

电热塞助燃对天然气射流点火特性的影响

李常委¹, 沈旭龙¹, 潘 康^{1,2}, 陈龙飞¹

(1. 杭州市北京航空航天大学国际创新研究院(北京航空航天大学国际创新学院), 杭州 311115;

2. 天目山实验室, 杭州 311115)

Influences of Glow Plug Assistance on the Ignition Characteristics of Natural Gas Jet

LI Changwei¹, SHEN Xulong¹, PAN Kang^{1,2}, CHEN Longfei¹

(1. Hangzhou International Innovation Institute, Beihang University, Hangzhou 311115, China; 2. Tianmushan Laboratory, Hangzhou 311115, China)

Abstract: In order to address the prolonged ignition delay of natural gas, a numerical simulation study on the ignition characteristics of natural gas assisted by glow plug (GP) was carried out. Results indicate that the GP effectively facilitates natural gas ignition, with the flame rapidly propagating from the circular opening and the bottom of the GP shield into the combustion chamber. Notably, the diamond multi-opening shield enhances flame propagation more effectively, and the ignition delay difference (IDD) is the smallest. The square multi-opening shield design prevents the natural gas jet from directly impinging on and cooling the GP surface, ensuring that the GP remains at an optimal temperature for ignition and reducing the ignition delay by temperature (IDT), compared to a single-opening shield. Additionally, elevated temperatures enhance natural gas ignition. When the GP temperature exceeds 1 400 K, the shield opening design becomes unnecessary. In these conditions, although a single-opening shield can achieve similar ignition performance with ignition time of about 0.3 ms, it may adversely affect the GP's lifespan.

摘要: 针对天然气点火延迟时间较长问题,开展了电热塞(glow plug, GP)辅助下天然气点火特性数值模拟研究。结果表明 GP 可以有效促进天然气点火,引燃的火焰快速从 GP 防护罩圆形开口和底端开口向燃烧室内蔓延。其中,菱形多开口防护罩更有利于火焰传播,点火延迟差(ignition delay difference, IDD)最小。方形多开口防护罩避免了天然气射流直接撞击 GP 表面并冷却 GP 的风险,从而促使 GP 始终保持高温,有利于天然气点火,温度点火延迟(ignition delay by temperature, IDT)时间小于单开口防护罩。高温可以有效促进天然气点火,在 GP 温度超过 1 400 K 时,天然气点火可以忽略防护罩开口设计,单开口防护罩表现出与多开口防护罩一样优异的点火性能(点火时间约为 0.3 ms),但也带来了 GP 使用寿命缩短的风险。

关键词: 天然气;电热塞;点火特性;燃烧室

Key words: natural gas; glow plug; ignition characteristic; combustion chamber

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2025.03.001

中图分类号: TK401

第二十七届中国科协年会学术论文

收稿日期: 2025-03-31

修回日期: 2025-04-17

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LZ23E060005)

Foundation Item: Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LZ23E060005)

作者简介: 李常委(1995—),男,博士生,主要研究方向为燃烧与排放,E-mail:lichangwei@buaa.edu.cn;

潘 康(通信作者),E-mail:pankang@buaa.edu.cn。

0 概述

在全球气候变暖的大背景下,世界各国纷纷提出碳中和战略,在航空、建筑、机械制造等行业推广新能源技术的应用。随着全球航空运输量的不断攀升,航空业二氧化碳排放量增长迅猛。据国际能源协会(International Energy Agency, IEA)统计,2019年全球航空排碳量达到 10^9 t, 占全球总排放量的 2.8%^[1], 其中中国民航碳排放占比达 13%^[2]。为了应对航空碳排放危机,航空新能源技术已经成为了世界各国关注的焦点和研究的热点。

天然气作为高效的清洁能源,因其具有优异的理化性质、价格低廉、储量丰富等特点被视为一种较为理想的航空替代燃料^[3-6]。相对于航空煤油,天然气燃烧产物更加环境友好,释放同等的能量时二氧化碳排放低 23%,可以实现颗粒物和 SO_2 的近零排放^[7-10]。文献[11]中对航空发动机燃烧室内甲烷和航空煤油掺混燃烧特性展开研究,发现甲烷的加入可以有效降低碳排放,燃烧室的空间也可以进一步缩小。文献[12]中试验对比了液化天然气与航空煤油的燃烧特性,结果表明液化天然气最大层流火焰速度是航空煤油的 63%,着火延迟时间却是航空煤油的 20 倍。文献[13]中探讨了航空发动机燃烧室改造为天然气燃烧室的可行性,提高预热温度可以有效消除局部高温,但同时也带来了 NO_x 排放问题。文献[14]中分析了高压直喷天然气的化学反应机理和燃烧过程。文献[15-16]中开展高压直喷天然气双燃料发动机仿真工作,发现燃用天然气可以有效降低碳烟排放,实现 NO_x 减排则需要优化天然气预喷策略。

相对于航空煤油,天然气着火能力较弱,需借助点火辅助装置来实现天然气快速引燃,提高发动机运行效率^[10,12]。电热塞(glow plug, GP)具有高温热表面,可助力天然气点火,有效消除天然气点火延迟的缺陷^[17]。文献[18-19]中研究表明 GP 温度达到 1 200 K 时可以实现天然气的快速点火。然而,裸露的 GP 会受到冷空气和冷燃料撞击的影响,造成表面温度降低和使用寿命下降。此外,燃料在 GP 周围停留时间较短,难以实现燃料的有效引燃^[19-20]。因此,在 GP 周围设计一种开口防护罩是十分有必要的,既能阻挡大量冷燃料,又能兼顾部分燃料直接进入并停留在防护罩内部,实现天然气快速引燃。

然而针对 GP 和 GP 防护罩共同存在下燃烧室内天然气点燃特性的研究特别是对既能促进点火又能保障火焰传播的防护罩研究尚不充分。此外,高

温有助于点火,然而温度和防护罩设计对点火延迟的耦合作用仍然是不明确的。本文中采用数值模拟的方法,对燃烧室内天然气点火特性和火焰传播开展研究,重点分析了 GP 温度和防护罩开口设计对天然气点火延迟的影响,为天然气发动机的改造提供理论依据和重要的数据支撑。

1 燃烧室结构配置

本研究中所采用的燃烧室结构如图 1 所示。发动机的主要部件包括喷射器和 GP,都安装在燃烧室内。GP 四周安装有开口的保护罩。在运行过程中,天然气由喷射器喷出,注入到燃烧室内。然后,天然气在 GP 保护罩内积聚,当达到一定浓度后,被高温 GP 引燃,并迅速在燃烧室内传播。

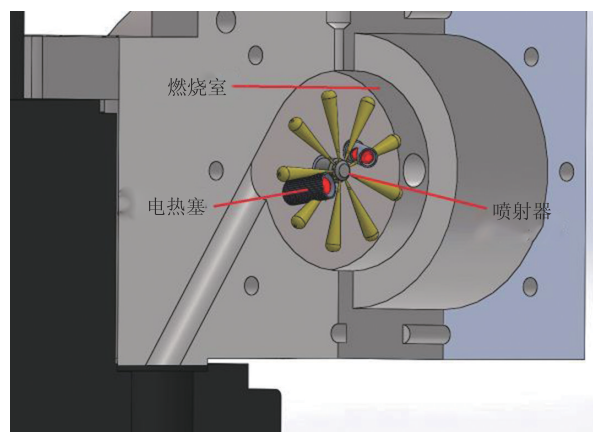


图1 定容燃烧室结构

Figure 1 Structure of constant volume combustion chamber

2 仿真模型

燃烧室仿真模型及俯视图分别如图 2 和图 3 所示。模型包含了燃烧室的主要特征,包括喷射器、GP、防护罩等。模拟中,采用了一个精细的喷射器模型模拟真实的喷射器几何形态,同时考虑到了喷射器内部燃料的流体动力学,复现了真实情况下的瞬态喷射。喷射器壁面设置有喷射口,本次模拟中相邻喷射口间的角度为 40° ,与 GP 之间的夹角 A 为 0° 。此外,为了模拟 GP 点火,采用改进的两步甲烷反应机理模拟天然气化学反应^[20]。模拟中所采用的 GP 模型将其固体表面沿径向方向划分为 $3.3 \mu\text{m}$ 的单元,用于预测 GP 表面温度的瞬态变化。该模型在模拟中通过求解相对传热方程,即计算 GP 内部的导热传热和表面的对流热损失和辐射热损失,来预测天然气注入和点火过程中 GP 表面径向和轴向的温度变化。此外,在 GP 外侧设置防护罩,并预留

一定空气间隙,防护罩下端设置有圆形开口,方向朝向喷射器,开口角度 B 为 0° 。

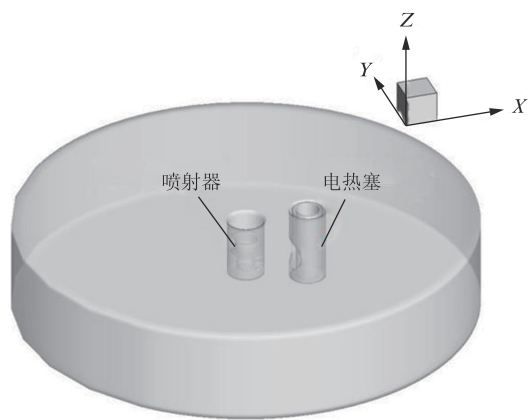


图2 定容燃烧室仿真模型

Figure 2 Simulation model of constant volume combustion chamber

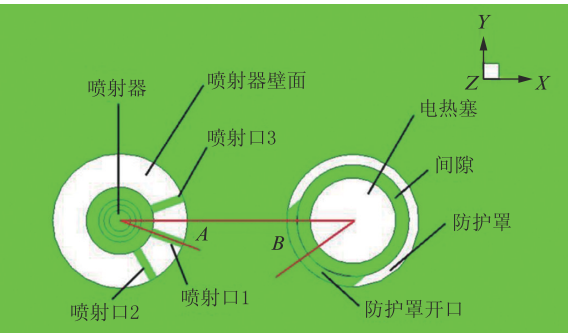


图3 燃烧室俯视图

Figure 3 Top view of combustion chamber

仿真模拟开始时,燃烧室的初始条件如表 1 所示。本次计算的重点是燃烧室内天然气点火延迟,天然气在喷射后的 2 ms 内被引燃。因此,在天然气开始喷射时便开始模拟喷射和点火,采用图 2 和图 3 燃烧室结构计算模型,以涡流强度为边界条件,使用表 1 中燃烧室的参数作为建模的初始输入。

表 1 燃烧室初始条件

Table 1 Initial conditions inside the combustion chamber

项目	参数
天然气喷射压力/MPa	11
天然气喷射温度/K	300
喷射时刻/(°)	-5
喷射时长/ms	2
喷射时燃烧室压力 p_c /MPa	5.2
喷射时燃烧室温度 T_c /K	850
喷射时燃烧室内旋流强度/($r \cdot \min^{-1}$)	5 500

2.1 模型验证

仿真计算采用 KIVA-3v 联合开展,为了验证模型的可靠性,与相应的试验结果展开对比,燃烧室温度 850 K、燃烧室压力 5.2 MPa、GP 温度 (T_{GP}) 1 400 K 时压力和点火延迟试验值与模拟值对比结果如图 4 所示^[21]。从图 4 中可以发现,模拟结果与试验结果吻合良好,仿真模型可以很好地预测 GP 点火所引起的燃烧室内压力上升。然而,在峰值压力处却存在略微的差异,主要由试验和模拟中燃料质量存在略微差异所导致^[18]。但点火延迟时刻发生在压力上升阶段,因此峰值压力差异不会影响仿真结果的准确性。为了进一步验证模型准确性,比较了喷射角为 $0^\circ \sim 40^\circ$ 的点火延迟,发现两者吻合良好。由此可认为该模型可以准确预测不同工况下的点火延迟时间。

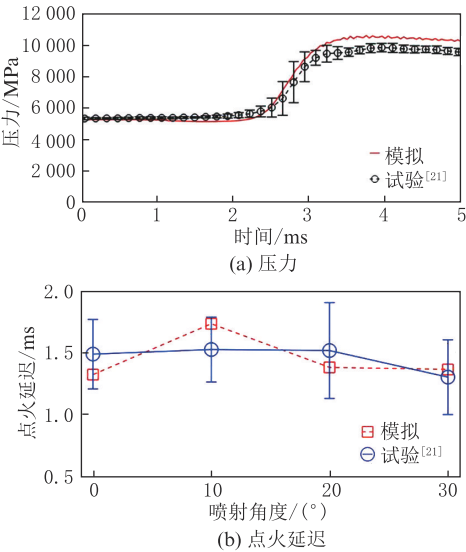


图4 压力和点火延迟试验值与模拟值对比($T_c=850$ K, $p_c=5.2$ MPa, $T_{GP}=1\,400$ K)^[21]

Figure 4 Comparison of experimental and simulated pressures and ignition delays ($T_c=850$ K, $p_c=5.2$ MPa, $T_{GP}=1\,400$ K)^[21]

图 5 展示了 T_c 为 300 K、 p_c 为 2.8 MPa 时模拟的喷射燃料质量与实测数据对比。从图 5 中可以看出,试验值在仿真计算值两侧分布,表明仿真模型计算得到的燃料喷射质量与试验值的吻合度良好。喷射燃料之间存在微小差异,主要由于试验过程对燃料喷射时间记录存在误差,导致燃料质量出现波动。喷射燃料质量的差异也导致了试验与模拟之间的峰值压力偏差。

当量比分布能够反映出燃料在燃烧室内分布和流动特征,因此也对模拟和试验当量比分布进行了比较分析。 T_c 为 750 K、 p_c 为 2.3 MPa 时燃料喷射后 1.44 ms

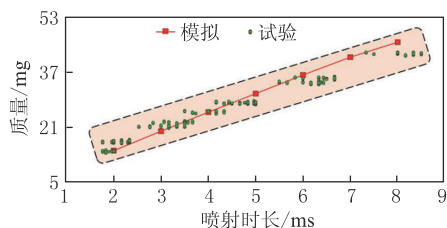


图5 试验和模拟喷射燃料质量比较 ($T_c=300\text{ K}$, $p_c=2.8\text{ MPa}$)

Figure 5 Comparison of experimental and simulated injection fuel mass ($T_c=300\text{ K}$, $p_c=2.8\text{ MPa}$)

当量比分布如图6所示。比较发现,模拟和试验的当量比轮廓和浓度分布基本一致,表明模型可以很好地模拟出燃烧室内天然气流动及其与空气的混合过程。

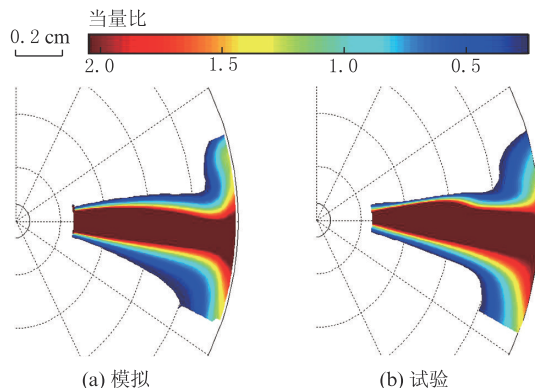


图6 燃料喷射后1.44 ms当量比分布 ($T_c=750\text{ K}$, $p_c=2.3\text{ MPa}$)

Figure 6 Equivalent ratio profiles at 1.44 ms after fuel injection ($T_c=750\text{ K}$, $p_c=2.3\text{ MPa}$)

2.2 防护罩开口设计

防护罩设计主要是为了避免大量冷燃料直接撞击高温 GP 表面造成表面温度降低和使用寿命下降。同时,为了兼顾天然气点火需求,在燃料喷射口一侧设置圆形开口,有利于部分燃料直接进入防护罩内部,并停留在 GP 周围形成可燃混合物,从而实现天然气快速引燃和火焰传播。

本研究中设计了3种防护罩,如图7和图8所示。图7所示为单开口防护罩,单开口防护罩只有一个直径3.8 mm的圆形开口。多开口防护罩中4个直径1.4 mm的圆形开口取代了单开口的大圆,如图8所示。对于多开口,研究了两种不同的几何排布方式,分别是菱形和方形排列。这种设计旨在阻碍冷燃料直接撞击 GP 表面。菱形开口设计中,燃料可以通过与喷射口处于同一水平面的两个开口进入防护罩,火焰从上下两个开口传播。方形开口设计是为了阻碍冷燃料直接喷射至 GP 表面,并允许燃料从4个开口进入防护罩。

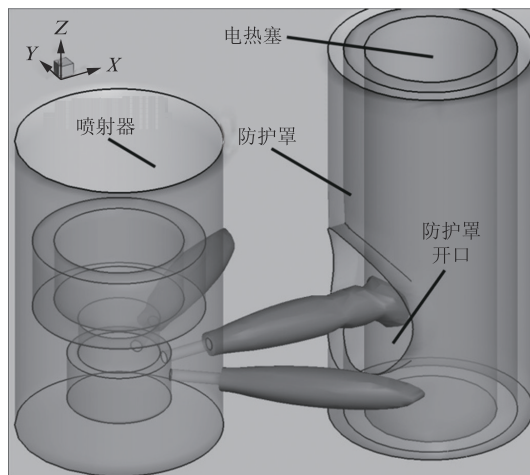


图7 单开口GP防护罩

Figure 7 Single-opening GP shield

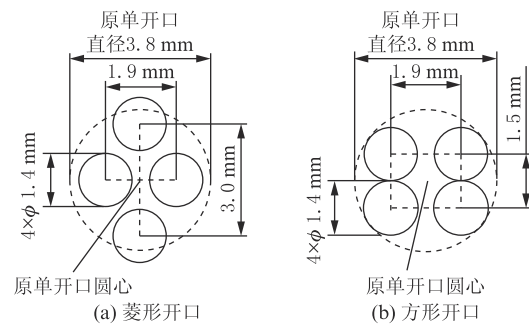


图8 菱形和方形开口GP防护罩

Figure 8 Diamond and square opening GP shields

3 结果与分析

3.1 火焰传播特征

可靠、快速的火焰传播会引发燃烧室内压力的快速上升,从而提高发动机性能。图9和图10分别展示了喷射角度和防护罩角度皆为 0° 、GP温度为1200 K时不同GP防护罩设计下的天然气点燃时刻的温度分布和当量比分布。此时,防护罩单开口、方形开口、菱形开口对应的点火时间分别为燃料喷射后第0.90 ms、0.67 ms、1.11 ms。这里认为温度达到2000 K时天然气已经被点燃,图9展示的是首次达到点燃温度时燃烧室内 GP 周围温度分布情况。

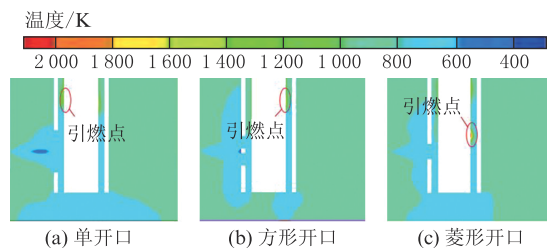


图9 不同GP防护罩设计在点燃时刻的温度分布

Figure 9 Temperature profile at the ignition time for different GP shield designs

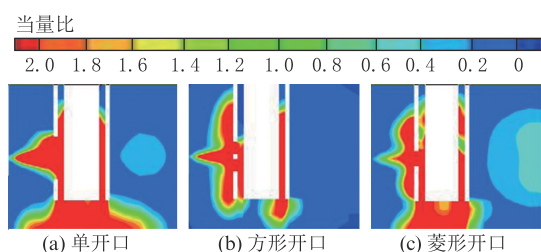


图10 不同GP防护罩设计在点燃时刻的当量比分布

Figure 10 Equivalence-ratio profile at the ignition time for different GP shield designs

从图9和图10中可以看出,引燃点都在GP表面,并且偏离喷射口,位于防护罩开口上方。这主要是由于冷燃料的喷射会造成GP表面温度下降,而远离喷射口的区域温度较高,能够引燃天然气。同时纯天然气无法自行引燃,需要空气的共同参与,而距离喷射口较远处天然气和空气混合充分形成可燃混合物,进而被引燃。菱形开口引燃点位置明显低于其他两种开口设计。此外,喷射燃料进入防护罩开口后,皆会从防护罩底端开口溢出,更加有利于引燃后火焰传播。

图11为单开口防护罩情况下,燃料喷射后第2.23 ms的火焰传播图像。从图11中可以看出,火焰传播路径与图10中燃烧室内燃料分布相同,即被高温GP所引燃的天然气火焰将会沿燃料分布从防护罩圆形开口和下端向燃烧室快速传播。在喷射器的射流作用下,大量的燃料由防护罩圆形开口进入,因防护罩内空间有限,燃料会迅速从防护罩底部开口溢出,导致防护罩正下方当量比较高。在燃料从下方溢出的同时,天然气火焰通过防护罩底部开口向外侧进一步传播,从而有利于燃烧室内火焰传播和压力迅速上升。

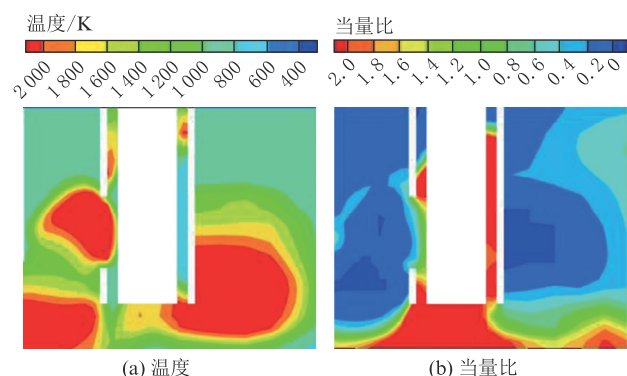


图11 单开口防护罩情况下,燃料喷射后第2.23 ms的火焰传播图像

Figure 11 Flame propagation for the single-opening shield at 2.23 ms after fuel injection

3.2 防护罩设计对点火延迟的影响

为了进一步评估天然气点火特性,引入3个点火延迟参数,分别是温度点火延迟(ignition delay by temperature, IDT)、压力点火延迟(ignition delay by pressure, IDP)、点火延迟差(ignition delay difference, IDD)。IDT即燃料开始喷射到燃烧室内任何一个单元温度首次到达2000 K所需要的时间,IDP即燃料喷射后燃烧室内整体压力上升100 kPa所需时间,IDD即IDT与IDP之间的差值。

图12展示了喷射角度和单开口防护罩角度皆为 0° 及GP温度为1400 K时,由喷射口2和3喷射出的天然气射流区域温度曲线。在到达IDT时,火焰停留在GP防护罩内,防护罩外没有火焰,也没有温升,喷射口2和3温度曲线相同。从图11可以看出,火焰首先从防护罩圆形开口端传出到水平对应喷射口。在IDT之后,受燃烧室内旋转气流影响,喷射口2周围天然气射流率先被引燃,温度出现上升,并高于喷射口3天然气射流。随后的火焰燃烧使燃烧室内的压力上升。在火焰传播时间达到IDP之后,喷射口2附近区域温度迅速上升并达到最高值,同时喷射口3区域温度开始上升,周围区域逐渐被引燃。

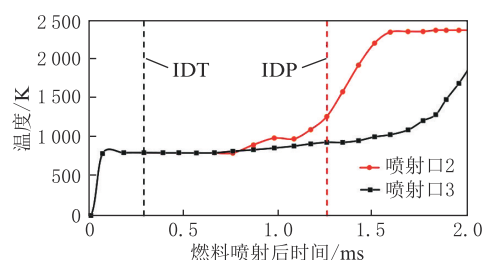
图12 喷射口2和3喷射出的燃料射流附近区域温度曲线 ($T_{GP}=1400\text{ K}$)

Figure 12 Temperature profiles near fuel jets from the injector holes 2 and 3 ($T_{GP}=1400\text{ K}$)

图13列出了GP温度为1200 K时不同防护罩方案的点火延迟时间。从图13中可以看出,单开口防护罩表现出优异的点火性能。这主要是由于在 0° 喷射角和 0° 防护罩开口角度下,单开口防护罩的开口圆心与喷射口位置水平对应。大量的燃料没有受到阻挡,涌入防护罩内部,促使天然气更快引燃和传播。其次是菱形开口,其独特的设计也展现出和单开口近似相同的点火性能。菱形防护罩左右两侧圆形开口有利于燃料的涌入,上下圆形开口有利于火焰传播,因此菱形开口IDD略优于单开口。然而对于方形开口,其IDP和IDD过高,在初期火焰传

播方面的性能较差。虽然方形开口阻碍了天然气的火焰传播,但是同时也有效防止了天然气直接喷射到 GP 表面,有效避免了天然气对 GP 的冷却作用,其 IDT 到达时间最短,有利于天然气早期的点燃。

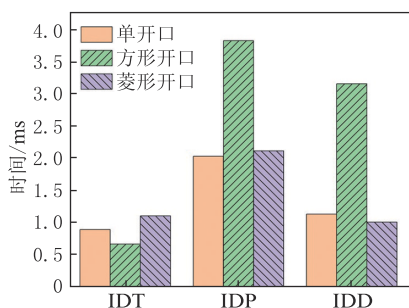


图 13 不同防护罩方案的点火延迟时间 ($T_{GP}=1200\text{ K}$)

Figure 13 Ignition delay time for different shield ($T_{GP}=1200\text{ K}$)

3.3 GP 温度对点火延迟的影响

图 14 展示了喷射角度和单开口防护罩角度皆为 0° 时,点火延迟时间随 GP 温度的变化。从图 14 中可以明显看出,随着温度升高,GP 点火性能不断提高,点火延迟时间不断缩短,天然气的火焰传播也更迅速,高温可以有效避免冷燃料注入对 GP 的冷却效应。然而当 GP 温度到达 1400 K 时点火延迟也到了极限,点火延迟时间不再随温度上升而改变,从而形成温度平台。同时,受到冷燃料注入的影响,快速点火并没有持续引发火焰的快速传播。相反,火焰传播速度降低,即在 $T_{GP}=1400\text{ K}$ 时 IDD 出现反弹现象,表明天然气点燃时刻与火焰传播到燃烧室之间的时间变长,火焰传播速率变慢。

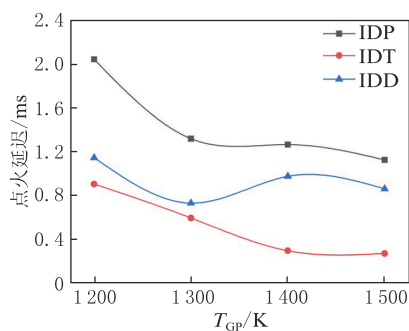


图 14 不同 GP 温度下的点火延迟时间

Figure 14 Ignition delay time at different GP temperatures

不同防护罩设计的温度点火延迟时间(IDT)受温度影响如图 15 所示。在 GP 温度为 1200 K 时,方形开口在引燃天然气方面展现出明显的优势。随着温度升高,温度点火延迟时间不断缩短。与单开口防护罩类似,多开口防护罩在 GP 温度超过 1400 K 时出现温度平台。此外,高温也可以缩小不同防护罩设计所带来的点火延迟差距。可以发现,高温使得单开

口和方形开口之间温度点火延迟时间曲线趋于重合,表明高温可以有效避免燃料对 GP 的冷却效应,实现快速点火,并能够弱化防护罩开口设计的影响。在 GP 温度达到 1500 K 时,IDT 都位于 0.3 ms 附近。但是,过高的温度设定会加速 GP 的损耗,进而带来使用寿命下降的问题。

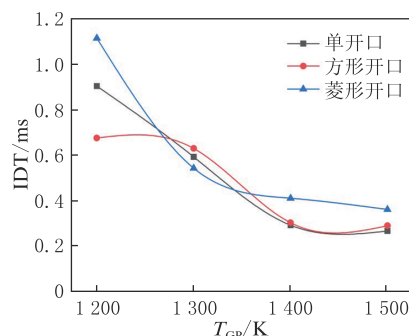


图 15 不同防护罩方案温度点火延迟时间随 GP 温度的变化

Figure 15 IDT change with GP temperature for different shield schemes

4 结论

(1) 采用数值模拟方法对不同电热塞(GP)防护罩开口设计(单开口、菱形多开口、方形多开口)和不同 GP 温度(1200 K 、 1300 K 、 1400 K 和 1500 K)下天然气点火特性的研究表明:GP 及其防护罩可以有效促进天然气引燃。天然气喷射后,率先在 GP 表面被引燃,随后从防护罩圆形开口和下端开口向外传播,促使燃烧室内压力和温度快速上升,进而提高发动机性能。

(2) 方形开口防护罩设计可有效助力天然气引燃。由于方形开口有效阻隔低温燃料对 GP 的冷却效应,使得其点火延迟时间 IDT 最优异。但方形开口防护罩同时也阻碍火焰的传播,其 IDP 和 IDD 在防护罩设计中也是最高的。

(3) 高温可以有效提高天然气点火性能。GP 温度升高,点火特征参数降低,点火延迟时间缩短,火焰传播速度加快。同时,GP 温度超过 1400 K 时都展示出近似相同的点火性能(IDT 约为 0.3 ms),可以忽略防护罩开口设计,但是也会带来 GP 使用寿命降低的风险。

参考文献:

- [1] BERGRO C, GOSNELL G, GIELEN D, et al. Pathways to net-zero emissions from aviation [J]. Nature Sustainability, 2023,6(4):404-414.
- [2] GRAVER B, RUTHERFORD D, ZHENG S. CO₂ emissions from commercial aviation:2013, 2018, and 2019[R/OL]. (2020-

- 10-01)[2025-01-03]. <https://coilink.org/20.500.12592/62jb1j>.
- [3] REITZ R D. Directions in internal combustion engine research [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(1): 1 - 8.
- [4] 陈伟泽, 张尊华, 龙焱祥, 等. 燃烧室结构与喷油策略对天然气-柴油反应活性控制压燃发动机的影响研究[J]. *内燃机工程*, 2022, 43(1): 39 - 47.
- CHEN W Z, ZHANG Z H, LONG Y X, et al. Effects of piston bowl geometry and injection strategy on natural gas-diesel reactivity controlled compression ignition engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2022, 43(1): 39 - 47.
- [5] 刘爱斌, 陈欣, 陈保东, 等. 液化天然气作为航空燃料的发展趋势及特点分析[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(6): 1281 - 1288.
- LIU A G, CHEN X, CHEN B D, et al. Development trend and characteristics of liquefied natural gas as the aviation fuel [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(6): 1281 - 1288.
- [6] 曹阳, 朱启天, 周逸帆, 等. 天然气发动机预燃室内混合气形成对点火射流的影响[J]. *内燃机工程*, 2022, 43(4): 31 - 39.
- CAO Y, ZHU Q T, ZHOU Y F, et al. Effects of mixture formation in pre-combustion chamber on ignition and combustion of a natural gas engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2022, 43(4): 31 - 39.
- [7] 魏立江, 周思源, 路秀伟, 等. 引燃策略对天然气直喷发动机射流燃烧及排放的影响[J]. *内燃机工程*, 2022, 43(5): 38 - 47.
- WEI L J, ZHOU S Y, LU X W, et al. Influence of ignition strategy on jet combustion and emissions of natural gas direct injection engines [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2022, 43(5): 38 - 47.
- [8] 刘国库, 曾文, 郑玮琳. 航空煤油/甲烷混合燃料航空发动机燃烧室燃烧与排放特性分析[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2022, 39(4): 10 - 18.
- LIU G K, ZENG W, ZHENG W L. Combustion and emission characteristics analysis of aero-engine combustor burning kerosene/methane [J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2022, 39(4): 10 - 18.
- [9] KORAKIANITIS T, NAMASIVAYAM A M, CROOKES R J. Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37(1): 89 - 112.
- [10] WEI L J, GENG P. A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance [J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 142: 264 - 278.
- [11] YAHYA OUI M. The use of LNG as aviation fuel: combustion and emission [C/OL]//13th International Energy Conversion Engineering Conference, July 27-29, 2015, Orlando, FL. New York: AIAA, 2015: AIAA 2015-3730 (2015-07-23) [2025-01-08]. DOI:10.2514/6.2015-3730.
- [12] 刘爱斌, 朱悦, 曾文, 等. 液化天然气与RP-3航空煤油燃烧特性对比试验[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2017, 34(4): 18 - 26.
- LIU A G, ZHU Y, ZENG W, et al. Comparison on combustion characteristics test for LNG and RP-3 kerosene [J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2017, 34(4): 18 - 26.
- [13] 李威, 张哲巍. 某航空发动机燃烧室天然气湿燃烧数值模拟研究[J]. *热能动力工程*, 2021, 36(5): 126 - 133.
- LI W, ZHANG Z D. Numerical investigation on a jet-engine combustor fueled by humidified natural gas [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2021, 36(5): 126 - 133.
- [14] 李敬瑞, 叶映, 罗伟凡, 等. 不同简化机理对高压直喷天然气船机燃烧和排放影响研究[J]. *热科学与技术*, 2023, 22(1): 1 - 12.
- LI J R, YE Y, LUO W F, et al. Influence of different simplification mechanisms on combustion and emission characteristics of a high-pressure direct-injection natural gas marine engine [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2023, 22(1): 1 - 12.
- [15] 王解托, 刘腾, 董晶瑾, 等. 燃气预喷对高压直喷天然气船机的影响研究[J]. *内燃机工程*, 2018, 39(5): 73 - 79.
- WANG J T, LIU T, DONG J J, et al. Influence of gas pre-injection strategies on combustion and emission characteristics of a pilot-ignited high-pressure direct-injection natural gas marine engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2018, 39(5): 73 - 79.
- [16] 李敬瑞, 王解托, 刘海峰, 等. 天然气后喷对高压直喷天然气船机燃烧和排放的影响研究[J]. *内燃机工程*, 2020, 41(6): 1 - 10.
- LI J R, WANG J T, LIU H F, et al. Influence of natural gas post-injection strategies on combustion and emissions of high pressure direct-injection marine natural gas engines [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2020, 41(6): 1 - 10.
- [17] CHOWN D, HABBAY C, WALLACE J S. An experimental investigation of combustion chamber design parameters for hot surface ignition [C]//Proceedings of the ASME 2014 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. New York: ASME, 2014: V001T03A018.
- [18] PAN K, WALLACE J S. Numerical studies of the ignition characteristics of a high-pressure gas jet in compression ignition engines with glow plug ignition assist: part 2 effects of multi-opening glow plug shields [J]. *International Journal of Engine Research*, 2018, 19(9): 977 - 1001.
- [19] WILLI M L, RICHARDS B G. Design and development of a direct injected, glow plug ignition-assisted, natural gas engine [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1995, 117(4): 799 - 803.
- [20] PAN K, WALLACE J S. Numerical studies of the ignition characteristics of a high-pressure gas jet in compression-ignition engines with glow plug ignition assist: part 1 operating condition study [J]. *International Journal of Engine Research*, 2017, 18(10): 1035 - 1054.
- [21] PAN K, WALLACE J S. A low temperature natural gas reaction mechanism for compression ignition engine application [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 202: 334 - 346.