文章编号：1000-5773(2011)04-0365-05

乙炔-氧气混合气体强爆轰参数的理论估算与实验研究*

王 建，段吉员，黄文斌，赵继波，文尚刚，谭多望

（中国工程物理研究院流体物理研究所，冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室，四川绵阳 621900）

摘要：针对非定常的气相强爆轰过程，建立了气相爆轰的理论计算模型，结合 C-J 理论和多方气体物态方程，对乙炔-氧气混合气体的强爆轰参数进行了理论估算，并在激波管中开展了化学计量比的乙炔-氧气混合气体的强爆轰实验。对比研究表明：爆速的理论估算值与实验值符合较好，证实了采用 C-J 理论估算气相强爆轰参数的可行性，计算数据具有一定的参考价值。

关键词：强爆轰；气相爆轰；乙炔；氧气

中图分类号：O381 **文献标识码**：A

1 引 言

强爆轰也称超驱动爆轰或过爆轰，是一种非定常的爆轰状态，其波后压力、温度、传播速度都明显高于定常爆轰。随着强爆轰波的传播，它将迅速衰减为定常爆轰波。强爆轰形成的宏观机制是：混合气体被点燃后，在冲击压缩和湍流加速作用下，前驱冲击波不断加强，反应诱导区长度不断减小，化学反应不断加剧；当前驱冲击波增强到某一临界值时，诱导区已经变得很窄，此时化学反应几乎紧贴着前驱冲击波发生，而且化学反应也不再平缓地进行，反应区内突然产生很多“局部爆炸”，形成了以“局部爆炸点”为中心向四周扩散的半球形波阵面，它追赶上前驱冲击波并与之相互作用，强爆轰波便由此产生[1-3]。

实验研究表明：强爆轰现象经常出现在燃烧转爆轰、直接起爆、冲击起爆、爆轰会聚等过程中。但是，由于强爆轰发生的位置很难预测，并且它的产生、成长以及再衰减为定常爆轰的持续时间很短，实验研究的难度很大，因此研究以理论计算为主。例如：Clavin 等人[4-5]利用非线性微分方程，对强爆轰波菱形胞格结构的产生进行了计算，结果表明波阵面压力在马赫杆端点位置发生突变；Short 和 Dold[6]利用 ZND 模型和活化能参变量计算了弱爆轰经历冲击、湍流作用转变为强爆轰的过程，通过计算对强爆轰的转变时间、位置及其细节进行了预测；李银成[7]用两相的排平物态方程对硝基甲烷的强爆轰参数进行了理论估算，理论值与拟稳态强爆轰的实验值（爆速、爆压和爆温）符合得很好，检验了这种理论估算模型和两相排平物态方程计算的正确性，同时他认为用常 k（绝热指数）等熵方程换算强爆轰的爆速和爆压是可行的，并且当压力低于 100 GPa 时两者的近似程度较好；曲志明等人[8-9]根据所建立的掘进巷道瓦斯爆炸的物理模型，利用 Hugoniot 方程和 Rayleigh 方程，推导了瓦斯爆轰参数公式，给出了瓦斯在强爆轰、弱爆轰和瞬时爆轰这 3 种情况下的气相爆轰参数表达式。实验方面：Wang 等人[10]实验研究了氢气-氧气-氦气混合气体的强爆轰压力与氢气浓度的关系，表明在氢气爆炸极限内强爆轰压力与氢气浓度呈“U”形变化，强爆轰的最大压力值出现在贫氧极限浓度附近；Desbordes 和 Lannoy[11]实验发现

* **收稿日期**：2010-04-18；**修回日期**：2011-03-17

作者简介：王 建（1981－），男，硕士，助理研究员，主要从事爆轰物理研究. E-mail：wj345jay@sina.com

爆轰波在不同可燃气体之间传播时会发生转变，即当爆轰波由较高感度的可燃气体向较低感度的可燃气体传播时，会在低感度的混合气体中产生强爆轰波；Li 等人[12]在丙烷-氧气混合气体的燃烧转爆轰过程中获得了强爆轰波，实验表明入射波在接近 Chapman-Jouguet(C-J)状态时会转变为强爆轰波，并且丙烷-氧气中的入射强爆轰在丙烷-空气中瞬间产生透射强爆轰波。

本研究基于建立的一维气相爆轰模型，利用 C-J 理论和多方气体物态方程，对乙炔-氧气混合气体的强爆轰参数进行理论估算。同时，在激波管中开展化学计量比的乙炔-氧气混合气体的强爆轰实验，通过可燃气体的燃烧转爆轰过程获得强爆轰波，对比研究理论估值与实验值的吻合程度。

2 理论估算

2.1 物理模型

建立简易的物理模型，如图 1 所示。假设化学计量比的预混乙炔-氧气混合气体在一维管道中发生爆炸，管壁为刚性，点火位置在管道左侧，认为强爆轰波阵面为强间断面。

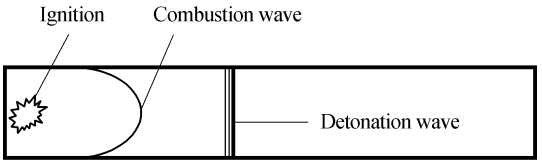


图 1 一维气相爆轰示意图

Fig. 1 Schematic of one dimensional gaseous detonation

2.2 基本关系式

利用爆轰波阵面两侧介质的质量、动量和能量守恒方程，得到 C-J 理论的 Hugoniot 方程和 Rayleigh 方程，即

$$e-e_0=\frac{1}{2}(p+p_0)(v_0-v)+Q \tag{1}$$

$$p-p_0=\frac{(D-u_0)^2}{v_0^2}(v_0-v) \tag{2}$$

式中：p_0、v_0、e_0、u_0 和 p、v、e、u 分别为爆轰波波前和波后气体的压力(Pa)、比容(L/g)、内能(J)和流速(m/s)，Q 为混合气体的爆热(J)，D 为爆轰波波速(m/s)。假设乙炔-氧气预混气体和爆炸产物气体为理想多方气体，并且气体绝热指数 k 值不变。对于多方气体

$$e=pv/(k-1) \tag{3}$$

将(3)式代入(1)式得到

$$\frac{pv}{k-1}-\frac{p_0v_0}{k-1}=\frac{1}{2}(p+p_0)(v_0-v)+Q \tag{4}$$

结合(2)式和(4)式，得到

$$v_0^2(k+1)(p-p_0)^2+2v_0[kp_0v_0-(D-u_0)^2](p-p_0)+2Q(k-1)(D-u_0)^2=0 \tag{5}$$

进一步假设混合气体波阵面前的气体流速 $u_0=0$，令 $A=v_0^2(k+1)$，$B=2v_0(kp_0v_0-D^2)$，$C=2Q(k-1)D^2$，则(5)式可简化为

$$A(p-p_0)^2+B(p-p_0)+C=0 \tag{6}$$

求解(6)式得到

$$p-p_0=\frac{-B\pm(B^2-4AC)^{1/2}}{2A} \tag{7}$$

式中：取正号时对应强爆轰情况，取负号时对应弱爆轰情况，$B^2=4AC$ 时对应 C-J 爆轰情况。由于乙炔-氧气预混气体的爆轰波压力约为初始压力的 40～50 倍，因此(7)式中可忽略 p_0，则强爆轰时的爆压为

$$p_s=\frac{D_s^2}{(k+1)v_0}\left[1+\left(1-\frac{2Q(k^2-1)}{D_s^2}\right)^{1/2}\right] \tag{8}$$

式中：p_s、D_s 分别为强爆轰波的爆压和爆速。再根据 C-J 解，得到 C-J 爆速 D_{CJ}

$$D_{CJ}=[2Q(k^2-1)]^{1/2} \tag{9}$$

将(9)式代入(8)式得到

$$p_s = \frac{D_s^2}{(k+1)v_0}\left[1+\left(1-\frac{D_{CJ}^2}{D_s^2}\right)^{1/2}\right] \tag{10}$$

定义 $\lambda=(1-D_{CJ}^2/D_s^2)^{1/2}$,表示强爆轰偏离 C-J 爆轰的程度,则强爆轰解为

$$p_s = p_{CJ}/(1-\lambda) \tag{11}$$

$$D_s = D_{CJ}/(1-\lambda^2)^{1/2} \tag{12}$$

$$u_s = u_{CJ}[(1+\lambda)(1-\lambda)]^{1/2} \tag{13}$$

$$v_s = v_0(k-\lambda)/(k+1) \tag{14}$$

式中:u_s、v_s 分别为强爆轰时的质点速度和比容,p_{CJ}为 C-J 爆压。

3　实验方法及实验结果

实验在激波管中进行。通过可燃气体的燃烧转爆轰过程获得强爆轰波。激波管内径为50 mm,长度为 3.5 m。采用电火花点火,点火能量约为 0.8 J。利用 PCB 压力传感器和 APX-RS 型高速摄影相机对实验进行观测,其中 6 个压力传感器距点火端的距离依次为 0.30、0.65、0.95、1.25、1.55 和 1.90 m,相机幅频设置为 52 500 s^{-1},快门为 4 μs。实验气体为化学计量比的乙炔-氧气混合气体。

$p_0=0.03$ MPa、$T_0=298$ K 时,乙炔-氧气混合气体($n_{C_2H_2}:n_{O_2}=1:2.5$)的典型实验结果如图 2～图 5 所示。图 2 为 6 个压力传感器(P1～P6)的压力测试结果,得到的峰值压力分别为 0.35、1.17、1.33、1.19、1.18 和 1.15 MPa。

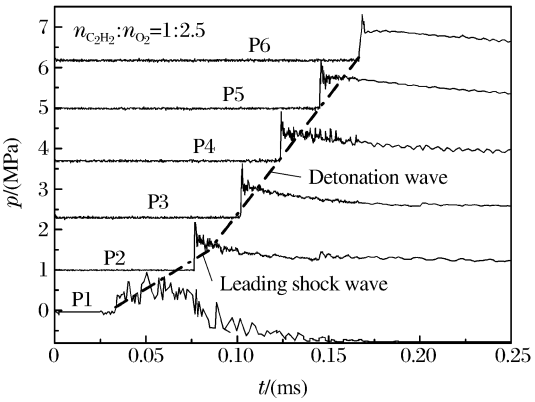


图 2　乙炔-氧气混合气体的爆压曲线

Fig. 2　Detonation pressure curves for C_2H_2-O_2 mixture

图 3 为高速摄影相机拍摄得到的乙炔-氧气混合气体($n_{C_2H_2}:n_{O_2}=1:2.5$)从点火至爆轰整个阶段的图像。从图 3 可以看出:实验气体火焰阵面受到管壁及稀疏波的影响,火焰阵面发生弯曲;随着火焰与冲击压缩正反馈作用的增强,压缩波强度迅速提高,形成了前驱冲击波,波阵面亮度明显增强;此后,冲击波强度逐渐增加,直至形成爆轰。

图 4 和图 5 是由图 3 得到的乙炔-氧气混合气体($n_{C_2H_2}:n_{O_2}=1:2.5$)波阵面传播速度和传播轨迹的变化过程。从图 4 可以明显看到强爆轰波的传播特征:混合气体点燃后,在冲击压缩和湍流加速的作用下,乙炔-氧气混合气体经历火焰加速、爆燃火焰传播和燃烧转爆轰过程,形成强爆轰波。实验得到的强爆轰波速(D_s,$t=0.87$ ms)为2.781 km/s,高于 C-J 爆速($D_{CJ}=2.765$ km/s),更高于混合气体的稳定爆速($D=2.348$ km/s)。从图 5 中可以获得确切的到爆轰时间(t_{DDT})为 0.845 ms,到爆轰距离(L_{DDT})为 391.4 mm。此外,由图 4、图 5 得到最大爆速对应的时间为 0.87 ms,到最大爆速距离为 450.5 mm,均稍大于到爆轰时刻的时间和距离。因此,通过分析可以认为:在本实验条件下强爆轰的形成与燃烧转爆轰有着密切的时空关联,即混合气体燃烧过程中,前驱冲击波强度增加到某一临界值时,冲击波前沿发生多处局部爆炸,局部爆炸导致爆燃

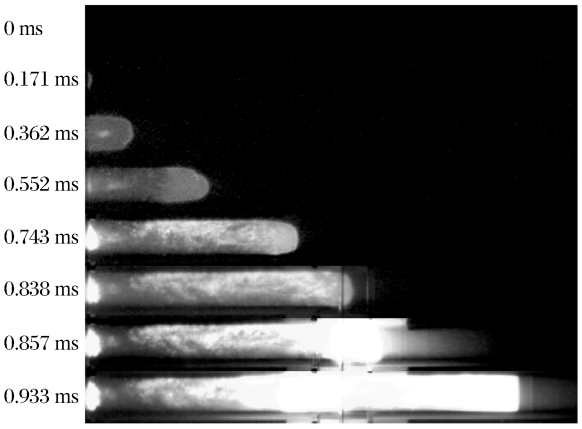


图 3　乙炔-氧气混合气体爆轰波形成过程

Fig. 3　Formation of detonation wave in C_2H_2-O_2 mixture

转变为爆轰，此时爆轰波与冲击波相互作用，进而形成强爆轰波。

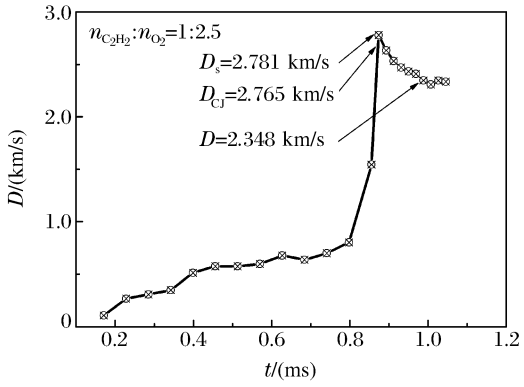


图 4 乙炔-氧气混合气体爆轰波速度曲线

Fig. 4 Detonation wave velocity history for C_2H_2-O_2 mixture

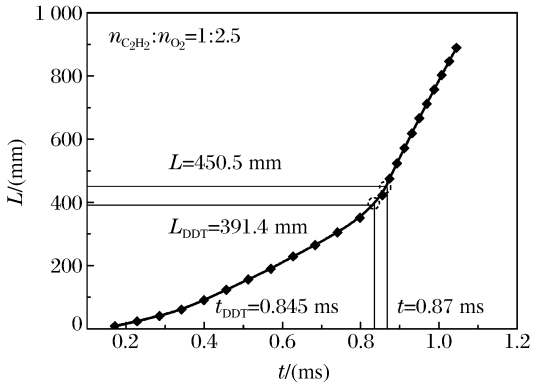


图 5 乙炔-氧气混合气体波阵面轨迹变化

Fig. 5 Shock wave front trajectory for C_2H_2-O_2 mixture

4 计算结果

对于化学计量比的乙炔-氧气混合气体，其爆炸反应为

$$C_2H_2 + 2.5O_2 \longrightarrow 2CO_2 + H_2O + 1\,306\ \text{kJ/mol} \tag{15}$$

计算时采用的初始条件包括：初始压力 p_0 = 0.03 MPa、初始温度 T_0 = 298 K、v_0 = 2.219 L/g、绝热指数 k = 1.15。计算得到 D_{CJ} = 2.765 km/s，D_s = 2.785 km/s，与实验结果 D_s = 2.781 km/s 符合较好。对于不同初始压力条件下的乙炔-氧气混合气体（$n_{C_2H_2}$ ∶ n_{O_2} = 1 ∶ 2.5），强爆轰爆速的计算值与实验值的对比如图 6 所示。可以看出，计算结果与实验结果符合较好，爆速的相对误差小于 5%。由此可见，采用 C-J 理论估算气相强爆轰参数是可行的，计算结果具有较高的精度，在工程上具有一定的应用价值。

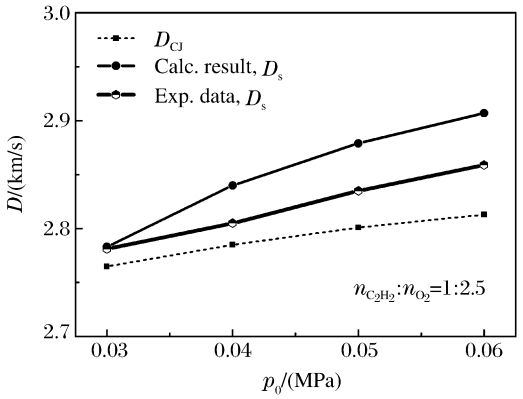


图 6 乙炔-氧气混合气体强爆轰爆速

Fig. 6 Overdriven detonation velocity for C_2H_2-O_2 mixture

5 结 论

利用 C-J 理论和多方气体物态方程，对乙炔-氧气混合气体的强爆轰参数进行了理论估算。通过乙炔-氧气混合气体的燃烧转爆轰实验获得了强爆轰波，测量得到了强爆轰波压力、传播速度和波阵面轨迹。对比研究表明：理论估算的爆速值与实验值符合较好，证实采用 C-J 理论估算气相强爆轰参数是可行性的，计算数据具有一定的工程应用价值。

References:

[1] Lee J H S. The Detonation Phenomenon [M]. New York: Cambridge University Press, 2008: 250-369.

[2] Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K. Applied Detonation Physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 6-40. (in Chinese)
孙承纬，卫玉章，周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京：国防工业出版社，2000：6-40.

[3] Zhang B P, Zhang Q M, Huang F L. Detonation Physics [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2001: 51-87. (in

Chinese)
张宝坪,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学 [M]. 北京:兵器工业出版社,2001:51-87.

[4] Clavin P, Denet B. Diamond Patterns in the Cellular Front of an Overdriven Detonation [J]. Phys Rev Lett, 2002, 28(4):044502.

[5] Clavin P, He L, Williams F A. Multidimensional Stability Analysis of Overdriven Gaseous Detonations [J]. Phys Fluids, 1997, 9(12):3764-3785.

[6] Short M, Dold J W. Weak Detonations, Their Paths and Transition to Strong Detonation [J]. Combust Theory Model, 2002, 6(2):279-296.

[7] Li Y C. The Calculation of Strong Detonation Parameters [J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2003, 16(1): 25-29. (in Chinese)
李银成. 强爆轰参数的理论估算 [J]. 化学物理学报, 2003, 16(1):25-29.

[8] Qu Z M, Zhou X Q, Jia L, et al. The Study on Attenuation Characteristics and Parameter Analysis in Roadway during Gas Detonation [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2006, 21(2):1-4. (in Chinese)
曲志明,周心权,贾　磊,等. 巷道瓦斯爆轰衰减规律及参数分析 [J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2006, 21(2):1-4.

[9] Qu Z M, Zhou X Q, Wang Y, et al. Numerical Calculation and Analysis of the Detonation Parameters in Gaseous Phase during Gas Explosion [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26(3):321-324. (in Chinese)
曲志明,周心权,汪　洋,等. 瓦斯爆炸气相爆轰参数的数值计算与分析 [J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(3):321-324.

[10] Wang B L, Habermann M, Lenartz M, et al. Detonation Formation in H_2-O_2/He/Ar Mixtures at Elevated Initial Pressures [J]. Shock Waves, 2000, 10(4):295-300.

[11] Desbordes D, Lannoy A. Effects of a Negative Step of Fuel Concentration on Critical Diameter of Diffraction of a Detonation [A]//Kuhl A L, Leyer J C, Borisov A A. Dynamics of Detonations and Explosions: Detonations [M]. Washington D C: AIAA, 1991:170-186.

[12] Li J, Lai W H, Chung K, et al. Experimental Study on Transmission of an Overdriven Detonation Wave from Propane/Oxygen to Propane/Air [J]. Combust Flame, 2008, 154(3):331-345.

Calculation and Experiment of Overdriven Detonation Parameters of C_2H_2-O_2 Mixture

WANG Jian, DUAN Ji-Yuan, HUANG Wen-Bin,
ZHAO Ji-Bo, WEN Shang-Gang, TAN Duo-Wang

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Based on the C-J theory and polytropic gas equation of state, a simple physical model is developed to calculate the parameters of overdriven detonation wave for C_2H_2-O_2 mixture with a stoichiometric ratio. The overdriven detonation experiments are also performed in a shock tube using a high speed digital camera and six piezoelectric sensors. The calculated overdriven detonation velocity is in agreement with the experimental value. Therefore, the overdriven detonation parameters obtained by this method are feasible and effective.

Key words: overdriven detonation; gaseous detonation; C_2H_2; O_2