

长吸附带填料柱有效吸附容量计算方法

张 怡¹ 黄 敏² 吴玲琳³ 刘 焱⁴ 王世和⁴

(1 四川省建筑设计院, 成都 610017; 2 中机国际工程设计研究院江苏分院, 南京 210000;

3 杭州市建筑设计研究院有限公司, 杭州 310001; 4 东南大学市政工程系, 南京 210096)

摘要 对长吸附带填料柱的有效吸附容量进行探讨。吸附带过长会导致填料柱有效吸附容量成负数, 提出了吸附带在 $f\delta > L$ 的情况下有效吸附容量的计算方法。定义了安全吸附容量系数 g , 证明了 g 值可以通过填料吸附量沿高度分布曲线和吸附柱的泄漏和耗竭曲线的相似法则计算得到。

关键词 填料柱 吸附带 吸附容量 安全吸附容量系数

有效吸附容量是吸附柱设计时的重要参数, 目前的计算方法大多通过吸附泄漏曲线进行推导, 且以往的推导中吸附柱填料多以活性炭为例^[1~4]。在将该理论用于本课题组研发高效除磷材料 (efficient phosphorus removal composite, EPRC) 的吸附柱设计计算时发现, 该理论并未涉及某些特定情况下泄漏曲线的推导。对此, 本文将进行探讨。

1 问题的提出

1.1 活性炭吸附柱的泄漏和耗竭过程^[1]

图 1 反映了吸附柱出水浓度同产水量的关系。图中 ρ_b 为允许的最高出水浓度, 即吸附柱的泄漏浓度; ρ_x 为耗竭浓度, $\rho_x \approx 0.95\rho_i$; V_b 为生产总水量; V_x 为耗竭时的生产总水量。由于 ρ_b 和 ρ_x 分别接近 0 和 ρ_i , 故在误差允许的范围内将吸附过程曲线的纵轴设定为 0 到 ρ_i , 以吸附接触时间为横轴作泄露与耗竭曲线, 如图 2, 图中 t_b 为吸附周期。

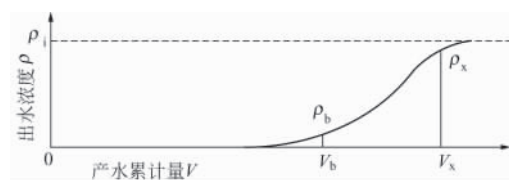


图 1 吸附柱的泄漏和耗竭曲线

由图 2 可知, 吸附带的总吸附能力为面积 $V_b V_x v_b$ 所代表的污染物, 但当吸附带到达柱底后, 它只剩面积 $V_b v_x v_b$ 所代表的吸附能力, 可以定义吸附带的分数容量 f_1 为:

江苏省太湖水污染治理科技专项 (BS2007146)。

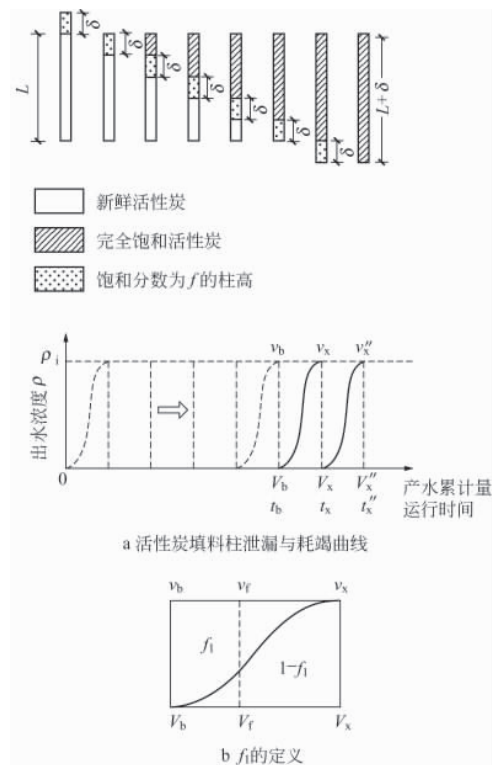


图 2 活性炭填料柱泄漏耗竭曲线的物理涵义

$$f_1 = \frac{\text{面积 } V_b v_x v_b}{\text{面积 } V_b V_x v_b} = \frac{(f\delta) \text{ 厘米吸附柱的全部吸附能力}}{(\delta) \text{ 厘米吸附柱的全部吸附能力}} \quad (1)$$

f_1 的含义见图 2b。

1.2 EPRC 吸附柱的泄漏和耗竭过程

由于吸附速率、污染物浓度的不同, EPRC 吸附柱的泄漏和耗竭曲线较活性炭更趋平缓, 如图 3, 其最大原因可能是 EPRC 吸附带的高度比所用吸附

柱高度要高,即 $\delta > L$, 其中 δ 可理解为长吸附带。
此时 f_2 的定义不变。

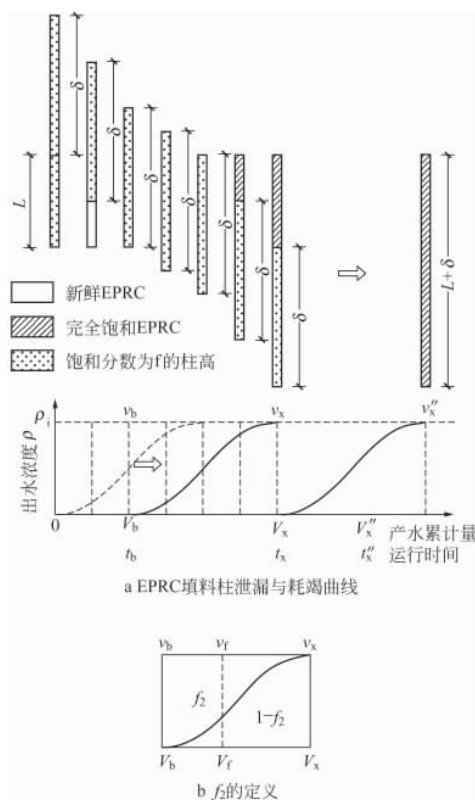


图3 EPRC 填料柱泄漏耗竭曲线的物理涵义

1.3 吸附容量的比较计算

对比两种填料的吸附柱泄漏和耗竭曲线可以看出,对有效吸附容量的计算已有不同。对活性炭吸附柱而言,当 $f\delta < L$ 时:

$$\text{吸附柱的有效吸附容量} = x_i \rho_c A (L - f\delta) \quad (2)$$

式中 A ——吸附柱的面积, m^2 ;

ρ_c ——活性炭的视密度, kg/m^3 ;

x_i ——平衡浓度为 ρ_i 时 1 kg 活性炭所吸附的有机物重量, kg 。

对 EPRC 吸附柱,由于 $f\delta > L$,若继续套用活性炭的有效吸附容量公式将会得出吸附容量小于零的错误结论。因此,对长吸附带情况下吸附容量的计算方法需要重新设计。

2 计算方法分析

2.1 安全吸附容量系数的提出

有效吸附容量的物理意义在于它定义了吸附柱出水从 0 到允许最高出水浓度 ρ_b 这一过程中吸附柱所吸附的污染物,在 EPRC 吸附过程中该容量应该有:

当 $f\delta > L$ 时:

$$\begin{aligned} \text{吸附柱的有效吸附容量} &= x_i \rho_c A \left[L - f\delta \left(\frac{L}{\delta} \right) \right] \\ &= x_i \rho_c A (L - fL) \\ &= x_i \rho_c A L (1 - f) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)表明该情况下吸附柱有效吸附容量与吸附带的大小无关,但注意到,纵轴所表示出水浓度的 0 点实际上是允许最高出水浓度 ρ_b ,因此此时的 ρ_b 不能用 0 来代替。

观察 $V_b v_x$ 曲线可以看出,在泄漏的初始阶段,出水的污染物浓度在很长时间内可保持在最高允许出水浓度 ρ_b 以下,可以推断,柱内污染物浓度从 0 到 ρ_b 这一过程可持续很长一段时间,且与 δ 有关。

设此时的允许最高浓度为 ρ_g ,作 $\rho = \rho_g$ 曲线与 $V_b v_x$ 交于 A 点,与 $V_b v_b$ 交于 B 点,如图 4。

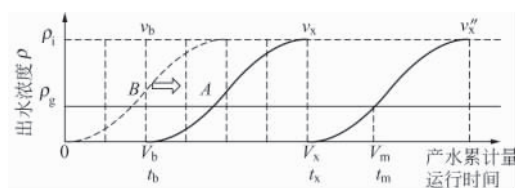


图4 EPRC 填料柱泄漏耗竭曲线

此时, $V_b AB$ 区域代表了在出水污染物浓度从 0 到允许范围内吸附柱能够拥有的吸附能力,对于活性炭填料吸附柱而言,由于 ρ_g 无限趋近于 ρ_b ,相当于图 4 中 ρ_g 无限趋近于 0 点, $V_b AB$ 区域面积无限趋近于 0,在误差范围内可以忽略不计;对于 EPRC 填料吸附柱而言则须计算到吸附容量内,此时的吸附容量应加上 $V_b AB$ 区域所代表的吸附能力。为了更好的表述,在此定义一无量纲参数 g ,数值上 $g = \text{面积 } V_b AB / \text{面积 } V_b v_x v_b$,称之为安全吸附容量系数。可见, g 反映了吸附柱允许最高出水浓度同耗竭后出水浓度的关系,其含义如图 5。

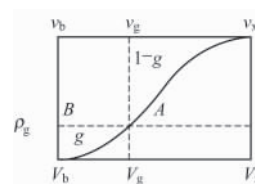


图5 安全吸附容量系数的涵义

2.2 有效吸附容量的校核

有了安全吸附容量系数,吸附柱的有效吸附容量则有如下关系式:

$$\begin{aligned}\text{吸附柱的有效吸附容量} &= x_i \rho_c A \left[L - fg\delta \left(\frac{L}{\delta} \right) \right] \\ &= x_i \rho_c A (L - fgL) \\ &= x_i \rho_c AL (1 - fg) \quad (4)\end{aligned}$$

由于 g 是由吸附带 δ 衍生而来的, 式(4)即说明了吸附柱的有效吸附容量同吸附带是有关系的, 同式(3)相比更能够反映客观规律。

2.3 安全吸附容量系数 g 的计算

鉴于吸附柱有效吸附容量计算的目的是为方便吸附柱的设计, 因此, 不妨在吸附柱的设计中对安全吸附容量系数 g 进行计算。为此有人^[1]提出, 可以建立吸附柱泄漏和耗竭曲线与吸附试验所求得容量传质系数的关系, 从而在不知泄漏曲线的前提下可直接设计吸附柱。

采用此方法进行吸附柱设计时有两个前提条件: 一是填料吸附量 x/m 沿吸附带高度的分布曲线同吸附柱的泄漏和耗竭曲线的末端完全相似; 二是合理假定单位填料所吸附污染物的量同单位通量所通过污染物的量是成正比。这两个条件已被证实^[1]。作出条件一中吸附量沿末端吸附带高度分布曲线图, 如图 6, 自此可对吸附柱进行设计。

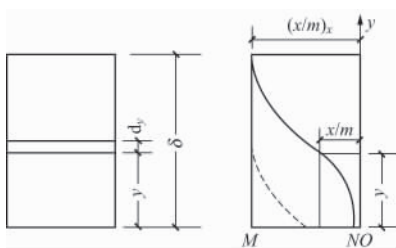


图 6 柱底吸附带中的 x/m 分布曲线^[1]

根据定义和图 5, 安全吸附容量系数 g 为:

$$g = \frac{\text{面积 } V_b AB}{\text{面积 } V_b v_x v_b} = \frac{\int_{V_b}^V (\rho_g - \rho) dV}{\int_{V_b}^V (\rho_i - \rho) dV}$$

右式分子分母同除以 $(V_x - V_b) \rho_i$, 有:

$$g = \frac{\int_{V_b}^V (\rho_g - \rho) dV}{(V_x - V_b) \rho_i} \cdot \frac{\int_{V_b}^V (\rho_i - \rho) dV}{(V_x - V_b) \rho_i}$$

分别计算右式的分子分母, 有:

$$\text{分母} = \frac{\int_{V_b}^V (\rho_i - \rho) dV}{(V_x - V_b) \rho_i} = f$$

又有:

$$\begin{aligned}f &= \int_0^1 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_i} \right) d \left(\frac{V - V_b}{V_x - V_b} \right)^{[1]} \\ &= \int_0^1 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_i} \right) d \left(\frac{y}{\delta} \right)^{[1]} \\ \text{分子} &= \frac{\int_{V_b}^V (\rho_g - \rho) dV}{(V_x - V_b) \rho_i} \\ &= \int_0^1 \left(\frac{\rho_g - \rho}{\rho_i} \right) d \left(\frac{V - V_b}{V_x - V_b} \right) \\ &= \int_0^1 \left(\frac{\rho_g - \rho}{\rho_i} \right) d \left(\frac{y}{\delta} \right) \quad (5)\end{aligned}$$

f 和 δ 已知后, 就可由式(5)计算出 g 值, 进而由式(4)计算出吸附柱的有效吸附容量。

3 计算实例验证

以本课题组所研发的高效除磷材料为例, 传质系数 $ka = 3.996 \text{ kg}/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$, 其干密度为 $1190.108 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。所用填料柱为内径 5 cm , 高 20 cm 的有机玻璃柱体, 用以处理平均总磷浓度为 $5 \text{ mg}/\text{L}$ 的污水, 污水的总磷负荷为 $2.25 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$, 取允许最高出水浓度 $\rho_g = 0.5 \text{ mg}/\text{L}$, 经过 23 d 填料柱出水开始不达标。

通过烧杯试验得 25°C 下吸附等温线为:

$$\begin{aligned}y &= 1.1393x + 0.0207 \\ R^2 &= 0.9897\end{aligned}$$

因此 $(x/m)^0 = 0.877732$, $b = 55.03865$, 进而得出该条件下 Langmuir 公式:

$$\frac{x}{m} = \frac{b(x/m)^0 \rho_e}{1 + b \rho_e} = \frac{55.04 \times 0.88 \times \rho_e}{1 + 55.04 \times \rho_e}$$

计算 $\int_{\rho_b}^{\rho_x} \frac{d\rho}{\rho - \rho_e}$ 及 f 值如表 1。

由表 1 可得: $\int_{\rho_b}^{\rho_x} \frac{d\rho}{\rho - \rho_e} = 5.794$, $\Sigma f = 0.6843$ 。

根据式(5)计算 g 值如表 2。其中表 2 第 14 栏与表 1 第 1 栏含义相同, 只计算 $\left(\frac{\rho_g - \rho}{\rho_i} \right) > 0$ 的部分。

由于 $\delta \times \frac{ka}{F_m} = 3.426905$, 将 ka 及 F_m 值代入得:

$$\delta = 3.4269 \times \frac{2.25}{3.996} = 1.930(\text{m})$$

表 1 $\int_{\rho_e}^{\rho_i} \frac{d\rho}{\rho - \rho_e}$ 及 f 值 计 算 结 果

ρ	ρ_e	$\frac{\rho}{\rho_i}$	$1 - \frac{\rho}{\rho_i}$	$\left(\frac{1 - \frac{\rho}{\rho_i}}{\rho_i}\right)$ 平均值	$\rho - \rho_e$	$\left(\frac{1}{\rho - \rho_e}\right)$	$\left(\frac{1}{\rho - \rho_e}\right)$ 平均值	$\frac{\Delta\rho}{\rho - \rho_e}$	$\sum \frac{\Delta\rho}{\rho - \rho_e}$	y/δ	$\Delta(y/\delta)$	f
0.2	7.6E-04	0.04	0.96		0.199	5.018 925						
0.6	0.002 5	0.12	0.88	0.92	0.598	1.673 548	3.346 237	1.338 495	1.338 495	0.390 584	0.390 584	0.359 337
1.0	0.004 5	0.20	0.80	0.84	0.995	1.004 542	1.339 045	0.535 618	1.874 113	0.546 882	0.156 298	0.131 290
1.4	0.007 0	0.28	0.72	0.76	1.390	0.717 890	0.861 216	0.344 486	2.218 599	0.647 406	0.100 524	0.076 398
1.8	0.010 2	0.36	0.64	0.68	1.790	0.558 710	0.638 3	0.255 320	2.473 919	0.721 911	0.074 505	0.050 663
2.2	0.014 2	0.44	0.56	0.60	2.186	0.457 495	0.508 102	0.203 241	2.677 160	0.781 218	0.059 307	0.035 584
2.6	0.019 5	0.52	0.48	0.52	2.580	0.387 527	0.422 511	0.169 004	2.846 164	0.830 535	0.049 317	0.025 645
3.0	0.027 0	0.6	0.40	0.44	2.973	0.336 361	0.361 944	0.144 778	2.990 942	0.872 782	0.042 247	0.018 589
3.4	0.038 2	0.68	0.32	0.36	3.362	0.297 457	0.316 909	0.126 764	3.117 705	0.909 773	0.036 991	0.013 317
3.8	0.056 7	0.76	0.24	0.28	3.743	0.267 141	0.282 299	0.112 92	3.230 625	0.942 724	0.032 951	0.009 226
4.2	0.093 2	0.84	0.16	0.20	4.107	0.243 501	0.255 321	0.102 128	3.332 753	0.972 526	0.029 802	0.005 96
4.6	0.199 7	0.92	0.08	0.12	4.400	0.227 258	0.235 379	0.094 152	3.426 905	1.000 000	0.027 474	0.003 297
5.0												0.729 307

表 2 根 据 式 (5) 计 算 得 到 的 g 值

ρ	ρ_e	$\frac{\rho}{\rho_i}$	$1 - \frac{\rho}{\rho_i}$	$\left(\frac{1 - \frac{\rho}{\rho_i}}{\rho_i}\right)$ 平均值	$\rho - \rho_e$	$\left(\frac{1}{\rho - \rho_e}\right)$	$\left(\frac{1}{\rho - \rho_e}\right)$ 平均值	$\frac{\Delta\rho}{\rho - \rho_e}$	$\sum \frac{\Delta\rho}{\rho - \rho_e}$	y/δ	$\Delta(y/\delta)$	$\left(\frac{\rho_g - \rho}{\rho_i}\right)$	$\left(\frac{\rho_g - \rho}{\rho_i}\right)$ 平均值	g
0.20	7.6E-04	0.040	0.960		0.199	5.018 9						0.060		
0.24	9.1E-04	0.048	0.952	0.956	0.239	4.182 6	4.600 75	1.840 30	1.840 299	0.191 3	0.191 285	0.052	0.056	0.010 712
0.28	0.001 1	0.056	0.944	0.948	0.279	3.585 2	3.883 87	1.553 55	3.393 848	0.352 8	0.161 48	0.044	0.048	0.007 751
0.32	0.001 2	0.064	0.936	0.940	0.319	3.137 1	3.361 15	1.344 46	4.738 309	0.492 5	0.139 746	0.036	0.040	0.005 590
0.36	0.001 4	0.072	0.928	0.932	0.359	2.788 7	2.962 89	1.185 16	5.923 466	0.615 7	0.123 188	0.028	0.032	0.003 942
0.40	0.001 6	0.080	0.920	0.924	0.398	2.509 9	2.649 26	1.059 71	6.983 172	0.725 9	0.110 148	0.020	0.024	0.002 644
0.44	0.001 8	0.088	0.912	0.916	0.438	2.281 8	2.395 83	0.958 33	7.941 503	0.825 5	0.099 611	0.012	0.016	0.001 594
0.48	0.001 9	0.096	0.904	0.908	0.478	2.091 7	2.186 75	0.874 70	8.816 201	0.916 4	0.090 918	0.004	0.008	0.000 727
0.52	0.002 1	0.104	0.896	0.900	0.518	1.930 9	2.011 29	0.804 52	9.620 718	1.0000	0.083 623			

此时 $f\delta = 0.729 \times 1.930 = 1.407 > 0.5 = L$

属于长吸附带。

表 2 最后一列的求和即为式 (5) 的分子

$= 0.032 96$ 。

由于高效除磷材料在浓度为 5 mg/L 时的 x/m 值为 675.155 kg/g, 由式 (4) 得吸附柱有效吸附容量为

$$x_i \rho_e AL(1 - fg) = [675.155 \times 1.90.1 \times 0.001 962 5 \times 0.2 \times (1 - 0.032 96 \times 0.729 3)] \\ = 307.795 9 (\text{g/m}^3)$$

污水总磷浓度按 0.005 g/L 计算, 污水则吸附周期 T 为:

$$307.796 / (0.005 \times 2.25) = 27 353.19 (\text{min})$$

$$= 455.886 4 (\text{h})$$

$$\approx 19.00 (\text{d})$$

可以看出, 通过计算推导出来的吸附周期 19 d 同试验时 23 d 穿透的结果较为接近。由于实际试验时温度很难稳定在 25 °C, 吸附速率随温度的变化而变化, 使结果略有降低。另计算时所产生的误差对结果也有影响。

4 结 论

鉴于以吸附柱有效吸附容量 $= x_i \rho_e AL(1 - f)$ 进行计算时, 吸附带过长易导致吸附容量小于 0 的错误结果, 故本文以吸附带 δ 满足 $f\delta > L$ 情况下吸

人工快渗处理城镇污水的优化技术研究

司圣飞¹ 陈永青¹ 刘康怀²

(1 广西华蓝设计(集团)有限公司, 南宁 530011; 2 桂林理工大学, 桂林 541004)

摘要 人工快渗(CRI)处理工艺具有管理简单、运行成本低、处理效果稳定等特点,适用于小城镇污水处理。目前,CRI的氧化还原环境主要依赖湿干交替运行,试验设置了三组不同的CRI系统,对设置通风管优化复氧环境和采用不同填料去除磷效果进行了研究,进一步论证了CRI系统在城镇污水处理方面的良好效果。

关键词 污水处理 CRI系统 复氧 填料 除污机理

1 CRI系统的应用及存在问题

人工快渗(Constructed Rapid Infiltration, CRI)处理工艺因其具有建设与运行成本低、管理简单、处理效果好等特点,在广东、广西、四川等地得到了推广应用,如:深圳市宝安区白花洞村生活污水工程(1 500 m³/d)、深圳观澜湖高尔夫球场牛湖河污水处理工程(1 万 m³/d)、凤凰河二沟污水治理工程(2 万 m³/d)、桂林市阳朔县田家河生活污水工程(8 000 m³/d)、桂林兴安县污水处理工程(1 万 m³/d)、广西蒙山县污水处理工程(1 万 m³/d)等。CRI是在传统快速渗滤系统(RI)的基础上发展起来的一种污水土地处理工艺模式^[1~4]。其工艺流程见图1。



图1 CRI处理生活污水的典型工艺流程

CRI系统工艺用于处理城镇生活污水有以下特点:①处理工艺流程简单,省去了二沉池;②设备少,

附柱的有效吸附容量 $=x_i\rho_cAL(1-f_g)$ 对EPRC进行计算。其中安全吸附容量系数 g 值可以通过填料吸附量沿高度分布曲线和吸附柱的泄漏和耗竭曲线的相似法则进行计算。

参考文献

- 1 许保玖 龙腾锐. 当代给水与废水处理原理. 北京: 高等教育出版社, 2000. 136~147

维修与管理容易;③建设与运行成本低;④需要人工翻晒填料层实现湿干交替运行来保持填料层的氧化还原环境;⑤处理后出水可以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B标准;⑥氨氮和总磷的去除效果显著,去除率可分别达到90%和80%,但脱氮除磷效果不稳定,特别是总氮的去除不稳定。

1.1 CRI系统脱氮途径分析

多年的理论和实践证明,微生物的硝化、反硝化作用是土地处理系统中氮去除的主要途径,一般去除率在70%以上。CRI系统通常氨氮的去除率较高,而总氮去除率较低,其原因就是硝化比较彻底,但反硝化不够充分。所以,CRI系统解决总氮去除的关键是解决反硝化不够充分的问题。

1.2 CRI系统除磷途径分析

早期的CRI系统处理池通常采用普通的砂填料(河砂),即使经过人工翻晒,实现湿干交替运行,其除磷效果也不稳定,特别是经过一段时间的运行后,出水可能达不到排放要求。为了达到除磷的效

- 2 《化学工程手册》编辑委员会. 化学工程手册. 1989
- 3 王乃忠. 活性炭吸附柱设计若干问题研究. 水处理技术. 1986, 12 (1): 5~9
- 4 Suffet I H, Mc Guire M J. Eds. Activated Carbon Adsorption of Organics from the Aqueous Phase. 1980

✉ 通讯处: 610017 成都市大安中路 65 号

E-mail: zhangyi_lance@163.com

收稿日期: 2010-09-16