

一氧化碳和空气预热混合气在管道内的爆炸特性

张良 魏小林 余立新 李腾 李博

(中国科学院力学研究所 100190)

摘要: 转炉煤气的主要成分为一氧化碳, 具有高温、易爆等特点。为了安全回收煤气显热, 需要研究不同温度下的一氧化碳和氧化剂(空气)混合气在管道输送中的爆炸特性。本文分析了火焰加速的机理, 结合预热混合气的火焰在有障碍管道中传播的实验结果, 研究了一氧化碳的爆炸特性以及预热温度对其的影响, 为高温可燃气的抑爆和回收利用提供一定的理论和实验依据。

关键词: 转炉煤气; 余热; 爆炸; 爆燃; 火焰加速

Explosive Characteristics of Pre-Heated Mixture of CO and Air in Flues

ZHANG Liang WEI Xiao-lin YU Li-xin LI Teng LI Bo

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: Converter gas is high-temperature and explosive, with carbon monoxide main combustible component. To recover sensible heat of the gas safely, it is necessary to study the characteristic of explosion for mixture of carbon monoxide and oxidizer (air) with different temperatures in duct transportation. This paper analyses the mechanism of flame acceleration, tests flame propagation of preheated mixture in duct with obstacles, and fixes on the characteristic of explosion for carbon monoxide and preheated temperature factor, so as to give theoretical and experimental foundation for explosion suppression of high-temperature gas and gas recycle.

Key words: Converter gas; Waste heat; Explosion; Deflagration; Flame acceleration

1 前言

转炉煤气含有 60% 以上的 CO (一氧化碳), 是一种回收价值很高的中热值煤气。转炉煤气的初温可达 1450℃, 通常先经过汽化冷却烟道将煤气降温至 1000℃, 然后采用 OG 法(湿法)或 LT 法(干法), 即喷水或喷水雾将煤气剧冷至低温后回收。除煤气的化学热外, 转炉煤气还包含很大的显热, 全部显热相当于 8~10 千克标煤/吨钢。但是回收全部的转炉煤气显热会遇到爆炸的危险, 如何保证安全高效地回收转炉煤气的全部显热并发电, 是冶金行业节能减排工作的重要课题。

管道对火焰传播有明显的加速效应, 由此带来的爆炸冲击(可达 7、8 个大气压)对设备的破坏是相当严重的。本文首先分析爆炸(火焰加速)机理, 然后从实验角度, 将煤气的主要成分 CO 和空气的混合物加热后在管道中点燃, 通过对火焰信号和压力信号的测量, 探讨实际的火焰加速和 CO 相关的爆炸特性。

2 管道内火焰加速机理

由于 CO 和空气反应强度较弱, 火焰在管道中最终主要形成稳定传播的爆燃波, 即带有前驱冲击波的亚音速火焰。因而本文将着重于爆燃分析, 不涉及爆轰以及爆燃转爆轰的过程。混合气体被点燃后, 形成了一个压力波在火焰面前端叠加堆积, 强度不断增强的过程。考虑一个方向上的火焰传播, 点燃端可理解为壁面, 典型的双波三区结构模型^[1-2]见示意图 1。

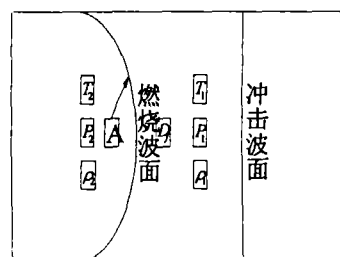


图 1 火焰在管道传播的双波三区模型

若火焰面积为 A ，燃烧速度为 S ，反应物密度为 ρ_1 ，则在 δt 时间内参加反应的反应物质量为 $AS\rho_1\delta t$ ；若管道内的有效横截面积（考虑阻塞效应）为 a ，生成物沿管道的平均长度为 l ，设生成物在 δt 时间内沿管道增加的长度为 δl ，则在 δt 时间内生成物的质量增加量为 $a\rho_2\delta l$ 。由于参加反应的反应物质量应等于生成物的质量增加量，即 $AS\rho_1\delta t = a\rho_2\delta l$ ，于是火焰传播速度可表示为

$$D_f = \frac{\delta l}{\delta t} = \sigma S \left(\frac{A}{a} \right), \quad \text{式中膨胀因子 } \sigma = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad \text{显}$$

然火焰传播速度与 σ ， S 和 A 成正比例关系。

火焰初始阶段的加速主要是由产物膨胀造成的，点然后的产物受到左端边界的限制向右传播，火焰形状由半圆球状逐渐过渡为指状，伴随着火焰面积成指数增长，带来更大的火焰速度。这种火焰面积的增加只会存在短暂时间^[3]，后期加速的因素包含以下几点：

(1) 边界效应。文献^[4]的分析显示管壁形成的无滑移边界导致火焰不断的加速，对于活性气体甚至触发爆轰。这主要是由于边界的粘性层和壁面热损失使得火焰弯曲，获得了更大的火焰面积，壁面粗糙度越大，这种效应会越明显。

(2) 火焰和流体力学不稳定性。平面层流火焰在现实中是不能稳定存在的，化学反应和生成热被限制在接近于产物的很薄区域内，而热和组分的对流和扩散在火焰较宽的预热区内保持平衡，火焰面前后的流场会通过汇合和分开来加强任何因素导致的火焰面变形^[5]，形成 Darrieus-Landau (D-L) 不稳定性。这种不稳定性^[6]也将通过增加火焰面面积来增加火焰速度，并且生成热越大不稳定性越强。对于较小的 Le 数，热扩散不稳定性也会加强褶皱的火焰面^[5]。上述两个不稳定性仅在火焰加速早期起重要作用，后期流体力学的不稳定因素，如剪切形成的 Kelvin-Helmholtz(K-H)不稳定性和密度差形成的 Rayleigh-Taylor(R-T)不稳定性，是增强湍流和增加火焰面积的主要机理。

(3) 湍流效应。当形成湍流火焰后，大涡扭曲了火焰面形状，小涡增加了火焰面的褶皱。湍流火焰加强了物质的输运，燃烧速度是层流燃烧速度的 2.6~7 倍^[7]。当火焰速度增大时，火焰面前端势

必将带来更大的气流速度，从而增强湍流及湍流燃烧速度，形成正反馈机制。当然湍流火焰的加速机制是有限度的，过于迅速的湍流混合将使化学反应不能有利进行而熄灭。

(4) 压力波影响。前驱的压力波有预热未燃混合气的作用，对于一般燃烧反应初温越高，反应越剧烈即可有更高的燃烧速度。火焰前后会有许多反射的压力波作用在火焰面上，这种压力波和火焰面相互作用机制^[8-9]增加了火焰面的不稳定因素，增强了火焰的变形和褶皱从而最终提高了火焰燃烧速度。同时每一次燃烧速度的增加都会带来火焰面前后形成更强的压力波以及反射的压力波，这也形成了相互强化的正反馈机制。实验研究^[10-11]表明管壁有声吸附材料时对爆炸有明显的抑制作用，将氢氧混合物最终的火焰速度由 1000m/s 降至 100m/s。

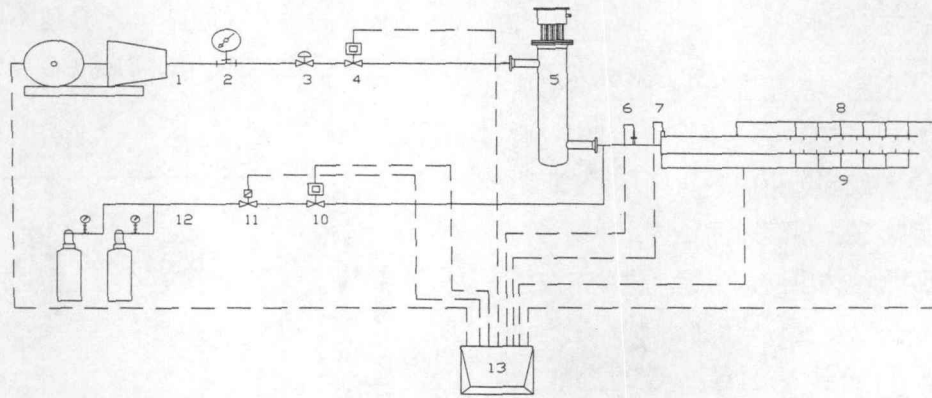
(5) 障碍物作用。障碍物的作用是最为显著的因素，其主要加速作用在于三点：一是管道形状的改变，火焰通过时出现拉伸现象，大幅增加了火焰面积；二是这种管道的突然变化对 K-H 和 R-T 不稳定性有强烈的触发作用；三是障碍物增强了压力发射波对火焰的作用。实验研究^[12]表明，在其它条件相同时，活性较弱的混合气（如甲烷/空气），无障碍物时最大火焰速度只有每秒几十米，而有障碍物时可达每秒几百米；活性强的混合气（如乙炔/空气）有障碍物时将很容易出现爆轰。

3 实验装置

实验装置见图 2，爆炸管道从点燃处到出口端长度为 5.26m，其中光管段 2.76m，障碍物段 2.5m（分布 10 个等间距圆环，截面积阻塞比 0.4375），管长方向上分布有 7 个压力传感器和 7 个光电二极管火焰传感器以获取压力和火焰信号。火焰传感器响应小于 0.001ms，满足测量爆炸火焰速度的需求。空气被电加热器加热后与 CO 气体混合，通过热电偶测量混合后气体温度，达到设定温度后点燃混合气，其中管道混合气总的平均流速保持在 2m/s 左右，初始压力接近外界大气压，混合气浓度由调节空气和 CO 的流量配比来控制。压力和火焰的测点具体位置见图 3，障碍物的作用主要是使火焰速度和爆炸压力迅速达到最大值，为了获取这些重要信号，测点主要布置于障碍物段

上部 7 个测点测量压力信号，下部 7 个测点测量火焰信号，压力测点 1 距点火处距离为 1.77m，火焰测点 1 位于点火处以确定点火时间，压力信号

测点 2~7 和火焰信号测点 2~7 距点火处距离分别 测点的间距除以火焰通过这两个测点的时间差。
 相同 (相隔 0.4m), 其中火焰速度为相邻两个火焰



1 变频防爆罗茨风机 2 气压计 3 球阀 4 质量流量计 5 防爆电加热器 6 热电偶
 7 点火器 8 压力传感器 9 火焰传感器 10 质量流量计 11 电磁阀 12 气瓶 13 控制和信号采集台

图 2 实验装置图

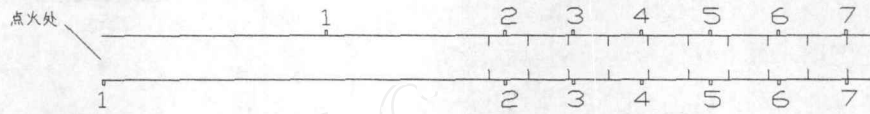


图 3 各测点距点火处的相对位置

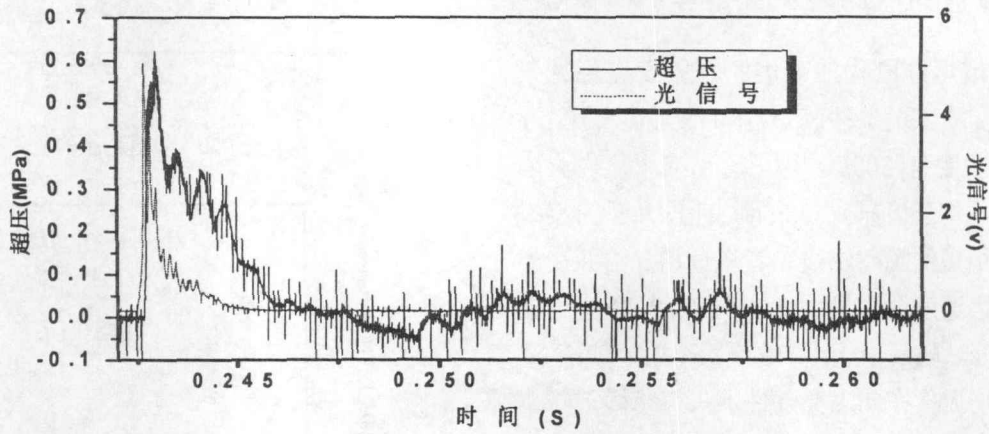


图 4 压力和火焰信号

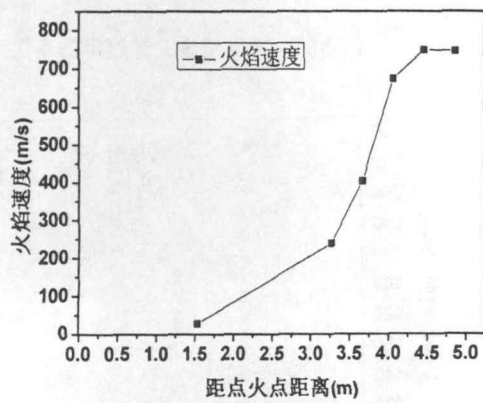


图 5a 火焰速度发展过程

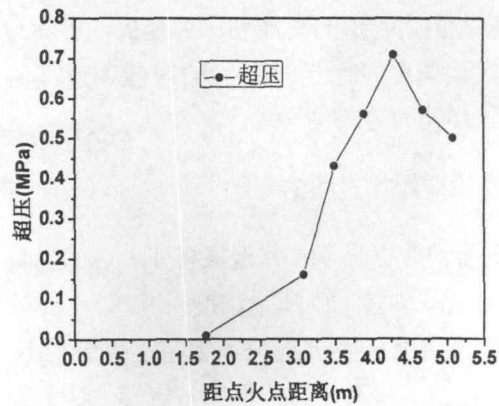


图 5b 超压发展过程

4 实验结果分析

4.1 压力和火焰信号的分析

图4是实验中所测得的超压和火焰光信号随时间变化的情况,为同一位置(6号测点)处的数据。可以看出光信号从起跳到结束的时间只有2.5毫秒左右,而压力波动复杂,持续时间长达几十毫秒。和理论性的双波三区结构不同,由于前驱冲击波强度弱、压力信号滞后以及复杂的火焰结构,超压起跳和波动均落后于光信号,并且经过较长时间的震荡才会恢复到常压。光信号反应了化学反应程度,可估计整个火焰区长度有:

$$0.0025(s) \times 750(m/s) = 1.875(m)$$

其中750(m/s)取自于下文4.2节中图5a(图4取自4.2节工况的测点)。火焰面在障碍物段被拉得很长并且火焰存在波动,每个光信号的波动以后几乎都对了一个超压的波动,这正说明了实际的爆燃湍流火焰结构的复杂性。

4.2 火焰沿管道加速过程

典型管道爆炸过程的火焰和超压发展可见于上图5a、b,实验工况条件:CO当量比为 $\Phi = 1.25$,初始混合气温度为300K。可以看出光管段内火焰加速很慢,平均速度只有28m/s,超压几乎为零;在比光管段稍短的障碍物段二者快速增加,并在接近出口端火焰速度达到最大值749m/s、超压达到最大值0.71MPa。随后由于出口的泄压作用,超压降低下来而火焰速度在此工况条件下只有略微下降。根据爆燃爆轰理论^[2],爆燃速度最大可以达到临界的C-J爆燃状态,此时火焰速度将和产物的等压声速接近,火焰后方的边界条件约束将不再对火焰传播发生影响。由于管道的动能和压力损失,实际最终的最大火焰速度将比当时产物的等压声速(约850m/s)小100m/s左右。

4.3 CO当量比对爆炸过程的影响

实验测得的数据显示,常温条件下,CO当量比在0.583-3.25(对应CO质量浓度为0.192-0.569)之间时火焰可以充分发展起来,其它当量比情况下,火焰很难加速起来,甚至不容易点燃。这主要是由于远离当量比化学反应剧烈程度明显下降,初始混合气的湍流对这种微弱反应的发展具有破坏而不是加强作用,同时一种反应物量相对太少也难

达到均匀混合。图6a~d为初始温度300K,CO当量比在0.583~3.25情况下的最大火焰速度、峰值超压(最大超压)、峰值超压上升速率以及火焰从点燃到达最后测点的传播时间随CO当量比的变化情况。可以得出:

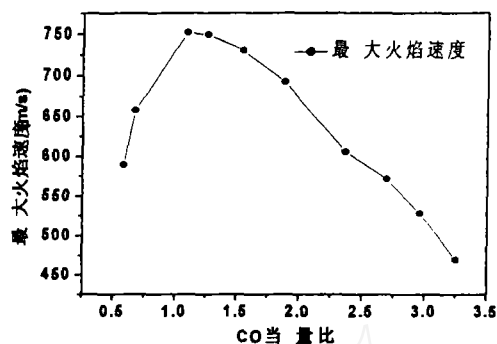


图6a 最大火焰速度的变化

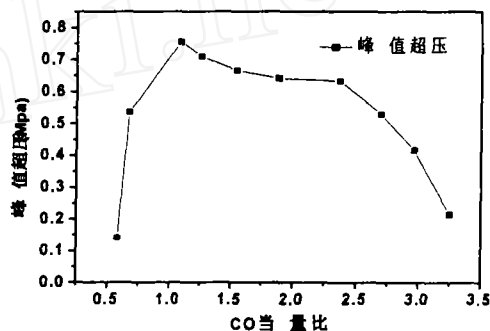


图6b 峰值超压的变化

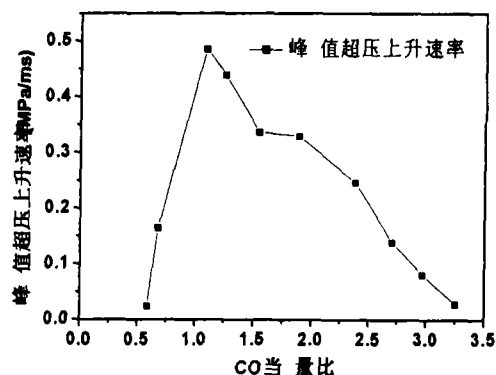


图6c 峰值超压上升速率的变化

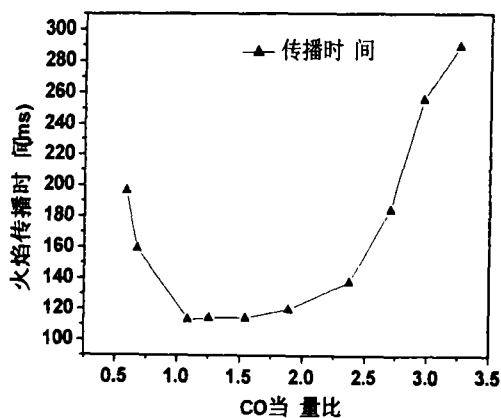


图6d 传播时间的变化

(1) 当量比在 $\Phi = 1.10$ 处爆炸强度最大, 最大火焰速度达到 752m/s, 超压达到 0.76MPa。

(2) 火焰得到充分发展的 Φ 范围主要分布在 $\Phi > 1$ 区域, 而在 $\Phi < 1$ 区域内, 随 Φ 的减小, 最大火焰速度和峰值超压都很快减小。

(3) 定义峰值超压的上升时间为超压从零到峰值的时间间隔, 超压上升速率即为峰值超压除以上升时间, 这也是反映爆炸强度的重要标准。实验测得最大的超压上升速率在 $\Phi = 1.10$ 处, 值为 0.485MPa/ms。

(4) 整个火焰传播的时间在 110ms 至 300ms 之间, 总结各工况光管段的传播占据了绝大部分的时间, 障碍物段的传播时间只有 4ms 至 10ms 之间。

4.4 温度对爆炸特性的影响

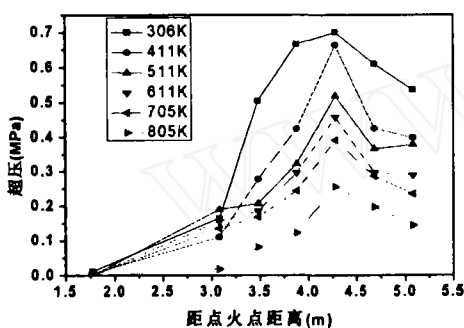


图 7a 超压发展随温度的变化

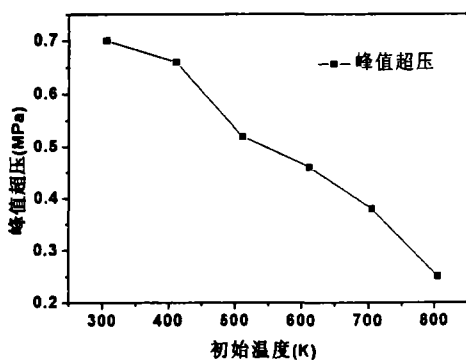


图 7b 峰值超压随温度的变化

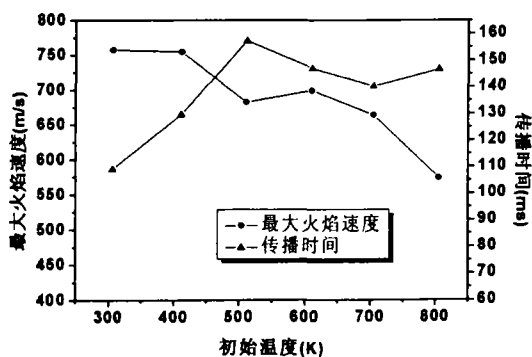


图 7c 最大火焰速度和传播时间随温度的变化

选择同一当量比 $\Phi = 1.10$ 条件下的不同温度作为工况条件重新做一组实验, 每个工况之间相差约 100K 的温度。图 7a-c 分别反映超压发展, 峰值超压以及最大火焰速度和传播时间随温度的变化情况, 表 1 为不同温度下的各位置点火焰速度。说明一点, 由于实验误差和初始条件不同, 所得到的 306K 的数据和 4.3 节中 300K 的数据有些差别 (比如 306K 下的最大火焰速度为 757.6 m/s, 峰值超压 0.7MPa), 但差别不大, 符合物理规律。随着温度升高, 爆炸的峰值超压逐渐减小, 从 306K 的 0.7MPa 下降到 805K 的 0.25MPa, 最大火焰速度也有减小, 但只从 757.6m/s 减小到 574.7m/s。同时传播时间起初较快增加, 后期较为平稳。可以得出三点重要结论:

表 1 不同温度下的各位置火焰速度(m/s)

位置(m)	温度(K)					
	306	411	511	611	705	805
1.54	29.4	24.8	20.4	21.8	22.8	24.2
3.28	246.3	187.6	145.9	179.5	212.6	134.3
3.68	414.1	383.1	284.1	327.9	331.7	186.9
4.08	626.9	557.1	561.8	552.5	561.8	398.4
4.48	757.6	754.7	682.6	699.3	664.5	522.2
4.88	678.0	636.9	641.0	602.4	588.2	574.7

(1) 超压发展基本满足随温度升高而变缓的规律, 峰值超压也随温度升高很快减小。

(2) 虽然温度高时峰值超压的强度有明显下降, 但火焰仍有比较快的传播速度, 对爆炸抑制具有特别的意义。

(3) 温度较低(小于 511K)时, 火焰加速随温度升高而明显减缓, 传播时间迅速增加。继续升温至 511K 以后火焰传播时间变化并不大, 说明高温区域内总体的平均传播速度相差不大。表 1 可以看出在 511K、611K 和 705K 温度下, 火焰沿管道加速变平缓, 即初期火焰速度更快些而后期更慢些。特别的, 在更高温度 805K 下, 后期火焰加速很慢直到接近出口还在加速, 而前期光管段火焰加速最快, 弥补了传播时间和其它温度的差距。

与火焰速度相关的膨胀因子 σ , 燃烧速度 S 和火焰面积 A 都没有直接涉及到温度, 然而很明显温度也是影响爆炸强度的重要因素。温度的变化主要带来四方面的影响:

(1) 对膨胀因子 σ 的影响。由于 $\sigma = \frac{\rho_1}{\rho_2}$,

$\rho_1 \propto 1/T_1$, 而 ρ_2 受初始温度 T_1 影响并不十分敏感, 因而 $\sigma \propto 1/T_1$, 即膨胀因子和初温成反比。实际上在初压相同条件下初温高则密度低, 体积能量释放率就少了, 爆炸强度必然会减弱, 这点可以归结到对膨胀因子 σ 的影响。

(2) 对 CO 和空气的化学反应的影响。空气中的 O_2 和 CO 混合时, 空气中少量的 H_2O 会生成自由基促进反应, 整体反应的速度常数随温度的升高而增大。从实验结果可以看出, 高温情况下初期火焰加速更快和此点影响有很大关系。

(3) 对混合气的声速影响。温度升高后, 混合气的声速提高, 压力波在气体介质中传播更快, 形成相同强度的前驱冲击波就必然需要更高的火焰速度, 因而温度较高时同样的火焰速度对应的超压必然要小。

(4) 对超压的影响。火焰面前端的压力变化 ΔP 可以表示为:

$$\Delta P = \rho_1 R_1 \Delta T = \rho_1 R_1 (T_1' - T_1)$$

其中, R_1 为燃烧前的气体常数, T_1 , T_1' 为初始温度和燃烧前的温度 (由于湍流传热和压力压缩作用气体燃烧前可以达到较高温度)。在初始压力相同情况下, 初始温度 T_1 越高, 超压以及峰值超压越低。

5 结论

(1) 管道火焰加速是产物膨胀、边界条件、火焰和流体力学不稳定性、湍流、压力波和火焰面相互作用以及障碍物等因素共同作用的结果。

(2) 常温条件下火焰得到充分发展的 CO 当量比在 0.583-3.25, 主要分布在 $\Phi > 1$ 区域内。障碍物对其的加速效应非常明显, 整个火焰传播的时间在 110ms 至 300ms 之间, 其中在光管段的传播占据了绝大部分的时间, 障碍物段的传播时间只有 4ms 至 10ms 之间。

(3) 实际爆燃的湍流火焰面被拉得很长 (达到 1-2 米), 同时存在波动, 超压也随之波动。

(4) 通过对膨胀因子、化学反应、声速以及超压的影响, 温度成为影响爆炸强度的重要因素。超压发展基本满足随温度升高而变缓的规律; 虽然

温度高时峰值超压的强度有明显下降, 但火焰仍有比较快的传播速度; 较高温度区域内 (大于 511K) 传播时间变化并不大, 火焰沿管道加速相对平缓, 即初期火焰加速更快些而后期更慢些。

参考文献

- [1] D. Bradley, M. Lawes, Kexin. Liu, Turbulent flame speeds in ducts and the deflagration/detonation transition [J], Combustion and Flame, 2008, 154: 96-108.
- [2] 赵衡阳, 气体和粉尘爆炸原理 [M], 北京理工大学出版社, 1996.
- [3] Vitaly. Bychkov, V'yacheslav. Akkerman, Gordon. Fru, Arkady. Petchenko, Lars-Erik. Eriksson, Flame acceleration in early stages of burning in tubes [J], Combustion and Flame, 2007, 150: 263-276.
- [4] V'yacheslav. Akkerman, Vitaly. Bychkov, Arkady. Petchenko, Lars-Erik Eriksson, Accelerating flames in cylindrical tubes with nonslip at walls [J], Combustion and Flame, 2006, 145: 206-219.
- [5] G. Ciccarelli, S. Dorofeev, Flame acceleration and transition to detonation in ducts [J], Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34: 499-550.
- [6] R.C. Aldredge, Baifang. Zuo, Flame acceleration associated with the Darrieus-Landau Instability [J], Combustion and Flame, 2001, 127: 2091-2101.
- [7] T. W. Lee, S. J. Lee, Direct comparison of turbulent burning velocity and flame surface properties in turbulent premixed flames [J], Combustion and Flame, 2003, 134: 492-502.
- [8] Elaine. S. Oran, Vadim. N. Gamezo, Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion [J], Combustion and Flame, 2007, 148: 4-47.
- [9] 何小民, 张彭岗, 王家骅, 爆震管内爆燃到爆轰转换过程的实验研究 [J], 推进技术, 2005, 26(3): 252-255.
- [10] A. Teodorczyk, J. S. H. Lee, Detonation attenuation by foams and wire meshes lining the walls [J], Shock Waves, 1995, 4(4): 225-236.
- [11] 郭长铭, 李剑, 爆轰波在阻尼管道中声吸收的试验研究 [J], 爆炸与冲击, 2000, 20(4): 289-295, 2001.
- [12] 余立新, 障碍物扰动对半开口管道中火焰传播特性的影响 [D], 中国科学院博士学位研究生学位论文.
- [13] Stephen. R. Turns, An Introduction to Combustions: concepts and applications (second edition) [M], McGraw-Hill Companies, 2000.
- [14] 伯纳德. 刘易斯, 京特. 冯. 埃尔贝等著, 王芳译, 燃气燃烧与瓦斯爆炸 [M], 中国建筑工业出版社, 2007.