

氢燃料发动机关键技术研究

袁华强

湖南中联重科智能高空作业机械有限公司, 湖南 长沙 410200

[摘要]随着全球对环保和可持续能源的需求不断增长,氢发动机作为一种清洁高效的驱动装置受到广泛关注。本文深入研究了氢燃料发动机的关键技术,包括氢燃料的储存与供给、燃烧过程控制、发动机结构优化以及排放控制等方面。通过对这些关键技术的分析,阐述了氢燃料发动机的工作原理、技术特点以及面临的挑战,并探讨了相应的解决方案。研究表明,氢燃料发动机具有显著的环保优势和较高的能量转换效率,但在技术成熟度和成本方面仍需进一步提升。

[关键词]氢燃料发动机; 关键技术; 燃烧控制; 排放控制; 可持续发展

DOI: 10.33142/ec.v8i6.17211

中图分类号: U473

文献标识码: A

Research on Key Technologies of Hydrogen Fuel Engines

YUAN Huaqiang

Hunan Zoomlion Intelligent Access Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410200, China

Abstract: With the increasing global demand for environmental protection and sustainable energy, hydrogen engines have received widespread attention as a clean and efficient driving device. This article delves into the key technologies of hydrogen fuel engines, including hydrogen fuel storage and supply, combustion process control, engine structure optimization, and emission control. By analyzing these key technologies, the working principle, technical characteristics, and challenges faced by hydrogen fuel engines are explained, and corresponding solutions are discussed. Research has shown that hydrogen fuel engines have significant environmental advantages and high energy conversion efficiency, but further improvements are needed in terms of technological maturity and cost.

Keywords: hydrogen fuel engine; key technologies; combustion control; emission control; sustainable development

1 研究背景与意义

在全球能源危机愈发严峻、环境污染问题持续加剧的当下,如何找到清洁且可持续的能源,以替代传统化石燃料,已成为亟待解决的当务之急。氢作为一种理想的能源载体,具有燃烧产物仅为水、能量密度高、可再生等优点,被视为未来能源领域的重要发展方向。氢燃料发动机是利用氢能的一种重要方式,它可以将氢的化学能转化为机械能,为各种电力设备供电,与传统的汽油和柴油发动机相比,氢燃料发动机在运行过程中几乎不会产生氮氧化物、颗粒物(PM)等污染物。可大幅减轻对环境的负面影响,对于改善空气质量、应对气候变化都有积极作用。

此外,氢燃料发动机还拥有较高的能量转换效率,能更高效地利用能源、降低消耗。在交通运输领域,它可广泛应用于汽车、船舶、飞机等各类交通工具,有望破解传统燃油交通工具面临的能源依赖与环境污染难题,促进运输部门实现绿色转型。在分布式发电领域,氢燃料发动机可作为备用电源或小型独立电源,为偏远地区、岛屿等提供可靠的电力供应,具有重要的现实意义。因此,深入研究氢燃料发动机的关键技术,对于促进氢能的广泛应用、实现能源的可持续发展具有至关重要的作用。

2 氢燃料发动机的发展现状

自20世纪70年代第一次石油危机爆发以来,人们一直专注于氢能在发动机领域的应用。早期的氢燃料发动机

主要采用进气道喷射方式,存在功率输出低、易回火等问题。随着科技的不断进步,电子控制技术、燃料喷射技术等氢燃料发动机上得到应用,发动机的性能得到了一定程度的提升。近年来,随着对环保要求的不断提高和氢能产业的快速发展,氢燃料发动机的研发取得了显著进展。

3 氢燃料发动机的工作原理与特点

3.1 工作原理

氢燃料发动机的工作方式类似于传统的内燃机,通过燃烧燃料和空气来产生热量,然后转化为机械能。在氢燃料发动机中,氢气作为燃料被引入发动机燃烧室,与空气混合形成可燃混合气。混合气在火花塞点火或其他点火方式的作用下燃烧,产生高温高压的燃气,推动活塞做功,实现热能到机械能的转换。根据氢气的喷射方式,氢燃料发动机主要有两种喷射方式(PFI)和汽缸内直接喷射(DI)。注射是将氢气注入注射线中,使其在燃烧前与空气一起进入燃烧室;直接注射是将氢气直接注入燃烧室,使气缸与空气形成可燃混合物。不同的注射方法、发动机的混合、燃烧过程和性能都有不同的效果。

3.2 特点

3.2.1 环保性能优越

氢燃料发动机最突出的特点之一是其出色的环保性能。氢燃烧后的唯一产品是水,不会产生有害污染物,如二氧化碳(CO₂),氮氧化物,颗粒物(PM)等。与传统燃油发动

机相比,氢燃料发动机可有效减少对大气环境的污染,有助于改善空气质量,应对全球气候变化。这使得氢燃料发动机在环保要求日益严格的今天具有巨大的发展潜力。

3.2.2 能量转换效率高

氢具有更高的能量密度,每质量燃烧氢释放的能量约为汽油的 2.7 倍。在理想情况下,氢燃料发动机能够更充分地利用氢气的化学能,实现较高的能量转换效率。通过优化发动机的燃烧过程和结构设计,氢燃料发动机的热效率可达到较高水平,从而降低能源消耗,提高能源利用效率。

3.2.3 燃烧特性独特

氢具有独特的燃烧特性,包括低点火能量,快速火焰爆发,广泛的可燃性限制,高自燃温度等。这些特性使得氢燃料发动机在燃烧过程中具有一些与传统燃油发动机不同的特点。但同时,氢气的可燃极限宽也增加了发动机发生早燃、回火等异常燃烧现象的风险,对发动机的燃烧控制提出了更高的要求。

3.2.4 低温启动性能好

氢气的点火能量较低,即便处于低温环境中也能较容易被点燃,这使得氢燃料发动机拥有良好的低温启动性能。这一特点使得氢燃料发动机在寒冷地区或低温环境下能够正常工作,具有较好的适应性。

4 氢燃料发动机关键技术

4.1 氢燃料储存与供给技术

4.1.1 储存方式

高压气体储存:氢气在高压状态下被压缩并储存在高压瓶中。这种储存方式具有储存效率较高、加气速度快等优点,但需要高压设备,对气瓶的耐压性能要求高,成本也相对较高。目前,空气中氢气的储水压力一般可以达到 35MPa 甚至 70MPa。

低温液体储存:氢气在极低的温度下储存 (-253°C) 冷却,使其转化为液体形式进行储存。液态氢的体积能量密度高,占用空间小,但储存过程中需要消耗大量的能量用于制冷和维持低温,且存在蒸发损失的问题此外,对液氢存储装置的等温性能要求很高,相应的成本相对较高。

金属氢化物储存:使用某些金属或合金与氢发生化学反应,形成金属氢化物以储存氢。这种储存方式具有安全性高、储存压力低等优点,但储氢材料的储氢容量有限,且充放氢速度较慢,成本也有待降低。

4.1.2 供给系统

进气口喷射系统:进气口喷射系统借助电子控制的多点气体喷射系统,进气口分流器中的氢气。该系统对传统的发动机结构变化不大,混合物的形成和燃烧易于控制,可以快速准确地控制空气和燃烧比,使发动机具有良好的瞬态响应。

气缸直接喷射系统:该系统是在阀门关闭后,将氢气直接泵入气缸中。根据发动机结构的不同,它分为低压氢气喷射和高压氢气喷射两种类型,其中,高压喷射在气缸中对空气负荷几乎没有影响,既克服了提高发动机效率的空气喷射,降低了燃气喷射效率的问题,又降低了发动机

爆炸的可能性。但缸内直喷系统的氮氧化物排放控制比较困难,增加了排放控制的成本,且氢气喷射阀长期暴露在高温燃气中,对喷射阀的可靠性有很大的挑战。

4.2 燃烧过程控制技术

4.2.1 点火系统优化

由于氢气的点火能量小,传统的点火系统可能无法满足氢燃料发动机的点火需求。因此,点火系统必须进行优化,以提高点火能量和点火可靠性。采用高能点火线圈、优化火花塞结构和点火时刻等措施,可以确保氢气在燃烧室内能够及时、稳定地点燃,促进燃烧过程的顺利进行。此外,一些新型的点火技术,如等离子体点火技术,也在氢燃料发动机的研究中得到关注。等离子体点火能够产生更高的点火能量和更广泛的点火区域,有助于改善氢气的燃烧效果,提高发动机的性能。

4.2.2 混合气形成与组织

为了实现氢气和空气的均匀混合,提高燃烧效率,必须优化气体混合物的形成和组织,比如采用特殊的进气道形状、设置导流板等来增强进气过程中的气体混合效果。在缸内直喷发动机中,合理设计喷油器的喷射角度、喷射压力和喷射时刻,以及优化燃烧室的形状和结构,能够使氢气在燃烧室内更均匀地分布,与空气充分混合。此外,在废气回收技术 (EGR) 的帮助下,进入进气系统的一部分废气也可以改善混合物的燃烧特性,降低燃烧温度,从而减少 NO_x 的产生。

4.2.3 燃烧过程监测与控制

实时监测氢燃料发动机的燃烧过程,对于优化燃烧控制、提高发动机性能和可靠性至关重要。通过在发动机上安装压力传感器、温度传感器等监测设备,获取燃烧室内的压力、温度等参数信息,进而分析燃烧过程的状态。基于这些监控数据,可以使用高级控制算法,如预测控制 (MPC) 模型和自适应控制,对点火时刻、喷油时刻、喷油量等参数进行实时调整,从而实现发动机在不同工况下的最优燃烧控制,提高效率、经济性和排放。

4.3 发动机结构优化技术

4.3.1 气缸盖与进气道设计

气缸盖与进气道的设计,对氢燃料发动机的混合气形成、燃烧过程及性能有着重要影响。采用屋脊式气缸盖设计,可以改善混合气的流动和混合效果,增强燃烧室内的湍流强度,有利于提高燃烧效率和火焰传播速度。优化进气道的形状和尺寸,使其能够更好地引导空气和氢气的流动,促进两者的混合,同时提高进气效率。此外,合理布置火花塞和喷油器的位置,也能够优化燃烧过程,减少异常燃烧现象的发生。

4.3.2 活塞与连杆设计

由于氢燃料发动机的燃烧特性与传统燃油发动机不同,其燃烧过程产生的压力和温度变化也有所差异。因此,需要对活塞和连杆进行专门设计,以适应这种变化,确保发动机的可靠性和耐久性。采用高强度、轻量化的材料制造活塞和连杆,提高其承受热负荷和机械负荷的能力。同时,通过优化活塞顶部形状和环形通道结构,可以减少活

塞与气缸壁之间的摩擦损失,从而提高发动机的机械效率。

4.3.3 增压技术应用

印刷技术可以增加发动机的进气压力,增加进气量,从而提高发动机的功率输出和热效率。在氢燃料发动机中应用增压技术,如涡轮增压、机械增压等,能够有效改善发动机的性能。但增压过程中会导致进气温度升高,增加发动机发生早燃、爆震等异常燃烧的风险。因此,有必要将中冷技术相结合,以便在加压后冷却空气,降低进气温度,保证发动机的稳定运行。同时,合理匹配增压系统与发动机的工作特性,优化增压控制策略,也是实现增压技术在氢燃料发动机中有效应用的关键。

4.4 排放控制技术

4.4.1 氮氧化物排放控制

虽然氢发动机的燃烧产物主要是水,但在高温下燃烧时会产生一定量的氮氧化物(NO_x)。为了减少氮氧化物的排放,可以使用各种技术:如前文所述,利用废气再循环(EGR)技术将部分废气引入进气系统,能降低燃烧温度,抑制 NO_x 生成;此外,通过使用选择性催化还原(SCR)技术,将SCR催化剂安装到废气系统中,通过喷洒还原剂如尿素溶液,可将 NO_x 还原为氮和水,从而有效减少 NO_x 的排放。还可以通过优化发动机的燃烧过程,如控制混合气浓度、点火时刻等,从源头上减少 NO_x 的生成。

4.4.2 其他污染物排放控制

虽然氢发动机理论上不会产生碳氢化合物(HC),一氧化碳(CO)和颗粒物(PM)等污染物,但实际运行中,受燃烧不完全、润滑油参与燃烧等因素影响,仍可能排放少量这类污染物。通过优化发动机的燃烧过程来减少HC和CO的排放,以确保足够的氢燃烧,并通过采用高效的空气过滤器和废气后处理装置来减少对环境的影响。

5 氢燃料发动机面临的挑战与解决方案

5.1 技术挑战

5.1.1 氢燃料储存与运输难题

目前,氢燃料的储存和运输技术仍存在诸多问题。高压气态储存需要昂贵的高压设备和耐压气瓶,且储存能量密度相对较低;低温液态储存的制冷能耗高,蒸发损失大,储存设备成本高;金属氢化物储存的储氢容量有限,充放氢速度慢。此外,氢气的运输基础设施不完善,长距离、大规模运输氢气的成本较高,这严重制约了氢燃料发动机的推广应用。

5.1.2 发动机成本较高

氢燃料发动机的制造成本显著高于传统燃油发动机。一方面,氢燃料发动机的关键部件,如氢气喷射系统、高压储氢设备、特殊的点火系统等,由于技术含量高、制造工艺复杂,导致成本居高不下。另一方面,目前氢燃料发动机的生产规模较小,尚未形成规模效应,进一步增加了单位产品的成本。高昂的成本使得氢燃料发动机在市场竞争中处于劣势,阻碍了其商业化进程。

5.1.3 燃烧稳定性与效率问题

尽管氢燃料发动机具有较高的理论能量转换效率,但

在实际运行中,由于氢气的独特燃烧特性,它容易发生异常燃烧现象,如早期燃烧,反弹和爆炸,影响燃烧的稳定性效率。此外,混合气形成不均匀、燃烧过程控制精度不够等问题,也会导致发动机的燃烧效率无法充分发挥,限制了发动机性能的提升。

5.2 解决方案

5.2.1 研发新型储氢材料与技术

应加大对新型储氢材料的研发投入,如新型金属氢化物、碳氢化合物、多孔材料等的研究。提高氢的储存容量,氢的放电速度和储氢材料的循环稳定性,降低氢的储存成本。此外,加强氢燃料运输基础设施建设,发展管道输氢、液氢运输等技术,降低氢气运输成本。

5.2.2 降低发动机成本

通过技术创新和工艺改进,降低氢燃料发动机关键部件的制造成本。例如,采用先进的制造工艺和材料,简化氢气喷射系统、高压储氢设备等部件的结构,提高生产效率。同时,随着氢燃料发动机市场需求的增加,逐步扩大生产规模,利用规模效应降低单位产品成本。此外,政府可以通过政策支持,如补贴、税收优惠等,鼓励企业加大对氢燃料发动机的研发和生产投入,推动成本降低。

5.2.3 优化燃烧过程与控制策略

有必要研究氢的燃烧特性,并建立精确的燃烧模型,以支持最佳燃烧过程。通过改进发动机结构设计——如优化气缸盖、进气道、燃烧室等部件的形状与尺寸——可改善混合气的形成及组织效果,提升燃烧稳定性。同时,采用先进的传感器技术和控制算法,实现对发动机燃烧过程的精确监控和实时调节,根据不同的运行条件,调整点火时间、喷射时间、燃油量等参数,确保发动机处于最佳燃烧状态,从而提高燃烧效率。

6 结语

本论文深入研究了氢燃料发动机关键技术,系统分析了其工作原理与特点。氢燃料发动机使用氢作为燃料,通过燃烧氢和氧将化学能转化为机械能,燃烧过程包括进气、压缩、燃烧和排气四个冲程,具有零排放、高能量密度和动力性能优异等显著特点,但也存在技术挑战,如氢气储存,燃烧控制和高成本。

[参考文献]

- [1]王世豪,吕家君,李更丰,等.考虑氢混燃机动态混氢特性的电-气互联系统优化调度[J].电网技术,2024,48(5):1896-1906.
- [2]郑玉荣,靳军宝,白光祖,等.氢燃料电池关键技术发展态势研究[J].现代化工,2024,44(11):12-17.
- [3]支新省.我国燃料电池电动自行车技术发展趋势研究[J].江苏科技信息,2024,41(14):9-12.

作者简介:袁华强(1986.3—),男,学历:硕士,毕业院校:广西大学,所学专业:机械设计及理论,目前职称:中级工程师。