

内燃机点火系统研发进展

赵庆武^{1,2}, 孔德炎², 田杰¹, 熊勇¹, 程勇^{1*}, 王兆宇³

1. 山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061; 2. 萨里大学机械工程学院, 吉尔福德 英国 GU27XH;
3. 龙口中宇热管理系统科技有限公司, 山东 龙口 265716

摘要:为提高内燃机在稀燃模式下的点火稳定性,从点火机理及放电等离子体覆盖范围两个角度分析不同点火的效果,探讨点火系统在燃烧速率控制及爆震抑制等方面的潜力,总结先进点火系统的发展方向。分析结果表明:点火系统在内燃机燃烧控制过程中起关键作用,先进点火技术可以保证内燃机在稀燃模式下的点火稳定性;增大点火能量和点火范围可以提高点火稳定性,但这两者同时增大导致总点火能量急剧上升,要求点火系统的功率更大,增大系统的复杂度,降低发动机的经济性。目前绝大多数点火方法主要基于气体放电生成等离子体引燃混合气,通过调整放电等离子体的特性,点火系统可以在缸内燃烧全过程对燃烧放热进行柔性控制。

关键词:内燃机;点火系统;高压放电;等离子体;燃烧调控

中图分类号:TK401

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)03-0001-09

引用格式:赵庆武,孔德炎,田杰,等. 内燃机点火系统研发进展[J]. 内燃机与动力装置,2025,42(3):1-9.

ZHAO Qingwu, KONG Deyan, TIAN Jie, et al. Development and trends in ignition systems for internal combustion engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025,42(3):1-9.

0 引言

点火系统是点燃式内燃机的重要部件,用于精确控制燃烧始点。稀薄燃烧及废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)等技术是实现清洁高效燃烧模式的有效手段。随着稀燃程度及 EGR 率不断提高,稳定点火越来越困难,导致内燃机循环变动较大,不利于提高内燃机性能与效率^[1],因此先进点火技术的突破对提高点燃式内燃机效率非常关键。

稀燃下混合气的最小点火能量(minimum ignition energy, MIE)较化学计量比混合气增加,高能点火是稀燃下有效的增强点火稳定性的方法^[2]。但高能点火的能量利用效率较低,大部分放电能量在电极处以热能散失,只有少部分能量沉积到混合气中,沉积在电极中的大量能量易造成电极烧蚀。当混合气浓度分布不均匀时,高能点火不能保证点火稳定性。因为其点火能量集中在很小的放电间隙,尤其是在缸内湍流强度较高时,最易燃混合气难以被稳定捕获^[3]。增大点火范围能增加捕获最易燃混合气的概率,同时大体积火核的比表面积更小,散热损失相对燃烧放热更低,形成的火核更容易自我维持,能提高混合气浓度分布不均匀及强湍流下的点火稳定性。但增大点火范围使得放电能量分散,如果点火范围内每一处混合气获得的能量都超过 MIE,总点火能量将急剧增加。

理想的点火系统应以最小总点火能量将点火范围覆盖至最大,因此单位体积点火所需能量(unit ignition energy, UIE)应尽量低,且放电通道的覆盖范围应尽量广。不同点火系统的 UIE 不同,一是因为点

收稿日期:2024-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51976107,52376118)

第一作者简介:赵庆武(1992—),男,湖北仙桃人,工学博士,主要研究方向为内燃机燃烧控制及新能源动力系统,E-mail:q.zhao@surrey.ac.uk。

*通信作者简介:程勇(1963—),男,石家庄人,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为内燃机燃烧组织及新能源汽车,E-mail:cysgd@sdu.edu.cn。

火能量从点火系统沉积到混合气的过程存在损失,二是能量转移到混合气中的动力学路径不同。传统的火花点火能量主要以热能沉积到混合气中,新型的非平衡等离子体点火可以将点火能量转换为温度较低但反应活性较高的活性粒子,这两者的点火机理存在明显差别,是影响 UIE 的重要因素。目前绝大多数点火系统都是通过电磁场激励(高电压、微波、激光)的气体放电引燃混合气,点火范围主要由放电方式决定,与气体放电过程的特性有关。

目前绝大多数点火方法通过气体放电产生等离子体引燃混合气,深入认识放电等离子体特性及其点火机理,对高性能点火系统开发十分必要。本文中从点火机理及放电等离子体覆盖范围两个角度分析不同点火方法的效果,探讨非平衡等离子体点火系统在燃烧过程控制方面的潜力,为内燃机先进点火系统的研究提供参考。

1 点火系统的点火机理

目前最常用的点火方法为高压电火花点火,高压放电在火花塞间隙产生的电火花通道中心温度约为 6 000 K^[4]。火花通道中的气体被电离,产生的等离子体中电子温度和重粒子温度接近,为热等离子体,其电子能量较低(气体温度约 6 000 K 时,火花通道中的等离子体对应的电子能量约为 0.52 eV),直接电子碰撞反应的速率很低,主要通过高温加速链引发反应来点火。以 H₂ 的点火过程为例,H₂、O₂、N₂ 混合气的关键反应式^[5]如表 1 所示。

表 1 等离子体辅助 H₂、O₂、N₂ 反应系统的关键反应式

编号	反应式	反应类型	编号	反应式	反应类型
R1	H ₂ +O ₂ →HO ₂ +H	链引发反应	R8b	e+O ₂ ⁺ →O+O	电子和 N ₂ 的碰撞反应
R2	H+O ₂ →OH+O	链分支/传播反应	R9a	N ₂ (A,B,C)+O ₂ →O+O+N ₂	电子和 N ₂ 的碰撞反应
R3	O+H ₂ →OH+H	链分支/传播反应	R9b	N ⁺ +O ₂ →O ⁺ +NO	电子和 N ₂ 的碰撞反应
R4	OH+H ₂ →H ₂ O+H	链分支/传播反应	R10	H+O ₂ (¹ Δ _g)→O+OH	等离子体活化反应
R5	HO ₂ +H→OH+OH	链分支/传播反应	R11	O ₃ +O ₂ →O+O ₂ +O ₂	等离子体活化反应
R6	H ₂ O ₂ →OH+OH	链分支/传播反应	R12	O(¹ D)+H ₂ →OH+H	等离子体活化反应
R7	H+O ₂ (+M)→HO ₂ (+M)	链中止反应	R13a	NO+HO ₂ →NO ₂ +HO	NO 催化分支反应
R7b	H+HO ₂ →H ₂ +O ₂	链中止反应	R13b	H+NO ₂ →NO+OH	NO 催化分支反应
R8a	e+O ₂ →O+O(¹ D)	电子和 N ₂ 的碰撞反应			

没有电子碰撞反应时,H 和 HO₂ 自由基最初都由反应 R1 产生,此后,一个 H 自由基将通过链分支反应 R2 产生两个自由基(OH 和 O);反应 R2 的活化能较高,需要较高温度(标准大气压下温度约为 1 100 K)来加速反应;随后,OH 和 O 自由基将通过链传播反应 R3、R4 迅速产生 3 个 H 自由基,导致自由基浓度以指数级增长并引发着火。这一过程中,R1、R2 的反应速率较慢,是导致点火延迟的关键。当等离子体中存在高能电子时,通过电子碰撞反应产生的自由基可以绕过反应速率较慢的 R1、R2,直接为 R3、R4 提供所需自由基,大大缩短点火延迟。

除火花点火外,还有微波放电点火^[6]、介质阻挡放电点火^[7]等通过产生等离子体点火的新型点火方式。不同等离子体中的电子能量和电子数密度分布^[5]如图 1 所示。由图 1 可知:介质阻挡放电和射频电晕放电等离子

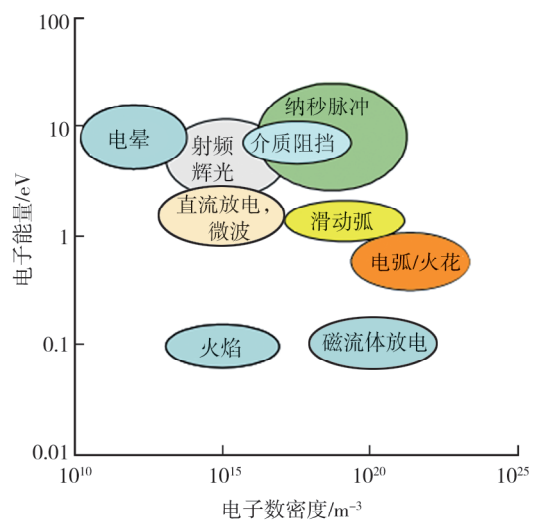


图 1 不同等离子体中的电子能量与电子数密度分布

体的电子能量较高,可达 10 eV,通过高能电子轰击反应物分子能高效产生活性自由基,在较低温度下就能点火。等离子体中的电子能量取决于放电时的约化场强(电场强度 E 与中性粒子数密度 N 的比),约化场强越高,平均电子能量也越高。

反应 R8a 与 R1~R3、R6 的反应常数及反应速率随约化场强的变化对比如图 2、3 所示^[8]。由图 2 可知,电子碰撞反应的反应常数比热着火的链起始和链分支反应常数高几个数量级。由图 3 可知:在较低温度下(低于 1 000 K),电子碰撞反应 R8a 产生自由基的速率比 R2 快得多;随着温度升高,R8a 反应速率降低,在中等温度区间(低于 1 500 K),R8a 仍显著快于 R6;在更高温度区间,常规的链起始和链分支反应速率超过电子碰撞反应速率。因此电子碰撞反应的强化点火效果在中低温区间更显著,根据这一特性,可以利用非平衡等离子体点火降低点火所需能量。非平衡等离子体中电子温度远高于重粒子温度,即电子能量高而等离子体整体温度低^[9]。纳秒脉冲放电和射频放电能最大限度地利用放电击穿瞬间的高场强,产生高能电子,同时不会因持续放电产生电弧导致电场降低,避免大量放电能量转为气体中的热量,从而产生温等离子体甚至冷等离子体。非平衡等离子体的化学活性强,而且不需要大量能量提高等离子体的整体温度,比热等离子体点火能效更高。

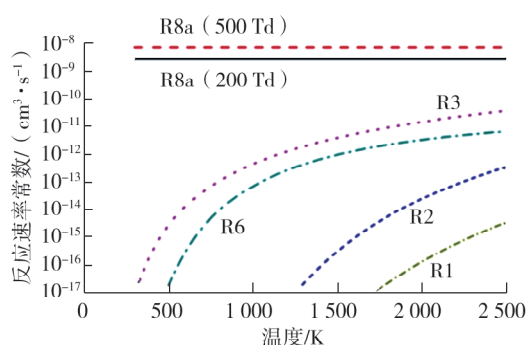


图2 不同约化场强下反应速率常数随温度的变化

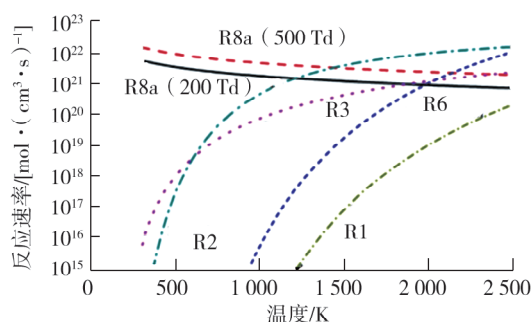


图3 不同约化场强下反应速率随温度的变化

不同点火方式在引发燃烧链式反应方面存在差别,但一次成功的点火除了需要引发链式反应,还应保证产生的火核能自持传播^[8]。自持火核的燃烧放热超过向周围的散热,使得火焰温度得以维持并引燃周围的新鲜混合气进行传播。燃烧放热量与火核体积成正比,散热量与表面积成正比,因此存在最小火核半径,半径大于最小火核半径的火核才能自持。混合气的最小火核半径决定了其最小点火能量。小分子混合气或者粒子扩散速率相对热扩散速率更快(路易斯数较小)的混合气最小火核半径更小,更容易点火。非平衡等离子体中的高能电子能将燃料分子轰击成小分子碎片,加速燃料与空气混合,降低最小点火半径,因而能降低最小点火能量。另外,多种新型的点火系统能产生大范围分布的放电通道,点火范围远大于最小点火半径,强化了点火效果。

2 点火系统的点火范围

除提高点火稳定性外,增大点火范围还可以缩短点火延迟,减小火焰传播距离,增加燃烧等容度,提高热效率。点火范围取决于点火电极结构以及点火系统激励方式。常见的晶体管线圈点火系统产生的放电通道集中在狭小的火花塞电极缝隙,点火范围很小。也有可以直接产生较大的放电区域、形成大体积或范围点火的方法,如射频放电点火、微波点火、介质阻挡放电点火等。

2.1 点状点火

火花塞等针-针型电极在高压脉冲的激励下,可以在电极间隙产生火花放电,形成点状火源。受击穿电压限制,电极间隙通常小于 1 mm,间隙过大可能无法放电,导致失火。为扩大火花点火范围,文献[3]中在一个与普通火花塞尺寸相当的火花塞上集成了 3 对电极,采用 3 个分离的线圈分别驱动,能同时产生 3 个点火点,常规火花塞与 3 极火花塞放电对比如图 4 所示。多个点火位置增加了火花捕获可燃混合

物的机会,单缸机上的试验表明,采用 3 极点火替换单点点火,在总放电能量相同的情况下,可以将稀燃极限从 1.8 扩展到 2.0,EGR 容限从 6% 扩大到 32%^[10]。



a) 单电极侧视图

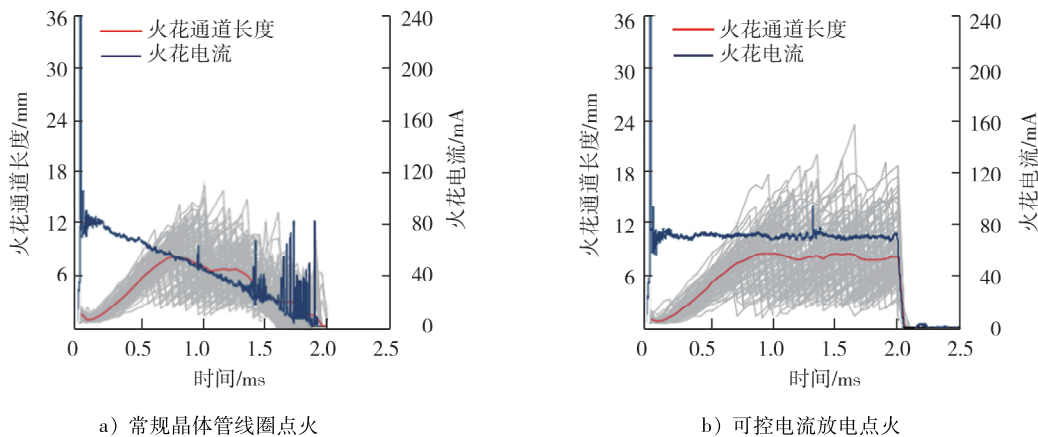
b) 3 极火花塞侧视图

c) 3 地电极火花塞顶视图

d) 3 极火花塞顶视图

图 4 常规火花塞与 3 极火花塞对比

当火花隙区域的气流速度较大时,火花通道受到气流拉伸,形成更大的点火范围;气流速度较低时,火花拉伸率较低,点火能量在电极上的热损失增加,点火效率降低。但高流速下火花通道较难维持稳定,容易被吹熄,或发生再击穿,易导致失火。通过控制次级放电电流,可使气流速度较大时火花通道更稳定。Brandt 等^[11]在气流速度为 10 m/s 时测试了传统火花点火(transistor coil ignition,TCI)和可控电流点火(controlled electronic ignition,CEI)在 50 个循环中的火花通道长度,发现 TCI 的电流衰减呈三角波形,当电流低于 50 mA 时,火花通道明显变短;CEI 的电流保持恒定,火花通道长度更稳定。不同点火方式下的火花通道长度和电流如图 5 所示。当次级电流小于某一定值时,火花通道容易被吹熄,相比三角波形电流,方波形电流能有效维持拉伸的火花通道,减小再击穿概率,提高稀燃与 EGR 极限^[9]。

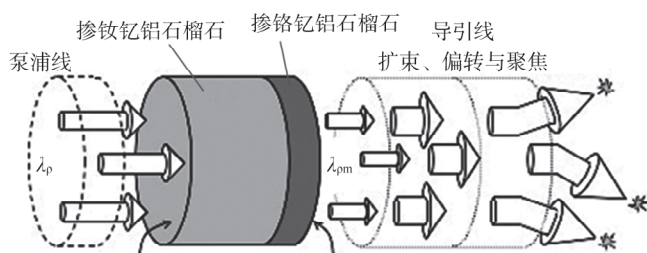


a) 常规晶体管线圈点火

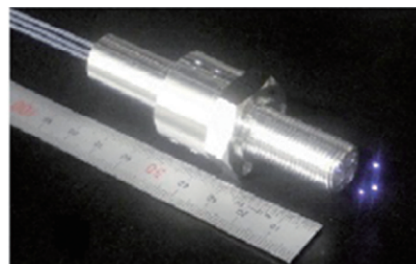
b) 可控电流放电点火

图 5 不同点火方式下的火花通道长度和电流

当足够峰值功率的激光脉冲聚焦到足够小的点时,可产生足够强的电场分量,引发气体电击穿,称为激光诱导火花点火。采用多个激光头或将多束激光集成在一个点火器上,形成激光多点点火^[12],多束激光多点点火如图 6 所示。



a) 多束激光集成示意图



b) 多束激光集成点火器

图 6 激光多点点火

Yamaguchi 等^[13]在双点点火模式下对比了火花点火和激光点火对内燃机性能和排放的影响,研究表明:在保证循环变动率小于 5% 的情况下,激光点火的稀燃极限燃空当量比可达 0.54,火花点火的稀燃极限燃空当量比仅为 0.60。

通过特殊的结构设计,可以使微波通过微波塞时形成谐振产生强电场击穿混合气,在微波塞尖端形成点火源。Imagineering 公司将这种新型点火器称为微波放电点火器(microwave discharge igniter, MDI),研究表明:在采用 CO₂ 对丙烷-空气混合气进行稀释时,MDI 较火花点火时的稀释极限更宽^[14]。微波谐振点火结构如图 7 所示。

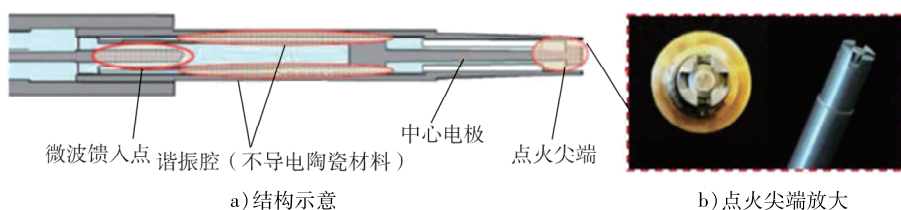


图7 微波谐振点火结构

2.2 大体积点火

文献[14]将定容弹作为微波谐振腔,通过带尖端的微波塞将微波导入到定容弹中,产生了大体积的微波等离子体点火。等离子体在微波塞尖端产生,由于尖端的局部电场较强,有利于击穿混合气,在背压为 0.1 MPa 下产生的微波等离子体体积约为 1 cm³。微波功率为 1 kW、微波脉宽为 100 μs 时,去除反射的能量,进入容弹的微波能量约为 60 mJ。点火试验结果表明,相比火花点火,该微波谐振点火能有效提高稀燃极限。微波谐振点火的谐振腔示意图、微波塞与火花塞及 MRPI 放电图像如图 8 所示。



图8 微波谐振点火

射频电晕放电(radio frequency based corona ignition, RFCI)也能产生大体积的空间点火,其采用频率为数百 kHz 以上(即射频)的高压交流电驱动带尖端的电极,可以产生空间分布的多条放电通道^[15]。与火花点火相比,RFCI 的初始火核分布范围更广,火核增长速度更快,在气流扰动下这一效果更明显^[16],射频电晕放电图像如图 9 所示。采用多尖端电极时,RFCI 可形成多个独立的火核。目前 RFCI 技术已实现了商用化应用,如先进电晕点火系统(advanced corona ignition system, ACIS)和 Ecoflash 点火系统。RF 放电电压和缸内气体压力影响放电通道的数量和长度,应控制放电电压使放电保持在电晕状态并避免电弧放电^[17]。

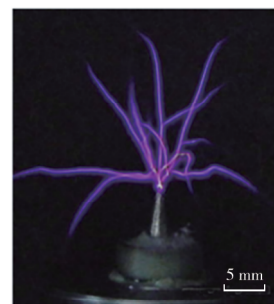


图9 射频电晕放电图像

当电极间隙较大时,高压纳秒脉冲放电可以产生覆盖很大空间的低温等离子体,这种方式称为瞬态等离子体点火(transient plasma ignition, TPI)^[18]。Singleton 等^[19]设计同轴电极进行 TPI 测试,中心电极采用长为 32 mm 的不锈钢螺杆,通过调整外侧筒状电极直径,控制两电极的径向间距为 4~15 mm,当施加电压幅值为 56 kV、半高宽为 54 ns 的脉冲后,产生了覆盖整个电极间隙的流注放电,瞬态等离子体点火的放电与火核发展过程如图 10 所示。由图 10 可知:初始火核从中心电极附近的多个着火点引发,沿流注通道向外电极发展;光谱拟合结果表明,空气中 TPI 放电区域的气体温度为约 300 K,接近室温,其点

火机理明显与热着火不同。Singleton 等^[19]认为火核倾向于在电场最强的地方产生,因为这些地方通过电子碰撞产生的活性粒子最多。Shiraishi 等^[20]发现 TPI 也可以在内燃机缸内的高压氛围下产生,与火花点火相比可以显著拓展稀燃和 EGR 极限,但与 RFCI 类似,TPI 也容易转为电弧放电。

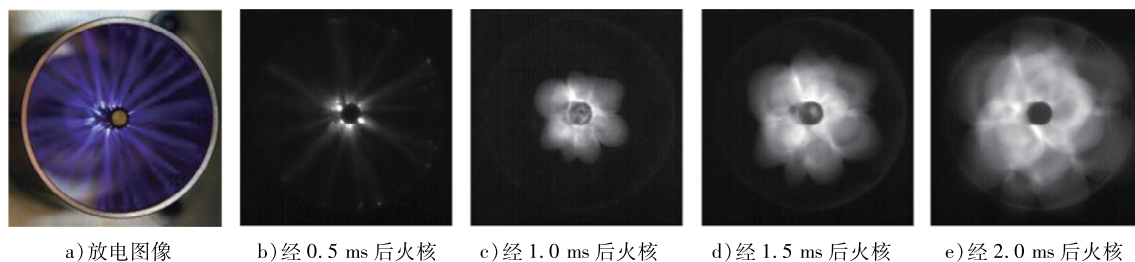


图 10 瞬态等离子体点火的放电与火核发展过程

2.3 大面积点火

将高压纳秒脉冲施加到沿面介质阻挡电极时,可以在绝缘介质表面同时产生大范围分布的放电通道,每条放电通道都可以点火,这种方式称为纳秒脉冲沿面介质阻挡放电点火^[16](nanosecond surface dielectric barrier discharge, nSDBD),nSDBD 电极示意图如图 11 所示。由于绝缘介质的阻隔,相比 RFCI 和 TPI,nSDBD 放电不会形成单一的电弧通道,可以保证产生大面积分布的等离子体,实现大范围点火。文献[20]观察到 nSDBD 点火在不同放电条件下存在三种模式:零星的数个火核(+20 kV,3 mJ)、沿中心电极边缘准均匀分布的火核(+33 kV,5 mJ)、沿着放电通道发展的火核(+53 kV,10 mJ),nSDBD 的放电和点火特性如图 12 所示,图 12 中点 1~6 的火核形态如图 13 所示。

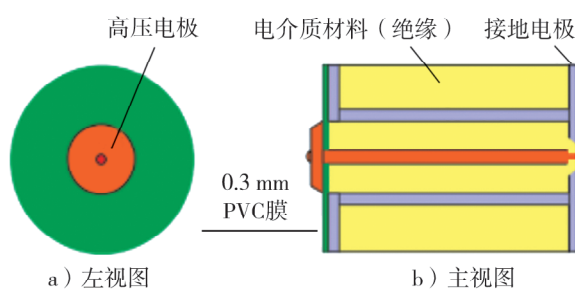


图 11 nSDBD 电极示意图

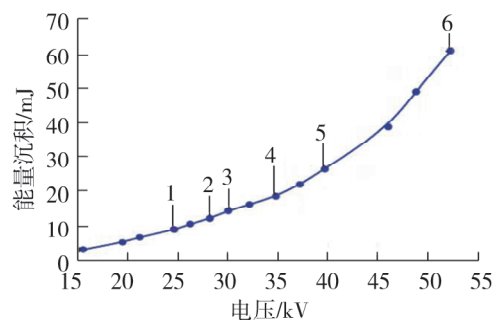


图 12 nSDBD 的放电和点火特性

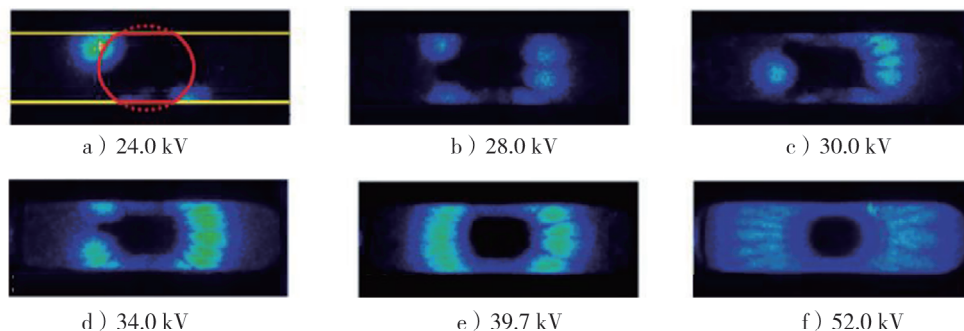


图 13 nSDBD 不同电压下的火核形态

文献[21]在快速压缩机内进行了 nSDBD 点火试验,在温度为 600~1 000 K、压力为 0.6~1.6 MPa 时实现了大范围点火,平均每个流注通道的放电能量低至 5~10 μJ 。

3 非平衡等离子体点火系统的燃烧控制潜力

除实现精确的点火正时之外,研究人员尝试使点火系统更广泛地参与缸内燃烧过程的调控。文

献[22]提出了一种高效率低温燃烧内燃机的运行控制策略,如图14所示。

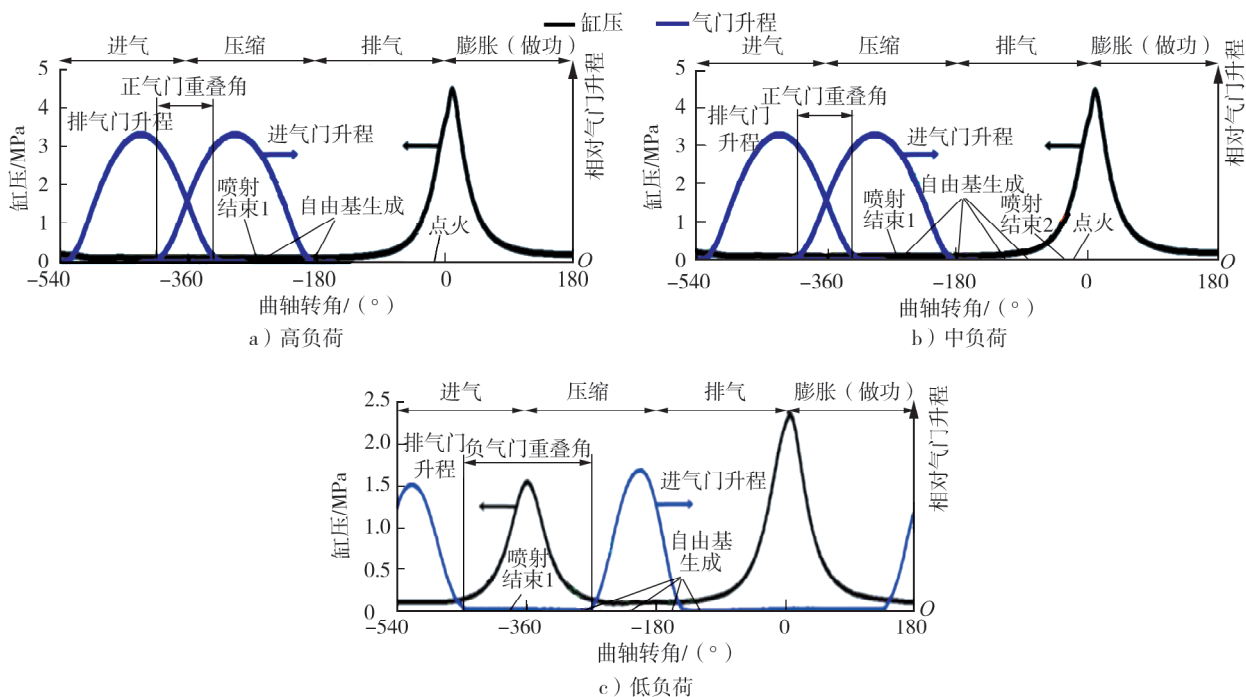


图14 不同工况下点火系统用于自由基产生和点火控制的示意图

由图14可知:点火系统在燃烧控制过程中起关键作用,在不同的转速和负荷下,点火系统在压缩冲程的不同时刻,通过不同时间的放电产生不同种类和浓度的活性自由基,进而控制燃烧相位与放热速率,提高稀释与稀燃极限。文献[23]在定容弹中采用 nSDBD 非平衡等离子体对丙烷空气混合气进行预处理,测试结果表明,预处理引起的气体流动和活性离子可以明显加速随后的燃烧过程。

文献[24]采用高频重复脉冲(脉冲重复效率为 20 kHz)驱动的 nSDBD 在丙烷空气混合气中进行了点火试验,第一个放电脉冲触发 2 ms 后不同放电能量下的火核图像如图 15 所示。

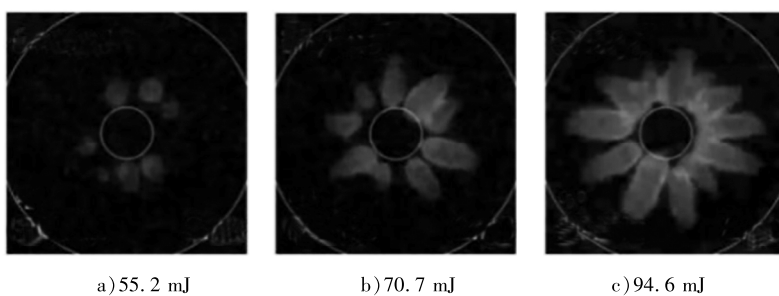


图15 丙烷空气混合气 nSDBD 不同放电能量下的火核图像

由图15可知:在火核产生后继续放电可以有效促进火核增长;持续放电下,圆形的初始火核发展为沿放电通道分布的长条形,火核当量直径迅速增加,燃烧速率明显加快。

文献[25]在 NH_3 空气混合气中进行了 nSDBD 点火试验,与丙烷空气混合气中不同, NH_3 的燃烧速度较慢,持续放电下火核的面积增长较慢,由放电引发的气流扰动导致的火核位移更加明显。 NH_3 空气混合气点火试验中,脉冲重复频率为 20 kHz, nSDBD 持续放电下初始火核的变化如图 16 所示。

这些研究表明,点火系统的研究已超出燃烧始点控制的范畴。点火前,通过点火系统放电产生的等离子体可以调整缸内工质中活性自由基的浓度及气流扰动;火核产生后,通过持续放电可以调控火核的发展过程,进而控制放热速率。通过调整放电等离子体的特性,点火系统可以在缸内燃烧组织的全过程对燃烧放热进行柔性控制。

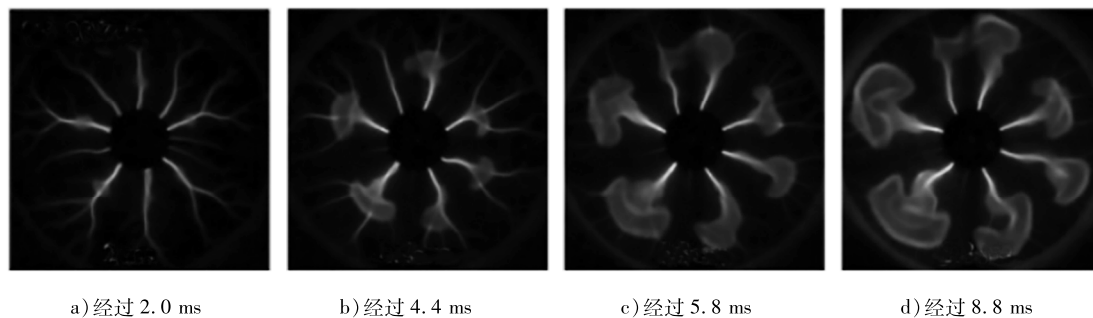


图 16 NH_3 空气混合气 nSDBD 持续放电下初始火核的变化

4 结束语

1) 非平衡等离子体的化学活化作用较强, 点火延迟更短, 点火过程的能效更高, 稀燃极限更宽; 激发非平衡等离子体需要的能量更少。

2) 激发空间分布的大体积等离子体比较困难, 需要能量较大, 沿面分布的大面积等离子体是更实际的大范围点火方法; 上止点附近燃烧室的轴向间隙小, 沿气缸横截面分布的面等离子体与覆盖整个气缸的体等离子体的点火效果比较接近。

3) 随着对等离子体点火和燃烧机理研究深入以及功率电子技术发展, 点火系统设计由单一驱动方式为主转为以最佳点火原理为依据、多种放电(驱动)方式按需结合的模式。

4) 点火系统的作用正从传统意义上的火核引发扩展到广义的燃烧过程控制, 如燃烧开始前的混合气预处理、火核发展过程控制等。未来的点火系统除了实现更加高效稳定的火核引发外, 在燃烧过程控制方面发挥更多、更重要的作用; 对非平衡等离子体点火系统的深入研究, 将极大助力内燃机高效燃烧模式的应用。

参考文献:

- [1] RAPP V, ILLINGSWORTH N, THERKELSEN P, et al. 4-lean-burn internal combustion engines[M]. 2nd Ed. Boston, USA: Academic Press, 2016: 111-146.
- [2] YU S, XIE K, YU X, et al. High energy ignition strategies for diluted mixtures via a three-pole igniter[C]//Proceedings of SAE 2016 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. Detroit, USA: SAE International, 2016.
- [3] SHY S S, NGUYEN M T, HUANG S Y. Effects of electrode spark gap, differential diffusion, and turbulent dissipation on two distinct phenomena: turbulent facilitated ignition versus minimum ignition energy transition[J]. Combustion and Flame, 2019, 205: 371-377.
- [4] KINOSHITA M, FUYUTO T, AKATSUKA H. Measurement of vibrational and rotational temperature in spark-discharge plasma by optical emission spectroscopy: change in thermal equilibrium characteristics of plasma under air flow[J]. International Journal of Engine Research, 2019, 20(7): 746-757.
- [5] JU Y G, SUN W T. Plasma assisted combustion: dynamics and chemistry[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2015, 48: 21-83.
- [6] 黄健. 一种新型点火模式——微波谐振等离子体点火的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [7] STEPANYAN S A, YU STARIKOVSKIY A, POPOV N A, et al. A nanosecond surface dielectric barrier discharge in air at high pressures and different polarities of applied pulses: transition to filamentary mode[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2014, 23(4): 45003.
- [8] VÁZQUEZ-ESPÍ C, LIÑÁN A. Thermal-diffusive ignition and flame initiation by a local energy source[J]. Combustion Theory and Modelling, 2002, 6(2): 297-315.
- [9] RAT V, ANDRÉ P, AUBRETON J, et al. Transport properties in a two-temperature plasma: theory and application[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2001, 64: 026409.

- [10] XIE K, YU S, YU X, et al. Investigation of multi-pole spark ignition under lean conditions and with EGR[C]//Proceedings of WCX™ 17: SAE World Congress Experience. Detroit, USA: SAE International, 2017.
- [11] BRANDT M, HETTINGER A, SCHNEIDER A, et al. Extension of operating window for modern combustion systems by high performance ignition[C]// Proceedings of Ignition Systems for Gasoline Engines. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2017: 26–51.
- [12] DASCALU T, CROITORU G, GRIGORE O, et al. High-peak-power passively Q-switched Nd:YAG/Cr4+:YAG composite laser with multiple-beam output[J]. Photonics Research, 2016, 4(6): 267.
- [13] YAMAGUCHI S, KASHIWAZAKI T, NISHIOKA M, et al. Dual-point laser ignition and its location effects on combustion in lean-burn gas engine[J]. SAE International Journal of Engines, 2015, 8(3): 1435–1446.
- [14] PADALA S, NAGARAJA S, IKEDA Y, et al. Extension of dilution limit in propane-air mixtures using microwave discharge igniter[C]//Proceedings of 13th International Conference on Engines & Vehicles. Detroit, USA: SAE International, 2017.
- [15] WANG Z, HUANG J, WANG Q, et al. Experimental study of microwave resonance plasma ignition of methane-air mixture in a constant volume cylinder[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(6): 2561–2568.
- [16] RICCI F, PAPI S, BATTISTONI M, et al. Engine efficiency measurements using a 100 kHz radio frequency corona igniter [C]//Proceedings of 16th International Conference on Engines & Vehicles. Detroit, USA: SAE International, 2023.
- [17] 赵庆武. 瞬态高频纳秒脉冲沿面介质阻挡放电多通道点火技术应用基础研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [18] WANG L Y. Characterization of corona discharge for ignition improvement[D]. Windsor, Canada: University of Windsor, 2019.
- [19] SINGLETON D, PENDLETON S J, GUNDERSEN M A. The role of non-thermal transient plasma for enhanced flame ignition in C₂H₄-air[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(2): 022001.
- [20] SHIRAISHI T, URUSHIHARA T, GUNDERSEN M. A trial of ignition innovation of gasoline engine by nanosecond pulsed low temperature plasma ignition[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(13): 135208.
- [21] SHCHERBANEV S A, POPOV N A, STARIKOVSKAIA S M. Ignition of high pressure lean H₂: air mixtures along the multiple channels of nanosecond surface discharge[J]. Combustion and Flame, 2017, 176: 272–284.
- [22] STEPANYAN S, VANHOVE G, DESGROUX P, et al. Time-resolved electric field measurements in nanosecond surface dielectric discharge. comparison of different polarities. ignition of combustible mixtures by surface discharge in a rapid compression machine[C]//Proceedings of 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston, USA: AIAA, 2013.
- [23] IDICHERIA C A, YUN H, NAJT P M. An advanced ignition system for high efficiency engines[C]//Proceedings of Ignition Systems for Gasoline Engines: 4th International Conference. Berlin, Germany: Institut für Kolbenmaschinen (IFKM), 2018.
- [24] XIONG Y, TIAN J, CHENG Y, et al. Investigation on the regulation of the combustion characteristics of a propane/air mixture by repetitive nSDBD pretreatment[J]. ACS Omega, 2024, 9(29): 31631–31645.
- [25] ZHAO Q W, XIONG Y, YANG X, et al. Experimental study on multi-channel ignition of propane-air by transient repetitive nanosecond surface dielectric barrier discharge[J]. Fuel, 2022, 324: 124723.

Development and trends in ignition systems for internal combustion engine

ZHAO Qingwu^{1,2}, KONG Deyan², TIAN Jie¹, XIONG Yong¹,
CHENG Yong^{1*}, WANG Zhaoyu³

1. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of Mechanical Engineering Sciences, University of Surrey, Guildford GU27XH, UK;

3. Longkou Zhongyu Thermal Management System Technology Co., Ltd., Longkou 265716, China

Abstract: To improve the ignition stability of internal combustion engines in lean-burn mode, the effects of different ignition methods are analyzed from two perspectives: ignition principles and the coverage range of

(下转第 18 页)

distribution characteristics of exhaust temperature, the combustion control area in the cylinder is divided into several intervals, and differentiated temperature control strategies are formulated for each interval. Based on the experimental verification of the effects of two exhaust thermal management technologies, namely intake throttle valve regulation and combustion parameter optimization, an adaptive exhaust thermal management strategy for the engine integrated with SCR automatic heating mode is designed. Engine bench cold world unified transient cycle (WHTC) tests and high-altitude complex road condition real vehicle verification tests are conducted to evaluate the actual effectiveness of the thermal management strategy. The results show that the influence of post injection quantity and post injection timing on exhaust temperature is significantly greater than that of rail pressure, main injection timing, and pre-injection timing. Furthermore, as the post injection quantity and timing increase, the exhaust thermal management effect gradually strengthens. When the closing degree of the intake throttle valve is not less than 70%, the exhaust temperature shows an upward trend with the increase of the closing degree of the intake throttle valve. When the engine operates at medium to high loads, it can achieve good thermal management effects by optimizing combustion parameters such as fuel injection quantity and timing. Under low load and zero load conditions, the strategy of regulating and coupling combustion parameters through the intake throttle valve can achieve good exhaust thermal management effects. Under cold WHTC conditions, the average exhaust temperature of the engine increases by about 20 °C. With a weighted average fuel consumption growth rate of only 4% in cold WHTC, the NO_x specific emissions are significantly reduced (by about 30%). In the case of long downhill slopes on the plateau, the inlet temperature of SCR can be maintained at around 370 °C for a long time. The designed engine adaptive exhaust thermal management strategy can enable the engine to have good thermal management effects in harsh working conditions such as refrigeration, high altitude, and low temperature.

Keywords: diesel engine; exhaust thermal management; SCR; combustion parameter; intake throttle valve

(责任编辑:臧发业)

·····
(上接第 9 页)

discharge plasma. The potential of the ignition system in combustion rate control and detonation suppression is discussed, and the development direction of advanced ignition systems is summarized. The analysis results show that the ignition system plays a key role in the combustion control process of internal combustion engines. Advanced ignition technology can ensure the ignition stability of internal combustion engines in lean-burn mode. Increasing ignition energy and ignition coverage can enhance ignition stability, but both will lead to a sharp increase in total ignition energy, requiring higher power for the ignition system, increasing system complexity, and reducing engine economy. Currently, the majority of ignition methods generate plasma ignition of the mixture through gas discharge. By adjusting the characteristics of the discharge plasma, the ignition system can flexibly control the combustion heat release throughout the combustion process in the cylinder.

Keywords: internal combustion engine; ignition system; high voltage discharge; plasma; combustion process control

(责任编辑:刘丽君)