

给排水絮凝池的网板反应技术

贾万新 蒲钢青

(中国市政工程西北设计研究院 兰州 730000)

【摘要】在给水排水处理工程中,反应技术是举足轻重的工艺环节,本文从反应的基本原理出发,论述了网板反应技术的原理及验证情况。网板反应技术是中国市政工程西北设计研究院的一项发明,已在国内许多工程中使用,效果良好。

【关键词】网板反应 技术原理

絮凝池的网板反应技术是从过网水流的流体力学原理出发,发明的新型絮凝反应设施。该项反应技术首先经过模型试验,以后又以不同形式在许多给水工程中广泛使用。多年的科研和生产实践表明,网板反应具有效率高、能耗低、反应效果好、停留时间短等许多优点,是一种符合絮凝原理,设备简单易行的良好反应形式,具有广阔的应用前景。

1 网板反应原理

1.1 网板反应是建立在近代流体力学和紊流传递的基础之上的。近代流体力学的发展使人们认识到流动在絮凝反应池中的紊流是一种随机的涡旋运动。各种大小不等的涡旋充塞着水体。在这种充满着各种尺度涡旋的水流中,各点流速的数值和方向不断发生变化,流速随时间的这种变化即所谓流速脉动。流速的脉动必将引起相邻各层流体间的动量和质量交换,也引起压力、温度和浓度的交换和脉动。流速和压力的脉动周期有大有小,大周期脉动中有小周期脉动。小周期脉动附有更小周期的脉动,或者大小周期的脉动交替出现。这种周期性的脉动构成了紊流流速和压力脉动的连续频率谱。

紊流运动是由不同尺度的涡旋组成的,其涡旋尺度在很宽的范围内变化。很自然,水流运动的能量也就分布在这些不同尺度的涡旋之中。紊流理论常用能谱函数表示紊流能量的分布特征。能谱曲线按波数大小可以分为以下三个区域:

一是小波数的大涡旋区。大涡旋从水流周界(外界)获得能量,并将其一部分能量传送给较小一级的涡旋。由于外界能量是大涡旋产生的基础,因此系统的几何形状等因素都对大涡旋的发生产生明显影响。又由于湍流的雷诺数都很大,所以大涡旋几乎不受粘性的影响而较为持久。

二是载能涡旋区。在此区间,能谱函数具有最大值。涡旋的相对变化率与全部动能的衰减具有相同的数量级。紊动取决于紊流能耗 ϵ ,粘度 ν (运动粘滞系数)和紊流发展时间 t ,而且由三者所构成的无因次数:

$$\frac{\epsilon \cdot t^2}{\nu} = \text{常数}$$

此无因次数可以理解为紊流结构的雷诺数。这表明紊流在衰减过程中其雷诺数将保持不变。三是大波数的小涡旋区。在此区域因素流的脉动动能衰减相对较慢,可以认为涡旋处于统计平衡状态,故亦称统计平衡区。在此区域中,涡流的紊动性质只取决于水流的内部条件,即由表达内部

条件的参数 ϵ 和 ν 来确定。

正如一切流体动力学过程一样,流动的性质由惯性力与粘滞力的比值来确定,即由雷诺数来确立。在统计平衡区内虽然各种波数的涡旋都消耗能量,但波数越大,能量消耗也越大。当紊流发展到最小涡旋特征波数 α_d 时,涡旋的惯性作用和粘性作用相平衡。在这种情况下,小涡旋处于惯性区向粘性区过渡的临界状态,其惯性力与粘滞力之比等于 1,即 $Re=1$ 。这说明供给紊流的脉动动能与消耗的动能处于平衡状态。柯尔莫果洛夫按照涡旋的耗散强度等于紊流中单位时间内的能耗 ϵ 的假设,导出特征波数 α_d 与 ϵ 的关系式。

$$\alpha_d = \frac{\epsilon^{\frac{1}{3}}}{\nu^{\frac{1}{3}}}$$

据此,紊流中最小涡旋的平均尺度 λ_0 为:

$$\lambda_0 = \frac{1}{\alpha_d} = \frac{\nu^{\frac{1}{3}}}{\epsilon^{\frac{1}{3}}}$$

此即涡旋的临界尺度

可以对临界尺度 λ_0 作出以下估算:当选用速度梯度为 $10S^{-1}$, $\nu=0.01cm^2 \cdot S^{-1}$, 则 $\epsilon=25erg \cdot g^{-1}s^{-1}$, 这样 $\lambda=1.4 \times 10^{-2}cm=0.14mm$, 可见,这样的涡旋尺度与絮凝反应池中的微絮体具有相同的数量级。

由于粘滞性的影响已不能忽略,当涡旋尺度小于临界尺度 λ_0 时,涡旋将在粘滞力的作用下逐渐湮灭。

水流的全部紊动动能都包含的涡旋之中,涡旋运动造成了强烈的动量交换和质量传递。比分子扩散高几千倍的紊流扩散也是由尺度较小的涡旋来完成的。1954 年列维奇在上述流体力学研究的基础上,根据紊流扩散和各向同性紊流理论(紊流的统计平均值与方向无关的紊流称各向同性紊流)建立了紊流条件下颗粒碰撞絮凝的基本方程式:即

$$N = 12\pi\beta \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\nu}} R_c^3 n_0^2$$

式中: N ——单位时间因素流扩散而发生的颗粒碰撞总数,是絮凝速度的表征。

β ——比例常数,约为 $1/4$;

ϵ_0 ——单位水体中单位时间平均消耗的能量;

ν ——运动粘滞系数。

上式反映了紊流运动中,影响絮凝诸因素间的基本关系,目前已为多数学者所接受。列维奇认为,微粒的碰撞是由小尺度的涡旋,即微涡体带动而致,这些涡体的尺度与水中的微粒(包括初级絮凝体)处于同一数量级。不难理解,当微粒被尺度很大的涡旋所卷带时,各个微粒只能随涡旋一起做迴转运动,微粒间不会产生相对运动而碰撞结合。当涡旋尺度比微粒小很多时,涡旋又难以推动微粒而运动。所以只有与微粒直径处于同等数量级的涡旋,才能导致微粒的碰撞絮凝。可以认为:由尺度较小的涡旋,即微涡旋体所产生的紊流扩散是絮体成长的主要动力学因素,反应池水力条件的好坏主要归结为能否产生与絮体粒径相适应的微涡体。

1.2 网板反应的提出是基于以下的 4 点考虑,概括地说就是:综合安排、密集涡体、沿程递增、均匀分布 4 个方面。

1、综合安排,絮凝反应过程是在外加能量的作用下,依靠水流的紊动扩散来实现絮体的不断

成长的。反应能耗、紊流扩散和絮凝效果构成了反应过程的统一体系,因此必须将这三者统一起来综合考虑安排。争取以最小能耗,取得最佳的絮凝效果。

2、密集涡体。只有与絮体粒径(d)相适应的微涡体才是造成絮体碰撞成长的主要因素,这样的微涡体在反应池中分布越多,反应池的效率越高,因此,应当创造一个让微涡体密集出现的水力条件。

3、沿程递增:随着反应过程的不断进行,絮体的粒径也不断增大,因此要设法控制水流的涡旋运动,使水流中产生的微涡体尺度既与絮体粒径适应,又能沿程递增。

4、均匀分布:在通常的反应池中,如隔板反应池中,涡旋大多从壁面附近产生,然后再向水流中心推移并串级破碎为较小的涡旋。这就使得有利于絮体成长的微涡体仅仅分布在水流的中心部分,以致反应池的容积效率不能得到有效利用,而且水流的能量也大量消耗于壁面阻力,制约了能量的利用。如能采取措施,使微涡体在过水断面上均匀分布,则反应池的絮凝效率即可得到提高。

1.3 网板反应池主要依据涡街和过网水流的紊流尾迹原理。我们知道当水流绕过一个非流线形的园柱体时,由于发生边界分离现象,在园柱体后部两侧便产生涡旋。涡旋长大到一定程度即从柱体分离,顺流而下,随后新的涡旋又孕育成长起来。这样,在柱后尾流中便出现了两列平行排列而又互相交错的涡列,称卡门涡街。理论分析和实践观测都表明,当 Re 约超过 5 时,层流边界层将发生分离,在紧贴园柱体的背后形成一对稳定的弗普尔涡旋。当 Re 提高至 40 时,涡旋开始脱离园柱体,于是一个周期性的尾流和交替错开排列的涡街就形成了。在 $Re < 150$ 时,涡街是层状的,当 $Re \approx 300$ 时,涡街便出现紊流状态,而在下游 50 个直径的距离以外,它是退化成完全的紊流。研究表明在 $Re < 3 \cdot 10^5$ 的广大范围内,涡旋以一个相当明确的频率周期性地脱落释放。斯特罗哈尔发现,涡旋脱落频率 f 与流速 U 成正比,与园柱体的直径 D 成反比即:

$$f = S_r \frac{U}{D}$$

而且比例系数 S_r (斯特罗哈尔数) 在反应池的流速范围内为一常数, $S_r = 0.2$ 。试验观测表明,初始的涡旋大小基本与柱体尺寸处于同一数量级。在离柱体较远处涡旋尺度及其间隔趋于增加。

另外根据泰勒等人对紊流的研究,流过网状物体的水流,其涡旋运动是各向同性或近似各向同性的,即在过网水流中,速度脉动等参数在所有的方向上基本相同,而且所产生的涡旋体与网格尺寸有关。这样我们就可以根据卡门涡街和过网水流的原理,在反应池的过水断面上设置一个个网板,同时控制网板孔径和网线的尺度,使经过网板而产生的涡旋与絮凝体的粒径处于同一数量级,或使其数量级相近。这样,反应池中的涡流运动就能够控制,我们也有可能根据絮体在反应池中絮结长大的规律来设计反应池,以提高反应池的效率。

2 网板反应的试验结果分析

为了对网板反应进行了科学验证,我们专门做了一系列试验研究。由于絮凝群体的沉降特性可通过絮体的沉速分布曲线全面准确地表达出来,因此,反应池中絮体的沉速分布是判别反应池工艺的主要依据,试验结果表明,网板反应的絮凝群体,其沉淀去除百分率一般比对照组高出 5%~10%,网板反应的剩余浊度也比对照组为优,现分别介绍如下:

2.1 沉速分布情况对照:试验表明在原水浊度 169~211NTU,投药量 4mg/L 的条件下,虽然网板反应的时间稍短,但经网板反应后 V_{10} (即百分率坐标 10 所对应的沉速值)已达 0.43mm/s,而无网对照组的 V_{10} ,仅 0.013mm/s,即网板反应所生成絮凝群体,其 90%的颗粒沉速均大于 0.43mm/s,而对照组的絮体,其 90%的颗粒沉速仅在 0.013mm/s 以上。网板反应的絮体沉速 V_{10} 是无网对照组的 32 倍。在沉速分布曲线上无网对照组曲线较陡,这说明网板反应生成的絮体均匀,一般常用 d_{60} 与 d_{10} 之比来表征颗粒的不均匀性。如用 $\frac{V_{60}}{V_{10}}$ 表示絮凝群体的不均匀系数,则网板反应的不均匀系数 K 为:

$$K = \frac{V_{60}}{V_{10}} = \frac{2.7}{0.43} = 6.28$$

无网对照组的不均匀系数 K' 为:

$$K' = \frac{V_{60}}{V_{10}} = \frac{2.2}{0.013} = 169.2$$

由 K 与 K' 值的比较可以看出,无网对照组的颗粒沉速相差极其悬殊,而通过网板反应所生成的絮体却十分均匀。絮体颗粒不均匀,是水力反应池大量积泥的主要原因之一,因此,网板反应在生成沉速高的絮体和其颗粒均匀方面均优于普通反应池。

在絮体沉速低于 1mm/s 的情况下,网板反应的沉速分布曲线均在无网对照的左上方。这说明网板反应生成的絮体沉速普遍较高。

2.2 沉淀效率:沉淀效率可按下式进行计算:

$$R = (1 - P_0) + \frac{1}{V_0} \int_0^{\infty} V dp$$

式中: V_0 ——是与给定沉淀负荷相应的沉速;

P_0 ——沉速 $\leq V_0$ 的絮体颗粒占全部絮体百分数。

沉淀效益表 表 1

日期	流量 L/h	原水 浊度	投药量 FeCl ₃ mg/L	沉淀效率(去除百分率)(%)					
				沉速 0.2mm/s			沉速 0.3mm/s		
				3—6#	3—11#	6—11#	3—6#	3—11#	6—11#
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9.4	600	190	4	96.8	97.9	98.1	94.1	95.1	85.1
9.5	810	211	4	94.0	95.5	90.6	90.0	91.5	86.1
9.7	900	183	4	92.7	95.3	90.1	91.0	86.1	88.4
9.10	720	169	4	89.9	90.4	80.7	89.1	88.5	78.9
10.22	780	368	4		93.5	86.1		88.0	80.6
11.2	1010	372	4		92.5	82.1		85.5	73.6
11.5	1200	289	4		86.5	75.1		77.0	63.6
8.13	500	464	10	9.28	98.0	93.0	96.5	96.3	92.0

注:3—6#,3—11#均为网板反应,6—11#为无网对照组。

表 1 是根据试验结果按上式计算求得的沉淀效率。从表 1 所列数字可以看到,9 分 48 秒的

网板反应,在特定沉速为 0.2mm/s 时,其沉淀效率已高达 97.9% ,而无网对照组(6~11#)虽经历了 13 分 20 秒的反应,其沉淀效率仅为 85.1% ,从表中我们还可以发现,3~6# 与 3~11# 管的沉降效率相差不大,其相应效率都很高。这说明网板反应不必延用很长的反应时间即能达到预期效果。从前面谈到的累计沉速分布曲线上也能看到这一问题。这说明经过约 10 分钟的网板反应后,再延长反应时间,絮体已不再迅速长大。絮体的颗粒组成似乎达到了某种动态平衡。这个现象与日本学者丹保宪仁的所谓“最大成长平衡”观点相吻合。按此观点,经过一定反应时间后,絮凝体的成长已达到一种平衡状态而不再能大幅度提高其群体沉降特性。而网板反应达到这种成长平衡所需要的时间较短,相应的沉降性能也比较好。

2.3 絮体成长速度与剩余浊度:试验对絮体在反应过程中的成长状态,进行了系统观测并绘制了絮凝群体的成长曲线。即用沉速分布特征值随时间而变化的关系来描述絮体成长的过程。沉速分布特征值可参照离散介质的各种特征数值而建立,如参照颗粒群体“中值粒径”的概念,建立并描绘出“中值沉速”的成长曲线。所谓“中值沉速”就是在整个絮凝群体中,大于或小于这一沉速的絮体,各占絮体总数的 50% 的沉速数值。它反映着絮凝群体中较大颗粒的沉速量级。除“中值沉速”外对沉淀池设计更有直接意义的是 V_{10} 值。

V_{10} 值的直接含义是小于该沉速的颗粒占颗粒总数的 10% 。意即 90% 的絮体,沉速都大于它。它既是反应池中细小絮体沉速的量度,也代表着整个絮凝群体的沉降性能, V_{10} 的高低直接影响着沉淀池的去除百分率,它反映着絮凝群体的整体沉降水平,因而“总体沉速”,是絮体的重要特征参数。试验表明,经过网板反应, V_{10} 大幅度提高。网板反应的 V_{10} 比普通反应的 V_{10} 值大很多。同时曲线斜率很陡。斜率表征着成长速度。网板反应 V_{10} 的增长率高达 $0.06\text{mm/s} \cdot \text{min}$;无网对照组仅为 $0.007\text{mm/s} \cdot \text{min}$ 速率相差 8 倍之多。

从一系列絮体成长曲线图中,发现网板大大增强了对细小絮体的絮凝作用。一般沉淀反应常因细小絮体的沉速过低而影响出水水质。为了保证水质不得不加大投药或降低流速,浊度较低时尤其如此。而网板反应却大大改善了原水细小絮体的絮凝状态,提高了絮凝群体的“总体沉速”。这将对提高沉淀池效率产生深远影响。

另外,剩余浊度也是一个重要指标,试验对沉降柱上部澄清水剩余浊度的观测表明,网板反应澄清水余浊,几乎全比对照组好。试验运行还发现,各网板反应柱在反应过程中,其絮体浓度一直比无网对照组高,而一旦水流停止运动,反应柱变为沉降柱时,网板反应系统各相应管段的透明度总是比对照组高,这说明网板反应的絮凝性能高于无网对照组,也是网板反应能大大改善细小絮体的成长条件,提高出水水质的证明。

2.4 网板对停留时间函数的改善,用示踪剂测定网板反应器和变通反应器的停留时间,进而评价反应器的水力特性,也是判别网板对反应过程影响的重要手段之一,试验对水流扩散系数、容积利用系数、以及短流和推流条件等四项水力参数都进行了测定分析。从测定分析结果来看,网板反应更接近于理想的推流式反应器,水力效率比对照组高 10% ,容积利用率也接近于 1(达到 0.98),还大大改善了短流影响,使短流参数降低了 15% 。值得注意的是,水流扩散系数的求定,证明网板能控制涡体尺度,能消除不利于反应的大尺度涡旋,使微涡体在整个涡体分布中的比重加大,为絮体的成长创造了良好的水力条件。

2.5 对水头损失的测定表明,网板反应在保持反应效果良好的情况下,水头损失较一般水力反应为小,这说明网板反应的能量利用率较高。其所以如此,是因为网板反应控制了反应池中紊动结构,使有利于絮体成长的微涡体在水中密集出现,把不利于絮体成长的较大涡旋控制在较低的水平上,这样便少了不必要的能量消耗。同时,由于网板沿程均匀设置,这就使紊动动能的输入和耗散趋于均匀,即保证了絮体成长的必要动力消耗,又防止了紊动强度过大对絮体的破坏,因而充分地利用了能量。这是能耗较低而反应效果良好的第二个原因。

3 过网水流的紊流结构分析

网板反应效率高而能耗低已为模型试验和生产运行实践所证实。然而为什么网板反应会这样好呢?除在前面“网板反应原理”中所述的几点外,我们试图从水流结构上补充分析如下:

3.1 过网水流的流速分布与紊动强度有利于絮凝

水流所通过的网板,可看做是彼此平行的单个圆柱体所形成的水平柱列和竖直柱列组合。为简化问题,假定柱列在水平和竖直方向上都是无限的,这样即可不计边界影响。水流绕过柱列的流动,属于流体力学自由紊流的范畴,平行柱列的尾流方程根据自由紊流基本方程及混合长度理论可以解出如下式:

$$u_1 = \frac{\overline{U_\infty}}{8\pi^2} \left(\frac{\lambda}{L} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{X} \right) \cos \left(2\pi \frac{Y}{\lambda} \right)$$

即尾流的流速分布为一余弦函数。

从解决工程问题出发,我们不妨假定网板后的尾流速场是竖向柱列与水平柱列流速场的线性迭加,由此得到的空间流速分布图形是网格中心轴对称山峰状分布,如用通过网格中心轴的任一平面去切该山峰状分布图形,所得剖面线,均为余弦曲线。水流经过网板由于横、竖柱列的作用形成很大的流速梯度,根据对紊流力学中用脉动速度相关矩表示的紊动微分方程的分析,可以认为,在这里形成的紊动必须有很大的紊动强度。正是这种较大的紊动强度,才为絮体的形成提供了紊动动能。创造了有利的碰撞条件使絮体能够迅速长大,也正是这种紊动强度,造成了絮体浓度沿水流断面的均化,使整个过水断面上都有足够的絮体浓度,从而使絮体的成长速度在整个断面内趋于均匀,增大了反应池的容积利用效率。在水平流动的反应管渠中设置网板,以改善反应条件,这种均化作用尤为显著。

3.2 由于网板的分割,涡体尺度被有效控制

网板后的水流是一个紊动流场。该紊动流场可以看作是叠加于平稳流动之上的一大群各种尺度的涡旋,水流经过网板后首先产生尺度较大的初级涡旋,而大尺度的涡旋在惯性影响下相互作用并不断产生越来越小的涡旋,形成所谓涡旋串级,最后发展为各向同性紊流。从前面网板原理的论述中得知,尽管网后初级涡旋尺度较大,但其量级仍与网线或网孔的数量级相同。这样整个紊流场中的较大涡体都能控制在有利于絮体成长的水平上,从而制止了不利于絮体成长的更大涡旋的无规则发展。如果说各向同性紊流的小尺度涡旋更有利于微絮体成长的话,那么由于网板反应的初生涡体较小,各向同性紊流便能尽早在反应器中出现。事实上,风洞试验的各向同性紊流就是通过多级网板的整流作用形成的。

3.3 连续网板的设置,形成了紊动从加强到衰减的周期性变化过程,有利于絮体成长。水流通过

一个个网板的运行,是一个紊动能不断起伏变化的过程。水流通过网板时,获得了较大的紊动动能。但紊动本身要消耗能量,为了保持紊动就必须不断地向紊动流提供能量,只有当供给紊动的能量,扩散的能量和消耗的能量处于平衡状态时,紊动流动才处于恒定状态。否则将导致紊动随时间和流程的变化。经过网板的紊动由于沿程平均断面流速是个常数,或者说平均流速梯度 $\frac{\partial v}{\partial X} = 0$,亦即没有经常性的能量来源,水流通过网板获得紊动动能后,在两道网板间的流程中,就不能再获得紊动能量,因此两个网板间的这种紊动是沿程衰减的。而衰减到一定程度,通过下个网板又进一步得到加强,这由强到弱,一强一弱的变化过程,正如脉冲澄清池中悬浮泥渣的聚集与离散过程,经证明是有利于絮凝的。

总之,从水流的紊动结构分析,网板所产生的紊动流场对絮凝是十分有利的,而网板的整流作用也有利于反应效率的提高。