

# 国外多孔基体氧化铝/氧化铝复合材料工程应用进展

田正豪<sup>1,2</sup>, 刘海韬<sup>1</sup>, 姜如<sup>3</sup>, 孙逊<sup>1</sup>, 邓归航<sup>1</sup>, 陈晓菲<sup>1</sup>

(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, 湖南 长沙 410073)

(2. 32517 部队, 安徽 芜湖 241000)

(3. 湖南科技大学 物理与电子科学学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 氧化铝/氧化铝复合材料 ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 是 20 世纪 90 年代兴起的一类连续陶瓷纤维增强陶瓷基复合材料, 已经发展为与 SiC/SiC、C/SiC 等非氧化物陶瓷基复合材料并列的一类陶瓷基复合材料。与非氧化物陶瓷基复合材料相比,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  具有长时抗氧化、高温耐腐蚀、低成本等独特优势, 已经在航空发动机、地面燃气轮机等军民两用热结构材料领域展现出广阔的应用前景。本文从材料应用的角度出发, 系统分析阐述了目前在  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  占主导地位的多孔基体  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3(\text{P-Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3)$  的增韧机制、成型工艺和性能特点, 重点归纳了国外近年来  $\text{P-Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  的工程化应用进展及前景, 最后指出了  $\text{P-Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  存在的局限性并展望了未来发展方向, 旨在为国内  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  体系发展提供借鉴和参考。

**关键词:** 氧化铝/氧化铝复合材料; 多孔基体; 工程应用; 综述

中图分类号: TB332

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)10-3910-12

氧化铝/氧化铝复合材料 ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 广义上是指以氧化铝为主要成分连续纤维和基体组成的陶瓷基复合材料, 已经成为连续陶瓷纤维增韧陶瓷基复合材料的一个重要分支。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  相比于高温合金更轻质且耐温能力可提升 100~200 °C; 与 SiC/SiC 等非氧化物陶瓷基复合材料相比,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  具有优异的高温抗氧化和抗水汽腐蚀性能, 且成本更低。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  在高温富氧、富含水汽、中等载荷等复杂工况下的显著优势使得其在航空发动机、地面燃气轮机、民用工业等领域呈现出广阔的应用前景<sup>[1-5]</sup>。

20 世纪 90 年代, 美、德等国家启动了大量有关  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  研究计划, 例如 ATP (advanced technology program, 1999~2003)、HIPOC (high performance oxide ceramic, 2009~2012)、CLEEN (continuous lower energy, emissions and noise, 2010~2015)、ERA (environmentally responsible aviation, 2010~2015) 等<sup>[6-8]</sup>; 2007 年  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  逐步进入了商品化阶段。根据 Newspaper Source 数据库发表的报告, 陶瓷基复合材料市场将从 2019 年的 94 亿美元增长至 2029 年的 233 亿美元, 年复合增长率 9.5%, 鉴于航空航天和民用工业对热结构材料的强大需求, 预计未来  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  在陶瓷基复合

材料市场占比将显著提升。

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  常见的增韧方法有引入界面相和制备多孔基体 2 种, 引入界面相制备  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  方法复杂且成本高昂, 而采用陶瓷浆料等方法制备多孔基体  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3(\text{P-Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3)$ , 不仅工艺简单还可实现与引入界面相相似的增韧效果, 因此多孔基体已发展成为  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  的主要增韧方法<sup>[9]</sup>。

近十年来, 我国在连续  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维及复合材料基础研究等方面进步显著<sup>[10-14]</sup>, 但在体系完整性、综合性能和工程应用等方面与国外尚有较大差距。目前已有文献从纤维类型、界面相、复合材料制备方法、材料性能等方面对  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  进行了综述, 但对占据  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  主导地位的  $\text{P-Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  增韧机制、工艺方法、商品化产品及性能等方面的讨论不成体系, 特别是工程化应用的时效性不强。基于此, 本文从  $\text{P-Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  在航空航天等领域实际应用的角度切入, 阐述了多孔基体复合材料的有效增韧机制、制备工艺和性能特点, 着重归纳了国外该复合材料在航空发动机、地面燃气轮机、热防护系统等方面的最新工程化应用进展, 总结了当前材料存在的应用问题并提出了发展建议, 旨在为国内  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  体系发展提供借鉴和参考。

收稿日期: 2021-10-11

基金项目: 湖南省杰出青年基金 (2020JJ2032)

作者简介: 田正豪, 男, 1993 年生, 硕士生, 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, 湖南 长沙 410073, 电话: 0731-87007666, E-mail: tzhjustin@163.com

### 1 多孔基体的增韧机制

对于连续陶瓷纤维增韧陶瓷基复合材料而言，增韧是永恒的主题，基体裂纹在传播至纤维/基体界面处发生偏转则是增韧的关键。多孔基体通过陶瓷颗粒形成的富含纳微米级孔隙的弱基体结构实现裂纹在基体、纤维/基体界面传播时有效偏转。当基体过于致密时，基体颗粒间、纤维/基体界面的结合显著增强，裂纹偏转的增韧机制会失效，基体裂纹引起的应力集中使纤维发生断裂，导致材料的韧性明显下降<sup>[15]</sup>。He 和 Hutchinson<sup>[16]</sup>通过比较裂纹传播过程中偏转裂纹和贯穿裂纹的能量释放速率，给出了裂纹偏转准则：

$$\frac{\Gamma_i}{\Gamma_f} < \frac{G_d}{G_p} \tag{1}$$

式中， $\Gamma_i$  和  $\Gamma_f$  分别为界面和纤维的韧性， $G_d$  和  $G_p$  分别为裂纹偏转和贯穿时的能量释放速率。 $G_d/G_p$  可表示为弹性失配系数  $\alpha$  的函数：

$$\frac{G_d}{G_p} = \frac{1}{4(1-\alpha)^{0.9}} \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{E_f - E_m}{E_f + E_m} \tag{3}$$

式中， $E_f$  和  $E_m$  分别为纤维和基体的弹性模量。对于多孔基体复合材料，基体模量  $E_m$  与相应单体陶瓷材料模量  $E_0$  可由式 (4) 表示<sup>[17]</sup>：

$$E_m = 0.76E_0 \left( \frac{zD}{2\pi} \right) \left( \frac{t}{t_R} \right)^{1/n} \tag{4}$$

式中， $z$  是配位常数， $D$  是基体的相对堆积密度（与孔隙率直接相关）， $t$  和  $t_R$  是烧结时间相关参数， $n$  是烧结扩散作用相关常数。

图 1 直观地展示了 He-Hutchinson 模型。由图可

知，增大弹性失配系数  $\alpha$ ，更易于实现复合材料中基体裂纹偏转行为。结合式 (3) 和式 (4)，降低基体堆积密度，即适当增加基体孔隙率可以显著提升  $\alpha$ ，进而促使基体裂纹偏转。基于此机制，在无纤维涂层的情况下，多孔基体能有效实现陶瓷基复合材料增韧。需要指出的是，多孔基体会增加氧化、水汽等气体在高温环境中的进出通道。因此，对于非氧化物纤维增韧的复合材料，不宜采用此方法，而是通过降低界面和纤维韧性比  $\Gamma_i/\Gamma_f$ ，即引入界面相来实现增韧。氧化铝固有的高温抗氧化、抗腐蚀特性是  $Al_2O_3/Al_2O_3$  采用多孔基体作为增韧机制的根本原因。

### 2 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 成型工艺及性能

#### 2.1 体系概述

图 2 列出了 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的组分、工艺、研究单位、商品化产品。目前，日本和美国的氧化铝纤维的生产技术成熟性能优异，美国和德国在复合材料制备

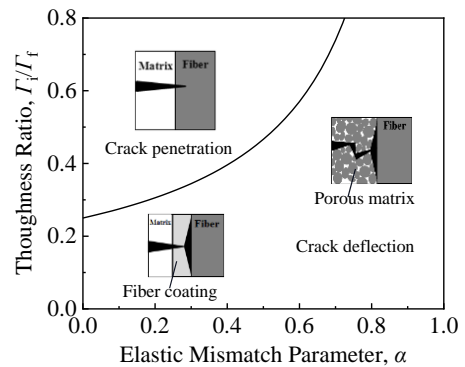


图 1 基于 He-Hutchinson 模型的裂纹偏转/贯穿示意图  
Fig.1 Crack deflection/penetration diagram based on He-Hutchinson model<sup>[16,17]</sup>

Fiber producers: 3M; Mitsui Mining; Sumitomo; Nitivy; ITCF Denckendorf		
Material manufacturers and research institutions: COI Ceramics; Composites Horizons; Walter E.C. Pritzkow Spezialkeramik; NASA Glenn Research Center; German Aerospace Center; Fraunhofer ISC-Zentrum HTL		
Composite trademark: COIC “N610/AS, N610/A, N720/AS, N720/A, N720/AM”; DLR “WHIPOX”; WPS “FW12, FW30”		
Fiber: ■ Almax            ■ N312 ■ Altex             ■ N440 ■ ALF-F2          ■ N550 ■ CeraFib 99      ■ N610 ■ Sapphire         ■ N720	Matrix: ■ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ■ Mullite ■ SiO <sub>2</sub> ■ YSZ ■ ZrO <sub>2</sub> ■ YAG	Process: ■ Filament winding ■ Fabric lay-up ■ Liquid

图 2 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系图  
Fig.2 System diagram of P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

上处于领先水平,在 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的生产和研发领域以美国 COIC (COI Ceramic) 和 CHI (Composites Horizons), 德国 WPS (Walter E.C. Pritzkow Spezialkeramik) 和 DLR (German Aerospace Center) 最具代表性,并已经形成系列化商品材料。

P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 采用的连续氧化铝纤维种类主要有单晶和多晶氧化铝纤维。单晶纤维(如 Sapphire 等)耐温性优异,但直径较大(>100 μm),可编织性差,主要应用于光学领域;小直径单晶氧化铝纤维目前在加速发展中<sup>[18]</sup>。当前,多晶纤维以 3M 公司生产的 Nextel™ 系列产品为主,根据氧化铝含量的不同分为多个牌号,其中氧化铝含量高的 N610 和 N720 纤维性能多用于增韧陶瓷,N610 纤维力学性能最高,N720 长时耐温性能特别是抗蠕变能力优异,使用温度可高于 1000 °C<sup>[9,18]</sup>。2 类纤维增韧的复合材料在 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的占比超 90% 以上。

在基体材料方面,多孔基体材料主要包括氧化铝(alumina, A)、氧化铝-氧化硅(aluminosilicate, AS)、氧化铝-莫来石(alumina-mullite, AM)体系。从基体的高温长时抗烧结(保持基体多孔特性的能力)、抗蠕变、耐水汽腐蚀角度看,AS、A、AM 体系最高耐温能力分别为 900~1000、1000~1100、1100~1200 °C<sup>[19-22]</sup>。因此,目前形成了以 N610/AS、N610/A、N720/AS、N720/A 为主体的 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系。

## 2.2 成型工艺

P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 主要成型工艺包括:缠绕、层铺、液相成型等,表 1 列出了不同成型工艺的优缺点及典型应用。成型工艺过程中使用的纤维增强体按结构分类主要有一维(1D)连续纤维束、二维(2D)平面织

物和三维(3D)纤维预制件<sup>[23-25]</sup>。在当前的实际工程应用中,一维和二维复合材料发展较成熟,制品性能稳定、均一性好,但仍存在易分层等局限。与二维层铺复合材料相比,三维复合材料具有出色的抗层间分层能力,其潜在的结构和性能优势使三维 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 处于加速发展阶段。

### 2.2.1 缠绕成型

缠绕成型工艺是将连续氧化铝纤维束在水性基体浆料中充分浸润,再缠绕在芯模上(见图 3a~3c),经过干燥、脱模、烧结等工序完成材料制备<sup>[26-28]</sup>。缠绕成型工艺具有复合材料力学性能可设计性强、自动化程度高的特点,适合制备回转体部件(见图 3d);局限是成型形状受限,难以成型非回转体部件,且纤维束缠绕交织区域易产生层状缺陷,进而降低材料承载能力与可靠性<sup>[26]</sup>。

### 2.2.2 层铺成型

层铺成型主要有 2 种方法:刷涂法和预浸料法<sup>[29-31]</sup>。与树脂基复合材料手糊工艺类似,刷涂法首先在模具上铺设单层氧化铝纤维布,接着刷涂基体浆料充分浸润纤维布(见图 4a),并反复多层刷涂铺叠后经干燥、脱模、烧结等步骤完成。目前,已经开发出针对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可长期储存的预浸料工艺,预浸料层铺相比于刷涂法更加方便快捷(见图 4b~4c),后续通过加压、加热等方式可实现整体固化成型<sup>[30]</sup>。层铺成型工艺简便、成本低,可制备复杂形状部件,制品力学性能优异,在航空发动机混合器等复杂部件生产中普遍使用;缺点是层铺成型复合材料无厚度方向上的纤维,导致材料层间强度低,生产大尺寸复杂部件过程中质量控制是严峻挑战。

表 1 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 主要制备工艺对比

Table 1 Comparison of main processes of P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[9,17,23-26]</sup>

Processing	Reinforcement	Advantage	Limitation	Typical application
Filament winding	1D continuous fiber tow	Mechanical property designable	Shape restriction Winding defect	Cylindrical combustion chamber liner Spherical return capsule
		High automation Suitable for gyrorotor component		
Fabrics lay-up	2D woven fabric	Complex shapes available	Weak interlaminar properties Low thermal conductivity	Complex structure engine mixer Flat sealing sheet Exhaust tubes, valves etc.
		Convenient and rapid production High mechanical property		
Liquid	3D fiber preform	Overall near-net-shape forming Interlaminar properties improvable (3D)	Long fabrication cycle and fiber damage(sol-gel) Material inhomogeneity and skin-core structure(slurry)	(Rapid development stage)

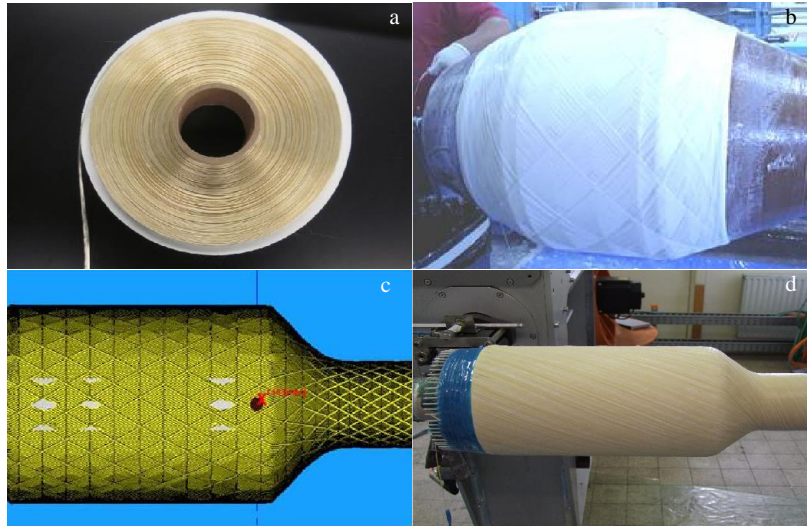


图 3 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 缠绕成型过程

Fig.3 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filament winding process: (a) Nextel 610 continuous fiber tow, (b, d) filament winding process, and (c) computer simulation filament winding<sup>[26-28]</sup>

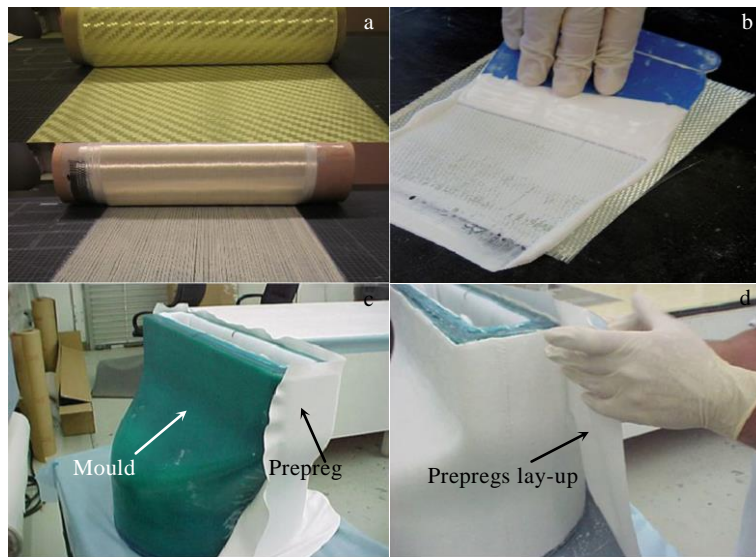


图 4 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层铺成型过程

Fig.4 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fabric lay-up process: (a) 2D woven fabrics, (b) slurry brushing, and (c, d) preregs lay-up<sup>[29,30]</sup>

### 2.2.3 液相成型

液相成型是通过压力或真空辅助等方法将液相基体原料引入堆叠织物或三维纤维预制件（见图 5a）内部，后经干燥、高温处理等方式形成复合材料基体，可实现整体净近成型，在纤维预制件中增加厚度方向的纤维可以有效改善材料的层间性能<sup>[24,25,32]</sup>。液相成型根据基体原料的不同主要有溶胶-凝胶法和陶瓷浆料法。

溶胶具有较好的流动性和浸润效果，能充分填充浸润纤维织物，但溶胶的陶瓷产率较低（质量分数一

般<20%），通常需要 10 次以上的反复致密化过程才能完成材料制备，溶胶在高温处理过程中存在复杂的物理与化学过程，对纤维损伤大，且纤维与基体间易形成界面强结合<sup>[33]</sup>，导致该方法制备的复合材料力学性能普遍偏低。陶瓷浆料通常为水性浆料，固含量高（>70%），热处理过程仅为水分挥发和陶瓷粉体烧结致密过程，对纤维损伤小、制备周期短；浆料法的技术难点是制备高固相含量且稳定的陶瓷浆料，缺点是陶瓷粉体易在织物表面堆积，在制备大厚度材料过程中易形成皮芯结构。

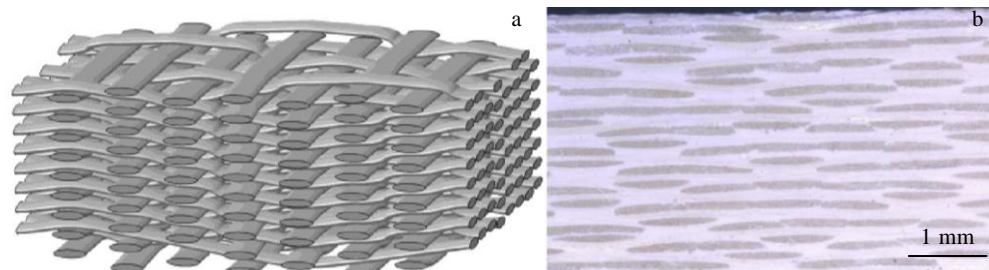


图 5 三维纤维预制件及液相成型 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 截面形貌

Fig.5 Schematic for 3D structure fiber preform (a); cross-section view of a typical P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> produced by liquid process (b)<sup>[24]</sup>

### 2.3 典型性能

表 2 列举了国外 6 种典型 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的基本性能。以氧化铝基体为例，对比相同基体不同纤维的 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 力学性能。室温下，由于 N610 纤维强度比 N720 更高，所以 N610/A 的力学性能优于 N720/A<sup>[21,30]</sup>；但温度超过 1100 °C 后，N720 纤维由于引入了莫来石相抗蠕变性能更好，具有更高的强度保留，因此 N720/A 高温性能优于 N610/A。对比相同纤维不同基体复合材料力学性能发现，从基体的高温长

时抗烧蚀性能角度看，AS、A、AS+ZrO<sub>2</sub> 基体复合材料的耐温性能依次提升。

与高温合金等材料横向对比，P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 密度为 2.5~2.9 g/cm<sup>3</sup>，是高温合金密度的 1/3（镍基合金 ~9 g/cm<sup>3</sup>）。P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的抗拉伸、抗弯曲强度可达 350~400 MPa，弹性模量近 150 GPa，断裂韧性约为 10 MPa m<sup>1/2</sup>，热膨胀系数为 6×10<sup>-6</sup>~9×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>，较高的韧性和低热膨胀使材料在高温下具备优异的损伤容限和结构稳定性。

表 2 典型陶瓷基复合材料性能参数

Table 2 Properties of typical ceramic matrix composites

Composites trademark	N610/AS	N720/AS	WHIPOX	N720/A	FW12	FW30	S400	N22	
Fiber	N610	N720	N610	N720	N610	N720	Sylramic	Sylramic	
Matrix	AS	AS	A	A	AS+ZrO <sub>2</sub>	AS+ZrO <sub>2</sub>	SiC	SiC	
Density/g cm <sup>-3</sup>	2.8	2.6	2.7	2.7	2.9	2.5	2.1	2.85	
Fiber volume fraction/%	51	45	37	45	35~45	35~40	40	36	
Porosity/%	25	25	25	25	25~35	30~35	10	2	
Tensile strength/MPa	23 °C	397	229	170	161	257	147	298	400
	1000 °C	351	229	96	176	216	168	-	-
	1200 °C	87	71	55	146	73	157	-	-
Bending strength/MPa	23 °C	-	216	283	182	345	161	241	-
	1000 °C	-	-	-	-	364	173	-	-
	1200 °C	-	-	-	190.3	231	139	-	-
Elastic modulus/GPa	124	76	145	70	97	51.5	110	250	
Interlaminar shear strength/MPa	15	11.5	12	12.5	17.4	8.4	27.6	~70	
Fracture toughness/MPa m <sup>1/2</sup>	-	-	11.5	-	10.2	-	-	-	
Thermal conductivity/W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	-	-	5.7	2~4	3.8	-	~20	24	
Thermal expansion/×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	8	6.3	6.5	6	8.5	-	2.6	~3	
Maximum service temperature/°C	1000	1100	1050	1200	1300	1300	1200	1200	
Reference	[34-36]	[34-36]	[37]	[34-36]	[5,38]	[5,38]	[36]	[39]	



表 2 还列出了 SiC/SiC 复合材料的典型性能。SiC 基复合材料具有更好的力学、导热性能和耐高温能力, 适用温度区间 1200~1400 °C, 其最显著的局限是抗氧化能力不足, 在含氧气高温环境中服役必须涂覆环境障涂层, 导致 SiC/SiC 构件成本提升和质量增加<sup>[39]</sup>。此外, SiC/SiC 复合材料原料价格昂贵生产成本较高, 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 生产成本仅为 SiC/SiC 复合材料的 1/2。综合上述分析, P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有密度低、强度高、长时抗氧化性优异、高温稳定性好、生产成本低等特点, 其整体性能明显优于高温合金, 与 SiC/SiC 复合材料十分接近且抗氧化稳定性更好, 极高的性价比使 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在高温结构材料领域工程应用中越来越受欢迎。

需要指出的是, P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 也存在性能局限, 主要有 2 个方面原因: 一是由于氧化铝纤维的使用温度限制, 在超过 1100 °C 氧化铝纤维由于晶粒生长、纤维脆性增加会导致复合材料在高温载荷下易发生蠕变破坏<sup>[40]</sup>; 二是由于其多孔基体特性导致, P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 孔隙率明显高于 SiC/SiC 等致密基体陶瓷基复合材料, 而材料的导热、层间性能通常与基体高度相关。因此, 相比于其他热结构材料 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的导热和抗分层能力偏弱<sup>[9,19]</sup>。

### 3 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 工程应用

#### 3.1 地面燃气轮机

地面燃气轮机燃烧室材料需要在 1000 °C 以上、富含水氧的复杂工况中服役数万小时。与高温合金相比, P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 能够显著提升燃气轮机的工作温度和效率, 是未来替代高温合金的重要备选材料<sup>[2]</sup>。

在美国 ATP 项目支撑下, 美国 COIC 和 Solar 等公司开展了复合材料在燃气轮机中的应用研究, 并共同开发了由 N720/A+FGI (friable graded insulation) 层组成的燃烧室外衬(图 6)<sup>[8,41]</sup>。2003 年 6 月至 2006 年 10 月, 该衬套在 Solar Centaur 50S 燃气轮机上累计运行达 25 404 h, 实现了 25 000 h 的测试目标<sup>[42]</sup>。这是 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 首次在燃气轮机燃烧室中完成长时测试。

#### 3.2 航空发动机

航空发动机对材料有苛刻的可靠性和服役寿命要求, 应用环境具有高温、高压、高速等特点。与金属材料相比, P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 应用于航空发动机, 可以实现减重、节能降噪、减少 NO<sub>x</sub> 和 CO 的排放等显著效果<sup>[3]</sup>。当前, P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 已在航空发动机排气部件、燃烧室衬套、喷管密封片和直升机发动机排气管等部件中进行应用测试, 部分已实现商品化。

美国 CLEEN 项目中研制了复合材料航空发动机排气部件, 由中心锥(宽 1.14 m, 高 2.34 m)和喷管部件(直径 1.60 m)组成, 是迄今为止制造的最大尺寸 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 部件, 其测试进展如图 7 所示。2013 年 2 月, 该部件在 RR Trent1000 发动机上完成了 75 h 地面发动机测试; 2014 年 7 月, 在波音 787 ecoDemonstrator 验证机顺利完成飞行测试, 累计装机测试 28.5 h, 达到 TRL (technology readiness level) 7 水平, 项目验证了大尺寸 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 航空构件的可行性, 已可在接近实际的环境中运行, 处于最后的应用测试阶段, 有望在新一代航空飞机中成功应用。

2010 年, 美国 GE 与 CHI 公司合作制造 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

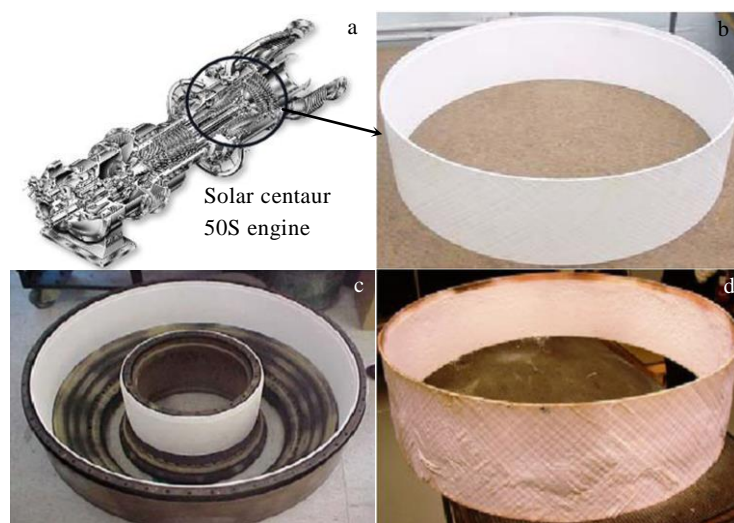


图 6 燃气轮机燃烧室 N720/A+FGI 外衬套

Fig.6 Gas turbine combustor N720/A+FGI outer liner: (a) schematic for the test engine, (b) outer liner ready for rig testing, (c) liner assembled, and (d) outer liner field engine test after 25 404 h<sup>[41,42]</sup>

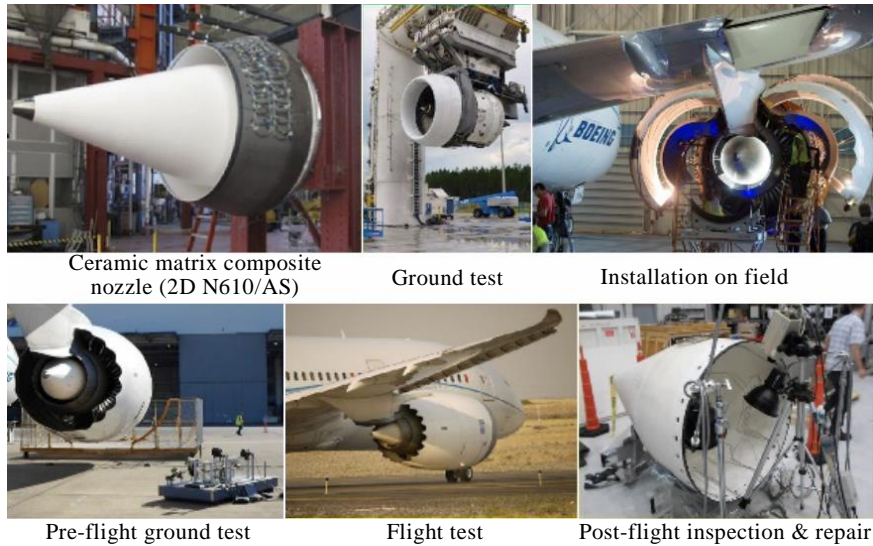


图 7 航空发动机 N610/AS 排气部件测试进展

Fig.7 Testing progress of aircraft engine N610/AS exhaust component<sup>[43]</sup>

航空发动机混合器、中心锥等部件，以改进 GE-Passport 20 发动机（Bombardier 公务机动力）减重、节能与降噪等效果<sup>[44]</sup>。图 8 是复杂结构 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 部件的典型制造过程。同年 4 月，在 ERA 项目支撑下，美国 NASA 与 COIC、RR（Rolls-Royce）等公司也协同研制了适配 RR AE3007 发动机（公务机、军用大型无人机动力）的 N610/AS 混合器、中心锥部件。RR AE3007 发动机于 2014 年完成了部件气动、声学和高/高温振动测试（见图 9）<sup>[7]</sup>。2015 年，应用氧化物复合材料部件的 GE-Passport 20 发动机通过

了美国 FAA 认证，截止 2017 年 CHI 公司已供货 300 余件 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 部件<sup>[44]</sup>。

2011 年，美国已经实现 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在军用航空发动机上应用。美国 F/A-18E/F 超级大黄蜂战斗机 F414 航空涡扇发动机喷管使用了 N720/AS 密封片（见图 10a~10c），使密封片部件的耐用提升明显<sup>[45-47]</sup>。此外，美国海军与 COIC 等公司联合研制了直升机发动机 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 排气管（见图 10d~10e）<sup>[30]</sup>。氧化物陶瓷基复合材料构件可以实现装备减重，提升装备构件使用寿命，降低维修更换成本。

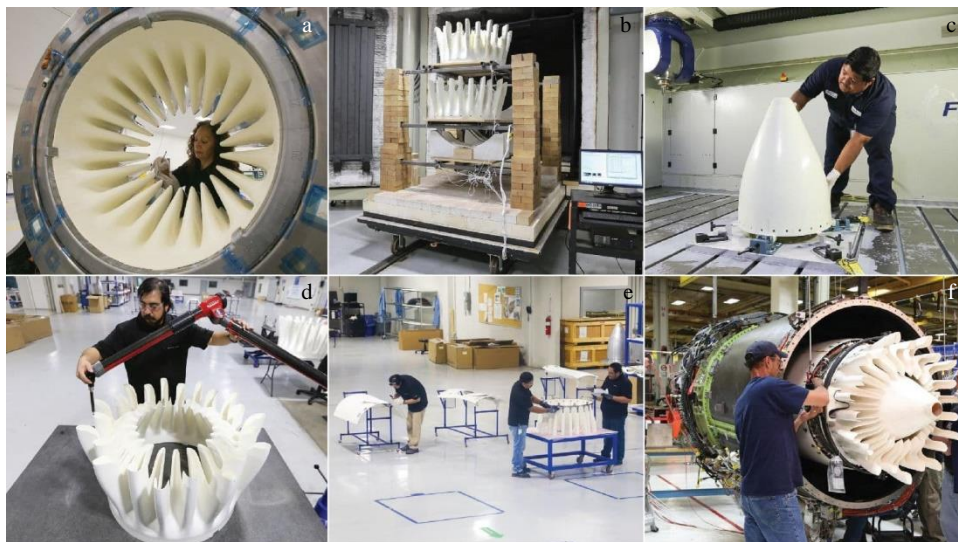


图 8 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混合器和中心锥制造流程

Fig.8 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> engine mixer and center body manufacturing process: (a) fabric lay-up in mold, (b) P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> components after sintering, (c) central body machining, (d) quality control inspection, (e) assemble metal and ceramic joint parts, and (f) assembled on GE-Passport 20 engine<sup>[44]</sup>



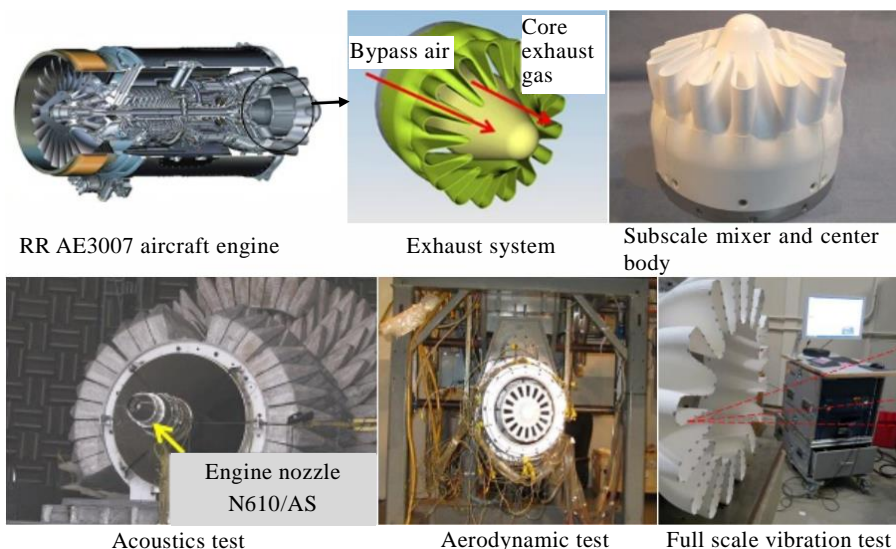


图 9 RR AE3007 发动机 N610/AS 排气部件测试

Fig.9 Testing progress of RR AE3007 engine N610/AS exhaust component<sup>[7]</sup>

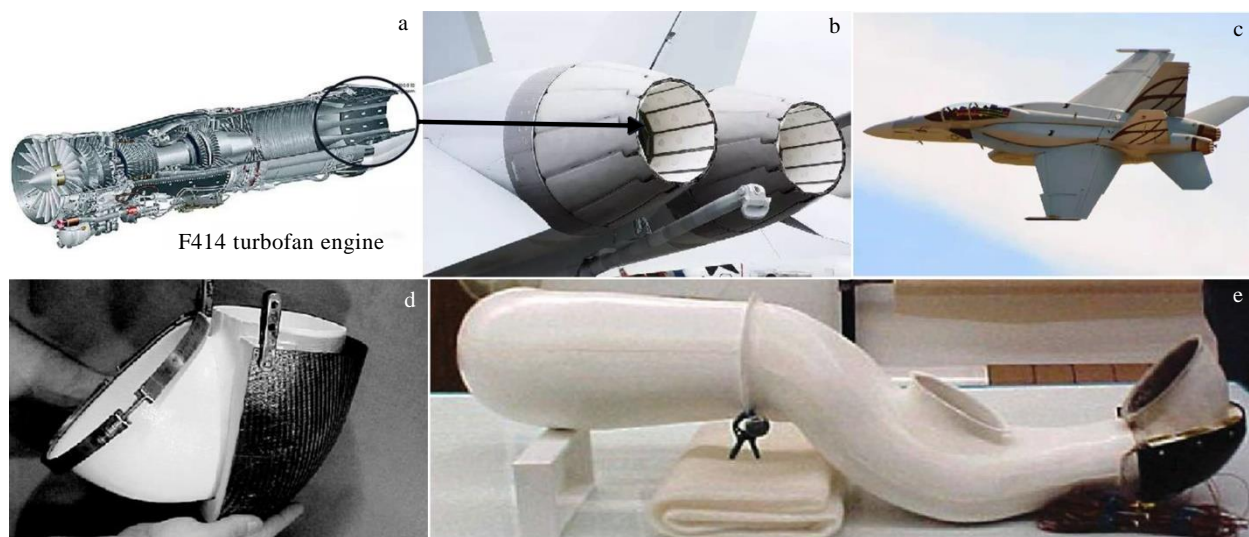


图 10 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 军用发动机部件

Fig.10 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for military applications: (a) schematic for F414 engine, (b) engine seal plates, (c) super hornet fighter aircraft, and (d, e) helicopter exhaust ducts<sup>[30,47]</sup>

2016 年，德国 DLR 报道了缠绕工艺 WHIPOX™ 衬套研究工作，测试了涂层+特殊结构的构件设计改善构件的导热和冷却<sup>[48]</sup>。衬套由 N610/A 制造，壁厚 3.5 mm，内壁面等离子喷涂 0.3~1.0 mm Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层，表面激光加工直径 0.6~0.75 mm，倾斜角 25° 的冷却孔，并设计了金属连接结构（见图 11），该燃烧室衬套成功进行了约 10 h 的模拟环境考核。

### 3.3 航天飞行器热防护系统

P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 应用于航天飞行器热防护系统（thermal protection system, TPS）可以发挥隔热、抗冲

刷、减重等作用<sup>[49,50]</sup>。借助其优异的低介电特性，在某些部件上可实现透波的功能。

美国 COIC 等公司开发用于航天飞行器和高超声速飞行器的 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 热防护系统（见图 12a），可实现快速安装固定、拆卸或更换<sup>[50]</sup>。德国 DLR 研发了 WHIPOX™ 球型结构返回舱（见图 12b）和 SHEFEX 飞行器热防护系统 N610/A 耐高温透波通信窗（见图 12c）<sup>[51]</sup>，并分别于 2012 年和 2015 年成功完成再入飞行实验。较低的使用成本是 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在航天飞行器热防护系统的一大优势，其低热导特性在热防护系



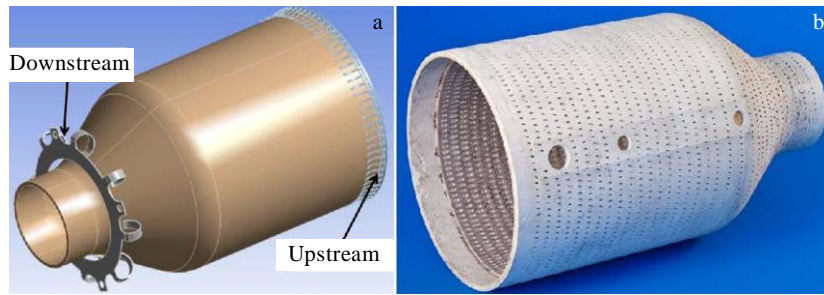


图 11 航空发动机 WHIPOX™ (N610/A) 燃烧室衬套

Fig.11 Aircraft engine WHIPOX™ (N610/A) combustor liner: (a) schematic for the liner structure and (b) liner with effusion cooling holes<sup>[48]</sup>

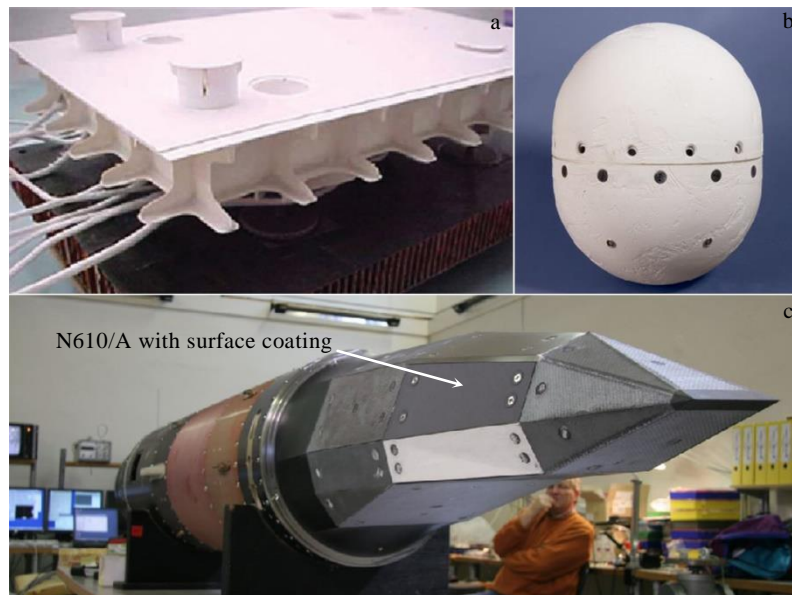


图 12 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 热防护系统

Fig.12 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> TPS: (a) COIC TPS, (b) spherical structure reentry capsule, and (c) SHEFEX N610/A high temperature wave-transparent window<sup>[9,51]</sup>

统中短时应用可发挥隔热特性。

### 3.4 工业等其他领域应用

P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在冶金、能源、汽车、无人机等领域应用广泛，德国 WPS 公司在 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 工业部件开发、制造和应用等方面具备丰富经验<sup>[52]</sup>。WPS 公司商品化的 Keramikblech<sup>®</sup> 火焰筒寿命可超过高温合金寿命的 20 倍以上（见图 13a）；其开发的 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 高端汽车排气管可承受汽车排气系统中的强热冲击循环，已成功通过现场试车测试（见图 13b）；WPS 公司与美国 Wilson 太阳能公司合作制造了光热发电的太阳能吸热器部件（见图 13c，高度 2.5 m，直径 2.5 m）；2018 年 7 月，WPS 公司与美国 Jetoptera 公司协作将 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 应用于无人飞行器射流推进器，相比金属部件实现了飞行器减重 50%、节约燃油 30% 以上的显著效果，该无人机首次顺利通过垂直

起降飞行测试，后续该推进器可装配多种型号无人飞行器（见图 13h~13k）。此外，WPS 公司生产的 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 部件广泛应用于铸铝（图 13d）、高温炉（图 13e）、燃烧器（图 13f）、热扩散器（图 13g）等领域。

综上，P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 适用于中等载荷、温度 1000~1200 °C、富含水汽等环境的非主承力固定部件应用。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 SiC/SiC 互为补充形成了陶瓷基复合材料体系，已在地面燃气轮机、航空发动机、航天热防护系统等应用逐步开展了测试，且因为 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 成本低廉，可在民用工业领域替代传统金属材料。

从国外的应用进展来看，P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的高比强度、比模量、高温抗氧化长时服役等优异性能，将逐步取代钛基和镍基等高温合金部件，成为民用及军用

图 13 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的工业应用

Fig.13 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> industrial applications: (a) P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and alloy flame tube HT-service test, (b) automobile exhaust tube, (c) solar absorber component, (d-g) P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> components for aluminum casting, furnace, burner, hot gas distributor, (h) vertical takeoff and landing test, and (i-k) flight test<sup>[52]</sup>

航空等领域广泛应用的复合材料之一。然而, 由于 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层间强度、导热及抗蠕变等问题局限, 现阶段难以承受高速高压涡轮部件的极端高温和转速, 工程化应用主要集中在排气系统、燃烧室衬套、热防护系统等部位。成型工艺方面, 国外制备 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的工艺发展相当迅速, 且产能在不断扩大, 复杂形状构件的关键技术逐渐成熟, 展现出国际顶尖的制造水平。在性能考核方面, P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 部件在气动、声学、振动及飞行等测试中进展顺利。未来 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可以适配航空发动机、燃气轮机等更高的工作温度, 促进更强大的亚音速和高超音速飞机等技术发展。相比之下国内在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的研究起步相对较晚, 在模型设计、成型及加工技术、考核测试、商品化等方面与先进国家还存在较大的差距, 这也是未来需要重点追赶和突破的方向。相信随着我国技术的快速进步, P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在国内陶瓷基复合材料领域的繁荣发展指日可待。

## 4 结 语

与 C/C、C/SiC、SiC/SiC 等非氧化物复合材料相比, 虽然氧化铝复合材料的发展历程较短(仅约 30 年), 但 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 已在很多领域已实现了工程应

用。然而, P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 仍存在一些局限性问题, 并未得到很好解决。目前, 该复合材料存在的主要问题有:

1) 二维纤维布增韧的多孔基体复合材料占到 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 80% 以上, 层间剪切强度偏低, 在服役过程易过早出现分层失效。

2) P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在高于 1200 °C 的环境服役时, 氧化铝晶粒生长将导致纤维力学性能严重降级, 复合材料的服役温度受到极大限制。

3) 多孔基体特性与氧化铝材料的本征热物理性能共同决定了 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的热导率偏低, 该材料应用于发动机结构材料时, 由于部件冷面与热面的温度梯度以及面内温度场的不均匀性, 会在复合材料内部形成较大的热应力, 降低材料服役寿命。

对于氧化铝复合材料而言, 机遇与挑战并存。针对使以上问题, 未来 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 发展应集中在以下 3 个方面:

1) 提升层间性能。三维纤维织物增韧复合材料应成为发展重点, 利用三维织物的高整体性和层间纤维提升复合材料层间力学性能, 与三维织物相配合的基体原料、基体引入工艺、材料微观结构与综合力学性能研究等大量工作待开展。

2) 提升材料服役温度及热物理性能。研制更高耐

温能力的纤维是解决复合材料耐温性的关键,如小直径多晶 YAG 纤维等。未来根据使用工况实现 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 热物理性能宽范围调控是未来重点工作,比如通过基体组分、纤维织物结构(纤维混编、厚度方向引入纤维)调控实现复合材料热/力性能的综合优化。

3) 强化新结构设计、材料设计与应用能力。采用 FGI 层能提升材料的服役温度;部件表面加工冷却孔可以提高冷却效率、降低厚度方向的温度梯度及材料热应力。未来 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 部件的结构设计、与金属的连接问题是工程应用的关键环节,发展适用于 P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的热障/环障涂层提升部件的服役温度和应用领域也是未来需要关注的方向。

#### 参考文献 References

- [1] Liu Haitao(刘海韬), Huang Wenzhi(黄文质), Zhou Yongjiang(周永江) et al. *High-Temperature Structure Materials for Microwave Absorption(高温吸波结构材料)*[M]. Beijing: Science Press, 2017: 70
- [2] Wang Yi(王义). *Thesis for Doctorate(博士论文)*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015
- [3] Walock M J, Heng V, Nieto A et al. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*[J], 2018, 140(10): 102 101
- [4] Roode M, Bhattacharya A. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*[J], 2013, 135(5): 51 301
- [5] Pritzkow W E C, Almeida R S M, Mateus L B et al. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2021, 41(5): 3177
- [6] Gerendás M, Cadoret Y, Wilhelmi C et al. *Processing of ASME Turbo Expo 2011*[C]. Vancouver: ASME and Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, 2011: 477
- [7] Kiser J D, Bansal N P, Ursic J et al. *ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*[C]. Montreal: ASME, 2015: 43 593
- [8] Lane J E, Morrison J A, Marini B et al. *ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air*[C]. Montreal: ASME, 2007: 267
- [9] Tushtev K, Almeida R S M. *Comprehensive Composite Materials II*[J], 2018, 5: 130
- [10] Zhang Shichao(张世超), Wu Wei(吴蔚), Sun Xiankai(孙现凯) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(S1): 273
- [11] Jiang R, Sun X, Liu H T et al. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2021, 41(10): 5394
- [12] Wang Y, Liu H T, Cheng H F et al. *Ceramics International*[J], 2015, 41(1): 1065
- [13] Tian Z H, Sun X, Deng G H et al. *Applied Composite Materials*[J], 2021, 28(3): 767
- [14] Lu Shuwei(卢淑伟), Luo Ruiying(罗瑞盈), Wang Lianyi(王连毅). *Journal of Ceramics(陶瓷学报)*[J], 2018, 39(4): 430
- [15] Mattoni M A, Yang J Y, Levi C G et al. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2001, 84(11): 2594
- [16] Lu T J, Hutchinson J W. *Composites*[J], 1995, 26(6): 403
- [17] Zok F W. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2010, 89(11): 3309
- [18] Bunsell A R, Berger M H. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2000, 20(13): 2249
- [19] Lange F F, Levi C G, Zok F W. *Comprehensive Composite Materials*[J], 2000, 4: 427
- [20] Casas L, Martínez-Esnaola J M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 368(1-2): 139
- [21] Ruggles-Wrenn M B. *Comprehensive Composite Materials II*[J], 2018, 5: 174
- [22] Xu Z K, Sun X H, Xiong K Z et al. *Ceramics International*[J], 2021, 47(5): 5896
- [23] Lincoln J, Jackson B, Barnes A et al. *Ceramic Transactions*[J], 2017, 263: 401
- [24] Scola A, Eberling-Fux N, Turenne S et al. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2018, 102(6): 3256
- [25] Yang J Y, Weaver J H, Zok F W et al. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2010, 92(5): 1087
- [26] Vasechko V, Flucht F, Rahner N. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2018, 38(15): 5192
- [27] Gerendas M, Wilhelmi C, Machry T et al. *ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition*[C]. San Antonio: ASME, 2013: 94 679
- [28] Szweda A, Butner S, Ruffoni J et al. *ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air*[C]. Reno: ASME, 2005: 315
- [29] Rüdinger A, Noeth A, Pritzkow W E C. *Ceramic Applications*[J], 2015, 3(2): 48
- [30] Bansal N, Lamon J. *Ceramic Matrix Composites: Materials, Modeling and Technology*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2015: 236
- [31] Shi Y, Hönig S, Frieß M et al. *Ceramics International*[J], 2018, 44(2): 2320
- [32] Puchas G, Helda A, Krenkela W. *Materials Today: Proceedings*[J], 2019, 16: 49
- [33] Jiang Ru(姜如). *Thesis of Doctorate(博士论文)*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019



- [34] Jurf R A, Butner S C. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*[J], 2000, 122(2): 202
- [35] Hull C. *Dissertation for Master*[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2015
- [36] Ruggles-Wrenn M B, Braun J C. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 497: 101
- [37] Volkman E, Tushtev K, Koch D *et al. Composites Part A*[J], 2015, 68: 19
- [38] Krenkel W, Naslain R, Schneider H. *High Temperature Ceramic Matrix Composites*[M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2006: 681
- [39] Bansal N P. *Handbook of Ceramic Composites*[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004: 55
- [40] Hay R S, Fair G E, Tidball T. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2015, 98(6): 1907
- [41] Roode M. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*[J], 2010, 132(1): 11 301
- [42] Roode M V, Price J, Otsuka J *et al. ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air*[C]. Berlin: ASME, 2008: 289
- [43] Keller K, Jefferson G, Kerans R. *Oxide-Oxide Composites, Ceramic Matrix Composites: Materials, Modelling and Technology*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2014
- [44] Dawson D. *Composites World*[J], 2017, 4: 11
- [45] John R, Zawada L P, Kroupa J L. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 1999, 82(1): 161
- [46] Staehler J M, Zawada L P. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2000, 83(7): 1727
- [47] Kellner T. *The Great Farnborough Airshow Scavenger Hunt for GE Tech*[N]. General Electric, 2017-07-16
- [48] Behrendt T, Hackemann S, Mechnich P *et al. ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*[C]. Seoul: ASME, 2016: 57 323
- [49] Davis J B, Marshall D B, Oka K S *et al. Composites Part A*[J], 1999, 30(4): 483
- [50] Riedell J. *America Patent*, US6827312B2[P], 2004
- [51] Göring J, Hackemann S, Kanka B. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*[J], 2007, 38(9): 766
- [52] Caballero F G. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2021

## Oversea Progress in Porous-Matrix Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites for Engineering Applications

Tian Zhenghao<sup>1,2</sup>, Liu Haitao<sup>1</sup>, Jiang Ru<sup>3</sup>, Sun Xun<sup>1</sup>, Deng Guihang<sup>1</sup>, Chen Xiaofei<sup>1</sup>

(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. 32517 Troop Unit of PLA, Wuhu 241000, China)

(3. School of Physics and Electronic Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** As one type of continuous ceramic fiber reinforced ceramic matrix composites that emerged in the 1990s, alumina/alumina composites (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) have become a major category of ceramic matrix composites alongside C/SiC, SiC/SiC, etc. Compared with non-oxide ceramic matrix composites, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites possess unique advantages such as long-term oxidation resistance, high-temperature corrosion resistance and low cost, etc, and display broad application prospects in the field of military and civilian thermal structural materials such as aircraft engines and gas turbines. From the perspective of material application, this paper demonstrated the toughening mechanism, fabricating process and performance characteristics of porous matrix Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), which were especially dominant among those Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The focuses were paid on the research process and engineering applications of P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in recent years. Finally, the key problems and the future development proposals of P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> were summarized. This information could provide reference for the development of domestic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Key words:** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites; porous matrix; engineering application; review

Corresponding author: Liu Haitao, Ph. D., Researcher, Science and Technology on Advanced Ceramic Fibers and Composites Laboratory, College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, P. R. China, Tel: 0086-731-87007666, E-mail: htshlt@163.com