

# 两步起爆过程中爆震波衍射特性研究

曾 昊<sup>1</sup>, 何立明<sup>1</sup>, 章雄伟<sup>1</sup>, 苏建勇<sup>2</sup>, 赵华<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军飞行试验训练基地, 河北 沧州 061000)

**摘 要:**为了研究两步爆震起爆过程,通过数值模拟研究了填充条件和预爆管出口伸进扩张过渡段的长度  $L$  对爆震波衍射特性的影响规律。结果表明: $L$  越小扩张过渡段对爆震起爆的加强作用越明显,但预爆管与扩张过渡段间的渐扩通道对爆震波回传的阻滞作用越弱; $L$  越大,则结果相反。因此,应选择合适的  $L$  使扩张过渡段与渐扩通道对爆震波传播的增强作用达到最大。同时,在  $L = 35 \text{ mm}$  时,爆震波能够较早地与扩张过渡段壁面作用形成高温、高压区,从而加强了爆震波的传播,且预爆管与扩张过渡段之间的渐扩通道能对回传的爆震形成一定的阻滞作用。

**关键词:**脉冲爆震发动机;两步爆震起爆;预爆管;衍射特性

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2010.05.002

**中图分类号:** V23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)05-0006-05

爆震波从预爆管到自由空间的传递过程称为爆震波的衍射(Diffraction of Detonation)<sup>[1]</sup>。其传递存在 2 种模式:亚临界传递与超临界传递,只有超临界传递时才能成功传递爆震波,亚临界传递时爆震波将衰变为燃烧波,在 PDE(Pulse Detonation Engine)中预爆管与主爆震管的尺寸相差较大,管间的爆震波传递与爆震波的衍射相似。普惠公司和波音公司在美国海军研究办公室的资助下<sup>[2]</sup>,2004 年推出了 ITR-2,单管工作频率可以达到 80 Hz。2004 年法国的一项无阀吸气式脉冲爆震发动机研究也使用起爆管爆震点火技术,实现了多循环稳定工作<sup>[3]</sup>。2007 年,德克萨斯大学(阿灵顿)和台湾成功大学合作给出了利用起爆管起爆的两相脉冲爆震燃烧室方案<sup>[4]</sup>。

现有的实验装置主要研究预爆管的临界直径、主爆震管的直径、扩张过渡段扩张角、预爆管出口扩张角以及可燃混合物成分等因素对爆震波传播特性的影响规律<sup>[5-7]</sup>。事实上预爆管出口伸进扩张过渡段长度对爆震波由预爆管向主爆震管传播也有着非常重要的影响,使预爆管引爆主爆震管的难易程度有所不同,为探寻其中的规律,有必要对预爆管出口在扩张过渡段不同位置的情况进行研究,针对这一问题,本文设计了一种脉冲爆震发动机两步起爆装置。

## 1 物理模型和计算方法

### 1.1 物理模型

本文设计的两步爆震起爆装置主要包括:预爆管油气混合器(预混合器)、预爆管、主爆震管油气混合器(主混合器)、扩张过渡段、主爆震管等 5 部分。

计算模型见图 1,预爆管点火区宽 5 mm,位于爆震管的最左侧,点火起爆条件为  $P = 2 \text{ MPa}$ ,  $T = 2000 \text{ K}$ 。预爆管的直径为 30 mm;主爆震管直径为 90 mm;采用四边形结构网格,轴向间距 0.5 mm,径向间距 1 mm,

\* 收稿日期:2010-04-01

基金项目:空军工程大学学术基金资助项目(XS0901009)

作者简介:曾昊(1983-),男,新疆乌鲁木齐人,博士生,主要从事脉冲爆震发动机关键技术研究;

E-mail: zenghao693@gmail.com

何立明(1959-),男,浙江上虞人,教授,博士生导师,主要从事飞机推进系统气动热力理论与工程等研究。

并在点火区进行网格加密。判断爆震成功转换的标准是爆震波传至主爆震管时的爆震波峰值压力和爆震波传播速度<sup>[8]</sup>。化学恰当比的氢气、空气混合气中的爆震波速度是 1 971 m/s,爆震波峰值压力是 1.57 MPa。整个计算域采用四边形结构网格,网格单元数量为 91 万。

本文选用通用有限速率模型。该模型是基于组分质量分数输运方程的解,采用所定义的化学反应机制,对化学反应进行模拟。反应速度是以源项的形式出现在组分输运方程中的,湍流模型选用 Spalart - Allmaras 模型。

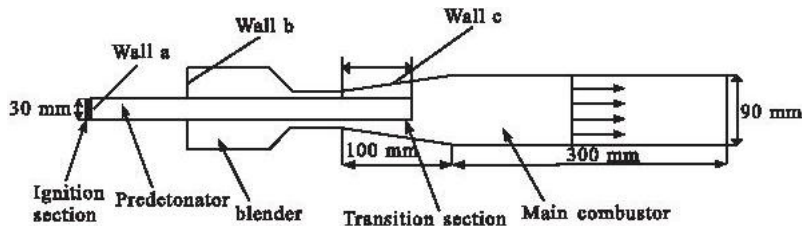


图 1 两步爆震起爆物理模型

Fig.1 Physical model for computation

### 1.2 计算方法验证

为了验证计算方法的准确性,以爆震波在爆震管内的传播与回传过程模拟为算例。爆震管长 2 110 mm,直径 64 mm。为了节省计算资源,采用轴对称模型,只计算一半的计算区域。为了克服确定喷管出口边界条件的困难,增加了 1 个外区。建立的爆震管计算模型见图 2。图 3 是不同时刻爆震管轴线上的压力分布。

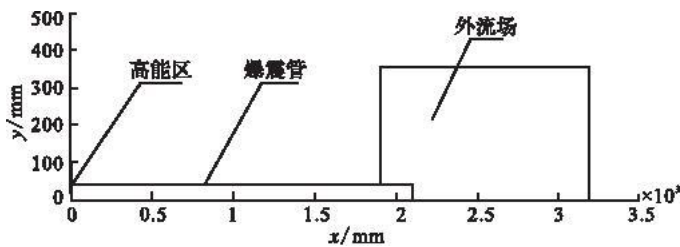


图 2 爆震管数值计算模型示意图

Fig.2 Detonation tube model sketch map

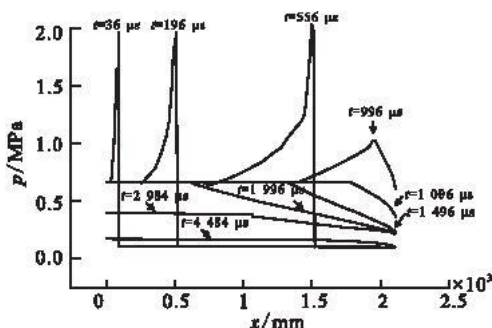


图 3 不同时刻爆震管轴线上的压力分布

Fig.3 Pressure distribution along axis of detonation tube

将计算结果与同等条件下 STANJAN 软件计算值<sup>[8]</sup>和实验值<sup>[9]</sup>相比较,结果见表 1。

表 1 爆震波参数模拟值与实验值的对比

Tab.1 Comparison between experimental and numerical simulation results

参数	模拟值	STANJAN	实验值
$p/\text{MPa}$	1.92	1.897	—
$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2 752.8	2 841.2	2 819

从表 1 可以看出,FLUENT 的计算结果与 STANJAN 软件计算值与实验值差别不大,证明了数值模拟方法的正确性。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 两步起爆过程爆震波的衍射特性

1) 预爆管内充填当量比 1.0 的氢气 - 氧气混合气,扩张过渡段、主爆震管及混合器内填充空气,预爆管伸进扩张过渡段  $L = 35 \text{ mm}$ 。图 4 是爆震波进入扩张过渡段时压力变化的详细图解。

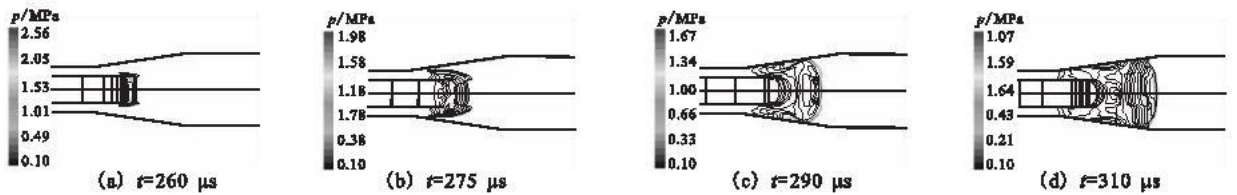
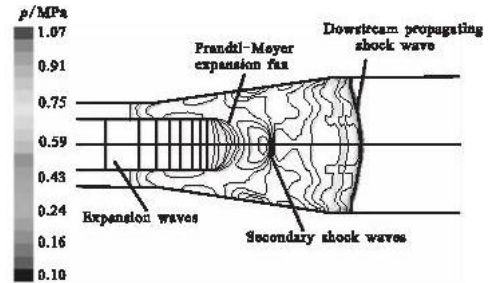


图4 爆震波衍射过程中的压力等值线图

Fig. 4 Pressure Distribution in process of detonation diffraction

图4(a)是 $t = 260 \mu\text{s}$ 时爆震波传至预爆管出口的情况,爆震波锋面开始弯曲,图4(b)是 $t = 275 \mu\text{s}$ 时爆震波锋面边缘处受到膨胀波削弱的情形,图4(c)是 $t = 290 \mu\text{s}$ 时的爆震波传播情形,由图可以看出虽然在管壁处产生了高温、高压区,但无法改变爆震波传播失败的趋势。图4(d)是 $t = 310 \mu\text{s}$ 时管内的压力分布,由图可知,爆震波传播失败。图5表明,爆震波没有成功地从预爆管传至主爆震管,其在进入装有空气的主爆震管后开始衰变,产生了二次激波,Prandal - Meyer膨胀波扇,压力等值线显示爆震波传播失败。

图5 爆震波衍射过程中 $t = 330 \mu\text{s}$ 的压力等值线图Fig. 5  $t = 330 \mu\text{s}$  Pressure Distribution

2) 预爆管内充填当量比为1.0的氢气和氧气混合气,主混合器与主爆震管内填充质量比为 $\text{H}_2 : \text{O}_2 : \text{N}_2 = 1 : 0.5 : 1.88$ 混合气,预爆管伸进扩张过渡段 $L = 35 \text{ mm}$ 。图6是爆震波由预爆管传入主爆震管的压力云图。

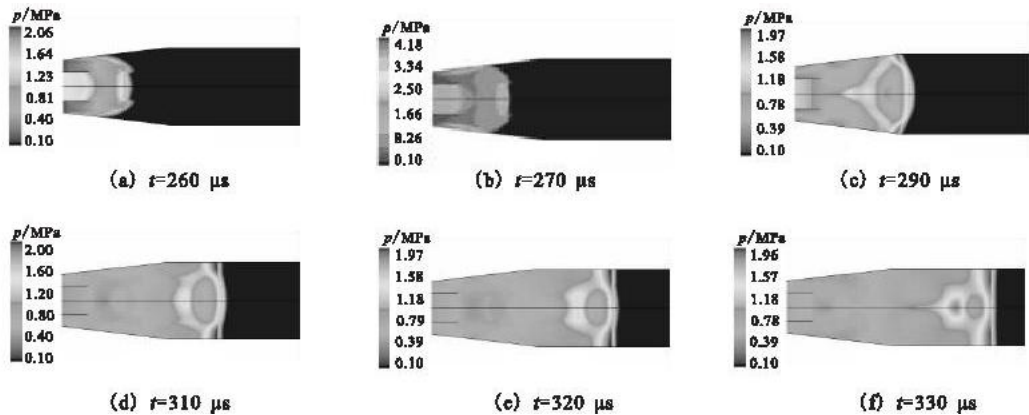


图6 爆震波传播过程中的压力云图

Fig. 6 Temporal Evolution of Pressure Distribution

由图6可以看出,爆震波由预爆管出口经过衍射过程,成功传至主爆震管。图6(a)表示 $t = 260 \mu\text{s}$ 时爆震波中心克服了膨胀波的削弱作用,继续向主爆震管传播。图6(b)说明 $t = 270 \mu\text{s}$ 时爆震波与扩张过渡段壁面接触,并产生了高温、高压区。图6(c)表示 $t = 290 \mu\text{s}$ 时爆震波由扩张过渡段进入主爆震管,形成球形爆震波面,壁面附近的高温、高压区增强了爆震波的传播。图6(d)表示 $t = 310 \mu\text{s}$ 时爆震波锋面由球形转变为平面,并能够自维持住,计算的爆震波传播速度为 $1965 \text{ m/s}$ ,爆震波峰值压力是 $1.91 \text{ MPa}$ ,爆震波成功传播进入主爆震管。

## 2.2 预爆管出口伸进扩张过渡段的长度对爆震波衍射特性的影响

预爆管出口伸进扩张过渡段中的长度会对爆震波的传播过程产生影响,使预爆管引爆主爆震管的难易程度有所不同,为探寻其中的规律,有必要对预爆管出口在扩张过渡段不同位置的情况进行数值模拟。分别模拟预爆管出口伸进扩张过渡段长度 $L = 0 \text{ mm}, 35 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 75 \text{ mm}, 100 \text{ mm}$ 时爆震波的传播情况。在这5种情况下,预爆管都充填易起爆的当量比为1.0的氢气-氧气混合气,主爆震管、主混合器与扩张过渡段内都充填 $\text{H}_2 : \text{O}_2 : \text{N}_2 = 1 : 0.5 : 1.88$ 混合气。

图 7 是上述 5 种情况的主混合器左壁面的压力变化比较。由图可以看出,  $L = 35 \text{ mm}$  时主混合器壁面达到的压力峰值要低于  $L = 0$  时达到的压力峰值, 并且随着  $L$  的增大逐步降低, 这说明预爆管与扩张过渡段间的渐扩通道对回传爆震形成的阻滞作用是随着预爆管出口伸进扩张过渡段长度  $L$  的增大而加强的。图 7 中预爆管出口伸进扩张过渡段的长度越大, 爆震波到达混合器左端壁面的时间越滞后。

图 8 是在 5 种情况下扩张过渡段壁面 (Wallc 的上壁面中点) 处的压力 - 时间曲线比较图。由图可以看出 5 种情况下的扩张过渡段壁面处压力峰值相差较大, 当预爆管出口在扩张过渡段中的伸进量为  $0 \text{ mm}$ 、 $35 \text{ mm}$ 、 $50 \text{ mm}$  时, 峰值到达壁面的时间相差不大, 均为起爆后  $t = 130 \mu\text{s}$  左右, 这是因为所选的考察点都位于预爆管出口端面之后。但伸进量为  $75 \text{ mm}$ 、 $100 \text{ mm}$  时, 压力峰值到达的时间差别明显, 伸进量为  $L = 75 \text{ mm}$  时, 压力峰值约在  $t = 155 \mu\text{s}$  时达到, 伸进量  $L = 100 \text{ mm}$  时, 压力峰值约在  $t = 175 \mu\text{s}$  达到。这是因为预爆管出口伸进量 ( $L > 50 \text{ mm}$ ) 越长, 爆震波回传距离越长, 回传时间自然也要相应滞后。观察图 8 的压力峰值还可以看出, 当  $L = 35 \text{ mm}$  时, 压力峰值最大, 明显高于其他 4 种情况。这说明当  $L = 35 \text{ mm}$  时, 爆震得到加强的程度相对较大, 有利于爆震波的传播和引爆扩张过渡段和主爆震管内的氢气 - 空气混合物。

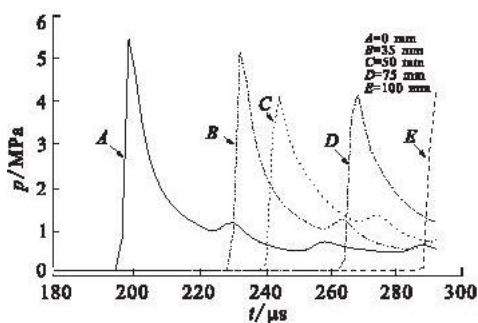


图 7 混合器左壁面的压力 - 时间曲线比较

Fig. 7 Comparison of blender head - end pressure

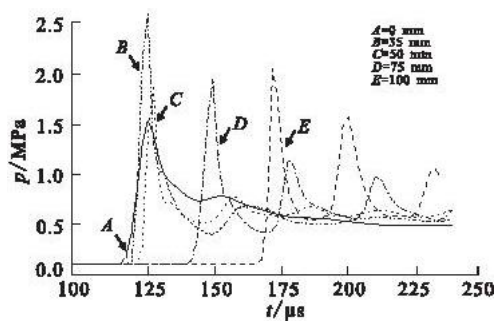


图 8 扩张过渡段壁面压力 - 时间曲线比较

Fig. 8 Comparison of transition section wall pressure

### 3 结论

本文通过数值模拟研究了填充条件和预爆管出口伸进扩张过渡段的长度  $L$  对爆震波衍射特性的影响规律, 并得出以下结论:

1)  $L$  越小, 扩张过渡段的辅助作用体现得越明显, 但预爆管与扩张过渡段间的渐扩通道对爆震回传的阻滞作用越弱;  $L$  越大, 则相反。所以, 应选择合适的  $L$  使扩张过渡段与渐扩通道对爆震波传播的增强作用达到最大。

2) 在  $L = 35 \text{ mm}$  时, 爆震波能够较早地与扩张过渡段壁面作用形成高温、高压区, 从而加强了爆震波的传播, 且预爆管与扩张过渡段之间的渐扩通道能对回传的爆震形成一定的阻滞作用。

本文设计的两步爆震起爆实验装置能够成功实现预爆管引爆主爆震管, 为进一步设计两步起爆脉冲爆震发动机研究提供了依据。

### 参考文献:

- [1] Brophy C M, Sinibaldi I O. Operation of A JP - 10/Air Pulse Detonation Engine[R]. AIAA 2000 - 3591.
- [2] Anderson S D, Tonouchi J H, Lidstone G L. Performance Trends for A Product Scale Pulse Detonation Engine[R]. AIAA 2004 - 3402.
- [3] Piton Dominique, Prigent Alban, Serre Laurent. Performance of A Valveless Air Breathing Pulse Detonation Engine[R]. AIAA 2004 - 3749.
- [4] Panicker Philip K, Li Jiun - Ming, Lu Frank K, et al. Development of A Compact Liquid Fueled Pulsed Detonation Engine with

- Predetonator[R]. AIAA 2007-0237.
- [5] Brophy C M, Sinibaldi J O, Damphousse P. Initiator Performance for Liquid - Fueled Pulse Detonation Engines[R]. AIAA 2002-0472.
- [6] Brophy C M, Werner L T S, Sinibaldi J O. Performance Characterization of A Valveless Pulse Detonation Engine[R]. AIAA 2003-1344.
- [7] 韩启祥,王家骅. 预混气爆震波在不同直径管间的传播特性[J]. 航空动力学报,2005, 20(2):225-229.  
HAN Qixiang, WANG Jiahua. Investigation on Characteristics of Detonation Wave Propagation in Tubes with Different Diameter [J]. Journal of Aerospace Power,2005,20(2):225-229. (in Chinese)
- [8] 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.  
YAN Chuanjun, FAN Wei. Principle and Key Technique of Pulse Detonation Engine[M]. Xi'an:Northwestern Polytechnic University Publishing Company,2005. (in Chinese)
- [9] Kailasanath K. Recent Developments in the Research on Pulse Detonation Engines[R]. AIAA 2002-0470.

(编辑:徐敏)

## Investigation on Diffraction of Detonation in Two - step Detonation Initiation Process

ZENG Hao<sup>1</sup>, HE Li - ming<sup>1</sup>, ZHANG Xiong - wei<sup>1</sup>, SU Jian - yong<sup>2</sup>, ZHAO Hua<sup>1</sup>

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Air Force Flight Test Training Base, Cangzhou 061000, Hebei, China)

**Abstract:** In order to investigate two - step detonation initiation process, the pre - detonators with different  $L$  (distance between transition section inlet and pre - detonator outlet) inserted transition section are simulated. The results indicate that the smaller the  $L$ , the more obvious the enhanced effect of the transition section is, but the effect caused by gradually outspread passage is weaker. When  $L$  turns longer, the trend is opposite. So it is necessary to choose a suitable  $L$  for the transition section and the gradually outspread passage to optimize the enhanced effect of detonation wave transition. When  $L$  is equal to 35 mm, the numerical simulated results indicate that the high temperature and high pressure area can be formed earlier to reinforce the detonation wave transition. The gradually outspread passage between pre - detonator and area expansion can form a better retardant effect on the return detonation wave, which prevents the excessively augment of the pressure in blender of the main combustor tube, then the two - step initiation of detonation can be successfully achieved.

**Key words:** pulse detonation engine; two - step initiation; pre - detonator; diffraction characteristic