

吴承康先生纪念专刊

# 氧气转炉煤气全干法显热回收系统中 CO 爆燃与 防爆研究<sup>1)</sup>

魏小林<sup>\*,2)</sup> 李 腾<sup>\*</sup> 陈晴晴<sup>\*</sup> 刘 迪<sup>†</sup> 王 曜<sup>†</sup> 吴东垠<sup>†</sup> 李 博<sup>\*</sup> 张 良<sup>\*</sup><sup>\*</sup>(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)<sup>†</sup>(西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049)

**摘要** 氧气转炉煤气一般在 850 °C 左右时采用喷水/水雾法降温除尘, 导致煤气 50% 的显热被浪费. 为了充分利用转炉炼钢过程中富含 CO 煤气的余热资源, 新方法取消了喷水工艺, 采用转炉煤气全干法显热回收系统, 但是该技术在转炉煤气前烧与后烧阶段存在煤气爆炸的风险. 针对转炉全干法系统的安全稳定运行需求, 通过实验和理论计算研究了 CO 当量比、混合气初始温度和含水量等因素对 CO 爆燃特性的影响. 结果表明: CO 爆燃的最大压力和火焰速度随着混合气体中 CO 当量比的减小呈现减少的趋势, 但当 CO 当量比小于 0.368 时, 则对火焰速度的影响不大. 在实验 CO 当量比范围内, 爆燃压力最大值为 0.65 MPa, 最大爆燃速度约为 750 m/s; 混合气体初始温度升高导致爆燃过程中产生的最大爆燃压力降低, 与此同时火焰速度会相对增加, 进而影响火焰传播时间. 含水量增加会导致 CO 爆燃的最大爆燃压力的增加, 但含水量到达 0.463% 后继续增大则对最大爆燃压力影响不大; 最后, 通过分析 CO 爆燃特性和实际生产过程, 提出了燃烧控制与强化以及煤气爆炸遏制等防爆方法和技术, 从而有效降低爆燃带来的损失.

**关键词** 转炉炼钢, CO 爆燃, 余热利用, 防爆技术

中图分类号: TK16 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-23-418

## RESEARCH ON CO DEFLAGRATION AND EXPLOSION PREVENTION IN THE ALL-DRY PROCESS OF GAS SENSIBLE HEAT RECOVERY FOR BASIC OXYGEN FURNACE<sup>1)</sup>

Wei Xiaolin<sup>\*,2)</sup> Li Teng<sup>\*</sup> Chen Qingqing<sup>\*</sup> Liu Di<sup>†</sup> Wang Yao<sup>†</sup> Wu Dongyin<sup>†</sup> Li Bo<sup>\*</sup> Zhang Liang<sup>\*</sup><sup>\*</sup>(State Key Laboratory of High-Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)<sup>†</sup>(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** When the gas of basic oxygen furnace (BOF) is about 850 °C, water spray is generally used for cooling and dedusting, resulting in 50% of the sensible heat of the gas being wasted. In order to fully utilize the waste heat resources rich in CO gas during the converter steelmaking process, the new method cancels the water spraying process and adopts

2023-09-03 收稿, 2023-11-10 录用, 2023-11-11 网络版发表.

1) 中国科学院战略性先导 A 类专项资助项目 (XDA29020503).

2) 通讯作者: 魏小林, 研究员, 主要研究方向为燃烧学. E-mail: xlwei@imech.ac.cn

引用格式: 魏小林, 李腾, 陈晴晴, 刘迪, 王曜, 吴东垠, 李博, 张良. 氧气转炉煤气全干法显热回收系统中 CO 爆燃与防爆研究. 力学学报, 2023, 55(12): 2796-2806

Wei Xiaolin, Li Teng, Chen Qingqing, Liu Di, Wang Yao, Wu Dongyin, Li Bo, Zhang Liang. Research on CO deflagration and explosion prevention in the all-dry process of gas sensible heat recovery for basic oxygen furnace. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(12): 2796-2806

the converter gas fully dry sensible heat recovery system. However, this technology poses a risk of gas explosion during the pre and post combustion stages of the converter gas. In response to the safe and stable operation requirements of the full dry process system of the converter, this article investigates the effects of factors such as CO equivalence ratio, initial temperature of the mixed gas, and water content on CO deflagration characteristics through experiments and theoretical calculations. The results show that the maximum pressure and deflagration speed of CO deflagration decreases with the decrease of CO equivalence ratio in the mixed gas. But, when the CO equivalence ratio is less than 0.368, the effect on flame speed is not significant. Within the range of CO equivalence ratio in the experiment, the maximum deflagration pressure is 0.65 MPa, and the maximum deflagration speed is about 750 m/s; The initial temperature increase of the mixed gas leads to a decrease in the maximum deflagration pressure generated during the deflagration process, while the flame speed increases relatively, thereby affecting the flame propagation time. An increase in water content will lead to an increase in the maximum deflagration pressure of CO deflagration, but further increase after the water content reaches 0.463% has little effect on the maximum deflagration pressure; Finally, by analyzing the characteristics of CO deflagration and the actual production process, explosion-proof methods and technologies such as combustion control and enhancement, as well as gas explosion containment, were proposed to effectively reduce the losses caused by deflagration.

**Key words** basic oxygen furnace steelmaking, CO deflagration, waste heat utilization, explosion suppression technology

## 引言

中国是目前世界上钢铁产能最大的国家, 钢铁年产量约 10 亿吨, 占全球总产量一半以上<sup>[1]</sup>, 每年消耗煤炭(包括焦炭)约 6 亿吨, 排放 CO<sub>2</sub> 约 18 亿吨, 约占我国碳排放的 15%, 仅次于电力等能源行业. 在我国的钢铁行业中, 虽然近年来电炉炼钢发展较快<sup>[2]</sup>, 但是氧气转炉炼钢仍占钢产量的 80% 左右. 氧气转炉在炼钢过程中通过吹氧氧化铁水中碳(含量约)等杂质, 会释放大量的转炉煤气<sup>[3-4]</sup>.

转炉煤气的主要气体成份为 CO(40% ~ 70%), 具有较高的温度(1400 ~ 1600 °C), 同时富含细粉尘(主要粒径 10 ~ 40 μm), 是一种富含余能余热的资源<sup>[5-6]</sup>. 典型转炉煤气产生量为 150 Nm<sup>3</sup>/t-钢(CO 平均浓度约为 45%), 含尘量为 15 ~ 20 kg/t-钢. 由于 CO 的热值为 12.64 MJ/Nm<sup>3</sup>, 烟气的平均比热为 1.137 kJ/(kg·K), 因此转炉煤气的化学热高达 850 MJ/t-钢, 煤气物理热(其中灰尘显热约占 10%)为 220 MJ/t-钢. 可见, 煤气显热占转炉煤气余能余热约 20%, 而煤气的化学热占 80%, 所以转炉煤气都通过降温除尘工艺后进行回收. 由于在转炉前烧/后烧期会存在 CO/O<sub>2</sub> 共存的阶段, 遇点火源有爆炸的风险, 因此为了防止煤气的爆炸风险, 转炉煤气的回收条件一般设定为 CO 浓度 ≥ 35% 且 O<sub>2</sub> 浓度 ≤ 2%<sup>[7]</sup>. 我国转炉的煤气回收量大多为 80 ~

100 Nm<sup>3</sup>/t-钢, 有些可以达到 120 Nm<sup>3</sup>/t-钢, 不符合回收条件的煤气仍存在大量被放散的现象.

目前国内外转炉煤气降温除尘普遍采用湿法(OG 法)和干法(LT 法)工艺系统, 其共同特点是: 采用汽化冷却烟道(转炉余热锅炉)回收转炉高温(初温约 1500 °C)煤气显热, 对于降温至 850 °C 左右的煤气采用喷水/喷水雾的方式进行降温除尘, 转炉煤气的 50% 显热被浪费. 转炉煤气余能余热的回收可以大幅度降低转炉炼钢工序能耗, 但目前转炉煤气的中低温余热仍未进行回收和利用<sup>[8-9]</sup>.

转炉煤气干法(LT 法)回收系统具有烟气含尘量低、控制程度高、无需水循环系统以及系统阻损小等优点, 在钢铁企业中已得到了较广泛的应用<sup>[10-11]</sup>. 但是对于 LT 法, 只是将 OG 法中的喷水文氏管改为喷水雾的蒸发冷却器, 仍然仅通过汽化冷却烟道回收了转炉煤气高温段(850 °C ~ 1500 °C)的余热, 这是由于在蒸发冷却器中, 转炉煤气通过喷水雾进行冷却, 因此导致中低温余热(150 °C ~ 850 °C)无法被回收. 这部分余热相当于 110 MJ/t-钢, 具有很高的回收价值, 但是在转炉的前烧/后烧段煤气成分将出现 CO 浓度 < 35% 且 O<sub>2</sub> 浓度 > 2% 的情况, 存在爆炸的风险, 因此煤气的中低温余热难以回收. 由于常温下 CO 在空气中的爆炸极限为 CO 浓度达到 12.5% ~ 75%, 如果这时煤气温度在自燃温度以下且存在点

火源, 煤气可能会发生爆炸, 同时转炉煤气回收管道中存在障碍物, 有利于爆燃的发展<sup>[12-15]</sup>, 进一步威胁设备安全, 可见潜在的爆炸风险导致转炉煤气余热难以被高效回收利用。

目前, 已经开展了一些针对转炉煤气燃烧和爆炸的研究. 薛玮<sup>[16]</sup>通过数值模拟得到了转炉煤气脉动燃烧的流场分布, 分析了燃烧温度变化特性. Liu 等<sup>[17]</sup>通过 TDLAS 检测手段探究了  $H_2$  和  $N_2$  对转炉煤气燃烧火焰的影响. 罗家松等<sup>[18]</sup>基于实验数据, 提出了多级分区的计算模型, 得出了煤气爆炸时沿程峰值超压和火焰传播速度的经验公式. 金潮等<sup>[19]</sup>通过实验探究了转炉煤气在密闭容器内的爆炸特性, 总结了爆炸的经验判据. Zhang 等<sup>[20]</sup>通过实验和数值模拟, 研究了煤气爆炸时的喷氮遏爆过程, 结果表明在爆炸时注入氮气可以大幅降低爆炸压力峰值. 王奎明<sup>[21]</sup>以转炉煤气/空气/惰性气体 ( $N_2$ ,  $O_2$  和  $H_2O$ ) 的预混气体作为研究对象, 采用数值模拟方法研究管道内转炉煤气中段余热回收过程中惰性气体抑爆特性, 结果表明抑制转炉煤气爆炸需要添加的  $CO_2$  量随初始温度升高而增加, 随初始压力的升高而减少, 随化学当量比的增加先增加后减少, 在化学当量比 1.25 附近, 由于反应放出的热量最多, 燃烧最为充分, 需要更多的  $CO_2$  才能抑制转炉煤气爆炸。

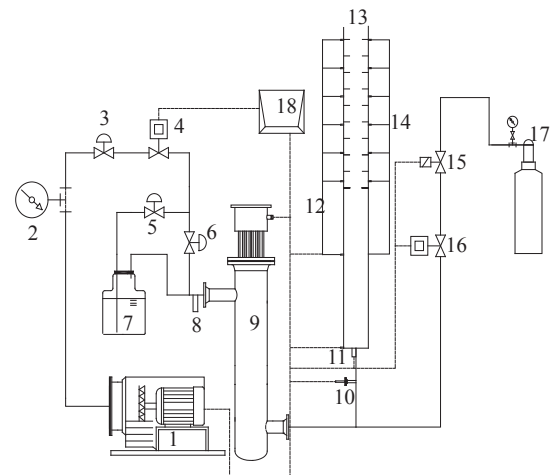
当采用余热锅炉回收中低温余热时, 烟道中的换热管束相当于一种障碍物, 它们会加速爆炸的发生与传播, 因此需要研究在有障碍物的管道内,  $CO$  和空气混合物在不同温度下 (从接近高温自燃温度到常温) 的爆燃特性, 从而为防爆研究提供基础数据. 本文通过实验研究和理论计算得到了  $CO$  当量比、混合气初始温度和空气中含水量等因素对  $CO$  爆燃特性的影响, 得到了不同条件下的压力和火焰速度数据, 明确了  $CO$  爆燃过程中的压力和火焰速度特性, 并对于转炉煤气显热回收过程中的防爆方法进行了讨论. 最后, 在此基础上提出了燃烧控制与强化以及煤气爆炸遏制等防爆方法和技术。

## 1 研究方法

### 1.1 实验方法

转炉煤气爆燃实验系统主要包括 5 个部分: 空气调湿与加热部分、 $CO$  管路部分、测量管道部分、消音器及尾气排放部分和控制及数据采集部

分. 实验时, 空气由变频罗茨风机引入, 经过质量流量计 (热式) 后分为两路, 其中一路通过水槽装置增湿, 系统流程见图 1. 两路气量的配比由球阀控制, 充分混合后的增湿空气状态由温湿度计测量. 电加热器温度由控制台设定, 调节与  $CO$  混合前的空气温度.  $CO$  和空气通入管道进行充分混合, 由热电偶测量混合后的温度, 稳定后打开点火器点燃气体, 同时记录点燃时的温度数据. 爆燃管道从点火处到出口全长 6.4 m, 内径 0.08 m, 为了研究障碍物对火焰的加速作用, 将爆燃管道分为两个部分, 其中光管段长 4 m, 障碍物段长 2 m, 管段尾部 0.4 m. 其中, 障碍物由 10 个同样大小的圆环构成, 圆环阻塞比 0.437 5 (外径 0.08 m, 内径 0.06 m), 各圆环间距为 0.2 m. 测点主要布置在障碍物段, 沿管道共布置了 8 个压力测量点和 7 个火焰测量点。



1. variable frequency roots blower, 2. barometer, 3. ball valve, 4. mass flow meter, 5. ball valve, 6. ball valve, 7. water tank, 8. temperature and humidity measurement port, 9. electric heater, 10. thermocouple, 11. igniter, 12. pressure sensor, 13. silencer, 14. flame sensor, 15. mass flow meter, 16. electromagnetic valve, 17. gas cylinder, 18. control and signal acquisition station

图 1 实验系统流程图

Fig. 1 Flow chart of experimental system

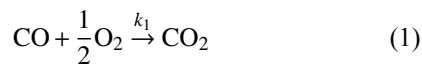
为了研究  $CO$  相关的爆燃特性, 本文从  $CO$  混合气体的流量、水含量以及温度等方面进行实验研究, 测量不同条件下爆燃产生的压力和火焰传播信号. 实验过程中每个工况重复 4 次。

### 1.2 数值模拟方法

#### (1) 模型设置

在进行数值模拟验证时, 将三维圆管问题简化为二维平面问题, 用质量、动量、能量及组分运输方程构成的流体力学方程组描述爆炸问题<sup>[22]</sup>. 此外,

由于管道内充分发展的湍流具有明显的方向性, 对于爆燃模拟, 湍流模型选用 Reynolds 应力方程模型 (RSM)<sup>[23]</sup>. 湍流和化学反应的耦合方式至关重要, 将直接影响可燃气体的燃烧反应速率, 本文燃烧模型选用涡耗散概念 (eddy dissipation concept, EDC) 模型<sup>[24]</sup>. 为提高计算效率, 化学反应机理采用 CO 与湿空气的总包反应机理<sup>[25]</sup>, 反应机理及速率表达式如下



$$\frac{d[\text{CO}]}{dt} = -k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) [\text{CO}]^1 [\text{H}_2\text{O}]^{0.5} [\text{O}_2]^{0.25} \quad (2)$$

式中, 指前因子  $k_0 = 1.8E + 12 \text{ (m}^3/\text{mol)}^{0.75} / \text{s}$ , 活化能

$E = 28.3 \text{ kcal/mol}$ ,  $R$  为通用气体常数.

图 2 为计算域示意图及部分网格.

(2) 工况设置

数值模拟具体工况设置如表 1 所示.

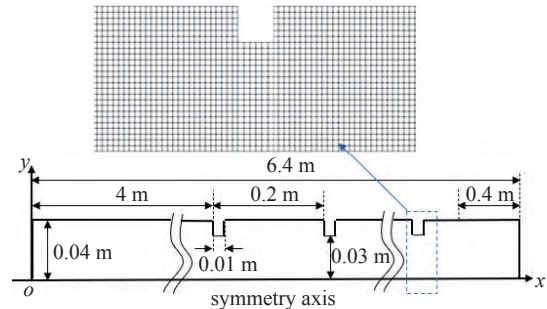


图 2 计算域示意图

Fig. 2 Schematic of the computational domain

表 1 工况表

Table 1 Operating conditions

NO	T/K	Gas flow/(Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )		CO equivalence ratio $\phi$	CO volume concentration/%	Water concentration/%
		air	CO			
1	368	28	8.2	0.697	22.7	0.329
2	368	33	8.2	0.591	19.9	0.329
3	368	38	8.2	0.514	17.7	0.329
4	368	43	8.2	0.454	16.0	0.329
5	368	48	8.2	0.407	14.6	0.329
6	368	53	8.2	0.368	13.4	0.329
7	368	56	8.2	0.350	12.8	0.329
8	368	59	8.2	0.331	12.2	0.329
9	342	28	8.2	0.697	22.7	0.329
10	440	28	8.2	0.697	22.7	0.329
11	503	28	8.2	0.697	22.7	0.329
12	538	28	8.2	0.697	22.7	0.329
13	573	28	8.2	0.697	22.7	0.329

### 1.3 化学平衡计算方法

为了将实验过程中 CO 的爆炸压力与理论结果进行比较, 本文采用化学平衡软件进行计算. 化学平衡计算时将热化学反应系统的热力学参数作为温度、压力和组分的函数, 认为在化学反应达到平衡时, 系统的总吉布斯自由能满足最小化条件, 从而可以预测出反应系统的参数<sup>[26]</sup>. 显然化学平衡计算主要是从化学热力学角度进行分析, 没有考虑反应速

率等化学过程以及气体混合、热量损失等物理过程的影响. 由于气体发生爆炸时, 一般其反应进行得非常迅速和完全, 因此一般情况下采用化学平衡计算还是比较可靠的. 本文在计算过程中选择了等温等容和等温等压两种条件, 采用等温等容条件时, 计算时的比热为定容比热; 采用等温等压时, 计算时的比热为定压比热, 其值要比定容比热大, 因此等温等压条件下的爆炸压力计算值比等温等容条件下的值要小.

## 2 结果分析

### 2.1 CO 当量比对爆燃的影响

#### (1) CO 当量比对爆燃压力的影响

在实验和数值模拟的过程中,通过改变 CO 混合气体当量比,观察其对管道内爆燃压力、火焰速度的影响.混合气初始温度为 368 K,CO 流量维持  $8.2 \text{ Nm}^3/\text{h}$  不变,空气流量变化范围为  $28 \sim 59 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ,对应空气中的 CO 浓度和 CO 当量比 ( $\Phi$ ) 见表 1,这与前烧/后烧阶段的放散煤气成分是比较接近的,且不包含 CO 过量的情况.图 3 为混合气体配比对于爆燃压力影响的实验结果.图 4 为相应的数值模拟结果.

从图 3 可见,当 CO 混合气体被点燃后,开始时火焰加速较缓慢(参见图 5),光滑管段压力峰值也较小,随后在 4 m 处进入障碍物管段,火焰不断加速,爆燃压力迅速攀升,并在靠近出口时爆燃压力达到最大值.由于出口的泄压作用,出口处监测点的压力峰值明显降低.与实验结果相似,从图 4 可以看到除 air:CO 流量比为 28:8.2 ( $\Phi = 0.697$ ) 的工况外,随着 CO 当量比下降,爆燃的峰值压力也不断下降.实验条件下爆燃压力的峰值约为 0.65 MPa,数值模拟时爆燃压力达到的峰值约为 0.55 MPa.进一步对比实验结果(图 3)和数值模拟结果(图 4)可以看到,不同火焰传播距离下的 CO 爆燃压力发展趋势一致,当量比的影响规律也相近,证实了数值模拟结果的可靠性,为后续火焰速度的数值模拟分析(图 5)的可靠性提供了一定依据.

#### (2) CO 当量比对火焰速度的影响

图 5 为混合气体流量对火焰传播速度的影响

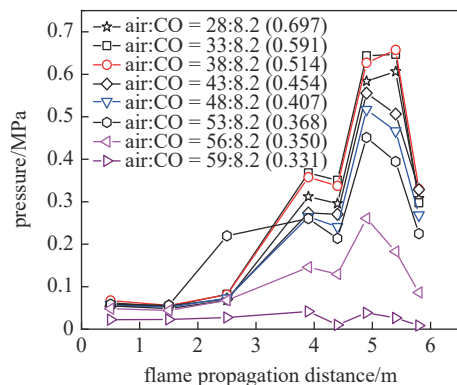


图 3 CO 当量比对爆燃压力的影响(实验结果)

Fig. 3 Effect of different CO mixture proportion on deflagration pressure (experimental results)

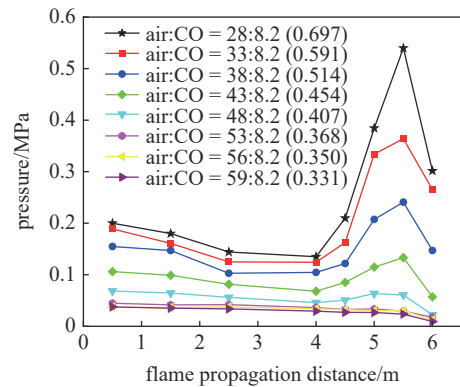


图 4 CO 当量比对爆燃压力的影响(数值结果)

Fig. 4 Effect of different CO mixture proportion on deflagration pressure (simulation results)

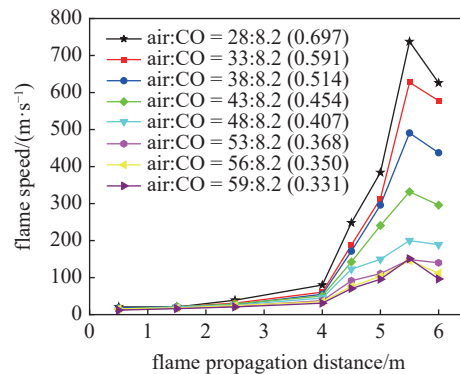


图 5 CO 当量比对火焰速度的影响(数值结果)

Fig. 5 Effect of different CO mixture proportion on flame speed (simulation results)

(数值模拟结果),从图中可以看出,在 CO 混合气体发生爆燃后,火焰开始传播速度较低,但随后不断增加,在接近出口时火焰传播速度达到近 750 m/s 的最大速度.并且不同当量比下,爆燃火焰速度发展趋势相近:在光滑管段火焰传播速度增加相对较缓,进入障碍物后,火焰传播速度迅速增加,并在靠近出口时达到最大值,在出口处略有降低.可以看到,随着当量比下降,各个位置上的火焰速度也基本呈下降趋势,但火焰速度发展规律基本一致.在当量比小于 0.368 时各点速度区别不大,此时 CO 当量比对火焰速度的影响较小.

### 2.2 混合气初始温度对爆燃的影响

#### (1) 混合气初始温度对爆燃压力的影响

研究不同混合气初始温度对爆燃的影响,在 air:CO 流量比为 27.8:8.2 ( $\Phi = 0.694$ ) 的条件下,对应混合气体中的 CO 体积浓度为 22.7%,对应的 CO 当量比.混合气体温度对爆燃压力影响的实验结果见图 6,数值模拟结果见图 7.

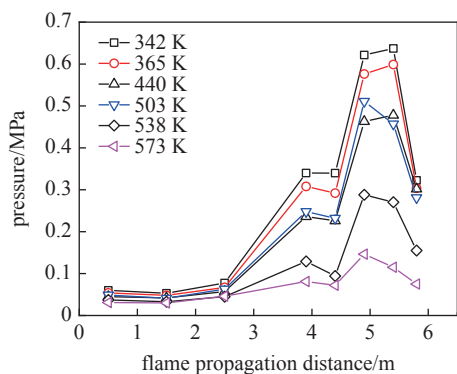


图 6 混合气体初始温度对爆燃压力的影响 (实验结果)

Fig. 6 The effect of mixed gas initial temperature on deflagration pressure (experimental results)

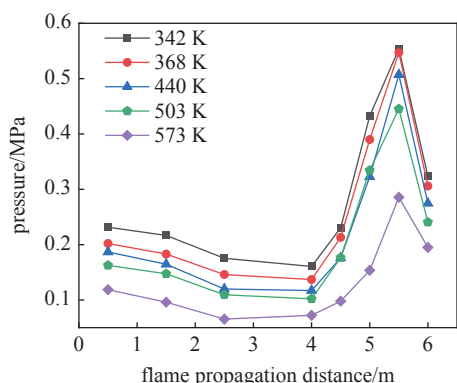


图 7 混合气体初始温度对爆燃压力的影响 (数值结果)

Fig. 7 The effect of mixed gas initial temperature on deflagration pressure (simulation results)

观察实验结果和数值模拟结果可以看到, 随温度升高, 相应位置点的压力下降, 压力的发展规律相近, 均遇到障碍物后迅速攀升, 并在靠近出口处达到最大值. 实验结果中最大压力从 342 K 的 0.65 MPa 下降到 573 K 的 0.15 MPa, 可见高温煤气爆燃的冲击破坏能力随温度升高在减弱. 随着温度升高, 混合气体的物理和化学性质会发生变化<sup>[27]</sup>. 当可燃混合气体温度升高时, 其密度和单位体积燃烧释放的化学能均会下降, 由于爆燃过程发生在受限定容空间内, 可以认为气体的密度与体积基本不变, 根据理想气体状态方程, 爆燃的理论最高压力将与气体爆燃前后热力学温度 (K) 的比值呈正比例, 即混合气体初温越高, 爆燃最大压力越小. 此外, 随着可燃混合气体温度升高, 流体声速和化学反应速度都会升高, 压力波在流体介质中的传播速度和火焰传播速度将加快, 由于爆燃最高压力来自于爆燃过程的压力波堆积, 过快的压力波和火焰传播速度均不利于压力波的堆积, 从而导致爆炸最大压力降低.

## (2) 混合气初始温度对火焰传播速度的影响

随温度升高, 火焰传播速度逐渐上升 (见图 8), 火焰传播速度的发展规律一致, 并且均在靠近出口处达到最大值. 混合气初始温度越高, 越有利于化学反应的发生, 高温下化学反应速率加快, 进一步导致火焰速度增大. 随着可燃混合气体温度升高, 流体声速和化学反应速度都会升高, 进而加快火焰传播速度. 在温度升至 503 K 时, 火焰速度约为 800 m/s 的最大值.

## (3) 混合气初始温度对火焰传播时间的影响

图 9 为火焰前锋位置随时间的变化, 可以看到, 混合气体发生爆燃后火焰在光滑管段传播相对较为缓慢, 4 m 时进入第一个障碍物后, 障碍物段对火焰有明显的加速作用. 不同温度下各管段火焰传播时间见表 2.

从图中可以看出, 随着混合气体温度的增加, 火焰在光管段内的传播时间逐渐降低, 从 145.15 ms 下降到 85.5 ms, 但火焰在障碍物段的传播时间相较于光管则变化较小, 从 6.95 ms 下降到 4.5 ms.

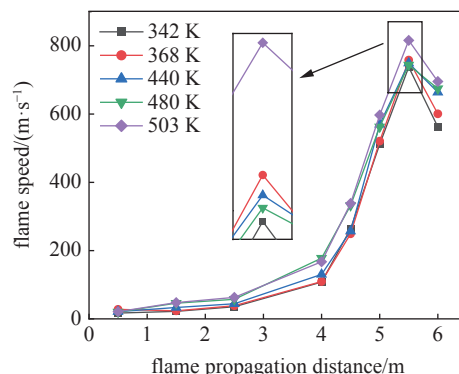


图 8 混合气体初始温度对火焰传播速度的影响 (数值结果)

Fig. 8 The effect of mixed gas initial temperature on flame speed (simulation results)

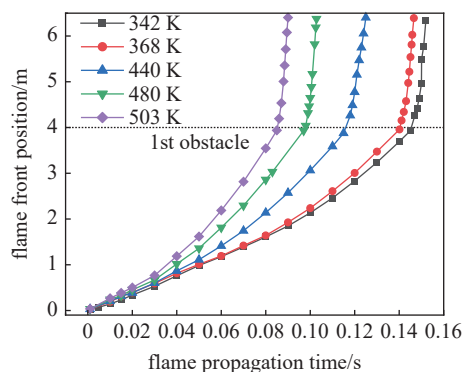


图 9 火焰前沿位置随时间变化图 (数值结果)

Fig. 9 The flame front position with time (simulation results)

表 2 不同温度下各管段火焰传播时间

Table 2 Flame propagation time of each pipe section at different initial temperatures

Temperature/K	Smooth section/ms	Obstacle section/ms	Total time/ms
342	145.15	152.10	6.95
368	140.46	146.77	6.32
440	116.40	122.30	5.90
480	97.50	102.85	5.35
503	85.50	90.00	4.50

由于光管段为火焰初始阶段, 火焰传播速度受初始状态影响较大, 管道内混合气体初始温度越高, 则含能越高且越易发生化学反应, 因此初始温度的改变会极大地影响光管段的传播时间. 而进入障碍物段后, 火焰已经充分发展并加速传播, 受初始阶段状态影响较小, 因此, 在障碍物段的火焰传播时间差别仅在 2.5 ms 左右.

### 2.3 混合气湿度对 CO 爆燃的影响

在研究混合气湿度对爆燃压力的影响时, 实验采用长度为 2.76 m 的光滑管段, 障碍物管段与先前实验相同, 通过实验得出空气中水含量对爆燃压力的影响见图 10. 实验中各工况下温度偏差控制在 5 K 以内, 质量流量相同, 均为 36 Nm<sup>3</sup>/h, 当量比也相同.

干燥的一氧化碳在空气中的燃烧非常困难, 因为这时 CO 主要通过  $\text{CO} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{O}$  等反应进行, 该反应的活化能为 201 kJ/mol. 而对于少量含水的一氧化碳在空气中燃烧, 由于反应  $\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{OH}$ ,  $\text{OH} + \text{CO} = \text{CO}_2 + \text{H}$  以及  $\text{H} + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{O}$  等形成链式反应, 其中一氧化碳氧化反应  $\text{OH} + \text{CO} =$

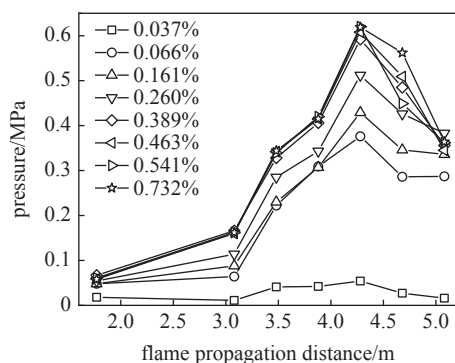


图 10 水含量对爆燃的压力的影响 (实验结果)

Fig. 10 The influence of different mixture gas temperature on deflagration pressure (experimental results)

$\text{CO}_2 + \text{H}$  的活化能仅为 4.522 kJ/mol, 因此含水一氧化碳的氧化反应将非常迅速<sup>[28]</sup>.

从图 10 可以看出, 随着空气中水含量的增加, 爆燃火焰压力发展速度逐渐加快, 直至含水量达到 0.463%; 此时继续增大含水量, 对火焰压力发展影响很小. 根据 CO 和湿空气化学反应特性可知, H<sub>2</sub>O 对 CO 和 O<sub>2</sub> 反应有显著的促进作用, 但是当含水量达到一定程度后, 相对反应是过剩的, 所以继续增加含水量不能继续促进反应进行. 本文通过实验确定, 该水分含量为 0.463%.

### 3 化学平衡计算

本文采用化学平衡计算软件, 得到了等温等容和等温等压条件下化学平衡时 CO 的爆炸压力和不同内部温度下 CO 的爆炸压力, 并与实验结果 (图中用实心圆点或方块表示) 进行了对比. 从图 11 可以看出, 在图线中段, CO 从 0.4~0.6 的范围内, 化学计算的结果和实验结果从数值和发展趋势都比较类似, 而在 CO 比例较低和较高时, 化学计算与实验结果差距较大. 试验过程中, 由于比例过高或者过低, 参与反应的反应物浓度配比不佳, 反应不充分, 使得反应速率降低, 进而导致压力降低. 此外反应不充分也会导致流体流动减缓, 在流动过程中通过管道的散热增加, 流动造成的能量损失也越大. 而计算过程中没有考虑这些因素, 导致两者误差很大.

由图 12 可以得出, 随着 CO 初温的提高, 爆炸压力逐渐降低, 且化学计算结果和实验结果在 500 K 范围内拟合良好. 但是在 500 K 以上时出现较大误差. 主要是由于试验中 CO 温度升高体积增加, 在管道内总容积不变, 这就导致空气减少, 虽然升温能够一定程度上促进化学反应进行, 但参与反应的

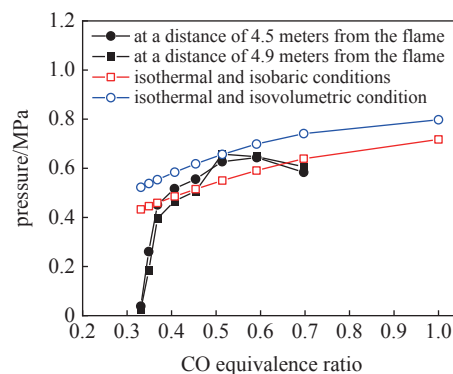


图 11 混合气体当量比对爆燃压力的影响

Fig. 11 CO explosion pressure at different equivalent ratios

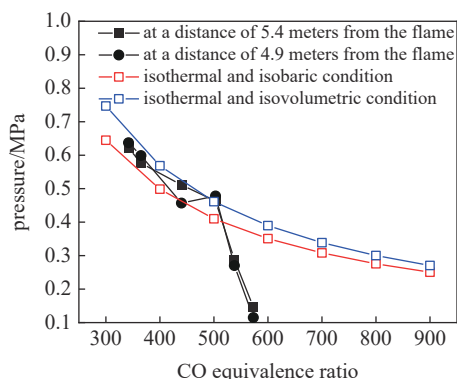


图 12 不同初温 CO 混合气体与爆炸压力

Fig. 12 Different initial temperature mixing gas and explosion pressure

物质比例变化导致反应速率下降,且温度升高造成管壁和气体的换热端差增大,散热损失能量更多,同时气体膨胀导致的流动损失增加,这些都表现为压力的下降。

## 4 防爆措施

### 4.1 转炉煤气爆炸的可能性

为更好地结合实际运行工况,我们结合表 3 实际转炉放散煤气典型成分对实际运行过程中的防爆措施进行讨论。

转炉煤气的回收主要使用中间回收法<sup>[30]</sup>,图 13 为转炉烟气成分变化的实测数据。烟气成分的变化特性为:转炉吹炼初期,在烟罩未降下时吹氧,氧气主要与铁水中的 Si, Mg 等元素反应, C 未被大量氧化,生成的 CO 很快被剩余氧气和炉口吸入的空气氧化,烟气中 O<sub>2</sub> 含量较多, CO 量很少。2~3 min 后脱碳条件趋于成熟,碳开始大量氧化,炉气中 CO 和 CO<sub>2</sub> 值迅速升高, O<sub>2</sub> 量很快趋于 0,并放下活动烟罩。吹炼中期,脱碳速度相对稳定, CO 和 CO<sub>2</sub> 变化较为平缓,并达到最大值,当 CO 浓度大于 30%~40% 且氧气量小于 2% 时开始回收煤气。在吹炼末期,活动烟罩重新抬起,由于熔池中碳值急剧下降,且从炉口吸入的空气量增加,二次燃烧充分, CO 值大幅度下降, CO<sub>2</sub> 比 CO 的生成量要多,吸入空气同时造成 O<sub>2</sub> 量增加。

通过转炉煤气生成理论分析并结合实际生产过

表 3 实际转炉放散煤气典型成分<sup>[29]</sup>

Component	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Volume concentration/%	30	30	1	39

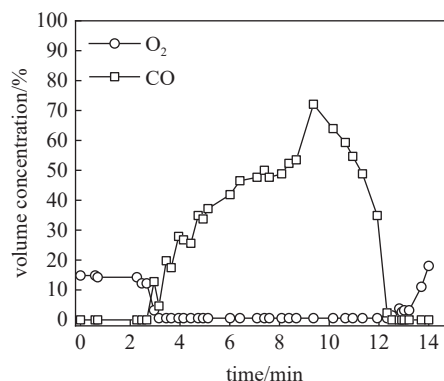


图 13 转炉烟气成分变化的实测数据

Fig. 13 Measured data of changes in converter flue gas composition

程的偶发事件,我们得到转炉煤气爆炸发生的可能性。

(1) 在 CO 与 O<sub>2</sub> 在前烧、后烧段共存时,遇到高温尘粒或者静电等明火条件,会引发速燃或轻微爆炸事故。

(2) 转炉吹炼初期,前文已经提到:氧气主要与铁水中的硅、锰等元素反应,生成的烟气中 O<sub>2</sub> 含量较多, CO 量较少,会出现两者共存的区域;此外,若转炉内废钢与铁水混合不均,导致部分吹入的氧气没有与铁水充分混合而直接接触到废钢,可能会引起脱碳反应异常以及转炉煤气含氧量超标而引发爆炸。

(3) 转炉吹炼中期,炉渣发生喷溅会进入文氏管,而氧枪切断阀关闭不严,导致氧气、煤气和火种同时存在而引发爆炸。

(4) 转炉吹炼末期,前文已经提到: CO 量下降, O<sub>2</sub> 开始增加,会出现两者共存的区域;同时若钢水成分不合格,需要二次吹氧(即进行点吹)时,由于氧气与煤气反应不完全也容易引起爆炸。

### 4.2 防爆措施

图 14 为某转炉一次实际爆炸过程的参数图,图中为从正常工况到发生爆炸,以及发生爆炸后进行的卸爆和氧气点吹全过程。爆炸发生在约 14 min 时,使用红线标记,爆炸原因为 O<sub>2</sub>, CO 和点火源共存引发的爆炸。

结合实际生产过程,参照爆炸可能性并根据图 14 的分析,提出以下防爆措施。

(1) 可采用降低 CO 当量比、提高 CO 混合气体初温等措施降低 CO 爆燃危害。

(2) 在一般采用前烧、后烧方法将管道中的氧气和煤气隔离方法的基础上实施炉口燃烧主动控制



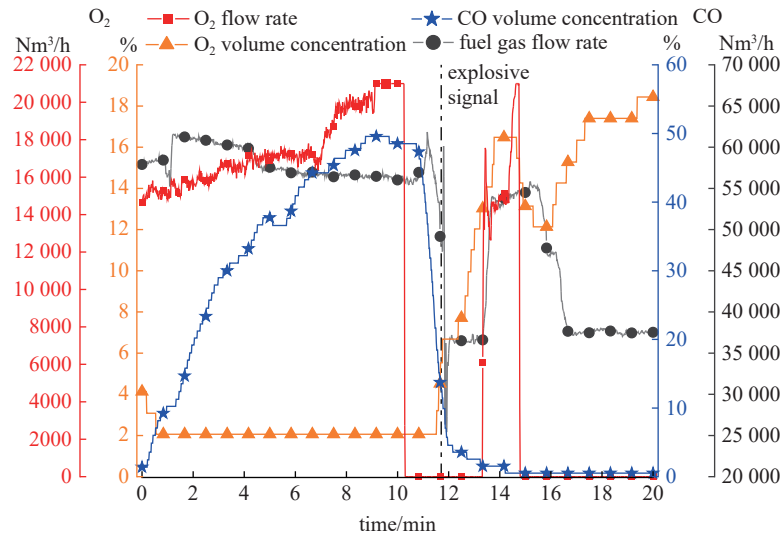


图 14 爆炸过程参数变化图

Fig. 14 Parameter variation diagram of explosion process

以及燃烧强化技术: 首先根据煤气中的  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  含量以及煤气温度的变化, 精确控制吸入的空气量, 保证恰当供给燃烧所需的空气; 其次强化炉口气流的混合, 保证  $\text{CO}$  与  $\text{O}_2$  充分混合, 同时保证  $\text{CO}$  在反应高温区的停留时间. 采用燃烧主动控制和燃烧强化技术后, 在转炉正常运行情况下, 可以保证在前烧、后烧过程中  $\text{CO}$  的高效燃烧, 使得管道中不出现  $\text{CO}$  与  $\text{O}_2$  共存的现象, 杜绝煤气发生爆炸的潜在危险. 此外可以通过采集的数据来判断煤气是否有爆炸风险, 如果有风险可以发出警报, 调整炼钢参数, 避免除尘系统发生爆炸, 提高转炉系统运行安全性.

(3) 采用主动防止煤气爆炸的遏制技术. 通过快速精确测量煤气中的  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  瞬时含量, 一旦超标及时报警; 其次喷入惰性气体对煤气进行稀释, 将  $\text{CO}$  含量降至 5% 或者  $\text{O}_2$  含量降至 2%; 最后采用水雾降温法将煤气温度迅速降至低温, 同时关闭电除尘器的电源.

(4) 采用煤气爆炸防护系统, 安装泄爆装置和隔爆装置, 降低爆炸的威力, 减少爆炸对设备的危害. 同时在煤气管道外部安装防爆板, 如果发生危险, 可以降低事故造成的损失.

## 5 结论

本文以  $\text{CO}$  气体为研究对象, 通过实验与数值模拟相结合的方法探究  $\text{CO}$  当量比、初温以及含水量对  $\text{CO}$  爆燃的最大压力和火焰传播速度的影响, 并通过化学平衡计算得出的结果与实验结果进行了

比较, 最后对防爆方法进行了讨论. 论文主要得出了以下结论.

(1)  $\text{CO}$  爆燃的最大压力以及火焰速度均随着混合气体中  $\text{CO}$  当量比的减小呈现减少的趋势, 在实验  $\text{CO}$  当量比范围内, 爆燃压力最大值为 0.65 MPa, 最大爆燃速度约为 750 m/s. 当  $\text{CO}$  当量比小于 0.368 时对火焰速度的影响不大.

(2) 随着混合气体的初始温度的升高, 最大爆燃压力减小, 符合理想气体状态方程规律, 与此同时, 温度升高有利于化学反应的发生, 因此火焰速度有所上升, 火焰传播时间同样减小.

(3)  $\text{CO}$  的爆燃最高压力随混合气体含水量增加而上升, 但在实验  $\text{CO}$  当量比范围内, 水分含量超过 0.463% 后, 继续增大含水量对爆燃产生的最高压力影响很小.

(4) 化学平衡计算方法对于中高当量比的  $\text{CO}$  的爆燃压力计算较为精准, 在低当量比或爆燃压力较小时, 计算误差较大.

(5) 针对  $\text{CO}$  混合气体, 可以通过降低  $\text{CO}$  当量比、提高初温等措施降低爆燃压力; 通过燃烧主动控制、燃烧强化技术以及爆炸遏制技术等能够有效预防爆燃; 同时通过爆炸防护系统可以降低爆燃带来的损失.

## 致谢与后记

我们铭记吴承康院士生前对课题组工作的悉心指导. 吴先生十分重视节能工作, 早在 20 世纪 90 年

代初, 他就领导了燃烧气脉冲技术的研发与应用, 为我国电站锅炉节能做出了重要的贡献, 本文的工作是在这些燃气爆炸研究的基础上开展的. 十余年来, 我们课题组在国家 863 目标导向类(重点)课题、中国科学院节能减排重点项目、战略性先导 A 类专项课题以及国家自然科学基金项目支持下, 针对转炉煤气爆炸性、多尘性和间歇性等特点, 研发了煤气防爆\遏爆、换热器高效换热与清灰等核心技术, 建成了首套转炉煤气全干法显热回收示范工程. 记得 2022 年 8 月向吴先生汇报该项目已经通过现场 168 小时考核运行时, 他审阅了相关文件后, 很快回复: “初步看了一下, 确实是产学研的成功典范……这项工作多年来投入大量精力, 取得重大成果, 实在是难能可贵. 祝贺你们!” 吴先生的鼓励和支持一直是我们的课题组在力学所坚持工业炉窑节能减排科研工作的主要动力, 在当前国内外强调绿色低碳发展理念的形势下, 我们有信心坚持不懈, 以行动实践吴先生当年发展我国节能技术的前瞻性思想. 愿以此文纪念尊敬的吴承康院士!

### 参 考 文 献

- Zhao JH, Yan PY, Wang DM, et al. Research on mineral characteristics of converter steel slag and its comprehensive utilization of internal and external recycle. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156: 50-61
- 上官方钦, 殷瑞钰, 李煜等. 论中国发展全废钢电炉流程的战略意义. 钢铁, 2021, 56(8): 86-92 (Shangguan Fangqin, Duan Ruiyu, Li Yu, et al. Discussion on strategic significance of developing full scrap EAF process in China. *Iron and Steel*. 2021, 56(8): 86-92 (in Chinese))
- Toshihiko E. Steelmaking technology for the last 100 years: toward highly efficient mass production systems for high quality steels. *ISIJ International*, 2015, 55(1): 36-66
- 张琦. 钢铁联合企业煤气资源合理利用及优化分配研究. [博士论文]. 沈阳: 东北大学, 2011 (Zhang Qi. Study on unreasonable utilization and optimizing distribution of gases fuel in iron and steel complex. [PhD Thesis]. Shenyang: Northeastern University, 2011 (in Chinese))
- 李洪福, 温燕明. 钢铁制造流程能源转换功能的开发与利用. 中国冶金, 2021, 31(9): 46-52 (Li Hongfu, Wen Yanming. Development and utilization of energy conversion function in iron and steel manufacturing process. *China Metallurgy*, 2021, 31(9): 46-52 (in Chinese))
- 张翔, 周建安, 王宝等. 转炉高温烟气中喷吹除尘焦粉后 O<sub>2</sub> 含量变化规律. 钢铁研究学报, 2020, 32(7): 584-590 (Zhang Xiang, Zhou Jianan, Wang Bao, et al. Variation law of O<sub>2</sub> content after dedusting coke powder injection in high temperature flue gas of converter. *Journal of Iron and Steel Research*, 2020, 32(7): 584-590 (in Chinese))
- 于鹏飞, 曾加庆, 林腾昌等. 国内转炉煤气回收概况与研究展望. 铸造技术, 2018, 39(1): 240-245 (Yu Pengfei, Zeng Jiaqing, Lin Tengchang, et al. General situation and research prospect of converter gas recovery in China. *Foundry Technology*, 2018, 39(1): 240-245 (in Chinese))
- 张琦, 蔡九菊. 钢铁制造流程系统节能与能效提升. 钢铁, 2021, 56(8): 32-42 (Zhang Qi, Cai Jiujü. Systemic energy saving and efficiency improving of iron and steelmaking process. *Iron and Steel*, 2021, 56(8): 32-42 (in Chinese))
- 杨再文, 胡显堂, 徐晨光. 转炉热端烟气分析与干法除尘的综合应用. 中国冶金, 2018, 28(6): 63-65, 70 (Yang Zaiwen, Hu Xiantang, Xu Chenguang. Comprehensive application of converter hot end flue gas analysis and dry dedusting. *China Metallurgy*, 2018, 28(6): 63-65, 70 (in Chinese))
- 王少军, 周朝刚, 蒋朝敏等. 基于干法除尘灰返回转炉的应用实践. 中国冶金, 2020, 30(4): 74-78 (Wang Shaojun, Zhou Chaogang, Jiang Chaomin, et al. Application practice of dust returning to converter based on dry dedusting. *China Metallurgy*, 2020, 30(4): 74-78 (in Chinese))
- Zhou JN, Song WM, Li YJ, et al. High-quality syngas production: The green and efficient utilization of waste tire and waste heat from the steelmaking converter process. *Waste Management*, 2021, 131: 98-107
- Li JD, Hao H. Numerical and analytical prediction of pressure and impulse from vented gas explosion in large cylindrical tanks. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 127: 26-244
- 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理. 北京: 北京理工大学出版社, 1996 (Zhao Hengyang. Principle of Gas and Dust Explosion. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996 (in Chinese))
- 刘原一, 李文广, 谭厚章等. 粉尘-CO/H<sub>2</sub> 杂混合物爆燃特性研究. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 215-220 (Liu Yuanyi, Li Wenguang, Tan Houzhang, et al. Experimental study on deflagration parameters of dust CO/H<sub>2</sub> hybrid mixture. *Explosion and Shock Wave*, 2017, 37(2): 215-220 (in Chinese))
- 白刚, 周西华, 宋东平. 温度与 CO 气体耦合作用对瓦斯爆炸界限影响实验. 高压物理学报, 2019, 33(4): 189-196 (Bai Gang, Zhou Xihua, Song Dongping. Experiment on the influence of temperature and CO gas coupling effect on gas explosion limit. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(4): 189-196 (in Chinese))
- 薛玮. 低热值转炉煤气脉动燃烧特性研究. [硕士论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2022 (Xue Wei. Study on characteristics of low calorific value converter gas pulsating combustor. [Master Thesis]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022 (in Chinese))
- Liu Y, Xue QG, Zuo HB, et al. Experimental study of H<sub>2</sub> and/or N<sub>2</sub> addition effects on CO/CO<sub>2</sub> air flames using a combustion diagnostic system. *Journal of Thermal Science*, 2021, 30: 1268-1277
- 罗家松, 魏小林, 李森等. 带障碍物圆管内煤气爆燃峰值超压和火

- 焰传播速度研究. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(11): 1360-1366 (Luo Jiasong, Wei Xiaolin, Li Sen, et al. Study on peak overpressure and flame propagation speed of gas deflagration in the tube with obstacles. *Science China-Technological Sciences*, 2010, 40(11): 1360-1366 (in Chinese))
- 19 金潮. 高温冶金炉煤气爆炸特性研究. [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2013 (Jin Chao. Experimental research on explosion characters of metallurgical gases in high temperatures. [Master Thesis]. Shenyang: Northeastern University, 2013 (in Chinese))
- 20 Zhang Y, Yu LX, Wei XL, et al. Numerical and experimental investigation on the preventing of CO deflagration. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22(2): 169-175
- 21 王奎明. 转炉煤气中温段余热回收抑爆特性研究. [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2021 (Wang Kuiming. Study on the explosion suppression characteristics of the waste heat recovery in the middle temperature zone of converter gas. [Master Thesis]. Shenyang: Northeastern University, 2021 (in Chinese))
- 22 Turns S, Haworth DC. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications. McGraw-Hill, 2000
- 23 Launder BE, Reece GJ, Rodi W. Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *Journal of Fluid Mechanics*, 1975, 68(3): 537-566
- 24 He D, Yu YS, Ma H, et al. Extensive discussions of the eddy dissipation concept constants and numerical simulations of the Sandia flame D. *Applied Sciences*, 2022, 12(18): 9162
- 25 Yetter RA, Dryer FL, Rabitz H. Complications of one-step kinetics for moist CO oxidation. *Symposium (International) on Combustion*, 1988, 21(1): 749-760
- 26 董刚, 蒋勇, 陈义良等. 大型气相化学动力学软件包 CHEMKIN 及其在燃烧中的应用. 火灾科学, 2000, 1: 27-33 (Dong Gang, Jiang Yong, Chen Yiliang, et al. A large-scale gas-phase chemical kinetics software package CHEMKIN and its application in combustion problems. *Fire Safety Science*, 2000, 1: 27-33 (in Chinese))
- 27 张良, 魏小林, 余立新等. 管道内一氧化碳和空气预热混合物的爆燃特性. 爆炸与冲击, 2010, 30(2): 191-196 (Zhang Liang, Wei Xiaolin, Yu Lixin, et al. Deflagration characteristics of a preheated CO-air mixture in a duct. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(2): 191-196 (in Chinese))
- 28 刘易斯·埃尔贝. 燃气燃烧与瓦斯爆炸. 第3版. 王方译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 67-82 (Lewis Erbe. Gas Combustion with Gas Explosion. Third Edition. Translated by Wang Fang. Beijing: China Architecture and Architecture Press, 2010: 67-82 (in Chinese))
- 29 陈凤生. 转炉煤气回收系统的安全运行措施. 天津冶金, 2017, 4: 72-74 (Chen Fengsheng. Measures of safe running of converter gas recovery system. *Tianjin Metallurgy*, 2017, 4: 72-74 (in Chinese))
- 30 王丹. 电除尘器内转炉煤气爆炸与泄爆过程的数值模拟及实验研究. [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016 (Wang Dan. Numerical simulation and experimental study on converter gas explosions and venting in electrostatic precipitator. [Master Thesis]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016 (in Chinese))