

# 可燃气体的燃烧与爆震

中国科学院力学研究所 刘育魁

目前,以燃烧形式释放的化学能是人类生产和生活中的最主要能源。可燃气体的燃烧现象是各类燃烧中最简单和最基本的一种。可燃气体燃烧过程的研究一直受到人们的关注。气体燃烧有两种形式。一是通过火焰释放化学能,称为速燃或燃烧。另一种是通过击波加热而伴随的能量释放,称为爆震。并总称为燃烧。

可燃气体燃烧与爆震的研究,主要用于发动机的设计和武器研制,也应用于工业爆炸灾害的防治。最近10年来有三个重要因素又促进了可燃气体燃烧与爆震的研究。它们是:①海中石油和天然气的开发,由于海上平台的操作和运转中存在可燃气体泄露而引起大面积火灾的危险性,需要进行研究和控制。②石油提价后,发动机设计希望能在低燃油/空气配比下工作,为不降低发动机的出力,要研究如何提高燃烧速度和提高化学反应完全程度。③1979年美国三里岛核反应堆事故中出现了氢氧混合气体爆炸的危险后,核电站安全问题受到了公众舆论重视和反核派攻击。于是西方主要国家加强了核电站安全的研究,其中包括对氢氧燃烧与爆震的研究。笔者在加拿大工作期间参加了上述研究工作,特在此介绍一下上述领域中研究工作的进展和问题。专著[1—5]已收集和介绍了不少以往的工作,凡在[1—5]中介绍过的,本文不再重复。

图1表明燃烧的物理过程。假定未燃气体的状态由图中0点( $P_0, V_0$ )表示,经强间断后的状态均落在曲线1上(Hugoniot线)。如又伴随有放热反应,则所有可能状态由曲线2的实线部分表示。由热力学第二定律知,曲线2仅CJ点以上段和BD段是可能的。CJ点为CJ爆震状态,CJ以上为过载爆震,BD为速燃的结果。由于燃烧速度很低,仅有米/秒的量级,所以火焰前后压力平衡,即B点相应的定压速燃有意义。以下分别讨论燃烧、爆震和由燃烧到爆震的过渡问题。

## I. 燃烧

一般氢气和碳氢气体化合物在空气或氧气中燃烧,火焰温度约1500℃,火焰后气体膨胀6—7倍。定容绝热燃烧时压力可达8—9大气压。燃烧时火焰通过热传导和扩散向外传播。

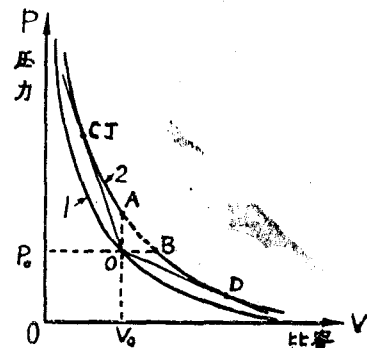


图 1

1. 点火 在防止工业爆炸灾害的工作中, 首先遇到的问题是什么条件下气体可被点燃。点火实验表明, 几十微焦耳的弱火花就可点燃气体燃料<sup>[23]</sup>。也就是说点火很容易实现。但实验又指出, 当可燃气体中的燃料浓度增加或减少到一定程度时, 点火能量增加非常快。因此, 对一般点火源言, 每种可燃气体有两个(最高和最低)浓度极限。如甲烷/空气混合物中, 甲烷的体积浓度小于5%或高于14%, 就极难点燃。实际上对点火来说, 人们更关心的是可燃浓度范围, 而不是点火能量。各种气体的浓度极限值可见[2]。目前点火研究主要是精确地控制点火源的强度和能量, 以求得更为准确的点火能<sup>[9-9]</sup>, 以及研究放电电极几何形状的影响<sup>[3]</sup>。同时也研究其它点火形式<sup>[10,11]</sup>, 和在流动着的气体中点火问题<sup>[12-14]</sup>。

点火理论主要是关于核的概念, 即认为点火能量释放在小空间(核)内, 经热传导和扩散过程后核内的温度仍能维持长于化学反应所必要的时间(即感应时间), 则点火成功。应用这个理论讨论点火问题的困难, 主要来自复杂的化学反应过程和众多反应常数的不确切。近期的有关理论工作可见[15-17], 有关感应时间的研究可见[17-19]。

2. 火焰的结构和传播 火焰传播是热传导和扩散的结果。火焰后的气体膨胀影响速度(声速)大于火焰速度, 因此火焰通常在运动着的气体中传播。称火焰相对于固定空间的速度为火焰速度, 而相对于前方气体的速度为燃烧速度。燃烧速度表明化学能的释放速度, 是可燃气体的自身属性。工程中, 燃速决定了发动机的输出功率, 也影响工业爆炸灾害的破坏能力, 是个重要参数。

研究燃烧速度必须知道火焰的结构和传播过程。不同气体中, 热传导和扩散起着不同作用。近期的理论和实验工作<sup>[20-23]</sup>详细给出了一维条件下火焰的结构(温度和化学组分的分布), 并得到了燃烧速度和气体初温、初压的关系。[22]中为了得到比较满意的甲烷/空气的燃烧过程, 总共计算了26种化学组分的84个反应方程。可见燃烧中的化学反应过程复杂。

任何关于火焰结构和传播的理论都需和实测的燃烧速度相比较, 以校验其正确与否。当前测量燃烧速度的方法与以往相比改进不大, 主要是仪器发展了, 精度提高了, 并扩大了测量范围。测量中的困难仍是如何消除湍流的影响。[24]详细给出了各种测试方法及其比较, 并着重介绍了热线风速仪和密度比方法。其它如燃烧喷口法<sup>[25]</sup>, 常体积燃烧容器法<sup>[26,27]</sup>都给出了有用的结果。值得一提的是[27], 它得到了初压在0.4—40大气压, 初温在298°—750°K范围内的层流燃烧速度的测量结果。

3. 火焰的不稳定性和加速 火焰后气体膨胀, 火焰面是密度间断, 它是不稳定的(Taylor不稳定性)。任何扰动均能引起火焰面的折皱和变形。火焰传播呈格子结构<sup>[5,28,29]</sup>。火焰面积的增加使得化学反应的面积增加, 释放化学能的速度加快, 这又助长了火焰的再加速<sup>[30]</sup>。

火焰加速的原因是压力波的作用<sup>[31]</sup>和障碍物引起的湍流与涡旋使火焰面变形<sup>[32-34]</sup>。这两个原因均引起火焰折皱和加速。湍流的加速燃烧作用, 使得发动机有可能在尺寸不变的条件大幅度提高输出功率和改善化学反应的完全程度, 或者采用低燃料/空气配比的气体而不降低出力。另一方面, 在工业爆炸事故中, 燃烧速度的提高会导致压力上升速率提高, 从而造成强的破坏效果。[35-37]研究了燃烧速度与湍流度的关系, [38,39]研究了燃烧速度与障碍物特征尺寸的关系。文献[40]的实例表明火焰在通过120厘米长的有障碍物的空间时, 火焰速度可以由每秒几米加速到400米/秒, 即提高了100倍, 这无疑要受到重视。

湍流增加燃速的另一种办法是射流点火,它利用热射流的湍流卷吸作用增加反应面积和提高燃速。这个方法在发动机的设计<sup>[11]</sup>和工业爆炸灾害的防治中<sup>[41,42]</sup>都有实际意义。

但上述的数量结果都与具体实验装置有关,目前也有一些理论分析工作<sup>[43-45]</sup>,由于湍流自身的机制与定量描述及测量工作尚未解决,所以很难圆满解决包括化学反应的燃烧问题。

4. 燃烧引起的爆炸现象 燃烧的结果是气体的温度和体积骤然上升形成了爆炸,发动机输出的机械能和爆炸事故中的灾害都是此爆炸现象的结果。

已有编制好的程序<sup>[46]</sup>可计算出任意气体在定容或定压燃烧后的力学和热力学各参数,也有数值方法<sup>[47,48]</sup>可计算二维空间条件下任意边界情况的燃烧结果。应指出,在考虑火焰传播时不能忽视障碍物边界对火焰的加速作用<sup>[49]</sup>。[50]详细研究了封闭容器内的爆炸现象。[42,51]研究了射流点火条件下封闭容器内的燃烧爆炸现象。笔者的工作<sup>[42]</sup>说明由于射流点火,容器内压力上升速率比火花点火时高10倍。可见射流点火要影响到发动机的设计思想和爆炸灾害的防护措施。

5. 泄压 可燃气体在连通大气的结构(如厂房建筑)内燃烧时,由于结构内压力不断上升,一部分未燃气体在燃烧前就已通过出口排出,使得燃烧完成时,结构内的压力明显低于气体定容燃烧压力,这种过程称为泄压。如果泄压后的最大压力低于结构的安全值,则结构安全。泄压的效果和气体成分、泄压面大小与位置、结构内障碍物分布规律及火焰可能加速的程度有关。这方面的研究工作不够成熟<sup>[5,51-53]</sup>,还有许多工作要做。一些实验<sup>[53]</sup>中发现,泄压而成功地降低了主要燃烧过程中的峰值压力,但在燃烧的尾期却出现了第二个压力峰值,这第二峰压比第一个峰值高出很多,于是如何消除第二峰压成为泄压的关键。

6. 熄火 这是点火的反问题。研究它有助于了解点火机制,也有助于消除或防止爆炸灾害。比如,在天然气的生产中,某些偶然因素(如雷电)能引起燃烧,火焰会经管道传播出去。人们希望在管道中预先安放一些装置,这些装置不影响气体的正常输送,但火焰经过它时可自行熄火。这就要求研究熄火问题。

熄火需要两个条件。①边壁的冷却<sup>[54-56]</sup>;②湍流度的增加<sup>[35,57,58]</sup>。[10]和笔者的工作[59]讨论了射流点火时的熄灭问题,这也属于湍流熄火机制。文中给出了安全间隙的实用数据。

## II. 爆震

如果可燃气体中的强击波将气体压缩升温到气体的点火温度以上,并维持长于化学反应必要的感应时间,则燃烧将伴随击波发生,这种现象称为爆震。氢气或碳氢化合物与空气或氧气的混合气中,爆震波压力可达16—20大气压,温度约为1800℃。其压力是气体定容燃烧压力 $P_c$ 的两倍左右。如果爆震波在固定边界上正反射,压力能是 $P_c$ 的四倍左右。显然,爆震比燃烧危害更大,而防止危害的一个重要方法是阻止爆震发生。

1. CJ爆震 CJ理论认为,爆震波处释放的化学能恰好维持爆震波的传播,并且爆震波以化学反应完成面处的声速传播。这种爆震称为CJ爆震。CJ爆震波速是介质常数,与边界条件无关。CJ理论自身得不出爆震波的厚度和结构,但CJ理论给出的爆速和爆压与实际测量结果符合得很好,因而被广泛应用。[46]有计算各种气体CJ爆震波参数的程序。

2. 爆震波的结构 CJ爆震实际上不存在。事实上,爆震波传播时其强度以CJ值为平均值而脉动变化。用烟熏过的平板沿爆震波传播方向放置,会在平板上留下菱形格子状痕

迹,称为爆格结构<sup>[61-63]</sup>。格子的边界是马赫反射三波点轨迹,爆震波沿圆形管传播会在管壁上留下螺旋形轨迹,称为螺旋爆震<sup>[4,60]</sup>。70年代后,人们用各种方法如光测法和测压法<sup>[64,65]</sup>,OH<sup>-</sup>离子发射法<sup>[66]</sup>对爆震波结构进行研究,同时也研究爆震波的化学动力学过程<sup>[67-70]</sup>。结果表明凡爆震波都有爆格结构,爆格尺寸(宽度 $\lambda$ )是可燃气体的固有属性,它与爆震波的许多微观和宏观属性紧密相关<sup>[71]</sup>。目前形成爆格的机制尚未弄清。

3. 爆震波的建立 爆震要比速燃破坏力大,从武器设计讲希望容易形成爆震,从防止爆炸灾害讲则不希望产生爆震。总之,都要研究爆震的建立过程。目前有四种方式建立爆震:①直接起爆,即通过放电、激光、炸药爆炸方法引爆可燃气体<sup>[72-76]</sup>。②光起爆,由光照射(非聚焦光)可燃气体形成爆震<sup>[77-79]</sup>。③射流起爆,由爆炸产物热射流起爆可燃气体<sup>[72,80]</sup>。④火焰加速到爆震,也就是DDT问题(Deflagration to Detonation Transition),它实质是前面讨论的火焰加速机制而导致的爆震<sup>[82-84]</sup>。目前还有人用冷射流起爆,但未成功。起爆能要比点火能高上千倍。目前已能精确地控制放电起爆能<sup>[75,76,85]</sup>,对炸药起爆研究也比较细致<sup>[86-88]</sup>。研究结果表明起爆能和感应时间有关<sup>[80,87,89]</sup>,并且起爆能正比于爆格尺寸 $\lambda$ 的三次方<sup>[71,89-91]</sup>。起爆能理论中采用的核的概念类似于点火核的概念。起爆时,外部能(如放电能)引起了可燃气体中的击波,当击波衰减到CJ条件相应的击波强度时,如果波阵面内(即核内)的气体化学能大于起爆能,则击波继续传播是由气体自己释放的化学能所维持,起爆是成功的<sup>[92]</sup>。

4. 爆震波的传播 爆震波对结构物的破坏作用与爆震波对结构的加载方式和载荷大小有关,要得到这些载荷参数,需研究爆震波与结构的相互作用规律,包括爆震波在障碍物上的折射、绕射和反射等规律。但这方面基本上没有什么研究结果。目前仅有爆震波在无限空间内传播规律的解<sup>[93-95]</sup>。另一类传播问题是爆震波在(化学成分)不均匀气体中的传播规律。这在解决气体泄露事件中爆震波建立和传播时有实用意义,可惜没有什么进展。

5. 爆震波经孔板的过渡 人们很关心爆震波在经过孔板、缝隙之后是否还是爆震波,或衰变为速燃。这在估计工业爆炸灾害时很重要。

首先,人们得到了爆震波从圆管中到无限空间时的过渡关系。实验指出,当圆管直径 $d$ 大于爆格宽度 $\lambda$ 的13倍时,爆震波可由圆管中的平面波过渡为无限空间中的球面波,这个临界条件 $d = 13\lambda$ 适用于任何气体和任何初始条件<sup>[71,96-98]</sup>。笔者的工作<sup>[99]</sup>证明以上关系也适用于经圆形孔板的过渡。对于任意孔形,只要取孔的最大和最小尺寸的平均值作为有效直径 $d_{eff}$ ,则过渡准则 $d_{eff} = 13\lambda$ 成立。在二维情况,即平面波经狭长缝(宽度 $w$ )过渡为柱面波时,临界条件为 $w = 3\lambda$ ,否定了长期以来应用的10倍 $\lambda$ 的概念<sup>[5]</sup>。

从以上结果还可以推论出气体相对爆炸危险性<sup>[90]</sup>,起爆能计算方法<sup>[71]</sup>,以及爆震极限等一系列理论和经验关系。

6. 爆震波的传播极限 在有边界限制的可燃气体中,并非无限增加起爆能都可建立爆震波。实验指出,爆震波的建立和传播有极限并与 $\lambda$ 有关。在直径 $d$ 的圆管中,爆震极限是单头螺旋爆震情况,这时圆管周长 $\pi d$ 等于爆格宽 $\lambda$ 。仅当 $d \geq \lambda/\pi$ 时,爆震波才能在圆管中建立和传播<sup>[100]</sup>。在相距为 $h$ 的两个平行平板之间,仅在 $h \geq (1/2)\lambda$ 时,爆震才可能。 $h = 1/2\lambda$ 时,边壁平板相当于一个爆格的对称中心面。地面上可燃气体厚度 $H \geq 1.5\lambda$ 时,爆震波可以沿地面传播。这是根据笔者的工作<sup>[99]</sup>推论的。

以上数据可以作为估算某种情况下能否形成爆震的根据。

### 参 考 文 献

- 1 Barnett H. C., Hibbard R. R., Basic considerations in the combustion of hydrocarbon fuel with air, NACA Rep. 1300 (1957) .
- 2 Lewis B., Von Elbe G., Combustion, Flame and Explosions of Gases, Academic Press (1961) .
- 3 Glassman I., Combustion, Academic Press (1977) .
- 4 Fickett W., Davis W. C., Detonation, Univ. of California Press (1979) .
- 5 Lee J. H., Gas Explosion, A Text Prepared for a Short Course at the Institute of Mechanics at Beijing (1981) .
- 6 Weinberg F. J., Wilson J. R., A preliminary investigation of the use of focused laser beams for minimum ignition energy studies, *Proc. Roy. Soc. (London)*, A 321 (1971) : 41—52.
- 7 Kono M., Kumagai S., Sakai T., The optimum condition for ignition of gases by composite spark, 16th Symp. (Intl) on Combustion (1976) .
- 8 Kingdon R. G., Weinberg F. J., The effect of plasma constitution on laser ignition energies, *ibid* (1976) .
- 9 Dixon-Lewis G., Effect of core size on ignition energy by localized sources, *Combust. & Flame*, 33 (1978) : 319—321.
- 10 Phillips H., The mechanism of flameproof protection, Research Report 275, Explos. & Flame Labor., England (1977) .
- 11 Oppenheim A.K., Teichman K., Hom K., Stewart H.E., Jet ignition of an ultra-lean mixture, Techn. Paper series 780637, Lawrence Berkeley Lab., Univ. of California (1978) .
- 12 Hertzberg M., The flammability limits of gases, vapors and dusts: theory and experiment, In "Fuel-Air Explosions", Univ. of Waterloo Press (1982) .
- 13 Ballal D. R., Lofebvre A. H., Spark ignition of turbulent flowing gases, AIAA 15th Aerospace Meeting (1977) .
- 14 —, —, Ignition and flame quenching in flowing gaseous mixture, *Proc. Roy. Soc. (London)*, A 357 (1977) : 163—181.
- 15 Oron E. S., Boris J. P., Theoretical and computational approach to modeling flame ignition in "Combustion in Reactive Systems", AIAA (1981) .
- 16 Guirguis R. H., Oppenheim A. K., Karasalo I., Greighton J., Thermochemistry of methane ignition, *ibid*, AIAA (1981) .
- 17 Bureat A., Calculation of the ignition delay times for methane-oxygen-nitrogen dioxide-argon mixture, *Combust. & Flame*, 28 (1977) : 319—325.
- 18 Krishnan K. S., Ravikumar R., Bhaskaran K. A., Experimental and analytical studies on the ignition of methane-acetylene mixture, *ibid*, 49 (1983) : 41—50.
- 19 Natáraján K., Bhaskaran K. A., An experimental and analytical study of methanal ignition behind shock waves, *ibid*, 43 (1981) : 35—49.
- 20 Warnats J., Flame velocity and structure of laminar hydrocarbon-air flames, in "Combustion in Reactive Systems", AIAA (1981) .
- 21 Cook S.J., Simmons R.F., A flame structure study of lean propane-oxygen flames diluted with argon, *Combust. & Flame*, 46 (1982) : 177—190.
- 22 Westbrooke C.K., Dryer F.L., Prediction of laminar flame properties of methanal-air mixture, *ibid*, 37 (1980) : 171—192.
- 23 Bechtel J. H., Blint R. J., Dasch C. J., Weinberger D. A., Atmospheric pressure premixed hydrocarbon-air flames: theory and experiment, *ibid*, 42 (1981) : 197—213.
- 24 Andrews G.E., Bradley D., The burning velocity of methane-air mixture, *ibid*, 19 (1972): 275—288.
- 25 Liu D. D. S., MacFarlane R., Laminar burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-air-steam flames, *ibid*, 49 (1983) : 59—71.
- 26 Agrawal D. D., Experimental determination of burning velocity of methane-air mixture in a constant volume vessel, *ibid*, 42 (1981) : 243—252.
- 27 Metghalchi M., Keck J.C., Laminar burning velocity of propane-air mixture at high temperature and pressure, *ibid*, 38 (1980) : 143—154.

- 28 Mitani T., Williams F.A., Studies of cellular flame in hydrogen-oxygen nitrogen mixture, *ibid*, **39** (1980) : 169—190.
- 29 Groff E. G., The cellular nature of confined spherical propane-air flame, *ibid*, **48** (1982) : 51—62.
- 30 Williams F. A., Laminar flame instability and turbulent flame propagation, in "Fuel-Air Explosion", Univ. of Waterloo Press (1982) .
- 31 Matsui Y., An experimental study on pyro-acoustic amplification of premixed laminar flames, *Combust. & Flame*, **43** (1981) : 199—209.
- 32 Wagner H. G., Some experiments about flame acceleration, in "Fuel-Air Explosion", Univ. of Waterloo Press (1982) .
- 33 Sabathier F., Boyer L., Clavin P., Experimental study of a weak turbulent premixed flame, in "Combustion in Reactive Systems", AIAA (1981) .
- 34 Moen I. O., The influence of turbulence on flame propagation in obstacle environments, in "Fuel-Air Explosion", Univ. of Waterloo Press (1982) .
- 35 Abdel Gayed R. G., Bradley D., The influence of turbulence upon the rate of turbulent burning, *ibid*, Univ. of Waterloo Press (1982) .
- 36 —, —, Dependence of turbulent burning velocity on turbulent Reynolds number and ratio of laminar burning velocity to root mean square turbulent velocity, 16th Symp. (Intl) on Combustion (1976) .
- 37 Ballal D. R., Lefebvre A. H., Turbulence effects on enclosed flames, *Acta Astronautica*, **1** (1974) : 471—483.
- 38 Chan C., Moen I.O., Lee J. H., Influence of confinement on flame acceleration due to repeated obstacles, *Combust. & Flame*, **49**(1983): 27—39.
- 39 Moen I. O., Donato M., Knystautas R., Lee J. H., Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles, *ibid*, **39** (1980) : 21—32.
- 40 —, —, —, —, Wagner H., Turbulent flame propagation and acceleration in the presence of obstacles, in "Gasdynamics of Detonations and Explosion", AIAA (1981) .
- 41 Ballantyne A., Brag K. N. C., Investigations into the structure of jet diffusion flames using time-resolved optical measuring techniques, 16th Symp. (Intl) on Combustion (1976) .
- 42 Liu Y. K., Lee J. H., Chan C., Thibault P., Pressure rise in closed vessels from turbulent jet ignition, 1982 Spring Technical Meeting, the Combustion Institute, Canadian Section (1982) .
- 43 Dwyer H. A., Kee R. J., Sanders B. R., Calculation of a complex combustion wave with adaptive grids, in "Combustion in Reactive Systems", AIAA (1981) .
- 44 Kent J.H., Bilger W., The prediction of turbulent diffusion flame fields and nitric oxide formation, 16th Symp. (Intl) on Combustion (1976) .
- 45 Chomiak J., Dissipation fluctuations and the structure and propagation of turbulent flames in premixed gases at high Reynolds numbers, *ibid*.
- 46 NASA SP-273.
- 47 Ku A. L., Doria M. L., Lloyd J. R., Numerical modeling of unsteady buoyant flows generated by fire in a corridor: 16th Symp. (Intl) on Combustion (1976) .
- 48 Butler T. D., O'Rourke P. J., A numerical method for two dimensional unsteady reacting flows, *ibid*.
- 49 Moen I.O., Lee J.H., Hjertager B.H., Fuhre K., Eckhoff R.K., Pressure development due to turbulent flame propagation in large-scale methane-air explosion, *Combust. & Flame*, **47** (1982): 31—52.
- 50 Bradley D., Mitcheson A., Mathematical solutions for explosion in spherical vessels, *ibid*, **26** (1976) : 201—217.
- 51 Guide for explosion venting, NFPA 68—1978, USA.
- 52 Morton V. M., Nettleton M. A., Pressures and their venting in spherically expanding flames, *Combust. & Flame*, **30** (1977) : 111—116.
- 53 Solberg D.M., Gas explosion research related to safety of ship and offshore platform, in "Fuel-Air Explosion", Univ. of Waterloo Press (1982) .
- 54 Jarosinski J., Flame quenching by a cold wall, *Combust. & Flame*, **50** (1983) : 167—175.
- 55 Ishikawa N., Branch M.C., An experimental determination of the quenching distance of methanol and iso-octane/methanol blends, *ibid*, **27** (1976) : 65—72.
- 56 Ferguson C. R., Keck J.C., On laminar flame quenching and its application to spark ignition

- engine, *ibid*, **28** (1977): 197—205.
- 57 Ballal D. R., Lefebvre A. H., Flame quenching in turbulent flowing gaseous mixtures, 16th Symp. (Intl) on Combustion (1976) .
  - 58 Chomiak J., Flame quenching by turbulence *Combust. & Flame*, **48** (1982) : 241—249.
  - 59 Thibault P., Liu Y. K., Chan C., Lee J. H., Knystautas R., Guirao C., Transmission of an explosion through an orifice, 19th Symp. (Intl) on Combustion (1982) .
  - 60 Schott G.L., Observations of the structure of spinning detonation, *Phys. of Fluids*, **8** (1965): 850—865.
  - 61 Edwards D. H., Hooper G., Jeb E. M., Parry D. J., The behavior of the frontal and transverse shocks in gaseous detonation waves, *Astronautica Acta*, **15** (1970) : 323—333.
  - 62 Strehlow R. A., Multi-dimensional detonation wave structure, *ibid*, **15** (1970) : 345—357.
  - 63 Urtiew P. A., Reflections of wave intersections in marginal detonations, *ibid*, **15** (1970) : 335—342.
  - 64 Takai R., Yoneda K., Hikita T., Study of detonation wave structure, 15th Symp. (Intl) on Combustion (1974) .
  - 65 Strehlow R. A., Crooker A. J., The structure of marginal detonation waves, *Acta Astronautica*, **1** (1974) : 303—315.
  - 66 Libouton J. C., Dormal M., Van Tiggelen P., Reinitiation process at the end of the detonation cell, in "Gasdynamics of Detonations and Explosions", AIAA (1981) .
  - 67 Westbrook C. K., Chemical kinetics of hydrocarbon oxidation in gaseous detonations, *Combust. & Flame*, **46** (1982) : 192—210.
  - 68 Libouton J. C., Dormal M., Van Tiggelen P., The role of chemical kinetics on structure of detonation waves, 15th Symp. (Intl) on Combustion (1974) .
  - 69 Tarver C.M., Chemical energy release in one-dimensional detonation waves in gaseous explosives, *Combust. & Flame*, **46** (1982) : 111—133.
  - 70 —, Chemical energy release in the cellular structure of gaseous detonation waves, *ibid*, **46** (1982) : 135—156.
  - 71 Lee J. H., Knystautas R., Guirao C., The link between cell size, critical tube diameter, initiation energy and detonation limits, in "Fuel-Air Explosion", Univ. of Waterloo Press (1982) .
  - 72 —, Initiation of gaseous detonation, *Ann. Rev. Chem.*, **28** (1977) : 75—104.
  - 73 —, Recent advances in gaseous detonations, AIAA 17th Aerospace Sci. Meeting (1979) .
  - 74 Edwards D. H., Thomas G. O., Williams T. L., Initiation of detonation by steady planar incident shock waves, *Combust. & Flame*, **43** (1971) : 187—198.
  - 75 Knystautas R., Lee J. H., On the effective energy for direct initiation of gaseous detonation, *ibid*, **27** (1976) : 221—228.
  - 76 Matsui H., Lee J. H., Influence of electrode geometry and spacing on the critical energy for direct initiation of spherical gaseous detonation, *ibid*, **27** (1976) : 217—220.
  - 77 Thrush B. A., The homogeneity of explosions initiated by flash photolysis, *Proc. Roy. Soc. (London)*, **A 233** (1956) : 439—469.
  - 78 Wadworth J., Use of flash photolysis to initiate detonation in gaseous mixtures, *Nature*, **190** (1961) : 623—624.
  - 79 Lee J. H., Knystautas R., Yoshikawa N., Photochemical initiation of gaseous detonation, *Acta Astronautica*, **5** (1978) : 971—982.
  - 80 Knystautas R., Lee J. H., Moen I., Wagner G.H., Direct initiation of spherical detonation by a hot turbulent gas jet, 17th Symp. (Intl) on Combustion (1978) .
  - 81 Lee J. H., Moen I. O., The mechanism of transition from deflagration to detonation in vapor cloud explosion, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **6** (1980) : 359—389.
  - 82 Brochet C., Sayous M., Detection method for the deflagration to detonation transition in gaseous explosive mixtures, in "Gasdynamics of detonations and Explosions", AIAA (1981) .
  - 83 Hasson A., Avinor M., Bureat A., Transition from deflagration to detonation, spark ignition, and detonation characteristics of ethylene-oxygen mixture in a tube, *Combust. & Flame*, **49** (1983) : 13—26.
  - 84 Chan C., Valenta K., Lee J. H., Knystautas R., Ultimate flame speeds by turbulent flame acceleration due to repeated obstacles, Chem. & Phys. Proc. in Combust., 1982 Techn. Meeting, the Eastern Section of the Combustion Institute, USA.
  - 85 Lee J. H., Matsui H., A comparison of the critical energies for direct initiation of spherical

- detonations in acetylene-oxygen mixture, *Combust. & Flame*, **28** (1977) : 61—66.
- 86 Collins P.M., Detonation initiation in unconfined fuel-air mixture, *Acta Astronautica*, **1** (1974): 259—266.
- 87 Bull D. C., Elsworth J. E., Hooper G., Concentration limits to unconfined detonation of ethane-air, *Combust. & Flame*, **35** (1979): 27—40.
- 88 Atkinson R., Bull D. C., Shuff P. J., Initiation of spherical detonation in hydrogen/air, *ibid*, **39** (1980) : 287—300.
- 89 Westbrook C. K., Chemical kinetics in gaseous detonation, in "Fuel-Air Explosions", Univ. of Waterloo Press (1982) .
- 90 Bull D. C., Towards an understanding of the detonability of vapour clouds, *ibid*.
- 91 Urtiew P. A., Tarrer C. M., Effects of cellular structure on the behavior of gaseous detonation waves under transient conditions, in "Gasdynamics of Detonations and Explosions", AIAA (1981) .
- 92 Lee J.H., Ramamurthi K., On the concept of the critical size of a detonation kernel, *Combust. & Flame*, **27** (1976) : 331—340.
- 93 Guignis R. H., Oppenheim A. K., Kamel M. M., Self-similar blast waves supported by variable energy deposition in the flowfield, in "Gasdynamics of Detonations and Explosions", AIAA (1981) .
- 94 Desbordes D., Manson N., Brossard J., Pressure evolution behind spherical and hemi-spherical detonations in gases, *ibid*, AIAA (1981) .
- 95 Logan J. D., Bdzil J. B., Self-similar solution of the spherical detonation problem, *Combust. & Flame*, **46** (1982) : 253—269.
- 96 Matsui H., Lee J. H., On the measure of the relative detonation hazards of gaseous fuel-oxygen and air mixtures, 17th Symp. (Intl) on Combustion (1978) .
- 97 Knystautas R., Lee J. H., Guirao C. M., The critical tube diameter for detonation failure in hydrocarbon-air mixture, *Combust. & Flame*, **48** (1982) : 63—83.
- 98 Edwards D. H., Thomas G. O., Nettleton M. A., Diffraction of a planar detonation in various fuel-oxygen mixtures at an area change, in "Gasdynamics of Detonations and Explosions", AIAA (1981) .
- 99 Liu Y. K., Lee J. H., Knystautas R., Effect of geometry on the transmission of detonation through an orifice, *Combust. & Flame*, **56** (1984) : 215—225.
- 100 Moen I.O., Donato M., Knystautas R., Lee J. H., The influence of confinement on the propagation of detonations near the detonability limits, Research Report of McGill University (1981).

## DEFLAGRATION AND DETONATION OF COMBUSTIBLE GASES

Liu Yu-kui

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

### Abstract

Chemical energy released through combustion is the most important energy source at present. Combustion consists of two phenomena, deflagration and detonation. To save energy and to prevent from explosion hazard in industry, many valuable developments of combustion investigation have been achieved in recent years. This paper introduces some new results in these branches of combustion: ignition, structure and propagation of flame, explosion caused by combustion, venting and quenching in deflagration, *CJ* detonation, structure of detonation wave, generation of detonation, propagation of detonation, transmission of detonation through orifice and propagation limit of detonation. In addition, some theoretical and technical problems on combustion, so far unsolved, are discussed in this paper.

• 354 •