第 30 卷　第 2 期
2010 年 3 月

爆　炸　与　冲　击
EXPLOSION AND SHOCK WAVES

Vol. 30 , No. 2
Mar. , 2010

文章编号: 1001-1455(2010)02-0191-06

管道内一氧化碳和空气预热混合物的爆燃特性*

张　良,魏小林,余立新,张　宇,李　腾,李　博
(中国科学院力学研究所等离子体与燃烧中心,北京 100190)

摘要: 为了安全回收煤气余热,实验研究了不同初始温度下的一氧化碳和空气混合气体在设置障碍物的管道中的爆燃特性。测量了爆燃压力和火焰速度,分析了化学当量比和温度对爆燃的影响。结果表明:爆燃压力和火焰速度在障碍物段快速提高;一氧化碳当量比为 1.1 时爆燃的强度最大;初始温度升高后,压力提高逐渐减缓,最大火焰速度下降,但仍大于 550 m/s,传播时间先快速增加后平稳。

关键词: 爆炸力学;爆燃;障碍物;转炉煤气;爆炸;高温;余热

中图分类号: O381　　**国标学科代码**: 130·3510　　**文献标志码**: A

1　引　言

转炉煤气含有 60 %以上的 CO,是一种回收价值很高的中热值煤气。转炉煤气的初温可达 1 450 ℃,通常先经过汽化冷却烟道将煤气降温至 850 ℃,然后采用湿法回收法或干法回收法,即喷水或喷水雾将煤气剧冷至低温后回收。除化学热外,转炉煤气中包含了大量余热,相当于 8～10 千克标煤/吨钢。全部回收转炉煤气余热必然存在爆炸的危险,因为在煤气余热回收过程中爆炸的 3 要素都将会满足:(1)转炉的断续生产使煤气在炼钢的开始和结束阶段混入了一定量的空气,很容易使混合气体达到爆炸极限,特别在一些流动性不好的死角;(2)在回收余热的余热锅炉内煤气会降温至自燃点以下;(3)煤气中的高温烟尘颗粒是引发爆炸的重要爆源。如何保证安全高效地回收转炉煤气的全部余热并发电,是冶金行业节能减排工作的重要课题。管道内的燃气爆炸表现出爆燃的特点,而研究 CO-air 爆燃机理是转炉煤气余热回收首要解决的问题。考虑到转炉煤气具有较高温度以及在回收管道中含有大量的障碍物,因此,究其本质是要研究在不同初始温度和管道内有障碍物的情况下,CO-air 爆燃过程中压力和火焰速度的特性。

已有大量相关研究的报道,C. Chan 等[1]在实验研究中使用 CH_4 与空气混合气体,指出管道中障碍物的限制对火焰加速有正反馈作用;A. Teodorczyk 等[2]和郭长铭等[3]的研究表明,衬有声吸收材料的管壁对爆燃有明显的抑制作用,如将氢氧混合物最终的火焰速度由 1 000 m/s 降至 100 m/s,反映了压力波对爆燃的作用。张建华[4]使用焦炉煤气(58.5 %H_2、22.2 %CH_4、5.1 %N_2、2.1 %CO、3.2 %CO_2、0.8 %O_2、8.1 %C_mH_n)研究得出在一定范围内随着管长的增加,最大爆炸压力增大而火焰速度减小。余立新等[5-6]研究得出在阻塞比相同的情况下,障碍物形状不对管道可燃气爆燃爆轰产生影响,其实验气体包括 H_2、C_2H_2、水煤气(58.5 %H_2、30.0 %CH_4、5.4 %N_2、6.1 %CO)、液化石油气(76.18 %C_3H_8、19.95 %C_3H_6)和 CH_4等。关于 CO-O_2混合气体爆轰速度的研究中得到该速度可达到 1 700 m/s[7]。赵衡阳[8]指出在管道内火焰加速机理中,初始温度的影响没有湍流机理作用大。

目前,研究较高温度下的 CO-air 混合物的爆燃特性既有工程背景又有理论意义。本实验中将转炉煤气的主要成分 CO 和空气混合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 CO 爆燃特性以及化学当量比和温度对 CO 爆燃特性的影响。

* **收稿日期**: 2009-01-05; **修回日期**: 2009-07-17
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2006AA05Z253);
中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGCX2-YW-321)
作者简介: 张　良(1983 —　),男,硕士研究生。

2 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示,空气被电加热器加热后与 CO 混合,通过热电偶测量混合物的温度,达到设定温度后再点燃混合气体。管道内混合气体总流量保持在约 36 Nm^3/h,CO 当量比由调节空气和 CO 的流量配比来控制。初始压力接近外界大气压,出口是一个具有较大空间的消音器。

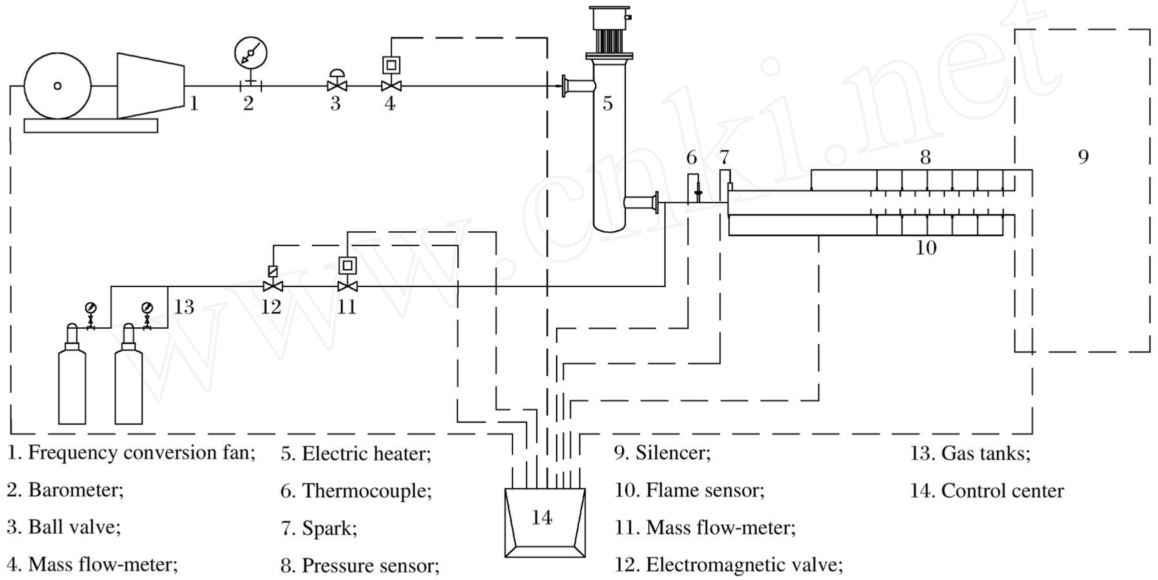

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 A sketch map for the experimental setup

测量管道示意图如图 2 所示,点火端到出口的长度为 5.26 m,其中光滑管壁段长度为 2.76 m,障碍物段长度为 2.50 m(分布 10 个等间距圆环,截面积阻塞比为 0.61)。沿管道轴线布置了 7 个压力传感器(上部)和 7 个光电火焰传感器(下部)分别获取压力信号和火焰的光信号。本文中着重于研究障碍物段的爆燃特点,因此把传感器主要布置在障碍物段。压力测点 1 距点火处 1.77 m,光测点 1 位于点火端,用以确定点火时间。压力信号测点 2~7 和光信号测点 2~7 距点火处距离分别相同,测点 2~7 之间分别相隔 0.40 m,测点 2 距点火处 3.08 m,其中火焰速度为相邻 2 个光测点的平均速度(间距除以火焰通过这 2 个测点的时间差)。火焰传感器的响应时间小于 1 μs,满足测量火焰速度的要求。

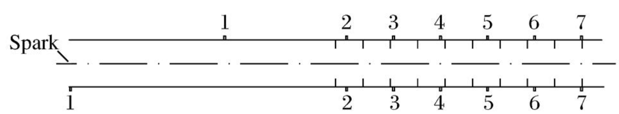

图 2 各测点距点火处的相对位置

Fig. 2 Layout of pressure and flame transducer ports

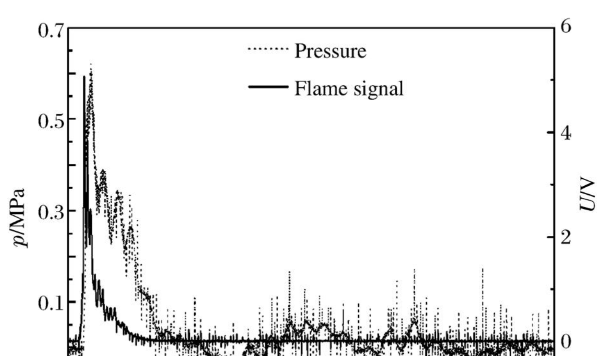

图 3 压力和火焰信号

Fig. 3 Pressure and flame signals

3 实验结果与分析

3.1 压力和火焰信号的分析

图 3 是测得的 6 号测点的压力和火焰信号。图中火焰信号从起跳到结束历时约 2.5 ms,而压力信号起止时间约 22.0 ms。火焰信号强弱反映

了化学反应的剧烈程度,而化学反应前后压力剧变,因而 2 信号的峰值点存在对应关系。由于压力信号的测量滞后于光信号的测量,因此压力信号峰值落后于火焰信号峰值。

3.2　火焰沿管道的加速过程

典型管道爆燃的火焰和压力演变过程可见图 4。工况条件:CO 当量比 ϕ = 1.250 ,初始混合气温度为 300 K。光滑管段内火焰加速缓慢,平均速度只有 28.0 m/s,压力几乎为零;在比光滑管壁段稍短的障碍物段火焰速度和压力迅速攀升,靠近出口端时火焰速度达到最大值 749.1 m/s,压力达到最大值 0.71 MPa。由于出口的泄压作用,压力达到最大值后明显降低下来。实验测得火焰从光测点 1 到光测点 2 的传播时间为 110.0 ms,而从光测点 2 到光测点 7 只用了 4.3 ms,即火焰在光滑管壁段中的传播占用了绝大部分时间。以上说明了障碍物对管道爆燃的作用显著,使火焰速度和压力得到了快速提高。

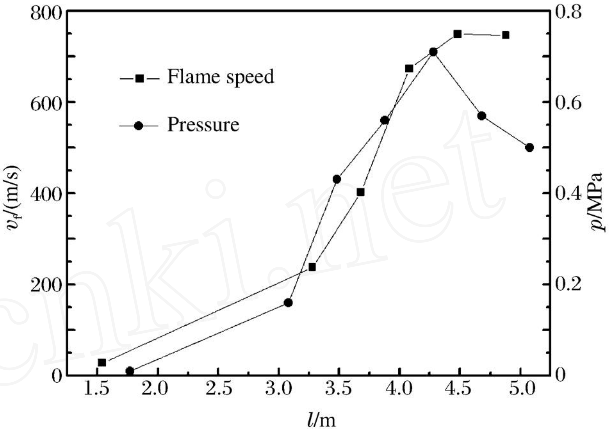

图 4 火焰速度和压力演变过程

Fig. 4 Evolution of flame speed and pressure

3.3　CO 当量比对爆燃过程的影响

实验显示,常温条件下的 CO 当量比为 0.583～3.250 (对应 CO 质量浓度为 0.192～0.569) ,火焰可以充分发展起来;而在上述范围外火焰很难得到加速,混合气体甚至不容易被点燃。初始温度为 300 K、CO 当量比 ϕ 为 0.583～3.250 的情况下,最大火焰速度、火焰从点火处到达最后测点的传播时间、最大压力以及最大压力上升速率随 CO 当量比的变化情况,如图 5 所示。从图 5 可以看出:

(1) CO 当量比 ϕ= 1.100 时,爆燃强度最大,此时最大火焰速度和最大压力达到极大值,分别为 752.0 m/s 和 0.76 MPa;

(2) 火焰传播时间随 CO 当量比的变化与最大火焰速度随 CO 当量比的变化正好相反,整个火焰的传播时间为 100.0～300.0 ms,CO 当量比 ϕ= 1.100 时,火焰传播时间最短,为 113.2 ms,而 ϕ= 3.250 时,火焰传播时间最长,为 289.4 ms;

(3) 定义最大压力的上升时间为压力从零到最大值的时间间隔,最大压力上升速率即为最大压力值除以上升时间,和最大压力一起构成了爆燃的威力参数[8]。实验得到的最大压力及其上升速率随 CO 当量比变化的情况相同,最大压力上升速率也在 ϕ= 1.100 时处于极大值,为 485 MPa/s;

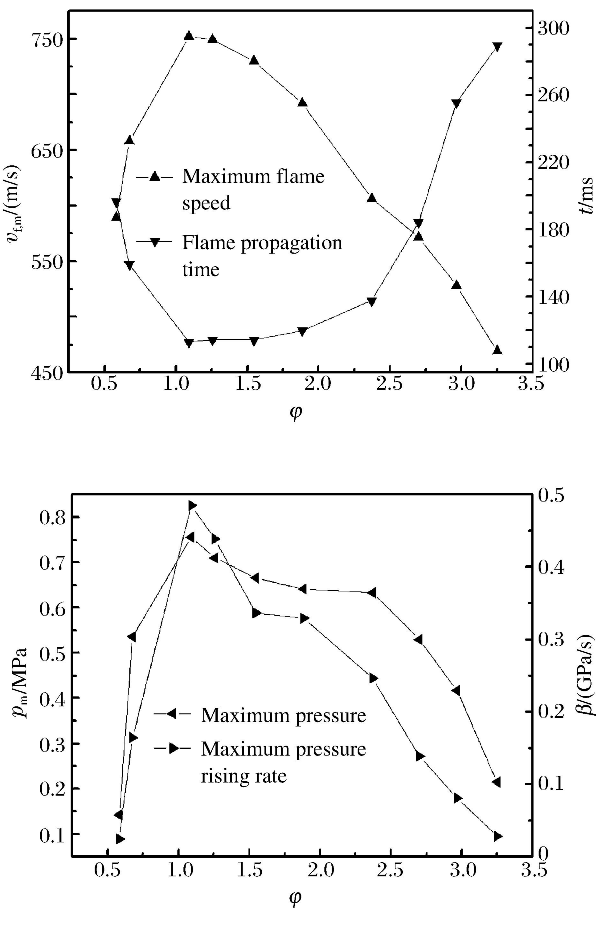

图 5 CO 当量比对不同物理量的影响

Fig. 5 Influence of CO stoichiometry on different physical parameters

(4) ϕ的范围主要分布在 $\phi > 1.000$ 区域,而在 $\phi < 1.000$ 区域内,随 ϕ的减小,最大火焰速度和最大压力都很快减小。

由于化学反应不完全以及燃烧产物离解需要一定能量,因而化学反应速率最大时所需的燃料总比当量比 $\phi = 1.000$ 时稍多。实验得出 $\phi = 1.100$ 时化学反应速率最大,爆燃强度也对应最大,离这一当量比越远反应剧烈程度越小。当当量比偏离 0.583～3.250 时,一种反应物量相对太少很难均匀混合,同时初始湍流对微弱反应具有破坏而不是加强作用,因而此时混合气体很难被点燃。

3.4 温度对爆燃特性的影响

选择同一当量比($\phi = 1.100$)条件下的不同温度作为新的工况条件,每个工况之间温度差约 100 K。图 6 给出了压力发展、最大火焰速度和传播时间随温度的变化情况,表 1 为不同初始温度下各位置点的火焰速度。通过这些数据,可以看出:

(1) 图 6(a)中不同温度下的压力发展趋势相同,相应位置点的压力值随温度升高而普遍下降。压力的发展基本满足了随温度升高而变缓的规律,其中最大压力从 306 K 的 0.7 MPa 下降到了 805 K 的 0.25 MPa,可见高温爆燃的冲击破坏能力已经明显减弱了。

(2) 图 6(b)中最大火焰速度随温度升高表现出下降趋势,但即使升高到 805 K 的高温,火焰传播速度仍然较快(大于 550 m/s),在进行高温 CO 爆燃的抑制研究时必须考虑到这一重要的速度值。

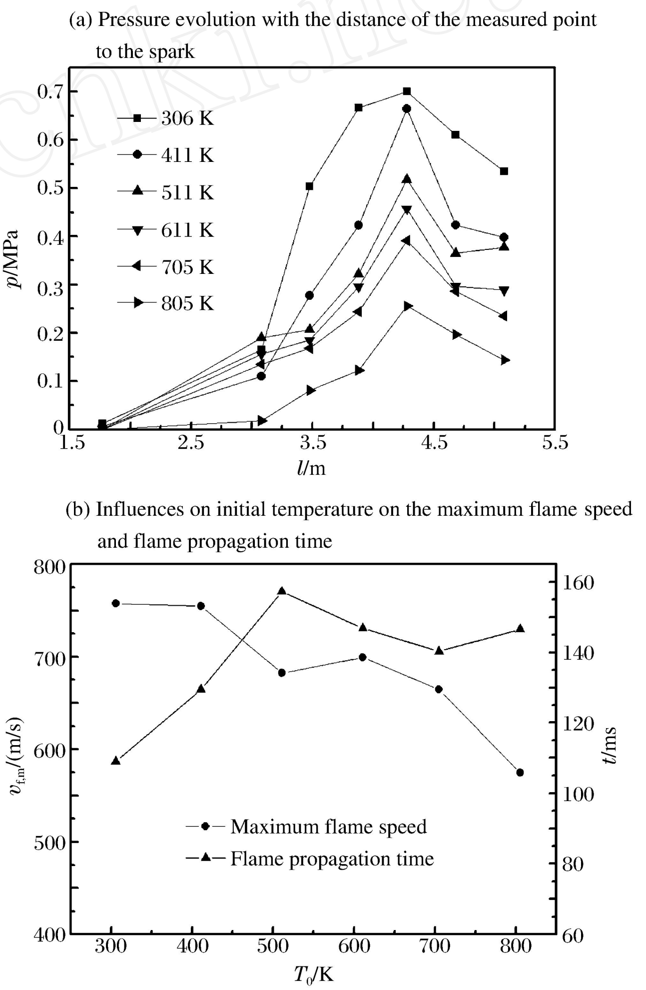

图 6 温度对不同物理量的影响

Fig. 6 Influence of initial temperature on different physical parameters

(3) 比较表 1 中 306、411 和 511 K 等 3 种工况,各对应点的火焰速度普遍减小,火焰加速呈减缓趋势,传播时间也迅速增加,见图 6(b)中的传播时间曲线。继续升温至 511 K 以后传播时间变化较小并有平稳趋势,说明 511 K 是火焰速度发展特性发生变化的一个转折点。在 511、611 和 705 K 等 3 种温度下,光滑管壁段的火焰速度随温升缓慢上升(从 20.4 m/s 上升至 22.8 m/s),并且这种火焰速度随温升而上升的情况一直持续到了障碍物段的 3.68 m 处,正是由于此种情况才使得火焰传播时间到 511 K 后平稳下来。另外,在最高温度 805 K 下爆燃最特别,火焰在光滑管壁段的速度最大(24.2 m/s),在障碍物段的发展最缓慢(各位置点的速度都比其他温度下的要低许多),与 705 K 时相比传播时间增加。

由于温度的升高,混合气体的物理和化学性质发生了以下 5 点转变,导致了上述压力和火焰速度的变化:

(1) 体积能量下降。随着温度升高,混合气的密度下降,单位体积混合气燃烧过程中释放的化学能将下降[8]。而爆燃压力是能量的释放方式,并随化学能减小而减小,因而温度的升高必将导致爆燃产生的压力下降。

(2) 流体声速提高。流体的声速可表达为 $a = \sqrt{kRT}$,式中 k、R 和 T 分别表示绝热指数、气体常数和温度。初始温度升高后,流体的声速提高[8] ,压力波在流体介质中的传播会更快,将不利于爆燃发展过程中压力波的堆积,成为了使压力下降的又一因素。

(3) 膨胀率下降。定义气体燃烧的膨胀率为 $\sigma = \rho_1 / \rho_2$,ρ_1、ρ_2 分别为燃烧前后的密度。火焰加速受膨胀率影响,膨胀率大则火焰加速快[9] 。单位体积化学反应释放的热量越少膨胀率越小[10] ,温度升高引起的化学释放热量下降减小了膨胀率,从而降低了火焰传播的速度。表 1 中在 306、411 和 511 K 等 3 个温度下各位置点处的火焰速度随温度升高而整体减小受到了此因素影响。

(4) 流速增大。相同质量流量下的混合气体随着温度的升高体积流量将增加,表现为管道内流速增大。这种流速的增大将使管道内流体的初始湍动增强,有利于物质输运而促进化学反应,以致加快初期的火焰传播[11] 。

(5) 化学反应加快。一般燃烧反应的速率随温度升高而增大,CO 的燃烧也不例外,这种初始温度的升高也将有利于加快化学反应从而提高火焰传播速度。

表 1 不同温度下各位置处的火焰速度

Table 1 Flame speed of every position at different initial temperatures m/ s

l/ m	T_0/ 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

4 结　论

(1) 与光滑管壁相比,等间距圆环障碍物对管道内爆燃的发展有显著影响,火焰传播速度及爆燃压力在障碍物段明显提高。

(2) CO 当量比为 0.583～3.250 时,常温下的火焰得到充分发展。当当量比为 1.100 时,爆燃的强度最大,火焰传播速度最高、最大压力及其上升速率达到极大值,而传播时间达到极小值。

(3) 温度是影响爆燃过程的重要因素,温度变化对体积能量、声速、膨胀率、流速及化学反应均会施加影响。随着混合气温度的升高,压力攀升逐渐变缓,最大火焰传播速度下降,但仍大于 550 m/ s , 传播时间先快速增加,然后趋于平稳。

参考文献:

[1] Chan C, Moen I O, Lee J H S. Influence of confinement on flame acceleration due to repeated obstacles[J]. Combustion and Flame, 1983,49(1-3):27-39.

[2] Teodorczyk A, Lee J H S. Detonation attenuation by foams and wire meshes lining the walls[J]. Shock Waves, 1995,4(4):225-236.

[3] 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):290-295.
GUO Chang-ming, LI Jian. Experimental investigation of acoustic absorption of detonation by absorbing materials lining wall[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(4):290-295.

[4] 张建华. 焦炉煤气在管道中的爆炸性及其火焰传播特性[J]. 武汉理工大学学报,2001,23(9):26-29.
ZHANG Jian-hua. Experimental study on the explosibility and flame propagation of coke oven gas[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2001,23(9):26-29.

[5] 余立新,孙文超,吴承康. 障碍物结构对管道中预混火焰加速的影响[J]. 燃烧科学与技术,2002,8(6):483-486.
YU Li-xin, SUN Wen-chao, WU Cheng-kang. Influence of the configuration of obstacles on premixed flame accel-

eration in a tube[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2002,8(6):483-486.

[6] 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]. 北京:中国科学院研究生院,2001.

[7] 刘易斯,埃尔贝. 燃气燃烧与瓦斯爆炸[M]. 王方,译. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,2007:451-454.

[8] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996:259;59;260.

[9] Bychkov V, Akkerman V, Gordon F, et al. Flame acceleration in early stages of burning in tubes[J]. Combustion and Flame, 2007,150(4):263-276.

[10] Aldredge R C, Zuo B. Flame acceleration associated with the Darrieus-Landau instability[J]. Combustion and Flame, 2001,127(3):2091-2101.

[11] Lee T W, Lee S J. Direct comparison of turbulent burning velocity and flame surface properties in turbulent premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2003,132(3):492-502.

Deflagration characteristics of a preheated CO-air mixture in a duct*

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

(Center for Plasma and Combustion Research, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*, China)*

Abstract: To safely recover the waste heat of the converter gas, a series of experiments were conducted to explore the deflagration properties of CO-air mixture at different initial temperatures in a duct lined with obstacles. By measuring deflagration pressure and flame speed, influences of CO stoichiometry and temperature on deflagration properties were investigated. Results show that the pressure and flame speed increase rapidly in the duct segment lined with obstacles. When CO stoichiometry is 1.100, deflagration attains the maximum intensity. As the initial temperature increases, the pressure increase slows down, and the maximum flame speed decreases, but still keeps a high speed, over 550 m/s. The flame propagation time increases at first and then becomes stable along with the increasing of the initial temperature.

Key words: mechanics of explosion; deflagration; obstacles; converter gas; explosion; high temperature; waste heat

---

* Received 5 January 2009; Revised 17 July 2009

Supported by the National High-tech R&D Program (863 Program) (2006AA05Z253)

Corresponding author: WEI Xiao-lin, xlwei@imech.ac.cn

(责任编辑 张凌云)