

密闭容器中转炉煤气爆燃特性研究

刘启昌¹ 韩鹏^{2*} 刘广强¹

1. 辽宁科技大学, 土木工程学院 辽宁 鞍山 114000

2. 辽宁科技大学, 材料与冶金学院 辽宁 鞍山 114000

摘要: 随着现代工业的快速发展, 许多重要的冶金、化工、能源等行业中普遍存在着各种类型的爆炸灾害。在转炉炼钢时, 将有很多温度较高的转炉煤气生成, 成分中CO占较大比例, 排放气体时出口温度能够达到1600℃左右, 对其进行余热回收具有非常高的价值。本文通过计算流体力学(CFD)的方法, 创建了一个二维封闭空间的物理模型, 用Fluent软件中的一种Premixed Combustion(预混燃烧)模型, 运用有限元的方式, 对封闭容器中, 转炉煤气和空气的充分混合气体的爆炸燃烧过程, 开展了数值模拟研究。模拟了在封闭容器内设置障碍物的情况下, 对转炉煤气的爆炸燃烧会产生什么影响。

关键词: 密闭容器, 煤气爆燃, 数值模拟, 障碍物

引言

转炉煤气是一种危险的容易发生爆炸的可燃性气体, 对转炉煤气的燃烧爆炸特性进行实验也包含在可燃性气体爆炸的研究范围之内^[1-2]。所以, 不管是以提升转炉煤气余热回收利用安全性看, 还是以增加余热回收的效率以及促进转炉炼钢不断发展的方向看, 进行转炉煤气的燃烧爆炸特性实验, 对其不同的影响因素进行实验探讨, 使得能够安全、可靠地回收利用转炉煤气中段温度的热量, 从而使发生转炉煤气爆炸事故的可能性得到降低以及消除, 以及节能减排等方面, 研究转炉煤气的燃烧爆燃特性及其影响因素具有重要的参考价值^[3-5]。

1 模型建立

建立一个合理的物理模型是进行数值模拟的关键, 只有物理模型与实际生产相互吻合, 才能够运用模拟对实际问题进行简单化以及合理分析解决问题^[1]。密闭容器内可燃预混气体的初始状态包括气体的成分、初始温度、初始压力等。这些参数的不同会影响燃烧过程的性质和特征。密闭容器内可燃预混气体的燃烧过程可以分为点火和燃烧两个阶段^[12]。在点火阶段, 点火源将气体点燃后热量向未燃烧区域传递, 当这一区域中热量达到燃烧所需条件时将开始燃烧。在燃烧阶段, 燃烧反应在气体中持续进行, 并释放大量的热能和燃烧产物, 直至容器中预混气体燃烧完全^[2]。

转炉煤气在爆炸过程中存在许多化学反应, 能量转化以及物质转化过程, 所以需要模型进行假定和简化:

- (1) 假设密闭容器中混合气体分布均匀, 同时处于常温常压的静止状态;
- (2) 预混气体的爆炸在绝热条件的密闭容器中, 忽

略容器和周围环境的能量传递^[15];

(3) 假设密闭容器的壁面为刚性, 预混气体在容器中发生爆炸时与容器壁面无相互作用力。

根据真实生产中的容器尺寸, 设计模拟的模型尺寸为24m×6m。创建一种结构化的网格形式, 从而能够让计算结果比较准确, 创建大小为3cm的网格, 其总的数量是160000个, 网格质量是1.0。网格示意图如图1所示。

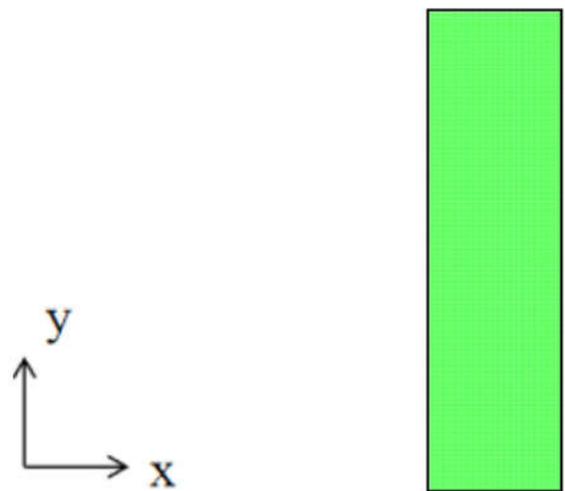


图1 计算区域及网格示意图

模型的四周边界都作为绝热壁面, 且热流密度是零, 壁面不会滑移。在反应的起始阶段速度为0, 未燃烧位置的温度是300K, 设置反应压力是1atm, 反应进程变量c是0。已经开始燃烧的区域温度是1950K, 压力是1atm, 反应进程变量c是1。

2 结果与讨论

2.1 转炉煤气火焰传播过程分析

在模拟过程中使用化学当量比是0.91，反应起始温度300K，起始压力1.0atm的转炉煤气和空气的相互混合气体。研究了在长度24m，宽度6m的容器里预混合气体发生爆炸的过程。

从下图2能够得到，转炉煤气和空气的预混合气体在密闭容器中开始燃烧时，模拟过程中显示的火焰传播过程清晰地展示了经典“郁金香”火焰的传播的四个流程：在0-70ms时，火焰锋面首先以椭球形向周围的未燃烧区发展；在70-600ms内，因为火焰受到了容器两侧壁面的限制，形成接近山字型的火焰前锋，火焰传播速度呈现出了剧烈的提速状态；在600-900ms时间段内，因为火焰发展与壁面接触使得壁面周围的火焰熄灭，火焰锋面呈现出了平面的形式，火焰的传播速度急速降低；在900ms以后，此阶段中火焰锋面会再次发生变化。随着时间推移，已燃区域的火焰锋面出现了凹陷的情况，也就是形成了tulip火焰。“郁金香”火焰形成的原因，可以用下图3容器内部气流变化的速度矢量图来说明。从图中能够看出，在600ms之前，流场的所有速度方向都与火焰传播的方向保持一致。在火焰发展至容器两侧壁面时，火焰传播速度降低。同时，流场中的反向气流变多，在容器侧壁形成涡旋，使火焰锋面在传播过程中缓慢变平。反应到900 ms时，涡旋处反方向气流对火焰减速作用提升，从而形成了tulip火焰^[3]。

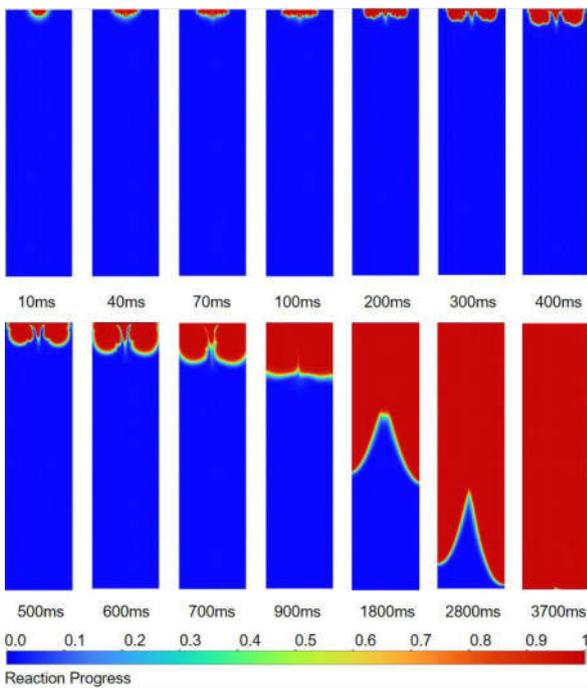


图2 进程变量c随时间的变化云图

2.2 转炉煤气爆炸压力随时间的变化曲线

在容器中选择坐标分别为Point1 (3, 18)，Point2

(3, 12)，Point3 (3, 6)，的三个不同位置的点来研究密闭容器内压力随时间的变化特性。三个点的压力分布曲线如下图2所示。

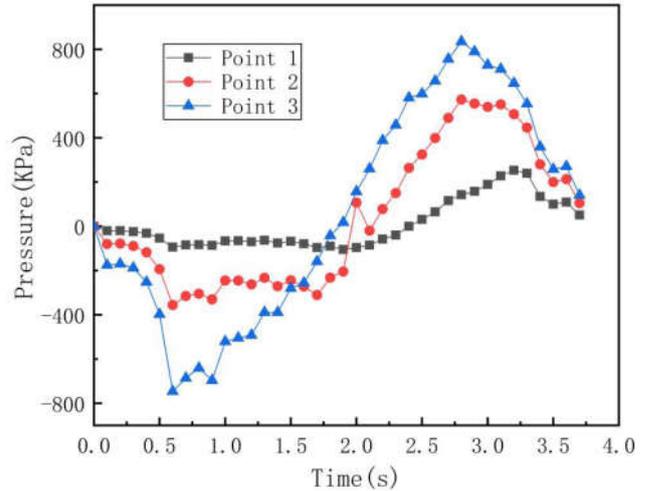


图2 容器内三处不同位置的爆炸压力随时间的变化曲线

从图2中能够看出，由于不同位置的点距离点火源的距离不同，使得不同位置的爆炸压力上升速率不同。当可燃气体在密闭容器内发生爆炸时，爆炸波使得容器内部的气体压力急剧降低，直至降为负压。随后，爆炸波继续向外传播，气体受到的压力和温度逐渐升高^[4]。

2.3 转炉煤气的火焰传播速度随时间的变化曲线

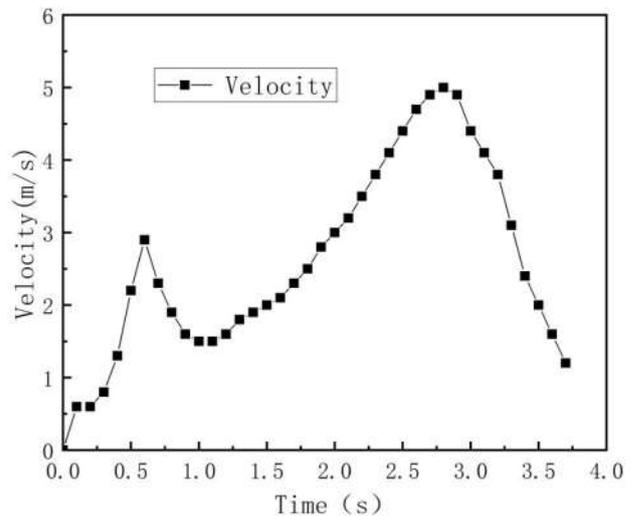


图3 火焰传播速度随时间的变化曲线

图3所示为爆炸过程中火焰传播速度与时间的变化曲线。图中能够看出火焰速度在第一阶段火焰传播速度迅速提升。随后火焰面接触到容器两侧壁面时火焰传播速度急剧下降。随后，因为tulip火焰的产生，火焰传播速度再次提升。此后，又因为反向气流增加的影响速度降低^[5]。

2.4 转炉煤气的燃烧温度随时间的变化曲线

图4所示为容器中三个不同位置点的温度随时间的变化曲线。从图中能够看出,随着初温的提高,火焰的绝热燃烧温度也随之提高,而各个点的初温则受到辐射等因素的影响而逐步提高;三个点的温度都上升到了绝热火焰的温度。

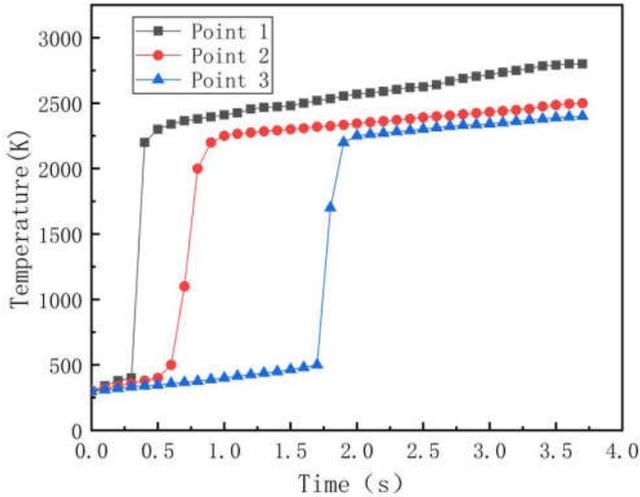


图4 不同三处位置的温度随时间的变化曲线

结论

密闭容器中转炉煤气燃烧爆炸时的火焰发展过程能够划分为四个阶段:第一阶段,在点火初期火焰锋面以

半球形状向外传播;第二阶段,火焰继续加速向前传播,火焰锋面呈现山字形状;第三阶段,火焰继续发展直至与容器两侧壁面接触时,火焰前锋会趋于一个平面;第四阶段,火焰在容器中会以“郁金香”的形状继续向前传播,直至完全燃尽;火焰在传播过程中与容器侧壁接触产生涡旋是tulip火焰产生的关键因素。此外,障碍物的存在会对其周围的流场产生干扰,从而使tulip火焰的形状会发生改变。

参考文献

[1]任冰朗. 高温转炉煤气与焦炉煤气混合重整研究[D].北京:北京科技大学,2022.

[2]张琦,张薇,王玉洁,徐进,曹先常. 中国钢铁工业节能减排潜力及能效提升途径[J]. 钢铁,2019,54(02):7-14.

[3]Ai-Hua W, Jiu-Ju C, Xiu-Ping L, et al. Affecting Factors and Improving Measures for Converter Gas Recovery[J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2007, (06):22-26.

[4]于庆波,胡贤忠,谢华清,秦勤.中温段转炉煤气干法除尘和余热回收系统及方法[P].辽宁省:CN104745762B,2018-06-08.

[5]孟祥燕.密闭型OG装置的研究[J].环境工程,1987,(03):25-30+24.