

# 混合气压力对爆震波特征参数的影响规律

袁 泉, 祝雪平, 何立明, 程邦勤, 陈 鑫

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘 要:**在混合气当量比一定的条件下,采用平衡常数法对烃-空气系统的爆震燃烧产物的平衡温度、平衡压力及爆震波速进行了计算及比较。在此基础上研究了混合气压力对爆震波特征参数的影响规律。结果表明:在同一当量比下,平衡温度和爆震波速随混合气压力变化规律一致,随着初始压力的增大而增大,逐渐趋于一最大值。平衡压力与初始压力呈线性增大。同时,对于不同燃料,分子量越大,其平衡温度、平衡压力就越大。

**关键词:**平衡常数法;爆震波特征参数;爆震燃烧;爆震波速;脉冲爆震发动机

**中图分类号:**V23 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)04-0001-04

脉冲爆震发动机(Pulse Detonation Engine),简称PDE,是一种利用间隙式或脉冲式爆震波来产生推力的全新概念的发动机<sup>[1-2]</sup>。脉冲爆震发动机的性能取决于爆震波的特征参数。本文应用平衡常数法在对烃-空气混合物爆震燃烧的平衡温度、平衡压力及爆震波速进行计算分析的基础上,研究了混合气的压力对爆震波特征参数的影响规律,为脉冲爆震发动机的设计、试验提供了技术储备。

## 1 爆震波特征参数的计算

### 1.1 爆震波燃烧平衡参数的计算

一般理想的燃烧化学平衡计算都只涉及到几种常见的燃烧平衡产物,没有考虑燃烧是否完全以及燃烧产物的离解问题<sup>[3]</sup>。而这些都与实际工况相差甚远。为了更接近实际工况,本文采用平衡常数法对烃-空气系统的爆震燃烧产物的平衡温度、平衡压力进行计算。为此作以下几点假设:

- 1) 燃料由C、H、O、N元素组成,空气是由O<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>组成的混和气体;
- 2) 燃烧过程是绝热的,并且燃烧效率为1;
- 3) 燃烧产物有18种成分(CO<sub>2</sub>、CO、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub>、OH、H、O、N<sub>2</sub>、NO、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、HNO<sub>3</sub>、HCN、CH<sub>4</sub>、C(gas)、NH<sub>3</sub>、N),并存在14种离解反应;
- 4) 混合气各组分视为理想气体,它们的定压、定容比热及离解反应的平衡常数是温度的多项式。

#### 1.1.1 基本方程

质量守恒方程:

$$\alpha(2n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2\text{O}} + 3n_{\text{HNO}_3} + 3n_{\text{O}_3} + 2n_{\text{O}_2} + n_{\text{O}} + n_{\text{OH}} + 2n_{\text{NO}_2} + n_{\text{NO}}) = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} + n_{\text{C}} + n_{\text{CH}_4} + n_{\text{HCN}} \quad (1)$$

$$\beta(2n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2\text{O}} + 3n_{\text{HNO}_3} + 3n_{\text{O}_3} + 2n_{\text{O}_2} + n_{\text{O}} + n_{\text{OH}} + 2n_{\text{NO}_2} + n_{\text{NO}}) = 4n_{\text{CH}_4} + 2n_{\text{H}_2\text{O}} + 2n_{\text{H}_2} + n_{\text{H}} + n_{\text{HNO}_3} + n_{\text{HCN}} + n_{\text{OH}} + 3n_{\text{NH}_3} \quad (2)$$

$$\gamma(2n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2\text{O}} + 3n_{\text{HNO}_3} + 3n_{\text{O}_3} + 2n_{\text{O}_2} + n_{\text{O}} + n_{\text{OH}} + 2n_{\text{NO}_2} + n_{\text{NO}}) = n_{\text{HNO}_3} + n_{\text{HCN}} + 2n_{\text{N}_2} + n_{\text{N}} + n_{\text{NO}_2} + n_{\text{NO}} + n_{\text{NH}_3} \quad (3)$$

$$\omega + x + y + z = 3n_{\text{CO}_2} + 2n_{\text{CO}} + n_{\text{C}} + 5n_{\text{CH}_4} + 3n_{\text{H}_2\text{O}} + 2n_{\text{H}_2} + n_{\text{H}} + 5n_{\text{HNO}_3} + 3n_{\text{HCN}} + 3n_{\text{O}_3} + 2n_{\text{O}_2} + n_{\text{O}} + 2n_{\text{OH}} +$$

收稿日期:2002-10-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59776001)

作者简介:袁 泉(1977-),男,江苏宿迁人,硕士,主要从事飞机气动热力理论与工程研究;

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及脉冲爆震发动机研究。

$$2n_{N_2} + n_N + 3n_{NO_2} + 2n_{NO} + 4n_{NH_3} \quad (4)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为 C、H、N 与 O 的原子比;  $\omega$ 、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为 C、H、N 与 O 的原子数;  $n_j$  为第  $j$  种燃烧产物的摩尔数。

浓度守恒方程( $X$  为产物成分的摩尔分数):

$$X_{H_2} + X_{H_2O} + X_{CO_2} + X_{N_2} + X_O + X_{O_2} + X_{O_3} + X_H + X_{OH} + X_{CO} + X_C + X_{CH_4} + X_{NO} + X_{NO_2} + X_{NH_3} + X_{HNO_3} + X_{HCN} + X_N - 1 = 0 \quad (5)$$

化学守恒方程:

$$CO_2 \rightleftharpoons CO + \frac{1}{2}O_2; \quad K_1 = \frac{n_{CO}n_{O_2}^{1/2}}{n_{CO_2}}(P_e/\sum n_j)^{1/2} \quad (6)$$

$$CO \rightleftharpoons C + \frac{1}{2}O_2; \quad K_2 = \frac{n_C n_{O_2}^{1/2}}{n_{CO}}(P_e/\sum n_j)^{1/2} \quad (7)$$

$$CH_4 \rightleftharpoons C + 2H_2; \quad K_3 = \frac{n_C n_{H_2}^2}{n_{CH_4}}(P_e/\sum n_j)^2 \quad (8)$$

$$HCN \rightleftharpoons C + \frac{1}{2}H_2 + \frac{1}{2}N_2; \quad K_4 = \frac{n_C n_{H_2}^{1/2} n_{N_2}^{1/2}}{n_{HCN}}(P_e/\sum n_j) \quad (9)$$

$$H_2O \rightleftharpoons H_2 + \frac{1}{2}O_2; \quad K_5 = \frac{n_{H_2} n_{O_2}^{1/2}}{n_{H_2O}}(P_e/\sum n_j)^{1/2} \quad (10)$$

$$H_2O \rightleftharpoons OH + \frac{1}{2}H_2; \quad K_6 = \frac{n_{OH} n_{H_2}^{1/2}}{n_{H_2O}}(P_e/\sum n_j)^{1/2} \quad (11)$$

$$\frac{1}{2}H_2 \rightleftharpoons H; \quad K_7 = \frac{n_H}{n_{H_2}^{1/2}}(P_e/\sum n_j)^{1/2} \quad (12)$$

$$\frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons O; \quad K_8 = \frac{n_O}{n_{O_2}^{1/2}}(P_e/\sum n_j)^{1/2} \quad (13)$$

$$\frac{3}{2}O_2 \rightleftharpoons O_3; \quad K_9 = \frac{n_{O_3}}{n_{O_2}^{3/2}}(P_e/\sum n_j)^{-1/2} \quad (14)$$

$$\frac{1}{2}N_2 \rightleftharpoons N; \quad K_{10} = \frac{n_N}{n_{N_2}^{1/2}}(P_e/\sum n_j)^{1/2} \quad (15)$$

$$\frac{1}{2}N_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons NO; \quad K_{11} = \frac{n_{NO}}{n_{N_2}^{1/2} n_{O_2}^{1/2}} \quad (16)$$

$$NO_2 \rightleftharpoons NO + \frac{1}{2}O_2; \quad K_{12} = \frac{n_{NO} n_{O_2}^{1/2}}{n_{NO_2}}(P_e/\sum n_j)^{1/2} \quad (17)$$

$$NH_3 \rightleftharpoons \frac{1}{2}N_2 + \frac{3}{2}H_2; \quad K_{13} = \frac{n_{N_2}^{1/2} n_{H_2}^{3/2}}{n_{NH_3}}(P_e/\sum n_j) \quad (18)$$

$$2HNO_3 + NO \rightleftharpoons 3NO_2 + H_2O; \quad K_{14} = \frac{n_{NO_2}^3 n_{H_2O}}{n_{HNO_3}^2 n_{NO}}(P_e/\sum n_j) \quad (19)$$

式中: $K$  为各种平衡反应的平衡常数;  $P_e$  为平衡压力。

爆震燃烧的能量守恒方程:

$$c_{v2} T_2 = c_{v1} T_1 + \Delta \bar{E}^0 + \frac{R_2 T_2}{2\gamma_2} \quad (20)$$

### 1.1.2 计算方法

假定一初始迭代的平衡温度  $T_e$ , 联立以上方程计算出平衡产物的成分, 由方程(3)得到  $\sum n_j$ , 产物总焓也能计算出来并与反应物的总焓进行比较。如果相应的能量不等, 则或者升高温度  $T_e$  (当  $H_i > H_j$ ), 或者降低温度  $T_e$  (当  $H_i < H_j$ ), 重新回到第一步再进行迭代直至达到所要求的值。流程见图 1。

### 1.2 爆震波波速的计算

前述可算出平衡温度  $T_2$ , 平衡压力  $P_2$ , 可燃混合气密度  $\rho_2$ , 气体常数  $R_2$ , 由式(21)可计算爆震波波

速<sup>[4]</sup>。

$$V_{CJ} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2} \sqrt{\gamma_2 R_2 T_2} \quad (21)$$

## 2 算例及结果

在初始温度为 298 K, 分别以甲烷(CH<sub>4</sub>)、丙烷(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)、丁烷(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)为燃料, 空气为氧化剂, 当量比为 0.8 和 1.2 条件下, 对爆震波特征参数进行了计算分析, 在此基础上, 研究了混气压力对爆震波特征参数的影响规律。

图 2 ~ 图 4 分别给出了当量比为 0.8 的条件下各种燃料 - 空气混合气的 T<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>、V<sub>CJ</sub>随混气初始压力 P<sub>i</sub> 的变化规律。图 5 ~ 图 7 分别给出了当量比为 1.2 的条件下各种燃料 - 空气混合气的 T<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>、V<sub>CJ</sub>随 P<sub>i</sub> 的变化规律。

由图 2 和图 5 可以看出在当量比一定的条件下, 各种燃料的爆震燃烧产物平衡温度随着混合气初始压力的增大而增大, 并逐渐趋于一最大值。由图 4 和图 7 可以看出在当量比一定的条件下, 爆震波波速的变化规律和平衡温度随混合气压力的变化规律一致, 随着混合气初始压力的增大而增大, 逐渐趋于一最大值。表明平衡温度和爆震波波速的增大有一极限, 达到其极值后, 将不再随着混合气初始压力的增大而增大。由图 3 和图 6 可以看出爆震燃烧产物的平衡压力和混合气初始压力成线性关系增大。同时由图 2、图 5 可以看出, 对于同一当量比, 各种燃料的平衡温度的相对关系一致, 温度由低到高的顺序依次是甲烷、丙烷, 丁烷。这说明用平衡常数法计算燃烧产物平衡温度的合理性。由图 3 和图 6 可以看出平衡压力由低到高的顺序依次是甲烷、丙烷, 丁烷。

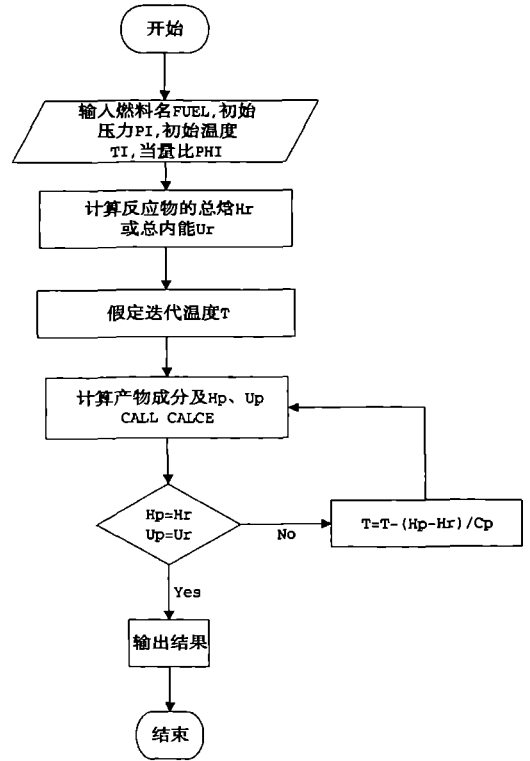


图 1 计算程序流程图

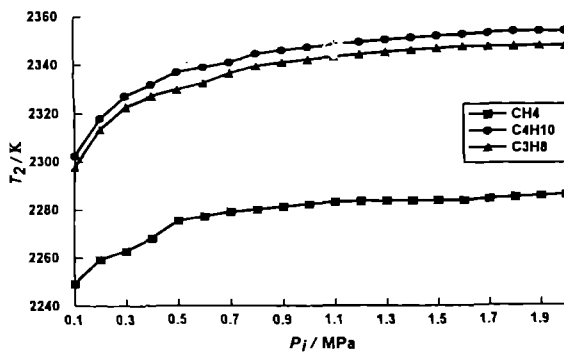


图 2 当量比为 0.8 时平衡温度曲线

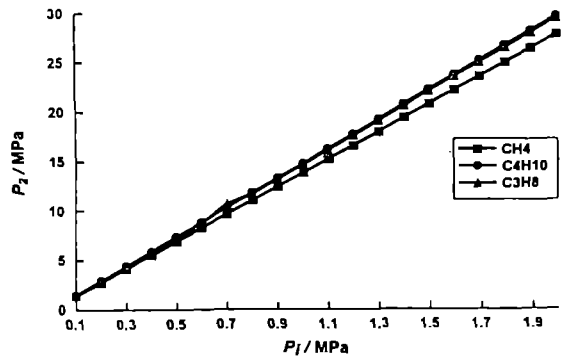


图 3 当量比为 0.8 时平衡压力曲线

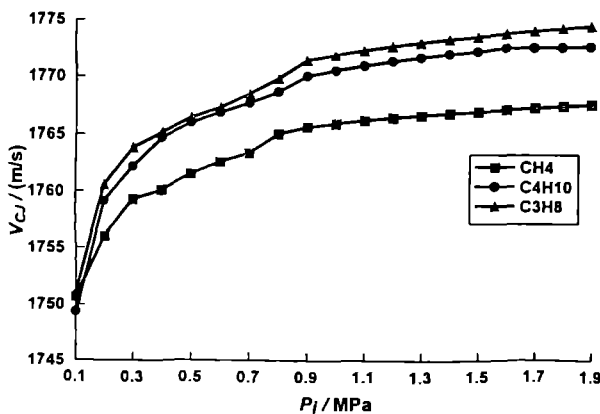


图 4 当量比为 0.8 时爆震波速曲线

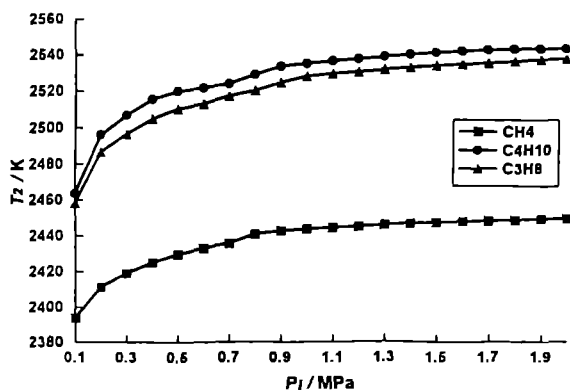


图 5 当量比为 1.2 时平衡温度曲线

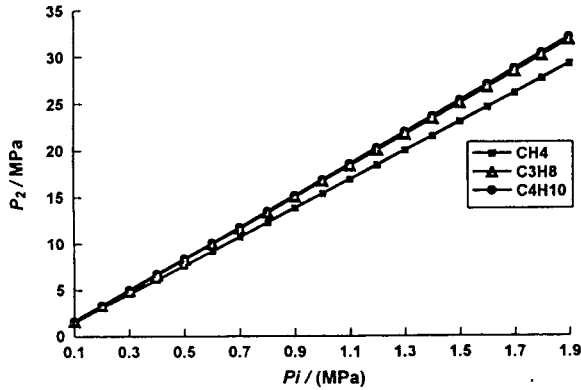


图6 当量比为 1.2 时平衡压力曲线

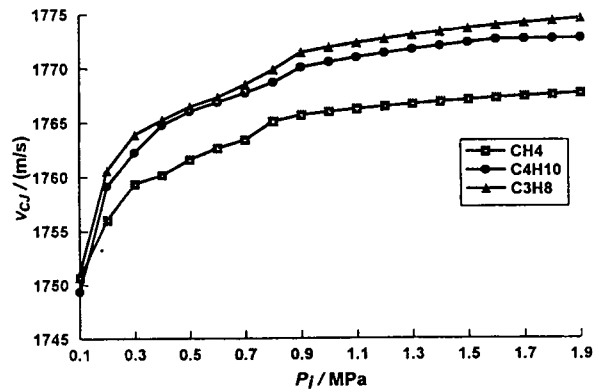


图7 当量比为 1.2 时爆震波速曲线

### 3 结论

1) 用平衡常数法对爆震燃烧特征参数进行了计算,结果和 Steffensen 的计算结果吻合,表明此算法的正确性。

2) 在同一当量比下,爆震波特征参数随混气压力的变化规律是:平衡温度和爆震波波速随初始压力的增大而增大,并逐渐趋于一最大值。平衡压力和初始压力成线性增大。

3) 在同一当量比下,对于不同燃料,分子量越大,其平衡温度和平衡压力越大。

#### 参考文献:

- [1] 何立明,严传俊,范 纬,等. 混合气体燃烧中爆震波传播机理的研究[J]. 推进技术,1997,13(3):39-43.
- [2] 严传俊,刘 军,范 纬,何立明. 爆震波发动机的工作原理及循环分析方法[A]. 天津:863 学术会议,1995.
- [3] 肯尼斯 K K. 燃烧原理[M]. 郑楚光,袁建伟,米建春. 武汉:华中理工大学出版社,1991.
- [4] 邓君香. 模型脉冲爆震发动机数值模拟及试验研究[D]. 西安:西北工业大学,1992.

(编辑:姚树峰)

## A Study of the Law of Mixture Pressure Influence on the Characteristic Parameters of Detonation Wave

YUAN Quan, ZHU Xue - ping, HE Li - ming, CHENG Bang - qin, CHEN Xin

( The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China )

**Abstract:** Under the conditions of constant mixture equivalence ratio, in this paper an equilibrium constant method is adopted in calculating and contrasting equilibrium temperature, equilibrium pressure and detonation wave velocity of hydrocarbon - air system detonation combustion products, and based on this a further study of the law of mixture's influence on the features of detonation wave's parameters is made. The result shows that, under a constant equivalent ratio, both the equilibrium temperature and the velocity of detonation wave all increase with the increase of mixture's initial pressure, and gradually tend to a certain maximum. The relationship between equilibrium pressure and initial pressure seems to be a liner increase. Meanwhile, for the different fuels, the more the molecule weight is, the higher the equilibrium temperature is, and the greater the equilibrium pressure is.

**Key words:** equilibrium constant method; characteristic parameters of detonation wave; detonation combustion; detonation wave velocity; pulse detonation engine