

氢能作为内燃机燃料的研究^{*****}

李径定 郭林松 楚书华 孙筱云 古滨庄一
(浙江大学) (日本 武藏工业大学)

提 要 该文论述了氢发动机运转中所存在的问题,提出了氢发动机的燃烧改进方案。研究表明,采用高压喷射、火花点火,并优化调整喷射正时和点火正时,就可控制异常燃烧,获得良好的性能。

关键词 氢能 内燃机 代用燃料

Study on Hydrogen as a Substitute Fuel for Engines

Li Jing-ding Guo Lin-song Chu Shu-hua Sun Xiao-yun
(Zhejiang University, Hangzhou)

Shoichi Furuhamu

(Musashi Institute of Technology, Tokyo, Japan)

Abstract Hydrogen is a new renewable energy resources which causes low pollution while burned. In the paper, the problems in operation of hydrogen-fueled engine are summarized, and a plan to improve the combustion in hydrogen-fueled engine is put forward. The research shows that abnormal combustion can be controlled and operation performance can be improved by means of high pressure injection for spark ignition and optimum selection of injection timing and ignition timing.

Key words Hydrogen Engines Substitute fuel

随着太阳能、原子核能的发展,作为其二次能源之一的氢能必将得到大力开发应用。制氢的原料水资源极其丰富,而且氢的燃烧产物主要是水,由此形成循环,有利于环境保护和生态平衡。因此,氢能作为可再生洁净能源,用作内燃机代用燃料的研究已引起了全世界的广泛关注。由于氢与柴油、汽油等石油燃料的物化特性及燃烧性能有所差异,因而控制异常燃烧,提高动力性能和经济性能是研制氢发动机的关键。同时,若能在氢的贮存技术和制氢方法上取得突破,氢能的应用前景将会更加广阔。

1 氢发动机存在的问题

1.1 氢的特点

* 收稿日期:1995-12-28

** 国家自然科学基金资助项目

*** 李径定,教授,杭州市 浙江大学能源系内燃机研究所,310027

氢与汽油、柴油等燃料相比,具有以下显著特点:

- 1) 比重小,扩散系数大(氢为 $6100 \text{ m}^2/\text{s}$,汽油为 $500 \text{ m}^2/\text{s}$),混合气易均匀一致,燃烧速度快(氢最大可达 3.1 m/s ,汽油仅为 1.2 m/s)。
- 2) 释放单位热量所需的燃料体积极大,如 0.1 MPa , 20°C 的氢气需 3130 L , 20 MPa , 20°C 的氢气需 15.6 L ,即使是液态氢也需 3.6 L ,而汽油只需 1 L 。
- 3) 在理论混合比下进入气缸时,氢气约占排量的 30% 。因此,若在进气阀关闭后将氢喷入燃烧室,将能增加混合气充量并产生更高的输出功率。
- 4) 燃烧后混合气的分子数减小。
- 5) 可燃空燃比范围大,体积可燃空燃比范围为 $24 \sim 0.3$,质量可燃空燃比范围为 $346.8 \sim 4.8$ 。
- 6) 自燃温度高,在空气中为 $803 \sim 853 \text{ K}$,在氧气中为 723 K ,而汽油在空气中的自燃温度为 $753 \sim 823 \text{ K}$ 。
- 7) 最小点火能量低,仅为 90 W 。
- 8) 氢空气混合气燃烧产物中唯一的有害成份是氮氧化物 NO_x ,无其他有害排放物。

1.2 预混式氢发动机运转中的问题

由于氢空气混合气的单位容积热值低,因而其理论最大输出功率仅为汽油空气混合气的 85% 。实际上,即使输出功率大大低于此值,如仅为汽油机的 50% 左右(预混火花点火式氢发动机),仍会发生回火而使发动机难以正常运转。同时, NO_x 排放物会急剧增大。

氢发动机在各种工况下的异常燃烧可分为以下三类^[1]:

1) 急剧的压力升高率;2) 燃烧室中发生早燃现象,并不断提早发生并延续下去,使进气歧管产生回火;3) 在混合气过稀或怠速运转时偶尔发生回火。

前两类情况发生于较浓混合气(大负荷)下,发动机将停止运转,第三类情况发生于稀混合气时,发动机不会停车,它们本质上有所差别。

试验表明,在较浓混合气(大负荷)下,急剧的压力升高大约从过量空气系数 $\phi = 1.7$ 开始出现,但无敲缸现象发生,发动机很快就熄火。

a. 当发动机转速低于 1700 r/min 时,加浓混合气至过量空气系数 $\phi = 1.5$ 以下,发动机无回火而迅速熄火。图 1 所示是在发动机将熄火前的时刻之示功图。由图可见,因燃烧结束过早,发动机飞轮不能克服压缩功而导致迅速停车。

b. 转速达 2100 r/min 的高速时,出现早燃,循环的点火时刻逐渐提前,并且在进气阀关闭时仍有早燃现象,即发生回火(如图 2),发动机最终将停车。

当混合气较稀时(低负荷),回火偶尔出现在过量空气系数 $\phi = 3$ 这样极稀混合气下。这类回火,燃烧能量不足以使发动机熄火,但将导致工作粗暴。加浓混合气后,发动机能恢复平稳运转。这类现象的发生与发动机转速和燃料供给方式无关,可能是由于残余废气的点火所致。因为在这样的混合气中,火焰传播速度很低,排气温度高,残余废气中的氧气含量高,因此可能在混合气或氢气供给进入气缸时即被点燃。

2 控制异常燃烧的措施

为了控制氢发动机的异常燃烧,可采取如下措施:

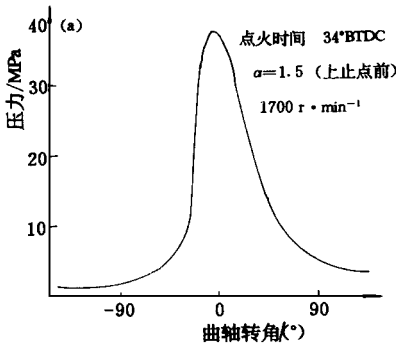


图 1 无早燃时的高压力升高率

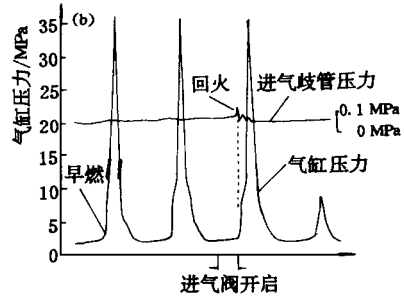


图 2 发生早燃时的回火过程

1) 采用喷水或废气再循环(EGR),这与控制氮氧化物 NO_x 的措施相一致;2) 进气阀打开时才供氢:美国迈阿密大学阿达德等开发了一种只在进气门打开时才把氢气吸入燃烧室的结构,其目的是防止氢气与空气在进气歧管内混合,以杜绝进气歧管发生回火,但实际应用效果并不理想,而且过量空气系数低,造成输出功率过低;3) 在进气阀关闭之后,将氢喷入缸内,能彻底控制回火。

研究表明,缸内喷氢能大大提高输出功率。由于完全缸内喷氢在上止点附近难以点燃,因而采取部分预混燃烧,其目的是在喷入氢时即使之燃烧以抑制过高的压力升高率和减少 NO_x 排放。

3 氢发动机燃烧的改进

如前所述,在进气阀关闭后的压缩冲程将氢喷入气缸,是彻底控制回火和提高发动机输出功率的最有效措施。由于火焰不能传播到进气歧管中,即使燃烧室中发生早燃,也不会出现回火,氢喷射发动机的功率可达预混式的两倍而无回火现象出现,早燃也因喷入低温氢而受到抑制。

3.1 氢的低压喷射

由于在进气阀关闭后喷氢,因而不会发生回火,喷射压力可低至 1 MPa,通常在压缩冲程的前半行程喷入氢。若喷入 0 ~ -50 的低温氢,则可在无早燃的情况下使其输出功率比汽油机(图 3 中 N_G)高 10% ~ 20% (如图 3 中的 N_{H_2} 所示)。但若喷入室温下的氢气,在混合气较浓时(过量空气系数 < 1.2),由于早燃,输出功率将降至与汽油机相同的水平(如图 3 中的 N_{H_1} 所示)。

3.2 氢的高压喷射

高压喷射可在上止点附近将氢喷入,点火方式有热表面点火和火花塞点火,其优点是不

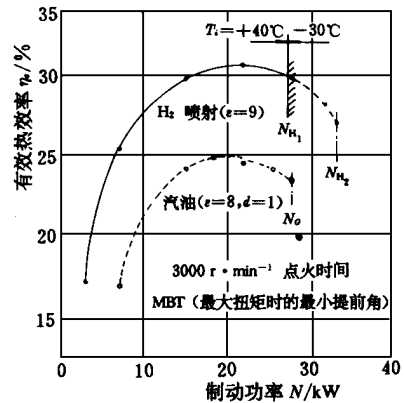


图 3 喷射低温氢时的有效热效率

会发生回火、早燃和敲缸,而且压缩比可提高到 12 1 至 15 1,从而提高了热效率,能适用于大缸径发动机。

然而,活塞在上止点附近时燃烧室中的压力较高,要使氢喷入并使其喷束到达缸壁,喷射压力必须达 8 MPa 以上,可能出现的泄漏要依靠对喷射阀及其阀座等偶件间的十分精密的加工来防止。其次,氢气密度小,其喷束在高压空气中的喷射速度较低,射程较短,且自燃温度较高,燃烧火焰辐射较弱,因而,要实现快速燃烧,必须有效合理地组织燃烧室内的气体流动。此外,由于氢混合气难以压燃,必须借助于外源点燃。

3.2.1 高压喷氢热表面点火

若热表面温度能高达 900 以上,则这种点火方式的稳定性较好。但实际应用中存在如下问题^[2]:

1) 陶瓷白热塞的寿命对于实际使用来说还不够长;2) 加热电源很重要,必须配备特大容量的蓄电池;3) 由于氢通过喷射阀泄漏,发动机起动时有发生早燃或回火的倾向。

3.2.2 高压喷氢火花点火

火花点火高压喷射是解决氢发动机所存在问题的有效措施。因为火花点火所需的点火能量小,可点燃的混合比范围大,因而可在更宽广的点火位置和点火正时范围内点燃,故与液体燃料喷雾比较,氢喷射更适合于火花点火。当然,对特定的发动机存在一最优的火花塞位置和点火正时。

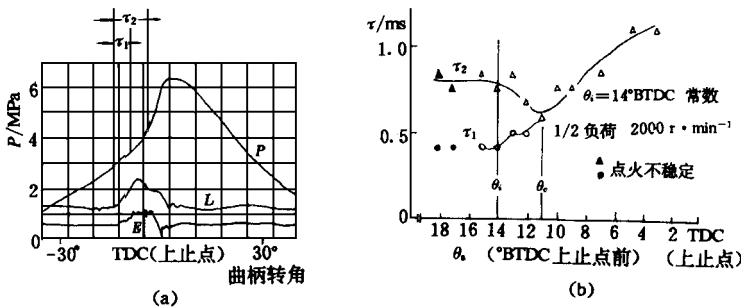


图 4 氢喷射火花点火的点火延迟

氢喷射要求着火延迟尽量小。图 4a 所示的试验结果中, E 为火花塞电压, L 为喷射阀行程, P 为气缸压力, τ_1 表示喷射阀开启与压力开始上升时刻间的时间间隔,在该时期内点燃氢喷束。随着火焰在该喷束内传播,在喷射阀开启 τ_2 时间后,火焰传到其他氢喷束,此时压力随着火焰的迅速传播而急剧升高。当喷射提前角 θ_i 保持 14° (曲柄转角) 不变,而改变点火正时 θ_s , 则 τ_1 和 τ_2 的变化如图 4b 所示。由图可见,若 θ_s 小于 θ_c , 由于氢喷束的连续分布而使火焰可连续传播,因而燃烧过程变为一个阶段(即 $\tau_1 = \tau_2$)。试验表明,最优 θ_s 值应与 θ_c 相当接近^[3]。

4 火花点火高压喷射氢发动机的试验

4.1 试验发动机

用 Nissan 公司生产的 BD30 型四缸、四冲程直喷式柴油机改装而成。原机的缸径、排量、工作行程及压缩比分别为 96 mm、3 L、102 mm 和 18.5 1。改装后的氢发动机压缩比减至 13.5 1, 加装了喷氢嘴和火花塞, 并改进了活塞, 在其顶部设计了一凹坑, 以合理组织燃烧室内的空气流动^[4]。

喷氢嘴有 8 个喷孔, 采用特别的具有加长电极的火花塞, 电极间隙与喷氢嘴其中一喷孔的距离为 3 mm。为了能任意调整点火正时, 点火系统不采用分电器, 每个火花塞单独配一个点火线圈。曲轴转角信号由曲轴转角传感器输入微机。

氢的喷射压力由 8 MPa 增加到 10 MPa, 以改善氢和空气的混合气形成。

4.2 喷射正时与点火正时对发动机性能的影响

所有工况的点火正时都应优化选择, 关键是确定喷射提前角 i 和点火提前角 s 。图 5 所示为发动机转速、平均有效

压力及喷射提前角 i 分别为 1000 r/min, 0.45 MPa 和 上止点前 6°(曲柄转角) 时, 点火正时对发动机气缸压力变化的影响, 由图 5 可见, 当 $s = i = 6^\circ$ (曲柄转角) 时, 压力曲线较平坦光滑, 各循环间的压力波动小, 显示出点火、燃烧均较稳定。而当 $s = 3^\circ$ (曲柄转角) 时, 燃烧初期压力升高急剧, 并有强烈的压力波动产生, 出现梳状示功图, 燃烧波动, 同时还常常发生失火。

研究表明, 为了获得良好的发动机工作性能, 应在各工况下优化选择喷射正时和点火正时, 使 i 与 s 之差保持在 0.05 ms 以内, 这必须通过电子控制系统来实现。

5 结 论

- 1) 进气阀关闭后再向气缸内喷氢, 即采用内部混合气形成, 是消除回火现象的根本措施。
- 2) 采用氢的高压喷射及通过合理设计燃烧室形状以有效组织燃烧室内的气体流动, 是促进氢与空气的混合气形成、提高发动机工作性能的有效手段。
- 3) 火花点火方式耗电小、耗能低、耐久性高, 可燃的混合比范围大, 有利于控制异常燃烧。
- 4) 喷射正时、点火正时对发动机工作性能有较大影响, 点火位置和点火时间均应精确

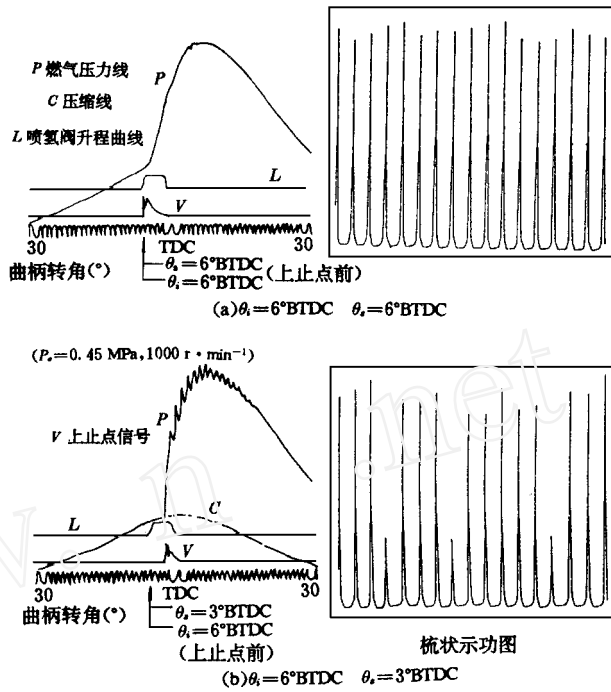


图 5 点火正时对循环波动的影响

选择,点火提前角与喷射提前角相等为最佳,这在实际上要依靠电子控制系统来实现。

参 考 文 献

- 1 古滨庄一. 水素自动车 の进步 と将来. 古滨庄一论文集 [6. 水素 エンジン关系(下)], 1991. 173 ~ 178
- 2 松下智彦,大冢千之等. 水素喷射热面点火 エンジンの燃烧改善 に関する研究. 古滨庄一论文集 [6. 水素 エンジン关系(下)], 1991. 282 ~ 287
- 3 S Furuhami Hydrogen Engines Systems for Land Vehicles. 古滨庄一论文集 [6. 水素 エンジン关系(下)], 1991. 327 ~ 333
- 4 古滨庄一. 氢发动机. 日本机械学会论文集, [No. 900 - - 20], 1990. 5

www.cnki.net