

掺氨燃料在四冲程内燃机中的排放特性

楚育纯, 周 梅, 王兆林*, 陈 锦, 胡晓慧, 郑淞生

(厦门大学能源学院, 福建 厦门 361102)

摘要: 为了实现直接利用氨载体氢作为发动机燃料以降低污染物排放, 对氨-丙烷双燃料在往复式四冲程发动机中的排放产物进行了实验研究, 测试了不同功率、不同燃料比例下的发动机运行状态参数, 包括发动机经济性指标、起燃的可靠性、输出功率以及排放参数, 实现了掺氨燃料发动机的稳定运行, 同时依据文献数据对比了氨-汽油、氨-柴油双燃料燃烧的排放特性。实验结果表明, 氨作为燃料的经济性优于丙烷, 而且掺氨可以改善丙烷的燃料经济性。丙烷作为助燃剂时的 CO_2 排放与柴油、汽油相比更低, 而且掺氨可以减少丙烷 47%~55% 的 CO_2 排放, 主要取决于掺氨的比例。丙烷掺氨燃烧时的碳氢化合物(HC)排放水平较汽油、柴油掺氨燃烧更高, 但掺氨可以显著减少丙烷的 HC 排放; 此外, 掺氨会使丙烷的 NO 排放水平增高, 但仍低于柴油的 NO 排放。

关键词: 掺氨燃料; 内燃机; 排放特性

中图分类号: TK 428.9 **文献标志码:** A

随着全球汽车保有量的不断增加, 化石燃料的消费量逐年增长, 化石燃料燃烧产生了大量的污染物, 尤其是排放的 CO_2 带来了严重的温室效应, 与此同时化石能源的储量也越来越少。在环境和能源危机的背景下, 传统内燃机的发展面临巨大挑战, 急需寻找清洁高效的代用燃料。目前内燃机的代用燃料主要有甲醇、乙醇、生物柴油、二甲醚和天然气等^[1-5], 这些代用燃料为碳基燃料, 燃烧会产生大量 CO_2 排放, 仍需寻找清洁的无碳燃料。

氢作为主要的无碳燃料^[6], 可由清洁能源制得, 从而显著减少 CO_2 的排放, 因此应用前景广阔。氢作为替代能源的研究已进行多年, 但由于其理化性质的限制, 在推广应用方面仍然存在一定的困难。例如氢气的储存与运输是氢能技术推广的瓶颈问题之一。目前高压储氢是世界上最常用的氢气储存方式之一, 但由于氢气的密度很小, 所需储氢压力很高才能达到一定的体积能量密度, 储氢效率很低^[7], 若储氢压力为 35 MPa, 温度为 298 K 时, 每千克的氢需要消耗 2.2 kWh 的电量^[8]。此外由于氢气的体积能量密度小, 氢内燃机的动力性较传统

收稿日期: 2019-08-31 录用日期: 2020-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(21875199); 福建省科技计划项目(2018H61010039)

*通信作者: ForestWang@xmu.edu.cn

内燃机更差^[9]，而且其 NO_x 排放更高，对过量空气系数的变化十分敏感，这对氢内燃机的控制提出了巨大的挑战^[10]。除此以外，氢内燃机还存在早燃、回火、功率下降等问题^[11]，这些都限制了氢内燃机的大规模普及。

为此，人们积极探索载氢的无碳燃料，其中氨就是典型的氢载体。氨同样可由可再生能源（如光伏、风电等）制得，利用可再生能源电解水制氢，空气分离制氮气，进一步合成氨即可获得零碳排的氨，同时该过程还可消纳可再生能源弃电^[12]。表 1 给出了氢、氨 2 种无碳燃料和 4 种常见碳基燃料的物化及燃烧特性参数，可以看出氨作为另外一种无碳燃料，可以很容易的在室温下低压液化，液化压力仅为 1 MPa，或者在常压下降温至 $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液化^[13]，比氢气的储存更经济，更安全。氨是一种富氢物质，含氢质量分数达到 17.6%，体积含氢密度至少比液氢高 30%，是一种理想的氢载体^[2]。表 2 给出了 3 种常见储氢载体的体积储氢密度对比，其中氨的体积含氢密度最高。此外，其辛烷值高达 110，抗爆性能良好，其高点火温度大大减低了氨火灾危险性，使其成为生产运输过程中相对安全的化学品。除此以外，氨还是世界上产量最多的无机化合物之一，尽管氨具有一定的毒性，但氨的生产、储存、运输都有完备的基础设施支持，这也为氨燃料的推广打下了良好的基础^[14]。

表 1 氨燃烧特性与其他燃料的比较^[7, 15-16]

Tab.1 Ammonia combustion characteristics compared with other fuels

燃料	氨	氢	天然气	丙烷	汽油	柴油
化学分子式	NH_3	H_2	CH_4	C_3H_8	-	-
储存方式	液态	气态	气态	液态	液态	液态
储存压力/MPa	1	30~70	25	1	常压	常压
辛烷值	110	>130	107	103	85	-
低位热值/($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	18.8	121	50.0	50.4	43.8	42.5
理论空燃比	6.14	34.8	14.4	15.7	15.4	15.1
火焰速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	10	300	40	41	40	33
自燃温度/K	923	843	723	853	573	503
绝热燃烧温度/K	2123	2273	2157	2253	2250	2326

表 2 3 种氢载体的体积含氢密度对比^[8]

Tab.2 Comparison of hydrogen density of three hydrogen carriers

氢载体	液氢	液氢	甲基环己烷
体积含氢密度/(kg·m ⁻³)	121	71.1	47.3

氨作为燃料的应用已经有数十年的历史，早在 1960 年，美国航空航天局的 X-15 型火箭使用氨和液氧作为燃料，飞上太空并创下人类航空史上最高时速纪录^[17]，随后美国军方进行了一系列氨燃料内燃机的应用实验，发现氨需要部分分解或者在较高压缩比和空气进气温度下发动机才能正常运行^[18]。

近年来，出于减少碳排放并推广氢能的目的，氨燃料的相关研究逐渐增多，包括在往复式内燃机和燃气轮机上的应用。氨存在火焰温度低、层流燃烧速度慢、点火能量高、可燃范围狭窄等问题，将氨与其他燃料混合燃烧是改善氨在内燃机中燃烧性能的最佳解决方案之一，助燃的燃料包括氢、汽油、柴油等常见燃料^[2]。

一些研究者提出利用氢作为助燃剂，使用少量的氢（约占燃料总质量的 1%）即可提升氨燃料发动机的性能^[19]。Ryu 等^[20]采用汽油作为氨的助燃剂，将氨气通过化油器喷入点燃式内燃机中，在汽油提供 0.6 kW 基础功率情况下，喷入的氨可以使发动机功率提升至 2.7 kW，并且 CO 排放略有降低。Reiter 等^[9]利用柴油作为引燃剂和助燃剂，在压燃式柴油发动机上测试了不同氨-柴油比例下的燃料经济性和尾气污染物排放情况，在氨提供 40%~60% 的能量时燃料利用效率较高。钟绍华等^[21]基于 Chemkin 对氨-正庚烷混合燃料在发动机气缸内的燃烧情况进行仿真研究，结果表明用正庚烷引燃氨可以降低燃料对进气温度、压缩比等条件的要求。

已有研究采用了几种不同燃料与氨混合燃烧，包括氢气、柴油、汽油、正庚烷等，所选取的助燃剂都各有优点，也存在一定的应用局限。例如：氢作为燃料时储存与运输困难，在发动机中燃烧时回火不易控制；柴油、汽油、正庚烷含碳量高导致 CO₂ 和碳烟等排放高。此外由于氨点燃困难，对氨燃料发动机低功率条件下的运行情况需要特别研究，而当前研究人员对氨燃料发动机高功率情况下的动力性指标研究较多。

为了减少传统汽油、柴油掺氨燃烧的 CO₂ 和碳烟排放，一些研究人员采用天然气和丙烷等低碳烃作为助燃剂。丙烷的含碳量较低，相对清洁，单位质量热值也高于柴油，是一种被广泛使用的气态燃料。本文中采用丙烷作为助燃剂，在保证燃料总热值不变的情况下，通过改变燃料中氨与丙烷的热值比，在不同功率尤其是低功率条件下实验测试了燃料的经济性

指标和排放特性，并与其它助燃剂的排放特性进行了对比研究。

1 起燃条件的初步分析

对于氨燃料在压燃式发动机上的应用，若想达到压燃效果，经过压缩后气缸内气体温度需超过氨的自燃温度。氨的自燃温度为 923 K，需要较高的压缩比才能达到其自燃点，因此需要对压缩过程中气缸内空气的状态参数进行估算，防止氨在气缸中液化，液化的氨会形成液滴，减少与缸内空气的接触面积，造成不完全燃烧从而影响发动机的排放性能。同时还需防止氨达到超临界状态，对燃烧造成不可预测的影响。

气缸压缩过程可以视为绝热压缩过程，气缸内气体状态参数关系为

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

其中： T 为气缸内气体温度，K； p 为缸内压强，Pa； κ 为绝热指数。依据该式可以计算出绝热压缩过程空气温度与压缩比的关系，如图 1 所示。如果氨采用气相进料，在整个压缩过程中缸内温度与压强一直处于氨的气相区，不会发生液化。且压缩比需达到 52.3 以上才能达到氨的自燃点，此时压强为 5.29 MPa，未超过氨的超临界点压强 11.45 MPa。如果采用液相进料，即液氨喷入气缸，由于液氨的汽化潜热较大，气化过程吸热会导致气缸内温度降低，此时需要更高的压缩比才能起燃。而目前大规模商用的柴油发动机压缩比一般为 16~22，远低于压燃氨气所需要的压缩比。另外丙烷的自然温度为 748 K，压缩比达到 25 时才能实现丙烷的压燃，因此在现有柴油机的基础上无法实现氨-丙烷双燃料的压燃，仍需要使用微量柴油点燃。

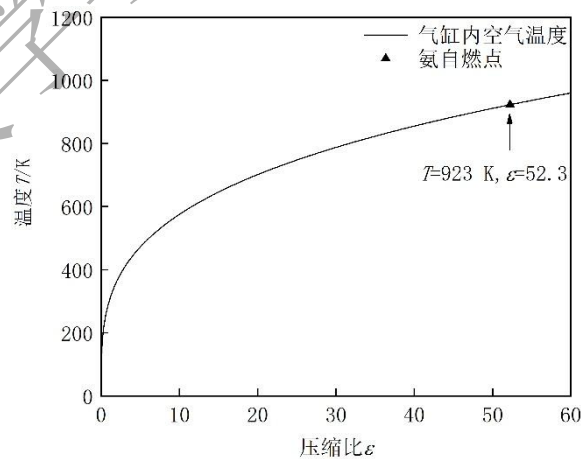


图 1 气缸内气体温度与压缩比关系

Fig. 1 In-cylinder temperature as a function of compress ratio

2 实验装置与过程

2.1 实验装置

本文中在双燃料发电机组的基础上进行氨-丙烷双燃料发动机性能和尾气排放的实验研究。发电机组为 HTD-20GF 双燃料发电机组，该型发电机组是在柴油发动机的基础上进行改装，保留原有柴油进料系统，加装气相双燃料进料控制系统和发电机，通过控制发电机的功率进行控制与测量。发电机额定功率 20 kW，额定电压 230 V，发动机为四缸四冲程直列柴油机，压缩比 18:1，总排量 3.6 L，额定转速 1500 r/min。该发电机组使用少量柴油启动，带负载运行状态下可以使用柴油或者燃气作为燃料。整体实验平台包括双燃料发电机组、燃料配比系统、可编程负载、尾气检测系统等，如图 2 所示。来自气瓶的氨气和丙烷经过减压阀减压，采用两台 Sevenstar D07 系列质量流量控制器控制并测量氨气、丙烷的流量，随后两种燃气在发电机组燃气进气口处的比例混合器中混合，然后混合燃料在进气管中与空气混合后进入气缸燃烧。采用一台 HORIBA MEXA-584L 尾气检测仪对几种常见污染物的含量进行检测在线检测，同时使用热电偶测量尾气排气温度。发电机组连接两台 Chroma 63805 可编程负载，精确控制负载用于发电机组的功率测试。通过数据采集与控制系统控制负载大小，采集负载的功率、电压、电流等参数，同时该系统也可以采集氨气、丙烷、空气的流量以及尾气中常见污染物的排放数据。

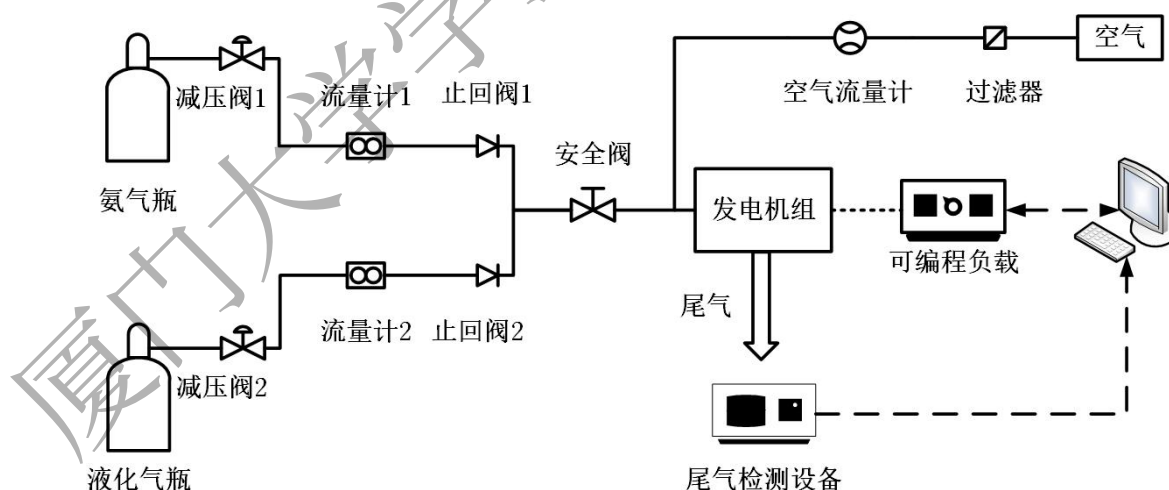


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup

2.2 实验过程

本文中对发电机组的测试采用定功率模式，发动机功率分为 2 和 4 kW 两种工况，掺氨比为 0，10%，20%和 30%，分别测量 2 种功率、4 种掺氨比下发电机组的性能与排放数据。本文中的掺氨比使用氨在混合燃料中的能量比 η_{NH_3} 表示，定义如下：

$$\eta_{NH_3} = \frac{X_{NH_3} \times L_{NH_3}}{X_{NH_3} \times L_{NH_3} + X_{C_3H_8} \times L_{C_3H_8}}$$

其中， X 为对应燃气的质量分数， L 为对应燃气的低位热值。试验时发动机先燃用柴油启动，待发电机运行稳定后，再缓慢加入丙烷，同时减小柴油流量，在发动机运行过程中柴油流量将一直保持在很低的水平(≤ 10 mL/min，约占燃料总热值的 4%~6%)，此时发动机运行所需绝大部分能量由丙烷提供。随后开始缓慢增加氨气的流量同时减少丙烷的流量，直至两种燃气能量比达到设定掺氨比。在整个流量调整过程中需要注意维持发电机的稳定运行，燃气流量以及柴油流量的变化速率不应过快，以免发电机组运行不稳定，这将影响发动机的气缸温度、转速等参数，从而影响排放数据。

3 实验结果

3.1 不同掺氨比下燃料的比能耗

发动机经济性指标是衡量发动机性能的重要参数，一般采用有效燃油消耗率(brake specific fuel consumption, BSFC)来表征，其含义是对应单位有效功消耗的燃料质量。本文的实验平台为双燃料系统，应当采用发动机比能耗(BSEC)进行比较。同时为了方便比较丙烷和氨作为燃料时的经济性，特定燃料的 BSEC 定义为消耗特定燃料的热值除以由该燃料产生的功率输出，不同功率不同掺氨比条件下发动机比能耗如图 3 所示。在掺氨比为 10%~30% 范围内，氨作为燃料的经济性比丙烷要好。由于氨的火焰温度低，掺氨会使混合燃料的火焰温度降低，造成部分燃料燃烧不完全，造成发动机燃料经济性下降，例如图中掺氨比为 10% 丙烷的 BSEC 比掺氨之前略微升高，但继续掺氨可以改善丙烷的燃料经济性。

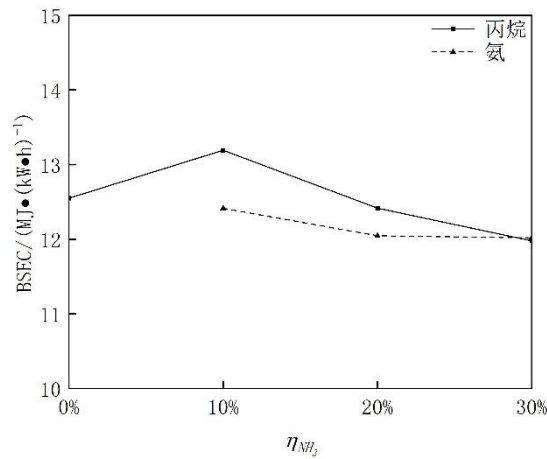


图 3 不同掺氨比下各燃料的比能耗

Fig. 3 Engine BSEC for respective fuels under various ammonia content

3.2 不同掺氨比下 NO 的排放情况

发动机工作过程中产生的 NO_x 主要包括热力型和燃料型，其中热力型 NO_x 为空气中的氮在高温下氧化产生，其反应速率与温度有关，温度越高，燃烧过程中产生的热力型 NO_x 越多；燃料型 NO_x 为燃料中含氮化合物在燃烧过程中氧化产生，主要受燃料含氮量、燃烧过程温度等因素的影响。在整个燃烧过程中排放的 NO_x 中 NO 占到总量的 90%~95%，故本文中只分析 NO 的排放情况。图 4 为不同功率、不同掺氨比下 NO 的排放情况，虚线所示为仅使用柴油时的 NO 比排放。可以看到在未经过尾气脱硝处理的情况下，发动机的尾气 NO 排放水平较高，各类工况下的排放水平平均高于国 V 标准中规定的 $2.0 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，但绝大部分工况下氨-丙烷燃料的 NO 比排放要低于柴油作为燃料时的 NO 比排放，在掺氨比为 0~30% 时，使用氨-丙烷燃料作为替代燃料可以有效减少发动机的 NO 比排放。发动机使用丙烷燃料的 NO 排放水平相对较低，向丙烷中掺入氨气后， NO 比排放随之升高，但增速随掺氨比的增高而放缓，如 4 kW 工况下掺氨比达到 30% 时 NO 比排放为 $26.5 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，仅比掺氨比 10% 时增加了 18%。这与文献^[16]的研究结果是一致的。分析原因，掺氨会使燃料中含氮量增加，燃料型 NO_x 生成量增加，这也是尾气中 NO 排放量增加的主要原因。另一方面由于氨的火焰温度低于丙烷，掺氨导致混合燃料的火焰温度降低，热力型 NO_x 生成量减少，这是 NO 比排放曲线增速放缓的主要原因。另外比较不同功率下发动机的 NO 比排放，在掺氨比相同时，提高发动机功率可以减少其 NO 比排放。

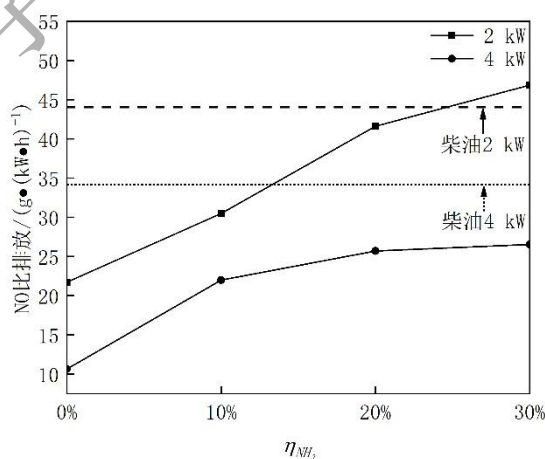


图 4 不同功率不同掺氨比下尾气 NO 比排放

Fig. 4 Exhaust brake specific NO emissions under different power output operation and ammonia content

为了进一步研究掺氨比与排放特性间的关系,本文还对比了汽油、柴油作为助燃剂时的排放特性,如图5所示,数据来源于文献^[16,22]。可以看到在较低掺氨比下(0~40%)柴油掺氨燃烧与丙烷掺氨燃烧所表现趋势是一致的,NO排放随着掺氨比的提高而增高。汽油掺氨燃烧则表现出相反的趋势,可能与发动机的点燃方式有关,柴油掺氨和丙烷掺氨燃烧的实验均是在压燃式发动机上进行的,汽油掺氨燃烧的实验基于点燃式发动机,同时其掺氨比较高,导致气缸内温度降低,NO的生成量减少。另外测试时发动机的负荷对NO的排放也有影响,丙烷和汽油掺氨的实验功率范围在1~4 kW,不到测试发动机额定功率的20%,柴油掺氨燃烧实验时发动机一直在满功率状态下进行(40 kW),其燃烧效率更高,对排放性能有一定影响。

在目前的商用发动机上,为了减少尾气中NO的排放水平,通用的做法是加装尾气处理装置,采用选择催化还原(SCR)技术,在催化剂和还原剂的作用下将NO_x还原为氮气和水,其中还原剂一般是氨或者尿素。对于传统发动机来说,加装SCR尾气处理设备还需要额外配置氨罐。对于氨燃料内燃机来说,尾气处理设备可以直接利用燃料储罐中的氨作为还原剂,不再需要配置额外的尿素或者氨储罐。

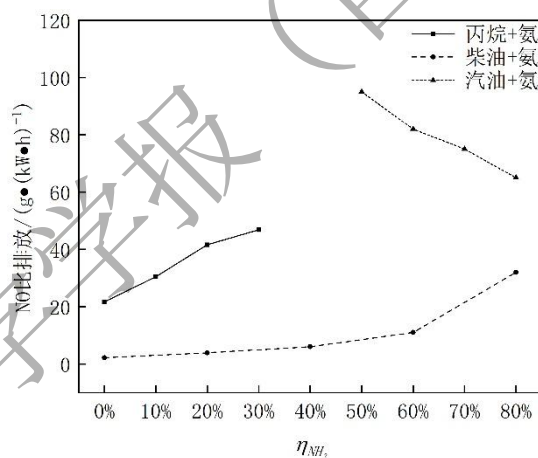


图5 不同助燃剂不同掺氨比下尾气NO比排放

Fig. 5 Exhaust brake specific NO emissions under different ammonia content using various combustion promoter

3.3 不同掺氨比下HC的排放情况

发动机尾气中的碳氢化合物(HC)主要是由与气缸内的燃料未完全燃烧产生的,大多数未燃烧的HC来自火焰因热量损失而熄灭的位置,主要是气缸与活塞间的间隙。气缸间隙捕获的HC量取决于气缸中的峰值压力,压力越大气缸间隙捕获的HC量就越多,而且气态燃料被捕获的HC量会明显高于液态燃料。另外燃料与空气形成的混合气过稀会导致火焰不能

传播，过浓会导致燃料不能自燃，这都将产生 HC，但是膨胀和排气冲程中气体温度升高会氧化一部分生成的 HC。图 6 显示了尾气中 HC 的排放浓度随燃料中掺氨比的变化曲线，虚线所示为仅使用柴油时 HC 的比排放。可以看到使用丙烷作为燃料时的 HC 排放水平较高，2 kW 功率下为 20.1 g/(kW·h)，远超国家标准规定的 0.46 g/(kW·h)。这是由于丙烷作为气态燃料，容易被气缸间隙捕获从而未能完全燃烧。随着燃料中掺氨比的增大，燃料中 HC 含量减少，尾气 HC 排放水平随之下降。但由于氨会使气缸内温度下降，未被完全氧化的 HC 会逐渐增多。这两种效用相互影响，会使得 HC 排放曲线趋于平缓。2 kW 下掺氨比达到 30% 时，HC 比排放为 9.64 g/(kW·h)，约为纯丙烷燃料的 50%。向丙烷中掺入氨气可以大大减少其 HC 排放含量。相同掺氨比下，发动机的 HC 比排放随着功率的提高而减小，其原因是低功率情况下发动机燃料消耗量小，燃烧室温度低，部分燃料未完全燃烧生成 HC。另一方面实验所用发动机没有空气流量调节装置，空气进气量固定。低功率情况下燃料消耗量小，导致混合气过稀，火焰在过稀混合气地区传播过程中可能会熄灭，这也会导致燃料不完全燃烧生成 HC。

图 7 所示为使用不同助燃剂时尾气 HC 排放情况。柴油和汽油是液体燃料，作为助燃剂时不容易被气缸间隙捕获，所以 HC 排放水平较低。掺氨燃烧时由于氨火焰温度低，掺氨比升高时气缸内温度下降，造成部分燃料不完全燃烧，其 HC 排放水平随掺氨比升高有略微增长。而丙烷作为助燃剂时，气体燃料更容易被气缸间隙捕获，因此丙烷掺氨燃烧的 HC 比排放更高，而随着掺氨比的提高，燃料含碳量减少，HC 排放水平随之下降。

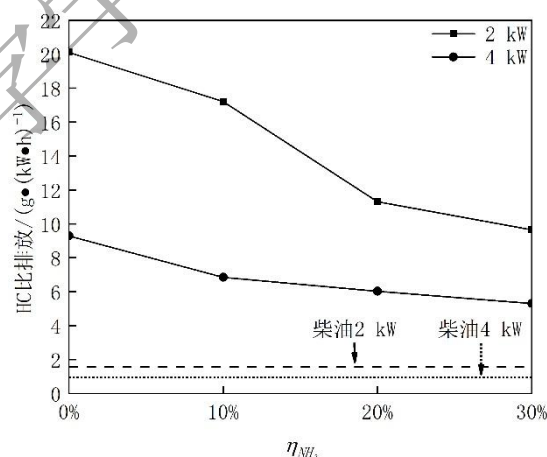


图 6 不同功率不同掺氨比下尾气 HC 比排放

Fig. 6 Exhaust brake specific HC emissions under different power output operation and ammonia content

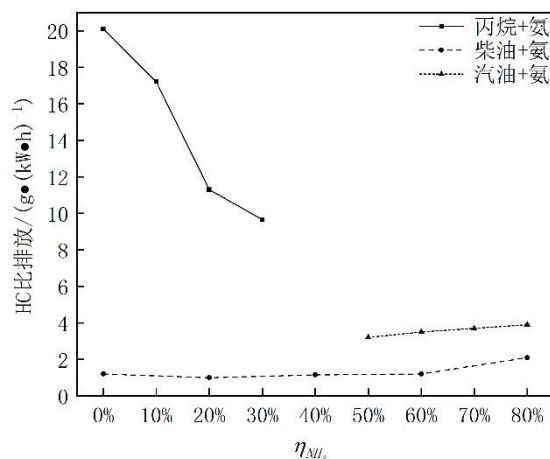


图 7 不同助燃剂不同掺氨比下尾气 HC 比排放

Fig. 7 Exhaust brake specific HC emissions under different ammonia content using various combustion promoter

3.4 不同掺氨比下 CO 的排放情况

发动机运行过程中产生 CO 主要有两条途径，一种是燃料未完全燃烧，燃料中的碳未被彻底氧化而产生的 CO；另一种是燃烧产物 CO_2 和 H_2O 在高温条件下产生热解反应进而生成的 CO。图 8 所示为不同功率、不同掺氨比下 CO 的排放情况，虚线所示为仅使用柴油时的 CO 比排放。可以看到向丙烷中掺入少量氨时可以略微降低其 CO 排放，当掺氨比继续增大时反而会增加丙烷的 CO 排放量，例如 4 kW 工况下纯丙烷燃料 CO 比排放为 $45.3 \text{ g/(kW} \cdot \text{h)}$ ，掺氨比达到 30% 时为 $45.2 \text{ g/(kW} \cdot \text{h)}$ ，与掺氨之前持平。其原因主要有 3 个方面：1) 掺氨使燃料碳含量下降，CO 排放会有所减少；2) 氨的空燃比较低，掺氨后的混合燃料理论空燃比降低，而发动机运行过程中保持空气进量不变，这会造成空气相对过量，使部分 CO 转化为 CO_2 ，两种工况下 10%~20% 掺氨比的曲线变化都证明了这两点；3) 掺氨导致火焰温度降低，部分燃料燃烧不完全，CO 排放因此升高。同时高功率工况下发动机气缸内温度更高，燃料燃烧更充分，因此高功率工况下的 CO 比排放较低。

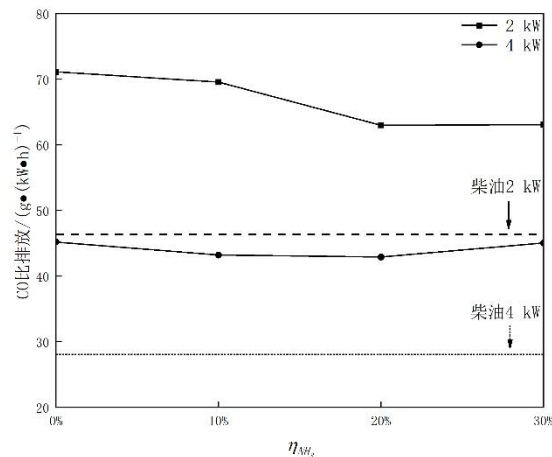


图 8 不同功率不同掺氨比下尾气 CO 比排放

Fig. 8 Exhaust brake specific CO emissions under different power output operation and ammonia content

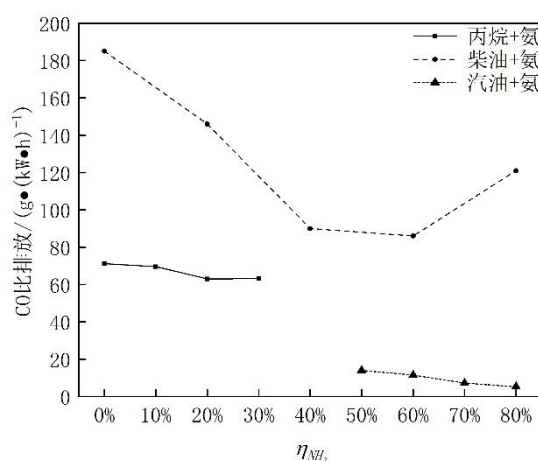


图 9 不同助燃剂不同掺氨比下尾气 CO 比排放

Fig. 9 Exhaust brake specific CO emissions under different ammonia content using various combustion promoter

图 9 为使用不同助燃剂时尾气 CO 排放情况，由于柴油掺氨燃烧实验时发动机维持 40 kW 负荷，导致其 CO 排放明显高于另外两组低功率状态下进行的实验，但其表现出的趋势与丙烷和汽油作为助燃剂时的趋势是一致的，在掺氨比不高时(0~60%)，随着掺氨比的提高，燃料中碳含量减少，CO 排放量减少，但氨的加入使火焰温度降低，导致部分燃料燃烧不完全，这种影响效果并不显著，以至于柴油掺氨比达到 80%时 CO 排放量反而升高。

3.4 不同掺氨比下 CO₂ 的排放情况

图 10 所示为不同燃料掺氨比下发动机尾气的 CO₂ 排放情况，可以看出掺入氨燃料后 CO₂ 排放水平明显降低，燃料掺氨比达到 30%时可减少 47%~55%的 CO₂ 排放。由此可见掺氨可以显著降低丙烷的 CO₂ 排放，这也是本研究的主要动机之一。另外由于丙烷的含碳量比柴油低，不同功率情况下氨-丙烷双燃料的整体 CO₂ 排放水平均远低于柴油。根据数据趋势可以判断，从控制 CO₂ 排放的角度来说，发动机的掺氨比越高越好，这与掺氨燃烧的主要目的和预期结果相符。

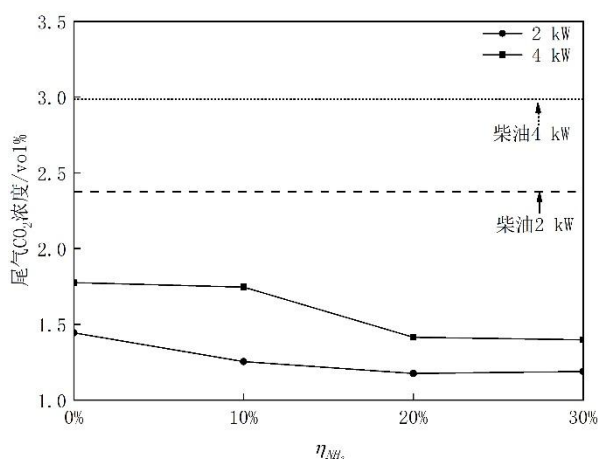


图 10 不同功率不同掺氨比下尾气 CO_2 排放

Fig. 10 Exhaust CO_2 emissions under different power output operation and ammonia content

4 结论

本文研究了丙烷作为助燃剂与氨混合燃烧,探讨了不同发动机功率和不同掺氨比下的燃油经济性和排放特性,主要结论如下:

1) 使用少量柴油点燃,丙烷作为续燃剂,可以将氨作为燃料应用在压燃式发动机上,氨占燃料总能量的 30%时,发动机仍能保证长时间稳定运行,并且可以满足一定的输出功率需求。

2) 氨作为燃料的经济性比丙烷要好,产生单位有效功所消耗的燃料总热值少于丙烷,并且掺氨比在 20%~30%时可以改善丙烷的燃料经济性。

3) 掺氨燃烧可以显著减少含碳燃料的 CO_2 和 HC 排放,丙烷作为助燃剂时的 CO_2 排放比柴油、汽油作为助燃剂时更低,而且掺氨比达到 30%时可以减少丙烷 47%~55%的 CO_2 排放。2 kW 工况掺氨比达到 30%时,HC 比排放为 9.64 g/(kW·h),约为纯丙烷燃料的 50%。

4) 掺氨燃烧会增加氨-丙烷双燃料发动机的 NO 排放,但是高功率情况下,掺氨比达到 30%时氨-丙烷双燃料的 NO 比排放为 26.5 g/(kW·h),低于柴油发动机。此外掺氨燃烧不会增加 CO 排放量。

参考文献:

- [1] 李坤颖. 柴油/天然气双燃料发动机燃烧策略的研究[D].广州: 华南理工大学, 2016.
- [2] GROSS C W, KONG S C. Performance characteristics of a compression-ignition engine using direct-injection ammonia-DME mixtures [J]. Fuel, 2013, 103:1069-1079.
- [3] 黄永仲. 甲醇柴油双燃料发动机二氧化氮排放后处理方案研究 [J]. 内燃机工程, 2019, 40(4): 72-77.

- [4] POLAT S. An experimental study on combustion, engine performance and exhaust emissions in a HCCI engine fuelled with diethyl ether–ethanol fuel blends [J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 143:140-150.
- [5] PANDIAN A K, MUNUSWAMY D B, RADHAKRISHNAN S, et al. Emission and performance analysis of a diesel engine burning cashew nut shell oil bio diesel mixed with hexanol [J]. *Petroleum Science*, 2018, 15(1): 176-184.
- [6] Bartels J R. A feasibility study of implementing an Ammonia Economy [D]. Ames, Iowa; Iowa State University, 2008.
- [7] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 69:63-102.
- [8] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K D KUNKUMAA, et al. Science and technology of ammonia combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(1): 109-133.
- [9] SOPENA C, DI GUEZ P M, SÁNZ D, et al. Conversion of a commercial spark ignition engine to run on hydrogen: Performance comparison using hydrogen and gasoline [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(3): 1420-1429.
- [10] NAG S, SHARMA P, GUPTA A, et al. Combustion, vibration and noise analysis of hydrogen-diesel dual fuelled engine [J]. *Fuel*, 2019, 241:488-494.
- [11] 朱英中. 柴油与安全柴油燃爆性能研究[D].南京: 南京理工大学, 2012.
- [12] The Institute for Sustainable Process Technology. Power to Ammonia [R]. Netherlands: The Institute for Sustainable Process Technology, 2017.
- [13] VALERA-MEDINA A, MARSH R, RUNYON J, et al. Ammonia–methane combustion in tangential swirl burners for gas turbine power generation [J]. *Applied Energy*, 2017, 185:1362-1371.
- [14] NOZARI H, KARABEYOĞLU A. Numerical study of combustion characteristics of ammonia as a renewable fuel and establishment of reduced reaction mechanisms [J]. *Fuel*, 2015, 159:223-233.
- [15] ZAMFIRESCU C, DINCER I. Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications [J]. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90(5): 729-737.
- [16] REITER A J, KONG S-C. Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia–diesel fuel [J]. *Fuel*, 2011, 90(1): 87-97.
- [17] Robert W S. The choice of NH₃ to fuel the X-15 rocket plane [D]. Portland; Iowa State University, 2011.
- [18] HAPUTHANTHRI S O, MAXWELL T T, FLEMING J, et al. Ammonia and Gasoline Fuel Blends for Spark Ignited Internal Combustion Engines [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2015, 137(6): 201-207.
- [19] DUYNLAEGHER C, JEANMART H, VANDOOREN J. Ammonia combustion at elevated pressure and temperature conditions [J]. *Fuel*, 2010, 89:3540-3545.
- [20] RYU K. Combustion Characteristics and Exhaust Emissions in Spark-ignition Engine Using Gasoline-ammonia [J]. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 2013, 21(6): 155-165.
- [21] 钟绍华, 万桂芹, 严利群. 氨燃料燃烧性能数值模拟与分析 [J]. *内燃机工程*, 2014, 35(3): 46-51.
- [22] RYU K, ZACHARAKIS-JUTZ G E, KONG S-C. Effects of gaseous ammonia direct injection on performance characteristics of a spark-ignition engine [J]. *Applied Energy*, 2014, 116:206-215.

Emission characteristics of four-stroke internal combustion engine using ammonia blended fuel

CHU Yuchun, ZHOU Mei, WANG Zhaolin*, CHEN Jin, HU Xiaohui,

ZHENG Songsheng

(College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: The exhaust emissions of four-stroke internal combustion engine (ICE) using ammonia blended fuel were investigated experimentally. The performance of the engine under different power output and fuel ratios were experimentally tested, including brake specific energy consumption (BSEC), power output and emission characteristics. It is observed that the engine can operate stably at extremely low loads using ammonia fuel. The emission characteristics of ammonia-gasoline and ammonia-diesel dual-fuel combustion were compared based on literature data. The results indicate that compared to propane, ammonia can generate the same power with less fuel consumption. Blending ammonia into propane can decrease the BSEC of propane. The CO₂ emission using ammonia-propane is lower than those from ammonia-gasoline and ammonia-diesel. Ammonia can reduce CO₂ emission from propane combustion by 47%-55%, depending on the proportion of blended ammonia. It is also found that ammonia can significantly reduce the HC emissions. Though the NO emission increases with the increase of the ammonia ratio, it's still lower than otherwise using diesel as the mere fuel.

Keywords: ammonia blended fuel; internal combustion engine; emission characteristics.