

题目：基于流-固-热耦合计算的 2.5D 编织陶瓷基复合材料 叶片强度与疲劳分析

1. 问题描述

在纪念中国人民抗日战争暨世界反法西斯战争胜利 80 周年的盛大阅兵式上，由空警-500A 预警机、歼-20 隐身战斗机、歼-35 舰载机以及运-20 大型运输机等 125 架先进战机组成的空中梯队，以磅礴之势飞越天安门广场，集中展示了我国航空工业体系化、跨越式发展的辉煌成就。这些“大国重器”的诞生，其核心驱动力之一正是航空发动机技术的不断突破。然而，随着航空发动机推重比向 10-12 甚至更高水平迈进，涡轮前温度的需求已远超传统镍基高温合金的承温极限（约 1100 °C），成为制约下一代航空动力发展的瓶颈。在此背景下，陶瓷基复合材料（CMC）因具备优异的耐高温性能和高比强度，近年来被广泛应用于航空发动机热端部件中，如图 2 所示。其中，2.5D 编织 CMC 叶片凭借其独特的纤维增强架构和抗分层特性，成为提升涡轮部件服役寿命的关键候选材料。



图 1 纪念中国人民抗日战争暨世界反法西斯战争胜利 80 周年大会现场图片

为了深入分析 2.5D 编织 CMC 叶片在复杂服役载荷下的性能，可将细观损伤模型引入宏观尺度叶片分析中，对其在离心力、气动力与热载荷耦合作用下的损伤演化与疲劳寿命进行预测。旨在通过多尺度建模方法，实现从细观代表性体积单元（RVE）到宏观叶片的损伤参数传递，并评估涡轮叶片关键危险区域的失效风险。

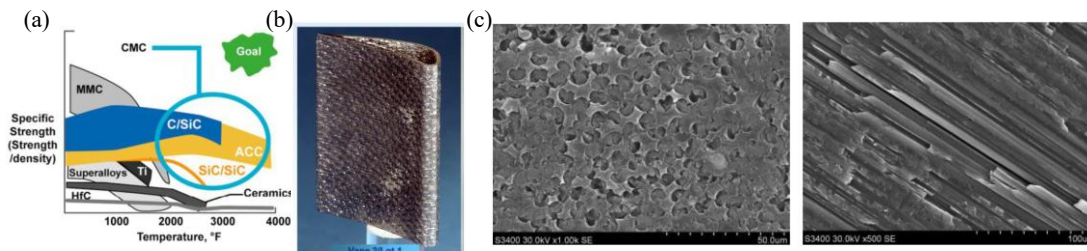


图 2 a. 各类材料耐温程度以及比强度特性示意图。b. 陶瓷基涡轮导向器叶片。
c. 单向纤维增韧材料内部结构电镜照片

2. 模型与参数

- **宏观叶片模型:** 参考如图 3 所示涡轮叶片建立叶片模型 (叶高约 100 mm, 底部长度约 50 mm, 底部宽度约 25 mm, 叶根固定约束, 可适当简化模型);

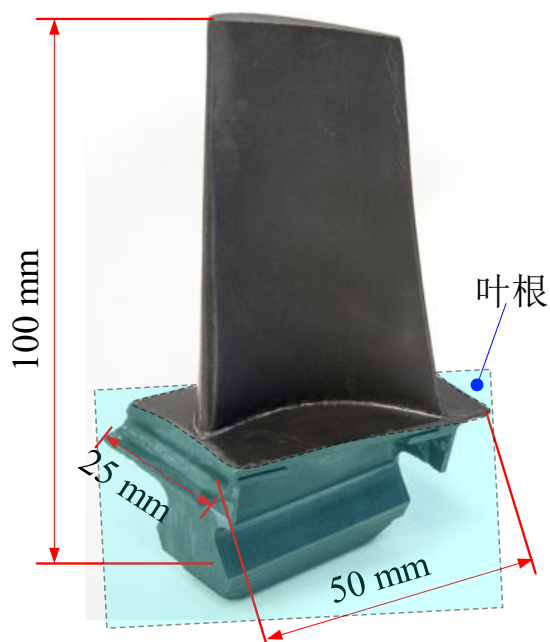


图 3 涡轮叶片示意图

- **多尺度关联:** 如图 4 为 2.5D 编织 SiC 复合材料编织结构示意图细观 RVE 损伤起始准则 (提供的材料参数表 1 仅供参考, 若需更多性能, 可自行查阅文献);

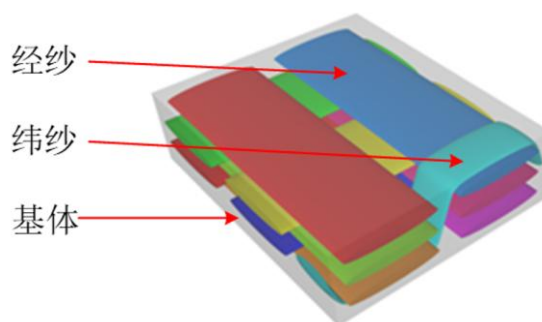


图 4 2.5D 编织 SiC 复合材料编织结构示意图^[4]

- **载荷条件:** 1. 离心载荷: 叶片整体施加转速为 15000 rpm 离心力; 2. 气动载荷: 15000 rpm 条件下的气动力 (其他条件参考真实涡轮叶片运行环境); 3. 温度场: 参考真实涡轮叶片温度分布 (梯度分布, 可自行查阅文献^[4]), 其中叶身温度最高处设为 1200 °C。

表 1 材料参数^[1-3]

材料参数	纤维束	基体
E11/GPa	339	350
E22/GPa	278	350
E33/GPa	278	350
V12	0.14	0.25
V13	0.14	0.25
V23	0.18	0.25
G12/GPa	115	145.8
G13/GPa	115	145.8
G23/GPa	115	145.8
K11	~5.0	~8.0
K22	~0.8	~8.0
K33	~0.8	~8.0
XT/MPa	2500	350
XC/MPa	1800	3500
YT/MPa	~2000	350
YC/MPa	~1000	3500

3. 计算要求

1. 请通过给出的纤维束和基体的材料参数，通过均匀化等方法获取宏观涡轮叶片等效材料性能参数；
2. 基于第 1 问计算所得宏观涡轮叶片等效材料性能参数作为输入，采用热-流-固耦合方法计算陶瓷基复合材料涡轮叶片在上述离心-气动-热载荷下的应力分布，识别危险点；
3. 将 2.5D 编织陶瓷基复合材料涡轮叶片危险点应力状态映射至细观 RVE 模型，分析细观损伤类型；
4. 选择合适的剩余刚度和剩余强度模型，结合第 2 问中的损伤准则，计算 2.5D 编织陶瓷基复合材料涡轮叶片在不同应力水平下的疲劳寿命。

参考文献

- [1] 杨成鹏, 郑茹悦, 贾斐. 2D-C/SiC 复合材料热传导系数演化模型[J]. 复合材料学报, 1-11 [2025-10-10]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250528.003>.
- [2] 屠泽灿. 陶瓷基复合材料导热机理及其在气冷涡轮叶片热分析中的应用研究[D]. 南京航空航天大学.
- [3] 陈明明. 平纹陶瓷基复合材料力学行为多尺度模型研究[D]. 上海交通大学, 2019.
- [4] N. Siddgonde, A. Ghosh, Thermo-mechanical modeling of C/C 3D orthogonal and angle interlock woven fabric composites in high temperature environment, Mech. Mater. 148 (2020) 1-14.

(注: 上述信息仅供参考, 更多信息和资料请自行查找)