

# 射流曝气器研究进展

陈福泰 胡德智 栾兆坤

(中国科学院生态环境研究中心环境水化学国家重点实验室,北京 100085)

郭立志

(西安污水处理厂,西安 710077)

尚海涛 王宝泉

(西安建筑科技大学,西安 710055)

**摘要** 射流曝气技术的应用与完善,有赖于射流曝气器的研制与发展。本文综述了射流曝气器的研究进展,并根据供气方式、工作压力、结构类型、安装方式、安装高度进行了分类,其中着重详述了对研发射流器比较重要的结构类型,最后指出射流曝气器的研究趋势。

**关键词** 射流曝气器 射流曝气 曝气器 射流器

## The research progress of jet aerator

Chen Futai Hu Dezhi Luan Zhaokun

(State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

Guo Lizhi

(Xi'an Wastewater Treatment Plant, Xi'an 710077)

Shang Haitao Wang Baoquan

(Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055)

**Abstract** The technology of jet aeration depends on the research and development of jet aerator. The research progress of jet aerator is presented and classified. Its research trends are discussed, too.

**Key words** jet aerator; aerator; jet aeration; jet

射流曝气是利用射流曝气器将气流或气-液混和流导入曝气池,以增加液体中氧含量的系统<sup>[1]</sup>。它具有下列优点:

- (1) 有较高的氧吸收率和充氧能力,混合搅拌作用强<sup>[1,2]</sup>;
- (2) 污泥活性好,基质降解常数较高,提高了污泥的沉淀性能<sup>[3]</sup>;
- (3) 构造简单、运转灵活、便于调节、维修管理方便<sup>[3,4]</sup>。

射流曝气技术的应用与完善,有赖于射流曝气器的研制与发展。射流曝气器既不是一种气泡扩散装置,也不是一种机械曝气设备,而是介于这二者之间的一种曝气设备,利用气泡扩散和水利剪切这两个作用达到曝气和混合的目的<sup>[5]</sup>。

### 1 射流曝气器发展与现状

射流曝气器是由喷射器曝气器(Ejector aerator)发展而来的<sup>[1]</sup>。喷射器曝气器自20世纪40年代就开始应用了。射流曝气器保留了喷射器曝气器的优点,同时克服了它的不足之处。

将射流器作为曝气设备用于处理污水,最早是在1947年,由美国DOW化学公司处理其含酚废水,规模为185 000m<sup>3</sup>/d,共布置了724只射流器,采用压力供气,工作介质为二沉池出水或曝气池混合液<sup>[6]</sup>。此后,Powers获得射流曝气活性污泥法的专利<sup>[7]</sup>。20世纪50年代美国宾州大学Kountz指出,当射流器的工作介质是活性污泥混合液,在压力为0.17—0.21MPa下循环流动时,溶解氧速率是喷嘴的函数,随后在牛奶废水的活性污泥法处理中应用了射流曝气系统<sup>[8,9]</sup>。

20世纪60年代末、70年代初,联邦德国Bayer化学公司,采用获得专利的四个一组安装的被称8/14型射流器(即喷嘴直径为8mm,混合管直径14mm)以压力供气方式处理化工废水<sup>[10]</sup>。联邦德国威尔定根化工厂1965年开始用射流曝气进行污水生化处理小型试验,1975年正式投产,每天处理24 000m<sup>3</sup>工业污水<sup>[11]</sup>。同一时期,美国的Richard<sup>[5]</sup>、Le Compte<sup>[12]</sup>及Wilson<sup>[13]</sup>均研究了射流器的曝气原理和应用。日本九州的日明水厂在扩建工程中采用了压力送风射流器,处理废水量为8.4

万  $\text{m}^3/\text{d}^{[14]}$ 。在夏季曝气池水深 10m 的条件下,充氧动力效率为 1.8—2.0  $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ ,比平行运行的 4.5m 深的鼓风曝气(扩散板)的 E 略高,后者为 1.5  $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ 。

20 世纪 80 年代以来,德国两家大的化学公司 Bayer 和 Hoechst 先后完成了采用“高塔——射流曝气活性污泥法”处理化工废水的扩建工程,日处理废水量分别为 16 万  $\text{m}^3$  和 10 万  $\text{m}^3^{[15-17]}$ 。它们采用获得专利的“狭缝射流器”(Slot injector)和“径向射流喷嘴”(Radial flow nozzle)进行曝气。这两种压力供气式射流器结合高塔(水深 25—30m)型的反应器,强化了氧的分布、溶解和利用,减轻了气泡并聚,提高了氧的利用率,可使充氧动力效率达 3.8  $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ 。近年来,德国 Clousthal 工业大学的 Vogelpoh 等人在类似化工上环流反应器中使用了中心部分进气,边缘部分为高速工作水流的射流器在中试规模下处理了啤酒和造纸生产废水。

有关射流曝气器的研究,始于 20 世纪 60 年代,由美国 Houdaille 公司和衣阿华大学土木工程系共同进行,他们对各种控制参数和氧吸收效率的关系进行了初步探索<sup>[5]</sup>。进入 20 世纪 70 年代后,射流曝气器的形状发生了根本改变,采用直径 25mm 以上的新型喷嘴,并成功地用于工业废水和城市污水处理上<sup>[18,19]</sup>。日本西原环境卫生研究所对射流曝气系统进行了一系列实用性的研究开发,该系统于 1982 年被日本建设省评为“省能型曝气系统”。目前在日本,已有许多城市污水及工业废水处理设施应用了射流曝气系统<sup>[20]</sup>。例如:日本北九州市日明污水处理厂,应用射流曝气系统,设计处理水量达到 8.44 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,实际处理量为 7.5  $\text{m}^3/\text{d}$ ,BOD 进水为 136  $\text{mg}/\text{L}$ ,处理后出水为 4.7  $\text{mg}/\text{L}^{[21]}$ 。

国内用射流曝气处理污水的试验研究工作始于 1973 年,由湖北轻工业研究所和武汉建材学院等单位进行了射流器清水充氧试验研究工作<sup>[22]</sup>。1975 年夏,西安市污水处理厂在佳木斯自来水公司对地下水利用射流充氧除铁除锰的启发下,提出了污水生物处理用射流充氧的办法来代替鼓风曝气头和曝曝的叶轮,得到国家建委和西安市城建局的支持,于是设计和安装了一套处理能力为 85  $\text{m}^3/\text{d}$  的污水处理曝气装置,经过试验于 1976 年取得成功<sup>[23]</sup>。1978 年以来,同济大学等单位从城市及工业废水的处理工艺、活性污泥生物学特性进行了较为系统的研究<sup>[24-26]</sup>,并在生产规模下将其用于处理屠宰

水和丝绸印染废水<sup>[27,28]</sup>。北京市政设计院研究了所谓的“型射流器”的充氧性能,并在生物接触法中使用了这种射流器,处理两种工业废水(感光胶片生产中的涂布废水和地毯染纱废水),规模为中试<sup>[29,30]</sup>。20 世纪 80 年代末,同济大学的李天德开发出具有转向锥体机构的射流器,在清水充氧和实际应用中具有较高的充氧能力,并向有关厂家转让了技术产品<sup>[31]</sup>。20 世纪 90 年代末,清华大学的孟立新开发出集曝气与搅拌于一体的新型射流器,其清水充氧能力达到了日本同类产品的水平,并实际应用到 SBR 工艺中<sup>[32]</sup>。

在理论研究方面,陆宏圻对射流器进行了较为深入系统的研究<sup>[33]</sup>,曹海滨对低压水气射流器的性能进行了理论分析与实验研究<sup>[34]</sup>,李天德对气液射流器的传质和剪切分散性能进行了理论分析和实验研究<sup>[31]</sup>。

## 2 射流曝气器的类型

### 2.1 根据供气方式分类<sup>[4]</sup>

根据供气方式的不同,射流曝气可分为两大类:

(1) 压力供气:即用鼓风机向射流器供给空气,其特点是:空气由鼓风机供给,空气量的控制比较方便,可以根据需要把射流器安装在曝气池的底部、顶部等不同的位置,射流器数量多,一般淹没在水中,安装与维修不方便。

(2) 自吸(负压)供气:由射流器喷嘴喷出的高速射流,使吸气室形成负压,将空气吸入,这种射流器通常称为自吸式射流器,其特点是不需要鼓风机。

### 2.2 根据工作压力分类

射流曝气器从工作介质的压力上划分,可分为高压型与低压型两种<sup>[23]</sup>。高压射流的工作压力为 0.2MPa,低压为 0.07MPa。高压型射流器喷嘴流速为 20  $\text{m}/\text{s}$  左右,低压为 12  $\text{m}/\text{s}$  左右。低压型射流器理论上的能量消耗是高压型的 1/3,而实际上可能还要少一些。

### 2.3 根据结构分类<sup>[4,33]</sup>

(1) 单级:又分为单喷嘴和多喷嘴两种形式。

(2) 多级:一般是两级。第一级吸气后,液气混合流在第二级再吸气,这样充分利用射流能量。

目前所采用的射流器结构差别很大,其主要形式如下:

(1) 单级单喷嘴射流器。该射流器包括:喷嘴、

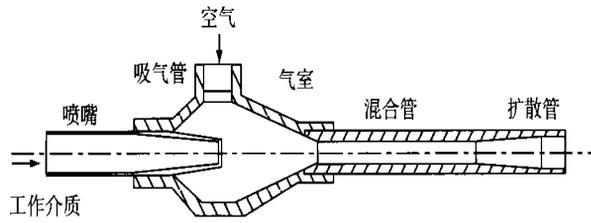


图1 单级单喷嘴射流器

吸气室、混合管(又称喉管)、扩散管等部分,自吸供气,动力效率为 1.4—2.0kg O<sub>2</sub>/kWh。它是西安污水厂、同济大学、北京市政设计院、北京建工学院等单位所研究和采用的主要类型,也是国内生产和应用较为广泛的形式(如图 1)。

图 2、图 3 是 1968 年美国 West 和 Paulson 试验所采用的射流器形式及结构安装,采取压力供气<sup>[5]</sup>,该射流器的清水充氧试验,动力效率为 2.08 kg O<sub>2</sub>/kWh。1970 年,美国 Willson 等取消了射流器混合管及扩散管,并把喷嘴直径扩大到 2.54cm 以上,旨在减少设备成本及维修费,并解决了堵塞问题<sup>[18,19]</sup>。采取压力供气,动力效率达到 2.54kg O<sub>2</sub>/kWh,如图 4,上海工业建筑设计院也采用了这种射流器。图 5 是 1976 年联邦德国专利的一种射流器,这种射流器以混合液作为工作液体,吸入室与扩散管构造比较特殊,其喷嘴大头外径占吸入室内径的 75%以上,可达 85%—90%。尺寸小者采用下限,当喷嘴大头外径为 5.08cm 时可用 75%,10.16cm 时可用 85%—90%。

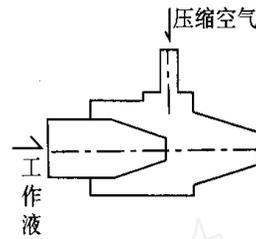


图4 Willson 射流器

(2) 单级多喷嘴射流器。1968 年联邦德国的 Bayer 化学公司采用的射流器,单体结构见图 6。每单体有四个喷嘴,设在曝气池底部,池深 4.8m,淹没深度 4.2m。这种射流器属于压力供气,喷嘴直径为 8mm,每立方米曝气池体积设一个喷嘴。运行参数见表 1。这种装置的缺点是构造比较复杂,制造、安装、检修比较困难。图 7 是另一种单级多喷嘴射流器,其工作压力要求高,动力效率为 1.3kg O<sub>2</sub>/kWh,构造复杂,容易堵塞。

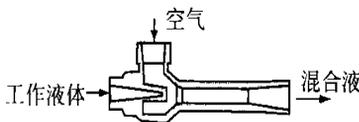


图2 West 射流器

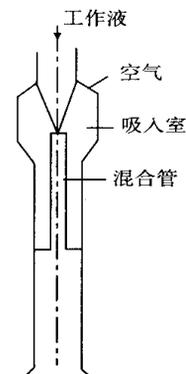


图5 联邦德国射流器

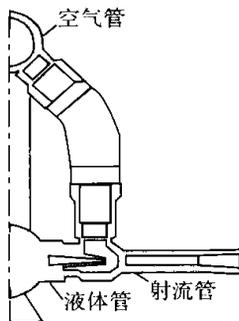


图3 Paulson 射流器

(3) 双级射流器。武汉轻工院、武汉水电学院及武汉建材学院等单位研制的双级射流器见图 8。其特点是采用了两级喷射的形式,即利用第一级混合管作为第二级的喷嘴,使水射流的能量得到充分的利用。当工作压力为 1kg/cm<sup>2</sup> 时,喷射系数约为

表 1 Bayer 射流曝气器运行参数

污水量 (m <sup>3</sup> /h)	空气量 (Nm <sup>3</sup> /h)	流量比	送气深度 (m)	氧利用率 (%)	充氧能力 (kg/h)	能耗 (kWh)	动力效率 (kgO <sub>2</sub> /kWh)
720	3320	4.64	4.2	7.7	340	115	2.95

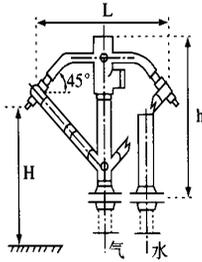


图 6 Bayer 射流器

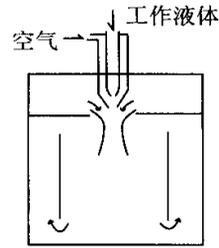


图 9 美式两极射流器

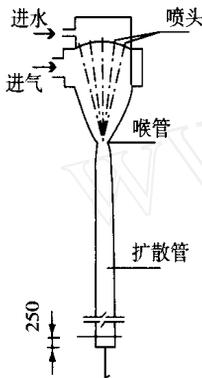


图 7 多喷射流器

0.8—0.9,动力效率为 2.07kg/kWh,二级与一级进气比约为 1 (15—17),随着工作压力的增加,比例逐渐增加。图 9 为美国 1974 年的一种射流器,从射流器形式来看,类似威尔逊式射流器,即无混合管,不过是两级喷射。

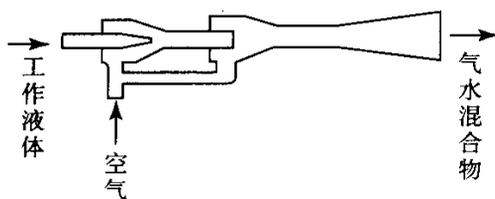


图 8 双级单喷嘴射流器

### 2.4 根据安装方式分类

射流曝气器的安装方式分为竖直(垂直)安装(立式)和水平安装(卧式)。由于液、气两相的水平运动与垂直运动在流态上有较大的差异,所以射流器的安装方式对它的性能有一定的影响<sup>[33]</sup>。

竖直安装:向下射流,除了本身具有的能量外,还受重力作用,吸气室、混合管内都不存水,因此阻力小,水利条件好;流动比较对称,也会减小阻力损失;工作停止时,整个射流器内不存水,易维修管理,尤其是抽送有腐蚀气体时,更显示出其优越性;但垂直安装需要一定高度的空间<sup>[35]</sup>。水平安装:射流为水平方向,在流动过程中由于重力的影响,气泡相对地集中在上部,使阻力损失增加。

通常水平安装的负荷都比较大,而竖式的负荷都较小;从生产管理上要求射流器的负荷小些,均匀地布置到曝气池中将使水、泥、气混合均匀,同时也便于检修。由上所述,在工艺没有特殊要求的情况下,宜采用竖直安装<sup>[35]</sup>。

### 2.5 根据安装高度分类

安装高度系指射流器喷嘴断面中心距曝气池水面的垂直距离。射流器在曝气池中的安装高度分为<sup>[26,33]</sup>:

- (1) 浸没式安装:射流器喷嘴置于曝气池水面下一定深度处(射流器可位于曝气池内或池外);
- (2) 低位安装:射流器扩散管出口断面比曝气池水面高 0—2m,由于高度较小,比较容易安装;
- (3) 高位安装:射流曝气器扩散管出口断面比曝气池液面高 8m 以上。在相同的工作压力条件

下,高位安装比低位安装的吸气量可以增加 30%左右。这是由于利用液体位能对气体进行了附加压缩的缘故。但提升液体到高位安装的射流器,需要增加耗用功率,而且需要较大的空间来满足安装高度的要求。因此,使这种安装方式的应用受到限制。

研究结果表明<sup>[26]</sup>,射流器的安装高度对充氧动力效率  $E$  的影响是很大的。高位射流的动力效率最低,低位安装稍高(提高 30%以上),浸没式安装最高(比低位安装高 20%左右);另外,浸没式安装比低位安装的氧利用率高(高约 25%左右)。

### 3 射流曝气器研究趋势

对射流曝气器的研究,主要从射流器结构与充氧原理方面进行探讨,目前射流器形式多样,应用条件也不同,需要探讨各种射流器的结构及充氧原理,比较它们的优缺点,发展更为理想的曝气射流器形式,特别是针对已有射流器的不足之处研制开发新型射流器,不断提高其充氧效率,最终提出新型射流器的概念模型和理论。

另外,不同的原水水质条件和应用条件,会对射流曝气器的效能曲线产生一定的影响。根据不同的原水水质条件和应用条件,开发不同型号的射流曝气器,使射流曝气技术得到进一步推广应用。

### 参考文献

- [1] Jerry Y. C., Mikkel G. Jet aeration theory and application. Prodeeding of the 28th Industry., Waste Conf., 1973, 1—12
- [2] Juberma O., Krause G. Ejector aeration in the biological clearing of sewage. Chemie-Ingenieur-Technik, 1968, 40(6): 288—300
- [3] 永彬,俞庭康等.射流曝气器充氧性能研究.同济大学学报,1993,21(1):129—133
- [4] 金儒林,车武.射流曝气法的评述.建筑技术通讯,给水排水,1981,7(1):34—42
- [5] Richard. W. W., Wayne L. P. Jet aeration in activated sludge system. JWPCF,1969,41(10):1726—1736
- [6] Harlow I. F., Powers T. J. Pollution control at a large chemical works. Ind. And Eng. Chem., 1947, 39:572—580
- [7] Powers T. J. Method for treating sewage. U. S. Patent number 2,479,403, Aug., 1949
- [8] Koutz R. R. Big problem:dairy waste-striking solution:bio-oxidation. Food Eng., 1954, (10):89—96
- [9] Witte J. H. Efficiency and design of liquid gas ejectors. J. of British Chemical Eng., 1965, (9):9—24
- [10] Dos 2408064 Sept. 1975, DE 2408064, Dec. 1983
- [11] Douglas E., Dreier. Theory and development of aeration equipment. Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes. Household Pub. Cop., New York, 1975
- [12] Compte A. R. et al. A case study of effluent treatment by channel aeration propelled and oxygenation with ejectors. WPCF,1971,44(10):1021—1036
- [13] Wilson G. E. Max oxygenation capacity design and control of jet aeration system. US. Pat., Appl., 1972
- [14] 郑圭实. 日本日明喷射式深层曝气法简介. 建筑技术通讯. 给水排水,1980,6(2):45—49
- [15] M. zlokarnik. Tower-shaped reactor for aerobic biological wastewater treatment. Biotechnology, 1985, 23(2):136—152
- [16] 李天灏等. 高塔射流曝气活性污泥法. 建筑技术通讯. 给水排水,1988,14(4):35—38
- [17] 李天灏等. 联邦德国三大化工公司的废水生物处理. 化工环保,1988,8(6):23—36
- [18] Wilson, G. E. Proportioning and hi-rate mixing with ejectors. Penberthy Houdaile Industries Prophetstown. Illinois,1971. 136—148
- [19] Wilson, G. E. Application of jet aeration to sugarcane waste water. Penberthy Houdaile Industries Prophetstown. Illinois, 1971. 235—246
- [20] 平送晃. シェットエヤン. ツヨソシヌテム(JAS). 造水技术,1983,9(5):68—79
- [21] 仲道,田岛等. 北九州市日明下水処理場の概要. 下水道協会志,1977,14(163):45—62
- [22] 湖北省轻工业设计研究所,湖北建筑工业学院等. 污水生化处理新型曝气装置—射流曝气机的试验研究报告(一),1977. 1—38
- [23] 刘永令. 污水射流曝气生物处理浅析. 城市污水处理技术,1984,4:58—69
- [24] 同济大学等. 射流曝气活性污泥法的研究. 城市污水处理工艺研究,1979
- [25] 同济大学等. 射流曝气活性污泥法的研究. 活性污泥生物学特性的报告,1980
- [26] 同济大学等. 射流曝气活性污泥法的研究. 曝气用射流器性能研究,1979. 1—37
- [27] 同济大学等. 射流曝气活性污泥法处理禽兔加工废水生产性试验报告,1985
- [28] 钱秉钧等. 射流曝气三相生物流化床处理丝绸印染废水试验. 环境污染与防治,1983,5(4):36—44
- [29] 北京市政设计院等. 型射流器工作性能测试报告,1982. 8
- [30] 北京市政设计院等. 射流曝气接触氧化法处理工业废水. 环境保护,1982,(10):28—34
- [31] 李天灏. 气液射流器传质和剪切分散性能的研究及其在废水处理中的应用. 同济大学博士论文,1989. 1—9
- [32] 孟立新. SBR工艺中JAS曝气器的研制与应用. 清华大学硕士学位论文,1997. 1—15
- [33] 陆宏圻. 射流泵技术的理论及应用. 水利电力出版社,1989. 1—8
- [34] 曹海滨. 水气引射器性能的理论分析与实验研究. 西安交通大学硕士论文,1992
- [35] 李燕城,邱少强. 水气射流抽气器工作性能的研究. 建筑技术通讯. 给水排水,1982,8(1):17—20

(责任编辑:郑晓梅)