实现发动机高效、清洁做功。

由上分析可知:新构建的甲醇发动机采用多项先进技术,大幅提升发动机热效率,若主缸热效率超过53%,主缸导入副缸的废气热量不低于总燃烧热量的22%,副缸热效率不低于33%,则,发动机的总热效率为: $53\% + 22\% \times 33\% = 60.26\%$,具备突破60%热效率的可行性。该发动机热效率的提高,除受上述因素影响外,还受益于:

(1)向缸内喷射 O_2 射流,而 O_2 焓值大于空气焓值,提升了混合气做功能力,其实是气体储能,将制氧过程消耗的能量转换为燃烧能;

(2)利用富燃甲醇混合气燃烧废气构建活化重整氛围,将甲醇重整改质为小分子燃料,降低了燃烧可用能损失^[33]。

4.3 发动机排放分析

4.3.1 NO_x 排放分析

由于主缸不对外排气,副缸排放值决定了新概念发动机排放性能,其排放物主要是 NO_x 、HC、CO、碳烟以及甲醛。发动机主缸采用 O_2 代替空气作为助燃剂,无氮(N)参与燃烧,从源头消除 NO_x 。副缸生

成 NO_x 需3个条件,即较高的反应温度、氧浓度和时间。当温度超过1 600 K时, NO_x 生成速度开始增加,温度超过1 800 K时,反应逐渐明显^[34]。副缸以主缸燃烧废气作燃料,燃烧热值低,可控制副缸最高燃烧温度在1 550 K,从而制约 NO_x 生成反应,实现 NO_x 近零排放。

4.3.2 CH_2O 、 CO 、 THC 排放分析

主缸膨胀做功结束到燃烧废气导入副缸,缸内温度均在1 100 K以上,副缸最高燃烧温度保持在1 550 K,过量空气系数控制在1.2左右,为主缸不完全燃烧产物提供了完全氧化的条件。据文献[35]研究表明,燃烧温度 ≥ 900 K时, CH_2O 氧化反应开始加速,温度为1 400 K时, CH_2O 完全氧化仅需0.35 ms;根据文献[13],温度为1 400 K时OH基生成率增加, $\text{CO}+\text{OH}=\text{CO}_2+\text{H}$ 反应加速,被公认为 CO 向 CO_2 转化的临界温度。可见, CH_2O 、 CO 从主缸到副缸、再从副缸排入涡轮增压器,有足够温度、时间被完全氧化。

改质后的主缸混合气体中富含 H_2 和 CO 等小分子燃料,可燃混合气体的淬熄距离变短,近壁面的火焰淬熄层变薄,从而极大降低 THC 排放。同时,主缸废气进入副缸后,不再压缩而直接混合燃烧,最高压力降低,减弱了“狭隙效应”。因此,副缸极大减少了 THC 排放。而未燃 HC 后期氧化温度约为900 K^[36],即使有少量 HC 生成,也会在排出涡轮增压器前被氧化掉。

4.3.3 碳烟排放分析

甲醇是醇类中最小的分子,只含有1个C且存在C-O键,其氧化速度大于裂解形成碳烟的速度,并且甲醇自含氧量高,其含氧质量比为50%,燃烧所需氧气量少,有利于混合气体充分燃烧,在各种工况燃烧过程中均不易生成碳烟颗粒^[37]。此外,甲醇C:H比为1:4,燃烧速度快、燃烧火焰稳定,因此,基本上可以不考虑甲醇发动机的碳烟排放。由于碳烟后期氧化温度为1 000 K^[36],即使主缸有少量碳烟产生,也会在副缸中被氧化掉。

与纯电动汽车和燃料电池汽车动力比,甲醇发动机仍产生 CO_2 排放,但甲醇作为可再生燃料,既可利用煤化工废弃物合成,也可利用生物质转换而成,每合成甲醇1 t可转换 CO_2 达1.375 t,通过 $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 \dots$,形成良性碳循环,实现燃料碳中和。

5 结束语

发动机工作效率随工况变化而波动的幅度较大,

而油电混合动力汽车的发展恰好弥补了发动机这一自身难以克服的缺陷,带来发动机发展的新机遇。立足于我国能源资源禀赋,综合考虑燃料使用费用、基础设施、产品供应链因素,甲醇是实现发动机碳中和的理想燃料。通过探索碳中和发动机架构、分析其工作机理,形成如下结论:

(1)基于工质移缸技术和甲醇的理化特性(气化潜热高、自含氧量高、H:C比值高),对发动机主缸、副缸功能进行分工和界定:主缸侧重于提高发动机热效率,副缸则侧重于对主缸不完全燃烧产物的净化处理;利用内燃兰金循环(ICRC)为甲醇构建缸内无氧热化学重整改质氛围,将甲醇改质为 H_2 、 CO 、 CH_4 小分子,废气热量转换为甲醇燃烧能,降低了燃烧可用能损失,有助于综合提高发动机热效率。

(2)利用成熟的可变气门正时技术,合理控制主缸余留废气率,进而控制副缸燃烧温度,实现对不完全燃烧产物的净化处理;随着利用绿电合成甲醇技术日益成熟,主缸、副缸相互协作的新型发动机架构,将使发动机碳中和成为现实。

(3)内燃兰金循环、工质移缸、热化学燃料改质、气体储能和可变气门正时技术,均有较系统的理论和大量试验研究,将其有机融合于一体,实现燃烧能量多级回收利用,使发动机热效率突破60%具有较高的可行性。

电动汽车是汽车产业颠覆式创新的重要领域。经历20多年发展,市场份额不断提升,逐渐成为低碳移动出行的领先地位。碳中和发动机发展初期也会遇到各种艰难险阻,随着碳中和发动机的发展,相信在不远的将来,将会形成电动车、燃料电池车、“油”电混合动力汽车共存的发展态势。下一步将结合发动机模拟仿真,对本文所提方案试验和优化,在此基础上,设计样机,并对样机性能进行测试验证。

参 考 文 献

- [1] 吴乐斌.“液态阳光”将在神州大地普照[N].中国科学报,2019-07-01(07).
- [2] 纪常伟,辛固,汪硕峰,等.零碳及碳中和燃料内燃机应用进展[J].北京工业大学学报,2022,48(3):273-291.
- [3] 罗瑞琼,朱利香,彭卫韶,等.氢燃料电池能量转换效率测试研究[J].机械工程与自动化,2022,235(6):7-9.
- [4] 袁博.碳中和目标下新能源汽车技术发展趋势[J].汽车文摘,2022(5):57-62.
- [5] 尧命发.双碳目标下的车用内燃机技术趋势[R/OL].(2021-09-05)[2023-01-05].<https://new.qq.com/rain/a/20210905A05MTZ00>.

- [6] 苏万华. 高密度-低温柴油机燃烧理论与技术的研究与进展[J]. 内燃机学报, 2008, 26(增): 1-8.
- [7] 王俊昌, 张勇, 刘近平, 等. 一种甲醇-高压氧气复合式二冲程发动机及其控制方法: 202010193142X[P]. 2020-06-16.
- [8] 段俊法, 张宇, 秦高林, 等. 基于较详细机理的氢燃料内燃机排放特性研究[J]. 车用发动机, 2019(1): 21-26.
- [9] 欧阳明高, 张育华, 辛军, 等. 氢内燃机的改装设计与控制研究[J]. 内燃机工程, 2008, 29(1): 1-5.
- [10] 孙柏刚, 包凌志, 罗庆贺. 缸内直喷氢燃料内燃机技术发展及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(3): 265-278.
- [11] 彭华, 徐铭辰. 中国甲醇车用燃料大规模应用的可行性分析[J]. 经济研究参考, 2016(34): 76-84.
- [12] 姚春德, 徐元利, 张志辉, 等. 一种高效清洁燃烧纯甲醇燃料的新方法探索[J]. 天津大学学报, 2008, 41(10): 1196-1201.
- [13] 苏万华, 赵华, 王建昕, 等. 均质压燃低温燃烧发动机理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 110-141.
- [14] 秦静, 易林, 林漫群. 活化热氛围条件下甲醇压燃燃烧低温反应机理[J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18(6): 504-508.
- [15] 易林. 活化热氛围下甲醇低温氧化机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2011: 23-35.
- [16] 吴志军, 于潇. 基于内燃兰金循环的二氧化碳CO₂回收车用动力系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(5): 1199-1202.
- [17] 于潇. 往复式内燃兰金循环发动机理论建模及系统热效率研究[D]. 上海: 同济大学, 2014: 20-35.
- [18] 孟相宇, 田江平, 隆武强, 等. 基于新型热力循环的高压空气JCCI模拟分析[J]. 内燃机学报, 2018, 33(4): 297-302.
- [19] 祝佩, 田华, 孟相宇, 等. 射流温度对高温气体射流控制压缩着火的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(7): 1729-1735.
- [20] 赵自庆, 王志, 李富柏, 等. 气相射流点火天然气发动机的燃烧及排放特性[J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(1): 117-126.
- [21] 裴普成, 卢勇. 非常规热力循环内燃机的节能技术[J]. 汽车安全与节能学报, 2013, 4(1): 1-15.
- [22] 卢勇. 新型循环内燃机工质移缸和喷水做功节能原理与应用基础[D]. 北京: 清华大学, 2014: 47-66.
- [23] 刘圣华, 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 85-92.
- [24] SZYBIST J P, STEEPER R R, SPLITTER D, et al. Negative valve overlap reforming chemistry in low-oxygen environments [J]. SAE International Journal of Engines. 2014, 7(5): 418-433.
- [25] WOLK B, EKOTO I, NORTHROP W F, et al. Detailed speciation and reactivity characterization of fuel-specific in-cylinder reforming products and the associated impact on engine performance[J]. Fuel, 2016, 185(11): 348-361.
- [26] 冉帆, 王锡斌, 朱瑞军, 等. 甲醇空气预混层流燃烧的简化化学动力学机理[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 27-31.
- [27] LI J, ZHAO Z W, ANDREI K, et al. A comprehensive kinetic mechanism for CO, CH₂O, and CH₃OH combustion [J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2007, 39(3): 109-136.
- [28] 许汉君. 柴油/甲醇二元燃料燃烧反应动力学研究[D]. 天津: 天津大学, 2012: 53-73.
- [29] 刘长鹏. 天然气浓燃改质燃烧机理与试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2018: 106-117.
- [30] ZHU L, HE Z Y, XU Z, et al. In-cylinder thermochemical fuel reforming (TFR) in a spark-ignition natural gas engine [J]. Proceedings of Combustion Institute, 2017, 36(3): 3787-3497.
- [31] 刘敬平, 夏孝朗, 赵智超, 等. 内燃机燃烧放热率的典型特征参数对比以及对热-功转换效率的影响[J]. 内燃机学报, 2012, 30(3): 260-265.
- [32] 王占峰, 王陆怡, 韩令海, 等. 高效燃烧汽油机技术特点分析与研究[J]. 汽车文摘, 2020, 532(5): 18-22.
- [33] 林章磊, 闫峰, 余浩, 等. 高温无氧重整与重整燃料可用能[J]. 内燃机学报, 2017, 35(2): 97-103.
- [34] 岑可法, 姚强, 骆仲泐, 等. 燃烧理论与污染控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 412-416.
- [35] 刘方杰, 苗家轩, 刘圣华, 等. 醇类燃料发动机醛排放产生机理[J]. 内燃机学报, 2014, 32(3): 236-241.
- [36] 龚金科. 汽车排放及控制技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018: 11-21.
- [37] 李本正, 刘圣华, 农金吉, 等. 甲醇缸内直喷发动机分层燃烧和均质燃烧的试验研究[J]. 内燃机学报, 2009, 27(6): 505-510.

【作者简介】

王俊昌, 硕士, 安阳工学院机械工程学院, 副教授, 主要研究方向为发动机节能与减排。

E-mail: aywjc168@sina.com