

文章编号:1000-8055(2011)08-1702-06

脉冲爆震发动机管壁废热加温燃油实验

黄希桥, 陈 乐, 严传俊, 郑龙席, 王治武, 邱 华
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 在内径为 110 mm 的大管径脉冲爆震发动机模型上, 以煤油为燃料, 空气为氧化剂, 进行了脉冲爆震发动机不同爆震频率的管壁换热实验. 实验结果发现利用管壁废热加温燃油可以提高燃油的温度, 改善爆震性能并缩短爆燃到爆震的转换(DDT)距离, 也能够有效地降低发动机的管壁温度. 当发动机工作在 20 Hz 时, 管壁温度最大可以降低 94 °C.

关 键 词: 燃油温度; 废热; 脉冲爆震发动机; 加温实验; 爆燃到爆震的转换(DDT)

中图分类号: V231.22

文献标志码: A

Experiment on heating kerosene with useless heat on the wall of pulse detonation engine

HUANG Xi-qiao, CHEN Le, YAN Chuan-jun, ZHENG Long-xi,
WANG Zhi-wu, QIU Hua

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

Abstract: Using kerosene as fuel and air as oxidizer, experiments on heat exchanger between detonation tube and fuel were performed on a pulse detonation engine (PDE) with a diameter of 110 mm at different frequencies. It's found that the way of utilizing the waste heat produced by detonation tube can not only increase the temperature of fuel, but also improve PDE's operating performance and shorten the distance of deflagration to detonation transition (DDT). This heat exchanger process could also reduce the temperature of detonation tube. The temperature of detonation tube could decrease by 94 °C at the operating frequency of 20 Hz.

Key words: fuel temperature; useless heat; pulse detonation engine (PDE); heating experiment; deflagration to detonation transition (DDT)

脉冲爆震发动机(PDE)是一种利用脉冲式爆震波产生推力的发动机^[1-2]. 该发动机的工作机理已经在实验室得到验证, 但要在工程中得到应用仍需突破许多实际问题, 比如爆震燃烧室管壁冷却问题. 由于爆震燃烧温度比较高, 导致管壁温度急剧上升, 如果不对管壁采取任何冷却措施, 将大大限制发动机的工作寿命, 同时也会导致能量的

浪费. 如何降低管壁温度, 实现管壁废热能量的回收则是实现 PDE 工程化一个必须面对的问题.

从 PDE 的工作过程中发现, 爆震室在进行爆震燃烧的过程中要将产生的大量热量通过管壁耗散掉^[3], 这部分热量不仅对提高爆震性能无用甚至会使发动机过热而对其工作的寿命、稳定性等方面产生危害. 如果在燃油进入发动机之前, 先在

收稿日期:2010-08-25; 修订日期:2010-11-29

基金项目:西北工业大学基础研究基金(CJ201035)

作者简介:黄希桥(1973—), 女, 陕西武功人, 副教授, 博士, 研究方向:燃烧学, 脉冲爆震燃烧基础研究.

其尾部表面进行物理吸热,吸收大量无用以致有害的热量来加热燃油,这样既可以对爆震室壁面进行冷却,同时也可以提高燃油温度,使燃油能更好的雾化蒸发^[4]。本研究的目的是应用 PDE 爆震管壁散发的热量来开发一套能够自持的,稳定工作的换热系统。该研究如果得到突破,那么将对脉冲爆震发动机的工程应用具有一定的实际指导意义。

关于如何通过提高燃油温度改善 PDE 的性能,国内外已经有相关的研究报道:美国空军实验室曾研制了一套电加热的燃油加热系统,这套系统旨在通过提高燃油温度来改善燃油的雾化效果,从而提高爆震燃烧性能,实验表明通过提高燃油温度可以改善 PDE 的爆震性能,但由于该系统采用的是电加热,而且该系统的大小和效率也不适合于未来的脉冲爆震发动机的实际应用^[5]。于是美国空军实验室又利用管壁废热将碳氢燃料(如:JP-8,JP-7 等)加热到超临界状态^[6-7],研究燃油雾化效果对爆震性能的影响,但该研究只局限于对燃油雾化性能的研究,而没有研究燃油对管壁温度的影响。而且在利用管壁废热加热燃油的时候,发现产生了大量积炭,说明该换热器有一定的局限性。

如果不考虑燃油预热,单纯降低管壁温度,国外也有一些报道:NASA Glenn Research Center 的 Louis 等人采取热障涂层的防护措施模拟了爆震管壁温度及其应力的分布规律,结果发现该方法对改善爆震燃烧室管壁强度有一定的效果^[8];也有研究人员对于脉冲爆震燃烧室外表面采用分区冲击冷却、引射冷却以及气膜冷却等^[9-11]冷却方式进行了研究。但是这些冷却方法的研究仅仅

局限于从如何降低爆震室管壁温度的角度考虑,在实际的应用中,这些方法的采用必须借助于外部的辅助设备,对实际应用具有一定的局限性。

国内西北工业大学的涂洪妍等^[12]和南京航空航天大学宫继双等人^[13]也进行了利用管壁废热加温燃油的实验,并取得了一定的结论。

本文自行开发的利用管壁废热加热燃油的换热器,既能够降低发动机管壁温度,延长发动机的工作时间,也能够提高燃油温度,改善发动机的起爆和爆震性能。

1 实验装置

脉冲爆震发动机燃烧室管壁换热实验装置示意图如图 1 所示,由供油、供气系统,爆震点火及频率控制系统,混合室,点火段,爆震室,压力测量系统、推力测量系统以及数据采集系统等组成。模型实验器内径为 110 mm,爆震室(包括混合室)的头部为直连式进气方式,用来模拟吸气式发动机的进气状态,发动机尾端敞口。发动机总长 1.7 m,其中混合室长 0.22 m,点火段长 0.20 m。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。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。实验采用航空煤油为燃料,空气为氧化剂。供气、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。在推力壁处(位置 0)放置一压力传感器,沿轴向在距发动机尾部为 0.25 m 和 0.52 m 处分别放置了 2 个压力传感器来测量爆震室内的压力。压力用压电式压力传感器来测量,型号为 CY-YD-205。推力采用力传感

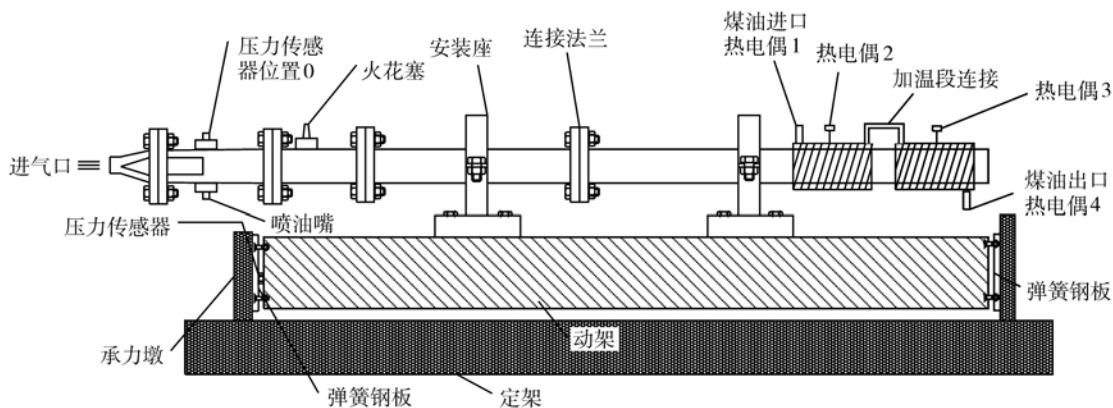


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

器直接测量法,选用具有零频响应的压电式力测量系统来完成.压电式力测量系统由瑞士 KISTLER 公司生产的压电式力传感器、专用连接电缆和单通道电荷放大器组成.为在混合室头部,供油系统采用气动喷嘴,这有利于燃料的雾化及其与空气的均匀掺混.在爆震室尾部的外壁带有两截长度各为 0.2 m 的换热器.

换热器采用了一种螺旋槽的结构,既可以有效降低管壁温度,也可以提高燃油温度,且燃油在换热器内的流动性也较好,流动阻力也较小.管壁换热器由结构完全一样的两段螺纹槽组成,为了增大换热流体与管壁的接触面积,实现有效换热,螺旋槽宽度尽可能的宽,槽壁在强度允许的情况下尽可能的窄.在实验加工中,槽宽 12 mm,槽壁 4 mm.为了避免换热器过长导致换热流体全部蒸发形成堵塞现象,换热器分两部分,可实现两路流体同时换热,这样既可以增加管壁冷区效果,也可以增加燃油的流量,保证发动机在高频下的大流量供应,实现发动机的自维持状态.为了提高换热器的实际工程应用能力,使得换热系统和发动机的工作保持自维持状态,实验中换热流体采用的是爆震燃烧所采用的燃料——煤油.换热流体的流量就是发动机当前工作下的燃料流量,即从油箱来的燃油不是直接通入发动机,而是通入换热器内,然后再由换热器进入发动机燃油喷嘴.

为了监测燃油经过换热系统的升温情况,实验分别在燃油入口和出口装有热电偶,用来监测燃油在换热前后的温度.图 2 给出了换热结构示意图.图 3 给出了实验换热测试系统的实物图.实验在测量煤油换热前后温度的同时,还测量两个换热器中间位置爆震管外壁温度,用以对比换热前后管壁温度.

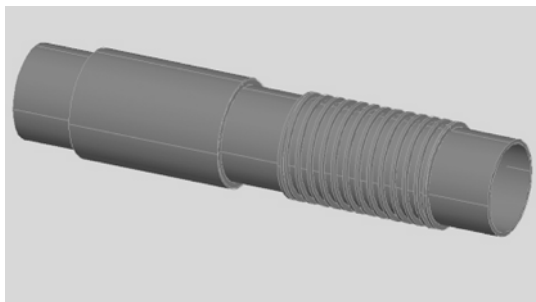


图2 爆震室管壁废热加热燃油结构三维模型
Fig. 2 Three-dimensional geometry of pulse detonation engine heat exchanger

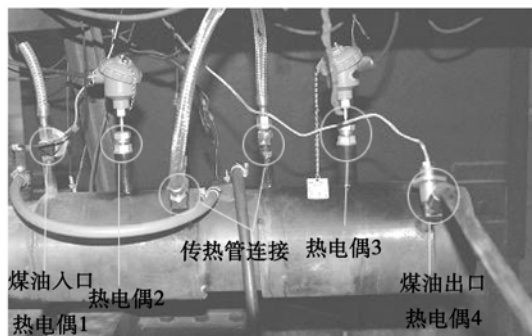


图3 换热器温度监测装置实物图
Fig. 3 Photograph of heat-exchanger for temperature measurement

2 实验结果与分析

2.1 换热流体升温实验

加温管壁由两段组成,长度均为 200 mm,总体加温长度为 400 mm.

在用航空煤油作为冷却流体进行实验过程中,首先对后面 200 mm 换热器使用煤油冷却,接着对后面整体两段使用煤油冷却,当煤油达到 150 °C 时停止实验,这是因为在以前做的实验中,已经得出结论:当煤油温度为 150 °C 时,容易起爆,爆震效果也比较好,有利于缩短 DDT 距离^[14].图 4 给出了爆震频率为 10 Hz 时分别使用 200, 400 mm 换热器进行加温的出口煤油温度曲线变化图:开始工作时煤油温度均从 40 °C 开始加温(如图 4).实验发现使用换热器长度为 400 mm 加温时,同样把煤油加温到 150 °C 只要 67 s,而 200 mm 时则需要大概 140 s.这表明当煤油温度

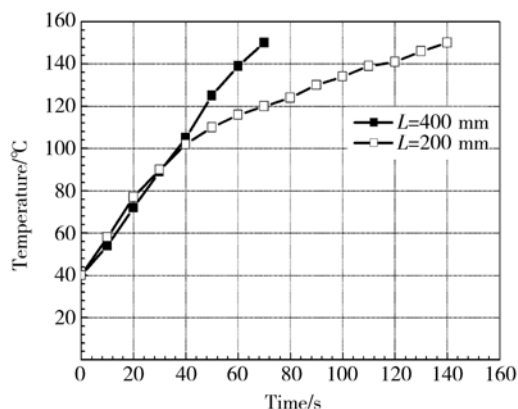


图4 爆震频率为 10 Hz,不同换热器长度下煤油温度变化

Fig. 4 Temperature of kerosene versus length of heat-exchanger at operating frequency of 10 Hz

到达同样的温度(150°C)时,换热长度增加 1 倍,加温时间大概缩短 1 倍. 根据此结论可以推算当发动机主燃烧室长度为 800 mm 的外壁全部加有换热器时,那么当发动机工作在 10 Hz 时只需要 35 s 就可以加温到 150°C .

实验也测量了当爆震频率分别为 $15, 20\text{ Hz}$ 时冷却煤油的温升实验. 实验开始时,煤油温度同样也是从 40°C 开始加温到 150°C 停止,实验观察不同爆震频率下冷却流体从同一温度开始加温到同一个温度时所需要的时间. 即发动机工作频率不同,冷却流体的流量也不同,换热流体的流量等于当前发动机实际工作的燃油流量,但实验时保证换热流体在加温前后温度相同,以此来对比不同爆震频率下的换热效果. 图 5 给出了三种不同工作频率下换热器出口处煤油温度变化曲线. 从图中可以发现 10 Hz 时煤油加热到 150°C 需要约 70 s ,而 15 Hz 需要 60 s , 20 Hz 只需要 50 s ,即爆震频率提升 5 Hz ,加温时间相应缩短 10 s . 这样,如果 800 mm 的爆震室外壁全部加有换热器时,工作在 10 Hz 时只需要 35 s 就可以加温到 150°C , 15 Hz 则只需要 30 s 左右, 20 Hz 需要 25 s ,由此推断出 40 Hz 时只需要 5 s 的工作时间,就可以将燃油温度提升到 150°C . 这说明伴随着频率升高,相应频率煤油要到达 150°C ,所需时间越来越短,这使得在高频率下,短时间内将燃料(煤油)加温到有利于爆震波形成的温度成为可能.

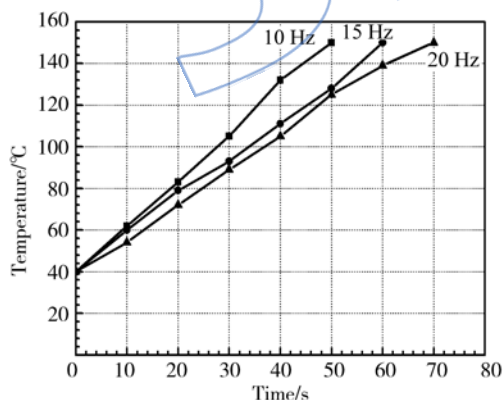


图 5 三种不同工作频率下的煤油出口温度变化曲线
Fig. 5 Temperature of heated kerosene versus time at three frequencies

从总的放热量来看,频率越高,放热量越大,加温效率高,升高到同一温度时间较短. 表明如果要实现发动机在工作过程中需要短时间提高燃油温度,提高起爆性能,实现快速起动,只要增加换

热长度,提高发动机的工作频率就可以实现.

2.2 加冷却流体前后燃烧室管壁温度的实验测试

由于脉冲爆震燃烧比传统的等压燃烧的火焰温度高,再加上发动机工作时,高温燃气是脉冲式流过发动机,所以对爆震发动机的结构材料强度要求就比一般发动机结构材料耐温性能更苛刻. 如果能有效地冷却发动机管壁,降低其表面温度,则可以有效地解决发动机材料的热疲劳,降低 PDE 对发动机材料的要求. 从前面的燃油冷却实验发现给爆震管壁加冷却流体可以有效地提高燃油温度,也就是说可以对管壁起到冷却的作用,改善发动机燃烧室管壁的热强度问题.

在实验中首先利用热电偶测量不同频率下,使用煤油冷却的爆震管壁温度,然后测量同频率下,没有煤油冷却,相同时间下管壁的温度变化情况,与前者进行比较,来分析煤油对发动机管壁材料的冷却效果.

图 6、图 7 分别绘出当爆震频率分别为 $10, 15, 20\text{ Hz}$ 时前后管壁在冷却前后温度曲线. 从图中很容易看出,冷却前后管壁温度都有很大的变化,冷却后管壁温度明显降低. 当爆震频率分别为 $10, 15, 20\text{ Hz}$ 时,发动机工作到 60 s 时前换热器中心处爆震管壁温度在未加燃油冷却前的温度分别为 $136, 181, 193^{\circ}\text{C}$,加燃油冷却后的温度分别为 $99, 98, 99^{\circ}\text{C}$,也就是说前管壁加燃油冷却前后,管壁温度分别降低了 $37, 83, 94^{\circ}\text{C}$. 实验发现当爆震频率较高时,冷却较明显,这是因为爆震频率越高,冷却燃油的流量相应增加,所以从管壁带走的热量就越大,冷却管壁的效果就越明显.

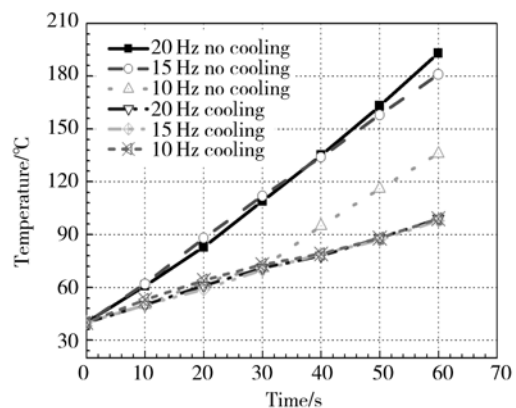


图 6 前爆震管壁冷却前后温度对比曲线
Fig. 6 Temperature profile of the former detonation tube wall with cooling and no cooling

图7给出了当爆震频率分别为10, 15, 20 Hz时, 后换热器爆震管壁在冷却前后温度曲线。和前管壁具有类似的实验结果, 管壁温度都是在较高工作频率下就有较高的温升梯度。当爆震频率分别为10, 15, 20 Hz时, 发动机工作到60 s时, 后管壁温度在未加燃油冷却前的温度分别为163, 212, 237 °C, 加燃油冷却后的温度分别为131, 140, 145 °C, 后管壁在加燃油冷却前后, 壁面温度分别降低了32, 72, 92 °C, 管壁降低温差也是随着工作时间的增加而增加。但是唯一和前管壁不同的一点是后管壁在冷却前后管壁温度都比前管壁高, 这是因为在后管壁处爆震波发展比较充分, 爆震燃烧的火焰温度比前管壁处高, 所以在后换热器处, 管壁从爆震燃气吸收的热量要比前换热器处高。表现在实验中就是后换热器管壁温度要比前面的高。另外一个原因是, 冷却燃油的流向是从前换热器流出再进入后换热器进行冷却, 所以进入后换热器的燃油温度本身就比前换热器内的燃油起始温度高, 所以当燃油流到后换热器的时候, 它的换热能力就相应地降低了, 所以从图6和图7发现, 后换热器对管壁温度的降低能力就较差一些。

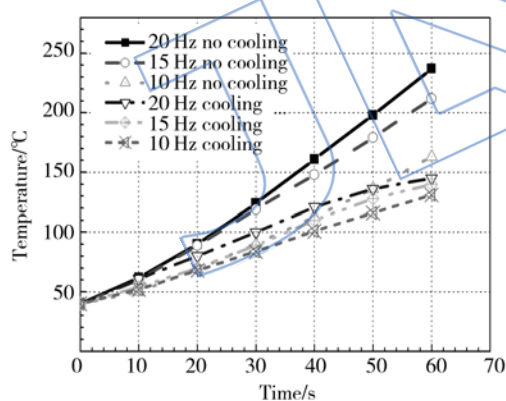


图7 后爆震管壁冷却前后温度曲线

Fig. 7 Temperature profile of the rear detonation tube wall with cooling and no cooling

从图6、图7可以看出, 爆震管壁温度随着工作时间的增加在继续上升, 这说明发动机管壁温度并没有达到热平衡。但是在达到热平衡前, 在加冷却流体之前, 不管是前管壁还是后管壁, 发动机爆震频率越高, 管壁温度上升就越剧烈; 但是在冷却流体之后, 爆震频率越高, 冷却效果就越明显, 即管壁温度降低就越大, 表明实验中采用发动机工作时的煤油降低管壁温度, 对管壁有很好的冷

却作用。

3 结 论

1) 自行设计加工了一套利用爆震管壁废热预热燃油的换热器, 实验证明该换热器可成功实现爆震管壁换热。

2) 将相同初始温度、相同供给频率的煤油加温到相同的温度, 频率越高, 加温所需要的时间越短。这使得在高频率下, 短时间内将燃料(煤油)加温到有利于爆震波形成的温度成为可能。

3) 实验采用不同换热长度的换热器对煤油加温, 换热器长度较长, 把燃油加热到同样温度所需的时间就较短。

4) 实验发现在爆震燃烧室外壁加换热流体前后管壁温度有明显的降低。爆震频率越高, 工作时间越长, 管壁温度降低越大, 当工作频率为20 Hz时, 管壁温度最大可以降低94 °C。

参考文献:

- [1] 严传俊, 范玮, 黄希桥, 等. 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.
- [2] 严传俊, 范玮, 黄希桥, 等. 现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)
- [3] 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]. 燃料科学与技术, 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)
- [4] Miser C L, King P I. PDE flash vaporization system for hydrocarbon fuel using thrust tube waste heat[R]. AIAA Paper 2005-3511, 2005.
- [5] Tucker K C, King P I. The use of a flash vaporization system with liquid hydrocarbon fuels in pulse detonation engine[R]. AIAA Paper 2004-868, 2004.
- [6] Helfrich 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.
- [7] 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 Paper 2009-501, 2009.
- [8] Ghosn L J, Zhu D. Thermal barrier and protective coating to improve the durability of a combustor under a pulse det-

- onation engine environment[R]. AIAA Paper 2007-2070, 2007.
- [9] Ajmani K, Breisacher K J. Qualitative study of cooling methods for a pulse detonation engine[R]. Lake Buena Vista, Florida: 51st JANNAF Propulsion Meeting, 2002.
- [10] Ajmani K, Breisacher K J. Multi-cycle analysis of an ejector-cooled pulse detonation device[R]. AIAA Paper 2004-3915, 2004.
- [11] Ajmani K, Breisacher K J. Numerical and experimental studies of a film cooled pulsed detonation tube[R]. AIAA Paper 2005-3509, 2005.
- [12] 涂洪妍, 范玮. 基于主动冷却的脉冲爆震火箭发动机试验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2010.
- TU Hongyan, FAN Wei. Experiment of pulse detonation rocket engines based on active cooling[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2010. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 陈乐, 黄希桥, 严传俊, 等. 燃油温度对 PDE 性能的影响实验[J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(5): 649-654.
- CHEN Le, HUANG Xiqiao, YAN Chuanjun, et al. Exploring Experimentally effect of kerosene temperature on performance of pulse detonation engine (PDE)[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(5): 649-654. (in Chinese)