**3实验结果**

**3.1电化学阻抗谱（EIS）**

电化学阻抗谱（EIS 曲线）的高频截距反映的是电池的欧姆阻抗（RΩ），低频截距为电池总阻抗（RT），两者的差值为该电池的极化阻抗（RP）

本次实验分别在800℃、750℃、700℃三个温度下对LSM为氧气极电解质支撑性SOC、LSCF为氧气极电解质支撑性SOC以及LSM为氧气极燃料极支撑性SOC做了EIS测定，为方便叙述，下文将分别用Cell1、Cell2、Cell3来代替LSCF为氧气极电解质支撑性SOC、LSM为氧气极燃料极支撑性SOC和LSM为氧气极电解质支撑性SOC。

****

图3-1 Cell1在不同温度下的EIS曲线

如图3-1所示，在800℃、750℃、700℃三个不同的温度下，Cell1的阻抗谱图曲线对比。从图中可以很明显的发现，随着工作温度的不断升高，所测的EIS曲线逐渐左移，说明电池的欧姆阻抗和极化阻抗均出现了不断减小的情况。800℃时，Cell3电池的欧姆阻抗（RΩ）为4.29Ωcm2，总阻抗（RT）为16.50Ωcm2，极化阻抗（RP）为12.21Ωcm2；750℃时，电池的欧姆阻抗（RΩ）为8.30Ωcm2，总阻抗（RT）为40.29Ωcm2，极化阻抗（RP）为31.99Ωcm2；700℃时，电池的欧姆阻抗（RΩ）为12.37Ωcm2，总阻抗（RT）为73.80Ωcm2，极化阻抗（RP）为61.43Ωcm2；极化阻抗在800℃、750℃、700℃分别占总阻抗的74%、79.3%、83.2%。800℃时的电池阻抗相比与700℃时下降了77.3%，这是因为高温的情况下电解质的电导率和电极活性的增大增强造成的。随着工作温度的上升，EIS曲线的高频弧和低频弧均不断减小，但是高频弧的减小相比与低频弧更为明显。由于高频弧对应着的是电极电荷的传递过程，具有很高的活化能，所以对温度很敏感，低频弧是扩散弧，相交而言对温度没有那么敏感。

****

图3-2 Cell2在不同温度下的EIS曲线

如图3-2所示，在800℃、750℃、700℃三个不同的温度下，Cell2的阻抗谱图曲线对比。从图中可以很明显的发现，随着温度升高，所测的EIS曲线逐渐左移。800℃时，Cell2电池的欧姆阻抗（RΩ）为0.018Ωcm2，总阻抗（RT）为0.047Ωcm2，极化阻抗（RP）为0.029Ωcm2；750℃时，电池的欧姆阻抗（RΩ）为0.027Ωcm2，总阻抗（RT）为0.078Ωcm2，极化阻抗（RP）为0.051Ωcm2；700℃时，电池的欧姆阻抗（RΩ）为0.031Ωcm2，总阻抗（RT）为0.146Ωcm2，极化阻抗（RP）为0.115Ωcm2；极化阻抗在800℃、750℃、700℃分别占总阻抗的74%、79.3%、83.2%。

****

图3-3 Cell3在不同温度下的EIS曲线

如图3-3所示，在800℃、750℃、700℃三个不同的温度下，Cell3的阻抗谱图曲线对比。从图中可以很明显的发现，随着温度升高，所测的EIS曲线逐渐左移。800℃时，Cell3电池的欧姆阻抗（RΩ）为5.78Ωcm2，总阻抗（RT）为11.6Ωcm2，极化阻抗（RP）为5.87Ωcm2；750℃时，电池的欧姆阻抗（RΩ）为8.81Ωcm2，总阻抗（RT）为18.89Ωcm2，极化阻抗（RP）为10.08Ωcm2；700℃时，电池的欧姆阻抗（RΩ）为14.03Ωcm2，总阻抗（RT）为30.27Ωcm2，极化阻抗（RP）为16.24Ωcm2；Cell3的EIS曲线在三个不同的温度下均出现明显的压扁的圆弧形状，这表明了这电极反应中至少包括了两个电化学的步骤。

****

图3-4 700℃Cell1、Cell2、Cell3的EIS曲线

****

图3-5 750℃Cell1、Cell2、Cell3的EIS曲线

****

图3-6 800℃Cell1、Cell2、Cell3的EIS曲线

图3-4、图3-5、图3-6分别所示为700℃、750℃、700℃下三种电池Cell1、Cell2、Cell3的EIS曲线对比。Cell2是电极支撑性电池所以相比于电解质支撑性电池而言阻抗相当小，所以在图中汇聚为接近于原点的点了。Cell1电池和Cell3电池相比，Cell1电池和Cell3电池的欧姆电阻相近，欧姆阻抗主要有电解质层决定，所以两者的欧姆电阻较为接近。由于Cell1电池和Cell3的氧气极材料不同，所以在极化阻抗上有很大的差别，以LSM为氧气极的Cell3电池的极化阻抗远小于以LSCF为氧气极的Cell1电池的极化阻抗。随着温度上升，Cell1的极化阻抗比Cell3的极化阻抗下降快很多。

**3.2 SOFC模式下的I-V曲线**



图3-7 Cell1在不同温度下的SOFC模式的IV曲线

图3-7所示为SOFC模式下的Cell1在不同温度下的IV曲线，三组曲线的电池开路电压（Open Circuit Voltage，OCV）约在1.1左右，符合理论值，说明电解质致密性较为良好。由于该电池是电解质支撑性的电池，所以电解质层很厚，总电阻很大，导致电流密度很小。



图3-8 Cell2在不同温度下的SOFC模式的IV曲线



图3-9 打磨掉氧气极的Cell2

图3-8所示为SOFC模式下的Cell2在不同的温度下的IV曲线，800℃、750℃、700℃下三组IV曲线的电池开路电压（OCV）分别为0.889V、0.757、0.692，已经偏离了理论值，怀疑由于燃料极支撑性电池的电解质层太薄可能出现电解质不密封导致的。在该组实验结束后，取下电池，将电池的氧气极打磨掉，如图3-9所示。观察电解质层表面出现一个细小漏洞如图中红圈所示，并用红墨水滴在燃料极上，观察到在漏洞中有红墨水渗透进。该电池为燃料极支撑性电池，极薄的电解质层使得电池的总电阻非常小，使得电流密度相对于电解质支撑性的电池（Cell1、Cell3）大很多。



图3-10 Cell3在不同温度下的SOFC模式的IV曲线

如图3-9所示，Cell3在不同温度下的SOFC模式的IV曲线，电压随电流增大而降低，且曲线近乎呈现出直线，三个温度下的开路电压都在1.05V左右，符合理论值，表明该电池的电解质层很致密。但是因为电解质层的厚度太厚，总阻抗非常大，导致和Cell1一样出现电流密度非常小的情况。

**3.3 SOFC模式下I-P曲线**



图3-11 Cell1在不同温度下的SOFC模式的I-P曲线



图3-12 Cell2在不同温度下的SOFC模式的I-P曲线



图3-13 Cell3在不同温度下的SOFC模式的I-P曲线

Cell1、Cell2、Cell3代表的LSCF为氧气极电解质支撑性SOC、LSM为氧气极燃料极支撑性SOC和LSM为氧气极电解质支撑性SOC在不同温度下的I-P曲线如图3-11、图3-12、图3-13所示。从电池的三组不同温度的I-P曲线来看，随着温度的升高，功率的最大值会越大，并且最大功率所在的电流密度的值也会相应地增加，三组电池在800℃时，电功率为最大。在800℃时，Cell1在电流密度为4.45mA·cm-2时得到最大功率2.23mW·cm-2，Cell2在电流密度为43.4mA·cm-2时得到最大功率20.9mW·cm-2，Cell3在电流密度为3.17mA·cm-2时得到最大功率1.57mW·cm-2，Cell1、Cell3均是电解质支撑性电池，电阻大，在SOFC放出小电流密度的情况下就达到了最大功率，而Cell2的电阻小，所以测得的功率最大值要远大于Cell1和Cell3电池的最大功率。

**3.4 SOEC模式下的I-V曲线**

SOEC模式是SOFC模式的逆向模式，两个模式下的I-V曲线图呈现出一定的对称性。SOFC模式下电流为正值而在SOEC模式下电流为负值，为了便于作图比较，在SOEC的IV曲线中，将负值的电流转为正值电流来作图（下同）。测试时燃料极电极为H2（35sccm）+N2（20sccm）+CO2（60sccm）+3vol.%水蒸气，氧气极连接空气。

对于SOEC模式下电解CO2生成CO的速率可以通过法拉第公式定量计算得到，计算的公式如下：



图3-14 Cell1在不同温度下的SOEC模式的IV曲线

图3-14所示为Cell1在SOEC模式下不同温度下的IV曲线，在相同的外加电压下，随着温度升高，电流密度增大。在1.3V的电压下800℃时电流密度为1.78mA·cm-2，750℃时电流密度为0.82mA·cm-2，700℃时电流密度为0.49mA·cm-2，分别对应的CO生成速率为0.744、0.342和0.204。



图3-15 Cell2在不同温度下的SOFC模式的IV曲线

图3-15所示为Cell2在SOEC模式下不同温度下的IV曲线，在相同的外加电压下，随着温度升高，电流密度增大。在1.3V的电压下800℃时电流密度为114.2mA·cm-2，750℃时电流密度为79.1mA·cm-2，700℃时电流密度为71.4mA·cm-2，分别对应的CO生成速率为47.74、33.06和29.85。



图3-16 Cell3在不同温度下的SOEC模式的IV曲线

图3-16所示为Cell3在SOEC模式下不同温度下的IV曲线，在相同的外加电压下，随着温度升高，电流密度增大。在1.3V的电压下800℃时电流密度为1.82mA·cm-2，750℃时电流密度为1.09mA·cm-2，700℃时电流密度为0.56mA·cm-2，分别对应的CO生成速率为0.761、0.456和0.234。

三组电池在相同的外加电压下，随着工作温度的不断升高，电流密度也不断增大，与之相对应的CO速率也不断的增大。三组电池的在相同的电解温度时的电解IV曲线对比，Cell2电池由于电解质层很薄所以在外加电压为1.3V时，电流密度最大，CO的生成速率也最大。Cell1和Cell3同为电解质支撑性电池，所以电流密度相较于Cell2小了很多，所以CO的生成速率也小很多。Cell1的氧气极材料是LSCF，Cell3的氧气极材料是LSM， EIS曲线中LSCF的极化阻抗相比与LSM的极化阻抗要大一些，所以Cell1在同等的电解温度下电流密度会比Cell3小一些，CO的生成速率也小一些。