

工业给排水.

# 厌氧颗粒污泥悬浮床反应器的研究与应用

王凯军<sup>1</sup> 常丽春<sup>1</sup> 甘海南<sup>2</sup>

(1 北京市环境保护科学研究院,北京 100037; 2 山东十方圆通环保有限公司,济南 250101)

**摘要** 提出厌氧复合循环颗粒污泥悬浮床反应器的新型反应器理论。通过引入分级三相分离器,使悬浮床反应器上部处理区液体和沼气的上升速度大大降低,创造了污泥颗粒沉降的良好环境。底部利用高负荷产生的沼气形成内循环,同时设置外回流系统,内、外循环实现了进水与颗粒污泥间的充分接触及保持了良好的反应条件,创造了大幅度提高  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  容积负荷的条件。对反应器的启动、运行和在不同负荷条件下的去除效果和悬浮流态进行了研究。研究表明,厌氧颗粒污泥悬浮床反应器处理淀粉废水,可在负荷  $30 \sim 40 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  条件下稳定运行,最高负荷达  $57.2 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,平均  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率可达 90 %。

**关键词** 厌氧颗粒污泥 悬浮床 流化床 膨胀床 液体流态

## Research and application of anaerobic granular sludge suspended bed reactor

Wang Kaijun<sup>1</sup>, Chang Lichun<sup>1</sup>, Gan Hainan<sup>2</sup>

(1. Beijing Environmental Protection Research Institute, Beijing 100037, China;

2. Shifang Yuantong Environmental Protection Co., Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** Concept of stepped tri-phase (gas-liquid-solid) separation was introduced to the anaerobic multiple recycling sludge granular suspended bed reactor and favorable sludge granular settling circumstance was created in the new reactor based on this theory. Best condition to massively increase the organic load of the reactor was produced by right of the sufficient contact of the inlet liquid and the granular sludge, which was created by the inner circulation formed by the biogas of high load in the bottom of the reactor and the external circulation formed by the installed external reflux system. The startup, performance and organic matter removal effect under different loads of industrial granular sludge suspended bed were roundly reviewed, whose flow pattern was researched also. The research results showed: when anaerobic granular sludge suspended bed reactor treated starch wastewater, the reactor could run steadily at the load of  $30 \sim 40 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , the highest load was  $57.2 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , and the average removal of  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  was 90 %.

**Keywords:** Anaerobic granular sludge; Suspended bed; Fluidized bed; Expanded bed; Flow pattern

在相当长一段时间内,人们满足于由于 UASB 反应器通过污泥颗粒化,达到了在反应器内保持高的活性污泥浓度,并实现了水力停留时间与污泥停留时间的分离,从而取得相对高的污泥负荷率和处

国家高技术研究发展计划(863)项目“水污染控制技术与治理工程”重大专项(2002AA601990)。

理效率。所以,进一步开发新型的高效反应器并没有提到议事日程上。虽然,Paques 公司从 1985 年就成功地开发了 IC 反应器,Jewell 等人也在 20 世纪 80 年代初就成功地开发了高效的厌氧接触膜膨胀床反应器(AAFEB)。但直到 20 世纪 90 年代末期,人们才开始对颗粒污泥膨胀床(EGSB)反应器

产生极大的兴趣。

在国家高技术研究发展计划(863)项目的支持下,通过分析和综合国际上高效厌氧反应器的发展,并根据我国厌氧领域研究进展和工程实际,笔者提出了开发具有自主知识产权的新型高效厌氧复合循环颗粒污泥悬浮床(以下简称“颗粒污泥悬浮床”)反应器。工艺开发通过理论研究、实验室和示范工程研究,对反应器性能等多方面均进行了深入细致的研究。本文重点介绍示范工程的研究阶段,以实际生产废水为处理目标,以生产规模的反应器为研究对象,以大型工业试验为研究手段,介绍颗粒污泥悬浮床反应器的开发结果。

## 1 示范工程

### 1.1 颗粒污泥悬浮床反应器的创新性

(1) 充分利用污泥颗粒化这一厌氧领域取得的技术成果。在我国重点研究 UASB 反应器内形成颗粒污泥后,一段时期内并没有进一步了解和利用 UASB 反应器产生颗粒污泥这一成果。颗粒污泥悬浮床反应器(见图 1)非常利于保持颗粒污泥高的沉淀速度、高的污泥浓度和高的比甲烷活性。

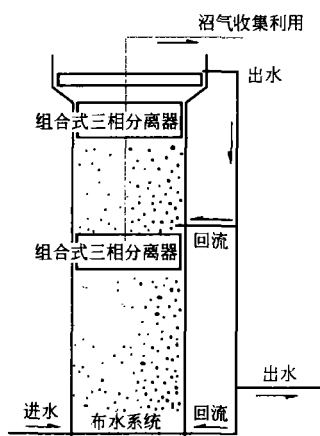


图 1 颗粒污泥悬浮床反应器示意

(2) 形成复合循环的关键技术,完成了新型反应器技术的创新。通过反应器在空间的分级,使底部形成高的  $COD_{Cr}$  容积负荷,结果导致高的产气率,利用沼气混合在无需外加能源的条件下形成内循环,同时通过外回流为实现反应器最佳反应创造了条件。内、外循环可保持进水与颗粒污泥和部分处理后废水间的良好接触和良好反应,可以充分利用

颗粒污泥高的比甲烷活性,创造了大幅度提高悬浮床反应器  $COD_{Cr}$  容积负荷的条件。

(3) 反应器结构形式的创新。引入分级三相分离器的概念,在反应器的构造上采用了两级三相分离器。分级三相分离器使上部处理区液体和沼气的上升速度大大降低,创造了污泥颗粒良好的沉降环境,为解决高  $COD_{Cr}$  容积负荷下污泥流失这一限制高效反应器发展的关键技术问题奠定了基础。通过结构形式解决了气体负荷和液体负荷(回流)分流的问题,两个区域的气体负荷和水力负荷不同,使颗粒污泥处于充分的膨胀和悬浮状态,强化了传质效果,保证了颗粒污泥的有效滞留和性质的保持。悬浮床反应器在底部高负荷区去除进水中大部分的  $COD_{Cr}$ ,而通过上部低有机负荷和水力负荷区进一步降解残余有机物,保证出水水质。

### 1.2 颗粒污泥悬浮床反应器示范工程

示范工程在山东省沂水县大地玉米开发有限公司进行,该公司主要生产玉米淀粉、口服葡萄糖等,年产淀粉 17 t,其废水处理工程分三期建设,其中三期工程新增 EGSB 反应器 1 座(直径 5 m,高 15 m,有效容积  $275\text{ m}^3$ )。但经过调试运行无法达到预期目标,故按颗粒污泥悬浮床反应器要求进行结构改造,具体措施如下:

(1) 控制膨胀率,避免产生流化状态,使反应器流态处于悬浮床状态,保证颗粒污泥或颗粒载体生物膜微观结构的稳定。

(2) 改造气水分离系统,保持稳定的内回流。

(3) 完善出水外循环系统,保证原水与回流水充分混合,以缓冲、稀释原水,使反应器内 pH、VFA、碱度在较小范围内波动,尽量减少因水质波动而引起的反应器波动。

## 2 示范工程中颗粒污泥悬浮床反应器的运行

示范工程运行分为两阶段,第一阶段为 2004 年 6 月 25 日设备改造后至 2005 年 2 月 6 日春节停产;第二阶段为春节后从 2005 年 3 月 11 日二次启动至今,废水经加热罐加热后进入反应器,反应器除启动阶段外,水温基本保持在  $32\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。废水有机物浓度随生产变化较大。反应器运行条件和处理效果见图 2 和图 3 和表 1。

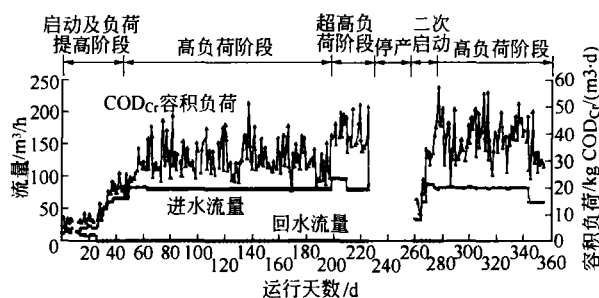


图2 不同阶段反应器流量与 COD<sub>Cr</sub> 容积负荷变化

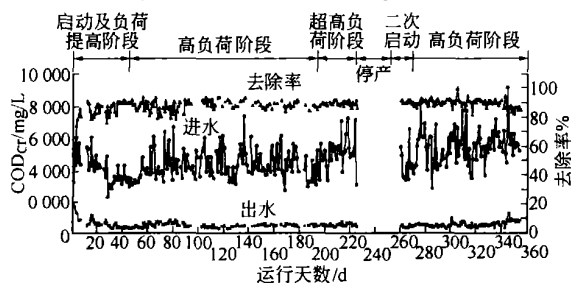


图3 不同阶段反应器对 COD<sub>Cr</sub> 的去除效果

## 2.1 反应器的初次启动与运行

从表 1、图 2 和图 3 中可以看出,反应器以 8 kg COD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d) 负荷启动。在启动初始 COD<sub>Cr</sub> 去除率较低,出现较多的颗粒污泥破碎并随出水流失的现象,经过 7 d 时间的稳定后,去除率上升到 80 % 以上,随后一直保持在 80 %~90 %。出水 VFA 随着运行逐渐降低,保持在 200 mg/L 以下。反应器经过 20 d 左右的适应后,处理能力和效率得到大幅度的提高,可以提高反应器的负荷。随后 26 d 分别经历了四个负荷阶段 9 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d)、12 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d)、18 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d) 和 25

kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d),反应器负荷在 25 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d) 稳定运行,完成了启动过程。

高负荷运行阶段开始后不久,将反应器平均 COD<sub>Cr</sub> 运行容积负荷进一步提高至 30.1 kg COD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d),并持续运行 153 d,考察反应器在高负荷下的运行稳定性。此阶段的运行情况见图 3 和表 1 中阶段 B,COD<sub>Cr</sub> 去除率在 85 % 以上。经过 5 个月的高负荷稳定运行后,反应器中积累了大量的颗粒污泥,总污泥量达到 19 t(阶段 C),最大产甲烷速率达到 1.5 gCOD<sub>Cr</sub>-CH<sub>4</sub>/(gVSS·d)。即使保守估计按 1 gCOD<sub>Cr</sub>-CH<sub>4</sub>/(gVSS·d) 计算,反应器的最大负荷潜力也可达到 70 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d)。

为进一步考察颗粒污泥悬浮床反应器运行的负荷条件,在理论计算的指导下进一步提高反应器负荷,将反应器进水量提高至 96 m<sup>3</sup>/h,上升流速高达 4.8 m/h,开始超高负荷阶段的运行,运行至春节停产检修,超高负荷阶段持续 28 d。在此阶段内,运行的 COD<sub>Cr</sub> 容积负荷平均为 40.2 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d),由于进水 COD<sub>Cr</sub> 波动,最高超过 50 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d),这与计算的最大容积负荷 70 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d) 相比还有一定距离,从反应器潜力可知反应器还有提高负荷空间(见表 1 和图 2 中阶段 C)。在负荷刚刚提高的前几天,反应器液面出现了少量的气泡和泡沫。出水 COD<sub>Cr</sub> 去除率仍保持在 90 % 左右,无其他异常现象。

## 2.2 反应器的二次启动

春节放假,反应器于 2005 年 2 月 6 日停止了运

表 1 颗粒污泥悬浮床反应器运行状况

| 反应器运行阶段                                      | 启动及提负荷阶段(A)        | 高负荷运行阶段(B)         | 超高负荷运行阶段(C)        | 二次启动(D)            | 高负荷运行阶段(E)         |
|----------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 起止日期                                         | 20040625~0808      | 20040809~20050108  | 20050109~0206      | 20050311~0324      | 20050325~至今        |
| 运行天数/d                                       | 44                 | 153                | 28                 | 14                 | 约 600              |
| 进水 COD <sub>Cr</sub> /mg/L                   | 3 224~6 044(4 055) | 2 092~7 342(4 300) | 3 332~7 249(5 143) | 3 360~6 539(4 270) | 2 821~8 187(5 530) |
| 进水流量/m <sup>3</sup> /h                       | 15~82              | 80                 | 80~96              | 33~86              | 85                 |
| OLR/kgCOD <sub>Cr</sub> /(m <sup>3</sup> ·d) | 8~25               | 30.1               | 40.2               | 10~34              | 38.3               |
| HRT/h                                        | 4.1~18             | 3.4                | 2.9~3.2            | 3.2~8.3            | 3.2                |
| COD <sub>Cr</sub> 去除率/%                      | 84.1               | 88.3               | 89.6               | 89.7               | 90.1               |
| 出水 VFA/mg/L                                  | 170.4              | 102.9              | 137.3              | 131                | 156.1              |
| 反应器污泥量/t                                     | 2.1~6.7            | 6.7~19             | 19                 | 13.2~15.3          | 15.3               |

注:括号内为平均值。

行。节后恢复生产,于 2005 年 3 月 11 日开始二次启动,启动首先恢复反应器床层温度和膨胀性能等,避免开始运行过程中出现局部酸化现象。在经过 15 h 的进水加温后,反应器内温度已升至 28℃,基本达到反应器启动所需温度。升温期间反应器出水 SS 非常高,颜色较黑,出水中含有大量的絮状和破碎颗粒污泥碎片。之后依次控制进水量为 33 m<sup>3</sup>/h、60 m<sup>3</sup>/h 和 87 m<sup>3</sup>/h,反应器在 10 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d)、20 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d)和 30 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d)的三个负荷水平分别运行 5 d 左右,逐步恢复到反应器停止运行前的负荷水平 30 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d),此阶段共计 14 d,实现了反应器的快速二次启动(见图 4)。随后反应器又进入了另一轮的高负荷稳定运行阶段。启动期间虽然出水 COD<sub>Cr</sub> 有所上升,但去除率始终保持在 90 %以上。

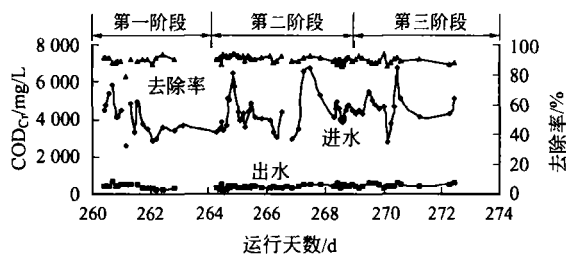


图 4 反应器二次启动过程中 COD<sub>Cr</sub> 去除效果

二次启动成功运行后,反应器的 COD<sub>Cr</sub> 容积负荷为 20 ~ 57.2 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d),平均为 38.3 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d),COD<sub>Cr</sub> 去除率平均为 90.1 %。出水 VFA 平均为 156.1 mg/L,出水碱度(AL K)平均为 1 402.4 mg/L。反应器运行效果稳定。

### 2.3 生产性试验小结

在理论研究和实验室试验基础上,通过优化设计的 275 m<sup>3</sup> 的颗粒污泥悬浮床反应器,应用于高浓度有机生产废水处理,稳定运行达一年以上。反应器平均负荷 40 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d),最高达 57.2

kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d),COD<sub>Cr</sub> 去除率平均为 90 %。出水 VFA 平均为 156.1 mg/L,出水 AL K 平均为 1 402.4 mg/L。反应器运行效果稳定,取得了长期的高负荷、高去除率、高稳定性的优化效果。颗粒污泥悬浮床反应器大幅削减了进水有机物,为后续好氧处理工艺提供了水质稳定、低浓度的进水,为好氧段减少投资、降低能耗、出水达标等提供了保障。

### 3 讨论和结论

在反应器放大和生产应用方面,良好的混合条件是反应器高效运行的前提条件。但是,由于反应器设计、加工、安装方面的问题以及污泥床的形状和布水方面的问题,往往容易出现死区、沟流和短流等现象,实际流态主要受液体上升流速、气体上升流速和颗粒性质等方面的影响。对生产性的反应器流态进行了系统研究,针对稳态运行的颗粒污泥悬浮床反应器,分别在不同的水力停留时间和容积负荷条件下,采用 LiCl 示踪剂进行了多次示踪试验,表 2 是其中不同负荷的测试结果。

试验结果表明,本反应器稳定运行期间离散数为 0.195 ~ 0.267 ( $N = 2.5 \sim 3.3$ ),反应器负荷在 20 kg COD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>·d) 时,反应器离散数最低,这可能与反应器死区和液体上升流速有关。反应器死区一般分为结构死区和其他因素死区两种,在生产性颗粒污泥悬浮床反应器中有一个不可忽视的因素就是在高负荷条件下悬浮床反应器中产生了大量气体,产生的气体在较高床层的上升中,不断合并和凝聚,形成了直径较大的气泡,这些不断产生的气泡势必占据反应器一定的空间。另外,在柱状反应器中液体上升流速较低时,离散数 D 较大,上升流速增大则离散数 D 减小。这些因素的综合结果可能造成离散数不规律变化。

在较高负荷时,随着负荷的增加,离散数 D 上升,

表 2 不同负荷条件下示踪试验结果统计

| 容积负荷<br>/ kgCOD <sub>Cr</sub> /(m <sup>3</sup> ·d) | 液体上升<br>流速/ m/h | 气体流速<br>/ m/h | HRT<br>/ h | 总污泥量<br>/ t | 平均停留时间<br>/ h | 离散数<br>D | 串连数<br>N | 死区<br>V <sub>d</sub> /V |
|----------------------------------------------------|-----------------|---------------|------------|-------------|---------------|----------|----------|-------------------------|
| 10                                                 | 1.7             | 3             | 8.2        | 13.2        | 7             | 0.228    | 2.8      | 0.167                   |
| 20                                                 | 3               | 5             | 4.5        | 14.2        | 4             | 0.195    | 3.2      | 0.133                   |
| 30                                                 | 4.3             | 6.3           | 3.3        | 18.9        | 2.6           | 0.235    | 2.7      | 0.195                   |
| 40                                                 | 4.4             | 8.3           | 3.2        | 13.5        | 2.6           | 0.267    | 2.5      | 0.192                   |

这是较高的水力上升流速和大量的气体共同作用的结果。同时反应器的串连数  $N$  相对较高,意味着反应器内微生物和污水的混合程度是足够的。但过高的混合会造成反应器里颗粒污泥结构的破坏,因此有必要将离散数  $D$  控制在一个合理的范围内。试验表明颗粒污泥悬浮床反应器的  $D$  控制在 0.2 左右的中等程度,可以保证颗粒污泥结构的稳定性。

#### 4 运行效果分析

通过对生产规模反应器的结构改造,应用生产规模的废水处理反应器稳定运行达一年以上,平均负荷稳定在  $40 \text{ kgCOD}_{\text{Cr}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,最高达  $57.2 \text{ kgCOD}_{\text{Cr}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率高于 90%。取得了高负荷、高去除率、高稳定性的较为理想的处理效果,为推广应用提供经验和依据。反应器高负荷稳定运行后,污泥性质得到进一步优化,颗粒污泥强度由最初的  $1.02 \times 10^5 \text{ N/m}$ ,增加至  $2.01 \times 10^5 \text{ N/m}$ 。这是悬浮床反应器水力条件的选择结果,量多而质优的颗粒污泥为反应器的高效运行提供了保证。

在颗粒污泥悬浮床反应器的启动和运行过程中,采用独特的复合循环方式,对几种循环(包括出水外部循环和产气形成的内循环)强度、方式及比例进行调控,使反应器内的液体、气体上升流速达到较高水平,确保反应器床层膨胀率在一个合理的范围之内,常规运行时通常保持在 25%~30%,使颗粒(污泥)始终处于悬浮状态,并在流体中保持着比较均匀的分布,提高反应器内的活性微生物与进水中污染物质的充分接触以及污染物质向颗粒(污泥)内部的传质与传递,因此可以完全突破传统的生物流化床和膨胀床概念,大大提高了有机物的去除效率。

目前,颗粒污泥悬浮床反应器在国家高技术研究发展计划(863)项目支持下,已在十多个废水处理工程中得到应用,实现了研究成果产业化,可以满足大量中、高浓度有机废水和生物难降解废水处理的迫切需要。

在同等运行条件下,颗粒污泥悬浮床反应器在与 EGSB、IC 反应器相比,具有适度的水力混合特性,其多种循环方式确保床层中颗粒污泥处于悬浮

状态,既保证了微生物和废水的充分混合,又确保了颗粒污泥结构的稳定性。使反应器在工程投资和运行能耗方面,要低于同类型的高效厌氧反应器。据统计 UASB 反应器平均设计负荷在  $10 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  左右,EGSB 反应器平均设计负荷是  $20 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,而本反应器负荷可达  $40 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,与 UASB、EGSB 反应器相比分别可节约反应器容积 75%和 50%,大大降低工程投资与占地面积。由此可见,颗粒污泥悬浮床反应器具有投资省、能耗低、负荷高、产泥少、耐冲击负荷、可回收利用沼气能源等诸多优点,特别在高浓度的淀粉废水处理中更具优势。

#### 参考文献

- 1 Versprille A I. Granule sludge in full-scale UASB and EGSB reactors: facts and figures, Papers of the Farewell Seminar of Dr. ir. Look Hulshoff Pol, June 28, 2002 Wageningen, The Netherlands. 27~40
- 2 贺延龄. 废水的厌氧生物处理. 北京:中国轻工业出版社,1998
- 3 刘永红,贺延龄,李耀中,等. UASB 反应器中颗粒污泥的沉降性能与终端沉降速度. 环境科学学报. 2005,25(2):176~179
- 4 Nicoletta J C, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Wastewater treatment with particulate biofilm reactors. Biotechnology, 2000,80:1~33
- 5 国家环保局等. 水和废水监测分析方法,第3版. 北京:中国环境出版社,1989
- 6 王凯军. 厌氧工艺的发展与新型厌氧反应器. 环境科学,1998,19(1):94~96
- 7 胡纪萃,周孟津,左剑恶,等. 废水厌氧生物处理理论与技术. 北京:中国建筑工业出版社,2003
- 8 左剑恶,李建平. 一种颗粒粒径分布的测量方法. 中国专利, CN1696654. 2005-11-16.
- 9 方皓. 高效厌氧反应器运行状态及其流态研究:[学位论文]. 北京:北京市环境保护科学研究院,2005
- 10 郭劲松,龙腾锐. 厌氧膨胀床反应器的研究及应用. 重庆建筑大学学报,1995,17(3):118~125

通讯处:100037 北京市西城区北营房中街 59 号

E-mail:changlichun76@163.com

收稿日期:2006-11-30

修回日期:2006-12-12