

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

谢佳苗, 王峰会

(西北工业大学 工程力学系, 西安 710129)

摘 要: 为了降低固体氧化物燃料电池在制备和工作过程中产生的热应力, 提高电池的电化学性能, 在电池中引入功能梯度层可以有效减小电池各层之间材料参数的差异, 从而缓解各层之间的热失配应力。本研究将阳极功能层引入燃料电池中, 通过阳极功能层子层数目和非线性梯度成分指数 n 控制各子层材料属性的变化情况, 研究了燃料电池在 800℃ 下的热应力分布。结果表明: 选取适当的指数 n 和阳极功能层的分层数目可以明显降低阳极层的最大拉应力和电解质层的最大压应力。

关 键 词: 固体氧化物燃料电池; 分层法; 阳极功能层; 热应力

中图分类号: TM911 文献标识码: A

Thermal Stress Analysis of Solid Oxide Fuel Cell with Anode Functional Layer

XIE Jia-Miao, WANG Feng-Hui

(Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: In order to reduce the thermal stress of solid oxide fuel cell in the process of preparation and working, and improve the electrochemical performance of the cell, the functionally graded layer is introduced into the cell. Due to the property of the functionally gradient material changes continuously or stepwise in a certain direction, the layer can reduce the difference of material parameters and relieve the thermal mismatch stress between layers effectively. On the basis of the previous research and the idea of hierarchical method, the anode functional layer is introduced into the solid oxide fuel cell, and the material parameters of the sub-layers are controlled through the anode functional layer number and the nonlinear gradient component exponent n . Thermal stress of the solid oxide fuel cell is studied at 800℃ within the operating temperature. The results show that the maximum tensile stress of the anode layer and the maximum compressive stress of the electrolyte layer decreases by introducing the anode functional layer. With the same anode functional layer number, the maximum tensile stress increases with the exponent n , and the maximum compressive stress of the electrolyte layer decreases with the exponent n increase. The thermal stress may lead to cracks and destroy the solid oxide fuel cell structure. This research provides theoretical basis for design and optimization of the solid oxide fuel cell.

Key words: solid oxide fuel cell; hierarchical method; anode functional layer; thermal stress

固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, 简记为 SOFC)是一种在高温条件下可以将氢能等化学能

直接转化成电能的电化学装置。SOFC 的制备温度在 1400℃ 左右, 当其从制备温度降到室温(20℃)时,

电池内部会产生残余应力 $\sigma_{1400^{\circ}\text{C}-20^{\circ}\text{C}}$ 。SOFC的工作温度在 800°C 左右,由于电池的阴极、阳极与电解质之间的热膨胀系数不同,在其工作过程中,即从室温到工作温度的反复循环过程中会在电池内部产生热失配应力 $\sigma_{20^{\circ}\text{C}-800^{\circ}\text{C}}$ 。过高的残余应力和热失配应力容易导致电池脱层或在薄弱部位产生裂纹,在升降温循环操作后产生破坏^[1-6],因此通过对电池的结构进行优化设计来降低电池的热应力具有重要意义。

为了降低电池的热应力水平,提高电池的电化学性能,研究人员在SOFC中引入功能梯度层。由于功能梯度材料的材料属性在某个方向上呈连续或阶梯变化^[7],在SOFC中引入功能梯度层能够缓解各层之间的热失配应力,提高电池的电化学性能^[8-10]。Jiang等^[11]和Mccoppin等^[12]将SOFC的电极层制备成连续梯度层,实验结果表明,与普通电极层相比,连续梯度电极层的极化电阻更小,电池的功率密度更高。但是,连续梯度层的材料属性分布的复杂性,且其制备工艺比较复杂,有必要对连续梯度层进行简化。

基于上述情况,Wang等^[13-15]提出了分层法模型,即将连续梯度材料结构分成若干层,每层的材料参数按连续函数变化,这样的分层模型在功能梯度结构的裂纹分析中取得了很好的效果。对于功能层而言,选择合适的分层数目及材料组分变化规律,不但能够扩大三相边界的面积,从而提高电池的性能,而且能够减小电池内部在工作过程中产生的热失配应力,防止电池脱层及裂纹的产生,从而保证电池的可靠性和耐久性,降低电池失效概率,延长电池使用寿命。Müller等^[16]将SOFC的阳极分成了三层,各层中NiO的摩尔百分比和粒子大小梯度变化,结果表明该阳极结构能够显著降低电池的极化电阻,从而提高电池的电化学性能。Kong等^[17]在阳极基底层和电解质层之间增加了梯度结构的阳极功能层,当阳极功能层厚度为 $40\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 时,最利于SOFC的电化学反应。Anandakumar等^[18]对比分析了含有电极功能层的SOFC与普通SOFC在 800°C 热载荷下的应力分布,发现含有功能层的SOFC能够明显降低阳极的最大主应力,降低了电池的失效概率,延长了电池使用寿命。

目前大部分有关含有功能梯度层的SOFC的研究都没有考虑功能层分层数目和各子层材料组分变化规律对SOFC热应力的影响。基于分层法的思想,本工作将阳极功能层划分成不同数目的子层,相邻层之间的材料属性按指数函数变化。并通过阳极功能层子层数目和非线性梯度成分指数控制各子层中材料属性的变化情况,来研究燃料电池在 800°C 下

的热应力分布。

1 功能梯度模型

1.1 分析模型

采用有限元软件ABAQUS对含有阳极功能层(Anode Functional Layer, 简记为AFL)的SOFC在 800°C 的热载荷作用下进行了数值分析,研究了AFL的分层数量和各子层材料组分变化规律对SOFC热应力分布的影响。考虑SOFC制备过程中产生的残余应力,设定SOFC在 1400°C 时处于零应力状态。

采用1/4模型对SOFC进行模拟,图1给出了SOFC的几何模型示意图。模型采用对称的边界条件,将AFL分别分割成1、2、3、4、5层,并与不含AFL的情况进行对比,共六种情况,如图2所示。

1.2 材料属性

在SOFC结构中,阴极材料和电解质材料分别采用LSM和YSZ,阳极基底材料采用NiO体积分数为80%的NiO-YSZ。SOFC各部分均采用线弹性材料模型,设置材料属性随温度变化,材料参数如表1所示。

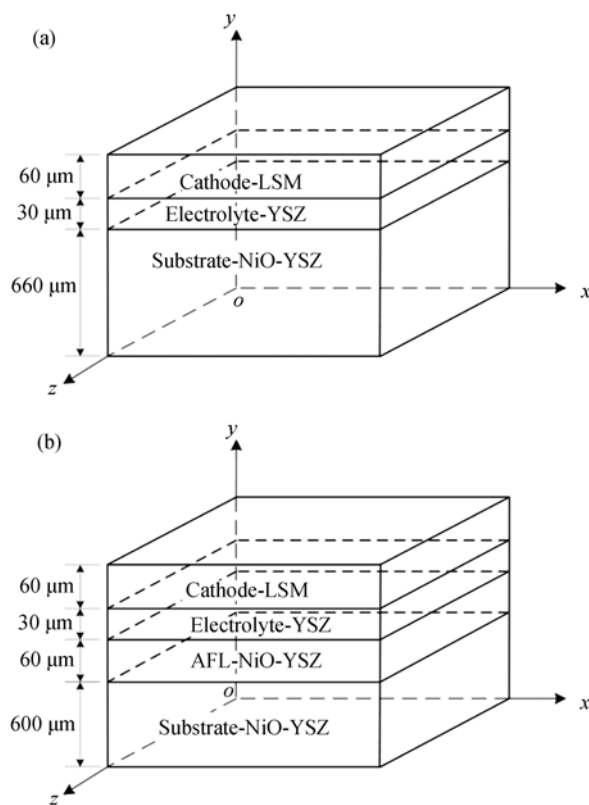


图1 SOFC几何模型图

Fig. 1 Geometry models of SOFC

(a) Without AFL; (b) With AFL

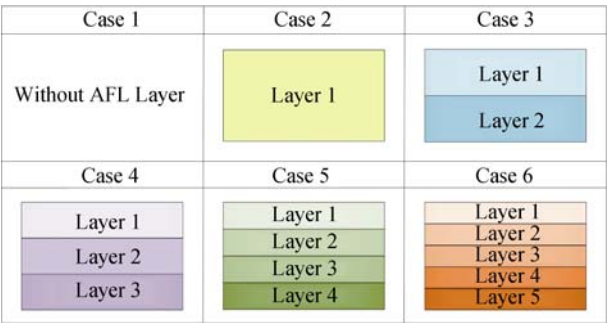


图 2 AFL 不同分层情况
Fig. 2 Different layer cases of AFL

表 1 电极、电解质等的材料属性^[19-21]
Table 1 Material properties of electrodes and electrolyte^[19-21]

	<i>T</i>	NiO-YSZ	YSZ	LSM	NiO
<i>E</i> /GPa	20℃	127.3	215	110	110
	800℃	105.5	185	118	90
μ	20℃	0.33	0.308	0.36	0.34
	800℃	0.33	0.313	0.36	0.34
CTE / $\times 10^{-6}$	20℃	11.77	7.6	9.8	13.0
	800℃	12.42	10.5	11.8	13.0
	1400℃	12.50	10.5	11.8	13.1

AFL 各层之间的材料属性呈阶梯状变化,且同一层的材料属性相同,每一层的材料属性取其中心点处对应的值^[22],如图 3 所示。对于每一层材料属性的控制可通过不同的函数表达式来实现^[23-27],为了保证模型中相邻层之间的材料属性有较好的连续性,材料属性通常按指数函数变化。

通过控制 AFL 中每一层的 NiO 体积分数,来确定各层的材料属性。AFL 中每一层 NiO 的体积分数 V 与该层的位置之间存在指数关系,即:

$$V = k \left(\frac{h}{t} \right)^n \quad (1)$$

其中 h 是该层中面与界面层(AFL 和电解质层之间的界面)沿厚度方向之间的距离, t 是 AFL 的厚度(约为

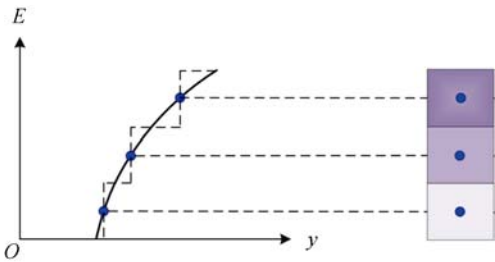


图 3 分层梯度的材料模型^[22]
Fig. 3 Model of graded elements^[22]

60 μm), n 是非线性梯度成分指数, k 为体积分数系数。当 $h=60 \mu\text{m}$ 时,阳极基底层中 NiO 的体积分数 V 为 80%, 由此可得 $k=0.8$, 方程(1)可表示为

$$V = 0.8 \left(\frac{h}{t} \right)^n \quad (2)$$

AFL 各层 NiO 的体积分数与该层的相对位置之间的关系如图 4 所示,当 AFL 的分层数目和非线性梯度成分的指数 n 不同时,各 AFL 子层中 NiO 的体积分数如表 2 所示。

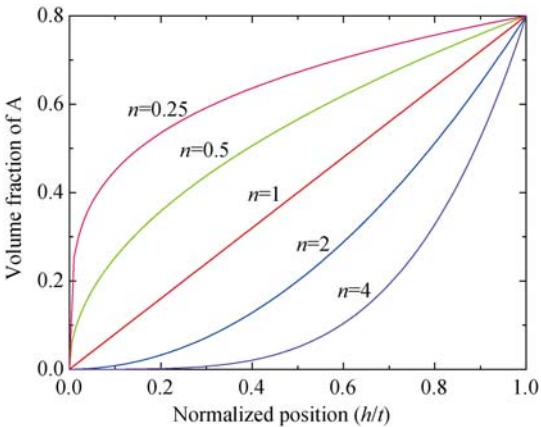


图 4 AFL 各层 NiO 的体积分数与该层的相对位置之间的关系
Fig. 4 Relationship between volume fraction and normalized position of NiO in AFL

表 2 各 AFL 子层中 NiO 的体积分数
Table 2 Volume fraction of NiO in AFL sublayers

Layer	AFL	NiO volume fraction		
		<i>n</i> =2	<i>n</i> =1	<i>n</i> =0.5
1	AFL1	20%	40%	56%
	AFL2	5%	20%	40%
2	AFL1	45%	60%	69%
	AFL2	2.5%	13%	32%
3	AFL1	20%	40%	56%
	AFL2	55%	66%	73%
4	AFL1	1.3%	10%	27%
	AFL2	11.3%	30%	49%
5	AFL1	31.0%	50%	63%
	AFL2	61.0%	70%	75%
6	AFL1	1%	8%	25%
	AFL2	7%	24%	43%
7	AFL1	20%	40%	56%
	AFL2	39%	56%	66%
8	AFL1	65%	72%	76%
	AFL2	65%	72%	76%

AFL 的材料 NiO-YSZ 是由 NiO 和 YSZ 按照一定的体积分数混合而成的, NiO 和 YSZ 的材料属性如表 1 所示。根据 Chin-Lung Hsieh 的模型^[28], 通过 NiO 和 YSZ 的材料属性以及它们各自的体积分数,

$$E^{\text{upper}} = \frac{\left[(1+c+c^2)E_1E_2 + cE_1^2 \right] \left[(1-\mu_1)E_2 + c(1-\mu_2)E_1 \right] - 2c^2E_1(\mu_1E_2 - \mu_2E_1)^2}{(1+c) \left[(cE_2 + E_1) \left[(1-\mu_1)E_2 + c(1-\mu_2)E_1 \right] - 2c(\mu_1E_2 - \mu_2E_1)^2 \right]} \quad (3)$$

其中 E_1 、 μ_1 分别为 YSZ 的弹性模量和泊松比, E_2 、 μ_2 分别为 NiO 的弹性模量和泊松比。参数 c 满足 $c = (1/V)^{0.5} - 1$, 其中 V 为 NiO 的体积分数。

NiO-YSZ 的弹性模量的下限为:

$$E^{\text{lower}} = \frac{(1+c+c^2)E_1E_2 + cE_1^2}{(1+c)(cE_2 + E_1)} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{lower}} = & \frac{\left[c(1+c)\mu_1E_2 + (c\mu_2 + \mu_1)E_1 \right] \left[(1-\mu_1)E_2 + c(1-\mu_2)E_1 \right]}{(1+c) \left[(cE_2 + E_1) \left[(1-\mu_1)E_2 + c(1-\mu_2)E_1 \right] - 2c(\mu_1E_2 - \mu_2E_1)^2 \right]} \\ & + \frac{c(\mu_1E_2 - \mu_2E_1) \left[(1-\mu_2)E_1 - (1-\mu_1)E_2 - 2c\mu_1(\mu_1E_2 + \mu_2E_1) \right]}{(1+c) \left[(cE_2 + E_1) \left[(1-\mu_1)E_2 + c(1-\mu_2)E_1 \right] - 2c(\mu_1E_2 - \mu_2E_1)^2 \right]} \end{aligned} \quad (6)$$

NiO-YSZ 的热膨胀系数的上限为:

$$\alpha^{\text{upper}} = \frac{A + c\alpha_1E_1}{B + cE_1} \quad (7)$$

$$A = \frac{E_1E_2 \left[(c\alpha_1 + \alpha_2) \left[(1-\mu_1)E_2 + c(1-\mu_2)E_1 \right] + 2c(\alpha_1 - \alpha_2)(\mu_1E_2 - \mu_2E_1) \right]}{(cE_2 + E_1) \left[(1-\mu_1)E_2 + c(1-\mu_2)E_1 \right] - 2c(\mu_1E_2 - \mu_2E_1)^2},$$

$$B = \frac{(c+1)E_1E_2 \left[(1-\mu_1)E_2 + c(1-\mu_2)E_1 \right]}{(cE_2 + E_1) \left[(1-\mu_1)E_2 + c(1-\mu_2)E_1 \right] - 2c(\mu_1E_2 - \mu_2E_1)^2}.$$

NiO-YSZ 的热膨胀系数的下限为:

$$\alpha^{\text{lower}} = \frac{(c\alpha_1 + \alpha_2)E_1E_2 + c\alpha_1E_1(cE_2 + E_1)}{(c+1)E_1E_2 + cE_1(cE_2 + E_1)} \quad (8)$$

由公式(3~8)可以得到不同 NiO 体积分数的 NiO-YSZ 的弹性模量 E 、泊松比 μ 和热膨胀系数 α 分别为:

$$E = \frac{E^{\text{upper}} + E^{\text{lower}}}{2} \quad (9)$$

$$\mu = \frac{\mu^{\text{upper}} + \mu^{\text{lower}}}{2} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\alpha^{\text{upper}} + \alpha^{\text{lower}}}{2} \quad (11)$$

由此计算得到对于不同的指数 n , AFL 不同分层情况下各子层的材料属性。

确定二者混合后的材料属性的上限和下限, 由此可以确定不同 NiO 体积分数的 NiO-YSZ 的弹性模量、泊松比和热膨胀系数。其中, NiO-YSZ 的弹性模量的上限为:

NiO-YSZ 的泊松比的上限为:

$$\mu^{\text{upper}} = \frac{c(1+c)\mu_1E_2 + (c\mu_1 + \mu_2)E_1}{(1+c)(cE_2 + E_1)} \quad (5)$$

NiO-YSZ 的泊松比的下限为:

其中 α_1 为 YSZ 的热膨胀系数, α_2 为 NiO 的热膨胀系数。系数 A 、 B 分别为:

2 计算结果及分析

2.1 模型精确性验证

为了验证本研究所采用模型的精确性, 对未设置 AFL 的 SOFC 在 20℃ 热载荷下的应力进行计算, 图 5 给出了电解质层在 20℃ 下的应力分布。将计算结果与 Yakabe 等^[29]的试验结果和 Fan 等^[30]的数值模拟进行对比, 如表 3 所示, 误差均小于 6%, 表明本研究采用的模型是精确的。

2.2 指数 n 和 AFL 划分层数对阳极拉应力的影响

对于 SOFC 的阳极层而言, 其破坏主要是由于拉应力造成的。对于不同的非线性梯度成分指数 n , 当 AFL 划分不同的层数时, 阳极层的最大拉应力值的变化情况如图 6(a)所示, 由图中可以看出, 随着

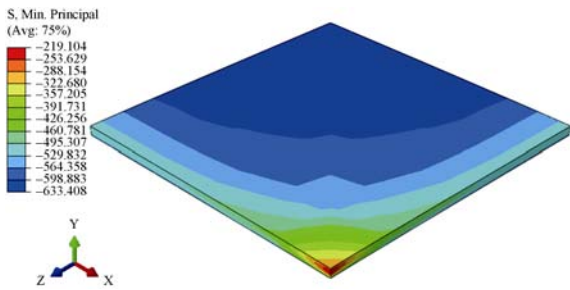


图 5 电解质层在 20℃下的应力云图

Fig. 5 Minimum principal stress of YSZ under 20℃

表 3 YSZ 最大压应力结果对比

Table 3 Comparison results of the maximum compressive stresses of YSZ

	Presented model	Experimental	Numerical analysis
Max. compressive stresses of YSZ /MPa	633.3	670 ^[29]	608.46 ^[30]
Error	—	5.8%	3.9%

AFL 划分层数的增多, 对于不同的指数 n , 阳极层的最大拉应力值的变化不同。

当 $n=2$ 时, 阳极层的最大拉应力出现在阳极基层与 AFL 的界面处, 且随着 AFL 划分层数的增多, 阳极层的最大拉应力值逐渐减小。当 AFL 划分层数由 0 层增加到 1 层时, 阳极层的最大拉应力值下降较为剧烈, 从 104.9 MPa 下降到 88.7 MPa, 下降了 15.4%。随着 AFL 划分层数的增多, 阳极层的最大拉应力值下降趋势趋于平缓。这主要是由于: 当 AFL 为 1 层时, 阳极基层、AFL 和电解质层三层中的 NiO 的体积分数由 80%→20%→0%, 导致相邻层之间的材料参数的差明显减小, 从而使阳极层的拉应力下降。但是随着 AFL 的层数继续增加, AFL 底层和阳极基层之间的材料参数的差并没有进一步减小, 所以, 当 $n=2$ 时, 设置 AFL 层可以有效减小阳极层的拉应力, 但增加 AFL 的层数并不能进一步减小阳极层的拉应力。

当 $n=1$ 时, 阳极层的最大拉应力出现在阳极基层与 AFL 的界面处。当 AFL 划分层数由 0 层增加到 1 层时, 阳极层的最大拉应力值下降更为剧烈, 从 104.9 MPa 下降到 76.98 MPa, 下降了 26.6%。这是因为当 $n=2$ 时, AFL 中 NiO 的体积分数为 20%; 而当 $n=1$ 时, AFL 中 NiO 的体积分数为 40%, 更加接近阳极基层中 NiO 的体积分数, AFL 的材料参数与阳极基层更为接近, 从而更有效地减小了阳极层的拉应力值。随着 AFL 划分层数的继续增多, 阳极层的最大拉应力值基本不变。

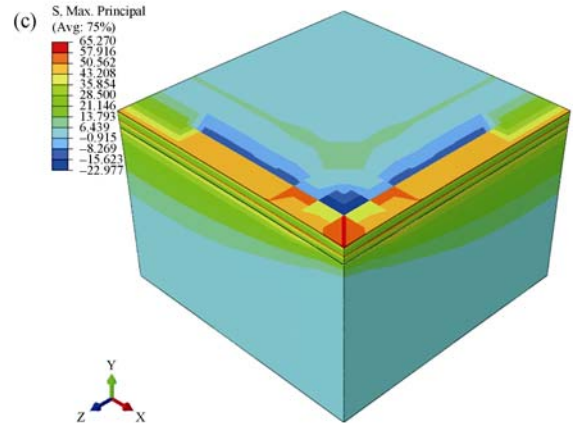
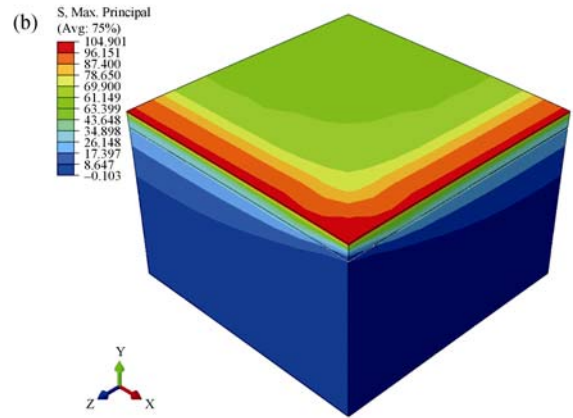
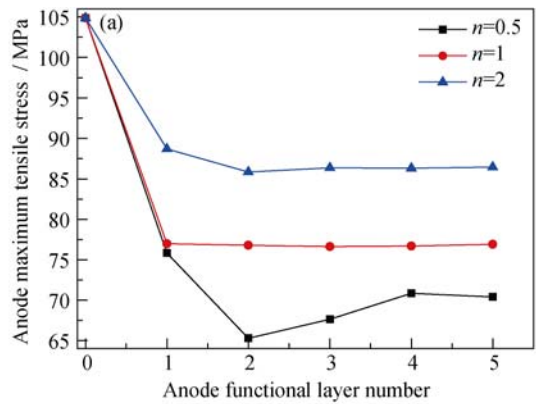


图 6 阳极层的最大拉应力随 AFL 划分层数和指数 n 的变化情况(a)、未设置 AFL 的阳极应力云图(b)及 $n=0.5$ 、AFL 划分 2 层的应力云图(c)

Fig. 6 (a) Maximum tensile stresses of anode with the layers of AFL and the exponent n ; (b) contour of anode without AFL; (c) contour of two layers of AFL ($n=0.5$)

当 $n=0.5$ 时, 阳极层的最大拉应力值的整体变化趋势与 $n=1$ 和 $n=2$ 一致。特别地, 当 AFL 划分层数由 0 层增加到 2 层时, 阳极层的最大拉应力值明显下降, 从 104.9 MPa 下降到 65.27 MPa, 下降了 38%。这是因为当 $n=2$ 和 $n=1$ 时, 阳极层的最大拉应力都出现在阳极基层与 AFL 的界面处, 但是对于 $n=0.5$ 且 AFL 划分成 2 层的情况, 阳极层的最大拉应力没有出现在阳极基层与 AFL 的界面处, 而

是出现在 AFL 的底层中,在一定程度上降低了阳极层的最大拉应力值。

2.3 指数 n 和 AFL 划分层数对电解质层压应力的影响

对于 SOFC 而言,在热载荷作用下,电极中产生了很大的拉应力,与此同时电解质层(YSZ)中会产生相应的压应力。对于不同的非线性梯度成分的指数 n ,当 AFL 划分不同的层数时,YSZ 的最大压应力值的变化情况如图 7 所示,从图中可以看出,设置 AFL 能明显减小 YSZ 的压应力。当 AFL 划分层数由 0 层增加到 1 层时,YSZ 的压应力下降的最为剧烈。当 $n=0.5$ 时,电解质的压应力从 -249.1 MPa 下降到 -229 MPa,下降了 8%;当 $n=2$ 时,电解质的压应力从 -249.1 MPa 下降到 -191.4 MPa,下降了 23%。之后,随着 AFL 划分层数的继续增多,电解

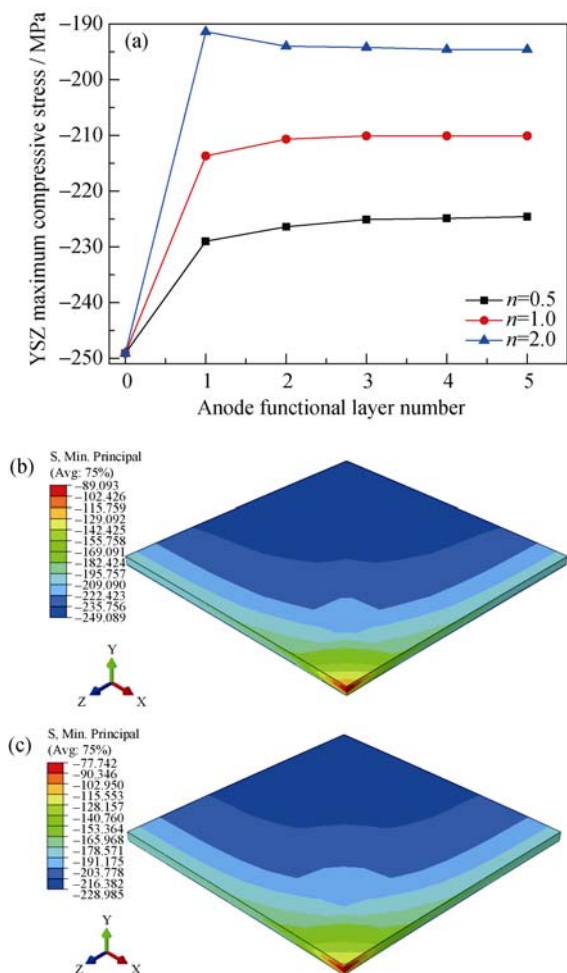


图7 YSZ 的最大压应力随 AFL 划分层数和指数 n 的变化情况(a)、未设置 AFL 的 YSZ 应力云图(b)及 $n=0.5$ 、AFL 划分 1 层的应力云图(c)

Fig. 7 (a) Maximum compressive stresses of YSZ with the layers of AFL and the exponent n , (b) contour of YSZ without the AFL and (c) contour of YSZ with two layers of the AFL ($n=0.5$)

质的压应力基本保持不变。当 AFL 划分层数相同时,YSZ 的最大压应力随着指数 n 的增大而减小,这与阳极层的最大拉应力的变化趋势相反。这是因为当 AFL 划分相同层数时,随着指数 n 的增大,阳极层的拉应力逐渐增大,YSZ 的压应力逐渐减小,从而保证 SOFC 整体的受力平衡。

2.4 指数 n 和 AFL 划分层数对界面应力差的影响

对于不同指数 n ,当 AFL 划分不同的层数时,在 $x=1, z=1$ 位置处,SOFC 电解质层和阳极层界面两侧单元的最大主应力差的变化情况如图 8 所示,当指数 n 不变时,随着 AFL 划分层数的增多,SOFC 电解质和阳极界面两侧单元最大主应力差逐渐减小。当 AFL 划分层数不变时,随着指数 n 的增大,SOFC 电解质和阳极界面两侧单元最大主应力差逐渐减小。另外,随着 AFL 划分层数的增多,不同指数 n 所控制的 SOFC 电解质和阳极界面两侧单元最大主应力差之间的差距逐渐减小。

3 结论

对含有 AFL 的 SOFC 在 800°C 的热载荷作用下进行了数值分析,研究 AFL 的分层数量和各层材料属性的变化趋势对 SOFC 的热应力分布的影响。主要结论如下:

- 1) 设置 AFL 能明显降低阳极层的最大拉应力。当 $n=0.5$ 时、AFL 划分成 2 层时,阳极层的最大拉应力比未设置 AFL 的情况下降了 38%,且在所有分析结果中其下降值最大。
- 2) 设置 AFL 能明显降低电解质层的最大压应力。当 $n=1$ 、AFL 划分成 1 层时,电解质层的最大

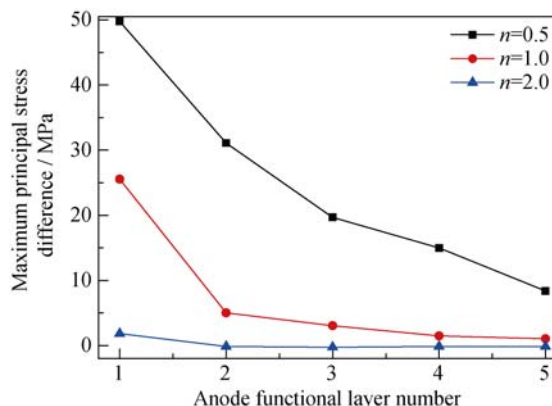


图8 电解质层和阳极层界面两侧单元的最大主应力差($x=1, z=1$)

Fig. 8 Maximum principal stress difference of interface element between YSZ and anode ($x=1, z=1$)

压应力比未设置 AFL 的情况下降了 23%，且在所有分析结果中，其下降值最大。

3) 当 AFL 划分层数相同时，阳极层的最大拉应力值随着指数 n 的增大而增大。电解质层的最大压应力随着指数 n 的增大而减小。

4) 当指数 n 不变时，随着 AFL 划分层数的增多，SOFC 电解质和阳极界面两侧单元最大主应力差逐渐减小；当 AFL 划分层数不变时，随着指数 n 的增大，SOFC 电解质和阳极界面两侧单元最大主应力差逐渐减小。另外，随着 AFL 划分层数的增多，不同指数 n 所控制的 SOFC 电解质和阳极界面两侧单元最大主应力差之间的差距逐渐减小。

综上所述，根据对含有 AFL 的 SOFC 进行的热应力分析，选取适当的非线性梯度成分指数 n 和 AFL 的分层数目，能有效地减小 SOFC 阳极中的拉应力、电解质中的压应力以及电解质和阳极界面两侧单元的最大主应力差，这为 SOFC 阳极功能层的优化设计提供了依据。

参考文献:

- [1] LAURENCIN J, DELETTE G, LEFEBVRE-JORD F, *et al.* A numerical tool to estimate SOFC mechanical degradation: case of the planar cell configuration. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2008, **28**(9): 1857–1869.
- [2] DUAN Z S, YANG M, YAN A Y, *et al.* $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ as a cathode for IT-SOFCs with a GDC interlayer. *J. Power Sources*, 2006, **160**(1): 57–64.
- [3] CHEN X, LIN Z Z, YIN C, *et al.* Theoretical prediction of the growth and surface structure of platinum nanoparticles. *Acta Phys. Sin.*, 2012, **61**(7): 076801.
- [4] SELÇUK A, MERERE G, ATKINSON A. The influence of electrodes on the strength of planar zirconia solid oxide fuel cells. *J. Mater. Sci.*, 2001, **36**(5): 1173–1182.
- [5] LIANG L J, LI K, YAN D, *et al.* Mechanical property and deformation behavior of SOFCs. *J. Inorg. Mater.*, 2015, **30**(6): 633–638.
- [6] CHEN X, YANG J, PU J, *et al.* Finite element analysis of thermal stresses in planar SOFCs. *J. Inorg. Mater.*, 2007, **22**(2): 339–343.
- [7] 彭晓领. 组元磁化法制备 ZrO_2/Ni 梯度功能材料研究. 浙江: 浙江大学博士学位论文, 2008.
- [8] ERDOGAN F, WU B H. Crack Problems in FGM layers under thermal stresses. *J. Therm. Stresses*, 1996, **19**(3): 237–265.
- [9] LEE Y D, ERDOGAN F. Residual/thermal stresses in FGM and laminated thermal barrier coatings. *Int. J. Fracture*, 1995, **69**(2): 145–165.
- [10] ZHA S W, ZHANG Y L, LIU M L. Functionally graded cathodes fabricated by Sol-Gel/slurry coating for honeycomb SOFCs. *Solid State Ionics*, 2005, **176**(1/2): 25–31.
- [11] JIANG T Z, WANG Z H, REN B Y, *et al.* Compositionally continuously graded cathode layers of $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})(\text{Fe}_{0.91}\text{Al}_{0.09})\text{O}_{3-\delta}\text{Gd}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_2$ by wet powder spraying technique for solid oxide fuel cells. *J. Power Sources*, 2014, **247**: 858–864.
- [12] MCCOPPIN J, BARNEY I, MUKHOPADHYAY S, *et al.* Compositional control of continuously graded anode functional layer. *J. Power Sources*, 2012, **215**: 160–163.
- [13] WANG Y S, GROSS D. Analysis of a crack in a functionally graded interface layer under static and dynamic loading. *Key Eng. Mater.*, 2000, **183–187**: 331–336.
- [14] WANG Y S, HUANG G Y, GROSS D. On the mechanical modeling of functionally graded interracial zone with a griffith crack: anti-plane deformation. *J. Appl. Mech.-T. ASME*, 2003, **70**(5): 676–680.
- [15] HUANG G Y, WANG Y S, YU S W. A new multi-layered model for in-plane fracture analysis of functionally graded materials (FGMS). *Chin. J. Theor. Appl. Mech.*, 2005, **37**(1): 1–8.
- [16] MÜLLER A C, HERBSTTRIT D, IVERS-TIFFÉE E. Development of a multilayer anode for solid oxide fuel cells. *Solid State Ionics*, 2002, **152–153**: 537–542.
- [17] KONG J R, SUN K N, ZHOU D, *et al.* Ni-YSZ gradient anodes for anode-supported SOFCs. *J. Power Sources*, 2007, **166**(2): 337–342.
- [18] ANANDAKUMAR G, LI N, VERMA A, *et al.* Thermal stress and probability of failure analyses of functionally graded solid oxide fuel cells. *J. Power Sources*, 2010, **195**(19): 6659–6670.
- [19] NAKAJO A, WUILLENIN Z, HERLE J V, *et al.* Simulation of thermal stresses in anode-supported solid oxide fuel cell stacks. Part I: Probability of failure of the cells. *J. Power Sources*, 2009, **193**(1): 203–215.
- [20] CLAGUE R, MARQUIS A J, BRANDON N P. Finite element and analytical stress analysis of a solid oxide fuel cell. *J. Power Sources*, 2012, **210**(15): 224–232.
- [21] JIANG W C, LUO Y, ZHANG W Y, *et al.* Effect of temperature fluctuation on creep and failure probability for planar solid oxide fuel cell. *J. Fuel Cell Sci. Tech.-T. ASME*, 2015, **12**(5): 051004–1–10.
- [22] KIN J H, PAULINO G H. Isoparametric graded finite elements for nonhomogeneous isotropic and orthotropic materials. *J. Appl. Mech.*, 2002, **69**(4): 502–514.
- [23] HIRANO T, WAKASHIMA K. Mathematical modeling and design. *MRS Bull.*, 1995, **20**(1): 40–42.
- [24] GIANNAKOPOULOS A E, SURESH S, FINOT M, *et al.* Elastoplastic analysis of thermal cycling: layered materials with compositional gradients. *Acta Metal. Mater.*, 1995, **43**(4): 1335–1354.
- [25] WILLIAMSON R L, RABIN B H, DRAKE J T. Finite element analysis of thermal residual stresses at graded ceramic-metal interfaces. Part I. Model description and geometrical effects. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(2): 1310.
- [26] AMADA S. Hierarchical functionally gradient structures of bamboo, barley, and corn. *MRS Bull.*, 1995, **20**(1): 35–36.
- [27] TEIXEIRA V. Numerical analysis of the influence of coating porosity and substrate elastic properties on the residual stresses in high temperature graded coatings. *Surf. Coat. Tech.*, 2001, **146–147**(2): 79–84.
- [28] HSIEH C L, TUAN W H. Elastic and thermal expansion behavior of two-phase composites. *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, 2006, **425**(1/2): 349–360.
- [29] YAKABE H, BABA Y, SAKURAI T, *et al.* Evaluation of the residual stress for anode-supported SOFCs. *J. Power Sources*, 2004, **135**(1/2): 9–16.
- [30] FAN P F, LI G J, ZENG Y K, *et al.* Numerical study on thermal stresses of a planar solid oxide fuel cell. *Int. J. Therm. Sci.*, 2014, **77**: 1–10.