

# 碳陶刹车材料的研究进展

## Research Progress of Carbon/Silicon Carbide Brake Materials

西北工业大学超高温结构复合材料国家重点实验室 徐兴亚 张立同 成来飞 范尚武

**[摘要]** 碳陶(C/SiC)刹车材料是近年来发展的一种新型刹车材料,具有密度低、耐高温、摩擦性能高且稳定等优点,在高速列车、飞机等高能刹车领域具有广泛的应用前景。刹车材料是结构/功能一体化材料,纤维预制体结构对材料的热物理性能、摩擦磨损性能和力学性能有很大影响。针对不同预制体类型,对C/SiC刹车材料的制备、微结构和摩擦磨损性能进行了系统介绍。同时,介绍了C/SiC刹车材料的改性方法。

**关键词:** 碳 / 碳化硅 刹车材料 摩擦磨损性能

**[ABSTRACT]** Carbon/silicon carbide (C/SiC) composites are new type of brake materials developed recently. C/SiC composites possess excellent properties, such as low density, good resistance to high temperature and high and stable frictional properties. C/SiC composites are promising brake materials in the field of high energy such as high speed trains and aircraft. Brake materials are structural-functional integration materials. The structure of fiber preform has a great influence on the thermo-physical properties, friction and wear properties and mechanical properties of materials. Preparation, microstructure and tribological properties of C/SiC with different performs are systematically introduced. Also, the modified methods of C/SiC brake materials are described.

**Keywords:** C/SiC Brake material Friction and wear property

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<sup>[1]</sup>;而C/C刹车材料存在静态和湿态摩擦系数低(湿态相对于干态衰减约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<sup>[2-5]</sup>。

C/SiC刹车材料(碳陶刹车材料)是近年来继粉末冶金材料和C/C复合材料之后发展的一种高性能刹车材料。与传统金属及半金属刹车材料相比,其具有密度低、强度高、摩擦性能稳定、摩擦量小、制动比大、耐高温、使

用寿命长等优点<sup>[6]</sup>。与C/C复合材料相比,由于引入了适量SiC陶瓷硬质材料作基体,材料的抗氧化性和摩擦系数得以提高,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,C/SiC刹车材料在高速列车、汽车、飞机等领域具广阔应用前景。

德国宇航院(DLR)Walter Krenkel等人以高档轿车刹车盘为应用目标,对C/SiC刹车材料进行了研究<sup>[7-8]</sup>,目前已在保时捷911、奥迪A8L、法拉利等高档汽车上得以应用<sup>[9-10]</sup>。美国Starfire公司研究先驱体转化法制备C/SiC刹车材料,并已应用于摩托车刹车片。西北工业大学张立同院士科研团队于2001年率先研究碳陶刹车材料<sup>[11-20]</sup>,到目前为止,研制的碳陶刹车盘已在两重点型号战机上定型,进入批产阶段,在多个型号战机上进行试飞验证,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。

下面针对不同预制体类型,对C/SiC刹车材料的制备、微结构和摩擦磨损性能进行系统介绍,并介绍C/SiC刹车材料的改性方法。

### 1 典型C/SiC刹车材料

刹车盘是结构/功能一体化材料,纤维预制体结构对材料的热物理性能、摩擦磨损性能和力学性能有很大影响。目前,刹车材料的纤维预制体有2D碳布叠层、短纤维模压和三维针刺等3种典型结构。

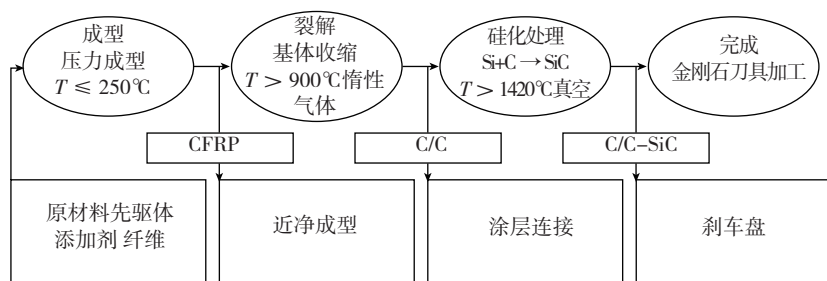
#### 1.1 2D碳布叠层C/SiC刹车材料

Krenkel等人最初制备C/SiC复合材料时所使用纤维预制体为2D碳布叠层。碳布是以PAN基预氧丝或C纤维正交相交编织而成的一种纤维布,后经碳化处理称为碳布,为X、Y平面走向。2D碳布叠层结构预制体即为多层碳布重叠而成。试验结果表明,该2D碳布叠层结构的C/SiC刹车材料摩擦系数高且磨损率低,但由于其垂直于摩擦面方向的导热系数太低,导致摩擦性能不稳定<sup>[6]</sup>。

#### 1.2 短纤维模压C/SiC刹车材料

##### 1.2.1 制备工艺

图1给出了短纤维模压C/SiC刹车材料的制备工艺流程,主要包括以下3个步骤:

图1 短纤维模压C/SiC刹车材料的工艺流程<sup>[21]</sup>Fig.1 Process of short fiber pressed C/SiC brake materials<sup>[21]</sup>

(1) 采用短纤维模压成型的方法制备C纤维增强树脂基复合材料(CFRP)。该方法能够实现近净尺寸成型,避免原材料的浪费。

(2) CFRP的高温碳化。在高温碳化处理过程中,树脂基体经过高温分解转化为碳,从而使CFRP转变为孔隙结构的C/C复合材料。碳化过程伴随着明显的质量变化和尺寸收缩。碳化温度对C/C复合材料的结构及C/SiC复合材料的性能有显著影响。随碳化温度的提高,材料内部C/C亚结构单元间距增大,导致后续RMI过程中材料内部Si和SiC含量增加,C/SiC复合材

料的导热系数随之增大<sup>[22-23]</sup>。

(3) 多孔C/C复合材料的硅化。硅化处理通常在真空中进行,温度高于Si的熔点(1420°C)。熔融Si在毛细管力的作用下渗入多孔C/C内部,与C反应生成SiC,从而得到C/SiC复合材料。

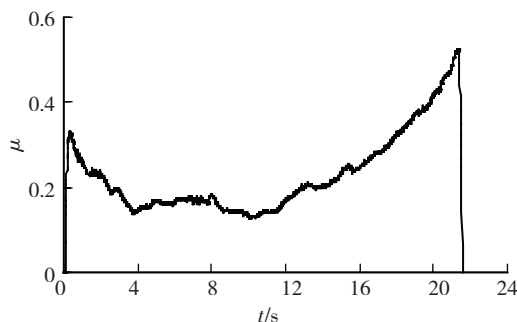
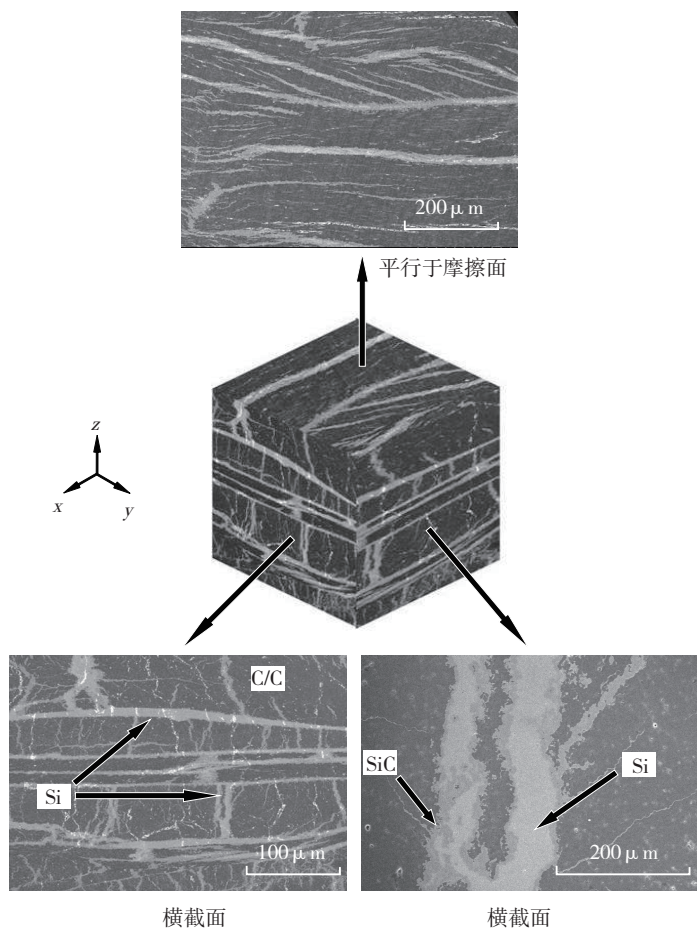
### 1.2.2 微观结构

图2为短纤维模压C/SiC刹车材料的典型微观结构。从图2中可发现,在复合材料内部,SiC和残余Si主要集中在树脂炭化收缩所形成的裂纹处,而其他地方仍保持较完整的C/C亚结构单元。

在短纤维模压C/SiC刹车材料的制备过程中,树脂浸渗碳纤维束使每根单丝碳纤维外部都覆盖一层树脂。碳化过程中,树脂基体裂解形成树脂碳,并形成一系列裂纹。在C/C多孔材料内部,裂纹主要存在于C/C亚结构单元之间。由于C/C复合材料形成了比较致密的C/C亚结构单元,所以在硅化过程中,熔融Si主要浸渗入基体收缩所形成较大尺寸的裂纹中,而纤维束之间很少有熔融Si渗入,因此大部分纤维并未与硅反应,保持完好,从而保证了短纤维模压C/SiC刹车材料良好的力学性能。

### 1.2.3 摩擦磨损性能

图3为28m/s速度下短纤维模压C/SiC刹车材料的摩擦曲线。从图中可以看出,短纤维模压C/SiC刹车材料在高能刹车时摩擦行为不稳定。刹车初期,摩擦系数曲线出现明显“前锋”;刹车后期,摩擦系数出现“翘尾”;且刹车中期,摩擦系数出现明显波动。这种现象会造成制动过程的不平稳,导致起落架明显震动,对刹车系统造成冲击<sup>[25]</sup>。

图3 28 m/s速度下短纤维模压C/SiC刹车材料的摩擦曲线<sup>[26]</sup>Fig.3 Brake curve of short fiber pressed C/SiC brake materials under 28 m/s<sup>[26]</sup>图2 短纤维模压C/SiC刹车材料的微观结构<sup>[24]</sup>Fig.2 Microstructures of short fiber pressed C/SiC brake materials<sup>[24]</sup>

## 1.3 三维针刺C/SiC刹车材料

### 1.3.1 制备工艺

图4给出了三维针刺C/SiC刹车材料的工艺流程。与短纤维模压C/SiC刹车材料相比,三维针刺C/SiC刹

车材料制备过程在纤维预制体和多孔 C/C 的制备上存在差异。

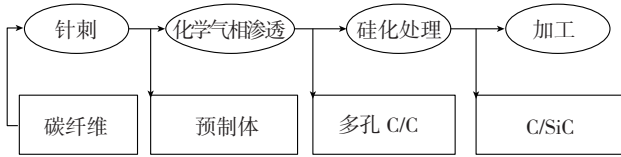


图4 三维针刺C/SiC刹车材料工艺流程<sup>[27]</sup>

Fig.4 Process of three-dimensional needled C/SiC brake materials<sup>[27]</sup>

(1) 三维针刺纤维预制体的制备。

首先将 C 纤维制成短纤维胎网和无纬布,然后将单层 0° 无纬布、胎网、90° 无纬布、胎网依次循环叠加,然后利用棱边上带下倒钩刺的针对无纬布和网胎进行针刺。当针刺入时,倒钩刺将网胎纤维带向垂直方向,使无纬布和网胎成为一体。根据需要的厚度,经反复叠层、针刺、叠层、针刺……,得到三维针刺碳纤维预制体<sup>[28]</sup>,如图 5 所示。由于层与层之间存在纤维连接,因此这种结构具有较好的剪切强度。

(2) 多孔 C/C 复合材料的制备。

多孔 C/C 复合材料有 2 种制备方法。一是采用化学气相渗透法,用碳氢化合物为原料进行致密化处理,

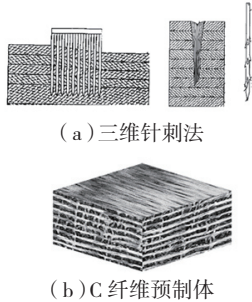


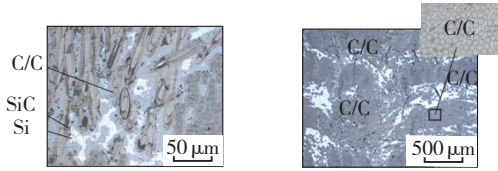
图5 三维针刺C纤维预制体的制造方法和结构

Fig.5 Manufacturing method and structure of three-dimensional needled carbon fiber performs

得到所需 C/C 复合材料<sup>[29-30]</sup>;二是用产碳率高的树脂等有机物对预制体浸渗,浸渗后碳化得到多孔 C/C 复合材料<sup>[31]</sup>。

1.3.2 微观结构

图 6 给出了三维针刺 C/SiC 刹车材料的光学显微结构。与短纤维模压成型 C/SiC 复合材料相似,三维针刺 C/SiC 复合材料也具有明显的亚结构单元。在纤维疏松区域,以 C 纤维为中心,形成局部的 C/C 复合材料。局部的 C/C 周边由反应生成的 SiC 包裹(图 1-6a 中灰色区域),大孔隙由金属硅(图 6 (a) 中白色区域)填充;在纤维束区域,形成较致密的 C/C 亚结构单元(如图 6 (b) 所示)。三维针刺多孔 C/C 中无纬布层的纤维束间和针



(a) Region of the sparse fiber (b) Region of the fiber bundle

图6 C/SiC刹车材料的光学显微形貌<sup>[32]</sup>

Fig.6 Optical micrographs of C/SiC brake materials<sup>[32]</sup>

刺纤维附近疏松多孔,而无纬布层的纤维束内为较致密的 C/C 结构单元。熔融 Si 很容易依靠毛细管力填充这些孔隙并与 C 迅速反应生成一层较致密的 SiC 将熔融 Si 与 C 隔开。后续的 Si 与 C 的反应只能依靠扩散通过 SiC 层进行反应。由于扩散作用相对较慢, Si、C 反应相对较弱,在无纬布层,形成被 SiC 和残余 Si 分割成的 C/C 亚结构单元<sup>[33-34]</sup>。

1.3.3 摩擦磨损性能

图 7 为三维针刺 C/SiC 刹车材料干态下的典型摩擦曲线。干态刹车时, C/SiC 刹车材料的摩擦系数高而且稳定<sup>[35-37]</sup>。Byrne<sup>[38]</sup>、张军战<sup>[39]</sup>研究了 Z 向纤维对材料摩擦性能的影响,发现 Z 向纤维打通了垂直刹车盘摩擦面方向的导热通路,提高了横向热导率,从而使摩擦热快速传出而降低摩擦面温度,阻止摩擦面局部过热产生“热点”,而加剧氧化对材料摩擦磨损性能的影响,提高摩擦系数的稳定性<sup>[6,40]</sup>。

图 8 给出了 C/SiC 刹车材料的湿态刹车条件下的摩擦曲线。从图中可知,该材料几乎不存在湿态摩擦性能衰减的问题,具有优良的湿态摩擦磨损性能,能满足飞机在潮湿环境中的服役。

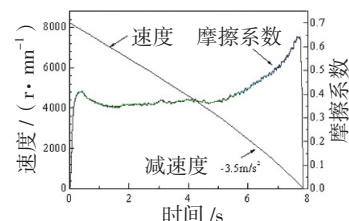


图7 三维针刺C/SiC刹车材料干态摩擦曲线<sup>[32]</sup>

Fig.7 Brake curve of three-dimensional needled C/SiC brake materials under dry condition<sup>[32]</sup>

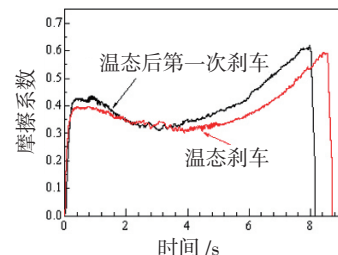


图8 三维针刺C/SiC刹车材料湿态摩擦曲线<sup>[32]</sup>

Fig.8 Brake curve of three-dimensional needled C/SiC brake materials under wet condition<sup>[32]</sup>

## 2 C/SiC 刹车材料的优化设计

CVI 结合 RMI 工艺制备的三维针刺 C/SiC 复合材料在刹车应用上具有巨大的优势。然而,该材料中存在大量聚集分布的残余 Si<sup>[2]</sup>,高能载刹车过程中,刹车材料摩擦表面的温度可能超过 1200℃,此时 Si 可能会发生熔融而导致摩擦性能不稳定甚至失效。而 SiC 基体硬且脆,摩擦表面难以形成稳定的摩擦膜,不利于高能刹车稳定性。另外,预制体结构的不均匀导致参与摩擦的组织结构不均匀,进而影响材料的摩擦磨损性能<sup>[41]</sup>。为解决上述问题,研究人员通过添加填料、改善预制体结构,对 C/SiC 刹车材料进行了优化设计。

蔡艳芝<sup>[42]</sup>通过浆料浸渗工艺结合 RMI 工艺,制备了石墨填料改性的 C/SiC 刹车材料。研究表明<sup>[43-45]</sup>,改性三维针刺 C/SiC 刹车材料中残余 Si (如图 9 中白色区域所示)的含量少且均匀弥散于 SiC 基体中。改性后,材料韧性提高,摩擦曲线稳定性提高,磨损率明显降低。通过添加石墨填料对材料进行优化,可改善材料的摩擦磨损性能。

杨尚杰<sup>[46]</sup>采用新型预制体结构——“三明治”结构,如图 10 所示。由图可知,该预制体由结构功能层和摩擦功能层组成,结构功能层位于材料的中间,摩擦功能层位于材料的外围,二者通过接力式针刺法连为一体。其中,结构功能层为典型的三维针刺结构,与三维针刺 C 纤维预制体的结构相同,摩擦功能层为纯胎网结构。图 11 给出了“三明治”C/SiC 刹车材料摩擦功能层的显微结构,图中黑色为 C 相,灰色为 SiC 相,白色为 Si 相。从图中可以看出,该种 C/SiC 复合材料具有分布相对均匀的摩擦功能层,可提高摩擦性能的稳定性。研究表明<sup>[17]</sup>，“三明治”C/SiC 刹车材料干态摩擦性能的稳定

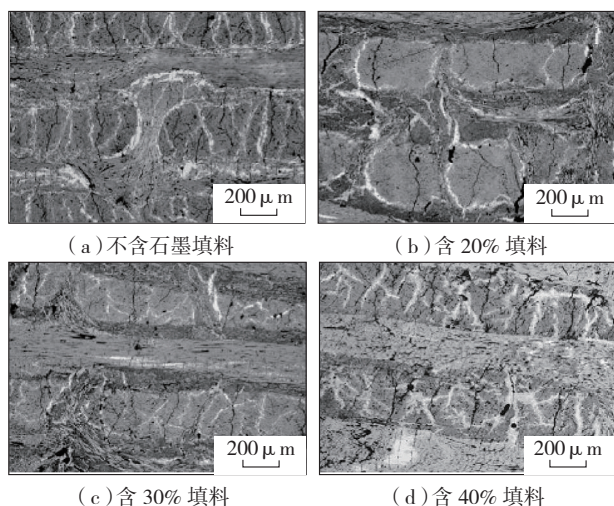


图9 C/SiC刹车材料的光学显微照片<sup>[44]</sup>  
Fig.9 Optical micrographs of C/SiC<sup>[44]</sup>

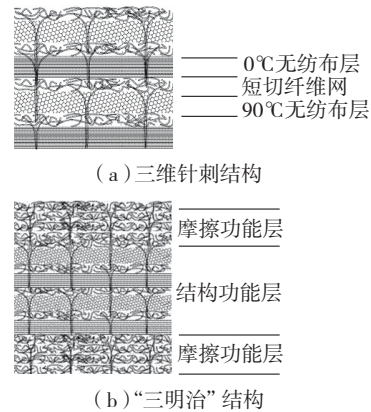


图10 两种C纤维预制体的结构示意图<sup>[46]</sup>  
Fig.10 Structures of two kinds of carbon fiber preforms<sup>[46]</sup>

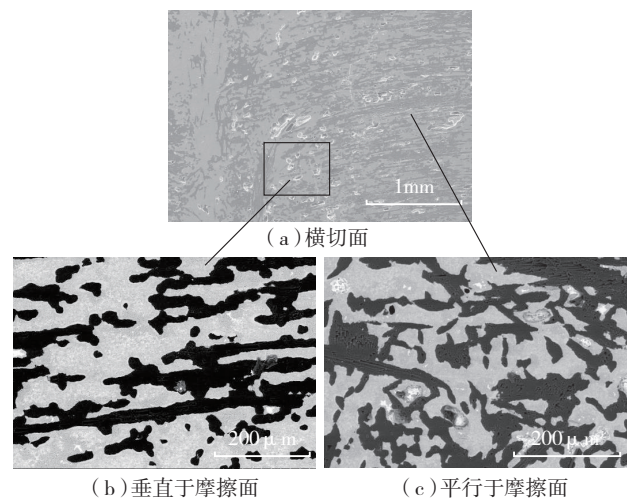


图11 “三明治”C/SiC刹车材料摩擦功能层的显微结构<sup>[46]</sup>  
Fig.11 Microstructures of the friction function layer of sandwich C/SiC brake materials<sup>[46]</sup>

性提高,静摩擦系数提高,湿态条件下摩擦性能无衰减。“三明治”C/SiC 刹车材料刹车效率提高。

通过一系列改性技术,突破了RMI-SiC的可控、可调批量制造技术。发明了碳陶刹车材料组成、结构和性能的可控、可调方法,成功解决了因残留硅量不可控而制约碳陶刹车盘在飞机上应用的国际性难题,可根据不同型号的刹车需求进行碳陶刹车盘的系列化设计与制造。

制造的碳陶刹车盘与碳/碳刹车盘相比,碳陶刹车盘静摩擦系数高 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,是极具竞争力的新一代飞机刹车材料。

## 3 展望

碳陶刹车材料作为性能优异的新型刹车材料,随着  
(下转第 108 页)

实现年产吨级连续 SiC 纤维,年产 10t 的产业化基地正在建设中。

#### 4 连续 SiC 纤维应用

SiC 纤维具有高强度、高模量、耐高温、抗氧化、抗蠕变、耐化学腐蚀、耐盐雾和优良电磁波吸收等特性,与金属、树脂、陶瓷基体具有良好的兼容性,可在多领域中用作高耐热、抗氧化材料以及高性能复合材料的增强材料,尤其在高温抗氧化特性上更显突出,特别适宜作航空发动机、临近空间飞行器及可重复使用航天器等热结构材料的主选材料<sup>[1]</sup>。国外连续 SiC 纤维产品的应用见表 4<sup>[8]</sup>。

连续 SiC 纤维产品的潜在应用表现为以下几个方面<sup>[9-10]</sup>:

(1) 作为耐热材料: 可用作连续热处理炉的网状带, 输送高温物质用的传送带, 金属精练、压延、铸接、焊接等作业的耐热带, 金属熔体过滤器以及隔热材料, 环境保护(排烟中的脱尘, 脱硫, 脱 NO<sub>x</sub> 装置) 中的衬垫、过滤器、袋式除尘器, 化学工业、原子能的过滤器, 汽车工业排气处理中的催化剂载体, 燃烧器械的喷灯嘴, 检测元件的红外敏感元件等;

(2) 作为耐腐蚀材料: 可用于航海领域的涂层, 机体结构材料以及海防工程等;

(3) 作为纤维增强金属材料: 在航天、航空、汽车工业等领域, 可用于机体结构材料、结构零件, 发动机部件及周围零件、风扇叶片等;

(4) 作为装甲陶瓷材料: 用于轻型装甲车辆挂片、舰船装甲、舰船夹板、飞机驾驶座椅、防弹背心插板等防护领域;

(5) 用于环保、低辐射泄漏领域: 如制造领域中计量设备的仪器、仪表等, 使其具有电磁兼容、吸收电磁干扰的作用;

(6) 用于反电磁干扰领域: 如军事、宇航、航空领域的雷达或通讯设备的天线, 导弹、飞机、卫星的特性耦合和散射测量等;

(7) 用于电子信息安全保密: 如计算机系统和数据处理设备、高屏蔽电缆、计算机、通讯终端、保密会议室、作战指挥室等, 可以防止数据泄露;

(8) 用作增强材料: 如耐火砖、陶瓷、玻璃、碳素等材料的强化和增韧材料等;

(9) 其他领域: 如高档扬声器锥体、除静电刷子、屏蔽材料、高尔夫球棒、滑雪板、人体红外检测器等。

#### 5 展望

新型航空航天器和尖端武器用热结构件, 要求材

料具有优异的比强比模、抗冲击能力、环境耐受性以及有氧环境下的耐高温能力。SiC 纤维作为一种新型陶瓷纤维, 具有耐高温、抗氧化、高的抗拉强度、良好的抗蠕变性能以及与陶瓷基体良好相容性等一系列优异性能, 同时 SiC 纤维集结构—隔热—吸波等功能于一身, 是一种非常理想的高性能复合材料增强纤维, 在航空航天、兵器、船舶和核工业等一些高技术领域具有广泛的应用前景, 是发展高技术武器装备以及航空、航天事业的关键战略材料之一, 也是当前国际上金属基复合材料(MMC)及陶瓷基复合材料(CMC)应用的重点增强纤维之一。

随着我国 SiC 纤维的产业化, 缓解了国内 SiC—CMC “无米之炊” 的局面。第一代 SiC 纤维的应用与发展仍是 SiC 纤维产业化的基础和技术进步的源动力, 随着 SiC 纤维性能的不断改进、下游应用技术的不断提高以及应用需求范围的不断扩大, SiC 将成为本世纪最引人注目的高科技材料之一, 并具有广阔的发展空间和市场前景。

#### 参考文献

- [1] 冯春祥, 范小林, 宋永才. 21 世纪高性能纤维的发展应用前景及其挑战 (I) 硅化物陶瓷纤维. 高科技纤维与应用, 1999, 24(4): 1-8.
- [2] Ceramic Fibers and Coatings: Advanced Materials for the Twenty-First Century. National Academy Press Washington, D.C. 1998.
- [3] 余继红, 江东亮. 碳化硅陶瓷的发展与应用. 陶瓷工程, 1998, 32(3): 3-11.
- [4] 贺福. 碳纤维及石墨纤维. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [5] 贺福. 碳纤维及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [6] Michio I, Kang F. Carbon Materials Science and Engineering—From Fundamentals to Applications. Tsinghua University Press, 2006.
- [7] Emolenko I N, Lyubliner I P, Gulko N V. Chemically Modified Carbon Fibers and Their Applications. Translated by E.P. Titovets, 1990.
- [8] シーエムシー. 炭化けい素纖維の生産及び市場. 機能材料 (Function & Materials), 1997, 17(7): 59-62.
- [9] 张卫中, 陆佳佳, 马小民, 等. 连续 SiC 纤维制备技术进展及其应用. 航空制造技术, 2012(4): 105-107.
- [10] 田秀梅, 马小民, 张博, 等. 连续 SiC 纤维工程化制备技术研究. 军民两用技术与产品, 2012, 7: 39-42.

(责编 亿霖)

(上接第 103 页)

进一步的优化设计和应用研究, 在飞机、高档轿车、重型汽车、重型机械和高速列车等领域将会得到更加广泛的应用, 可形成年产值数亿元的产业规模, 推动交通运输等相关行业的技术进步和产业升级。

本文共有参考文献 46 篇, 因篇章有限, 未能一一列出, 如有需要, 请向本刊编辑部索取。

(责编 亦非)