

热面点火辅助均质压燃

田相龙¹, 汪洋¹, 耿鹤鸣¹, 刘宇¹, 付长来¹, 席博文¹, 甄旭东²

(1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072;

2. 天津职业技术师范大学汽车与交通学院, 天津 300222)

摘要: 利用电热塞热面效应, 在一台快速压缩膨胀机上实现了甲醇热面辅助均质压燃, 研究了不同电热塞加热功率和压缩比对热面辅助均质压燃燃烧特性的影响。研究表明: 甲醇燃料热面辅助均质压燃具有两阶段放热特性, 放热缓慢的第 1 阶段和放热急速的第 2 阶段; 与 HCCI 相比, 热面辅助均质压燃放热速率低, 可以使运行工况向大负荷拓展, 指示平均有效压力可以达到 0.74 MPa; 和 SI 燃烧模式相比, 热面辅助均质压燃可以实现稀薄高压比燃烧; 当压缩比为 14~16、电热塞加热功率为 30~34 W 时, 热面辅助均质压燃燃烧运行于高效状态。

关键词: 电热塞; 热面点火; 均质压燃; 快速压缩膨胀机; 负荷拓展

中图分类号: TK401

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2017)06-0516-07

Hot-Surface Assisted Compression Ignition Combustion

Tian Xianglong¹, Wang Yang¹, Geng Heming¹, Liu Yu¹, Fu Changlai¹, Xi Bowen¹, Zhen Xudong²

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Automobile and Transportation, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: In this study, the methanol hot-surface assisted compression ignition (HACI) combustion mode has been achieved by using a glow plug in a rapid compression-expansion machine (RCEM). The effects of different compression ratios and heating powers on combustion characteristics of HACI mode were studied. The results show that the methanol HACI combustion mode had two stages during heat release, one was slow stage, and the other was rapid stage; compared with the HCCI combustion mode, the heat release rate of HACI was lower, so the operating conditions under heavy load could be expanded, and the p_i could reach up to 0.74 MPa. Compared with the SI combustion mode, the HACI could achieve lean high compression combustion. The combustion efficiency of HACI was high when the compression ratio was 14—16 and the heating power was 30—34 W.

Keywords: glow plug; hot-surface ignition; HCCI; rapid compression-expansion machine (RCEM); load extension

均质充量压燃 (HCCI) 具有较高的经济性和低排放特性, 是内燃机领域研究的热点技术。但着火时刻控制及运行范围的拓展成为制约 HCCI 技术实用化

的障碍^[1-2]。目前利用火花助燃^[3-4]、EGR^[5]、混合气温度分层及浓度分层^[6-7]等方法来解决上述问题, 但是效果不能令人满意。

收稿日期: 2016-11-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51476113; 51406135).

作者简介: 田相龙 (1992—), 男, 硕士研究生, tian_xianglong@sina.com.

通讯作者: 汪洋, 男, 博士, 教授, wang_yang@tju.edu.cn.

甲醇(分子式 CH_3OH)自燃温度 $465\text{ }^\circ\text{C}$, 辛烷值 108, 是一种优质的替代燃料. 甲醇具有良好的抗爆性但同时意味着难以压燃, 要实现甲醇燃料的 HCCI 燃烧过程, 需要采取辅助措施.

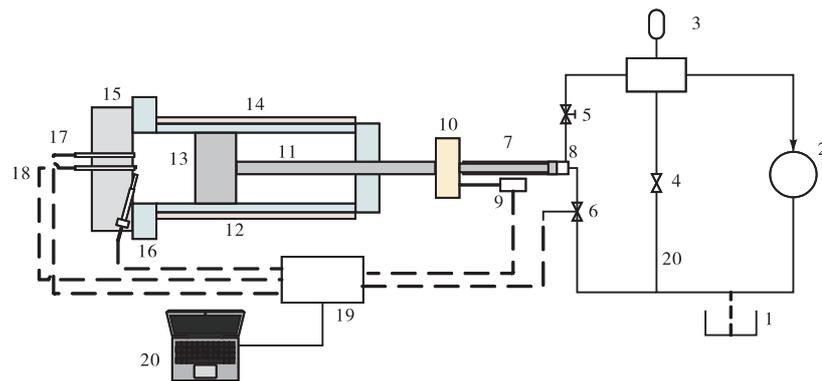
电热塞辅助燃烧技术, 目前主要应用于如下 3 个方面: 一是用于提高柴油机的冷启动性能, 文献[8]在进气道安装电热塞, 用于加热进气, 文献[9]在燃烧室内安装, 用于引燃柴油喷雾; 二是用于解决低十六烷值燃料的压燃问题, 文献[10]在预燃室内安装电热塞, 用于引燃预燃室内天然气, 文献[11]在燃烧室内安装, 用于引燃甲醇喷雾; 三是在微型航模发动机中, 用于实现甲醇混合气均质压燃, 如文献[12], 但是没有对其中关键性参数(加热功率、压缩比)对燃烧过程的影响展开研究. 至于这种燃烧方式在大排量发动机上应用研究, 鲜见报道.

笔者在一台快速压缩膨胀机上, 实现电热塞热面辅助均质压燃的燃烧过程, 探讨这种燃烧模式在大缸

径发动机上应用的可行性. 进一步研究了电热塞加热功率和压缩比对燃烧过程的影响, 探索实现热面辅助均质压燃高效运行的途径.

1 试验设备和试验方法

快速压缩膨胀机使用方便, 边界条件可控, 压缩比可自由调节, 作为试验装置被广泛应用于内燃机燃烧研究中^[13-14]. 笔者采用的快速压缩膨胀机主要包含液压驱动系统、燃烧室、数据采集系统和控制系统. 其结构如图 1 所示, 具体参数如表 1 所示. 快速压缩膨胀机工作原理如下: 油泵运转产生一定压力的液压油进入蓄能器, 打开进油阀, 高压油进入柱塞腔推动柱塞, 带动活塞向缸盖方向运动. 当活塞移动到上止点附近时, 缸内气体开始燃烧, 活塞下行, 柱塞腔内的高压油经泄压阀返回油箱, 快速压缩膨胀机完成一次循环.



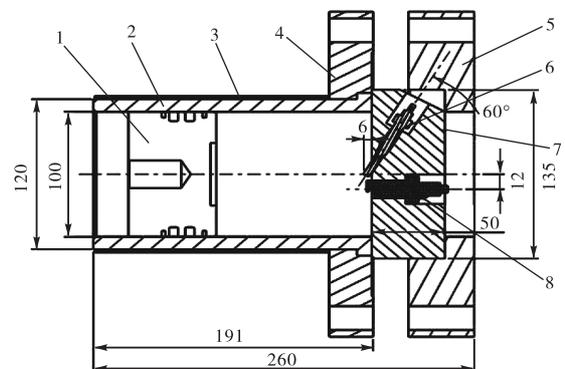
1—油箱; 2—油泵; 3—蓄能器; 4—溢流阀; 5—进油阀; 6—泄压阀; 7—柱塞腔; 8—柱塞; 9—位移传感器; 10—质量块; 11—连杆; 12—缸体; 13—活塞; 14—加热带; 15—气缸盖; 16—电热塞; 17—压力传感器; 18—火花塞; 19—电控单元; 20—上位机

图 1 试验系统原理示意

主燃烧系统的结构如图 2 所示. 气缸盖上加装电热塞, 直接伸入到燃烧室内, 配合电压的调节可实现加热功率的变化进而改变发热体温度. 同时, 在气缸盖上加装了火花塞, 配合可变压缩比, 可以在同一台快速压缩膨胀机中实现 SI、HCCI、SICI 及热面辅助均质压燃的燃烧.

表 1 快速压缩膨胀机参数

参数	数值
缸径/mm	100
最大行程/mm	108
压缩比	6~30
燃烧室壁面温度/K	373
电热塞加热功率/W	26~36



1—活塞; 2—缸套; 3—加热带; 4—机体固定法兰; 5—缸盖压板; 6—电热塞; 7—缸盖; 8—集成缸压传感器式火花塞

图 2 主燃烧系统示意(单位: mm)

实验中采用 REX-C700 温度控制仪控制缸体温度,采用 Kistler 6052 C 缸压传感器和 Kistler 5018 型电荷放大器测量缸内瞬时压力,采用电阻式直线位移传感器 LWH125MM 测量位移信号,用数字示波器 DS1104Z 采集和存储信号。

定义燃烧始点为放热总量 10% 时刻,燃烧持续期为放热量在 10% ~ 90% 之间的时间间隔。活塞到达上止点的时刻为 0 时刻。

2 试验结果分析

2.1 热面辅助均质压燃的实现

图 3 为电热塞加热功率 34 W 时,缸内的压力和放热率曲线,压缩比 14.5,混合气过量空气系数 1.7。为了便于比较,放置了相同条件下,单纯压缩及火花助燃条件下的实验结果。可以发现:在电热塞加热条件下,在上止点附近缸内发生了燃烧,而在相同条件下,纯压缩或火花助燃都未能使混合气着火。

从图中还可以发现,通过电热塞辅助着火的燃烧过程中存在比较明显的两个阶段:放热速率缓慢的第 1 阶段,以及放热速率剧烈的第 2 阶段,其中第 2 阶段的放热速率与 HCCI 燃烧方式接近。笔者认为:由于电热塞的加热作用,使得其周围的混合气温度高于其他区域,在上止点附近首先发生小范围自燃,并向四周扩散,这个过程参与燃烧的混合气较少,放热速率低,这一阶段本质上属于引燃阶段。第 1 阶段进行到一定程度,缸内的温度与压力达到一定阈值,缸内的剩余混合气将发生大范围压缩自燃,发生剧烈放热,这一阶段本质上属于压缩自燃阶段。

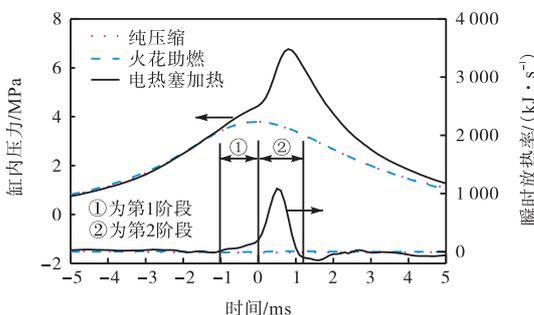


图 3 电热塞加热对燃烧状态的影响

研究还发现,第 1 阶段燃烧相位受电热塞加热功率控制,第 2 阶段的燃烧特征与 HCCI 过程类似。故笔者称这种燃烧模式为热面辅助均质压燃。

2.2 五种典型燃烧模式的对比

为了便于比较,在快速压缩膨胀机上,通过控制

方式的改变,依次实现了 5 种燃烧模式:SI、HCCI、HCCI 爆震、火花助燃 HCCI(SICI)和热面助燃 HCCI(HACI)。图 4 为这 5 种燃烧模式缸内压力和放热速率曲线。

图 4(a)为 SI 燃烧方式。为便于对比选用常用过量空气系数 $\lambda=1$ 及较高压缩比 $R=11.5$ 。发现最高爆发压力较低,燃烧速率较慢,最大瞬时放热率仅为 316 kJ/s。

图 4(b)所示为 HCCI 燃烧方式。选用典型 HCCI 混合气过量空气系数 $\lambda=2.8$ 及该过量空气系数下可燃压缩比 $R=24.3$ 。实验发现最高爆发压力较高,放热迅速,瞬时放热率峰值可达 1 703 kJ/s。

如图 4(c)所示,如果将 HCCI 燃烧方式向大负荷工况拓展,当混合气过量空气系数增大到 $\lambda=2$ 时,缸内压力出现剧烈高频振荡,最大压力升高率可达 0.23 MPa/ μs ,属于典型的爆震燃烧。此时的 $R=22.4$ 。

如图 4(d)所示,最佳点火时刻下,实现典型 SICI 燃烧,其中 $\lambda=1.7$ 和压缩比 $R=17.7$ 。对比发现,SICI 燃烧存在双阶段放热,燃烧始点靠前,燃烧持续期较 HCCI 延长,最大爆发压力和最大放热速率都较 HCCI 低。实验发现,当压缩比下降到 $R=17$ 以下,SICI 燃烧易失火,无法正常运行。

图 4(e)所示为 HACI 燃烧。为便于对比设置混合气过量空气系数 $\lambda=1.7$,其中压缩比 $R=14.5$ 时为较典型工况。其燃烧呈双阶段特性,最大爆发压力和最大放热率较 HCCI 燃烧方式低,可以使工况向大负荷拓展,指示平均有效压力可以达到 0.74 MPa,相比 SICI 燃烧方式,HACI 运行区间更广,可以在更低的压缩比下实现,瞬时放热率峰值更靠近上止点,燃烧持续期更短。

综上,相比于 HCCI 模式,HACI 通过双阶段燃烧途径,降低了燃烧放热速率,抑制了爆震倾向,将均质压燃的运行范围向高负荷拓展;相比于 SI 模式,HACI 可以实现稀薄燃烧,压缩比与柴油机相当,燃烧持续期短,经济性大幅度提升;相比于火花助燃的 HCCI,由于热面的放热能量比电火花高一个数量级,而且热影响面积大,激发 HCCI 的能力增强,可以以更低的压缩比引燃,助燃效果更好。

2.3 电热塞加热功率对 HACI 燃烧的影响

电热塞加热功率的变化影响电热塞发热体表面温度,进而影响混合气被引燃的时刻,从而影响其整体燃烧过程,通过红外热像仪测得电热塞加热功率与发热体温度的关系如图 5 所示。

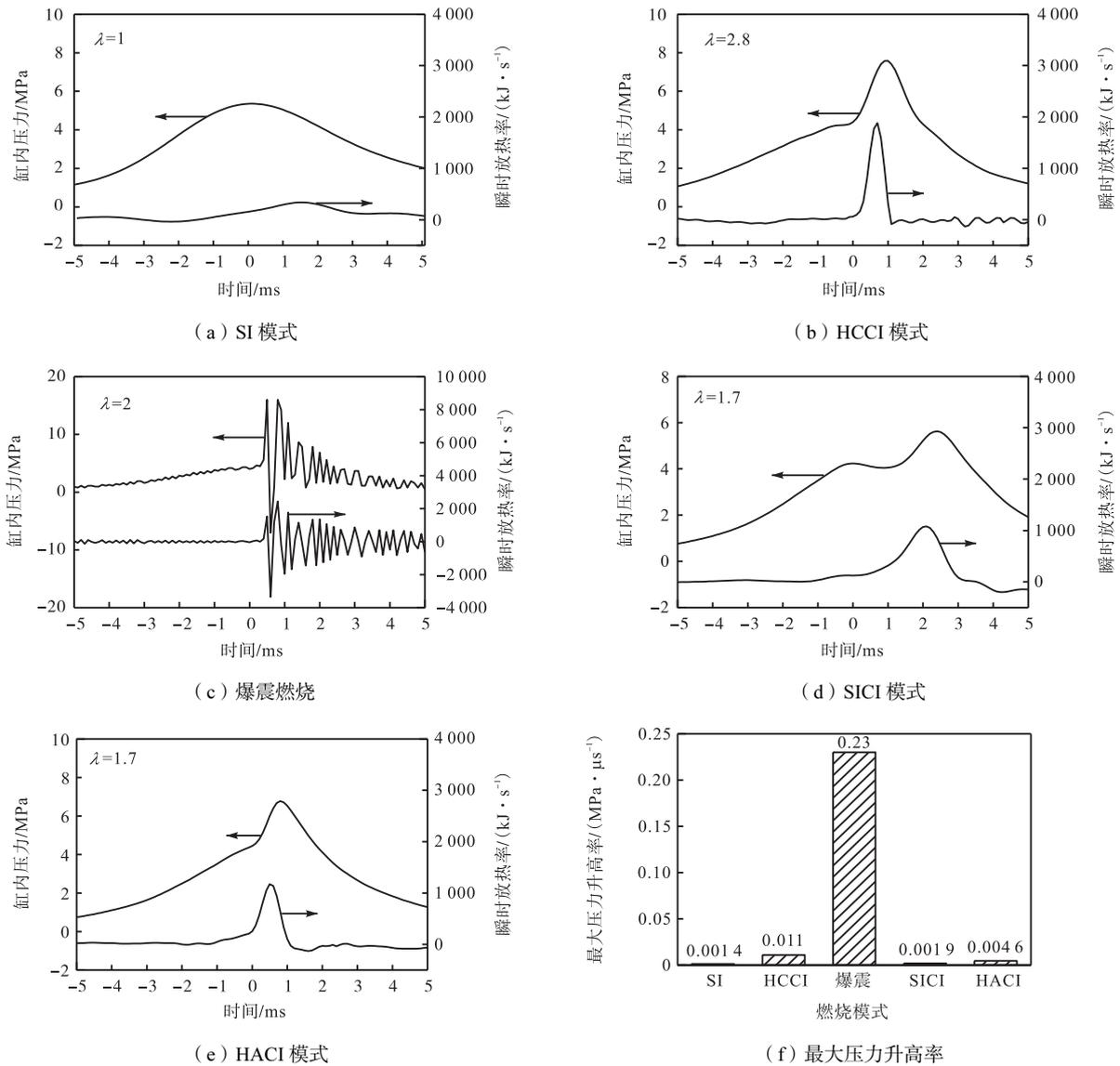


图 4 5种不同燃烧模式燃烧状况

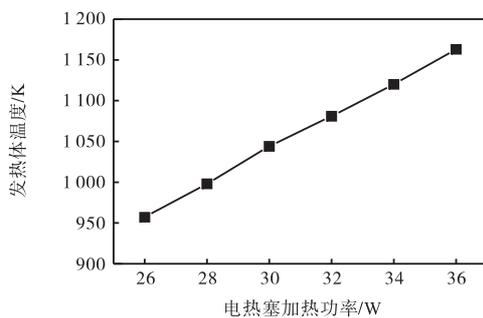


图 5 电热塞加热功率与发热体温度的关系

图 6 为不同电热塞电功率条件下的活塞位移、缸内压力和瞬时燃烧放热率随时间变化曲线。图 7 为电热塞加热功率 36 W 时的压力升高率曲线。图 8 为燃烧始点与燃烧持续期的变化随电热塞加热功率变化的关系。在实验中，保持压缩比 14.5、过量空气系数 1.7 不变，通过改变电热塞加热功率来改变电热塞表面温度。可以发现：电热塞加热功率 28 W 时，两阶

段放热中第 1 阶段的比例较多，着火时刻为上止点后 0.9 ms，燃烧持续期为 2.8 ms，瞬时放热率峰值为 574 kJ/s，燃烧主要发生在膨胀行程中；电热塞加热功率增加到 30 W 时，第 1 阶段比例减小，着火时刻为上止点后 0.5 ms，燃烧持续期为 1.5 ms，瞬时放热率峰值升高至 760 kJ/s；电热塞加热功率继续升高至 32 W 时，燃烧始点提前至上止点后 0.2 ms，燃烧持续期缩短至 1.1 ms，最大瞬时放热率升高至 900 kJ/s；电热塞加热功率继续提高到 34 W 时，燃烧始点提前至上止前 0.1 ms，燃烧持续期缩短至 0.9 ms，最大瞬时放热率增至 1 120 kJ/s。当进一步提高到电热塞加热功率至 36 W 时，发动机出现爆震现象，如图 7 所示，爆震时压力升高率最大达到 0.21 MPa/μs。

图 9 为相同实验条件下，最大缸内压力升高率随电热塞加热功率的变化关系。可以看出，电热塞加热功率增大，最大压力升高率提高。

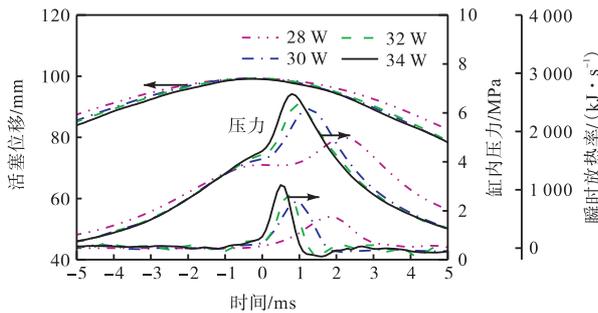


图 6 电热塞加热功率对燃烧状态的影响

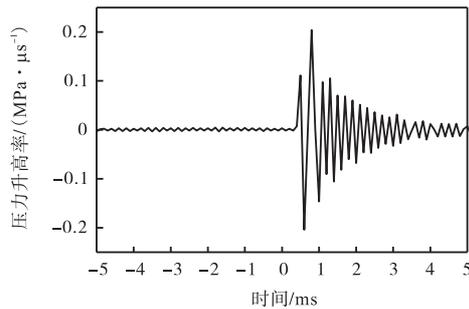


图 7 电热塞加热功率 36 W 时压力升高率曲线

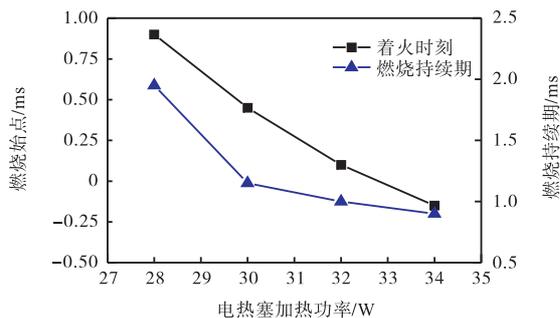


图 8 燃烧始点和燃烧持续期随电热塞加热功率变化关系

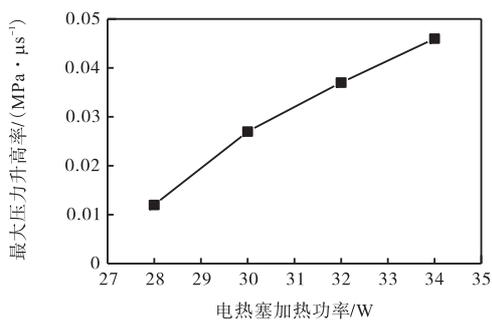


图 9 最大压力升高率随电热塞加热功率变化关系

图 10 为压缩比 $R=14.5$ 时, 指示热效率随电热塞加热功率变化的关系. 可以发现: 当加热功率从 28 W 提升到 30 W 时, 指示热效率为从 29.1% 提升到 33.2%, 上升幅度较大. 当加热功率从 30 W 上升到 34 W 时, 指示热效率进一步提升到 33.8%, 但是提升幅度较小; 当加热功率提升到 34 W 时, 指示热效率反而小幅降低; 加热功率为 36 W 时, 指示热效

率大幅度下降. 出现上述现象的原因是, 当电热塞加热功率升高时, 第 2 阶段放热增大, 燃烧持续期缩短, 燃烧等容度增大, 这对指示热效率提升是有效的; 另一方面, 第 2 阶段燃烧均发生在上止点后, 因燃烧相位靠前而导致的负功并不大, 但放热速率的增大会提高缸内混合气的最高温度和最高爆发压力, 这会导致散热损失和漏气损失增大, 效率小幅下降; 当爆震发生后, 散热和漏气率会剧烈增大, 导致指示热效率大幅度下降.

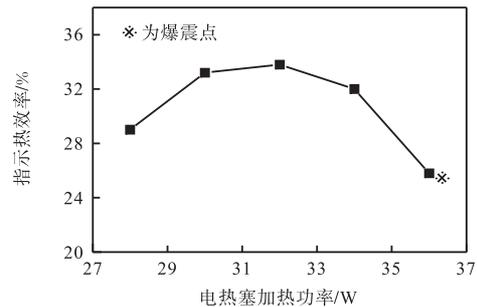


图 10 指示热效率随电热塞加热功率的变化关系

HACI 燃烧过程与电热塞加热功率有密切关系. 在压缩比不变前提下, 电热塞加热功率升高, 燃烧始点前移, 燃烧持续期变短, 放热速率增大, 效率提高. 但加热功率过高会导致指示热效率下降, 进一步提高会引发爆震, 导致指示热效率进一步恶化.

2.3 压缩比对 HACI 燃烧的影响

图 11 为不同压缩比条件下的活塞位移、缸内压力和瞬时燃烧放热率随时间变化曲线. 图 12 为压缩比 $R=16.5$ 时的压力升高率曲线. 图 13 为燃烧始点与燃烧持续期的变化随压缩比变化的关系. 在实验中发现, 电热塞加热功率为 32 W 时, 过量空气系数为 1.7 时压缩比有较大变化范围. 从图中可以发现: 压缩比 12.5 时, 两阶段放热不明显, 着火时刻为上止点后 0.5 ms, 燃烧持续期为 4.6 ms, 瞬时放热率峰值为 322 kJ/s, 后燃较多; 压缩比升高至 13.9 时, 出现两阶段放热现象, 着火时刻为上止点后 0.4 ms, 燃烧持续期为 1.8 ms, 瞬时放热率峰值升高至 613 kJ/s, 燃烧速率提升较快; 压缩比进一步提高到 14.5 时, 第 1 阶段放热比例减小, 燃烧始点提前至上止点后 0.2 ms, 燃烧持续期缩短至 1.1 ms, 最大瞬时放热率升高至 1 075 kJ/s; 当压缩比上升至 15.3 时, 燃烧始点提前至上止前 0.1 ms, 燃烧持续期缩短至 0.7 ms, 最大瞬时放热率增至 1 523 kJ/s. 当进一步提升压缩比时, 发动机出现爆震现象, 如图 12 所示, 爆震时最大压力升高率可达 0.34 MPa/μs.

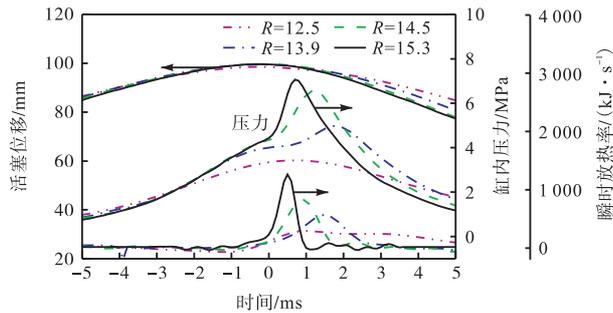


图 11 压缩比对燃烧过程的影响

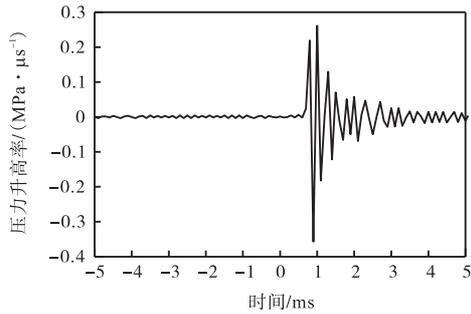
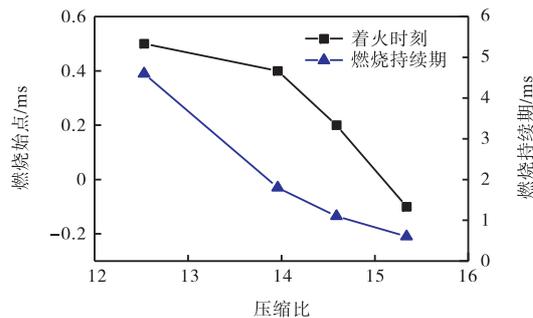
图 12 压缩比 $R = 16.5$ 时压力升高率曲线

图 13 燃烧始点及燃烧持续期随压缩比的变化关系

图 14 为最大压力升高率随压缩比的变化关系。在电热塞加热功率不变前提下,压缩比增大,最大压力升高率随之提高。

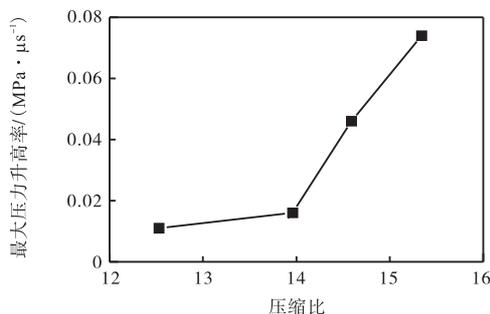


图 14 最大压力升高率随压缩比的变化关系

图 15 为指示热效率随压缩比变化的关系。从图中可以看到,在功率为 32 W 时,随着压缩比由 12.5 提升到 13.9,指示热效率由 24.9% 提升到 29.1%,提升幅度为 16.9%。当压缩比提高至 14.5,指示热效率为 33.8%。当压缩比继续增高至 15.3,指示热效率为 33.3%,指示热效率略有降低。上述现象的原因是:压

缩比升高可以提高上止点附近的混合气压力和温度,促使燃烧始点提前,持续期缩短,这对提高指示热效率是有效的。但是随着压缩比增大,缸内最高燃烧温度增大导致的散热损失增大,而且较多未燃混合气被挤压到燃烧室周边间隙,这些因素对指示热效率是不利的,因此即使不考虑爆震因素,也不能过分提高压缩比。

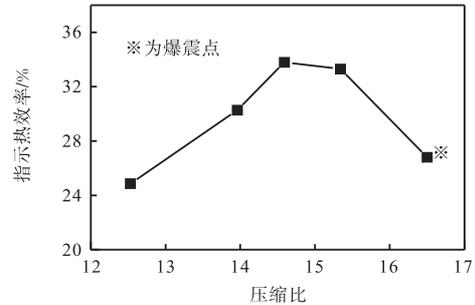


图 15 指示热效率随压缩比的变化关系

综上,在电热塞加热功率不变前提下,随着压缩比的增大,燃烧相位提前,燃烧持续期变短,指示热效率提高。当压缩比过大时,指示热效率下降,存在一个最佳压缩比,此时的指示热效率达到最大值。进一步提高压缩比,爆震现象出现。

2.5 HACI 的控制参数优化及运行区域

图 16 为过量空气系数 1.7,不同压缩比,不同电热塞加热功率条件下获得的 HACI 指示热效率分布图。如图 16 所示:左下区域为失火区,此时当电热塞加热功率过小,或者压缩比过小,不足以引发燃烧;右上为爆震区,此时由于电热塞加热功率过高,或者压缩比过大,导致放热速率过大引起缸内压力剧烈震荡;中间为电热塞热面助燃区域,当压缩比为 14~16、加热功率为 30~34 W 时,发动机可以形成稳定而高效的燃烧,具有较好的经济性,指示热效率可以保持在 33%~35% 之间。

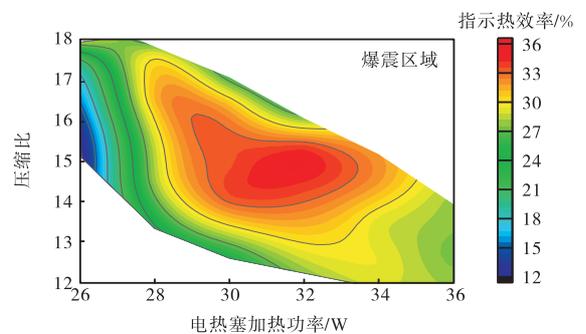


图 16 甲醇热面助燃运行示意

3 结论

(1) 在一台快速压缩膨胀机上,实现了甲醇热面

辅助均质压燃(HACI),燃烧过程分为缓慢放热的第 1 阶段和急速放热的第 2 阶段,其中第 2 阶段的放热特性,与 HCCI 类似。

(2) 相比于 HCCI 模式,HACI 燃烧放热速率较低,可以抑制爆震发生;相比于 SI 模式,HACI 可以实现稀薄燃烧,压缩比提高,燃烧持续期短;相比于火花助燃 HCCI,热面点火能量高、助燃效果要好。

(3) 在压缩比不变前提下,随着电热塞加热功率升高,HACI 燃烧始点前移,燃烧持续期变短,放热速率增大,效率提高,但是加热功率过高会导致指示热效率下降,进一步提高会引发爆震,指示热效率进一步恶化。

(4) 在电热塞加热功率不变前提下,随着压缩比的增大,HACI 燃烧相位提前,燃烧持续期变短,指示热效率提高,当压缩比过大时,指示热效率下降,进一步提高压缩比,爆震现象出现,指示热效率进一步恶化。

(5) 甲醇热面助燃需要电热塞功率与压缩比匹配在一定区域内。当压缩比为 14~16、加热功率为 30~34 W 时,HACI 燃烧比较稳定和高效,指示热效率在 33%~35% 之间。

参考文献:

- [1] Zhao F, Asmus T W, Assanis D N, et al. *Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) Engine: Key Research and Development Issues*[M]. PA: Society of Automotive Engineers, 2003.
- [2] Yao M, Zheng Z, Liu H. Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition(HCCI) engines[J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2009, 35(5): 398-437.
- [3] Persson H, Johansson Bengt. The effect of swirl on spark assisted compression ignition(SACI)[C]// *SAE Paper*. Detroit, MI, USA, 2007, 2007-01-1856.
- [4] Wang Zhi, Wang Jianxin, Shuai Shijin, et al. Research on spark induced compression ignition(SICI)[C]// *SAE Paper*. Detroit, MI, USA, 2009, 2009-01-0132.
- [5] Alasdair Cairns, Hugh Blaxill. The effects of combined internal and external exhaust gas recirculation on gasoline controlled auto-ignition[C]// *SAE Paper*. Detroit, MI, USA, 2005, 2005-01-0133.
- [6] Sjöberg M, Dec J E, Cernansky N P. Potential of thermal stratification and combustion retard for reducing pressure rise rates in HCCI engines, based on multi-zone modeling and experiments[C]//*SAE Paper*. Detroit, MI, USA, 2005, 2005-01-0113.
- [7] Sjöberg M, Dec J E. Smoothing HCCI heat-release rates using partial fuel stratification with two-stage ignition fuels [C]// *SAE Paper*. Detroit, MI, USA, 2006, 2006-01-0629.
- [8] Payri F, Broatch A, Serrano J R, et al. Study of the potential of intake air heating in automotive DI diesel engines [C]// *SAE Paper*. Detroit, MI, USA, 2006, 2006-01-1233.
- [9] Pastor J V, Bermúdez V, García-Oliver J M. Influence of spray-glow plug configuration on cold start combustion for high-speed direct injection diesel engines [J]. *Energy*, 2011, 36(9): 5486-5496.
- [10] 张德福, 张惠明, 张金良, 等. 改善热面点火天然气发动机起动和运转性能的研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2009, 15(1): 34-39.
Zhang Defu, Zhang Huiming, Zhang Jinliang, et al. Investigation on improving starting up and operating characteristics of glow plug natural gas engine [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2009, 15(1): 34-39 (in Chinese).
- [11] 孙志远, 王树奎, 付茂林. 采用电热塞助燃法在原压缩式发动机中燃用甲醇的试验研究[J]. *内燃机学报*, 1995, 13(4): 352-360.
Sun Zhiyuan, Wang Shukui, Fu Maolin. An investigation into methanol combustion in the original CI engine by adopting electric heating plug aided combustion method [J]. *Transactions of CSICE*, 1995, 13(4): 352-360 (in Chinese).
- [12] Ma H, Kar K, Stone R, et al. Analysis of combustion in a small homogeneous charge compression assisted ignition engine[J]. *International Journal of Engine Research*, 2006, 7(3): 237-253.
- [13] 常国峰, 郭英男, 张纪鹏, 等. 采用快速压缩机对甲醇燃料的 HCCI 燃烧特性的研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2008, 14(3): 233-238.
Chang Guofeng, Guo Yingnan, Zhang Jipeng, et al. Study on HCCI of methanol by rapid compression machine[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2008, 14(3): 233-238 (in Chinese).
- [14] 汪洋, 汪建才, 朱永生, 等. 液压快速压缩-膨胀试验机的开发研究[J]. *内燃机工程*, 2016(1): 146-151.
Wang Yang, Wang Jiancai, Zhu Yongsheng, et al. The development of hydraulic rapid compression-expansion experimental machine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2016(1): 146-151 (in Chinese).