

# 液体催化燃料电池的放大试验研究

王梦娇<sup>1,2\*</sup>, 李雄威<sup>1,2</sup>, 高文君<sup>1,2</sup>, 陈毅伟<sup>1,2</sup>, 孙振新<sup>1,2</sup>, 郭桦<sup>1,2</sup>

(1. 国电新能源技术研究院有限公司, 北京 102209;

2. 发电系统功能材料北京市重点实验室, 北京 102209)

**摘要:**液体催化燃料电池技术是一种基于电化学原理将生物质能直接转化为电能的绿色、高效生物质燃料电池发电技术。为了研究大功率的液体催化燃料电池技术发电性能,对液体催化燃料电池进行了功率放大试验研究。开发出放电面积为 100 cm<sup>2</sup> 的单电池,通过将组建的小型燃料电池组和中型燃料电池组串联,搭建出一个发电功率为 52 W 的燃料电池电堆,并对该燃料电池电堆的泵损耗和造价成本进行初步分析。结果表明,该燃料电池电堆的泵损耗为 9.87 W,占电堆发电功率的 19%,整个燃料电池系统的总造价成本为 1.55 万元。

**关键词:**液体催化燃料电池;放大试验;生物质;发电性能;泵损耗

中图分类号:TM911.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)09-0114-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.09.025

## Scale-up experiment study on liquid catalyst fuel cell

WANG Meng-jiao<sup>1,2\*</sup>, LI Xiong-wei<sup>1,2</sup>, GAO Wen-jun<sup>1,2</sup>, CHEN Yi-wei<sup>1,2</sup>,

SUN Zhen-xin<sup>1,2</sup>, GUO Hua<sup>1,2</sup>

(1. Guodian New Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. Beijing Key Laboratory of Power Generation System Functional Material, Beijing 102209, China)

**Abstract:** The liquid catalyst fuel cell is a kind of green and highly efficient biomass fuel cell power generation technology, which converts biomass energy directly into electricity based on electrochemical principle. In order to study the power generation performance of high-power liquid catalyst fuel cell technology, the scale-up experiment study on liquid catalyst fuel cell is carried out. A single battery with a discharge area of 100 cm<sup>2</sup> is developed, and a fuel cell stack with a power of 52 W is built by connecting the assembled small fuel cell bank and medium fuel cell bank in series. The preliminary analysis on the pump loss and cost of this fuel cell system shows that the pump loss is 9.87 W, accounting for 19% of the fuel cell power. The total cost of the fuel cell system is RMB15 500.

**Key words:** liquid-catalyst fuel cell; scale-up experiment; biomass; power generation performance; pump loss

随着全球可再生能源开发利用规模不断扩大及应用成本的快速下降,发展可再生能源已成为许多国家推进能源转型的核心内容和应对气候变化的重要途径,也是我国推进能源生产和消费革命、推动能源转型的重要措施。而作为一种重要的可再生能源的生物质能的合理利用可以实现低碳排放,解决化石燃料消耗带来的温室效应,从而有利于生态平衡的保持<sup>[1-2]</sup>。以生物质为原料的燃料电池技术即是一种清洁的生物质利用技术,其在解决分布分散的生物质资源的高效利用、避免生物质燃烧带来的气态污染物和颗粒物排放问题等方面具有独特优势<sup>[3]</sup>。然而,目前的生物质燃料电池发电技术还存在着固体氧化物燃料电池受运行温度限制和微生物燃料电池输出功率密度低和稳定性差等问题<sup>[4-7]</sup>。

液体催化燃料电池技术是一种新型的生物质燃料电池发电技术,在光照或加热(80~200℃)条件

下,利用水溶性多金属硝酸盐或氧化还原电对的氧化催化性能对生物质进行氧化降解,被还原的多金属硝酸盐释放出电子进行放电,从而将生物质的有机质部分在低温下直接转化为电能<sup>[8-11]</sup>。与现有的固体氧化物燃料电池技术和微生物燃料电池技术相比,液体催化燃料电池技术可选用葡萄糖、淀粉、秸秆、甘油、污水污泥、褐煤等作为生物质原料<sup>[4-5,9-10,12-15]</sup>,使用绿色、无毒且稳定的多金属硝酸盐或氧化还原电对为催化剂而非铂等贵金属催化剂<sup>[13,16]</sup>。在以葡萄糖为生物质原料、浓度为 0.2 mol/L 磷钨酸为催化剂、阳极电解液在 250 W 卤素灯下光照 20 h 的条件下,燃料电池的最大输出功率达到 31.5 mW/cm<sup>2</sup>,是微生物燃料电池输出功率的 1 000 倍以上<sup>[4,17]</sup>。因此,液体催化燃料电池技术具有生物质燃料种类广泛、反应条件温和、可利用太阳能、无贵金属催化剂、功率密度高等优

收稿日期:2019-05-09;修回日期:2019-07-06

基金项目:北京市科技重大专项(Z171100002017021);国家能源集团重点科技项目(2017B1BE00100)

作者简介:王梦娇(1986-),女,博士,研究方向为生物质燃料电池及制氢,通讯联系人,wangmengjiao\_33@163.com。

势,是一种极具应用潜力的生物质燃料电池发电技术<sup>[15,17-18]</sup>。

为了满足更大功率的电池需求,笔者进行了液体催化燃料电池的放大试验。在小面积电堆实验研究基础上探索了大面积电池组的制备<sup>[4-5]</sup>,设计加工了大面积单电池流场板,并对所搭建的大面积液体催化燃料电池装置进行测试,考察其发电性能,并对造价成本进行初步分析。

## 1 燃料电池系统

### 1.1 流场设计

合理的电极板流场结构可以使电极板各处均能获得充足的反应物,从而保证燃料电池具有良好的发电性能。考虑到加工和物料成本以及使用寿命等因素,放大试验研究中电极板的流场不再采用之前的蛇形流道设计<sup>[4-5]</sup>,而是采用无流道设计,即电极板内的液体流道为一个整体空腔,空腔内放一整块石墨毡,石墨毡在起到液体分散作用的同时也可传导电子,这种设计具有加工方便、阻力小、损耗少和使用寿命长等优点。流场板采用石墨材料,其空腔面积为 $125\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 。

由本课题组前期研究可知,降低电解液电阻损失的主要途径有降低电极厚度和电流密度,以及提高电解液的电导率。电极厚度越小,泵损失越大,因此电极厚度不能过小。液体催化燃料电池小试装置的电极厚度为 $10\text{ mm}$ ,相对较大,若降低为 $3\text{ mm}$ ,则可将损失降低为原来的 $30\%$ <sup>[4]</sup>,因此本放大试验研究中电极厚度设计为 $3\text{ mm}$ 。

### 1.2 燃料电池组

燃料电池组主要由端板、集电板、电极板和质子交换膜组成。为了控制加工成本并保证电池组的强度,电池组内部电极板采用夹层设计,中间夹层为石墨板用于传导电子,边上两层为陶瓷材料,采用回字型结构以露出中间的石墨电极板。

质子交换膜选用美国杜邦公司生产的 Nafion 115 膜,由于 Nafion 膜质地较软且价格昂贵,因此仅在质子交换膜的工作部分采用, Nafion 膜通过热塑镶嵌在塑料材质的外沿内,塑料外沿起到了固定和保护作用,使质子交换膜的使用寿命大大提高并降低了加工成本。

质子交换膜置于 2 片电极板之间,并与 2 电极板内侧以及电极板流道内的石墨毡紧密接触。

2 片集电板外侧放置塑料端板,用于紧固电池,

防止电解液泄漏。

燃料电池组组装前,先将石墨毡浸入体积比为 3:1 的浓硫酸和浓硝酸混合物中,在 $50^\circ\text{C}$ 下加热 $30\text{ min}$ ,然后将石墨毡用去离子水冲洗干净并干燥。

本次试验分别组装了由 4 片单电池组成的小型燃料电池组和由 16 片单电池组成的中型燃料电池组,以测试不同规格燃料电池组及其组合连接后的燃料电池电堆的发电性能。

### 1.3 燃料电池系统组装

放大后的液体催化燃料电池系统如图 1 所示,主要由阳极储液罐、燃料电池组、电子负载、循环泵和阴极储液罐组成。使用聚四氟乙烯管分别将电池组的最外侧阳极电极板与阳极储液罐连接,将电池组的最外侧阴极电极板与阴极储液罐连接,利用循环泵分别实现阳极和阴极电解液的循环。

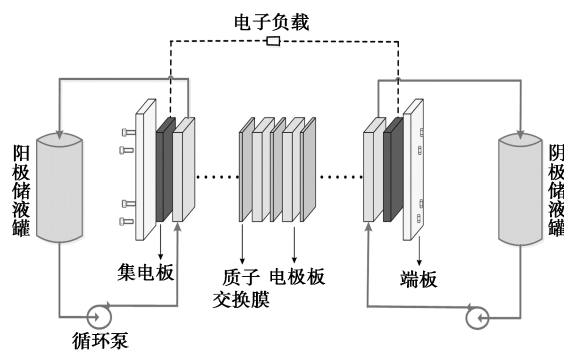


图 1 放大的液体催化燃料电池系统

同时,在阳极集电板和阴极集电板之间连接电子负载,以对燃料电池系统进行数据采集。

## 2 试验测试

### 2.1 试剂及电解液制备

主要试剂包括葡萄糖、磷钼酸、三氧化钼、过氧化氢、磷酸和五氧化二钒,五氧化二钒购自西亚试剂公司,其余试剂均购自阿拉丁试剂公司,所用试剂均为分析纯。试验选用葡萄糖为燃料电池原料,以磷钼酸为阳极催化剂。

取一定量的磷钼酸加水稀释,配制成浓度为 $0.3\text{ mol/L}$ 的磷钼酸水溶液。取配制好的磷钼酸水溶液 $500\text{ mL}$ ,在其中加入 $20\text{ g}$ 葡萄糖样品作为阳极电解液。将阳极电解液在 $100^\circ\text{C}$ 下持续加热 $24\text{ h}$ ,加热完成后,可看到阳极电解液的颜色由淡黄色变为深蓝色。将加热后的阳极电解液冷却放入阳极储液罐。

用三氧化钼、过氧化氢、磷酸和五氧化二钒合成

浓度为 0.3 mol/L 的钒钼酸水溶液,作为阴极电解液。取配制成的阴极电解液 500 mL,放入阴极储液罐。

### 2.2 测试过程及结果

将小型燃料电池组置于放大的液体催化燃料电池系统,并将阳极储液罐和阴极储液罐的温度加热至 80℃ 并保持稳定,打开循环泵并将流速设置为 50 mL/min,接通电子负载,开始记录电压、电流及功率,其发电性能测试结果如图 2 所示。由图 2 可以看出,4 片单电池组装的小型燃料电池组的最大功率为 5 W。

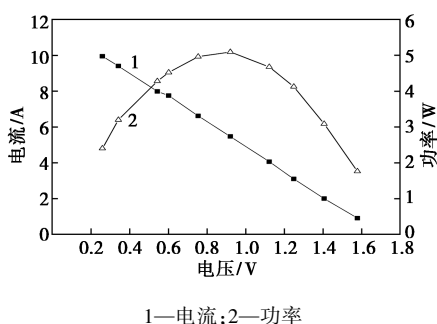


图 2 小型燃料电池组功率/电流-电压测试曲线

将中型燃料电池组置于放大的液体催化燃料电池系统,同样将阳极储液罐和阴极储液罐的温度加热至 80℃ 并保持稳定,打开循环泵并将流速设置为 50 mL/min,接通电子负载,开始记录数据,其发电性能测试结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,16 片单电池组装的中型燃料电池组的最大功率可达到 24 W。因此,相比小型燃料电池组,中型燃料电池组的发电功率增长了 4 倍以上。

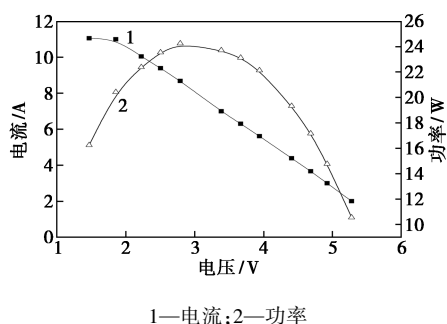


图 3 中型燃料电池组功率/电流-电压测试曲线

将 2 个小型燃料电池组与 2 个中型燃料电池组通过电路串联连接,置于放大的液体催化燃料电池系统,重复上述操作步骤,测试电池组串联连接的发电性能,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,由小型燃料电池组和中型燃料电池组串联构成的燃料电池电堆,在最优工况下,电堆电流为 7 A,电压为 7 V,

电堆功率可达到 52 W。

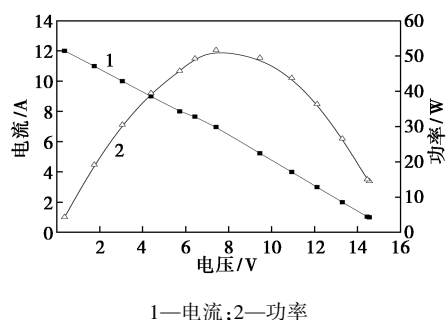


图 4 燃料电池电堆功率/电流-电压测试曲线

### 3 燃料电池系统泵损耗计算

燃料电池运行过程中,电解液在管道和电池中的流动会产生一定的损失,这部分损失由泵的运转来提供。燃料电池的泵损计算式为:

$$P_p = \Delta P \times (Q/\eta) \quad (1)$$

式中: $\Delta P$  为电解液在流动中的压力损失,Pa; $Q$  为电解液的体积流量, $m^3/s$ ; $\eta$  为泵的效率,对于一个给定的泵,泵效率  $\eta$  为一定值。

电解液在流动中的压力损失主要包括电解液在管道中的压力损失  $\Delta P_1$  和在电池中的压力损失  $\Delta P_2$ <sup>[19]</sup>,计算式为:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (2)$$

电解液在管道中流动的压力损失可表示为:

$$\Delta P_1 = \rho g h_f + \rho g h_j \quad (3)$$

式中: $\rho$  为电解液密度, $kg/m^3$ ; $h_f$  和  $h_j$  分别为电解液在管道中的沿程阻力损失和局部阻力损失,m。其中,

$$h_f = \lambda(L_1/D)(v_1^2/2g) \quad (4)$$

$$h_j = \zeta(v_1^2/2g) \quad (5)$$

式中: $L_1$  为管道长度,m; $D$  为管道直径,m; $v_1$  为电解液在管道中的流动速度, $m/s$ ; $\lambda$  和  $\zeta$  分别为管道的沿程阻力损失系数和局部阻力损失系数。

对于层流运动,沿程阻力系数为:

$$\lambda = 64/Re \quad (6)$$

式中: $Re$  为雷诺数,

$$Re = \rho D v_1 / \mu \quad (7)$$

式中: $\mu$  为电解液的动力黏度, $Pa \cdot s$ 。

多孔电极中电解液的压降为:

$$\Delta P_2 = v_2 \mu L_2 / K \quad (8)$$

式中: $v_2$  为电解液在电极中的线速度, $m/s$ ; $L_2$  为电极长度,m; $K$  为多孔电极的渗透率,可由 Carman-Kozeny 公式得到<sup>[20]</sup>,即:

$$K = d_r^2 \varepsilon^3 / [16k_{CK}(1 - \varepsilon)^2] \quad (9)$$

式中: $d_r$ 为多孔介质中纤维的直径,m; $\varepsilon$ 为孔隙率; $k_{CK}$ 为 Carman-Kozeny 常数,取决于材料类型。

泵损模型的输入参数如表 1 所示。

表 1 泵损模型的输入参数

参数	数值
阳极电解液密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1908
阴极电解液密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2065
电解液流量/( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	$5.56\times 10^{-6}$
管道长度/m	2
管道内径/m	0.01
单电池数量	40
泵效率	0.7
多孔电极纤维直径/m	$1.76\times 10^{-5}$
多孔电极孔隙率	0.929
Carman-Kozeny 常数	4.28
局部损失系数	5
阳极电解液动力黏性系数/( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	$6\times 10^{-3}$
阴极电解液动力黏性系数/( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	$9\times 10^{-3}$

将输入参数代入式(1)~式(9)中计算,结果如表 2 所示。由表 2 中可以看出,燃料电池泵损耗为 9.87 W。燃料电池系统的功率为 52 W,因而泵的功率消耗占电池功率的 19%。由式(4)、式(5)、式(8)可知,燃料电池的泵损耗受管道几何尺寸、电极尺寸、电解液的流量等因素的影响。对于一个固定的燃料电池系统来说,影响燃料电池运行过程中泵损耗的主要因素为电解液的流量,随着电解液的流量增大,泵的运行损耗显著增大<sup>[21]</sup>。因此,在燃料电池实际运行过程中,应通过运行策略优化电解液流量,从而在一定范围内降低泵损耗,提升整个燃料电池系统的性能。

表 2 泵损耗计算结果

参数	数值
阳极电解液管道内压力损失/Pa	$5.1\times 10^3$
阳极电解液电池内压力损失/Pa	$6\times 10^4$
阴极电解液管道内压力损失/Pa	$6.65\times 10^3$
阴极电解液电池内压力损失/Pa	$9\times 10^4$
阳极循环泵压力损失/Pa	$3.51\times 10^4$
阴极循环泵压力损失/Pa	$5.17\times 10^4$
阳极循环泵损耗/W	3.98
阴极循环泵损耗/W	5.89
电池泵损耗/W	9.87

## 4 燃料电池系统造价成本

由于放大的燃料电池电堆的电池规模增大,其造价成本也必将有所增加。搭建的燃料电池电堆系统的成本信息如表 3 所示。

表 3 液体催化燃料电池系统的主要成本信息

项目	价格
阳极电解液成本/( $\text{元}\cdot\text{L}^{-1}$ )	380
阴极电解液成本/( $\text{元}\cdot\text{L}^{-1}$ )	2000
储液罐成本/( $\text{元}\cdot\text{L}^{-1}$ )	3
质子交换膜价格/( $\text{元}\cdot\text{m}^{-2}$ )	25000
电极板价格/( $\text{元}\cdot\text{m}^{-2}$ )	250
石墨毡价格/( $\text{元}\cdot\text{m}^{-2}$ )	200
每台循环泵价格/元	2000

经过计算可知,放大后的 52 W 液体催化燃料电池系统的造价成本约为 1.55 万元,如表 4 所示。

表 4 放大的液体催化燃料电池系统的造价成本

项目	成本/元
电堆(含 40 片单电池)	$1.03\times 10^4$
阳极电解液(500 mL)	190
阴极电解液(500 mL)	1000
电解液储罐(2 L)	6
2 台循环泵	4000
合计	$1.55\times 10^4$

## 5 结论

(1)开发了放电面积为  $100\text{ cm}^2$  的单电池,并分别组建出包含 4 个单电池的小型燃料电池组和包含 16 个单电池的中型燃料电池组。经过测试,小型燃料电池组和中型燃料电池组的发电功率分别可达到 5 W 和 24 W。

(2)通过将 2 组小型燃料电池组和 2 组中型燃料电池组串联,搭建出 1 个燃料电池电堆。经过实验测试,在最优工况下,电堆的电流为 7 A,电压为 7 V,电堆的总功率达到 52 W。

(3)发电功率为 52 W 的燃料电池系统在运行过程中,泵的损耗占电堆发电功率的 19%。而电解液流量是影响泵损耗的重要因素,随着电解液流量的增大,泵的运行损耗会显著增高。

(4) 燃料电池系统的造价成本中, 质子交换膜的成本占绝大部分。如果能够降低质子交换膜的成本, 则燃料电池系统的成本还可能更大幅度地降低。

### 参考文献

- [1] 李季, 孙佳伟, 郭利, 等. 生物质气化新技术研究进展[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 1-6.
- [2] 童家麟, 吕洪坤, 齐晓娟, 等. 国内生物质发电现状及应用前景[J]. 浙江电力, 2017, 36(3): 62-66.
- [3] 赵展, 齐秀龙, 刘晓东, 等. 生物质气化—燃料电池发电系统性能分析[J]. 可再生能源, 2011, 29(6): 115-120.
- [4] 李雄威, 刘聪敏, 徐冬, 等. 生物质液体催化燃料电池的电化学模型[J]. 可再生能源, 2018, 36(8): 1113-1118.
- [5] 李雄威, 刘聪敏, 徐冬, 等. 液体催化燃料电池的污泥发电性能分析[C]. 《环境工程》2018 年全国学术年会, 北京, 2018.
- [6] 何凡, 胡蕴仪, 黄秀静, 等. 碳纸和碳布电极微生物燃料电池产电特性的对比研究[J]. 现代化工, 2019, 39(1): 184-187.
- [7] 卓露, 汪兴兴, 吕帅帅, 等. 微生物燃料电池技术的研究进展[J]. 现代化工, 2017, 37(8): 41-44.
- [8] Wei L, Wei M, Yulin D. High-performance liquid-catalyst fuel cell for direct biomass-into-electricity conversion [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53(49): 13558-13562.
- [9] Liu W, Mu W, Liu M, et al. Solar-induced direct biomass-to-electricity hybrid fuel cell using polyoxometalates as photocatalyst and charge carrier[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(2): 1-8.
- [10] Wu W, Liu W, Mu W, et al. Polyoxymetalate liquid-catalyzed polyol fuel cell and the related photoelectrochemical reaction mechanism study[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 318: 86-92.

(上接第 113 页)

其典型特征为能够将硫化物氧化为硫单质; 生理生化和分子生物学鉴定菌株 T1 为地芽孢杆菌。

(2) 菌株 T1 最适宜生长条件为: 温度为 70℃, pH 为 7, 盐度为 4%。

(3) 菌株 T1 具有高效的生物脱硫特性, 在初始 S<sup>2-</sup> 质量浓度为 67 mg/L 条件下, 在 30 h 内可将硫化物完全去除, 平均去除速率约为 2.22 mg/(L·h)。

(4) 筛选得到的嗜热脱硫细菌 T1 为高温污水生物脱硫工艺的实施提供了一种微生物资源, 在污水硫化物治理领域具有广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] 黄廷林, 赵建伟, 吴宗福, 等. 陇东油田采出水系统的腐蚀及防护[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2002, 34(4): 320-321.
- [2] Starkey R L. The general physiology of the sulfate-reducing bacteria in relation to corrosion[J]. *Producers Monthly*, 1958, 22: 12-16.

- [11] 刘跃岭, 景琦, 徐帆, 等. 直接利用生物质的化学燃料电池研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(9): 3346-3354.
- [12] Zhang Z, Liu C, Liu W, et al. Direct conversion of sewage sludge to electricity using polyoxometalate catalyzed flow fuel cell [J]. *Energy*, 2017, 141: 1019-1026.
- [13] Gong J, Liu W, Du X, et al. Direct conversion of wheat straw into electricity with a biomass flow fuel cell mediated by two redox ion pairs [J]. *Chemosuschem*, 2017, 10(3): 506-513.
- [14] Zhang Z, Liu C, Liu W, et al. Innovative design of coal utilization-A green pathway for direct conversion of coal to electricity through flow fuel cell technology [J]. *Applied Energy*, 2017, 200: 226-236.
- [15] 吴伟兵, 李建, 刘聪敏, 等. 基于水溶性多金属酸盐的光催化燃料电池[J]. 高等学校化学学报, 2017, 38(6): 1082-1089.
- [16] Liu C, Zhe Z, Wei L, et al. Synergistic effect of polyoxometalate solution and TiO<sub>2</sub> under UV irradiation to catalyze formic acid degradation and their application in the fuel cell and hydrogen evolution [J]. *Green Energy & Environment*, 2017, 2(4): 436-441.
- [17] 夏子华, 赵璐洋, 吴伟兵, 等. 基于杂多酸的光催化生物质燃料电池性能[J]. 林业工程学报, 2017, 2(6): 86-91.
- [18] 杨琦, 苏伟, 姚兰, 等. 生物质制氢技术研究进展[J]. 化工新型材料, 2018, 46(10): 247-250.
- [19] Xiong B, Zhao J, Tseng K J, et al. Thermal hydraulic behavior and efficiency analysis of an all-vanadium redox flow battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 242: 314-324.
- [20] You D, Zhang H, Chen J. A simple model for the vanadium redox battery [J]. *Electrochimica Acta*, 2009, 54(27): 6827-6836.
- [21] 李雄威, 孙振新, 陈毅伟, 等. 液体催化燃料电池泵损耗及运行策略分析[C]. 中国电机工程学会 2017 年年会, 广西南宁, 2017. ■

[3] 杨怀玉, 陈家坚, 曹楚南. H<sub>2</sub>S 水溶液中的腐蚀与缓蚀作用机理的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, 20(2): 97-100.

[4] 马晓丹, 高灵芳, 谭文博, 等. 一株异养脱硫反硝化菌株的筛选及其生物脱硫脱氮特性研究[J]. 微生物学通报, 2015, 42(5): 853-857.

[5] Nazina T N, Tourova T P, Poltarau A B, et al. Taxonomic study of aerobic thermophilic bacilli: Descriptions of *Geobacillus subterraneus* [J]. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2001, 51: 433-446.

[6] Fortina M G, Mora D, Schumann P, et al. Reclassification of *Saccharococcus caldxylosilyticus* as *Geobacillus caldxylosilyticus* comb [J]. *nov Int J Syst Evol Microbiol*, 2001, 51(6): 2063-2071.

[7] Zeigler D R. The Genus *geobacillus* introduction and strain catalog. The bacillus genetic stock center catalog of strains [DB]. 7edition, volume 3, Ohio State University, Ohio, 2001.

[8] Marchant R, Banat I M, Rahman T J, et al. The frequency and characteristics of highly thermophilic bacteria in cool soil environments [J]. *Environmental Microbiology*, 2002, 4(10): 595-602.

[9] Maugeri, Teresa L, Gugliandolo, et al. Three novel halotolerant and thermophilic *Geobacillus* strains from shallow marine vents [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2002, 25(3): 450-455. ■