

升流式厌氧污泥床(UASB)反应器的系列化和设备化研究

王凯军 贾立敏
北京市环境保护科学研究院

摘要: 本研究通过对国内外厌氧工艺的发展分析,提出了各种厌氧反应器中应用最为广泛的 UASB 反应器设备化是国内外的发展方向的观点。在“九五攻关”期间对 UASB 反应器进行设备化研究工作,其中对混凝土结构的矩形 UASB 反应器,结合三相分离器进行了反应器标准化和系列化的设计工作。对国外引进的两种反应器的制作技术,进行了圆形 UASB 反应器的设备化研究。结合工程应用的分析表明,新型材料的 UASB 反应器在技术和经济上具有一定的优越性。

关键词: UASB 反应器, 设备化, 拼装式反应器, Lipp 技术、圆形和矩形反应器

The Standardized and Equalization of Upflow Anaerobic Sludge Blanket(UASB) Reactor

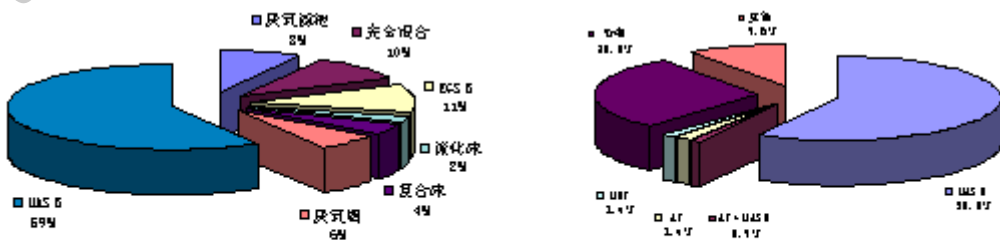
Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection

Abstractor: In this paper, the development of anaerobic treatment processes are analyzed, the Equalization of the most popularized in application among various kind anaerobic reactors, UASB reactor is trend of technology in abroad and at home. During Nine Five-Year Program periods, the key project for equalization of UASB reactor has been conducted. For rectangular concrete UASB reactor, the standardized and equalization for UASB reactor has been pursued with a special three phase separator. The two kind of new material for production UASB reactor are introduced, which are used for the cycle UASB reactor. The full-scale projects application indicated that UASB reactor made by these new material and techniques are technique and economic feasible and profitable.

Key Words: UASB reactor, Equalization, resemble reactor, Lipp technique, cycle and rectangular reactor

一、概述

对各种厌氧工艺的应用进行统计,在世界范围(不包括中国)内到 99 年共统计了 1303 个采用了不同类型的反应器(见图 1a)。其中有近 800 座采用 UASB 反应器,占全部项目的 59%。UASB 反应器最大的优点是结构简单便于放大、运行管理简单。EGSB 目前虽然仅占厌氧工艺应用总数的 11%左右,但是考虑到其是近年来刚刚开发的工艺,其占据市场的速度非常快,在新建厌氧处理装置中占有很大的比例。而在我国采用各种厌氧处理技术据不完全统计,到 99 年共有 219 个项目采用不同类型的厌氧反应器(见图 1b)。其中采用 UASB 反应器的有 120 座以上,占全部项目的 58%,基本与国外应用情况相类似。



a) 国际1303个厌氧项目(99年7月); b) 国内厌氧项目共219家

图1 世界范围内和中国采用厌氧工艺统计



国际上荷兰的 PAQUES、美国的 BIOTHANE 和比利时的 BIOTIM 公司是世界上主要三个 UASB 技术的厂家。仅这三家公司占国际市场份额的 74%，这三家公司的技术主要是采用 UASB 技术，这反映了 UASB 技术除其技术本身的特点之外，其市场化的水平也是比较高的。这与 UASB 技术本身的特点有关，如 UASB 的反应器、三相分离器和颗粒污泥等等都是专有技术，技术含量较高。这使得厌氧 UASB 工艺在欧洲迅速得到了推广和普及，目前已向美国和世界其他地区辐射。

二、UASB 反应器

1、UASB反应器的原理

升流式厌氧污泥床(UASB)反应器是由Lettinga在七十年代开发的。图 2 是UASB反应器及其设备的示意图。废水被尽可能均匀的引入到UASB反应器的底部，污水向上通过包含颗粒污泥或絮状污泥的污泥床。厌氧反应发生在废水与污泥颗粒的接触过程，反应产生的沼气引起了内部的循环。附着和没有附着在污泥上的沼气向反应器顶部上升，碰击到三相分离器气体发射板，引起附着气泡的污泥絮体脱气。气泡释放后污泥颗粒将沉淀到污泥床的表面，气体被收集到反应器顶部的三相分离器的集气室。一些污泥颗粒会经过分离器缝隙进入沉淀区。UASB反应器包括以下几个部分：**进水和配水系统、反应器的池体和三相分离器**(图 2)。如果考虑整个厌氧系统还应该包括沼气收集和利用系统。在UASB反应器中最重要的设备是三相分离器，这一设备安装在反应器的顶部并将反应器分为下部的反应区和上部的沉淀区。

2、反应器的池体几何形状

第一个生产性的UASB反应器(200m³)和在圣保罗CETESB处理生活污水的中试厂(120m³)具有特殊的形状，即上部的(沉淀池的)截面积大于下部反应区的截面积(图 3a)。较大表面积的沉淀器的水力负荷较低，有利于保持反应器内的污泥，对于低浓度污水尤为重要。但是对于高浓度污水，有机负荷比水力负荷更重要，因此沉淀池截面没有必要设计为较大的表面积(图 3b)。但是实际上不论是在建的或已投入运转的大部分生产规模的UASB反应器，在反应器的反应和沉淀部分是等面积的(图 3c所示)。建筑直壁的反应器比斜壁的具有较大(或较小)

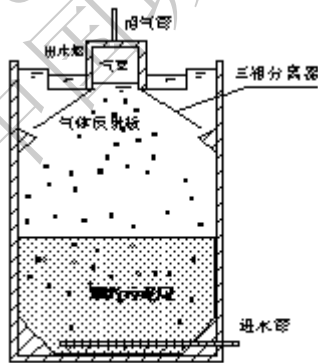


图2 UASB反应器原理图

沉淀池的反应器在结构上更加有利。因此，以下仅讨论直壁 UASB 反应器。

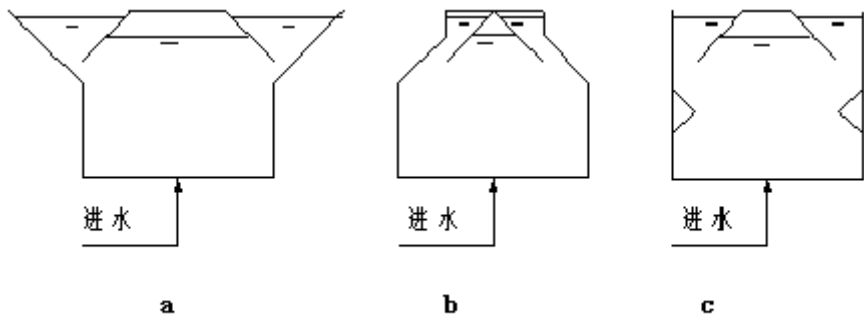


图3 UASB反应器几何形状和沉淀区的关系

从反应器的形状有矩形和圆形这两种反应器，已大量应用于实际中。圆形反应器具有结构较稳定的优点，同时对于圆形反应器在同样的面积下，其周长比正方形的少 12%。所以圆形池子的建造费用比具有相同面积的矩形反应器至少要低 12%。但是圆形反应器的这一优点仅仅在采用单个池子时才成立，所以，单个或小的反应器可以建造成圆形的。

当建立两个或两个以上反应器时，矩形反应器可以采用共用壁。当建造多个矩形反应器时有其优越性。对于采用公共壁的矩形反应器，池型的长宽比对造价也有较大的影响。对于大型 UASB 反应器建造多个池子的系统是有益的，这可以增加处理系统的适应能力。如果有多个反应池的系统，则可能关闭一个进行维护和修理，而其他单元的反应器继续运行。

三、UASB 反应器的设备化

1、矩形(钢筋混凝土)结构反应器

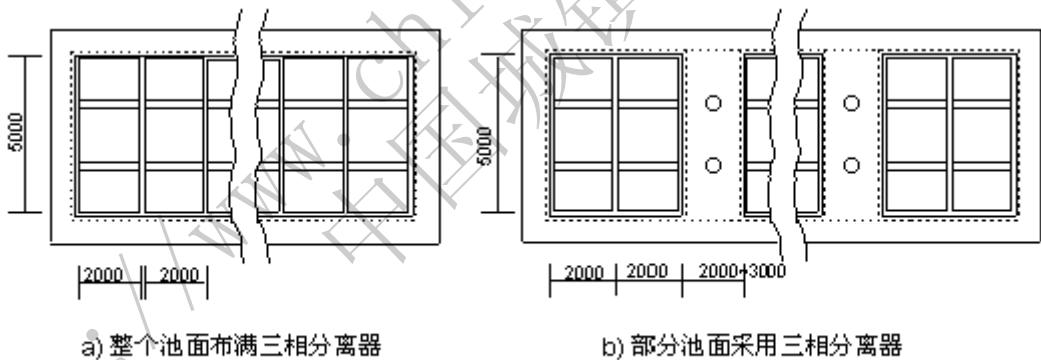


图4 矩形单池UASB反应器装配式三相分离器和反应器平面尺寸布置

混凝土结构的 UASB 反应器是最为常见的结构和材料型式，但是采用标准化和系列化的设计必须考虑结构的通用性和简单性，在此基础上形成的系列化才推广的价值。池体的标准化主要是根据三相分离器的尺寸进行布置的，笔者采用的三相分离器的平面尺寸是 2×5m。根据这一形式布置池体有以下几种方式(图 4)。图 4 中(a)为整个池表面均采用三相分离器的形式，而图 4b 是池顶的一部分采用池体本身结构构成气室。这样可以节省一部分三相分离器的投资。标准化可以分为单池单个分离器和两个并列分离器，大型结构可采用双池公用壁的形式。很明显如果需要也可以构成双池每池两组分离器的形式。由于三相分离器的尺寸原因，池子的宽度一般以 5m 为模数，长度方向以 2m 为模数。原则上如果采用管道或渠道布水，池子的长度是不受限制。如前所述由于反应器的长宽比的范围涉及到池子的经济性，所以在上述范围内选择要结合池子组数考虑适当的长宽比。

表 1 矩形反应器的平面尺寸和有效体积的选用表格(体积单位: m³)

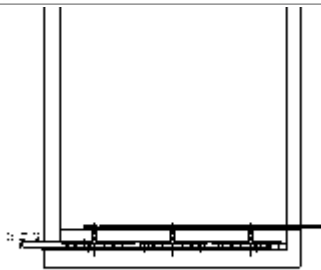


图5 矩形混凝土反应器的工程剖面图

池长(m)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
单池宽 5m	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
双池宽 5m	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
池长(m)	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
单池宽 10m	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
双池宽 10m	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
注: 反应器的有效高度为 5m, 一般推荐 UASB 反应器的高度为 4~6m。											

表 1 是根据上述原则给出了UASB系列化的一组选择。从原则上讲安排 2×5m的三相分离器的平面布置还可以有其他多种的平面配合形式如, 宽度可以以 2m为模数, 而长度以 10m为模数, 构成 4×5, 4×10, 6×5, 6×10, 6×15m.....的系列。甚至可以采用三相分离器横竖混合布置的形式。但是考虑通用性和简单性的原则, 推荐表 1 的组合方式。

图 5a是采用混凝土反应器的一种可整体安装的三相分离器设计形式。三相分离器设备固定可以采用牛腿和工字钢支撑的两种形式。需要说明的是由于运行过程中, 三相分离器的气室内有一定量的沼气, 所以会形成比较大的浮力。需要考虑上部的固定措施, 固定措施可以借助出水管和出气管, 以及其他形式。

2、UASB反应器新型结构和材料的开发

1) 德国Farmetic公司的拼装和Lipp公司的双折边咬口制罐技术

国外发达国家的工业废水处理工程大多已采用新设备、新材料和新工艺来设计和建造, 如德国利浦 (Lipp)公司的双折边咬口技术和Farmetic公司的拼装制罐技术就是其中之一。这些技术应用金属塑性加工中的加工硬化原理和薄壳结构原理, 通过专用技术和设备将 2~4mm镀锌或搪瓷钢板建造成体积为 100~2000m³的反应器。具有施工周期短、造价较低、质量高等优点, 其施工周期比同样规模的混凝土罐缩短 60%, 罐体自重仅为混凝土罐的 10%, 比普通钢板罐节省材料达 50%以上, 而且耐腐蚀, 不需保养维修, 使用寿命要达 20 年以上。高质量的自动化安装技术, 反应器的先进性和经济性, 表明这些技术是理想的、适宜于中国国情的现代化技术。

UASB 反应器由于其反应过程和反应产物均有一定的腐蚀性, 其对于材料防腐性能有特殊的要求。采用柔性搪瓷预制钢板或 Lipp 不锈钢复合钢板的防腐形式, 能阻止筒体腐蚀。特殊防腐涂层的开发, 解决了钢制反应器腐蚀问题。同时此项技术由于整体设计合理的罐体结构材料用量大大减少, 降低了造价。并将 UASB 工艺技术设备化, 将技术融于设备中, 形成技术含量高的一体化设备。

a) 拼装制罐技术

拼装技术采用高新技术制成的罐体材料, 以快速低耗的现场拼装方式最终成型, 组成成套化的单元反应器设备, 使污水处理设备的全套装置达到技术先进、配制合理、性能优良、耐腐蚀好、维修便利、外表美观的效果。罐体材料将根据不同反应器采用软性搪瓷或其他防腐形式预制钢板。预制的钢板采用以栓接方式拼装, 栓接处加特制密封材料防漏(见图 6a), 此种预制钢板形成的保护层不仅能阻止罐体腐蚀, 而且具有抗酸碱的功能。

b) Lipp 技术

Lipp 罐制作时薄钢板通过一台成型机和一台咬合机，在成型机上薄钢板上部被折成 h 形而下部被折成 n 形，在咬合机上薄钢板上部与上一层薄钢板的下部被咬合在一起的成型过程和截面形状(如图 6b)。废水处理中被处理废水具有腐蚀性(如酸碱废水)的废水，或处理工艺过程中产生腐蚀性(如厌氧处理)的情况，采用镀锌板无法像搪瓷钢板一样法满足罐体材料具有耐腐蚀的要求。而全部用不锈钢卷板来制作罐体其制作成本相当高，通过复合机械，将镀锌卷板与 0.3mm 厚度的不锈钢薄膜复合在一起，其截面形状如图 6b 所示。

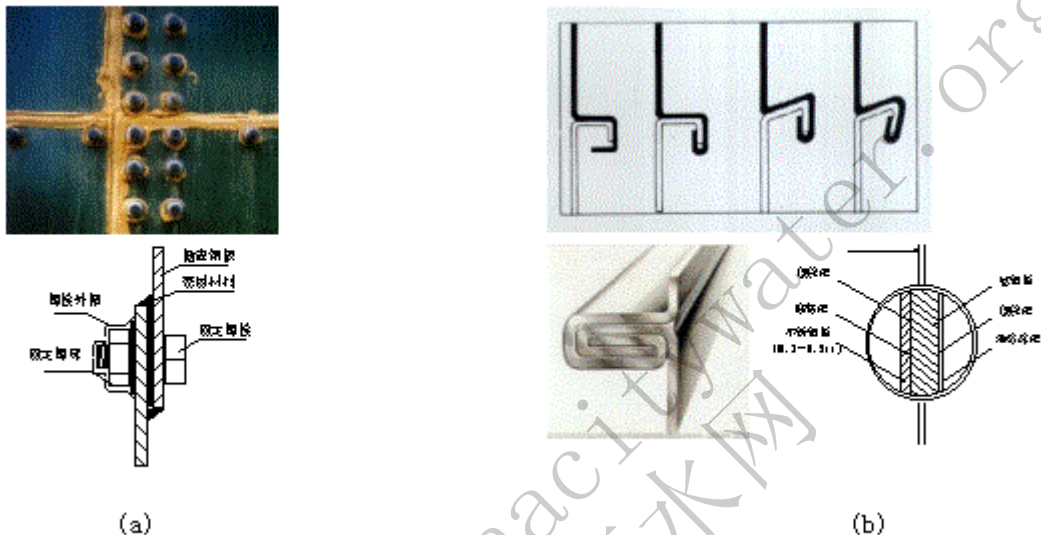


图6 拼装钢板栓接处特制密封(a)和Lipp咬合筋成型过程及截面形状示意图(b)

Lipp 制罐技术是一种具有世界先进水平的制罐工艺与技术，但是需要特殊机械。80 年代国内粮食系统引进多套加工机械，并且在粮仓上有大量的应用。目前也逐步应用于污水处理。

2) 两种罐体的基础和配件

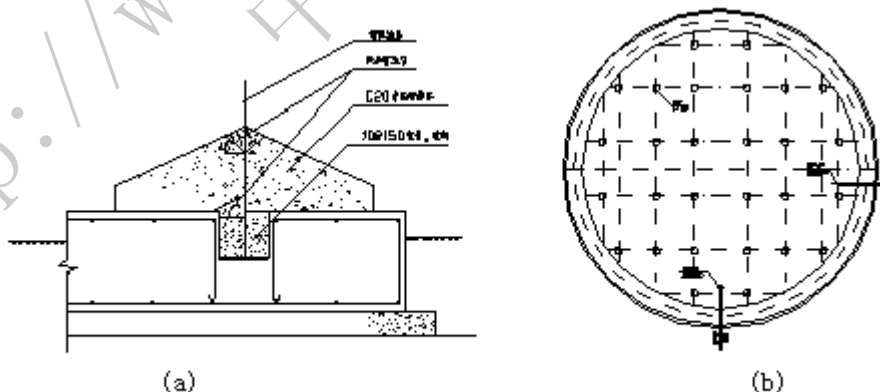


图7 两种罐体的基础处理形式(a)和反应器的基础设计(b同时考虑了各种管道、预埋件等)

应用上述两项技术由于罐体所用材料较少，在基础承载力计算中几乎可以不考虑罐体自重对基础的承压要求。在基础底板浇筑时，按所要制作的罐径在底板表面留一条宽 150mm，深 100mm 的预留槽，槽内按直径均匀放置一定数量的预埋件，反应器制作完成后，放入预留槽内，用螺栓将罐体和预埋件固定，然后用膨胀混凝土和沥青等材料来密封，最后覆细石混凝土保护层(见图 7a)。罐体的设计是设备化的一部

分工作，可对不同高度和直径的反应器的结构进行系列设计。这样整个反应器的设计仅仅是基础的结构设计，这在结构设计中比较简单。图 7b 是基础图设计之一，这样整个反应器池体和基础的设计就形成了系列化。

3、拼装预制和Lipp制罐技术的优点和局限性

施工时间短，质量高是预制拼装和Lipp反应器的优点之一。由于机械化加工和施工方式，工作强度大幅减小，施工难度降低，施工质量得到保障。虽然在预制加工过程中对材质要求较高(如：拼装结构需要冷扎板和搪烧，Lipp罐需要镀锌钢板和不锈钢薄板)。

采用的薄壁结构虽然材料用量减少，但是由于其相等间距的咬合筋(或栓接)的作用，拼装预制和Lipp制罐具有相当大的环拉强度。对于圆形池体，满足了环向受压的要求也就是基本满足了池体的强度要求。环向拉力的强度计算过程，对于不同的材料、不同的介质以及不同的池容，需要进行计算。计算的过程实际上就是寻求最佳材料厚度的过程。例如，对直径为 10m，总高度 6.5m，水力高度为 6m 的 500m³ 反应器，其壁厚可选用了两种不同壁厚的材料用于不同水力高度的位置，罐体下部壁厚为 3mm，而罐体上部均选用 2mm。



图8 Lipp罐(a)和拼装式搪瓷罐(b)制成的UASB反应器

从理论上讲，罐的壁厚可比 2mm 小。但是，考虑到结构稳定性等因素，一般不小于 2mm。对于直径大、高度高的罐体，理论上可选用更厚的钢板制作。但由于国内搪瓷钢板的规格和 Lipp 制罐机械在机械压紧强度，咬口紧密度等方面的限制，罐体的选用材料壁厚一般最大为 4mm。所以，这两种技术国内制作的最大罐体直径在 30~40m。对于特殊的超大超高的罐体，可选用高强度材料。同样，由于价格成本和池形的限制，拼装预制和 Lipp 制罐不适用对于容积小和直径小于 5m 的反应器。从结构上考虑拼装和 Lipp 技术不适用于地下池和方形结构池。

四、不同池型结构的技术经济比较

UASB反应器的材料，可采用碳钢、Lipp(或拼装结构)和混凝土结构。对钢制结构的反应器需进行保温处理，钢池考虑采用现场 4~8mm 厚阻燃型聚苯乙烯泡沫板及彩色防护板保温和装饰，碳钢的防腐材料采用环氧树脂加玻璃布三层做法。混凝土池不考虑保温问题。附属设备如三相分离器、配水系统、走道、扶手、楼梯暂等不考虑。对以上三种结构型式进行了技术经济比较。三种池的容积均按 1250m³ 考虑，表 2 是投资、折旧和施工技术条件的对比表。

表 2 不同结构经济技术比较(投资、经常维护费用和施工)

序号	项 目	混凝土池(万元)	碳钢池(万元)	拼装或复合 Lipp 罐(万元)
----	-----	----------	---------	------------------

1	容积(总)	10×20×7m	φ15×8.0×δ10	φ15×8.0m×δ3
2	重量(吨)	---	36	12.20
3	池体投资费用	56	28.8	14.5
4	保温投资费用	无	4.0	4.0
5	池基础费用	无	3.0	2.4
6	内防腐费用	无	4.0	无
7	外防腐费用	无	2.0	无
	小计	56	41.8	20.9
	经常维护费用			
8	年防腐费	无	4.2(内外)	无
9	设备折旧费	1.87(>30 年计)	4.18(10 年计)	0.92(25 年计)
10	施工周期	>三个月	>两个月	<一个月
	小计	1.87	8.38	0.92
	施工要求			
11	施工周期	>三个月	>两个月	<一个月
12	加工技术要求	土建，严格	焊接，较难	专业设备，易
13	安装难易程度	严格	一般	易
14	搬迁可能性	不可能	一般	可能
15	外观美观程度	低	低	高

由上述表格比较可知从一次性投资来看，以拼装结构和 Lipp 罐的价格最低，而混凝土池最高。但是，钢结构和混凝土的投资相差不大，混凝土使用寿命远远高于碳钢结构池体。并且每年的经常费用一年就相差较大。从整体比较来看，拼装结构或 Lipp 罐从投资上和年经常费用上均较低。同时优点是安装方便，施工周期短。

目前，我国的UASB反应器大多以钢筋混凝土为材料，施工期长，占地面积大，质量难以控制，使一些工程因施工质量不合格而不能正常运行。有一部分处理工业废水的沼气工程采用钢板结构，但传统的焊接方法因用料多、成本高、易腐蚀等问题而影响推广应用。国外的实用经验与国内的示范工程表明，在污水处理工程中，对于 100~2000m³的圆形罐体，拼装预制和Lipp制罐技术具有极好的实用性和极强的竞争性，随着国产化进程的提高，制作成本的降低，拼装预制和Lipp制罐技术必将得到广泛的推广与应用。

参考文献

- 北京市环境保护科学研究院(2000),UASB 反应器设备化及其配套产品开发,国家九五攻关项目研究报告(项目编号: 96-909-05-04), 2000 年 8 月
- 王凯军(1998),厌氧工艺的发展和新型厌氧反应器,环境科学, Vol.19, No.1, pp.94
- 蔡磊(1998),德国利浦制罐技术在大中型沼气工程中的应用
- 王凯军 王晓惠(1998)中国水工业的水处理技术和设备的产业化分析,给水排水, Vol.25 No.11