


高等院校教材



生活垃圾焚烧厂 渗滤液处理实例教程

主 编◎班福忱 胡俊生 徐启程

天津出版传媒集团

天津科学技术出版社


高等院校教材



生活垃圾焚烧厂 渗滤液处理实例教程

主 编◎班福忱 胡俊生 徐启程

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

生活垃圾焚烧厂渗滤液处理实例教程 / 班福忱, 胡俊生, 徐启程主编. -- 天津: 天津科学技术出版社, 2017. 3


ISBN 978-7-5576-2486-6

I. ①生… II. ①班… ②胡… ③徐… III. ①垃圾处理—高等学校—教材 IV. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 059600 号

责任编辑: 方 艳

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社出版

出版人: 蔡 颢

天津市西康路 35 号 邮编 300051

电话: (022) 23332695 (编辑部)

网址: www.tjkjcb.com.cn

新华书店经销

北京建宏印刷有限公司印刷

开本 710×1000 1/16 印张 9.75 字数 148 000

2017 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定价: 35.00 元

编委会名单

主 编

班福忱

胡俊生

徐启程

参 编

于 洋

叶友林

吴娜娜

孙剑平

徐 丽

郭慧宇

冯 雷

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景及目的意义	1
1.1.1 项目的研究背景	1
1.1.2 整体项目建设意义	2
1.2 城市生活垃圾焚烧厂渗滤液的来源和特性	2
1.2.1 城市垃圾焚烧厂渗滤液产生	2
1.2.2 垃圾焚烧厂渗滤液特点分析	3
1.3 垃圾渗滤液处理方法	5
1.3.1 生物法	5
1.3.2 土地法	10
1.3.3 物理化学法	11
1.3.4 生物 - 物化组合工艺	16
1.4 国内外垃圾渗滤液处理研究应用现状	17
1.4.1 国外垃圾渗滤液处理主流技术	17
1.4.2 国内垃圾渗滤液处理主流技术	18
1.5 研究内容及技术路线	19
1.5.1 课题研究内容	19
第 2 章 焚烧厂垃圾渗滤液水质水量的分析与确定	21
2.1 项目概况及自然条件	21
2.2 渗滤液产生量预测及设计规模确定	22
2.2.1 渗滤液产生量确定	22
2.2.2 设计规模确定	22
2.3 设计进水水质	22

2.3.1 国内部分城市垃圾焚烧厂垃圾渗滤液水质	23
2.3.2 渗滤液设计进水水质	23
2.4 设计出水水质	24
第 3 章 工艺方案选择与分析	25
3.1 垃圾渗滤液处理工艺方案选择原则	25
3.2 处理工艺选择依据	25
3.3 垃圾焚烧厂渗滤液处理方法比选	26
3.3.1 现有工艺的应用情况	26
3.3.2 工艺的比较	32
3.3.3 本项目工艺的确定	38
3.4 采用工艺的先进性、合理性及可行性分析	40
3.4.1 工艺特点分析	40
3.4.2 水量、水质变化的适应性	41
3.4.3 污染物去除及达标论证	42
3.5 小结	43
第 4 章 设计参数优化及工艺设计	45
4.1 垃圾渗滤液处理项目设计原则	45
4.2 预处理系统设计方案	46
4.2.1 预处理系统设计说明	46
4.2.2 预处理系统主要构筑物设计	46
4.3 厌氧系统设计方案	47
4.3.1 UBF 设计说明	47
4.3.2 UBF 反应器工艺计算	48
4.3.3 厌氧出水处理段设计说明	50
4.3.4 厌氧出水处理段主要设计参数	50
4.4 MBR 系统设计方案	50
4.4.1 外置式膜生化反应器工艺原理	50
4.4.2 外置式膜生化反应器 (MBR) 设计说明	51

4.4.3 MBR 生化系统设计	53
4.4.4 MBR 生化系统主要工艺参数	55
4.4.5 MBR 超滤计算	56
4.4.6 MBR 超滤主要工艺参数	56
4.5 纳滤系统设计方案	57
4.5.1 纳滤系统工艺原理	57
4.5.2 纳滤系统工艺设计	57
4.5.3 纳滤系统工艺计算	58
4.5.4 纳滤系统工艺参数	58
4.6 反渗透系统设计方案	59
4.6.1 反渗透系统工艺原理	59
4.6.2 反渗透系统设计说明	60
4.6.3 反渗透系统计算	60
4.6.4 反渗透系统主要工艺设计参数	61
4.7 污泥处理系统	61
4.7.1 污泥系统工艺设计	61
4.7.2 污泥脱水系统工艺参数	61
4.7.3 污泥处理设备选型比较	62
4.8 浓缩液处理方案	63
4.8.1 纳滤浓缩液处理方法概述	63
4.8.2 纳滤浓缩液处理系统工艺计算	64
4.8.3 纳滤系统工艺参数	64
4.8.4 反渗透浓缩液处理方案	64
4.9 主要构筑物与配套设备统计	66
第 5 章 安装施工方案	69
5.1 总体概述	69
5.1.1 主要建、构筑物及主要安装设备量	70
5.1.2 施工组织总体设想	71
5.1.3 施工阶段划分	77

5.2 安装施工方案及技术措施	77
5.2.1 电气照明安装、配管、配线施工方案及技术措施	77
5.2.2 设备工程施工方案及技术措施	79
5.2.3 管道安装施工方案及技术措施	85
5.2.4 电气安装施工方案及技术措施	97
5.2.5 不锈钢栏杆安装施工方案及技术措施	99
第 6 章 施工总进度计划	103
6.1 项目总进度计划	103
6.2 施工进度控制方案和保证措施	104
6.2.1 进度管理的控制方法	104
6.2.2 建设工程项目进度控制的组织及管理措施	105
6.2.3 采用技术措施确保工程项目进度控制	108
6.2.4 工程进度控制的经济激励措施	110
6.2.5 针对节假日、冬雨季、农忙季节工期保证措施	110
6.3 设备合理使用	110
6.4 合理分配人力，满足施工进度	111
6.5 运输及接卸方案	112
第 7 章 调试、试运行的技术要求	117
7.1 单机调试	117
7.2 联动调试	121
7.3 厌氧系统调试、试运行	122
7.3.1 厌氧启动	122
7.3.2 厌氧负荷提高	122
7.3.3 厌氧负荷提高注意事项	123
7.4 MBR 系统调试、试运行	124
7.4.1 污泥驯化培养	124
7.4.2 污泥培养时应注意的问题	124
7.4.3 其他要求	125

7.5 超滤系统调试、试运行	125
7.5.1 超滤系统运行调试	125
7.5.2 超滤膜污染及其清洗	126
7.5.3 超滤系统日常检查项目内容	129
7.6 纳滤、反渗透系统调试、试运行	129
第 8 章 污染物排放控制应急预案	131
8.1 出水水质稳定达标措施总则	131
8.2 出水水质稳定达标工艺处理措施	131
8.2.1 最终出水 COD 超标处理措施	131
8.2.2 最终出水氨氮及总氮超标处理措施	132
8.2.3 反应器温度过低或过高处理措施	133
8.2.4 生化抑制类毒性物质的使用处理措施	133
8.2.5 硝化反应器溶解氧过低处理措施	133
第 9 章 项目竣工验收	135
9.1 项目验收基本概况	135
9.1.1 项目主要内容	135
9.1.2 三废处理情况	136
9.2 项目验收的条件	137
9.3 竣工验收的工作内容	137
9.4 项目验收指标	138
9.5 工程移交前验收	138
9.5.1 竣工验收的工作内容	138
9.5.2 各项验收指标采用的测试方法、标准	138
9.5.3 验收测试过程监督及数据的确认方法	138
9.6 投入本项目的主要施工设备表	139
9.7 材料试验 / 质量检验仪器设备表	140
参考文献	141

第 1 章 绪论

1.1 背景及目的意义

1.1.1 项目的研究背景

随着经济发展和城市规模在一点点地扩大，我国城市生活垃圾产量同步快速增长。现如今，我们的人均生活垃圾约为 440 千克，每年的总量约为 1.6 亿吨，占全球垃圾总量的两成以上，并且每年大约会以 10% 的速度极速增长，有部分城市的垃圾增长率更高达 20%。迅速增长的城市生活垃圾量，影响了社会的环境，阻碍了经济的发展。综上所述，在减少垃圾排放量的问题上我们需要不断的努力，同时也急需寻找好的方法来处理数量巨大的垃圾，不但要实现对生活垃圾的资源化循环利用，也要合理的对垃圾进行安置处理。

生活垃圾经常进行堆放填埋处置，在自然环境的自身不断循环中，生活垃圾的成分中的一些有害物质会进入生态环境中，大气、水体以及土壤会遭到污染。当生态系统不断的循环时，有毒物质会一起循环，不断地进行污染环境，这样的潜在的、长期的危害性需要引起我们的重视。

垃圾焚烧厂的垃圾渗滤液作为一种有机废水，属于二次污染物，垃圾渗滤液含有高浓度的有毒、有害物质，难以处理，废水中所含有机物种类高达百余种。渗滤液主要来源于直接降水、地表径流和下渗、蒸发和蒸腾作用、垃圾自身水分及有机物分解生成水。垃圾渗滤液作为液体具有一定的流动性，在这个过程中就会使渗滤液本身的成分发生变化，影响其物理、化学和生物性质。所以在考虑垃圾焚烧厂的渗滤液的废水水质时，需要考虑到水质波动情况，需要做出预留安全余量。因此，必须对其进行合理的有效处理，将其对环境影的影响降至最低。以西北地区某生活垃圾焚烧发电项目垃圾渗滤液处理项目为例：本项目

位于甘肃省省会西北地区某市。该市是西北地区中最重要的工业基地，同时也作为甘肃省乃至西北地区的综合交通枢纽，也是西北地区最重要的中心城市之一。本项目是位于西北地区某地的全国规模最大的垃圾焚烧发电厂，为重点建设生活垃圾焚烧发电无害化处理项目和环保节能产业项目，占地 340 平方千米，日处理生活垃圾 3 000 吨。该地区垃圾产量较多，传统填埋方法难以对垃圾进行妥善处理，本项目通过垃圾焚烧发电的方法来处理，以达到使垃圾减量化的目的，后续处理可充分利用科回收资源并做无害化处理，该项目大大地改变了现状。但是垃圾焚烧也有很多弊端，影响的方面较多，本研究主要对垃圾储存坑，以及垃圾转移过程中出现的垃圾渗滤液问题进行研究处理方案。为了使项目对环境的影响降到最小，垃圾渗滤液的处理也是至关重要的。

1.1.2 整体项目的建设意义

在普遍国内生活垃圾焚烧厂的设计中，为了提高垃圾的燃烧热值，通常在进行垃圾焚烧前，为了提高垃圾焚烧的效率，会将垃圾储存在垃圾坑中，沥出一定水分后再进行焚烧。而垃圾的储存时间一般为不超过七天。当垃圾的沥出一定水分后，焚烧过程可减少了对辅助燃料的投加，并且大大增加了发电量。与此同时也产生了渗滤液废水的问题。本研究针对以西北地区某地的生活垃圾焚烧厂渗滤液为主的污水，在分析渗滤液废水的水质和水量的基础上，根据当地经济发展水平和所需达到的处理要求，对几种国内主流的渗滤液处理工艺进行比选，确定最优处理方案。处理后出水水质要求达到 GB19923—2005《城市污水再生利用工业用水水质》中敞开式循环冷却水系统补充水水质标准（换热器为非铜质）。

1.2 城市生活垃圾焚烧厂渗滤液的来源和特性

1.2.1 城市垃圾焚烧厂渗滤液的产生

城市的生活垃圾从居民住家到垃圾处理厂的过程一般要经过 3 个步骤：首先小区垃圾站统一收集各家居民的家用垃圾等，当统一收集后定期运送至垃圾中转站进行一定的压缩处理，简单压缩处理后再运送至垃圾处理厂。在整个 3 个步骤

中，第一步垃圾在小区垃圾站中，垃圾不做处理且停留时间较短，这个过程中渗滤液产生量较少甚至不产生渗滤液；第二步，垃圾来到中转站进行压缩处理，通过挤压作用，垃圾中的液体会渗出，此时会产生部分渗滤液，该类型渗滤液属于新鲜渗滤液^[1]，此处的渗滤液量较少，且多为单一污染物的水分液体等，该部分渗滤液浓度较低，因此一般不进行其他的处理，直接随生活污水排入市政污水管网；在第三个步骤中，当垃圾被运送到垃圾焚烧厂后会继续产生垃圾渗滤液，而由于不同的垃圾处理方式会产生不同量的垃圾渗滤液，在采用循环流化床^[2]垃圾焚烧工艺的垃圾焚烧厂，在焚烧前垃圾可以以存储时间较短的程度进行焚烧处理，总的储存时间为一天，在该种情况下，垃圾渗滤液产生量较少，大约为垃圾量的10%；在采用另一种工艺炉排型焚烧炉为焚烧工艺的垃圾焚烧厂，通常对燃烧垃圾的燃烧能力有要求，所以需要提高垃圾热值，需要垃圾沥出较多的水分，当垃圾堆放在储存坑中可进行发酵，一般停留时间为4~6天。冬季垃圾渗滤液产生量较少，约为垃圾量的20%。夏季垃圾渗滤液产生量较高，约为垃圾量的30%。由于南北方差异，总体上北方垃圾渗滤液产生量较南方低。

1.2.2 垃圾焚烧厂渗滤液特点分析

生活垃圾通常为居民日常生活中或者为日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及法律、行政法规规定视为生活垃圾的固体废弃物而不包括工厂所排出的工业固体废物和医疗废物、危险废物等。这就造成生活垃圾成分复杂的情况。但是大致可分为有机物垃圾、无机物垃圾以及可回收利用垃圾等。对于我国的情况来说，我国主要的生活垃圾是餐厨垃圾即厨余垃圾，通常厨余垃圾为含水率高的有机物，因其含水率很高造成了提供热值较低的情况。因此，针对这样的情况，在设计国内生活垃圾焚烧厂时，需在垃圾进行焚烧前对垃圾进行沥水处理，即将垃圾储存在垃圾坑中，一般垃圾坑设计容量可以储存七天左右的垃圾处理量用以垃圾发酵沥水。但同时垃圾渗滤液的处理也是一大问题。而对于垃圾焚烧厂渗滤液具有以下特点：

(1) 污染物的成分种类多、水质变化大

由于地理位置、居住环境、垃圾源头等众多影响因素，导致垃圾焚烧厂渗滤

液的水质的成分极其复杂，不但有机污染物浓度高，还有金属类、无机盐类、细菌微生物等有毒有害的物质。

由于焚烧厂的垃圾渗滤液属于原生废水，缺少酸化水解过程，垃圾沥滤液中含有种类繁多的有机物，由于垃圾主体多为厨余垃圾，所以垃圾渗滤液中脂肪酸类，腐殖类化合物较多，且含有灰黄霉酸类物质。并且含有数十种难降解有机物，因此水质非常复杂，污染物种类多，而且浓度也有一定的波动性以及长期的变化。

(2) 有机污染物浓度较高

一般情况下，废水中的 COD 浓度在 40 000 ~ 80 000mg/L，BOD 浓度在 20 000 ~ 40 000mg/L。除此之外，还有数十种金属离子、无机污染物。通常可生化性较好，一般 B/C 大于 0.4，如采用传统的生化处理工艺，达到要求的排放标准较为困难。

(3) 氨氮浓度高

垃圾焚烧厂的渗滤液废水的氨氮浓度较高，通常在 750 ~ 2 000mg/L，这也为废水的处理工艺带来了难度，要求其具备较强的脱氮能力。

(4) 营养比例失调

对于高浓度的有机废水，我们通常采用生化处理工艺，但是相比来说，垃圾焚烧厂渗滤液废水中的营养比例失调，其中磷含量偏低而氨氮含量偏高。

(5) 重金属离子和盐分的含量高

由于垃圾中重金属离子与盐份较高，垃圾对放过程中重金属离子与盐分带入渗滤液中，导致渗滤液中含有较高的重金属离子与盐分。

(6) 焚烧厂渗滤液 pH 值较低

焚烧厂渗滤液未经处理，使其内含有大量的有机酸，导致渗滤液 pH 值较低，呈酸性，一般为 4 ~ 6。

(7) 水量波动范围较大

当季节变化，垃圾渗滤液的水量大小也会跟随变化。不仅如此，垃圾运输的过程也会对垃圾渗滤液的水量造成一定的影响，考虑多种因素，垃圾焚烧厂渗滤液的水量变化很大。在冬季来临，由于降雨旱季的水量较少，导致渗滤液含水量减少，

这样渗滤液污染浓度较高；当夏季来临也会迎来雨季，此时垃圾渗滤液的含水量较高，因此渗滤液污染浓度较低。因此，要求处理工艺具备强抗冲击负荷能力。

1.3 垃圾渗滤液处理方法

近年来国内外研究人员对一直研究的垃圾渗滤液处理工艺进行改良更新，不断尝试，很多更优的方法已被应用，很多实际工程运行效果良好。由于渗滤液水质水量的波动性、复杂性以及多变性，大多数就现场实际情况及不同的出水要求以及其经济性等来采用具有针对性的处理工艺。根据国内外垃圾渗滤液处理的应用现状进行分类，目前主流处理工艺有生物法、土地法、物理化学法以及不同工艺的组合应用。

1.3.1 生物法

生物法作为当今世界应用最广泛的污水处理工艺之一，在处理垃圾渗滤液的工程中也是应用最多的一种工艺。生物法具有较大的优势，对比其他方法，生物法的运行费用低，而相对来说处理效率很高，因此受到广泛的应用。生物法主要分为好氧生物处理法、厌氧生物处理法以及厌氧—好氧组合工艺。

1.3.1.1 好氧生物处理法

好氧生物处理法是实际应用中采用最多的同时也是最为成熟的一种污水处理方法。好氧生物处理工艺可以很有效地降解有机污染物。好氧处理工艺最大的优势是很好地降解氨氮，降解氨氮的方法是通过控制硝化和反硝化反应实现的，通过控制工艺流程可以有效地降低处理成本，对高浓度氨氮废水也非常适合。所以该工艺也经常应用于处理垃圾渗滤液的工程。现有的垃圾渗滤液的处理规模均较小，因此要求工艺简单、灵活和较强的抗冲击能力，好氧生物处理工艺完全满足了上述条件。好氧生物处理法在垃圾渗滤液处理的主要工艺包括以下几种工艺：

(1) 活性污泥法

在好氧生物法中，活性污泥法是以处理效率高而著称的，同时费用低廉，

这使得活性污泥法应用十分广泛。活性污泥法的主要原理为：废水中的悬浮微生物具有一定的吸附、降解作用，活性污泥法利用了这个特性，有效去除了易生物降解有机物和高浓度氨氮等物质。但是活性污泥法也存在着许多问题弊端，存在能耗大的问题，而且剩余污泥处理费用高的问题和剩余无机营养元素高的问题等无法忽视。

张连凯等人采用两级 SBR 工艺处理垃圾渗滤液，该垃圾渗滤液经过混凝预处理，实验结果表明，SBR 工艺对垃圾渗滤液中的 COD 和氨氮的去除率分别为 88% 和 89%，出水效果十分理想，可以达到 GB16889—1997 二级排放标准。E.Neczaj 等人采用 SBR 处理垃圾渗滤液，垃圾渗滤液同样也先经过预处理后进行 SBR 工艺的处理，超声波的预处理工艺可提高其可生化性，对 SBR 工艺的处理十分有利。实验结果表明，当超声波长一定时，SBR 工艺可去除 90% 的 COD 和 70% 的氨氮，这是的去除效果最好。孙艳波等人通过向晚期垃圾渗滤液投加含高浓有机物的粪水，提高了碳氮比，使其对 BOD 和氨氮的去除率分别为 95.6% 和 99.6%，较好地去除了废水中的污染物。孙召强等人采用 CASS 工艺对垃圾渗滤液进行处理，对于高浓度废水的 COD 和氨氮去除率分别为 85% 和 91%，效果显著。

（2）曝气氧化塘法

曝气氧化塘法作为一种占地面积大、容积也大、有机负荷低、处理效率较低的处理工艺，但其具有一定的优势，即经济效率高且工程简单，这些优点是十分适用于那些土地资源丰富的地区的。目前，在处理垃圾渗滤液的过程中，曝气氧化塘常法是经常作为后续深度处理工艺的，例如中山市狗仔坑垃圾场便应用了曝气氧化塘法，具体采用了水葫芦氧化塘工艺进行深度处理垃圾渗滤液，最后出水的水质达到排放标准。吴荻等采用三级稳定塘对渗滤液进行深度处理，在进水可生化性较差的情况下，经过曝气氧化塘处理后，COD 和氨氮的去除率可达 60%，运行稳定，出水达到国家要求的排放要求。Maehlum T 采用曝气氧化塘法来处理低温地区的垃圾渗滤液，后续出水水质成分中，有机物和氨氮的去除效果都较好，污染物的去除率都可以达到 60%。

(3) 生物膜法

生物膜法最大的优点为拥有强抗冲击符合能力，且膜上存货能存留的微生物都是世代时间较长的微生物，如硝化菌等。德国 Damsdoof 垃圾填埋场，率先采用反渗透装置来处理废水。Loukidou M X 等采用生物流化床处理老的那个垃圾渗滤液，以聚氨基甲酸酯颗粒和粉末活性炭作为载体，当载体为聚氨基甲酸酯颗粒时，可以分别去除 65%、90%、70% 的 COD、BOD 和色度，在后期稳定的阶段可去除 90% 以上 NH₃-N；而载体为粉末活性炭时，可分别去除 81%、90%、85%、80% 的 COD、BOD、NH₃-N 和色度。

好氧处理虽然能够较好地处理可生化降解的有机物，但好氧处理能耗较高，运行费用较高，且有毒有害物质会对处理效果产生较大的影响。所以，好氧生物法主要适合于处理规模小的工程。若处理规模较大，好氧生物法作为辅助或者后续处理法来进行组合工艺处理。这样可以有效地利用有限的资源取得更大的效果。

1.3.1.2 厌氧生物处理法

厌氧生物处理法较好氧生物处理相比其运行能耗少、需要较少的营养物质，也具有操作简单的优势。根据厌氧生物处理法的特性，可了解该方法的建设投资和运行费用较低，在废水出水后所产生的剩余污泥量少。厌氧生物处理法处理垃圾渗滤液有较好的出水效果，现应用较多的反应器主要有：

(1) 厌氧消化池

厌氧消化池是一种简单的反应器，虽然整体的水处理效率较低，但是胜在价格低廉，运行管理方便，这种工艺适合于处理少量的渗滤液。黄群贤等采用厌氧消化池法处理垃圾渗滤液，结果表明，可去除垃圾填埋场的渗滤液中 COD 的 80%。

(2) 厌氧序批式反应器

厌氧序批式反应器（ASBR）是一种活性污泥法。ASBR 法可以均匀水质、对于降解厌氧有机物效果显著。该工艺具有工艺简练的优点、同时该工艺也具备操作简单的优势。该种工艺处理垃圾渗滤液出水悬浮颗粒浓度低且抗冲击负荷

能力强。但也存在着弊端即处理效率较低，负荷率较低。Timur H 等处理高浓度垃圾渗滤液采用厌氧序批式反应器（ASBR）处理工艺，出水 COD 去除率高达 85%，容积负荷可达 $9.4\text{COD}(\text{L}\cdot\text{d})$ 。ASBR 最大的特点是能在同一容器内实现固体的截留以及有机物的去除。

（3）上流厌氧污泥床反应器

上流式厌氧污泥床反应器（UASB）对操作要求比较高，是荷兰 Lettinga G 在 70 年代率先试验使用的，该工艺总体体积小、水力停留时间（HRT）短、能耗低、负荷率高且具有强抗冲击负荷能力，在处理垃圾渗滤液工程中应用广泛，但是整个反应器构造复杂，也有启动时间较长的缺点。康家福等采用 UASB 处理高浓度垃圾渗滤液，出水水质 COD 去除率可达 82%、BOD 的去除率可达 85%。

（4）厌氧生物滤池

厌氧生物滤池（AF）的主要特点为一直拥有高浓度生物膜量的反应器，COD 的负荷率高启动时间短，污泥停留时间（HTR）长，无须回流，出水悬浮颗粒少且能耗小，出水 COD 去除率高。但建设投资较高，填料较贵，底部堵塞也较常发生。徐竺^[16]等采用上流厌氧过滤反应器来处理较高浓度的垃圾渗滤液，在 $35 \sim 40^\circ\text{C}$ 的温度下进行消化，出水 COD 可去除 95% 以上，容积负荷为 $5\text{kgCOD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ，整个工艺启动周期短，而且耐冲击。

（5）上流式厌氧污泥床过滤反应器

上流式厌氧污泥床过滤反应器为 UASB 和 AF 复合而成的，上部为 AF，下部为 UASB，具有两种工艺的优点，建设投资较贵，运行操作较为复杂。Keenan PJ^[17]等在实验中，当时进水 COD 为 $800 \sim 1\,000\text{mg/L}$ ，进水 BOD 为 $300 \sim 4\,000\text{mg/L}$ ，在容积负荷为 $10\text{KgCOD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 时，出水 COD 的去除率达到 85%。李军等采用 UASBF 对高浓度垃圾渗滤液进行处理研究，结果表明在水温为 34°C 、水力停留时间（HRT）为 2 天和容积负荷为 $9.5\text{kgCOD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 时，出水 COD 和 BOD₅ 的去除率分别为 83.3% 和 88.4%。

（6）厌氧折流板反应器

厌氧折流板反应器（ABR）是一种推流式的反应器，厌氧折流板反应器的结