

# A<sup>2</sup>O-BAF 工艺处理低 C/N 值生活污水的快速启动

王建华, 陈永志, 彭永臻

(北京工业大学 水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 以低碳氮比的实际生活污水为处理对象, 重点研究了 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺的快速启动。结果表明, 先单独对硝化型曝气生物滤池进行挂膜后再将 A<sup>2</sup>O 与 BAF 连接起来可成功启动该双污泥系统。采用快速排泥挂膜法和自然挂膜法相结合的复合挂膜法, 使用不含有机物的配水对曝气生物滤池进行挂膜, 18 d 后曝气生物滤池挂膜成功。系统连续运行 44 d 后达到稳定。使用碳氮比为 3:21 的生活污水进行驯化, 反硝化除磷菌占聚磷菌的比例为 66.7%, 缺氧吸磷为系统的主要除磷方式, 此时出水氨氮、正磷酸盐浓度均接近于零, 出水硝态氮为 15.1 mg/L 左右, 对 COD、氨氮、总磷和总氮的去除率分别为 82%、100%、100% 和 67%。表明该双污泥系统运行效果稳定, 启动成功。

**关键词:** A<sup>2</sup>O-BAF 工艺; 硝化型曝气生物滤池; 反硝化除磷; 快速启动

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2010)15-0032-05

## Fast Start-up of A<sup>2</sup>O/BAF System for Treatment of Low C/N Ratio Domestic Sewage

WANG Jian-hua CHEN Yong-zhi PENG Yong-zhen

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** The fast start-up of A<sup>2</sup>O/BAF system was investigated using domestic sewage with low carbon-nitrogen ratio. The two-sludge system can be successfully started up by forming biofilm first in nitrifying BAF and then connecting A<sup>2</sup>O with BAF. The start-up of BAF is successfully achieved by combining natural biofilm formation method with quick sludge discharge biofilm formation method and using the influent without organic matters after 18 d. The system reaches a stable state after continuous operation of 44 d. During the domestication using the domestic sewage with a carbon-nitrogen ratio of 3:21, denitrifying phosphorus removing bacteria are 66.7% of phosphorus accumulating organisms and anoxic phosphorus uptake is the main way for phosphorus removal. The ammonia nitrogen and orthophosphate concentrations in the effluent are close to zero, the nitrate nitrogen concentration is about 15.1 mg/L, and the removal rates of COD, ammonia nitrogen, total phosphorus and total nitrogen are 82%, 100%, 100% and 67% respectively, which shows that the two-sludge system operates stably and is started up successfully.

基金项目: 北京市教委科技创新平台项目 (PXM2008\_014204\_050843); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07317-007-005, 2008ZX07209-003); “城市水资源与水环境国家重点实验室”开放基金资助项目 (QAK200802)

**Key words** A<sup>2</sup>O/BAF system; nitrifying biological aerated filter; denitrifying phosphorus removal; fast start-up

低 C/N 值生活污水的处理一直是我国污水处理领域的一大难题。新的污水排放标准对氮、磷的要求越来越高,而理论上低 C/N 值生活污水的脱氮除磷效率不会很高,因而老污水处理厂的出水水质大多达不到新的污水排放标准,这要求我们在已有的构筑物基础上结合其他工艺或采用革新的运行方式来提高脱氮除磷效率。

A<sup>2</sup>O 工艺是最简单的同步脱氮除磷工艺,具有水力停留时间短、不易发生污泥膨胀、污泥中磷含量高、运行费用低等优点,但也存在硝化与除磷污泥龄矛盾的问题<sup>[1]</sup>。针对 A<sup>2</sup>O 工艺固有的缺陷,提出了 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺,该工艺将曝气生物滤池 (BAF) 置于二沉池之后,其主要目的是完成硝化反应,而去除有机物、除磷、反硝化都在 A<sup>2</sup>O 工艺中进行。部分 BAF 出水回流到 A<sup>2</sup>O 的缺氧段为反硝化和缺氧吸磷提供电子受体。该双污泥工艺具有如下优点: ①硝化和除磷分别在两个系统中进行,因此解决了硝化菌和聚磷菌对污泥龄要求的问题; ②前置 A<sup>2</sup>O 工艺所需的好氧段较短,从而减少了曝气量; ③反硝化除磷是系统的主要除磷形式,因而大大节省了碳源; ④由于有机物和悬浮物大都在 A<sup>2</sup>O 工艺中被去除,这有利于 BAF 中硝化反应的进行,同时可延长 BAF 的反冲洗时间; ⑤A<sup>2</sup>O 出水中仅含有少量硝酸盐和亚硝酸盐,二沉池中不易发生因反硝化而产生的污泥上浮,污泥回流到厌氧段后增强了厌氧释磷能力,以便于在缺氧段和好氧段更好地吸磷<sup>[2]</sup>。

由于 A<sup>2</sup>O 与 BAF 工艺特点的不同,如果一开始就直接进行连续培养,无论对 A<sup>2</sup>O 工艺中优势菌种的培养,还是对 BAF 中起硝化作用的生物膜的形成都是不利的,尤其是对 BAF 的挂膜。因此,首先使用不含有机物的配水对 BAF 进行挂膜,待生物膜趋于成熟即挂膜成功时,再将 A<sup>2</sup>O 和 BAF 连接起来进行连续培养,直至出水水质稳定 (表明系统启动成功)。笔者研究了聚磷菌和好氧硝化生物膜的单独培养驯化及 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺处理低碳氮比生活污水的快速启动,以期为该工艺的应用提供理论依据。

## 1 材料与 方法

### 1.1 试验装置和运行工况

A<sup>2</sup>O-BAF 工艺流程见图 1,包括进水水箱、

A<sup>2</sup>O 反应器、二沉池、中间水箱、曝气生物滤池和出水水箱。其中 A<sup>2</sup>O 反应器由 9 个格室构成,总有效容积为 30.5 L,前 2 个格室是厌氧区,随后的 3 个是缺氧区,剩余的 4 个为好氧区,即厌氧区、缺氧区和好氧区的容积比为 2:3:4。A<sup>2</sup>O 工艺的进水量是 5.4 L/h,相应的 HRT 为 5.6 h,MLSS 约为 2500 mg/L, SRT 为 9 d,硝化液回流比为 200%,污泥回流比为 100%。A<sup>2</sup>O 工艺的污泥取自北京市某污水处理厂的 A<sup>2</sup>O 中试系统,二沉池的有效容积为 21 L,BAF 的容积为 15 L, HRT 为 30 min。系统进水量、硝化液回流量、污泥回流量均由蠕动泵控制,曝气生物滤池的进水量由高压泵控制。曝气生物滤池以陶粒为填料,其上可以形成良好的生物膜。

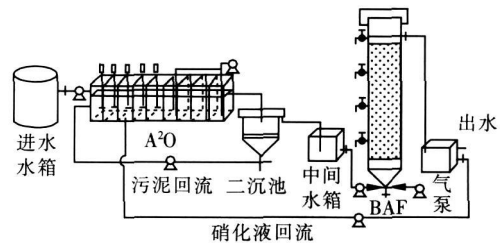


图 1 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺流程

Fig 1 Flow chart of A<sup>2</sup>O/BAF process

### 1.2 原水水质

试验用水取自某学校生活区所排放的生活污水,其水质见表 1。启动 BAF 所用的是不含有机物的人工配水,其 pH 值为 7.5, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为 50 mg/L, TP 为 10 mg/L。

表 1 原水水质

Tab 1 Characteristics of raw wastewater

项目	COD / (mg·L <sup>-1</sup> )	TN / (mg·L <sup>-1</sup> )	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P / (mg·L <sup>-1</sup> )	C/N	C/P
范围	144.2~254	53.6~69.7	3.34~9.57		
均值	207.8	64.8	5.4	3.21	38.5

### 1.3 分析项目与方法

COD: COD 快速测定仪; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 纳氏试剂光度法; NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N: N-(1-萘基)-乙二胺光度法; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N: 麝香草酚分光光度法; TP: 抗坏血酸-钼蓝分光光度法; MLSS: 滤纸称重法; 温度、pH 和 DO: WTW ino lab level 2 在线监测仪。

系统启动成功后,对 A<sup>2</sup>O 中的反硝化除磷菌

(DPAOs)占聚磷菌 (PAOs)的比例进行估算。取 2 L 好氧末端泥水混合物,离心清洗 3 遍后加入到 2 L 的锥形瓶中,采用乙酸钠作碳源 (COD = 200 mg/L) 进行 2 h 的厌氧反应,反应结束后测定 COD、TP 从而确定后续缺氧段要加入的硝态氮的量。污泥再次离心清洗 2 遍并分成两份,一份在 DO 充足的情况下曝气反应 2 h,另一份加入足够的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 并缺氧反应 2 h,缺氧最大吸磷速率和好氧最大吸磷速率的比值反映了 DPAOs 占 PAOs 的比例<sup>[3]</sup>。

### 1.4 培养方式

BAF 中好氧硝化型生物膜的培养采用快速排泥挂膜法与自然挂膜法相结合的复合挂膜法。将人工配制的含有有机物的生活污水与接种污泥混合后泵入反应器中,先曝气 2 h,停曝后静置 8 h 并将泥水混合液排出。每天运行 2 个周期,如此循环 3 d。3 d 后以 1/2 的设计流量通入不含有机物的人工配水,待出水氨氮浓度接近于零并保持稳定后将进水量加大到设计值。生物膜培养成熟后,将 A<sup>2</sup>O 与 BAF 连接起来从而完成整个系统的启动。

## 2 结果与讨论

### 2.1 曝气生物滤池的挂膜启动

挂膜期间 BAF 对氨氮的去除效果见图 2。

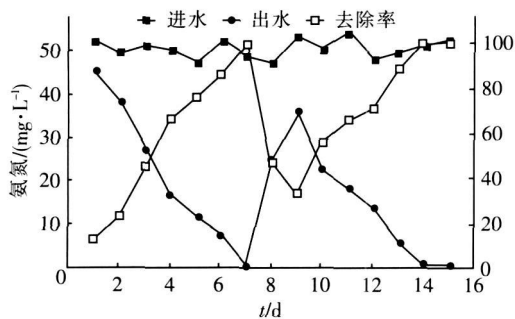


图 2 启动期间 BAF 进、出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度及其去除率的变化

Fig 2 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration in influent and effluent of BAF and its removal efficiency during start-up

硝化菌是化能自养菌,可以二氧化碳为碳源,从无机物的氧化中获取能量,因此 BAF 挂膜采用不含有机物的配水也能满足硝化菌的生长要求。在第 1 天对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率为 13%,一个星期后就达到了 100%。进水流量增大到设计值后,水流的剪切力增加且 BAF 的水力停留时间减少,前者使原来悬浮于陶粒表面的不牢固污泥被冲刷下来,后者使得对氨氮的去除率下降(如在第 8 天去除率降至

47.2%)。随后对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率开始增大,两周后又重新恢复至 100%,表明 BAF 挂膜成功。

### 2.2 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺的快速启动

待 BAF 挂膜成功后,将两个反应器连接起来并连续运行,在此过程中对 COD、氨氮、总氮、总磷的去除率变化如图 3 所示。

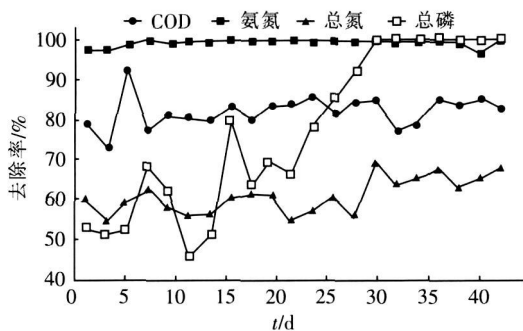


图 3 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺连续运行后对各污染物去除率的变化  
Fig 3 Removal efficiencies of pollutants during continuous run period of A<sup>2</sup>O/BAF

从图 3 可以看出,该组合工艺对 COD 的去除率一直维持在 82% 左右;对总磷的去除率在运行初期不高,但到后期几乎达到 100%。这是由于连续运行初期硝化反应主要在 A<sup>2</sup>O 工艺中进行,回流污泥中含有大量的硝态氮,含有硝态氮的污泥回流到厌氧区后破坏了其厌氧环境,由于反硝化菌争夺碳源的能力要比聚磷菌强,因此在厌氧区优先进行反硝化作用,聚磷菌则因为没有足够的碳源而释磷不充分,同时合成的 PHB 也少,使得进入好氧区后不能进行充分吸磷,故前期的除磷率不高。随着反应器的运行,污泥龄保持在 9~10 d,这对世代时间长的硝化细菌来说是很不利的,通过不断的淘洗,硝化细菌所占的比例越来越小,好氧区的硝化作用也逐渐减弱,流入二沉池的硝态氮含量随之降低,二沉池很少发生污泥上浮现象。启动后期随着释磷量的增高,对磷的去除率也提高,几乎稳定在 100%;由于生物膜已经具有了良好的硝化能力,对氨氮的去除率一直保持很高,进入到 BAF 中的氨氮几乎全部转化为硝态氮;对总氮的去除率一直不是很高,最终保持在 67% 左右。Wang 等<sup>[4]</sup>的研究表明,C/N 值为 7:1 时对 TN 的去除率最高,而本试验进水的 C/N 值平均为 3.21,因而对总氮的去除率不会很高。可见低碳氮比对去除总磷无影响,但对去除总氮的影响很大。此外,进水中的大部分 COD 都被聚磷菌用

于厌氧释磷, 进入缺氧区的 COD 浓度很低, 反硝化菌没有可利用的碳源进行反硝化, 而只能靠反硝化除磷菌去除一部分硝态氮, 并不能把回流的硝态氮完全去除, 出水总氮中大部分是硝态氮, 这导致了出水的总氮浓度较高。

图 4 是系统运行稳定后一个周期内 COD、氨氮、亚硝态氮、硝态氮和总磷浓度的沿程变化 (1<sup>#</sup>~12<sup>#</sup> 分别代表进水、厌氧 1、厌氧 2、缺氧 1、缺氧 2、缺氧 3、好氧 1、好氧 2、好氧 3、好氧 4、中间水箱和出水)。

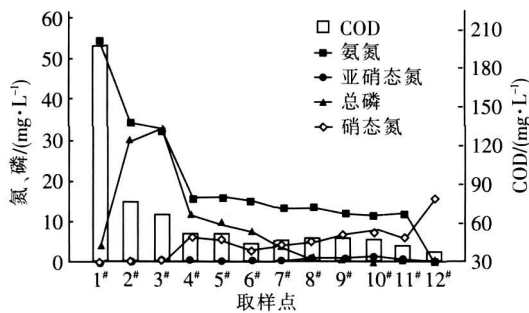


图 4 运行稳定后典型周期内各污染物浓度的沿程变化

Fig 4 Change of pollutants during a cycle after stable operation

进水 COD 为 209.3 mg/L, 在厌氧段聚磷菌利用 VFA 合成 PHB, 对 COD 的去除率为 66.8%, 厌氧区最大的释磷量为 30.4 mg/L, 硝态氮浓度几乎为零。硝化液回流到缺氧段后, 由于可利用的 COD 已经很少, 加之经长期的驯化后反硝化除磷菌已成为聚磷菌的优势菌, 在此阶段反硝化除磷菌以在厌氧段合成的 PHB 为碳源, 以硝态氮为电子受体进行反硝化除磷, 剩余的磷在好氧段被进一步去除<sup>[5]</sup>。但缺氧区出水的硝态氮浓度仍然很高, 且好氧区的硝态氮浓度变化较小, 这说明经几个污泥龄的淘洗后好氧区的硝化菌数量已大大下降。BAF 出水的氨氮浓度几乎为零, 且氨氮都被转化为了硝态氮。

### 2.3 A<sup>2</sup>O 污泥特性

厌氧释磷和好(缺)氧吸磷效果见图 5。经过厌氧释磷了大量的磷, 在随后的好氧和缺氧条件下都有磷的减少。说明在低 C/N 值生活污水的驯化下, 反硝化除磷菌得以增殖。经计算, 最大好氧吸磷速率为 17.69 mgP/(gMLSS·h), 最大缺氧吸磷速率为 11.82 mgP/(gMLSS·h), 两者之比为 0.668, 即反硝化除磷菌占聚磷菌的 66.8%。这说明 A<sup>2</sup>O-

BAF 组合工艺对磷的去除主要是靠反硝化除磷作用, 这样既节省了好氧区的容积, 又可减少曝气量。

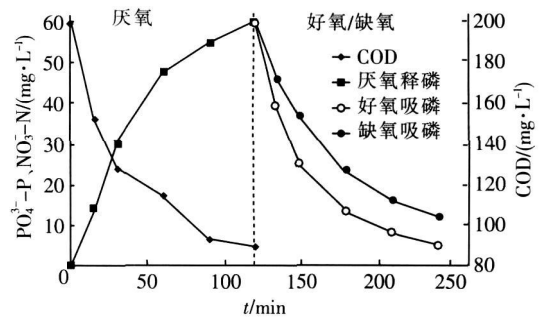


图 5 厌氧释磷和好氧、缺氧吸磷效果

Fig 5 Effects of anaerobic phosphorus release and aerobic and anaerobic phosphorus uptake

综上所述, 先以不含有机物的人工配水培养 BAF 中的硝化生物膜, 后将 A<sup>2</sup>O 和 BAF 连续培养, 通过控制 A<sup>2</sup>O 工艺的污泥龄来淘洗硝化菌, 可使硝化反应主要在 BAF 中进行。A<sup>2</sup>O-BAF 组合工艺经过 18 d 的 BAF 挂膜和 44 d 的系统连续运行最终实现成功启动。

### 3 结论

① 使用不含有机物的人工配水, 采用快速排泥挂膜法和自然挂膜法相结合的复合挂膜法培养硝化生物膜, 18 d 后可挂膜成功。生物膜培养成熟后, 将 A<sup>2</sup>O 和 BAF 连接起来并连续运行, 经过 44 d 的培养驯化, 系统启动成功, 对各项指标的去除率均保持稳定。

② 在碳氮比为 3:21 的生活污水培养下, 反应器运行稳定后除磷率接近 100%, 其中 DPAOs 占 PAOs 的 66.7%, 以反硝化除磷为主。通过控制污泥龄, A<sup>2</sup>O 的硝化率很低, 硝化主要在 BAF 中进行, 从而节省了 A<sup>2</sup>O 工艺的好氧段容积和曝气量。

③ A<sup>2</sup>O-BAF 工艺具有很好的脱氮除磷效果, 待系统稳定后, 对 COD、氨氮、总氮、总磷的去除率分别为 82%、100%、67%、100%。出水总氮以硝态氮为主 (达 15.1 mg/L)。此工艺解决了传统 A<sup>2</sup>O 工艺中硝化菌和聚磷菌之间污泥龄的矛盾问题, 使两者都能发挥自己的优势, 是一种适合老水厂改造并能深度脱氮除磷的节能新工艺。

### 参考文献:

- [1] Ding Y L, Wang L, Wang B Z, et al. Removal of nitrogen (下转第 40 页)

难;而对以脱氮硫杆菌为主的 $2^{\#}$ 反应器的影响较小,当进水 COD 为 250 mg/L 时, $2^{\#}$ 反应器对硫化物和硝态氮的去除率均达 100% 左右,对硫化物的比降解速率和产气量也提高了 1.1~1.2 倍,相应的出水硫酸盐浓度最低,80% 左右的硫化物转化为单质硫,73% 的 COD 被去除,可实现同时脱氮、脱硫和除碳。

通常条件下采用厌氧工艺处理高浓度有机废水时,出水中除含有大量的硫化物外,还含有 200~300 mg/L 的 COD,有机物的存在影响了同步脱氮除硫工艺的去除特性,限制了该工艺的应用。但本试验结果表明,在上述有机物浓度范围内,接种脱氮硫杆菌到厌氧污泥的强化厌氧污泥体系具备同时去除碳、氮、硫的能力,为同步脱氮除硫工艺的应用提供了新的思路。

### 3 结论

① 进水 COD 浓度对接种脱氮硫杆菌到厌氧污泥的 $2^{\#}$ 反应器的硫化物与硝态氮的比降解速率影响较小,当进水 COD 为 250 mg/L 时,对硫化物和硝态氮的去除率均约为 100%,硫化物的比降解速率和产气量提高了 1.1~1.2 倍,相应的出水硫酸盐浓度最低,80% 左右的硫化物转化为单质硫,73% 的 COD 被去除,可实现同时脱氮、脱硫和除碳。

② 接种厌氧污泥的 $1^{\#}$ 反应器,对硫化物与硝态氮的比降解速率受进水有机物浓度的影响较大,随着有机物浓度的增加则产气量大幅降低,硝酸盐转化为氮气的过程受阻,反硝化困难。

③ 当进水 COD > 400 mg/L 时,两个反应器对硫化物的氧化均明显受到抑制,仅 60%~76% 的硫

化物被去除。

### 参考文献:

- [1] OH S E, K in K S, Choi H C, *et al*. Kinetics and physiological characteristics of autotrophic denitrification by denitrifying sulfur bacteria[J]. *Water Sci Technol* 2000, 42 (3-4): 59-68
- [2] Campos J L, Carvalho S, Portela R, *et al*. Kinetics of denitrification using sulphur compounds: Effect of S/N ratio, endogenous and exogenous compounds[J]. *Bioreour Technol* 2008, 99(5): 1293-1299
- [3] Gommers P J F, Kuenen J G. Simultaneous sulfide and acetate oxidation in a denitrifying fluidized bed reactor— I. Start-up and reactor performance[J]. *Water Res* 1988, 22(9): 1075-1083
- [4] Reyes-Avila J, Razo-Flores E, Gomez J. Simultaneous biological removal of nitrogen, carbon and sulfur by denitrification[J]. *Water Res*, 2004, 38 (14-15): 3313-3321.
- [5] 徐金兰,侯圣春,黄廷林. 进水 N/S 值对同步脱硫反硝化特性的影响[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(7): 1-4
- [6] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001
- [7] Krishnakumar B, Manilal V B. Bacterial oxidation of sulphide under denitrifying conditions[J]. *Biotechnol Lett* 1999, 21(15): 437-440

作者简介: 徐金兰(1973-), 女, 浙江兰溪人, 副教授, 研究方向为废水生物处理。

电话: (029) 82202744 13991946772

E-mail: xujinlan@xauat.edu.cn

收稿日期: 2010-04-15

(上接第 35 页)

- and phosphorus in a combined A<sup>2</sup>O/BAF system with a short aerobic SRT[J]. *J Environ Sci* 2006, 18(6): 1082-1087.
- [2] Lee J, Choi I, Wiemenn U. Test of porous ceramic material for the immobilisation of predominantly nitrifying bacteria and for the improvement of the AAO process[J]. *Eng Life Sci* 2004, 4(1): 31-37.
  - [3] Peng Y, Wang X, Li B. Anoxic biological phosphorus uptake and the effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in the A<sup>2</sup>O process[J]. *Desalination*, 2006, 189(1-3): 155-164.
  - [4] Wang X L, Peng Y Z, Wang S Y, *et al*. Influence of

- wastewater composition on nitrogen and phosphorus removal and process control in A<sup>2</sup>O process[J]. *Bioprocess Biosyst Eng* 2006, 28(6): 397-404.
- [5] Wang X L, Wang S Y, Peng Y Z. Anoxic biological phosphorus uptake in A<sup>2</sup>O process[J]. *Chin J Chem Eng* 2005, 13(4): 516-521.

作者简介: 王建华(1985-), 女, 黑龙江富锦人, 硕士研究生, 研究方向为污水生物处理。

E-mail: wangjianhua@emails.bjtu.edu.cn

收稿日期: 2010-02-09