

箭发动机和卫星反射镜，在航天领域已实现成熟应用。

Cf/SiC 具有良好的摩擦性和抗氧化性，而且摩擦性能对外界环境介质不敏感，有望成为传统粉末冶金和 C/C 复合材料刹车材料的良好替代品。碳陶刹车盘已批量应用于汽车和飞机，在高铁上也已得到应用。

导弹天线罩需要具备承载、耐温、透波、耐蚀等多功能于一体，陶瓷基透波复合材料是天线罩透波材料的发展趋势。连续 Si₃N₄ 纤维有望替代石英纤维，制备新一代高马赫数导弹天线罩。

全球 CMC 市场规模高速增长，2022 年全球 CMC 市场规模为 119 亿美元，预计 CMC 市场规模将以 10.5% 的 CAGR 增长，2028 年达到 216 亿美元，其中 CMC-SiC 市场占比最高。目前用于国防与航空航天领域的 CMC 市场占比最高，其次是汽车，能源领域的需求也将持续增长。

三、CMC 工艺壁垒高，GE 的 CMC 制备已进入产业化阶段

CMC 组件的制备工艺复杂，壁垒极高。总体来看，陶瓷基复合材料的制备工艺分为纤维制备、预制体编织、纤维界面层制备、基体制备和增密、机加工成型几步。对于工作环境恶劣的 CMC 组件，如航空发动机热端部件，还需制备环境障涂层。

SiC 纤维成本占 CMC 成品成本的 50% 以上，主要采用先驱体转化法制备。CMC 复合材料的制备工艺中 CVI、MI 和 PIP 工艺较成熟，但存在各自的局限性。CVI 可制备大型、薄壁、复杂结构的部件，但成本高、工艺复杂、沉积速率慢、制备周期长，内部易形成孔隙，不适合制备厚壁部件；MI 工艺有简单高效、可近净成型、制备周期短、CMC 基体致密孔隙率低等优点，但是会有残余的游离硅单质影响材料的强度，降低材料的耐高温能力；PIP 被广泛认为是制造大尺寸、结构复杂部件的有效方法，但耗费先驱体量大而且工艺周期长，成本高。复合工艺能结合多种工艺的优点。

GE 公司从 20 世纪 80 年代末就开始 MI 工艺制备 SiC/SiC 复合材料技术攻关，经历工艺探索阶段、大规模验证阶段，目前已进入产业化阶段（2016 年至今）。GE 在美国建立了第一个垂直整合的 CMC 供应链，包括 SiC 纤维、预浸料和 CMC 部件的生产，每年可生产 20 吨 CMC 预浸料，10 吨 SiC 纤维和超过 5 万个 CMC 发动机部件。GE 2019 年的报道称，GE 和 CFM 发动机对 CMC 的需求在过去十年中增长了 20 倍，预计 CMC 部件产量将在未来 10 年增长 10 倍。

四、我国已建成相对完善的 CMC 产业链，航发 CMC 或迎来拐点

总体来看，我国陶瓷基复合材料与国外几乎处于并跑位置，我国在刹车、飞行器耐热领域领跑，但在航空发动机领域还较为落后。碳化硅纤维方面，早期 SiC 纤维是我国 CMC 产业的瓶颈环节，目前我国第二代碳化硅纤维已发布国家标准，标志着相关产业已经成熟，第三代 SiC 纤维已实现技术突破，实验室研发的产品与日本同类型产品水平相近，但是生产水平还尚未达到工业化生产规模。氮化硅纤维方面，国内连续 Si₃N₄ 纤维已经实现批产，我国基本与美、日、德、法并跑。陶瓷基复合材料制备方面，我国 CVI 工艺已实现工业化生产，PIP 工艺较为成熟，MI 工艺也有相关单位及企业布局。

从应用来看，Cf/SiC 方面，我国已将其作为热结构和空间相机支撑结构等应用于飞行器和高分辨率空间遥感卫星，在飞机刹车材料的应用上处于国际领先地位；SiCf/SiC 方面，国内航发 CMC 已进入应用验证阶段，尚未实现规模化工程应用，但 2024 年我国航发产业对陶瓷基复合材料的需求或已出现拐点。

我国 CMC 产业链环节相对完善，在 Cf/SiC 方面，碳纤维、碳陶刹车材料的参与企业较多，但是在 SiCf/SiC 方面，与国外相比，我国企业数量较少、单体规模较小、产业链薄弱，普遍存在产能有限、产品批次稳定性差、生产成本高等问题。氮化硅方向目前还处于应用早期，少数企业已有布局。

五、投资建议

2024 年我国航发产业对陶瓷基复合材料的需求或已出现拐点，随着相关企业的技术突破、生产成本的降低、应用成熟度的提高，我国航发领域 CMC 增长潜力巨大。

SiCf/SiC 应用验证阶段对于上游原材料有较大需求，进入小批量交付以及批产阶段后上游环节有望率先启动。建议关注：火炬电子、楚江新材。

随着 CMC 制备技术的优化、上游纤维成本的降低、应用成熟度的提高，中游 CMC 零部件制造企业有望迎来高速发展期。建议关注：华秦科技、中航高科。

风险分析

1.CMC 下游应用进度不及预期风险。2.上游纤维产业化进度不及预期风险。3.市场竞争加剧风险。

目录

一、陶瓷基复合材料高温性能优异，SiCf/SiC 是近年研究的热点.....	1
二、CMC 在航空航天及核能等领域极具应用前景，市场空间广阔.....	3
2.1 SiCf/SiC 是航空发动机的热端理想材料，已批量应用于热端静止件.....	3
2.2 SiCf/SiC 辐照稳定性好，是核工业的理想候选材料.....	8
2.3 Cf/SiC 在航天领域得到广泛应用，主要用于飞行器隔热以及卫星反射镜	9
2.4 Cf/SiC 是新一代高性能刹车材料的首选，已批量应用于汽车和飞机.....	11
2.5 氮化硅纤维有望替代石英纤维，制备新一代导弹天线罩.....	12
2.6 全球 CMC 市场规模高速增长，CMC-SiC 占比最高	13
三、CMC 工艺壁垒高，GE 的 CMC 制备已进入产业化阶段.....	14
3.1 陶瓷基复合材料的制备工艺：主要为纤维制备和基体制备两个步骤	14
3.1.1 SiC 纤维：成本占 CMC 成品成本的 50%以上，主要采用先驱体转化法制备	14
3.1.2 预制体：编制纤维以满足几何形状要求	17
3.1.3 界面层：SiC 纤维的表面涂层，CVI 是主流工艺	17
3.1.4 CMC 复合材料：CVI、MI 和 PIP 工艺较成熟，但存在各自的局限性.....	18
3.1.5 环境障涂层：防止 CMC 受高温水蒸气侵蚀，主要由 APS 工艺制备	23
3.2 GE 已建成垂直整合的 CMC 供应链，CMC 部件产量还将增长十倍	25
四、我国已建成相对完善的 CMC 产业链，航发 CMC 或迎来拐点.....	27
4.1 火炬电子：背靠厦门大学，布局 PCS、碳化硅纤维、氮化硅纤维，向下游 CMC 延伸	28
4.2 苏州赛菲：依托国防科大，实现第一代碳化硅纤维量产.....	30
4.3 众兴新材：与国防科大和中科院过程所合作，建有第二代碳化硅纤维产线.....	30
4.4 泽睿新材：背靠中南大学，推进低成本第三代碳化硅纤维研制.....	31
4.5 华秦科技：与上硅所强强联合，瞄准航发 CMC 产业化	31
4.6 楚江新材：产品包含特种纤维预制体、碳陶刹车盘以及热工装备.....	32
4.7 西安鑫垚：依托西北工业大学，建设全国首个陶瓷基复合材料智能制造园区.....	32
4.8 中航高科：中航复材全面布局陶瓷基复合材料，优材百慕拓展碳陶刹车盘.....	33
4.9 北摩高科：碳陶刹车盘已成功用于军机	34
4.10 金博股份：长纤维碳陶制动盘已批产，短纤维碳陶制动盘价格显著低于国外产品.....	34
4.11 天宜上佳：碳陶制动盘面向新能源车、高端乘用车、商用车以及特种车辆.....	34
4.12 中天火箭：布局 CMC 耐烧蚀部件，碳陶刹车盘实现小批交付	35
4.13 博云新材：无人机用碳陶刹车盘组件完成设计鉴定及项目验收.....	36
五、投资建议	36
风险分析	36

图表目录

图表 1: 陶瓷基复合材料结构示意图	1
图表 2: CMC 与金属、PMC 的性能对比	1
图表 3: 陶瓷基复合材料种类及应用环境	2
图表 4: 不同种类非氧化物 CMC 性能对比	2
图表 5: 不同代际航空发动机的涡轮前温度	3
图表 6: 全球典型航空发动机涡轮前温度发展历程	3
图表 7: 高温合金与陶瓷基复合材料耐温能力对比	4
图表 8: CMC 可应用在航空发动机上的部位	4
图表 9: SiCf/SiC 和 Ox/Ox 在航空发动机上的应用部位	5
图表 10: CMC 在航空发动机上已经实现应用的部位	5
图表 11: 不同发动机上 CMC 的应用部位和应用情况	6
图表 12: passport20 的 Ox/Ox 整流罩、排气混合器和中心锥	7
图表 13: F414 的 Ox/Ox 封严片	7
图表 14: LEAP 发动机的 CMC 涡轮外环	7
图表 15: F414 的 Ox/Ox 封严片	错误!未定义书签。
图表 16: F414 的的 CMC 低压涡轮叶片	8
图表 17: XA100 发动机	8
图表 18: 碳化硅燃料包壳管	8
图表 19: 高温气冷堆燃料元件	9
图表 20: 法国 Hermes 航天器大量采用 Cf/SiC	10
图表 21: IXV 飞行器热防护结构	10
图表 22: Cf/SiC 在国外火箭发动机上的应用	10
图表 23: 空间相机反射镜示意图	10
图表 24: 保时捷碳陶刹车盘	11
图表 25: “先锋”导弹概念图及其天线罩	12
图表 26: 全球 CMC 市场规模	13
图表 27: 不同基体 CMC 市场规模情况	13
图表 28: 用于不同行业的 CMC 市场对比	13
图表 29: 制备 CMC 工艺流程图	14
图表 30: 先驱体转化法制备 SiC 纤维示意图	15
图表 31: 具有代表性的 SiC 纤维型号及其制备路线和微观示意图	16
图表 32: 三代 SiC 纤维的组成、性质、力学性能和价格对比	16
图表 33: 不同预制体类型优缺点对比	17
图表 34: 界面层在 CMC 中的应用	18
图表 35: 不同的 CMC 制备工艺对比	19
图表 36: CVI 工艺示意图	19
图表 37: 国产 CMC-SiC 涡轮叶盘	20
图表 38: 预浸料熔渗法工艺示意图	20
图表 39: 预浸料熔渗法制备的 CMC 涡轮外环	21

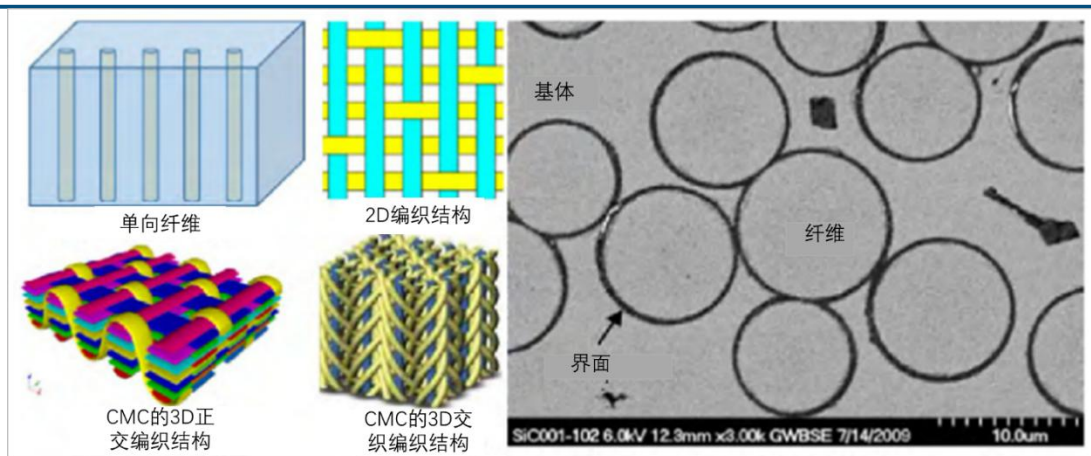
图表 40:	料浆浇注法工艺示意图	21
图表 41:	PIP 工艺示意图.....	22
图表 42:	NITE 工艺示意图	22
图表 43:	CVI+PIP 工艺示意图	23
图表 44:	EBC 的关键性能要求.....	24
图表 45:	第一代 EBC 涂层截面	24
图表 46:	第二代 EBC 涂层截面	24
图表 47:	GE 制备 CMC 的工艺流程	25
图表 48:	GE 的 CMC 供应链	26
图表 49:	CMC 产业链	28
图表 50:	火炬电子自产新材料板块营业收入及增速	30
图表 51:	自产新材料板块收入占比与毛利占比	30

一、陶瓷基复合材料高温性能优异，SiCf/SiC 是近年研究的热点

陶瓷基复合材料（Ceramic Matrix Composites，CMC）是指在陶瓷基体中引入增强材料，形成以引入的增强材料为分散相，以陶瓷基体为连续相的复合材料。其中分散相可以为连续纤维、颗粒或者晶须，目前研究较多的是连续纤维增强的陶瓷基复合材料。连续纤维增强陶瓷基复合材料保留了陶瓷材料耐高温、抗氧化、耐磨耗、耐腐蚀等优点的同时，充分发挥陶瓷纤维增强增韧作用，克服了陶瓷材料断裂韧性低和抗外部冲击载荷性能差的先天缺陷。

陶瓷基复合材料主要由陶瓷基体、纤维以及界面层组成。纤维构成陶瓷基复合材料的骨架，是主要承载单元。碳化硅陶瓷基体在复合材料中主要是填充纤维预制件内部空隙，将纤维束包裹起来，连成一体，起到传递载荷及保护纤维的双重作用。界面相位于纤维与基体之间的结合处，在二者之间起到传递载荷的“桥梁”作用；此外，当裂纹扩展至中间层时，可通过裂纹偏转和界面脱粘等能量耗散机制，阻止裂纹向纤维内部扩展。

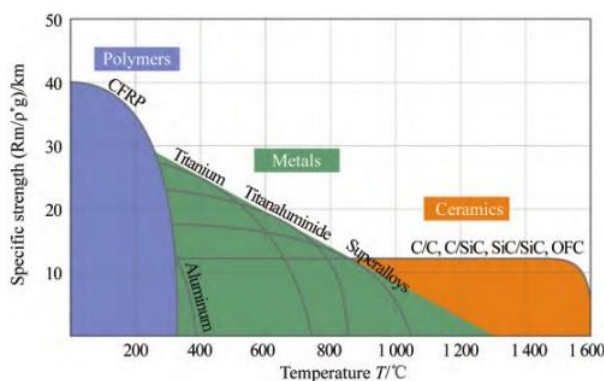
图表1：陶瓷基复合材料结构示意图



数据来源：《陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展》， 证券

相比树脂基复合材料和金属，CMC 具有**耐高温、低密度、高比强、高比模、抗氧化和抗烧蚀**等优异性能，使其具有接替金属作为新一代高温结构材料的潜力，CMC 被美国国防部列为重点发展的 20 项关键技术之首。

图表2：CMC 与金属、PMC 的性能对比



数据来源：《航空发动机 SiCf /SiC 复合材料与环境障涂层系统及制备技术研究进展》， 证券

按照陶瓷基体的不同，CMC 一般为氧化物基及非氧化物基两大类，非氧化物基耐高温能力更强。氧化物 CMC，增强材料采用氧化物纤维，基体材料多为高熔点金属氧化物，常用基体有氧化铝（Al₂O₃）、钇铝石榴石（YAG）、氧化锆（ZrO₂）等；非氧化物陶瓷基复合材主要以 SiC 作为基体，此外还有超高温陶瓷基复合材料。氧化物 CMC 从材料成分上直接避免被高温氧化的问题，但耐温能力相对较弱，SiC 的高温抗氧化性最强，密度小，并有较低的热胀系数和较高的热导系数，因此以 SiC 为基体的 CMC-SiC 是研究的重点。

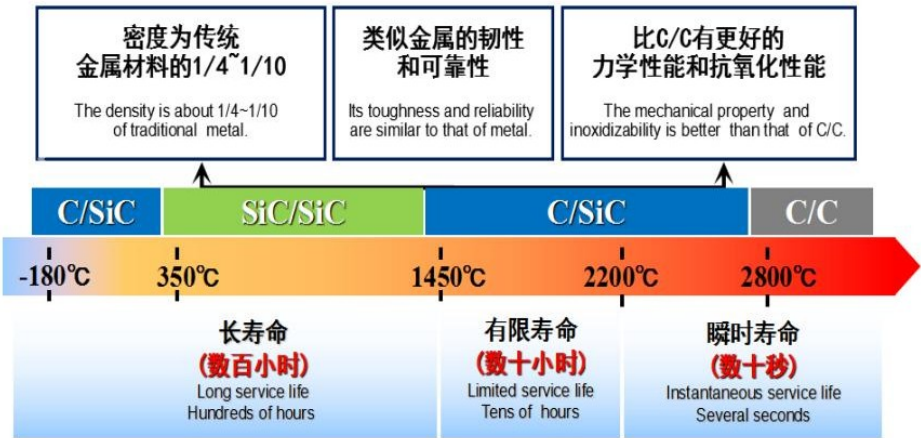
图表3：陶瓷基复合材料种类及应用环境

基体成分	复合材料	特征	服役环境
碳化硅陶瓷基复合材料	Cf/SiC	耐高温（<1800℃） 良好的抗氧化性	高温，氧化-力-热耦合服役环境
	SiCf/SiC	耐高温（<1650℃） 极佳的抗氧化性 良好的耐中子辐照性	高温-辐照-氧化 长期极端服役环境
超高温陶瓷基复合材料	Cf/ZrB ₂ -SiC Cf/ZrC	耐超高温（≥2000℃）	超高温环境（≥2000℃）
	Cf/HfB ₂ -SiC Cf/HfC	超高温环境下抗氧化性 极好的烧蚀性能	超高温氧化环境 要求极好烧蚀性能
氧化物陶瓷基复合材料	Al ₂ O ₃ f/Al ₂ O ₃	耐高温	高温，氧化，长期服役环境
	Al ₂ O ₃ /mullite	不会氧化	

资料来源：《连续纤维增强陶瓷基复合材料研究与应用进展》， 证券

CMC-SiC 按照增强纤维的不同，可进一步分为 Cf/SiC（碳陶）和 SiCf/SiC，后者是近年来研究的热点。用于增强 SiC 基体的纤维主要为碳纤维和碳化硅纤维，对应的 CMC 分别为 Cf/SiC（碳陶）和 SiCf/SiC，与碳纤维相比，SiC 纤维在耐氧化、抗蠕变等方面具有显著的优势，同时，SiC 纤维与基体 SiC 具有良好的相容性，无热膨胀失配等问题。所以自 20 世纪 70 年代末 SiC 纤维实现量产以来，连续碳化硅纤维增韧的碳化硅基复合材料(SiCf/SiC CMC)一直是研究热点。

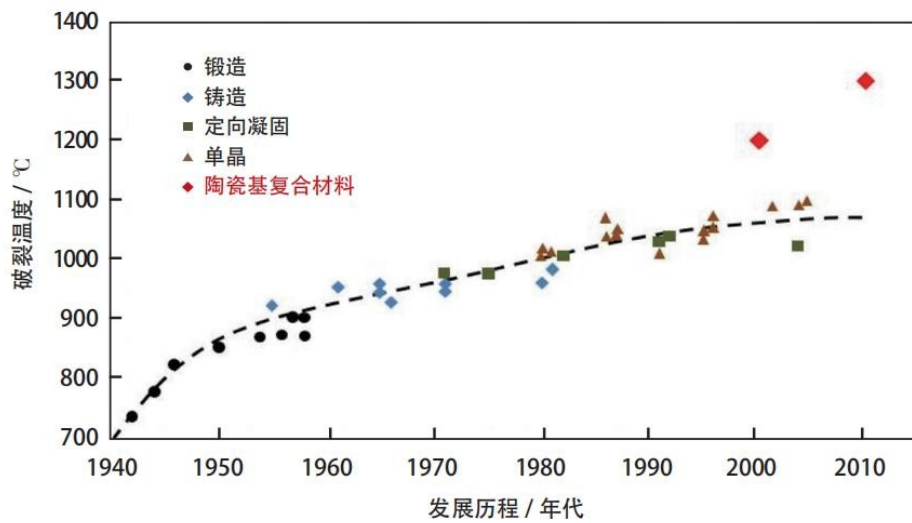
图表4：不同种类非氧化物 CMC 性能对比



数据来源：西安鑫垚官网， 证券

相比高温合金，CMC 具有耐高温、轻量化和寿命长的特点，被各国视为下一代航空发动机战略性热结构材料。相比于镍基高温合金，CMC 材料有以下显著优势：（1）比高温合金能承受更高的温度（CMC 材料耐温极限比镍基高温合金提高约 150℃~350℃，潜在使用温度可达 1650℃），可显著减少冷却气消耗量约 15%~25%，从而提高发动机效率，同时还能减少氮氧化物的排放；（2）CMC 材料密度（2.0~2.5g/cm³）为高温合金的 1/4~1/3，可以显著降低发动机重量（发动机减重 30%~70%）从而大幅提高推重比；（3）高温下优异的持久强度，使用寿命长；（4）可设计性强，纤维纺织技术的引入使 CMC 可设计性和结构适应性大幅提高，可根据不同部件的性能需求设计可达到最佳的热/力特性匹配。目前，各航空强国普遍认为：CMC 是航空发动机高温结构材料的关键核心技术之一，直接体现一个国家先进航空发动机和先进武器装备的设计和制造能力。

图表7：高温合金与陶瓷基复合材料耐温能力对比



数据来源：《航空发动机用陶瓷基复合材料研究进展》， 证券

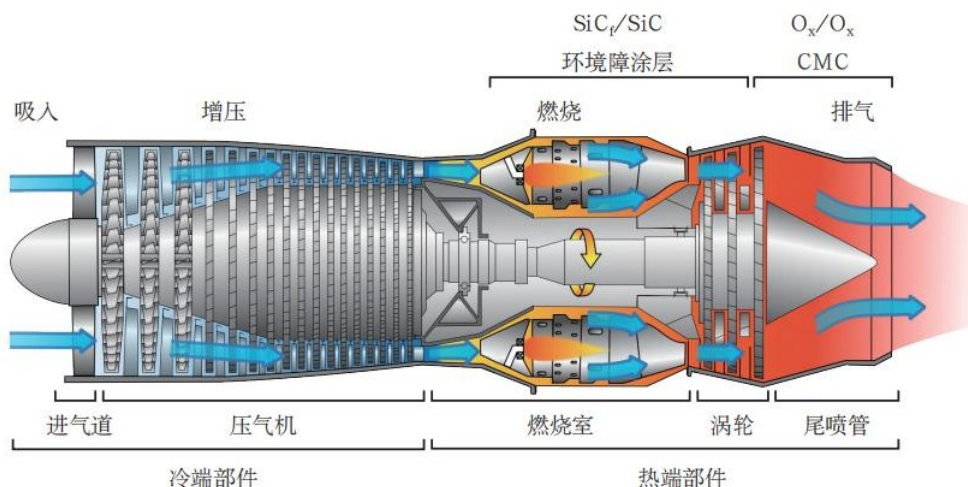
CMC 是航空发动机的热端理想材料，潜在应用部位为燃烧室/加力燃烧室、涡轮导向叶片、涡轮外环、涡轮叶片、尾喷管调节片/密封片等。

图表8：CMC 可应用在航空发动机上的部位



数据来源：《陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展》， 证券

已在发动机上得到应用的主要有碳化硅纤维增强碳化硅复合材料（SiCf/SiC）和氧化物纤维增强氧化物复合材料（Ox/Ox）两种，其中 SiCf/SiC 是研究和应用的重点。SiCf/SiC 在 1200~1400℃ 的高温燃气下的寿命可达几千小时，是军用/商用航空发动机核心机热端结构（燃烧室、高低压涡轮）最理想的材料。Ox/Ox 的耐温能力低于 SiCf/SiC，但由于不存在氧化问题，寿命可达上万小时，且成本相对较低，可应用于涡喷、涡扇发动机喷管以及涡轴、燃气轮机核心机的高温部位。因 SiCf/SiC 耐温能力更强，符合航空发动机的核心需求，且综合性能更好，被国内外公认为最有潜力的发动机热结构材料之一，是目前研究和应用的重点。

图表9：SiCf/SiC 和 O_x/O_x 在航空发动机上的应用部位

数据来源：《航空发动机用陶瓷基复合材料及制造技术》，证券

对于 CMC 的应用，国外中温中载静止件已进入批产阶段，高温中载件正在进行全寿命验证，高温高载转动件仍在探索。国外在陶瓷基复合材料构件的研究与应用方面，基于先易后难、先低温后高温、先静子后转子的层层递进的发展思路，充分利用现有的成熟发动机进行考核验证。首先发展中温（700℃~1000℃）和中等载荷（低于 120MPa）的静止件，如尾喷口调节片/密封片、内锥体等；再发展高温（1000℃~1300℃）中等载荷静止件，如火焰筒、火焰稳定器、涡轮导向叶片和涡轮外环等；最后验证高温高载荷（高于 120MPa）的转动件，如涡轮转子、涡轮叶片。总的来说，**喷管调节片 / 密封片等中温中等载荷静止件已完成全寿命验证并进入实际应用和批量生产阶段，可以实现减重 50%以上；燃烧室火焰筒和内外衬、导向叶片等高温中等载荷静止件正进行全寿命验证，有望进入实际应用阶段，涡轮外环已进入批产阶段；而涡轮转子、涡轮叶片等高温高载荷转动件尚处于探索研究阶段，使用寿命与应用要求相距甚远。**

图表10：CMC 在航空发动机上已经实现应用的部位



数据来源：《航空发动机陶瓷基复合材料无损表征技术研究进展》，证券

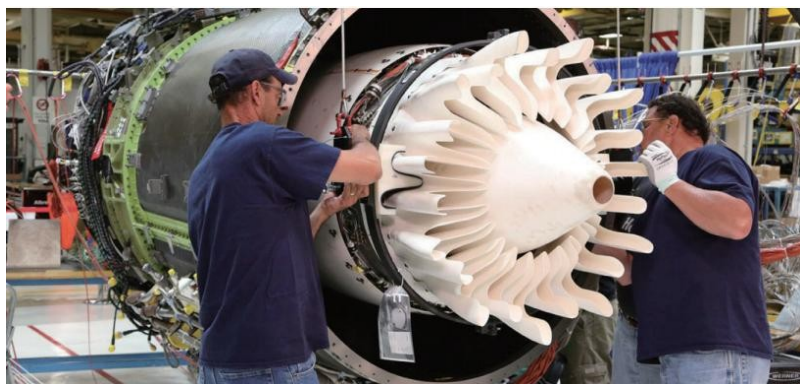
图表11：不同发动机上 CMC 的应用部位和应用情况

型号	材料	应用部位	飞机型号	验证情况/效果
法国M88-2	Cf/SiC	尾喷调节片	阵风	常态化使用
法国M52-2	Cf/SiC	喷管调节片/密封片	幻影 2000	完成实战测试飞行
美国 F119	Cf/SiC	矢量喷管内壁板和外壁板	F22	减重，解决飞机重心后移问题
美国 F414	SiCf/SiC、Ox/Ox	燃烧室、尾喷调节片	F/A-18	更耐高温，延长使用寿命，冷却气需求量更小
美国 F100	SiCf/SiC	密封片	F-15,F-16	减重 60%，更好的抗热机械疲劳性能
美国 F110	SiCf/SiC	密封片	F-15,F/A-18	推力提升 35%
欧洲 EJ200	SiCf/SiC	燃烧室、火焰稳定器和尾喷管调节片	EF2000	通过军用发动机试验台、验证发动机的严格审定，在高温高压燃气下未受损伤
美英 Trent800	SiC 复合材料	涡轮外环	B777	大幅节省冷气量，提高工作温度和使用寿命，有效减重
美国 F136	SiCf/SiC	导向叶片	/	已进行了全寿命演示验证，进入工程应用阶段，耐高温能力提高，减少冷却空气量。
美法 LEAP	SiCf/SiC	涡轮外环	C919	减少从压气机引出的冷气需求量，提高发动机推力，并降低燃油消耗量 1.5% 以上。
美国 GE9X	SiCf/SiC	燃烧室内外衬，涡轮外环、导向叶片	B777X	第一阶段，导向叶片和涡轮外环已通过测试；第二阶段，燃烧室火焰筒已经过百小时级试车考核。

资料来源：《航空发动机陶瓷基复合材料无损表征技术研究进展》，《SiC 纤维及其增强 SiCf/SiC 复合材料的研究进展》，《碳化硅陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用需求及挑战》，《陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展》， 证券

军用航空发动机一般采用 SiCf/SiC 尾喷管以满足隐身性能，GE 生产的 passport20 公务机发动机和 F414 军用发动机采用氧化物 CMC 制造排气装置和封严片。对于军用航空发动机而言，发动机尾喷管是重要红外辐射源之一，因此还需要考虑材料的隐身性能。与 Cf/SiC 以及 Ox/Ox 相比，SiCf/SiC 的吸波性能更好，可实现发动机的隐身，因此军用航空发动机的尾喷一般采用 SiCf/SiC。GE 用于“环球”7000/8000 公务机的 passport 20 发动机采用氧化物复合材料制造整流罩、排气混合器和中心锥，与同级别发动机相比，减少了 8%的耗油率。此外，2011 年生产的军用发动机 F414 开始安装 Ox/Ox 制造的封严片。

图表12： passport20 的 Ox/Ox 整流罩、排气混合器和中心锥



图表13： F414 的 Ox/Ox 封严片



数据来源：《航空发动机用陶瓷基复合材料研究进展》， 证券数据来源：《陶瓷基复合材料在航空发动机热端部

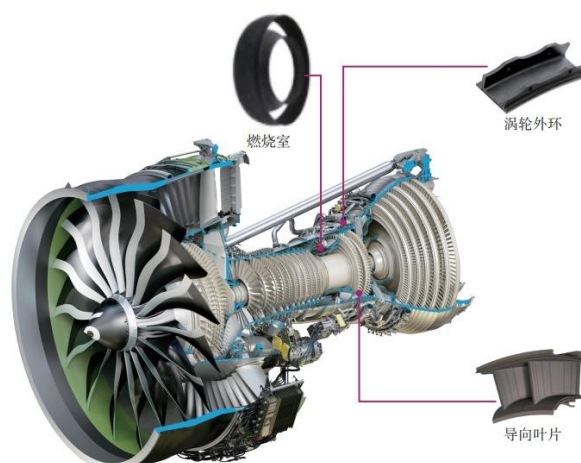
件应用及热分析研究进展》， 证券

GE 是目前对于 SiCf/SiC 应用最成功的公司，已将其批量应用于 LEAP、GE9X 和 GE3000。2009 年，该公司研制的 SiCf/SiC 复合材料低压导向叶片在 F136 发动机上完成验证，并于 2010 年完成首飞。2016 年在 LEAP 发动机的涡轮外环率先使用 SiCf/SiC 复合材料并已批产，显著降低冷气的消耗量并显著改善外环的服役特性和使用寿命，**一台 LEAP 发动机有 18 个 CMC 零件，总重量为 1kg。**继而在新型 GE9X 商用发动机的燃烧室内衬和外衬、两级导向叶片和一级涡轮外环共五个部件使用了该材料，耗油率比 GE90-115B 降低 10%，该型号已于 2020 年获得美国 FAA 适航认证，成为目前世界上推力最大的商用喷气发动机。在燃气轮机方面，H 型燃气轮机使用了 SiCf/SiC 复合材料涡轮外环，其燃烧效率创造了世界纪录。新一代军用涡轴 GE3000 发动机使用了陶瓷基复合材料，比 T700 型发动机耗油率降低 25%、全生命周期成本降低 35%，寿命延长 20%，功重比提高 65%。

图表14： LEAP 发动机的 CMC 涡轮外环



图表15： GE9X 上的 CMC 部件



数据来源：《陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析 研究进展》， 证券

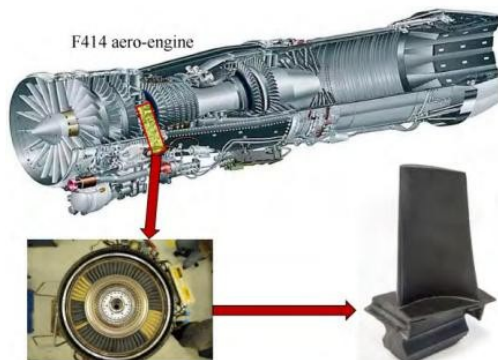
数据来源：《航空发动机用陶瓷基复合材料研究进展》， 证券

GE 完成了首个 CMC 低压涡轮转子叶片的验证，研制的下一代军用变循环发动机 XA1000 是 CMC 应用最广泛的发动机。2014 年 GE 航空集团以 F414 发动机为验证平台，在 1650℃下经过 500 个严酷的循环考核，完

成了首个低压涡轮转子叶片的验证。GE 在 XA100 发动机的部件使用 CMC 材料和聚合物基复合材料(PMC)等，

是所有商用或军用发动机中 CMC 使用最广泛的发动机，与之前的产品相比，XA100 发动机的燃油效率提高了 25%，推力提升 10%，散热能力也到了很好的改善。目前已经完成了第二台 XA100 变循环发动机的第三轮测试，该发动机可用于 F-35 和第六代战斗机。

图表16：F414 的 CMC 低压涡轮叶片



图表17：XA100 发动机



数据来源：《陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展》，证券

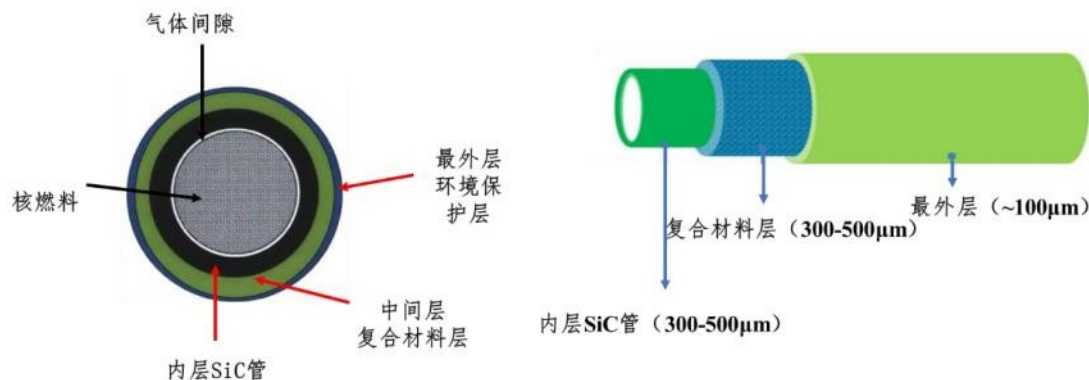
数据来源：《SiC 纤维及其增强 SiCf/SiC 复合材料的研究进展》，证券

2.2 SiCf/SiC 辐照稳定性好，是核工业的理想候选材料

在核能领域，SiCf/SiC 复合材料以其高熔点、高热导率、高温稳定性、较小的中子吸收截面、优良的中子辐照稳定性等优异性能，成为**反应堆包层第一壁、流道插件、控制杆和分流器**等的理想候选材料。

SiCf/SiC 有望取代锆合金作为水堆燃料元件的包壳材料。核燃料元件是核反应堆的核心组件，它对核反应堆的经济与安全有直接的影响。目前正在使用的核电站多数是以锆合金为燃料元件的轻水反应堆，然而，锆合金包壳本身存在着的问题包括吸氢、水中的腐蚀和芯-壳反应等，无法解决核燃料元件的长期安全性问题。SiCf/SiC 复合材料具有高温蒸汽腐蚀动力学低、中子经济性高、辐照稳定性好、以及优异的高温力学性能等特点，被认为是理想的核燃料元件包壳材料，有希望代替锆合金应用于轻水堆。美国通用原子公司利用 SiCf/SiC 复合材料制备了具有三层结构的新型水堆燃料元件，内层和最外层为 SiC，中间层为 SiCf/SiC。

图表18：碳化硅燃料包壳管

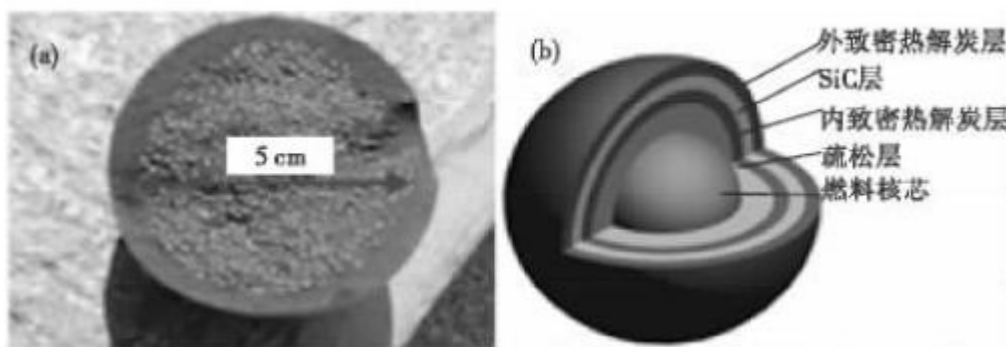


数据来源：《碳纤维增韧碳化硅复合材料的制备与性能研究》，证券

此外，碳化硅还在高温气冷堆、熔盐堆、气冷快堆、事故容错材料等方向具有应用前景。**目前日本和美国**

的应用进度世界领先。

图表19：高温气冷堆燃料元件



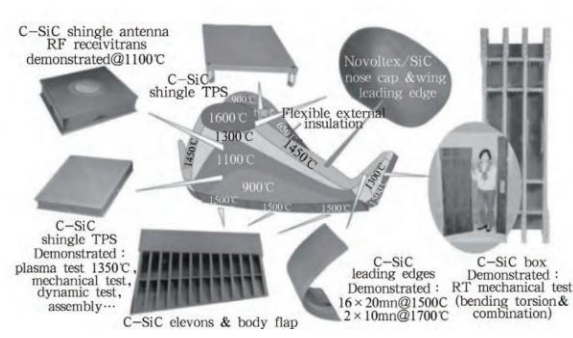
数据来源：《碳化硅材料在核燃料元件中的应用》， 证券

2.3 Cf/SiC 在航天领域得到广泛应用，主要用于飞行器防热以及卫星反射镜

Cf/SiC 发展较早，在航天领域已实现成熟应用。Cf/SiC 是最早发展起来的陶瓷基复合材料，一直吸引着发达国家投入巨资开展研究。欧美国家侧重于该材料在航空航天领域的应用研究，日本则更注重其在新能源等高新技术领域的应用研究。Cf/SiC 是目前应用最为成熟的陶瓷基复合材料体系，**抗氧化能力弱于 SiCf/SiC，但耐高温能力优于 SiCf/SiC，适用于对温度要求高但对寿命要求相对较低的场景，在航天领域中主要作为热结构应用，另外还被用于卫星镜面。**

Cf/SiC 可有效解决高超声速飞行器的防热需求和减重需求。随着航空航天领域的不断发展，各国对高超声速飞行器等技术越来越重视。由于在长时间飞行、大气层再入飞行和跨大气飞行时面对严重的烧蚀、高速气流的冲击以及大梯度热冲击的影响，急需一种耐高温、耐烧蚀、抗冲击的材料解决这些问题。Cf/SiC 可实现结构-防热的一体化，满足防热需求的同时实现减重。在欧美等国家，Cf/SiC 在飞行器上已经得到了广泛的应用，主要应用在航天器的头锥帽、机翼前缘和盖板等。法国的 Hermes 航天器的头锥帽和机翼前缘，美国的 NASA X-37 飞行器的组合襟翼、方向舵等结构件均采用这类材料作为高温热防护结构，美国 X-38 空天飞机采用防热/结构一体化的全 Cf/SiC 组合襟翼。2015 年 2 月，欧洲 IXV 试验飞行器飞行成功，其热防护系统头锥、迎风面大面积、翼前缘和体襟翼均采用 C/SiC 复合材料，可以满足超过 1600℃ 的服役要求，薄壁异形构件尺寸达到了米量级，体现出很高的制备工艺水平，技术成熟度较高。

图表20：法国 Hermes 航天器大量采用 Cf/SiC



图表21：IXV 飞行器热防护结构



数据来源：《SiC 纤维及其增强 SiCf/SiC 复合材料的研究进展》， 证券

数据来源：《空天飞行器热防护与热管理技术分析与展望》， 证券

Cf/SiC 被广泛用于火箭发动机。由于 Cf/SiC 耐热冲击性高，对液体推进剂化学稳定性高，具有较高的抗蠕变性，作为耐烧蚀材料 and 高温结构材料在国外多种火箭发动机上得到广泛应用。

图表22：Cf/SiC 在国外火箭发动机上的应用

发动机种类	应用部位
动能武器小型姿控轨控发动机	抗氧化推力室
大型液体发动机	抗氧化喷管、扩张段与延伸锥
特种武器液体冲压发动机	抗氧化燃烧室（内衬）、喷管、进气口罩
特种武器固体冲压发动机	抗氧化喷管、抗氧化燃气中心管
战术导弹固体发动机	低烧蚀喉衬、喷管

资料来源：《Cf/SiC 陶瓷基复合材料在航天领域的研究与应用》， 证券

Cf/SiC 还是一种理想的空间相机结构材料。随着空间相机分辨率的逐渐提高，空间相机正朝着大口径、长焦距、轻量化方向发展。其中空间相机反射镜和支撑结构是高分辨率空间相机的关键部件，必须具有优异的力学性能和热稳定性。Cf/SiC 复合材料具有质量轻、刚度高、热膨胀系数低等特点，可以极大地提高空间相机部件的尺寸稳定性。作为卫星反射镜材料的研究在国外已经进行了 30 多年，技术已相当成熟，美国、德国等国家已制备出 Cf/SiC 超轻镜面和反射镜、微波屏蔽镜面等光学结构。

图表23：空间相机反射镜示意图



数据来源：《C/SiC 复合材料制备技术及应用现状》， 证券

2.4 Cf/SiC 是新一代高性能刹车材料的首选，已批量应用于汽车和飞机

目前广泛用于高速列车、汽车和飞机上的刹车材料主要是粉末冶金和 C/C 复合材料。然而，粉末冶金刹车材料存在高温容易粘结、摩擦性能易衰退、高温强度下降显著、抗热震能力差、使用寿命短等缺点；而 C/C 刹车材料存在静态和湿态摩擦系数低（湿态相对干态衰减约 50%）、热库体积大、生产周期长（约 1200h）及生产成本高等问题，制约了其进一步发展及应用。

Cf/SiC 复合材料是近年来逐渐发展起来的一种新型高性能刹车材料，有望成为传统粉末冶金和 C/C 复合材料的良好替代品。Cf/SiC 复合材料具有比金属基复合材料更低的密度、更高的强度、更好的摩擦性以及更长的使用期限等优势。Cf/SiC 复合材料可以看作是将 C/C 复合材料中的 C 基体替换成硬质的 SiC 基体，SiC 的加入有效改善了复合材料的摩擦性和抗氧化性，而且摩擦性能对外界环境介质（霉菌和油污、潮湿等）不敏感。因此，Cf/SiC 复合材料被视为新一代高性能刹车材料的首选，在飞机、高铁、汽车等制动领域具有广阔的应用前景。

目前，Cf/SiC 刹车材料已用于高档轿车，在高铁上也已经得到实际应用。目前碳陶刹车盘价格偏高，因此多应用于高档汽车，保时捷、法拉利、奥迪 A8L 等高档汽车都已应用碳陶刹车材料。法国 TGV-NG 高速列车和日本新干线也已试用 Cf/SiC 闸瓦。美国 Starfire 公司研究先驱体转化法制备 Cf/SiC 刹车材料，并已应用于摩托车刹车片。

图表24：保时捷碳陶刹车盘



数据来源：brembo 官网， 证券

碳陶刹车材料对于军机意义重大，我国飞机碳陶刹车盘技术世界领先。碳陶刹车材料耐海水、耐盐雾腐蚀性强，抗热震和抗冲击能力强，还能实现浇水快速冷却，冷却时间大大缩短，对于军机战略意义非同凡响。由西北工业大学与中航工业西安航空制动科技有限公司联合研制的碳陶刹车盘产品，已经进入批产阶段，使我国成为国际上第一个将碳陶刹车盘成功用于飞机的国家，标志着中国飞机刹车技术跻身于世界领先水平。该碳陶刹车盘与上一代刹车盘相比，静摩擦系数提高 1—2 倍，湿态摩擦性能衰减降低 60%以上，磨损率降低 50%以上，使用寿命提高 1—2 倍。生产周期降低 2/3，生产成本降低 1/3，能耗降低 2/3，性价比提高 2—3 倍。价格也仅相当于国外同类产品的 50%—60%。

2.5 氮化硅纤维有望替代石英纤维，制备新一代导弹天线罩

导弹天线罩需要具备承载、耐温、透波、耐蚀等多功能于一体，陶瓷基透波复合材料是天线罩透波材料的发展趋势。天线罩透波材料的发展主要经历了三个阶段：有机透波材料、陶瓷透波材料、陶瓷基透波复合材料。

（1）上世纪 40 年代，导弹的飞行速度低，无法产生较大的气动加热（一般低于 300℃），采用树脂基复合材料制备天线罩即可满足要求。例如，美国 Boeing 公司制备“波马克”导弹天线罩的原料为不饱和聚酯树脂透波材料。

（2）第二阶段是上世纪 50 年代至 80 年代，飞行器及导弹飞行速度有所提升，气动加热效果上升（约 300~1000℃），有机材料的耐温性及高温透波性能的缺点开始放大，无法继续满足天线罩的服役环境要求。因此研究者们将目光转向于耐高温、耐烧蚀以及具有优良介电性能的陶瓷材料，包括氧化铝、微晶玻璃、堇青石、石英、氮化硼、氮化硅陶瓷等，逐渐成为制备高速飞行器天线罩的首选材料，其中一些已成功获得了型号应用。

（3）第三阶段是从上世纪 80 年代至今，飞行器及导弹飞行速度进一步提升，而单相陶瓷透波材料由于自身性能特点，在高温下韧性和稳定性不足，逐渐达不到高速飞行所面临的更加恶劣的环境对天线罩材料的要求。因此通过结合各种陶瓷材料的优点，将材料优化设计组合为一体称为新的研究思路，开始研究制备增强增韧的陶瓷基透波复合材料。美国与前苏联都先后研发了适用于高速导弹天线罩的陶瓷基透波复合材料并成功应用。

图表25：“先锋”导弹概念图及其天线罩



数据来源：《Si3N4 纤维表面 BN 涂层的 CVD 制备工艺及其在复合材料中增韧机制研究》，证券

连续 Si3N4 纤维有望替代石英纤维，制备新一代高马赫数导弹天线罩。近年来，超高音速导弹的快速发展对耐高温透波陶瓷纤维提出了迫切需求。目前，国内外高温透波材料的增强体主要为石英纤维。石英纤维具有高强度、低密度特性，且介电损耗低，可以实现宽频透波。但是，石英纤维在高于 900℃ 的温度下会因晶粒粗化而导致强度迅速下降，从而显著降低复合材料性能。随着中远程精确制导导弹的快速发展，新一代导弹的速度提高，天线罩的工作温度已经提升到 1000℃ 以上，且工作环境更加恶劣，这对高温透波材料提出了新的需求。连续 Si3N4 纤维的耐温性能优于石英纤维，且当碳含量控制在 5 wt% 以下时，纤维具有良好的高温透波性能，因此有望替代石英纤维，用于制备新一代高马赫数导弹天线罩，氮化硅纤维一般用于增强氮化硼和氧化硅，目前对于氮化硅纤维天线罩的应用仍处于早期阶段。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/908124011032006075>