

天然气缸内直喷发动机在不同喷射和 点火时刻下的排放与燃烧特性

刘亦夫, 刘兵, 刘亮, 曾科

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在一台缸内直喷火花点火天然气发动机上对不同喷射时刻和点火时刻下的微粒排放进行了试验研究,并对相关的燃烧和排放特性进行了分析. 研究表明:随着喷油时刻和点火时刻的提前,发动机微粒排放增多;峰值粒径出现在 29 nm 附近,数量浓度达到 $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$,而微粒的粒径分布没有发生太大变化;火焰发展期随着喷油时刻的提前而缩短,快速燃烧期在 190° 时达到最小值;随着点火时刻的提前,火焰发展期变长,快速燃烧期先减小后增大; NO_x 和 HC 排放均随喷油时刻和点火时刻的提前而增大.

关键词: 缸内直喷;微粒排放;燃烧特性

中图分类号: TK431.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)05-0012-05

Particulate Emission and Combustion Characteristics of a Direct-Injection Natural Gas Engine under Various Injection and Ignition Timings

LIU Yifu, LIU Bing, LIU Liang, ZENG Ke

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The particulate emission under various injection timings and ignition timings was experimentally investigated on a natural gas direct-injection spark-ignition engine, and the corresponding combustion and emission characteristics were also analyzed. The results show that the particulate emission increases with the advance of fuel injection timing and ignition timing, the peak of particle number concentration appears around the particle diameter of 29 nm with the value of $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, but the size distribution varies slightly. The flame development duration decreases with the fuel injection timing advancing, and the rapid flame duration reaches the minimum value at the fuel injection timing of 190° . With the ignition timing advancing, the flame development duration increases. The rapid combustion duration firstly decreases with the advancing ignition timing, and then increases. Both NO_x and HC concentrations increase with the advanced fuel injection timing and ignition timing.

Keywords: direct-injection; particulate emission; combustion characteristics

随着汽车排放法规的日趋严格,汽车尾气中的微粒排放受到人们越来越多的关注. 悬浮在空气中的可吸入颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ (粒径 $D_p < 2.5 \mu\text{m}$) 由于颗粒小,极易被吸入人体肺部沉积,并具有表面活性,

易于与人体发生反应,同时,粒径越小的颗粒物比表面积越大,在相同质量下与人体接触的机会更多,因而 $\text{PM}_{2.5}$ 对人体产生危害的可能性极大^[1]. 火花点燃式发动机的微粒排放虽然在质量浓度上远不如柴

油机的高,但其超细颗粒的数量浓度仍不容忽视,再加上目前在城市道路上,以点燃式发动机为动力的汽车的行驶总里程远远高于以柴油机为动力的汽车,因此点燃式发动机的微粒排放又重新受到人们的关注。

天然气作为一种代用燃料,具有储量大、辛烷值高、排放低、价格便宜等优点,因此受到了人们的青睐。目前,进气道喷射(PFI)天然气发动机已广泛应用于国内各大城市的公交车和出租车。为进一步挖掘天然气在车用发动机方面的应用潜力,国内外学者对缸内直喷天然气发动机展开了研究^[2-3]。针对燃用压缩天然气(CNG)、液化石油气(LPG)的气体燃料发动机的微粒排放,国内外已有相关的研究报告^[4-6],然而有关缸内直喷CNG发动机微粒排放的研究尚未见报道,因此有必要针对缸内直喷天然气发动机微粒排放的数量浓度和粒径分布展开研究。喷射时刻和点火时刻作为缸内直喷天然气发动机的重要调节参数,对发动机的燃烧及排放特性具有重要影响,因此本文针对不同喷射和点火时刻的燃烧和排放特性进行了研究。

1 试验装置和方法

1.1 试验设备及燃料

试验发动机由TY1100单缸柴油机改装而成,改装后的发动机参数以及缸内喷油器和火花塞的布置参见文献[3]。试验中将压缩比由原来的8增加至14,并采用自主开发的电子控制单元对发动机的运行参数进行调节。

试验采用陕北天然气,其甲烷体积分数为96.16%。采用的颗粒分析仪器为芬兰DEKATI公司的静电低压撞击器(ELPI),该仪器可测的粒径分布为7 nm~10 μm 。ELPI中的串级冲击式采样器利用颗粒的惯性,按动力学粒径将颗粒分为12级。由于本文主要关注的是PM_{2.5}范围内的微粒排放,故试验中所选择的采样级数为1~10级,所测粒径范围为7 nm~1.61 μm 。

1.2 稀释和采样方法

试验采用的稀释采样系统为DEKATI公司的两级稀释系统(DI-2003),稀释比为64:1。为了防止发动机排气在导气管壁的凝结或沉降,在连接排气管和初级稀释系统的排气导入管外围包裹了加热保温材料,同时,对初级稀释系统进行加热,将温度控制在200℃。排气在次级稀释系统中被常温的环境压缩空气再次稀释后进入ELPI采样管,此时气

溶胶温度已低于60℃,达到了ELPI的测试要求。

1.3 试验方案

首先将点火提前角 θ_{ig} 固定为32°,喷油提前角 θ_{inj} 以10°为步长在170°至210°之间变化,在此条件下研究喷油提前角对微粒、燃烧及排放特性的影响;然后将喷油提前角 θ_{inj} 固定为180°,点火提前角 θ_{ig} 以4°为步长在24°至40°之间变化,在此条件下研究点火提前角对微粒、燃烧及排放特性的影响。点火提前和喷油提前角均以压缩上止点为参照点,压缩上止点前为正,压缩上止点后为负。发动机转速为1200 r/min,喷油脉宽固定为11.96 ms(86°),发动机平均有效压力(p_{me})维持在0.37 MPa,空燃比保持在1.5附近。试验开始前,先对发动机进行暖机,使水温保持在70℃以上。

2 试验结果及分析

2.1 喷射、点火提前角对微粒排放的影响

图1给出了不同喷射提前角下排气中的微粒数量浓度和粒径(D_p)分布。如图所示,发动机颗粒排放呈单峰分布,峰值处颗粒物粒径在29 nm附近,数量浓度达到 $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$,比其他粒径的浓度高1~3个数量级。Ristovski等人^[4]曾对2台重型天然气发动机的颗粒排放进行过试验研究,发现排气中的颗粒物几何平均直径在20至60 nm之间,该模态的颗粒物数量浓度峰值达到了 $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$,而本试验得到的结果与此相符。Maricq等人^[7]曾对缸内直喷汽油机的微粒排放展开过研究,发现燃油喷射过早虽然可以使燃料与空气更均匀地混合,减少了颗粒物的形成,然而与此同时,过早的喷射也使得油束与活塞顶部发生撞击,形成壁面存油,增加了颗粒物的形成。对于缸内直喷天然气发动机而言,由于喷射的是气体燃料,燃料与壁面碰撞不再形成壁面存油,因而其对微粒排放的影响可以忽略。随着喷射提前角的增大,燃油与进气混合的时间更充足,这将有助于形成更均匀的混合气,减少颗粒物的生成。然而如图1所示,微粒物排放随着喷射提前角的提前反而增加,并没有像预期那样减少。Kayes等人^[8]曾对火花点燃式汽油机微粒排放的生成机理做了研究,对影响微粒排放的各个因素进行了试验并建立了数学模型进行分析。虽然该模型无法普遍适用于其他火花点燃式发动机,但是依然有助于对微粒排放物生成机理的理解。在该模型中,微粒排放物生成机理包括3部分:①微粒的集结成核作用;②微粒的生长作用;③微粒的氧化作用。其中,集结成核作用可以用

Edlman 表达式描述

$$\frac{d[S_{ec}]}{dt} = A_{ec} T^a [HC]^b [O_2]^c \exp\left(\frac{T_{a, gp}}{T}\right) \quad (1)$$

式中: $\frac{d[S_{ec}]}{dt}$ 为微粒质量增长率; A_{ec} 、 $T_{a, gp}$ 为常数; T 为缸内气体温度; $[HC]$ 、 $[O_2]$ 为碳氢和氧气的浓度; a 、 b 、 c 均由试验拟合得到, 分别为 -1.94 、 1.81 和 -0.5 。微粒的生长是指 HC 由于某种化学或物理作用被吸附在微粒表面, 从而引起微粒粒径和质量的增加。如图 1、图 2 所示, 微粒只是在数量级上有变化, 其粒径分布没有太大变化, 生长作用此时可能没有发生。微粒的氧化主要与缸内的气体温度和氧含量有关, 温度越高、氧含量越大就越能促进微粒的氧化。与碳氢排放不同, 微粒的氧化过程主要发生在汽缸内, 微粒在排气管中的氧化可忽略不计^[8]。随着喷射提前角的增大, 燃烧逐渐提前, 缸内最高压力增大(见图 3)并更靠近上止点, 缸内最高温度升高。一方面, 缸内温度的升高将减弱集结成核作用(参见式(1)), 同时也增强了对微粒的氧化作用, 但是另一方面, 如图 4 所示, HC 排放随着喷射提前角增大而增加, 而 HC 浓度的增加将促进微粒的集结成核。在这两方面的影响中, 由 HC 浓度升高引起的促进作用似乎要强于由温度升高引起的减弱作用。

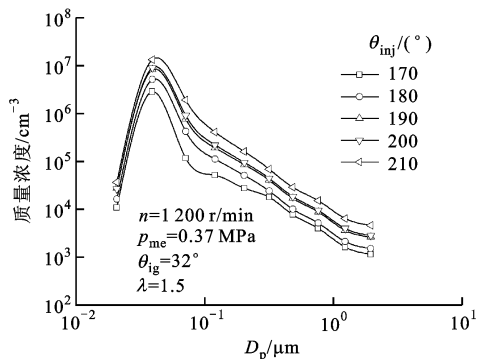


图1 喷射提前角对微粒数量浓度分布的影响

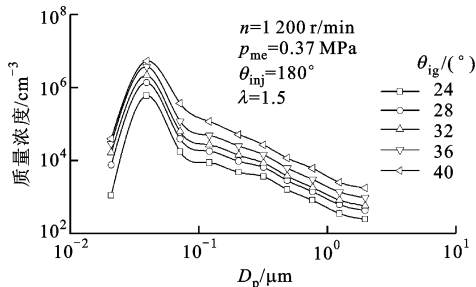


图2 点火提前角对微粒数量浓度分布的影响

由图 2 可以看到, 随着点火提前角的减小, 微粒

的数量浓度逐渐降低, 这一变化趋势与文献[7] 中的结果是一致的。当点火提前角从 40° 调整到 24° 时, 微粒的粒径分布大致没有变化, 但是微粒的数量浓度减小了约 1 个数量级。随着点火提前角的增大, 燃烧提前(见图 5), 缸内的最高温度升高, HC 排放量增大(见图 6)。与喷射时刻对微粒排放的影响类似, 集结成核和氧化的综合作用导致了微粒排放量随点火时刻的提前而增加。

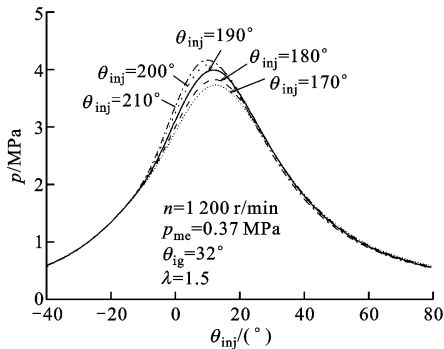


图3 不同喷射提前角下的缸压曲线

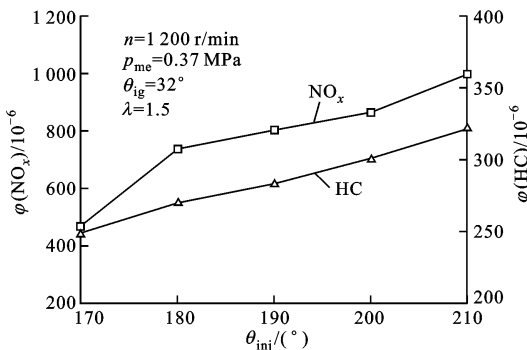


图4 NO_x 和 HC 排放与喷射提前角的关系

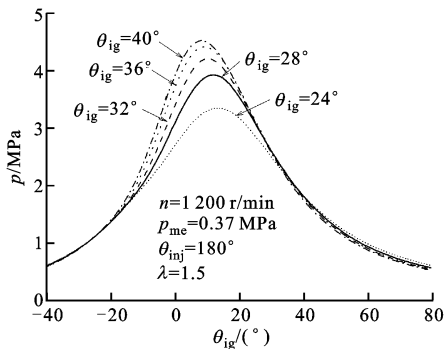


图5 不同点火提前角下的缸压曲线

如果把每个微粒看作球形颗粒(实际为链形), 微粒密度近似为 1 g/cm^3 , 可以得到微粒的质量浓度分布。随着粒径的增大, 微粒的质量浓度明显升高

(见图 7、图 8). 虽然大尺寸颗粒在数量上明显不如超细颗粒或纳米颗粒,但所占总质量的比例却很大.

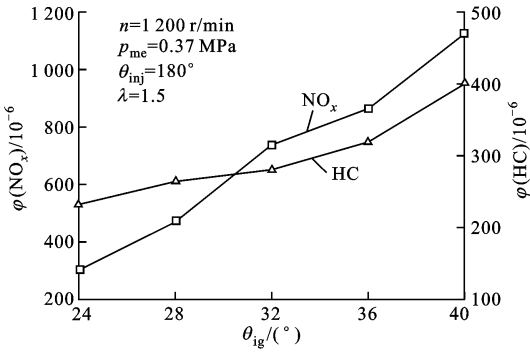


图 6 NO_x 和 HC 排放量与点火提前角的关系

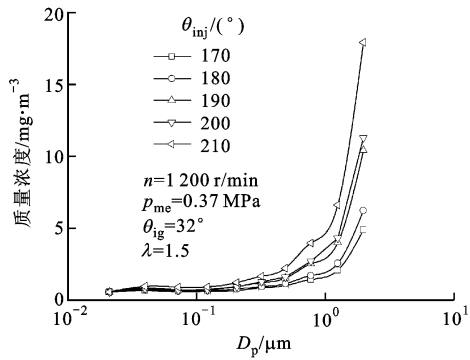


图 7 喷射提前角对微粒质量浓度分布的影响

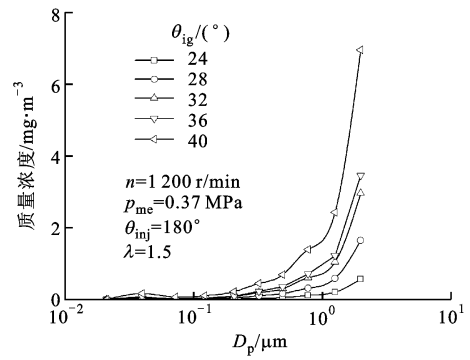


图 8 点火提前角对微粒质量浓度分布的影响

2.2 喷射、点火提前角对燃烧持续期的影响

燃烧持续期包括火焰发展期和快速燃烧期 2 个阶段:火焰发展期(θ_{fd})为从火花跳火到累计放热率达到 10% 所经历的曲轴转角;快速燃烧期(θ_{rd})为累计放热率从 10% 到 90% 所经历的曲轴转角. 图 9 为火焰发展期和快速燃烧期与喷射提前角的关系曲线,可以看出随着喷射提前角的增大,火焰发展期逐渐缩短,这可能与缸内混合气的分层情况有关,随着喷射时刻的推迟,燃料与空气混合的时间将减少,火

花塞附近将形成更浓的可燃混合气,并且由于本试验中压缩比由原来的 8 增大至 14,较大的压缩比缩短了喷雾射程,火花塞附近的可燃混合气将变得更浓,不利于火核的形成,从而会延长火焰发展期. 快速燃烧期在喷射提前角为 190° 时达到最小值,这说明此刻混合气的空燃比分布最为合适,火焰传播速度最快.

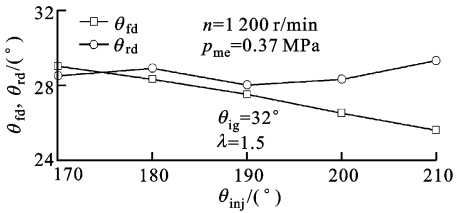


图 9 燃烧持续期与喷油提前角的关系曲线

图 10 给出了不同点火提前角下的火焰发展期与快速燃烧期. 与喷射提前角的情况不同,火焰发展期随着点火提前角的增大而延长,这是因为点火提前角的减小意味着推迟了混合气的点火时间,这样混合气在点火前将经历更多的压缩过程,致使点火前的初始压力和温度均有所升高,有助于火核的形成^[9]. 随着点火提前角的减小,快速燃烧期先减小后增大,因为如果点火时刻太早,相对低的缸内温度和压力不利于火焰的快速传播,快速燃烧期因此延长;如果点火时刻太迟,有一部分燃烧过程将发生在排气冲程,而排气冲程中相对较低的温度和压力也不利于火焰的传播,快速燃烧期因此缩短.

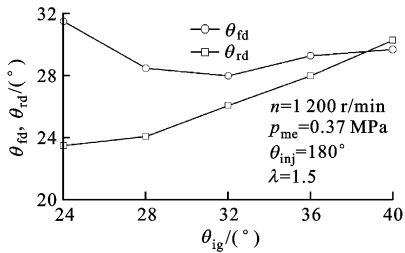


图 10 燃烧持续期与点火提前角的关系曲线

2.3 喷射、点火提前角对 NO_x 和 HC 的影响

由图 4、图 6 可以看到: NO_x 排放的浓度随喷油提前角和点火提前角的增大而增加,这是由于稀燃时 NO_x 排放物的生成主要与缸温有关,随着喷射时刻和点火时刻的提前,缸内最高温度升高, NO_x 排放也随之增加. HC 排放物的浓度随喷油提前角和点火提前角的增大也呈增加趋势,这是因为随缸压升高,更多的未燃混合气将进入活塞顶岸间隙,形成未燃 HC,同时,排气冲程和排气管中的温度下降也

减弱了对未燃 HC 的氧化。

3 结 论

(1)随着喷射提前角和点火提前角的增大,颗粒排放量均呈增长趋势,但粒径分布范围变化不大,峰值出现在 29 nm 附近,数量浓度达到 10^7 cm^{-3} ,比其他粒径的浓度高 1~3 个数量级。大尺寸颗粒在数量上虽然不如超细颗粒或纳米颗粒,但是所占总质量的比例却很大。

(2)随着喷射提前角的增大,火焰发展期逐渐缩短,快速燃烧期在 190° 达到最小值,火焰发展期随着点火提前角的增大而变长,快速燃烧期则先缩短后延长。

(3) NO_x 和 HC 排放的浓度均随喷油提前角和点火提前角的增大而升高, NO_x 的增加主要与缸内温度过高有关,而 HC 排放的增加则主要与间隙效应、排气冲程和排气管中未燃 HC 的氧化有关。

参考文献:

- [1] US Environmental Protection Agency. Air quality criteria for particulate matter, EPA600 P-65[R]. Research Triangle Park, NC, USA: US Environmental Protection Agency, 1996.
- [2] 黄佐华,曾科,杨中乐. 利用快速压缩装置进行直喷天然气发动机燃烧特性的研究[J]. 内燃机学报, 2001, 19(4): 314-322.
HUANG Zuohua, ZENG Ke, YANG Zhongle. Study on combustion characteristics of direct injection natural gas engine by using a rapid compression machine [J]. Transactions of CSICE, 2001, 19(4): 314-322.
- [3] 刘亮欣,黄佐华,蒋德明,等. 不同喷射时刻下天然气直喷发动机的燃烧特性[J]. 内燃机学报, 2005, 23(5): 469-474.
LIU Liangxin, HUANG Zuohua, JIANG Deming, et al. Combustion characteristics of a direct injection natural gas engine under various fuel injection timings [J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(5): 469-474.
- [4] RISTOVSKI Z D, MORAWSKA L, HITCHINS J, et al. Particle emissions from compressed natural gas engines [J]. Journal of Aerosol Science, 2000, 31(4): 403-413.
- [5] 王振锁,肖宗成,邓宝清,等. 小型点燃式发动机应用 LPG 的微粒排放特性[J]. 燃烧科学与技术, 2004, 10

(3): 283-287.

WANG Zhensuo, XIAO Zongcheng, DENG Baoqing, et al. Characteristics of particulate emissions from a small SI engine with LPG fuel [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004, 10(3): 283-287.

- [6] 翟鸿宾,李理光,刘志敏,等. LPG 小型点燃式发动机怠速工况下微粒排放特性研究[J]. 内燃机学报, 2007, 25(1): 66-72.
ZHAI Hongbin, LI Liguang, LIU Zhimin, et al. Characteristics of particulate emissions at idle from a small LPG EFI SI engines [J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(1): 66-72.
- [7] MARICQ M M, PODSIADLIK D H, BREHOB D D, et al. Particulate emissions from a direct-injection spark-ignition (DISI) engine, SAE paper 1999-01-1530 [R]. Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers, 1999.
- [8] KAYES D, HOCHGREB S. Mechanisms of particulate matter formation in spark-ignition engine: 3 Model of PM formation [J]. Environmental Science and Technology, 1999, 33(20): 3978-3992.
- [9] 马凡华,王宇,汪俊君,等. 不同点火提前角时 HCNG 发动机的燃烧与排放特性[J]. 内燃机工程, 2008, 29(4): 23-27.
MA Fanhua, WANG Yu, WANG Junjun, et al. Combustion and emission characteristics of a HCNG engine under various spark timings [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2008, 29(4): 23-27.

[本刊相关文献链接]

汽油直喷发动机燃烧特性分析. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 9-13.
缸内直喷汽油机复合燃烧技术. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 14-18.
冷启动时甲醇掺烧液化气发动机的甲醛和未燃甲醇排放. 西安交通大学学报, 2010, 44(5): 21-25.
天然气掺氢配合废气再循环发动机燃烧过程的数值模拟. 西安交通大学学报, 2009, 43(5): 22-25.
甲醇缸内直喷发动机的燃烧特性. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1372-1376.
甲醇缸内直喷复合导流分层燃烧系统的优化研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(1): 27-31.

(编辑 葛赵青 苗凌)