第 49 卷第 3 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 3
2021 年 3 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　March，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200423

平板式固体氧化物燃料电池的热机械行为

宋　明[1]，王文慧[1]，杜传胜[2]，王炳英[2]，蒋文春[3]

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院，山东 青岛 266580；2. 中国石油大学(华东)材料科学与工程学院，山东 青岛 266580；3. 中国石油大学(华东)新能源学院，山东 青岛 266580)

摘　要：基于 COMSOL Multiphysics 仿真平台建立了多物理场耦合作用下的平板式固体氧化物燃料单电池模型，考虑多种温度相关的材料物理化学性质，研究了残余应力以及阳极材料中镍体积分数对电池内部热应力的影响。结果表明：残余应力的存在增大了电池关键构件电解质和阴极电极工作状态下的最大拉伸和压缩应力，减小了阳极电极的最大拉伸应力而增大了其最大压缩应力；阳极镍体积分数的增大会使电池各构件的最大拉伸应力呈现先减小后增大的趋势，阳极镍体积分数的最佳百分比为 40%~60%。

关键词：固体氧化物燃料电池；热应力；残余应力；温度相关性；阳极材料
中图分类号：TM911.42　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)03–0476–07
网络出版时间：2021–01–21

Thermomechanical Behavior of Planar Solid Oxide Fuel Cell

SONG Ming[1], *WANG Wenhui*[1], *DU Chuansheng*[2], *WANG Bingying*[2], *JIANG Wenchun*[3]

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China; 2. College of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China; 3. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China)

Abstract: A single planar solid oxide fuel cell model considering various temperature-dependent physical and chemical properties of the materials was proposed *via* multi-physics coupling based on the COMSOL multiphysics simulation platform. The effects of residual stress and nickel volume fraction in the anode material on the internal thermal stress of the fuel cell were investigated. The results show that the existence of residual stress increases the maximum tensile and compressive stresses of the electrolyte and the cathode electrode under working conditions, reduces the maximum tensile stress of the anode electrode and increases its maximum compressive stress. The increase in the volume fraction of nickel in the anode electrode firstly decreases and then increases the maximum tensile stress of each component of the SOFC. The optimal percentage of nickel volume fraction in the anode electrode is 40%–60%.

Keywords: solid oxide fuel cell; thermal stress; residual stress; temperature dependence; anode material

固体氧化物燃料电池(Solid oxide fuel cell，SOFC)作为新一代的燃料电池，具有燃料种类使用灵活，不需要昂贵的催化剂，能量利用效率高等优点，在各种燃料电池中脱颖而出，成为代替化石能源的最佳选择[1]。SOFC 的工作温度一般为 800~1 100 ℃，其关键构件和密封材料长时间在高温下工作，受电池温度、电化学反应、物质浓度、结构力学、流体流动等多方面因素共同作用与影响。SOFC 启停和工作时，不均匀的温度场分布会使电池内部产生较大热应力，可能造成电池关键构件发生变形，甚至失效，严重影响电池使用寿命。因此，研究固体氧化物燃料电池的热力学性能具有重要意义。

收稿日期：2020–06–11。　修订日期：2020–07–10。
基金项目：国家自然科学基金(51805543)；山东省自然科学基金(ZR2017BEE037)；山东省自然科学基金(ZR2019MEE108)；中央高校基本科研业务费专项资金(18CX05002A)。
第一作者：宋　明(1984—)，男，博士，讲师。

Received date: 2020–06–11.　**Revised date:** 2020–07–10.
First author: SONG Ming (1984–), male, Ph.D., Lecturer.
E-mail: songmingx@gmail.com

SOFC 热应力的实验研究可采用 X 射线断层扫描分析[2–3]，但实验方法有很大的局限性，相反数值模拟具有省时、经济、可视化等优点[4]，因此仿真模拟常常用来研究 SOFC 内部热应力分布。Weil 等[5]和 Jiang 等[6]采用 ANSYS 软件对 SOFC 建模并进行了电池密封下的热应力分析。Jiang 等[6]也利用有限元思想，研究了单电池中的热应力，结果表明均匀温度场会使 SOFC 热应力比真实热应力低估 46%。Andersson 等[7]使用 COMSOL 软件对 SOFC 建模分析，考虑了热量、质量、动量及电荷的传递和动力学控制方程的耦合。樊鹏飞等[8]使用 Abaqus 软件建立了三维 SOFC 热应力模型并进行了热应力的数值计算和分析。孔令周等[9]使用 Fluent 和 Abaqus 联合建立了热流动和电化学反应多场耦合作用下的 SOFC 三维模型，分析了加热、工作和冷却过程中的温度分布和热应力分布。

目前，SOFC 热应力研究主要集中于分析工作状态下的热应力分布。而 SOFC 从原材料、电池构件制备、装配到稳定工作运行，要经过 20、1 400、800 ℃的温度变化，即原材料温度为常温 20 ℃，在 1 400 ℃制成电池构件且烧结成型，进而冷却至常温 20 ℃进行装配，最后升温至 800 ℃运行工作。在研究电池工作状态热应力分布时，电池的制备温度 1 400 ℃作为无应力参考温度已被广泛接受[10]。众多学者在计算电池工作状态下的热应力时，直接求解了工作温度相对烧结温度产生的热应力[11–12]，在其分析过程中并没有考虑残余应力的影响。然而，电池在制备结束后，冷却至室温的过程中不可避免的会产生残余应力，随后从室温再次加热至工作温度。此过程中，很有必要在考虑残余应力的基础上对电池内部的热应力进行准确计算。考虑残余应力的存在，对电池进行高温热应力建模分析，会更为真实的反映电池内部热应力分布。由于电池材料在不同温度下的多种化学和物理属性不同，即电池的关键构件具有温度相关性[13–14]，这可能会使 SOFC 热应力分布的求解结果产生差异。另外，阳极材料中的镍(Ni)体积分数及其氧化还原过程会影响阳极材料的弹性模量、热膨胀系数和密度[15]，皆会使电池残余应力及热应力发生变化，从而对 SOFC 的热应力分布产生影响。

因此，基于上述分析，借助 COMSOL Multiphysics 软件建立电化学–物质传递–流体流动–温度–结构力学多场耦合作用下考虑材料性能温度相关性的平板式固体氧化物燃料单电池热力学数值模型，研究残余应力和阳极材料的 Ni 体积分数对电池热应力的影响并找到 Ni 体积分数的最优值。

1　多物理场耦合有限元建模

1.1　几何模型

固体氧化物燃料电池有平板式、锥管式和瓦楞式，以平板式 SOFC 为研究对象。为加快模型计算时间，提高求解效率，仅取 SOFC 的周期性单元即单电池进行研究。图 1 为单个平板式固体氧化物燃料电池几何构成示意，其主要由金属双极板、燃料通道、阳极多孔电极、电解质、阴极多孔电极和空气通道组成。燃料气(如氢气)从阳极通入，氧化剂(如空气)从阴极通入，且燃料和空气的流动方向采用逆流配置。模型使用商业软件 COMSOL Multiphysics 建立：定义 x 为电池宽度方向；y 为电池厚度方向；z 为电池长度方向且 z 向视图以 0.1 的比例显示。其中，SOFC 几何模型参数[16]见表 1。

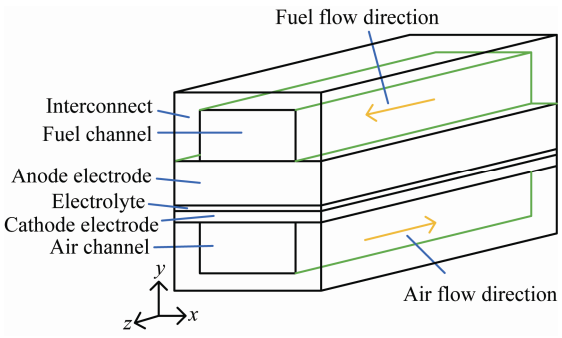


图 1　平板式 SOFC 单电池几何模型

Fig. 1　Geometric model of single planar SOFC

表 1　几何模型参数

Table 1　Parameters of geometric model

Parameter	Value/mm	Description
L	100.00	Length of the SOFC model
W	2.50	Width of the SOFC model
H	3.15	Thickness of the SOFC model
ha	0.55	Thickness of anode electrode
hc	0.05	Thickness of cathode electrode
he	0.01	Thickness of electrolyte
hch	1.00	Thickness of gas channel
wch	2.00	Width of gas channel

1.2　材料属性

固体氧化物燃料电池分别使用氧化钇稳定的氧化锆(YSZ)和锶掺杂锰酸镧(LSM)作为电解质材料和阴极电极材料，且 SOFC 各构件均采用线弹性材料模型，材料的多种化学和物理性能具有温度相关

性，即电池材料性能随电池温度 T 发生变化。电池材料的具体性能弹性模量 E、Poisson's 比 μ、热膨胀系数 α 及密度 ρ 如表 2 所示[15]。

表 2 电池材料属性

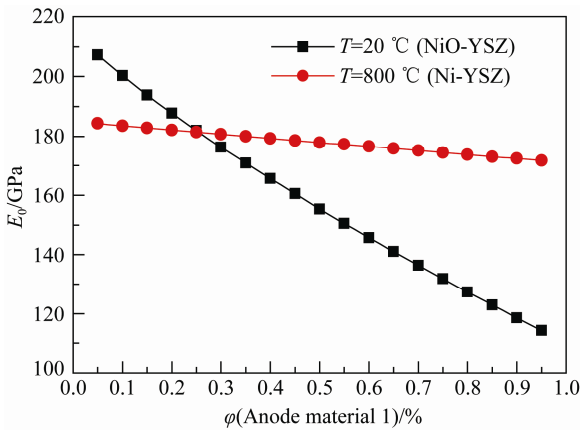
Table 2 Material properties of SOFC

Materials	T/℃	E/GPa	μ/%	$\alpha\times10^6/k^{-1}$	ρ/(kg·m^{-3})
YSZ	20	215	30.8	7.6	6 040
YSZ	800	185	31.3	10.5	
LSM	20	110	36.0	9.8	6 570
LSM	800	118	36.0	11.8	6 570
NiO	20	110	34.0	13.0	6 670
Ni	800	171	31.3	16.9	8 900

E—Elastic modulus; μ—Poisson ratio.

阳极电极采用由 Ni 和 YSZ 按照一定体积分数混合而成的材料，并假设其为连续均匀的多孔介质。由于经历烧结后，阳极电极的 Ni 将被氧化为 NiO，直至工作状态下，NiO 将进一步还原成 Ni，并假设完全还原且忽略体积收缩。因此 20 ℃下的阳极材料属性由 NiO 和 YSZ 的属性共同决定，而 800 ℃的阳极材料属性由 Ni 和 YSZ 的属性共同决定。Chin-Lung Hsieh 模型[17]可以预测两相复合材料的弹性常数和热膨胀系数，给出其上下限，与其他模型相比，Chin-Lung Hsieh 模型可以涵盖大部分实验数据，改进了对实验数据的预测。

本工作阳极电极的混合材料属性可根据 Chin-Lung Hsieh 模型计算上下限，并假设所得上下限的平均值作为阳极材料属性的值[15]。得到不同 NiO 或 Ni 体积分数下阳极材料的弹性模量 E_0 和热膨胀系数 α_0 变化曲线如图 2 和图 3 所示。忽略阳极



φ—Volume fraction.

图 2 阳极材料弹性模量随 Ni/NiO 体积分数变化曲线

Fig. 2 Elastic moduli of anode material 1 *versus* volume fraction of Ni/NiO

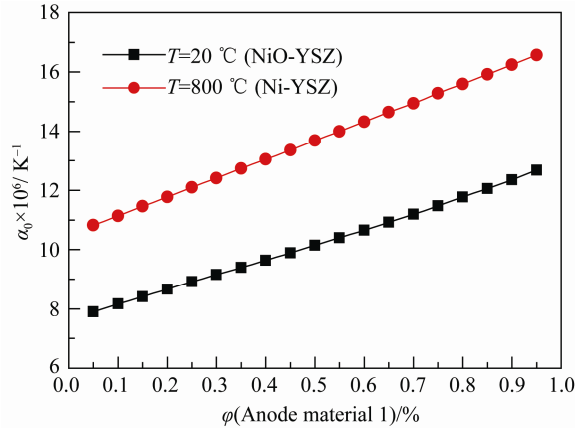


图 3 阳极材料热膨胀系数随 Ni/NiO 体积分数变化曲线

Fig. 3 Thermal expansion coefficient of anode material 1 *versus* volume fraction of Ni/NiO

材料 Poisson's 比 μ_0 随 NiO 和 Ni 体积分数的变化，20 ℃下阳极 Poisson's 比为 0.322，800 ℃阳极 Poisson's 比为 0.314。

多孔阳极电极的密度 ρ_0 由下式计算：

$$\rho_0=(\rho_1\varphi_1+\rho_2\varphi_2)\cdot(1-\varepsilon_{por}) \quad (1)$$

其中：ρ_1 和 ρ_2 为阳极材料 1 (NiO 或 Ni)和材料 2 (YSZ)的密度；φ_1 和 φ_2 分别为两种材料的体积分数；ε_{por} 表示孔隙率。得到阳极电极密度在不同温度下随 NiO 和 Ni 体积分数变化的曲线如图 4 所示。

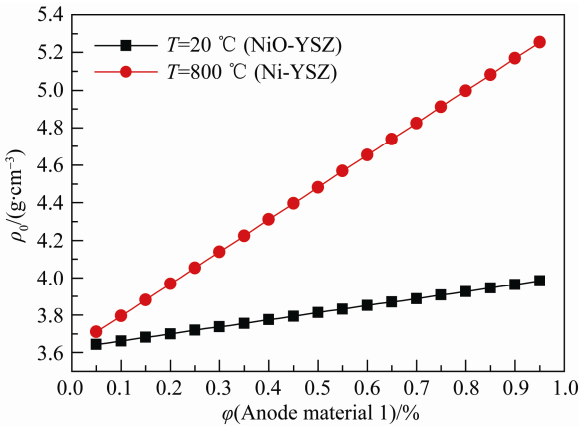


图 4 阳极材料密度随 Ni/NiO 体积分数变化曲线

Fig. 4 Density of anode material 1 *versus* volume fraction of Ni/NiO

1.3 边界条件

为使工作条件下的 SOFC 温度场更加符合实际工况，必须选择适当的边界条件。在研究中，电池的工作电压设为 0.7 V。气体入口假设为层流并指定平均速度；气体出口设压力边界，指定为 1 个大气压，且抑制回流。另外，将燃料通道入口处气体定

义为氢气(40%，质量分数)和水蒸气(60%，质量分数)，而空气通道入口处气体为氧气(15%，质量分数)、水蒸气(37%，质量分数)和氮气(48%，质量分数)。气体入口温度设置为 800 ℃。固体力学边界条件设为自由边界，即假设电池没有施加机械负载，电池各构件可以自由变形。另外，使用“刚体运动抑制”条件对 SOFC 结构进行位移约束，即假设模型没有刚体位移，不能自由移动或旋转；COMSOL 自带的“自动刚体运动抑制”边界条件，是无数个手动约束自由度的情况之一，不同自由度约束条件求解结果的刚体运动的位移可能不同，但应变和应力是相同的。

2　结果与讨论

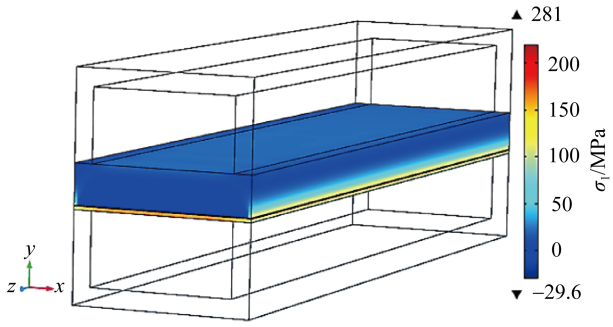
2.1　电池热应力分布

燃料电池的热应力大小一般使用第 1 主应力描述[10–11]。虽然 von Mises 应力考虑了可以显示应力分布的第 1、第 2 和第 3 主应力，但是它更适合于塑料材料的分析，而对于研究 SOFC 中的热应力，主应力分布更适合。由于主应力有助于理解材料中引起的拉伸和压缩应力，故采用主应力分布对 SOFC 内部热应力进行分析。图 5 和图 6 分别为考虑残余应力求解的 SOFC 在工作状态下阳极材料的 Ni 体积分数为 50%时的电池第 1 主应力和第 3 主应力分布。

由图 5a 可知，SOFC 整体的第 1 主应力范围为 –29.6~281.0 MPa，在空气入口侧附近应力较大，这是因为在此处空气入口温度相对较低，而经过剧烈电化学反应到达燃料出口处的燃料气体温度较高，在温差的作用下电池构件进行热传导，从而产生非常大的温度梯度。而在电池其他位置，温度梯度相对较小，电池各构件热应力的差异则主要由热膨胀系数的差异造成。如图 5b 所示，在电池端面，阳极电极、电解质和阴极电极产生的热应力分布不同。阴极电极在电池端面承受较大的第 1 主应力，而电解质和阳极电极的第 1 主应力相对阴极电极小很多。

由图 6a 可知，SOFC 整体的第 3 主应力范围为 –449.0~24.2 MPa，且电池的第 3 主应力分布相对均匀。由图 6b 可以明显看出，电解质的第 3 主应力最小。阳极电极在与电解质接触表面承受较小的第 3 主应力，且随着与电解质的距离变大而逐渐增大。

综上分析，SOFC 在工作状态下阳极电极和阴极电极主要承受较大的拉伸应力，而电解质则承受较大的压缩应力。



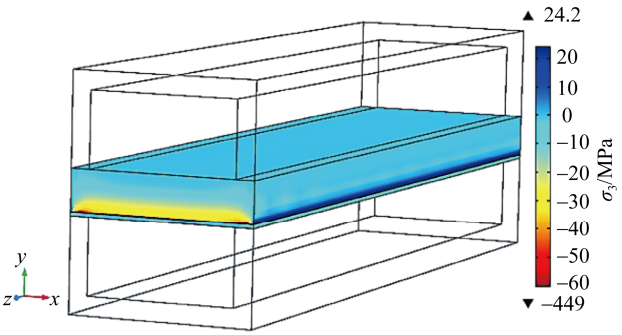
(a) Overall cell



(b) Cell end face

图 5　电池第 1 主应力分布

Fig. 5　First principal stress distribution of the SOFC



(a) Overall cell



(b) Cell end face

图 6　电池第 3 主应力分布

Fig. 6　Third principal stress distribution of the SOFC

2.2　残余应力对 SOFC 热应力计算结果比较

不考虑残余应力时直接求解 SOFC 工作状态温度相对于烧结温度产生的热应力，而考虑残余应力则首先考虑由烧结温度降至室温时产生的残余应力，进而升温至工作状态温度时在电池构件中产生的热应力。基本原理如下：

$$\sigma=\sigma_0+C[E,v]:\varepsilon_{el} \quad (2)$$

式中：σ 为总应力；σ_0 为预应力；C 为刚度矩阵，与弹性模型 E 及 Poisson's 比 μ 有关；ε_{el} 为弹性应变，由式(3)确定：

$$\varepsilon_{el}=\varepsilon-\varepsilon_0-\varepsilon_{th} \quad (3)$$

式中：ε 为总应变；ε_0 为预应变；ε_{th} 为热应变。热应变由热膨胀系数和温度共同决定：

$$\varepsilon_{th}=\alpha(T-T_{ref}) \quad (4)$$

式中：α 为热膨胀系数；T 为电池温度；T_{ref} 为无应力参考温度。

残余应力的计算过程中，T_{ref}=1 400 ℃，T=20 ℃，且 ε_0=0，材料属性 E、v、α 均为 20 ℃下对应的值；电池由室温进入工作状态需升温至 T=800 ℃，此过程计算时，残余应力和残余应变作为预应力 σ_0 和预应变 ε_0，将室温 20 ℃作为参考温度，且材料属性 E、v、α 采用 80 ℃下对应的值，从而得到 SOFC 考虑残余应力时在工作状态下产生的热应力。

在此节通过比较是否考虑残余应力计算 SOFC 热应力的求解结果，讨论残余应力对 SOFC 工作热应力的影响。工作状态下阳极电极材料 Ni 的体积分数为 50%时，考虑残余应力与不考虑残余应力时电池内部热应力的求解结果如图 7 所示。

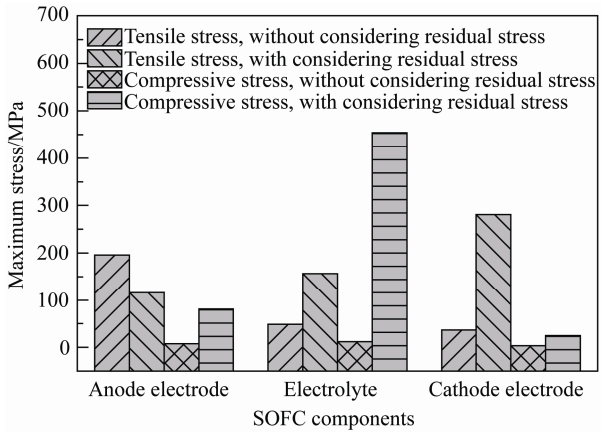


图 7 残余应力对 SOFC 热应力的影响

Fig. 7 Effects of residual stresses on the thermal stresses of the SOFC

由图 7 可知，不考虑残余应力时阳极电极的最大拉伸应力为 196.0 MPa，考虑残余应力时结果为 116.0 MPa，考虑残余应力结果比不考虑残余应力结果减小了约 0.4 倍。电解质的最大拉伸应力的不考虑残余应力时的结果为 48.9 MPa，考虑残余应力时结果为 157.0 MPa，考虑残余应力结果比不考虑残余应力结果增大了约 2.2 倍；不考虑残余应力时阴极电极的最大拉伸应力为 36.7 MPa，考虑残余应力时结果为 281.0 MPa，考虑残余应力结果比不考虑残余应力结果增大了约 6.7 倍。因此，不考虑残余应力求解的电解质和阴极电极的最大拉伸应力均比考虑残余应力求解的结果小，而阳极电极的最大拉伸应力不考虑残余应力比考虑残余应力的结果要大。

不考虑残余应力时阳极电极、电解质和阴极电极的最大压缩应力分别为 7.7、12.5 和 3.81 MPa，而考虑残余应力时阳极电极、电解质和阴极电极的最大压缩应力分别为 80.6、454.0 和 25.2 MPa，分别增大了约 9.4、35.3 和 5.6 倍。可见，残余应力增大了电池各构件的最大压缩应力，尤其是电解质的最大压缩应力。

从图 7 还可以看出，考虑残余应力时，阳极电极和阴极电极的最大拉伸应力均比最大压缩应力大，而电解质的最大拉伸应力比最大压缩应力小。因此，阳极电极和阴极电极的破坏主要考虑拉伸应力，而电解质的破坏主要考虑压缩应力。

不考虑残余应力求解与考虑残余应力求解的 SOFC 热应力结果虽规律相似，但具有较大的差异，考虑残余应力的存在增大了电池关键构件电解质和阴极电极在工作状态下的最大拉伸应力和最大压缩应力，减小阳极电极的最大拉伸应力并增大其最大压缩应力。考虑残余应力对电池进行高温热应力建模分析，会更为真实的反映电池内部热应力分布。

2.3 阳极 Ni 体积分数对 SOFC 热应力的影响

电池的残余应力及热应力与电池材料属性密切相关。阳极电极材料为 Ni 和 YSZ 的混合材料，其中 Ni 的体积分数会同时影响阳极电极的弹性模量、热膨胀系数和密度，从而影响电池残余应力及热应力的大小[15]。图 8 和图 9 分别为考虑残余应力的 SOFC 各构件在工作状态下的最大拉伸应力和最大压缩应力随阳极材料 Ni 体积分数的变化曲线。

由图 8 可知，阳极电极的最大拉伸应力在阳极 Ni 体积分数为 60%之前逐渐减小，在阳极 Ni 体积分数大于 60%时不断增大。另外，电解质和阴极电极的最大拉伸应力随阳极 Ni 体积分数的增加先不断减小后缓慢增大，具有相似的变化规律。但电解质和阴极电极的最大拉伸应力的极小值位于阳极 Ni 体积分数为 40%~60%处。因此，电池各构件的最大拉伸在阳极 Ni 体积分数的不同值处取得极小值。基于综合减小电池工作热应力的原因，即电池整体的最大拉伸应力尽量减小且电池各构件受力相对均匀，阳极材料的 Ni 体积分数的最佳百分比应为

40%~60%，此时，电池的最大拉伸应力位于阴极电极内。

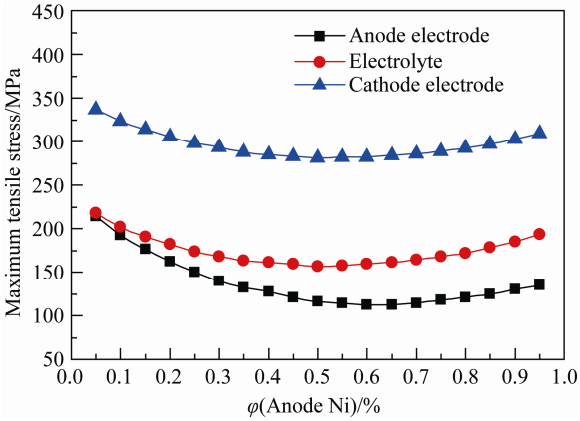


图 8　电池最大拉伸应力随阳极 Ni 体积分数变化

Fig. 8　Maximum tensile stress of the SOFC *versus* the volume fraction of Ni in the anode

由图 9 可知，阳极电极的最大压缩应力随阳极 Ni 体积分数的增大不断减小，而电解质的最大压缩应力随阳极 Ni 体积分数的增大而增大，且其最大压缩应力比阳极电极和阴极电极高很多。从减小电池热应力的角度，应尽量减小阳极材料的 Ni 体积分数。由于电解质材料的抗压强度远大于抗拉强度，可以承受较大的压缩应力，因此，阳极 Ni 体积分数的最优值应主要考虑对 SOFC 最大拉伸应力的影响。

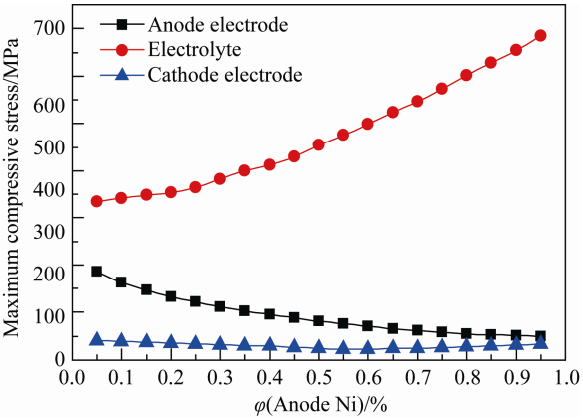


图 9　电池最大压缩应力随阳极 Ni 体积分数变化曲线

Fig. 9　Maximum compressive stress of the SOFC *versus* the volume fraction of Ni in the anode

3　结论

1) 电池在工作状态下阳极电极和阴极电极主要承受较大的拉伸应力，电解质则承受较大的压缩应力。

2) 是否考虑残余应力求解 SOFC 的热应力结果具有较大的差异，残余应力的存在会增大电池关键构件电解质和阴极电极在工作状态下的最大拉伸应力和最大压缩应力，减小阳极电极的最大拉伸应力并增大其最大压缩应力，且考虑残余应力对电池进行高温热应力建模分析，会更为真实的反映电池内部热应力分布。

3) 阳极电极材料 Ni 的体积分数会同时影响电池的残余应力及热应力。电池各构件的最大拉伸应力随阳极 Ni 体积分数的增大先逐渐减小后不断增加，基于尽量减小电池的热应力的原因，阳极材料 Ni 体积分数的最佳百分比为 40%~60%。

4) 电解质的最大压缩应力比阳极电极和阴极电极高很多且随阳极 Ni 体积分数的增大而增大。但由于电解质材料为抗压材料，可以承受较大的压缩应力，因此，阳极 Ni 体积分数的最优值应主要考虑对最大拉伸应力的影响。

参考文献:

[1] BABAK G, KRISHNA V. A review study on software-based modeling of hydrogen-fueled solid oxide fuel cells[J]. Int J Hydrogen Energy, 2019, 44(26): 13700–13727.

[2] MALZBENDER J, STENINBRECH R W. Advanced measurement techniques to characterize thermo-mechanical aspects of solid oxide fuel cells[J]. J Power Sources, 2007, 173(1): 60–67.

[3] YAKABE H, BABA Y, SAKURAI T, et al. Evaluation of the residual stress for anode-supported SOFCs[J]. J Power Sources, 2003, 135(1): 9–16.

[4] JIANG C Y, GU Y C, GUANG W B, et al. 3D thermo–electro–chemo–mechanical coupled modeling of solid oxide fuel cell with double-sided cathodes[J]. Int J Hydrogen Energy, 2020, 45(1): 904–915.

[5] WEIL K S, KOEPPEL B J. Thermal stress analysis of the planar SOFC bonded compliant seal design[J]. Int J Hydrogen Energy, 2007, 33(14): 3976–3990.

[6] JIANG T L, CHEN M H. Thermal-stress analyses of an operating planar solid oxide fuel cell with the bonded compliant seal design[J]. 2009, 34(19): 8223–8234.

[7] ANDERSSON M, YUAN J L, SUNDEN B. SOFC modeling considering electrochemical reactions at the active three phase boundaries[J]. Int J Heat Mass Transf, 2011, 55(4): 773–788.

[8] 樊鹏飞, 张兄文, 李国君, 等. 板式固体氧化物燃料电池的热应力分析[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(7): 75–81.
FAN Pengfei, ZHANG Xiongwen, LI Guojun, et al. J Xi'an Jiaotong Univ (in Chinese), 2012, 46(7): 75–81.

[9] 孔令周. 多场耦合下平板式固体氧化物燃料电池热应力与失效概率计算[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
KONG Lingzhou. The Computation of Thermal Stress and Failure Probability in Planar Solid Oxide Fuel Cell within Multi-field Coupling (in Chinese, dissertation). Qingdao: China University of Petroleum, 2017.

[10] XU Ming, LI Tingshuai, YANG Ming, et al. Modeling of an anode supported solid oxide fuel cell focusing on thermal stresses[J]. Inter J

Hydrog Energy, 2016, 41(33): 14927–14940.

[11] FAN Pengfei, LI Guojun, ZENG Yikai, et al. Numerical study on thermal stresses of a planar solid oxide fuel cell[J]. Int J Therm Sci, 2014, 77: 1–10.

[12] XU Ming, LI Tingshuai, YANG Ming, et al. Solid oxide fuel cell interconnect design optimization considering the thermal stresses[J]. Sci Bull, 2016, 61(17): 1333–1344.

[13] NAKAJO A, WUILLEMIN Z, VAN HERLE J, et al. Simulation of thermal stresses in anode-supported solid oxide fuel cell stacks. Part II: Loss of gas-tightness, electrical contact and thermal buckling[J]. J Power Sources, 2008, 193(1): 216–226.

[14] CLAGUE R, MARQUIS A J, BRANDON N P. Finite element and analytical stress analysis of a solid oxide fuel cell[J]. J Power Sources, 2012, 210: 224–232.

[15] 谢佳苗, 王峰会. 基于热应力分析的固体氧化物燃料电池阳极功能层优化设计[J]. 无机材料学报, 2017, 32(4): 400–406.
XIE Jiamiao, WANG Fenghui. J Inorg Mater (in Chinese). 2017, 32(4): 400–406.

[16] NERAT M, JURICIC D. A comprehensive 3-D modeling of a single planar solid oxide fuel cell[J]. Int J Hydrogen Energy, 2016, 41(5): 3613–3627.

[17] HSIEH C L, TUAN W H. Elastic and thermal expansion behavior of two-phase composites[J]. Mater Sciamp; Eng A, 2006, 425(1): 349–360.