

工业废水焚烧处理工艺综述

肖双全¹, 马吉亮², 李晓军¹, 陈晓平²

(1. 大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆 163453; 2. 东南大学热能工程研究所, 江苏南京 210096)

[摘要] 笔者讨论了焚烧法处理工业废水的机理以及废水焚烧效果的影响因素。介绍了国内外主要的废水焚烧炉型, 并分析了各种焚烧炉的特点。介绍了废水焚烧工艺在国内外的应用情况。并指出优化焚烧炉的操作参数, 从而达到较高的焚烧效率又保证较低的污染物排放浓度是研究废水焚烧工艺的发展方向。

[关键词] 工业废水; 焚烧炉; 焚烧处理工艺

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2012)06-0016-04

Review of the incineration process for the treatment of industrial wastewater

Xiao Shuangquan¹, Ma Jiliang², Li Xiaojun¹, Chen Xiaoping²

(1. Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing 163453, China;

2. Thermal Energy Engineering Research Institute, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The mechanism of incineration process for the treatment of industrial wastewater, as well as the factors influencing the incineration efficiency, is discussed. Main kinds of incinerators for treating wastewater in China and abroad are introduced, and the characters of incinerators are analyzed. The operation parameters of optimal incinerators are put forward. It is pointed out that achieving higher incinerating efficiency and lower pollutant emission concentration is the development direction of the research on wastewater incineration process.

Key words: industrial wastewater; incinerator; incineration treatment process

近年来,我国石油化工、冶金等行业发展迅速。但在创造巨大经济效益的同时,这些行业每年也向环境排放了数亿吨的有机废水。这些废水不仅有有机物浓度高,有些还含有有毒有害物质。若直接将废水排入水体中,会对水体的生态环境和下游居民的生活带来极大的危害。据统计,造纸、食品等行业,近五年来每年从废液中直接排入水体的平均 COD 高达 1364 万 t^[1-5]。因此,对高浓度有机废水的处理方法进行研究应用具有非常现实的意义。

1 中国废水污染现状

我国废水的排放总量在近五年中呈上升趋势。其中,工业废水是我国水环境污染的主要污染源。我国每年排放的工业废水约占废水排放总量的 50% 左右。

由于工艺及原料的原因,传统的生化工艺如活性污泥法、活性炭吸附法等在处理某些富含难降解污染物的废水如油页岩干馏废水时,处理效率无法达到要求。和上述方法相比,焚烧技术作为一种简单、高效而又不受水温、水质等因素影响的废水处理方

法^[6],更适合处理挥发性高且难降解的工业废水^[7]。

2 废水焚烧的技术特点

废水焚烧是指在焚烧炉的燃烧室内,通过可控高温化学反应,破坏废水中各种有害物质的分子结构,把废水氧化成 CO₂ 和 H₂O 等无害物质的技术^[8]。废水焚烧过程可分为蒸发、气化、氧化 3 个阶段。

废水中的水分在高温环境中首先蒸发出来,可燃组分呈雾状细滴。而后,有机物气化,高分子有机物可能会裂解为低分子化合物(反应温度约为 700~800 ℃)。最后,气态有机物与炉内的氧气发生氧化反应,生成 CO₂ 和 H₂O,并随烟气排出炉外^[9]。

废水燃烧的主要特点如下:(1)燃烧速度与液滴粒径的二次方成反比。液体雾化越细,燃烧速度越快,燃烧越完全^[9]。(2)高于 900 ℃时,废水的氧化反应速度快,燃尽效果好,而当温度低于 850 ℃时,氧化反应速度减弱,限制了燃尽效果,此时要求废水的雾化效果较好,从而提高蒸发效率,改善燃尽效果^[10];雾化效果主要取决于雾化液滴中大颗粒范围内的粒径分布^[11]。(3)废水中常含有一些盐类或二次污染的

[基金项目] 国家科技重大专项(2008ZX05055)

前驱物质,因此在焚烧处理时,还需要进行必要的预处理和后处理^[9]。(4)决定焚烧效率的关键要素是“3T+1E”原则。“3T+1E”是指温度(temperature)、时间(time)、扰动(turbulence)和空气过剩系数(excess air ratio)。“3T+1E”原则能确保危险废水中的有害成分充分分解,有效控制烟气排放造成的二次污染^[12]。

废水焚烧的工艺流程根据废水的性质有所不同。高热值的有机废水(热值 $>6\text{ kJ/g}$ ^[11])可以直接通入焚烧炉并依靠自身热量维持燃烧;对于低热值废水,则需要向炉内添加辅助燃料帮助焚烧;处理低热值高含水率的废水时,需要先采用蒸发^[13]、气提^[14]、冷却结晶^[15]等方法进行预处理,再将分离出来的浓缩液进行焚烧处理,不仅提高了废水的热值还兼具除盐的功能,防止废水中的盐对焚烧炉进行腐蚀^[16]。

一般有机废水焚烧处理工艺流程包括预处理、高温焚烧、余热回收及烟气处理等过程。预处理主要包括:(1)过滤中和废水;(2)掺混燃料,提高废水的燃烧特性^[17];(3)加热或稀释,降低废水黏度,易于输送雾化^[18]。良好的雾化是实现有害物质高脱除(燃烧)率的关键。常用的雾化技术有机械雾化、介质雾化和特殊喷嘴雾化^[19]。一般高黏度废水采用介质雾化,低黏度废水可采用机械雾化。目前常用的喷嘴有转杯式雾化喷嘴、蒸汽或空气雾化喷嘴等^[20]。

3 焚烧炉炉型介绍

国内外实现工业应用的废水焚烧炉种类繁多,根据不同的实际情况采用不同的炉型。大体上可分为液体喷射炉、回转窑焚烧炉、流化床焚烧炉和旋转流化床焚烧炉4种。

3.1 液体喷射炉

液体喷射炉是装有耐火衬里,专用于处理可燃废水的圆柱形焚烧炉,分立式喷射炉和水平喷射炉两种。立式喷射炉用于处理富含无机盐和低熔点灰的废水,水平喷射炉通常用于处理高水分、低热值、低灰渣物质^[21]。废水通过喷嘴雾化为细小液滴,在高温火焰区域内以悬浮态燃烧。采用旋流或直流燃烧器,使废水雾滴与助燃空气良好混合,增加停留时间,使废水在高温区内充分燃烧。燃烧产生的烟气和蒸发出的可燃物可再次通入燃烧室来保证完全燃烧^[22]。

运行时,辅助燃料和雾化蒸汽或空气由燃烧器进入炉膛,火焰温度为 $1\ 430\sim 1\ 650\text{ }^{\circ}\text{C}$,废水经雾化后由喷嘴喷入火焰区燃烧。烟气在燃烧室内的停留时间为 $0.3\sim 2.0\text{ s}$,焚烧炉出口温度为 $815\sim 1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,

燃烧室出口空气过剩系数为 $1.2\sim 2.5$,排出的烟气进入急冷室或余热锅炉回收热量^[23]。

典型的立式液体喷射焚烧炉顶部安装重油喷嘴,重油与雾化蒸汽在喷嘴内预混合喷出。燃烧用的空气在喷嘴附近通过涡流器进入炉内,炉内火焰较短,燃烧室的热强度很高。大多数废水的最佳燃烧温度为 $870\sim 980\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在焚烧炉炉底设有冷却罐。由冷却罐出来的烟气经文丘里洗涤器洗涤后排入大气^[23]。

液体喷射焚烧炉的优点是可以处理各种不同成分的废液;处理量调整幅度大;温度调节速率快;投资维护费用低^[24]。缺点是处理量小,无法处理高黏度废水;必须配置不同形式的燃烧器和喷雾器,以处理不同黏度及固体悬浮物含量的废液^[25];以燃油或燃气作为辅助燃料,运行费用高;炉膛中心的高温会产生大量的热力型 NO_x ,造成二次污染^[26]。

3.2 回转窑焚烧炉

回转窑焚烧炉由一个稍倾斜的炉膛(回转窑)与一个二燃室组成。炉膛是一个内嵌耐火砖的空心钢制圆筒。运行时废水从炉膛的高端喷入,在自身重力及炉膛旋转的推动作用下缓慢下滑。炉膛的转动促使废水与空气更好地混合,达到更高的焚烧效率^[22]。回转窑长径比一般为 $(2\sim 10):1$,转速 $1\sim 5\text{ r/min}$,安装倾角 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$,操作温度上限为 $1\ 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。焚烧温度 $(650\sim 1\ 650\text{ }^{\circ}\text{C})$ 的选择取决于废水的性质,对含卤代有机物的废水,焚烧温度应在 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上;对含氰化物的废水,焚烧温度应高于 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[23]。二燃室装备一到数个燃烧器,气体产物与二燃室内的过量空气混合后在高温下燃烧,除去气体产物中的毒性有机物。热值高的废水可以与固体危险废弃物混合后投入回转窑燃烧,也可以雾化后直接喷入二燃室焚烧。废水燃烧的烟气在二燃室中平均停留时间为 $1.0\sim 3.0\text{ s}$,空气过剩系数为 $1.2\sim 2.0$ 。最后废气从二燃室排入进入余热锅炉和烟气净化装置。

按窑内气、液流动方向的不同,回转窑可分为顺流式回转窑和逆流式回转窑^[12];按除渣方式的不同又可分为熔渣式回转窑和非熔渣式回转窑。熔渣式回转窑的焚烧温度高达 $1\ 200\sim 1\ 400\text{ }^{\circ}\text{C}$,由辅助燃料燃烧器控制^[27]。

回转窑焚烧炉的优点是可以处理的废物种类广;气、液(固)体接触良好;窑内废物停留时间可以通过转速的调整来控制;操作温度高,可以有效破坏任何有毒有害物质。缺点是结构复杂,投资大;耐火砖维护费用高,一般每2年需更换1次^[23];空气需求

量大,排气中粉尘含量高;热效率低^[25]。

3.3 流化床焚烧炉

流化床焚烧炉由风室、布风板、密相区、扩展段和稀相区组成,主要用于处理焦油、浆液等难以雾化的黏稠液体或固体废弃物,也可用于焚烧废气。

流化床焚烧炉运行时辅助燃料(煤、半焦等)经给料机从密相区加入炉内燃烧,为废水的蒸发和热解提供能量。若废热的热值较高,不需向床内添加辅助燃料即可维持正常燃烧,则可用河沙等惰性物料作床料。F. M. Okasha 等指出,床料高度越高,废水焚烧效果越好^[28]。流化床焚烧炉通常采用分级送风技术,一次风通过布风板送入床内,在保证床料良好流化的同时为废水的充分燃烧提供空气;加旋二次风布置在稀相区下部,切向喷入炉内,加强了流化床稀相区的扰动,使得气及气固的混合充分,保证废水在稀相区燃尽以及飞离密相区的细灰的进一步燃烧。稀相区出口布置余热锅炉,以提高焚烧炉的经济性。在运行过程中,密相区温度控制在 870~950℃,稀相区温度控制在 750~850℃,烟气在炉内的停留时间不少于 3 s(有机物和其它废弃物的分解和燃尽时间一般不超过 2 s),这样可保证有机物的充分燃烧,使焚烧效率达到 99.99%以上^[29]。

流化床焚烧炉主要有两种炉型:鼓泡流化床和循环流化床。当空气速度达到床料的临界流化速度时,床层开始流化。进一步提高气速,床层开始膨胀,过剩的空气以气泡的形式通过床层,以这种方式运行的焚烧炉为鼓泡流化床焚烧炉。鼓泡流化床内空截面速度约为 1.0~3.0 m/s,平均停留时间为 1.0~5.0 s,空气过剩系数为 1.0~1.5。循环流化床焚烧炉的空截面烟气速度一般为 4.0~6.0 m/s。此时,大量的床料颗粒被空气带出炉膛,经高温旋风分离器分离后,回送至炉内进一步燃烧,实现物料的循环。

流化床焚烧炉内,固体物料浓度很高,气固滑移速度大,传热和传质速率很高,因此炉膛温度十分均匀,有利于废水稳定、高效地焚烧。通过向流化床内加入碱性颗粒物,与燃烧过程中生成的酸性气体反应,可实现酸性气体的高效脱除,其生成物可作为固体灰渣的一部分被排出炉膛。

流化床焚烧炉的主要优点是焚烧效率高,结构紧凑,占地面积小;炉内无活动部件,运行故障少;实现低 NO_x 排放和低成本炉内脱硫、脱氯。缺点是焚烧碱金属含量高的废水时床料容易结焦,流化失败^[8]。工业上对此类废水常进行蒸发除盐预处理^[30],

而后采用低温燃烧或向炉内添加高岭土等含有钙、镁、铁等元素的物质,提高灰的熔点,避免结焦。

3.4 旋转流化床焚烧炉

旋转流化床焚烧炉是使流化床在离心状态下工作的一种焚烧炉。由于旋转造成的超重力场可使炉中床料的有效重力增加十几甚至几十倍,气固间的相互作用大大增强^[31],从而克服了传统流化床临界流化速度小、大颗粒腾涌、小颗粒夹带粘结等缺点^[32],使炉内的传热传质速率增大,设备尺寸大幅减小,同时废水在巨大的剪切力和撞击下被拉伸成极薄的膜,产生较大的接触面积,提高了反应速率,极大地改善了废水焚烧处理效率^[33]。但其结构复杂,炉内有旋转部件,运行及维护成本高,易损坏,因此未得到广泛的应用。

除了上述 4 种焚烧炉外,多膛焚烧炉^[34]、高温裂解炉^[35]等也可用于工业废水的焚烧处理。但由于运行成本等原因,这两种焚烧炉未被广泛使用。

4 国内外废水焚烧情况

废水焚烧工艺占地面积小、处理速度快、污染物破坏彻底、可进行余热回收再利用、对废水成分没有特殊的要求,国外已有大量成功的工程案例,在美国现有的 276 座危险废弃物焚烧炉中,有 170 座是专门处理废水的焚烧炉,占 61.59%^[8],其中多以工业废水为主^[36-37]。除此之外,加拿大、德国、印度、日本等国家也相继采用了流化床等焚烧设备处理造纸废水等难以生化降解的工业废水^[38-39]。

我国的废水焚烧处理技术在最近几年取得了长足的进步。国内有很多高校、科研院所及企业致力于废水焚烧处理技术的研究和应用。各种文献中报道的废水焚烧炉有 10 多座,集中在石油化工、制药等企业。其中主要以流化床作为主要的焚烧炉型。例如东南大学为南通醋酸化工厂^[40]和大连某化工厂^[41]设计的废水焚烧炉。哈尔滨工业大学为平顶山尼龙 66 盐厂设计的^[42],浙江大学为嘉兴平湖酚醛塑料厂^[41]设计的都为流化床焚烧炉。除此以外,东北制药总厂和山西三维集团也分别采用了液体喷射炉^[43]和回转窑焚烧炉处理工业废水^[44]。

5 结论

通过分析讨论可以看出,焚烧技术是一种极具前景的废水处理工艺。在应用较为广泛的几种焚烧炉中,液体喷射炉适合处理少量的高热值废水,投资维护费用低,但不适合处理高黏度废水,且会产生大

量的热力型 NO_x ; 回转窑焚烧炉可以同时处理固体废物和废水,但废水处理量较为有限,而且结构复杂,运行成本高;流化床焚烧炉可大量高效地处理多种热值低的废水,运行故障少,二次污染物排放浓度低,但床料会结焦,使流化失效;旋转流化床焚烧炉的建造和运行成本较高,因而在实际工业中应用较少。今后废水焚烧技术的主要研究方向将集中在如何控制焚烧过程中产生的多环芳烃、重金属、 NO_x 等污染物的排放并根据不同废水的性质成分,优化焚烧炉的操作参数,既达到较高的焚烧效率又保证较低的污染物排放浓度。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 2005 年中国环境状况公报[EB/OL]. (2006-07-27) [2011-04-12] <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb>.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 2006 年中国环境状况公报[EB/OL]. (2007-06-19) [2011-04-12] <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb>.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 2007 年中国环境状况公报[EB/OL]. (2008-11-17) [2011-04-12] <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb>.
- [4] 中华人民共和国环境保护部. 2008 年中国环境状况公报[EB/OL]. (2009-06-09) [2011-04-12] <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb>.
- [5] 中华人民共和国环境保护部. 2009 年中国环境状况公报[EB/OL]. (2010-06-03) [2011-04-12] <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb>.
- [6] 陈振东. 含盐废液流化床焚烧特性研究[D]. 南京:东南大学, 2010.
- [7] Emek E, Kara B Y. Hazardous waste management problem: The case for Incineration[J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(5): 1424-1441.
- [8] 池涌,王波,严建华. 有机危险废液焚烧处理技术[J]. *电站系统工程*, 2006, 22(6): 8-11.
- [9] 董元芳. 焚烧法处理三废的情况和技术[J]. *化工环保*, 1989(3): 152-156.
- [10] Ehrhardt K, Ehret A, Leuckel W. Experimental study on the dependence of burnout on the operation conditions and physical properties in wastewater incineration[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1978, 27(1): 1293-1299.
- [11] Ehrhardt K, Kufferath A, Leuckel W. Assessment of atomization with respect to burnout for the incineration of organically contaminated wastewaters[J]. *Combustion Science and Technology*, 1998, 136(1/2/3/4/5/6): 333-347.
- [12] 张绍坤. 回转窑处理危险废物的工程应用[J]. *工业炉*, 2010, 32(2): 26-29.
- [13] Miccio M, Poletto M. Disposal of olive mill waste waters through concentration and combustion: comparison between different process options[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2009, 17: 221-226.
- [14] Dvorak B I, Herbeck C J, Meurer C P, et al. Selection among aqueous and off-gas treatment technologies for synthetic organic chemicals[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1996, 122(7): 571-580.
- [15] Roos A C, Verschuur R J, Schreurs B, et al. Development of a vacuum crystallizer for the freeze concentration of industrial waste water[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2003, 81(8): 881-892.
- [16] Moulin P, Allounane T, Latapie L, et al. Treatment and valorisation of an industrial effluent by pervaporation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2002, 197(1/2): 103-115.
- [17] Law C K. Considerations of droplet processes in liquid hazardous waste incineration[J]. *Combustion Science and Technology*, 1990, 74(1/2/3/4/5/6): 1-15.
- [18] Miccio M, Miccio F. Fluidized Combustion of Liquid Fuels: Pioneering Works, Past Applications, Today's Knowledge and Opportunities [C] // 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Xi'an, China, 2009: 71-82.
- [19] 田春霞, 仇性启, 崔运静. 喷雾雾化技术进展[J]. *工业加热*, 2005, 34(4): 40-43.
- [20] 马静颖. 高浓度含盐有机废液焚烧技术[J]. *能源与环境*, 2005(1): 45-48.
- [21] 邹家庆. 工业废水处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 172-174.
- [22] Saxena S C, Jotshi C K. Management and combustion of hazardous wastes[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996(22): 401-425.
- [23] 别如山, 杨励丹, 李季, 等. 国内外有机废液的焚烧处理技术[J]. *化工环保*, 1999, 19(3): 148-154.
- [24] Wang L, Wang I, Chang J, et al. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from the liquid injection incineration of petrochemical industrial wastewater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 148(1/2): 296-302.
- [25] 徐茂蓉. 高浓度有机废液焚烧二次污染物排放特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [26] 王兆熊, 郭崇涛, 张瑛, 等. 化工环境保护和三废治理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984: 69-71.
- [27] 朱江, 蒋旭光, 刘光, 等. 回转窑处理危险废弃物技术探讨[J]. *环境保护*, 2004, 22(5): 57-61.
- [28] Okasha F M, El-Emam S H, Mostafa H K. The fluidized bed combustion of a heavy liquid fuel[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27(4): 473-480.
- [29] 陈晓平, 赵长遂, 沈来宏, 等. 流化床焚烧技术在有机废液无害化处理领域的应用[J]. *锅炉技术*, 2001, 32(9): 25-28.
- [30] Ma Jingying, Ma Zengyi, Yan Jianhua, et al. Development of an evaporation crystallizer for desalination of alkaline organic wastewater before incineration[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2005, 6A(10): 1100-1106.
- [31] 江茂强, 赵永志, 郑津洋. 新型静态旋转流化床内气固流动行为的数值模拟[J]. *过程工程学报*, 2009, 52(2): 175-179.
- [32] Nakamura H, Tokuda T, Iwasaki T, et al. Numerical analysis of particle mixing in a rotating fluidized bed[J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(11): 3043-3056.

(下转第 85 页)

度的波动,因此原水水质的控制是影响处理效果的重要因素。处理后出水经提升泵进入综合污水处理厂处理后,终端生化出水 COD 始终维持在 60 mg/L 以下。

表 2 正常运行处理效果

检测次数	原水/(mg·L ⁻¹)		出水/(mg·L ⁻¹)	
	COD	油	COD	油
1	19 840	660	6 286	65
2	23 620	—	6 686	—
3	38 860	—	8 953	—
4	21 620	—	5 524	—
5	16 830	362	4 636	58
6	26 840	—	6 491	—

4.3 存在的主要问题与讨论

调试及运行期间,由于企业每天产生排出的纺丝油剂水水量及 COD 浓度差异较大,而集水池池容太小不足以均匀水质,导致原水水质波动较大;此时,药剂用量难以迅速调控,从而导致出水效果不太稳定。鉴于 COD 波动较大的问题,溶剂废水 COD 应先检测后再定量配入到集水池,以确保集水池原水水质的稳定性和药剂用量的可控性,从而确保处理效果。

5 经济成本分析

废水处理工程总投资为 56 万元。电费为 4.04 元/m³,药剂费(双氧水、硫酸亚铁、片碱、PAC、PAM)为 7.32 元/m³;该废水处理站定员 2 人,人工费按 60 元/(人·d)计,则人工费为 2.50 元/m³;污泥处置费用为 2.42 元/m³,不计折旧及维修费用,则运行费用

为 16.28 元/m³。

6 结论

(1)工程实践表明,该工艺能够用于处理化纤行业纺丝油剂废水,COD 去除率可达 70%以上;进一步通过生化处理后,出水可达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级标准。

(2)调试运行结果表明,纺丝油剂废水水量及浓度变化较大,直接影响处理效果;因此,企业应加强管理,定期排放收集纺丝油剂废水,预先检测 COD 并进行油剂水分类,然后定量配入集水池。另外,建议集水池池容设计更大一些,停留时间至少为 3 d 以上。

(3)该预处理工艺一次性投资较低,占地省;产生的污泥量较大,运行费用偏高,建议进一步优化运行操作条件。

[参考文献]

- [1] 李国庆,高湘.电-Fenton 法处理模拟含油废水影响因素的研究[J].安徽化工,2010,6(4):63-66.
- [2] 陈春茂,李敏,阎光緒,等.高浓度超稠油乳化废水预处理工艺与实践[J].工业水处理,2008,28(1):76-78.
- [3] 陈国华,史春莲,齐春惠.Fenton 试剂处理乳化含油废水[J].应用基础与工程科学学报,2007,15(2):156-163.

[作者简介] 李红良(1975—),2008 级浙江理工大学在读研究生。E-mail:lihl1975@sina.com.通讯联系人:吴成强,副教授。电话:13738045371,E-mail:wucq@zjut.edu.cn.
[收稿日期] 2012-04-17(修改稿)

~~~~~  
(上接第 19 页)

- [33] Taib M R, Swithenbank J, Nasserzadeh V, et al. Investigation of sludge waste incineration in a novel rotating fluidized bed incinerator[J]. Process Safety and Environmental, 1999, 77(5): 298-304.
- [34] Werther J, Ogada T. Sewage sludge combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25(1): 55-116.
- [35] Chang R C W, Vorndran S C, Joseph M F, et al. Method and apparatus for plasma pyrolysis of liquid waste:US, 4886001 [P]. 1989-04-07.
- [36] John C, Evans W. Fluid-bed incineration is used by Menasha at NSSC pulp mills[J]. Pulp & Paper, 1975, 49(2): 140-141.
- [37] Kenneth E. Menasha expands and modernizes NSSC pulp mill at North Bend. Ore[J]. Pulp & Paper, 1976, 50(6): 80-83.
- [38] 宋德龙,邝仕均.用于草浆黑液的流化床碱回收技术[J].国际造纸,2002,2(1):44-47.
- [39] Mistry N. A case study for thermal treatment of halogenated inorganic aqueous waste with energy and by-product recovery[C] //

Courtesy of Selas Fluid Processing. New Orleans, Louisiana, 2002: 69-75.

- [40] 张敦定,段春琳,陈晓平,等.流化床焚烧技术及其工业设备的开发[J].绿洲技术,1999(2):28-30.
- [41] 陈惠超.含盐有机废液循环流化床焚烧试验研究[D].南京:东南大学,2006.
- [42] 戴新民.焚烧技术在三废处理中的应用[J].辽宁化工,1997,26(5):294-295.
- [43] 卢文森.高浓度制药有机废液的焚烧处理[J].化工环保,1985(5):73-77.
- [44] 李腊红.回转窑焚烧炉处理醋酸残渣和丁烯醛废液[J].山西化工,2009,29(5):69-70.

[作者简介] 肖双全(1975—),2011 年毕业于吉林大学,硕士,工程师。电话:13159810182,E-mail:xiaoshuangquan@petrochina.com.cn.  
[收稿日期] 2012-04-12(修改稿)