



第十届内燃机可靠性技术国际研讨会

内燃机活塞用轻质耐高温碳陶复合材料

Lightweight and high temperature resistant carbon-ceramic composites for internal combustion engine pistons

罗瑞盈 罗浩

北京航空航天大学

前沿科学技术创新研究院-先进材料分院

电 话: 010-82338267, 13911726099

Email: ryluo@buaa.edu.cn

地 址: 北京航空航天大学凝聚态物理与材料物理研究中心 (非晶态楼)

主要内容



北航高温复合材料团队介绍



研究背景



内燃机活塞用碳陶复合材料



碳陶复合材料活塞制备关键问题

关键问题一：预制体结构设计

关键问题二：高性能界面和基体调控

关键问题三：复杂曲面结构控形控性技术

关键问题四：隔热防氧涂层技术

一、北航高温复合材料团队介绍



□ 高温复合材料团队主要人员



徐惠彬
北航校长、院士



宫声凯
院士



罗瑞盈
教授



马朝利
教授



郭洪波
教授



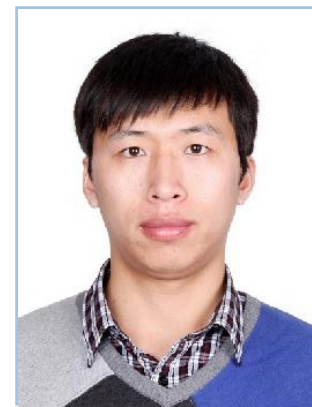
王连毅 青年教师



茹毅 青年教师



何健 青年教师



郑瑞晓 青年教师



李露 青年教师

一、北航高温复合材料团队介绍



□ 拥有的创新平台

- 航空发动机气动热力国防科技重点实验室
- 先进高温材料技术国防科技创新团队
- 高温结构材料技术工信部重点实验室
- 空天先进材料与服役教育部重点实验室
- 国防科工局高性能纤维与复合材料评价中心
- 2011计划“先进航空发动机协同创新中心”结构完整性与可靠性创新团队
- 超温服役环境金属材料国家自然科学基金创新群体人才团队

一、北航高温复合材料团队介绍



□ 主要研究方向

长期从事高性能高温复合材料体系设计、预制体结构设计
设计与成型、致密化、加工、热防护涂层和材料性能
评价等理论与工程化研究工作

一、北航高温复合材料团队介绍



上级领导的关怀



时任国务院副总理马凯、时任工信部部长苗圩和现任工信部部长肖亚庆视察

一、北航高温复合材料团队介绍



上级领导的关怀

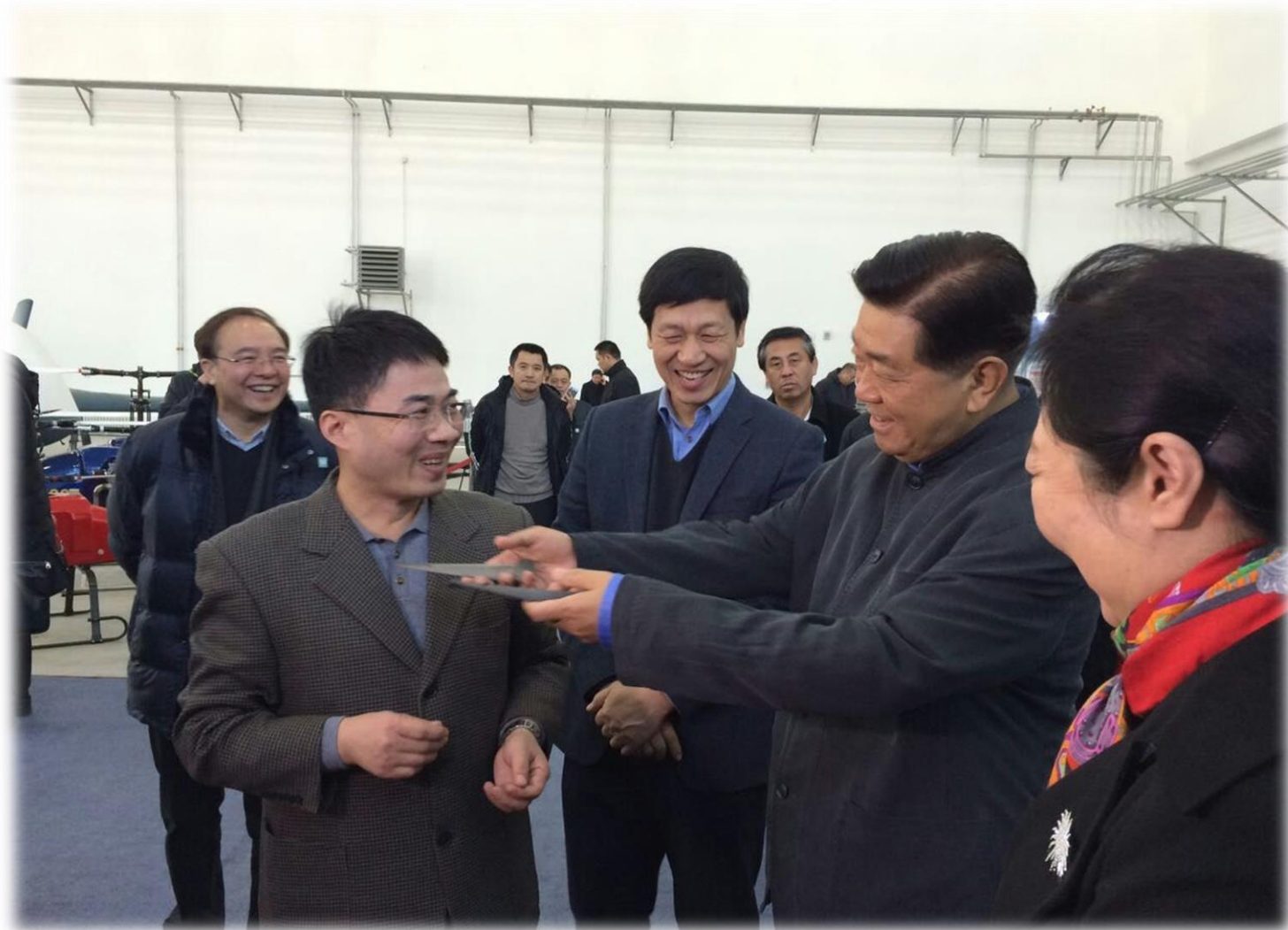


工信部肖亚庆部长在北航曹淑敏书记和校长徐慧彬院士陪同下考察

一、北航高温复合材料团队介绍



上级领导的关怀



前中央政治局常委、全国政协主席贾庆林同志视察

一、北航高温复合材料团队介绍



上级领导的关怀



中国航发集团董事长曹建国院士和陈懋章院士视察指导

一、北航高温复合材料团队介绍



上级领导的关怀



北京市副市长隋振江和工程院张军院士视察指导

一、北航高温复合材料团队介绍

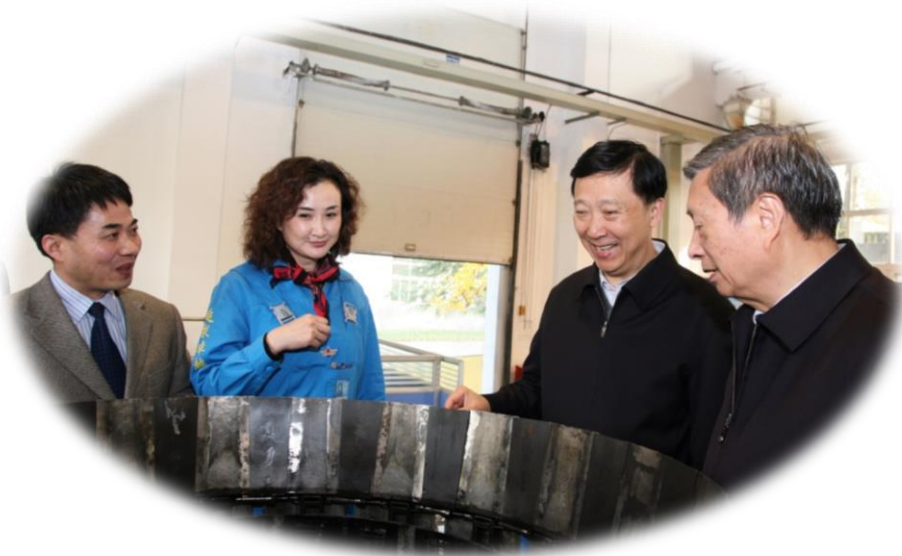


院
士
的
关
怀
指
导



北京航空航天大学校长徐惠彬院士指导

一、北航高温复合材料团队介绍



中国航发副总经理向巧院士和著名航空发动机专家刘大响院士指导

中国工程院院士、西北核技术研究所副总工程师、科技委副主任欧阳晓平指导



二、研究背景



➤ 内燃机的发展对活塞性能提出更高要求

内燃机油耗和排放标准的提高，使得活塞服役环境更为苛刻，
对性能提出了更高的要求

节能减排技术

- 轻量化设计
- 清洁燃料
- 燃料喷射
- 废气再循环
- 提高燃烧压力
- 尾气后处理



活塞性能要求

- 质量 **更轻**
- 高温机械强度 **更高**
- 抗疲劳性能 **更好**

活塞现状

研究表明，内燃机故障**70%以上**与活塞燃烧室承受温度能力有关；

- 铝合金活塞，**高温机械强度衰减严重**。

**传统金属活塞很难满足内燃机发展需求，
迫切需要开发新型轻质、耐高温活塞技术**

二、研究背景



碳陶复合材料密度小（仅为钢材料的1/3~1/4），减重显著，耐热温度高达1350℃以上，无需冷却。

活塞材料	密度 (g/cm ³)	极限工作温度 (°C)	特点
铸造铝合金 (M124)	2.68	350	耐温性能差
铸铁	7.2	460	密度大
钢 (38MnVS6)	7.78	550	密度大

**碳陶复合材料耐温极高，减重显著，在新一代
内燃机活塞技术领域应用前景广阔**

三、内燃机活塞用碳陶复合材料



➤ 组成及特点

以碳纤维为增强体，碳与陶瓷成分为基体的一种新型复合材料

由**增强纤维**、**界面层**、**基体**和**涂层**四部分组成

纤维



预制体



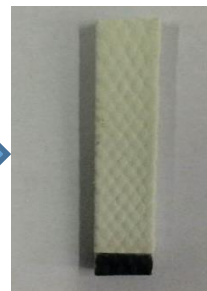
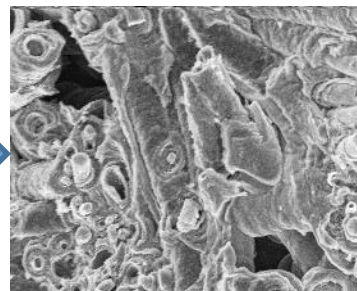
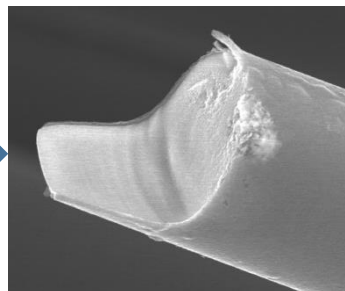
界面制备



致密化



防护涂层



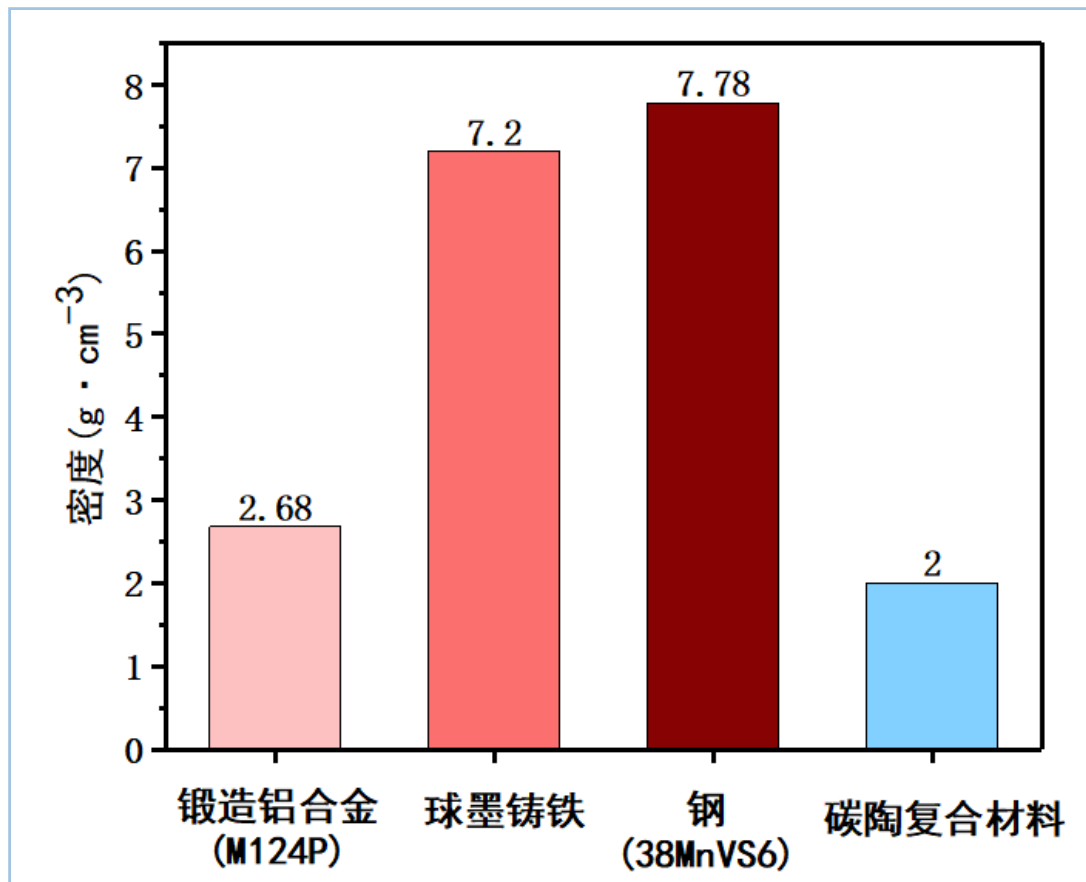
性能优异

前期研制的碳陶复合材料活塞通过初步性能考核，
性能满足设计要求

三、内燃机活塞用碳陶复合材料



► 碳陶复合材料密度



碳陶复合材料密度相对铝合金降低约25% 为铸铁和钢材料的

减重显著，可有效提高输出功率，减少油耗

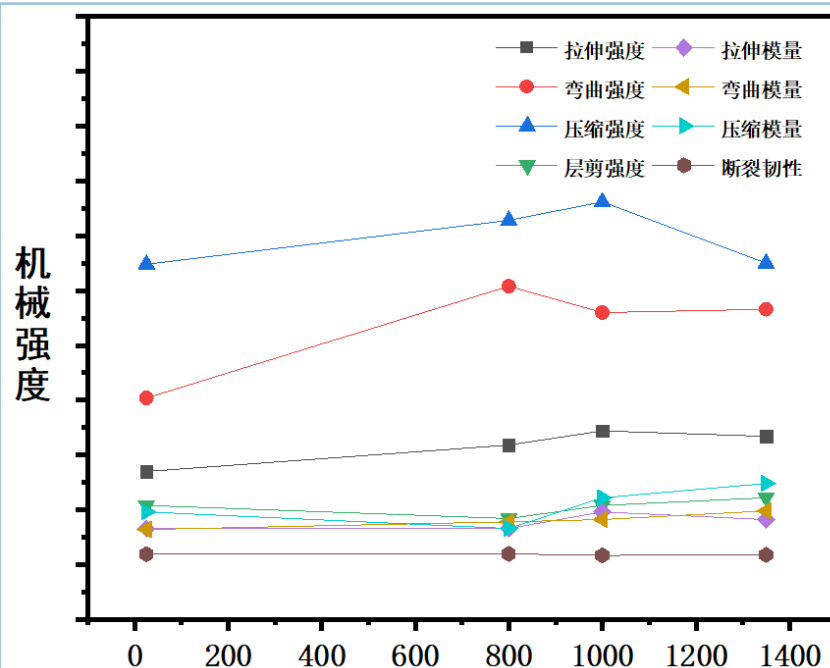
三、内燃机活塞用碳陶复合材料



➤ 碳陶复合材料力学性能

性能	室温	800℃	1000℃	1350℃
拉伸强度 /MPa	130	139	142	147
弯曲强度 /MPa	202	254	230	233
压缩强度 /MPa	274	314	331	275
层剪强度 /MPa	54	42	54	61
断裂韧性 /MPam ^{0.5}	9.5	9.7	8.4	8.8
拉伸模量	33	33	48	41

不同温度下的机械强度



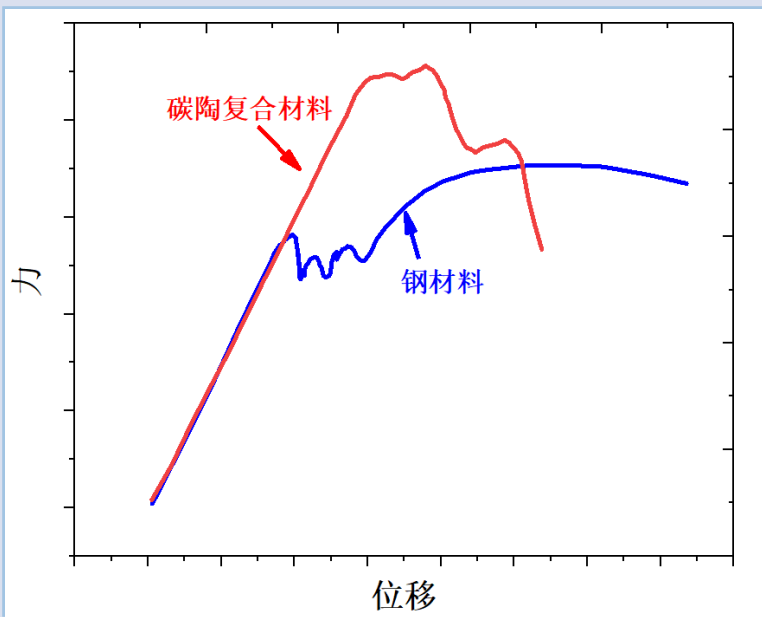
高温力学性能优异，可简化冷却结构设计，有效提高
活塞使用寿命

三、内燃机活塞用碳陶复合材料

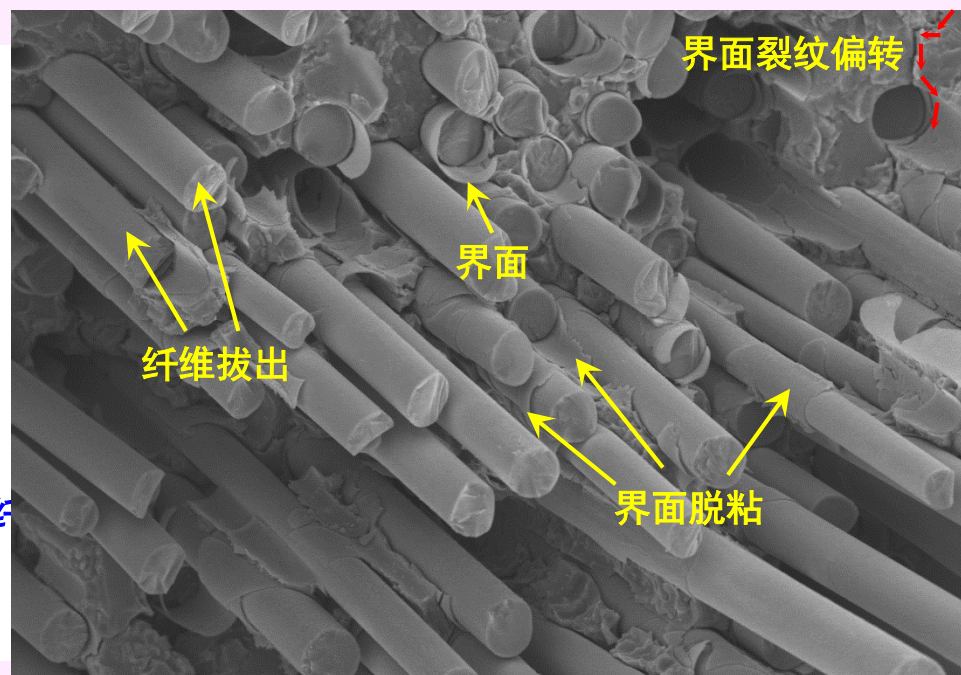


➤ 碳陶复合材料失效模式

□ 力-位移曲线



□ 强韧化机理



- ◆ “假塑性”断裂，与钢材失效模式相似；
- ◆ 1800℃以下高温环境不发生相变，且界面结合强度增加，孔隙率减小，强度提高。

三、内燃机活塞用碳陶复合材料



➤ 碳陶复合材料热物理性能

❑ 热膨胀系数($1\sim 2/K$ ，约为合金锻钢的 $1/10$ ，铝合金的 $1/18$)

材料	100 ℃	200 ℃	300 ℃	400 ℃	500 ℃	600 ℃	700 ℃	800 ℃	900 ℃	1000 ℃
碳陶材料	1.1	1.1	1.2	1.4	1.5	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1
合金锻钢	12.8	13.4	14.6	14.6	14.7	14.7	14.7	-	-	-
M244 铝合金	18.3	19.3	20.0	20.7	-	-	-	-	-	-

◆ 可减少配合间隙，降低油耗和排放量，提高发动机功率，降低噪音；

◆ 高温下尺寸稳定性良好，可降低“咬缸”的几率，提高使用寿命；

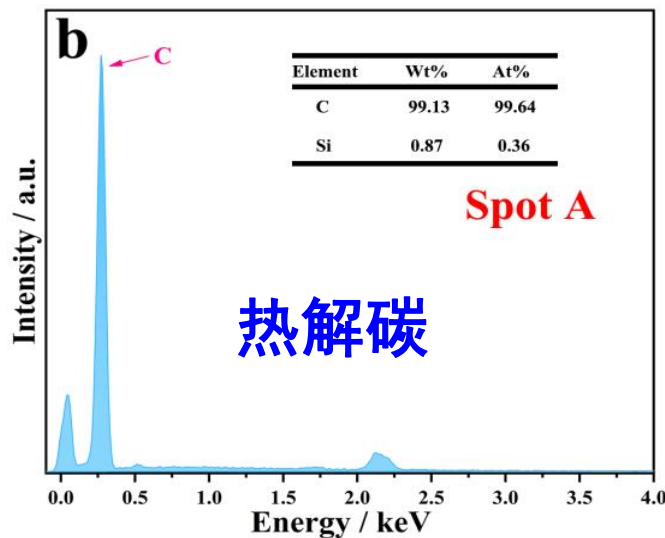
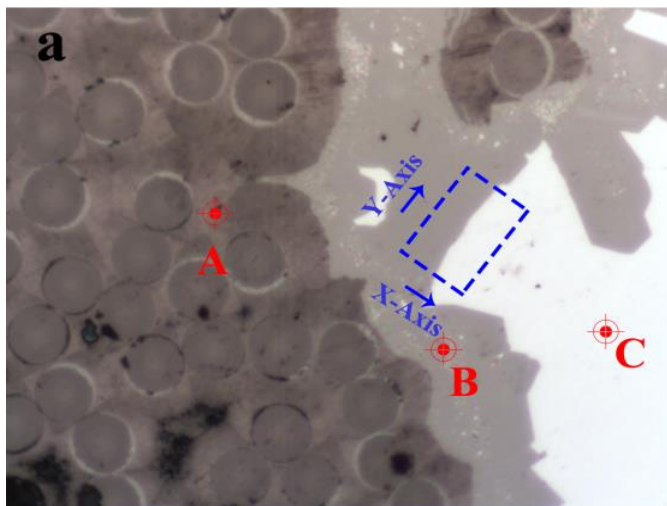
❑ 热导率($2\sim 40W/(mk)$ 范围内可设计)

热物理性能优异，可有效实现节能减排

三、内燃机活塞用碳陶复合材料

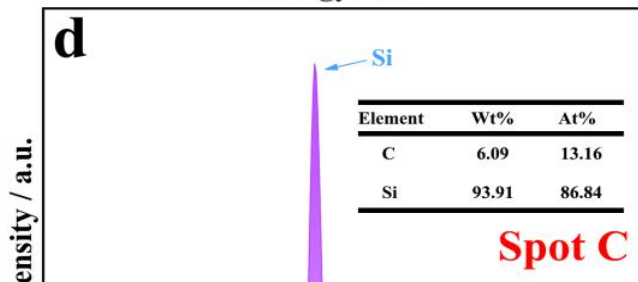
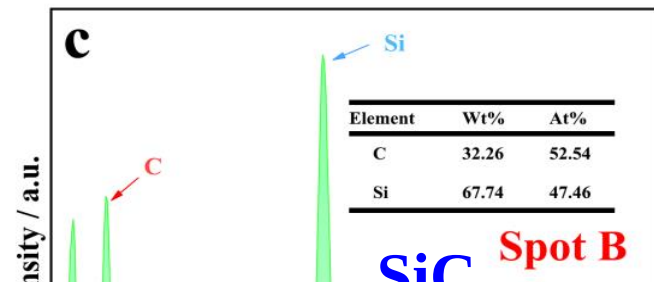


➤ 碳陶复合材料摩擦磨损性能



碳陶复合材料物相组成:

- 热解碳: 石墨层状结构, 具有自润滑性;
- SiC: 立方晶系结构, 硬度高, 耐磨性优异;
- 富Si-SiC: 具有类陶瓷结构, 硬度高, 耐磨性优异;



耐磨性能优异且自润滑性, 可提高内燃机稳定性, 减少润滑油消耗



四、碳陶复合材料活塞制备关键问题

➤ 关键问题一：预制体结构设计

➤ 原因

- 预制体结构决定材料性能强度上限
- 要提高复杂结构的整体性能，满足构件受力特点，但是仿形预制体的设计难度大、成型工艺复杂、控制困难
- 制备过程中预制体易变形，对制备工艺稳定性和性能稳定性影响大

□ 解决途径

- **设计**：从简单到复杂，通过模型仿真和试验验证实现宏观形体、细观结构和性能的一体化设计
- **成型**：研究不同简单特征预制体成型和组合转换的机制，建立多重特征组合下预制体成型方法
- **控制**：分析工艺缺陷和参量偏差对构件性能影响，建立容限准则，实现定型工艺和性能稳定性控制

四、碳陶复合材料活塞制备关键问题



➤ 关键问题一：预制体结构设计

三维正交



环形针刺



叠层缝合





四、碳陶复合材料活塞制备关键问题

➤ 关键问题二：高性能界面和基体调控

➤ 原因

- 界面和基体是决定构件整体性能的主要因素
- 界面沉积工艺控制难度大，影响因素多，可控性差
- 界面和基体微观结构与性能调控是实现材料高性能关键

□ 解决途径

- 理论分析和试验研究，优选界面沉积体系，优化工艺参数和气体扩散方式
- 优选基体工艺路线，优化工艺参数，建立工艺、材料结构和性能的相关性

四、碳陶复合材料活塞制备关键问题

➤ 关键问题二：高性能界面和基体调控

高性能多层组合界面设计

X层为力学熔断层

PyC



Y层为阻隔层

SiC

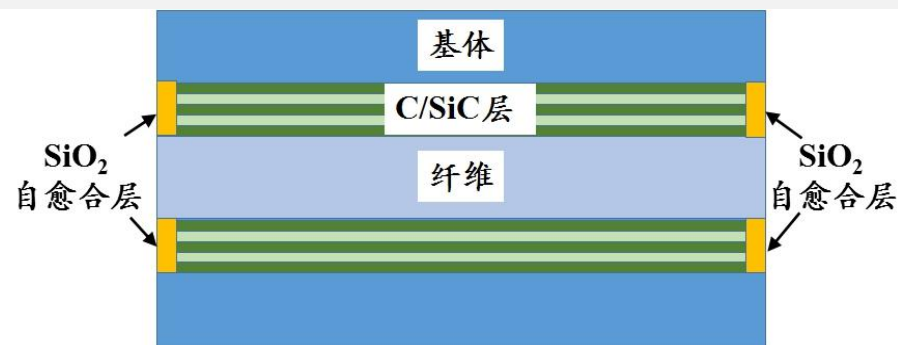


多层组合界面

$(\text{PyC/SiC})_n$

■ $(\text{PyC/SiC})_n$

- 合理设计，实现1000°C以上自愈合特性，抗氧化性能好



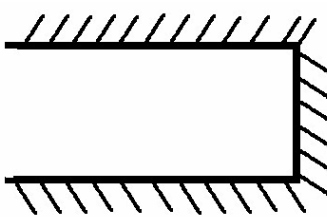
四、碳陶复合材料活塞制备关键问题

➤ 关键问题二：高性能界面和基体调控

高性能碳坯体制备工艺

以碳氢气体为前驱体，利用弱温差弱压差和气体定向扩散原理，实现高效迅速渗积，通过CAM模型完成高性能碳坯体的制备。

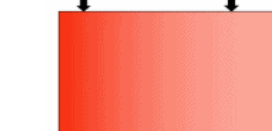
传统技术



由外向内渗积
形成闭孔
反复加工

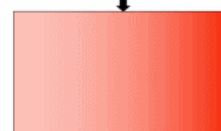
弱温差弱压差技术

弱高温区 弱低温区
弱低压区 弱高压区

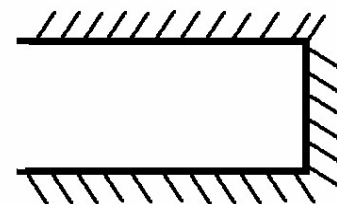


快速定向扩散

预制体



混合气体



- 闭孔率低，更利于后续陶瓷化；
- 制备周期短，成本低

四、碳陶复合材料活塞制备关键问题

➤ 关键问题二：高性能界面和基体调控

高效陶瓷化技术

1

- 采用CVI法制备热解碳基体，分别用于后续陶瓷化过程中保护碳纤维及原位反应消耗；

2

- 采用SI法或CVD主动调节CVI制备多孔体的孔径大小及分布，提高基体陶瓷相分布均匀性以及碳陶界面结合强度；

3

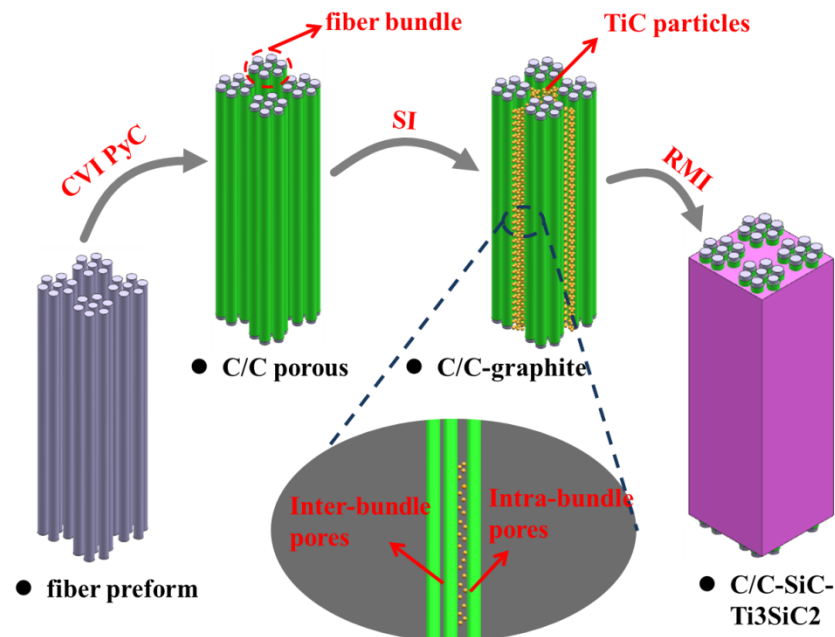
- 基于热力学和动力学设计，在高温下使熔Si与基体碳及纳米TiC填料发生原位反应，生成SiC和Ti₃SiC₂复合基体；

液态Si

TiC

热解炭

Ti₃SiC₂陶瓷



- TiC与RMI后基体中的残余Si发生原位反应，生成Ti₃SiC₂陶瓷，**消除残余Si**；
- Ti₃SiC₂陶瓷为层状结构，具有高的损伤容限，优异的高温力学性能及抗氧化性能，**进一步提升材料的损伤容限，力学强度及抗氧化性能**；



四、碳陶复合材料活塞制备关键问题

➤ 关键问题三：复杂曲面结构控形控性技术

➤ 原因

- 制造工艺过程直接影响复杂结构组织和性能，性能难控制
- 复杂结构在成型过程中易发生变形，控形困难
- 制备工艺参数与结构变形量和性能间的关系不明确

□ 解决途径

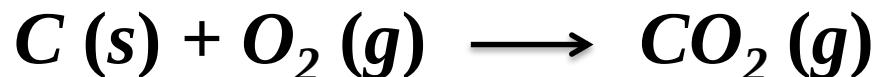
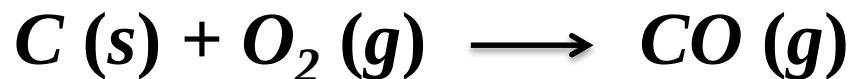
- 确定预制体补偿量：基于预制体变形特性研究，通过试验确定变形补偿量
- 工装控形控性：调控工装模具型腔尺寸和内表面质量，实现模具与材料贴合，同时减弱热失配导致材料剪切损伤
- 优化制备工艺参数：建立制备工艺性能和变形量影响规律，确定可获得高性能、低变形量构件的优化工艺参数性



四、碳陶复合材料活塞制备关键问题

➤ 关键问题四：隔热防氧涂层技术

- 服役工况条件下，碳基体易与氧气反应生成可挥发性气体，导致材料失效



- 低热导率可以有效减少燃烧室热量损失，并能实现对废气热量的二次回收，提高燃烧效率，降低油耗

具有隔热防氧能力的涂层是活塞长时高效工作的关键



四、碳陶复合材料活塞制备关键问题

➤ 关键问题四：隔热防氧涂层技术

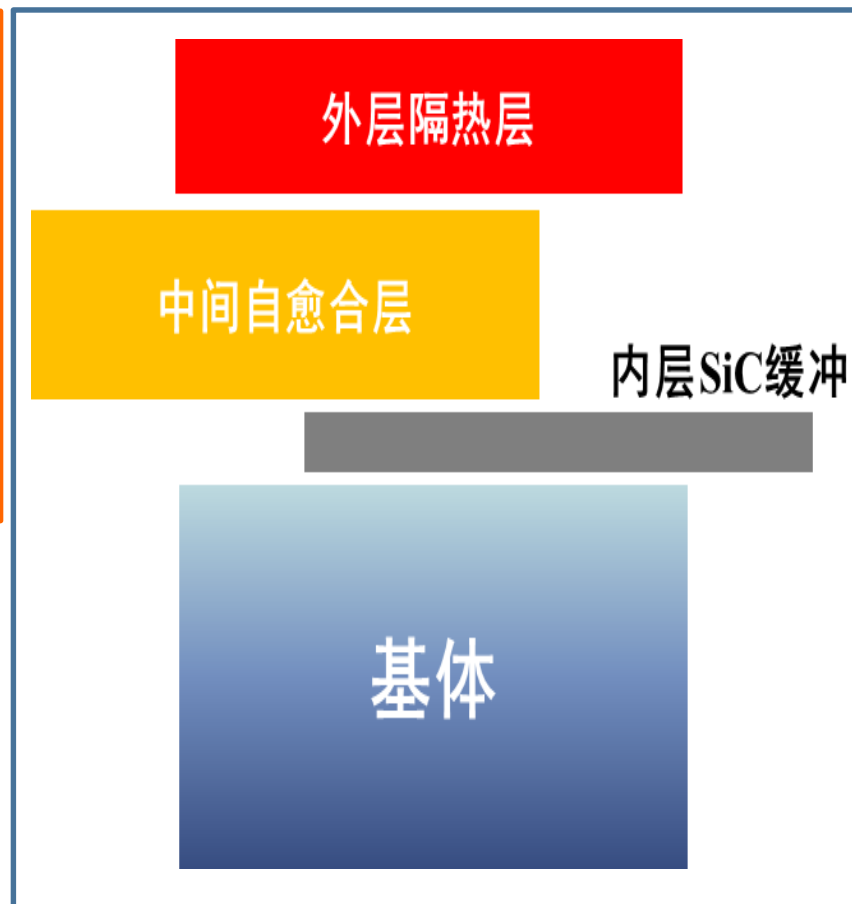
体系设计

三层复合涂层：SiC缓冲内层/自愈合中间层/隔热外层

- 内层：缓解热失配性、缓冲屏障
- 中间层：防氧化、自愈合、提高粘结强度
- 外层：抗冲刷、抗腐蚀、隔热

制备工艺

- 内层SiC缓冲层：CVD法
- 中间自愈合层：料浆烧结法
- 外层隔热层：料浆烧结法



涂层功能/结构一体化，隔热、防氧、多层协同



谢谢

艱苦樸素 勤奮好學
全面發展 勇於創新

北京航空航天大學