

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.03.005

悬浮载体有效比表面积的生物法测定研究

张亚莉¹, 霍克影², 周 坤³, 杨华仙⁴, 蔡言安⁵

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 宁波北仑岩东水务有限公司, 浙江 宁波 315800; 3. 北京北排建设有限公司, 北京 100000; 4. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081; 5. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266555)

摘 要: 悬浮载体有效比表面积(ESSA)的测定,对于准确设计悬浮载体投加量至关重要。采用生物法测定ESSA,以行业公认的K3型悬浮载体作为参比,将待测悬浮载体与K3置于相同条件下挂膜培养至稳定,通过稳定期各悬浮载体的处理性能并参比K3的表面负荷来测算ESSA。对于市面常见的6种不同类型悬浮载体,在低负荷培养条件下,符合行标产品的标号ESSA与实测值偏差不大,而非行标产品具有5.0%以上的负偏差;在高负荷培养条件下,各类产品均存在一定偏差,主要原因是生物膜增厚,挤占了有效表面积。采用生物法测定悬浮载体有效比表面积,具有准确可靠、可重现性强、结合实际水质等特点,更具有工程实际意义。对于常规的市政污水处理,低负荷下的测定结果更具备工程价值,如果条件允许,采用实际污水培养更接近工程结果;而对于高负荷进水,设计时应考虑设置安全系数,防止ESSA不足。悬浮载体的ESSA越大,应用时负荷弹性越大,可为污水厂持续提标、提量提供生物基础。新型悬浮载体的开发,应朝着ESSA更大的方向发展,需综合平衡悬浮载体流道、流化及整体形状。

关键词: 移动床生物膜反应器; 悬浮载体; 有效比表面积; 表面负荷; 生物法

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)03-0029-06

Determination of Effective Specific Surface Area of Suspended Carrier by Bioassay Method

ZHANG Ya-li¹, HUO Ke-ying², ZHOU Kun³, YANG Hua-xian⁴, CAI Yan-an⁵

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. Ningbo Beilun Yandong Water Co. Ltd., Ningbo 315800, China; 3. Beijing Drainage Construction Co. Ltd., Beijing 100000, China; 4. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China; 5. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266555, China)

Abstract: The determination of effective specific surface area (ESSA) of suspended carrier is very important for accurate design of suspended carrier dosage. A bioassay method was applied to determine ESSA, and the industry-recognized K3 suspended carrier was used as a reference. The suspended carriers to be tested and K3 were placed under the same condition for biofilm attached growth until stability, and ESSA was calculated by comparing the treatment performance of each suspended carrier and the surface

通信作者: 蔡言安 E-mail: cya_yanan@163.com

load of K3. For 6 different types of suspended carriers in the market, under the condition of low load, the deviation between the labeled ESSA of the products conforming to the industry standard and the measured value was small, while the negative deviation of the non-industry standard products was more than 5.0%. Under the condition of high load, all kinds of suspended carriers had certain deviation. The main reason was that the biofilm thickened and occupied the effective surface area. The bioassay method for determining the ESSA of suspended carriers has the characteristics of accuracy, reliability, strong reproducibility, combining with the actual water quality and so on, which has more engineering practical significance. For conventional municipal sewage treatment, the measurement results under low load have more engineering value. If conditions permit, the actual sewage culture is closer to the engineering results. For high load influent, safety factor should be considered in the design process to prevent the lack of ESSA. The larger the ESSA of the suspended carrier is, the greater load flexibility will be obtained during application, which can provide a microbial basis for sewage treatment plants to continuously increase the discharge standard and the treatment capacity. The development of new suspended carrier should be in the direction of pursuing a larger ESSA, and it is necessary to comprehensively balance the flow channel, fluidization and overall shape of suspended carrier.

Key words: moving bed biofilm reactor (MBBR); suspended carrier; effective specific surface area; surface load; bioassay method

移动床生物膜反应器(MBBR)是污水厂提标改造或新建的常规工艺之一,国内应用规模已超过 $2\,500\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,其中市政污水领域应用规模已超过 $2\,000\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。MBBR的应用按照微生物富集方式,主要有泥膜复合MBBR(简称S-MBBR)和纯膜MBBR(简称P-MBBR)两种。S-MBBR以活性污泥为基础,嵌入悬浮载体系统,强化活性污泥效果,行业内也称之为IFAS工艺。需要指出的是,IFAS泛指活性污泥-生物膜复合工艺,包括S-MBBR形式,也包含其他复合生物膜形式。P-MBBR则用悬浮载体生物膜完全替代活性污泥,不设置污泥回流,不富集悬浮态活性污泥^[1]。国内污水厂提标改造多采用S-MBBR形式,而近些年,P-MBBR在市政污水、市政给水、微污染水、黑臭水体治理(包含应急处理)等领域得以广泛应用^[2]。MBBR不论采用哪种形式,悬浮载体仍是其核心设备之一,其主要功能是为微生物的附着提供场所。单位体积悬浮载体能够为微生物挂膜提供保护且传质传氧良好的部分被称为有效比表面积(ESSA),是计算悬浮载体最终投加量的关键参数。悬浮载体的有效比表面积与总比表面积(TSSA)不同,在实际应用中,由于悬浮载体本身的构造和系统的水力特性,导致其某些部位并不能富集生物膜。一般ESSA/TSSA为0.6~

0.8,与具体悬浮载体产品相关。若采用TSSA替代ESSA,则可能面临悬浮载体投加量不足的风险,影响出水水质的稳定性。笔者从悬浮载体实际应用角度出发,以表面负荷为评定基准,研究了ESSA的生物测定方法,并评估了低负荷和高负荷培养条件下结果的差异性,以期为悬浮载体ESSA的测定提供新思路,为悬浮载体的选型提供依据。

1 MBBR工艺设计与有效比表面积

与传统活性污泥法采用容积负荷或污泥负荷作为设计参数不同,MBBR工艺采用表面负荷(L_s),即单位有效表面积的悬浮载体每天能够处理的污染物量作为设计参数^[3-4]。MBBR工艺不宜采用容积负荷作为设计参数的主要原因在于,一方面受悬浮载体填充率影响,容积负荷随之改变,表述复杂;另一方面,悬浮载体型号不同,相同填充率下其容积负荷也不相同。MBBR工艺不宜采用污泥负荷作为设计参数的主要原因在于,悬浮载体富集生物膜,传质对效果影响较大,而传质是界面过程,与表面积密切相关;同时生物膜的生物量测定困难,准确性差,而且与水质及组成密切相关,数值变化范围大且不稳定,故不宜作为设计参数。表面负荷是MBBR工艺自诞生之日起即采用的通用设计参数。同时,采用表面负荷作为设计参数,通过限定其范

围,可以鼓励开发更大有效比表面积的悬浮载体产品,对于产业发展也具有积极意义。住建部颁布的《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014)行业标准和最新修订的《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)都明确规定了采用表面负荷作为MBBR工艺的设计参数。

根据污染物去除量和表面负荷进行设计,得出总有效表面积(TESA),以此参数作为招投标依据。不同类型的悬浮载体,TESA相同时,由于ESSA不同,导致体积不同,这种方式有利于规避特定专利产品,有利于MBBR细分领域的发展。根据所选悬浮载体的ESSA,可最终获得悬浮载体的体积或质量,便于验收。

在CJ/T 461—2014标准中规定了部分产品的ESSA,并建议采用几何测量加和法测定悬浮载体的ESSA。由于悬浮载体尺寸较小,几何尺寸的误差可能会给ESSA带来更大误差,故也有借助显微镜进行几何尺寸的测定,以增强测定的准确性,但仍属于几何测量加和法范畴。另外,也有采用悬浮载体堆积密度、材料密度、平均壁厚方式测定总比表面积,称之为测量壁厚换算法,总比表面积=悬浮载体堆积密度÷悬浮载体平均厚度÷悬浮载体密度×2,但平均壁厚比悬浮载体内边角尺寸更小,测定仍基于几何法。从实际应用角度考虑,以上两种计算方法均不能准确区分ESSA和TSSA。为提高悬浮载体的挂膜面积,可以对微观表面粗糙化,但若其粗糙部分尺寸远小于生物膜厚度,微生物挂膜时会将表面粗糙处填平,最终并不能达到增加ESSA的目的,导致实际几何法测定的ESSA大于实际应用的ESSA。因此,几何测量加和法与测量壁厚换算法均可能存在一定的局限性,只能给出悬浮载体的TSSA上限,并不能获得准确的ESSA数据,并且缺乏第三方的论证。既然表面负荷是生化数据,与之对应的ESSA测定理应采用生物法,即在一定条件下培养,以标准的悬浮载体为参比,通过对比最终各悬浮载体处理性能的差别核算各自的ESSA。

2 材料和方法

2.1 悬浮载体的选取

K3型悬浮载体的ESSA为 $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$,为较早的应用于MBBR工艺的悬浮载体,已得到了业界的广泛认可。故以K3型悬浮载体为基准,以硝化性能为

参考,选取6种不同类型的悬浮载体(依次标记为C1~C6),采用生物法测定其ESSA。其中,C1为威立雅K1型悬浮载体,用以验证生物法测定悬浮载体ESSA的准确性,C2~C6为待检验悬浮载体。待检悬浮载体中C3为SPR-Ⅱ型,C4为SPR-Ⅲ型,C5的外观除高度外与SPR-Ⅲ相同,C2和C6为市场采购的其他悬浮载体,各类悬浮载体的规格见表1。

表1 不同类型悬浮载体的规格参数

Tab.1 Specification of different types of suspended carriers

项 目	K3	C1	C2	C3	C4	C5	C6
通道数	19	4	19	19	37	37	64
直径/mm	25	9.1	15	25	25	25	25
高度/mm	10	7.2	10	10	10	4	4
标号 ESSA/ ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$)	500	500	500	620	800	800	850
形状	放射状	十字	放射状	蜂窝状	蜂窝状	蜂窝状	放射状
通道形状	五边形	扇形	五边形	六边形	六边形	六边形	四边形
行标产品	否	否	否	是	是	是	否

2.2 试验装置

试验装置见图1,由储备液罐、原水罐和反应器组成。储备液罐用来储存高浓度污水,该类污水在原水罐被自来水稀释成特定浓度污水,然后由7个独立的进水泵打入7个反应器,保障各反应器进水水质一致。反应器分别记作R1~R7,有效容积均为18 L,对应的悬浮载体分别为K3、C1~C6,悬浮载体标号总有效表面积均为 4.5 m^2 ,悬浮载体填充率分别为50.0%、50.0%、50.0%、40.3%、31.3%、31.3%、29.4%。各反应器均配有曝气系统,以实现充氧并维持悬浮载体的流化,同时配有在线pH和DO探头,以维持稳定、相同的试验条件。

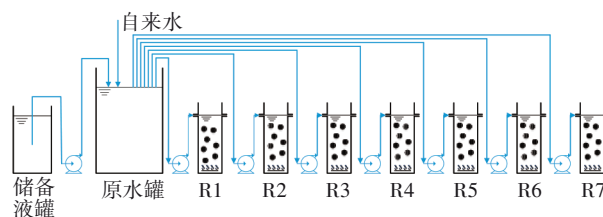


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of test device

2.3 试验阶段划分

试验分为启动期、低负荷运行期和高负荷运行期3个阶段,共运行112 d,以逐步提升流量的方式实现系统的快速启动。运行期间控制 $\text{DO} > 6 \text{ mg/L}$,

温度在20~22℃之间,其他参数如表2所示。

表2 运行阶段的参数控制

Tab.2 Parameters control in operation stage

项 目	运行 天数/ d	进水流量/ (L·d ⁻¹)	进水氨 氮浓度/ (mg·L ⁻¹)	HRT/h	设计进水 氨氮负 荷/(g·d ⁻¹)
启动期	40	20→140	70	21.6→3.1	1.4→9.8
低负荷 运行期	45	140	70	3.1	9.8
高负荷 运行期	27	140	100	3.1	14.0

2.4 分析方法

生物量的测定:①从各反应器随机选取50个挂膜悬浮载体,用蒸馏水清洗3次以去除表面杂质,然后放入鼓风干燥箱在60℃下烘干12h,取出放入干燥器中冷却至室温后称重,悬浮载体质量记为 m_1 ;②将烘干称重后的悬浮载体放入10%盐酸溶液中搅拌浸泡12h,然后用蒸馏水清洗3次,再放入10%的NaOH溶液中搅拌浸泡12h,直至生物膜脱落后取出清洗,然后按照步骤①烘干冷却称重,悬浮载体质量记为 m_2 。生物量AS按照式(1)进行计算。

$$AS = \frac{m_1 - m_2}{50} \quad (1)$$

生物膜的ESSA计算公式:

$$ESSA = \frac{(C_{inf} - C_{eff}) \times Q}{ARL_K \times (0.018 \times \varphi)} \quad (2)$$

式中: C_{inf} 为进水氨氮浓度,mg/L; C_{eff} 为出水氨氮浓度,mg/L; Q 为进水流量,L/d; ARL_K 为悬浮载体K3的表面负荷(以氨氮计),g/(m²·d);0.018为反应器的有效容积,m³; φ 为悬浮载体的填充率。

氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定,DO、pH值分别采用E+H CM448多参数水质分析仪和WTW Multi3430多参数水质分析仪测定。

3 结果与讨论

3.1 生物法测定悬浮载体的有效比表面积

反应器在各阶段的运行效果如图2所示。反应器采用保持进水氨氮浓度恒定、逐步提升进水流量的启动方式,未接种活性污泥,自然挂膜,各反应器的调控保持一致。除K3外,其余悬浮载体的ESSA均为待测,故文中所述表面负荷均以K3为标准进行计算。运行8d后,各系统出水氨氮均实现了快速降低,R1反应器的氨氮去除率达到90%以上,硝化

表面负荷达到0.26 g/(m²·d)。随后开始提升进水流量,每一次流量的提升,都伴随着出水氨氮浓度的升高,但很快又能恢复到较低水平,说明系统的硝化性能提升效果较好。运行16d后,R1反应器的硝化表面负荷已达到0.62 g/(m²·d)。为了保障系统更加稳定,每次出水氨氮降低后并没有急于再次提升进水流量,而是稳定运行一段时间后再提升,导致启动时间有所延长。运行40d后进水流量达到140 L/d的目标值。此时,悬浮载体挂膜状态密实,各反应器出水氨氮浓度均稳定低于1.0 mg/L,系统进入低负荷运行期。

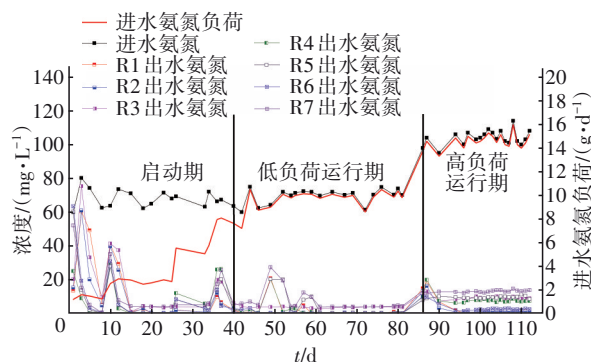


图2 各反应器的运行效果

Fig.2 Operation effect of each reactor

在低负荷运行期,各系统的实际进水氨氮负荷为9.86 g/d,R1反应器的氨氮去除率达到99.54%,硝化表面负荷为2.18 g/(m²·d)。由于C1~C6型悬浮载体的ESSA均为待测定指标,故只核算了R2~R7的硝化性能,分别为9.82、9.33、9.83、9.81、9.84、9.26 g/d,计算得到的ESSA见图3。随后控制进水流量不变,将进水氨氮浓度提高至100 mg/L,系统进入高负荷运行期,实际进水氨氮负荷为14.68 g/d,是低负荷的1.49倍。在该阶段,随着进水负荷的提升,各系统的处理能力也得到了提升。但由于各系统硝化能力的差异,导致了出水氨氮差异较大,其中R1、R2、R7反应器出水效果较好,出水氨氮均低于5 mg/L,其余反应器得出水氨氮均在5 mg/L以上。稳定运行期间,R1反应器的氨氮去除率达到99.04%,硝化表面负荷为3.23 g/(m²·d)。同样核算R2~R7的实际硝化性能分别为14.52、13.37、13.62、13.32、14.32、12.82 g/d,计算得到的ESSA见图3。从图3可以看出,在低负荷条件下,除C2和C6外,其余悬浮载体的ESSA测定结果与标号值基本相符;C2、C6的ESSA相对偏差分别为-5.0%、

-5.5%。在高负荷条件下,悬浮载体的ESSA实测值均低于标号值,C1~C6的ESSA相对偏差分别为-0.2%、-8.0%、-6.3%、-8.5%、-1.6%、-11.8%。C1为MBBR工艺较早应用的K1型悬浮载体,测定结果显示,不论是低负荷还是高负荷,其ESSA测定值基本为 $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$,间接验证了采用生物法测定悬浮载体ESSA的有效性。

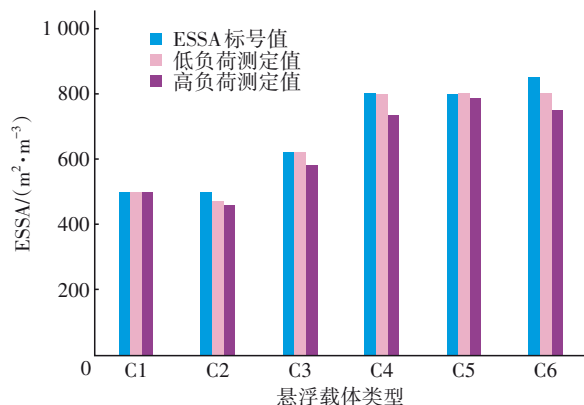


图3 低、高负荷下测得的悬浮载体ESSA

Fig.3 ESSA of suspended carriers under low load and high load

从图3还可以看出,在低负荷条件下,除C1的ESSA测定值等于标号值,C3、C5的ESSA测定值略高于标号值外,其余悬浮载体的ESSA测定值均低于标号值。C2和C6的ESSA测定值偏差较大,达到了5%以上,而在高负荷条件下,该值继续扩大到了8%以上,说明在实际应用过程中,这两种悬浮载体的ESSA标号值存在一定的误差,应防止实际应用时ESSA不足导致的出水超标问题。C3~C5虽然在低负荷条件下的ESSA测定值与标号值相差不大,但在高负荷条件下也出现了较大的偏差,说明随着应用场景的切换,各类型悬浮载体能够提供的ESSA也会随之变化。对于一般的生活污水,进水氨氮浓度大多低于 70 mg/L ,低负荷条件下的ESSA测定结果对于常规生活污水更具有工程价值。另外可以看出,在容积负荷相差不大的情况下,随着悬浮载体ESSA的增加,其投加量(填充率)降低。采用较大ESSA的悬浮载体,能够更大范围内强化系统的处理性能,也能够为污水厂持续提标、提量提供生物基础。对于高负荷系统,主要是处理工业废水,设计时应增加安全系数,从而弥补高负荷条件下悬浮载体ESSA的降低。综上可知,采用生物法测定悬浮载体的ESSA具有一定的实际意义。

在不同运行期悬浮载体的生物量见图4。可以看出,各悬浮载体之间由于直径、高度存在差异,其生物量无明显的变化规律,无可比性。而对于同一悬浮载体,随着进水负荷的提高,其生物量均出现了不同程度的增加,也就意味着在ESSA一定的情况下,随着生物量的提高,生物膜厚度也相应增加。如图5所示(从左到右生物膜逐渐增厚),生物膜厚度增加带来的直接问题就是流道孔径的降低以及实际ESSA的降低。

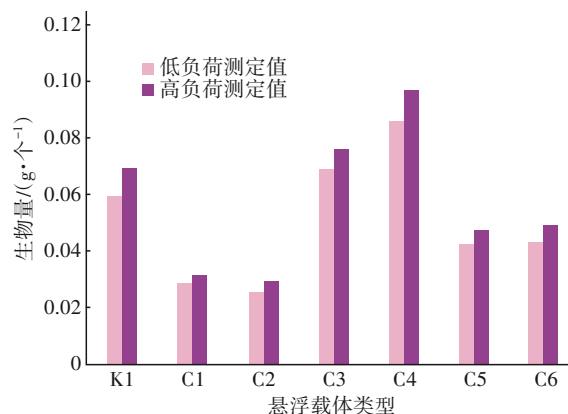


图4 各类型悬浮载体的生物量

Fig.4 Biomass of different types of suspended carriers

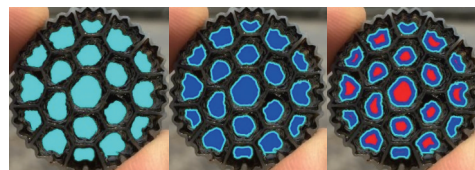


图5 生物膜厚度对传质的影响

Fig.5 Effect of biofilm thickness on mass transfer

为简化描述,将悬浮载体流道抽象为圆形,以流道直径 2.5 mm 、高度 10 mm 为例,生物膜厚度每增大 0.2 mm ,流道直径将缩小 0.4 mm ,流道周长将缩小16%,直接接触的ESSA也将缩小16%。同时,流道越小,毛细作用越显著,表面张力越大,对传质的影响越大,不利于微生物代谢。此外,悬浮载体生物膜对污染物的去除作用依赖于传质传氧过程,而DO及基质传质能力有限,若生物膜增厚,虽然表观生物量增加,但由于内层基质供给不足,并不能发挥处理效能,所以这部分由于生物膜增厚所带来的生物量增长并不能提高处理效率^[5]。以上两个问题也是导致在高负荷条件下悬浮载体ESSA降低的原因。所以MBBR工艺的运行,应更多地关注悬浮载体的有效表面积,尤其是能够满足微生物富集生

长及良好传质的有效表面积,从而直接提高处理效果,这也是悬浮载体投加量设计的重要依据。

3.2 悬浮载体 ESSA 的影响因素初探

为了提高 MBBR 工艺的处理效能,新型悬浮载体的开发应朝着 ESSA 更大的方向发展。结合表1和图3对悬浮载体 ESSA 的影响因素进行分析。

① 通道形状的影响:悬浮载体 K3 和 C3 的直径、高度、通道数都一样,通过优化通道形状可以提高其 ESSA,同时,蜂窝状受力结构更优,有利于维系悬浮载体结构的稳定,确保其使用寿命。

② 通道数的影响:C3 和 C4 的直径、高度、通道形状均一致,通过优化分格后,C4 的通道数由 C3 的 19 增至 37,在一定程度上增加了 ESSA,但并非按照通道数比例增加。通道数不能一味地增加,如 C4 的通道数比 C3 增加了近 1 倍,但 ESSA 仅增加了 29%;如 C4 和 C6,在通道数由 37 增至 64 后,悬浮载体的 ESSA 并没有表现出明显的增长,这是因为通道数增加,则通道变小,传质传氧将更加困难,对于流化要求更高。试验是在相同流化条件下进行的,故实测显示其 ESSA 未明显增长。流道越小,越需要较强的剪切力条件来促使生物膜效果的表达。

③ 高度的影响:对比 C4 和 C5,两者的通道数量、直径和通道形状均一致,但高度不一样,这对 ESSA 的影响有限;但是,减少高度对于强化通道内的传质效率有积极意义,所以在高负荷条件下,C5 的实际 ESSA 较 C4 更接近于标号值。

综上,要想实现悬浮载体 ESSA 的增加,需综合平衡流道、流化及整体形状。

4 结论与建议

采用生物法实测市面常见标号有效比表面积分别为 500、500、620、800、800、850 m^2/m^3 的 6 种不同类型悬浮载体,在市政污水水平的低负荷培养条件下,ESSA 的实测值与标号值偏差分别为 0、-5.0%、0.3%、-0.1%、0.3%、-5.5%;在高浓度废水水平的高负荷培养条件下,ESSA 的实测值与标号值偏差分别为 -0.2%、-8.0%、-6.3%、-8.5%、-1.6%、-11.8%。在低负荷条件下,符合行标产品的标号 ESSA 与实测值偏差不大,非行标产品具有 5.0% 以上的负偏差;高负荷条件下,各类产品的 ESSA 实测值均存在一定偏差,主要原因是生物膜增厚,挤占

了有效表面积。

生物法测定悬浮载体的有效比表面积,具有准确可靠、可重现性强、结合实际水质等特点,更具有工程实践意义。对于常规的市政污水处理,低负荷下的测定结果更具有工程价值,如果条件允许,采用实际污水培养更接近工程结果;而对于高负荷进水,设计时应考虑设置安全系数,防止 ESSA 不足。悬浮载体的 ESSA 越大,应用时负荷弹性越大,可为污水厂持续提标、提量提供生物基础。新型悬浮载体的开发,应朝着 ESSA 更大的方向发展,需综合平衡悬浮载体流道、流化及整体形状。

参考文献:

- [1] 吴迪. MBBR 在国内的工程应用与发展前景[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16): 22-31.
WU Di. Application and development prospect of MBBR in China [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 22-31 (in Chinese).
- [2] 周家中, 吴迪, 郑临奥. 纯膜 MBBR 工艺在国内外的工程应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 37-47.
ZHOU Jiazhong, WU Di, ZHENG Lin'ao. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 37-47 (in Chinese).
- [3] ØDEGAARD H, GISVOLD B, STRICKLAND J. The influence of carrier size and shape in the moving bed biofilm process [J]. Water Science and Technology, 2000, 41(4/5): 383-391.
- [4] ØDEGAARD H. Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process [J]. Water Science and Technology, 2006, 53(9): 17-33.
- [5] 吴迪. 水处理用悬浮载体填料行业标准解读与投加量设计[J]. 中国给水排水, 2017, 33(16): 13-17.
WU Di. Interpretation of high density polyethylene suspended carrier for water treatment and calculation of added amount of suspended carrier [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 13-17 (in Chinese).

作者简介:张亚莉(1977-),女,陕西渭南人,本科,高级工程师,主要从事市政给排水设计工作。

E-mail: zhangyali00@cemi.com.cn

收稿日期:2021-07-07

修回日期:2021-09-18

(编辑:刘贵春)