

基于微孔隙率作为损伤指标的陶瓷基复合材料

循环热冲击引起的各向异性损伤

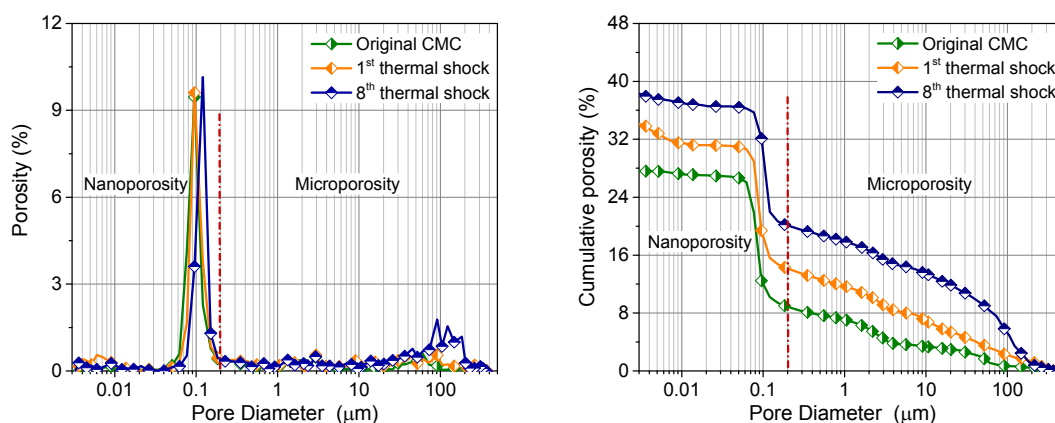
杨正茂¹, 袁 荒²

(1.中国科学院力学研究所, 北京 100190;

2. 清华大学航天航空学院, 北京 100089)

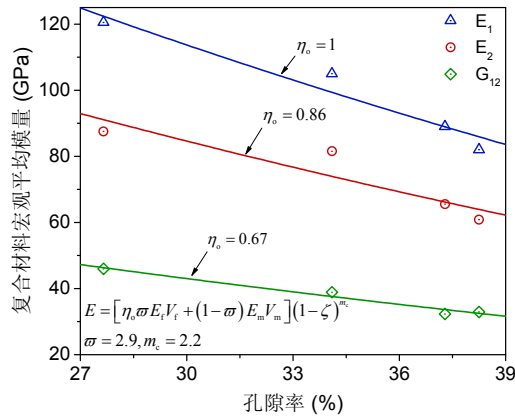
摘要: 针对先进航空发动机/可重复使用运载系统等新型航天飞行器结构承热结构/热防护材料开展工作。氧化物/氧化物陶瓷基复合材料 (Oxide/Oxide Ceramic Matrix Composites, Ox/Ox CMC) 由于且耐高温、抗氧化和高比强度材料而备受关注。然而, 该材料导热系数低, 耐高温, 对热冲击的敏感性高, 在瞬态温度条件下评估 Ox/Ox CMC 结构完整性成为其应用的一个重要研究课题。

本文以选定的工艺路线的二维编织 Ox/Ox CMC 为研究对象, 在编织工艺分析的基础上, 从微观到宏观层次, 研究了循环热冲击下 Ox/Ox CMC 的热机械损伤与热冲击后 Ox/Ox CMC 的损伤力学行为。借助扫描电镜(SEM)和压汞法研究不同热冲击温度及不同累计循环周次下 CMC 的损伤形式, 损伤萌生与演化情况, 定量表征下 Ox/Ox CMC 在不同热冲击温度及不同累计循环周次下 CMC 微观结构的演化规律, 获得定量描述孔隙分布与演化的参数。实验结果表明, 基体裂纹密度随着累积循环次数的增加而增加, 最终趋于稳定饱和状态, 并证实了材料的微孔隙率是材料裂纹密度增加的宏观体现。



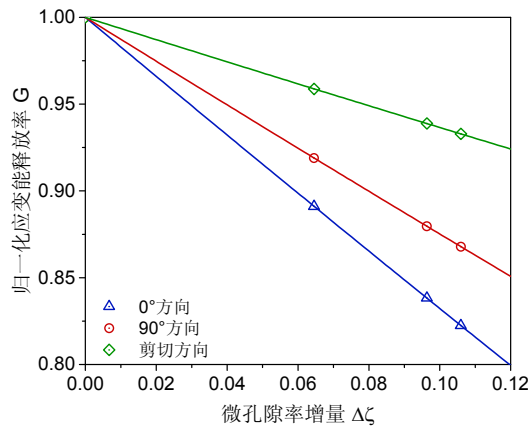
通过压汞法测定的循环热冲击前后氧化物/氧化物 CMC 孔隙率及孔径分布

基于详细的实验分析与研究, 提出多层次孔隙的概念描述材料中两种不同尺度的孔隙对材料基体和纤维束力学性能的影响, 基于 Voigt 混合律模型, 建立了考虑多层次孔隙率影响的多孔基体 CMC 有效模量预测模型。



氧化物/氧化物 CMC 的弹性模量和剪切模量随孔隙率 ζ 的变化.

提出由微孔隙率增量作为损伤变量来描述 Ox/Ox CMC 的各向异性损伤，并结合断裂力学方法，建立了 Ox/Ox CMC 微孔隙率增量与相应状态下材料应变能释放率之间的关系。



应变能量密度释放率 G 和材料经历循环热冲击后的 $\Delta\zeta$ 的关系

最终，通过数值模拟不同状态的微孔隙率对材料宏观弹性模量的预测，验证了所提模型的合理性。

杨正茂，中国科学院力学研究所，助理研究员；主要研究方向为：复合材料的本构理论研究、疲劳损伤模型、疲劳寿命评估方法。邮箱：zmyang@imech.ac.cn

袁荒，清华大学航天航空学院，教授；从事航空发动机设计、热结构温度、结构耐久性和完整性、材料本构模型、非线性算法等领域的基础理论及应用技术研究。