文章编号:1000-5773(2013)03-0385-06

可燃气体混合物燃烧转爆轰判据对比分析*

王 建,段吉员,赵继波,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实验室,四川绵阳 621900)

摘要:基于气相爆轰实验中到爆轰时刻不同判据之间的比较,利用数字高速摄影相机,在激波管中开展化学计量比的乙炔-氧气混合气体的燃烧转爆轰实验,对比了 6 种不同的判据判读到爆轰时刻数据之间的差异。对比分析表明,采用波阵面火焰发光强度和波阵面轨迹作为乙炔-氧气混合气体到爆轰时刻的判据,能够更精确地获得到爆轰时间和到爆轰距离。不同判读数据之间的差异较大,主要原因是在燃烧转爆轰过程中发生局部爆炸,对压力和波速的走时产生较大的影响,导致了判读到爆轰时刻的误差。

关键词:气相爆轰波;燃烧转爆轰;到爆轰距离;到爆轰时间

中图分类号:O643.2 **文献标识码**:A

1 引 言

直接起爆和通过燃烧转爆轰(Deflagration to Detonation Transition,DDT)起爆是气相爆轰中常见的两种起爆方式[1-2]。由于直接起爆需要非常高的起爆能量,因此在实际应用中是以燃烧转爆轰为主要的起爆方式。然而,燃烧转爆轰过程受到湍流及多波系的相互作用,在时间、空间尺度上都呈现一定的随机性,因此,至今仍没有获得一种通用性的火焰速度与冲击波参数之间的关系式。受到实验条件下传感器、探针数量的限制,难以精确记录燃烧转爆轰时刻的信号,长期以来也没有统一的标准来判读到爆轰时间(Time of the Detonation Onset,t_{DDT})与到爆轰距离(DDT Run-up Distance,L_{DDT})。

虽然在物理意义上到爆轰时刻是一个范围量,但是在实际应用中,到爆轰时刻被定义为一个确切的点,采用不同的判读方法,得到不同的到爆轰时间和到爆轰距离。这些判读方法大致可以分为 4 类:(1) 依据火焰波、爆轰波在压力和传播速度上存在的量级差别,把压力或速度曲线上发生突跃变化的位置判读为到爆轰时刻,此时的时间、距离即为到爆轰时间与到爆轰距离[1-2];(2) 利用压力传感器或光电探针记录压力或火焰传播,把波阵面传播速度最先到达燃烧产物的声速、实验中的稳定爆速或 CJ 爆速判读为到爆轰时刻[3-7];(3) 利用火焰发光强度变化,如把光电二级管信号曲线上的突跃变化点判读为到爆轰时刻,此时的时间即为到爆轰时间,再结合波阵面轨迹与到爆轰时间确定到爆轰距离[8-11];(4) 把压力曲线上爆轰波与回传爆轰波的交点判读为到爆轰时刻[12-13]。针对上述部分判读方法,Lu 等[14]、Li 等[15]曾对采用不同方法判读到爆轰距离的误差进行了分析,认为采用发光强度方法能够精确地判读到爆轰时间,同时认为,由于 DDT 过程中发生局部爆炸,采用火焰波、爆轰波和回传爆轰波的判读方法会产生一定的偏差。

基于比较不同到爆轰时刻判读方法得出到爆轰时间和到爆轰距离之间的差别,以化学计量比的预混乙炔-氧气混合气体为对象,采用高速数字相机记录 DDT 过程中前驱冲击波和火焰的发展历程,依据实验结果分析不同到爆轰时刻数据之间的相对误差,以确定最准确合理的判据。

* **收稿日期**:2011-04-11;**修回日期**:2011-09-15

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

2 实验装置和测试系统

实验装置包括激波管、同步点火装置、混气装置以及测试系统，如图 1 所示。激波管内径 50 mm，总长度 3.5 m，其中长度 1 m 的有机玻璃管用于高速摄影测试，拍摄混合气体从燃烧到爆轰过程的变化情况。点火装置为高压脉冲发生器，点火能量约为 0.8 J。

实验采用 APX-RS 型高速摄影数字相机拍摄前驱冲击波和火焰的发展过程，相机幅频设置为 52 500 幅/秒，幅间隔 19.05 μs。与此同时，为获得更清晰的波阵面图像，高速相机设定 4 μs 的电子快门，尽可能实现对冲击波流场的时空冻结。实验气体为化学计量比的乙炔-氧气混合气体。

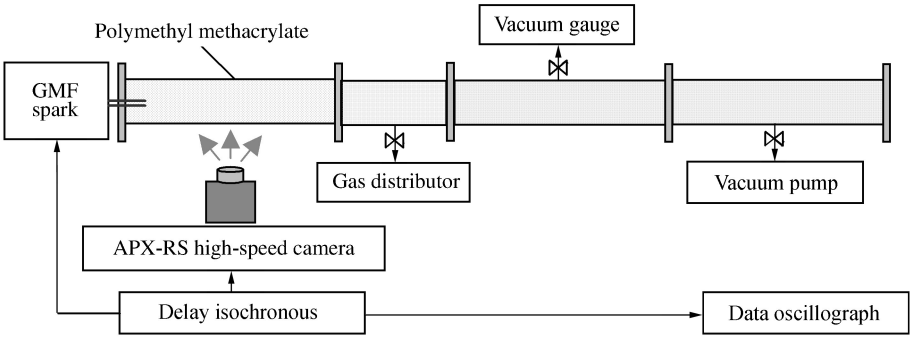


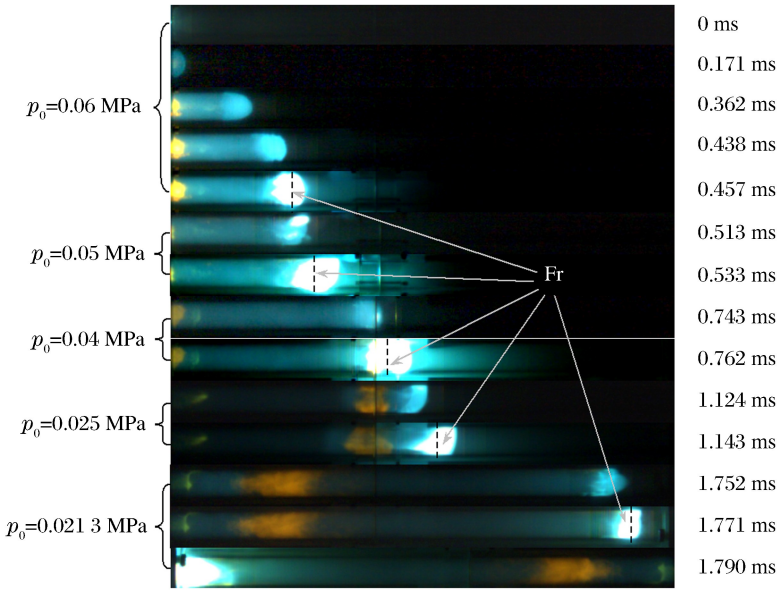
图 1 气相爆轰装置系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

3 实验结果分析与讨论

3.1 爆轰波转变图像

实验所拍摄的不同初始压力下的燃烧转爆轰过程的图像如图 2 所示。



Fr: Front of the detonation onset

图 2 不同初始压力下 DDT 过程图像

Fig. 2 Deflagration to detonation transition for $C_2H_2+2.5O_2$ at different initial pressures

把火焰发光强度(The Intensity of Radiation，I_R)发生剧烈变化的位置判读为到爆轰时刻，表明此时混合气体完成燃烧到爆轰的转变。由于高速相机幅频的限制，不能获得连续图像，定义发光强度剧烈变化前、后的两幅图像时间、距离的中间时刻为爆轰时刻，图 2 中虚线阵面 Fr 取为到爆轰时刻的爆轰波阵面。相机幅频设置为 52 500 幅/秒，幅间隔 19.05 μs，因此采用上述方法获得的到爆轰时间误差小于 2%。以初压 0.06 MPa 的混合气体为例，得到其到爆轰时间为 0.447 ms，到爆轰距离为 216.3 mm。

3.2　波阵面轨迹

依据波阵面传播图像和物像比例，由发光前沿确定不同时刻波阵面的传播位置，从而得到火焰波、冲击波或爆轰波波阵面的传播轨迹如图 3(a)、图 3(b)所示。由于火焰波、爆轰波在传播速度上有量级的差别，若发生燃烧转爆轰，波阵面的轨迹上应有比较明显的转折点，如图 3 中的圆圈标示。若是没有此转折点，表明气体未能在实验条件范围内实现燃烧转爆轰，如图 3(b)中，初压为 0.017 5 MPa 的混合气体。以图 3(a)中 0.025 0 MPa 的混合气体为例，从图中点 O 得到其到爆轰时间为 1.122 ms，到爆轰距离为 462.6 mm。

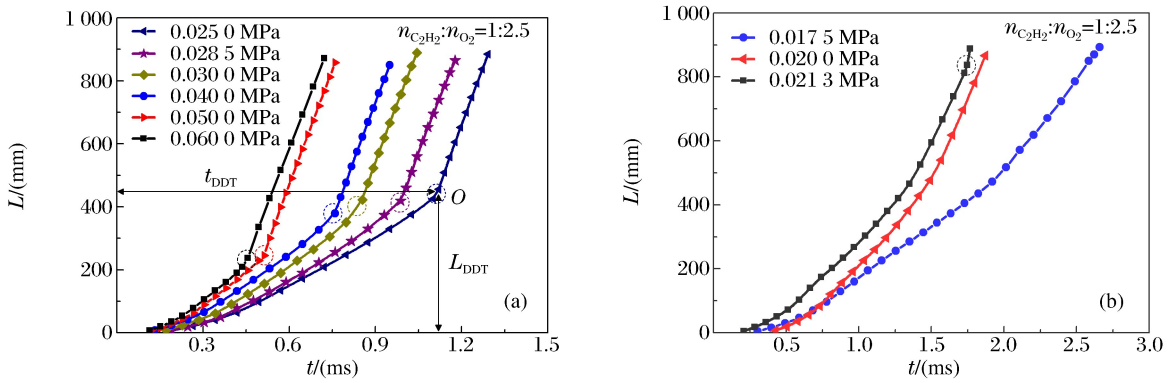
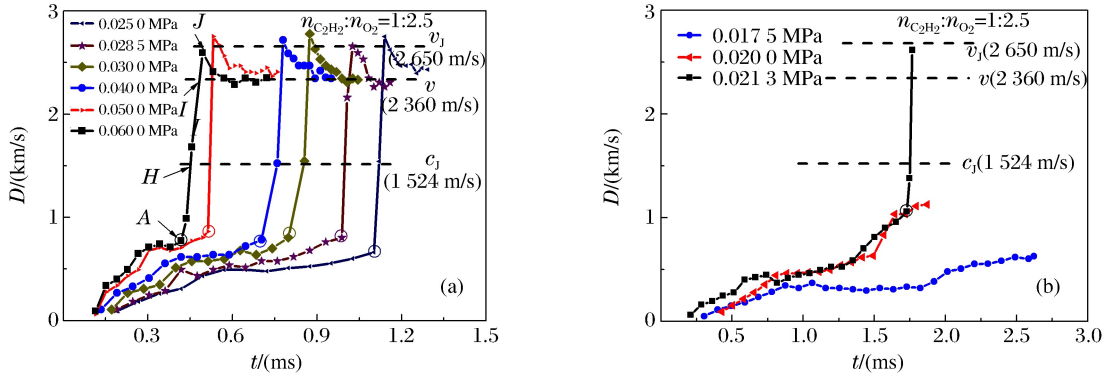


图 3　乙炔-氧气混合气体波阵面轨迹变化

Fig. 3　The trajectory of shock wave front for $C_2H_2+2.5O_2$ at different initial pressures

3.3　波速历程曲线

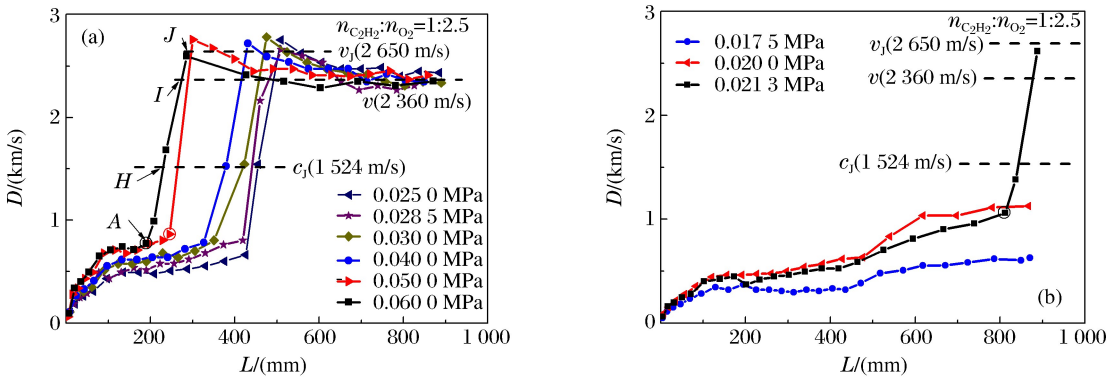
取波阵面轨迹曲线的导数，得到波阵面的速度变化历程如图 4、图 5 所示。从图中波速曲线可以分别找出波速发生突跃的位置点(Abrupt Station，如图中圆圈标示“A”处)、首次到达产物声速点、首次到达实验稳定波速点和首次到达 CJ 理论爆速点 4 个不同时刻，它们都曾在不同的文献中用于判读燃烧转爆轰，获得各自的到爆轰时间和到爆轰距离。以初压为 0.06 MPa 的混合气体为例，上述 4 点如图 4(a)和图 5(a)中 A、H、I、J 所示，得到其到爆轰时间依次为 0.416、0.458、0.487、0.472 ms，到爆轰距离依次为 189.7、229.9、275.3、285.2 mm。



v_J：CJ detonation velocity；v：Experimental detonation velocity；c_J：The speed of sound in the combustion products

图 4　乙炔-氧气混合气体爆轰波速度成长历程

Fig. 4　Flame speeds versus time for $C_2H_2+2.5O_2$ at different initial pressures



v_J:CJ detonation velocity; v:Experimental detonation velocity; c_J:The speed of sound in the combustion products

图 5 乙炔-氧气混合气体爆轰波速度成长历程

Fig. 5 Flame speeds versus distance for $C_2H_2+2.5O_2$ at different initial pressures

3.4 L_{DDT}、t_{DDT}对比分析

依据不同的判据,得到多组到爆轰时间、到爆轰距离数据,见表 1,判读标准依次为火焰发光强度(I_R)、波阵面轨迹拐点(O)、波速发生突跃位置(A)、波速到达产物声速时刻(c_J)、波速到达实验稳定爆速时刻(v)、波速到达 CJ 爆速时刻(v_J)。

表 1 L_{DDT}、t_{DDT}的实验结果

Table 1 The experimental results of L_{DDT} and t_{DDT}

p_0 /(MPa)	Compared to I_R		Compared to O		Compared to A		Compared to c_J		Compared to v		Compared to v_J	
	L_{DDT} /(mm)	t_{DDT} /(ms)	L_{DDT} /(mm)	t_{DDT} /(ms)	L_{DDT} /(mm)	t_{DDT} /(ms)	L_{DDT} /(mm)	t_{DDT} /(ms)	L_{DDT} /(mm)	t_{DDT} /(ms)	L_{DDT} /(mm)	t_{DDT} /(ms)
0.021 3	821.9	1.761	838.5	1.754	801.4	1.728	842.9	1.747	877.3	1.761	890.2	1.767
0.025 0	466.3	1.133	462.6	1.122	427.9	1.103	455.8	1.119	494.2	1.132	507.1	1.139
0.028 5	422.6	0.981	424.1	0.991	419.5	0.985	438.3	0.999	481.8	1.007	505.2	1.021
0.030 0	394.7	0.848	391.4	0.845	352.6	0.801	423.4	0.854	455.8	0.868	464.3	0.873
0.040 0	382.5	0.752	379.8	0.758	326.7	0.699	375.9	0.758	413.0	0.774	423.4	0.777
0.050 0	247.1	0.522	248.3	0.519	244.8	0.512	262.3	0.519	288.3	0.528	294.8	0.532
0.060 0	216.3	0.447	218.7	0.451	189.7	0.416	229.9	0.458	275.3	0.487	285.2	0.472

表 1 数据表明,采用火焰发光强度和波阵面轨迹作为判据时,到爆轰时间和到爆轰距离数据几乎完全吻合,结合 Lu 和 Li 等人的研究结论,认为这两种方法得到的数据更精确,更接近真实值。相比较而言,其它方法得到的数据都有一定的误差:到爆轰时间的误差范围为$-0.056\sim0.038$ ms,到爆轰距离的误差范围为$-54.5\sim81.9$ mm。因此,当把采用火焰发光强度和波阵面轨迹作为判据,得到数据的平均值作为真实的到爆轰时间和到爆轰距离时,相应的误差结果如表 2 所示。表 2 表明,利用火焰发光强度和波阵面轨迹得到的到爆轰时间误差小于 0.5%,到爆轰距离误差小于 1.0%,而后面的 4 组数据都存在较大的误差。同时,表 2 也表明,利用波速突跃位置判读的到爆轰时刻有所提前,利用实验中稳定爆速和 CJ 爆速判读的到爆轰时刻均有所延后。对比后 4 组数据也能看出,利用产物声速得到的数据的误差相对更小,表明判读的到爆轰时间和到爆轰距离相对其它 3 种方法更准确。

出现误差既与混合气体燃烧转爆轰的物理机制有关,也与实验获得数据的方式有关。因为燃烧转爆轰是由冲击波、湍流加速、温度梯度共同导致的局部爆炸(如图 2 中 0.513 ms 时刻所示)所引起,局部

爆炸将影响压力和速度,引起判读到爆轰时刻的误差。另外,实验中得到的波速数据实际上为一段距离内的平均值,它不是连续值,因而也会引起判读误差。这一结果与 Lu 和 Li 等人分析结果一致,他们认为采用发光强度方法能够精确地判读到爆轰时间,再利用轨迹曲线可以精确地判读到爆轰距离。

表 2　L_{DDT}、t_{DDT}的相对误差

Table 2　The relative errors of L_{DDT} and t_{DDT}

p_0 /(MPa)	Compared to I_R		Compared to O		Compared to A		Compared to c_J		Compared to v		Compared to v_J	
	$\delta_{L_{DDT}}$ /(%)	$\delta_{t_{DDT}}$ /(%)	$\delta_{L_{DDT}}$ /(%)	$\delta_{t_{DDT}}$ /(%)	$\delta_{L_{DDT}}$ /(%)	$\delta_{t_{DDT}}$ /(%)	$\delta_{L_{DDT}}$ /(%)	$\delta_{t_{DDT}}$ /(%)	$\delta_{L_{DDT}}$ /(%)	$\delta_{t_{DDT}}$ /(%)	$\delta_{L_{DDT}}$ /(%)	$\delta_{t_{DDT}}$ /(%)
0.021 3	−1.00	0.20	1.00	−0.20	−3.47	−1.68	1.53	−0.60	5.67	0.20	7.23	0.54
0.025 0	0.40	0.49	−0.40	−0.49	−7.87	−2.17	−1.86	−0.75	6.41	0.40	9.18	1.02
0.028 5	−0.18	−0.50	0.18	0.50	−0.91	−0.10	3.53	1.32	13.81	2.13	19.33	3.55
0.030 0	0.42	0.18	−0.42	−0.18	−10.29	−5.38	7.72	0.89	15.96	2.54	18.13	3.13
0.040 0	0.35	−0.40	−0.35	0.40	−14.29	−7.42	−1.38	0.40	8.36	2.52	11.08	2.91
0.050 0	−0.24	0.29	0.24	−0.29	−1.17	−1.63	5.89	−0.29	16.39	1.44	19.01	2.21
0.060 0	−0.55	−0.45	0.55	0.45	−12.78	−7.35	5.70	2.00	26.57	8.46	31.13	5.12

4　结　论

在实验条件下,对乙炔-氧气混合气体的爆轰实验结果分别依据火焰发光强度(I_R)、波阵面轨迹拐点(O)、波速发生突跃位置(A)、波速到达产物声速时刻(c_J)、波速到达实验稳定爆速时刻(v)和波速到达 CJ 爆速时刻(v_J)6 种到爆轰时刻判据,得到 6 组到爆轰时间(t_{DDT})与到爆轰距离(L_{DDT})的数据,通过对比分析得到如下初步结论。

(1) 在气相爆轰实验中,不同的到爆轰时刻判据得出不同的到爆轰时间和到爆轰距离,并且各组数据之间的差异较大。

(2) 对比分析表明,采用波阵面火焰发光强度和波阵面轨迹作为乙炔-氧气混合气体到爆轰时刻的判据,能够更精确地判读到爆轰时间和到爆轰距离。

(3) 到爆轰时刻判据不同,到爆轰时间和到爆轰距离数据会产生较大差异,主要原因是在燃烧转爆轰过程中发生局部爆炸,对压力和波速的走时有较大的影响,引起了判读到爆轰时刻的误差。

References:

[1] 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.

[2] Zhang B P, Zhang Q M, Huang F L. Detonation Physics [M]. Beijing: Ordnance Industry Publishing House, 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.

[3] Brown C J, Thomas G O. Experimental studies of shock-induced ignition and transition to detonation in ethylene and propane mixtures [J]. Combust Flame, 1999, 117(4): 861-870

[4] Cooper M, Jackson S, Shepherd J E. Effect of deflagration-to-detonation transition on pulse detonation engine impulse, FM00-3 [R]. California: Explosion Dynamics Laboratory Graduate Aeronautical Laboratories, California In-

stitute of Technology,2000.

[5] Pinard P F,Higgins A J,Lee J H S. The effects of NO_2 addition on deflagration-to-detonation transition [J]. Combust Flame,2004,136(1-2):146-154.

[6] Card J,Rival D,Ciccarelli G. DDT in fuel-air mixtures at elevated temperatures and pressures [J]. Shock Waves,2005,14(3):167-173.

[7] Sorin R,Zitoun R. Optimization of the deflagration to detonation transition:Reduction of length and time of transition [J]. Shock Waves,2006,15(2):137-145.

[8] Wang B L,Habermann M,Lenartz M. Detonation formation in H_2-O_2/He/Ar mixtures at elevated initial pressures [J]. Shock Waves,2000,10(4):295-300.

[9] Kuznetsov M,Ciccarelli G,Dorofeev S,et al. DDT in methane-air mixtures [J]. Shock Waves,2002,12(3):215-220.

[10] Kersten C,Förster H. Investigation of deflagrations and detonations in pipes and flame arresters by high-speed framing [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2004,17(1):43-50.

[11] Kuznetsov M,Alekseev V,Matsukov I,et al. DDT in a smooth tube filled with a hydrogen-oxygen mixture [J]. Shock Waves,2005,14(3):205-215.

[12] Aizawa K,Yoshino S,Mogi T. Study of detonation initiation in hydrogen/air flow [J]. Shock Waves,2008,18(4):299- 305.

[13] Li J,Lai W H,Chung K. Tube diameter effect on deflagration-to-detonation transition of propane-oxygen mixtures [J]. Shock Waves,2006,16(2):109-117.

[14] Lu F K,Wilso D R. Some perspectives on pulse detonation propulsion systems [C]//Proceedings of the 24th International Symposition on Shock Waves. Beijing,2004:75-86.

[15] Li J,Lai W H,Chung K. Uncertainty analysis of deflagration-to-detonation run-up distance [J]. Shock Waves,2005,14(5):413-420.

Analysis of the Onset of Detonation in the DDT Process for Combustible Mixture

WANG Jian,DUAN Ji-Yuan,ZHAO Ji-Bo,TAN Duo-Wang

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

Abstract:For comparison with several methods used to define the location of the onset of detonation, several of experiments were performed to study on the deflagration to detonation transition (DDT) for premixed $C_2H_2+2.5O_2$ mixture in a shock tube. A high-speed digital camera was used to track the velocities of flame, shock, or detonation wave. In this work, six methods were used to define the location of the onset of detonation, and six different results of the DDT run-up distance (L_{DDT}) and the time of the detonation onset (t_{DDT}) were obtained. It is found that the methods based on the flame emission radiation and the growth trajectory of flame, shock, or detonation wave can accurately define t_{DDT} and L_{DDT}. The onset of detonation defined by the other methods based on the speed of detonation wave might result in some error or underestimated values due to the localized explosion taking place just prior to the generation of detonation.

Key words:gaseous detonation wave;deflagration to detonation transition;DDT run-up distance;time of the detonation onset