氢氯燃料电池实验条件的优化

燕 翔[1],胡佳雷[2],马 丽[1],马 晶[1],豆存鑫[1],杨妙妙[1]
(1.陇南师范学院农林技术学院,甘肃陇南 742500;2.成县支滇初级中学,甘肃陇南 742500)

摘 要:通过正交试验,考察了电解电压、电解时间、电极间距和氯化钠溶液浓度对氢氯燃料电池能量转化效率的影响。结果表明,电解食盐水的优化条件为:电极间距1 cm,电解电压8 V,电解时间6 min,氯化钠溶液质量分数15%。在该条件下,氢氯燃料电池驱动蜂鸣器可持续工作4.25 min,实验结果重复性良好。该方案既可作为中学化学和小学科学的学生实验项目,也可用于家庭趣味探究活动,具有一定的推广价值。

关键词:氢氯燃料电池;正交试验;实验条件;优化;蜂鸣器;能量转化效率
DOI:10.19935/j.cnki.1004-2326.2026.09.023
引用格式:燕翔,胡佳雷,马丽,等.氢氯燃料电池实验条件的优化[J].实验教学与仪器,2026,43(09):95-98.

燃料电池是一种在电极上完成燃烧反应(氧化还原反应),将化学能直接转化成电能的一种高能和无污染的新型电池,其能源利用率超过80%[1]。《普通高中化学课程标准(2017年版2020年修订)》将制作简单的燃料电池列为选择性必修课程的学生必做实验。将燃料电池引入课堂教学,让学生在动手制作中亲身体验能量转化过程,不仅有助于学生加深对电化学原理的理解,也为发展其科学探究与创新意识素养提供了实践载体。

已有研究围绕氢氯燃料电池的实验材料、装置与条件进行了较多改进。在教学实验层面的工作主要包括:①电极材料的改进。对碳棒进行淬火处理,外裹海绵制成模拟多孔电极,提升对H_2、Cl_2的吸附性能[2-3]。②电解装置的改进。针对电解产氢可能带来的污染问题,利用注射器、塑料瓶、输液滴管等制作封闭式电解装置[2,4-5],集制气、储气、验气与尾气处理于一体,抑制Cl_2逸散,便于检验气体及检测生成的NaOH溶液,契合绿色化学理念。③负载与测量的改进。为增强能量转化过程的直观性与趣味性,选用发光二极管、微型电机(小风扇)、音乐芯片等作为负载;并借助并联电压表、串联电流表或Edislab Pro软件配接电压传感器,实时采集放电数据并绘制放电曲线,即可直接读取电池电压与电流[2-3,5]。此外,杨祖望等[6]将氢氯燃料电池与盐酸制备耦合,设计了以盐酸为电解质、碳化钨为氢电极、炭黑为氯电极的实验型电池,部分化学能直接转为电能,输出性能良好,为其在盐酸生产中的工业应用提供了参考。

但既有研究仍有两点未充分回应:其一,电解电压、电解时间、电极间距、电解液浓度等因素均影响能量转化效率,但其主次关系与交互作用尚不清晰;其二,已有方案电解电压高达16~18 V,对配套电源要求较高,不方便在家庭或常规课堂低成本开展。

针对上述不足,笔者以2B铅笔芯作为电极,设计制作了一套电解食盐水并组成氢氯燃料电池的实验装置,通过正交试验,探究了电解电压、电解时间、电极间距、电解液浓度等对氢氯燃料电池能量转化效率的影响,以期为电解食盐水与氢氯燃料电池实验条件的优化提供参考。

1 实验原理

在电解氯化钠溶液时,阴极、阳极分别析出氢气和氯气,电极反应如下[1]。

阳极(碳棒):$2Cl^- = Cl_2\uparrow + 2e^-$;

阴极(碳棒):$2H_2O + 2e^- = H_2\uparrow + 2OH^-$;

总反应:$2NaCl + 2H_2O = H_2\uparrow + Cl_2\uparrow + 2NaOH$。

待两电极吸附氢气、氯气后,断开外电源,用导线连接两个电极,H_2、Cl_2构成氢氯燃料电池,电极反应如下。

正极(碳棒):$Cl_2 + 2e^- = 2Cl^-$;

负极(碳棒):$H_2 - 2e^- + 2OH^- = 2H_2O$;

总反应:$H_2 + Cl_2 + 2OH^- = 2H_2O + 2Cl^-$。

在负极上氢气发生氧化反应,氢原子失去的电子在外电路中向正极定向移动而产生电流,实现了化学能向电能的转化。

2 实验内容

2.1 实验用品

仪器:塑料电解槽(可以用烧杯代替),有源蜂鸣器

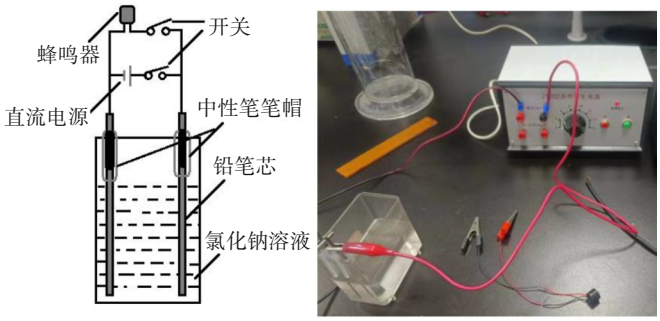
(3 V),烧杯(250 mL),学生直流电源,鳄鱼夹,红、黑导线。

试剂:NaCl溶液(质量分数5%、10%、15%、25%)。

材料:2根2B铅笔芯(直径2 mm、长105 mm),2个中性笔的塑料笔帽。

2.2　实验装置

取一根细铁丝在酒精灯火焰上烧红,在笔帽顶端烫出铅笔芯粗细的小孔;取2根长约10 cm的2B铅笔芯,插入小孔中作为电极;通过卡扣将电极固定在电解池上,使两电极保持适当间距,注意避免相互接触,以防短路;在电解槽中注入100 mL质量分数为15%的氯化钠溶液,阳极铅笔芯接直流电源正极,阴极铅笔芯接负极。实验装置如图1所示。



a 示意图　　b 实物图

图1　氢氯燃料电池实验装置

2.3　实验步骤

(1) 按图1连接好装置,使两电极间距分别为1、3、5、7 cm,设定电压分别为4、6、8、10 V,分别通电电解2、4、6、8 min后,断开直流电源;在电解池电极上分别连接伏特表、灵敏电流表,测量氢氯燃料电池的端电压及外电路中的电流强度,并记录数据。随后,将蜂鸣器经导线与鳄鱼夹接至燃料电池两电极:正极接原电解阳极(Cl_2端),负极接原电解阴极(H_2端)。电路接通后蜂鸣器发声,用秒表记录其持续工作时间。

(2) 影响氢氯燃料电池能量转化效率的主要因素有电极间距、电解电压、电解时间和NaCl溶液质量分数。选用$L_{16}(4^5)$正交表进行试验设计,各因素水平为:电极间距(A)分别取1、3、5、7 cm;电解电压(B)分别取4、6、8、10 V;电解时间(C)分别取2、4、6、8 min;NaCl溶液质量分数(D)分别取5%、10%、15%、25%,按表共安排16组试验。

(3) 以电池容量作为燃料电池的性能指标。在燃料电池工作时,除检测电池电压、电流强度的数据变化外,主要以蜂鸣器工作时长作为试验指标,直观地表征氢氯燃料电池的工作性能。

2.4　数据分析及绘图

正交试验设计、数据分析采用SPSSAU数据科学分析平台。绘图工具采用Origin Pro 9.0软件。

3　实验结果及分析

3.1　实验现象及解释

接通直流电源电解氯化钠溶液,两电极上逐渐产生气泡:阳极析出Cl_2,阴极析出H_2。断开电解电源后,将蜂鸣器正极接原电解阳极(Cl_2端),负极接原电解阴极(H_2端),蜂鸣器立即发出蜂鸣声,表明该氢氯燃料电池能够对外输出电流。

电解过程中可能产生高活性的原子态氢[7],在碳棒电极的吸附与催化作用下[5],H_2与Cl_2在电极表面发生氧化还原反应,外电路产生电流,驱动蜂鸣器持续工作。

3.2　正交试验结果及分析

(1) 正交试验数据。

正交试验数据如表1所示。蜂鸣时长的极差分析结果见表2。由表2看出,蜂鸣时长的极差主次顺序为:电极间距>电压=时间=氯化钠浓度。电极间距是影响蜂鸣时长的主要因素,而电解电压、电解时长和氯化钠溶液浓度等3个因素对蜂鸣时长的影响基本相近。电极间距、电压、时间、氯化钠浓度等4个因素的最优组合为$A_1B_3C_3D_3$,即在电极间距为1 cm、电解电压为8 V、电解时间为6 min、氯化钠浓度为15%的优化水平下,蜂鸣时长最长可达4.25 min。

(2) 电极间距对蜂鸣时长的影响。

氢氯燃料电池的能量转化效率可以用蜂鸣时长来衡量[8]。由表2可知,电极间距是影响蜂鸣时长的主要因素。电极间距对蜂鸣时长的影响如图2所示。由图2中看出,电极间距为1 cm时蜂鸣时长最长;随着电极间距的增大,蜂鸣时长逐渐变短。可能原因是:电极间距减小,Cl^-和H^+迁移到电极表面的速率加快,离子放电更充分,相同时间内产生H_2、Cl_2更多,贮存的化学能更多,燃料电池后续输出能量更大。在燃料电池工作阶段,减小电极间距,则可以减小燃料电池的内阻,使电池放电能力增强。但电极间距不宜过小。若两极距离过近,电解生成的气泡不易从狭窄缝隙散逸,而易附着在电极表面或形成“气桥”,可能降低燃料电池放电过程的稳定性。同时两电极意外接触的风险增大,存在短路隐患。综合正交试验结果,在该实验条件范围内,电极间距优选为1 cm。

表1 氢氯燃料电池正交试验数据

编号	A(电极间距)/cm	B(电压)/V	C(时间)/min	D(NaCl质量分数)/%	端电压/V	电流/mA	蜂鸣时长/min
1	1	4	2	5	1.70	6.50	0.86
2	1	6	4	10	1.30	5.53	2.09
3	1	8	6	15	1.50	4.76	4.25
4	1	10	8	25	1.00	4.41	1.14
5	3	4	2	5	1.45	5.73	3.49
6	3	6	4	10	1.70	5.16	1.40
7	3	8	6	15	1.40	5.40	0.43
8	3	10	8	25	1.40	4.67	2.36
9	5	4	2	5	1.45	2.41	1.27
10	5	6	4	10	1.30	4.32	4.13
11	5	8	6	15	1.45	5.25	2.14
12	5	10	8	25	1.20	4.67	0.33
13	7	4	2	5	1.40	6.24	2.14
14	7	6	4	10	1.60	3.20	0.34
15	7	8	6	15	0.90	2.96	1.17
16	7	10	8	25	0.70	3.67	0.55

表2 蜂鸣器蜂鸣时长的极差分析

项目	A(电极间距)/cm	B(电压)/V	C(时间)/min	D(NaCl)/%
K_1	8.34	7.76	7.76	7.76
K_2	7.68	7.96	7.96	7.96
K_3	7.87	7.99	7.99	7.99
K_4	4.20	4.38	4.38	4.38
k_1	2.09	1.94	1.94	1.94
k_2	1.92	1.99	1.99	1.99
k_3	1.97	2.00	2.00	2.00
k_4	1.05	1.10	1.10	1.10
优化水平	A_1	B_3	C_3	D_3
R	1.04	0.90	0.90	0.90
主次顺序			A>B=C=D	

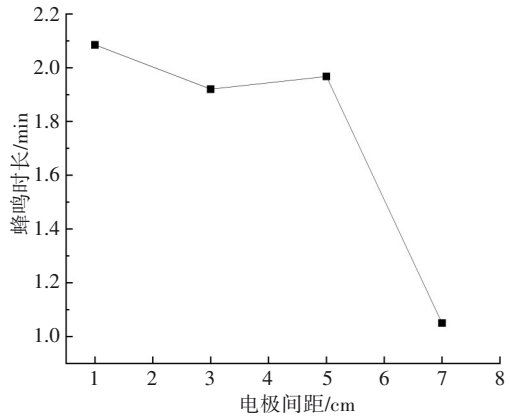


图2 电极间距对蜂鸣时长的影响

(3) 氯化钠质量分数对蜂鸣时长的影响。

NaCl质量分数对蜂鸣时长的影响如图3所示。由图3中看出,随着氯化钠质量分数的逐渐增加,蜂鸣时长呈先升后降的趋势。这表明氯离子质量分数越高,氯离子放电效率越高,阳极上产生的氯气越多。当氯化钠质量分数为15%时,蜂鸣时长达到最大值。当氯化钠质量分数大于15%后,蜂鸣时长骤然下降,其可能的原因是:一方面氯离子质量分数越大,阳极上产生的氯气越多,碳棒上吸附的氯气达到饱和而导致多余氯气逸出;另一方面,随着H^+持续放电,溶液中OH^-浓度逐渐增大,故阳极附近OH^-浓度较高,阳极上吸附的氯气发生了歧化反应而被消耗,导致蜂鸣时长缩短。故而,电解时选择氯化钠溶液的最佳质量分数为15%。

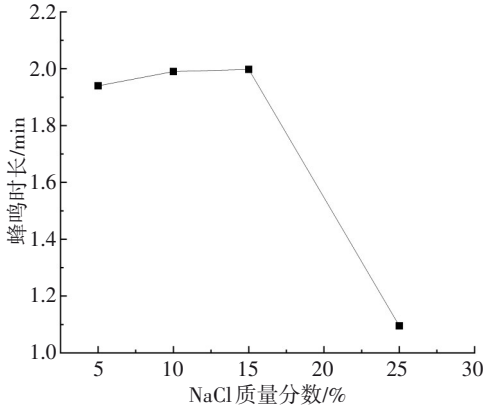


图3 氯化钠质量分数对蜂鸣时长的影响

(4) 电解时间对蜂鸣时长的影响。

电解时间对蜂鸣时长的影响如图4所示。由图4中看出,随着电解时间的延长,蜂鸣时长逐渐增加,总体呈先升后降的趋势,当电解时间为6 min时,蜂鸣时长为最大值。这说明电解时间越长,产生的氯气和氢气越多,能量转化效率越高。但电解时间过长,产生的氯气、氢气过多,将会有部分气体脱离电极逸出或与氯气发生歧化反应,使参与电极氧化还原反应的气体减少,能量转化效率降低。故而,电解氯化钠溶液的最佳时长为6 min。

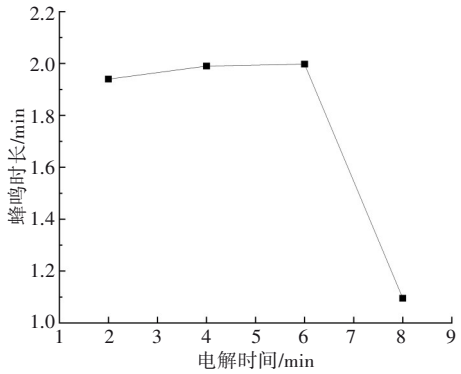


图4 电解时间对蜂鸣时长的影响

(5) 电解电压对蜂鸣时长的影响。

同理,随着电解电压的增大,蜂鸣时长总体呈先升后降的趋势,当电解电压为8 V时蜂鸣时长为最大值。这说明增加电解电压,有利于电解反应的进行,从而产生更多的氯气和氢气,提升燃料电池的能量转化效率。但电解电压过高,产生的氯气、氢气过多,能量转化效率反而降低。故而,电解氯化钠溶液的最佳电压为8 V。

(6) 重复性试验结果分析。

根据正交试验结果,燃料电池工作的优化条件为:电极间距为1 cm、电压为8 V、电解时间为6 min、氯化钠溶液质量分数为15%。在优化条件下氢氯燃料电池能量转化效率的重复性试验数据见表3。分析数据可知,氢氯燃料电池提供的电压为1.30~1.50 V,平均电压为1.43 V;外电路中电流强度为4.35~4.87 mA,平均电流强度为4.63 mA。蜂鸣器蜂鸣时长为4.11~4.25 min,平均时长为4.18 min。蜂鸣时长的极差为0.14 min,标准差为0.047 min,说明实验数据离散程度较小,氢氯燃料电池性能较为稳定。

4 结论

影响氢氯燃料电池能量转化效率的4个因素的优化条件是:电极间距为1 cm,电解电压为8 V,电解时间为6 min,氯化钠溶液质量分数为15%。在该优化条件下,蜂鸣器持续发声时间达到最大值4.25 min。重复性试验表明:在该优化条件下,氢氯燃料电池具有良好的稳定性。

表3 重复性试验数据

序号	电池端电压/V	外电路电流/mA	蜂鸣时长/min	蜂鸣时长标准差S/min
1	1.50	4.76	4.25	0.047
2	1.30	4.48	4.11	
3	1.40	4.66	4.19	
4	1.40	4.87	4.15	
5	1.50	4.35	4.19	
6	1.50	4.64	4.18	

该实验还具有以下优点:①电解电压较低,可用9 V电池或充电宝代替学生直流电源,便于学生在家庭条件下开展电解与燃料电池探究实验;②用废旧中性笔帽作为电极固定器,可避免电极触碰而发生短路,提高了实验成功率;③使用氯化钠溶液作为电解液,原料易得、使用安全,方便学生开展家庭实验;④蜂鸣器工作电压低、声响大,用其表征氢氯燃料电池能量转化效率,较发光二极管、电动机、小风扇等负载更具直观性和趣味性。

基金项目:甘肃省陇南市科技计划项目"锰改性市政污泥/核桃壳生物炭吸附Pb(Ⅱ)的效能和机理研究",编号:2024SZ19。

作者简介:燕翔(1969—),男,教授,研究方向:无机化学及实验教学与研究。E-mail:yanxiang0207@163.com。

参考文献

[1] 河北师范大学,辽宁师范大学,福建师范大学,等.无机化学上册[M].第2版.北京:高等教育出版社,2012.
[2] 邹定兵.绿色化多功能电化学实验装置的制作及应用[J].中学化学教学参考,2012(07):49-50.
[3] 耿亚萍.利用数字传感器探究燃料电池的制作[J].化学教与学,2021(05):80-83.
[4] 申勇,高洁.电解饱和食盐水实验装置的绿色化设计[J].实验教学与仪器,2022,39(03):53-54.
[5] 刘怀敏.电解饱和食盐水及氢氯燃料电池的创新设计[J].考试周刊,2019(10):163,192.
[6] 杨祖望,马淳安.氢氯燃料电池的研究[J].浙江工学院学报,1987(01):3-7.
[7] 戴乐.氢氧燃料电池演示仪的开发与使用[J].化学教学,2010(11):7-8.
[8] 肖芮,万莉,徐波,等.氢氧燃料电池实验的改进[J].化学教育(中英文),2019,40(21):74-76.