

脉冲爆震发动机爆震管壁换热及冷却的实验

黄希桥, 李 洋, 熊月飞, 袁元园, 郑龙席
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 利用 Pt100 热电阻对脉冲爆震发动机(PDE)在有、无水冷状态下爆震管壁沿轴向的温度分布进行了实验研究. 实验结果发现爆震管同一轴向位置处, 爆震外管壁温度随爆震频率的增加而增加. 同一爆震频率时, 距推力壁位置越远, 爆震外管壁温度相对越高. 向爆震管换热系统中通入冷却水之后, 爆震外管壁温度有明显的降低, 并且爆震外管壁温度梯度也有一定的下降, 20 Hz 时加水冷之后, PDE 工作 16 s 时, 爆震外管壁温度最高可降低 106.5 °C.

关 键 词: 脉冲爆震发动机; 冷却; 温度; 频率; 换热

中图分类号: V231.22

文献标志码: A

Experiment on heat exchange and cooling of pulse detonation engine detonation tube wall

HUANG Xi-qiao, LI Yang, XIONG Yue-fei,
YUAN Yuan-yuan, ZHENG Long-xi

(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Experimental investigation for pulse detonation engine (PDE) tube wall temperature distribution along axial direction with or without cooling water using Pt100 thermal resistance was conducted. The results indicate that the outer detonation tube wall temperature increases as the engine's detonation frequency increases at the same axial location of detonation tube. At the same detonation frequency, the outer detonation tube wall temperature in the zone far away from the thrust wall is higher than that in the zone near the thrust wall. The outer detonation tube wall temperature and the temperature gradient reduces when the cooling water is filled into the detonation heat exchange system. The temperature of outer detonation tube wall could be decreased by 106.5 °C when the PDE works for 16 s at the detonation frequency of 20 Hz.

Key words: pulse detonation engine; cooling; temperature; frequency; heat exchange

随着脉冲爆震发动机(pulse detonation engine, PDE)工作机理研究的不断深入, PDE 爆震管壁温度对 PDE 性能的影响逐渐引起人们的关注. PDE 在高频状态下工作时由于周期性的高温、高压作用, 爆震室在进行爆震燃烧的过程中会产生大量的热^[1], 这部分热量将会通过爆震管壁

逐渐向外界传递, 其中一部分热量作用在爆震管壁上, 使其温度逐渐升高; 另外一部分热量则是通过自然对流和辐射作用耗散到大气中. 在高爆震频率和长时间工作状态下, 爆震管壁温度可以达到 800 °C 以上, 这对 PDE 工作的稳定性造成了一定的影响, 也对 PDE 爆震管壁材料提出了更高的

要求. 如果不采取任何冷却措施的话, 爆震管壁温度会出现飞升状态, 从而会诱发爆震管壁的机械疲劳和热疲劳问题^[2-3]. 在 PDE 工作的过程中, 如何降低爆震管壁的温度是 PDE 应用于工程所必须解决的问题之一.

关于如何获得爆震管壁温度分布以及如何降低爆震管壁温度, 国内外已有相关研究: Hoke 和 Bradley^[4]对爆震管壁温度分布进行了实验研究, 结果表明: 爆震频率、填充系数、点火延迟、当量比的变化都对 PDE 爆震管壁的热负荷产生影响, 其中当量比的影响最大, 爆震频率其次. 美国海军研究院 Fontenot 设计了一套利用冷却水对爆震管壁进行冷却换热的实验装置^[5], 实验结果表明: 爆震管在爆震频率为 20 Hz 水冷却状态下工作时, 爆震管外壁面热平衡温度在 100~150 °C 范围内, 并且距离爆震管出口越近的位置处, 爆震管壁的温度会越高. 美国格林研究中心的 Ajmani 等人对 PDE 在气膜冷却状态下爆震管壁的温度分布进行了实验研究, 发现对 PDE 采用气膜冷却可以降低爆震管壁热流量 20%~30%^[6]. 美国格林研究中心的 Naples 等人^[7-8]通过数值模拟和实验研究, 得出了一个爆震循环的平均热负荷, 并且设计了一种可以使缓慢火焰和爆震火焰有效传播的横流管, 利用两种模式火焰来加热流过横流管的水, 比较两种火焰的热负荷, 结果表明: 爆震火焰的热负荷比稳态缓慢火焰的热负荷低 20%~30%. 美国以燃料为冷却介质对爆震管壁进行冷却开展了大量的研究^[9-13], 但是对于上述实验研究, 并没有将无冷却状态下爆震管壁温度分布与冷却状态下的爆震管壁温度分布进行对比研究.

南京航空航天大学的宫继双、王杏涛等人^[14-15]进行了爆震管热负荷的测量计算, 采用两种换热模型, 在两种方式下, 得到爆震管的热负荷随频率的变化关系基本相同, 随着频率升高热负荷增大. 西北工业大学郑龙席等人^[16-18]将复杂的爆震过程进行简化, 利用简化之后的模型进行了 PDE 爆震管壁温度分布数值模拟, 数值模拟结果表明: 爆震管内壁面温度振荡上升, 外壁面温度连续上升. 同时进行了相关的实验研究, 并与数值模拟的结果进行了对比. 但是此研究仅仅局限于无任何冷却措施下爆震管壁的温度分布规律. 本文研究的目的是利用自行设计的爆震管换热器, 研究在水冷状态下爆震管壁温度分布情况, 并与无水冷却状态下爆震管壁温度分布进行对比, 来了解爆震管换热器的换热效果.

1 实验装置

爆震管换热实验装置示意图如图 1 所示, 由供油系统、供气系统、爆震点火及频率控制系统、混合室、点火段、爆震管换热器、测量系统以及数据采集系统等组成. 其中 PDE 总长为 1.55 m, 爆震管内径为 60 mm, 爆震管壁厚为 4 mm. 在点火段处安装火花塞, 由频率在 1~100 Hz 范围内连续可调的爆震点火及频率控制系统控制起爆. 爆震点火系统为一般汽车发动机用磁控高能无触点电子点火器, 点火频率用频率信号发生器控制, 点火能量小于 50 mJ. 实验采用汽油为燃料, 空气为氧化剂. 供油由相应的调节阀门控制并由相应的流量计来测定其流量.

在爆震管换热器距 PDE 出口分别为 0.315, 0.065 m 放置了两个压电式压力传感器用来测量爆震室内的压力, 型号为 CY-YD-205, 压力范围为 0~30 MPa, 自振频率大于 200 kHz, 绝缘电阻大于 $10^3 \Omega$, 测量误差为 $\pm 7.5 \text{ mV}/(10^5 \text{ Pa})$. 压电式压力测量系统由压电式压力传感器、专用连接电缆和单通道电荷放大器组成, 温度测量采用 Pt100 热电阻.

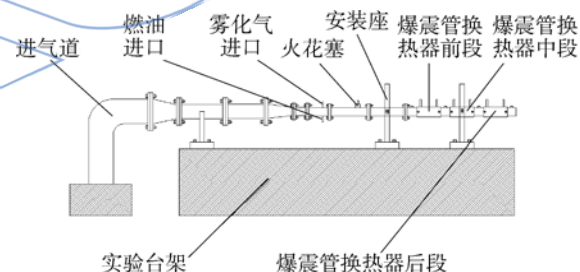


图 1 爆震管换热实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat exchange experimental device for detonation tube

爆震管换热器采用一种螺旋倒槽结构, 这样可以有效实现导流作用. 爆震管换热器由 3 段结构完全相同的螺旋倒槽组成, 在每一段螺旋倒槽外焊有与螺旋倒槽长度相同的外套管, 在每个外套管上布置两个热电阻安装座用来安装测量爆震外管壁温度的 Pt 热电阻. 另外在每个外套管上还布置有一个冷却介质进口和一个冷却介质出口, 冷却介质从进口流入, 经过螺旋倒槽然后从出口流出, 实现对爆震外管壁的冷却作用. 在冷却介质进、出口上装有热电阻用来测量冷却介质进、出口温度. 为了实现更有效的换热效果, 将螺旋倒槽的槽宽设计尽量宽, 在强度允许的情况下, 槽壁的厚

度尽可能小,这样既可以增加螺旋倒槽的截面积,又可以增强对爆震管壁的冷却效果.如图 2 所示为爆震管换热器结构示意图,图 3 所示为爆震管换热实验装置实物图.

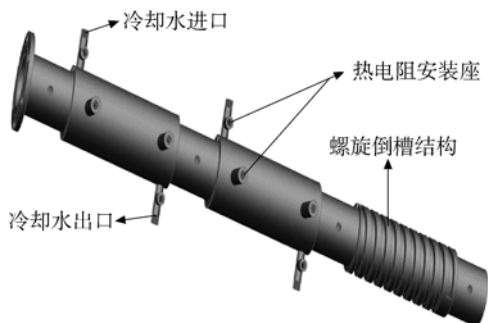


图 2 爆震管换热器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heat exchanger structure for detonation tube



图 3 爆震管换热实验装置实物图

Fig. 3 Photo of heat exchange experimental device for detonation tube

2 实验结果与分析

本文实验是在 5, 10, 15, 20 Hz 四种爆震频率下进行的,爆震管长度为 0.915 m,对 PDE 分别进行了无水冷状态和水冷状态下爆震外管壁温度分布的实验研究.在爆震管换热器距离推力壁 0.880, 1.170, 1.460 m 位置处分别放置用于测量爆震外管壁温度的 Pt 热电阻.对于上述 4 种爆震频率下的爆震外管壁无水冷时 90 s 之后停止点火.对于爆震外管壁在水冷状态下的实验,向换热段内通入冷却水.对于爆震频率为 5 Hz 的实验,PDE 工作 50 s 之后,换热段外壁面温度趋于热平衡状态,此时出口冷却水温度为 60 °C.对于爆震频率为 10, 15, 20 Hz 的实验,冷却水的流量与爆震频率为 5 Hz 的实验所采用的冷却水流量相同.在实验的过程

中,当出口冷却水温度达到 60 °C 时停止点火,并记录 PDE 工作时间.实验结果如图 4 所示.

2.1 无水冷实验

图 4~图 5 分别为 10, 20 Hz 两种爆震频率下距推力壁距离 $t=0.880, 1.170, 1.460$ m 位置处爆震外管壁温度变化曲线,可以看出,对于同一爆震管的不同轴向位置处,爆震外管壁温度宏观变化趋势基本相同.爆震外管壁温度是连续上升的,并且随着工作时间的增加,爆震外管壁温度上升速度趋于平缓.距离推力壁位置越远,爆震外管壁的温度会越高,原因是对于长度为 1.55 m 的 PDE,距离出口位置越近,形成的爆震波越充分,释热率越高,所以该位置处的温度会越高.

如图 6 所示,为爆震管距离推力壁为 1.460 m

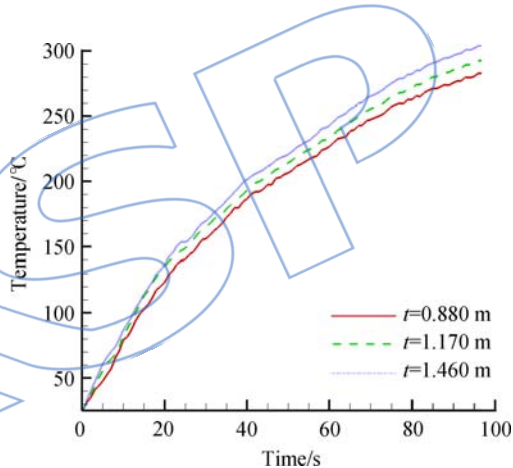


图 4 无水冷状态下 10 Hz 时距推力壁不同位置爆震外管壁温度变化曲线

Fig. 4 Outer detonation tube wall temperature change curves of different positions from thrust wall at 10 Hz without water cooling

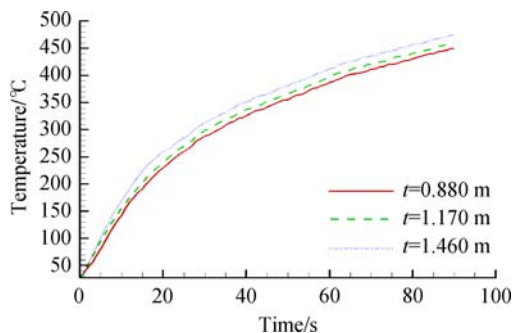


图 5 无水冷状态下 20 Hz 时距推力壁不同位置爆震外管壁温度变化曲线

Fig. 5 Outer detonation tube wall temperature change curves of different positions from thrust wall at 20 Hz without water cooling

位置处在无水冷状态下不同爆震频率时爆震外管壁温度变化曲线. 从中可以看出, 相同轴向位置处, 爆震外管壁温度随着爆震频率的增加而增加. 对于温度变化曲线上升段来说, 爆震频率越高, 曲线的斜率越大. 也就是说, 爆震频率越高, 爆震外管壁温度上升速度越快. 这是因为 PDE 的爆震频率越高, 单位时间内爆震燃烧的释热率会越大, 所以导致同样位置处, 爆震频率越高, 爆震外管壁温度会越高的现象.

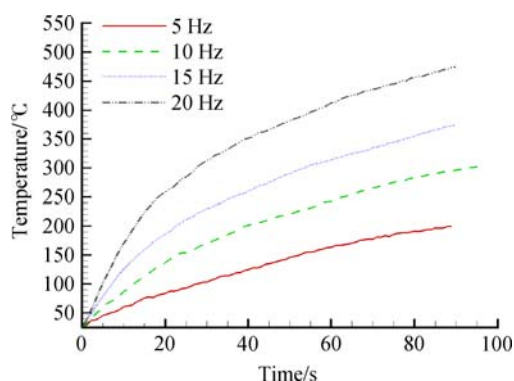


图 6 无水冷状态下距离推力壁 1.460 m 不同爆震频率爆震外管壁温度变化曲线

Fig. 6 Outer detonation tube wall temperature change curves of position of 1.460 m from thrust wall at different detonation frequencies without water cooling

2.2 水冷实验

如图 7~图 10 所示, 在水冷状态下, 随着时间的增加, 爆震外管壁温度不断增加, 并且增加的速度逐渐减慢. 在爆震管 3 个不同轴向位置处, 爆震外管壁温度变化趋势基本相同, 距离推力壁位置越远, 温度上升越快. 主要原因是越靠近爆震管出口处爆震会更充分一些; 其二是换热段所使用的冷却水从靠近推力壁位置处的进口流入, 然后从靠近爆震管出口位置处的出口流出, 由于冷却水进入换热段的前段流出之后已经被加热, 再流入换热段的中段时换热效果会降低, 同样从换热段中段流出的冷却水再次被加热, 继续流入换热段后段时换热效果会再次降低, 所以会导致距离推力壁较远位置爆震外管壁温度上升的速度比较快. 对于爆震频率为 5 Hz 的实验, 当出口冷却水温度达到 60 °C 时爆震外管壁温度趋于热平衡状态, 此时停止点火. 以此作为基准, 对于爆震频率为 10, 15, 20 Hz 的实验, 当出口冷却水温度达到 60 °C 时停止点火. 发现爆震频率为 10 Hz 时, PDE 工作时间为 37 s; 爆震频率为 15 Hz 时, PDE 工作

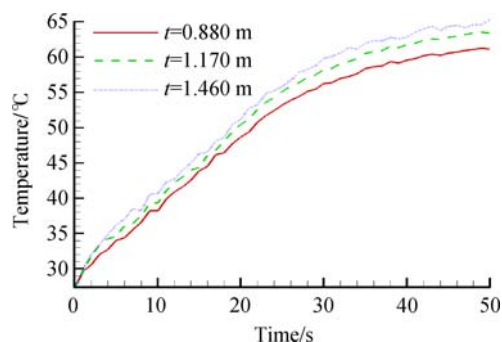


图 7 水冷状态下 5 Hz 时距推力壁不同位置爆震外管壁温度变化曲线

Fig. 7 Outer detonation tube wall temperature change curves of different positions from thrust wall at 5 Hz with water cooling

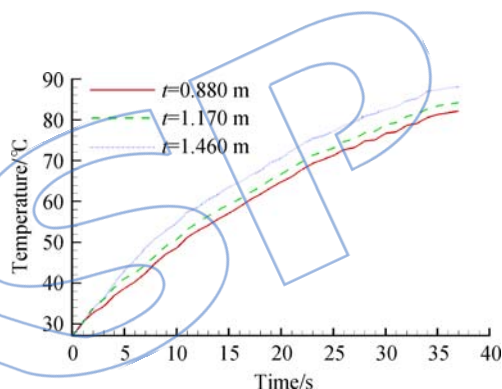


图 8 水冷状态下 10 Hz 时距推力壁不同位置爆震外管壁温度变化曲线

Fig. 8 Outer detonation tube wall temperature change curves of different positions from thrust wall at 10 Hz with water cooling

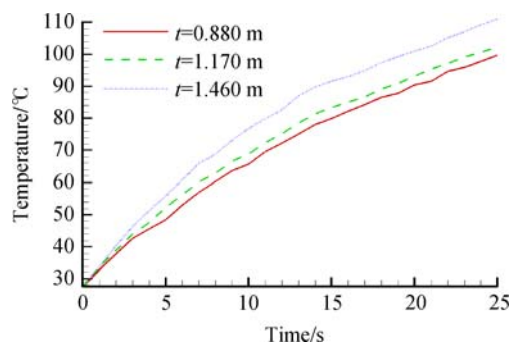


图 9 水冷状态下 15 Hz 时距推力壁不同位置爆震外管壁温度变化曲线

Fig. 9 Outer detonation tube wall temperature change curves of different positions from thrust wall at 15 Hz with water cooling

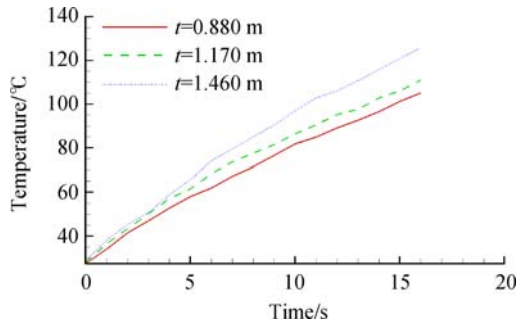


图 10 水冷状态下 20 Hz 时距推力壁不同位置爆震外管壁温度变化曲线

Fig. 10 Outer detonation tube wall temperature change curves of different positions from thrust wall at 20 Hz with water cooling

时间为 25 s;爆震频率为 20 Hz 时,PDE 工作时间为 16 s.从中可以看出,保持冷却水流量不变的情况下,使出口冷却水达到指定温度时,PDE 工作的时间随爆震频率的增加而减少,也就是说,爆震频率越高爆震外管壁对冷却水加热的效果越明显.但是对于爆震频率为 10,15,20 Hz 的实验爆震外管壁温度均未达到热平衡状态.根据换热计算可知,如果增加冷却水的流量不仅可以进一步降低爆震外管壁温度还可以使 PDE 工作时间得以延长.对于爆震频率为 20 Hz 的实验,如果将冷却水流量增加到原来的 4 倍,也就是将换热量增加到原来的 4 倍,预计当出口冷却水温度达到 60 °C 左右时,爆震外管壁温度也会达到热平衡状态.

2.3 水冷与无水冷实验对比

如图 11~图 14 为不同频率时距推力壁不同

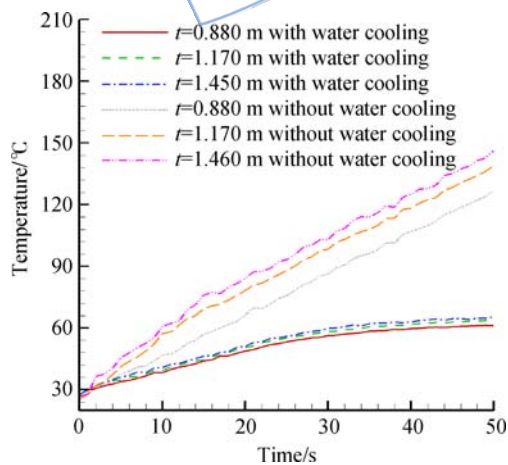


图 11 5 Hz 时距推力壁不同位置处爆震外管壁温度在有水冷与无水冷状态实验结果对比

Fig. 11 Comparison of experimental result with water cooling and without water cooling of different positions from thrust wall at 5 Hz

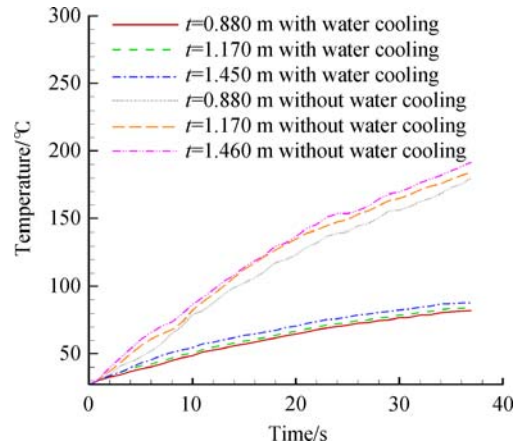


图 12 10 Hz 时距推力壁不同位置处爆震外管壁温度在有水冷与无水冷状态实验结果对比

Fig. 12 Comparison of experimental result with water cooling and without water cooling of different positions from thrust wall at 10 Hz

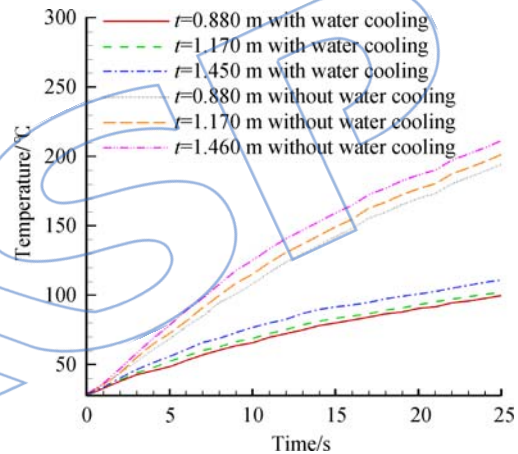


图 13 15 Hz 时距推力壁不同位置处爆震外管壁温度在有水冷与无水冷状态实验结果对比

Fig. 13 Comparison of experimental result with water cooling and without water cooling of different positions from thrust wall at 15 Hz

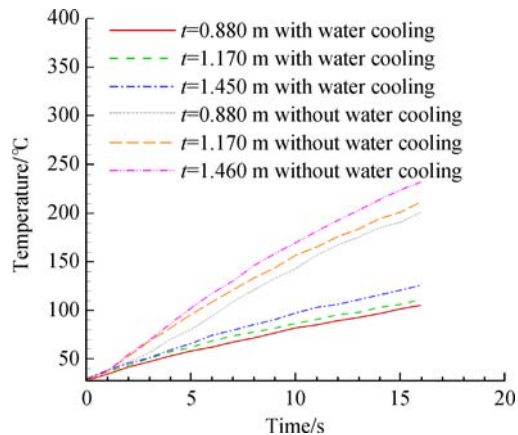


图 14 20 Hz 时距推力壁不同位置处爆震外管壁温度在有水冷与无水冷状态实验结果对比

Fig. 14 Comparison of experimental result with water cooling and without water cooling of different positions from thrust wall at 20 Hz

位置处在有水冷和无水冷状态下爆震外管壁温度变化曲线。可以看出,向爆震管换热器中通入冷却水之后,爆震外管壁温度分布得到了大大的改善,并且爆震外管壁温度上升速度也有了明显的降低。爆震频率为 5 Hz 加水冷之后,工作 50 s 时,爆震外管壁温度最多降低 80.9 °C;爆震频率为 10 Hz 加水冷之后,工作 37 s 时,爆震外管壁温度最多降低 103.7 °C;爆震频率为 15 Hz 加水冷之后,工作 25 s 时,爆震外管壁温度最多降低 100.3 °C;爆震频率为 20 Hz 加水冷之后,工作 16 s 时,爆震外管壁温度最多降低 106.5 °C。对于爆震频率为 10, 15, 20 Hz 的实验,加水冷之后爆震外管壁温度下降均在 100~110 °C 范围内,但是爆震频率越高, PDE 爆震外管壁降低相同的温度所需的时间越短。

3 结 论

PDE 在工作过程中将会产生大量的热,本文使用冷却水对爆震管壁进行冷却,得到水冷状态下爆震外管壁温度分布情况,并且与无水冷状态下的爆震外管壁温度分布进行了对比,得出如下结论:

1) PDE 无论是在水冷状态还是无水冷状态,对于同一爆震管、同一工况下的不同轴向位置处,爆震外管壁温度宏观变化趋势基本相同。爆震外管壁温度是连续上升的,并且随着工作时间的增加爆震外管壁温度上升速度趋于平缓。距离推力壁位置越远,爆震外管壁的温度会越高。相同轴向位置处,爆震外管壁温度随着爆震频率的增加而增加。对于温度变化曲线上升段来说,爆震频率越高,曲线的斜率越高。

2) 在水冷状态下,保持冷却水流量不变的情况下,使出口冷却水达到指定温度时, PDE 工作的时间随爆震频率的增加而减少,也就是说,爆震频率越高爆震管壁对冷却水加热的效果越明显。

3) 向爆震管换热器中通入冷却水之后,爆震管壁温度分布得到了大大的改善,并且爆震管壁温度上升速度也有了明显的降低。对于实验所测的爆震频率为 5, 10, 15, 20 Hz 四种工况来说,加冷却水之后爆震外管壁温度下降均在 100~110 °C 范围内,且爆震频率越高,爆震外管壁降低相同的温度所需的时间越短。

参考文献:

[1] 郑龙席,严传俊,范玮,等.脉冲爆震发动机模型机爆震室壁

温分布实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(4): 344-347.
ZHENG Longxi, YAN Chuanjun, FAN Wei, et al. Experimental investigation on outer wall temperature distribution of a pulse detonation engine model[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2003, 9(4): 344-347. (in Chinese)

[2] 严传俊,范玮.脉冲爆震发动机原理及关键技术[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2005: 277-280.

[3] 严传俊,范玮,黄希桥,等.新概念脉冲爆震发动机的探索性研究[J]. 自然科学进展, 2002, 12(10): 1021-1025.

YAN Chuanjun, FAN Wei, HUANG Xiqiao, et al. New concept of pulse detonation engine exploratory study[J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(10): 1021-1025. (in Chinese)

[4] Hoke H, Bradley R. Heat transfer and thermal management in a pulsed detonation engine[R]. AIAA-2003-852, 2003.

[5] Fontenot D G. Transient heat transfer properties in a pulse detonation combustor[D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2011.

[6] Ajmani K, Breisacher K J. Numerical and experimental studies of a film cooled pulsed detonation tube[R]. AIAA-2005-3509, 2005.

[7] Naples A G, Hoke J L. Study of heat loads from steady deflagration and pulsed detonation combustion[R]. AIAA-2010-956, 2010.

[8] Naples A G, Hoke J L. Numerical analysis of a pulse detonation cross flow heat load experiment[R]. AIAA-2011-584, 2011.

[9] Miser C L, King P I. PDE flash vaporization system for hydrocarbon fuel using thrust tube waste heat[R]. AIAA-2005-3511, 2005.

[10] Tucker K C, King P I. The use of a flash vaporization system with liquid hydrocarbon fuels in pulse detonation engine[R]. AIAA-2004-868, 2004.

[11] Helfrish T M, King P I. Effect of supercritical fuel injection on cycle performance of pulsed detonation engine[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(4): 748-755.

[12] Stevens C A, King P I. Fuel composition and coking analysis of endothermically heated hydrocarbon fuels for use in a pulsed detonation engine[R]. AIAA-2009-501, 2009.

[13] Ghosn L J, Zhu D. Thermal barrier and protective coating to improve the durability of a combustor under a pulse detonation engine environment[R]. AIAA-2007-2070, 2007.

[14] 宫继双,范育新,王家骅,等.爆震管壁面热负荷实验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(9): 1952-1958.

GONG Jishuang, FAN Yuxin, WANG Jiahua, et al. Experimental study on heat load of detonation tube[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 1952-1958. (in Chinese)

[15] 王杏涛,张靖周,谭晓茗.脉冲爆震燃烧室管壁冲击冷却效果的数值研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2515-2521.

WANG Xingtiao, ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming. Nu-

- merical simulation on impingement cooling characteristics of pulsed detonation tube[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2515-2521. (in Chinese)
- [16] 郑龙席, 严传俊, 李牧. 多循环 PDE 模型机爆震室壁温分布数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(5): 414-420. ZHENG Longxi, YAN Chuanjun, LI Mu. Numerical simulation on detonation chamber wall temperature distribution of a multi-cycle pulse detonation engine model[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(5): 414-420. (in Chinese)
- [17] 黄希桥, 陈乐, 严传俊, 等. 脉冲爆震发动机管壁废热加温燃油实验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1702-1707. HUANG Xiqiao, CHEN Le, YAN Chuanjun, et al. Experiment on heating kerosene with useless heat on the wall of pulse detonation engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1702-1707. (in Chinese)
- [18] 陈文娟, 张群, 范玮, 等. 吸气式脉冲爆震发动机壁温试验[J]. 推进技术, 2011, 32(2): 296-300. CHEN Wenjuan, ZHANG Qun, FAN Wei, et al. Experiment on wall temperature of an air-breathing pulse detonation engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(2): 296-300. (in Chinese)