



高等院校力学教材
Textbook in Mechanics for Higher Education

复合材料力学

Mechanics of Composite Materials

沈观林 胡更开 编著

Shen Guanlin Hu Gengkai



清华大学出版社



Springer



高等院校力学教材
Textbook in Mechanics for Higher Education

复合材料力学

Mechanics of Composite Materials

沈观林 胡更开 编著
Shen Guanlin Hu Gengkai



清华大学出版社
北京

 Springer

内 容 简 介

本书全面系统地阐述了复合材料力学基础、宏观力学和细观力学的基本理论、分析方法和结果,并介绍了混杂复合材料、智能复合材料,以及复合材料疲劳、断裂和连接等众多专题。内容包括:复合材料概论,各向异性弹性力学基础;单层复合材料的宏观力学分析以及层合板刚度和强度的宏观力学分析,复合材料力学性能实验测定,湿热效应,层合平板弯曲、屈曲和振动,若干专题;复合材料的有效性质和均质化方法,单层复合材料的细观力学分析,复合材料的单夹杂问题,复合材料有效模量预测的近似方法,智能复合材料等。书中还附有习题和教学实验指导书。

本书可供高等院校力学及相关的理工科专业本科生和研究生作为教材使用,还可供有关科技人员学习参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

复合材料力学/沈观林,胡更开编著. - 北京:清华大学出版社,2006.9

(高等院校力学教材)

ISBN 7-302-12986-X

I. 复… II. ①沈… ②胡… III. 复合材料力学—高等学校—教材 IV. TB330.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 046381 号

出版者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

地址:北京清华大学学研大厦

邮编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:杨倩

文稿编辑:赵从棉

印装者:清华大学印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开本:175×245 印张:22 彩插:1 字数:455千字

版次:2006年9月第1版 2006年9月第1次印刷

书号:ISBN 7-302-12986-X/TB·106

印数:1~3000

定价:34.00元



沈观林 男，1935年10月生，1953—1957年在清华大学土木系工业与民用建筑专业学习，1957—1959年上清华大学工程力学研究班，毕业后在工程力学系任教，清华大学教授。长期从事固体力学、复合材料力学、实验力学教学和科研，获国家教委科技进步二等奖（1993），参编的《实验应力分析》、《振动量测与应变电测基础》获清华大学优秀教材二等奖，独编《复合材料力学》（1996），参编《应变电测与传感技术》（1991）和《应变电测与传感器》（1999）等专著和教材。获清华大学教学成果二等奖（复合材料力学课程），清华大学实验技术成果二等奖、三等奖多项。先后发表学术论文五十余篇。



胡更开 男，1964年10月生，教授。2003年度国家杰出青年科学基金获得者，2004年度全国优秀教师，北京理工大学理学院力学系主任。

1986年6月获北京工业学院应用力学系理学学士学位，1991年12月获法国巴黎中央工程师大学（ECP）材料系工学博士学位。曾为法国中央工程师大学材料系，法国国立高等工艺制造大学（ENSAM）材料系，香港科技大学机械工程系，剑桥大学工程系，法国巴黎高等师范大学（Cachan）访问教授。现为第五届教育部科技委委员，中国力学学会理事，中国兵工学会理事，中国兵工学会应用力学专业委员会主任委员；《Acta Mechanica》编委，《力学进展》常务编委，《力学学报》、《Acta Mechanica Sinica》、《固体力学学报》编委；《应用力学与数学》（中英文版）编委，《兵工学报》编委，《力学与实践》编委，《北京理工大学学报》编委。在学术期刊上发表研究论文60多篇。

前 言

复合材料是一大类新型材料,其强度高、刚度大、质量轻,并具有抗疲劳、减振、耐高温、可设计等一系列优点,近 40 年来,在航空航天、能源、交通、建筑、机械、信息、生物、医学和体育等工程和部门日益得到广泛的应用。随着各种新型复合材料的开发和应用,复合材料力学已形成独立的学科体系并蓬勃发展。国内外不少高等院校已将“复合材料力学”列为力学专业及相关的理工科专业本科生和研究生的必修和选修课。

作者多年来先后给工程力学、机械、材料、土建等专业本科生以及工程力学专业研究生开设“复合材料力学”必修或选修课。笔者所著(1996 年出版)的《复合材料力学》教材,已经为国内许多高等院校多个专业本科生和研究生教学使用。

现今在参考国内外复合材料力学书籍和大量新技术资料以及科研文献的基础上新编这本《复合材料力学》教材。书中全面系统地阐述了复合材料宏观力学的基本理论、分析方法和结果,特别详细介绍了复合材料细观力学的基本理论、分析方法和重要结果,并在众多专题方面提出初步研究成果和发展方向。书中附有习题和实验指导书。本教材可供高等院校力学及相关理工科专业本科生、研究生“复合材料力学”课程作为教材,还可供复合材料有关科技人员学习参考。在教学中可按本科生和研究生的不同要求讲授不同的内容。

本书分为 3 篇 14 章,第 1 篇 复合材料力学基础,第 2 篇 复合材料宏观力学,第 3 篇 复合材料细观力学。其中第 1 章~第 9 章、第 11 章和第 14 章由沈观林编写,第 10 章、第 12 章和第 13 章由胡更开编写,沈观林对全书进行统稿。限于作者的水平 and 经验,书中定有错误和欠缺之处,敬请读者批评指正。

作 者

2006 年 5 月

目 录

第 1 篇 复合材料力学基础

第 1 章 复合材料概论	3
1.1 复合材料及其种类	3
1.2 复合材料的构造及制法	11
1.3 复合材料的力学分析方法	14
1.4 复合材料的力学性能	15
1.5 复合材料的各种应用	17
习题	28
第 2 章 各向异性弹性力学基础	29
2.1 各向异性弹性力学基本方程	29
2.2 各向异性弹性体的应力-应变关系	31
2.3 正交各向异性材料的工程弹性常数	39
习题	44

第 2 篇 复合材料宏观力学

第 3 章 单层复合材料的宏观力学分析	47
3.1 平面应力下单层复合材料的应力-应变关系	47
3.2 单层材料任意方向的应力-应变关系	50

3.3	单层复合材料的强度	55
3.4	正交各向异性单层材料的强度理论	57
	习题	63
第4章	复合材料力学性能的实验测定	65
4.1	纤维和基体的力学性能测定	65
4.2	单层板基本力学性能的实验测定	67
4.3	其他力学性能实验	75
	教学实验指导书	80
	实验1 单层复合材料弹性常数测定	80
	实验2 单层复合材料拉伸、剪切强度测定	81
	实验3 单层复合材料压缩性能测定	82
	实验4 单层复合材料弯曲性能测定	82
	实验5 单层复合材料层间剪切强度测定	83
	实验6 复合材料冲压式剪切强度测定	84
	实验7 复合材料冲击韧性测定	85
第5章	层合板刚度的宏观力学分析	86
5.1	引言	86
5.2	层合板的刚度和柔度	88
5.3	几种典型层合板的刚度计算	94
5.4	层合板刚度的理论和实验比较	103
	习题	110
第6章	层合板强度的宏观力学分析	112
6.1	层合板强度概述	112
6.2	层合板的应力分析	114
6.3	层合板的强度分析	115
6.4	层合板的层间应力分析	123
	习题	131
第7章	湿热效应	132
7.1	单层板的湿热变形	132
7.2	考虑湿热变形的单层板应力-应变关系	134

7.3	考虑湿热变形的层合板刚度关系	134
7.4	考虑湿热变形的层合板应力和强度分析	136
	习题	143
第 8 章	层合平板的弯曲、屈曲与振动	144
8.1	引言	144
8.2	层合平板的弯曲	145
8.3	层合平板的屈曲	153
8.4	层合平板的振动	159
8.5	层合板中耦合影响的简单讨论	164
	习题	164
第 9 章	若干专题	165
9.1	混杂复合材料及力学分析	165
9.2	金属基复合材料	176
9.3	陶瓷基复合材料	178
9.4	纳米复合材料	181
9.5	复合材料的疲劳	183
9.6	复合材料的损伤和断裂	187
9.7	复合材料的蠕变	196
9.8	复合材料的连接	199
9.9	横向剪切的影响	208

第 3 第 复合材料细观力学

第 10 章	复合材料的有效性质和均质化方法	221
10.1	引言	221
10.2	尺度和代表单元的概念	223
10.3	细观过渡方法	224
第 11 章	单层复合材料的细观力学分析	229
11.1	引言	229
11.2	刚度的材料力学分析方法	231
11.3	强度的材料力学分析方法	237

11.4	短纤维复合材料的细观力学分析	244
11.5	热膨胀的力学分析	250
11.6	刚度的弹性力学分析方法	253
	习题	265
第 12 章	复合材料的单夹杂问题	266
12.1	弹性问题的一般解	266
12.2	椭球型夹杂问题	268
12.3	本征应变问题	277
12.4	夹杂的能量	283
	习题	285
第 13 章	复合材料线性有效模量预测的近似方法	287
13.1	引言	287
13.2	宏观整体坐标系和局部坐标系	288
13.3	稀疏方法	290
13.4	Mori-Tanaka 方法	293
13.5	自洽方法	299
13.6	微分法	301
13.7	广义自洽方法	302
13.8	Voigt 和 Reuss 界限	303
13.9	复合材料有效热膨胀系数	304
第 14 章	智能复合材料	307
14.1	概述	307
14.2	形状记忆复合材料	312
14.3	压电、铁电复合材料	319
14.4	磁致伸缩复合材料	327
14.5	电(磁)流变液	333
参考文献		342

第 1 篇

复合材料力学基础

第 1 章

复合材料概论

1.1 复合材料及其种类

1.1.1 基本概念

复合材料是由两种或多种不同性质的材料用物理和化学方法在宏观尺度上组成的具有新性能的材料。一般复合材料的性能优于其组分材料的性能,并且有些性能是原来组分材料所没有的,复合材料改善了组分材料的刚度、强度、热学等性能。

人类使用复合材料的历史已经很久了。中国古代使用的土坯砖是由粘土和稻草(或麦秆)两种材料组成的,稻草起增强粘土的作用。古代的宝剑是用复合浇铸技术得到的包层金属复合材料,它具有锋利、韧性好、耐腐蚀的优点。现在的胶合板、钢筋混凝土、夹布橡胶轮胎、玻璃钢等都属于复合材料。

复合材料从应用的性质可分为功能复合材料和结构复合材料两大类。功能复合材料主要具有特殊的功能。例如:导电复合材料,它是用聚合物与各种导电物质通过分散、层压或形成表面导电膜等方法构成的复合材料;烧蚀材料,它由各种无机纤维增强树脂或非金属基体构成,可用于高速飞行器头部热防护;摩阻复合材料,它是用石棉等纤维和树脂或非金属制成的有高摩擦系数的复合材料,应用于航空器、汽车等运转部件的制动、控速等机构。

我们主要研究结构复合材料,它由基体材料和增强材料两种组分组成。基体采

用各种树脂或金属、非金属材料；增强材料采用各种纤维或颗粒等材料。其中增强材料在复合材料中起主要作用，提供刚度和强度，基本控制其性能。基体材料起配合作用，它支持和固定纤维材料，传递纤维间的载荷，保护纤维，防止磨损或腐蚀，改善复合材料的某些性能。复合材料的力学性能比一般金属材料复杂得多，主要有不均匀、不连续、各向异性等，因此逐步发展成为复合材料特有的力学理论，称为复合材料力学，它是固体力学学科中的一个新分支。

1.1.2 复合材料的种类

根据复合材料中增强材料的几何形状，复合材料可分为三大类：

- (1) 颗粒复合材料，由颗粒增强材料和基体组成。
- (2) 纤维增强复合材料，由纤维和基体组成。
- (3) 层合复合材料，由多种片状材料层合而组成。

我们主要研究纤维增强复合材料，对其他两种作简单介绍。

1. 颗粒复合材料

它由悬浮在一种基体材料的一种或多种颗粒材料组成。颗粒可以是金属，也可以是非金属。

(1) 非金属颗粒在非金属基体中的复合材料。最普通的例子是混凝土，它由砂、石、水泥和水粘合在一起经化学反应而变成坚固的结构材料，如加入钢筋又做成钢筋混凝土。还有用云母粉悬浮在玻璃或塑料中形成的复合材料。

(2) 金属颗粒在非金属基体中的复合材料。例如，固体火箭推进剂是由铝粉和高氯酸盐氧化剂无机微粒放在如聚氨酯的有机粘结剂中组成的，微粒约占75%^①，粘结剂约占25%。为了能有稳定的燃烧反应，复合材料必须均匀和不裂。火箭推力与燃烧表面积成比例，为增加表面积，固体推进剂制成星形或轮形内孔，并研究其内应力。

(3) 非金属在金属基体中的复合材料。氧化物和碳化物微粒悬浮在金属基体中得到金属陶瓷。用于耐腐蚀的工具制造和高温应用；碳化钨在钴基体中的金属陶瓷用于高硬度零件制造，如拉丝模具；碳化铬在钴基体中的金属陶瓷有很高的耐磨性和耐腐蚀性，适用于制造阀门。

2. 层合复合材料

它至少由两层不同材料复合而成，其增强性能有强度、刚度、耐磨损、耐腐蚀等。层合复合材料有以下几种。

^① 75%表示质量分数，余同，不一一注明。

(1) 双金属片。它由两种不同热膨胀系数的金属片层而成,当温度变化时,双金属片产生弯曲变形,可用于温度测量和控制。

(2) 涂覆金属。将一种金属涂覆在另一种金属上,得到优良的性能。例如用10%的铜涂覆铝丝作为铜丝的替代物,铝丝价廉而质轻,但难于连接,导热性较差;铜丝价贵而较重,但导热性好,易于连接。涂铜铝丝比纯铜丝价廉而性能好。

(3) 夹层玻璃。这是为了用一种材料保护另一种材料。普通玻璃透光性好但易脆裂,聚乙烯醇缩丁醛塑料韧性好但易被划损,夹层玻璃是两层玻璃夹包一层聚乙烯醇缩丁醛塑料,具有良好的性能。

3. 纤维增强复合材料

各种长纤维比块状的同样材料强度高得多。例如,普通平板玻璃在几十兆帕的应力下就会破裂,而商用玻璃纤维的强度可达3000~5000MPa,实验室研制的玻璃纤维强度已接近7000MPa,这是因为纤维与块状玻璃的结构不同,纤维内部缺陷和位错比块状材料少得多。

纤维增强复合材料按纤维种类分为玻璃纤维(其增强复合材料俗称玻璃钢)、硼纤维、碳纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维和芳纶纤维等。

纤维增强复合材料按基体材料可分为各种树脂基体、各种金属基体、陶瓷基体和碳(石墨)基体几种,这些将在第9章介绍。

纤维增强复合材料按纤维形状、尺寸可分为连续纤维、短纤维、纤维布增强复合材料等。

4. 以上两种或三种混合的增强复合材料

例如,两种或更多种纤维增强一种基体的复合材料。玻璃纤维与碳纤维增强树脂称为混杂纤维复合材料,这已在很多工程中得到广泛应用,关于混杂复合材料也将在第9章介绍。

1.1.3 几种常用纤维

1. 玻璃纤维

它是最早使用的一种增强材料,在飞行器结构中常用E型玻璃和S型玻璃两个品种。玻璃纤维的直径为5~20 μm ,它强度高、延伸率较大,可制成织物;但弹性模量较低,约为 $7 \times 10^4 \text{MPa}$,与铝接近。一般硅酸盐玻璃纤维可用到450 $^{\circ}\text{C}$,石英和高硅氧玻璃纤维可耐1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上高温。玻璃纤维的线膨胀系数约为 $4.8 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。玻璃纤维由拉丝炉拉出单丝,集束成原丝,经纺丝加工成无捻纱、各种纤维布、带、绳等。

2. 硼纤维

它是由硼蒸气在钨丝上沉积而制成的纤维(属复相材料,钨丝为芯,表面为硼)。由于钨丝直径较大,硼纤维不能作成织物,成本较高。20世纪60年代初硼纤维由美国研制成功并应用于某些飞行器。

3. 碳纤维

它是用各种有机纤维经加热碳化制成。主要以聚丙烯腈(PAN)纤维或沥青为原料,纤维经加热氧化,碳化、石墨化处理而制成。碳纤维可分为高强度、高模量、极高模量等几种,后两种需经 $2500\sim 3000^{\circ}\text{C}$ 石墨化处理,又称为石墨纤维。由于碳纤维制造工艺较简单,价格比硼纤维便宜得多,因此成为最重要的先进纤维材料。其密度比玻璃纤维小,模量比玻璃纤维高好几倍。因此碳纤维增强复合材料已应用于宇航、航空等工业部门。碳纤维的应力-应变关系为一直线,纤维断裂前是弹性体,高模量碳纤维的最大延伸率为 0.35% ,高强度碳纤维的延伸率可达 1.5% 。碳纤维的直径一般为 $6\sim 10\mu\text{m}$ 。碳纤维的热膨胀系数与其他纤维不同,具有各向异性,沿纤维方向 $\alpha_1 = -0.7\times 10^{-6}\sim -0.9\times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$,而垂直于纤维方向 $\alpha_2 = 22\times 10^{-6}\sim 32\times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

4. 芳纶纤维

它是新的有机纤维,属聚芳酰胺,国外牌号为Kevlar。有三种产品:K-29用于绳索电缆;K-49用于复合材料制造;K-149强度更高,可用于航天容器等。芳纶纤维性能优良,单丝强度可达 3850MPa ,比玻璃纤维约高 45% ;弹性模量介于玻璃纤维和硼纤维之间,为碳纤维的一半;热膨胀系数纤维方向 $\alpha_1 = -2\times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$,横向 $\alpha_2 = 5\times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$,与碳纤维接近。

芳纶纤维的制造工艺与碳纤维和玻璃纤维都不同,它采用液晶纺丝工艺。液晶在宏观上属液体,微观上有晶体性质。芳纶纤维的聚对苯撑对苯二甲酰胺(PPTA)在溶液中呈一定取向状态,为一维有序紧密排列,它在外界剪切力作用下,易沿力方向取向而成纤维。纺丝采用干喷湿纺工艺:采用高浓度、高温度PPTA液晶溶液在较高喷丝速度下喷丝,喷丝进入低温凝固液浴,经纺丝管形成丝束,绕到绕丝辊上,经洗涤,在张力下于热辊上干燥,最后在惰性气体中高温处理得芳纶纤维。

5. 碳化硅纤维及氧化铝纤维

它们属于陶瓷纤维。碳化硅纤维有两种形式,一种是采用与硼纤维相似的工艺,在钨丝上沉积碳化硅(SiC)形成复相纤维;另一种是20世纪70年代日本研制的连续碳化硅纤维,它用二甲基二氯硅烷经聚合纺丝成有机硅纤维,再高温处理转化成单相碳化硅纤维。碳化硅纤维具有抗氧化、耐腐蚀和耐高温等优点,它与金属相容性好,

可制成金属基复合材料,用它增强的陶瓷基复合材料制成的发动机,工作温度可达1200℃以上。

氧化铝纤维的制法有多种,其一是采用三乙基铝、三丙基铝、三丁基铝等原料制造聚铝氧烷,加入添加剂调成粘液喷丝,形成 $\phi 100\mu\text{m}$ 的纤维,再经1200℃加热制成氧化铝纤维。

各种主要纤维材料的基本性能列在表1-1中,某些性能数据供参考,表中还列出钢、铝、钛等金属丝的性能供对比用。

表1-1 各种主要纤维材料与金属丝基本性能

材料		直径 / μm	熔点 / $^{\circ}\text{C}$	相对 密度 γ	拉伸强度 $\sigma_b/10\text{MPa}$	模量 E / 10^3MPa	热膨胀系数 α / $10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$	伸长率 $\delta/\%$	比强度 (σ_b/γ) / 10MPa	比模量 (E/ γ) / 10^3MPa
玻璃 纤维	E	10	700	2.55	350	0.74	5	4.8	137	0.29
	S	10	840	2.49	490	0.84	2.9	5.7	197	0.34
硼纤维		100	2300	2.65	350	4.1	4.5	0.5~0.8	132	1.55
		140		2.49	364	4.1			146	1.65
碳 纤维	普通		3650	1.75	250~300				143~171	
	高强	6		1.75	350~700	2.25~2.28			200~400	1.29~1.30
	高模	6		1.75	240~350	3.5~5.8	-0.6	1.5~2.4	137~200	2.0~2.34
	极高模	6		1.75	75~250	4.60~6.70	-1.4	0.5~0.7	43~143	2.63~3.83
芳纶 纤维	K-49Ⅲ	10		1.47	283	1.34	-3.6	2.5	193	0.91
	K-49Ⅳ	10			304	0.85		4.0	207	0.58
碳化硅 纤维	复相	100	2690	3.28	254	4.3	3.8		77.4	1.31
	单相	8~12		2.8	250~450	1.8~3.0			89~161	0.64~1.1
氧化铝纤维			2080	3.7	138~172	3.79			37~46	1.02
钢丝			1350	7.8	42	2.1	11~17		5.4	0.27
铝丝			660	2.7	63	0.74	22		23	0.27
钛丝				4.7	196	1.17	9		41.7	0.25

1.1.4 几种常用基体

1. 树脂基体

它分为热固性树脂和热塑性树脂两大类。热固性树脂常用的有环氧、酚醛和不饱和聚酯树脂等,它们最早应用于复合材料。环氧树脂应用最广泛,其主要优点是粘

结力强,与增强纤维表面浸润性好,固化收缩小,有较高耐热性,固化成型方便。酚醛树脂耐高温性好,吸水性小,电绝缘性好,价格低廉。聚酯树脂工艺性好,可室温固化,价格低廉,但固化时收缩大,耐热性低。它们固化后都不能软化。

热塑性树脂有聚乙烯、聚苯乙烯、聚酰胺(又称尼龙)、聚碳酸酯、聚丙烯树脂等,它们加热到转变温度时会重新软化,易于制成模压复合材料。

几种常用树脂的性能列于表 1-2 中,供参考和比较。

表 1-2 几种树脂的性能

序号	名称	相对密度 γ	拉伸强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%	模量 E / 10^4 MPa	抗压强度 /MPa	抗弯强度 /MPa
1	环氧	1.1~1.3	60~95	5	3~4	90~110	100
2	酚醛	1.3	42~64	1.5~2.0	3.2	88~110	78~120
3	聚酯	1.1~1.4	42~71	5	2.1~4.5	92~190	60~120
4	聚酰胺 PA	1.1	70	60	2.8	90	100
5	聚乙烯		23	60	8.4	20~25	25~29
6	聚丙烯 PP	0.9	35~40	200	1.4	56	42~56
7	聚苯乙烯 PS		59	2.0	2.8	98	77
8	聚碳酸酯 PC	1.2	63	60~100	2.2	77	100

2. 金属基体

它主要用于耐高温或其他特殊需要的场合,具有耐 300℃ 以上高温、表面抗侵蚀、导电导热、不透气等优点。基体材料有铝、铝合金、镍、钛合金、镁、铜等,目前应用较多的是铝,一般有碳纤维铝基、氧化铝晶须镍基、硼纤维铝基、碳化硅纤维钛基等复合材料。几种纤维增强金属基复合材料的性能列于表 1-3 中。

3. 陶瓷基体

它耐高温、化学稳定性好,具有高模量和高抗压强度,但有脆性,耐冲击性差,为此用纤维增强制成复合材料,可改善抗冲击性并已试用于发动机部分零件。纤维增强陶瓷基复合材料,例如,单向碳纤维增强无定形二氧化硅复合材料,碳纤维含量 50%,室温弯曲模量为 1.55×10^5 MPa, 800℃ 时为 1.05×10^5 MPa。还有多向碳纤维增强无定形石英复合材料,耐高温,可供远程火箭头锥作烧蚀材料。此外还有石墨纤维增强硅酸盐复合材料、碳纤维增强碳化硅或氮化硅复合材料、碳化硅纤维增强氮化硅复合材料、碳化硅晶须增强含有 Y_2O_3 (碳化钇) 的多晶四方相氧化锆复合材料(SiC 晶须/Y-TZP) 和 SiC/SiC 复合材料。