

文章编号: 0258-1825 (2007) 03-0330-06

爆轰波穿越惰性气团时的透射激波参数分析

王春, 赵伟, 孙英英, 姜宗林

(中国科学院力学研究所高温气动实验室(LHD), 北京 100080)

摘要:爆轰波穿越惰性气团再进入可燃混合气体时,透射激波参数主要受到三个基本过程的影响:头激波两次穿越惰性气团与可燃气体之间接触面导致的激波强度下降、放热反应中止、爆轰波后稀疏波对激波的衰减作用。放热反应中止是透射激波衰减的主要原因,不同种类的惰性气体对透射激波参数影响不大。

关键词:爆轰退化;惰性气团;透射激波

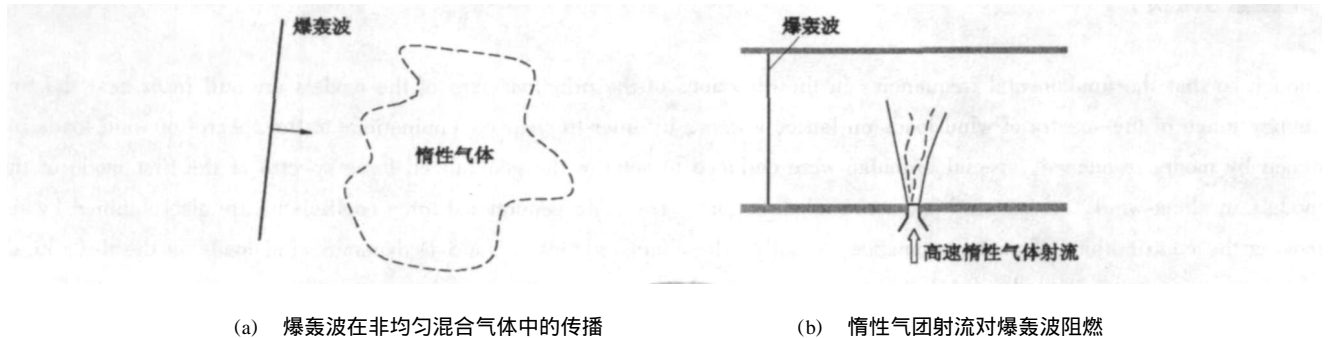
中图分类号: V211.3 **文献标识码:** A

0 引言

当自持爆轰波在可燃混合气体中传播时,由于化学热在非常短的时间和距离内得以释放,爆轰波后温度和压力得到较大的提升,同时爆轰波以极高的速度向前传播。在实际的过程中,爆轰波的传播可能发生如下情况:1)爆轰波在非均匀混合气体中传播,在流场局部地区,可燃混合气团处于极度贫油或者富油状态。当爆轰波进入此区域时,由于着火条件恶劣,爆轰波可能发生熄火(图1(a)所示);2)爆轰波安全问题中,一个新的思路是采用惰性气体射流对爆轰波进行阻燃(图1(b)所示)。那么,我们非常关心的是,对于图1(a)中的情况,爆轰波穿越惰性气团之后,退化激波能否实现对可燃预混气体的点火和再起爆过程?对于图1(b)所示的情况,高速惰性气团射流要满足如何的条件,才能成功地实现对爆轰波的阻燃?这两个问题的首要任务,即是确定爆轰波穿越惰

性气团之后,再进入可燃混合气体时的激波退化问题,这也是本文所要研究的内容。

赵伟等人数值和实验研究了爆轰驱动激波管中爆轰波与卸爆气体接触面的相互作用^[1],并在爆轰驱动激波管中使用卸爆段来改善激波管的性能。I. Sochet 等人实验研究了有浓度梯度的非均匀可燃混合气体中爆轰起爆的特征,并对比了非均匀可燃混合气体以及均匀混合气体的临界起爆能量^[2]。Aksamentov, S. M 等人数值求解并研究了给定非均匀初始温度和浓度分布的爆轰波退化条件^[3]。Short, M 研究了初始非均匀速度、压力、温度和浓度分布下的化学反应演化问题,认为在大梯度非均匀气体中高速传播的燃烧波可以发展成为爆轰波^[4]。M. S. Kuznetsov 等人实验研究了爆轰驱动管中爆轰波经过非均匀混合区域进入低反应混合气体接收室时爆轰波的传播、退化和再点火过程,实验结果显示爆轰波的行为极大地依赖于非均匀混合区的梯度^[5]。目前的研究,多为



(a) 爆轰波在非均匀混合气体中的传播

(b) 惰性气团射流对爆轰波阻燃

图1 爆轰波与惰性气团的相互作用

Fig. 1 Interactions of detonation wave and inert gas

* 收稿日期: 2006-01-03; 修订日期: 2006-03-02.

基金项目: 中国博士后基金(2005037444)、国家自然科学基金(10602059).

作者简介: 王春(1975-),男,博士,研究领域:流体力学、超声速燃烧及爆轰.

爆轰波在具有浓度梯度混合气体中的传播现象研究,而对爆轰波穿越惰性气团后再进入可燃混合气体时的激波参数相对研究较少,此问题对于在非均匀混合气体中传播的爆轰波的再点火过程是一个重要和基本的问题。

1 爆轰波穿越惰性气团再进入可燃混合气体的激波退化机制

爆轰波穿越惰性气团再进入可燃混合气体时,包含着以下几个基本的物理过程:爆轰波头激波两次穿越惰性气团与可燃混合气体之间的接触面(如图2(b)和(c)所示);爆轰波的放热反应突然中止;在惰性气团中传播的激波衰减过程。

图2(b)和(c)显示了运动激波穿越两道接触面时可能的激波马赫数变化趋势。即根据可燃混合气体与惰性气团性质的不同,激波马赫数可以出现1)先增加再减小(图2(b)所示);2)先减小再增加(图2(c)所示)的现象,这通常取决于可燃混合气体与惰性气团的声速比 a_1/a_0 (不考虑绝热指数的差异)。对于自持爆轰波的传播而言,除了出现上述运动激波与接触面相互作用的现象之外,还伴随化学反应热释放过程的突然终止现象和运动激波在惰性气团中传播时的激波衰减过程(如图2(d)所示)。

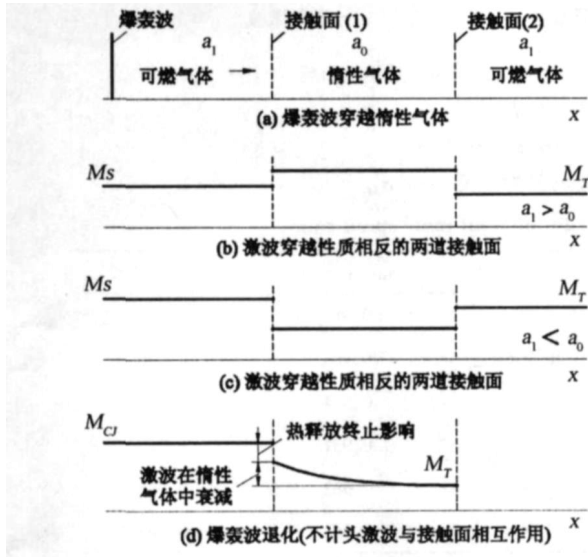


图2 爆轰波穿越惰性气团的退化机制

Fig. 2 The three mechanisms of detonation decay while detonation transmits an inert gas zone

对上述三种机制,我们考虑如下的计算分析方法:1)运动激波穿越性质相反两道接触面的透射激波参数计算;2)在不考虑透射激波与接触面相互影响

(即理想)条件下,使用CJ理论对爆轰波进入惰性气团时放热反应突然中止导致的爆轰波退化激波参数进行计算。这个过程主要表征了化学反应热释放中止产生的影响;3)使用数值模拟方法计算惰性气团中传播的爆轰波退化激波的衰减趋势,这个过程用于考虑泰勒稀疏波对透射激波的影响(不考虑粘性和边界层导致的激波衰减)。

2 运动激波穿越性质相反两道接触面后的透射激波参数计算

模型如图2(b)和(c)所示。计算取运动激波参数,接触面两侧的温度压力相同,而气体常数不同,即接触面两侧的气体声速不同。取如下激波马赫数恢复系数、压力恢复系数和温度恢复系数(后同):

$$M = \frac{M_T}{M_C}, \quad p = \frac{p_T}{p_C}, \quad \tau = \frac{T_T}{T_C}$$

表1给出了不同入射激波马赫数 M_s 和不同接触面两侧气体声速比 a_0/a_1 的透射激波恢复参数数据。接触面两侧压力 $p_0 = p_1 = 0.10133\text{MPa}$, 温度 $T_0 = T_1 = 300\text{K}$, 气体绝热指数 $\gamma_1 = \gamma_0 = 1.4$ 。入射激波马赫数范围 $M_s = 1.5 \sim 5.5$, 与气相爆轰可能存在的马赫数范围相当,(1)区的气体常数取空气气体常数。由表中数据可知,当运动激波穿过性质相反的两道接触面后,无论两道接触面之间的气体声速比大于还是小于1,透射激波的马赫数都降低了,激波的马赫数恢复系数均小于1。当入射激波马赫数在 $1.5 \sim 5.5$ 范围内变化,声速比在 $0.4 \sim 1.6$ 范围内变化,透射激波的马赫数恢复系数都比较接近于1,最小的马赫数恢复系数约为0.88,此条件对应于高激波马赫数和低声速比的情况。

整体来说,声速比 a_0/a_1 接近于1时,透射激波的马赫数恢复系数较大,激波的损失最小;而声速比 a_0/a_1 偏离1时,激波的损失增加。上述结果显示,不同种类惰性气团对透射激波参数影响不大。

3 理想条件下化学反应热释放中止对透射激波参数的影响

为了单纯考察化学反应热释放中止对爆轰波透射激波参数的影响,我们希望排除爆轰波头激波与惰性气团接触面的相互作用,考虑如下的理想条件:

(1)接触面两侧气体的属性相同:接触面两侧的气体仅有可燃与不可燃的差别,它们的气体常数和绝

热指数相等;

(2) 接触面两侧的气体具有相同的压力和温度等参数。

在上述两个条件下,爆轰波与惰性气团的相互作用简化为最简单的情况,当爆轰波的头激波经过可燃气体与惰性气团之间接触面时,将直接穿过接触面,即不反射激波也不反射稀疏波,运动激波也不发生衰减现象。这样问题就简化为:当爆轰波穿越惰性气团时,单纯由爆轰波热释放突然终止导致的爆轰波退化问题。

在物理途径上,可以通过如下的方式实现:在接触面左侧,使用 $H_2 + O_2 + N_2$ 作为可燃混合气体,接触面右侧,使用 $H_2 + N_2$ 作为惰性气团,在给定接触面左侧气体参数,通过调整接触面右侧的 H_2 和 N_2 的比例及温度,使接触面两侧混合气体具有相同的气体常数、绝热指数和声速,如图 3(a) 所示。

当爆轰波穿过此接触面时,爆轰波头激波与接触面产生的相互作用可以忽略。在惰性气体气团中 H_2 和 N_2 高温热分解效应可以忽略情况下,爆轰波穿越

惰性气团的退化激波问题简化为当爆轰波穿越惰性气团时,单纯由热释放终止产生的退化激波问题。

考虑自持爆轰波为 C-J 爆轰,则借助一维 C-J 爆轰关系式和运动激波关系式,上述问题可单一求解,进而获得爆轰波退化为激波时的透射激波及波后气流参数。在理想条件下,爆轰波穿越上述接触面时,会形成逆向传播的稀疏波,其流场波系生成如图 3(b) 所示。

透射激波以及激波波后参数可以通过以下方式计算:(2) 区气流参数由 C-J 条件确定,透射激波和反射稀疏波参数由接触面两侧(3)区和(3')区的等速度和等压力条件求解。通过调整图 3(a) 中区域 0 区的 H_2 和 N_2 混合比例,保证区域 0 区和区域 1 区的气体具有相同的气体常数和绝热指数,以及相同的温度和压力参数。

上述爆轰波后参数,由基于化学平衡计算的 C-J 理论给出。气相组分考虑 H_2 、 H 、 O_2 、 O 、 OH 、 HO_2 、 H_2O_2 、 H_2O 、 N_2 。

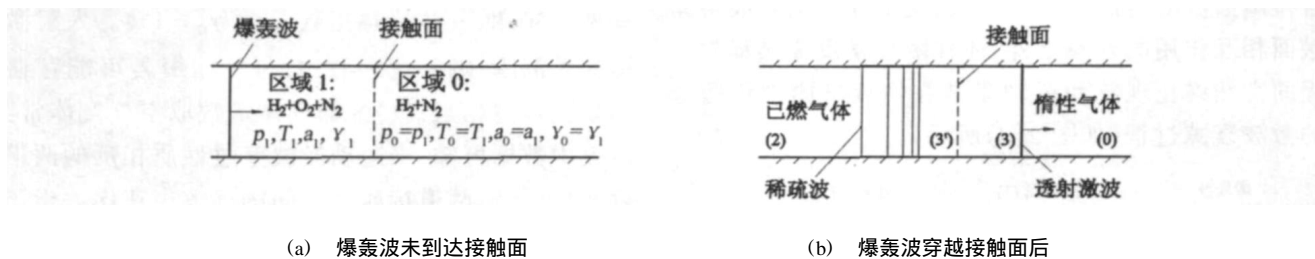


图 3 理想条件的爆轰波退化模型及其生成波系

Fig. 3 The ideal model for detonation transmitting inert gas and the waves

表 1 接触面两侧不同声速比时运动激波马赫数恢复系数 M

Table 1 The Mach number recovery coefficients with different sonic speed ratios

Ms	$a_0/a_1 = 0.4$	$a_0/a_1 = 0.6$	$a_0/a_1 = 0.8$	$a_0/a_1 = 1.2$	$a_0/a_1 = 1.4$	$a_0/a_1 = 1.6$
1.5	0.933	0.977	0.995	0.998	0.989	0.979
2.0	0.901	0.966	0.993	0.996	0.984	0.970
3.0	0.882	0.960	0.992	0.995	0.981	0.963
4.0	0.880	0.960	0.991	0.994	0.981	0.963
5.0	0.881	0.960	0.992	0.995	0.982	0.964
5.5	0.881	0.961	0.992	0.994	0.981	0.963

4 理想条件下不同 N_2 稀释比例爆轰波退化的计算结果

图 4 中给出了理想条件下,当量比 $ER = 1$ 、可燃混合气体压力 $p_1 = 0.1013\text{MPa}$, $T_1 = 300\text{K}$ 时,不同 N_2

稀释比例的透射激波马赫数恢复系数的 C-J 理论解(设 M_T 为透射激波的马赫数)。其中横坐标为 N_2 摩尔分数(即体积分数),图 4(a) 为 C-J 理论计算的爆轰波马赫数以及透射激波的马赫数随 N_2 摩尔分数的变化关系,图 4(b) 为透射激波的马赫数恢复系数,图 4

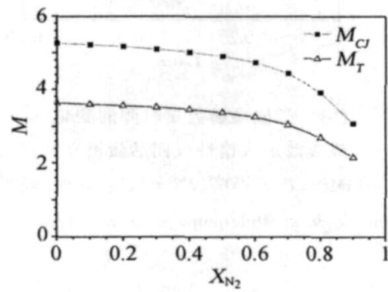
(c) 为透射激波波后的压力恢复系数,图 4(d) 为透射激波波后的温度恢复系数。

由图 4(a) 可知,在 H_2/O_2 当量比 $ER = 1$ 的情况下,随着 N_2 稀释比例的增加,爆轰波的马赫数逐渐降低,从 $X(N_2) = 0$ 时的 $M_d = 5.27$ 逐渐下降到 $X(N_2) = 90\%$ 时的 $M_d = 3.08$ 。与之相对应的透射激波马赫数从 $M_T = 3.64$ 降至 $M_T = 2.16$ 。图 4(b) 所示的马赫数恢复系数曲线显示,在 H_2/O_2 当量比 $ER = 1$ 的情况下,随着 N_2 稀释比例的增加,激波马赫数恢复系数变化很小,非常接近一条直线,其值约为 0.7 左右。

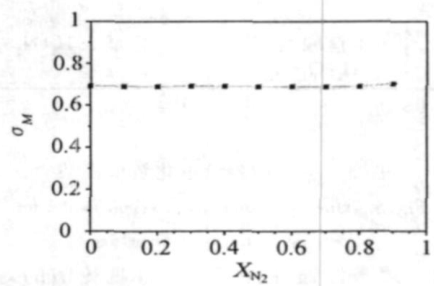
图 4(c) 显示了上述条件下透射激波后的气流压力恢复系数。由图可见,在 H_2/O_2 当量比 $ER = 1$ 的情况下,透射激波波后的压力恢复系数也接近直线变化,其值约为 0.86。而图 4(d) 中的透射激波波后的

温度恢复系数,随着 N_2 稀释比例的增加而逐渐增加,从 $X(N_2) = 0$ 时的 $\tau = 0.288$ 增加到 $X(N_2) = 90\%$ 时的 $\tau = 0.469$ 。

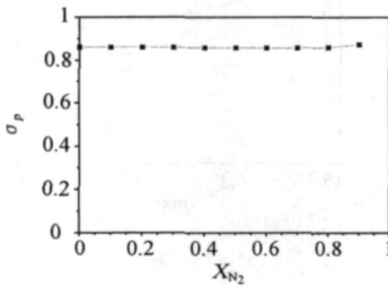
由上述当量比 $ER = 1$ 情况的计算结果可知,当爆轰波突然进入不可燃的惰性气团后,爆轰波头激波的马赫数有明显的下降,由此导致波后气流参数的下降。因此,当爆轰波穿越惰性气团再进入预混可燃气体时,很可能造成爆轰起爆的再点火困难,导致爆轰波熄灭现象。随着预混可燃气体中 N_2 稀释比例的增加,爆轰波头激波和透射激波的马赫数都下降较多,因而在高 N_2 稀释比例的情况下,爆轰波穿越惰性气团再进入预混可燃气体时,更难于点火。但在高 N_2 稀释比例的情况下,温度恢复系数略有回升,对于爆轰的再次起爆可能略有弥补。



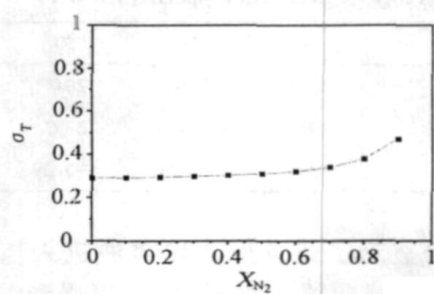
(a) C-J 爆轰波及透射激波马赫数



(b) 透射激波马赫数恢复系数



(c) 压力恢复系数



(d) 温度恢复系数

图 4 理想条件下,透射激波恢复参数 ($ER = 1, p_1 = 0.1013\text{MPa}, T_1 = 300\text{K}$)

Fig. 4 The Mach number recovery coefficient of transmitting shock in ideal condition

5 爆轰波后稀疏波对透射激波的影响

上述文中对爆轰波退化现象的分析是基于 σ 爆轰理论假设,相当于活塞比拟的爆轰理论结果。在实际的爆轰过程中,爆轰波后的泰勒稀疏波对于透射激波参数也有重要的影响。

对于稳定自持传播的爆轰波,泰勒稀疏波的影响止于爆轰波波后的声速面。而当爆轰波进入惰性气

团退化为运动激波时,泰勒稀疏波将迅速地追赶向前运动的激波,并使运动激波的马赫数降低。对于非 σ 爆轰波退化问题的理论分析是比较困难的,在此,本文使用数值方法来考察非 σ 爆轰波在穿越惰性气团时的退化现象。数值模拟条件仍然依据前面所分析的爆轰波退化问题的理想条件,考虑图 5 所示的一维爆轰波退化模型(进口区域长度较长,是考虑爆轰波起爆后需要一段距离来达到较为稳定的状态)。数

值模拟求解一维无粘、可压缩、气相多组分化学反应控制方程,并忽略粘性和边界层对于激波的衰减作用。

气相多组分化学反应取 $H_2/O_2/N_2$ -9 组分 20 步基元化学反应模型,9 组分分别为: H_2 、 H 、 O_2 、 O 、 OH 、 HO_2 、 H_2O 、 H_2O 、 N_2 , 见文献 [6], 不计 N_2 分解。数值求解采用迎风 TVD 差分格式,具有空间二阶精度,时间离散取一阶时间精度。化学反应源项求解采用“点隐式”处理,克服数值“刚性”问题。一维爆轰波波速数值验证结果如表 2 所示。由表中数据可知,数值模拟的爆轰波波速的结果是可靠的。计算与 C-J 理论值的相对误差在 $\pm 1.3\%$ 以内。

计算算例:压力 $p_0 = p_1 = 0.1013\text{MPa}$, 温度 $T_0 = T_1 = 300\text{K}$ 。 H_2/O_2 当量比 $ER = 1$, N_2 稀释比例 70%。

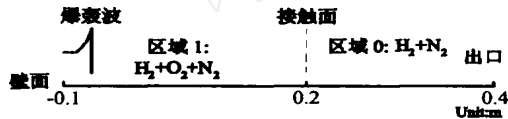


图 5 一维爆轰波退化数值模型

Fig. 5 One-dimensional numerical model for detonation decay in inert gas

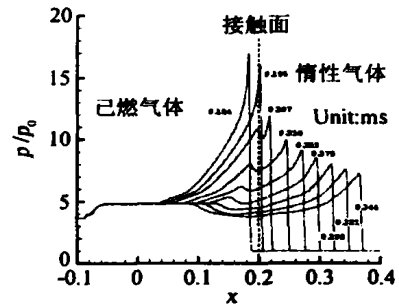
表 2 爆轰波波速计算与 C-J 理论值的对比

Table 2 Numerical validation of detonation speed to C-J detonation speed (ER = 1)

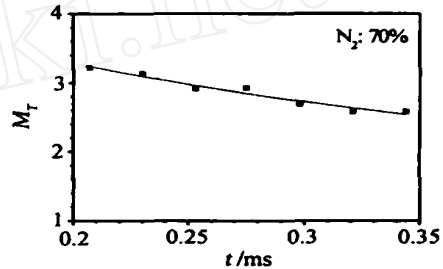
N_2 (%)	0	20	50	70
u_d (m/s)	2828	2464	2044	1701
u_{CJ} (m/s)	2842	2476	2052	1722
E_r (%)	- 0.52	- 0.50	- 0.39	- 1.25

图 6(a) 显示了此算例下爆轰波进入惰性气团后的压力分布衰减曲线。由图可见,当爆轰波突然进入惰性气团之后,首先由于放热反应过程的突然中止,爆轰波的压力分布有突然的下降,压力尖峰迅速地下落。此后,在惰性气团中传播的激波的压力分布仍有继续下降的趋势,这是由于爆轰波波后稀疏波逐渐追赶,不断地削弱运动激波所致。图 6(b) 中显示了在惰性气团中传播的运动激波马赫数随时间的变化曲线。在惰性气团中传播的运动激波,受波后稀疏波的影响,激波的马赫数逐渐下降。

图 7 给出了可燃混合气体中不同 N_2 稀释比例时,在惰性气团中传播的运动激波马赫数随时间变化的衰减曲线。由图可知,当可燃混合气体中的 N_2 稀



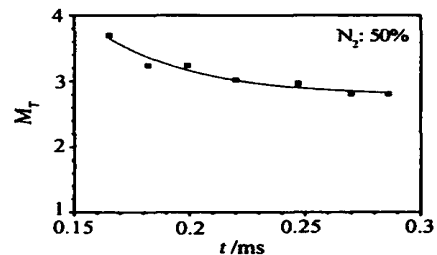
(a) 压力分布随时间的变化



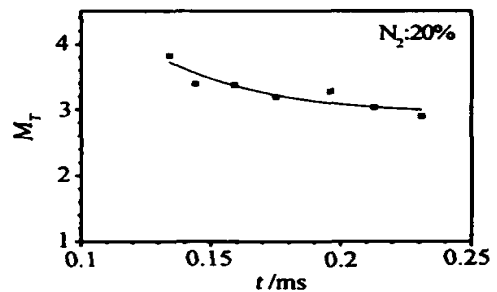
(b) 激波马赫数随时间的变化

图 6 爆轰波进入惰性气团后激波衰减曲线 ($p_0 = 0.1013\text{MPa}$, $T_0 = 300\text{K}$, $ER = 1$, $N_2 : 70\%$, 理想条件)

Fig. 6 The detonation decay while propagating in inert gas in ideal condition



(a) $N_2 : 50\%$



(b) $N_2 : 20\%$

图 7 可燃混合气体中不同 N_2 稀释比例时,惰性气团中激波马赫数衰减曲线 ($p_0 = 0.1013\text{MPa}$, $T_0 = 300\text{K}$, $ER = 1$, 理想条件)

Fig. 7 The Mach number recovery coefficients with different N_2 dilution ratios

释比例减少时,运动激波马赫数衰减速度有所上升,但随着时间的增加,衰减速度越来越低,到最后,曲线变得较为平缓。

由上述数值结果可知,爆轰波进入惰性气团之后,由于波后稀疏波的影响,在惰性气团中传播的运动激波马赫数逐渐下降,这一现象说明当增加惰性气团区域的长度时,不利于点火的再发生,但有利于对爆轰波的阻燃。

6 进一步的讨论

爆轰波放热反应突然中止是导致爆轰波透射激波衰减的主要控制机制。由此可知,对于在非均匀气体中传播的爆轰波,如果流场中存在着极度贫油或者富油区,化学反应热释放量的降低对爆轰波的传播造成较大困难,如果透射激波不能再次点燃爆轰,那么爆轰波很可能发生熄爆现象。

由运动激波穿越惰性气团的计算结果可知,不同种类的惰性气体只影响在惰性气团中传播的激波强度,而运动激波再进入可燃混合气体时,透射激波的强度总是在下降。由此可知,采用不同种类的惰性气团对透射激波参数影响不大,因此当希望对爆轰波阻燃时,采用不同的惰性气体对阻燃效果影响不大。

7 小 结

爆轰波穿越惰性气团再进入可燃混合气体时,其透射激波参数主要受三个基本机制的影响:爆轰波头激波两次穿越惰性气团与可燃混合气体之间接触面;

放热反应突然中止;在惰性气团中传播的激波衰减过程。其中化学反应热释放中止是爆轰波透射激波参数下降的主要控制机制。爆轰波后泰勒稀疏波对透射激波的衰减作用与惰性气体的区域长度有关,不同种类的惰性气体对透射激波参数影响不大。

参 考 文 献:

- [1] 赵伟,李仲发,谷笏华,俞鸿儒. 氢氧爆轰波与界面的相互作用[J]. 气动实验与测量控制. 1996,19(2):41-46.
- [2] SOCHET I, LAMY T, BROSSARD J. Experimental investigation on the detonability of non-uniform gaseous mixtures [J]. *Shock Waves*, 2000, 10(5): 363-376.
- [3] AKSAMENTOV S M, KISELEV I A, MATSUKOV D I. Decay of detonation in a region with an inhomogeneous temperature and concentration distribution [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 1991, 27(5): 635-640.
- [4] SHORT M. The initiation of detonation from general nonuniformly distributed initial conditions [J]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1995, A 353:173-203.
- [5] KUZNETSOV M S, ALEKSEEV V I, DOROFEEV S B, et al. Detonation propagation, decay, and reinitiation in nonuniform gaseous mixtures [A]. Symposium. (International) on Combustion Proceedings of the 27th International Symposium on Combustion [C], Vol. 2, p2241-2247, Aug 2-7 1998.
- [6] 岳朋涛. 超燃冲压发动机燃烧室若干问题的研究[D]. [博士学位论文], 中国科学技术大学, 2002, 5.

Analysis of shock parameters when detonation wave transmits an inert gas zone

WANG Chun, ZHAO Wei, SUN Ying-ying, JIANG Zong-lin

(Institute of Mechanics of China Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: When detonation transmits an inert gas zone and re-enters combustible gas mixture, the shock parameters are affected by the following mechanisms: interactions of shock and the two contact surfaces between combustible gas mixture and inert gas; the termination of chemical reaction heat releasing, shock decay in inert gas by the rarefaction waves behind detonation wave. The termination of heat releasing is the main cause which decreases of Mach number of transmit shock; using different kind of inert gas has little effect on transmitting shock.

Key words: detonation decay; inert gas; transmit shock