

柴油引燃天然气发动机诱导火焰射流燃烧模式分析

沈照杰¹, 赵华², 王彦岩¹, 纪兆圻¹, 马琮淦¹, 康玉霞³

1. 哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 山东 威海 264209;

2. 布鲁奈尔大学先进动力与燃油研究中心, 英国 伦敦 UB83PH; 3. 广西玉柴机器股份有限公司, 广西 玉林 537005

摘要:为提高天然气燃烧速率,突破天然气发动机在低负荷工况下碳氢排放高、燃烧效率低,以及高负荷工况下爆震倾向显著等技术瓶颈,系统研究柴油引燃天然气发动机的引燃优化与火焰传播增强技术进展。厘清缸内预混天然气燃烧加速机制的关键科学问题,重点解析引燃柴油喷射调控、缸内火焰传播强化和诱导火焰射流三种燃烧组织模式。分析表明:提高引燃效率、加快火焰传播速度、维持火焰传播稳定及缩短火焰传播距离是解决天然气燃烧速率低的主要技术思路;诱导火焰射流燃烧方式结合柴油多点引燃和预燃室火焰射流,通过节流环设计使引燃火焰向余隙区高速射流,可以缩小缸内各区域燃烧始点、持续期及火焰传播距离差异,加快天然气火焰传播速度,是实现缸内天然气快速燃烧的潜在技术路径;节流环结构还有很大优化空间,应开展相关基础研究以推进该技术的发展和應用。

关键词:柴油-天然气双燃料发动机;燃烧优化;余隙燃烧;诱导火焰射流燃烧

中图分类号:TK401

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)03-0035-08

引用格式:沈照杰,赵华,王彦岩,等.柴油引燃天然气发动机诱导火焰射流燃烧模式分析[J].内燃机与动力装置,2025,42(3):35-42.

SHEN Zhaojie, ZHAO Hua, WANG Yanyan, et al. Analysis of induced flame jet combustion mode of diesel ignited diesel-natural gas dual fuel engine [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42 (3):35-42.

0 引言

为应对气候变化并推动全球能源治理,我国着力推进能源绿色低碳转型,国家发改委、国家能源局在《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》中提出,在交通运输领域推行氢能、天然气等清洁能源交通工具^[1-2],发展天然气能源交通工具是我国推进能源绿色低碳转型战略的重要举措。

天然气的主要成分是甲烷,并含有少量乙烷、丙烷及其他低碳烷烃,相同热值下,天然气燃烧的碳排放比柴油减少 25%,如果将柴油发动机全部切换为天然气,预计我国每年可减少碳排放 9 000 万 t^[3],天然气发动机在船舶动力、发电机组、汽车动力领域具有显著的应用潜力与发展前景。天然气中氢的占比和储采比均高于汽油、柴油,输运、存储及使用技术均已成熟;此外,天然气可通过生物质制取^[4],是碳中和战略背景下可持续生产利用的一种绿色低碳燃料。因此,推广天然气能源交通工具是我国能源绿色低碳转型可行的低成本技术路线。

天然气燃烧速度比汽油、柴油慢,动力性较差、甲烷排放较高^[5],天然气在发动机上的利用效能亟需进一步提高。国内外学者提出并优化了天然气稀燃^[6-7]、预燃室点火^[8]、双火花塞^[9]、柴油引燃^[10]、直喷分层燃烧^[11]、缸内热化学燃料改质^[12]、天然气掺氢^[13]、废气再循环^[14-15]等技术改善天然气燃烧性能。

收稿日期:2025-02-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51606054,52402107)

第一作者简介:沈照杰(1985—),女,山东五莲人,工学博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为碳中和内燃动力技术, E-mail:shenzj@hitwh.edu.cn。

柴油引燃技术具有压缩比高、无节气门损失、结构改动小、总体性能好的特点,在水陆交通动力领域得到广泛应用^[16]。但柴油引燃天然气发动机仍存在低负荷工况下碳氢排放高^[17]、燃料利用效能低、高负荷工况下爆震等问题,制约了其应用及发展进程。优化天然气燃烧过程、发展柴油引燃天然气发动机高效清洁燃烧技术,是支撑天然气交通运输工具大范围推广的重要技术途径。

天然气在缸内的物理化学过程可以分为燃料与空气混合、引燃、火焰传播三阶段。柴油引燃天然气发动机工作过程中,气体燃料经气道喷射进入气缸,在压缩上止点附近,燃料与空气混合较充分,因此强化燃料引燃和火焰传播是加快天然气燃烧的重点。本文中系统分析柴油引燃天然气发动机改善引燃和火焰传播技术,梳理加快缸内预混天然气燃烧面临的关键技术瓶颈,着重探讨提高天然气燃烧速率的可行技术路径,分析诱导火焰射流燃烧模式的机理,为天然气发动机高效清洁燃烧技术发展提供参考。

1 天然气燃烧技术现状

天然气是以甲烷为主的多种碳氢化合物混合燃料,其分子结构及理化特性限制了发动机缸内火焰传播速度。为了改善天然气燃烧性能,国内外研究者针对柴油引燃喷射、燃烧室结构优化等^[18-23]技术开展了大量试验和仿真研究。天然气发动机点火方式包括引燃式和点燃式,两种方式的燃烧室结构示意图如图 1 所示,不同点火方式对应的加快天然气燃烧的技术现状及解决措施如表 1 所示。

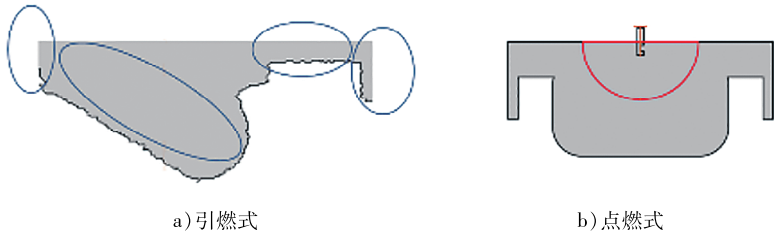


图 1 天然气发动机燃烧室结构示意图

表 1 加快天然气燃烧技术现状及解决措施

点火方式	强化方式	调控手段	技术瓶颈	解决措施
引燃	调控引燃	调整喷射压力、喷射正时、多段喷射、喷油器参数	喷油器参数和喷射参数配合难,着火核心的火焰发展氛围,高低负荷着火相位控制	扩大引燃区,燃烧室形状与喷雾形状匹配;缩扩节流环,诱导火焰向近壁区高速射流,缩小各区燃烧时序差异;节流环后涡流,保持高速气流火焰稳定
点燃	调控点火	高能点火,等离子体点火,预燃室	大缸径火焰传播距离长	
引燃和点燃	调控火焰传播	强化流动 ^① ,掺氢,改善化学氛围 ^②	高速气流火焰传播不稳定,余隙燃烧差,缸内各区域燃烧时序差异大	

①优化燃烧室结构,强化涡流、滚流、挤流。②优化化学反应条件,改善可燃混合气当量比、催化燃烧、燃烧室温度和压力。

2 天然气燃烧调控技术

2.1 基于引燃柴油喷射的天然气燃烧调控

柴油喷射调控是改善天然气燃烧的有效措施之一,通过控制引燃的柴油量、引燃柴油喷射压力、引燃柴油喷射正时、引燃柴油多段喷射等技术改善柴油喷射雾化过程^[24-28],提高柴油对天然气的引燃效率,实现天然气多点同时燃烧,但仍存在一系列调控难点。

陈舟等^[29]基于 CR9000 型高压共轨喷油器可视化试验台分析了柴油喷射流动瞬态发展特性,研究表明:喷油参数、喷孔设计参数共同影响缸内引燃柴油分布位置及雾化蒸发;喷孔设计参数选择应与喷油策略相配合,才能达到较好的引燃效果。Nie 等^[30]指出:直喷天然气柴油引燃发动机扩大缸内燃烧反应区

的情况下,柴油喷雾连续引燃着火和同时产生多个火核可加强天然气燃烧过程,降低未燃碳氢化合物排放,但为促进火焰快速发展,应保证火核附近分布较高浓度的混合气。赵国锋等^[31]基于6缸柴油引燃天然气发动机试验研究提出:为改善双燃料发动机燃烧和排放特性,一方面应增加柴油空间分布,使柴油与可燃混合气充分混合,提高引燃效率;另一方面应强化对着火相位的控制,防止燃烧不稳定,但在高负荷工况下,控制着火相位易导致发动机热效率降低。还有研究者认为引燃燃料和预混天然气燃烧所需的有利条件之间存在矛盾:Liu等^[32]基于4缸柴油天然气发动机试验研究了多段喷射燃烧和排放特性,指出多段喷射在减少碳氢排放的同时增加了 NO_x 排放及高负荷时爆震的风险。柴油引燃火焰主要集中在活塞凹坑区,低负荷时余隙燃烧差,高负荷时易爆震。协调高、低负荷工况下天然气燃烧优化矛盾,是当前提高天然气燃烧效率、降低甲烷排放、避免爆震燃烧的难点。

综上所述,引燃柴油喷射调控既应考虑喷射参数和喷油器参数的配合,还应保证在多火核区周围均具有良好的火焰发展氛围,同时要灵活控制高、低负荷着火相位,以保证缸内全局区域燃烧稳定、高效、清洁。

2.2 基于缸内火焰传播的天然气燃烧调控

在实现高压喷射柴油充分雾化引燃的前提下,控制燃烧室空间火焰传播对改善天然气燃烧极为重要。加快火焰传播速度和避免燃烧不稳定是天然气火焰传播调控的重点和难点。为了加快天然气火焰传播,研究者针对燃烧室结构优化开展了大量试验和数值仿真研究,取得了显著成效,但仍存在余隙燃烧差、火焰传播不稳定等调控难点。由于火焰到达近壁余隙区域较晚,活塞下行,缸内温度、压力降低,加上壁面熄火效应,余隙内燃烧较差,还存在火焰没有到达近壁区天然气火焰传播中断的现象。火焰传播不稳定大大增加了余隙燃烧优化的难度,即使是掺氢也难以解决在全工况稀燃运行条件下的余隙燃烧难题。

芮璐等^[33]对某直列5缸柴油引燃天然气发动机仿真研究发现,保持压缩比不变,改变燃烧室喉口直径、深度比、挤气形状,可加快天然气燃烧,使发动机指示热效率提高3.82%。王忠恕等^[34]通过减小直列6缸柴油天然气发动机燃烧室喉口直径,提高了缸内燃料的燃烧速度,在燃烧室的底部中心部位设计凸台,改善了燃烧室底部燃料燃烧。焦运景等^[35]在柴油机改造的点燃式天然气发动机上仿真证实了优化燃烧室喉口结构可加快天然气燃烧速度。Morimoto等^[36]指出,较小的燃烧室缩口结合燃烧室底部设计凸台能延长燃烧室内较高湍动能的持续期,有效促进燃料燃烧,但气缸壁附近及余隙内的天然气燃烧问题仍未得到解决。余隙空间约占燃烧室容积的3.5%,余隙内可燃混合气质量约占7%,余隙内预混合可燃燃气未燃或未完全燃烧引起的燃烧效率低、甲烷排放高的问题不可忽视。Kakaee等^[37]、Lim等^[38]应用活塞倒角(斜角大于3 mm)加快了Cat3401E柴油天然气发动机气缸壁附近及余隙内天然气的燃烧速率,使甲烷排放降低。但这种方式不能解决低负荷稀燃条件下天然气火焰传播不稳定问题^[39],此外还存在气缸中心的未燃甲烷排放高的问题^[40]。

徐通模等^[41]研究表明,天然气火焰传播速率(受限于燃气理论燃烧速度,天然气湍流燃烧速率约为0.4~20.0 m/s)小于缸内气体流动速率(上止点处约为30~100 m/s)是缸内火焰传播不稳定的主要原因之一,高速湍动气流下气体火焰很难稳定传播,低负荷工况火焰传播速率更小,更易发生缸内燃烧不稳定现象。罗坤等^[42]针对当量燃烧的某直列4缸天然气发动机,设计了不同形状的进气道和燃烧室,组织了弱涡流、强滚流、高湍流强度的缸内气流运动,显著增加了点火时刻缸内平均湍动能,加快燃烧速率,提高指示热效率,但湍动能增大导致低负荷低当量比下火焰传播不稳定性增加。现有燃烧室结构优化主要从加强缸内气体流动出发,但解决余隙燃烧问题既要加快发动机各工况下火焰传播速度,又要保证余隙内具有良好的燃烧氛围,同时还应协调强化流动带来的高速气流火焰稳定性问题。

气缸中心区域燃烧差是甲烷排放的主要来源之一。田江平等^[43]在柴油发动机可视化平台研究中发现,气缸中心喷油器附近的柴油无法自燃或者自燃后无法引燃周围的可燃气,因此在燃烧优化过程中应重点改善气缸中心区域柴油和天然气混合气的燃烧效率,在燃烧室结构优化设计针对性地改善气缸中心区域的燃烧。气缸中心和近壁余隙区内燃料燃烧是柴油引燃天然气发动机燃烧优化的难点,柴油引燃

天然气发动机缸内全局燃烧优化应同时考虑各燃烧困难区域,减少甲烷排放,提高燃烧效率。

综上所述,结合柴油引燃天然气发动机缸内天然气燃烧三阶段,归纳加快天然气燃烧的技术目标与实施方案如表 2 所示。由表 2 可知:提高引燃效率,实现大面积多点同时引燃、加快火焰传播速度、缩短火焰传播距离、减小燃烧室各区燃烧差异及维持高速气流火焰稳定传播是当前解决天然气燃烧慢的可行技术方案。

表 2 柴油引燃天然气发动机加快天然气燃烧的技术目标与实施方案

燃烧时段	目标	方案
可燃气预混合阶段	充分预混合	组织气道流动,调控天然气喷射等
柴油引燃阶段	提高引燃效率,大面积多点同时燃烧	调控引燃柴油喷射参数、喷油器设计参数等
		匹配燃烧室、调控化学氛围、掺混或使用理想引燃燃料等
火焰传播阶段	加快火焰传播速度	优化燃烧室结构,强化湍流,组织气流运动,调控当量比、温度压力等
	缩小火焰传播至燃烧室各区的燃烧差异	扩大引燃区,合适的引燃区位置,调控喷雾贯穿距离、喷射角度等
	保证高速气流火焰稳定传播	高速气流火焰稳定方法(燃烧室形状变化、钝体、旋流等形成回流区)

2.3 基于诱导火焰射流的天然气燃烧调控

加快柴油引燃天然气发动机气体燃料燃烧速度的技术途径涉及燃烧室结构设计、柴油喷射控制、余隙燃烧强化、高速气流火焰稳定等多方面,且多因素耦合,使得天然气燃烧调控极为复杂。探求同时满足柴油引燃效率高、火焰传播速度快、火焰稳定及火焰传播距离短的技术手段,开发低、高负荷工况天然气完全、快速、稳定稀燃技术是解决天然气燃烧慢的关键。

2.3.1 缸内诱导火焰射流燃烧模式

预燃室技术是点燃式天然气发动机燃烧技术发展的重要方向,该技术利用预燃室节流口实现点火火焰向主燃烧室高速射流,有效加快天然气点火及燃烧过程^[44-46],但其在大缸径机上的应用仍面临诸多挑战。Shen 等^[47-48]将预燃室火焰射流思想与柴油引燃天然气的多点压燃相结合,提出了柴油引燃天然气诱导火焰射流燃烧模式。

1)在活塞上设计诱导火焰射流环形凸台,在整个气缸周向上与缸盖共同形成缩扩结构(节流环),诱导燃烧火焰从活塞凹坑向近壁余隙区高速射流,利用射流使燃烧火焰快速充满燃烧室,增强远端可燃气的燃烧。缸内诱导火焰射流缩扩结构示意图如图 2 所示,不同曲轴转角(压缩上止点后)下原机和诱导射流燃烧室的缸内湍动能分布如图 3 所示。由图 3 可知:缸内诱导火焰射流活塞在压缩上止点后曲轴转角 5° 出现明显的火焰射流,火焰射流最大湍动能为 35 m²/s²,远大于现有文献活塞结构改动的研究结果(最大湍动能为 10 m²/s²)。

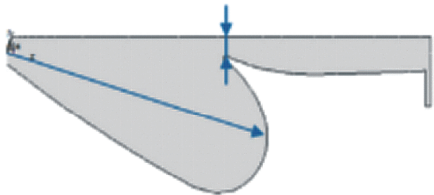


图 2 缸内诱导火焰射流缩扩结构示意图

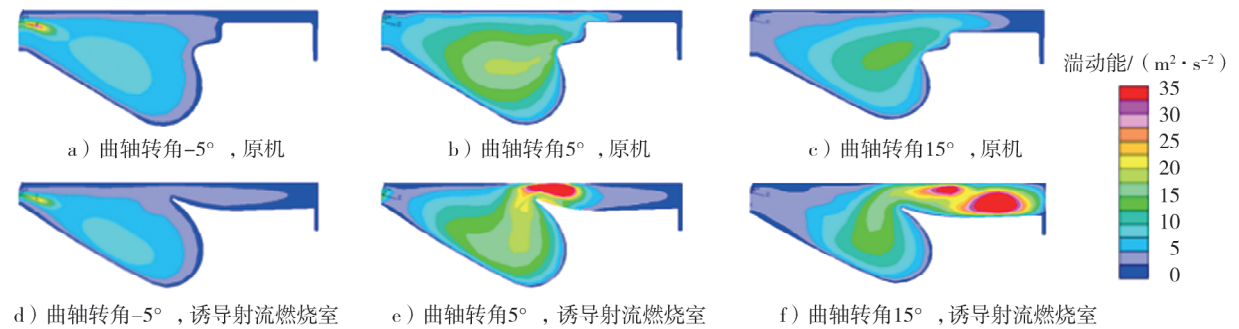


图 3 不同曲轴转角下原机和诱导射流燃烧室的缸内湍动能分布

2) 烃类燃料在实际燃烧装置中的气流速度比最大可能的湍流火焰传播速度高 10 倍以上,高速气流火焰难以稳定地向缸壁区传递,必须在高速气流中采用特殊手段稳定火焰;诱导火焰射流活塞产生射流的凸台和余隙结构起到了钝体稳定高速气流火焰^[41]的作用,并利用形状变化产生回流区,有效稳定火焰,避免燃烧中断。

3) 结合柴油喷雾形态优化活塞凹坑结构,配合缸内诱导火焰射流,缩小燃烧室不同区域的燃烧始点及燃烧持续期差异,实现缸内预混合气的全局燃烧强化,采用该燃烧方式,天然气燃烧持续期由原机上止点后曲轴转角 56.2° 缩短到曲轴转角 35.1°,可在不改变发动机其他所有运行、结构及控制参数前提下,使低负荷(转速为 1 200 r/min,指示平均有效压力为 0.6 MPa)工况下甲烷排放降低 61.8%,指示平均压力提高 14.6%,碳烟排放降低 51.4%。

与其它燃烧室结构改进强化整个工作循环缸内挤流和涡流不同,诱导火焰射流模式考虑射流产生、高速火焰稳定、柴油喷雾形状适配等多方面优化,同时满足了提高引燃效率、加快火焰传播速度、维持火焰传播稳定及缩短火焰传播距离的要求。

2.3.2 缸内诱导火焰射流燃烧模式的技术优势

1) 解决低负荷甲烷排放高和余隙燃烧差的难题。因为其有效组织了火焰射流,改变了引燃火焰的空间布局,使其快速拓展到节流环外侧的近壁余隙区,加快了近壁余隙区预混天然气着火及燃烧过程,这一区域是甲烷排放的主要来源,因此在强化余隙燃烧的同时,也有效降低了甲烷排放。

2) 具有拓展缸内稀燃极限的潜力。诱导火焰射流使燃烧火焰快速充满整个燃烧室,加快了火焰传播速度,因此,可在发动机上采用更低的燃空当量比而不使燃烧发生恶化。

3) 具有改善高负荷爆震的潜力。在大负荷工况,缸内诱导火焰射流使火焰更快更早到达近壁余隙区,有利于缓解可燃混合气远端自燃现象,也有利于采用更稀的天然气燃空当量比缓解爆震问题。

2.3.3 缸内诱导火焰射流燃烧模式的局限

1) 节流环设计使燃烧室面容比增加,引起较高的传热损失,需要研究表面涂覆层或先进散热技术以改善传热损失。

2) 产生缩扩节流环的活塞凸台也可能导致活塞出现应力集中,导致活塞耐久性下降,需通过新材料研发、新活塞冷却结构设计、活塞振荡冷却技术、表面涂层、优化过渡连接或采用镶嵌方式安装特殊材料环形凸台等途径解决;或将节流环布置在缸盖上以消除对活塞的影响。总之,节流环产生的诸多问题仍待进一步优化和解决。

2.3.4 节流环优化方向

当前设计的节流环对低负荷燃烧的改善效果十分可观,但距离实际应用还需要深层次的理论探索以支撑其优化和发展。

1) 探究诱导火焰射流产生的影响因素及这些因素对火焰射流特征的影响规律,解析诱导火焰射流的产生及调控机制,为组织和调控诱导火焰射流提供理论基础,支撑节流环设计的优化和改进,克服面容比增加的传热和应力集中问题,推进该技术的发展和应用。

2) 文献[47]研究中发现,几种活塞节流环结构缸内湍动能的明显差别出现在天然气火焰传播阶段而非柴油引燃阶段或更早。进气、压缩及膨胀过程中不同活塞几何形状缸内平均湍动能随曲轴转角变化如图 4 所示。由图 4 可知:上止点后曲轴转角 5°,原机活塞和柴油诱导火焰射流活塞的反应历程相同;在进气和压缩过程中,不同活塞结构的缸内平均湍动能相差很小,说明预混燃烧改善可能是节流环产生射流的作用,也可能是火焰稳定性得到改善的原因,诱导火焰射流大幅缩短天然气燃烧

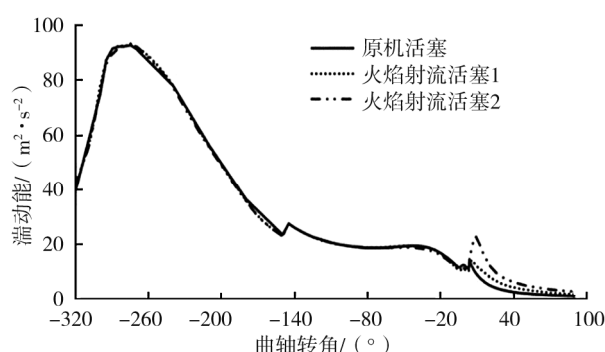


图4 进气、压缩及膨胀过程中不同活塞几何形状缸内平均湍动能随曲轴转角变化

持续期的作用机制尚不清楚。

3) 火焰射流是强湍流和高瞬变的非定常流动,传播过程中存在无序耗散,能量变迁对近壁余隙区的燃烧影响极大,燃烧过程中热-质-流多物理场不协同导致射流能量耗散。为保证能量耗散后仍有足够的点火能量点着近壁余隙区的可燃混合气,亟需发展火焰射流热、质、流低损失定向协同传播技术。

3 结论

国内外学者针对发动机天然气燃烧慢问题进行了大量研究,开发了一大批天然气发动机关键技术,为天然气发动机高效清洁燃烧技术发展奠定了理论和技术基础。柴油、天然气中多种燃料组分燃烧是复杂的物理化学过程,在燃烧优化过程中,多目标优化存在耦合冲突,面临协调高、低负荷工况下天然气燃烧优化矛盾,改善气缸内燃烧困难区域天然气燃烧及高速气流火焰传播不稳定的诸多难点。

1) 提高引燃效率、加快火焰传播速度、维持火焰传播稳定及缩短火焰传播距离是当前解决天然气燃烧慢的主要技术思路。诱导火焰射流燃烧方式结合柴油多点引燃和预燃室火焰射流思想,设计节流环使引燃火焰向余隙区高速射流,缩小了缸内各区域燃烧始点、持续期及火焰传播距离差异,加快了天然气火焰传播速度;凸台及余隙区结构起到了高速气流下钝体稳定火焰作用;凸台后的形状变化使高速气流火焰产生回流区,有效稳定火焰;活塞凹坑与柴油喷雾形态相配合,扩大了柴油的多点引燃效率,同时满足提高引燃效率、加快火焰传播、维持火焰稳定、缩短火焰传播距离四方面技术需求。

2) 节流环结构还有很大优化空间,亟需开展相关基础研究以推进该技术的发展和應用;解析诱导火焰射流的产生及调控机制,以支撑节流环设计的优化和改进;诱导火焰射流大幅缩短天然气燃烧持续期的作用机制尚不清楚,可能是节流环产生射流的作用,也可能是火焰稳定性得到改善的原因。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会. 天然气利用管理办法: 国家发展改革委员会令; 2024 年第 21 号[S/OL]. (2024-06-19) [2024-08-09]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/fzggwl/202406/P020240619558234487976.pdf>.
- [2] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见: 发改能源[2022]206号[S/OL]. (2022-01-30) [2024-08-09]. <https://zfxxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=18682>.
- [3] 王波. 天然气发动机热效率历史首次超越柴油机[J]. 能源研究与信息, 2022, 38(4): 217.
- [4] 高振, 侯建国, 王秀林, 等. 焦炉尾气耦合生物沼气制取天然气的工艺集成研究[J]. 化学工程, 2016, 44(11): 74-78.
- [5] WEI L J, GENG P. A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 142: 264-278.
- [6] 刘津津, 丁顺良, 高建设, 等. 低负荷工况下天然气发动机燃烧不稳定性分析[J]. 内燃机学报, 2022, 40(5): 394-402.
- [7] WEI H Q, ZHANG R, CHEN L, et al. Effects of high ignition energy on lean combustion characteristics of natural gas using an optical engine with a high compression ratio[J]. Energy, 2021, 223: 120053.
- [8] WU X F, FENG Y M, XU G D, et al. Numerical investigations on charge motion and combustion of natural gas-enhanced ammonia in marine pre-chamber lean-burn engine with dual-fuel combustion system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(30): 11476-11492.
- [9] 宋昌庆, 陈文森, 李君, 等. 不同当量比下单双点火对天然气燃烧特性的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(6): 1929-1935.
- [10] 刘亚龙, 毋波, 郭斌扬, 等. 柴油微引燃天然气发动机中高负荷 QHCCI 燃烧试验[J]. 内燃机学报, 2022, 40(6): 481-488.
- [11] CHEN W, PAN J F, YANG W M, et al. Stratified combustion characteristics analysis and assisted-ignition strategy optimization in a natural gas blended diesel Wankel engine[J]. Fuel, 2021, 292: 120192.
- [12] 邵宇, 何卓遥, 徐震, 等. 改质缸当量比对缸内热化学燃烧模式稀燃天然气发动机燃烧性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(11): 2532-2541.
- [13] 冷先银, 葛琪琪, 何志霞, 等. 预燃室式天然气掺氢发动机燃烧及排放模拟[J]. 内燃机学报, 2021, 39(1): 26-33.

- [14] SONG H P, LIU C P, LI Y F, et al. An exploration of utilizing low-pressure diesel injection for natural gas dual-fuel low-temperature combustion[J]. *Energy*, 2018, 153: 248-255.
- [15] 陈贵升, 魏峰, 李冰, 等. 不同进气氛围耦合废气再循环对双燃料发动机工作过程的影响[J]. *内燃机工程*, 2022, 43(2): 1-11.
- [16] 李孟涵, 李振国, 李志杰, 等. 微量柴油引燃高压直喷天然气发动机燃烧循环变动研究[J]. *车用发动机*, 2020(1): 86-92.
- [17] 邓斌静, 郭晓宇, 陈英杰, 等. 喷射策略对双燃料发动机热效率影响的研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2022, 47(5): 1244-1252.
- [18] CHEN Y J, ZHU Z, CHEN Y J, et al. Study of injection pressure couple with EGR on combustion performance and emissions of natural gas-diesel dual-fuel engine[J]. *Fuel*, 2020, 261: 116409.
- [19] 陈贵升, 魏峰, 杨杰, 等. 射流角度对双燃料发动机燃烧过程的影响[J]. *内燃机学报*, 2022, 40(4): 297-305.
- [20] LI J G, ZHANG R, YANG P H, et al. Optical investigations on lean combustion improvement of natural gas engines via turbulence enhancement[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(7): 2225-2238.
- [21] 仇滔, 邓玉婉, 雷艳, 等. 预燃火焰引燃高压甲烷射流的数值模拟[J]. *内燃机学报*, 2022, 40(6): 513-518.
- [22] 郑尊清, 王献泽, 王许, 等. 基于当量燃烧的天然气发动机燃烧室优化研究[J]. *内燃机工程*, 2020, 41(4): 1-8.
- [23] 张真英男, 李昂, 朱磊, 等. 小分子醇对天然气发动机热化学重整的影响[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(1): 222-231.
- [24] 蒋顺豪, 白云, 曹靖, 等. 喷油策略对大缸径双燃料发动机燃烧和排放的影响[J]. *船舶工程*, 2021, 43(8): 73-79.
- [25] 郑尊清, 毛一玲, 刘腾, 等. 预燃室式柴油-天然气双燃料船用发动机热效率优化燃烧控制策略仿真研究[J]. *内燃机工程*, 2020, 41(6): 19-28.
- [26] 王许, 廖秀科, 梁和平, 等. 柴油/天然气双燃料发动机数值优化[J]. *燃烧科学与技术*, 2022, 28(1): 11-19.
- [27] POORGHASEMI K, SARAY R K, ANSARI E, et al. Effect of diesel injection strategies on natural gas/diesel RCCI combustion characteristics in a light duty diesel engine[J]. *Applied Energy*, 2017, 199: 430-446.
- [28] BARTOLUCCI L, CORDINER S, MULONE V, et al. A computational investigation of the impact of multiple injection strategies on combustion efficiency in diesel-natural gas dual-fuel low-temperature combustion engines[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2021, 143(2): 022305.
- [29] 陈舟, 何志霞, 郭根苗, 等. 柴油机锥度孔喷嘴内线空化及初始气泡对喷雾形态影响的可视化研究[J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(4): 953-959.
- [30] NIE X K, SU W H. Numerical study of ignition core formation and the effects on combustion in a pilot ignited NG engine [C]//*Proceedings of International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting*. Detroit, USA: SAE International, 2017.
- [31] 赵国锋, 贾崎, 姚崇, 等. 预喷策略对双燃料发动机燃烧和排放特性的影响[J]. *内燃机学报*, 2020, 38(1): 19-26.
- [32] LIU J H, LIU Y, JI Q, et al. Effects of split injection strategy on combustion stability and GHG emissions characteristics of natural gas/diesel RCCI engine under high load[J]. *Energy*, 2023, 266: 126542.
- [33] 芮璐, 王谦. 喷射器位置对天然气发动机燃烧特性的影响[J]. *农业装备与车辆工程*, 2021, 59(1): 76-81.
- [34] 王忠恕, 李慧, 杨舟, 等. 燃烧室形状对双燃料发动机性能影响的模拟分析[J]. *车用发动机*, 2016(1): 1-8.
- [35] 焦运景, 董宏, 张惠明, 等. 燃烧室形状对天然气发动机燃烧过程影响的研究[J]. *内燃机工程*, 2009, 30(4): 28-33.
- [36] MORIMOTO S, NADA Y, KIDOGUCHI Y. Numerical simulations of mixture distributions in cylinder of natural gas engine with a subchamber[C]//*Proceedings of Conference of Chugoku-Shikoku Branc*. Tokyo, Japan: JSMECS, 2017.
- [37] KAKAEE A H, NASIRI-TOOSI A, PARTOVI B, et al. Effects of piston bowl geometry on combustion and emissions characteristics of a natural gas/diesel RCCI engine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102: 1462-1472.
- [38] LIM J H, REITZ R D. Improving the efficiency of low temperature combustion engines using a chamfered ring-land[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, 137(11): 111509.
- [39] LI Y, LI H L, GUO H S, et al. A numerical investigation on methane combustion and emissions from a natural gas-diesel dual fuel engine using CFD model[J]. *Applied Energy*, 2017, 205: 153-162.
- [40] ALKIDAS A C. Combustion-chamber crevices: the major source of engine-out hydrocarbon emissions under fully warmed conditions[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1999, 25(3): 253-273.
- [41] 徐通模, 惠世恩. 燃烧学[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.

- [42] 罗坤,黄勇成,朱赞,等. 进气道和燃烧室形状对大缸径天然气发动机缸内流动和燃烧的影响[J]. 内燃机工程, 2021,42(2):64-71.
- [43] 田江平,周洋. 基于可视化的航空煤油燃烧特性分析[C]//2018 年世界内燃机大会论文集. 无锡:中国内燃机学会,2018.
- [44] LIU X L, ECHEVERRI MARQUEZ M, SANAL S, et al. Computational assessment of the effects of pre-chamber and piston geometries on the combustion characteristics of an optical pre-chamber engine[J]. Fuel, 2023, 341:127659.
- [45] 刘博,吴越,吴璠,等. 预燃室通道直径和形状对低速天然气双燃料发动机爆震的影响[J]. 内燃机工程, 2023, 44(1):76-83.
- [46] 徐清祥,孙永亮,孔龙,等. 预燃室式火花塞在大缸径气体机上的试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(2):13-17.
- [47] SHEN Z J, WANG X Y, ZHAO H, et al. Numerical investigation of diesel-spray-orientated piston bowls on natural gas and diesel dual fuel combustion engine [C]//Proceedings of WCX SAE World Congress Experience. Detroit, USA; SAE International, 2020.
- [48] SHEN Z J, WANG X Y, ZHAO H, et al. Numerical investigation of natural gas-diesel dual-fuel engine with different piston geometries and radial clearances[J]. Energy, 2021, 220:119706.

Analysis of induced flame jet combustion mode of diesel ignited diesel-natural gas dual fuel engine

SHEN Zhaojie¹, ZHAO Hua², WANG Yanyan¹, JI Zhaoqi¹, MA Conggan¹, KANG Yuxia³

1. School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China;

2. Centre for Advanced Powertrain & Fuels, Brunel University, London UB83PH, UK;

3. Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd., Yulin 537005, China

Abstract: To improve the combustion process of natural gas, this paper systematically investigates the research progress on ignition optimization and flame propagation enhancement technologies for diesel and natural gas dual fuel engines. By clarifying the core scientific issues of the in-cylinder premixed natural gas combustion acceleration mechanism, the characteristics of three combustion organization modes, regulation of diesel injection, enhancement of in-cylinder flame propagation enhancement, and new combustion mode of induced flame jet are emphatically analyzed. The analysis results indicate that the main technical paths to accelerate natural gas combustion include improving ignition efficiency, enhancing flame propagation speed, maintaining stable flame propagation, and shortening flame propagation distance. The induced flame jet combustion mode represents a potential way to speed up combustion of natural gas by integrating multi-point auto-ignition of diesel with flame jets generated through a throttle ring. In this mode, the combustion flame is injected into the clearance region at high speed, the differences of the start of ignition, combustion duration, and flame propagation distance among different regions in the cylinder will be effectively reduced. To further optimize natural gas combustion performance, the throttle ring structure can undergo additional refinement. Meanwhile, clarifying the mechanism of induced flame jet combustion is essential to promote the technology's development and practical application.

Keywords: diesel-natural gas dual fuel engine; combustion optimization; clearance combustion; induced flame jet combustion

(责任编辑:刘丽君)