

机械搅拌澄清池搅拌机规范化设计研究

薛广进, 姚左钢, 王 洋, 董 红, 林海燕
(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘 要: 搅拌机是机械搅拌澄清池的核心设备,在澄清池泥渣循环环节起到关键作用。基于机械搅拌澄清池搅拌机的产品标准修编,对其展开研究,对旧标准中不能适应当前生产运行的条件进行修正,对旧型号设备进行升级,对新型搅拌机进行规范,从而实现了对有机械搅拌澄清池搅拌机的系列化和规范化,同时利用 CFD 模拟技术对搅拌机的提升性能进行校验,实现了对机械搅拌澄清池搅拌机行业产品标准的修编,对水处理行业有积极的推动作用。

关键词: 机械搅拌澄清池; 搅拌机; 叶轮; 驱动; 计算流体力学

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)01-0063-05

Standardization Design of Stirrer in Mechanical Stirring Clarifier

XUE Guang-jin, YAO Zuo-gang, WANG Yang, DONG Hong, LIN Hai-yan
(Beijing General Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: The stirrer is the core equipment of mechanical stirring clarifier, which plays a key role in the sludge return link. The stirrer was studied based on the revision of the stirrer product standard. The conditions in the old standard which could not meet the requirements of current production were corrected, old model equipment was upgraded, and the new stirrer was standardized, so as to realize the serialization and standardization of existing stirrers. Meanwhile, the performance of the stirrer was checked using CFD simulation technology. The revision of the stirrer product standard was achieved to actively promote the water treatment industry.

Key words: mechanical stirring clarifier; stirrer; impeller; driving; CFD

20 世纪 70~90 年代机械搅拌澄清池风靡全国,在众多的澄清池型式,机械搅拌澄清池在我国的应用效果比较理想,是除平流沉淀池、斜板(管)沉淀池外,在我国应用较多的澄清分离系统。机械搅拌澄清池利用搅拌机进行泥渣回流,使原水中的颗粒和池中积聚的沉淀泥渣相互碰撞接触、吸附、聚合,然后形成絮粒,最终进入分离室分离。通过改变搅拌机的叶轮开度和转速,可实现对泥渣回流量的调节,从而适应不同的水质条件^[1~3]。机械搅拌澄清池的特点是对原水适应性强,处理效果较好且稳

定,处理效率高,缩短了总停留时间,排泥较为方便,设备少、操作管理较集中,电耗、药耗、投资较低,在大中型水厂中应用效果好。

关于机械搅拌澄清池及其设备的研究,最初由北京市政总院编制了 8 种不同规模的机械搅拌澄清池设计标准图集,并编制了机械搅拌澄清池搅拌机、刮泥机的产品标准。笔者基于行业标准《机械搅拌澄清池搅拌机》(CJ/T 81—1999)的修订工作,详细研究了机械搅拌澄清池搅拌机的设计参数等,对机械搅拌澄清池的研究与应用有重要意义。

1 搅拌机总体结构

机械搅拌澄清池搅拌机主要由提升叶轮、桨叶、主轴、调流装置和驱动装置等组成,工作时通过叶轮旋转进行搅拌和提升。机械搅拌澄清池原结构有2个系列、共13个尺寸型号,配有给水排水标准图集S774系列和95S718系列。近年来部分厂家设计研究出新的池型及搅拌机,与原池型及设备相比原理一致,也可归至机械搅拌澄清池系列,将新型搅拌机独立成一个系列。按照叶轮不同,将原搅拌机系列命名为搅拌型叶轮搅拌机,将新型搅拌机命名为加速型叶轮搅拌机。搅拌型叶轮搅拌机尺寸较大,转速较慢,安装位置较高;加速型叶轮搅拌机尺寸较小,转速较快,安装位置较低。两类搅拌机的结构及安装效果如图1和图2所示。

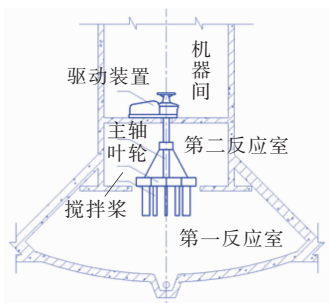


图1 搅拌型叶轮搅拌机

Fig.1 Mixing type impeller mixer

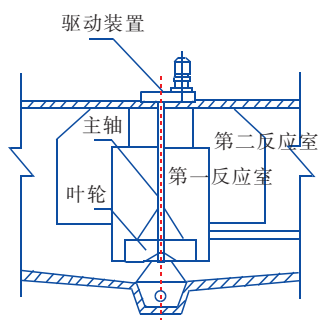


图2 加速型叶轮搅拌机

Fig.2 Accelerating type impeller mixer

2 提升叶轮

2.1 叶轮结构

搅拌型叶轮搅拌机和加速型叶轮搅拌机的主要差别是叶轮,搅拌型叶轮带有桨叶,桨叶搅拌而叶轮提升;加速型叶轮仅有叶轮,通过快速旋转达到搅拌和提升的双重作用,其效率较搅拌型叶轮高。搅拌型叶轮和加速型叶轮的结构分别如图3和图4所示。其中, $h_{开}$ 为叶轮开度,即叶轮的出水口在澄清

池第二反应室底板以上部分的高度,该高度是叶轮提升水流的出水高度; B 为叶轮出水口宽度; $D_{叶}$ 为叶轮直径; L 为搅拌桨长度。

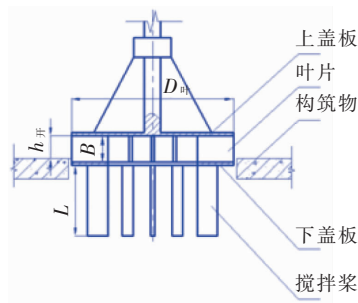


图3 搅拌型叶轮结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of mixing type impeller

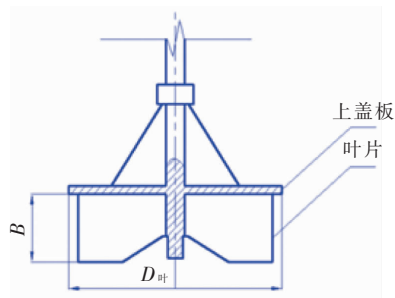


图4 加速型叶轮结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of accelerating type impeller

叶轮和搅拌桨在第一反应室完成机械絮凝,使经过加药混合产生的微絮凝颗粒与回流中原有的矾花碰撞接触、吸附,形成较大颗粒。提升叶轮将第一反应室形成絮凝颗粒的水体提升至第二反应室,再经过折流到澄清区进行分离,清水上升,泥渣从澄清区下部再回流到第一反应室^[4]。

2.2 叶轮设计

搅拌型叶轮和加速型叶轮的主要差别在于桨板,其提升原理一致,均可用如下方法进行计算。

提升叶轮的出水口宽度,可按下式计算^[5]:

$$B = \frac{60Q_1}{Cnd^2} \quad (1)$$

式中, B 为叶轮出水口宽度,m; Q_1 为提升水量, m^3/s ; C 为叶轮出水口计算系数; n 为叶轮转速,r/min; d 为叶轮外径,m。

提升水量是在考虑自用水的前提下,按照经验对设计处理水量进行增倍,可按式计算:

$$Q_1 = Q_2 \times K \times 5 \quad (2)$$

式中, Q_2 为设计水量, m^3/s ; K 为自用水系数。

搅拌过程中,对搅拌机的外缘速度及叶轮外径有一定的要求,按照下式可以求出叶轮的转速:

$$n = \frac{60v}{\pi d} \quad (3)$$

式中, v 为叶轮外缘线速度。

叶轮搅拌及提升消耗功率,按照下式计算:

$$N_1 = C_z \frac{\rho Q_1 H}{10^2 \eta} \quad (4)$$

式中, ρ 为泥渣水密度, kg/m^3 ; η 为叶轮提升的水力效率; C_z 为阻力系数; H 为提升水头, m (10 kPa); N_1 为叶轮消耗功率, kW 。

为节约能源及加工材料,设计过程中应考虑在保证运行效率和安全的前提下,尽量与实际工况相匹配。提升水量 Q_1 一般为净产水量的2~5倍,在计算中,为了保证调节的幅度,按照5倍计算。

叶轮出水口计算系数 C ,根据正常运行经验取值为3.0,主要表征叶轮提升效率,该数据由经验设计所得,此处通过计算流体力学软件模拟叶轮提升过程实现对该参数的验证。利用计算流体力学软件Fluent建立搅拌型叶轮及周围流体模型,设定边界及运行条件,采用多重参考系法(MRF)^[6,7]对搅拌机的三维流场进行数值计算。在此过程中,设定叶轮转速为10 r/min、叶轮宽度为200 mm,待计算收敛后,读取截面速度,对比转速及循环截面尺寸,变换式(1)如式(5),可反求得 C 值为2.65。

$$C = \frac{60Q_1}{Bnd^2} \quad (5)$$

加速型叶轮由于其结构的差异,其叶轮出水口宽度 B 可视作叶轮开度,为验证其是否仍符合式(1)的计算方法,设计加工一套中试装置进行试验,实测叶轮转速与提升水量的关系如图5所示。结合该中试装置叶轮尺寸及式(5),得到 C 值为2.46。

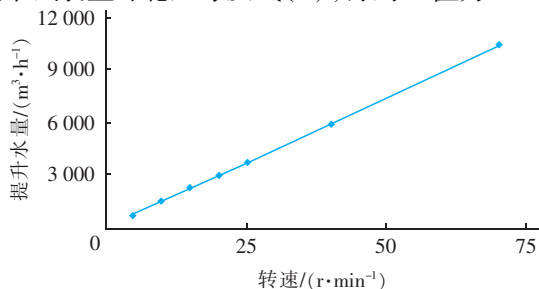


图5 叶轮转速与提升水量的关系

Fig. 5 Relationship between impeller frequency and lifting capacity

叶轮外径设计,一般为水池直径的0.15~0.2倍,设计中多用0.16倍,运行效果较好。提升水头 H 可以按照水泵理论计算:

$$H = \left(\frac{nd}{87}\right)^2 \quad (6)$$

式中的 n 一般取最大值。工程实测提升水头几米,高度为0.01~0.03 m,若考虑水头损失,一般可采用 $H=0.05 \text{ m}$ (0.5 kPa)。

3 搅拌桨

3.1 尺寸及数量

搅拌桨位于叶轮下方,主要实现搅拌作用。搅拌桨的回转外径约为叶轮外径的0.9,即水池直径的0.135~0.18倍,设计中多取0.144倍,按照下式计算:

$$2R_2 = 0.9d \quad (7)$$

式中, R_2 为搅拌桨内半径, m 。

搅拌桨叶片的高度约为反应室高度的1/3,叶片宽度取叶片高度的1/3,按照下式计算:

$$h = 0.33H_1 \quad (8)$$

式中, h 为搅拌桨叶高度, m ; H_1 为反应室高度, m 。

搅拌桨叶片数一般取6~10片,通过计算机模拟搅拌澄清池第一反应室平均纵截面积,取叶片的总面积为纵截面积的10%,进而取整获得其值,可参考如下标准进行设计:当叶轮直径 $D \leq 2000 \text{ mm}$ 时,搅拌桨叶取4片;当 $2000 \text{ mm} < D \leq 2500 \text{ mm}$ 时,搅拌桨叶取6片;当 $D > 2500 \text{ mm}$ 时,搅拌桨叶取8片。

3.2 桨叶消耗功率

桨叶消耗功率可按照下式计算设计:

$$N_2 = C_z \frac{\rho \omega^3 H}{400g} (R_1^4 - R_2^4) Z \quad (9)$$

式中, N_2 为桨叶消耗功率, kW ; ω 为叶轮旋转的角速度, rad/s ; R_1 为桨叶外缘半径, m ; Z 为桨叶数。

4 驱动装置

4.1 驱动装置型式

为满足实际运行中水质、水量和水温的变化,搅拌机在运行过程中应针对不同的条件设置不同的提升能力和搅拌强度。由于变化要求较高,所以均设有调流装置及调速装置。搅拌机转速较低、减速比较大,同时具有调流,所以很难直接应用单级减速器,

一般多级减速后使用,可由电动机与蜗轮蜗杆减速器采用V型皮带传动组成、电动机与齿轮减速器采用直联传动组成。

4.2 功率计算

驱动机的提升和搅拌功率,可按照下式计算:

$$N = N_1 + N_2 \quad (10)$$

驱动的电功率可按照下式计算:

$$N_A = \frac{K_g N}{\eta} \quad (11)$$

式中, N_A 为驱动电机功率, kW; K_g 为电动机工况系数, 当搅拌介质为水、每日 24 h 连续运行时取 1.2。

机械总效率 η 可按照下式综合计算:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \quad (12)$$

式中, η 为机械传动总效率, %; η_1 为三角皮带传动效率, 一般采用 96%; η_2 为电磁调速电动机效率, 一般采用 83%; η_3 为蜗轮减速器效率, 按单头蜗杆考虑时取 70%; η_4 为轴承效率, 取 90%。

5 主轴及调流装置

5.1 型式及受力

搅拌机主轴一般为实心轴, 当有刮泥机与搅拌机同心安装时, 搅拌机轴为空心轴, 应考虑刮泥机轴外径与搅拌机空心轴内径的匹配。

搅拌机轴主要传递扭矩, 电机功率通过主轴传递至叶轮及搅拌桨, 主轴所受扭矩按照下式计算^[8]:

$$M_n = 9\,550 \frac{N}{n} \quad (13)$$

5.2 主轴校核

为保证搅拌机工作可靠性, 需要对主轴强度和刚度安全系数进行校核, 一般保证安全系数不小于 3。以实心轴为例, 校核轴的刚度和强度, 将设计计算扭矩乘以安全系数作为校核扭矩, 进而求最小直径。

实心轴强度计算可按照下式进行校核^[8]:

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{W_t} = \frac{16 T_{\max}}{\pi D^3} \leq [\tau] \quad (14)$$

式中, τ_{\max} 为最大切应力; $[\tau]$ 为许用切应力; T_{\max} 为截面最大扭矩; W_t 为抗扭截面系数; D 为主轴直径。

查得轴对应的许用切应力, 进而按照下式求得满足强度要求的最小直径:

$$D \geq \sqrt[3]{\frac{16 T_{\max}}{\pi [\tau]}} \quad (15)$$

受扭矩的实心轴刚度表现为扭转变形, 为满足刚度要求, 应限制其扭转角变化率, 可按式计算:

$$\varphi'_{\max} = \frac{T_{\max}}{G I_p} \times \frac{180}{\pi} = \frac{T_{\max}}{G \times \frac{\pi}{32} D^4} \times \frac{180}{\pi} \leq [\varphi'] \quad (16)$$

式中, φ'_{\max} 为最大扭转角变化率; G 为材料切变模量; I_p 为截面极惯性矩; $[\varphi']$ 为许用扭转角变化率。

查得对应的许用扭转角变化率, 进而按照下式求得满足刚度要求的最小直径:

$$D \geq \sqrt[4]{\frac{32 T_{\max} \times 180}{G \pi^2 [\varphi']}} \quad (17)$$

5.3 调流装置

搅拌机通过调流装置与变速装置配合实现不同提升流量和不同搅拌强度。调流装置应容易操作, 并设置指示装置。调流装置有三种方式, 其中最常用的是升降叶轮式, 用叶轮升降来调节叶轮出水口宽度, 其原理如图 6 所示。

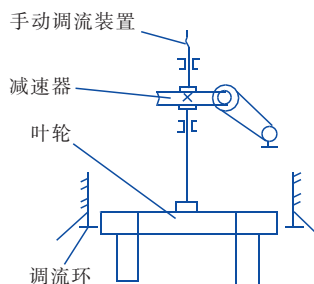


图6 升降叶轮调流示意

Fig. 6 Schematics of flow control by lifting impeller

此外还有调流环升降式和浮筒式, 分别利用调流环和浮筒控制叶轮出水和进水方向的实际进出水面积, 实现调流功能。

6 系列化设计

结合上述设计计算方法及依据, 参考旧版系列化设计成果, 对机械搅拌澄清池搅拌机进行整体计算设计。在此基础上, 结合厂家生产资料, 综合调整, 实现搅拌机的系列化设计。原机械搅拌澄清池图集已被废止, 新计算方法可供新设计参考使用。

6.1 搅拌型叶轮搅拌机

搅拌型叶轮搅拌机共有 13 个型号, 按照公称水

量区别,具体数值如表 1 所示。

表 1 搅拌型叶轮搅拌机的规格及基本参数

Tab. 1 Specification and basic parameters of mixing type
impeller mixer

公称水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	澄清池直 径/m	叶轮直径/ mm	叶轮转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	叶轮出水口 宽度/mm
20	3.5	620	15.0 ~ 28.9	60
40	4.5	900	12.0 ~ 23.5	70
60	5.5	1 100	11.0 ~ 20.7	80
80	6.5	1 240	10.0 ~ 19.3	90
120	7.5	1 500	8.0 ~ 16.2	110
200	10	2 000	4.5 ~ 14.5	110
320	12			170
430	14	2 500	3.5 ~ 11.5	175
600	17			245
800	20	3 500	3.0 ~ 8.5	230
1 000	22			290
1 330	25	4 500	2.0 ~ 6.2	300
1 800	29			410

6.2 加速型叶轮搅拌机

加速型叶轮搅拌机共有 8 个型号,按照公称水量区别,具体数值如表 2 所示。

表 2 加速型叶轮搅拌机的规格及基本参数

Tab. 2 Specification and basic parameters of accelerating type
impeller mixer

公称水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	澄清池直 径/m	叶轮直径/ mm	叶轮转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	叶轮出水口 宽度/mm
200	10	1 400	6 ~ 25	360
320	12			420
430	14	1 800	5 ~ 23	500
600	17			520
800	20	2 300	4 ~ 18	540
1 000	22			560
1 330	25	2 800	4 ~ 15	580
1 800	29			600

7 结论

① 通过计算流体力学软件建模,对机械搅拌澄清池搅拌机的运行进行数值计算,从而得到搅拌机运行过程中的工况,可为搅拌机设计参数的取值提供依据,使得搅拌机的设计更加科学合理。

② 将澄清池搅拌机按照叶轮分为加速型叶轮搅拌机和搅拌型叶轮搅拌机,利用中试装置,验证了加速型叶轮搅拌机的设计计算可参考搅拌型叶轮搅拌机的计算方法,同时求得设计参数 C 的建议值。

③ 通过对实际生产及运行中搅拌机的调研,对机械搅拌澄清池搅拌机进行系列化设计,搅拌型

叶轮搅拌机共有 13 个规格,加速型叶轮搅拌机共有 8 个规格,可为实际生产及运行提供指导。

④ 结合生产状况及运行需求,对搅拌机设计材料选择提供统一建议,对设备设计的标准化和统一化具有重要的指导意义。

综上,利用原有设计理论,结合先进的模拟计算方法及试验装置,参考实际生产及运行资料,对机械搅拌澄清池搅拌机进行系统化、系列化设计,可为实际生产及运行提供有效参考。

参考文献:

[1] 陈伟,孙博雅,陈洪斌,等. 机械搅拌澄清池运行优化的研究[J]. 给水排水,2008,34(2):7-10.

[2] Brucato A, Ciofalo M, Grisafi F, et al. On the simulation of stirred tank reactors via computational fluid dynamics [J]. Chem Eng Sci, 2000, 55(2): 291-302.

[3] 裘尚德,陈义标. 机械加速澄清池搅拌桨板的改造[J]. 青岛理工大学学报,1999,20(2):66-70.

[4] 饶磊. 浅谈郭公庄水厂的工艺选择[J]. 城镇供水, 2012, (4): 41-44.

[5] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 给水排水设计手册(第9册):专用机械(第3版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[6] 王瑞金,张凯,王刚. FLUENT 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2007.

[7] 彭珍珍,赵恒文,郭聪聪,等. 潜水搅拌机三维流场的数值模拟[J]. 给水排水,2009,35(增刊):340-342.

[8] 刘鸿文. 材料力学 I (第4版)[M]. 北京:高等教育出版社,2005.



作者简介:薛广进(1988-),男,北京人,硕士,工程师,研究方向为市政给水排水工艺设计。

E-mail: xueguangjin2006@126.com

收稿日期:2016-06-25