

2D SiC/SiC 复合材料电阻率对服役环境的响应特性

魏婷婷¹, 高希光², 宋迎东^{2,3}

(1. 航空工业金城南京机电液压工程研究中心, 南京 211106; 2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016; 3. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘要: 研究针对不同服役环境下 2D SiC/SiC 复合材料的电阻率特性进行了研究。从 1300 °C 降至室温的无氧环境中, 复合材料的电阻率随温度降低而增大; 借助曲线拟合, 建立了电阻率与温度之间的映射关系。在 1300 °C 空气中氧化 20 和 60 h 后, 由于 PyC 界面层和 SiC 基体的氧化, 复合材料的导电性显著降低; 以 SiO₂ 的含量定量表征氧化程度, 建立了电阻率与氧化损伤之间的映射关系。复合材料的电阻率和应力随应变的变化趋势相似, 电阻率变化率和刚度随应变的变化趋势相反。在线性阶段, 基体开裂数量极少, 刚度几乎不变, 电阻率缓慢增大; 在非线形阶段, 基体开裂数量增加较快, 造成刚度降低, 电阻率快速增大; 后半段的基体裂纹数量缓慢增多, 刚度和电阻率变化率趋于平稳。

关键词: 陶瓷基复合材料; 电学特性; 高温特性; 机械性能; 损伤力学

中图分类号: TB332 文献标志码: A

Response of 2D SiC/SiC Composites Resistivity to Service Environments

WEI Tingting¹, GAO Xiguang², SONG Yingdong^{2,3}

(1. AVIC Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211106, China; 2. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. State Key Laboratory of Mechanics and Control Mechanical Structures, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The resistivity characteristics of 2D SiC/SiC composites were studied experimentally. In the oxygen-free environment, the resistivity increases when temperature decreases. With curve fitting, the mapping relationship between resistivity and temperature is established. After oxidation at 1300 °C in the air for 20 and 60 h, the conductivity of composites is greatly reduced due to the oxidation of the PyC interface and the SiC matrix. The degree of oxidation was characterized by the content of SiO₂, and the quantitative relationship between resistivity and oxidative damage was obtained. The changes in resistivity and stress with strain are similar. In the linear segment of stress-strain curve, with few matrix cracks the stiffness is almost unchanged, and the resistivity increases slowly. In the

收稿日期: 2021-03-09; 收到修改稿日期: 2021-05-20; 网络出版日期: 2021-05-25

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0703200); 国家自然科学基金(51575261; 51675266); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

National Key Research and Development Program of China (2017YFB0703200); National Natural Science Foundation of China (51575261, 51675266); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

作者简介: 魏婷婷(1994-), 女, 硕士. E-mail: weitingtingd@163.com

WEI Tingting (1994-), female, Master. E-mail: weitingtingd@163.com

通信作者: 高希光, 教授. E-mail: gaoxiguang@nuaa.edu.cn

GAO Xiguang, professor. E-mail: gaoxiguang@nuaa.edu.cn

non-linear section, the resistivity rate and stiffness increase quickly because crack increases rapidly. They eventually stabilize when the increase in cracks slows down.

Key words: ceramic-matrix composites; electrical property; high-temperature property; mechanical property; damage mechanics

陶瓷基复合材料(Ceramic Matrix Composites, CMCs)具有极好的高温力学性能, 逐步成为未来高性能航空燃气涡轮发动机热端部件(如涡轮导向叶片、涡轮工作叶片和尾喷管调节片等)的重要候选材料, 并得到快速发展^[1-2]。在高温氧化环境下, 强烈的热应力以及水汽、氧等的侵蚀, 容易导致 CMCs 热端部件损坏^[3]。如果能够实时“感知” CMCs 构件的损伤状态, 则可基于不同时刻的损伤状态对寿命进行预测, 实现自诊断和自调节, 从而避免灾难性的构件失效和重大的经济损失。

碳化硅纤维增强陶瓷基复合材料具有导电性, 其电导率伴随损伤状况变化, 即具备损伤自检特性。电阻层析成像技术(Electrical Resistance Tomography, ERT)^[4]可基于成像目标表面的边界电压及重建算法重建二维或三维目标内部电阻率的空间分布图像, 直观表征内部损伤, 操作简便, 成本低廉, 在无损实时检测领域具有较大潜力^[5-6]。借助该技术, 有望实现航空发动机 CMCs 热端部件损伤的智能“感知”。然而, CMCs 的电阻率不仅与机械损伤相关, 还会受到温度、氧化等因素的耦合影响。因此, 为了将 ERT 应用于 CMCs 构件的高温燃气损伤检测, 需要研究材料的电阻率特性, 明确材料的电阻率与高温燃气损伤和典型机械损伤之间的映射关系。依据上述映射关系, 能够从材料电阻率分布间接推断 CMCs 构件的温度分布、氧化程度及机械损伤情况。

材料的电阻率特性一般借助电阻法来研究。电阻法是在向被测试件两端注入电流的同时, 测量两端的电压降, 以获得试验件平均电阻值的方法^[7]。目前, 已有很多利用复合材料自诊断特性结合电阻法揭示材料损伤机制的研究^[8-10]。杜双明等^[11-12]对 3D C/SiC 复合材料进行拉-拉疲劳试验, 以标距段电阻的变化分析碳纤维的损伤程度及破坏形式, 揭示了材料的疲劳损伤演化规律, 建立了电阻与疲劳周次的关系式。Xia 等^[13]建立了 2D SiC/SiC 复合材料的力-电耦合模型, 该模型将力学损伤与电阻相关联, 可准确预测材料的应力-应变曲线, 并由力学模型获得材料的变形、基体开裂与纤维断裂损伤信息, 获取加载过程中材料的损伤演化和电阻变化。Mei 等^[9]借助电阻法, 分析了处于湿氧气氛中 500~

1200 °C 热循环下 2D C/SiC 复合材料的损伤演化。Böhrk 等^[14]研究了 2D C/C-SiC 复合材料在室温至 1700 °C 范围内, 在拉伸应力最高达 120 MPa 的条件下, 电阻率与温度、应力的经验公式。Smith 等^[15-17]研究发现, 在高温蠕变状态下, 氧化反应生成的氧化物填充基体裂纹或孔洞, 促使电阻发生变化; 电阻的变化与基体裂纹的密度和深度密切相关; 利用包含基体开裂密度和应变参数的函数关系拟合了加/卸载循环过程中电阻的变化。Morscher 等^[18]在 SiC 基体中浸入导电性更高的 Si, 使电阻法对基体开裂更为敏感, 利用串/并联电阻组合电路模拟了横向基体裂纹和纤维/基体单元。由于纤维断裂和裂纹间距不均匀导致界面滑移, 该模型的电阻预测值会低于实际情况。

从以上 CMCs 电阻率特性的研究现状可以看出, 材料的电阻率特性通常是借助试验得到的变化曲线来定性确定, 少数借助力-电耦合模型实现定量预测。然而, 现有研究主要侧重于电阻在基体开裂、纤维断裂及氧化侵蚀等综合因素影响下的变化, 对于电阻与温度或氧化反应等各因素之间的独立映射关系研究甚少。此外, 材料的制备工艺和组分含量等不同, 其所具有的电阻率特性也存在一定差异。因此, 本研究对 2D SiC/SiC 复合材料的电阻率特性进行实验研究, 以确定材料电阻率与温度、氧化及机械损伤的关系特性。

1 实验方法

1.1 材料及试件

实验材料为 2D SiC/SiC 复合材料, 采用化学气相渗透工艺(CVI)制备, 厚度为 4~5 mm, 孔隙率约为 32%, 密度约为 1.9 g/cm³。复合材料中的界面层为热解炭(Pyrolytic Carbon, PyC), 基体为 SiC, 纤维为国产第二代 SiC 纤维。材料的微观结构如图 1 所示。由于编织工艺和化学气相渗透工艺的局限性, 材料内部孔隙较多。

利用扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线能谱分析(EDS)对 2D SiC/SiC 复合材料进行微观形态观察和元素面扫描分析, 结果如图 2 所示。2D SiC/SiC

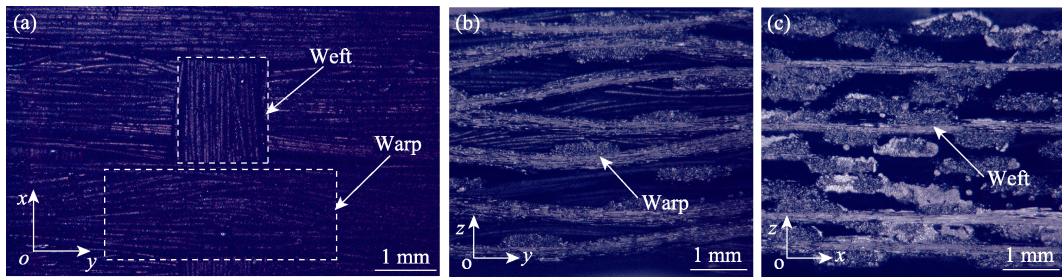


图 1 2D SiC/SiC 复合材料试验件的微观结构

Fig. 1 Microstructures of 2D SiC/SiC composites specimen

(a) Surfaces; (b) Side face; (c) Cross section

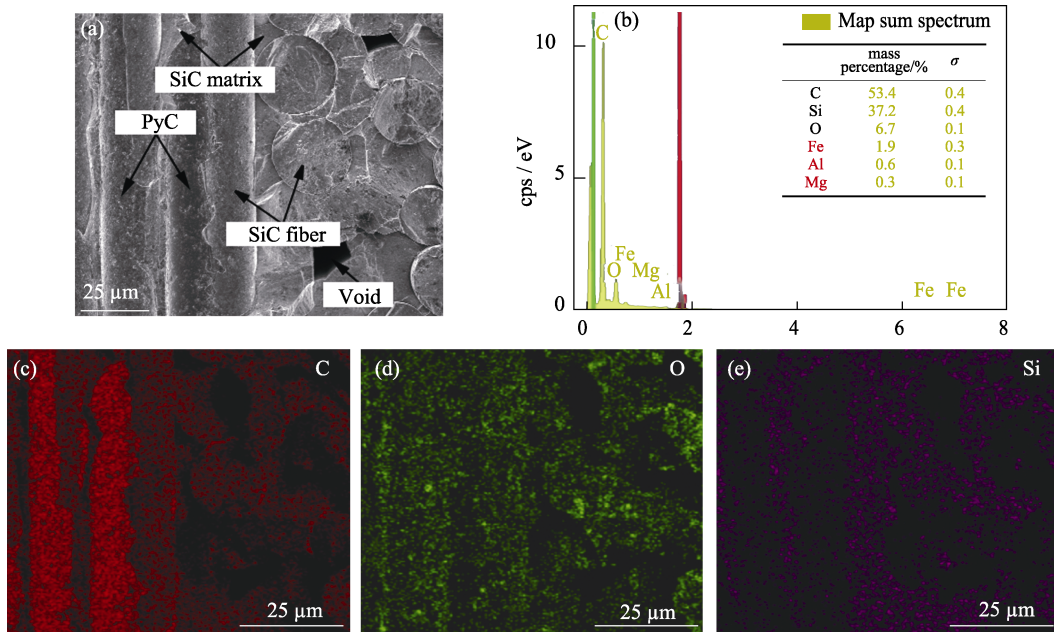


图 2 2D SiC/SiC 复合材料的 SEM 照片(a)和 EDS 元素占比分析结果(b); C 元素(c)、O 元素(d)及 Si 元素(e)的面扫描图

Fig. 2 SEM image (a) and EDS analysis (b) of the 2D SiC/SiC composites with surface scans of C (c), O (d) and Si (e)

复合材料中 O 元素含量极少, 而 C 元素的含量较高, 且主要分布在纤维与基体之间的 PyC 界面层中。SiC 基体分布在 SiC 纤维束内部和纤维束之间; 因此, 该材料的电阻率特性主要取决于 PyC 界面层和 SiC。PyC 作为碳素材料具有较高的电导率, SiC 属于化合物半导体, 具有负电阻率温度特性(电阻率的变化趋势与温度相反)、动态环状伏安特性^[19]以及非线性导电特性^[20], 其导电性还会随电场强度增强而迅速升高。由于半导体材料具有掺杂特性, 当 SiC 纤维中的游离碳或 PyC 界面层与 SiC 基体之间的有效接触面积较大时, 材料的导电性能会有所提高。

本实验共采用四个 2D SiC/SiC 复合材料样品, 编号、加热温度、加热时间和尺寸见表 1。其中, 样品 T1 用于研究材料电阻率与温度之间的独立映射关系; 样品 T2 和 T3 用于研究材料电阻率与氧化损伤之间的关系; 样品 T4 用于研究材料电阻率与机械损伤之间的关系。

表 1 2D SiC/SiC 复合材料样品

Table 1 Details of the 2D SiC/SiC composites specimens

| Number | Temperature/°C | Holding time/h | Dimension/mm |
|--------|----------------|----------------|--------------|
| T1 | 1300 | — | 120×8 |
| T2 | 1300 | 20 | 60×8 |
| T3 | 1300 | 60 | 60×8 |
| T4 | — | — | 120×12 |

1.2 实验系统及方法

实验装置主要包括高温惰性气体环境箱、管式炉(TCW-32B)、MTS 试验机以及电阻测试仪(App-lent AT512)。针对不同实验目的, 所采用的实验系统及实验方法如下:

(1) 电阻率与温度的关系

实验系统主要由惰性气体环境箱、高温炉、冷水机和电阻测试仪组成, 高温惰性气体环境箱如图 3 所示。为了排出环境箱中的氧气, 利用高真空机组抽真空, 随后充入氩气并密闭。高温炉的加热

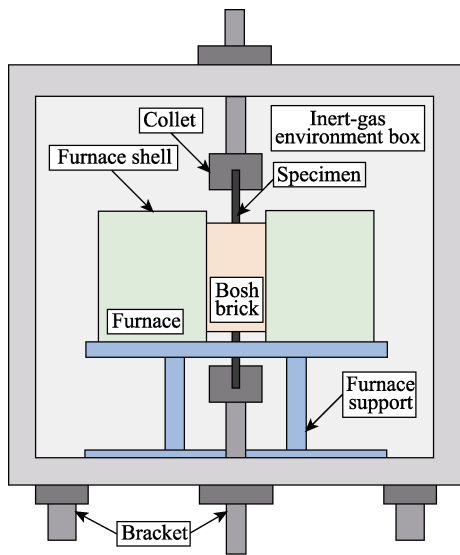


图 3 高温惰性气体环境箱示意图

Fig. 3 Diagram of the high-temperature system under inert gas environment

方式为电加热, 产生的外加电磁场会影响半导体材料直流电阻的测量^[21], 因此, 为防止电磁干扰, 只在高温炉停止工作的降温过程中测量 2D SiC/SiC 复合材料的电阻。实验前, 用银粉导电胶将铜导线粘结在试验件的两端, 待导电银胶固化后, 利用耐高温绝缘胶带包裹试验件两端的夹持区, 确保试验件与夹头之间电绝缘。实验中, 借助冷水机的水循环冷却夹头、高温炉炉壳以及环境箱。利用高温炉的温度控制器以及电阻测试仪实时记录材料在降温过程中的温度值和电阻值。

(2)电阻率与氧化损伤的关系

实验系统包括管式炉和电阻测试仪。试验中, 管式炉不密闭, 使试验件在有氧环境中充分氧化。采用氧化铝坩埚盛放试验件, 随后将坩埚推入管式炉的炉管内, 管式炉的工艺曲线包括升温段、恒温段和降温段。当温度恒定不变时, 材料的氧化程度主要取决于氧化时间, 因此, 通过改变恒温段的时间来控制试验件的氧化程度。待试验件恢复到室温后, 用导电银胶将铜导线固定在试验件的两端。待导电银胶固化后, 利用电阻测试仪测量试验件的电阻值。

(3)电阻率与机械损伤的关系

实验系统如图 4 所示, 主要包括 MTS Landmark 电液伺服试验机、25 mm 标距 MTS 引伸计以及电阻测试仪。样品 T4 为狗骨状, 形状如图 5 所示。实验前, 将铜导线缠绕在样品标距段的两端, 并在导线上涂覆导电银胶以固定; 用砂纸打磨铝制加强片的上下表面, 防止加载时脱粘; 用环氧 AB 胶将铝制加强片粘结在样品的夹持区, 防止材料被试验机的夹头损坏。采用位移控制模式, 利用 MTS 试验机对

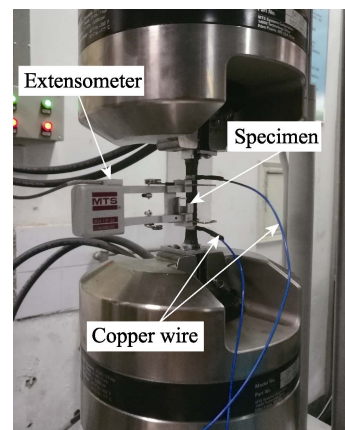


图 4 2D SiC/SiC 复合材料样品的单向拉伸试验装置

Fig. 4 Equipment of uniaxial tensile experiment of 2D SiC/SiC composites specimen

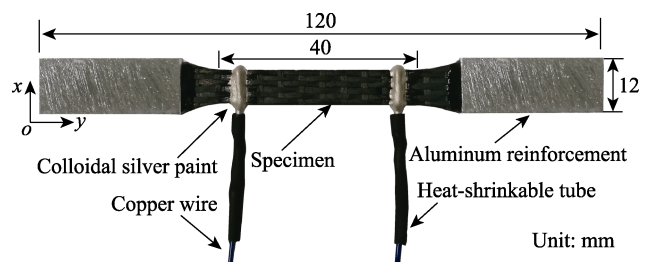


图 5 2D SiC/SiC 复合材料单向拉伸样品

Fig. 5 2D SiC/SiC composites specimen

样品进行单向静拉伸试验, 加载速度为 0.05 mm/min; 试验中, 利用电阻测试仪和 MTS 引伸计等实时记录材料在静载作用下的电阻值和应力-应变曲线。

2 结果与讨论

2.1 电阻率与温度的关系

材料的电阻率与温度的关系如图 6 所示。随着温度下降, 材料的电阻率不断升高, 待温度降至室温时, 电阻率相比降温前增长约 49.7%。采用三阶多

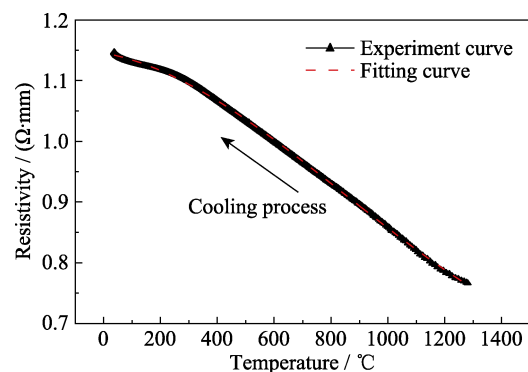


图 6 2D SiC/SiC 复合材料电阻率与温度的关系曲线

Fig. 6 Resistivity-temperature response of the 2D SiC/SiC composites

项式拟合电阻率 ρ 与温度 T 之间的关系, $\rho = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3$, 各系数的值为 $a_0 = 1.1454$, $a_1 = -8.09246 \times 10^{-5}$, $a_2 = -3.42581 \times 10^{-7}$, $a_3 = 1.35043 \times 10^{-10}$, 由此, 建立了 2D SiC/SiC 复合材料的电阻率与温度之间的独立映射关系, 利用该关系式, 可间接测量材料在一定电阻率分布下的温度分布情况。

由于 SiC 具有负电阻率温度特性, 2D SiC/SiC 复合材料也呈现出电阻率随温度降低而增加的趋势。当温度上升时, 由于热激发, SiC 半导体中的电子-空穴对增多, 宏观载流子密度增大, 导致电阻率降低, 导电性增强; 反之, 当温度下降时, 材料的导电性也随之降低。由于热胀冷缩效应, SiC 微粒尺寸在降温过程中减小, 晶界相应增多, 导致电子和空穴运动受阻^[22], 使得电阻率进一步增大。此外, PyC 界面层实质为一种气相沉积碳, 其体积电阻率随温度升高而下降^[23], 这与材料整体电阻率随温度变化的趋势相同。

2.2 电阻率与氧化损伤的关系

2D SiC/SiC 复合材料经历数十个小时的高温氧化过程后, 其光学显微形貌如图 7 所示。由于 SiC 氧化生成 SiO₂ 薄膜层, 样品的表面和侧面均呈现明显的光泽感。

利用扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)分析样品 T3 横截面上的微观形态和元素分布, 结果如图 8 所示。由于长时间处于高温有氧环境中, SiC 纤维表面

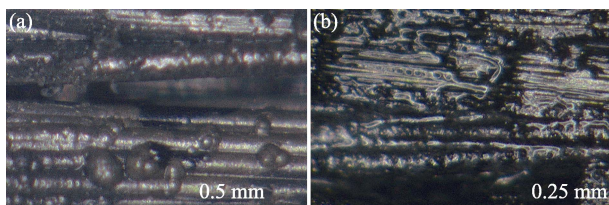


图 7 氧化后 2D SiC/SiC 复合材料表面和侧面的微观形貌
Fig. 7 Microstructures of the 2D SiC/SiC composites specimen after oxidation
(a) Surface; (b) Side face

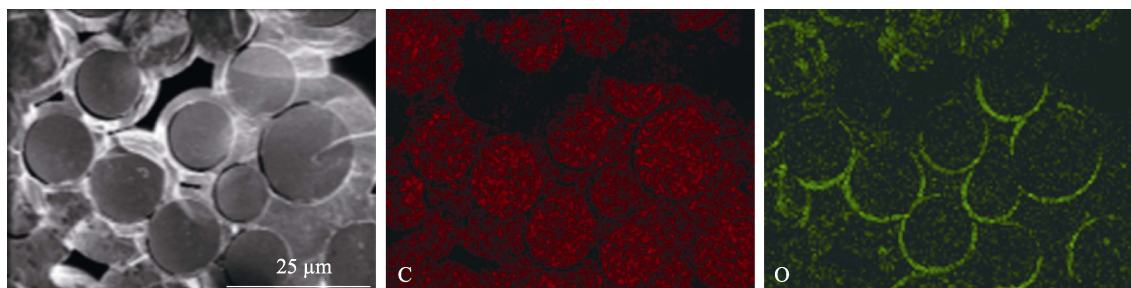


图 8 氧化后 2D SiC/SiC 复合材料横截面的 SEM 照片和 EDS 元素面分析结果
Fig. 8 SEM image and EDS analysis of the cross-section of the 2D SiC/SiC composites specimen after oxidation

的 PyC 界面层几乎全部氧化, 生成 CO 或 CO₂ 逸出。界面相消失使 O₂ 进一步向纤维渗透, 氧化纤维表面。

利用 X 射线衍射(XRD)确定材料中氧化产物 SiO₂ 的含量, 以研磨 2D SiC/SiC 复合材料得到的粉末为测试样品。2D SiC/SiC 复合材料样品的电阻率与 SiO₂ 含量的关系如图 9 所示, 氧化时间越长, 材料的氧化现象越明显, 氧化产物 SiO₂ 的含量越高, 材料电阻率越大。

本实验所用 2D SiC/SiC 复合材料中纤维和基体均为多晶 SiC, 是由众多取向各异的微小单晶粒无序堆积而成, 内部结构松散, 存在大量晶界, O₂ 更易扩散进入材料内部^[24], 导致氧化加重。由于制备工艺的局限性, 基体或界面层很难致密化, 材料内部存在大量孔隙; 沉积时的热应力还会造成基体开裂。此外, 由于 PyC 界面层与 SiC 基体的结合较弱, 两者在热应力作用下容易发生脱粘, 形成孔隙, 孔隙和微观裂纹不但改变了材料的导电通路, 而且加剧 O₂ 扩散至材料内部氧化。由于碳具有较高的导电性, 当 PyC 界面层或 SiC 纤维中的游离碳与渗入的 O₂ 发生反应后, 材料的导电性显著降低。SiC 基体的氧化产物为近似电绝缘的 SiO₂ 薄膜层, 这也使材料的电阻率进一步升高。

2.3 电阻率与机械损伤的关系

样品 T4 的电阻率和应力随应变的变化关系如图 10 所示, 电阻率相比试验前增长约 24.15%。由于损伤的产生和累积, 材料的力学响应表现出明显的非线性, 而电阻率和应力随应变的变化趋势相似。

样品 T4 的刚度及电阻率变化率与应变的关系如图 11 所示, 两者的变化趋势大致相反。刚度 E_e 为相对于应力初始值 σ_0 和应变初始值 ε_0 的割线刚度, $E_e = (\sigma - \sigma_0) / (\varepsilon - \varepsilon_0)$; 电阻率变化率 ρ_e 的定义式与割线刚度相似, 为 $\rho_e = (\rho - \rho_0) / (\varepsilon - \varepsilon_0)$, ρ_0 为电阻率初值。基体开裂是 2D SiC/SiC 复合材料的主要损伤形式, 在应力水平较低时基体裂纹密度增长缓慢; 随着应力

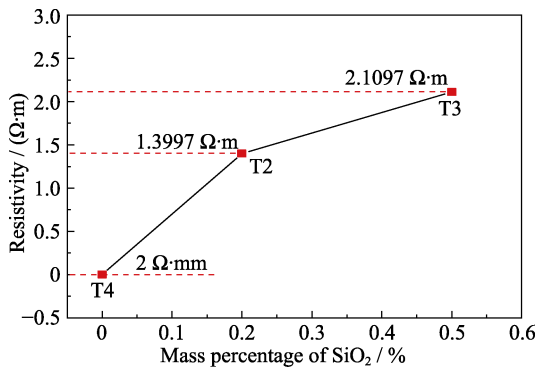


图 9 2D SiC/SiC 复合材料电阻率与 SiO₂ 含量的关系曲线
Fig. 9 Relationship between resistivity and SiO₂ content of the 2D SiC/SiC composites

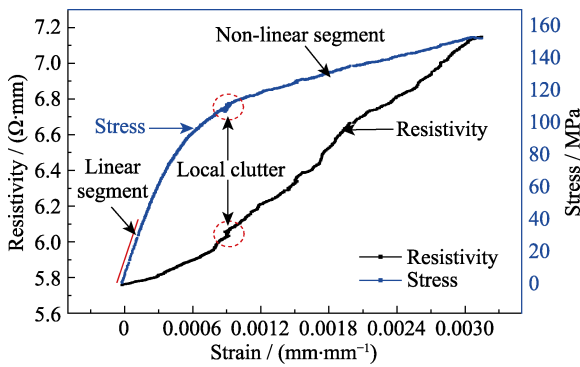


图 10 2D SiC/SiC 复合材料电阻率与应力-应变的关系曲线
Fig. 10 Response of resistivity and stress to strain of the 2D SiC/SiC composites

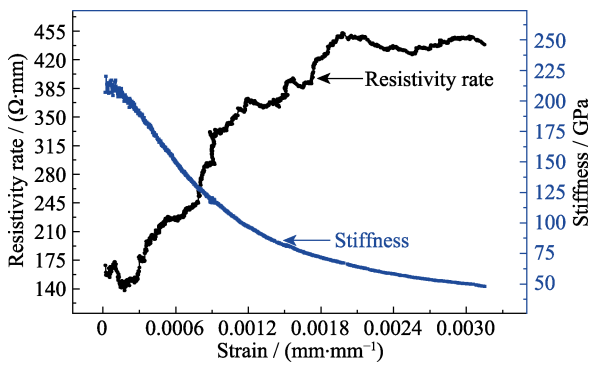


图 11 2D SiC/SiC 复合材料的电阻率变化率和刚度与应变的关系曲线
Fig. 11 Response of resistivity-rate and stiffness to strain of the 2D SiC/SiC composites

水平的增大, 裂纹数量急剧增加, 最终趋于饱和^[25]。线性段的基体开裂数量极少, 因此刚度几乎不变, 电阻率增加缓慢; 非线性段的基体开裂数量增加较快, 造成刚度降低, 电阻率快速增加; 在后半段, 基体裂纹数量增长变慢, 刚度和电阻率变化率趋于平稳。

如图 12 所示, 样品的断口位于标距段与夹持段之间, 断裂区域存在明显的纤维拔出、基体开裂以

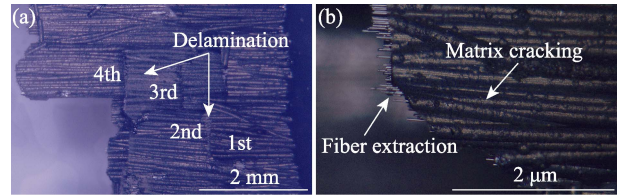


图 12 2D SiC/SiC 复合材料的断口形貌
Fig. 12 Fracture micromorphologies of the 2D SiC/SiC composites specimen

及分层。在图 10 中的虚线圆圈位置处, 应力曲线变得杂乱, 并伴有短暂的脆断声, 这可能是由于样品中某一位置处的纤维束发生了断裂, 造成应力、应变的短暂下降; 纤维发生断裂使同一时刻的电阻率曲线也出现了相似的杂乱区域。可见, 电阻率与 2D SiC/SiC 复合材料的机械损伤密切相关, 能够揭示损伤的演化过程。

3 结论

研究了 2D SiC/SiC 复合材料的电阻率特性, 并对材料电阻率与温度、氧化程度、机械损伤之间的实验数据进行分析, 得出如下结论:

1) 在无氧环境, 从 1300 °C 降至室温的过程中, 2D SiC/SiC 复合材料的电阻率随温度的降低而增大; SiC 半导体材料的负电阻率温度特性使 2D SiC/SiC 复合材料也呈现电阻率随温度降低而增加的现象。借助曲线拟合, 建立材料电阻率与温度之间的独立映射关系。

2) 2D SiC/SiC 复合材料在 1300 °C 空气环境中氧化 20 和 60 h 后, 由于 PyC 界面层和 SiC 基体的氧化, 材料的导电性显著降低; 借助 XRD, 以主要氧化产物 SiO₂ 的含量定量表征氧化程度, 建立了材料电阻率与氧化损伤之间的映射关系。

3) 2D SiC/SiC 复合材料在单向拉伸试验过程中, 材料的刚度和电阻率变化率随应变的变化趋势相反。线性段的基体开裂数量极少, 刚度几乎不变, 电阻率增加缓慢; 非线性段的基体开裂数量增加较快, 造成刚度降低, 电阻率快速增加; 在后半段, 基体裂纹数量增加变慢, 刚度和电阻率变化率趋于平稳。

参考文献:

[1] EATON H E, LINSEY G D, MORE K L, *et al.* EBC Protection of SiC/SiC Composites in the Gas Turbine Combustion Environment. ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air, Munich, Germany, 2000: 18–22.
[2] MISRA A K. Development of Advanced Engine Materials in NASA Ultra Efficient Engine Technology Program. 15th International Symposium on Air Breathing Engines Conference, 2001.

- [3] UPADHYA K Y, YANG J M, HOFFMAN W P. Materials for ultrahigh temperature structural applications. *American Ceramic Society Bulletin*, 1997, **76(12)**: 51–56.
- [4] CHENEY M, ISAACSON D, NEWELL J C. Electrical impedance tomography. *Der Anaesthetist*, 1999, **41(1)**: 85–101.
- [5] SCHUELER R, JOSHI S P, SCHULTE K. Damage detection in CFRP by electrical conductivity mapping. *Composites Science & Technology*, 2001, **61(6)**: 921–930.
- [6] GAO X G, WEI T T, DONG H N, *et al.* Damage detection in 2.5D C/SiC composites using electrical resistance tomography. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, **39(13)**: 3583–3593.
- [7] MAYER J. *Electronic Materials Science: for Integrated Circuits in Si and GaAs*. New York, USA: Macmillan, 1990.
- [8] FANKHÄNEL B, MÜLLER E, MOSLER U, *et al.* SiC-fibre reinforced glasses—electrical properties and their application. *Journal of the European Ceramic Society*, 2001, **21(5)**: 649–657.
- [9] MEI H, CHENG L. Damage analysis of 2D C/SiC composites subjected to thermal cycling in oxidizing environments by mechanical and electrical characterization. *Materials Letters*, 2005, **59(26)**: 3246–3251.
- [10] SMITH C, MORSCHER G N, XIA Z. Electrical Resistance as a NDE Technique to Monitor Processing and Damage Accumulation in SiC/SiC Composites. 32nd Annual Conference on Composites, Materials, and Structures, Daytona Beach, FL, 2008.
- [11] 杜双明, 乔生儒, 纪岗昌, 等. 3D-C/SiC 复合材料拉-拉疲劳模量和电阻的变化. *宇航材料工艺*, 2002, **32(5)**: 39–41.
- [12] 杜双明, 乔生儒. 基于电阻变化的 3DC/SiC 复合材料疲劳损伤演化. *复合材料学报*, 2011, **28(2)**: 165–169.
- [13] XIA Z, SUJIDKUL T, NIU J, *et al.* Modeling of electromechanical behavior of woven SiC/SiC composites. *Composites Part A Applied Science & Manufacturing*, 2012, **43(10)**: 1730–1737.
- [14] BÖHRK H, LESCHINSKI P, REIMER T. Electrical resistivity measurement of carbon-fiber-reinforced ceramic matrix composite under thermo-mechanical load. *Composites Science & Technology*, 2013, **76(4)**: 1–7.
- [15] SMITH C, XIA Z, GYEKENYESI A. Electrical Resistance of SiC/SiC Ceramic Matrix Composites for Damage Detection and Life-prediction. 33rd International Conference on Advanced Ceramics and Composites, Daytona Beach, FL, 2009.
- [16] SMITH C E, MORSCHER G N, XIA Z. Electrical resistance as a nondestructive evaluation technique for SiC/SiC ceramic matrix composites under creep-rupture loading. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2011, **8(2)**: 298–307.
- [17] SMITH C E, MORSCHER G N, XIA Z H. Monitoring damage accumulation in ceramic matrix composites using electrical resistivity. *Scripta Materialia*, 2008, **59(4)**: 463–466.
- [18] MORSCHER G N, BAKER C, SMITH C. Electrical resistance of SiC fiber reinforced SiC/Si matrix composites at room temperature during tensile testing. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2014, **11(2)**: 263–272.
- [19] 贺西民. 碳化硅非线性电阻导电机理. *电瓷避雷器*, 1992(6): 47–49.
- [20] 郭磊, 宁叔帆, 于开坤, 等. 碳化硅非线性导电特性的研究进展. *绝缘材料*, 2005, **38(3)**: 60–64.
- [21] 付海涛, 覃国茂, 俞启建. 磁场干扰对测量线圈直流电阻的影响实例与分析. *水电站机电技术*, 2011, **34(1)**: 22–23.
- [22] 吕振林, 熊流锋, 黄清伟, 等. 工艺参数对反应烧结碳化硅导电性的影响. *西安交通大学学报*, 1998(12): 70–72.
- [23] 王钧, 杨小利, 刘东, 等. 碳纤维增强复合材料电阻率-温度特性研究. *武汉理工大学学报*, 2001(12): 5–8.
- [24] 李跃进, 杨银堂. 多晶碳化硅的氧化技术研究. *功能材料*, 2000, **31(2)**: 142–143.
- [25] 张盛. 编织陶瓷基复合材料力学行为的多尺度分析. 南京: 南京航空航天大学博士学位论文, 2018.