

## 试验研究

## 燃煤电厂烟气环境下脱硫废水液滴蒸发特性的研究

秦福初,倪明,杨洋

(国家电投集团远达环保工程有限公司,重庆 401122)

**摘要:**通过理论分析和数学模型研究了烟道喷雾蒸发技术脱硫废水液滴在烟气环境中的运动、受热和蒸发过程中的传热传质特性,考察了烟气速度、温度和液滴粒径等对液滴蒸发特性的影响规律。结果表明:烟气速度越大,液滴初速度对液滴运动速度的影响越小;气液初始相对速度越大,液滴完全蒸发时间越短;烟气温度是影响废水蒸发时间的关键参数,在不影响锅炉效率的前提下适当提高锅炉尾部烟气温度有利于喷雾蒸发技术的实现。在本文研究的烟气环境和液滴条件下,液滴无量纲完全蒸发时间与烟气温度呈指数递减关系。

**关键词:**脱硫废水零排放;喷雾蒸发技术;液滴蒸发特性

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2019)03-0023-04

## Study on evaporation characteristics of droplets from desulfurization wastewater in flue gas environment of coal-fired power plant

QIN Fu-chu, NI Ming, YANG Yang

(SPIC Yuanda Environmental-Protection Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

**Abstract:** Through theoretical analysis and mathematical modelling of flue spray evaporation technology, the heat and mass transfer characteristics of desulfurization wastewater droplets were studied during moving, heating and evaporation process in flue gas environment. The effects of flue gas velocity, temperature and droplet size on the droplet evaporation characteristics were investigated. The results show that the larger the flue gas velocity was, the smaller the influence of initial droplet velocity on the droplet velocity was; the larger the initial relative velocity of gas and liquid was, the shorter the complete evaporation time of droplets was; the key parameter affecting the evaporation time of wastewater was flue gas temperature; properly increasing the temperature of tail gas of the boiler without affecting boiler efficiency was conducive to the realization of spray evaporation technology. the dimensionless complete evaporation time of droplets decreases exponentially with the increase of flue gas temperature under the flue gas environment and droplet conditions studied in this paper.

**Key words:** Zero discharge of desulphurization wastewater; Spray evaporation technology; Droplet evaporation characteristics

## 0 引言

目前燃煤电厂脱硫废水的处理主要采用传统的化学处理方法,但化学方法处理不仅成本较高,

并且无法去除废水含有的高浓度  $Cl^{-1,2}$ 。近年来,利用锅炉尾部烟气对脱硫废水进行喷雾蒸发处理逐渐受到关注,国内外相关的专利也有不少<sup>3,4</sup>。该

收稿日期:2019-02-18

基金项目:重庆市技术创新与应用示范专项“工业废水零排放工艺与示范”(cstc2018jszx-cyzdX0031)

第一作者简介:秦福初(1981-),男,重庆人,高级工程师,硕士。Email:3002591@qq.com

引用格式:秦福初,倪明,杨洋.燃煤电厂烟气环境下脱硫废水液滴蒸发特性的研究[J].能源环境保护,2019,33(3):23-26+9.

处理方法是將脱硫废水通过喷嘴雾化喷入空气预热器和电除尘器之间的烟道，利用烟气热量蒸发水分，废水中溶解的金属盐类以固体颗粒形式和烟灰一起进入电除尘器，被电极捕捉后随灰一起排出。但这种方法中脱硫废水的微小液滴喷入烟气流后，必须在尽量短的时间内完全蒸发，否则未完全蒸发的液滴会对烟道和除尘器产生腐蚀<sup>[9]</sup>。因此，本文针对喷雾蒸发处理技术中的关键问题，即液滴完全蒸发时间进行了研究。首先研究了喷雾蒸发技术中的烟气环境，对液滴在其中的运动以及受热和蒸发过程中的传热传质特性进行了理论分析，并通过建立相应的数学模型，分析了烟气速度和温度、液滴粒径和初速度等对液滴蒸发特性的影响规律。

## 1 实验内容

针对火电厂脱硫废水雾化液滴在锅炉尾部烟道大空间内低温低速烟气中的蒸发过程进行数值研究，烟气和液滴的温度参数都取自某电厂单台300 MW 机组的数据，其中烟气温度为烟道中除尘器前烟气温度433 K，流速10 m/s，脱硫废水温度为废水排放温度323 K。根据 Aggarwal S 等<sup>[9]</sup>的研究结果，在大气环境下单组份替代液滴可以在很宽的范围内模拟两组份液滴的蒸发过程，烟气环境与大气环境非常相近，废水液滴由微米级细小固体颗粒和水组成，废水液滴在受热过程中只有组份水的蒸发，所以用水液滴作为火电厂脱硫废水溶液液滴的替代进行研究。锅炉尾部烟气流速和温度受锅炉燃烧状态等一系列因素的影响，所以文中将烟气速度研究范围扩展为-20 m/s~20 m/s，烟气温度研究范围扩展为393 K~453 K，研究了烟气速度和温度对液滴蒸发特性的影响。表1为温度在393 K~453 K时烟气及323 K时水液滴的具体物性参数。表2为特定温度环境下，不同烟气速度对液滴蒸发特性影响的具体计算工况。

表1 烟气和液滴的物性参数

	温度(K)	比热 J/(kg·K)	导热系 W/(m·K)	密度 kg/m <sup>3</sup>	粘度 kg/(m·s)
烟 气	453	1091.2	3.834×10 <sup>-2</sup>	0.7884	23.68×10 <sup>-6</sup>
	433	1084	3.53×10 <sup>-2</sup>	0.868	22.70×10 <sup>-6</sup>
	413	1079.2	3.482×10 <sup>-2</sup>	0.8692	22.04×10 <sup>-6</sup>
	393	1073.8	3.306×10 <sup>-2</sup>	0.9096	21.22×10 <sup>-6</sup>
液滴	323	4200	0.6	998.2	1.003×10 <sup>-3</sup>

表2 具体计算工况

液滴烟气			
初始速度 (u <sub>0</sub> , m/s)	初始直径 (d <sub>0</sub> , μm)	速度 (u <sub>g</sub> , m/s)	温度 (T <sub>g</sub> , K)
50	50	-20	433
50	50	-10	433
50	50	10	433
50	50	20	433

## 2 结果与讨论

### 2.1 烟气速度对液滴蒸发特性的影响

#### 2.1.1 烟气速度对液滴速度的影响

图1为直径50 μm、速度50 m/s的水液滴在不同烟气速度下液滴速度随时间的变化。从图中可以看出，液滴经历了速度减小的过程，直到衰减为与烟气流速相等。烟气流速越大，液滴初速度对液滴运动速度的影响越小，液滴速度越容易达到烟气速度，液滴达到烟气速度所需时间越短。图中烟气速度为20 m/s时液滴达到烟气速度比烟气速度为10 m/s时所需时间短。因为液滴突然进入有相对速度的烟气环境中时，受到阻力和重力的影响，速度会逐渐减小，并且烟气流速越大，液滴质量越小，液滴受阻力的影响越明显，所以液滴速度越容易达到烟气速度。

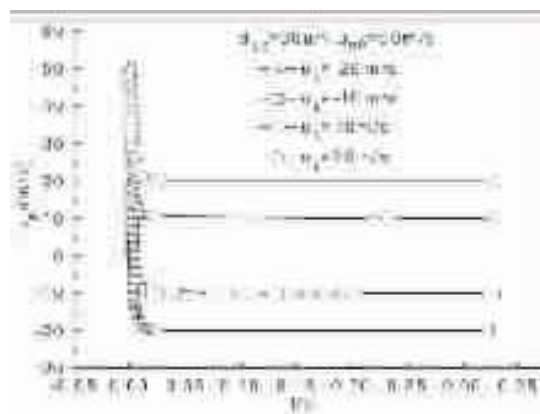


图1 不同烟气速度下液滴速度随时间的变化(T<sub>g</sub>=433K)

#### 2.1.2 烟气速度对液滴平均直径的影响

图2为直径50 μm、速度50 m/s的水液滴在不同烟气速度环境下蒸发过程中液滴平均直径随时间的变化，其中a图是整体图，b图是a图的局部放大。从a图可知，在初始的一段时间内液滴粒径随时间没有发生变化，大约在0.006秒后粒径随时间逐渐减小，直到为零。从a图还可得出，初始直径和速度一定的液滴，烟气速度的改变对液滴完全蒸发时间的影响很小。从b图可知，四种工况下完全蒸发时间的差异在0.025秒范围内，即

液滴初始直径和速度一定的条件下,气液相对初速度对液滴完全蒸发时间的影响很小。因为液滴置于有相对速度的气体环境中时,受阻力影响,速度逐渐减小,在很短的时间内液滴运动速度就达到烟气流速。此时,强制对流减弱,蒸发常数减小,液滴表面的蒸汽压成为传质的蒸汽推动力,决定着蒸发的速率,在相当长时间内控制着液滴蒸发的快慢,所以对于初始直径和速度一定的液滴,烟气速度的改变对液滴完全蒸发时间的影响很小。a 图中线(5)是气液相对速度为 50 m/s 时采用非平衡蒸发方法计算的结果,线(1)~(4)是文中采用平衡蒸发方法计算的结果。由上述的分析可知,气液初

始相对速度对液滴完全蒸发时间的影响很小,所以认为线(5)与线(1)~(4)具有可比性。从图中可以看出,线(5)与线(1)~(4)整体上吻合较好,但是随着液滴直径的逐渐减小,直径随时间的变化趋势存在一定差异,因为非平衡蒸发计算方法认为,液滴直径减小到很小时蒸发速率和蒸汽扩散速度为有限值。文中的平衡蒸发计算方法认为,液滴直径减小到很小时蒸发速率和蒸汽扩散速度为无限值。为了详细了解线(5)与线(1)~(4)数据的差异,采用加权平均方法计算了线(5)与线(1)~(4)数据的定量差异,差异为  $1.27\text{E}-4$ ,说明本文计算结果与计算结果区别较小,可以认为在合理范围之内。

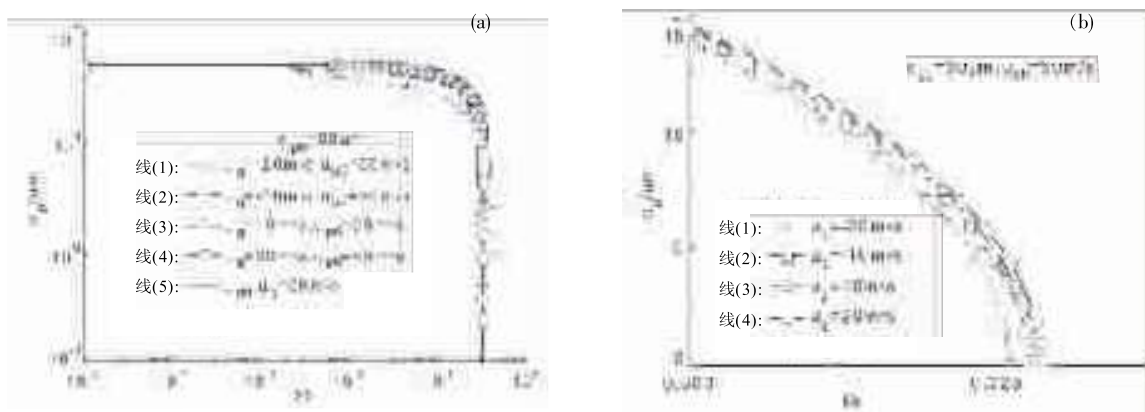


图 2 不同烟气流速下液滴直径随时间的变化( $T_g=433\text{K}$ )

## 2.2 烟气温度对液滴蒸发特性的影响

### 2.2.1 烟气温度对液滴温度的影响

对不同粒径液滴分别在不同温度烟气环境下的蒸发特性进行了研究,因为烟气温度环境的改变对液滴运动速度的影响甚微,所以针对粒径为  $50\ \mu\text{m}$  的液滴,仅详细分析了烟气温度对液滴蒸发过程中液滴平均温度和直径变化的影响,最后分析了烟气温度对不同粒径液滴完全蒸发时间的影响。具体计算工况见表 3。

表 3 具体计算工况

温度(K)	速度(m/s)		初始直径		初始速度
	10	20	50	80	(m/s)
453	10	20	50	80	50
453	10	20	50	80	50
413	10	20	50	80	50
393	10	20	50	80	50

图 3 为直径  $50\ \mu\text{m}$ 、速度  $50\ \text{m/s}$  的水液滴在不同温度烟气环境中液滴平均温度随时间的变化。从图 3 可以看出,液滴进入温度较高的烟气环境中时,运动较短的时间就达到临界蒸发温度,并且蒸发结束的时间也较短。因为烟气与液滴之间

温差越大,烟气对液滴的传热量越强,液滴达到同样的温度越容易,需要的时间越短。图中点 1~4 分别表示液滴在不同温度烟气环境中蒸发过程的结束。

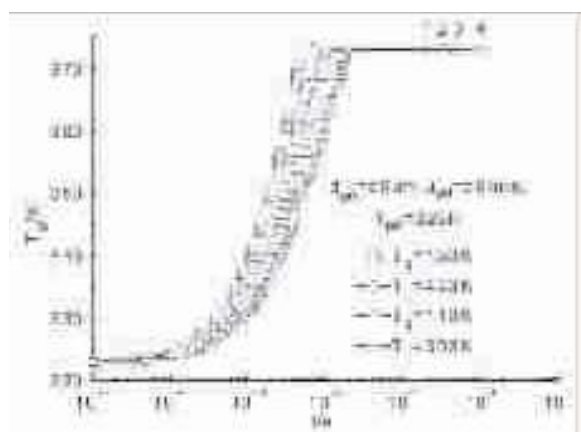


图 3 不同温度烟气中液滴平均温度随时间的变化( $u_r=10\ \text{m/s}$ )

### 2.2.2 烟气温度对液滴平均直径的影响

图 4 为直径  $50\ \mu\text{m}$ 、速度  $50\ \text{m/s}$  的水液滴在不同温度烟气环境下蒸发过程中液滴平均直径随

时间的变化。从图4可知,在不同温度的烟气环境中,液滴直径随时间变化的速率不同,烟气温度越高,液滴直径随时间变化率越大,完全蒸发时间越短。从图4可见,液滴在温度为433 K烟气中的完全蒸发时间大约是温度为453 K烟气中完全蒸发时间的1.5倍。在温度为393 K烟气中液滴完全蒸发时间大约是温度为413 K烟气中液滴完全蒸发时间的两倍。由此可知,烟气从较高温度与从较低温度下降相同幅度时,液滴在其中的完全蒸发时间按不同的倍数在增加。

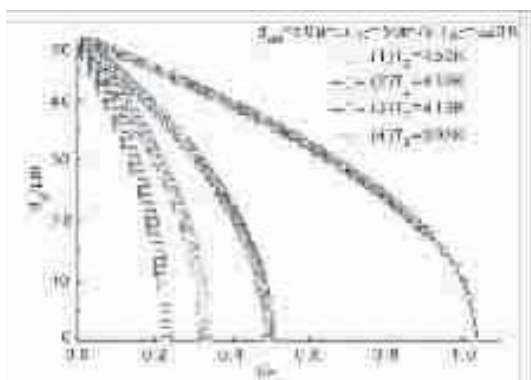


图4 不同温度烟气中液滴平均直径随时间的变化( $u_e=10\text{m/s}$ )

为了更加清楚地了解烟气温度对液滴完全蒸发时间的影响,分别对直径 $20\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 和 $80\ \mu\text{m}$ ,速度 $50\ \text{m/s}$ 的液滴在温度为 $393\ \text{K}$ 、 $413\ \text{K}$ 、 $433\ \text{K}$ 和 $453\ \text{K}$ ,速度 $10\ \text{m/s}$ 烟气环境中的蒸发过程进行了研究,并且以温度 $393\ \text{K}$ 烟气环境中液滴的完全蒸发时间 $t_{p,393\ \text{K}}$ 作为基准,定义 $t_p/t_{p,393\ \text{K}}$ 为无量纲完全蒸发时间,理论计算为式1。图5为液滴无量纲完全蒸发时间随烟气温度的变化。从图5可知,三种直径不同的液滴无量纲完全蒸发时间随烟气温度的变化规律非常相似,都呈指数规律递减。对于研究的液滴,无量纲完全蒸发时间随烟气温度的递减规律为式1:

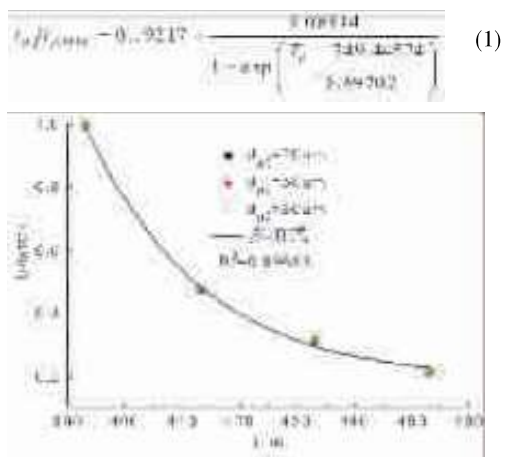


图5 液滴无量纲完全蒸发时间随烟气温度的变化

### 3 结论

文章对喷雾蒸发处理技术中的关键问题,即液滴完全蒸发时间进行了研究。首先针对喷雾蒸发技术中的烟气环境,对液滴在其中的运动以及受热和蒸发过程中的传热传质特性进行了理论分析,并建立了数学模型。然后,分析了烟气速度和温度、液滴粒径和初速度等对液滴蒸发特性的影响,获得了以下结论:

(1) 气相速度越大,液滴初速度对液滴运动速度的影响越小,液滴速度越容易达到气相速度。

(2) 对于初始直径和速度一定的液滴,气液初始相对速度越大,液滴达到临界蒸发温度所需的时间越短,完全蒸发时间也越短。但是,在文中研究的范围内,整体上气相速度的改变对液滴完全蒸发时间的影响很小。因此,调整气液相对初速度对喷雾蒸发处理技术的实现作用不大。

(3) 对于喷雾蒸发处理技术,气相温度环境的改变对液滴达到临界蒸发温度的时间以及完全蒸发时间的影响很大。烟气从较高温度与从较低温度分别下降相同幅度温度时,液滴在烟气中的完全蒸发时间按不同的倍数在增加,烟气温度越低,液滴完全蒸发时间增加的越多。因此,在不影响锅炉效率的情况下适当地提高锅炉尾部烟气温度有利于喷雾蒸发技术的实现。

(4) 对于文中喷雾蒸发处理技术中研究的烟气环境和液滴,液滴无量纲完全蒸发时间随烟气温度的增加呈指数规律递减,具体表现为式1。

### 5 参考文献

- [1] 高原,陈智胜.新型脱硫废水零排放处理方案[J].华电技术,2008,30(4):73-75.
- [2] 袁彬.燃煤电厂脱硫废水零排放处理工艺[J].山东工业技术,2014(17):54-55.
- [3] 刘宁.一种脱硫废水处理装置及烟气处理系统:中国,107381922A[P].2017-11-24.
- [4] 谢飞.一种利用烟气余热实现脱硫废水零排放系统:中国,206580588U[P].2017-10-24.
- [5] 丁继贤,孙凤贤,姜任秋.对流条件下环境压力对液滴蒸发的影响研究[J].哈尔滨工程大学学报,2007,28(10):1104-1108.
- [6] 李达然,高永峰,徐秀萍.烟气处理脱硫废水的HCl产物对锅炉系统的影响[J].能源环境保护,2015,29(3):11-13+44.
- [7] 胡迎明,杨龙滨,赵宇炜.VOF方法数值计算双液滴蒸发与燃烧[C].中国工程热物理学会-燃烧学,2013.
- [8] 马双忧,柴峰,吴文龙,等.脱硫废水烟道喷雾蒸发的数值模拟[J].计算机与应用化学,2016,33(1):81-84.

(下转第9页)