

橡胶废水烟道喷雾蒸发特性研究

孙城¹, 张琳^{1,2*}, 马广权¹, 卜诗^{1,2}, 许伟刚^{1,2}, 柳林^{1,2}

(1. 常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213016; 2. 江苏省绿色过程装备重点实验室, 江苏 常州 213164)

摘要: 针对橡胶废水烟道喷雾蒸发技术, 采用数值模拟方法研究液滴群蒸发特性的影响因素。结果表明: 随着烟气流速的增大, 液滴完全蒸发时间缩短, 蒸发率提高, 液滴完全蒸发距离呈先增大后减小的趋势; 烟气温度越高和烟气水蒸气含量越小, 液滴传质速率越快, 液滴群蒸发特性越好; 随着进料流量的增大, 液滴完全蒸发时间缩短, 液滴完全蒸发距离呈减小趋势, 且有一段变化较平缓; 进料温度对液滴群蒸发特性影响不明显。

关键词: 橡胶废水; 烟道; 雾化蒸发; 蒸发特性; 烟气温度; 烟气流速; 水蒸气含量

中图分类号: TQ330.8/.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2020)05-0388-07

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.05.0388



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

橡胶加工过程中会产生高浓度的有机废水, 其水质复杂, 氯离子浓度大, 杂质种类多, 处理困难。目前常见的橡胶废水处理方法如化学沉淀法、生物脱除法以及化学脱除法都存在工艺复杂、设备占地面积大和运行成本高等问题^[1-2]。烟道脱除技术作为一项投资小、脱除效果好的废水处理技术广泛应用于石化和橡胶等行业。

烟道蒸发技术最早由K. S. Prabhat等^[3]在1990年提出并进行了可行性试验。国内管一明^[4]最早提出烟道蒸发技术, 众多学者对其展开研究, 主要集中在液滴群蒸发特性和技术可行性两个方面。高原等^[5-6]理论计算结果表明, 蒸发前后烟道内温度和湿度的变化不会影响系统的正常运行。张志荣^[7]首次对废水烟道喷雾蒸发技术进行了详细的数值研究, 结果表明: 烟气温度和雾化气液比对液滴群蒸发率的影响较大; 粒径为300~400 μm的液滴更易发生二次破碎, 从而缩短液滴完全蒸发时间。J. J. Deng等^[8]试验研究结果表明: 废水烟道运行期间脱除系统入口烟气温度、循环浆液pH值和脱除效率等无明显变化; 除尘器各电压和电流参数稳定, 无大幅波动, 这进一步说明废水烟道喷雾

处理方法切实可行。马双枕等^[9]采用X射线衍射、电子扫描色谱和离子色谱等方法分析了脱硫废水蒸发结晶产物特性, 结果表明, 脱硫废水蒸发结晶产物主要是硫酸钙、氯化钠和硫酸钠等盐类, 脱硫废水烟道蒸发不影响飞灰的综合利用。周正等^[10]采用数值模拟方法研究了液滴粒径和烟气水蒸气含量对双流体喷嘴中脱硫废水蒸发过程的影响, 结果表明, 液滴粒径越小, 烟气水蒸气含量越小, 喷嘴出口液滴粒径越小, 蒸发效果越好。

国内外学者对烟道脱除橡胶废水的研究尚不充分, 在液滴群蒸发特性方面主要采用数值模拟方法来研究不同操作参数对蒸发效果的影响^[11-13], 且绝大多数研究只是通过液滴轨迹云图对比来表现蒸发效果, 较少定量分析研究, 而关于液滴群完全蒸发距离的研究更是寥寥无几。

本工作主要研究橡胶废水烟道喷雾蒸发操作参数对液滴完全蒸发时间、完全蒸发距离和蒸发率的影响规律, 为烟道喷雾蒸发处理橡胶废水的工程应用提供一定的理论依据。

1 实验

1.1 试验原理

本烟道喷雾蒸发试验台采用相似性原理设计, 为达到试验台模型与烟道原型的流动相似, 二者需几何相似、运动相似和动力相似。其中几何相似指模型与原型对应的几何尺寸成相同比例; 运动相似指模型与原型对应速度(或加速度)方向

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51606014); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(18KJA480002); 江苏省“六大人才高峰”创新人才团队项目(GDZB-CXTD-001); 常州市重点研发计划(社会发展科技支撑)项目(CE20195035)

作者简介: 孙城(1993—), 男, 安徽芜湖人, 常州大学在读硕士研究生, 主要从事过程强化与节能环保装备技术研究。

*通信联系人(z3281315@yeah.net)

一致,大小成相同比例;动力相似指模型与原型对应点上所受的力方向一致,大小成相同比例。

1.2 试验系统

烟道喷雾蒸发试验台包括以下几个部分:热风系统、进料及雾化系统、数据测量和采集系统,试验台结构如图1和2所示。

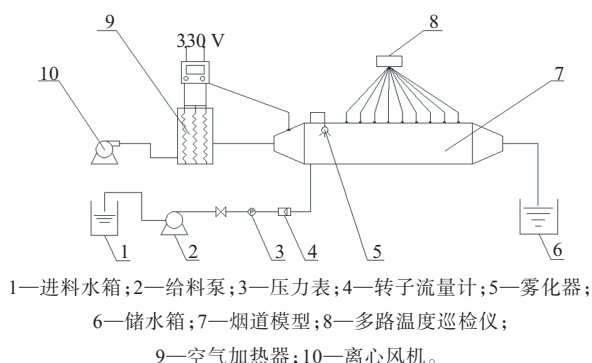


图1 烟道喷雾蒸发试验台结构示意图



图2 烟道喷雾蒸发试验台实物

(1) 热风系统。主要包括离心风机、电容调压器、空气加热器和烟道模型。工作时,离心风机将空气鼓入空气加热器中,开始加热空气,当烟道内温度趋于稳定,且烟道模型进口温度达到指定温度后,开启进料及雾化系统,进行蒸发试验。

(2) 进料及雾化系统。主要包括水箱、给料泵、阀门和雾化喷嘴等。当烟道模型进口温度达到指定温度后,开启给料泵,将一定量的纯水从水箱送到雾化喷嘴中,雾化后的细小液滴在烟道模型中随气流向前运动并发生强烈热交换。进料流量由阀门开度控制(通过转子流量计测得进料流量)。

(3) 数据测量和采集系统。主要包括多路温度巡检仪及K型热电偶、转子流量计、压力表和风速仪等。试验开始前,先使用风速仪测量进口平均风速,多次测量取平均值;转子流量计和压力表分别用于测量进料流量和压力;多路温度巡检仪和K型热电偶能够实时测量烟道模型进出口及中

间段的温度。

1.3 数据处理

蒸发率是衡量喷雾蒸发效果的一个重要指标。本试验将蒸发率定义为蒸发量与喷雾总量的百分比,公式如下:

$$R = \frac{Q - V}{Q} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为蒸发率,%; Q 为喷嘴喷射的流量,L; V 为蒸发后剩余的废水流量,L。

2 数值研究

2.1 控制方程

2.1.1 液滴加热阶段

在液滴加热阶段,由于气液两相没有质量交换,其热平衡方程可以表示如下:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) \quad (2)$$

式中: m_p 为液滴质量,kg; c_p 为液滴比热, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$; T_p 为液滴温度,K; t 为时间,s; h 为对流传热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$; A_p 为液滴表面积, m^2 ; T_∞ 为气相温度,K。

h 通过如下Ranz-Marshall关联式计算得到:

$$Nu = \frac{h d_p}{k_\infty} = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3)$$

式中: Nu 为气相努赛尔数; d_p 为液滴直径,m; k_∞ 为气相导热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$; Re_d 为液滴雷诺数; Pr 为气相普朗特数。

2.1.2 液滴蒸发阶段

液滴从热气流中吸收的热量主要用于液滴的加热和蒸发,气液两相发生传热、传质反应。其热平衡方程如下:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_g \quad (4)$$

式中, h_g 为液滴汽化潜热, $J \cdot kg^{-1}$ 。

2.1.3 液滴沸腾阶段

当液滴温度达到液滴沸点温度(T_b),即 $T_p \geq T_b$ 时,液滴温度保持不变,其沸腾蒸发速率方程为

$$\frac{dd_p}{dt} = \frac{4k_\infty}{\rho_p c_{p,\infty} d_p} (1 + 0.23 \sqrt{Re_d}) \ln \left[1 + \frac{c_{p,\infty} (T_\infty - T_p)}{h_g} \right] \quad (5)$$

式中: ρ_p 为液滴密度, $kg \cdot m^{-3}$; $c_{p,\infty}$ 为气相(定压)比热容, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ 。

2.2 几何模型

选取中间一段长12 m的烟道模型来展开数值研究,平均烟气流速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,温度为423 K,废水流量为 $1.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$,具体结构如图3所示。采用六面体结构化网格划分,对雾化喷嘴附近网格进行加密处理,网格质量在0.95以上,基本满足Fluent的网格质量要求;此外,为了降低网格数量对模拟结果的影响,选取出口平均温度作为考察量,综合考虑计算成本和求解精度,选择100万网格进行求解,具体网格划分如图4所示。

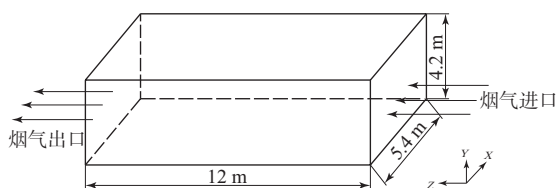


图3 烟道结构模型示意

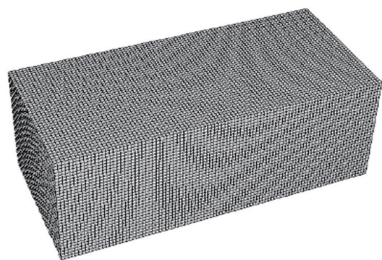


图4 烟道模型网格划分

对于连续相采用速度进口和压力回出口,壁面设置为无滑移绝热壁面。离散相液滴通过雾化器喷射到烟道内,喷射方向与烟气流速方向一致,雾化喷嘴位置在(2.7, 2.1, 2)处。

烟气模拟参数为:流速 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,温度 423 K,水蒸气质量分数 0.05。液滴模拟参数为:进料温度 300 K,进料流量 $0.834 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$;喷射压力 44 MPa,喷嘴孔径 1.68 mm,雾化角度 55° 。

2.3 边界条件

采用离散相模型(DPM)研究脱硫废水液滴喷入烟道的蒸发过程。对于连续相采用标准 $k-\epsilon$ 模型,壁面条件选择标准壁面函数,采用压力与速度耦合的SIMPLE算法、二阶迎风离散方式求解;对于离散相计算,在连续相收敛后,打开离散相模型且考虑相间耦合。

入口设置为速度入口,且方向垂直于进口截

面,速度分布为 $8 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;出口压力为101 kPa;所有壁面设置为无滑移绝热边界,壁面的离散相模型边界条件为捕捉。

2.4 模拟可靠性验证

为了验证数值模型的准确性,建立与试验模型尺寸一致的几何模型,对试验工况进行数值研究,试验与数值模拟结果见图5。

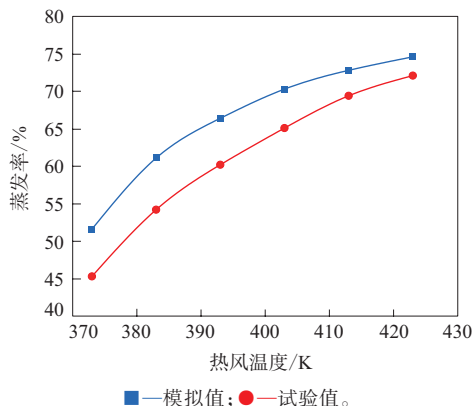


图5 热风温度对蒸发率影响的试验值与模拟值对比

由图5可见:蒸发率随着热风温度的升高而增大,且增大幅度逐渐减小;试验值与模拟值的变化趋势基本一致;在热风温度为373 K时,试验值与模拟值差异较为明显,相对误差为12.2%;热风温度为423 K时,试验值与模拟值比较接近,相对误差为3.4%。这是因为模拟时,DPM模型边界条件设置为捕捉,即液滴运动到壁面上就不再计算;而试验中由于壁面有一定的温度,液滴撞击到壁面上形成液膜还会蒸发一部分,温度越高,液滴蒸发越多,因此随着热风温度的升高,试验值与模拟值更为接近。

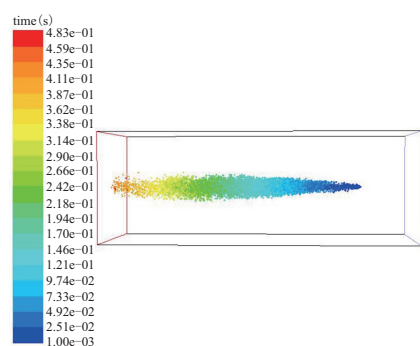
根据试验值与模拟值对比分析,平均相对误差为8.8%,说明本研究的模拟方法具有较高的准确性。

3 结果与讨论

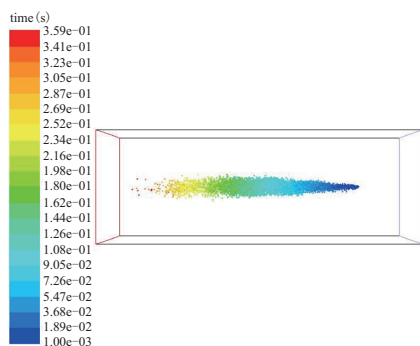
3.1 烟气温度

不同烟气温度下液滴的运行轨迹及蒸发规律如图6和7所示。

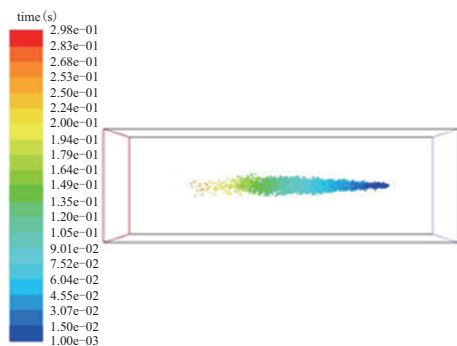
由图6和7可见:烟道喷雾呈实心锥形的射流形态,雾化区域呈中心低、两边高的温度分布趋势;随着烟气温度的升高,液滴完全蒸发时间缩



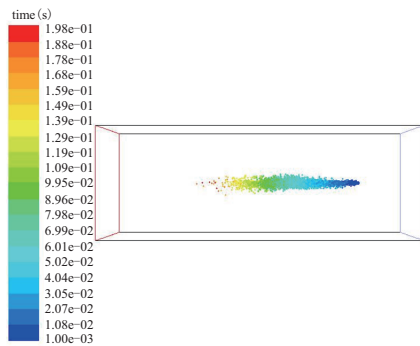
(a) 393 K



(b) 423 K



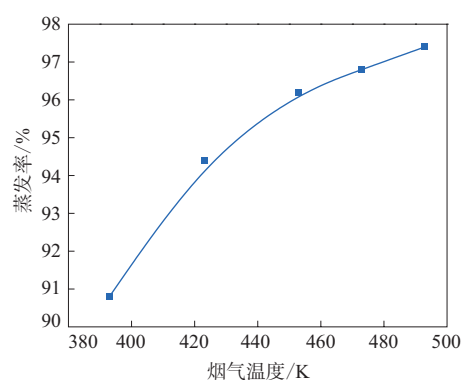
(c) 453 K



(d) 493 K

烟气流速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 烟气水蒸气质量分数为 0.05, 进料流量为 $0.834 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 进料温度为 300 K。

图6 不同烟气温度下液滴运动轨迹



注同图6。

图7 烟气温度对蒸发率的影响

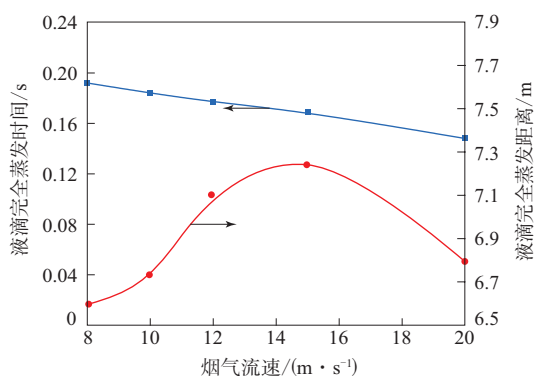
短,液滴完全蒸发距离减小,且减小的幅度逐渐减缓;蒸发率随着烟气温度的升高而增大。这是由于随着烟气温度的升高,气液间温差增大,对数平均温差变大,根据 D^2 定律,液滴蒸发时间与对数平均温差成反比,因此液滴完全蒸发时间缩短;此外,烟气温度的升高,也缩短了液滴达到临界蒸发温度所需要的时间,即随着液滴完全蒸发时间的缩短,在相同的进气流速下,液滴向前运动的距离也随之减小。而烟气温度越高,单位体积内烟气的热能越高,根据能量守恒定律,能够蒸发的水就越多,因此蒸发率越大;但随着蒸发的进行,更多的水被蒸发,使得气液边界层水蒸气分压差减小,一定程度上影响了传质速率,因此蒸发率增长幅度减缓。

此外,烟气温度越高,液滴群Z方向长度越小,即液滴完全蒸发距离越短,这也间接说明液滴最长停留时间缩短。

3.2 烟气流速

烟气流速对液滴完全蒸发时间、液滴完全蒸发距离和蒸发率的影响见图8和9。

由图8和9可知,随着烟气流速的增大,液滴完全蒸发时间缩短,液滴完全蒸发距离呈先增大后减小的趋势,蒸发率增大。这是因为烟气流速的增大增强了气液间的对流强度,不仅加快了液滴传质速率,而且增加了液滴间的碰撞次数,使得液滴更易发生二次破碎,成为更小的液滴,从而缩短了液滴完全蒸发时间,提高了蒸发率。但流速的提高使液滴受到的气流曳力增大,使得液滴随烟气的运动能力增强,因此在某一段时间内液滴向前运动的距离变大。这两方面的因素,致使液



烟气温度为423 K, 烟气水蒸气质量分数为0.05, 进料流量为 $0.834 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 进料温度为300 K。

图8 烟气流速对液滴完全蒸发时间和液滴完全蒸发距离的影响

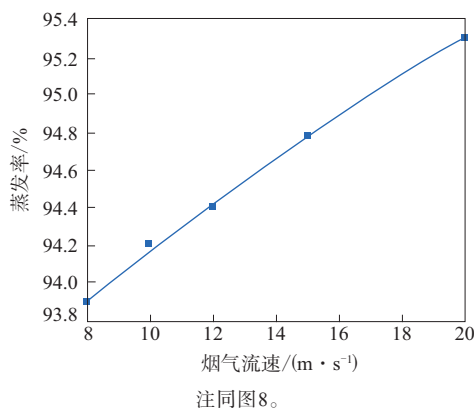
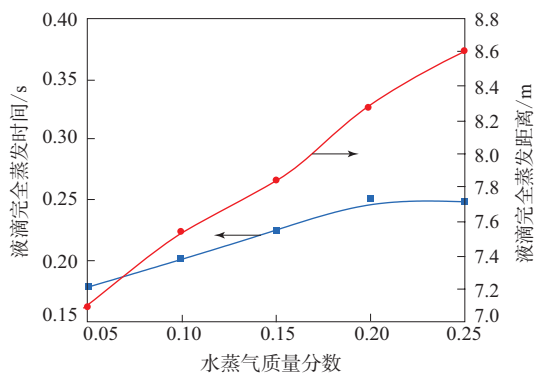


图9 烟气流速对蒸发率的影响

滴完全蒸发距离呈先增大后减小的趋势。

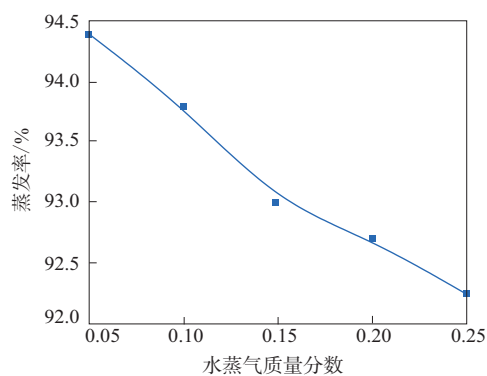
3.3 烟气水蒸气含量

烟气水蒸气含量对液滴完全蒸发时间、液滴完全蒸发距离和蒸发率的影响如图10和11所示。



烟气温度为423 K, 烟气流速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 进料流量为 $0.834 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 进料温度为300 K。

图10 烟气水蒸气含量对液滴完全蒸发时间和液滴完全蒸发距离的影响



注同图10。

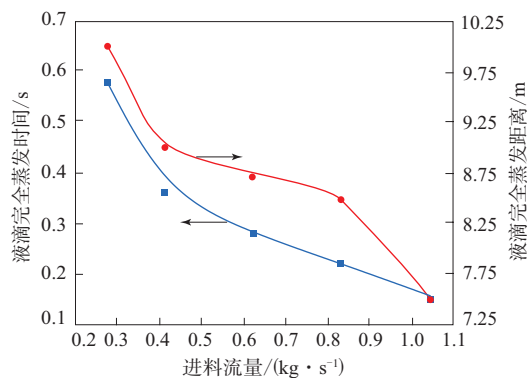
图11 烟气水蒸气含量对蒸发率的影响

从图10和11可以看出: 烟气水蒸气含量对液滴完全蒸发时间和液滴完全蒸发距离的影响规律基本一致, 即随着烟气水蒸气含量的增大, 液滴完全蒸发时间延长, 液滴完全蒸发距离增大, 但液滴完全蒸发时间延长幅度逐渐减缓; 蒸发率随烟气水蒸气含量的增大而减小。根据液滴蒸发过程的理论分析, 气液边界层水蒸气分压压差是质传递的驱动力; 液滴蒸发过程中, 随着烟气水蒸气含量增大, 气液边界层水蒸气分压压差减小, 导致液滴向气相中的扩散速率下降, 传质速率减小, 液滴完全蒸发时间延长, 从而使液滴完全蒸发距离增大, 蒸发率呈下降趋势。

3.4 进料流量

进料流量对液滴完全蒸发时间、液滴完全蒸发距离和蒸发率的影响如图12和13所示。

由图12和13可知: 进料流量对液滴完全蒸发时间和液滴完全蒸发距离的影响规律基本一致,



烟气温度为423 K, 烟气流速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 烟气水蒸气质量分数为0.05, 进料温度为300 K。

图12 进料流量对液滴完全蒸发时间和液滴完全蒸发距离的影响

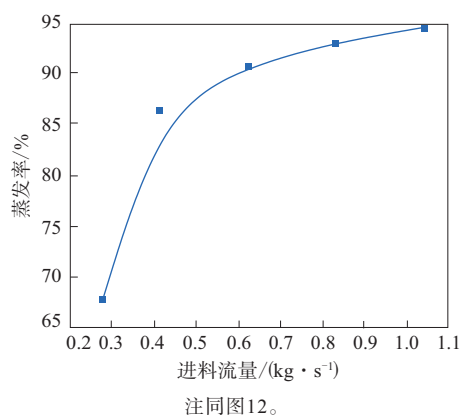


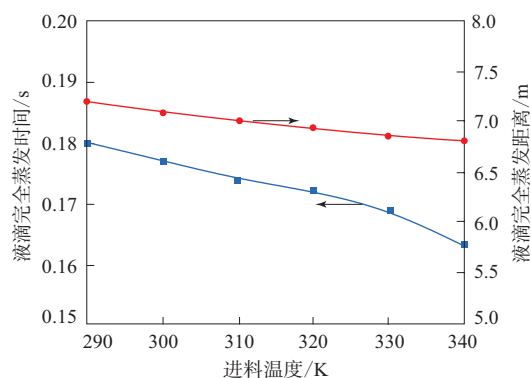
图13 进料流量对蒸发率的影响

即随着进料流量的增大,液滴完全蒸发时间缩短,液滴完全蒸发距离减小;蒸发率随进料流量的增大而增大。这是因为进料流量越大,相对应的喷射压力越大,使得雾化液滴粒径减小,液滴比表面积增大,蒸发速率也就越大,所以液滴完全蒸发时间越短,蒸发率越大;此外,喷射压力越大,相应的喷射速度越大,使得气液边界层的湍动更加剧烈,从而加快液滴传质速率,使得液滴完全蒸发时间缩短。但较大的喷射压力也使液滴初始速度较大,液滴向前运动能力增强。这两方面的因素使得液滴完全蒸发距离有一段较平缓的减小趋势,但在进料流量大于 $0.834 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 之后液滴完全蒸发距离又急剧减小。此外,当液滴粒径小到一定程度就无法进一步破碎,因此蒸发率增长趋势逐渐减缓。

3.5 进料温度

进料温度对液滴完全蒸发时间、液滴完全蒸发距离和蒸发率的影响如图14和15所示。

从图14和15可以看出,随着进料温度的升高,液滴完全蒸发时间缩短,液滴完全蒸发距离减小,蒸发率呈上升趋势,但总体上变化都不大。这是因为进料初始温度越高,液滴升温到临界蒸发温度所需要的时间越短,相应的液滴完全蒸发时间缩短,液滴完全蒸发距离减小。但是根据液滴传热传质理论可知,液滴升温到临界蒸发温度所需时间占液滴总蒸发时间的比例很小,因此进料温度的变化对液滴完全蒸发时间和液滴完全蒸发距离的影响较小。此外,液滴从烟气中吸收的能量主要用于液滴的相变过程,液滴升温阶段所需的能量占很小的比例,蒸发率的变化基本可以忽略



烟气温度为423 K,烟气流速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,烟气水蒸气质量分数为0.05,进料流量为 $0.834 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图14 进料温度对液滴完全蒸发时间和液滴完全蒸发距离的影响

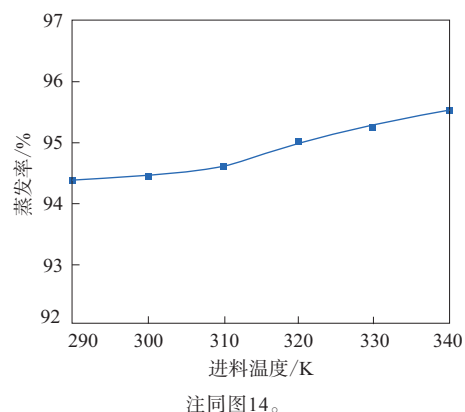


图15 进料温度对蒸发率的影响

不计。因此工程应用上不需要增加额外的设备用于升高进料初始温度。

4 结论

通过对橡胶废水烟道喷雾蒸发特性影响因素的研究,得出如下结论。

(1) 废水烟道喷雾呈实心锥形的射流形态;雾化区域呈中心低、两边高的温度分布趋势,且中心低温区长度随着操作参数的变化而变化。

(2) 烟气流速的提高增大了气液间的对流强度,加快了液滴传质速率,缩短了液滴完全蒸发时间,提高了蒸发率;但烟气流速的提高使得液滴受到的气流曳力增大,液滴向前运动的能力增强,即某段时间液滴完全蒸发距离增大。

(3) 烟气温度越高、烟气水蒸气含量越小,液滴传质速率越快,液滴群蒸发特性越好。

(4) 进料流量越大,喷射压力越大,雾化粒径

越小,液滴蒸发速率越大;同样使得液滴初始速度增大,液滴向前运动能力增强,液滴完全蒸发距离减小。进料温度对液滴群蒸发特性的影响较小。

参考文献:

- [1] 王谦. 浅谈天然橡胶初加工行业废水中总磷的处理方法[J]. 化工管理, 2019(24): 35-36.
- [2] 丁军委, 兰倩. 絮凝法处理橡胶促进剂CBS废水的研究[J]. 现代化工, 2018, 38(12): 168-170, 172.
- [3] Prabhat K S, Alexander Y, Superfin R P, et al. Optimize Design of Zero Discharge Water Management Systems by Integration with Spray Dryer Type FGD System[A]. The International Water Conference 51st Annual Meeting, Pittsburgh, PA: 1990: 22-24.
- [4] 管一明. 燃煤电厂烟气脱硫废水处理[J]. 电力环境保护, 1998, 14(1): 38-44.
- [5] 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.
- [6] 周臣, 谭文轶. 脱硫废水水量计算及烟道处理技术[J]. 热力发电, 2009, 38(3): 85-87.
- [7] 张志荣. 火电厂湿法烟气脱硫废水喷雾蒸发处理方法关键问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [8] Deng J J, Pan L M, Chen D Q. Numerical Simulation and Field Test Study of Desulfurization Wastewater Evaporation Treatment Through Flue Gas[J]. Water Science and Technology, 2014, 70(7): 1285-1291.
- [9] 马双枕, 于静伟, 贾邵广, 等. 燃煤电厂脱硫废水烟道蒸发产物特性[J]. 动力工程学报, 2016, 36(11): 890-894.
- [10] 周正, 吴畏, 郑昕, 等. 喷嘴雾化特性及脱硫废水蒸发数值模拟[J]. 化工进展, 2018, 37(1): 32-38.
- [11] 张天琦. 利用烟道气废热处理脱硫废水的技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [12] 赵子行. 旋转射流破碎雾化机理的实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [13] 林小星. 几种喷嘴的喷射流场模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.

收稿日期: 2020-01-08

Study on Flue Spray Evaporation Characteristics of Rubber Wastewater

SUN Cheng¹, ZHANG Lin^{1,2}, MA Guangquan¹, BU Shi^{1,2}, XU Weigang^{1,2}, LIU Lin^{1,2}

(1. Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment, Changzhou 213164, China)

Abstract: In view of the flue spray evaporation technology of rubber wastewater, the factors influencing the evaporation characteristics of the droplet were studied by numerical simulation methods. The results showed that as the flow rate of flue gas increased, the complete evaporation time of the droplet was shortened, the evaporation rate increased, and the complete evaporation distance of the droplet increased at first and then decreased. The higher the flue gas temperature and the smaller the water vapor content in flue gas, the faster the mass transfer rate of droplet was, and the better the evaporation of the droplet was. With the increase of the feed flow, the complete evaporation time of the droplet was shortened, and the complete evaporation distance of the droplet decreased, which would have small change under certain feed flow range. The feed temperature had little effect on the evaporation characteristics of the droplet.

Key words: rubber wastewater; flue; atomization evaporation; evaporation characteristics; flue gas temperature; flue gas flow rate; water vapor content

一种液体硅胶橡胶配方及其制备方法 由苏州市亚博冷热缩制品有限公司申请的专利(公布号 CN 110283460A, 公布日期 2019-09-27)“一种液体硅胶橡胶配方及其制备方法”, 涉及的液体硅胶橡胶配方为: 低聚硅氧烷 45~75, 聚甲基含氢硅氧烷 1~10, 白炭黑 20~50, 链增长剂 0.1~5, 抗粘剂 1~15, 硫化剂 2~10。该液体

硅胶橡胶流动性较好; 添加链增长剂可以使反应随着温度的升高而加快, 添加抗粘剂可以防止溶液稠度过大而粘在装置内部; 通过往复驱动机构工作带动搅拌杆转动, 使搅拌杆带动搅拌清洁组件对溶液进行搅拌的同时对装置内壁进行清理, 溶液反应彻底, 生产效率高。

(本刊编辑部 赵 敏)