

环境污染治理实用
技术手册第一册

废水治理新技术——超深层曝气

国家环境保护局情报研究所

废水处理新技术—— 超深层曝气法（深井曝气）

曹凤中 单素云

ICI深井曝气工艺，是一种新型的污水生物处理法，首创于英国。1968年英国帝国化学公司在利用好气细菌生产SCP（单细胞蛋白）的研究中，发明了充氧能力很高的深井培养槽并把这一技术应用于污水处理中。1974年在毕林汉姆建造了世界上第一个半生产性的深井曝气污水处理试验厂。其成果发表于1975年4月。不久，西德KSK公司在埃姆里海姆的马铃薯淀粉厂建造了世界上第一个处理工业废水的深井装置。之后，美国、加拿大、日本、瑞典等都进行了研究并建成了一大批生产处理装置。

“深井曝气工序是一种新型的废水生物处理法。其特点是占地小，效率高，投资少，耐冲击负荷性好，可处理高浓度废水，及常规法难以处理的确基废水、有机氯废水、含磷废水及其他农药废水、高盐有机废水等。由于受井深水压的作用，空气中氧易溶于水中，故氧利用率高达60~90%。深井位于地下，有利于保温，可保证北方地区冬天废水处理有较好的效果。经国内投产的深井曝气装置运转证明，深井工艺确实是目前活性污泥法处理废水中最佳的一种方法”。

1978年，北京市政设计院首先进行了研究。1980年与东北制药总厂进行合作并在该厂建成国内第一座深井曝气装置。自1981年试车投产至今运转正常。1983年通过了由城乡建设环境保护部与国康医药管理总局共同组织的技术鉴定。

1980年上海环保科研所在上海啤酒厂也进行了试验，取得了良

好效果。

一、适用范围

深井法充氧能力高 ($3\text{Kg/hr}\cdot\text{m}^3$)，动力效率高 ($2\cdot3\sim 6\text{KgO}_2/\text{KW}$)，污泥转化率低 ($0\cdot2\sim 0\cdot5\text{Kg污泥/Kg去除BOD}_5$)，因而处理污水快速、高效、费用低，装置简单，结构紧凑，操作容易，占地少，适应性强，不仅能处理城市污水，而且还能处理高浓度可生化的工业废水，也可用于污泥的好气消化。目前已被广泛应用于城市污水以及食品加工、化工、制药、造纸以及轻工等部门废水的处理中。深井曝气法适用范围为：

1、城市生活污水可作为大型宾馆配套的废水处理设施，大型城市污水处理场，国外大的达几万吨/日，其投资较普通法省，占地仅为普通曝气法的 $1/10$ 。

2、食品加工废水。如啤酒废水、淀粉废水、马铃薯加工废水、糖蜜废水、味精废水、乳制品加工、罐头加工、湿式面粉、酵母废水、屠宰废水等。

3、化工废水。如：含酚废水、含氨废水、含油废水、丙烯废水、石油加工产品废水、有机酸、醛、醇类废水等。

4、制药废水。如：磺胺类、维生素类、激素类、解热止痛药类、中药废水，以及各种混合废水，以及常规生化法难以处理的硝基废水等。

5、农药废水，有机氯、有机磷废水。包括常规生化法难以处理的高盐废水，环氧氯丙烷废水等。

6、造纸废水。如：木浆造纸废水、纸浆废水、造纸黑液与中段废水等。

7、抗药素废水。如：土霉素、四环素、利福霉素、头 菌素、青霉素、链霉素、庆大、卡那等。

8、纺织废水、印染废水等。

9、混合废水

以上各种废水均可混合生化，不受影响，尤其是区域废水处理工业废水与生活污水混合处理效果更佳。

二、工艺流程

I·C·I·深井是一个地下深井（直径1—6米，深度50—150米）作为曝气池，并利用静水压力提高氧向液体中的传质速度。其工艺流程见图1。

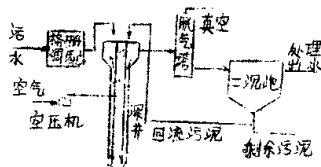


图1 深井曝气工艺流程

第一代深井处理大致分为三种形式（参见图2）。

①同心圆式；②U型管式；③隔板式。在深井内充满了

待处理的废水和活性污泥 并被分隔为降管与上升管两部份,当废水被连续引入深井时,污水、活性污泥与空气沿下降管下降,再返回沿上升管上升,并绕井循环,停留,处理水则靠重力溢流出井去进行下一步即固液分离。

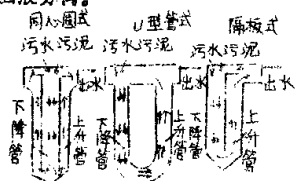


图2 深井装置形式

在深井的顶部设有一定容积的脱气池以脱除废水。由于废水中部分氧已被利用,因此不能再作为空气使用。

为了防止粗颗粒与杂物进入深井造成堵塞,故在深井之前设有予处理装置。予处理有二个内容:

一是格栅与泥沙等以去除固体杂质;

二是中和、絮凝、调碱等以保证进水水质稳定、营养充分。

在结构上,深井脱水池顶部上应尽量密封以防止杂物掉入造成堵塞。

深井的材料大部分为钢材,为了防止废水的腐蚀,采取一定的防腐措施,如刷防腐漆,涂环氧树脂层,再外面包环氧玻璃钢;在国外还有用钢管加内衬水泥层等。下降管大多为钢管,也有用工程塑料中间充以玻璃布条,一方面防止腐蚀,二是加工方便,成本也低。因此,为了防止井管腐蚀造成地下水污染,国外在井壁外

面采用灌水泥浆固化而形成外包一层水泥管的办法来解决这个问题。这么做无疑增加了大量的费用与材料、工时，也增加了施工困难。要确保整个水泥管不渗漏在施工上是很困难的，技术上也有不少难题。国内苏州第一制药厂及杭州农药厂也碰到了这个问题，水泥灌浆是失败的。尤其对国内，机械化程度差，很难保证做到灌浆的质量。但目前已有灌浆成功的例子。

第二代及第三代深井结构较复杂，但其优点是能够克服第一代井中供氧不足及井喷等现象。

国内外围绕深井曝气是否会对地下水源造成二次污染问题而展开的争论近来已有定论。深井曝气只是利用地下空间与静水压力，只要措施得当，是绝对不会对地下水造成污染的。在湍流与充氧的状态下，钢材的腐蚀是很小的。国内某厂五年实测仅腐蚀 0.1mm 。日本曾用超声波进行 100 米井上对管壁进行测定，结果也是五年仅腐蚀 0.1mm 。因此，一般的深井寿命在 50 年以上是没有问题的。鉴于以上数据，国内大多数单位在设计中根本不采用水泥灌浆这一不必要的浪费措施。正由于为了慎重观测，有的地区采用边上打观测井的做法。一旦渗漏即可测得。这么做在一个地区做一只已是足够了，不过这样增加了投资费用，也不是必要的。保险与保守不同。否则，国家与治理单位在经济上遭受相当大的损失。如上海××厂，采用以上措施，多增加了 30 多万的投资。实在是多此一举，把深井曝气投资少的优点反而抹杀了。

三、运行方式

深井的循环有两种方式，液提；气提。

液提：即以机械循环的方式。借助外界的力量，如水泵，造成井内水流循环。这个循环可使液流速度达到 $1-1.5$ 米/秒，大大高于 0.3 米/秒的气泡上升速度。这样，就可利用循环下降力把空气抽吸入液流中（或由外界鼓入液流中），将气泡夹带至井底，使气液充分接触，传递氧，以达到净化之目的。液提的流程见示意图 3。

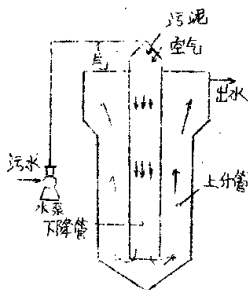


图 3 液提示意图

液提泵可用一般离心水泵或螺旋泵、轴流泵等。目前，东北制药厂在深井曝气装置中采用液提法，具有操作简便、安全、稳定等优点。但在较大规模的井中则宜采用气提法，以减少能耗。

在机械循环、超深层曝气筒中，液体循环所产生的阻力是利用装置在井口的水泵来克服的。这样，下降液流一直可延伸至井口的自由液面之上，构成一个反口形的虹吸装置。运行开始时，将虹吸

管内空气抽空。然后启动水泵，使液体循环（见图4）。由于采用了机械循环，生化所必需的空气可在脱气槽的自由液面之上的位置注入。从而增加了气液接触时间，提高了氧的利用率。循环液中的废气在脱气槽中充分脱除。这对于保证机械循环是十分必要的。图5为机械循环中气泡空隙率 ε 随水深 X 的变化模式。

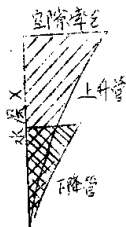


图4 气提循环时
井内空隙率
 ε 随水深 X
的变化模式

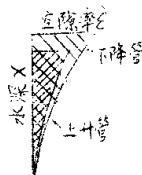


图5 机械循环时
井内空隙率
 ε 随水深 X
的变化模式

气提：是利用空气提升的原理使废水在井内循环。使空气在造成循环的同时也为基质的去除提供氧〔8〕。

通常，在上升管较浅的位置和下降管较深的位置处设置进气点。运行开始时，首先将压缩空气注入上升管。由于气体的扬升作用，液体开始循环。一旦形成稳定的循环流后，再逐渐向下降管注入空气。最后把注入深井中的全部空气由上升管转换到下降管中。其空气随循环液流被夹带至井底。此时，氧已转入液体中并沿上升管上

升。在上升过程中气体溶解。由井的顶部排出。气提流程可见图6。

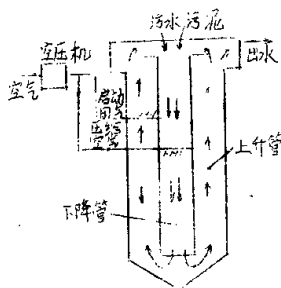


图6 气提示意图

在国外，普遍使用气提法。该法应用于大井中比液提法能节省。只要供电充足，就不会发生逆转现象。第二及第三代深井已从根本上解决了逆转问题。

在国内，气提法试验数据尚不完善，还在进一步探讨中。目前在杭州及苏州均已安装了气提设施，不久将有详细的资料报道。

四、后处理

从超深层曝气筒流出的混合液中，由于不等量的微气泡粘附在活性污泥表面，因而形成污泥一部分上浮、一部分沉淀、一部分悬浮。为此，可根据污水的性质和客观需要来确定固液分离装置的形式。目前国内外经常采用的固液分离工艺有以下列几种：

1、真空脱气、淀粉分离工艺（见图7）。

此工艺将超深层曝气筒流出液在真空脱气塔内脱除气泡，再在二沉池中进行固液分离。经处理后水中SS可降到30毫克/升以下。此工艺国外应用较多，也较为成熟。缺点是真空脱气后加剧了二沉池内缺氧状态，电耗较高。



图7 真空脱气、沉淀分离工艺

2、浮上分离工艺。

此法利用从超深层曝气筒流出液中含有较多微气泡，具有自发的浮选作用来分离混合液中的悬浮物（见图8）。浮选所得污泥与沉淀污泥一道流回流污泥。处理后水中SS含量较高（30毫克/升以下）。

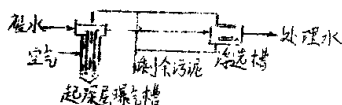


图8 浮上沉淀分离工艺

3、浮上分离、机械脱气、沉淀分离工艺（见图9）。

首先利用混合液中的微气泡自发浮选作用分离部分污泥，然后机械脱气。沉淀分离除去水中的悬浮物。上海环科所在上海啤酒厂

废水处理中采用此工艺，处理后水中SS可小于30毫克/升。本法优点除机械脱气有进一步充氧作用，有助于改善二沉池缺氧状态，动力消耗亦较低。

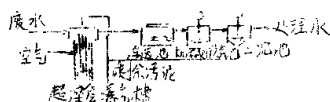


图9 浮选、机械脱气、沉淀分离工艺

4、两段生物处理A法（如图10）。

将超深层曝气筒作前处理装置，将其出水不经固液分离直接送入后段曝气池中，进行二段生物处理并脱气，然后在沉淀池进行固液分离。此法适用于高浓度废水处理及现有处理设备的改造。处理后水中SS可小于30毫克/升。

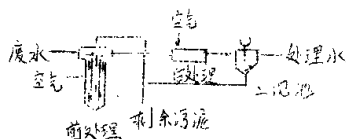


图10 两段生物处理A法

5、两段生物处理B法（如图11）。

将超深层曝气筒流出液先在浮选槽进行固液分离，再进入后段生物处理和沉淀固液分离。此法适用于现有生物处理设备改造，以提高废水的处理能力与处理效果。

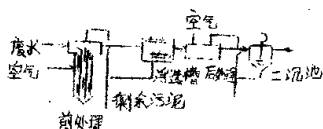


图 1 1 两段生物处理 B 法

具体采用何种形式进行分离则要根据被处理的废水种类及性质来确定。目前，国内大多采用第 2 及第 3 两种方式处理。虽说设备稍显复杂，但节省能耗、分离效果好、灵活、易于操作控制。国外普遍采用的真空脱气虽具有能脱除大部份残余气体，使污泥全部沉降的优点，但能耗大，且脱除后污泥中的残留溶解氧也被真空除去。污泥放入二沉池内时溶解氧已为零。因此，在二沉池中极易发臭、厌氧，影响了污泥的循环使用。国内有的采用先浮选后再用机械脱气沉降（或再连一只斜板沉淀池），效果良好。东北制药总厂目前在生产上已使用机械脱气加沉降的处理方式，获得了较为理想的效果。

五、主要参数

由于井内的液流始保持 $1-1.5$ 米/秒的流速。从而大大超过 0.3 米/秒的气泡自然上升速度，造成气体带着气泡向井下移动。氧溶解在废水中，随着压力的增加溶解度亦增大。提高了充氧效率，加快了废水净化过程。在深水中比较重要的参数有空隙率 ϵ ，它代表气液混合流中气体的含量（体积比）。在气泡于水中自

由上升的两相流中，当空隙率 ε 达到大约0.2以上时，会明显发生气泡合并现象。因此，深井的基本设计规则是： $\varepsilon_{\max} > 0.2$ 。

在深井中各点的 ε 是不一样的。在气提式循环中， $\varepsilon_{\max}$ 发生在上升管的顶端；而在液提式中， $\varepsilon_{\max}$ 在下降管进气点的出口。但无论哪一种形式，若维持在 $\varepsilon_{\max} < 0.2$ ，深井整体的 ε 值就很小，液体容积系数 $(1 - \varepsilon)$ 大致为一常数，因此可以将流经深井全长的流速作为定值来看待。实际上，下降管与上升管中的流速与 ε 是不一致的。这个差别就是确保深井循环的推动力。在下降管中气泡的上升速度与液流相反，因而气泡流动比液体慢；而上升管中气泡上升与液流同向，因而移动比液体快。所以在同一水深下降管中 ε 值总是小于上升管的 ε 值，其比值 ψ 大致为0.54—0.74。从 ψ 值可以判断管内液体流动情况。

深井的规格由处理量与需要的停留时间而定，根据目前的试验情况大致如下：

COD(毫克/升)	2000 以下	2000—5000	5000—10000
停留时间(小时)	2	5—6	6—12

从目前国内的打井技术与费用来考虑，一般采用直径1—2米井深80—150米为宜，而U型管式的深井则采用直径0.5—1米，深50—80米为好。其他参数如：

井径 0.5—6米

井深 50—150米

空隙率 $\varepsilon_{\max} < 0.2$

液体循环流速 $0.7 \sim 2$ 米/秒

下降管曝气深度 (离地面计) $h_{\text{下}} = 2.4 \sim 5.0$ 米

上升管曝气深度 (离地面计) $h_{\text{上}} = 1.5 \sim 3.0$ 米

井内平均溶解氧浓度 $2.5 \sim 4.0$ 毫克/升

氧利用率 $60 \sim 90\%$

氧转移能力 $1.9 \sim 3$ 公斤氧/小时·米³

动力效率 $2.3 \sim 4.5$ 公斤氧/千瓦·小时。

六、超深层曝气与其它方法处理效果比较

1. 氧的转移特性的比较

由于超深层曝气筒深度大 ($50 \sim 150$ 米), 气液接触时间长 ($2 \sim 6$ 分钟), 加之井内雷诺系数高达 $10^5 \sim 10^6$, 完全处于良好的紊流状态, 因而导致该设备具有较好的氧的转移特性。现将几种曝气方法氧的转移特性列于表 1 中。

表 1 几种曝气方法中氧转移特性的比较

曝气方法	充氧能力 ($\text{kgO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$)	氧利用率 (%)	动力效率 ($\text{kgO}_2/\text{KW} \cdot \text{hr}$)
普通曝气	0.05	5~15	0.5~1.5
纯氧曝气	0.025	90	1.0~1.5
超深层曝气	2~3	50~90	2.3~6.0

2、运行结果比较

1) 日本日立公司的 $\Phi 2.3 \times 100$ 米的超深层曝气筒日处理2万吨造纸废水的结果与其它方法比较(列于表2)。

表2 日立超深层曝气法与其它生物处理法的比较

比较项目	超深层 曝气法	活性 污泥法	接触 氧化法
停留时间(小时)	1.0	7.0	6.5
污泥负荷 ($\text{kgCOD}_{\text{ml}}/\text{kgSS日}$)	0.98	0.2	—
容积负荷 ($\text{kgCOD}_{\text{ml}}/\text{M} \cdot \text{D}$)	4.8	0.7	0.75
MLSS浓度(克/升)	4.5~6.0	2.5~4.0	—
污泥回流比(%)	100~150	50~150	—
剩余污泥生成量 ($\text{kg污泥}/\text{kgBOD}$)	0.2~0.5	0.5~0.6	0.2~0.3
氧的利用率(%)	50~90	5~15	5~15
占地面积(包括沉淀池)	1.0	1.6	1.4
运转费用	1.0	1.4	1.3

2) 上海市环科所用 36 米深的超深层曝气处理啤酒废水试验结果与其它方法的比较列于表 3。

表 3 36 米深层曝气处理结果与其它方法的比较

比 较 项 目	超 深 层 曝 气	活 性 污 泥 法	接 触 氧 化 法
氧 即 利 用 (%)	47~50	4.5~8	5~15
容 积 负 荷 (kgBOD/m ³ ·D)	8.02	0.5~0.6	0.75~0.85
污 泥 浓 度 (g/l)	4.57	2.0	—
污 泥 生 成 率 (kg 污泥/kgBOD)	0.144	0.5~0.6	0.3~0.5

3) 处理量为 30000 m³/日的超深层曝气废水处理厂与标准活性污泥法处理厂结果列于表 4。

表4 处理量20000m³/日的废水处理厂

与其它方法的比较

比 较 项 目	超深层 曝气法*	标准活性 污泥法
废水停留时间(小时)	1.2	8.0
空气通入量(m ³ /分)	15	125
通气深度(米)	50	5
曝气动力(KW)	106	152
动力效率(kgO ₂ /KW·hr)	6.0	1~1.5
氧转移速率(kgO ₂ /m ³ ·hr)	3.0	0.05~0.1
氧利用率(%)	90	5~15

*注 超深层曝气气筒深度为130米。

3、施工技术与造价比较

常用的深井施工方法有钻井法、回转法和挖掘法。

钻井法采用钻头钻。一般可用于打直径1米以下的小井。能保持垂直度。费用省。设备简单。但钻石层有困难。若遇坍方在安全上缺少保证。

回转法采用类似石油钻探中的钻机。可以打1—3米的井。施