

多物理场耦合作用下平板式固体氧化物燃料电池的蠕变损伤行为

宋 明¹, 马 帅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: 利用 COMSOL Multiphysics 软件建立了电化学-气体流动-物质传递-温度相耦合的多物理场模型, 将多物理场数值计算得到的不均匀温度场分布作为热载荷施加至 ABAQUS 模型中, 基于由 Wen-Tu 蠕变延性耗竭模型开发的蠕变损伤子程序, 研究了固体氧化物燃料电池(SOFC)的蠕变损伤行为, 预测了蠕变裂纹演化过程。结果表明, SOFC 各构件蠕变变形与损伤在运行初期迅速增大后基本保持不变, 下连接体最先达到临界损伤值, 是潜在危险区域, 最容易发生失效; 50 000 h 后, SOFC 出现 2 处蠕变损伤, 最大裂纹发生于下连接体与阴极材料交界且距空气流道入口 1.1 mm 处, 长度为 1.6 mm, 为非贯穿裂纹, 较整体结构尺寸相比损伤较小不会发生气体泄漏, 可以满足 40 000 h 的商业安全运行要求。

关键词: 固体氧化物燃料电池; 不均匀温度场; 蠕变损伤; 裂纹扩展

中图分类号: TM911.42 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)01-0212-07

网络出版时间: 2021-11-26



Damage and Creep Behavior in Planar Solid Oxide Fuel Cell by Modeling of Multiphysics Coupled

SONG Ming¹, MA Shuai¹, DU Chuansheng², WANG Bingying², JIANG Wenchun³

(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 multiphysics-coupling model of solid oxide fuel cell (SOFC) was proposed via a software named COMSOL Multiphysics for the establishment of coupled fields of electrochemical-gas, flow-matter and transfer-temperature. The inhomogeneous temperature distribution obtained from the numerical analysis was applied to the corresponding model build by ABAQUS as a thermal load, and the creep damage subroutine developed based on the Wen-Tu creep ductile depletion model was used to analyze the creep damage of SOFC. The creep damage behavior of SOFC was investigated and the creep crack propagation was predicted. The results show that the creep deformation and damage of SOFC components firstly increase and then remain unchanged. The lower connector is the first to reach the critical damage value, which is the potential dangerous area and is the most likely to failure. After 50 000 h, two creep damages occur in SOFC. The maximum crack is 1.6 mm as the non-penetrating crack that occurs at the junction of 1.1 mm in the air inlet of the lower connector and the cathode material. Compared with the overall structure size, the smaller crack will not cause gas leakage, thus meeting the requirement of commercial safe operation for 40 000 h.

Keywords: solid oxide fuel cell; uniform temperature field; creep and damage; crack propagation

固体氧化物燃料电池(SOFC)作为新一代的燃料电池, 具有高效率、低排放和燃料灵活性的优势, 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 由阳极、电解质和阴极陶瓷材料与金属连接体组成, 其工作温度一般为 700~1 000 °C, 使用寿命从几千小时到数万小时不等。SOFC 长期

收稿日期: 2021-04-30。 修订日期: 2021-07-30。

基金项目: 国家自然科学基金(51805543); 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: 2021-04-30. Revised date: 2021-07-30.

First author: SONG Ming(1984—), male, Ph.D., Lecturer.

E-mail: songmingx@gmail.com

服役于高温条件下,不同部件之间的热膨胀系数不匹配,会导致严重的热应力和翘曲^[2-3],这些应力会使 SOFC 产生较大蠕变变形,甚至失效,严重影响电池的使用寿命。SOFC 电堆运行时间至少达到 40 000 h 且功率损耗小于 10% 是其商业化的基本要求^[4]。因此,为推进 SOFC 大规模商业化进程,研究电池的高温蠕变行为具有重要意义。

国内外对于 SOFC 的高温蠕变行为的研究已有一些文献报道。Clague 等^[5]发现 SOFC 运行过程中存在明显的应力释放,长时间蠕变会导致较大塑性变形,长期高温服役下会增加 SOFC 发生故障的概率。Liu 等^[6]发现连接体的蠕变行为会导致燃料流和气流通道变窄,从而会影响 SOFC 电堆的电化学性能;Jiang 等^[7]研究了 SOFC 柔性密封中热应力引起的蠕变,预测了最大蠕变应变产生在电池边缘拐角和 BNi-2 焊料位置处;Jiang 等^[8]还发现,由于管状 SOFC 中各层之间的蠕变参数不匹配,50 000 h 后,管状 SOFC 电解质中最先开始出现裂纹。Greco 等^[9]研究了阳极支撑的平板式 SOFC 电堆在稳定和瞬态状态下蠕变失效分析。Nakajo 等^[10]证实蠕变变形会对玻璃陶瓷密封材料的电池失效概率产生显著影响,而对压缩密封垫圈的电池影响有限。Zhang 等^[11]采用与蠕变损伤相关的失效概率预测模型,分析了不同几何尺寸下固体氧化物燃料电池构件的失效概率。Wang 等^[12]基于应变蠕变损伤模型,预测了 SOFC 在均匀温度场 50 000 h 蠕变后的最大损伤位置位于玻璃陶瓷面与框架的交界处。

然而,目前的 SOFC 蠕变力学行为研究大多忽略了多物理场的相互作用,均假设 SOFC 处于均匀温度场,忽略了 SOFC 在实际工作条件下的不均匀温度场影响。绝大多数关于 SOFC 热应力和蠕变损伤的研究都基于均匀温度场这一假设,因此使得求解得到的蠕变损伤并不能准确反映 SOFC 运行过程中真实的材料劣化情况。Jiang 等^[13]通过有限元分析,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%。实际上,SOFC 运行包括热量、质量、流体流动、化学反应、电荷的传递和固体力学等多场耦合作用,必须考虑多物理场耦合作用下的不均匀温度场,在此基础上才能够得到准确预测 SOFC 的蠕变力学性能。本工作首先借助 COMSOL Multiphysics 软件建立电化学-物质传递-气体流动-温度多场耦合模型,对在逆流条件下的三维热电特性进行研究,得到了

工况下 SOFC 的准确不均匀温度场分布。再基于 Wen-Tu 蠕变延性耗竭模型,开发了蠕变损伤子程序,利用有限元软件 ABAQUS 建立三维 SOFC 蠕变损伤模型,将 COMSOL Multiphysics 数值计算得到的温度场分布作为热载荷施加到 ABAQUS 模型中,对 SOFC 进行蠕变和损伤的研究。

1 有限元模型建立

1.1 多物理场有限元模型建立

1.1.1 几何模型 以 1 个单元堆的 SOFC 为研究对象进行建模与数值模拟。由于单元堆呈对称形状,为简化模型,提高求解效率,分析时取其面对称区域建模如图 1 所示。SOFC 单元结构主要金属连接体、燃料流道、阳极多孔电极、电解质、阴极多孔电极和气体流道组成。分别使用厚度为 0.10 mm 氧化镍-氧化钇稳定的氧化锆(NiO-YSZ)做阳极材料、厚度为 0.10 mm 锶掺杂锰酸镧(LSM)做阴极材料、厚度为 0.05 mm 氧化钇稳定的氧化锆(YSZ)做电解质材料、金属连接体材料为 Crofer 22APU。SOFC 反应面积 1.50 mm×20.00 mm,气体流道宽度和高度均为 1.00 mm,连接体肋宽为 0.25 mm。

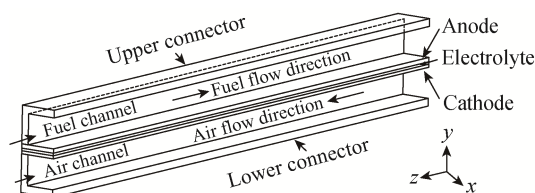


图1 固体氧化物燃料电池(SOFC)单电池几何模型
Fig. 1 Geometric model of single solid oxide fuel cell (SOFC)

1.1.2 边界条件 为了真实反应电池运行工况的初始和边界条件,定义阳极侧金属互连的上表面接地,阴极侧金属互连的下表面为电池电压,电池的工作电压设为 0.7 V^[14]。气体入口假设为层流,阳极侧流道入口气体速率为 0.4 m/s,阴极侧流道入口气体速率为 0.8 m/s,气体入口温度为 800 °C,出口压力为 1 个大气压,且抑制回流。另外,定义燃料流道入口处气体为氢气(97%,质量分数)与水蒸气(3%,质量分数),空气流道入口处气体为氧气(21%,质量分数)与氮气(79%,质量分数)。

1.1.3 模型验证 通过课题组前期建立的多物理场耦合理论模型与数值模拟^[15]得到在逆流条件下的 SOFC 不均匀温度场分布如图 2 所示。由图 2 可见,温度最大值集中在电池中间段靠近阳极入口处,结果与文献[16]中的温度分布相吻合。

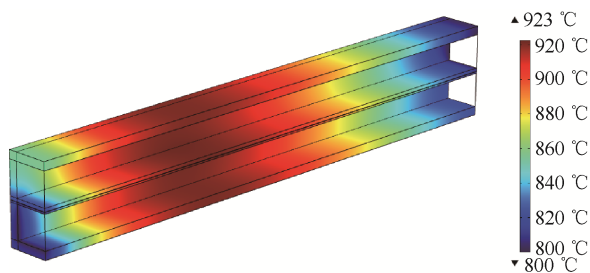
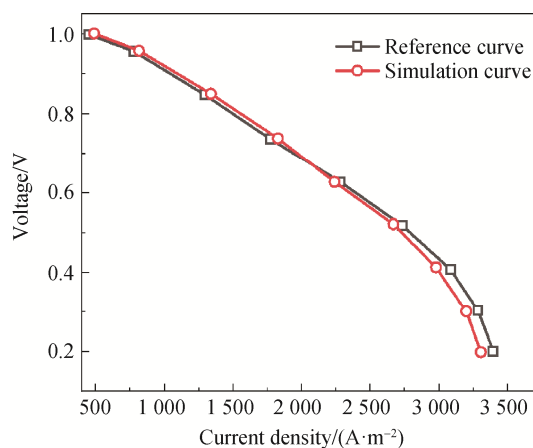


图2 多场耦合作用下的 SOFC 非均匀温度场分布

Fig. 2 Inhomogeneous temperature distribution of single SOFC by modeling of multiphysics coupled

电池的电压-电流密度(V - J)曲线通常被用来直观描述 SOFC 电化学性能,为了验证所建立模型的有效性,利用建立的数值模型得到了电池 V - J 曲线。通过对比发现,在相同工作条件下,模拟得到的 V - J 曲线与文献[17]中的数据具有很好的吻合性,如图3所示,进一步验证了建立的 SOFC 模型的正确性与有效性。

图3 模拟与文献[17]电流密度-电压(V - J)曲线对比Fig. 3 Comparison of voltage-current density(V - J) curves between simulation and reference[17]

1.2 蠕变行为有限元模型建立

COMSOL Multiphysics 有较好的多物理场耦合能力,但固体力学模块边界条件和处理非线性能力不足。而 ABAQUS 具有强大非线性分析、边界处理和模块开发能力。将多物理场耦合计算得到的温度场作为热载荷施加在 ABAQUS 有限元模型的节点上,基于 Wen-Tu 蠕变延性耗竭模型开发的子程序进行蠕变损伤分析。

SOFC 重要构件阳极-电解质-阴极制备到稳定运行,要经过 1 400 °C 到 800 °C 温度变化,即在 1 400 °C 完成烧结成型冷却至室温,然后升温至 800 °C 运行工作。因此,选取电池阳极-电解质-阴极制备温度 1 400 °C 作为无应力参考温度^[16]。SOFC

组成构件材料众多,包含金属与非金属材料,不同材料热膨胀系数的不匹配会使整体结构在高温下产生非均匀热应力,而过大的热应力在电池长时间运行过程中会导致蠕变变形。电池各构件的总应变包括弹性应变、热应变、塑性应变和蠕变应变,电池构件总应变方程表示为:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{th} + \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_c \quad (1)$$

式中: ε_t 为总应变; ε_{th} 为热应变,由温差(ΔT)和热膨胀系数得到; ε_e 为弹性应变,由 Hook 定律确定; ε_p 为塑性应变,符合 Von Mises 屈服面准则; ε_c 为蠕变应变,由 Wen-Tu 模型^[18]控制:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2} B \sigma_{eq}^{n-1} s_{ij} \left[1 + \beta_0 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right]^{\frac{n+1}{2}} \quad (2)$$

$$\beta_0 = \frac{2\rho}{n+1} + \frac{(2n+3)\rho^2}{n(n+1)} + \frac{(n+3)\rho^3}{9n(n+1)^3} + \frac{(n+3)\rho^4}{108n(n+1)^4} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{2(n+1)}{\pi\sqrt{1+3/n}} \omega^{3/2} \quad (4)$$

$$\frac{\varepsilon_f^*}{\varepsilon_f} = \frac{\exp \left[\frac{2}{3} \left(\frac{n-0.5}{n+0.5} \right) \right]}{\exp \left[2 \left(\frac{n-0.5}{n+0.5} \right) \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right]} \quad (5)$$

$$\omega = \int_0^t \dot{\omega} dt = \int_0^t \frac{\dot{\varepsilon}_c}{\varepsilon_f^*} dt \quad (6)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_{ij}^c$ 为蠕变应变率张量; B 和 n 为材料蠕变常数; s_{ij} 为偏应力; σ_{eq} 为等效应力; σ_m 为静水应力; σ_1 为第一主应力; β_0 为与应力相关函数; ρ 为微裂纹损伤参数; ω 为损伤量从 0 到 1,表示材料初始无损伤到裂纹产生完全失效; ε_c 为等效蠕变应变; ε_f^* 为多轴断裂应变; ε_f 为单轴蠕变断裂应变,由单轴蠕变试验获得。相关蠕变参数^[12,19]如表1所示。

表1 蠕变参数
Table 1 Creep parameters

Component	$B/(\text{MPa}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	n	ε_f
Anode	2.64×10^{-12}	1.7	0.02
Electrolyte	1.18×10^{-16}	1.0	0.02
Cathode	1.27×10^{-13}	1.7	0.02
Connector	3.62×10^{-12}	6.0	0.60

B 和 n are the creep constants of materials; ε_f is uniaxial creep rupture strain.

1.2.1 几何模型 应用于固体力学计算的几何模型与多物理场有限元模型具有相同的尺寸、网格与节点坐标。基于 ABAQUS 对 SOFC 有限元模型划分网格如图 4 所示, 采用 C3D8R 单元, 共计 46 000 个单元, 58 984 个节点。

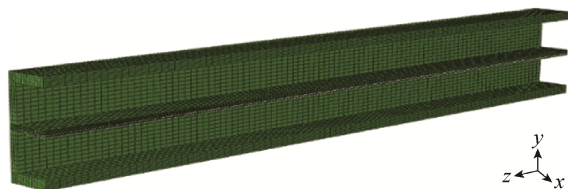


图 4 有限元模型网格划分

Fig. 4 Mesh generation of finite element model

1.2.2 材料属性 SOFC 各构件材料力学性能均考虑温度相关性, 即电池材料性能随电池温度(T)发生变化, 其材料性能, 包括弹性模量(E)、Poisson

比(ν)、屈服强度(σ_0)和热膨胀系数(α), 如表 2^[13,20-21]所示。

1.2.3 边界条件 根据单电池的实际工作状态, 保持各界面变形协调, 因此假设各界面保持位移和应变连续, 在各个部件之间采用 tie 操作粘合在一起, 将连接体对阳极、电解质、阴极整体的约束和形变都考虑在内。同时假设 SOFC 底面上的所有节点在 Y 方向($U_2=0$)被约束, 以限制 SOFC 的移动, 在轴对称截面上施加了 X 轴对称边界条件。

1.2.4 非均匀温度场导入 通过 MATLAB 编程将 COMSOL 计算得到节点温度坐标导入 ABAQUS 的 INP 文件中, 将得到不均匀温度导入预定义场。通过多物理场耦合得到的非均匀温度场分析力学性能, 相比于假设为均匀温度场进行蠕变研究, 能更准确反映 SOFC 运行过程中的真实应力分布情况。

表 2 SOFC 中材料的性能
Table 2 Properties of materials in SOFC

$T/^{\circ}\text{C}$	Anode(NiO-YSZ)			Electrolyte(YSZ)			Cathode(LSM)			Connector(Crofer 22 APU)			
	E/GPa	$\alpha \times 10^6/^{\circ}\text{C}^{-1}$	ν	E/GPa	$\alpha \times 10^6/^{\circ}\text{C}^{-1}$	ν	E/GPa	$\alpha \times 10^6/^{\circ}\text{C}^{-1}$	ν	E/GPa	$\alpha \times 10^6/^{\circ}\text{C}^{-1}$	ν	σ_0/MPa
20	108.0	11.70	0.3	200.0	7.6	0.31	41.0	9.80	0.28	214.0	9.7	0.29	291.0
200	108.0	12.31	0.3	180.0	8.2	0.31	42.4	10.20	0.28	210.0	10.3	0.29	231.0
400	115.0	12.41	0.3	165.0	8.8	0.31	43.8	10.60	0.28	184.0	10.8	0.29	225.0
600	106.8	12.41	0.3	160.8	9.6	0.31	45.2	11.00	0.28	162.0	11.4	0.29	201.0
800	103.3	12.41	0.3	157.3	10.0	0.31	46.6	11.40	0.28	44.0	11.9	0.29	44.0

NiO-YSZ is nickel oxide-yttria stabilized zirconia; YSZ is yttria stabilized zirconia; LSM is strontium doped lanthanum manganite; T is temperature; E is elastic modulus; ν is Poisson's ratio; α is coefficient of thermal expansion; σ_0 is yield strength of material.

2 蠕变损伤分析

建立的蠕变损伤模型, 定义 ω 为损伤量, 当 $\omega=0.99$ 时, 定义试样裂纹的萌生, 裂纹萌生即为失效单元。采用 Saanouni 等^[22]的方法, 将失效单元 Gauss 点上的弹性模量降低为初始弹性模量的 $1/10^6$, 该点的应力在后续计算中将一直接近于零, 即代表此处已无承载能力。选择式(2)作为蠕变模型, 式(3)~式(6)作为连续性损伤模型, 通过蠕变子程序将连续性蠕变损伤模型编入 ABAQUS, 同时嵌入 USDFLD 子程序, 获得每个时间增量的变量 σ_1 和 σ_m 并更新蠕变损伤 ω 。在损伤分析中, 当 $\omega=0.99$ 时, 认为应力分量在积分点失效, 表示裂纹萌生。

2.1 蠕变应力与应变分析

图 5 为对数坐标下 SOFC 蠕变 50 000 h 过程中 Von Mises 随时间的变化曲线, 因为温度梯度与热膨胀系数不匹配, 上、下连接体、阳极、电解质和阴极中的初始热应力分别为 43.6、43.9、150.7、490.7 MPa

和 97.5 MPa, 由于蠕变松弛, 应力在前 1 000 h 迅速下降后逐渐趋于稳定, 50 000 h 后上、下连接体、阳极、电解质和阴极中的应力为 3.8、4.1、80.2、348.1 MPa 和 53.8 MPa, 分别比初始应力降低了 91.3%、90.6%、46.8%、29.1%和 44.8%。连接体材料应力降低最明

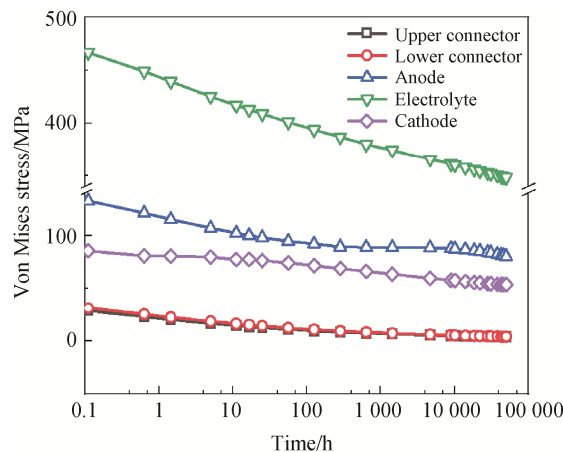


图 5 等效应力随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of Von Mises stress versus time

显,这是因为金属材料抗蠕变性能相对陶瓷材料较差,产生了较大蠕变变形与其他构件进行协调变形导致阳极、电解质、阴极应力下降。

图6为对数坐标下SOFC蠕变50000 h过程等效蠕变应变随时间变化曲线,其上、下连接体、阳极、电解质、阴极最大蠕变应变分别为 5.2×10^{-3} 、 8.4×10^{-3} 、 2.6×10^{-4} 、 2.1×10^{-9} 、 6.1×10^{-6} 。随着蠕变时间增加各构件的等效蠕变应变逐渐增大,最大蠕变应变出现在下连接体处。而阳极、电解质、阴极蠕变应变相对足够小,这是因为陶瓷具有较好的抗蠕变性能。

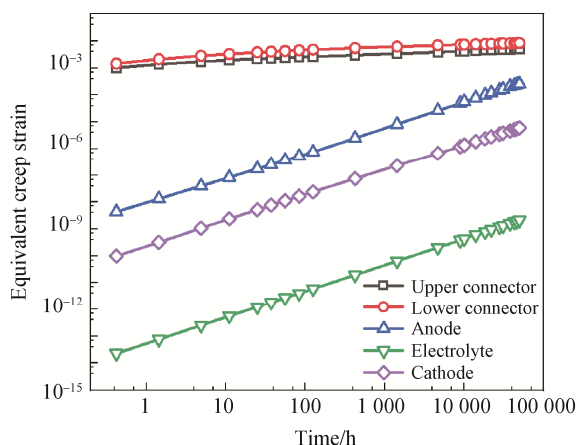


图6 等效蠕变应变随时间变化

Fig. 6 Variation of equivalent creep strain with time

2.2 危险位置分析

图7为SOFC各构件运行过程损伤随时间变化曲线,上、下连接体、阳极、电解质、阴极经过50000 h运行中损伤分别从0增加到0.45、0.99、0.11、 1.48×10^{-6} 和 3.98×10^{-3} 。损伤变化总体趋势与等效蠕变应变类似,初始阶段损伤迅速增大,后逐渐长趋于稳定,SOFC在运行过程中可能会经历多次服务启动和关闭,每次启停都会重复上述过程,导致损伤在之前的基础上迅速积累,同时产生较大蠕变变形,加速裂纹扩展,对材料的失效产生很大的影响,因此应尽可能减少启停次数。结合图6发现损伤随着应力的减小仍然会逐渐增大,这是因为,蠕变导致应力减小,同时产生较大蠕变变形。然而,蠕变变形会引起新的裂纹或导致现有的缺陷扩展。因此,随着应力的减小损伤仍然会逐渐增大。在50000 h蠕变过程中,下连接体的损伤最先达到临界值0.99,即裂纹萌生。

综合图6与图7的结果,从蠕变变形与损伤角度分析,得出SOFC下连接体是潜在危险区域,最

容易发生失效。

尽管电解质中等效力高达490.7 MPa,远大于其他部件,但相比下连接体损伤量仍较小。因为根据Wen-Tu连续性损伤模型,损伤不仅与等效力有关,还与等效蠕变应变、应力三轴度有关。电解质中等效蠕变应变远小于下连接体。因此,下连接体损伤最先达到失效值,发生开裂。

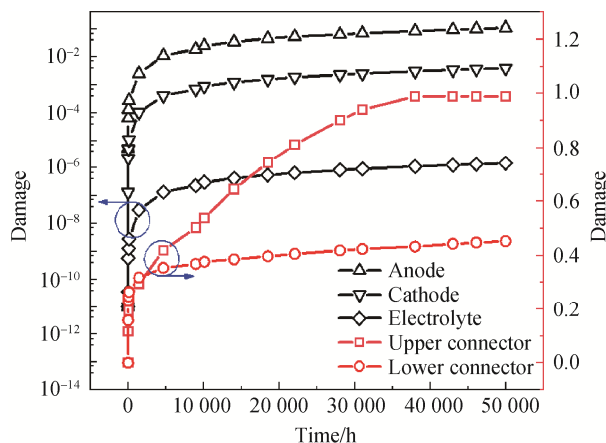


图7 构件损伤随时间变化

Fig. 7 Variation of component damage with time

2.3 损伤演化分析

图8为下连接体失效位置变化云图。图8a为下连接体蠕变36000 h后损伤 ω 达到0.99,裂纹开始萌生,此时下连接体出现2个起裂点分别位于下连接体与阴极的交界面空气流道入口2.0 mm处与空气流道出口1.8 mm处。图8b,图8c和图8d分别为蠕变40000、45000 h和50000 h后下连接体损伤分布云图。由图8可见,随着损伤积累裂纹由起裂位置向两边扩展,属于内裂纹。

图9为SOFC蠕变50000 h下连接体损伤沿路径方向变化曲线。裂纹位于下连接体空气流道入口1.1 mm与空气流道出口1.3 mm,裂纹长度分别是1.6 mm与1.2 mm,由于裂纹为内裂纹,非贯穿裂纹且与整个结构的尺寸相比,内部裂纹很小,不会发生气体泄漏。因此,其可以满足40000 h^[4]的设计要求。

进一步分析下连接体裂纹长度随时间变化规律。图10为下连接体裂纹长度随时间变化曲线,可以看出裂纹起始时间约为36000 h,由于蠕变应变积累的原因,裂纹长度先迅速增大,当蠕变时间大于45000 h后,裂纹长度不再增长。由于蠕变松弛效应,应力随着蠕变时间的延长而减小。当应力低于一定值时,应力引起的蠕变变形不显著,因此裂纹逐渐停止扩展。

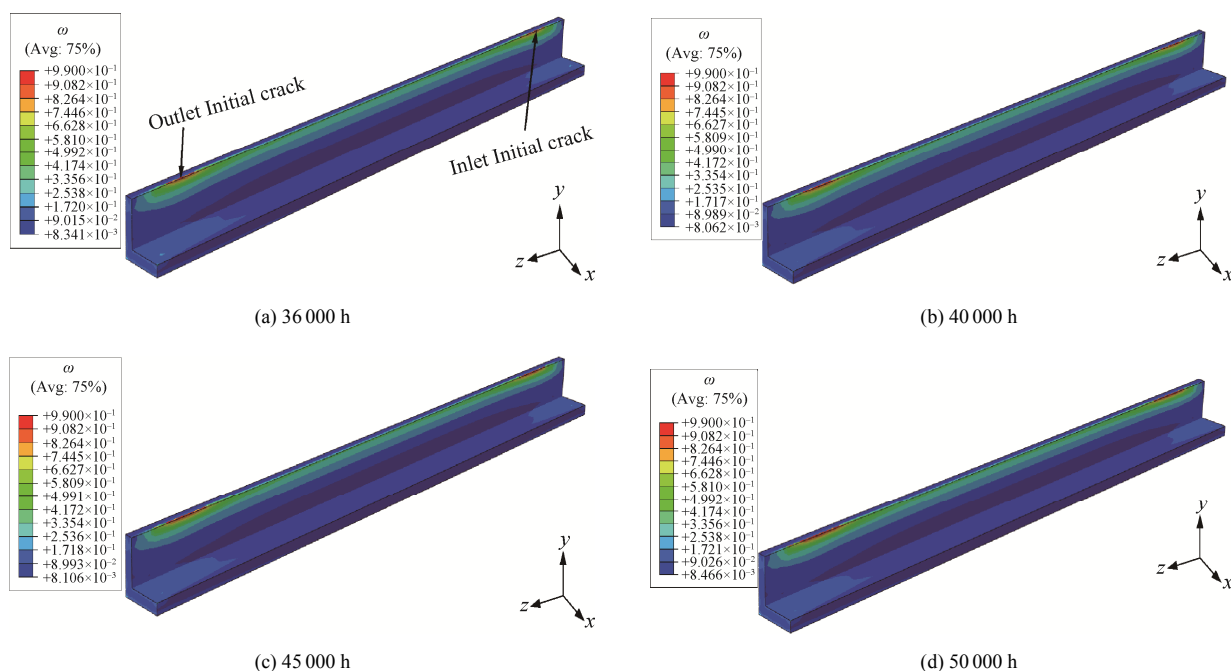


图 8 下连接体不同时刻蠕变损伤分布

Fig. 8 Distribution of damage evolution of lower connector for different durations

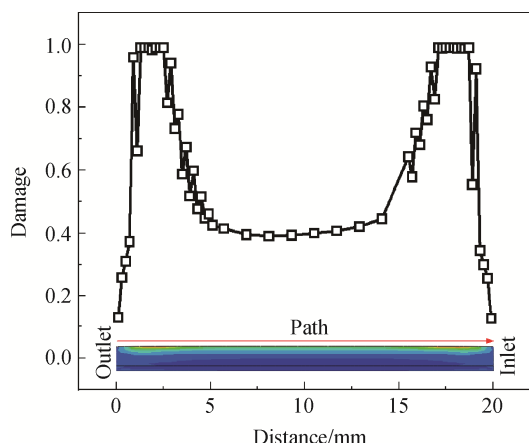


图 9 下连接体损伤参量沿路径变化规律

Fig. 9 Variation of damage parameters along the path of lower connector

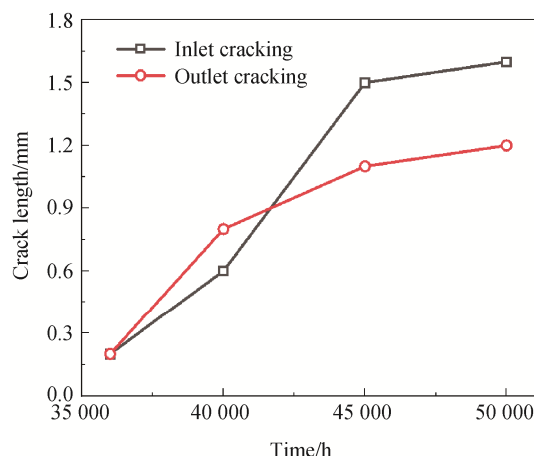


图 10 下连接体裂纹长度随时间变化

Fig. 10 Crack length of lower connector changing with time

3 结论

1) SOFC 在逆流形式下的电化学反应、气体流动、物质传递和温度传递进行了三维数值模拟, 得到非均匀温度场分布, 高温区域主要集中在电池中间靠近燃料入口侧, 最高温度 923°C , 高于入口温度 123°C , 模拟所得极化曲线与文献中数据吻合良好, 证明了模型的有效性。

2) 在蠕变过程中, 由于应力松弛效应, SOFC 的上、下连接体、阳极、电解质、阴极中的应力分别比初始热应力降低了 91.3%、90.6%、46.8%、29.1%和 44.8%。在 50 000 h 蠕变之后下连接体的

损伤最大, 出现 2 处裂纹, 位于下连接体空气流道入口 1.1 mm 与空气流道出口 1.3 mm 处, 下连接体是 SOFC 首先失效的构件。

3) 根据等效蠕变应变与损伤分析, SOFC 蠕变变形与损伤在运行初期迅速增大后基本保持不变。阳极、阴极、电解质蠕变损伤很小, 下连接体最先达到临界损伤值, 是潜在危险区域, 最容易发生失效。

4) 蠕变 50 000 h 后, 裂纹长度最大约为 1.6 mm , 位于下连接体空气流道入口 1.1 mm 与阴极材料交界处, 属于内裂纹, 非贯穿裂纹, 与 SOFC 结构的尺寸相比相对较小, 不会造成泄漏, 证明 SOFC 结构能满足 800°C 高温 40 000 h 长期运行的要求。

参考文献:

- [1] 蒋文春, 张玉财, 关学伟. 平板式 SOFC 钎焊自适应密封热应力与变形分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(11): 55–58, 116.
JIANG Wenchun, ZHANG Yucai, GUAN Xuewei. Trans Chin Weld Inst (in Chinese), 2012, 33(11): 55–58, 116.
- [2] FAN P F, LI G J, ZENG Y K, et al. Numerical study on thermal stresses of a planar solid oxide fuel cell[J]. Int J Therm Sci, 2014, 77(3): 1–10.
- [3] LAURENCIN J, MOREL B, BULTEL Y, et al. Thermo-mechanical model of solid oxide fuel cell fed with methane[J]. Fuel Cells, 2010, 6(1): 64–70.
- [4] CHOU Y S, STEVENSON J W, GOW R N. Novel alkaline earth silicate sealing glass for SOFC: Part II. Sealing and interfacial microstructure[J]. J Power Sources, 2007, 170(2): 395–400.
- [5] 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: 2–10.
- [6] LIU W N, SUN X, KHALEEL M A. Effect of creep of ferritic interconnect on long-term performance of solid oxide fuel cell stacks[J]. Fuel Cells, 2010, 10(4): 703–717.
- [7] JIANG W C, ZHANG Y C, LUO Y, et al. Creep analysis of solid oxide fuel cell with bonded compliant seal design[J]. J Power Sources, 2013, 243: 913–918.
- [8] JIANG W C, LUO Y, WEI Z Q, et al. Effect of tube radius on creep for an anode supported tubular solid oxide fuel cell: Experimental and finite element simulation[J]. Int J Hydrogen Energ, 2017, 42(36): 23198–23206.
- [9] GRECO F, FRANDSEN H L, NAKAJO A, et al. Modelling the impact of creep on the probability of failure of a solid oxide fuel cell stack[J]. J Eur Ceram Soc, 2014, 34(11): 2695–2704.
- [10] NAKAJO A, MUELLER F, BROUWER J, et al. Mechanical reliability and durability of SOFC stacks. Part II: Modelling of mechanical failures during ageing and cycling[J]. Int J Hydrogen Energ, 2012, 37(11): 9269–9286.
- [11] ZHANG Y C, LU M J, JIANG W C, et al. Effect of the geometrical size on time dependent failure probability of the solid oxide fuel cell[J]. Int J Hydrogen Energ, 2019, 44(21): 11033–11046.
- [12] WANG Y, JIANG W C, SONG M, et al. Effect of frame material on the creep of solid oxide fuel cell[J]. Int J Hydrogen Energ, 2019, 44(36): 20323–20335.
- [13] JIANG T L, CHEN M H. Thermal-stress analyses of an operating planar solid oxide fuel cell with the bonded compliant seal design[J]. Int J Hydrogen Energ, 2009, 34(19): 8223–8234.
- [14] AKHTAR N, DECENT S P, LOGHIN D, et al. A three-dimensional numerical model of a single-chamber solid oxide fuel cell[J]. Int J Hydrogen Energ, 2009, 34(20): 8645–8663.
- [15] 宋明, 王文慧, 杜传胜, 等. 平板式固体氧化物燃料电池的热机械行为[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(3): 476–482.
SONG Ming, WANG Wenhui, DU Chuansheng, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49 (3): 476–482.
- [16] XU M, LI T S, YANG M, et al. Modeling of an anode supported solid oxide fuel cell focusing on thermal stresses[J]. Int J Hydrogen Energ, 2016, 41(33): 14927–14940.
- [17] 汤水, 张茂贵, 贾明, 等. 固体氧化物燃料电池数值仿真模型的建立[J]. 中南大学学报, 2019, 50(11): 2633–2644.
TANG Shui, ZHANG Maogui, JIA Ming, et al. J Cent South Univ (in Chinese), 2019, 50 (11): 2633–2644.
- [18] WEN J F, TU S T, GAO X L, et al. Simulations of creep crack growth in 316 stainless steel using a novel creep-damage model[J]. Eng Fract Mech, 2013, 98: 169–184.
- [19] ZHANG Y C, ZHAO H Q, JIANG W C, et al. Time dependent failure probability estimation of the solid oxide fuel cell by a creep-damage related Weibull distribution model[J]. Int J Hydrogen Energ, 2018, 43: 13532–13542.
- [20] LUO Y, JIANG W C, ZHANG Q, et al. Effects of anode porosity on thermal stress and failure probability of planar solid oxide fuel cell with bonded compliant seal[J]. Int J Hydrogen Energ, 2016, 41(18): 7464–7474.
- [21] CHANG H T, LIN C K, LIU C K. Effects of crystallization on the high-temperature mechanical properties of a glass sealant for solid oxide fuel cell[J]. J Power Sources, 2010, 195(10): 3159–3165.
- [22] SAANOUNI K, CHABOCHE J L, BATHIAS C. On the creep crack growth prediction by a local approach[J]. Eng Fract Mech, 1986, 25(5): 677–691.