

喷射压力对内燃机中汽油燃爆特性的影响

李润 程扬帆 张蓓蓓 李世周 李梦

Effect of Injection Pressure on Gasoline Deflagration Characteristics in Internal Combustion Engine

LI Run, CHENG Yangfan, ZHANG Beibei, LI Shizhou, LI Meng

引用本文:

李润,程扬帆,张蓓蓓,等.喷射压力对内燃机中汽油燃爆特性的影响[J].高压物理学报,2025,39(3):035301. DOI: 10.11858/gywlxb.20240857

LI Run, CHENG Yangfan, ZHANG Beibei, et al. Effect of Injection Pressure on Gasoline Deflagration Characteristics in Internal Combustion Engine[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(3):035301. DOI: 10.11858/gywlxb.20240857

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240857

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金属丝网对甲烷/空气爆燃火焰传播特性的影响

Effect of the Wire Mesh Structure on the Flame Characteristics of Methane/Air Deflagration 高压物理学报. 2020, 34(5): 055201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200536

热刺激下不同结构引信的响应机理

Response Mechanism of Fuse with Different Structures under Thermal Stimulation 高压物理学报. 2021, 35(5): 055101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210720

内部爆炸载荷作用下砌体墙结构的失效规律

Failure Characteristics of Masonry Wall under Internal Explosion 高压物理学报. 2022, 36(2): 024203 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210810

C₂H₄/N₂O预混气体的爆轰性能与火焰淬熄特性

Detonation and Quenching Characteristics of Premixed C_2H_4/N_2O

高压物理学报. 2020, 34(4): 045201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190845

靶机气囊缓冲着陆过程中的冲击特性

Impact Characteristics of Drone Aircraft in Airbag Cushion Landing 高压物理学报. 2021, 35(6): 065301 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210712

爆炸载荷下舱内泡沫铝夹芯结构的动响应特性

Dynamic Response Characteristics of Aluminum Foam Sandwich Structure under Explosion Load in Cabin 高压物理学报. 2022, 36(2): 024103 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210849 DOI: 10.11858/gywlxb.20240857

喷射压力对内燃机中汽油燃爆特性的影响

李 润1,程扬帆1,2,张蓓蓓2,李世周1,李 梦1

(1. 安徽理工大学安全科学与工程学院,安徽淮南 232001;2. 安徽理工大学土木建筑学院,安徽淮南 232001)

摘要:为了探究不同喷射压力对受限空间内汽油的燃爆特性的影响,运用 20 L 球形爆炸测 试装置,对不同喷射压力下汽油云雾燃爆的特征参数变化、火焰传播、温度变化进行了测试。结 果表明:最佳喷料时间为 100 ms,最大燃爆压力和最大燃爆压力上升速率随喷射压力的增加呈 线性上升趋势,燃爆持续时间则呈线性下降趋势。喷射压力的变化对燃爆持续时间的影响更为 显著,汽油的燃爆效率随着喷射压力的增加而显著提高。基于比色测温方法对火焰温度场进行 重构,发现最高平均温度与喷射压力呈线性关系,最高平均温度随喷射压力的增加而升高。通 过火焰传播过程中云雾形态和火焰温度的变化情况,就喷射压力对汽油云雾燃爆的影响进行了 分析。研究结果可为增压直喷式内燃机的设计以及汽油内燃机燃烧效率和经济性的提升提供理 论参考。

关键词:汽油内燃机;喷射压力;燃爆特性;蒸发速率 中图分类号:O389;O521.9 文献标志码:A

随着汽车工业的迅速发展,对能源利用效率和环境保护的要求不断提高,深入理解汽油内燃机的 工作原理并优化其性能变得至关重要。喷射压力作为影响汽油内燃机燃烧过程和性能的关键因素之 一,其作用和影响机制尚未得到充分揭示和理解。汽油内燃机作为现代交通工具和动力设备的核心部 件,在降低能源消耗和减轻环境污染方面面临着巨大的挑战。为了满足日益严格的排放标准,提高燃 油经济性,对内燃机燃烧过程优化成为了研究的焦点。燃油喷射系统作为控制燃油供给和混合气形成 的关键部件,其喷射压力的大小直接影响燃油的雾化、蒸发和混合质量,进而对燃烧过程和发动机性能 产生重要影响。

近年来,国内外学者针对喷射压力对汽油内燃机的影响开展了大量的研究。包凌志等[1]基于一台 2.0L涡轮增压直喷氢内燃机研究了不同喷射压力对其排放特性的影响,发现适当提高喷射压力可以改 善燃油的雾化质量,促进混合气的均匀分布,从而提高燃烧效率,降低排放。李玉兰等^[2]采用 CFD 软件 研究了不同天然气喷射压力对船用柴油引燃天然气直喷发动机燃烧性能的影响,结果表明,喷射压力 越高,动能越大,混合越均匀,燃烧越充分。然而,过高的喷射压力可能会导致燃烧不稳定、缸内压力 波动增大等问题。刘海峰等^[3]基于一台光学发动机研究了喷油压力和进气温度对氨/正十二烷双燃料 发动机缸内燃烧的影响规律,结果表明,直喷燃料喷射压力降低会导致正十二烷浓度分层增大,自燃着 火点增多,更有利于正十二烷引燃均质预混合的氨气。张丹等^[4]采用阴影法对喷射压力为 5~ 60 MPa 的喷雾进行测量,分析了喷射压力对油束发展历程、贯穿距离、喷雾锥角、喷雾面积以及喷油 器尾喷现象的影响,发现随着喷雾发展,贯穿距离和喷雾面积均呈现一定程度的线性增大。此外,不同

^{*} 收稿日期: 2024-07-17; 修回日期: 2024-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(12272001);安徽省高校自然科学基金杰青项目(2023AH020026) 作者简介: 李 润(2000-),男,硕士研究生,主要从事爆炸安全与防护研究. E-mail: 1989657216@qq.com 通信作者: 程扬帆(1987-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事爆炸力学和爆炸安全研究. E-mail: cvf518@mail.ustc.edu.cn

的发动机结构和运行工况对喷射压力的响应也存在差异。秦超群等^[5]基于电热塞引燃式直喷甲醇发动机,采用三维数值模拟方法研究了喷射压力对甲醇雾化、空燃混合、燃烧、排放的影响,结果表明,提高喷射压力使可燃混合气的均匀程度提高,缸内平均温度和压力降低。晏飞等^[6]以某船用孔式喷油器为研究对象,运用液滴破碎模型、大涡湍流模型、液滴碰撞聚合模型对燃油喷雾过程进行数值分析,研究了喷射压力对喷雾特性的影响规律,发现喷雾初期贯穿距离与时间成正比;而喷雾中后期,贯穿距离增大的速度逐渐减缓,喷雾锥角随着喷射压力的增加而增大。因此,喷射压力对汽油内燃机性能的影响还需要进一步的系统研究和综合分析。

本研究运用 20 L 球形燃爆装置来探究不同喷射压力对汽油雾化的影响,通过高速摄像机拍摄汽油爆炸时的火焰传播过程,基于比色测温方法对爆炸温度场进行重构,对平均温度变化进行测量,并对 实验结果进行分析和讨论,旨在系统地探究喷射压力对汽油内燃机性能指标的影响,为进一步提高汽 油内燃机的效率和经济性提供理论参考。

1 实 验

1.1 实验材料

实验使用的汽油燃料为中国石油天然气集团公司生产的 92 汽油,实验前通过 GC-MS(美国 Thermo Fisher 公司生产)对所用汽油的组分及基本物化参数进行测试,实验原料符合 GB 17930—2016《车用 汽油》标准的要求;空气(21% O₂+79% N₂,纯度为 99.9%)由中国合肥恒隆电气有限公司提供。

1.2 实验装置

如图 1 所示,实验使用的仪器有 20 L 球形液体燃爆测试装置(适用标准 GB/T 16426—1996, 吉林 市宏源科学仪器有限公司生产)和可编程逻辑控制器(PLC, 佛山市敏控科技有限公司生产)。液体燃料 爆炸测试系统主要由 20 L 球形爆炸罐体、燃料喷洒系统、点火系统、数据采集系统和同步控制系统组 成。罐体对称两侧均有直径为 14 cm 的光学观察窗,便于高速摄像机(Memrecam HX-3)捕捉火焰形态, 球体顶部有 1 个直径为 20 cm 的操作口,用于清洁球体。燃料喷洒系统主要由 2 个分散喷嘴、2 个 70 mL 燃料储液罐、2 个电磁控制阀、2 个 1.5 L 储气罐和 1 个高压气瓶组成;点火系统主要由 2 个间隙 为 1.5 mm 的纯钨电极和 1 个电火花发生器组成,实验中所用的电火花发生器通过连续脉冲回路放电; 数据采集系统包含 1 个 PCB 压力传感器(PCB 113B24)和 1 个示波器(Teledyne Lecroy HDO4034),通过 示波器采集和压力传感器接收爆炸超压信号;同步控制系统包含 1 个编程逻辑控制器,用于控制点火





延迟时间以及点火能量。点火延迟时间设置为 100 ms, 以保证云雾有足够的静置时间^[7]; 点火能量设置 为 60 J。实验在室温(298 K)、常压(0.1 MPa)环境下进行。实验选用的汽油的质量浓度为 160 g/m³。每 组实验进行 3 次以上, 以保证实验的重复性和准确性。

1.3 比色测温方法

在进行正式的温度测量之前,需在室内无光照条件下对液体燃爆温度进行标定^[8]。比色测温标定 系统包括:20L液体爆炸罐、高速相机、衰减片、钨丝灯、直流稳压电源、电压表、电流表、Python标定 程序,标定实验装置如图 2(a)所示。本实验选用钨丝灯进行温度标定,通过改变电源的电流,记录电流 表以及电压表的相关数据,计算其阻值,并通过高速相机拍摄钨丝灯,采用 Python 程序将高速相机捕捉 到的 8 bit 灰度图像通过插值算法处理,计算出每个像素点对应的 *R/G*值,最后将钨丝灯的实际温度与 计算得出的 *R/G*值进行拟合,如图 2(b)所示。从图 2(b)中可以看出,该系统拟合效果极佳,相关系数 *R*²= 0.996 98,具体函数关系为

$$T = 1\ 610.441\frac{R}{G} + 195.707\tag{1}$$

式中:T为钨丝灯的实际温度,K;R、G分别为像素点红色和绿色的分量值。



Fig. 2 Calibration for colorimetric temperature measurement

2 结果与讨论

2.1 喷射压力对汽油燃爆特征参数的影响

喷料时间(*t_i*)会影响汽油在球罐内的云雾形态^[9-10]。为此,对喷料时间进行测试,喷射压力取 0.8 MPa。如图 3 所示,通过研究不同喷料时间对汽油燃爆的影响,发现随着喷料时间的增加,最大燃爆 压力(*p_{max}*)、最大燃爆压力上升速率((*dp/dt*)_{max})均呈现先升后降的变化趋势,在*t_i*为 100 ms 时达到峰 值,分别为 1.05 MPa 和 57.05 MPa/s; 燃爆持续时间 *t_a*则呈现先降后升的变化趋势,在*t_i*为 100 ms 时达到 最小值 26.6 ms。

通过喷气的形式使汽油燃料进入罐内时,会在球罐中形成湍流,湍流的强度^[11]会影响汽油的燃爆 特性。选用实验得出的最佳喷料时间 100 ms,研究液体喷射压力(p_i ,0.4~1.2 MPa)对汽油云雾燃爆的 影响。图 4 揭示了不同喷射压力下 p_{max} 、(dp/dt)_{max}和 t_d 的变化趋势。可以看出,随着喷射压力的增加, p_{max} 和 (dp/dt)_{max}均呈线性增加趋势,而 t_d 则呈线性下降趋势。 p_{max} 、(dp/dt)_{max}、 t_d 与喷射压力均呈良好的 线性关系。与喷射压力为 0.4 MPa 时的 p_{max} (0.86 MPa)和 (dp/dt)_{max}(44.16 MPa/s)相比,喷射压力为 1.2 MPa 时的 p_{max} 和 (dp/dt)_{max}分别为 1.17 MPa 和 68.35 MPa/s,增幅分别为 36.05%和 54.78%,燃爆持续 时间则下降了 71.31%。喷射压力的变化对燃爆持续时间的影响更显著,使得汽油的燃爆速率随着液体 喷射压力的增加而显著增加。



Fig. 4 Influence of injection pressure on p_{max} , $(dp/dt)_{\text{max}}$ and t_{d}

2.2 喷射压力对汽油爆炸火焰传播过程的影响

图 5 给出了不同喷射压力(0.4、0.8、1.2 MPa)下汽油云雾的火焰传播过程。由图 5 可知,3 种喷射压力下,火焰锋面到达观察窗口边界的时间不同,喷射压力为 0.4、0.8 和 1.2 MPa 时,到达时间分别为 37、12 和 6 ms。3 种喷射压力均可以使汽油液滴分散,分散开的液滴会不断挥发,使得在球罐中出现多 处局部蒸气燃爆。当火焰中心变成一个明亮的白色区域并迅速填满整个观察窗时,火焰前沿发展到观 察窗口之外,火焰锋面变得不可观测。*t*=6 ms 时,喷射压力为 0.4 和 0.8 MPa 的火焰锋面还未到达观察 窗边缘,并且云雾主要分散在球罐的中部和上方;而喷射压力为 1.2 MPa 的火焰锋面已经到达了观察窗



Fig. 5 Flame propagation process of gasoline explosion under different injection pressures

边缘,汽油云雾分布于整个球罐中,并且产生了耀眼的光亮。由于挥发出来的蒸气比液滴更容易被点燃,产生的能量用于预热未燃的液滴^[12-13],因此,较高的喷射压力会加速燃料的蒸发,使汽油云雾更容易发生燃爆产生高温高压区域,对其他未燃区域进行预热,从而加速液滴的预热和蒸气的挥发及燃爆。

2.3 喷射压力对汽油燃爆火焰温度的影响

基于黑体辐射的比色测温技术对汽油燃爆过程中的火焰传播过程进行了温度场重构。从图 6 可 以看出,喷射压力为 0.4 MPa 时,温度分布较为均匀,这是因为当喷射压力较低时,形成的云雾中液滴的 沉降效应明显^[14],使得燃爆以已存在的局部蒸气燃爆为主导,而蒸气燃爆通常是均相爆炸^[12],分子间间







隙大,蒸气分布均匀。喷射压力为 0.8 MPa 时,可以观察到液滴的预热过程,这是因为喷射压力增大使 得液滴挥发出的蒸气增多,爆炸反应速率增大,较快的反应速率又会加快球罐内温度升高,使得汽油蒸 气的氧化反应加快,从而形成正反馈作用,加速反应的进行。喷射压力为 1.2 MPa 时,喷出液体的雾化 更为明显和均匀,初始蒸气的燃爆现象较多,使得罐内温度快速升高^[15]。

对不同喷射压力下汽油燃爆的火焰传播过程进行了温度测量,结果如图7所示。在点火后,平均 温度(T_{ave})随时间增加呈先下降后上升再下降的趋势,这是因为点火后会有已经挥发的蒸气发生燃爆, 但产生的热量会通过热传递及热辐射的方式预热未燃区域,热量被未燃烧的液滴和球罐内壁吸收,导 致火焰温度有所下降。在罐内预热完成后,罐内蒸气含量大幅增加,蒸气的集中燃爆产生大量热量,使 得罐内温度骤升。平均温度达到峰值后,由于爆炸产生了大量的水和碳黑,阻碍了反应的进行并对罐 内热量进行了吸收,容器内壁也持续对产生热量进行吸收,使得反应速率减小,平均温度下降。平均温 度随时间变化出现波动,这是因为液滴的燃烧通常属于非均相燃烧,在燃爆过程中会有少量液滴受热







燃烧使得局部产生高温,导致平均温度出现振荡。随着喷射压力的增加,最高平均温度(Tm)与喷射压 力呈线性关系,最高平均温度随着喷射压力的增加而升高,喷射压力为0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 MPa时的 T_{am}分别为 2 021、2 150、2 265、2 372 和 2 459 K。T_{am} 与 p_i 的关系为

$$T_{\rm am} = 1\ 809.641\ 11 + 547.747\ 84p_{\rm i} \tag{2}$$

式(2)可用于预测更高喷射压力下汽油在20L球形容器内燃爆的温度变化。

3 分析与讨论

喷射压力主要影响系统内气体湍流的变化。Kolmogorov等^[16]指出,湍流区域内湍流的空气动力 学效应对液体雾化形成的液滴尺寸起着至关重要的作用[17-18],并给出了等熵流中临界韦伯数的表达式

$$We'_{\rm b} = \rho_{\rm gas} u^2 D_{\rm max} / \sigma_1 \tag{3}$$

式中: We'b为临界韦伯数; pgas 为液滴周围的气体密度, kg/m3; u为液滴表面空气湍流脉动的平均速度, $m/s; D_{max}$ 为液滴最大直径, m; σ_1 为液面张力系数, N/m。

Batchelor 提出, 液滴表面空气湍流脉动的平均速度 u 与单位时间内气体的动能 E_{as}和质量有关, 即

$$u^2 = 2(E_{\rm gas}D_{\rm max})^{2/3} \tag{4}$$

因此,临界韦伯数可以转换为

$$We'_{\rm b} = 2\rho_{\rm gas} E_{\rm gas}^{2/3} D_{\rm max}^{5/3} / \sigma_1 \tag{5}$$

稳定液滴的最大直径 D_{max} 为

$$D_{\rm max} = C\sigma_1^{3/5}\rho_{\rm gas}^{-3/5}E_{\rm gas}^{-2/5} \tag{6}$$

式中:C为常数。可以推断,随着喷射压力的增加,汽油液滴的粒度逐渐减小,有助于较小颗粒尺寸的 液滴悬浮并形成更均匀的可燃预混合物。此外,研究显示,液体云雾的蒸发速率与湍流强度[19-21] 有关

$$v^{\rm t} = A + Bu_{\rm rms}/D_{32} \tag{7}$$

式中:v^t为液滴蒸发率,g/(m³·s);A、B均为通过实验测定的系数;D₃,为液滴平均直径,m;u_{ms}为湍流均 方根速度。u_{ms}表示为

$$u_{\rm rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (u_i - \bar{u})^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (v_i - \bar{v})^2 \right]}$$
(8)

式中: u_i 、 v_i 为X和Y方向上的湍流分量, m/s; \bar{u} 、 \bar{v} 分别为X和Y方向上的平均湍流分量, m/s, $\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} u_i$,

 $\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} v_i \circ$

因此,喷射压力的增加会造成初始湍流加剧,使得汽油云雾的蒸发速度变得更快,即在同一时间段 内蒸发更多的可燃气体,可燃气体的积累和集中燃爆会释放更多的热量。这表明,改变喷射压力在本 质上是影响液滴的直径和蒸发速率,从而影响汽油的燃爆特性。

4 结 论

(1) 随着喷料时间的延长,最大燃爆压力和最大燃爆压力上升速率均呈现先升后降的变化趋势,在 喷料时间为 100 ms 时达到峰值, 分别为 1.05 MPa 和 57.05 MPa/s, 燃爆持续时间则呈现先降后升的变化 趋势,在喷料时间为100 ms 时达到最小值26.6 ms,因此,最佳喷料时间为100 ms。

(2) 随着喷射压力的增加,最大燃爆压力和最大燃爆压力上升速率呈线性增加趋势,而燃爆持续时 间呈线性下降趋势。与喷射压力为0.4 MPa时的最大燃爆压力(0.86 MPa)和最大燃爆压力上升速率 (44.16 MPa/s)相比, 喷射压力为 1.2 MPa 时其值分别为 1.17 MPa 和 68.35 MPa/s, 增幅分别为 36.05% 和 54.78%, 燃爆持续时间则下降了 71.31%。

(3) 对不同喷射压力下汽油爆炸的火焰传播过程进行了温度测量,发现平均温度呈现先下降后上 升再下降的趋势。随着喷射压力的增加,最高平均温度与喷射压力呈线性关系,最高平均温度随着喷 射压力的增加而增大,喷射压力为 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 MPa 时的最高平均温度分别为 2 021、2 150、 2 265、2 372 和 2 459 K。随着喷射压力从 0.4 MPa 增至 1.2 MPa,最高平均温度升高了 21.67%。

参考文献:

- [1] 包凌志, 孙柏刚, 罗庆贺. 高效增压直喷氢内燃机近零 NO_x 排放试验优化 [J]. 内燃机学报, 2023, 41(5): 412–419.
 BAO L Z, SUN B G, LUO Q H. Optimization of a turbocharged direct injection hydrogen engine to achieve high efficiency and near-zero NO_x emissions [J]. Transactions of CSICE, 2023, 41(5): 412–419.
- [2] 李玉兰, 王谦, 芮璐, 等. 喷射压力对直喷天然气发动机燃烧特性的影响 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(19): 89–94.
 LI Y L, WANG Q, RUI L, et al. Effect of injection pressure on combustion characteristics of direct injection NG engine [J].
 Ship Science and Technology, 2021, 43(19): 89–94.
- [3] 刘海峰, 王冠月, 文铭升, 等. 喷油压力和进气温度对氨/正十二烷双燃料发动机燃烧稳定性影响研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2024, 30(1): 1-8.

LIU H F, WANG G Y, WEN M S, et al. Influence of injection pressure and intake temperature on combustion stability of ammonia/n-dodecane dual-fuel engine [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2024, 30(1): 1–8.

 [4] 张丹, 裴毅强, 王琨, 等. 超高喷射压力下 GDI 喷油器喷雾宏观特性 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2018, 49(5): 1272-1280.
 ZHANG D. PELY O. WANG K. et al. Spray magrageonic characteristics of CDI injector under ultra high injection pressure [II].

ZHANG D, PEI Y Q, WANG K, et al. Spray macroscopic characteristics of GDI injector under ultra-high injection pressure [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(5): 1272–1280.

- [5] 秦超群, 吴家正, 吴继盛, 等. 喷射压力对电热塞引燃甲醇发动机的影响研究 [J]. 车用发动机, 2019(4): 8–15. QIN C Q, WU J Z, WU J S, et al. Effects of injection pressure on methanol engine ignited by glow plug [J]. Vehicle Engine, 2019(4): 8–15.
- [6] 晏飞, 杜雨辰, 张建, 等. 喷射压力对船用柴油机燃油喷雾特性的影响 [J]. 舰船科学技术, 2016, 38(15): 67–71, 75. YAN F, DU Y C, ZHANG J, et al. Effects of injection pressure on fuel spray in marine diesel engine [J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(15): 67–71, 75.
- [7] 蒋八运,程扬帆,李世周,等.环氧丙烷/空气混合物气-液两相燃爆特性 [J]. 含能材料, 2023, 31(7): 699–706.
 JIANG B Y, CHENG Y F, LI S Z, et al. Vapor-liquid two-phase combustion and explosion characteristics of propylene oxide/air mixtures [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(7): 699–706.
- [8] 程扬帆, 王中华, 胡芳芳, 等. TiH₂ 粉尘火焰传播速度及温度分布的高速二维测量 [J]. 兵工学报, 2023, 44(4): 1181–1192. CHENG Y F, WANG Z H, HU F F, et al. High-speed two-dimensional measurements of flame propagation velocity and temperature distribution of TiH₂ dust flame [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(4): 1181–1192.
- [9] 马春丽, 武晓鑫, 黄凤仙, 等. 小分子液体的高温布里渊散射研究 [J]. 高压物理学报, 2015, 29(1): 35–41. MA C L, WU X X, HUANG F X, et al. Brillouin scattering study on molecular liquid under high pressure and high temperature conditions [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2015, 29(1): 35–41.
- [10] LI H T, CHEN X K, SHU C M, et al. Experimental and numerical investigation of the influence of laterally sprayed water mist on a methane-air jet flame [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 356: 554–569.
- [11] 齐文亮,明平剑,张文平,等.喷嘴内湍流运动对火焰浮起长度影响的数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2018, 33(12): 2859-2865.

QI W L, MING P J, ZHANG W P, et al. Numerical simulation of effect of turbulence flow in nozzle on flame lift-off length [J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2859–2865.

- [12] MENG S, HAN Z Y, FAN B Z, et al. Impacts of fuelling methods on knock-limited combustion and emissions of a dedicated hybrid spark-ignition engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 254: 123898.
- [13] 赵洪祥, 袁景. 蒸气云爆炸荷载计算方法比选研究 [J]. 安全与环境学报, 2023, 23(11): 3944–3950.
 ZHAO H X, YUAN J. Research on calculation method selection of vapor cloud explosion load [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(11): 3944–3950.
- [14] 姚干兵, 解立峰, 刘家骢. 激波管内燃料两相云雾爆轰的实验研究 [J]. 高压物理学报, 2007, 21(1): 77-82.

YAO G B, XIE L F, LIU J C. Experimental study on detonation characterics of several liquid fuel-air clouds in shock tube [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21(1): 77–82.

[15] 谭汝媚, 张奇, 黄莹. 环境湿度对环氧丙烷蒸气爆炸参数的影响 [J]. 高压物理学报, 2013, 27(3): 325-330.

TAN R M, ZHANG Q, HUANG Y. Ambient humidty influence on explosion characteristics parameters of gaseous epoxypropane [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(3): 325–330.

- [16] KOLMOGOROV A N. On the disintegration of drops in turbulent flow [J]. Doklady Akademi Nauk SSSR, 1949, 66: 825-28.
- [17] 辛娟娟, 周致富, 辛慧, 等. 单个液滴蒸发模型中不同质量传递公式的有效性分析 [J]. 化工学报, 2012, 63(6): 1704–1708.
 XIN J J, ZHOU Z F, XIN H, et al. Validation analysis of different mass transfer formula in single droplet evaporation model [J].
 CIESC Journal, 2012, 63(6): 1704–1708.
- [18] EL-ZAHLANIEH S, SANTOS I S D, SIVABALAN S, et al. Finding a way through the "misty" evaluation of the flammability and explosivity of kerosene aerosols [J]. Fuel, 2022, 328: 125275.
- [19] 蒋勇,朱宁,陈军,等.喷雾过程液滴蒸发计算研究 [J]. 火灾科学, 2001(1): 20-23.
 JIANG Y, ZHU N, CHEN J, et al. Numerical calculation on droplet vaporization in spray process [J]. Fire Safety Science, 2001(1): 20-23.
- [20] SHEN S Q, SUN K, CHE Z Z, et al, Puffing and micro-explosion of heated droplets for homogeneous ethanol-propanolhexadecane fuel and micro-emulsified ethanol-biodiesel-hexadecane fuel [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 165: 114537.
- [21] 王海鸥, 罗坤, 白云, 等. 不同湍流强度下液雾燃烧的直接数值模拟 [J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(3): 222–226.
 WANG H O, LUO K, BAI Y, et al. Direct numerical simulation of spray combustion with various turbulent intensities [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(3): 222–226.

Effect of Injection Pressure on Gasoline Deflagration Characteristics in Internal Combustion Engine

LI Run¹, CHENG Yangfan^{1,2}, ZHANG Beibei², LI Shizhou¹, LI Meng¹

School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;
 School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China)

Abstract: In order to explore the influence of injection pressure on the deflagration characteristics of gasoline in the confined space, a 20 L spherical explosion test device was used to examine the changes of characteristic parameters, i.e., the transient flame propagation and temperature of gasoline mist deflagration under different injection pressures. The results showed that the optimum spraying time was 100 ms, and the maximum explosion pressure and maximum explosion pressure rise rate increased linearly with the increase of injection pressure, while explosion duration decreased linearly. The change of injection pressure had a more significant effect on explosion duration, and the combustion efficiency of gasoline increased significantly with the increase of injection pressure. Based on the colorimetric temperature measurement method, the flame temperature field was reconstructed. It was found that the maximum average temperature had a linear relationship with injection pressure on the deflagration characteristics of gasoline mist was analyzed through the changes of mist morphology and flame temperature during flame propagation. The outcome of this research can provide theoretical reference for the design of turbocharged direct injection internal combustion engine and the improvement of combustion efficiency and economy of gasoline internal combustion engine.

Keywords: gasoline internal combustion engine; injection pressure; deflagration characteristics; evaporation rate