

# 淀粉/聚矾固体缓释碳源的制备及应用研究

王全勇<sup>1</sup>, 彭锦玉<sup>1</sup>, 张克峰<sup>2\*</sup>, 丁万德<sup>2</sup>, 吴彬彬<sup>1</sup>, 赵晓菲<sup>1</sup>

(1. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120; 2. 山东建筑大学, 山东 济南 250101)

**摘要:**为解决传统液态有机碳源在反硝化过程中投加过量或不足等问题,利用相转化法制备了以淀粉为碳源、聚矾为骨架的固体缓释碳源。利用扫描电子显微镜对固体碳源表面微观结构进行了表征,并考察了不同原料质量比的缓释碳源在反硝化间歇实验中对 $\text{NO}_3^-$ -N的去除效率及出水COD和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度。结果表明,当 $m(\text{淀粉}):m(\text{聚矾})$ 为1:1时,反硝化效果最好,此时出水COD为40 mg/L, $\text{NO}_3^-$ -N的去除率高达93%,并且没有 $\text{NO}_2^-$ -N的积累,为开发环境友好的可控性缓释碳源提供了科学依据。

**关键词:**相转化;淀粉;聚矾;缓释碳源;反硝化

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)S-0143-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.S.031

## Preparation and application of starch/polysulfone solid slow-release carbon source

WANG Quan-yong<sup>1</sup>, PENG Jin-yu<sup>1</sup>, ZHANG Ke-feng<sup>2\*</sup>, DING Wan-de<sup>2</sup>,  
WU Bin-bin<sup>1</sup>, ZHAO Xiao-fei<sup>1</sup>

(1. China Urban Construction Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China;

2. Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the addition of traditional liquid organic carbon source is excessive or insufficient during denitrification, a solid slow-release carbon source is prepared via the phase conversion method with starch as carbon source and polysulfone as framework. Surface microstructure of the carbon source is characterized by scanning electron microscopy. The removal efficiency of  $\text{NO}_3^-$ -N, and the concentrations of COD and  $\text{NO}_2^-$ -N in the effluent are investigated over slow-release carbon source with different mass ratios (the ratio of starch to polysulfone is 1:3, 1:1 and 3:1, respectively) in batch denitrification test. Results show that the denitrification performs best with a COD concentration of  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and a removal rate of  $\text{NO}_3^-$ -N as high as 93% when the mass ratio of starch/polysulfone is 1:1. Furthermore, there is no accumulation of  $\text{NO}_2^-$ -N, which provides a scientific basis for the development of environmentally friendly controllable sustained-release carbon sources.

**Key words:** phase inversion; starch; polysulfone; slow-release carbon source; denitrification

水体中氮元素含量超标容易造成水体富营养化,已成为世界性问题,严重威胁生态平衡和人类健康<sup>[1-2]</sup>。在中国,全国近2/3的湖泊因氮污染而中度或严重退化。根据2012年7月开始实施的新版北京市《城镇污水处理厂水污染物综合排放标准》,在水生生态敏感地区,总氮(TN)浓度被限制在10.0 mg/L以下。废水中TN即氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮的去除已成为最重要、最紧迫的问题之一。为了解决这一问题,人们采用了各种技术,包括离子交换、吸附、膜分离、电渗析和生物脱氮<sup>[3-5]</sup>,其中,反硝化脱氮技术因成本低、环境友好等特点而备受研究者青睐。

目前,城镇污水厂二级出水多为低碳/氮污水,限制了反硝化效率,其深度脱氮工艺需外加碳源<sup>[6-7]</sup>。传统的有机碳源,如乙醇、葡萄糖、乙酸盐、甲醇等液体碳源往往出现投加过量或不足等问题,导致废水中COD的增加或硝酸盐的积累。因此,采用新型固体碳源已成为反硝化脱氮的研究热点之一<sup>[8-9]</sup>。固体碳源一般分为天然材料和可降解聚合物两类。与天然材料(如木屑、稻草、玉米穗和棉花)相比,合成生物可降解聚合物,如聚丁二酸丁二醇酯(PBS)、聚己内酯(PCL)、聚乳酸(PLA)、淀粉/聚己内酯(SPCL)和聚-β-羟丁酸(PHB)作为碳源可以更加有效地控制碳源释放速率,在保持较高硝

收稿日期:2020-01-13;修回日期:2020-04-27

基金项目:中国城市建设研究院有限公司科技创新基金资助项目(Y2000X100)

作者简介:王全勇(1969-),男,博士生,教授级高工,研究方向为水污染控制理论及应用;张克峰(1964-),男,博士,教授,研究方向为水处理理论与技术和非常规水资源化理论与技术,通讯联系人,kfz@sdjzu.edu.cn。

酸盐去除效率的同时可解决污水中的色度和过量 COD 问题<sup>[10]</sup>。

淀粉是重要的生物营养成分之一,可以水解生成麦芽糖、葡萄糖等,且原料来源广泛,价格更为低廉<sup>[11]</sup>。然而,淀粉本身难于成型,在长时间的反硝化过程中容易发生分解,导致 COD 释放失控,往往需要和其他聚合物结合制备固体碳源。聚砜(PSf)是一种琥珀色透明聚合物材料,无毒、热稳定性高、耐水解,通过相转化过程容易形成固态聚砜材料,可以很好地与淀粉材料共混,并在成型过程中对淀粉材料进行包裹,不仅可以提高淀粉在反硝化过程中的稳定性,同时可以控制淀粉的分解、COD 的释放速率<sup>[12]</sup>。因此,本研究以淀粉为碳源、聚砜为骨架材料,通过简单的相转化法制备新型的淀粉/聚砜固体缓释碳源,利用扫描电镜和能谱仪对碳源结构进行表征,研究不同添加比例对释碳速率、脱氮效果的影响,确定淀粉/聚砜固体缓释碳源最优配比,对材料生物脱氮过程的动力学参数进行探讨,为新型缓释碳源的开发应用提供数据依据。

## 1 实验部分

### 1.1 材料、试剂及仪器

聚砜,琥珀色粒状,美国 Solvay 公司;马铃薯淀粉,济南兴森淀粉科技有限公司;二甲基乙酰胺,分析纯,天津市富宇精细化工有限公司;污泥,取自中国光大水务有限公司(济南)。

$\text{KNO}_3$ ;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ;  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ; 碘化汞; 碘化钾; 氢氧化钠; 酒石酸钾钠; 盐酸; 氨基磺酸; 4-氨基苯磺酰胺; 硫酸亚铁铵; 硫酸; 硫酸银; 重铬酸钾。

FA2004N 电子分析天平、UV-754N 紫外分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;HH-WO 恒温水浴锅,上海绪航科学仪器有限公司;GI 高压灭菌锅,致微仪器有限公司;DHG-9053A 电热鼓风干燥箱,上海益恒实验仪器有限公司;YL-1ACOD 消解仪,承德市华通环保仪器厂;JEM-2100 扫描电镜、能谱仪,JEOL 捷欧路(北京)科贸有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 淀粉/聚砜碳源的制备

将淀粉和聚砜按质量比 1:3、1:1、3:1 分别加入盛有 60 mL 二甲基乙酰胺的锥形瓶中,并置于水浴锅中 80℃ 条件下搅拌 24 h 使淀粉、聚砜混合均匀,然后将上述溶液倒入模具中。将含有溶液的模具浸入去离子水中 1 h 后,将碳源取出并转移至相转化水槽中进行 2 d 的相转化过程,每天更换水槽中的

水。待相转化过程完成后将碳源取出烘干备用。为了便于分析,将质量比 1:3、1:1、3:1 的淀粉/聚砜碳源分别命名为 1 号、2 号和 3 号。

#### 1.2.2 淀粉/聚砜碳源结构表征

样品在表征前置于鼓风干燥箱于 60℃ 条件下烘干 24 h。采用扫描电镜对碳源表面的微观形貌进行表征;利用扫描电镜和能谱仪(面扫)表征淀粉与聚砜分子的混合均匀性。

#### 1.2.3 淀粉/聚砜碳源静态释碳实验

将 10 g 1 号、2 号和 3 号碳源添加到 500 mL 锥形瓶中并加入 500 mL 静置 24 h 后的自来水,调节 pH 至 7.5 左右,并将瓶密封,将锥形瓶置于转速 80 r/min、25℃ 的振荡培养箱中,每 24 h 取水样进行 COD 浓度测量。

#### 1.2.4 淀粉/聚砜碳源间歇反硝化实验

将 10 g 1 号、2 号和 3 号碳源添加到 500 mL 锥形瓶中并加入 500 mL 合成废水(50 mg/L  $\text{NO}_3^-$ -N、1 mg/L TP)和最终浓度为 800 mg/L 的活性污泥。将烧瓶放在设定为 80 r/min 和 25℃ 的振荡培养箱中。每 24 h 取水样进行 COD、 $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度测量,并同时更换烧瓶中的合成水。实验装置如图 1 所示。

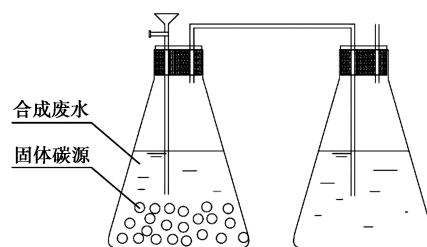


图 1 间歇反硝化实验装置

#### 1.2.5 分析方法

$\text{NO}_3^-$ -N 的测定采用紫外分光光度法; $\text{NO}_2^-$ -N 的测定采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法;COD 的测定采用重铬酸钾法;pH 使用雷磁 pH-3C 型 pH 计测定。 $\text{NO}_3^-$ -N 去除率计算见公式(1):

$$NRR = 100\% \times (\text{NO}_{3(\text{Nin})} - \text{NO}_{3(\text{Nef})} - \text{NO}_{2(\text{Nef})}) / \text{NO}_{3(\text{Nin})} \quad (1)$$

式中: $\text{NO}_{3(\text{Nin})}$ 、 $\text{NO}_{3(\text{Nef})}$  分别为进、出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度, mg/L;  $\text{NO}_{2(\text{Nef})}$  为出水  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度, mg/L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 淀粉/聚砜碳源形貌表征

1~3 号碳源均为 1.5 cm×1.5 cm×1 cm 的块状固体。淀粉添加量较低时,形成的碳源为琥珀色,随

着淀粉含量的增加,碳源逐渐变为白色。为了观察碳源表面微观结构及淀粉聚砜分子混合程度,采用扫描电镜及能谱仪对其进行表征,如图2所示。

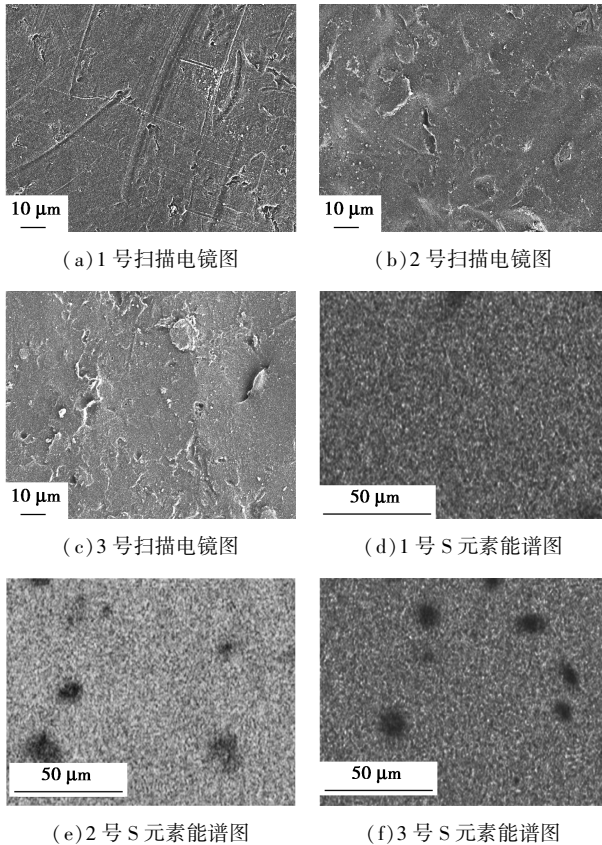


图2 不同比例淀粉/聚砜碳源扫描电镜图及S元素能谱面扫图

由图2(a)可以看到,碳源表面较为疏松,粗糙度较低,并且没有明显的块状聚合物;S元素为聚砜分子特征元素,由图2(d)能谱面扫图可以看到,S元素分布均匀,表明在制备碳源过程中淀粉与聚砜分子混合较为均匀,有利于聚砜分子在反硝化过程中对淀粉的保护,从而降低淀粉在水中的降解速率,减缓COD的释放速率。由图2(b)可以看到,当淀粉含量增加时碳源表面变得较为致密,这是由于淀粉分子含有大量羟基,容易与聚砜分子形成氢键,增强了分子间的结合力,使得碳源变得更加紧实;由图2(e)同样观察到了S元素的分布较为均匀,因此在膜表面并没有形成较大缺陷。而当淀粉含量进一步增加,由图2(c)可以清晰地看到膜表面虽然变得更加致密,但此时粗糙度上升,并且在碳源表面出现了小的块状聚合物,这是由于淀粉不溶于二甲基乙酰胺,当淀粉含量过多时容易造成团聚从而影响淀粉与聚砜分子的均匀混合;此时,由图2(f)可以清晰地观察到S元素的分布不均匀。碳源表面粗糙度的

上升及块状聚合体的出现可能会增加反硝化过程中碳源与水体及细菌的接触面积,导致碳源中的淀粉更容易受到攻击而发生水解,从而提高COD的释放速率。

## 2.2 不同比例淀粉/聚砜碳源静态释碳实验

图3为不同比例淀粉/聚砜碳源15d内静态释碳浓度图。

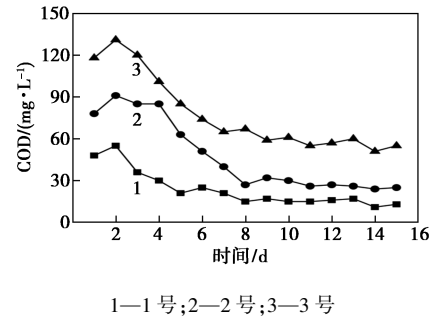


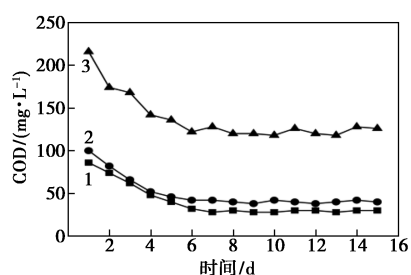
图3 不同比例淀粉/聚砜碳源静态释碳浓度

由图3可以看到,3种不同碳源释碳浓度都经历了下降(0~6d)、稳定(7~15d)两个阶段。在开始的0~3d内,3种碳源均不稳定,释碳浓度都较高,且随淀粉含量增加释碳浓度增加,这可能是由于表面不稳定的小分子有机碳溶解到水中所致;在3~6d内,3种不同碳源的释碳浓度均开始出现下降,这是由于淀粉与聚砜混合,聚砜分子对淀粉起到了保护作用,避免了碳源内部淀粉与水分子的直接接触,从而降低了碳源的释碳速率;当静态释碳实验持续7d时,COD浓度明显保持稳定,直至实验结束时变化不大,此时3种碳源的稳定释碳浓度1号(15 mg/L)<2号(28 mg/L)<3号(59 mg/L)。可以看到,随着淀粉含量的增加释碳浓度升高,当淀粉与聚砜质量比为3:1时,释碳浓度达到59 mg/L,这是由于碳源表面粗糙度的上升及块状聚合体的出现增加了碳源与水体的接触面积,导致碳源中的淀粉更容易发生水解,从而提高了COD的释碳浓度<sup>[13]</sup>。

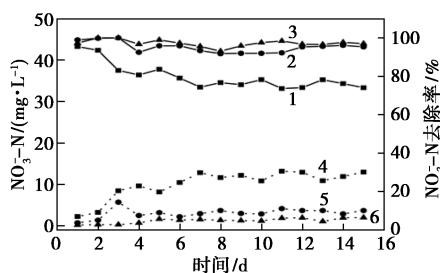
## 2.3 不同比例淀粉/聚砜碳源间歇反硝化实验

图4为不同比例淀粉/聚砜碳源15d内间歇反硝化实验出水COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N浓度图。

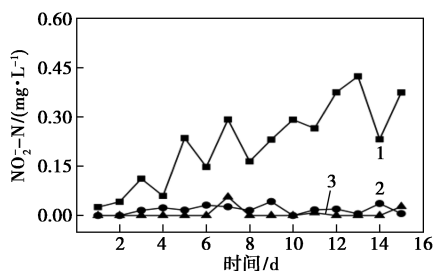
由图4可知,对于1号碳源,出水COD浓度稳定在28 mg/L,但NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N去除率仅为76%,出水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度高于10 mg/L并且伴有明显的NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N积累,这可能是由于碳源淀粉含量低,聚砜分子对淀粉分子的包裹过于致密,导致细菌对淀粉的水解作用降低,造成可利用COD供给不足,从而影响了反硝化速率;对于2号碳源,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N去除率高于93%,



1—1号;2—2号;3—3号  
(a) COD 出水浓度



1—1号 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率;2—2号 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率;  
3—3号 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率;4—1号 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 出水浓度;  
5—2号 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 出水浓度;6—3号 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 出水浓度  
(b) NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率及出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度



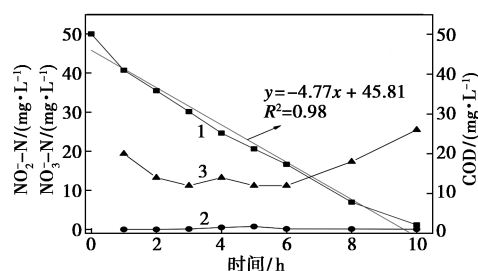
1—1号;2—2号;3—3号  
(c) 出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度

图 4 间歇反硝化实验出水水质

出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度低于 5 mg/L 并且没有 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的积累 (< 0.1 mg/L), 此时出水 COD 浓度稳定在 40 mg/L, 满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 对出水 COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的排放要求<sup>[14]</sup>; 而当淀粉含量进一步增加(3号碳源), 虽然 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率更高, 出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度低于 3 mg/L 并且没有 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的积累 (< 0.1 mg/L), 但此时出水 COD 浓度稳定在 122 mg/L, 远远高于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 对出水 COD 的排放要求, 出水 COD 浓度高容易造成对水体的二次污染。综上所述, 当淀粉与聚砜质量比为 1:1 时, 反硝化效果最好。

#### 2.4 淀粉/聚砜碳源反硝化动力学研究

对 2 号碳源进行了反硝化动力学研究, 结果见图 5。



1—出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N;2—出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N;3—出水 COD

图 5 2 号碳源反硝化动力学研究

由图 5 可以看到, 硝酸盐浓度与时间呈高度线性相关, 相关系数  $R^2$  达到 0.98, 说明反硝化过程为零级反应<sup>[15-16]</sup>。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在 1 h 内迅速下降, 这可能是由于更换合成废水不完全造成的。此外, 在反硝化过程开始时, 活性污泥可能会吸附少量的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, 且硝化细菌利用残留的可降解小分子 COD 将 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 还原为 N<sub>2</sub>, 进一步加速了 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 下降。之后, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 还原速率基本保持不变。在整个过程中可以看到, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的浓度几乎为 0, 没有发生积累。反硝化过程在 10 h 内基本完成, 但出水 COD 浓度增加到 25 mg/L, 表明反硝化过程结束后, 碳源释碳过程仍在继续。由于合成废水每 24 h 更换一次, 出水 COD 浓度稳定在 40 mg/L 左右, 这可能是由于未充分利用的碳源不断降解所致, 仍需要进一步的实验来验证。

### 3 结论

(1) 利用相转化法制备了淀粉:聚砜质量比分别为 1:3、1:1、3:1 的固体缓释碳源, 由扫描电镜图和能谱图可以看到, 当淀粉含量较低时, 淀粉与聚砜分子混合较为均匀。

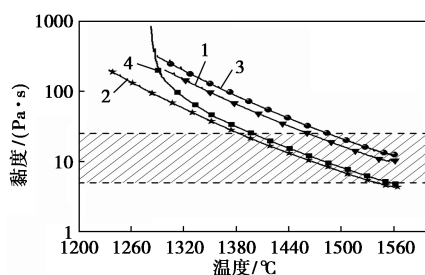
(2) 在不同原料质量比的反硝化间歇实验中, 综合考虑出水 COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度, 当质量比为 1:1 时碳源反硝化效果最好, 浓度分别为不超过 45、5 和 0.1 mg/L, 满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 要求。

(3) 以淀粉:聚砜质量比为 1:1 的碳源进行反硝化动力学研究, 结果表明, 反硝化过程属于零级反应。利用淀粉和聚砜的特性可以制备使用寿命长、价格低廉并具有生物降解可控性的碳源, 对于城镇污水厂二级出水中硝酸盐的去除具有广阔的应用前景。

#### 参考文献

[1] Ruan Y J, Deng Y L, Guo X S, et al. Simultaneous ammonia and nitrate removal in an airlift reactor using poly (butylene succinate) as carbon source and biofilm carrier[J]. Bioresource Technology, 2016, 216: 1004-1013.

(下转第 150 页)



1— $m(\text{ZN}) : m(\text{MD}) = 1 : 1$ ; 2— $m(\text{ZN}) : m(\text{MD}) = 3 : 1$ ;  
3— $m(\text{ZL}) : m(\text{MD}) = 1 : 1$ ; 4— $m(\text{ZL}) : m(\text{MD}) = 3 : 1$

图 4 配煤对黏温特性的影响

### 3 结论

(1) 煤灰熔点和煤灰黏温特性是煤应用于气流床气化技术的两个重要指标,只有两个指标同时合适的煤才能应用于气流床气化炉。ZN 和 ZL 煤灰熔点低,但是黏温特性曲线存在临界黏度点,因此不适用于气流床气化炉。

(2) 通过配煤可以改变煤灰的灰熔点。配煤后的灰熔点与原煤灰熔点不呈线性关系。通过配煤,高灰熔点煤的灰熔点显著降低,可应用于干燥粉化炉。

(3) 煤灰熔点的高低与高温黏度的高低没有一致性。

(4) 采用合适配比,能够使不利于液态排渣的塑性渣型变成玻璃体渣,且配煤后能够有效降低高黏温特性煤灰的黏度,从而使不适用于气流床气

化炉的煤能够应用于气流床气化炉。

### 参考文献

- [1] 许祥静,刘军.煤炭气化工艺[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [2] 中国国家统计局.中国统计年鉴[R].北京:中华人民共和国国家统计局,2012.
- [3] 周夏.褐煤气化技术评述[J].煤化工,2009,37(6):1-4.
- [4] Collot A. Matching gasification technologies to coal properties[J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 65(3-4): 191-212.
- [5] 乌晓江,张忠孝,朴桂林,等.煤粉加压气流床气化特性实验研究[J].工程热物理学报,2008,29(8):1431-1434.
- [6] Ninomiya Y, Sato A. Ash melting behavior under coal gasification conditions[J]. Energy Conversion and Management, 1997, 38(10-13): 1405-1412.
- [7] Vargas S, Frandsen F J, Dam-Johansen K. Rheological properties of high-temperature melts of coal ashes and other silicates[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2001, 27(3): 237-429.
- [8] Song W J, Tang L H, Zhu X D, et al. Fusibility and flow properties of coal ash and slag[J]. Fuel, 2009, 88(2): 297-304.
- [9] Song W J, Tang L H, Zhu X D, et al. Prediction of Chinese coal ash fusion temperatures in Ar and H<sub>2</sub> atmospheres[J]. Energy & Fuels, 2009, 23(4): 1990-1997.
- [10] 戴爱军. 煤灰成分对灰熔融性影响研究[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(5): 23-26.
- [11] Vassilev S V, Kitano K, Takeda S, et al. Influence of mineral and chemical composition of coal ashes on their fusibility[J]. Fuel Processing Technology, 1995, 45: 27-51.
- [12] 岑可法,樊建人,池作和,等.锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M].北京:科学出版社,1994.
- [13] Ge Z, Kong L, Bai J, et al. Effect of CaO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio on slag viscosity behavior under entrained flow gasification conditions[J]. Fuel, 2019, 258: 116-129. ■

(上接第 146 页)

- [2] 韩恺忻,邹小林,宋珊嘉,等.秸秆碳源对高硝氮含量水体脱氮效果实验研究[J].水处理技术,2019,45(2):105-110.
- [3] 赵凯,黄盼宁,鲍捷.固体缓释碳源辅助低碳氮比污水脱氮技术研究[J].辽宁化工,2015,44(8):1037-1039.
- [4] 刘华杰.强化脱氮技术在污水处理中的策略研究[J].环境与发展,2019,31(3):82-84.
- [5] 杨帆,王鹤立.缓释碳源复合材料的制备及其用于地下水硝酸盐污染修复的研究[J].水处理技术,2013,39(4):75-83.
- [6] Shen Z, Zhou Y, Liu J, et al. Enhanced removal of nitrate using starch/PCL blends as solid carbon source in a constructed wetland[J]. Bioresource Technology, 2015, 175: 239-244.
- [7] 裴廷权,杨小毛,刘欢,等.不同缓释碳源对低碳氮比污水反硝化的影响[J].工业水处理,2013,33(5):40-43.
- [8] 裴廷权,王波,刘欢.固体缓释碳源处理低碳氮比污水的脱氮及机理[J].环境工程学报,2014,8(6):2423-2428.
- [9] 张雯,尹琳,周念清.地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性[J].环境科学,2018,39(9):4150-4160.
- [10] Wang J, Chu L. Biological nitrate removal from water and wastewater

by solid-phase denitrification process[J]. Biotechnology Advances, 2016, 34(6): 1103-1112.

- [11] 唐丹琦,王娟,郑天龙,等.聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究[J].环境科学,2014,35(6):2236-2240.
- [12] 朱振亚,白成玲,王磊,等.磺化氧化石墨烯/聚酰胺复合膜的制备及抗污染性能[J].复合材料学报,2019,36(11):2515-2521.
- [13] Wu C, Tang D, Wang Q, et al. Comparison of denitrification performances using PLA/starch with different mass ratios as carbon source[J]. Water Science and Technology, 2015, 71(7): 1019-1025.
- [14] Zhang Q, Ji F, Xu X. Effects of physicochemical properties of poly-ε-caprolactone on nitrate removal efficiency during solid-phase denitrification[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 283: 604-613.
- [15] Cao S, Du R, Li B, et al. Nitrite production from partial-denitrification process fed with low carbon/nitrogen (C/N) domestic wastewater: Performance, kinetics and microbial community[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 326: 1186-1196.
- [16] Shen Z, Wang J. Biological denitrification using cross-linked starch/PCL blends as solid carbon source and biofilm carrier[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(19): 8835-8838. ■