

学校编码: 10384
学号: 20720121150054

分类号__密级__
UDC__

碳化硅纤维 / 环氧树脂复合材料的制备及吸波性能研究

李华展

指导教师 陈立富教授

厦门大学

厦门大学

硕士学位论文

碳化硅纤维/环氧树脂复合材料的制备
及吸波性能研究

Preparation and Electromagnetic Wave Absorbing Property
of SiC Fiber /Epoxy Resin Composites

李华展

指导教师姓名: 陈立富 教授

专业名称: 高分子化学与物理

论文提交日期: 2015年 月

论文答辩时间: 2015年 月

学位授予日期: 2015年 月

答辩委员会主席: _____
评阅人: _____

2015年5月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪 论.....	1
1.1 概述.....	1
1.2 电磁波吸波材料简介	1
1.2.1 电磁波吸波材料的吸波机理.....	1
1.2.2 电磁波吸波材料的分类.....	2
1.3 吸波碳化硅纤维的研究概况	5
1.3.1 碳化硅纤维的制备.....	5
1.3.2 吸波碳化硅纤维的研究进展.....	7
1.4 碳化硅纤维增强树脂基复合材料的吸波性能研究	9
1.4.1 碳化硅纤维增强树脂基复合材料的吸波性能研究进展.....	9
1.4.2 结构吸波材料的传输线理论模型.....	14
1.5 本论文的设计思路与研究内容	16
1.5.1 本论文的设计思路.....	16
1.5.2 本论文的研究内容.....	16
参考文献	18
第二章 实 验.....	24
2.1 实验原料与试剂	24
2.2 碳化硅纤维的制备	24
2.2.1 碳化硅纤维制备的工艺流程.....	24
2.2.2 碳化硅纤维的热处理.....	26
2.3 碳化硅纤维/环氧树脂复合材料的制备	26
2.3.1 介电常数测试用复合材料制备方法.....	26
2.3.2 反射率测试用复合材料制备方法.....	27
2.4 分析表征方法	29

2.4.1 碳化硅纤维/环氧树脂复合材料力学性能测试	29
2.4.2 碳化硅纤维电阻率测试.....	29
2.4.3 碳化硅纤维元素含量测试.....	31
2.4.4 碳化硅纤维/环氧树脂复合材料断面形貌观察	31
2.4.5 碳化硅纤维微观形貌观察.....	31
2.4.6 碳化硅纤维/环氧树脂复合材料介电性能测试	31
2.4.7 碳化硅纤维/环氧树脂复合材料反射率测试	32
2.4.8 碳化硅纤维/环氧树脂复合材料反射率的模拟计算	33
参考文献	35
第三章 碳化硅纤维/环氧树脂复合材料的制备及性能研究	37
3.1 吸波碳化硅纤维的制备及表征	37
3.1.1 热处理对碳化硅纤维电阻率的影响.....	37
3.1.2 碳化硅纤维/环氧树脂复合材料介电性能的研究	38
3.1.3 不同电阻率的碳化硅纤维微观结构的研究.....	39
3.2 碳化硅纤维/环氧树脂复合材料的制备和反射率测试	40
3.2.1 单层吸波材料的制备和吸波性能表征.....	40
3.2.2 多层吸波材料的制备与表征.....	41
3.3 碳化硅纤维/环氧树脂复合材料力学性能的研究	43
3.3.1 纤维体积分数对复合材料力学性能的影响规律.....	43
3.3.2 断口形貌观察.....	45
3.4 本章小结	46
参考文献	48
第四章 碳化硅纤维/环氧树脂复合材料吸波性能的模拟计算	49
4.1 单层复合材料吸波性能的模拟	49
4.1.1 纤维电阻率和复合材料厚度对吸波性能的影响.....	49
4.1.2 纤维体积分数对复合材料吸波性能的影响.....	52
4.2 多层复合材料吸波性能的模拟	55
4.2.1 两层材料吸波性能的模拟.....	55
4.2.2 三层材料吸波性能的模拟.....	56

4.3 日本 Nicalon 吸波纤维吸波性能的研究	58
4.4 本章小结	58
参考文献	62
第五章 多层吸波材料反射率计算程序	63
5.1 单层结构吸波材料反射率 matlab 计算程序	63
5.2 两层结构吸波材料反射率 matlab 计算程序	64
5.3 三层结构吸波材料反射率 matlab 计算程序	66
第六章 结论与创新点	68
6.1 主要结论	68
6.2 主要创新点	69
硕士期间发表的论文及专利	70
致谢.....	71

厦门大学博硕士学位论文文摘

Contents

Abstract in Chinese.....	I
Abstract in English	III
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background.....	1
1.2 Brief Introduction to Wave Absorption Materials.....	1
1.2.1 Principle of Electromagnetic Wave Absorption	1
1.2.2 Classification of Wave Absorption Materials	2
1.3 Resreach on Microwave Absorption Silicon Carbide Fibers	5
1.3.1 Preparation of Silicon Carbide Fibers	5
1.3.2 Status of Silicon Carbide Fibers	7
1.4 Research on Silicon Carbide Fibers Reinforced Resin Composites	9
1.4.1 Status of Silicon Carbide Fibers Reinforced Resin Composites	9
1.4.2 Transmission Line Theory for Multilayer Materials	14
1.5 Rationale and Scope of This Work	16
1.5.1 Rationale	16
1.5.2 Scope.....	16
Reference.....	17
Chapter 2 Experimental	23
2.1 Raw Materials and Reagents	23
2.2 Preparation of Silicon Carbide Fibers	23
2.2.1 Flow Chat for the Silicon Carbide Fibers.....	23
2.2.2 Heat treatment of the Silicon Carbide Fibers	25
2.3 Preparation of Silicon Carbide Fibers Reinforced Resin Composites	25
2.3.1 Preparation of Composites for Dielectric Test.....	25
2.3.2 Preparation of Composites for Reflection Loss Test	26
2.4 Characterization	28
2.4.1 Mechanical Properties	28

2.4.2 Resistivity	28
2.4.3 Chemical Cositions	30
2.4.4 Scanning Electron Microscopy of Composites	30
2.4.5 Transmission Electron Microscopy of fibers	30
2.4.6 Dielectric Proerties.....	30
2.4.7 Reflection Loss	31
2.4.8 Simulation of Reflection Loss	32
Reference.....	34
Chapter 3 Preparation and Characterizaiton of Silicon Carbide Fiber Reinforced Resin Composites	36
3.1 Preparation and Characterizaiton of Silicon Carbide Fibers.....	36
3.1.1 Effect of Heat Treatment on Fiber Resistivity.....	36
3.1.2 Dielectric Properties of Composites	37
3.1.3 Microstructure study of Fibers	38
3.2 Preparation and Reflection Loss of Silicon Carbide Fiber Reinforced Resin Composites	39
3.2.1 Single Layer Composites	39
3.2.2 Multi Layer Composites	40
3.3 Mechanical properties of Silicon Carbide Fiber Reinforced Resin Composites.....	42
3.3.1 Effect of Fiber Contents on Mechanical Properties.....	43
3.3.2 Microstructure study	45
3.4 Conclusions.....	46
Reference.....	47
Chapter 4 Simulation of Relection Loss	49
4.1 Simulation of Reflection Loss for Single Layer Composites	49
4.1.1Effect of Fiber and Sample Thickness on Relection Loss.....	49
4.1.2 Effect of Fiber Contents on Relection Loss	52
4.2 Simulation of Reflection Loss for Multi Layer Composites	54

4.3 Reflection Loss of Nicalon Fiber Reinforced Resin Composites.....	58
4.4 Conclusions.....	61
Reference.....	62
Chapter 5 Calculation Software Program of Reflection Loss	63
5.1 Single Layer	63
5.2 Double Layer	64
5.3 Three Layer	66
Chapter 6 Conclusions and Innovations.....	68
6.1 Conclusions.....	68
6.2 Innovations	69
Publicaitons	70
Acknowledgements	71

廈門大學博碩士論文查重系統

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要

本论文对碳化硅 (SiC) 纤维进行热处理, 制备了不同电阻率的 SiC 纤维; 利用不同电阻率的 SiC 纤维与环氧树脂复合, 制备单层、两层和三层复合材料, 测试其在 X 波段下的电磁参数及吸波性能; 利用传输线理论, 计算预测了纤维电阻率、纤维体积分数、材料厚度和叠层方式对复合材料吸波性能的影响规律, 并将实验结果与理论计算结果进行了对比验证。

研究发现, 在 1000-1500°C 温度区间, 随着热处理温度的升高, SiC 纤维的电阻率大幅度降低。当热处理温度达到 1500°C 时, 纤维电阻率约为 $10^0\Omega\cdot\text{cm}$ 。随着纤维电阻率的降低, 复合材料的介电常数实部和虚部逐渐增大。当纤维的电阻率为 $1\Omega\cdot\text{cm}$ 和 $10\Omega\cdot\text{cm}$ 时, 复合材料的平均介电损耗角正切值分别为 0.23 和 0.25, 表现出了较好的介电损耗能力。

由电阻率为 $1\Omega\cdot\text{cm}$ 的 SiC 纤维制备的单层复合材料 (厚度为 3mm) 在 C1 (4-6GHz) 波段和 Ku (12-18GHz) 波段内对电磁波的平均反射率分别为 -3.7dB 和 -4.7dB; 在该材料上叠加两层由电阻率分别为 $40\Omega\cdot\text{cm}$ 和 $10^7\Omega\cdot\text{cm}$ 的 SiC 纤维制备的复合材料 (三层厚度分别为 2mm, 1mm 和 1mm), 所得三层材料在 8-26GHz 内的平均反射率达到了 -6dB, 最低值为 -9dB, 复合材料的吸波性能得到了增强。

理论计算表明, 对于单层吸波材料, 随着材料厚度增加, 吸波性能先增加, 随后又趋于稳定。此时, 材料与自由空间的界面阻抗不匹配限制了吸波性能的进一步提高; 此外, 纤维体积分数与吸波性能的关系也存在着相似效应, 随着体积分数提高到一定值, 复合材料吸波性能不再升高, 反而开始下降。

对 Nicalon 纤维的吸波性能研究表明, 选择纤维电阻率为 $10^6\Omega\cdot\text{cm}$ (介电常数为 5-0.2j) 的复合材料作为匹配层, 纤维电阻率为 $10^0\Omega\cdot\text{cm}$ (介电常数为 17-7j) 的复合材料作为吸收层, 双层材料的吸波性能显著优于其单层材料, 实现了吸波性能的提升和频带的展宽。对比本文所得纤维和 Nicalon 纤维的研究结果可知, 若要通过多层叠层实现吸波性能的提升, 对单层材料的电磁参数具有特定要求。

关键词: 碳化硅纤维; 树脂基复合材料; 吸波性能; 传输线理论

Abstract

This work modified the resistivity of SiC fibers by different heat treatment and the microwave absorption SiC fibers are obtained. Then these fibers are composed with epoxy resin to achieve single, double and three layer SiC fiber reinforced resin composites. The transmission line theory are extended to the situation of double and three layer composites to further study the effect of fiber resistivity and content, thickness of materials and layer sequence on the microwave absorption properties.

In the temperature range of 1000-1500°C, with the increase of heat treatment temperature, the resistivity of the SiC fiber decreases significantly. When the temperature reaches 1500°C, the resistivity falls to $10^0\Omega\cdot\text{cm}$. In this range, the lower the resistivity is, the higher the permittivity is. The tangent loss value of 0.23 and 0.25 are achieved when the resistivity are $1\Omega\cdot\text{cm}$ and $10\Omega\cdot\text{cm}$.

The resin composites enforced by SiC fibers with the resistivity of $1\Omega\cdot\text{cm}$ exhibit the average reflection loss of 3.7dB and -4.7dB in C1(4-6GHz) and Ku (12-18GHz) band, respectively. When composites enforced by SiC fibers with the resistivity of $40\Omega\cdot\text{cm}$ and $10^7\Omega\cdot\text{cm}$ are applied on the surface, the average reflection loss falls to -6dB.

For the single layer composite, with the increase of sample thickness, the reflection loss decreases at first and then remains still. The impedance mismatch restrict the further improvement of wave absorption ability. The effect of fiber contents on microwave absorption ability shows the same tendency.

The study on Nicalon fibers proves that the impedance match structure has specific requirements on the permittivity of each layer. The results show that when the Nicalon fiber with resistivity of $10^0\Omega\cdot\text{cm}$ and $10^6\Omega\cdot\text{cm}$ are used to prepared double layer composite, good wave absorption ability can be achieved.

Key words: Silicon carbide fibers; resin composites; microwave absorption ability; transmission line theory.

第一章 绪论

1.1 概述

电磁辐射不仅干扰电子设备的稳定运行，而且会对人体系统造成伤害^[1-7]，因此，新的电磁屏蔽/吸收装置及相关材料的研发成为近年来的研究热点。另外，军事上对隐身技术的迫切需求也推动着电磁吸收技术的发展。隐身技术是通过控制武器系统的信号特征，使其难以被发现、识别和跟踪打击的技术^[8-10]。在现代战争中，武器发现识别目标主要是通过雷达发射的电磁波遇到目标体后产生反射或散射，雷达接受装置根据反射或散射回的电磁波对目标体的类型、距离、大小、运动速度等进行判断。因此，要实现雷达波隐身，就必须使目标体的雷达回波无法被探测到，也就是说，要么吸收入射的雷达波，要么改变目标体的反射特性。目前，降低目标体雷达信号的方法主要有外形设计和使用雷达吸波材料^[11,12]。而其中雷达波吸收材料由于可以从全方位降低武器的信号特征，因而越来越成为隐身技术研究的热点^[13]。美国是世界上对隐身技术研究的最早的国家，而且在技术水平上也遥遥领先。目前，美国的 F-22、F-35、F-117A 以及 B-2 等战机均已经大量应用了电磁波吸波材料^[14-16]，达到了较好的隐身效果。

1.2 电磁波吸波材料简介

电磁波吸波材料指的是能有效吸收、衰减入射材料的电磁波，并将电磁波转化成能量或者使其干涉相消的材料^[17-19]。本节介绍电磁波吸波材料的吸波机理和一些常见的电磁波吸波材料。

1.2.1 电磁波吸波材料的吸波机理

良好的电磁吸波材料一般需要同时满足两个条件。第一，当电磁波入射到材料的表面时，能够尽可能多地进入材料内部，减少电磁波在空气/材料界面上的反射，这需要在设计材料时充分考虑到阻抗匹配；第二，当电磁波进入材料内部后，能够对电磁波形成有效的衰减，这需要材料具有良好的衰减特性^[20-23]。

从衰减特性上看, 衡量材料对电磁波衰减能力的参数主要为材料的复介电常数 ($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$) 和复磁导率 ($\mu_r = \mu' - j\mu''$)。其对电磁波的损耗可以用损耗角正切值表示为

$$\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_\epsilon + \text{tg}\delta_\mu = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} + \frac{\mu''}{\mu'} \quad (1-1)$$

式中, $\text{tg}\delta_\epsilon$ 和 $\text{tg}\delta_\mu$ 分别为介电损耗角正切值和磁损耗角正切值, 表示介电损耗和磁损耗能力的强弱; ϵ' 和 μ' 分别为介电常数实部和磁导率实部, 代表材料在外界磁场作用下发生极化和磁化的大小; ϵ'' 和 μ'' 分别为介电常数虚部和磁导率虚部, 表示材料在磁场作用下电偶极子和磁偶极子发生重排时所引起的损耗大小。从中可以看出, 提高材料对电磁波损耗能力关键在于增大材料的 ϵ'' 和 μ'' 。

然而, 单一提高材料的 ϵ'' 和 μ'' 还无法保证获得优异的吸波性能, 材料必须满足和空气界面间具有良好的阻抗匹配特性时才可以使电磁进入材料内部。界面处电磁波的反射系数 R 取决于材料的特性阻抗 Z 与空气阻抗 Z_0 的差异:

$$R = \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right| \quad (1-2)$$

式中 $Z = E/H = \sqrt{\mu_r \mu_0} / \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0}$ 为材料的特征阻抗, $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ 为自由空间的特性阻抗。可见, 只有当 $\mu_r = \epsilon_r$ 时, 反射系数 R 才为零, 此时自由空间和材料的界面阻抗完全匹配, 电磁波可以完全进入材料。但是几乎没有吸波材料可以达到这一要求, 只能在尽可能宽的频率范围内使 $\mu_r \approx \epsilon_r$ 。

1.2.2 电磁波吸波材料的分类

通常将吸波材料分为以下几类^[23-25]: (1) 按照吸波机理, 可以分为吸收性和干涉型两大类。吸收性是利用材料本身对入射电磁波的损耗进行吸收的, 干涉型则是利用吸波材料的表层和底层的两列反射电磁波之间由于振幅相同方向相反而发生干涉相消来吸波的。这需要材料的厚度刚好为电磁波波长的 $1/4$ 的奇数倍。

(2) 按照材料的成型工艺和承载能力分类, 可以分为涂覆型和结构型两大类。结构型吸波材料是指材料自身不仅可以作为结构件, 而且也具有吸收电磁波的能力。通常是用具有吸波性能的纤维增强树脂制成树脂基复合材料, 这种材料结合了质量轻、强度高以及吸波等特点, 成为了新一代吸波材料的研究重点。涂覆型吸波材料是指将吸波剂与胶粘剂混合后涂覆在器件外壳上从而达到吸波的目的,

该种吸波材料研究较早，成本较低且施工方便，因此得到广泛应用。但是由于吸波涂层会增加质量，并存在脱落的问题，因此目前有被结构型吸波材料取代的趋势。(3) 按照对电磁波的损耗机理，可以分为电损耗型和磁损耗型吸波材料。电损耗型吸波材料主要是利用材料的电子极化、离子极化、分子极化或界面极化等弛豫衰减吸收电磁波，典型的电损耗型吸波材料有炭黑、碳纤维、碳化硅纤维以及钛酸钡陶瓷等；磁损耗型吸波材料是利用畴壁共振和自然共振、磁滞损耗、后效损耗等磁极化机制衰减吸收电磁波，铁氧体、羰基铁粉和磁性金属就属于这一类。下面选取了几类常见的吸波材料并简要介绍其研究现状。

(1) 铁氧体。铁氧体是目前发展的最为成熟的一种吸波材料，其结构、组成可调，因此可以调控其吸波频段和吸波性能，已经得到了广泛的应用。在微波波段把铁氧体作为吸收剂主要是利用了它的畴壁共振和自然共振损耗^[26]。铁氧体按照晶体类型可以分为尖晶石型、磁铅石型和石榴石型^[27]。应用于吸波材料的主要是前两者，其中又以六角晶系磁铅石型铁氧体的吸波性能最好，因其具有片状结构，同时其又具有较高的自然共振频率^[28]。尖晶石型铁氧体的结构通式可以表示为 MeFe_2O_4 ，其中 Me 代表 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Zn^{2+} 等二价金属离子；磁铅石型铁氧体的结构通式为 $\text{AB}_{12}\text{O}_{19}$ ，其中 A 是半径与氧离子相近的阳离子，如 Ba^{2+} 、 Co^{2+} 等；B 是 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Mn^{3+} 等三价金属离子^[29]。

虽然铁氧体具有较好的吸波性能，但是由于存在密度大，高温特性差的缺点，而且单一的铁氧体材料无法满足吸收频带宽、质量轻、厚度薄的要求，因此铁氧体往往和其他吸收剂混合制成吸波复合材料，常见的有炭黑、石墨、羰基铁粉、碳化硅粉和铁粉等^[30-32]。

(2) 碳基材料。碳材料由于具备优异的介电性能和低密度，在吸波材料领域受到了广泛的关注^[33-35]。石墨、炭黑、碳纤维和碳纳米管均已经在吸波材料上有了广泛应用^[36-38]。

碳纤维吸波材料是一种兼具承载与吸波功能的结构功能一体化的结构吸波材料。碳纤维的电阻率较低，约为 $10^{-2}\Omega\cdot\text{cm}$ ，是电磁波的强反射体，因此需要对碳纤维进行改性。通过对碳纤维的改性和处理，可以调控其吸波性能，发展出一系列吸波材料^[39]。日本曾有专利报道已研制出一种吸波型特殊碳纤维，在 10GHz 时相对介电常数实部 $\epsilon' = 8-12$ 、虚部 $\epsilon'' = 3-5$ 。用这种碳纤维与环氧树脂复合制备

了厚度为 3mm 的层压平板，其在 X 波段反射损耗达-15dB。

石墨很早就被用来填充于飞机蒙皮的夹层中吸收雷达波。美国在石墨吸波材料的研究上取得了巨大进展，其研制的石墨/树脂复合材料对雷达波的吸收率可以达到 99%，而且在低温下（-53°C）仍保持了很高的韧性^[40-41]。侯进^[42]以层状无机物作为吸波剂与石墨吸波剂复合，制备出双层复合吸波涂层，获得了最低反射损耗为-22.3dB 的双层复合涂层，其中小于-5dB 和-10dB 的频宽分别为 5.4GHz 和 3.1GHz。

炭黑体积电阻率为 0.1-10Ω·cm，制备树脂基复合材料时其可以与基体强烈作用，形成网状的导电通路，从而大幅度调整材料的导电性（ $1-1 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ ）^[43]。炭黑对电磁波的损耗主要是电损耗，如当乙炔炭黑粒子填充到丁腈橡胶中，依靠介质内部的极化形成导电链或局部导电网络，从而吸收电磁波。当导电高聚物处于半导体状态时，对微波有较好的吸收，并且在一定电导率范围之内最大吸收随电导率的增大而增大^[44]。吴友朋等^[45]在纳米炭黑中添加微米碳化硅制备了一种新型的复合吸收材料。研究结果表明加入碳化硅可以使得炭黑/环氧树脂复合涂层的体电阻率和渗流阈值降低。在 5%的炭黑中添加 50%的碳化硅，制备厚度为 2mm 的涂层时，在 7.5-13.5GHz 宽频范围内反射损耗均优于-10dB，吸收峰值达-40dB。

炭黑由于其存在高温抗氧化性能差等缺点，近些年已经不再是吸波材料研究领域的热门。但是由于其介电常数大，可以与其他材料复合以调节材料的电磁参数，因此仍然有较大的应用潜力。

（3）碳化硅（SiC）纤维。喷气发动机喷管和导弹弹头等武器的部件工作温度一般都在 700°C 以上，有时候甚至达到了 1000°C。SiC 纤维由于具有高强度、高模量以及优异的耐高温氧化性能，同时其吸波性能可以通过调控其电阻率而得到提高，因此成为了高温吸波复合材料领域最具有应用潜力的增强剂及吸收剂，在航空航天、核工业等领域有着广泛的应用前景^[46-48]。在一些非耐高温的部件上，比如超音速飞机的外壳，SiC 纤维由于其高强度及吸波特性，也具有极大的应用潜力。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.