

[环保·安全]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.06.019

急冷塔内喷雾蒸发过程的数值模拟

詹仕巍, 虞斌

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏南京 211816)

摘要:针对废弃物焚烧时高温烟气在降温过程中二噁英的再生成问题,建立了高温烟气与雾化液滴两相流动及两相之间传质传热的数学模型,并以此为基础,利用计算流体力学(CFD)方法对急冷塔内雾化液滴的蒸发过程进行了数值模拟,研究了入口烟气温度、液滴初始粒径、初始温度及喷射速度对液滴群蒸发的影响。模拟结果表明:液滴蒸发经过非稳态和稳态过程,在稳态阶段液滴平衡温度受入口烟气温度的影响较大且随着烟气温度升高而增大;液滴群的完全蒸发时间随着烟气温度的升高而缩短且随着颗粒初始粒径的增大而延长;液滴群完全蒸发时间与液滴初始温度及喷射速度基本无关;初始粒径在150 μm以下能保证在1 s内冷却烟气至200 ℃。该结果可为急冷塔系统设计及运行提供参考。

关键词:急冷塔;高温烟气;两相流;计算流体力学(CFD);平衡温度

中图分类号:X701.7 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)06-0087-06

Numerical Study on Spray Evaporation Process in Quench Tower

ZHAN Shiwei, YU Bin

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: The mathematical model of two-phase flow of high temperature flue gas and atomized droplets and heat and mass transfer between two phases were established to prevent the formation of dioxins in the process of cooling. By using computational fluid dynamics (CFD) method to simulate the evaporation process of atomized droplets which was exist in the quench tower, the effects of inlet flue gas temperature, initial droplet size, initial temperature and injection velocity on the droplet evaporation were analyzed. The simulation results show that droplet evaporation includes two processes: steady state and unsteady state in the steady state, and the droplet equilibrium temperature is affected greatly by the inlet flue gas temperature and with the increase of flue gas temperature. The total evaporation time of droplet group decreases with the increase of flue gas temperature and increases with the increase of initial particle size. The total evaporation time of droplet group is not related to the initial droplet temperature and injection velocity. The initial particle size of 150 microns below can guarantee the 1s cooling flue gas to 200 degrees celsius. The results can provide basis for the design and operation of the quench tower system.

Keywords: quench tower; high temperature flue gas; two-phase flow; CFD (computational fluid dynamics); equilibrium temperature

在废弃物焚烧工艺中,焚烧过程中会产生大量的有害物质,二噁英就是其主要组成成分。为了控制二噁英排放,不仅要求废弃物在焚烧炉及二燃室充分燃烧,而且还要防止在低温烟道中二噁英的产生^[1]。从有关二噁英的研究表明^[2-3],二噁英的再生成温度区间在200~500 ℃之间,主要活跃区间是300~400 ℃。为了减少二噁英的产生,需要在极短的时间(1 s内)

将烟气冷却至200 ℃以下。高温烟气的冷却方式有:直接风冷、间接风冷、间接水冷及喷雾直接冷却。喷雾直接冷却符合技术要求^[4],利用水的汽化潜热,换热效率高且耗水量少,冷却空间小且设备投资小。

急冷塔作为高温烟气净化系统的核心设备,研究其喷雾蒸发过程中气液两相之间的传质传热过程对急冷塔系统的设计和运行十分重要。通过查阅文献[5-

收稿日期:2017-03-10;修回日期:2017-04-12

第一作者简介:詹仕巍(1990),男,江西九江人,硕士,主要研究方向为高效传质传热设备。E-mail:swzhan1224@163.com

8],目前国内外主要集中在特殊物质的单因素研究或者单液滴多因素的研究,而液滴在高温烟气的多因素蒸发研究较少。近年来,CFD软件在两相流分析中得到了广泛地应用^[9-11],本课题组使用CFD技术方法对高温烟气建立了喷雾蒸发过程的数值模型,并利用该模型对某项目的急冷塔内气液两相流动进行了模拟,研究了雾化液滴的初始粒径、初始温度、初始速度及烟气温度对液滴的蒸发影响。

1 物理模型

塔体的几何模型的构件及气液两相参数:急冷塔的总体高度为5 200 mm,其中塔体圆筒状长度为3 500 mm,下部锥体的高度为1 200 mm,塔体内直径为 $\varnothing 1\ 000$ mm,上部入口内管径为 $\varnothing 500$ mm,下部出口管径为 $\varnothing 500$ mm,并与塔体中心线呈 45° 夹角。为了降低出口管回流的影响,课题组对出口管进行延长处理。具体模型见图1。烟气入口速度为 $v = 2$ m/s。



图1 喷雾急冷塔几何模型

Figure 1 Geometric model of spray cooling tower

文中采用的具体喷嘴布置方式为:8个喷嘴平均布置在半径为300 mm圆环上,圆环距塔顶500 mm。喷嘴为实心锥形喷嘴,喷射角度为 30° ,喷射的方向与烟气流动方向相同,总体喷水量为1.4 kg/h。

2 数学模型

烟气相采用欧拉模型进行计算模拟,当气相模型达到收敛以后,利用离散相模型(DPM)再对雾滴蒸发进行模拟。烟气入口采用速度进口,壁面条件为标准壁面函数。

在对离散相液滴颗粒与烟气的传质传热过程进行CFD数值模拟计算时,做出如下简化及假设:①忽略喷嘴、喷管等水路系统及内部其他小构件布置对烟气流场的影响;②急冷塔内烟气流动的马赫数较低,将其设定为不可压缩流体;③将离散相液滴颗粒假定为球形颗粒且颗粒内部不存在温度梯度;④忽略颗粒之间的摩擦、碰撞及破碎等相互之间的影响;⑤将壁面边界条件设为绝热壁面,不考虑烟气与壁面之间的换热;⑥

不考虑辐射模型。

2.1 气相模型

急冷塔内部构件比较少,烟气流动为弱旋流动,湍流模型采用标准的 κ - ε 双方程模型。

2.2 离散相(液滴颗粒)控制方程

液滴颗粒的轨迹模型在Lagrangian坐标系下作用力平衡方程可描述为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F。$$

式中: u 为烟气的速度; u_p 为颗粒(液滴)的速度; t 为时间; ρ 为烟气密度; ρ_p 为液滴密度; $F_D(u - u_p)$ 为单位质量的液滴受烟气作用的曳力; F 为液滴的附加质量力。

根据气固两相流理论,作用在颗粒上的力有曳力、重力、虚拟质量力、热泳力、布朗力和Saffman升力等。对于微小颗粒而言,除曳力和重力外,其他作用力均可忽略。

受高温烟气的影响,在烟气中运动的液滴的传热、传质过程可分为3个阶段。

1)当液滴温度 T_p 低于液滴蒸发温度 T_{vap} 时,此阶段液滴颗粒只能以惯性颗粒的形式来和高温气体进行热量交换。两相之间没有质量交换,当不考虑辐射模型时,离散相颗粒的热平衡方程可表达为:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p)。$$

式中: m_p 为液滴质量; c_p 为液滴比热容; A_p 为液滴表面积; T_∞ 为周围烟气的温度; T_p 为液滴的设定温度; h 为两相之间的对流传热系数。

2)当液滴温度 T_p 高于液滴蒸发温度 T_{vap} 而低于液滴沸腾温度 T_{bp} 时,此时离散相颗粒的热平衡方程可表达为:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg}。$$

式中 h_{fg} 为液滴汽化潜热。

此阶段液滴颗粒在与烟气进行传热的同时还伴有传质(液滴表面蒸发)现象的发生。气粒两相之间传质方程可表达为

$$m_p(t + \Delta t) = m_p(t) - N_i A_p M_{w,i} \Delta t。$$

式中: Δt 为时间步长; N_i 为液滴蒸汽的摩尔流率; $M_{w,i}$ 为液滴的摩尔质量。

3)当液滴温度高于液滴沸腾温度 T_{bp} 时,气粒两相传热达到平衡,液滴的温度将不再发生变化直至液滴完全蒸发。此时气粒两相之间的传质传热速率较之前2个阶段大幅度增加。此时颗粒沸腾蒸发速率方程

可表达为

$$\frac{dd_p}{dt} = \frac{4k_\infty}{\rho_p c_{p,\infty} d_p} (1 + 0.23 \sqrt{Re_d}) \ln \left[1 + \frac{c_{p,\infty} (T_\infty - T_p)}{h_{fg}} \right]$$

式中: d_p 为颗粒的直径; $c_{p,\infty}$ 为烟气比热容; k_∞ 为烟气导热率; Re_d 为液滴颗粒雷诺数。

2.3 网格可行性及算法验证

为了验证网格的可行性,分别采用网格数为430 000的模型和网格数为600 000网格模型(关键部位加密)进行数值模拟,计算收敛后得到的流场及温度场相近。综合考虑计算时间和计算的准确性,最终采用400 000网格数为计算网格数。为了验证该模型的可靠性,对黄明星等^[12]的实验结果进行比较,对比结果如表1所示,可见用本文的算法得到的模拟结果与试验结果有较高的一致性,表明本文的模型算法有效。

表1 实验结果与模拟结果的比较

Table 1 Comparison between experimental results and simulation results

工况	实际喷水量/ (t·h ⁻¹)	模拟喷水量/ (t·h ⁻¹)	误差/ %
入口温度210℃,出口温度170℃	3.60	3.65	1.3
入口温度220℃,出口温度170℃	4.18	4.29	2.6

3 模拟结果分析

急冷塔在喷雾工况下沿轴向中心截面的速度、温度分布云图如图2~3所示。从图中可以看到在喷雾后,急冷塔上部喷雾区域由于液滴蒸发而吸收大量的热导致在较短的竖直区域内烟气温度急剧下降。由于喷射液滴与高温烟气的耦合作用,急冷塔内部烟气的流场受到很大的影响,且喷嘴下方区域由于温差较大而出现不同尺度的旋涡。

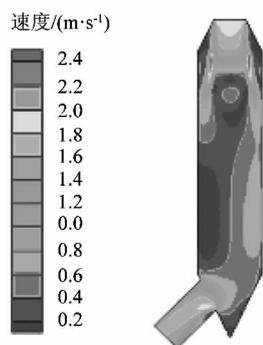


图2 喷雾工况下塔内速度云图
Figure 2 Velocity nephogram in tower under spray state

图4为入口烟气温度 $T = 800$ K、喷射速度为 10 m/s、初始粒径为 $100 \mu\text{m}$ 时的液滴温度与蒸发时间的

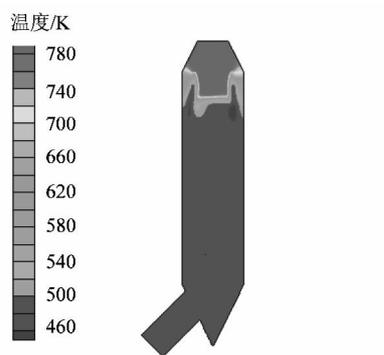


图3 喷雾工况塔内温度云图
Figure 3 Temperature nephogram in tower under spray state

关系。从图中可以看出蒸发过程可以分为非稳态和稳态过程。在非稳态蒸发过程当中,液滴的温度随蒸发过程的进行而逐渐升高,而且此过程发生相当迅速,相比整个蒸发时间几乎可以忽略,此时液滴吸收的热量一部分用来升高液滴的温度,一部分为液滴与烟气的传质所带走的热量。在液滴的稳态过程中,此时液滴达到饱和和蒸气温度(平衡温度),可视为烟气与液滴的换热量刚好和液滴蒸发所带走的热量持平,且此过程伴随着蒸发的继续直至蒸发完全。

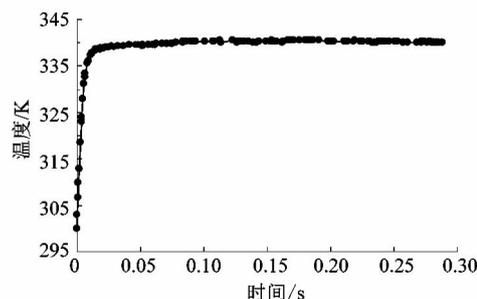


图4 液滴颗粒的温度随时间的变化
Figure 4 Temperature variation of droplet particles with time

3.1 入口烟气温度对雾化液滴蒸发时间的影响

为了了解不同的入口烟气温度对雾化液滴群寿命的影响,分别对初始粒径为 $100 \mu\text{m}$ 、初始速度为 10 m/s的雾滴在 $700, 750, 800, 850, 900$ K的烟气环境下的蒸发特性进行研究,如图5所示。入口烟气温度为 700 K时,液滴群最大蒸发时间为 0.73 s,相比入口烟气温度为 800 K时,液滴群最大蒸发时间增加了 72.6% ;而相比入口烟气温度为 900 K时,液滴群最大蒸发时间增加了近 108% 。

从图6可以看出只改变入口烟气温度的情况下,液滴颗粒的平衡温度随着入口烟气温度升高而递增,

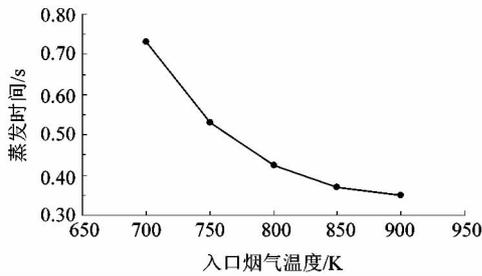


图5 烟气温度对液滴群完全蒸发时间的影响

Figure 5 Effect of flue gas temperature on total evaporation time

且递增的趋势略有所减少。入口烟气温度为 800 K 时,平衡温度为 340 K,相比入口烟气温度为 700 K 时只增加了 4.3%,而相比入口烟气温度为 900 K 时减小了 1.7%。

入口烟气温度对液滴群蒸发过程的影响显著,随着入口烟气温度升高,液滴群完全蒸发时间逐渐缩短,但缩短的趋势略有所减少。这是因为随着烟气温度的升高,液滴与烟气的温差增大,液滴达到平衡温度所需的时间更短而且使得气液之间的传热传质的驱动力增强,使得液滴的蒸发时间变短。但是由于液滴的气液传质的驱动力由蒸气压决定的,烟气温度变高,液滴表面达到饱和蒸气压所需的时间逐渐减小,而且烟气温度较高时温差变化率较小,所以液滴颗粒群的蒸发速度曲线逐渐缓和。

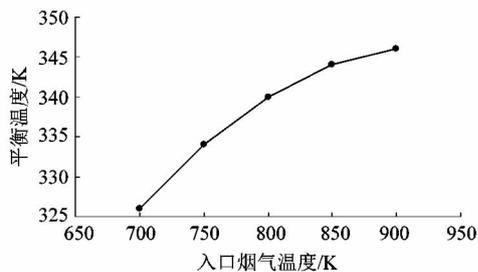


图6 烟气温度对液滴平衡温度的影响

Figure 6 Effects of flue gas temperature on droplet equilibrium temperature

3.2 喷雾颗粒的初始粒径对蒸发时间的影响

笔者在雾滴初始速度为 10 m/s、雾滴初始温度为 300 K 的工况下,分别对初始粒径为 100,120,135,150,165,180 和 200 μm 液滴群的最大完全蒸发时间进行计算。综合图 7 和图 8,可见液滴粒径的大小很大程度上影响液滴群蒸发的时间与粒子的运动轨迹。雾化后随着初始粒径的增大,液滴的寿命在大体上呈线性增长,当入口烟气温度为 800 K 时,初始粒径为 200 μm

的液滴完全蒸发时间为 1.210 s,而初始粒径为 100 μm 的液滴蒸发时间为 0.423 s,同比增长了 186%。从图 9 可以看出粒径的大小对液滴的平衡温度并没有影响,在 800 K 的烟气环境中,平衡温度均为 340 K。

喷嘴的雾化液滴直径对液滴的蒸发过程有着很重要的影响。液滴的初始直径越大,液滴群的最大完全蒸发时间越长。这是因为液滴颗粒的粒径越大,比表面积越小,对流传热越弱、不利于液滴去吸收高温烟气中的热量,从而导致蒸发的速度越慢,则液滴的寿命越长,同时液滴完全蒸发所需要的热量越多。为了达到急冷塔的工作要求,选择合适尺寸的喷嘴显得十分重要。

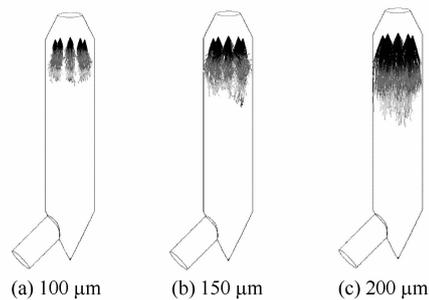


图7 不同初始粒径的液滴在塔内的运动轨迹

Figure 7 Different initial particle size of droplet trajectories in tower

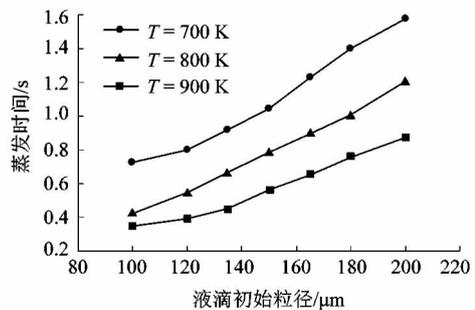


图8 液滴初始粒径对完全蒸发时间的影响

Figure 8 Effects of initial droplet size on total evaporation time

3.3 喷雾液滴的初始温度对蒸发时间的影响

采用单一变量的分析方法,由图 10 可知,随着液滴的初始温度的升高,液滴颗粒群的完全蒸发时间呈现出递减的趋势。当入口烟气温度为 800 K 时,初始温度为 300 K 的液滴群完全蒸发的时间为 0.423 s,比液滴初始温度分别为 320,340,360 K 的液滴群完全蒸发的时间分别增加了 5.75%,3.60%和 1.92%。可见液滴的初始温度对其完全蒸发时间影响可以忽略,这是因为当液滴的初始温度低于平衡温度时,液滴蒸发所带走的热量低于用于液滴温度升高的热量,随着液

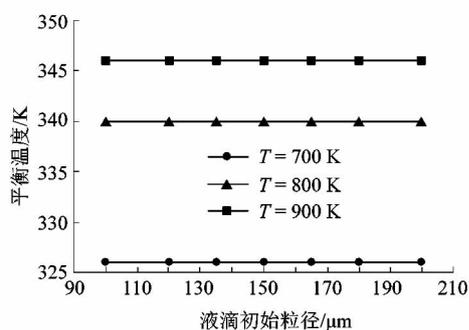


图9 液滴初始粒径对其平衡温度的影响
Figure 9 Effects of initial droplet size on equilibrium temperature

滴温度的升高,蒸发速率也增大,当液滴温度达到平衡温度时,进入稳态的蒸发阶段;而当液滴的初始温度高于平衡温度时,液滴蒸发所带走的热量要多于液滴吸收的热量,随着液滴温度的降低,蒸发速率逐渐减小,当液滴温度达到平衡温度时,也进入稳态蒸发阶段。由于到达平衡温度所需的时间相对蒸发时间来说可以忽略不计,而液滴用于升高温度或维持平衡温度所需要的热量相比高温烟气中的热量所占比例很小,所以在实际考量中,可以忽略喷雾液滴的初始温度对液滴群的完全蒸发时间的影响。从图11可以看出,喷雾液滴的初始温度对液滴的平衡温度没有影响。

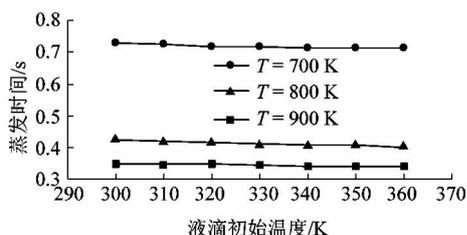


图10 液滴初始温度对完全蒸发的影响
Figure 10 Effects of initial droplet temperature on total evaporation time

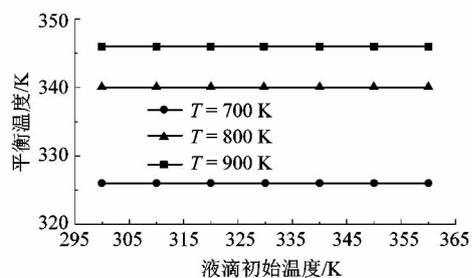


图11 液滴初始温度对其平衡温度的影响
Figure 11 Effects of initial temperature on equilibrium temperature

3.4 喷雾液滴的初始速度对蒸发时间的影响

图12可见,液滴的初始速度的改变,其平衡温度没有变化。在不改变其他参数的条件下,两相之间交换的总热量没有变化,液滴的初始速度变化不会影响到烟气及液滴的物性参数,这是导致其平衡温度没有变化的主要原因。

液滴初始速度的改变对其完全蒸发时间的影响并不明显,如图13所示,初始速度为5 m/s的液滴群完全蒸发时间为0.431 s,相比初速度为50 m/s的液滴群的完全蒸发时间仅增加了7.5%。因为液滴的运动受到高温烟气的影响比较大,由于受到曳力及重力的影响,液滴颗粒在很短的时间内能达到烟气的速度。这说明单纯依靠提高液滴喷射速度来加快液滴蒸发并不可取。

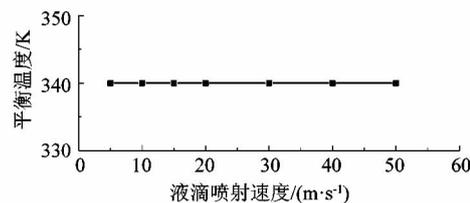


图12 液滴喷射速度对其平衡温度的影响
Figure 12 Effects of droplet velocity on equilibrium temperature

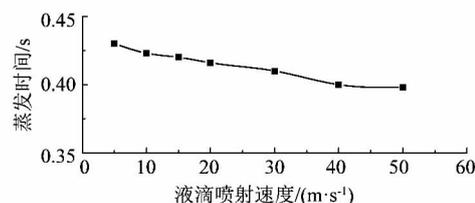


图13 液滴喷射速度对完全蒸发时间的影响
Figure 13 Effects of droplet injection rate on total evaporation time

4 结论

1) 喷雾液滴对流场的影响较大,在喷嘴下方区域会形成小范围的低速回流区域。采用喷雾急冷塔能达到在1 s内将高温烟气冷却至200℃,可有效地避免二噁英的再生成。满足工程应用效果。

2) 液滴颗粒在很短的时间内饱和蒸发温度即平衡温度,相比完全蒸发时间可忽略不计。在本文中,液滴平衡温度与液滴本身的基本参数无关,只与液滴所处的高温烟气环境的温度有关,温度越高,液滴的平衡温度就越高且增长的趋势放缓。

(下转第96页)