

气体发动机技术的发展

郭子锐¹, 邓康耀¹, 曲 栓¹, 牟善祥², 张国昌²

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 胜利油田胜利动力机械集团有限公司, 山东东营 257032)

摘 要: 介绍了气体发动机的发展过程和研究现状, 以及所应用的 Miller 循环技术、EGR 技术、混合气形成供给技术。着重介绍了气体机发展过程中出现的各种点火技术, 并就这些点火技术对发动机排放和热效率的影响作了对比分析。分析表明: 在目前点火技术下, 气体发动机稀燃程度已经达到 $\lambda = 2.0$ 左右, 热效率也提高到 45% 以上。气体发动机和传统燃料发动机相比: 效率相当, 排放低, 因此, 气体发动机有着不可限量的发展潜力。

关键词: 气体发动机; 点火技术; 热效率; 排放

中图分类号: TK431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)06-0003-07

The Development of Gas Engine Technology

Guo Zirui¹, Deng Kangyao¹, Qu Shuan¹, Mou Shanxiang², Zhang Guochang²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;
2. Shengli Oil Field Shangli Power Machinery Co. Ltd., ShangdongDongying257032)

Abstract: The development and research state of gas engines are briefly introduced. The technologies applied on gas engines, including Miller cycle, EGR and the mixture gas formation and supplyment are presented. The varied kinds of the ignition technologies during the gas engine development history are introduced in detail. Meanwhile, the influence of different ignition technologies on emission and thermal efficiency are compared and analyzed. The analysis results indicate that with the now available ignition technology, the lean burn has reached $\lambda = 2.0$ or so, thermal efficiency has improved to more than 45% above. Compared with traditional engine, it features lower emissions with the same efficiency. Therefore, gas engine has unlimited development potential.

Keywords: gas engine; ignition technology; thermal efficiency; emission

0 引 言

石油是不可再生资源, 对国家的发展有着重要的影响。随着全球石油资源消耗量不断增加, 能源问题日益加剧, 对天然气的开发利用能有效减轻石油消耗的压力。我国天然气资源比较丰富, 但天然气消费量却排名在世界第 20 位以后, 仅占世界总量的 0.9%。在能源消费结构中, 天然气占 2.1%, 远远低于 23.8% 的世界平均水平。因此, 天然气的开发利用势必日益受到重视。

此外, 化石燃料的燃烧对环境的影响重大。随着环保意识的加强, 人们越来越意识到使用清洁燃料的重要性, 且各种排放法规也日益严格。在这种背景下, 作为高清洁燃料, 天然气的开发利用已成为世界性的研究课题。

气体发动机是天然气的一个有效利用途径, 已经在欧美国家得到了相当程度的普及。欧盟对气体发动机排放的要求如图 1 所示, 与同排量的柴油机相比, 气体发动机动力性相当, 环保优势明显; 另外天然气比柴油便宜, 经济性好, 因此气体发动机

收稿日期: 2011-08-22

作者简介: 郭子锐(1986-), 男, 硕士, 研究方向为内燃机增压技术, E-mail: guo1446353@163.com。

的市场份额在不断提高。

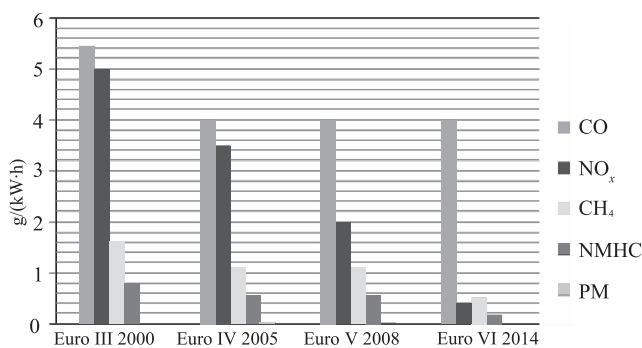


图1 欧盟排放标准

1 气体机技术发展简述

最先出现的气体发动机采用开式燃烧室，当量比混合气，因此，提高输出功率是其首先要解决的问题，在不发生爆震的前提下，压缩比的提高能够极大地提高发动机输出功率。为了能够抑制爆震，使用 Miller 循环和 EGR 技术，于是气体发动机的压缩比得以提高，功率也得到相应提高。

当功率继续提高时，过高的热负荷成为主要限制因素，随着研究的深入，稀燃成为了提高功率、降低热负荷同时减少排放的有效方法，并得到普遍应用。如图 2^[1] 所示，随着过量空气系数的增大，发动机的输出功率提高，NO_x 排放下降，热效率也得到提高。

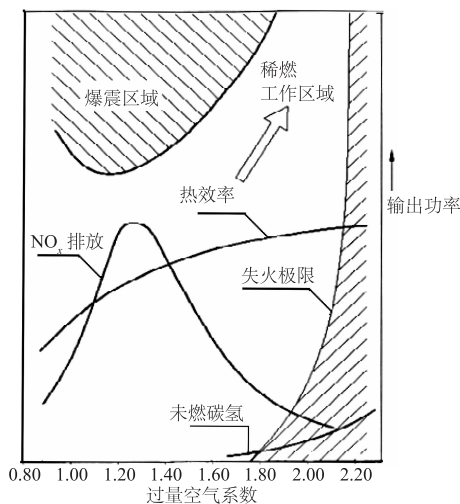


图2 气体发动机工作范围

但是随着稀燃程度的加深，最小点火能量急速增长，如图 3^[1] 所示。为了解决点火问题，又引入了预燃室技术。除了对点火能量的要求外，由于稀燃程度加大，发动机工作范围越来越窄，对爆震和失火的控制要求也越高。

气体发动机性能的提高主要从五个方面着手，分别为：Miller 循环、EGR 技术、优化气体混合、提高点火技术、改进预燃室技术^[2]。以下分别作介绍。

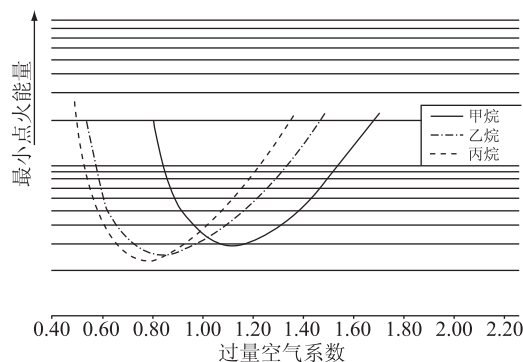


图3 点火能量随稀燃的变化

2 气体发动机性能提高技术分析

2.1 Miller 循环

Miller 循环通过改变气门正时使有效膨胀过程大于有效压缩过程，使有效压缩比减小，降低压缩终点时缸内温度和压力，从而抑制爆震。而随着爆震极限的提高，可以使用有更高压缩比的气缸，提高平均有效压力(BMEP)，同时热效率也会有所提高。为了弥补由于气门定时改变带来的进气量损失，需要使用高效高压比涡轮增压器。理论分析表明，如果燃烧速度足够快，会减小 Miller 循环对充气效率的影响^[3]。

有效压缩比对爆震的影响如图 4^[4] 所示，纵坐标表示当前爆震极限与原机的差值，数值越大表明越不易发生爆震。从对比结果看，提高有效压缩比会使缸内工质的燃烧温度和压力升高，容易出现爆震；而在几何压缩比均为 13 的情况下，使用 Miller 循环可将有效压缩比降到 10.5，能够抑制爆震。

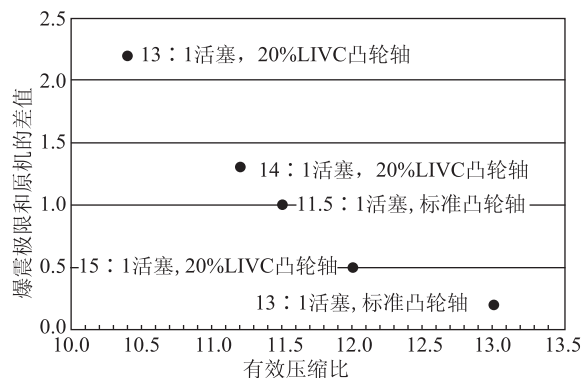


图4 有效压缩比对爆震的影响

目前通常使用两种方法实现 Miller 循环, 分别是进气门早关 (EIVC) 和进气门晚关 (LIVC), 如图 5^[5] 所示。

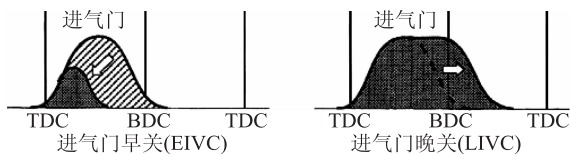


图 5 Miller 循环的气门定时

图 6^[5] 所示为进气门定时 (IVC) 对充气效率和进气温度的影响, 点火时刻位于爆震极限处。由于进气惯性的影响, LIVC 在下止点后 (aBDC) 40° 时充气效率达到最大值, 随后由于进气回流, 充气效率随进气阀关闭定时的推后迅速下降, 而由于回流气体与进气道的摩擦使得进气道温度升高。EIVC 系统减小了凸轮升程, 使充气效率减小, 因此需要增大进气管压力。LIVC 系统中, 凸轮最大升程的持续时间长, 时面值大, 与 EIVC 相比充气效率较高, 进气管压力增加量较小。两种 Miller 循环的热效率基本一致。

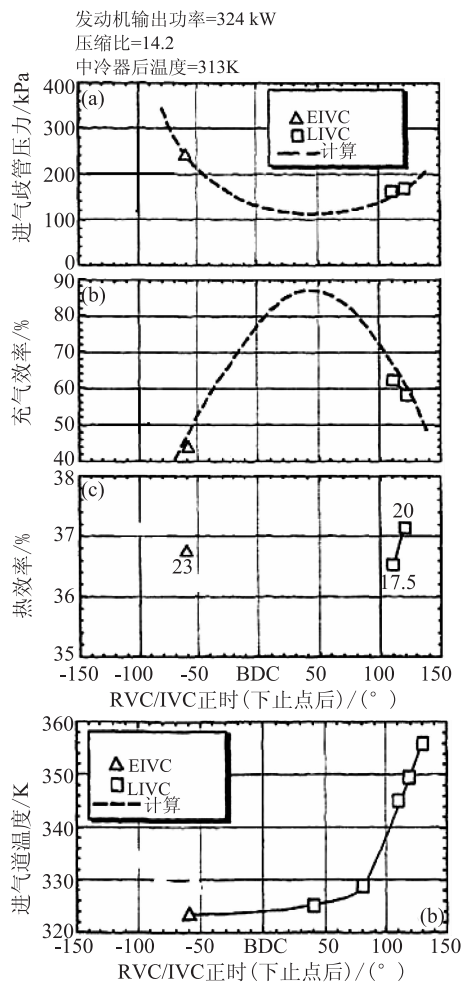


图 6 IVC 的影响

考虑到 EIVC 充气效率不高, 二十世纪九十年代的 Miller 循环大都采用 LIVC, 而现在的技术条件使得在实现气门早关时, 气阀升程不必像从前一样降低很多, 这样就能够保持较高的充气效率, 解决了 EIVC 充气效率低的问题。

2.2 EGR 技术

在气体发动机上使用 EGR 来解决 NO_x 排放高, 易爆震的问题, 主要是由于 EGR 中多原子分子的热容高, 导致最高温燃烧度和燃烧压力下降。图 7^[5] 所示为 EGR 对整个发动机性能的影响, 此时使用当量比混合气, 点火时刻分为固定在上止点前 (bTDC) 15° 和最大扭矩定时 (MBT)。如图所示, 在两种点火定时的情况下, EGR 率的增加都会使泵气功 (PMEP) 降低, 这是由于流量增加使得节流阀处的压力损失减小。对于 15° bTDC 点火, EGR 率的提高使得平均指示压力变动系数 (COV_IMEP) 增加, 且燃烧速度降低, 因此热效率降低。而在燃烧推迟和排气压力升高双重影响下, 排气温度变化不大。对于 MBT 点火, 高 EGR 使得 PMEP 和排气温度降低, COV_IMEP 几乎不变, 热效率有所提高。

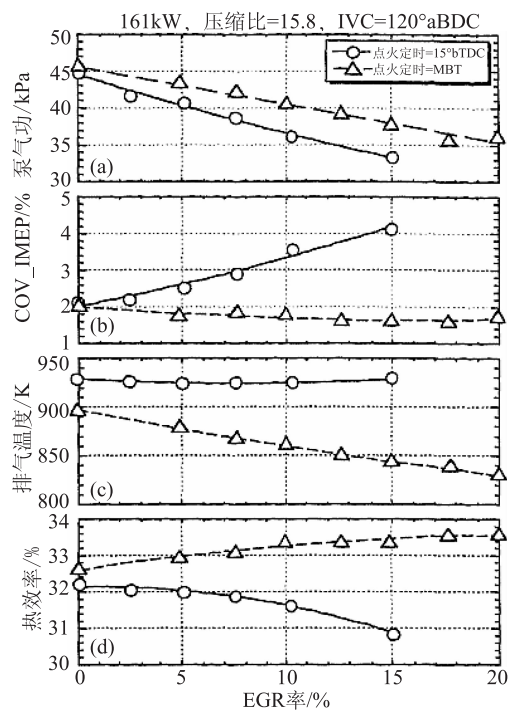


图 7 EGR 率对发动机性能的影响

图 8^[5] 所示为 EGR 对排放的影响。在 15° bTDC 点火时, 由于燃烧持续期较长, 且排温几乎不变, 从而使得 EGR 对 THC 排放影响较低; 在 MBT 定时情况下, EGR 的增加使得 THC 排放增加, 但同时 CO 和 NO_x 排放减小。因此 MBT 定时相比 15° bTDC

定时,虽然能够取得更好的性能提升但排放稍显不足。

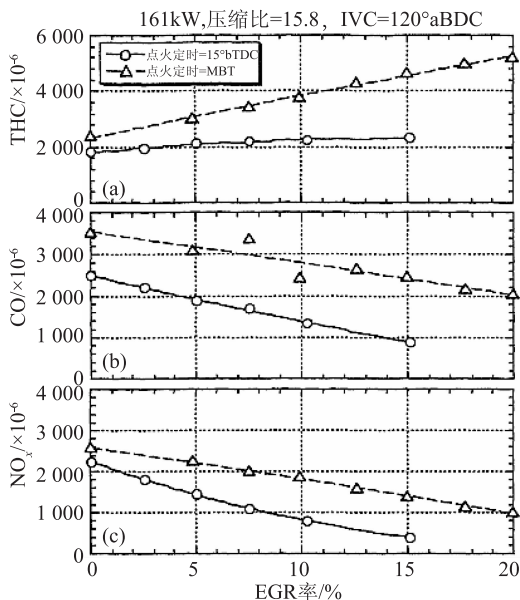


图 8 EGR 率对排放的影响

随着点火技术的发展,在稀燃状态下也采用

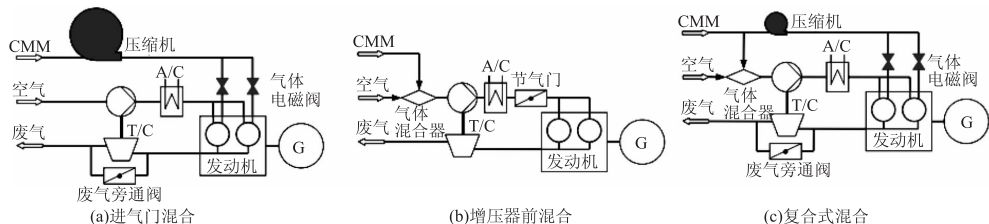


图 10 供气方式对比

(1) 进气门混合

使用电磁阀通过控制气阀开启持续期来控制各缸进气量,而开启持续期依靠燃气与增压空气的压力差控制。空气与燃气分别经过增压器压缩后在进气门附近混合进入气缸,不需要节气门,且可以减轻和消除由于气门重叠角的存在,造成燃气直接逸出,导致排放变差和燃料浪费的不良影响。

(2) 增压器前混合

空气和燃气在混合器中按一定空燃比混合之后

EGR 技术来提高爆震极限。如图 9^[6]所示,三菱公司的预燃室火花点火稀燃气体发动机“MACH-SI”,混合气过量空气系数 $\lambda \geq 1.9$,在 EGR 率达到 35% 时有最高效率。

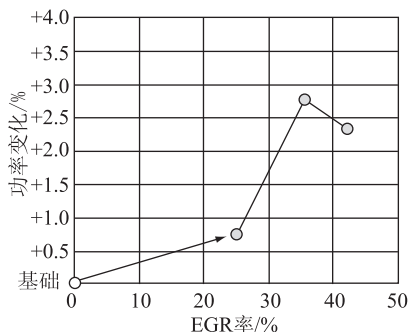


图 9 EGR 率对功率的影响

2.3 混合气的形成和供给

气体发动机的混合气形成以缸外预混合为主,主要方式有三种,分别为:进气门混合、增压器前混合和复合式混合。以三菱公司 MACH 系列发动机为例作说明,各种预混合进气的方式对比如图 10^[6]和表 1 所示。

进入压气机压缩,由节气门控制进气量调节发动机负荷。混合器大体可以分为两种,即结构简单的文丘里管混合器和功能较为完善的比例调节混合器。

(3) 复合式混合进气

由于进气门混合所需要的压力较高,为了防止进气压力不足导致的进气量不足,使用了这种复合式混合进气装置。当采用进气门混合时不能提供足够的燃气时,则在增压器前令部分燃气与空气混合来弥补燃气进气不足。

表 1 混合方式对比

供气方式	进气门混合	增压器前混合	复合式混合
优点	对负荷和混合气变化有较快的响应速度; 进气管爆炸危险小	供气压力较低	进气管内没有爆炸危险; 可以拓宽燃气量的范围; 可以在燃气量不足时补充燃气
缺点	需要较高的燃气压力(约高 0.5MPa); 混合气浓度有限制(燃气量有最低限制)	进气管内爆炸危险高; 对负荷和混合气浓度的 变化响应慢	装置复杂; 增加额外成本

2.4 开式燃烧室点火技术

气体发动机采用稀燃主要受到爆震和失火的影响,最初在开式燃烧室式发动机上采用,过量空气系数可达 1.7 左右。为了进一步提高稀燃极限,在开式燃烧室的基础上使用了预燃室式火花塞,过量空气系数可达到 1.85^[7] 左右。此外还出现了开式燃烧室柴油引燃的点火方式,如图 11^[7-8] 所示。

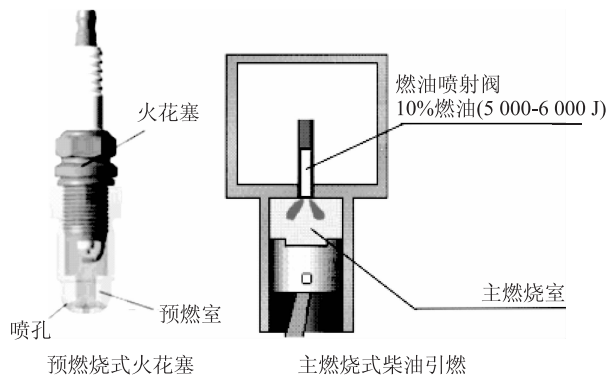


图 11 开式燃烧室点火系统

2.4.1 预燃室式火花塞

随着混合气稀燃程度的提高,点火能量的要求逐渐提高,普通开式燃烧室已不能满足稀混合气所要求的点火能量。由此设计了预燃室式火花塞,目的是在不改变整个燃烧系统的情况下,拓宽稀燃失火极限,使主燃烧室的燃烧速度加快。预燃室式火花塞的工作过程为:在发动机压缩行程,在主燃烧室中的混合气体被压入火花塞的预燃室,在预燃室中点燃混合气,然后火焰从喷口喷出,作为点火源使主燃烧室内的混合气体燃烧。如图 12^[7] 所示为预燃室式火花塞的结构。研究表明在增压的情况下增加预燃室体积、缩小喷口直径和突出点火位置,能够加速燃烧、缩短燃烧持续期并使燃烧更稳定。

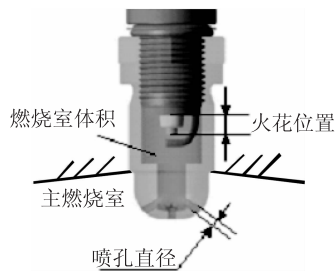


图 12 预燃室式火花塞结构

鉴于对预燃室式火花塞的研究,设计新型预燃室火花塞 F,以此做试验得到的结果与普通火花塞的效果对比如图 13^[7],可以看出预燃室火花塞在增加了预燃室容积后,燃烧快于普通火花塞,而 COV_IMEP 也要低的多。

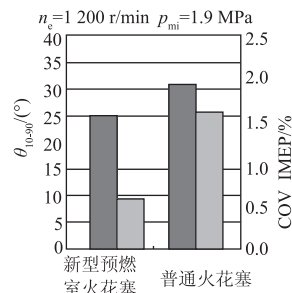


图 13 火花塞效果对比

图 14^[7] 为预燃室式火花塞和普通火花塞对稀燃程度影响的比较,随过量空气系数增加,COV_IMEP 增加,燃烧变得不稳定,容易失火。普通火花塞在过量空气系数为 1.8 时,COV_IMEP 已经出现急速升高的趋势,燃烧已经变得不稳定了;预燃室式火花塞在过量空气系数为 1.9 时才出现急速升高的趋势。由此看出使用预燃室式火花塞能够在一定程度上提高稀燃极限。

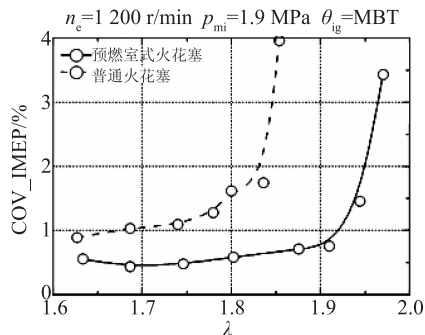


图 14 COV-IMEP 的比较

需要指出的是,只有在增压的情况下,预燃室式火花塞对稀燃极限和热效率的改进才优于普通火花塞。

2.4.2 开式燃烧室柴油引燃

开式燃烧室柴油引燃是指向主燃烧室中喷射占总热量 3% 的柴油,以柴油压燃产生的火焰点燃整个燃烧室内的混合气。有些双燃料发动机能在天然气和轻型柴油之间迅速切换使用。

Kenji Nakagawa 等人^[9]对开式燃烧室柴油共轨喷射引燃技术作了研究。使用水冷四冲程发动机,缸径和行程均为 170 mm,燃烧室形状经过优化使燃烧快速进行。为了优化喷射的柴油量和引燃柴油喷射正时进行试验研究,固定转速 1 000 r/min,指示平均有效压力(IMEP)为 1.2 MPa,混合气温度 323 K。

图 15^[9] 所示为引燃柴油喷射正时和喷油量对总碳氢(THC)排放和氮氧化物(NO_x)排放的影响,从总体上来说,随着过量空气系数增加,THC 排放增

加, NO_x 排放降低。随着喷油时刻的提前, 所能达到的稀燃极限提高(以 NO_x 排放达到 $2 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 为富油极限)。

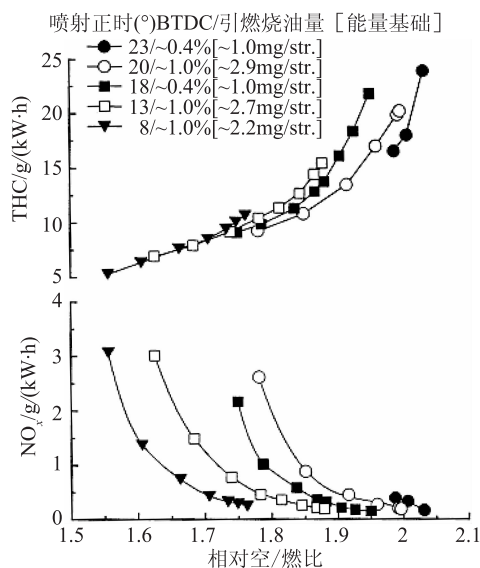


图 15 引燃柴油喷射正时和喷油量对排放的影响

图 16^[9] 为引燃柴油喷射正时和喷油量对热效率和 COV_IMEP 的影响, 随着过量空气系数的增大, 燃烧变差, HC 排放增加, 热效率下降, COV_IMEP 增大(以 $\text{COV_IMEP} = 3\%$ 为失火极限)。

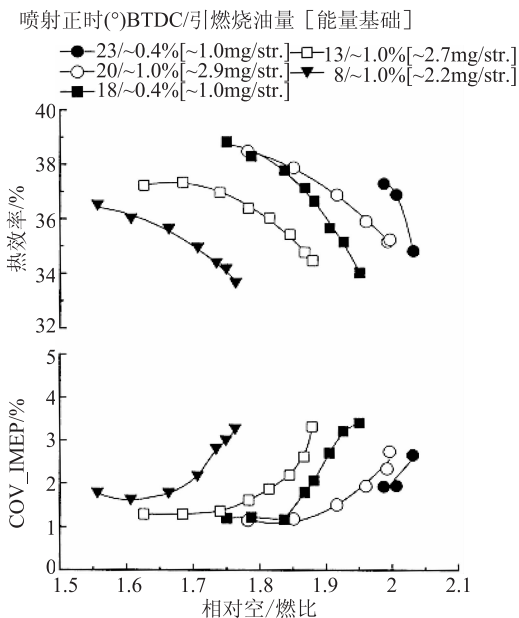


图 16 引燃柴油喷射正时和喷油量对热效率和 COV_IMEP 的影响

2.5 预燃室式点火技术

由于开式燃烧室所能达到的稀燃程度有限, 为了达到更高的稀燃程度而使用预燃室技术, 预燃室中气体燃烧后火焰喷入主燃烧室点燃稀薄混合气, 能够大大提高稀燃极限, 实现稀燃稳定燃烧, 降低

NO_x 排放, 提高热效率。

预燃室技术又可分为预燃室火花点火和预燃室微量柴油引燃两种, 以下作简要分析。

2.5.1 预燃室火花点火

预燃室火花点火技术可概括为: 从排气行程末期开始, 一直持续到压缩冲程的前半段, 使总进气质量的 3% 作为引燃燃气进入预燃室, 预燃室内的混合气接近理论空燃比, 这部分气体由火花塞点燃, 然后火焰喷出点燃主燃烧室内的稀薄混合气。预燃室和点火系统如图 17^[6] 所示。

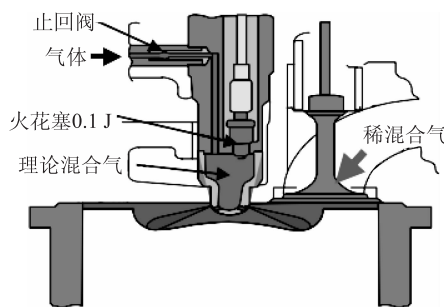


图 17 预燃室火花点火燃烧室结构

使用稀燃技术的一个重要问题是燃烧和火焰传播不稳定, 易导致失火。预燃室内的混合气不像想象的那样均匀, 由于受压缩过程中来自主燃烧室内的稀混合气影响, 通常, 在火花塞附近的燃气比较稀, 而在壁面处混合气浓度高; 并且由于需要比普通点火更高的电压, 所以火花塞的使用寿命一般较短。针对以上两点问题, 相应的解决方案如下。

(1) 预燃室设计

预燃室体积减小, 初期燃烧就会受到限制, NO_x 排放会降低, 爆震受到抑制, 然而热效率和等容度会降低。因此需要在保持足够火焰喷射能量的前提下尽量减小预燃室体积^[12]。

三菱公司对预燃室的火焰喷射能量做了试验研究^[6], 选择了强、中、弱三种火焰喷射强度做对比, 通过调节过量空气系数来使三种情况下最高燃烧压力变动系数 ($\text{COV_P}_{\max}$) 均达到最小值, 同时爆震强度也通过调整点火正时调节到相同水平。对比如图 18 所示, 预燃室的火焰喷射能量会对燃烧稳定性和爆震产生很大的影响, 火焰喷射能量高能够提高效率, 降低未燃碳氢排放, 但是会以损失 $\text{COV_P}_{\max}$ 作为代价。实际应用中仍然会选择有火焰喷射能量的预燃室。

(2) 使用长寿命的火花塞

长时间工作使得电极磨损, 会影响点火质量, 从而产生循环波动甚至失火。如图 19^[6] 所示, 令

冷却位置更加接近电极, 能够提供更好的冷却效果, 延长火花塞工作寿命。

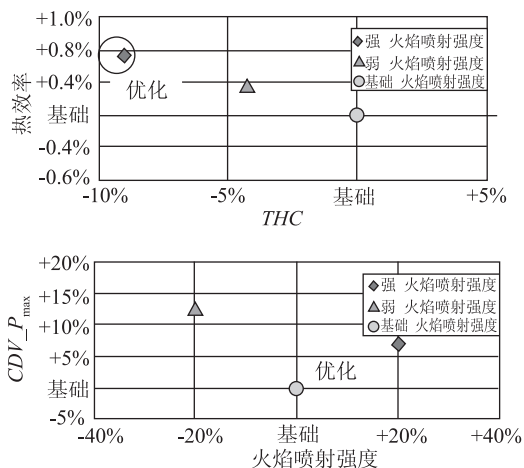


图 18 预燃室火焰喷射强度的影响

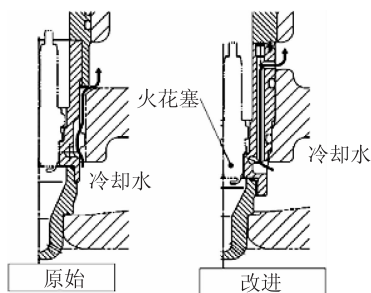


图 19 冷却系统的改善

2.5.2 预燃室微量柴油引燃

预燃室微量柴油引燃系统工作过程为: 将占总输入燃料能量的 1% 的柴油喷入预燃室, 柴油引燃预燃室内的燃气后, 火焰从预燃室中喷出点燃主燃烧室内的稀薄混合气。预燃室微量柴油引燃系统的结构简图如图 20^[6] 所示。

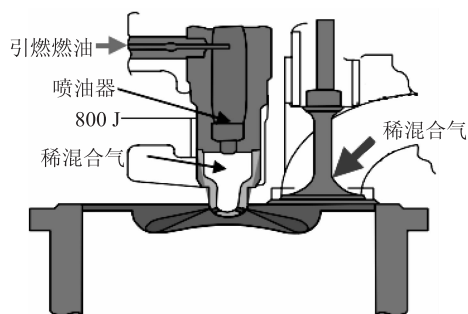


图 20 预燃室微量柴油引燃燃烧室结构

预燃室内引燃柴油喷嘴直径和喷射压力会对柴油油耗和效率产生影响。如图 21^[11] 所示, 在 NO_x 排放相同且效率相同时, 小直径喷嘴 (0.24 mm) 所需引燃喷射量更小。在相同喷射压力相同 NO_x 排放时, 喷油量越多效率越低。另外, 不需要过高的

喷油压力 (50.0 MPa), 只要能使大液滴破碎, 能帮助雾化就足够了。

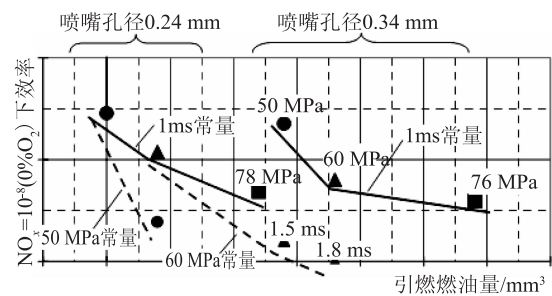


图 21 预喷射的影响

预燃室喉部的设计会影响到火焰喷射压力, 从而影响主燃烧室内的燃烧。如图 22^[11] 所示, 喉部越小, 预燃室内火焰压力就越大, 就会有越高的能量使火焰喷入主燃烧室。另外, 通常选择垂直布置的喉部, 既能产生足够的涡流来加强放热, 提高预燃室内气体压力, 又能避免涡流过强导致穴蚀, 影响使用寿命。合理的喷射通道长度有利于雾化和混合, 使柴油在预燃室喉部燃烧, 喷入主燃烧室的是燃烧的柴油而不是柴油蒸汽或者未燃柴油^[12]。

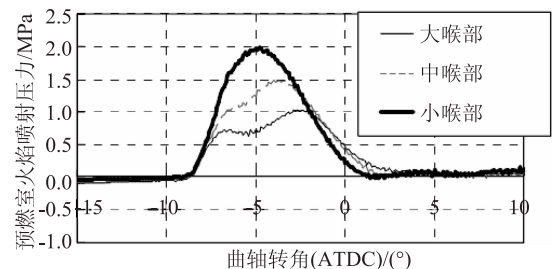


图 22 预燃室喉部对火焰压力的影响

预燃室中燃油量很少, 所以 NO_x 排放很低, 这样就可以使燃烧室做得更大, 体积可以达到火花点火发动机预燃室的 3 倍, 与后者相比有更高的热效率和更低的 NO_x 排放。但是这种燃烧模式要求使用两种燃料, 不如火花点火方便。

3 结论

Miller 循环和 EGR 的使用提高了气体发动机的爆震极限, 令气体机可以使用更高的压缩比。此外, 由于点火技术的发展, 稀燃已广泛应用于各种气体发动机中, 热负荷的问题已经基本解决, 希望进一步提高稀燃极限以追求更低的排放和更高的热效率, 这就需要改进当前的点火技术。在目前点火技术下, 气体发动机稀燃程度已经达到 $\lambda = 2.0$ 左右, 热效率也提高到 45% 以上。

(下转第 16 页)

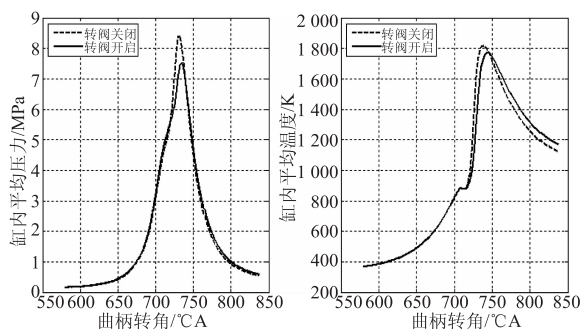
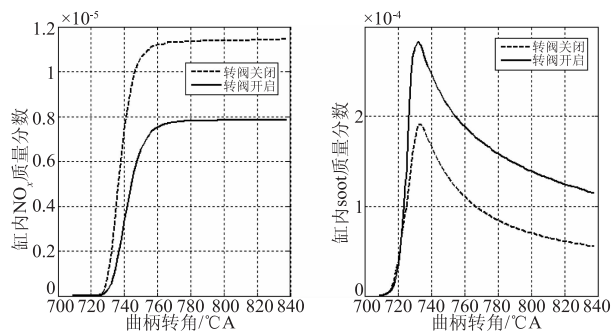


图 6 缸内平均压力和平均温度

图 7 缸内 NO_x 和 soot 质量分数

6 总 结

综上所述,在 25% 负荷工况下,关闭进气控制阀有利于缸内混合气的形成,改善燃油雾化燃烧的效果,增加柴油机的动力性;与此同时,柴油机 NO_x 生成量有所增加,而 soot 生成量有所降低。因此,当 TBD620 柴油机运行在低负荷工况下时,通过关闭进气控制阀,能较好地改善柴油机燃烧和排放性能。

参考文献

- [1] 常汉宝,张煜盛,黄锦星. TBD620 柴油机低负荷性能研究[J]. 内燃机工程,2002,23(3):30-32.
- [2] 施爱平,叶丽华,燕明德,等. 柴油机缸内工作过程的数值模拟[J]. 农业机械学报,2009,40(3):40-45.
- [3] 常丽,庞华廷. 进气参数对柴油机排放及性能的影响[J]. 车用发动机,2006(4):24-27.

(上接第 9 页)

气体发动机和使用传统燃料的发动机相比,效率相当,排放低,符合当前节能减排的要求,因此越来越受到全球的关注,随着新技术的应用,气体发动机有着不可限量的发展潜力。

参考文献

- [1] Lars M. Nerheim, Dr.-Ing. Rune Nordrik. Bergen gas engine developments[C]. CIMAC Paper no. 71, 2004.
- [2] Johann Klausner, Christian Trapp, et al. The gas engine of the future-innovative combustion and high compression ratios for highest efficiencies[C], CIMAC Paper no. 312, 2010.
- [3] Dr. Guenther Herdin, Dipl.-Ing. Friedrich Gruber, et al. Miller Cycle-efficiency Potentials for Gas Engines[C]. CIMAC Paper no. 197, 2004.
- [4] Dr. Joel Hiltner, Dr. Scott Fiveland. Development considerations for lean burn natural gas engines employing the miller cycle[C]. CIMAC Paper no. 2, 2004.
- [5] Kazuhisa OKAMOTO, Fu-Rong ZHANG, Satoshi MORIMOTO, et al. Development of a high-performance gas engine operating at a stoichiometric condition-effect of miller cycle and EGR[C]. CIMAC 1998.
- [6] MICHIIYASU ISHIDA, SHOJI NAMEKAWA, et al. Newly

developed mitsubishi MACHII-SI and CM-MACH gas engines, enhancing and expanding utilization of energy and specialty gases[C]. CIMAC Paper no. 109, 2010.

- [7] Koji Yamanaka, Shin Nishioka, Yosuke Shiraga, et al. Development of pre-chamber spark plug for gas engine[C]. CIMAC Paper no. 182, 2010.
- [8] S. Goto, Y. Ono, Y. Nishi, S. Nakayama. Development of advanced gas engine 22AG with high bmep, high efficiency, ignited by micro-pilot MDO[C]. CIMAC Paper no. 8-12, 2001.
- [9] Kenji Nakagawa, Teruhiro Sakurai, Fujio Shoji. Study of lean burn gas engines using pilot fuel for ignition source[C]. SAE Paper no. 982480, 1998.
- [10] Shinji Yasueda, shigemi Ono, Kuninori Itou, et al. Development of high efficiency KU30GA gas engine with micro-pilot ignition[C]. CIMAC Paper no. 8-10, 2001.
- [11] Akira Tsunoda, Takayuki Yamamoto, Shinji Yasueda, et al. Further development of advanced gas engine KU30GA (MACH-30G)[C]. CIMAC Paper no. 120, 2004.
- [12] Stephen G. Dexter, J. Vincent Serve, Frank Berghof. Micro-pilot, the gas combustion system to challenge the diesel engine[C]. CIMAC Paper no. 8-05, 2001.