

过热蒸汽袋式除尘器阻力特性研究

余博¹, 张继孝¹, 陈海焱², 颜翠平²

(1. 中国神华能源股份有限公司国华惠州热电分公司, 广东 惠州 516000;

2. 西南科技大学固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要: 过热蒸汽与高温、高湿烟气具有相似的特性, 针对高温、高湿烟气袋除尘困难的问题, 设计开发了过热蒸汽袋式除尘器, 并试验分析了气体参数对其阻力的影响。结果表明, 过热蒸汽袋式除尘器运行状况良好, 除尘器阻力随进口气体温度的升高及蒸汽通入时间的延长呈“鱼钩曲线”变化; 而蒸汽过热度增加, 除尘器阻力减小。

关键词: 过热蒸汽袋式除尘器; 高温、高湿烟气; 蒸汽过热度

中图分类号: TQ028.26

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2009)11-0078-04

Study on resistance characteristics of superheated steam bag filter

YU Bo¹, ZHANG Ji-xiao¹, CHEN Hai-yan², YAN Cui-ping²

(1. Guohua Huizhou Cogeneration Branch, China Shenhua Energy Co., Ltd., Huizhou 516000, China;

2. Key Laboratory of Solid Waste Management and Resource of the Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Superheated steam has the same characteristics with the high-temperature and dense-moisture smoke. A superheated steam bag filter is designed according to the difficulty to collect high-temperature and dense-moisture smoke with bag filter, and the influences of the gas parameters on the pressure drop are analyzed by experiments. The results indicate that the superheated steam bag filter's operation goes smoothly. Furthermore, the pressure drop of the filter changes as "fishhook curve" with the increase of the gas temperature at its entry and the time for the superheated steam to pass through; but the pressure drop declines with the increase of the overheat degree of the steam.

Key words: superheated steam bag filter; high-temperature and dense-moisture smoke; steam overheat degree

烘干机、炼钢炉、炼焦炉等装置所排的烟气通常具有高温、高湿、高露点等特点, 黏附性强, 极易造成袋式除尘器失效, 难以达标排放。因此, 在环保要求日益严格的今天, 开发针对高温、高湿烟气的高效袋除尘技术是保证现代化工企业环境友好的关键。

减少或排除袋除尘系统的结露是高温、高湿烟气有效除尘的核心。目前, 抗结露措施主要从高温、高湿烟气的降温减湿、设备保温隔热、反吹气源处理、除尘器本体优化等几方面进行研究, 取得了一定进展, 但市场上常用的抗高温、高湿除尘器主要是针对水泥行业设计的, 对其他烟气没有普遍适用性, 同时缺乏气体工况参数对袋式除尘器性能的影响及其机理的研究。

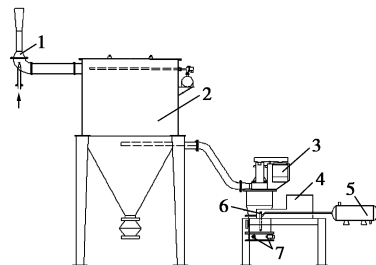
以电厂过热蒸汽为工质的超微粉碎、分级系统的研究正日益得到重视和应用, 其采用的收集装置即为过热蒸汽袋式除尘器, 由于过热蒸汽极具高温、高湿烟气的特点, 有较强的代表性, 笔者提出一种专门针对过热蒸汽的袋式除尘技术, 并通过通过对过热蒸

汽袋式除尘器的设计及试验研究, 以期在高温、高湿烟气的袋式收集提供参考。

1 试验部分

1.1 试验系统

试验系统主要由预热空气系统、蒸汽喷射诱导系统、粉碎分级系统和过热蒸汽袋除尘系统组成, 示意图如图1所示。



1—蒸汽喷射泵; 2—过热蒸汽袋式收尘器; 3—过热蒸汽气流粉碎分级机; 4—密封加料装置; 5—蒸汽-空气换热器; 6—通风加料管; 7—蒸汽超音速喷管

图1 过热蒸汽气流粉碎分级系统

收稿日期: 2009-06-01

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(08ZS1101); “十一五”国家支撑计划重大项目(2006BAF02A24)

作者简介: 余博(1982-), 男, 硕士, 研究方向为电力环境保护; 张继孝(1965-), 男, 大学, 工程师, 0752-5586331, lingyi2001@163.com。

1.1.1 预热空气系统

常温空气经蒸汽-空气列管式换热器加热后,在负压作用下进入试验系统,对各设备进行试验前的冲刷预热以及停车后的蒸汽置换,以减少蒸汽冷凝,同时在试验过程中混入部分高温空气也可降低蒸汽露点温度。空气温度由进入换热器的蒸汽流量阀门开度控制。

1.1.2 蒸汽喷射诱导系统

整个试验装置的负压由蒸汽喷射泵提供,通过调整蒸汽流量及喷嘴与喉部的距离来改变负压。

1.1.3 粉碎分级系统

粉碎分级系统由过热蒸汽粉碎分级机、密封加料装置组成。调好参数的过热蒸汽进入粉碎室,通过超音速喷嘴膨胀加速后喷出,同时物料由密封加料装置经通风加料管送入粉碎室,物料在喷嘴喷汇处冲击粉碎,合格粉体在负压气流带动下通过顶部设置的涡轮分级机由袋式除尘器收集。粉体粒度由加料量、蒸汽参数、分级机转速等控制。

1.1.4 过热蒸汽袋除尘系统

除尘器筒体直径 1 460 mm,高度 3 350 mm,玻纤滤袋,设计过滤风速 0.25 m/min。在除尘器入口处设置可调式导流装置,以保证良好的气流组织,即避免蒸汽在除尘器内因存在涡流而滞留冷凝,以及保证较佳的粉尘沉降规律。本研究中,通过计算机仿真模拟论证,采用石棉保温、电加热及特殊设计的旋切流加热装置,可极大提高过热蒸汽袋除尘器的抗结露能力;由于该装置脉冲喷吹流量所占比例较小,故未设压缩空气加热装置;另外在除尘器花孔板上均布置有温度和压力测量点。

1.2 试验过程

试验是在滤袋已有 $d_{50} = 5.238 \mu\text{m}$ 的超细粉煤

(上接第 77 页)

(4)在实际工艺运行中,不能仅考虑单个因素对工艺的影响,而应在管网输气系统的安全平稳运行,确保下游天然气用户的供气安全条件下,优化 BOG 再冷凝工艺的运行。

参考文献

- [1] 陈雪,马国光,付志林,等.我国 LNG 接收终端的现状与发展新动向[J].煤气与热力,2007,27(8):63-66.
- [2] 刘浩,金国强.LNG 接收站 BOG 气体处理工艺[J].化工设计,2006,16(1):13-16.
- [3] 顾安忠,鲁雪生,汪荣顺,等.液化天然气技术[M].北京:机械工业出版社,2004.

灰初层,且不进行压缩空气脉冲喷吹的情况下进行的,以维持较为恒定的滤袋阻力。试验过程如下:

(1)启动蒸汽喷射泵,调整蒸汽阀门开度,调至设定负压值。启动蒸汽-空气换热器,制备高温空气进行系统内部的冲刷预热,并开启涡轮分级机,加强气流扰动,缩短预热时间。不断改变除尘器入口高温空气温度,观察除尘器进出口压差变化。

(2)观察步骤(1)中系统各过程,稳定后开启电加热器及旋切流加热装置进行除尘器外部加热,并在线监测除尘器上下箱体温度,当除尘器内部各处均高于蒸汽露点温度时,开启超音速喷嘴进口蒸汽阀门,将蒸汽参数稳定在设定值一段时间,观察除尘器阻力变化。

(3)接着调整并维持蒸汽压力不变,不断改变蒸汽温度,但必须保证蒸汽参数在 0.5 MPa(表压),260℃以上,随时记录除尘器阻力、预热空气温度与流量、除尘器进出口温度等。停机时先关闭超音速喷嘴前蒸汽阀,用换热器预热的高温空气置换系统内残留的过热蒸汽 20 min,然后再关闭预热空气系统及蒸汽喷射泵,试验结束。

1.3 试验条件

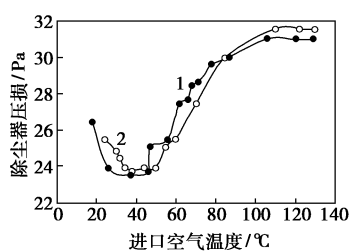
通过减压阀调整蒸汽压力,水冷器调整蒸汽温度;采用变频器控制涡轮分级机;用毕托管和 U 型压力计测量压力损失,热线风速仪测量气流流速,热电偶及水银温度计测定温度。

2 试验结果与讨论

2.1 空气温度对过热蒸汽袋式除尘器阻力的影响

在未通入蒸汽的情况下,仅改变进入袋式除尘器的预热空气温度,测定过热蒸汽袋式除尘器阻力随空气温度的变化,结果见图 2。

- [4] 曹文胜,鲁雪生,顾安忠,等.液化天然气接收站终端及其相关技术[J].天然气工业,2006,26(1):112-115.
- [5] Chicago Bridge & Iron Company. System and apparatus for condensing boil-vapor from a liquified natural gas container: US, 6470706 [P]. 2002-10-29.
- [6] Granger D. Natural gas vapor reconderer system: US, 6745576 [P]. 2004-06-08.
- [7] 李志军.液化天然气接收站的工艺系统[J].中国海上油气(工程),2002,14(6):8-9.
- [8] Chu Yan-qun, Chen Wen-l, Niu Jun-feng. The applied techniques in LNG receiving terminals[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(1):120-122.
- [9] Osaka Gas Co Ltd. Boil-off gas reliquefaction method for reliquefying natural gas, involves mixing boil-off gas with part of liquefied gas at same pressure and performing heat exchange between mixture and remaining liquefied gas: JP, 2000146430-A [P]. 2000-05-26. ■



注:图中曲线 1、2 代表 2 次重复实验结果

图 2 过热蒸汽除尘器压损随温度变化

由图 2 可以看出,除尘器阻力随热空气温度的提高而呈现“鱼钩曲线”,除尘器阻力先呈小幅下降后又急剧上升直至平缓,热空气温度从 19℃ 增至 40℃ 时,过热蒸汽除尘器阻力从 26.7 Pa 降至 23.2 Pa;热空气温度从 40℃ 增至 105℃,过热蒸汽除尘器阻力从 23.5 Pa 增至 30.8 Pa;随后阻力随温度变化减缓。

除尘器阻力随热空气温度升高而小幅下降,原因是滤袋初通入热空气时,使得滤袋初层的超细粉煤灰变得松散,黏附力下降引起阻力减小。阻力随后迅速上升,是由于气体温度引起的过滤性能的变化。在袋除尘系统中,除尘器的性能受多种因素的影响,运行中的滤袋阻力损失 ΔP 可表示为^[1]:

$$\Delta P = (\xi_f + \xi_d)\mu_f U_s = (\xi_f + WR)\mu_f U_s \quad (1)$$

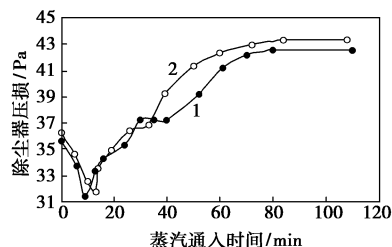
式中: ξ_f 为滤布的阻力系数(m^{-1}); ξ_d 为粉尘的阻力系数(m^{-1}); μ_f 为气体黏度($kg \cdot s/m^2$); R 为粉尘层平均阻力系数(m/kg); W 为单位面积织物上的粉尘质量(kg/m^2); U_s 为平均过滤风速(m/s)。

ξ_f 和 ξ_d 分别反映了滤料材质和粉尘性质等因素,不同的物质具有不同的阻力特性。从气体参数的角度看,最重要的因素是气体黏度。由于气体的黏性切应力主要来自流层之间分子的动量交换,因此温度升高时气体分子运动加剧,黏性增加。显然,对于空气,温度升高,气体黏度 ξ_f 增大。所以当滤袋初层膨胀到一定程度后,气体黏度因素开始起主导作用,除尘器阻力 ΔP 迅速增加。而当空气温度升到一定值后,黏度因素影响减小,除尘器阻力增加趋缓。因此用于冲刷预热系统及降低蒸汽露点用的高温空气温度不应过高,以免引起除尘器阻力增加。

2.2 蒸汽过滤时间对过热蒸汽袋式除尘器阻力的影响

保持 2.1 小节的试验条件,待除尘器内各温度达到 98℃ 以上后,开启喷嘴进口蒸汽并调至 0.5 MPa,310℃ 不变,保证进入过热蒸汽袋式除尘器内的为干蒸汽,测定除尘器阻力随蒸汽过滤时间的变

化,结果如图 3 所示。由图 3 可见,图 3 和图 2 具有相似的“鱼钩曲线”,除尘器阻力随过热蒸汽过滤时间的延长先降低后升高至平缓。



注:图中 1、2 代表 2 次重复实验结果

图 3 过热蒸汽除尘器压损随蒸汽过滤时间变化

随着蒸汽过滤时间的增加,滤料特性、初层的粉煤灰性质、除尘器内相对湿度等变化各异。除尘器阻力先小幅下降,是因为在热空气未停的状态下开启蒸汽,是高温空气几倍的大流量气体突然冲刷滤袋,使得滤袋初层遭到破坏,部分粉煤灰脱落或变得松散引起;随着通入时间的延长,过滤风速增加所造成的阻力上升的因素凸显,同时除尘器内相对湿度增加,粉煤灰初层吸附的水蒸气增多,导致粉尘间液桥力增加,粘附性增强;另外高温蒸汽渐渐将除尘器内的热空气置换完,滤袋及除尘器内腔温度升高,而温度的升高也使得动力黏度增加,除尘器阻力上升;当液桥力及气体黏度增加到一定程度后,除尘器阻力就趋于平缓。可见,过滤时间对过热蒸汽袋式除尘器的过滤性能影响不大,除尘器在恒定参数下可长时间稳定运行。

2.3 蒸汽过热度对过热蒸汽袋式除尘器阻力的影响

2.3.1 湿蒸汽的产生

过热蒸汽在 Laval 喷嘴中的流动过程很快,可以认为与外界没有热量交换,近似地看作是绝热膨胀过程。其动能的增加是由蒸汽在膨胀过程中的焓降转换的,即是一个压力能转化为动能的过程,对于微元绝热流动过程,可用式(2)表示:

$$d \cdot c^2/2 = - dh \quad (2)$$

式中 c 为蒸汽流速(m/s); h 为蒸汽焓值(kJ/kg)。

Laval 喷管中过热蒸汽膨胀时,气态分子一方面随主流蒸汽沿压力下降的方向高速运动,另一方面不停地在蒸汽容积内作 Brownian 运动。当膨胀线越过焓熵图中的饱和线,由于蒸汽膨胀时间很短,蒸汽不会立刻发生冷凝,只形成过饱和或过冷状态。随着膨胀继续进行,蒸汽过冷增加到威尔逊点时,凝结核数目迅速增多,且水滴不断变大,出现自发冷凝。

较小的水滴随蒸汽流喷出;一部分较大的水珠在喷管壁上凝结成水膜,这种水膜被高速运动着的蒸汽撕破而由出口边脱落下来,又继续被蒸汽冲击成质量相当大的水滴,但这些水滴并不具有气流中的完全蒸汽速度。

2.3.2 蒸汽过热度的影响

过热蒸汽袋式除尘器内水蒸气分压力的大小决定着液体桥的附着力,蒸汽在喷嘴中过度膨胀产生的小水滴也会增大液桥力,从而使物料发生凝聚,甚至产生糊袋现象。

在预热空气流量及进口蒸汽压力不变时,不断调整 Laval 喷嘴进口蒸汽温度(过热度),即相应地改变了进入除尘器的蒸汽过热度。图 4 所示为喷嘴进口不同蒸汽过热度下袋式除尘器的阻力变化。由图 4 可见,在蒸汽压力一定时,随着喷嘴进口蒸汽过热度的增大,除尘器阻力相应减小。原因是喷嘴进口蒸汽过热度越低,膨胀产生的蒸汽湿度越大,由于蒸汽压的不同和粉体表面不饱和力场的作用,湿蒸汽凝结或吸附在滤袋初层的超细粉煤灰表面,形成水化膜,当颗粒表面的水分多到粒子接触处形成透镜状或环状的液相时,开始产生液桥力,湿度越大,水化膜越厚,颗粒间的粘结力越强,从而加速了颗粒的团聚,粉尘相互粘结在滤袋上,形成覆盖膜,造成除尘器通流面积减小,过滤风速增加,阻力因此相应提高。当蒸汽过热度很高时,喷嘴出口蒸汽湿度较小,此时粉尘间起主导作用的为范德华力,基本上不存在液桥力,因此阻力减小。但考虑到能耗问题,过热度不可无限提高,应限制在一定范围内。

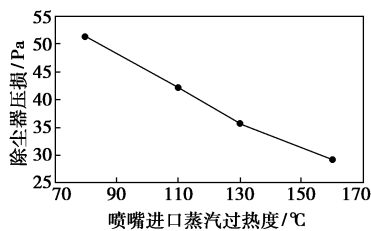
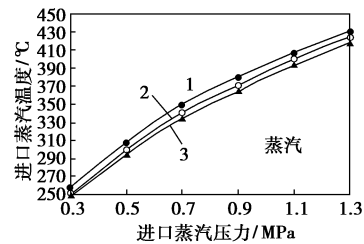


图4 过热蒸汽除尘器压损随蒸汽过热度的变化

由以上分析可知,为保证袋式除尘器阻力不至过高,首先要避免过热蒸汽通过 Laval 喷嘴后由于膨胀降温而冷凝,保证喷嘴出口温度 t_2 必须大于与粉碎室中的工质背压 p_b 相对应的蒸汽饱和温度 t_s ,即出口蒸汽仍然保持干燥状态。

要保证喷嘴出口蒸汽为干蒸汽,进口蒸汽必须达到一定的温度(过热度),同时喷嘴背压 P_b 也起到一定的影响作用。图 5 为不同背压时,在保证喷

嘴出口蒸汽干度 $x = 1$ 情况下所要求的进口蒸汽最低温度 t_1 。可见,随着蒸汽压力 p_1 的提高,所要求的蒸汽温度升高;背压提高,要求的蒸汽温度有所降低。 p_1 从 0.3 MPa 增至 1.3 MPa,最低蒸汽温度从 250℃ 左右增至 430℃ 左右,增加了 1.72 倍;而在相同蒸汽压力下,背压从 -10 kPa 增至 0 kPa,增幅达到 10 倍,蒸汽温度却变化甚微。



喷嘴背压/kPa: 1—10; 2—-5; 3—0

图5 不同压力下喷嘴进口蒸汽最低温度
(出口蒸汽干度为 1)

蒸汽进口压力的提高或出口背压的降低引起喷嘴前后膨胀比的增大,使得蒸汽焓降增大,出口速度增加,因此在保证出口蒸汽干度的情况下,必须提高进口蒸汽温度。但蒸汽温度要求过高,能耗迅速增大,所以在压力 p_1 增加,喷嘴出口速度达到理想值时,不必一味地提高蒸汽温度,只要除尘器阻力不是很大,可以允许喷嘴出口蒸汽有一定的湿度。另外,降低背压可使喷嘴出口蒸汽速度迅速增加,但对最低进口蒸汽温度却影响较小,因此可采取适当降低背压的方式增大气流速度,但不恰当背压会产生激波现象,降低粉碎效率,同时过低的背压也会引起引风机能耗增大。

因此,在其他操作参数不变的情况下,要获得理想的除尘器阻力和能耗值,必须寻找一个最佳的蒸汽压力和温度。

3 结语

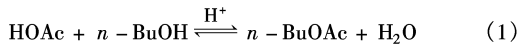
(1) 过热蒸汽袋式除尘器的设计,必须保证有良好的气流组织及有效的抗结露措施,以减少蒸汽滞留冷凝,尤其对于灰斗部位;必要时需对脉冲气源进行加热,同时加强系统的密封性与操作规范性。

(2) 过热蒸汽袋式除尘器可在过热蒸汽状态下长期稳定运行,阻力随空气温度的升高、蒸汽通入时间的延长均呈现“鱼钩曲线”;但预热空气温度不宜过高,以免引起阻力增加,甚至烫伤滤袋。

(下转第 83 页)

体系中存在6个二元共沸物和2个三元共沸物。既有均相共沸物,也有非均相共沸物,是复杂的非理想体系。因此,选择NRTL模型来计算各个物系,用强非理想状态来描述体系中液相的性质。

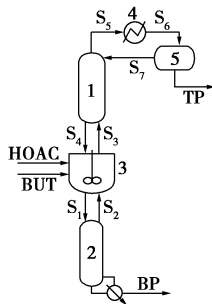
醋酸与正丁醇在酸性催化剂催化下生成醋酸丁酯和水的反应方程式见式(1):



考虑到使用硫酸作催化剂会腐蚀设备,也给分离带来困难,选用固体催化剂Amberlyst-15来催化酯化反应。采用Steinigeweg研究的Amberlyst-15催化醋酸与正丁醇酯化反应的动力学方程^[9]。

1.2 模拟流程的建立

由表1可知,产物与反应物的沸点顺序关系:水 < 正丁醇 < 醋酸 < 醋酸丁酯。根据Yi等^[10]研究一系列的反应,与制备醋酸丁酯符合的是体系M3,流程由精馏塔、反应器和提馏塔组成。但Yi等研究的是理想物系,结构相对简单。醋酸丁酯体系存在非均相共沸物,添加1个倾析器,流程如图1所示。



1—精馏塔(RC);2—提馏塔(SC);3—全混流反应器(CSTR);
4—换热器(HE);5—倾析器(DE)

图1 反应器/塔耦合体系制备醋酸丁酯的流程

整个流程由全混流反应器、精馏塔和提馏塔(2个塔都采用RadFrac模型)、换热器和倾析器组成。从反应器出来的气相,不断将反应产物移出体系,促进正反应的进行。醋酸丁酯作为产品从提馏塔塔底采出。精馏塔塔顶蒸汽进入换热器冷凝后,在倾析器分层后有机相回流,体系产生的水排出。

2 结果与讨论

2.1 反应器/塔耦合体系制备醋酸丁酯模型优化

醋酸和正丁醇采用25℃常压进料,进料摩尔比

(上接第81页)

(3)过热蒸汽的过热度增加,除尘器阻力减小,但过热度过大则能耗剧增,只要除尘器阻力不是很大,可以适当降低蒸汽过热度;蒸汽压力越大、背

选择 $n(\text{HOAc}) : n(n - \text{BuOH}) = 1 : 1$ ^[11]。为了实现分层又不浪费能量换热器和倾析器温度都设定为80℃^[2]。在此条件下,对反应器/塔耦合体系进行优化^[12],优化后的参数及结果如表2所示。

表2 优化后的参数和结果

RC 塔板数	CSTR 温度/ ℃	SC 塔板数	RC的 回流比	BP中 n-BuOAc 摩尔分数	TP中 H ₂ O 摩尔分数	HOAc的 转化率
35	104	11	0.610	1.000	0.974	0.987

优化体系中精馏塔和提馏塔温度和组成分布见图2(精馏塔和提馏塔塔板编号自上而下)。

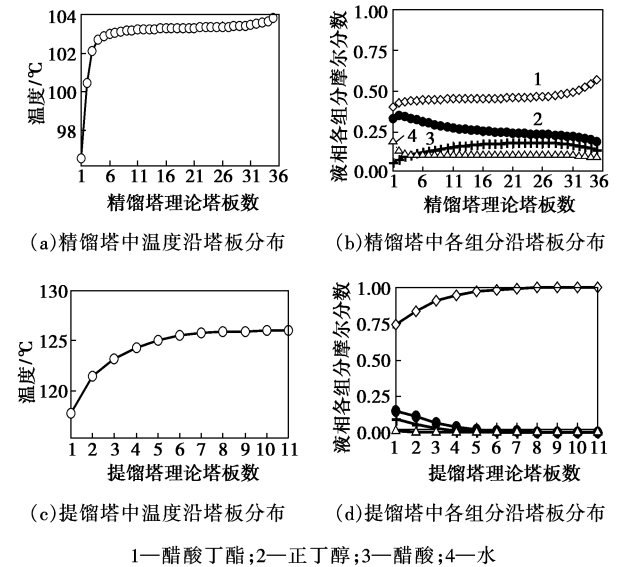


图2 优化体系中精馏塔和提馏塔的温度组成图

反应器/塔耦合体系制备醋酸丁酯与理想物系精馏比较,相同的是在提馏塔中随塔板数增大,重组分浓度越来越大,轻组分浓度越来越小。与理想物系的精馏不同,精馏塔中重组分的组成变化不大。这是因为重组分醋酸丁酯形成低沸点的共沸物作为轻组分被蒸出,冷凝后在倾析器中分层,又回流到精馏塔中,而在理想物系的精馏过程中回流液主要是轻组分。精馏塔和提馏塔的温度分布与理想物系的精馏过程变化趋势一致。

2.2 反应器/塔耦合体系用于回收醋酸的研究

采用醋酸与正丁醇反应生成醋酸丁酯的方法来回收工业废水中的醋酸,既不浪费资源,又可以减少

压越低,要求的蒸汽初温度越高,但背压的影响相对较小,适当降低背压可提高粉碎效果,降低除尘器阻力。

(4)过热蒸汽袋除尘技术的研究对热动系统中高温、高湿尾气的达标处理具有重大意义。■