引用格式：谷雅宁，刘倩，蔡雨，等.抗氧化烧蚀涂层高温性能测试方法研究进展[J].材料工程，2026，54(4)：86-105.
GU Yaning，LIU Qian，CAI Yu，et al.Research progress in high-temperature performance testing methods for anti oxidation ablative coatings[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(4)：86-105.

抗氧化烧蚀涂层高温性能测试方法研究进展

谷雅宁[1]，刘　倩[1]，蔡　雨[2]，贾成兰[1]，陈思安[1*]
（1 国防科技大学 空天科学学院 新型陶瓷纤维及其复合材料重点实验室，长沙 410073；
2 中国人民解放军 96951 部队，北京 100085）

摘要：随着空天飞行器对耐高温、超高速及极端恶劣服役环境的需求日益突出，热防护材料在耐温性、耐久性与可靠性方面面临着更高的要求。表面涂层技术已经成为提高热防护材料在高温环境下抗氧化与抗烧蚀性能的有效途径之一。其中超高温陶瓷涂层以高熔点、高硬度、良好的化学稳定性与优异的抗氧化烧蚀性等优势成为表面抗氧化烧蚀涂层技术领域的重点研究方向。性能良好的陶瓷涂层能够保护基体与外界高温、富氧、强气流冲刷等恶劣环境隔绝，从而提高复合材料的服役使用寿命，促进复合材料在航空航天、船舶等领域的应用。针对高马赫数飞行器面临的极端服役环境，本文以当前陶瓷涂层性能测试研究进展为理论基础，系统地梳理了当前抗氧化烧蚀涂层高温性能测试技术的研究进展，重点围绕静态抗氧化、抗热震与动态抗氧化烧蚀三类核心评价技术的测试方法、测试原理、适用范围与局限性进行全面对比分析。为解决抗氧化烧蚀陶瓷涂层在性能评估中面临的一些瓶颈，未来仍需致力于构建多场耦合仿真、建立性能预测框架并推动测试标准化，以突破技术壁垒加速高性能涂层的研发与应用。

关键词：抗氧化烧蚀涂层；性能测试；氧化性能；抗热震性能；烧蚀测试
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000577　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000577
中图分类号：TB332　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)04-0086-20

Research progress in high-temperature performance testing methods for anti oxidation ablative coatings

GU Yaning[1]，LIU Qian[1]，CAI Yu[2]，JIA Chenglan[1]，CHEN Sian[1*]
（1 Science and Technology on Advanced Ceramic Fibers and Composites Laboratory，College of Aerospace Science and Engineering，National University of Defense Technology，Changsha 410073，China；2 Unit 96951 of the Chinese People's Liberation Army，Beijing 100085，China）

Abstract：As the demand for aerospace vehicles to withstand high temperatures，ultra-high speeds，and extremely harsh service environments becomes increasingly prominent，there are higher requirements for thermal protection materials in terms of temperature resistance，durability，and reliability. Surface coating technology has become one of the effective ways to improve the oxidation and ablation resistance of composite materials in high-temperature environments. Among these，ceramic coatings，with advantages such as high melting point，high hardness，good chemical stability，and excellent oxidation and ablation resistance，have become a key research direction in the field of surface coating technology. Well-performing ceramic coatings can protect the substrate from harsh external environments such as high temperatures，oxygen-rich conditions，and strong airflow，thereby extending the service life of composites and promoting their application in fields such as aerospace and marine. Addressing the extreme service environments faced by high-Mach-number vehicles，this paper systematically reviews the research progress in high-temperature performance testing technology for ceramic coatings，based on current advancements in testing performance. It focuses on a comprehensive comparative analysis of three core evaluation technologies：static oxidation resistance，thermal shock resistance，and dynamic oxidation ablation，including their

testing methods, principles, applicable ranges, and limitations. To address some of the bottlenecks faced by antioxidant ablation ceramic coatings in performance evaluation, future efforts should focus on developing multi-field coupled simulations, establishing performance prediction frameworks, and promoting standardization of testing, to overcome technical barriers and accelerate the research, development, and application of high-performance coatings.

Key words: anti-oxidation ablative coating; performance testing; oxidation property; thermal shock resistance; ablation test

临近空间飞行器、轨道打击武器等新型空天武器的迅速发展对热防护系统提出严峻挑战，其需要在极端高温（>2000 ℃）、强氧化及剧烈热冲击耦合作用下保持结构完整性[1-3]。碳/碳（C/C）复合材料因其轻质、高比模量、低密度和优异的高温力学性能等优势，成为高速飞行器热端部件最具潜力的理想结构材料之一[4-5]。但其氧化敏感性导致材料在450 ℃以上的富氧环境中会发生显著质量与力学性能损失[6-8]。为此，研究者提出“基体-涂层”协同防护策略，通过表面改性技术实现抗氧化与抗烧蚀功能化设计，其中超高温陶瓷涂层（UHTCs）凭借其超过3000 ℃的高熔点与优异的高温抗氧化抗烧蚀特性，成为关键技术方向[9-10]。

超高温陶瓷材料体系的研究起源于20世纪60年代，其后经历了约30年的发展停滞期，直至20世纪末至21世纪初重新成为高温材料领域的重点研究对象[11-12]。大量研究表明，以过渡金属硼化物（HfB_2、ZrB_2、TaB_2等）、碳化物（HfC、ZrC、TaC等）及氮化物（HfN、TaN、TiN等）为代表的抗氧化烧蚀涂层体系[13-15]，在极端高温与氧化环境中表现出优异的抗氧化与抗烧蚀性能，已成为高超声速飞行器热防护系统、火箭发动机及核反应堆等关键部件的重要候选材料[16-18]。为实现涂层与基体之间的界面强化和性能优化，以包埋法（pack cementation，PC）[19]、化学气相沉积法（chemical vapor deposition，CVD）[20]、超声速大气等离子喷涂（supersonic atmospheric plasma spraying，SAPS）[21-22]等为主的先进制备工艺迅速发展，这些工艺显著改善了涂层的微观结构及其高温服役表现，例如Huang等[45]采用激光熔覆技术在C/C复合材料上制备了ZrB_2-ZrC-SiC超高温复合陶瓷涂层，并在常压空气中对该涂层进行了1600 ℃等温氧化实验，持续氧化时间分别设定为20、40、60 min和80 min。通过计算氧化增重/失重率绘制氧化动力学曲线，揭示了涂层在不同暴露时间下的氧化演变规律，通过多时间节点解析，为评价涂层在高温下的防护耐久性提供了数据支持。王蔚言等[24]结合PC法与SAPS法在C/C复合材料的表面制备了SiC-ZrB_2涂层，经过缺陷修复后，陶瓷涂层在氧乙炔火焰流短时烧蚀后的线烧蚀率与质量烧蚀率分别提高至0.65 μm/s和−0.28 mg/s，表现出良好的抗烧蚀性能。然而，不同制备方法与工艺参数所制备的涂层在微观结构与服役性能表现中呈现显著离散性，涂层在制备与性能调控中仍然具有较大的工艺敏感性和不确定性，因此必须构建一套系统化的高温性能考核体系，以模拟并量化涂层在超高温、剧烈热冲击与高速冲刷等多种极端服役环境因素作用下（图1）的耐受能力与失效行为[25-29]。

针对抗氧化烧蚀陶瓷涂层在极端环境下的服役需求，当前其性能测试技术主要聚焦于涂层在静态抗氧化性、抗热震性与动态抗氧化烧蚀三大关键性能的测试与评价，因此本文以当前抗氧化烧蚀陶瓷涂层性能测试研究进展为理论基础，系统地梳理了当前抗氧化烧蚀陶瓷涂层高温性能测试技术的研究进展，重点分析了上述三类测试技术的原理与方法，继而深入对比分析了其适用范围与固有局限性。最后对抗氧化烧蚀陶瓷涂层高温性能测试技术的未来研究方向提出展望，旨在为抗氧化烧蚀陶瓷涂层性能评估与标准化测试体系的建立提供理论借鉴。

1　静态抗氧化性能

抗氧化烧蚀陶瓷涂层技术已经成为改善C/C复合材料在极端高温环境下抗氧化性能的关键技术之一[30]。针对其主要工作环境和应用需求，当前抗氧化性能测试通常以常压氧化考核与低压氧化考核为主[31-33]。

1.1　常压氧化实验

常压氧化实验是通过在静态空气或特定气氛中模拟高温富氧环境，以评估抗氧化烧蚀涂层保护基体材料抗氧化能力的一种测试方法[34]。该测试旨在验证涂层的致密性、均匀性以及对氧扩散的阻隔作用，确保涂层在高温富氧等恶劣环境条件下的稳定性和耐久性[35-36]。实验通常需要将涂层样品置于800～1600 ℃的静态空气或特定气氛中，保持恒定温度并持续一定时间，通过涂层试样的质量变化绘制氧化动力

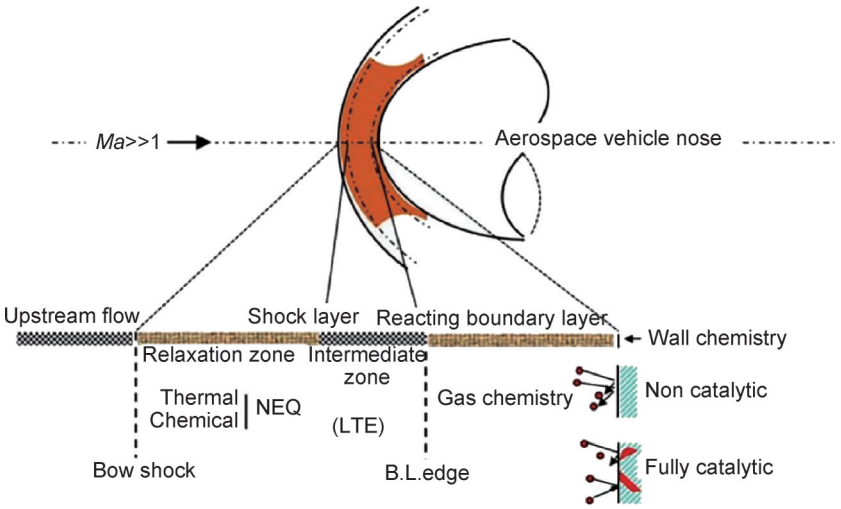


图 1 高超声速飞行器驻点前复杂气动环境示意图[29]

Fig.1 Schematic diagram of complex aerodynamic environment ahead of a hypersonic vehicle in a stationary position[29]

学曲线并计算抛物线氧化速率常数，结合扫描电子显微镜（SEM）、能谱分析（EDS）和 X 射线衍射（XRD）等手段判断涂层抗氧化失效阈值[37-38]。目前，抗氧化烧蚀陶瓷涂层的常压氧化实验常用测试设备有高温氧化炉、管式炉等[39]，具有操作简单、成本低廉等优势。但静态恒温特性无法模拟气流冲刷等动态服役条件。

胡凯飞等[40]采用静态空气环境下的高温炉，对石墨基 B_4C 涂层进行了 800、1000、1200、1400 ℃下严格等温保持实验，利用静态空气环境模拟了材料在无强制对流的氧化场景，排除了气流对氧化膜形成和挥发的干扰，使获取的防护效率数据更聚焦于温度本身对材料本征氧化行为的影响。实验结果显示涂层氧化防护效率会随温度呈非线性变化，在 800～1100 ℃具有良好的氧化防护性能。任宣儒等[41]为精确探究 $MoSi_2$ 含量对 HfB_2-$MoSi_2$-SiC 复合涂层抗氧化机制的影响，将涂层置于静态空气环境下的高温炉中，在 1500 ℃下恒温保持 200 h，该设计通过消除气流扰动，模拟了高温部件长时间稳态服役时面临的极端恒温氧化环境，从而有效揭示 $MoSi_2$ 含量对涂层氧化行为的影响规律。

随着马弗炉加热元件、炉体隔热设计与测温精度等多方面技术的不断革新，常压静态氧化可测试温度也在不断提高[42-43]。曾燮榕等[44]为系统评价 C/C 复合材料表面的 $MoSi_2$-SiC 复相陶瓷涂层在超高温长时防护效能，基于马弗炉加热元件等技术革新所实现的温度上限突破，设计了涂层在 1300～1650 ℃的多温度点的静态空气环境下持续氧化实验。该实验同样排除了强制对流所导致的气流冲刷效应，避免了氧化膜因机械剥落而导致的非本征失效。实验结果显示，在该静态环境下涂层氧化增重曲线呈现抛物线规律，清晰揭示了温度对氧化动力学过程的控制，表明该测试方法可以有效用于评价涂层在高温长时、无扰流条件下的内在防护性能与失效阈值。Huang 等[45]为探究 ZrB_2-ZrC-SiC 复合涂层对 C/C 复合材料在极端高温氧化环境下的长效防护机制，在常压空气中对该涂层进行了 1600 ℃等温氧化实验，持续氧化时间分别设定为 20、40、60 min 和 80 min。通过计算氧化增重/失重率绘制氧化动力学曲线，揭示了涂层在不同暴露时间下的氧化演变规律，通过多时间节点解析，为评价涂层在高温下的防护耐久性提供了数据支持。Ren 等[46]通过超长时常压静态氧化实验考核了 TaB_2-SiC/TaB_2-SiC-Si/SiC-Si 多层梯度涂层的静态抗氧化性能，在 1773 K 静态空气环境中开展了持续 1360 h（约 57 天）的连续氧化考核，远超常规测试时长。实验结果显示，基体未发生显著氧化破坏，表明 TaB_2-SiC/TaB_2-SiC-Si/SiC-Si 梯度涂层体系仍能有效保护基体。该实验依托高温电阻炉的稳定加热能力，在无气流扰动对氧化膜的破坏条件下，为涂层在长寿命需求场景中的可靠性提供了强有力的实证支持。

常压氧化考核装置普遍以电阻炉为主，其有效工作温度范围往往取决于装置加热元件的材料耐温极限。当温度超过 1600 ℃时，系统会引发显著的控温波动并导致炉体寿命急剧下降，因此其高温测试温度通常聚焦于 900～1800 ℃。同时，此类测试方法存在一个关键系统误差源，即电阻炉内的压力通常高于材料实际服役环境的压力，这种压力差异会影响氧化速率、材料性能表现及测量数据的准确性，进而可能导致测试结果失真。此外，试样尺寸、热循环周期设定以及失效判定标准等关键因素均会影响测试结果的一致性，容易造成数据分散、重现性差的问题。

1.2　低压氧化实验

飞行器以高超声速穿越稀薄大气层时将会面临低压高温氧化腐蚀环境，而电阻炉常压氧化实验往往难以模拟材料在低气压下的氧化行为与失效机制[47-48]。因此近年来低压氧化也逐渐成为超高温陶瓷材料等先进热防护材料体系的一种重要评估方法。低压氧化实验的设备一端连接真空泵，另一端设有通气阀，通过真空泵全功率运行并结合通气阀调节气体流量，使管内空气压力达到并维持在设定值。低压氧化的关键在于温度与压力控制。通过不同的氧分压条件下的测试能够系统阐明其对氧化物层形貌演变及玻璃相流动性调控机制。

谢冯旻煜等[49]在精确控制的低氧分压条件（20、12 kPa）与1000、1200、1500 ℃三种温度下，系统研究了TiC陶瓷的低压等温氧化行为。该实验通过精确调控进气成分与流速在样品表面形成设定值的低氧分压，同步实现了反应环境均匀、排除副产物及模拟真实气流条件的关键目标，有效模拟了实际低氧分压高温环境。实验表明低氧分压抑制氧化的机制在于：降低反应-扩散速率的同时促生了致密TiO_2层，从而延缓了氧化。Charpentier等[50]研究了ZrB_2-$MoSi_2$超高温陶瓷在低压解离空气中的氧化行为，精准复现高超声速飞行的极端气动热化学条件，触发实际服役中的关键失效机制。实验结果表明，材料氧化生成的二氧化硅保护层在2000 K以下有效；当温度超过2000 K时，二氧化硅将转化为气态SiO并挥发，致使保护层失效，材料氧化急剧加速。

低压氧化的结果分析侧重于涂层材料在低氧分压下的高温稳定性与挥发行为，这与关注涂层在常规环境下的整体防护行为与失效机制的常压氧化不同，两者对比见表1[51-54]。静态氧化实验的结果通常以特定温度下涂层开始发生剧烈氧化或失去保护作用的临界氧分压来表征。虽然能模拟高超声速飞行中的不同氧分压与高温环境，但实际飞行中还有太阳辐射、粒子侵蚀等复合因素共同作用，单纯静态氧化测试会高估涂层性能。此外，实验室采用的等温测试模式与真实服役中频繁的热循环工况存在本质差异，后者引入的周期性热机械应力会引发涂层界面损伤与微裂纹扩展，进一步加速防护体系的失效进程。

表1　静态氧化测试方法对比[51-54]

Table 1　Comparison of static oxidation test methods[51-54]

Static oxidation	Environmental condition	Advantage	Limitation
Atmospheric oxidation	Steady-state high temperature at standard atmospheric pressure, high oxygen partial pressure	Equipment is simple, low-cost, easy to operate, capable of long-term testing, and well-established international standards have been developed	Test temperature is mostly below 1600 ℃, making it impossible to simulate high-temperature and high-pressure transient conditions
Low pressure oxidation	Simulating extreme environments such as high-altitude low pressure and sudden changes in oxygen partial pressure	Simulated temperature is higher, and the transient thermal stress interacts synergistically with the changing oxygen partial pressure	Equipment is complex, the cost is higher, and the testing protocols have not yet been standardized

2　抗热震性能

超高温陶瓷涂层的抗热震性是指材料耐受温度剧烈变化的能力[55]。就陶瓷涂层而言，抗热震性能是其力学性能、热学性能等在各种受热条件下的综合体现。涂层热震破坏形式主要有两种：一种是在热冲击作用下发生的瞬时崩裂；另一种则是经热冲击循环作用后，出现开裂、剥落，直至整体结构破坏的情况[56-57]。当前，超高温陶瓷涂层的抗热震性能测试多参考国家标准GB/T 16536—1996和GB/T 37246—2018，同时可对比国际标准ASTM C1525或ISO 13123：2011等，根据冷却介质不同主要分为水冷法、气冷法、油冷法。

2.1　水冷法

水冷法是通过快速升温保温一段时间后快速浸入室温水浴中淬冷，实现瞬时降温，通过涂层开裂、剥落等失效行为的临界循环次数来评估其抗热震性[58]。Wang等[59]使用水淬法对大气等离子喷涂制备的热障涂层进行热震实验，在马弗炉中升温至1100 ℃，保温15 min后，迅速在水槽中淬火至25 ℃。每次热冲击处理均重复以上步骤。利用ImageJ软件计算涂层剥落面积的比例评估涂层的抗热震性。Liu等[60]通过氧气-乙炔火焰对涂层进行加热至1500 ℃保温25 min后将涂层迅速放入水中进行冷却，通过这种热震-冷却循环的方式来测试涂层的抗热震性能。实验显示在热震测试过程中，涂层内部形成拉伸水平应力，这种应

力促进了垂直裂纹的产生。已有研究指出[61]，水淬过程中，水发生相变时引起的换热行为会使材料界面区域随机生成气泡，气泡分布不均匀性导致界面不同区域出现差异化的热传导特性，并引发多种热交换机制共存的现象，可能对材料的抗热震性能产生重要影响。

2.2 气冷法

气冷法是通过快速升温至高温，保温一段时间后通过空气、惰性气体或高速气流对高温样品进行冷却，空气无热交换系数梯度，冷却速率较低[62]。该方法利用调节气体流速、温度梯度实现不同冷却速率，适用于研究材料在不同热震强度下的响应行为。Wang等[63]在空气气氛管式炉中评估了超高温陶瓷涂层的抗热震性能，每次循环包含1500 ℃高温保持5 min后室温冷却保持5 min，反复循环。实验结果显示，碳化硅晶须(SiC_w)改性涂层比HfB_2-SiC-Si/SiC涂层的热应力较小，产生的裂纹较小，表明SiC_w能够减轻热应力，增强涂层的高温抗氧化性和抗热震性能。李国浩等[64]通过气冷法表征涂层的抗热震性能，试样在1100 ℃下恒温氧化50 min后空冷至室温，循环进行直至涂层剥落面积超过20%。结合氧化时间绘制动力学曲线，定量分析涂层的退化规律。实验结果表明，黏结层界面平整性显著影响涂层的抗热震性能与服役寿命。吴壮志等[65]通过气冷法热冲击实验结合有限元模拟，系统研究了$MoSi_2$/Mo涂层的抗热震性能。实验结果显示，涂层在热震初期优先形成垂直于界面的穿层裂纹，其扩展程度与热震循环次数呈正相关。

2.3 油冷法

油冷法指将经过高温热处理后的涂层试样迅速取出后放入常温淬火油内进行急冷，待冷却至室温后取出放入烘箱内干燥，为一次抗热震性能测试[66]。范星宇等[67]在多孔氮化硅表面制备了γ-$Y_2Si_2O_7$陶瓷涂层，并采用油冷法进行涂层热震性能的评估，通过涂层的裂纹和剥落情况来评估涂层抗热震性能，实验结果表明在较高温度下，SiO_2与Al_2O_3物质的量之比较高时，会形成双层结构，较低时，会形成单层结构，而双层结构的涂层抗热震性能明显犹豫单层结构涂层。

气冷法、水冷法与油冷法是涂层热震性能测试中三种典型的急速冷却方法，其中冷却速率/与热震强度排序依次是水冷＞油冷＞气冷，具体对比如表2[68-74]。气冷法的优势在于冷却率平稳，热应力集中系数较低，适用于评估超高温陶瓷涂层在循环热载荷下的长期稳定性。水冷法由于瞬时降温，突然的剧烈冷却让界面应力超过结合强度，水渗入孔隙后二次加热时汽化膨胀往往会引发剧烈热应力冲击，快速暴露涂层的薄弱区域，适用于研究材料在极端工况下的失效机理。油冷法的冷却速率介于气冷法和水冷法之间，既能产生足够的热应力（比气冷严苛），又比水冷温和。对于绝大多数多孔、含非氧化物相或应用于中高温热循环环境的陶瓷涂层，油冷法往往能更准确地评估其本质的耐热震性能。

表2 抗热震性能测试方法对比[68-74]

Table 2 Comparison of methods for testing thermal shock resistance[68-74]

Feature	Water quenching	Gas quenching	Oil quenching
Cooling medium	Water	Air, inert gas	Silicone oil
Cooling rate	High	Low	Intermediate
Heat transfer coefficient	Yes	No	No
Thermal stress concentration factor	High	Low	Intermediate
Suitable coating type	High toughness, high adhesion strength coating	Ultra-high temperature ceramic coatings, high-toughness intermetallic compound coatings, materials sensitive to oxidation	Vast majority of ceramic coatings are porous coatings and coatings containing non-oxide phases
Advantage	Severe cooling, rapid induction of failure, short testing cycle, simulating extreme conditions	Stress is stable and causes minimal coating damage, making it suitable for long-term cyclic testing	Moderate cooling rate, widely applicable
Limitation	Bubble interference	Testing cycle is relatively long	Medium contamination, not easy to clean

3 动态抗氧化烧蚀性能

飞行器在实际工作中会受到气动加热效应的影响，其表面将承受较为极端的热载荷，静态氧化测试环境多为恒定温度、无气流冲刷与无机械载荷，难以充分模拟航天器面临的极端服役条件。例如高超声

速气动加热伴随的高速氧化性气流剪切、发动机喷焰的剧烈热震与化学侵蚀等[75-76]。因此良好的抗烧蚀性能同样是确保飞行器在极端条件下长时间稳定运行的关键要素之一[77-78]。抗烧蚀性能测试根据测试设备的不同，主要可以分为热辐射加热法、氧-乙炔火焰烧蚀测试、等离子火焰烧蚀测试以及风洞烧蚀测试等[79-81]。

3.1　热辐射加热实验

热辐射加热实验主要用于评估材料、设备或系统在高温条件下的性能和耐久性，通常使用高温环境模拟器或辐射源来产生高温条件[82-83]。当前主要加热方式有石英灯辐射加热、石墨加热器与激光加热等方法[84-86]。热辐射加热实验中的测试技术多用于构件级考核中的热力与热振考核，如图 2 所示。

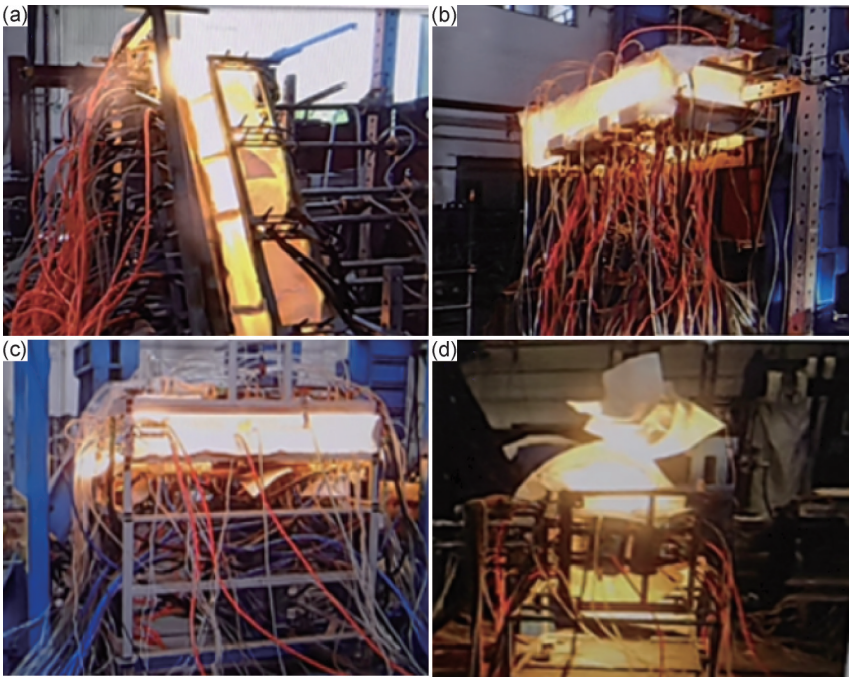


图 2　V 尾力热实验(a)、副翼力热实验(b)、襟翼力热实验(c)与前缘组件力热实验(d)

Fig.2　V-tail force-thermal test(a), aileron force-thermal test(b), flap force-thermal test(c), and leading edge assembly force-thermal test(d)

(1)石英灯辐射加热法

石英灯加热器是利用红外辐射模拟飞行器气动加热环境的一种加热装置[87]。美国 NASA Dryden、Langley、俄罗斯国家空气动力研究院、德国 DLRIABG 等实验室均建有石英灯辐射加热系统[88-89]。其基本原理是根据高超声速飞行器的飞行轨迹和气动外形，实时自动地执行气动热加载、表面热流和温度的测量以及数据的处理、显示和保存[90]。

北京航空航天大学固体力学所[91]自行研制了可以实现高至 210 ℃/s 的极快非线性升温速率、能够生成高达 2 MW/m^2 的瞬态非线性热流密度、实现高达 1500 ℃超高温氧化热环境的石英灯红外辐射式气动热环境实验模拟系统，如图 3 所示[91]。该核心优势在于其能够高保真、动态地模拟高超声速飞行器材料在实际服役中遭遇极快升温、高热流、超高温氧化等环境。这使得它成为研究先进复合材料在接近真实服役的复杂动态条件下的抗氧化失效机理、氧化动力学、氧化与损伤的相互作用以及最终使用寿命的不可替代的关键实验平台。

上海交通大学范绪箕团队[92]自行开发了一套气动热瞬态实验系统，该系统的气动热计算模块采用工程算法，加热器由石英灯阵列组成，通过控制可控硅改变石英灯的实验电压，进而实现热流的控制。该系统需要提供飞行器的飞行轨迹和实验部件的外形参数，通过实验可以发现，模糊控制具有很好的控制效果，可以精确地模拟瞬态热流。王振亚团队[93]在研究中针对石英灯管作为加热元件的烧蚀防热结构地面热模拟实验，提出了一系列优化方案。他们通过石英灯管的布置引入抽气排烟系统以及开发“热流-电压”控制模式的实时无扰动切换技术，显著提升了石英灯辐射加热实验的安全性与热流传感器的测量精度。这些改进为石英灯加热系统的工程应用提供了重要的技术支持。时圣波团队[94]将石英灯辐射加热设备应用于硅橡胶基涂层的高温热环境考核实验，深入研究了烧蚀型防热涂层在高温热环境下的性能表现。在此基础上，他们建立了烧蚀和热响应耦合预报模

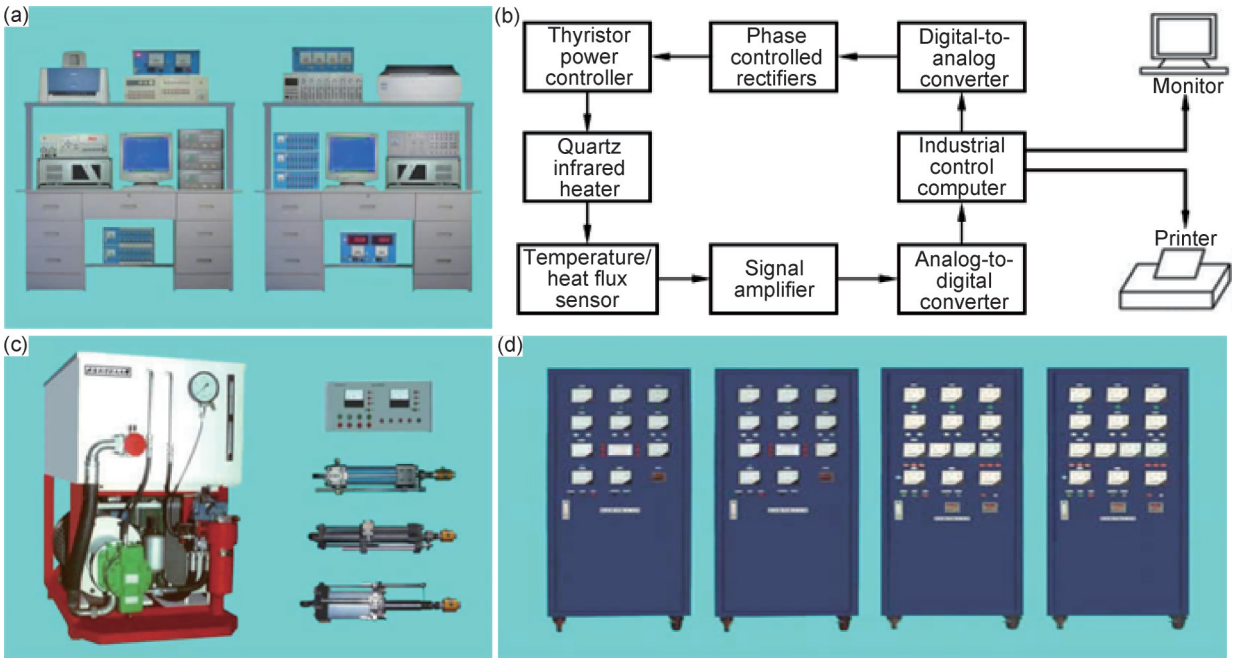


图3 气动热载实验模拟系统图[91]

(a)气动加热模拟计算机控制系统实物图;(b)气动加热模拟系统原理图;(c)液压加载设备实物图;(d)可控硅功率调节设备实物图

Fig.3 Diagram of aerodynamics thermal loading test simulating system[91]

(a)photograph of computer control system for aerodynamic heating simulation;(b)schematic diagram of aerodynamic heating simulation system;(c)photograph of hydraulic loading equipment;(d)photograph of silicon control power regulator equipment

型,为烧蚀型防热涂层的精细化设计与性能预示提供了理论依据。这一研究进一步拓展了石英灯加热系统在高温热防护材料性能评估中的应用范围。

石英灯辐射加热系统具有惯性低、电控制性能好、体积小、拼装组合方便、灵活性强、成本低与适用范围广等优势[95-96]。适合高速变化的瞬态气动加热模拟,能够有效模拟实际飞行器防热层的辐射热环境。然而,该系统加热方式为非对流加热,没有表面气动力作用,且受制于材料特性,结构温度最高为1500 ℃,加热温度仍存在一定限制,这在一定程度上制约了其在更高温度条件下的应用[97]。

(2)石墨加热器

高超声速飞行器的快速发展对地面热实验模拟能力提出了更高要求,进而推动了材料、设计、控制等技术的深入研究,促进了地面热实验用辐射加热装置中的核心加热元件由石英灯加热元件向石墨加热元件转变[98]。石墨加热器根据不同加热需求大致可分为棒状、管状、板状和带状等四种类型[99]。其工作原理是由供电及控制系统为加热元件供电,使其升温辐射热量、热防护系统以循环冷却介质对部件进行保护,最后依据测试系统反馈的加热效果通过供电及控制系统调节功率,从而实现对热载荷的精准控制。低氧条件为石墨加热器的应用提供了理想环境,采用石墨作为加热元件,能够在飞行器结构热实验中实现更高的加热温度,因而多用于材料级和构件级考核,如图4所示[100-102]。

张仪等[103]基于平板式石墨加热元件研制了一套大范围快时变热载荷模拟实验系统,该系统可实现500~1800 ℃范围内的可控多次快速升温与快速降温,升/降温速率可达到10 ℃/s,为高超声速飞机结构热实验提供了技术条件。王彬文等[104]研制了一种超高温石墨加热装置。该装置具备1.38 MW/m^2、500 s长时大热流极端热载荷生成能力,能够实现对C/SiC平板实验件表面1800 ℃级超高温加热。

石墨作为一种发热体材料,具有高温力学性能优良、加工性能好、成本低、电阻温度系数小等特点。在保护气氛中其最高使用温度可达3000 ℃,理论热流密度可实现5.6 MW/m^{2}的高通量加热[105]。因而以石墨为加热主体的石墨加热器在热效率、热稳定性、可控性等方面表现优异,不仅适用于航天器热实验、材料性能测试,还广泛应用于高温结构件的热载荷模拟、热防护材料性能评估等领域。虽然石墨相比石英灯热惯性更大,加热迟滞效应明显,但是石墨加热器在相同加载功率下具有更好的热输出能力,其在热实验中的应用前景更加广阔[106]。

(3)激光加热法

激光加热法是利用近红外激光通过光子激发电

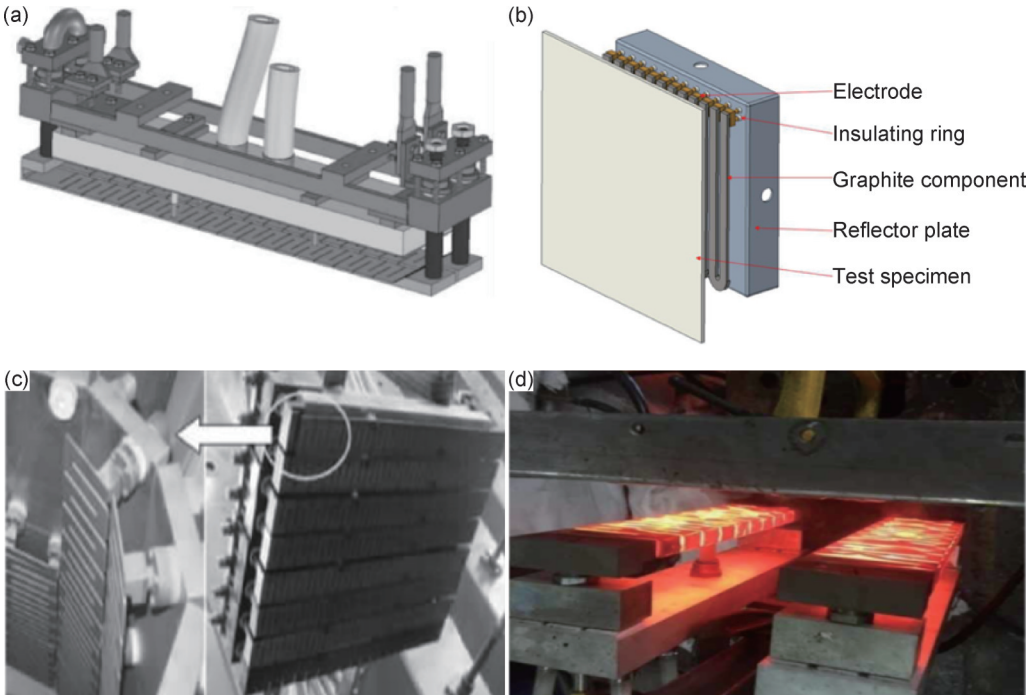


图4　石墨加热装置结构[100-102]

(a)单元式石墨加热三维模型;(b)石墨辐射加热器装配图;(c)多个单组元组合的石墨加热装置;(d)带抗氧化涂层的石墨加热元件

Fig.4　Structure of graphite heating devices[100-102]

(a)3D model of modular graphite heating unit;(b)assembly of graphite radiant;(c)graphite heating assembly composed of multiple individual heating elements;(d)graphite heating elements with oxidation resistance coating

子,由电子与晶格的相互作用将能量转化为热能,从而在材料表面实现微小区域极端高温条件的测试方法[107]。自 1974 年 Ming 等[108]利用脉冲激光将高压下的石墨成功加热至 3000 K 后,激光加热法已成为一种极具前景的极端高温测试技术,目前,其最高测试温度已经达到 6000 K[109]。

为满足材料在极端条件下的性能研究需求,中国科学院[110]、西北工业大学[111]等团队开发出可实现微区加热温度超过 3000 K 的激光加热装置(图 5)。其中中国科学院搭建的连续激光加热装置进一步完善了上海同步辐射光源原位高温高压实验条件,为极端高温高压条件的材料物性研究奠定基础。该系统能够测试超高温度下涂层的高温性能,同时结合 X 射线衍射分析高温下涂层结构演变,有助于深入理解材料失效机制。Schneider[112]通过非接触式激光快速加热与红外测温技术,实现了陶瓷材料在真空与空气两种环境下的抗热冲击性能的精确表征。为陶瓷涂层的热冲击失效评估与寿命预测提供了有效手段,结合二维有限元分析能够更真实地计算出涂层内部复杂的热应力场及储存的弹性能量,从而建立更可靠的失效判据。但针对不同涂层体系可能需要针对每种情况开发特定的校准方案,这增加了测试的复杂性。

在热辐射加热实验领域,石英灯加热法、石墨加热器与激光加热法都是非接触式或者间接接触式的热源,能够实现短时迅速升温。三者均有其独特优势与对应的局限性,具体对比见表 3[113-118]。值得注意的是,在工程实践中,上述热测试技术的应用并非相互排斥,而是呈现出显著的协同互补性,当前复合加热策略已展现出强大潜力,例如石英灯与激光的复合式加热装置,该装置利用石英灯实现大面积、相对均匀的基础预热,并结合激光对需要极高温度或巨大温差的局部区域进行精准的强化加热[119]。这在航空发动机叶片等具有复杂曲面且需要承受极端高温和巨大温度梯度的构件热实验中,能够更真实地模拟实际工况,有效建立所需的高温复杂温度场。此外,多场耦合在线监测技术也在迅速发展,即在加热的同时,结合红外热像仪和声发射检测等多种监测手段,直接将热冲击过程与材料的微观损伤演化直接相互关联,为建立更精确的材料失效模型提供实验依据。

3.2　氧-乙炔火焰烧蚀实验

氧-乙炔火焰烧蚀实验是测试涂层试样烧蚀性能的典型实验方法,参照 GJB 323B—2018、GJB 323A—1996 等进行,广泛应用于涂层材料抗烧蚀性能的测试与评估[120]。该方法主要通过氧-乙炔火焰作为热源,来模拟飞行器在高焓气流环境中所经历的极端热环境,从而对涂层试样在高温环境下的抗烧蚀性能进行

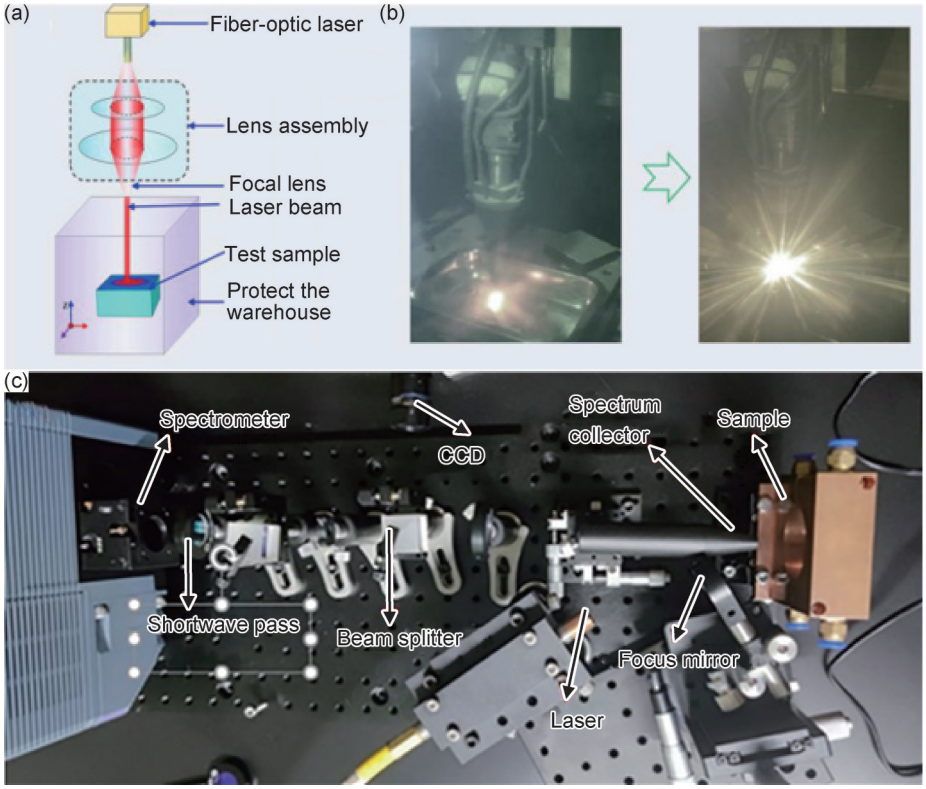


图 5 激光加热原理与装置

(a)激光烧蚀示意图;(b)激光烧蚀过程;(c)激光烧蚀系统

Fig.5 Laser heating principle and experimental setup

(a)schematic diagram of laser ablation;(b)laser ablation process;(c)laser ablation system

表 3 热辐射加热实验对比分析[113-118]

Table 3 Comparative analysis of radiative heating tests[113-118]

Test method	Sample size	Advantage	Limitation
Quartz lamp heating method	Suitable for small to medium-sized flat plates or blades; for large areas, multiple lamp arrays or a moving platform are required	Simple design and low cost; suitable for prolonged steady-state heating; enables large-area uniformity with lamp arrays	Thermal uniformity dependent on lamp spacing/orientation; significant non-uniformity on large specimens; maximum temperature limited by lamp power (1500 ℃); high maintenance requirements
Graphite heater	Suitable for medium to large sized specimens, and can be directly integrated into the test rig	High power density and rapid heating; modular platform integration; water-cooling for stable temperature control	Limited service life; susceptibility to high-temperature oxidation; requires inert atmosphere or vacuum
Laser heating method	Suitable for any size through the optical system, but the laser beam must be scanned uniformly	Extremely high power density and instantaneous heating; local controllability for complex temperature fields	High equipment costs; sensitivity to optical viewport condition and sample surface reflectivity

系统性研究[121]。主要测试方法为通过调控气体流量与压力获得特定热流密度,垂直灼烧涂层试样,利用红外测温仪实时监测试样中心的温度,烧蚀一定时间后冷却并观测表面形貌,通过计算烧蚀前后的质量与厚度变化,得出量化评价涂层耐高温烧蚀性能的质量烧蚀率和线烧蚀率[122-123]。氧-乙炔火焰烧蚀实验在飞行器热防护材料的筛选与工艺优化中具有重要的应用价值。

李淑萍团队[124]采用标准化的氧-乙炔火焰烧蚀实验,通过精确控制气源参数,为评估 SiC-$HfSi_2$-$TaSi_2$ 涂层在 3000 ℃下的性能构建了一个稳健的测试平台。该方法的优势在于其高度可控性与良好的可重复性,为材料提供了稳定、极端的热-化学环境,从而可靠地验证了涂层 20 s 短时抗烧蚀性能。然而,这种稳态烧蚀环境与真实服役中存在的热-机械-气流多场耦合冲击有所差异。Shao 等[125]利用氧-乙炔火焰对覆有涂层

的C/C-SiC-ZrC复合材料进行了系统性烧蚀研究，通过对距离、角度、喷嘴等几何参数的严格调控，以及改变燃气流量以构建不同热-化学环境，确保实验的重复性，有效揭示了材料烧蚀机制从氧化、蒸发到剥蚀的演变规律。但该测试方法提供的仍是相对简单的热-化学耦合场，适合材料体系的初期筛选和机理初步探索。

早期涂层主要依赖于传统氧-乙炔火焰烧蚀实验测试方法，通过精确控制距离、角度和燃气流量等参数来评估材料性能。然而，单一的肉眼观测难以解析烧蚀过程中热-流-化学多场耦合的复杂机理。因此氧-乙炔火焰烧蚀实验正逐步从传统的实验分析转向实验与仿真融合的多物理场耦合研究。魏连锋等[126]采用氧-乙炔烧蚀实验与多物理场耦合仿真相结合的方法，仿真结果与实验数据的高度吻合既验证了模型的准确性，又揭示了单纯依靠实验难以观测的内部烧蚀机理，成功将氧-乙炔火焰烧蚀实验测试从传统的现象观察推进到机理预测阶段。Song 等[127]构建了一套可同步进行氧-乙炔火焰烧蚀与拉伸测试的实验平台，通过显微组织表征揭示了材料的拉伸载荷条件下的烧蚀机制，突破性地复现了材料热化学环境与机械载荷多场耦合环境下服役状态，通过微观结构表征阐明了烧蚀与拉伸载荷的相互作用机制，证实了烧蚀环境导致材料承载能力显著降低，而机械载荷又反过来加速材料烧蚀进程，为热防护材料的耦合失效机理研究提供了关键方法学支撑。

氧-乙炔火焰烧蚀法作为一种超高温陶瓷涂层初步筛选的高效手段，具有操作简便、成本低廉和实验周期短等优点，但其火焰束狭小，热流分布不均匀，不能真实还原超高温材料的某些真实服役环境，一般只适用于考核驻点部位的材料[128-129]。若要提升其对真实服役环境的再现能力，必须在热流均匀化、发射率校准、气氛成分闭环以及等离子体耦合等方面进行进一步完善[130-131]。通过模块化设计、闭环控制与多物理场仿真相结合，可在保持成本优势的同时，进一步扩大氧-乙炔火焰烧蚀实验的适用范围，从而能够快速准确评估超高温陶瓷涂层材料在高温热环境中的抗烧蚀性能。

3.3　等离子火焰烧蚀实验

等离子火焰烧蚀实验是一种利用高温等离子体作为热源来模拟高焓气动加热环境下涂层材料烧蚀行为的测试技术[132]。其测试基本原理是通过高频火花在阴极和阳极（喷嘴）之间引燃电弧，工作气体通过电弧区被电弧剧烈加热而电离形成等离子体，由于喷嘴的机械作用和气体流动的冷却效应，电弧受到压缩，能量高度集中，形成高温高压的等离子气体从喷嘴中高速喷出，喷出后，气体压力骤降，体积迅速膨胀，最终形成一股温度极高、速度极快的等离子射流[133-135]。当这种火焰接触到材料表面时，对材料表面施加热载荷和冲刷作用，从而实现对材料在高焓气动加热环境下的热防护特性研究。通过控制等离子体流的温度、速度和焓值等参数，可以实现对材料表面烧蚀行为分析。超高温陶瓷涂层试样考核前需要先将涂层试样固定于水冷样品台并对准等离子喷枪火焰中心，之后按预设热流和温度条件启动喷枪，以高温射流烧蚀涂层并同步计时，烧蚀全程监测火焰温度、热流密度、烧蚀时长等，测量质量损失并计算烧蚀率，以此评估涂层抗烧蚀性能[136-138]。

魏玺团队[139]利用氩气等离子火焰烧蚀实验对C/C-HfC-SiC和C/C-HfB_2-HfC-SiC碳基复合材料进行了2200 ℃的烧蚀性能测试，采用该测试方法比普通的电阻加热炉更能模拟综合热-力-化学耦合的严苛烧蚀环境，可以有效模拟材料在高超声速飞行、火箭发动机喷管、再入飞行器鼻锥等实际应用中面临的热冲击和烧蚀环境。在考核测试中，氩气作为形成等离子弧的工作介质能够排除空气中氧气的干扰，从而单独研究高温热冲刷和机械侵蚀对材料的影响。Xu 等[140]着眼于HfB_2-SiC-$TaSi_2$涂层的长时抗烧蚀能力，通过设计600 s的等离子火焰烧蚀实验，系统探讨了$TaSi_2$的引入对涂层性能的影响。600 s的测试时长覆盖涂层从初始加热、稳态烧蚀到潜在失效的全过程，通过高低两种热通量条件（3.0/4.0 MW/m^2）的对比实验，可评估涂层在不同热载荷下的性能梯度与耐受极限。实验结果显示，HfB_2-SiC-$TaSi_2$涂层的表面温度分别维持在约1840 ℃和1970 ℃，且所有样品在烧蚀600 s后宏观形貌保持完好，HfB_2-SiC-$TaSi_2$涂层具备优异的抗长时间热-机械烧蚀能力。

等离子火焰烧蚀实验热流密度大、射流温度高。因其高能量密度的热环境模拟能力，为超高温热防护材料烧蚀性能研究提供了关键实验技术，该系统能够产生中心温度超过4000 K的等离子射流，其热流密度显著高于常规实验方法，可有效复现高超声速飞行器再入过程中所面临的高焓气动加热环境[141]。与传统的氧-乙炔烧蚀实验相比，等离子火焰的一个显著特征是射流速度相对较慢，故而其对试样表面的冲刷载荷和剪切应力作用较小。此外，实验结果对烧蚀型面演化、射流定向及烧蚀距离等参数较为敏感，实验设计需精确控制几何与空间变量，以准确解析材料在准稳态高温环境下的失效机理[142-143]。适用于评估材料在超高温环境下的热-化学稳定性与耐久性。

3.4 风洞烧蚀实验

风洞烧蚀实验作为一种高度复杂的测试技术，其结果的可靠性长期受制于行业标准的缺失。直到20世纪90年代末随着美国、英国等国家将大型生产型风洞推向企业化运营（如NASA的WTE、欧洲的ETW），其质量管理开始遵循工业标准[144]。涂层的风洞测试依据多种参数，如气流速率、温度、压力与马赫数等可细分为多种类型，如表4所示[145-150]。风洞测试能够较为准确地模拟实际飞行过程中诸如热流密度、气体总温等关键参数，同时可以模拟气体成分和流动状态，使其更贴近真实飞行条件[151-152]。对于设计和验证热防护系统以及材料性能而言具有至关重要的意义。

表4 风洞类型及其主要特征（按马赫数划分）[145-150]

Table 4 Wind tunnel types and applications (Mach number)[145-150]

Wind-tunnel type	Mach-number range	Application
Low-speed tunnel	$Ma<0.3$	Basic aerodynamics, acoustic tests, low-speed vehicle studies, calibration
Subsonic tunnel	$0.3<Ma<0.8$	Aerodynamic-acoustic coupling, icing/precipitation tests, aircraft subsonic layout, low-temperature material evaluation
Trans-sonic tunnel	$0.8<Ma<1.2$	Shock-boundary-layer interaction, variable-angle control surfaces, supersonic leading-edge separation studies
Supersonic tunnel	$1.2<Ma<5$	High-speed aerodynamic layout, shock-wave experiments, scramjet inlet testing, heat-flux & pressure distribution
Hypersonic tunnel	$5\leqslant Ma\leqslant 10$	Re-entry vehicle thermal protection, ablative-coating evaluation, non-equilibrium chemistry, wall catalysis
High-enthalpy hypersonic with tunnel	$Ma\geqslant 10$	Extreme-heat-flux testing, material ablation at ultra-high temperatures, extreme-velocity re-entry studies, high-temperature chemical kinetics

在抗氧化烧蚀陶瓷涂层烧蚀性能测试中，主要以电弧风洞与高频等离子风洞测试为主，电弧风洞示意图与风洞实验设备布置现场如图6所示[153-154]。两者的原理都是将高速气流激发电离，形成高焓、高速的等离子气流，模拟高超声速飞行器服役过程中的高焓、高速、等离子非平衡态服役环境[155-158]。目前国内外风洞测试单位主要有NASA Ames研究中心、比利时冯卡门流体研究中心、中国航天空气动力技术研究院与中国科学院力学研究所等[159-161]。韩文波团队[162]对含涂层的C/C-SiC-ZrB_2复合材料进行了2300 K、0.5 MPa水氧耦合长时烧蚀风洞考核实验。考核结束后样件结构完整，表现出微烧蚀特性，线烧蚀率仅为

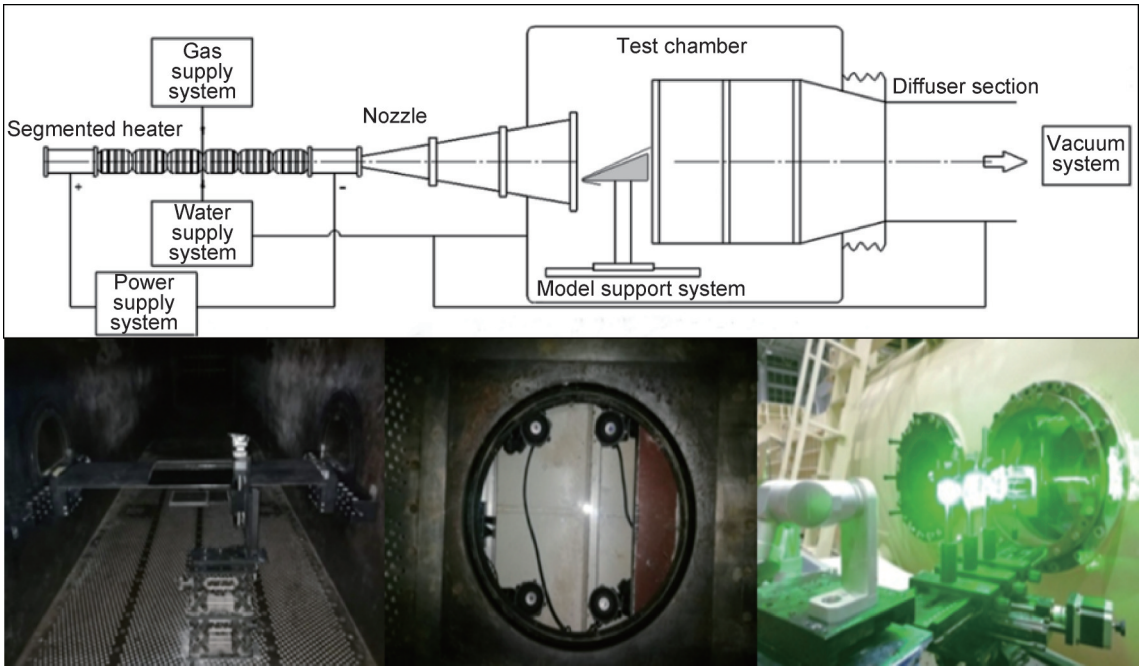


图6 FD15电弧风洞设备示意图与风洞实验设备布置现场[153-154]

Fig.6 Schematic diagram of FD15 arc wind tunnel equipment and wind tunnel test equipment layout[153-154]

9.37×10^{-4} mm/s。王德文等[163]研制了基于热等离子体为热源的再入飞行地面模拟实验系统。该系统能够产生温度高达10^4K以上同时流速可达马赫数3左右的高焓等离子体射流，具有参数调节性好、精度高、能够模拟一定环境下的再入飞行的热环境。

除高焓纯气相流中的热-化学烧蚀外，热防护材料在实际服役中还面临固体微粒高速冲刷导致的机械剥蚀。在实际的超高速飞行与推进系统中，风洞烧蚀需引入能模拟此类机械载荷的专用装置，以构建完整的抗烧蚀评价体系。Zhang等[164]利用高焓电弧风洞模拟马赫数8、32 km高度下飞行器再入时的环境，该实验装置能够有效复现1700 ℃以上高温与高焓气动热耦合工况。结果表明该风洞装置提供的热-力耦合环境可精准模拟实际飞行条件，试样在长时间考核后仍保持结构完整。通过结合非接触测温与长期动态考核对烧蚀数据分析，构建了一套高效可靠的材料烧蚀性能评估方法。陈连忠等[165]为模拟大面积区域的高焓、低热流与长时间气动加热环境，设计了一套基于1 m电弧风洞与石英灯辐射加热的联合实验新方法。该测试方法成功实现了对400 mm×400 mm大尺度模型的热实验，有效弥补了单纯依赖电弧加热难以模拟长时间气动加热环境的不足。Li等[166]通过高频等离子风洞烧蚀实验对Ir/HfC复合抗烧蚀涂层进行考核，累积超高温持续2200 s，突破了传统风洞单工况、短时烧蚀的局限，能够更加真实地模拟高速飞行器实际服役中的复杂热载荷历程。

基于流动相似性与运动相对性原理，电弧风洞可覆盖马赫数3～30的宽广范围，进行长时间的热防护实验，能够有效复现飞行器面临的气动热环境。但是电弧风洞无法同时模拟尺寸、压力及气动剪力等关键参数，且其工作时电极烧蚀会导致气流污染，影响测试准确性。高频等离子体风洞在热防护材料烧蚀性能考核中同样优势显著，其具备流场纯净度高、稳定运行时间长、环境复现能力强、实验效率高等特点，但其在流场压力模拟方面仍存在明显不足。风洞测试基本能够覆盖绝大多数飞行条件，但是实验成本远高于其他烧蚀测试技术，因而往往是最终评估材料性能的最终方法。

未来电弧风洞与高频等离子风洞实验技术的发展应以先进实验平台为基石，以高精度测量技术为利器，以精准物理模型为关键。发展先进的高焓风洞实验装备，为材料烧蚀考核提供能够复现高超声速飞行的关键气动环境参数的极端条件平台。其次应着力发展以平面激光诱导荧光、吸收与发射光谱为代表的非接触光学诊断技术，逐步实现对烧蚀过程中表面形貌演化、组分释放和气固界面反应的多参量同步测量。随着多物理场耦合模型与高性能计算能力的提升，建立热-化学-力学协同作用的烧蚀预测模型已成可能，该模型通过风洞实验数据的重复验证与迭代更新，已成为连接材料烧蚀基础研究与高超声速飞行器工程设计的关键。

4　结束语

航空航天领域的发展对抗氧化烧蚀陶瓷涂层提出了更高的要求，以期能延长服役时间，并提升在更高温度及更强冲蚀环境下的耐受能力。为满足这些需求，抗氧化烧蚀陶瓷涂层服役前的性能测试是将涂层由实验研究转向工程应用不可或缺的环节。尽管在高温性能测试方面已经取得显著进展，但仍然存在以下问题：

(1)实验室评估与实际工况脱节。传统测试技术多局限于静态或者单一环境模拟，无法复现涂层在真实服役条件下所经历的多物理场耦合的复杂环境。这导致实验室性能数据与实际使用寿命之间存在显著差距。

(2)缺乏预测性的性能关联模型。目前的研究多采取事后检测方法，即测试后分析性能，缺乏能够从涂层的微观结构或成分为基础预测其宏观性能与服役寿命的计算模型和理论框架。涂层研发在很大程度上仍依赖于“试错法”，导致开发周期长、成本高，且难以实现主动和精准的优化设计。

(3)测试方法不统一。数据可比性差，不同研究机构或企业之间缺乏标准化的测试协议，尤其是在模拟动态过程(如侵蚀-氧化交互作用)方面，测试设备、参数和评价指标各不相同，来自不同来源的实验数据无法进行有效比对和验证，降低了研究成果的可信度。由于上述评估方法的局限性，工业界对实验室研发的新涂层技术往往持谨慎态度。许多有潜力的涂层技术难以跨越从学术论文到工业应用的鸿沟，技术转化速度缓慢。

未来抗氧化烧蚀陶瓷涂层在极端测试评估技术仍需聚焦于以下关键方向：

(1)构建多物理场耦合仿真平台。突破传统单一环境因素的测试局限，重点研发能够同步施加热、机械、环境及交变载荷的多功能复合测试设备。通过仿真技术在虚拟空间中高保真还原涂层氧化、热循环、流体侵蚀、机械载荷等多场耦合下的真实服役行为，解决实验室测试与实际服役工况脱节的关键问题，消除实验室性能优而实际应用差的偏差。

(2)建立预测性计算建模框架。以多物理场仿真数据和前期实验数据为基础,构建量化模型,重点打通涂层微观结构中的成分比例、孔隙率、晶粒大小与宏观耐久性指标中的结合强度、抗氧化寿命、抗热震性能、抗烧蚀性能、抗腐蚀磨损等之间的关联,实现从微观参数到宏观性能的可计算、可预测。摆脱传统研发依赖试错法的低效模式,解决缺乏理论支撑、无法提前预测涂层性能的问题。

(3)推动产学合作制定标准化测试方案。联合高校、科研机构与企业共同制定并推广覆盖动态侵蚀-氧化、热-机械交变等复杂工况的标准规范。旨在解决行业内测试方法不统一、数据缺乏可比性以及技术难以转化落地的问题,为材料的可靠应用与合格评定提供共同依据。

参考文献

[1] GUO M F, YU K X, YANG J P, et al. B_2O_3-reinforced ablative materials with superior and comprehensive ablation resistance used in aerospace propulsion thermal protection systems [J]. Polymer Degradation and Stability, 2024, 223: 110740.

[2] WU J P, ZHANG J S, SANG M, et al. Acid-assisted toughening aramid aerogel monoliths with ultralow thermal conductivity and superior tensile toughness [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(2): 2307072.

[3] HU D, FU Q G, ZHOU L, et al. Effects of air plasma flame on the ZrB_2-based UHTC coatings: microstructure, phase evolution and ablation resistance[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 158: 194-206.

[4] FU Q G, LI H J, SHI X H, et al. Silicon carbide coating to protect carbon/carbon composites against oxidation[J]. Scripta Materialia, 2005, 52(9): 923-927.

[5] BUCKLEY J D. Carbon-carbon-an overview [J]. American Ceramic Society Bulletin. 1988(2): 364-368.

[6] 王俊山,冯志海,徐林,等. 高超声速飞行器用热防护与热结构材料技术[M]. 北京:科学出版社,2021:394.
WANG J S, FENG Z H, XU L, et al. Thermal protection and thermal structural materials technology for hypersonic aircraft[M]. Beijing: Science Press, 2021: 394.

[7] 陈玉峰,洪长青,胡成龙,等. 空天飞行器用热防护陶瓷材料[J]. 现代技术陶瓷,2017,38(5):311-390.
CHEN Y F, HONG C Q, HU C L, et al. Ceramic-based thermal protection materials for aerospace vehicles[J]. Advanced Ceramics, 2017, 38(5): 311-390.

[8] 李贺军,陈苗苗,姚西媛,等. 自愈合C/C复合材料的研究现状与展望[J]. 硅酸盐学报,2018,46(1):142-149.
LI H J, CHEN M M, YAO X Y, et al. Status and prospect of self-healing for carbon/carbon composites research [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(1): 142-149.

[9] TANG S F, HU C L. Design, preparation and properties of carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic composites for aerospace applications: a review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(2): 117-130.

[10] LIU B L, WANG Y N, LI C Q, et al. Research on the thermal shock simulation of the super high speed aircraft[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2023, 30(9): 1889-1896.

[11] FAHRENHOLTZ W G, HILMAS G E, TALMY I G, et al. Refractory diborides of zirconium and hafnium [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2007, 90(5): 1347-1364.

[12] 张幸红,胡平,韩杰才,等. 超高温陶瓷复合材料的研究进展[J]. 科学通报,2015,60(3):257-266.
ZHANG X H, HU P, HAN J C, et al. Research progress on ultra-high temperature ceramic composites [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(3): 257-266.

[13] LI F, ZHOU L, LIU J X, et al. High-entropy pyrochlores with low thermal conductivity for thermal barrier coating materials[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2019, 8(4): 576-582.

[14] 闫永杰,张辉,黄政仁,等. 硼化锆基超高温陶瓷材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2009,27(5):793-797.
YAN Y J, ZHANG H, HUANG Z R, et al. Research and development of ZrB_2-based ultra-high temperature ceramics[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2009, 27(5): 793-797.

[15] KUMAR S, SINGH A. Evaluation of mechanical and tribological characteristics of ZrB_2-based ultra-high-temperature ceramics (UHTC)[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series D, 2024, 105(3): 1601-1607.

[16] WANG D, ZHANG L, LUO X T, et al. $MoSi_2$ addition for high ablation resistance of dense ZrB_2-based composite coating prepared by very low-pressure plasma spraying [J]. Corrosion Science, 2022, 209: 110800.

[17] 曾耀莹,王润宁,侯佳琪,等. 耐极端烧蚀环境C/C复合材料研究进展[J]. 航空学报,2025,46(6):386-406.
ZENG Y Y, WANG R N, HOU J Q, et al. Research progress of C/C composites resistant to extreme ablation environments [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(6): 386-406.

[18] ZHOU L, ZHANG J P, HU D, et al. High temperature oxidation and ablation behaviors of HfB_2-SiC/SiC coatings for carbon/carbon composites fabricated by dipping-carbonization assisted pack cementation [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 111: 88-98.

[19] 刘嘉琦,杨鑫,黄启忠,等. 先驱体转化法结合包埋法制备SiC/SiC双层涂层的高温抗氧化性能研究[J]. 炭素技术,2022,41(3):19-23.
LIU J Q, YANG X, HUANG Q Z, et al. Anti-oxidation property of SiC/SiC double layer coating at high temperature fabricated by pack cementation and polymer pyrolysis method[J]. Carbon Techniques, 2022, 41(3): 19-23.

[20] REN J C, FENG E R, ZHANG Y L, et al. Microstructure and anti-ablation performance of HfC-TaC and HfC-ZrC coatings synthesized by CVD on C/C composites [J]. Ceramics International, 2020, 46(8): 10147-10158.

[21] CHEN R C, ZHANG Y L, ZHANG J, et al. $MoSi_2$ modified HfC coating for the ablation protection of SiC-coated C/C composites: ablation resistance and behavior[J]. Corrosion Science, 2022, 205:

110418.

[22] WU H, LI H J, MA C, et al. $MoSi_2$-based oxidation protective coatings for SiC-coated carbon/carbon composites prepared by supersonic plasma spraying[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30(15): 3267-3270.

[23] HUANG D, ZHANG M Y, HUANG Q Z, et al. Fabrication and ablation property of carbon/carbon composites with novel SiC-ZrB_2 coating [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(11): 3708-3715.

[24] 王蔚言,付前刚,胡逗,等.C/C复合材料表面SiC-ZrB_2涂层的缺陷修复与抗烧蚀性能[J].中国表面工程,2022,35(6):214-221.
WANG Y Y, FU Q G, HU D, et al. Defect repair and ablation resistance of the damaged SiC-ZrB_2 coating for C/C composites[J]. China Surface Engineering, 2022, 35(6): 214-221.

[25] 张军,张磊,李国栋,等.化学气相沉积ZrB_2涂层的微观形貌及晶粒择优生长[J].材料研究学报,2017,31(3):168-174.
ZHANG J, ZHANG L, LI G D, et al. Micro-morphology and preferential growth of ZrB_2 coating prepared by chemical vapor deposition [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(3): 168-174.

[26] 张磊,李国栋,熊翔,等.反应气体对ZrB_2涂层物相及显微结构的影响[J].粉末冶金材料科学与工程,2017,22(3):335-341.
ZHANG L, LI G D, XIONG X, et al. Effect of reactive gas on the phase and microstructure of ZrB_2 coating [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2017, 22(3): 335-341.

[27] 任岩,钱余海,张鑫涛,等.热震对包覆ZrB_2-SiC-La_2O_3/SiC涂层渗硅石墨力学性能的影响[J].中国腐蚀与防护学报,2021,41(1):29-35.
REN Y, QIAN Y H, ZHANG X T, et al. Effect of thermal shock on mechanical properties of siliconized graphite with ZrB_2-SiC-La_2O_3/SiC coating [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(1): 29-35.

[28] OPEKA M M, TALMY I G, ZAYKOSKI J A. Oxidation-based materials selection for 2000 ℃ + hypersonic aerosurfaces: theoretical considerations and historical experience[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(19): 5887-5904.

[29] 张楷力.Ir-*X*涂层的设计、制备及其热防护机制研究[D].长沙:国防科技大学,2020.
ZHANG K L. Design, preparation and thermal protection mechanism of Ir-*X* coatings[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020.

[30] ZHANG Y L, WANG H H, LI T, et al. Ultra-high temperature ceramic coating for carbon/carbon composites against ablation above 2000 K [J]. Ceramics International, 2018, 44(3): 3056-3063.

[31] 杜仲,王全胜,柳彦博,等.真空预氧化处理对热障涂层静态氧化行为的影响[J].航空材料学报,2015,35(5):27-31.
DU Z, WANG Q S, LIU Y B, et al. Effect of vacuum pre-oxidation treatment on oxidation behavior of thermal barrier coating[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(5): 27-31.

[32] 毛金元,刘敏,毛杰,等.等离子喷涂制备ZrB_2-$MoSi_2$复合涂层及其抗氧化性能[J].无机材料学报,2015,30(3):282-286.
MAO J Y, LIU M, MAO J, et al. Oxidation-resistance of ZrB_2-$MoSi_2$ composite coatings prepared by atmospheric plasma spraying[J]. Journal of Inorganic Materials, 2015, 30(3): 282-286.

[33] 吴震,陈维鑫,陶雪钰,等.碳表面激光熔覆制备HfB_2-TaB_2-ZrB_2-SiC-$MoSi_2$复合涂层及其高温抗氧化性能研究[J].陶瓷学报,2025,46(2):308-318.
WU Z, CHEN W X, TAO X Y, et al. Preparation of HfB_2-TaB_2-ZrB_2-SiC-$MoSi_2$ composite coatings on carbon surface with laser cladding[J]. Journal of Ceramics, 2025, 46(2): 308-318.

[34] CHENG L F, XU Y D, ZHANG L T, et al. Oxidation behavior from room temperature to 1500 ℃ of 3D-C/SiC composites with different coatings [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2002, 85(4): 989-991.

[35] 刘子京,樊坤阳,黄淙,等.C/C复合材料ZrB_2基超高温陶瓷涂层的研究进展[J].材料科学与工艺,2022,30(5):69-81.
LIU Z J, FAN K Y, HUANG C, et al. Research progress of ZrB_2-based ultra-high-temperature ceramic coatings on C/C composites [J]. Materials Science and Technology, 2022, 30(5): 69-81.

[36] 王恩会,杨亚锟,侯新梅.非氧化物陶瓷氧化动力学的研究现状与进展[J].工程科学学报,2022,44(4):654-663.
WANG E H, YANG Y K, HOU X M. Current research and development on the oxidation kinetics of nonoxide ceramics[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(4): 654-663.

[37] 苑英志,李晗晔,江冶,等.镍基高温合金陶瓷涂层的制备及性能表征[J].电镀与涂饰,2013,32(4):73-76.
YUAN Y Z, LI H Y, GANG Y, et al. Preparation and property characterization of ceramic coatings on surface of nickel-based superalloy[J]. Electroplating & Finishing, 2013, 32(4): 73-76.

[38] 丁振杰,安晓伟,何利娜,等.有机聚硅氮烷复合涂层的制备及耐高温性研究[J].涂料工业,2025,55(7):27-33.
DING Z J, AN X W, HE L N, et al. The preparation and study of the high-temperature resistance of organic polysilazane composite coating[J]. Paint & Coatings Industry, 2025, 55(7): 27-33.

[39] 刘淑贤,杨立荣,黄转红.不锈钢表面SiO_2-ZrO_2-Al_2O_3-Cr_2O_3陶瓷涂层性能的研究[J].耐火材料,2007,41(2):118-121.
LIU S X, YANG L R, HUANG Z H. Properties of SiO_2-ZrO_2-Al_2O_3-Cr_2O_3 coatings on stainless steel substrate[J]. Refractories, 2007, 41(2): 118-121.

[40] 胡凯飞,王佩佩,孙万昌,等.温度对B_4C涂层氧化防护性能和防护机制的影响[J].表面技术,2024,53(4):89-97.
HU K F, WANG P P, SUN W C, et al. Effect of temperature on oxidation protection performance and mechanism of B_4C coating [J]. Surface Technology, 2024, 53(4): 89-97.

[41] 任宣儒,王炜光,孙科,等.液相烧结法制备$MoSi_2$改性HfB_2-SiC超高温陶瓷抗氧化涂层[J].新型炭材料,2022,37(3):603-614.
REN X R, WANG W G, SUN K, et al. Preparation of $MoSi_2$-modified HfB_2-SiC ultra high temperature ceramic anti-oxidation coatings by liquid phase sintering [J]. New Carbon Materials, 2022, 37(3): 603-614.

[42] 李智,张平,郭喜平,等.铌合金表面(Ta,Mo,W,Zr/Ti)Si_2高熵硅化物涂层的微观结构与抗氧化性能[J].中国有色金属学报,2025,35(8):2751-2762.
LI Z, ZHANG P, GUO X P, et al. Microstructure and oxidation resistance of (Ta, Mo, W, Zr/Ti)Si_2 high-entropy silicide coatings

on Nb alloy[J].The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2025,35(8):2751-2762.

[43] 张莹,周团坤,张尼,等.实验室用高温马弗炉的发展现状及应用[J].现代仪器与医疗,2017,23(5):28-30.
ZHANG Y,ZHOU T K,ZHANG N,et al.The development status and applications of laboratory high-temperature muffle furnace[J].Modern Instruments & Medical Treatment,2017,23(5):28-30.

[44] 曾燮榕,李贺军,杨峥.碳/碳复合材料表面$MoSi_2$-SiC复相陶瓷涂层及其抗氧化机制[J].硅酸盐学报,1999,27(1):8-15.
ZENG X R,LI H J,YANG Z.Effect of microstructure and component of $MoSi_2$-SiC multilayerceramic coating on oxidation resistance[J].Journal of the Chinese Ceramic Society,1999,27(1):8-15.

[45] HUANG K J,XIA Y H,WANG A H.High temperature oxidation and oxyacetylene ablation properties of ZrB_2-ZrC-SiC ultra-high temperature composite ceramic coatings deposited on C/C composites by laser cladding[J].Coatings,2023,13(1):173.

[46] REN X R,LI H J,FU Q G,et al.Oxidation protective TaB_2-SiC gradient coating to protect SiC-Si coated carbon/carbon composites against oxidation[J].Composites Part B:Engineering,2014,66:174-179.

[47] 王庆洋,丛堃林,刘丽丽,等.临近空间高超声速飞行器气动力及气动热研究现状[J].气体物理,2017,2(4):46-55.
WANG Q Y,CONG K L,LIU L L,et al.Research status on aerodynamic force and heat of near space hypersonic flight vehicle[J].Physics of Gases,2017,2(4):46-55.

[48] 罗祎晨,许和勇,章胜,等.三维构型飞机的动导数数值计算[J].航空计算技术,2025,55(2):43-47.
LUO Y C,XU H Y,ZHANG S,et al.Numerical calculation of dynamic derivatives of 3D configured aircraft[J].Aeronautical Computing Technique,2025,55(2):43-47.

[49] 谢冯旻煜,尹健,熊翔,等.热压烧结TiC陶瓷的高温氧化行为[J].材料工程,2025,53(3):143-152.
XIE F M Y,YIN J,XIONG X,et al.High temperature oxidation behavior of TiC ceramics by hot-pressed sintering[J].Journal of Materials Engineering,2025,53(3):143-152.

[50] CHARPENTIER L,MIRANDA P,TALLARON H,et al.The oxidation of ZrB_2/$MoSi_2$ ceramics in dissociated air:the influence of the elaboration technique[J].Materials,2024,17(15):3818.

[51] LI L,LI H J,SHEN Q L,et al.Oxidation behavior and microstructure evolution of SiC-ZrB_2-ZrC coating for C/C composites at 1673 K[J].Ceramics International,2016,42(11):13041-13046.

[52] 李辉,孙国栋,邓娟利,等.碳化铪氧化的热力学研究[J].材料导报,2015,29(18):136-140.
LI H,SUN G D,DENG J L,et al.A thermodynamic study on the oxidation of HfC[J].Materials Review,2015,29(18):136-140.

[53] LIU X J,WANG T,LI C C,et al.Microstructural evolution and growth kinetics of thermally grown oxides in plasma sprayed thermal barrier coatings[J].Progress in Natural Science:Materials International,2016,26(1):103-111.

[54] 尹涛,高飞,刘玥,等.低氧环境热强度试验舱研制及性能验证[J].导弹与航天运载技术,2018(4):116-120.
YIN T,GAO F,LIU Y,et al.Research and capability verification of inert atmosphere heat test chamber[J].Missiles and Space Vehicles,2018(4):116-120.

[55] 丁琦恒,胡丽娜,雷海军,等.8YSZ热障涂层表面织构设计及其抗热震性能[J].表面技术,2024,53(15):224-233.
DING Q H,HU L N,LEI H J,et al.Surface texture design of 8YSZ thermal barrier coating and its thermal shock resistance[J].Surface Technology,2024,53(15):224-233.

[56] 宋智辉,代明江,李洪,等.热震对TiAlSiN涂层结构与性能的影响[J].表面技术,2019,48(11):297-304.
SONG Z H,DAI M J,LI H,et al.Effect of thermal shock on structure and properties of TiAlSiN coating[J].Surface Technology,2019,48(11):297-304.

[57] SU X J,BAO Y W,WAN D T,et al.Thermal shock resistance of Ti_3SiC_2 ceramic under extremely rapid thermal cycling[J].Journal of Alloys and Compounds,2021,866:158985.

[58] 李江涛,李争显,刘林涛,等.多层结构热障涂层的抗热震性能[J].稀有金属材料与工程,2018,47(8):2435-2439.
LI J T,LI Z X,LIU L T,et al.Thermal shock resistance of multilayer thermal barrier coatings (TBCs)[J].Rare Metal Materials and Engineering,2018,47(8):2435-2439.

[59] WANG X,WANG Y Z,SONG X M,et al.Analysis of thermal shock performance of Y_2O_3 stabilized ZrO_2 (YSZ) coating based on residual stress and micro-morphology[J].Ceramics International,2022,48(13):19081-19089.

[60] LIU L Q,XU W H,SHI J M,et al.Plasma sprayed thermal barrier coatings with outstanding ultrahigh temperature thermal shock resistances through gradient porosity level optimizations[J].Ceramics International,2025,51(13):17484-17491.

[61] SINGH J P,THOMAS J R,HASSELMAN D P H.Analysis of effect of heat-transfer variables on thermal stress resistance of brittle ceramics measured by quenching experiments[J].Journal of the American Ceramic Society,1980,63(3/4):140-144.

[62] 刘祎冉,宋艳艳,谭丽华,等.全自动空气急冷法抗热震性试验机的研制与应用[J].耐火材料,2017,51(3):225-226.
LIU Y R,SONG Y Y,TAN L H,et al.Development and application of fully automatic air quench method thermal shock resistance testing machine[J].Refractories,2017,51(3):225-226.

[63] WANG T Y,LUO R Y.Oxidation protection and mechanism of the HfB_2-SiC-Si/SiC coatings modified by *in-situ* strengthening of SiC whiskers for C/C composites[J].Ceramics International,2018,44(11):12370-12380.

[64] 李国浩,巴德纯,倪岩松,等.粘结层粗糙度对YSZ涂层热震性能的影响[J].表面技术,2021,50(7):310-317.
LI G H,BA D C,NI Y S,et al.Effect of bonding layer roughness on thermal shock performance of YSZ coating[J].Surface Technology,2021,50(7):310-317.

[65] 吴壮志,陈浩,蔡圳阳,等.$MoSi_2$/Mo涂层热震过程中界面应力分布和裂纹扩展的有限元模拟[J].稀有金属材料与工程,2021,50(11):3934-3941.
WU Z Z,CHEN H,CAI Z Y,et al.Finite element simulation of stress distribution and crack propagation of $MoSi_2$/Mo coating during thermal shock cycles[J].Rare Metal Materials and Engi-

neering,2021,50(11):3934-3941.

[66] XU X F,LI Y W,ZHU T B,et al.Influence of flake graphite coated MgO particles on thermal shock resistance and fracture behaviour of MgO-C refractories based on Brazilian splitting test with digital image correlation method and acoustic emission technique[J].Ceramics International,2025,51(5):6458-6467.

[67] 范星宇,王红洁,温江波,等.多孔氮化硅表面γ-$Y_2Si_2O_7$陶瓷涂层的制备及抗热震性能[J].复合材料学报,2016,33(5):1097-1103.
FAN X Y,WANG H J,WEN J B,et al.Prepration and thermal shock resistance property of γ-$Y_2Si_2O_7$ ceramic coating on surface of porous silicon nitride[J].Acta Materiae Compositae Sinica,2016,33(5):1097-1103.

[68] LI W G,CHENG T B,LI D Y,et al.Numerical simulation for thermal shock resistance of ultra-high temperature ceramics considering the effects of initial stress field[J].Advances in Materials Science and Engineering,2011,2011:757543.

[69] 张小锋,周克崧,刘敏,等.镀铝表面改性7YSZ纳米热障涂层热震性能分析[J].无机材料学报,2017,32(9):973-979.
ZHANG X F,ZHOU K S,LIU M,et al.Thermal shock analysis of surface Al-modified 7YSZ nano-thermal barrier coating[J].Journal of Inorganic Materials,2017,32(9):973-979.

[70] 张桂花,仲兆祥,邢卫红.多孔陶瓷材料的抗热震性能[J].材料热处理学报,2011,32(9):6-9.
ZHANG G H,ZHONG Z X,XING W H.Thermal shock resistance of porous ceramic materials[J].Transactions of Materials and Heat Treatment,2011,32(9):6-9.

[71] 汪超,李亚伟,徐小峰,等.普通烧结镁砂骨料中杂质相对镁碳耐火材料抗热震性和高温断裂行为的影响[J].硅酸盐学报,2024,52(6):2094-2106.
WANG C,LI Y W,XU X F,et al.Influence of impurities in ordinary sintered magnesia aggregates on thermal shock resistance and high temperature fracture behavior of MgO-C refractory[J].Journal of the Chinese Ceramic Society,2024,52(6):2094-2106.

[72] LIANG F,XUE Z L,ZHAO L,et al.Mechanical properties and thermal shock resistance of alumina/hexagonal boron nitride composite refractories[J].Metallurgical and Materials Transactions A,2015,46(9):4335-4341.

[73] 崔乘鑫,刘岩,赵萍,等.317L不锈钢表面激光熔覆Ni60-WC涂层的组织及性能研究[J].兵器材料科学与工程,2025,48(4):25-31.
CUI C X,LIU Y,ZHAO P,et al.Study on microstructure and performance of laser cladding Ni60-WC coating on surface of 317L stainless steel[J].Ordnance Material Science and Engineering,2025,48(4):25-31.

[74] 闫志巧,熊翔,肖鹏,等.SiC/Mo-Si复合涂层C/SiC复合材料的氧化性能[J].新型炭材料,2010,25(2):124-128.
YAN Z Q,XIONG X,XIAO P,et al.Oxidation behavior of C/SiC composites with a SiC/Mo-Si multilayer coating[J].New Carbon Materials,2010,25(2):124-128.

[75] PETERS A B,ZHANG D J,CHEN S,et al.Materials design for hypersonics[J].Nature Communications,2024,15:3328.

[76] 张浩,李小亚,王禄越,等.AlWCrNiMo高熵涂层的阻扩散性能研究[J].表面技术,2025,54(2):127-136.
ZHANG H,LI X Y,WANG L Y,et al.Diffusion barrier performance of AlWCrNiMo high-entropy coatings[J].Surface Technology,2025,54(2):127-136.

[77] ZHANG S L,LI X,ZUO J Y,et al.Research progress on active thermal protection for hypersonic vehicles[J].Progress in Aerospace Sciences,2020,119:100646.

[78] SZIROCZAK D,SMITH H.A review of design issues specific to hypersonic flight vehicles[J].Progress in Aerospace Sciences,2016,84:1-28.

[79] 吴大方,潘兵,郑力铭,等.高超声速飞行器材料与结构气动热环境模拟方法及试验研究[J].航天器环境工程,2012,29(3):250-258.
WU D F,PAN B,ZHENG L M,et al.Aerodynamic heating simulation method and testing technique for materials and structures of hypersonic flight vehicles[J].Spacecraft Environment Engineering,2012,29(3):250-258.

[80] GAI W H,ZHANG Y L,ZHANG J,et al.A strategy to improve the anti-ablation performance of C/C composites under cyclic oxy-acetylene flame:SiC/HfB_2 multi-layer alternating coatings prepared by CVD[J].Journal of Alloys and Compounds,2025,1015:178803.

[81] SAKRAKER I,ASMA C O.Experimental investigation of passive/active oxidation behavior of SiC based ceramic thermal protection materials exposed to high enthalpy plasma[J].Journal of the European Ceramic Society,2013,33(2):351-359.

[82] AKAMINE S,SUDO Y,OGAWA C,et al.Radiation heating tests to evaluate low-emissivity porous ceramics coatings for stand-off thermal protection systems[J].Acta Astronautica,2024,219:810-817.

[83] TOVSTONOG V A.Radiation heating test stands and installations[J].Fluid Dynamics,2024,59(7):2200-2228.

[84] BROGAN M T,MONAGHAN P F.Thermal simulation of quartz tube infra-red heaters used in the processing of thermoplastic composites[J].Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,1996,27(4):301-306.

[85] 王慧,马双伟,龙建,等.2500 ℃超高温石墨发热体功率研究[J].工程与试验,2023,63(2):67-69.
WANG H,MA S W,LONG J,et al.Research on 2500 ℃ ultra-high temperature graphite heater power[J].Engineering & Test,2023,63(2):67-69.

[86] KOMABAYASHI T,PESCE G,MORARD G,et al.Phase transition boundary between fcc and hcp structures in Fe-Si alloy and its implications for terrestrial planetary cores[J].American Mineralogist,2019,104(1):94-99.

[87] 王智勇,黄世勇,巨亚堂.石英灯辐射加热试验热流分布优化研究[J].强度与环境,2011,38(2):18-23.
WANG Z Y,HUANG S Y,JU Y T.The quartz radiation heating system heat flux distribution optimization study[J].Structure & Environment Engineering,2011,38(2):18-23.

[88] 章恒,胡戎兴,余清洲,等.托卡马克真空室加热方式的研究[J].真空电子技术,2022(3):80-84.
ZHANG H,HU R X,YU Q Z,et al.Study on heating mode of to-

kamak vacuum vessels[J].Vacuum Electronics,2022(3):80-84.

[89] GLASS D, BELVIN H. Airframe technology development for next generation launch vehicles [C] //12th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies.Norfolk, UK:AIAA,2003:2003-6916.

[90] 侯玉柱,郑京良,董威.高超声速飞行器瞬态热试验[J].航空动力学报,2010,25(2):343-347.
HOU Y Z, ZHENG J L, DONG W. Transient test of aerodynamic heating for hypersonic vehicle [J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(2):343-347.

[91] 吴大方,潘兵,高镇同,等.超高温、大热流、非线性气动热环境试验模拟及测试技术研究[J].实验力学,2012,27(3):255-271.
WU D F, PAN B, GAO Z T, et al.On the experimental simulation of ultra-high temperature, high heat flux and nonlinear aerodynamic heating environment and thermo-machanical testing technique [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27 (3) : 255-271.

[92] 郑京良.高超声速飞行器气动加热与热防护系统性能的仿真与试验研究[D].上海:上海交通大学,2009.
ZHENG J L. Simulation and test of aeroheating and thermal response of TPS for hypersonic vehicle [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2009.

[93] 王振亚,魏广平.烧蚀防热结构热模拟试验技术研究[J].工程与试验,2017,57(1):58-61.
WANG Z Y, WEI G P.Research on thermal simulation test technology for ablative thermal protection structure[J].Engineering & Test,2017,57(1):58-61.

[94] 时圣波,雷宝,张云天,等.硅橡胶基防热涂层烧蚀和热响应特性预报方法[J].航空学报,2023,44(23):428141.
SHI S B, LEI B, ZHANG Y T, et al.Prediction method of ablation and thermal response for a thermal protection coating with silicone rubber[J].Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2023, 44(23):428141.

[95] 朱言旦,刘骁,曾磊,等.大面积气动加热的石英灯阵模拟优化设计[J].航空学报,2017,38(9):225-232.
ZHU Y D, LIU X, ZENG L, et al.Optimization design of aerodynamic heating of large area simulated by quartz lamp array [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2017,38(9):225-232.

[96] 任青梅.热/结构试验技术研究进展[J].飞航导弹,2012(2):91-96.
REN Q M. Progress in technical research on thermal/structural tests[J].Aerodynamic Missile Journal,2012(2):91-96.

[97] 吴大方,王岳武,高镇同,等.1500 ℃高温氧化环境下C/SiC复合材料结构的热/力联合试验[J].复合材料学报,2015,32(4):1083-1091.
WU D F, WANG Y W, GAO Z T, et al. Thermal-mechanical joint test of C/SiC composite structure in high-temperature/oxidation environment up to 1500 ℃[J].Acta Materiae Compositae Sinica,2015,32(4):1083-1091.

[98] 陈思员,苗文博,程晓丽.地球大气再入返回器辐射加热计算方法研究[J].空气动力学学报,2013,31(3):333-337.
CHEN S Y, MIAO W B, CHENG X L.Study on radiative heating calculation method for reentry vehicles [J]. Acta Aerodynamica Sinica,2013,31(3):333-337.

[99] 刘仁家.真空热处理与设备[M].北京:宇航出版社,1984:331.
LIU R J.Vacuum heat treatment and equipment[M].Beijing: Astronautics Press,1984:331.

[100] 秦强,蒋军亮,成竹,等.临近空间高超声速飞行器地面热防护试验技术[J].飞机设计,2016,36(6):41-48.
QIN Q, JIANG J L, CHENG Z, et al.Ground thermal protection experimental technologies for near space hypersonic vehicle[J]. Aircraft Design,2016,36(6):41-48.

[101] 张凯.石墨加热元件及其加热控制方法研究[D].北京:中国航天科技集团公司第一研究院,2017.
ZHANG K.Research on graphite heating element and its heating control methods[D].Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology,2017.

[102] 陈浩.石墨加热器辐射加热特性研究及优化设计[D].北京:北京化工大学,2024.
CHEN H.Study on radiant heating characteristics and optimal design of graphite heater[D].Beijing: Beijing University of Chemical Technology,2024.

[103] 张仡,王彬文,吴敬涛,等.基于石墨的宽温度区间快时变热载荷模拟方法[J].航空学报,2024,45(3):160-168.
ZHANG Y, WANG B W, WU J T, et al.Graphite-based simulation method of wide temperature range and rapidly time-varying aerothermal load [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024,45(3):160-168.

[104] 王彬文,张仡,秦强,等.大气环境下高温结构极端热载荷生成方法[J].西北工业大学学报,2024,42(6):979-986.
WANG B W, ZHANG Y, QIN Q, et al. Extreme thermal load generation method for high-temperature structures in atmospheric environment [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2024,42(6):979-986.

[105] 张伟,张正平,李海波,等.高超声速飞行器结构热试验技术进展[J].强度与环境,2011,38(1):1-8.
ZHANG W, ZHANG Z P, LI H B, et al. Progress on thermal test technique of hypersonic vehicle structures [J]. Structure & Environment Engineering,2011,38(1):1-8.

[106] 李军鹏,李世平,王振亚,等.电路参数对石墨加热元件发热特性的影响规律研究[J].航空工程进展,2024,15(1):176-181.
LI J P, LI S P, WANG Z Y, et al.Research on influence law of circuit parameters on heating characteristics of graphite heating elements[J].Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024,15(1):176-181.

[107] SANS M, SCHICK V, PARENT G, et al.Experimental characterization of the coupled conductive and radiative heat transfer in ceramic foams with a flash method at high temperature[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2020,148:119077.

[108] MING L C, BASSETT W A.Laser heating in the diamond anvil press up to 2000 ℃ sustained and 3000 ℃ pulsed at pressures up to 260 kilobars[J].Review of Scientific Instruments,1974,45 (9):1115-1118.

[109] TATENO S, HIROSE K, OHISHI Y, et al. The structure of iron in earth's inner core[J].Science,2010,330(6002):359-361.

[110] 李海涛,赵波,张祥志,等.便携式同步辐射原位激光加热装置

研制[J].核技术,2023,46(2):020101.
LI H T,ZHAO B,ZHANG X Z,et al.Development of a portable laser heating device for synchrotron radiation *in situ* experiment[J].Nuclear Techniques,2023,46(2):020101.

[111] ZHANG J,ZHANG Y L,CHEN R C,et al.Exploration of laser ablation protection for HfC coatings on C/C composites above 2900 K[J].Ceramics International,2024,50(20):38641-38648.

[112] SCHNEIDER G A. Laserthermoschockversuche-durchführung und auswertung für unterschiedliche hochleistungskeramiken [D].Hamburg:Technische Universität Hamburg,2014.

[113] ZHANG Z,ZHANG J S,YUE M K,et al.High-temperature thermal expansion behaviour of C/SiC studied using an *in-situ* optical visualisation method and numerical simulations in a quartz lamp array heating environment [J]. Ceramics International,2021,47(9):12547-12556.

[114] 朱言旦,刘骁,曾磊,等.石英灯热流分布计算方法对比研究[J].工程热物理学报,2019,40(6):1397-1402.
ZHU Y D,LIU X,ZENG L,et al.Comparison research of methods for quartz lamp heat flux simulation [J].Journal of Engineering Thermophysics,2019,40(6):1397-1402.

[115] FEINAUER A,JAKKALA S G,VENGADESAN S,et al.kW-scale graphite heater for extreme temperature applications [J]. Applied Thermal Engineering,2025,274:126398.

[116] 李翔,傅波.高超声速飞行器复杂结构热试验技术[J].航空学报,2016,37(增刊1):73-79.
LI X,FU B.Thermal test technique of complex structure of hypersonic aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016,37(Suppl 1):73-79.

[117] ARCHER T,BERNY M,BEAUCHÊNE P,et al.Creep behavior identification of an environmental barrier coating using full-field measurements [J]. Journal of the European Ceramic Society,2020,40(15):5704-5718.

[118] 付佳伟,蔡亚辉,李霓,等.面向航空航天复杂载荷条件的材料热-力学属性表征方法研究进展[J].机械工程学报,2024,60(24):75-103.
FU J W,CAI Y H,LI N,et al.Research progress on characterization methods for thermal-mechanical properties of materials under complex loading conditions in aeronautic and astronautic engineering [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(24):75-103.

[119] 范学领,杨晶晶,李东旭,等.一种石英灯与激光复合式复杂曲面加热装置:CN202023052455.8[P].2021-12-24.
FAN X L, YANG J J, LI D X, et al. A quartz lamp and laser composite heating device for complex curved surfaces: CN202023052455.8[P]. 2021-12-24.

[120] JIAO X Y,HE Q C,FENG J,et al.Comparison of the ablation resistance of mullite modified C/C-SiC-HfC and C/C-SiC-HfC composites under oxyacetylene flame of 2.38 MW/m^2 heat flux [J].Ceramics International,2023,49(22):36580-36589.

[121] YU G Q,DU J K,ZHAO X C,et al.Morphology and microstructure of SiC/SiC composites ablated by oxyacetylene torch at 1800 ℃[J].Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(14):6894-6904.

[122] 侯佳琪,陈睿聪,曾耀莹,等.气相渗硅法修复SiC涂层及其抗热震和烧蚀性能[J].无机材料学报,2025,40(2):168-176.
HOU J Q,CHEN R C,ZENG Y Y,et al.Thermal shock and ablation resistance of SiC coating repaired by gaseous silicon infiltration[J].Journal of Inorganic Materials,2025,40(2):168-176.

[123] GONG G,HE Q C,WANG Y Q,et al.The ablation behavior of mullite modified C/C-SiC-ZrC composites under oxyacetylene flame at a heat flux of 4.18 MW/m^2 with different mullite content [J].Journal of Alloys and Compounds,2025,1020:179317.

[124] 李淑萍,李克智,袁秦鲁.碳/碳复合材料SiC-$HfSi_2$抗烧蚀复合涂层[J].硅酸盐学报,2010,38(2):352-356.
LI S P,LI K Z,YUAN Q L.A SiC-$HfSi_2$ anti-ablation compound coating of carbon/carbon composite[J].Journal of the Chinese Ceramic Society,2010,38(2):352-356.

[125] SHAO M M,CHEN Z K,WANG X S,et al.Ablation behavior and mechanisms of ZrC-SiC-$MoSi_2$ coated C/C-SiC-ZrC ceramic matrix composites under oxyacetylene torch[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(1): 220-230.

[126] 魏连锋,崔红,李克智,等.C/C复合材料氧乙炔烧蚀多物理场仿真及分区烧蚀机制[J].复合材料学报,2026,43(2):1174-1183.
WEI L F,CUI H,LI K Z,et al.Multiphysics simulation and zonal ablation mechanism of oxyacetylene ablation in C/C composites[J].Acta Materiae Compositae Sinica,2026,43(2):1174-1183.

[127] SONG L C,XIE W H,YANG Q,et al.Ablation and mechanical behaviour of C/C composites under an oxyacetylene flame and tensile loading environment[J].Journal of the European Ceramic Society,2024,44(11):6321-6330.

[128] PAUL A,BINNER J G P,VAIDHYANATHAN B,et al.Heat flux mapping of oxyacetylene flames and their use to characterise Cf-HfB_2composites [J]. Advances in Applied Ceramics, 2016, 115(3):158-165.

[129] 姚栋嘉,李贺军,付前刚,等.C/C复合材料Ta_2O_5-TaC/SiC抗氧化抗烧蚀涂层研究[J].中国材料进展,2011,30(11):1-5.
YAO D J,LI H J,FU Q G,et al.Ta_2O_5-TaC/SiC multilayer coating for protecting C/C composites against oxidation and ablation[J].Rare Metals Letters,2011,30(11):1-5.

[130] 马康智,李春,倪立勇,等.氧乙炔与等离子烧蚀试验的系统评价研究[J].材料导报,2022,36(11):249-253.
MA K Z,LI C,NI L Y,et al.Research and systematical evaluation of oxyacetylene and plasma ablation tests[J].Materials Reports,2022,36(11):249-253.

[131] 解静,孙国栋,李辉.CVD-SiC涂层封孔处理后C/C-ZrC-SiC复合材料的烧蚀行为[J].固体火箭技术,2018,41(6):772-777.
XIE J,SUN G D,LI H.Ablation behavior of C/C-ZrC-SiC composites after surface sealing by CVD-SiC coating[J].Journal of Solid Rocket Technology,2018,41(6):772-777.

[132] 李天佑,曾毅,胡锦润,等.浆料涂刷-热压法制备2D C_f-ZrB_2-SiC复合材料的力学与烧蚀性能[J].粉末冶金材料科学与工程,2024,29(4):275-289.
LI T Y,ZENG Y,HU J R,et al.Mechanical and ablation properties of 2D C_f-ZrB_2-SiC composites prepared by slurry brushing-

hot pressing method[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2024, 29(4): 275-289.

[133] ZHANG H, ZHOU S J, CHEN H, et al. Excellent cyclic ablation resistance of MoAlB ceramics under nitrogen plasma flame at 2000 ℃[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(6): 3675-3682.

[134] HU Y, LU J, NI D W, et al. Microstructure evolution and ablation mechanisms of Csf/ZrB_2-SiC composites at different heat fluxes under air plasma flame[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(6): 3514-3524.

[135] ZHANG X M, ZHANG Y Y, FAN K F, et al. Ablation behavior of ZrC-SiHfOC-$MoSi_2$ coating for carbon/carbon composites under Ar-O_2 plasma flame[J]. Corrosion Science, 2024, 231: 111944.

[136] ZHENG L, LUO X, FANG C Q, et al. Ablation behaviour and mechanism of Mg-modified ZrC-SiC composite in plasma ablation flame[J]. Corrosion Science, 2022, 206: 110523.

[137] ZHANG J, JIANG J M, SONG Q, et al. Ultra-high temperature ablation property of $Ta_{0.5}Hf_{0.5}C$ ternary ceramic under plasma flame[J]. Ceramics International, 2021, 47(19): 28050-28054.

[138] XIONG Y F, HE Q C, ZHANG X L, et al. Plasma ablation behavior of C/C-$(Hf_{1-x}Zr_x)C$ composites prepared by precursor infiltration and pyrolysis[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1028: 180733.

[139] 魏玺, 李捷文, 张伟刚. HfB_2-HfC-SiC改性C/C复合材料的超高温烧蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 12-17.
WEI X, LI J W, ZHANG W G. Ablation behaviors of HfB_2-HfC-SiC ceramic modified C/C composites at ultra-high temperature[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(3): 12-17.

[140] XU Y X, ZHENG W, DAI M Q, et al. Effect of $TaSi_2$ addition on long-term ablation behavior of HfB_2-SiC coating[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(14): 5802-5813.

[141] 张天昊, 查柏林, 李志农, 等. 轴棒法编织C/C复合材料等离子烧蚀性能分析[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(9): 237-243.
ZHANG T H, ZHA B L, LI Z N, et al. Analysis on plasma ablation properties of axial carbon rod woven 4D C/C composites[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(9): 237-243.

[142] ZHANG H, HU B T, DAI B, et al. Excellent ablation resistance of Ti_3AlC_2 ceramics up to 1900 ℃ in nitrogen plasma flame[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(3): 1436-1444.

[143] 吴小军, 杨杰, 郑蕊, 等. 烧蚀型面结构对CVI+HPIC工艺制备针刺C/C喉衬等离子烧蚀性能的影响[J]. 无机材料学报, 2020, 35(6): 654-660.
WU X J, YANG J, ZHENG R, et al. Effect of ablation surface microstructure on plasma arc ablation properties of C/C throat insert fabricated *via* CVI+HPIC methods[J]. Journal of Inorganic Materials, 2020, 35(6): 654-660.

[144] 战培国, 杨炯. 国外风洞试验的新机制、新概念、新技术[J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(4): 1-6.
ZHAN P G, YANG J. New systems, concepts and techniques in the area of foreign wind tunnel test[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2004, 18(4): 1-6.

[145] ZHANG K L, ZHU L, BAI S X, et al. Ablation behavior of an Ir-Hf coating: a novel idea for ultra-high temperature coatings in non-equilibrium conditions[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 818: 152829.

[146] LUO L, WANG Y G, DUAN L Y, et al. Ablation behavior of C/SiC-HfC composites in the plasma wind tunnel[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(15): 3801-3807.

[147] 姜宗林, 韩桂来, 汪运鹏, 等. JF-22超高速风洞理论基础与关键技术[J]. 航空学报, 2025, 46(5): 136-151.
JIANG Z L, HAN G L, WANG Y P, et al. Theoretical bases and key technologies of JF-22 hypervelocity wind tunnel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(5): 136-151.

[148] 李明, 廖俊必, 曾学军, 等. 风洞气动热试验外推关联参数初步研究[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(5): 513-517.
LI M, LIAO J B, ZENG X J, et al. Preliminary study on correlative parameters of extrapolation to-flight of aerodynamic heating from wind tunnels[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(5): 513-517.

[149] 陈爱国, 田颖, 王杰, 等. 高超声速风洞稀薄流场转动温度和振动温度测量研究[J]. 实验流体力学, 2025, 39(2): 46-53.
CHEN A G, TIAN Y, WANG J, et al. Measurement investigation of rotational temperature and vibrational temperature in hypersonic wind tunnel rarefied flow field[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2025, 39(2): 46-53.

[150] 张永升, 郎卫东. 亚声速低密度风洞的现状和发展[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(6): 675-680.
ZHANG Y S, LANG W D. Present situation and development of subsonic low density wind tunnel[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(6): 675-680.

[151] 孙丹羽, 朱世步, 刘泰山, 等. 超高温陶瓷改性C/C复合材料抗氧化烧蚀性能研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(增刊1): 104-114.
SUN D Y, ZHU S B, LIU T S, et al. Research progress on antioxidant ablation properties of ultra-high temperature ceramic modified carbon/carbon composite[J]. Materials Reports, 2024, 38(Suppl 1): 104-114.

[152] LIU R X, WANG H B, HONG C Q, et al. Mechanical and dual-stage wind tunnel ablative behavior of ceramic fiber-tile reinforced phenolic aerogel[J]. Composites Communications, 2022, 36: 101386.

[153] 欧东斌, 陈连忠, 董永晖, 等. 大尺寸结构部件电弧风洞烧蚀试验技术[J]. 空气动力学学报, 2015, 33(5): 661-666.
OU D B, CHEN L Z, DONG Y H, et al. Ablation test technique of large scale structure component in arc-heated wind tunnel[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2015, 33(5): 661-666.

[154] 李晓辉, 王宏伟, 张淼, 等. Tomo-PIV亚跨声速风洞应用探索[J]. 实验流体力学, 2020, 34(4): 44-52.
LI X H, WANG H W, ZHANG M, et al. Application exploration of Tomo-PIV in the subsonic and transonic wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(4): 44-52.

[155] 靳亮, 王德, 王耀辉, 等. 热防护材料烧蚀性能测试方法研究[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(2): 245-250.
JIN L, WANG D, WANG Y H, et al. Research on test method

for ablation properties of ablative materials[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2018, 41(2): 245-250.

[156] 付斌, 王永海, 陈鑫, 等. C/SiC复合材料的烧蚀机理试验研究[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2024(4): 77-80.
FU B, WANG Y H, CHEN X, et al. Experimental research on ablation mechanical of C/SiC composites[J]. Missiles and Space Vehicles, 2024(4): 77-80.

[157] 张军, 王国林, 马昊军, 等. 高温二氧化碳气体红外辐射实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3169.
ZHANG J, WANG G L, MA H J, et al. Infrared radiation experimental measurement and analyse of carbon dioxide at high temperature[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(12): 3169.

[158] PAGLIA L, GENOVA V, TIRILLÒ J, et al. Design of new carbon-phenolic ablators: manufacturing, plasma wind tunnel tests and finite element model rebuilding[J]. Applied Composite Materials, 2021, 28(5): 1675-1695.

[159] BERRY S A, RHODE M N, EDQUIST K T. Supersonic retropropulsion experimental results from NASA Ames 9 × 7 foot supersonic wind tunnel[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2014, 51(3): 724-734.

[160] PLAYEZ M, FLETCHER D G, MARSCHALL J, et al. Optical emission spectroscopy during plasmatron testing of ZrB_2-SiC ultrahigh-temperature ceramic composites[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2009, 23(2): 279-285.

[161] 张旭, 张启帆, 岳连捷, 等. 高马赫数燃烧强化的激波风洞试验研究[J]. 力学学报, 2022, 54(5): 1403-1413.
ZHANG X, ZHANG Q F, YUE L J, et al. Shock-tunnel experimental study of combustion enhancement methods for a high-Mach-number scramjet[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(5): 1403-1413.

[162] 韩文波, 周长灵, 胡平, 等. C/C-SiC-ZrB_2复合材料表面SiC/ZrB_2-SiC/SiC涂层的制备及抗氧化烧蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(10): 1-7.
HAN W B, ZHOU C L, HU P, et al. Preparation and oxidation ablation resistance of SiC/ZrB_2-SiC/SiC coating on C/C-SiC-ZrB_2 composites[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(10): 1-7.

[163] 王德文, 杨月诚, 查柏林. 地面模拟再入烧蚀系统研究[J]. 测试技术学报, 2013, 27(3): 248-253.
WANG D W, YANG Y C, ZHA B L. Study on ground simulated reenter ablated test system[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2013, 27(3): 248-253.

[164] ZHANG X M, ZHANG Y Y, GUO L X, et al. Ablation resistance of ZrC coating modified by polymer-derived SiHfOC ceramic microspheres at ultrahigh temperature[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 182: 119-131.

[165] 陈连忠, 程梅莎, 洪文虎. Φ1 m电弧风洞大尺度防隔热组件烧蚀热结构试验[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(6): 71-73.
CHEN L Z, CHENG M S, HONG W H. Ablation-thermal-structure test of large scale model in Φ1 m arc heated wind tunnel[J]. Aerospace Materials & Technology, 2009, 39(6): 71-73.

[166] LI F Y, ZHU L A, WANG Z, et al. Wind tunnel ablation behaviors and synergistic effect of the Ir/HfC coating[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 10222-10233.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52173306)
收稿日期: 2025-10-13; **录用日期**: 2025-11-25
通讯作者: 陈思安(1984—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为耐高温陶瓷基复合材料的制备及应用, 联系地址: 湖南省长沙市开福区德雅路109号国防科技大学新型陶瓷纤维及其复合材料重点实验室(410073), E-mail: chensian07@nudt.edu.cn

(本文责编: 齐书涵)