

拼接 GFRP 管混凝土构件轴心受压性能

张 霓, 王连广, 陈百玲

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 拼接 GFRP 管混凝土组合构件是在两个独立的 GFRP 管拼接处设置连接件, 再在内部浇筑混凝土, 形成一种连续整体的 GFRP 管混凝土组合构件. 通过试验, 研究了基于 3 种连接(钢筋、钢板钢筋及钢管连接)的拼接 GFRP 管混凝土组合构件的受力机理和破坏模式. 结果表明, 当加载到 $(30\% \sim 40\%) P_u$ (极限荷载) 时, 在 GFRP 管表面开始出现白纹; 当加载到 $(60\% \sim 70\%) P_u$ 时, GFRP 管对核心混凝土开始产生套箍约束作用; 继续加载, 套箍约束作用继续存在. 拼接构件的破坏发生在构件端部, 连接处没有发生破坏, 而连续整体构件破坏发生在中部位置, 表明 3 种连接均能保证拼接 GFRP 管混凝土轴压构件正常工作.

关 键 词: GFRP 管; 钢筋; 钢板钢筋; 钢管; 轴压构件; 拼接

中图分类号: TU 398

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)01-0118-05

Axial Compression Performance of Splicing Concrete-Filled GFRP Tubular Composite Component

ZHANG Ni, WANG Lian-guang, CHEN Bai-ling

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Ni, E-mail: 13066758899@163.com)

Abstract: The splicing concrete-filled GFRP tube composite members is a new kind of composite member, which is composed of two independent GFRP tubes connected by connectors with poured concrete inside. The mechanical behavior and failure modes of splicing and continuous concrete-filled GFRP tubular composite member connected by steel bars, steel plates and steel tube under axial load were studied. The results indicated that white stripes appear on the surface of GFRP tube when the load reaches about $(30\% \sim 40\%) P_u$ (limit load), and the confinement effect of GFRP tube are motivated when the load reaches $(60\% \sim 70\%) P_u$. The failure of splicing specimens occurs near the end of connectors instead of the splicing joint. However, the failure of the continuous specimen occurs in the middle of the specimen. Results show that the influence of the three connecting ways can ensure the normal work of splicing concrete-filled structures.

Key words: GFRP tube; steel bars; steel plates and steel bar; steel tube; axial compressive member; splicing

GFRP 管混凝土组合构件是在 GFRP 管的内部浇筑混凝土而形成的一种新型构件^[1-3]. GFRP 管具有抗腐蚀性能, 对内部混凝土起到了很好的保护作用; GFRP 管对核心混凝土的套箍约束作用, 使混凝土在外荷载作用下处于三向受力状态, 同时核心混凝土增强了 GFRP 管的稳定性^[4-9]. 近年来, 由于实际工程需要, 经常将两个或两个以上的 GFRP 管混凝土构件拼接成一个连续整体的

GFRP 管混凝土构件, 连接部位的受力性能是 GFRP 管混凝土组合构件的关键部位. 为此本文提出了基于钢筋、钢板钢筋及钢管作为连接件的拼接 GFRP 管混凝土组合构件的拼接方法, 并通过试验研究其轴心受压性能.

1 试验概况

本次试验共设计了 5 根 GFRP 管混凝土试验

收稿日期: 2014-11-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N120401010).

作者简介: 张 霓(1985-), 女, 山东威海人, 东北大学博士研究生; 王连广(1964-), 男, 辽宁鞍山人, 东北大学教授, 博士生导师.

构件,试验所用的 GFRP 管的内径 200 mm,管壁厚 5.5 mm,组合构件高度 700 mm(由 350 mm 长的两根管拼接而成),试验所用的混凝土 150 mm 立方体试块在标准养护条件下的抗压强度为 40.8 MPa. GCS-1 采用钢筋连接,纵筋 4 ϕ 14,箍筋 ϕ 8@50(注:HPB235 钢筋目前在国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010—2010 中已取消);GCPS-2 采用钢板钢筋连接纵筋 4 ϕ 14,钢板直径为 210 mm,厚度为 12 mm,钢板上的钢筋焊接点

位置为距离钢板形心 75 mm 处的圆周等分点;GCST-3 和 GCST-4 采用钢管连接,钢管连接长度分别为 200 mm 和 100 mm,钢管外径均为 113 mm,管壁的厚度均为 3.5 mm.

试验前,按设计要求制作 GFRP 管及连接件,并在设计位置粘贴应变片^[10]. GFRP 管及连接件形式见图 1, GFRP 管混凝土连接方式见图 2, GFRP 管的实测性能参数见表 1,钢筋及钢管的实测力学性能见表 2.

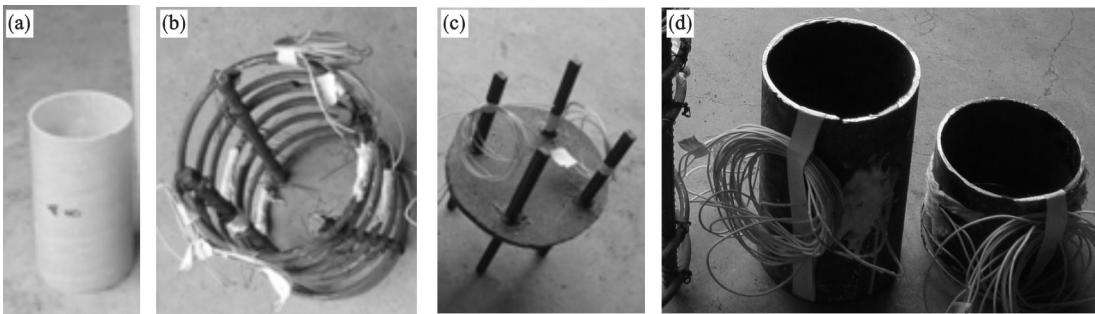


图 1 GFRP 管及钢管连接件
Fig. 1 The GFRP tubes and the steel tubes

(a)—GFRP 管; (b)—钢筋连接件; (c)—钢板钢筋连接件; (d)—钢管连接件.

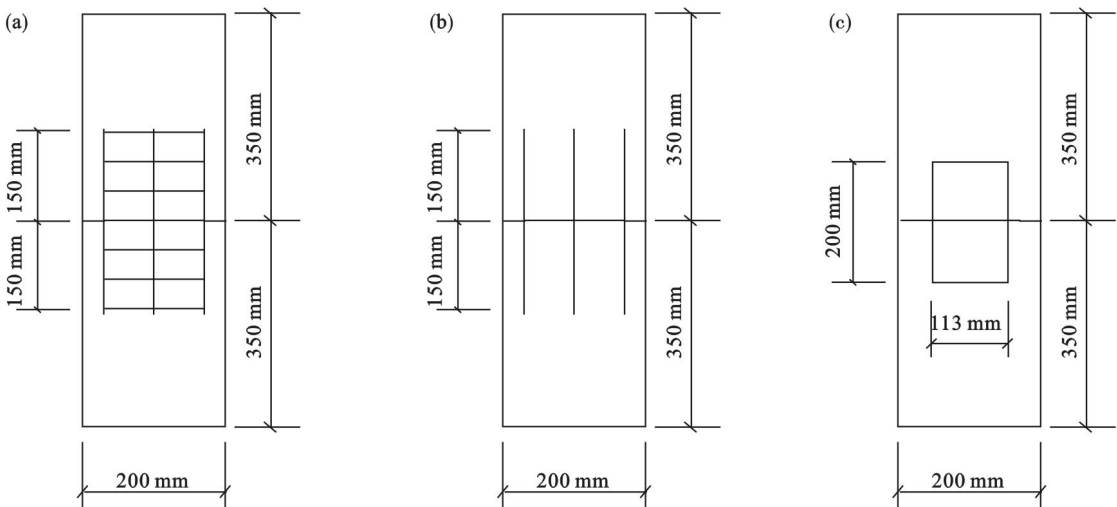


图 2 GFRP 管混凝土连接方式
Fig. 2 The connecting ways of GFRP tube concrete

(a)—钢筋连接; (b)—钢板钢筋连接; (c)—钢管连接.

表 1 GFRP 管材料性能

Table 1 The material properties of GFRP tubes

| GFRP 管内径 mm | 壁厚 mm | 环向 | | 纵向 | |
|----------------|----------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| | | 弹性模量/(N·mm ⁻²) | 强度/(N·mm ⁻²) | 弹性模量/(N·mm ⁻²) | 强度/(N·mm ⁻²) |
| 200 | 5.5 | 27 400 | 470 | 16 650 | 288 |

表 2 钢筋性能

Table 2 The material properties of the steel bar

| 品种 | 型号 | 屈服强度/(N·mm ⁻²) | 极限抗拉强度/(N·mm ⁻²) | 伸长率/% |
|--------|-----------|----------------------------|------------------------------|-------|
| HPB235 | ϕ 8 | 269.1 | 433.7 | 21.8 |
| HRB335 | ϕ 14 | 380.9 | 564.6 | 18.2 |
| 钢管 | 外径 113 mm | 340.7 | 519.8 | — |

在 GFRP 管中部及上下 1/4 截面位置处分别粘贴应变片,以测量试验构件的环向和纵向应变,见图 3。受压方式采用 GFRP 管和核心混凝土共同承压,试验在 5 000 kN 试验机上完成,加载采用单调分级加载方式。

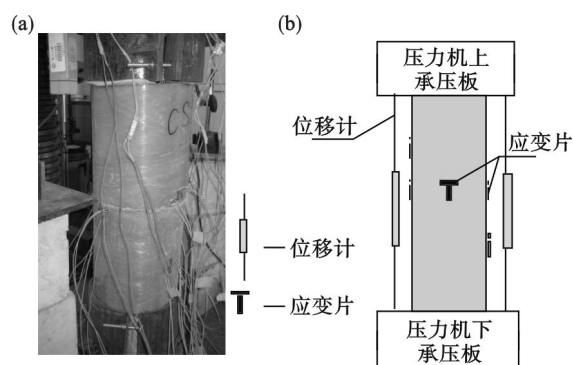


图 3 试验构件与测试

Fig. 3 The experimental members and testing ways

(a)—试验构件; (b)—位移计及应变片布置。

2 破坏模式

在荷载作用初期,所有构件的 GFRP 管与内部钢筋、钢管及混凝土的变形都很小,整个构件

处于弹性工作阶段。当加载到 $(30\% \sim 40\%) P_u$ (极限荷载) 时, GFRP 管表面开始出现一些白色条纹;继续加载, GFRP 管表面的纤维颜色逐渐变得不规则且局部发白,随着荷载的增加,白色条纹的范围不断地往外延伸;当加载到 $(75\% \sim 85\%) P_u$ 时,偶尔可以听到 GFRP 管纤维断裂和树脂开裂的声音。在荷载达到极限荷载 P_u (GCS-1: 2 120 kN; GCPS-2: 2 210 kN; GCST-3: 2 580 kN; GCST-4: 2 490 kN; GC-5: 2 350 kN) 时,伴随着较大的响声,在距离顶端一定距离处 (GCS-1: 150 mm, GCPS-2: 100 mm, GCST-3: 100 mm; GCST-4: 50 mm; GC-5: 200 mm), GFRP 管的纤维开始发生断裂,并且沿着纤维方向从断裂的地方向两侧迅速剥离、扩展。极限状态时,构件 GCS-1, GCPS-2 和 GCST-3 的中部连接处没有发生破坏,构件 GCST-4 的拼接处几乎同时发生破坏,而对比构件 GC-5 破坏发生在构件中部附近一定范围内。说明这 3 种连接方式均能保证构件轴心受压正常工作,而 200 mm 长钢管的连接性能好于 100 mm 长钢管的连接性能,原因是 200 mm 长钢管对核心混凝土的约束范围大,使内部混凝土受力更加均匀。构件的破坏模式见图 4。

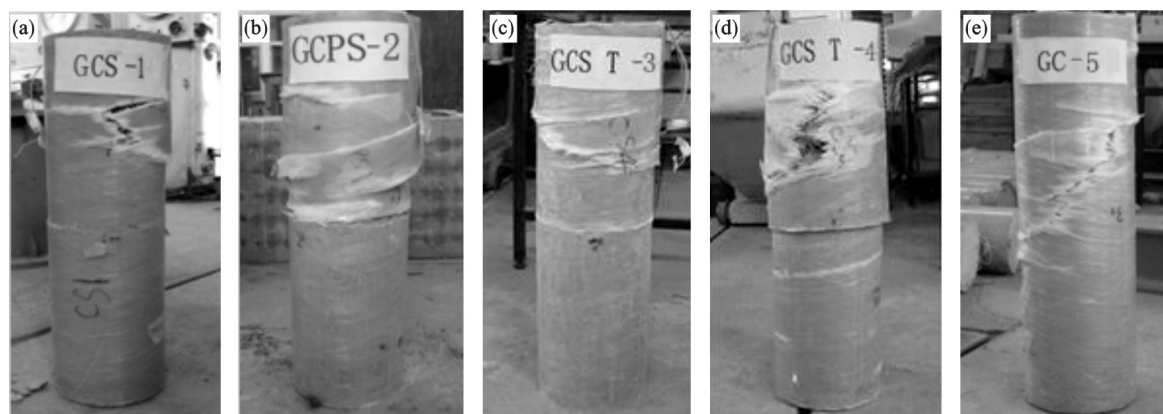


图 4 试件的破坏模式

Fig. 4 The failure modes of different members

(a)—GCS-1; (b)—GCPS-2; (c)—GCST-3; (d)—GCST-4; (e)—GC-5。

3 变形分析

由试验得到构件的荷载与变形关系曲线见图 5。可以看出,在加载到极限荷载前,各构件的荷载与变形关系曲线相似,近似呈线性关系;当加载到 $(60\% \sim 70\%) P_u$ 时,荷载与变形关系曲线出现明显的转折点,变形的增长速度明显大于荷载的增

长速度,此时构件变形分别为 5.8, 6.2, 4.6, 5.2 和 5.8 mm。继续加载到极限荷载 (GCS-1: 2 120 kN, GCPS-2: 2 210 kN, GCST-3: 2 580 kN, GCST-4: 2 490 kN, GC-5: 2 350 kN) 时,构件发生破坏,构件最大变形分别为 13.5, 12.8, 19.0, 19.6 和 15.0 mm。构件 GCST-4 的承载力比构件 GCST-3 略低,且 GCST-3 和 GCST-4 承载力高于对比件 6% ~ 10%,由于钢

管连接件对内部混凝土的约束作用提高了拼接 GFRP 管混凝土构件的承载力, 采用 3 种连接方式均是可行的, 100 mm 长钢管和 200 mm 长钢管连接区别不大。

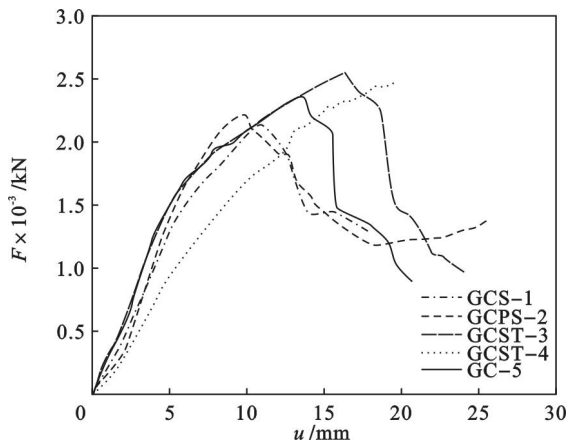


图 5 荷载-变形曲线

Fig. 5 The load-deformation curves

4 荷载与应变关系分析

构件的荷载与应变关系见图 6。由图 6a 可知, 在荷载作用初期, 各个构件 GFRP 管的荷载与应变关系曲线表现出线性关系, 说明构件此时处于弹性工作阶段; 当加载到 $60\% P_u$ 左右时, GFRP 管的应变增长速度大于荷载增长速度, 表明 GFRP 管对混凝土的约束作用明显; 继续加载, GFRP 管的荷载与应变曲线大致呈线性变化, 说明 GFRP 管对内部混凝土继续产生约束作用。构件 GCS-1, GCPs-2, GCST-3 的 GFRP 管中上部的环向应变对比件小, 纵向应变与对比件相近, 随着荷载的增加变化趋势不明显, 构件 GCST-4 环、纵向应变均大于对比件。由图 6b 可以看出, 在荷载达到 $70\% P_u$ 以前, 钢筋的荷载与应变曲线基本呈线性关系, 达到极限荷载时, 构件 GCS-1, GCPs-2 内部钢筋屈服。由图 6c 可知, 在加载初期, 钢管的荷载与应变关系曲线呈线性关系, 当加载到 $50\% P_u$ 左右时, 钢管的环向变形呈非线性增长。极限状态时, 构件 GCST-3 和 GCST-4 内部钢管的纵、环向应变均屈服。

钢筋、钢板钢筋及钢管 3 种连接方式均能保证拼接 GFRP 管混凝土轴压构件正常工作, 由于钢板钢筋连接件的制作比较复杂, 采用钢管连接的拼接 GFRP 管混凝土的构件承载力高于采用钢筋及钢板钢筋连接件的拼接 GFRP 管混凝土构件承载力, 所以在实际工程中推荐采用钢管连接的方式。

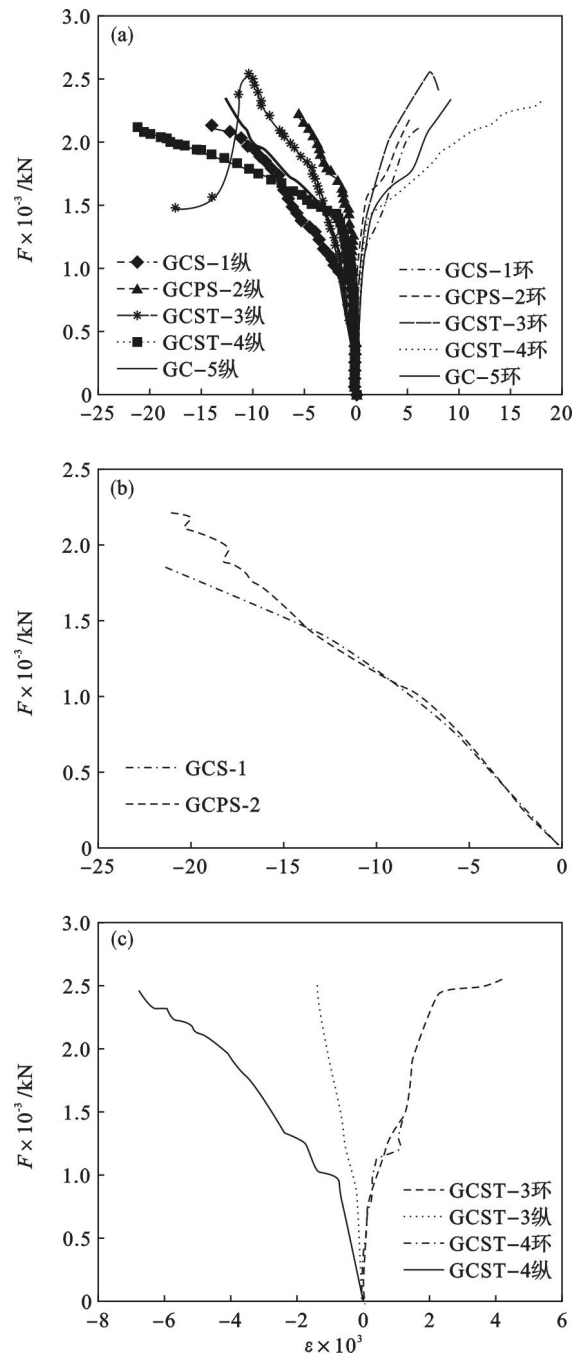


图 6 荷载-应变关系曲线

Fig. 6 The load-strain curves

(a)—GFRP 管中上部; (b)—纵筋中部; (c)—钢管中部。

5 结 论

1) GFRP 管混凝土拼接构件的破坏发生在构件端部, 连接处没有发生破坏, 而连续整体构件破坏发生在中部位置。

2) 在 GFRP 管内部设置钢筋、钢板钢筋及钢管, 均能保证拼接 GFRP 管混凝土轴压构件正常工作。

3) 3 种拼接构件与对比构件受力类似, 但钢管拼接构件的承载力高于对比件 $6\% \sim 10\%$, 在

实际工程中推荐采用钢管拼接方式.

参考文献:

- [1] Toutanji H, Saafi M. Durability studies on concrete columns encased in PVC-FRP composite tubes [J]. *Composite Structures*, 2001, 54(1): 27–35.
- [2] Fam A, Rizkalla S. Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber-reinforced polymer tubes [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(4): 451–461.
- [3] Carey SA, Harries K A. Axial behavior and modeling of confined small-, medium- and large-scale circular sections with carbon fiber-reinforced polymer jackets [J]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(4): 596–604.
- [4] 王清湘, 阮兵峰, 崔文涛. GFRP 套管钢筋混凝土短柱轴压力学性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(6): 122–127.
(Wang Qing-xiang, Ruan Bing-feng, Cui Wen-tao. Experimental study on mechanical properties of axially loaded GFRP tubed short reinforced concrete columns[J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(6): 122–127.)
- [5] Fam A, Cole B, Mandal S. Composite tubes as an alternative to steel spirals for concrete members in bending and shear [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(2): 347–355.
- [6] Muhammad N S, Wang W Q, Sheikh M N. Axial

compressive behaviour of GFRP tube reinforced concrete columns [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 81(2): 198–207.

- [7] Karimi K, Tait M J, El-Dakhkhni W W. Influence of slenderness on the behavior of a FRP-encased steel-concrete composite column [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2012, 16(2): 100–109.
- [8] Zhu Z Y, Ahmad L, Mirmiran A. Splicing of precast concrete-filled FRP tubes [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10(8): 345–356.
- [9] 钱鹏, 冯鹏, 叶列平. GFRP 管轴心受压性能的试验研究[J]. *天津大学学报*, 2007, 40(1): 19–23.
(Qian Peng, Feng Peng, Ye Lie-ping. Experimental study on GFRP pipes under axial compression[J]. *Journal of Tianjin University*, 2007, 40(1): 19–23.)
- [10] 陈百玲, 秦国鹏, 王连广. GFRP 管钢骨混凝土轴压短柱承载力研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(7): 1035–1038.
(Chen Bai-ling, Qin Guo-peng, Wang Lian-guang. Study on bearing capacity of axially-loaded GFRP tube filled with steel-reinforced concrete short columns [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2010, 31(7): 1035–1038.)

(上接第 108 页)

3) 从属分类学水平的分析发现, 具有电化学生活性的 *Geobacter* 属细菌在实验组和对照组的生物膜群落构成中占着统治地位, 数量比例接近 30%, 电化学生活性的缺失和 *Geobacter* 属所占数量比例大小没有直接关系.

参考文献:

- [1] Mieseler M, Atiyeh M N, Hernandez H H, et al. Direct enrichment of perchlorate-reducing microbial community for efficient electroactive perchlorate reduction in biocathodes [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2013, 40(11): 1321–1327.
- [2] Faimali M, Chelossi E, Pavanello G, et al. Electrochemical activity and bacterial diversity of natural marine biofilm in laboratory closed-systems [J]. *Bioelectrochemistry*, 2010, 78(1): 30–38.
- [3] Lee T K, Van Doan T, Yoo K, et al. Discovery of commonly existing anode biofilm microbes in two different wastewater treatment MFCs using FLX titanium pyrosequencing [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 87(6): 2335–2343.
- [4] Parameswaran P, Zhang H, Torres C I, et al. Microbial community structure in a biofilm anode fed with a fermentable substrate: the significance of hydrogen scavengers [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2010, 105(1): 69–78.
- [5] Lu L, Xing D, Ren N. Pyrosequencing reveals highly diverse

microbial communities in microbial electrolysis cells involved in enhanced H_2 production from waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2012, 46(7): 2425–2434.

- [6] Zhu X, Yates M D, Hatzell M C, et al. Microbial community composition is unaffected by anode potential [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(2): 1352–1358.
- [7] Shehab N, Li D, Amy G L, et al. Characterization of bacterial and archaeal communities in air-cathode microbial fuel cells, open circuit and sealed-off reactors [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, 97(22): 9885–9895.
- [8] Mardanpour M M, Esfahany M N, Behzad T, et al. Single chamber microbial fuel cell with spiral anode for dairy wastewater treatment [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, 38(1): 264–269.
- [9] Agler M T, Wrenn B A, Zinder S H, et al. Waste to bioproduct conversion with undefined mixed cultures: the carboxylate platform [J]. *Trends in Biotechnology*, 2011, 29(2): 70–78.
- [10] Xing D, Cheng S, Logan B E, et al. Isolation of the exoelectrogenic denitrifying bacterium *Comamonas denitrificans* based on dilution to extinction [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 85(5): 1575–1587.
- [11] Zhang G, Wang K, Zhao Q, et al. Effect of cathode types on long-term performance and anode bacterial communities in microbial fuel cells [J]. *Bioresour. Technology*, 2012, 118: 249–256.