

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.15.014

絮体沉降性能参数体系的建立及相应装置的开发

李小军^{1,2}, 陈玉强^{1,2}, 蔺阳³, 黄丹凤³, 姜国策^{1,2}, 张凯^{1,2},
魏巍^{1,2}, 高先登³

(1. 西安西热水务环保有限公司 西安市工业节水及废水治理工程技术研究中心, 陕西
西安 710054; 2. 高效灵活煤电及碳捕集利用封存全国重点实验室, 北京 100031;
3. 西安益通热工技术服务有限责任公司, 陕西 西安 710032)

摘要: 为解决絮凝沉降效果评价问题,提出了表征絮体沉降性能的新参数:絮体沉降比(FV)、絮体污泥浓度(FLSS)、絮体分配系数(FLD)、絮体沉降指数(FVI),推导了各参数之间的关系。同时,根据光学原理开发了与之相匹配的在线测试装置。该装置具备自动取样、自动测试、周期测量、深度清洗、循环监测等功能,测量精度为0.5%,满足实际使用要求。基于此装置,实现了上述参数的同步测定与动态解析,建立了絮体沉降表征模型,为絮凝工艺优化提供了多维量化依据。将该装置用于内蒙古某电厂,监测运行过程中拟合的参数及实时浊度,通过参数可实时反映絮凝沉降效果并提前预测出水浊度,该装置对澄清系统具有一定的监控预警作用。

关键词: 絮凝; 沉降; 表征参数; 在线监测装置

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)15-0097-07

Establishment of Parameter System for Floc Settling Performance and Development of a Corresponding Device

Li Xiaojun^{1,2}, Chen Yuqiang^{1,2}, Lin Yang³, Huang Danfeng³, Jiang Guoce^{1,2},
Zhang Kai^{1,2}, Wei Wei^{1,2}, Gao Xiandeng³

(1. Xi'an Engineering Research Center of Industrial Water Saving and Wastewater Treatment, Xi'an TPRI Water-Management & Environmental Protection Co. Ltd., Xi'an 710054, China;
2. State Key Laboratory of High-Efficiency Flexible Coal Power Generation and Carbon Capture Utilization and Storage, Beijing 100031, China; 3. Xi'an Yitong Thermal Technology Service Co. Ltd., Xi'an 710032, China)

Abstract: To address the issue of evaluating flocculation settling performance, new parameters characterizing floc settling behavior were proposed, including floc settling ratio (FV), floc sludge concentration (FLSS), floc partition coefficient (FLD), and floc settling index (FVI), and the interrelationships among these parameters were derived. Furthermore, a matching online testing device was developed based on optical principles. The device is equipped with functions such as automatic sampling, automatic testing, periodic measurement, deep cleaning, and cyclic monitoring, with a measurement accuracy of 0.5%, meeting practical application requirements. Based on this device, the

基金项目: 华能长江环保科技有限公司科技项目(GC-23-HCK01)

通信作者: 李小军 E-mail: lixiaojun@tpri.com.cn

simultaneous determination and dynamic analysis of the above parameters were achieved, and a floc settling characterization model was established, providing multi-dimensional quantitative basis for flocculation process optimization. The device was applied in a power plant in Inner Mongolia to monitor the fitted parameters and real-time turbidity during operation. Through these parameters, the flocculation settling effect can be reflected in real time and the effluent turbidity can be predicted in advance. The device exhibits a certain monitoring and early warning function for the clarification system.

Keywords: flocculation; settling; characterization parameter; online monitoring device

絮凝沉淀是水处理过程的基本单元,是设备正常运行和水质保证的重要一环。发生絮凝沉淀的澄清系统具有非线性、时变性和迟滞性等特点,无法体现当下进水与预处理出水情况对出水后状态的影响,因此絮凝沉淀的监测及其澄清系统的提前预警对于工业应用具有非常重要的意义。

目前对于絮体的监测主要是微观和宏观两个方面。在微观方面,研究学者将混沌学、分形学、耗散结构学、电化学、图形学、光电学结合起来,用于描述絮体的形态、结构特征、絮体成长过程及沉降结果^[1-3]。其中,主要代表技术有流动电流检测(SCD)、絮凝控制系统(FCD)、透光率脉动法(PDA)。SCD的优点是构成简单、成本较低,但灵敏度不高,受原水水质影响较大,需要定期清洁和维护^[4]。FCD技术建立了等效粒径与自动加药量之间的关系,可实现对絮体颗粒的拍摄及图片存储,然而絮体的聚集、融合、交叉、掩盖作用严重干扰目标算法^[5-6]。PDA具有不受检测装置透光壁污染和电子漂移影响的优点,且无需进行定期的清洗和标定,但存在滞后时间较长、适应性较差、系统不易达到稳定等缺点。在宏观方面,主要依靠人工的烧杯试验测试污泥沉降比进而判定絮凝沉淀效果。此方法虽然容易进行,但劳动强度大、取样不及时、数据不准确,且难以具体描述絮凝沉降过程^[7-8]。同时污泥沉降比受进水水质、进水量等因素影响较大,无法准确评判絮凝沉降效果。虽然已有一些自动化的污泥沉降比测试装置^[9-11],但存在测试指标单一化和测试结果片面化的缺陷。

本研究针对絮体沉降提出了一套完整的表征

$$FLSS = \frac{\text{进水悬浮物} + \text{药剂生成污泥量} + \text{污泥回流量} + \text{其他污泥量}}{\text{进水量} + \text{污泥回流量}} \quad (2)$$

根据肯奇理论,高度为 H_t 、均匀浓度为 C_t 的沉淀管中所含悬浮物量和原来高度为 H_0 、均匀浓度为 C_0

参数,可以较为全面地描述絮凝沉降状态及效果,同时开发了可实时测试这些参数的自动化装置。将该装置用于内蒙古某电厂,通过测试所提出的参数可预判澄清系统絮凝沉降效果及出水浊度,具有一定的监控预警作用。

1 新参数体系的提出及定义

1.1 絮体沉降比(FV)的提出

絮体经过沉降之后,最直观感受到的是下层絮体的高度、“上清液”的高度、“上清液”的清澈程度。为了精确描述絮体沉降比例,引入新的参数即絮体沉降比(FV,%),它指的是将待测泥水经过充分搅拌后迅速转移至1 000 mL的量筒中,静置一段时间后,下部污泥高度与测试泥水样高度的比值,其表达式如下:

$$FV = \frac{H_F}{H_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{H_U}{H_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: H_U 、 H_F 、 H_0 分别为上清液高度、絮体污泥高度、测试水样高度。

FV能够定性评价絮体凝聚、沉降性能。不同沉降时间的FV具有不同的意义。前几分钟主要进行自由沉降和拥挤沉降,因此 FV_5 (5 min沉降比)主要反映絮体沉降的速率;后面主要进行的是压缩沉降,故 FV_{30} (30 min沉降比)主要反映絮体污泥形态和沉降结构。

1.2 絮体污泥浓度(FLSS)的提出

絮体污泥浓度(FLSS,mg/L)定义为絮凝池出液的絮体污泥浓度,即进水加药、回流形成的污泥量与水量之间的比值,反映待测水样中所含絮体的量,计算公式如下:

的沉淀管中所含悬浮物量相等。结合物料守恒定律,则有:

$$FLSS \times H_0 = C_{\text{上}} H_{\text{上}} + C_{\text{下}} H_{\text{下}} \quad (3)$$

式中: $C_{\text{上}}$ 和 $C_{\text{下}}$ 分别为上清液絮体浓度和下部絮体污泥浓度。

FLSS是进水负荷、污泥浓度、加药量、污泥回流比的综合参数,代表待测水样中絮体的平均浓度,一定程度上也反映进水、加药、絮凝三个过程的结果,进而反映FV的变化。

1.3 絮体污泥分配系数(FLD)的提出

污泥絮体分配系数(FLD)定义为下部絮体污泥质量和待测水样中絮体质量的比值,其表达式为:

$$FLD = \frac{C_{\text{下}} H_{\text{下}}}{FLSS \times H_0} = \frac{FLSS \times H_0 - C_{\text{上}} H_{\text{上}}}{FLSS \times H_0} = 1 - \frac{C_{\text{上}} H_{\text{上}}}{FLSS \times H_0} \quad (4)$$

FLD表征下部絮体污泥质量和上清液中残留絮体质量之间的定量关系。通过FLD可以看出上清液的清澈度,通常FLD越大,表明下层污泥占比越大,上层悬浮物比例越小,则水越清澈;FLD越小,表明沉降比例越小,上清液未沉降的絮体比例越大,则水越浑浊。FLD与FV有异曲同工之妙,FLD与FV分别反映的是下部絮体污泥的质量占比和体积占比。因此FLD是FV的进一步补充,是另一个角度的定量表示。

1.4 絮体沉降性能指数(FVI)的提出

为了消除测量过程中混合液浓度的影响,构建相对稳定的指标体系,采用絮体沉降性能指数(FVI)作为监测和表征絮体沉降性能的控制参数。FVI定义为待测混合液经沉淀后,沉降到下部1 g絮体所占的体积,其表达式如下:

$$FVI = \frac{FV}{FLD \times (FLSS - 1)} \quad (5)$$

相较于其他参数,FVI很好地克服了进水、加药、排泥等工况的影响,卓越地体现了澄清系统状态,这是因为FVI的推导过程结合了FV、FLSS和FLD,是一个复合性的参数。在实际正常运行状态下,FVI将会是一个比较稳定的数值,当絮凝沉降存在异常时则会发生剧烈变化,形成明显对比。每个澄清系统都有自己限定的FVI值,通过FVI可以判断出沉降异常点。

2 测试装置的构建与开发

2.1 测试装置的整体设计

基于便捷性、高效性、可靠性的基本原则,结合

现场生产经验,构建了轻量化、功能集合化的絮凝沉降在线监测装置,具体如图1所示。该装置包括冲洗水系统、进泥水系统、排泥水系统、测量筒以及测试程序系统。冲洗水系统、进泥水系统、排泥水系统由管道和自动阀门组成,进水和排泥时间由程序控制。系统采用虹吸法进行取样,最大程度上避免完整的混凝絮体出现破坏、破裂情况,降低误差率。测量筒由一根厚壁透明玻璃管制成,同时在测量筒相对位置配备4组光学感应器(光幕)作为光的发射和接收装置。光幕位置依据澄清池的清水区、斜板区、布水区、浓缩区、泥区的分布而设置。4组光幕从上到下距离溢流口的位置分别为15、60、100、125 mm,依次命名为1#、2#、3#、4#。在测量筒下半部分设置可上下活动的一对光幕(命名为移动光幕),记录光感应值进而探寻泥层和清水层的分界面,用于测定絮体沉降高度、计算絮体沉降比。光幕将发射光和接收光强度转换为数字化电信号,反映不同部位的透光率。

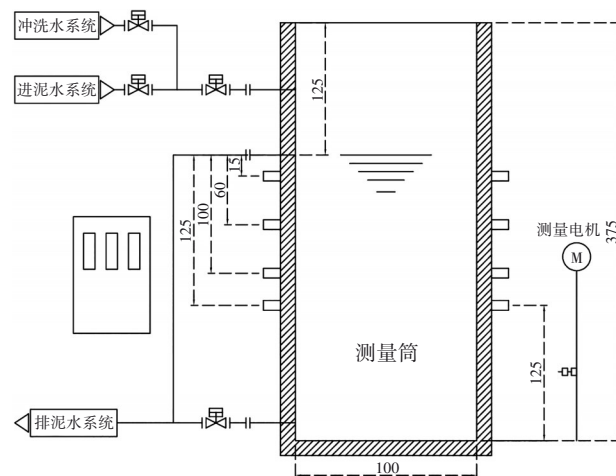


图1 絮凝监测装置示意

Fig.1 Diagram of flocculation monitoring device

本装置考虑了相关干扰因素并采取了对应措施。首先,光幕采用自然光对其干扰较小的红光,固定波长为660 nm。另外,测量筒及相关配件组装成一个整体嵌套到密闭的可拆卸箱体(处于避光状态),再装入该装置中,最大程度免除其他光线对测试精度的影响。值得一提的是,该光幕适用温度范围为-55~70℃,不受天气、光照强度的影响。该装置将自动校正、清洗、取样、测量、结果汇报、循环测试等功能集于一体,具备稳定、准确的测试及便捷的数据统计分析功能。该装置结合了光电理论、

人机交互和自动化控制等技术,可实现精准化、自动化、连续化运行。

2.2 测试装置开发的光学理论

水体中的悬浮颗粒物会阻碍光线直线透过水层,部分光线会被吸收或散射。本装置利用这一原理,通过光幕的发射装置让一束平行光(I_0)通过泥水介质,一部分光被吸收(I_a),一部分发生透射(I_t),一部分被反射(I_r)。则有:

$$I_0 = I_a + I_t + I_r \quad (6)$$

光线通过测量筒中的泥水样品时,部分光会被所遇到的悬浮颗粒改变传播方向形成散射,散射的程度和悬浮颗粒的数量成正比。而透射光的强度体现了光穿过浑浊物质的能力,即反映了泥水的浊度。透光强度越大,则泥水浊度越小。透射光强度 I_t 与入射光强度 I_0 之比称为透光率 T ,即:

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad (7)$$

由式(7)可知,透射光强度越大则透光率越高,即水越清澈。该装置采用的光幕已将光强度转化为相应的数字信号,可便捷地了解水中絮体情况和浊度变化。

2.3 装置测试过程

依据现场条件和测试要求,打开冲洗水阀门进行管道冲洗,冲洗完毕后排空;关闭冲洗水阀门,打开进泥水阀门持续一段时间(有溢流管道可防止水样溢出),使泥水充满测量筒;关闭所有阀门让其自然沉降;沉降结束之后,移动光幕开始运动。当移动光幕行至絮体沉降的明暗交界面处,光幕的接收值发生突变,控制模块记录絮体污泥高度并自动抓取各光幕值,为后续参数的计算提供依据。测试结束后,水样通过测量筒下端排出并进行管道冲洗,间隔一段时间,开启下一次测试。以上步骤的运行时间均可根据需要进行设置。

3 测试装置的验证及应用

3.1 装置的误差验证

为了验证该装置对数据读取的准确性,进行了人工目测和装置测试对比试验。结果显示,不同絮体高度的人工目测值分别为12.8、17.5、19.9、21.4、23.2、26.0、28.1、29.8、31.7 mm,相应的装置测试值分别为12.8、17.5、19.9、21.5、23.3、26.1、28.2、29.9、31.8 mm,装置测量误差分别为0、0、0、0.47%、0.43%、0.38%、0.36%、0.34%、0.32%。由

此可知,对于不同的絮体高度,人工目测值和装置测试值基本一致,说明装置读数准确且稳定。同时不难发现,有时装置测试值比人工目测值略高,这可能是由于人眼更倾向于明暗交界面处,而机器具有更好的灵敏度和分辨性,会参考一部分明暗交界面上方轻薄的絮体,使读数略大。尽管如此,装置的测量误差依然在0.5%以内,满足使用要求,具备真实性、可靠性、有效性。

3.2 装置的测试验证

3.2.1 光幕及FV的测试验证

将装置安装于内蒙古某电厂的澄清池系统,旨在监测澄清池的絮凝沉降效果。该装置每隔20 min进行自动取样、测试与记录。经过一段时间的运行,FV、测量筒顶部的光幕值和平均光幕值如图2所示。经过长时间的运行,监测数据可连续反馈,说明该装置具有稳定、持续运行的能力,可以实现自动化,代替人工监测。

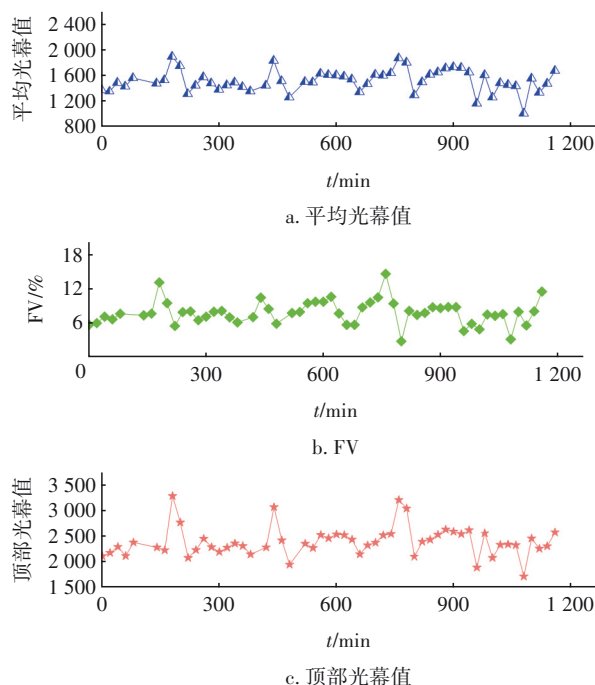


图2 FV和光幕值随时间的变化曲线

Fig.2 Temporal variations of FV and light curtain values

从图2可以看出,平均光幕值曲线和顶部光幕值曲线的变化趋势一致,两者的光幕值分别处于1300~1700和2100~2500之间,光幕值的变化幅度不大,由此可以证明该沉降过程是平稳且均匀的。还可以观察到与之对应的FV值大多处于5.5%~9.5%,波动性较小。在180、440、760 min时

光幕值明显突增,FV也同步激增;在480、800、960、1 000、1 080 min时光幕值明显下跌,FV随之下降。整体来看,FV与光幕值具有相同的变化趋势,符合絮体沉降的基本理论。对于工况一定的絮凝沉降过程,其样品中的絮体含量是一定的,随着时间的推移,悬浮的颗粒逐渐沉降,光幕的透光值随之增大,悬浮颗粒沉降得越来越多,因此FV增大,反之亦然。整体来说,新定义参数FV与光幕值是同步的,是絮体沉降的宏观体现与重要指标,一定程度上可以反映絮凝情况和出水浊度的变化。

3.2.2 FV、FLSS、FLD与FVI的测试验证

夏季时拟合参数FV、FLSS、FLD、FVI随时间的变化曲线如图3所示。图中4条曲线均有较小程度的波动,同时这4条曲线表现出良好的相关性,具有相似的波动形态,反映了絮凝效果评价的一致性。

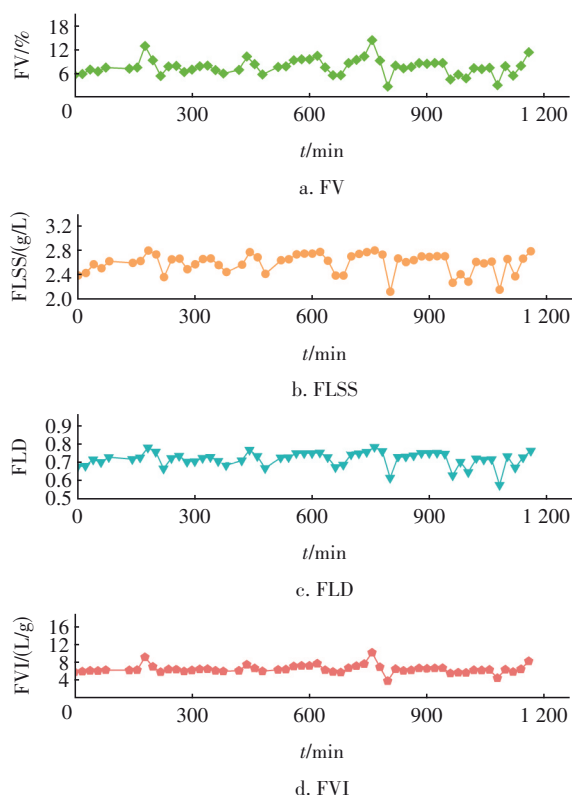


图3 夏季各参数随时间的变化曲线

Fig.3 Temporal variation of each parameter in summer

具体而言,FV大多处于5.5%~9.5%,是絮体沉降的直接体现;FLSS大多处在2.5~2.8 g/L之间,代表了平均絮体浓度;FLD基本处于0.70~0.76的范围,与FV具有相近的变化趋势;随着FV、FLSS、FLD的波动,FVI也在发生相同趋势的变化,但波动很小,基本处于一个平稳的波动状态(5.9~7.5 L/g之

间)。相较于其他参数,FVI很好地克服了进水、加药、排泥等工况影响,优秀地反映出澄清系统状态,这是因为FVI的推导过程结合了FV、FLSS和FLD,是一个综合性的参数。在220和480 min时,FV、FLSS、FLD在合理范围内有所下降,然而FVI的降低微乎其微。这是因为FVI是一个“比例型”参数,结合了FV、FLSS、FLD三个参数的变化,一定程度上消除了其他参数浮动带来的影响,这也是拟合FVI的意义。当FV、FLSS、FLD波动较小时,并不影响FVI的变化,不作为异常点记录;而当其他参数在异常范围发生变化时,关联的FVI剧烈变动,记为异常点;出现连续3个FVI异常点时,则发出絮凝沉降异常预警。每个澄清系统均有自己限定的FVI值,通过FVI可以判断出沉降异常点。

原水水质和药剂的作用会随季节发生一定的变化,进而絮凝沉降效果会受到一定影响。为了考察装置对原水随季节变化的适应性,在冬季对澄清系统进行监测。结果表明,FV处于5%~7%、FLSS处于2.3~2.6 g/L、FLD处于0.64~0.70、FVI处于5.9~6.4 L/g,相较于夏季均有所降低。这是因为冬季温度低,药剂性能会有所下降,同时温度的降低引起水的黏滞力增强,导致各参数值及絮体沉降效果降低。因此,不同的水质(季节、地域、水源)会引起各参数的变化,但是浮动范围不大。对于本装置而言,更多研究的是拟合参数的突变点、变化趋势、变化速率。

从以上数据可以看出,无论冬季还是夏季,在监测过程中各参数值均有较小的变动,但变化趋势仍保持一致,几乎没有受到水质的影响。因此,在后续预警运行中,只需要稍微调整临界预警值即可。判定异常点的个数不变,在整体的趋势范围外出现3个连续异常点则发出预警,进而检查与调整运行条件,保证出水质量。因此装置的预警功能不受原水水质及季节的影响,对于澄清絮凝系统具有一定的普适性。

4 测试装置的应用

该装置在运行过程中可同时读取顶部光幕、平均光幕、FV、FLSS、FLD、FVI参数值,经过一段时间的监测,各参数的变化曲线如图4所示。可以看出,经过长时间的运行,其监测数据依然连续反馈,进一步证明了该装置的自动化监测功能。

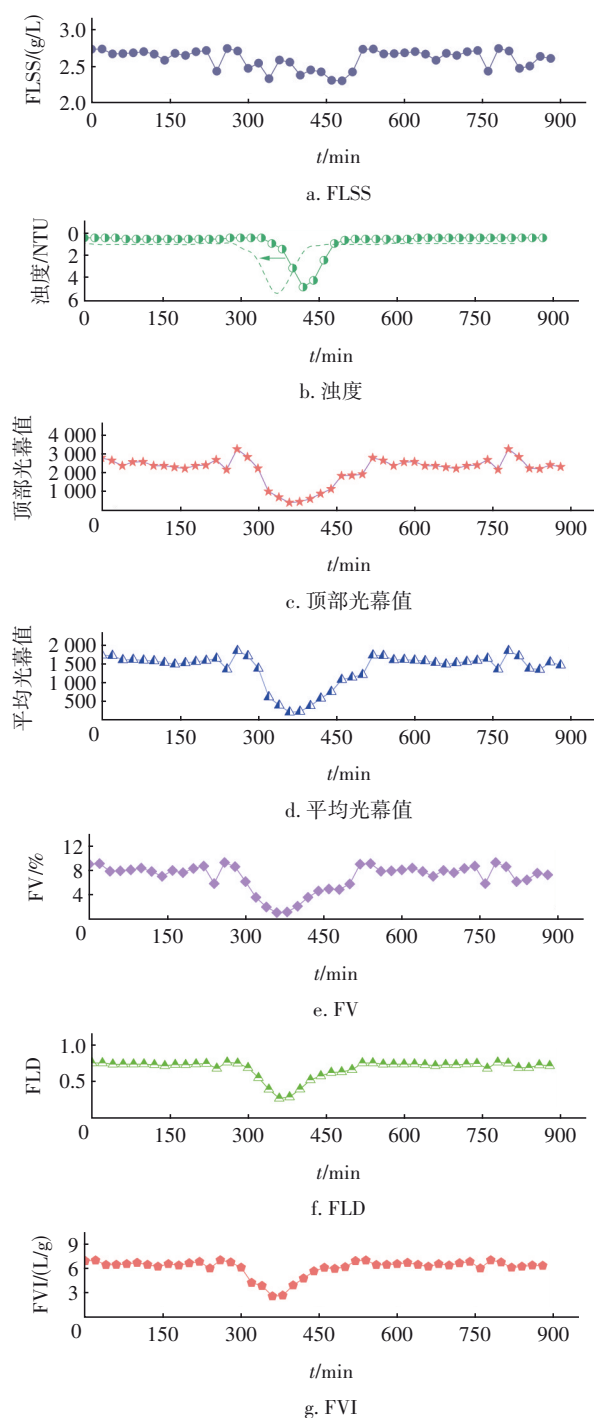


图4 各参数随时间变化的曲线

Fig.4 Temporal variation of each parameter

从图4(a)可以看出,FLSS波动不大但较为频繁,说明原水水质较为稳定,也是系统絮凝澄清后水质的间接反映。絮凝澄清后水质的直接反映为浊度,如图4(b)所示。浊度曲线整体呈现倒山峰形态,在曲线的两端波动很小,出水浊度基本在0.5 NTU左右,满足运行要求;然而浊度曲线中间位置

出现一个巨型“凹陷”,表明出水浊度发生了显著变化,从第360分钟浊度开始升高,持续到第420分钟,然后开始下降,再经过60 min后逐渐恢复到0.5 NTU左右。

同时发现,顶部光幕、平均光幕、FV、FLD、FVI这5条曲线显示“连续”状态,进一步表明装置自动化及连续运行的可靠性。5条曲线呈“凹”字形态,与浊度曲线具有相同的趋势和高度的相似性。而且,5组数据变化的时间节点相同,说明拟合参数反馈的同步性和一致性。另外,若将浊度曲线向左平移60 min,如图4(b)中绿色虚线所示,拟合参数曲线与浊度曲线可呈现“重合”之态,即曲线在形态、变化趋势、突变时间上具有出奇的一致性。对于变化趋势和突变时间而言,试验初始阶段,FV约为8%,FLD维持在0.73左右,FVI处于6.5 L/g左右。随着试验的进行,从300 min开始,FV、FLD、FVI呈现下降趋势并持续60 min,随后逐步上升恢复至正常运行状态。浊度曲线从360 min开始下凹且也持续60 min,随后逐渐恢复至正常水平。这说明FV、FLD、FVI的曲线趋势表达了1 h后的浊度曲线,表明拟合参数在表征澄清系统出水浊度上具有预警功能。

FVI的推导结合了其他拟合参数及因素,因此将FVI作为综合效能指标表征絮体沉降性能。在该系统中将FVI=2.6 L/g设置为出水不合格(5 NTU)的预警点。在本轮监测中,第360分钟之后,拟合参数FV、FLD、FVI在波动范围之外出现了连续3个下降点,达到判定工况运转为异常的条件。此时FVI降到2.57 L/g(低于预警值2.6 L/g),装置发出预警,提醒调整运行条件。经现场排查,发现助凝剂未及时添加,导致絮凝效果不佳,引起拟合参数的变化。加药调整后,各参数逐渐趋于合理范围。新拟合参数恢复后,浊度开始降低,经过1 h的缓冲,浊度接近0.5 NTU,恢复正常。因此,当FVI低于预警值时,表明絮体沉降性能较差,可能会发生絮体上浮、出水不清澈等现象,此时应查看加药系统运行工况、污泥回流量等,及时调整絮凝池工况,提高絮体沉降性能。

试验证明,开发的装置可实时监测絮体沉降状况,拟合参数尤其是FVI对澄清系统具有一定的预警作用。因此,该装置及拟合参数在水的预处理系统中具有广泛的应用前景。

5 结论

本研究提出了评价絮体沉降性能的表征参数: FV、FLSS、FLD 和 FVI, 推导了各参数之间的关系。同时开发出测试上述参数的装置, 为絮凝沉降提供了多维度的考量, 实现了测试的精准化、实时化、连续化与自动化。将该装置用于内蒙古某电厂, 拟合参数可及时反馈与监测澄清系统絮凝沉降效果, 尤其是 FVI 对澄清系统的预警具有更直观和显著的体现, 可提前 1 h 预测出水情况。同时该装置不受原水水质、季节、光线等因素的影响, 在监测与预警絮凝沉降效果领域具有一定的应用潜力。

参考文献:

- [1] Marques R O, Filho S S F. Further investigation of the irreversible floc breakup in flocculation kinetics modelling [J]. *Water Supply*, 2022, 22 (4): 3814-3823.
- [2] Saxena K, Brighu U. A comprehensive methodology for analysis of coagulation performance: dosing approach, isotherm modelling, FTIR spectroscopy and floc characterization [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 52: 103509.
- [3] Xu R J, Zou W J, Rao B, et al. In situ kinetics and flocs conformation studies of kaolinite flocculated by Chi-g-CPAM [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2023, 30(5): 813-823.
- [4] Muzi S S. Evaluation of the streaming current detector (SCD) for coagulation control [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 70: 1211-1220.
- [5] Romphophak P, Chamnanmor R, Fagkaew P, et al. Modelling the predictive analysis of turbidity removal efficiency in the in-line coagulation and flocculation process [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2024, 210: 301-310.
- [6] Bankole A O, Moruzzi R, Negri R G, et al. Machine learning framework for modeling flocculation kinetics using non-intrusive dynamic image analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908: 168452-168464.
- [7] 陈永久. 一种污泥沉降比监控系统及其自动清洗装置 [J]. *今日制造与升级*, 2023(9): 91-93.
Chen Yongjiu. A monitoring system for sludge settling velocity and the automatic cleaning device [J]. *Automation Technology and Application*, 2023(9): 91-93 (in Chinese).
- [8] 张江磊. 化工园区污水厂污泥沉降比在线检测装置的开发和应用研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
Zhang Jianglei. Development and application research of online detection device for sludge settling ratio in chemical park wastewater plant [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023 (in Chinese).
- [9] 潘泓江. 基于人工神经网络的实时污泥沉降比软测量器的设计与应用 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
Pan Hongjiang. Design and application of real-time sludge settlement ratio soft sensor based on artificial neural network [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [10] 洪雷, 王德凯. 污泥沉降比试验融合图像识别技术的应用研究 [J]. *中国新技术新产品*, 2023(7): 136-139.
Hong Lei, Wang Dekai. Application of fusion image recognition technology in sludge settling ratio test [J]. *China New Technologies and New Products*, 2023(7): 136-139 (in Chinese).
- [11] Benalia A, Baatache O, Derbal K, et al. The use of central composite design (CCD) to optimize and model the coagulation-flocculation process using a natural coagulant: application in jar test and semi-industrial scale [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 57: 104704-104720.

作者简介: 李小军(1979—), 男, 山西吕梁人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为水污染防治理论与技术。

E-mail: lixiaojun@tpri.com.cn

收稿日期: 2025-04-25

修回日期: 2025-05-28

(编辑: 刘贵春)