



国防科技图书出版基金

刘祥萱 王焯军 崔虎 著

Design and Property Analysis of Radar Absorbing Materials

雷达波吸收材料设计 与特性分析



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

雷达波吸收材料设计与特性分析

Design and Property Analysis of Radar Absorbing Materials

刘祥莹 王煊军 崔虎 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

雷达波吸收材料设计与特性分析/刘祥萱等著. —北京:国防工业出版社, 2018.3

ISBN 978-7-118-11431-7

I. ①雷… II. ①刘… III. ①雷达-微波吸收材料-研究 IV. ①E951.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第035494号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 字数 309千字

2018年6月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 88.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部**国防科技图书出版基金**资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要来自国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 许西安 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

现代战争以高、精、尖技术的广泛应用为显著特点。随着现代各种光电磁探测技术的迅猛发展,先进侦察系统和精确打击系统在实际作战中对军事装备及设施的威胁越来越大。雷达隐身材料的应用能够显著提高武器装备的生存、突防和纵深打击能力,已经成为陆、海、空一体化现代战争中最重要、最有效的突防技术手段,是世界各军事强国研究的热点之一,出于军事与技术保密的需要,这类材料的研究一直处于非公开状态。

国内高校和研究院所在吸收剂种改性、多层吸收材料、手性吸波材料、频率选择表面、光子晶体隐身、等离子体隐身等方面进行了广泛研究。雷达波吸收剂的制备与吸收材料的研究报道很多,但由于吸收剂种类、结构(尺寸、形状、核壳)、混合、浓度、多层结构及材料厚度等诸多因素对吸收性能产生影响,雷达波反射吸收曲线变化多样,研究在这些纷杂现象的背后的本质是本书的主要目的。雷达波吸收材料涉及反射、吸收、干涉等多重作用,本书力图从这些角度去揭示雷达波吸收材料的内在作用规律。

雷达波吸收材料研究体系实践性强,性能优异吸收剂的研制是应用研究基础。我们在深入研究具有代表性的碳系吸收剂(包括炭黑、碳纤维、碳纳米管)、铁氧体(包括尖晶石、M型铁氧体)、羰基铁和碳化硅的电磁参数与吸收性能基础上,主要在吸收剂形状、共混、掺杂改性及包覆等方面开展研究,确定常见吸收剂的电磁参数特性及改性效果和作用;探求雷达波吸收材料的本质规律,结合雷达波吸收材料衰减作用理论分析,阐释雷达波吸收材料的设计思想和方法,进而展示单层介电型和磁损耗型吸收材料的设计、泡沫吸收材料制备与性能、多层吸收材料层结构优化等方面研究成果。为此,本书是从两条主线展开:一是吸收剂的改性方法,涉及共混、掺杂、包覆以及孔隙等方面调整电磁参数(第4、5、6章及2.5、7.3、7.4节);二是单层、双层到多层吸波材料的设计思路、吸收机理与特性分析的探讨(第2、3、7章)。本书结合典型雷达吸波材料案例分析,并从理论上推证磁性吸收剂改性和多层吸收材料的层结构设计是雷达波吸收材料研究的发展方向。

本书名中的“特性分析”是指吸收剂电磁参数特性的影响因素分析,用吸波材料的反射、干涉、吸收作用和匹配的观点分析它们对吸波材料吸收衰减曲线的影

响。本书通过机理讨论、实际案例和研究成果特性分析,深入浅出地说明吸波材料的衰减作用机制和设计思路,研究具有基础性、代表性和创新性,目前国内外均未见相似论著。本书的实验部分由刘祥萱、王煊军和崔虎课题组指导研究生张泽洋、闻武、陈鑫、郭磊和莫斌等共同完成。刘祥萱主要完成第2、3章和7.5节的撰写及全书统稿。吴有朋、张泽洋参与了部分章节的写作,特此表示感谢。

由于作者专业水平和学术水平有限,加上时间仓促,书中难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

2017年3月

目 录

第 1 章 雷达散射截面与隐身技术	1
1.1 雷达探测原理	1
1.1.1 雷达工作原理	1
1.1.2 雷达工作波段	3
1.1.3 雷达探测特性	3
1.2 雷达隐身技术	5
1.2.1 雷达隐身技术简介	5
1.2.2 雷达波吸收材料的设计要求	7
1.2.3 国外吸波材料的历史回顾	8
参考文献	12
第 2 章 吸波材料基本原理	14
2.1 电磁波与材料相互作用	14
2.1.1 材料电磁特性参数	14
2.1.2 材料对电磁波的反射、吸收和干涉	16
2.1.3 不同材料的界面反射系数、衰减因子	20
2.2 等效电路与传输线理论	25
2.2.1 传输线理论	25
2.2.2 复介电常数的物理机制	28
2.3 吸收损耗机理的探讨	30
2.3.1 极化损耗与磁损耗	31
2.3.2 微纳米吸收剂作用机理	33
2.3.3 复合材料导电机理	37
2.4 影响电磁参数的因素与作用原理	42
2.4.1 吸收剂的种类、电导率与形状	43
2.4.2 复合效应与渗流阈值	54
2.4.3 等效媒质理论与强扰动理论	56
2.5 炭黑、碳化硅及其共混吸波性能	60

2.5.1	几种碳材料的电磁参数	61
2.5.2	炭黑浓度对吸波效果的影响	67
2.5.3	SiC 浓度对吸波效果的影响	68
2.5.4	混合吸收剂对电磁参数的影响	71
2.5.5	L-CB 与 SiC 混合模拟吸波性能	74
2.5.6	材料的导电性能	76
2.5.7	吸收剂在涂料涂层中的分散性	78
2.5.8	涂层实测吸波性能	79
参考文献		81
第3章 单层吸波材料基本规律		86
3.1	雷达波吸收材料的性能指标	86
3.2	单层介电材料的阻抗匹配与展频效应	87
3.2.1	单层纯介电材料的匹配条件	88
3.2.2	介电材料 Cole - Cole 图	95
3.3	磁性吸波材料的匹配与强化透吸作用	99
3.3.1	磁性吸波材料的 Cole - Cole 图	99
3.3.2	磁性吸波材料的特殊性	101
3.3.3	羰基铁磁性吸波材料分析	102
3.4	单层吸波材料吸收规律分析	105
3.4.1	干涉、吸收共同作用	105
3.4.2	反射衰减吸收峰的分析	106
3.4.3	多吸收峰的产生	107
3.4.4	厚度对于干涉与吸收的影响	109
3.5	典型单层吸波材料的解析	114
3.5.1	干涉吸收为主的吸波材料	114
3.5.2	损耗吸收为主的吸波材料	117
参考文献		119
第4章 吸收剂微观结构对复合材料电磁参数的影响		121
4.1	等效电磁参数的计算方法	121
4.1.1	等效媒质理论	121
4.1.2	修正 EMT 公式	123
4.2	颗粒形状对复合体系电磁参数的影响	125
4.2.1	颗粒形状对复合体系介电常数的影响	125
4.2.2	颗粒形状对复合体系渗流阈值的影响	128

4.3 颗粒核壳结构对电磁参数的影响	130
4.3.1 核壳模型的建立	130
4.3.2 核壳结构对电磁参数的影响	133
4.4 界面效应对电磁参数的影响	135
4.4.1 含界面相等效介电模型的建立	136
4.4.2 理论结果与实验数据比较	137
4.4.3 界面效应对介电常数的影响分析	138
4.4.4 界面效应对吸波性能的影响	140
参考文献	142

第5章 稀土掺杂铁氧体的制备及电磁特性

5.1 电磁参数及吸波性能的测定方法	146
5.1.1 电磁参数的测试方法	146
5.1.2 吸波涂层反射率测试	147
5.2 $\text{NiNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 的制备及电磁性能	148
5.2.1 $\text{NiNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 样品制备	148
5.2.2 $\text{NiNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 晶体结构与形貌	148
5.2.3 钕离子掺杂量对电磁参数的影响	150
5.2.4 $\text{NiNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 的吸波性能分析	153
5.3 $\text{NiLa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 的制备及电磁性能	156
5.3.1 $\text{NiLa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 样品制备	156
5.3.2 $\text{NiLa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 晶体结构与形貌	156
5.3.3 镧离子掺杂量对电磁参数的影响	157
5.3.4 $\text{NiLa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 的吸波性能分析	160
5.4 $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ 的制备及电磁性能	162
5.4.1 La-Co 掺杂 M 型锆铁氧体样品制备	162
5.4.2 La-Co 掺杂 M 型锆铁氧体的晶体结构与形貌	163
5.4.3 La-Co 掺杂 M 型锆铁氧体电磁参数与吸波性能	166
5.5 $\text{Sr}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ 的制备及电磁性能	168
5.5.1 Nd-Co 掺杂 M 型锆铁氧体样品制备	168
5.5.2 Nd-Co 掺杂 M 型锆铁氧体晶体结构和形貌	169
5.5.3 Nd-Co 取代 M 型锆铁氧体电磁参数与吸波性能	170
5.5.4 吸波涂层的性能	173

参考文献	175
------------	-----

第6章 MOCVD 制备铁氧体@羰基铁核壳粉体	177
6.1 $\text{NiFe}_2\text{O}_4@ \alpha - \text{Fe}$ 粉体的制备与电磁性能	177
6.1.1 $\text{NiFe}_2\text{O}_4@ \alpha - \text{Fe}$ 样品的制备	177
6.1.2 工艺条件对 $\text{NiFe}_2\text{O}_4@ \alpha - \text{Fe}$ 核壳粉体微观结构的影响	178
6.1.3 工艺条件对 $\text{NiFe}_2\text{O}_4@ \alpha - \text{Fe}$ 核壳粉体电磁参数和吸波性能的影响	184
6.2 锶铁氧体@羰基铁核壳粉体的制备及电磁性能	189
6.2.1 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}@ \alpha - \text{Fe}$ 样品的制备	189
6.2.2 工艺条件对 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}@ \alpha - \text{Fe}$ 样品微观形貌的影响	189
6.2.3 工艺条件对 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}@ \alpha - \text{Fe}$ 样品电磁参数和吸波性能的影响	193
6.3 化学气相沉积法制备羰基铁包覆 $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$	198
6.3.1 $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}@ \alpha - \text{Fe}$ 样品制备方法	198
6.3.2 羰基铁包覆 $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ 晶体微结构	199
6.3.3 羰基铁包覆 $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ 电磁参数和吸波性能的影响	202
6.3.4 球磨法制备羰基铁/ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ 的电磁参数和吸波性能	205
6.3.5 羰基铁包覆 $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ 吸波涂层的制备	208
参考文献	209
第7章 雷达吸波材料设计实例与吸波性能	211
7.1 雷达波吸收材料的设计与优化方法	212
7.1.1 雷达波吸收材料的设计方法	212
7.1.2 雷达波吸收材料优化方法	213
7.1.3 多层吸收材料的设计思想	215
7.2 单层吸波材料优化设计	219
7.2.1 非磁性材料吸波材料的设计	219
7.2.2 磁性波材料电磁参数设计	225
7.3 硬质聚氨酯基泡沫吸波材料	227
7.3.1 硬质聚氨酯基炭黑泡沫吸波材料	228
7.3.2 硬质聚氨酯基碳纳米管泡沫吸波材料	230
7.3.3 硬质聚氨酯基羰基铁泡沫吸波材料	232
7.4 软质聚氨酯基泡沫吸波材料	235

7.4.1	聚氨酯基炭黑泡沫吸波材料	236
7.4.2	聚氨酯基碳纳米管泡沫吸波材料	237
7.4.3	聚氨酯基羰基铁泡沫吸波材料	238
7.4.4	聚氨酯基炭黑-羰基铁泡沫吸波材料	240
7.5	铁氧体双层吸波材料的涂层优化	241
7.5.1	铁氧体/羰基铁复合吸波材料的基本特性	242
7.5.2	铁氧体/羰基铁复合吸波材料层厚度的优化	246
7.5.3	铁氧体/炭黑复合吸波材料的涂层优化	246
7.6	基于遗传算法的多层吸波材料优化设计	251
7.6.1	优化设计思路	252
7.6.2	多层吸波涂层优化	253
7.6.3	优化计算结果	253
7.6.4	双层复合涂层制备及表征	254
参考文献		256

Contents

Chapter 1 Radar Scattering Cross Section and Stealth Technology	1
1.1 Radar Detection Principle	1
1.1.1 Radar Works	1
1.1.2 Radar Bands	3
1.1.3 Radar Detection Characteristics	3
1.2 Radar Stealth Technology	5
1.2.1 Introduction of Radar Stealth Technology	5
1.2.2 Design Requirements of Radar Absorbing Materials	7
1.2.3 Historical Review of Radar Stealth Materials Abroad	8
References	12
Chapter 2 Basic Principle of Absorbing Materials	14
2.1 Interaction Between Electromagnetic Waves and Materials	14
2.1.1 Electromagnetic Properties of Materials Parameters	14
2.1.2 Material Reflection, Absorption and Interference of Electromagnetic Waves	16
2.1.3 Interface Reflection Coefficient and Attenuation Factor of Different Materials	20
2.2 Equivalent Circuit and Transmission-Line Theory	25
2.2.1 Transmission-Line Theory	25
2.2.2 Physical Mechanism of Complex Dielectric Constant	28
2.3 Investigation of Absorption-Loss Mechanism	30
2.3.1 Polarization Loss and Magnetic Loss	31
2.3.2 Mechanism of Micro-nano Absorbent	33
2.3.3 Conductive Mechanism of Composites	37
2.4 Influencing Factors of Electromagnetic Parameters and Action Principle	42

2.4.1	Type, Conductivity and Shape of Absorbent	43
2.4.2	Compound Effect and Percolation Threshold	54
2.4.3	Equivalent Medium Theory and Strong Perturbation Theory	56
2.5	Absorbing Properties of Carbon Black, Silicon Carbide and Their Mixtures	60
2.5.1	Several Carbon Absorbent Electromagnetic Parameters	61
2.5.2	Effect of Carbon Black Concentration on Absorbing Property	67
2.5.3	Effect of Silicon Carbide Concentration on Absorbing Property	68
2.5.4	Effect of Mixed Absorbents on Electromagnetic Parameters	71
2.5.5	Conductive L – CB and SiC mixed analog Microwave Absorption ...	74
2.5.6	Conductive Properties of Materials	76
2.5.7	Absorbent Dispersions in Coatings	78
2.5.8	Measured value of Absorbing Property of Coatings	79
	References	81

Chapter 3 Fundamental Laws of Monolayer Absorbing Materials 86

3.1	Performance Index of Radar-Absorbing Materials	86
3.2	Impedance Matching and Spread Spectrum Effect of Monolayer Pure Dielectric Materials	87
3.2.1	Matching conditions of Single Layer Pure Dielectric Materials	88
3.2.2	Cole – Cole Diagram of Dielectric Materials	95
3.3	Matching and Enhanced Absorbing of Magnetic Absorbing Materials ...	99
3.3.1	Cole – Cole Diagram of Magnetic Absorbing Materials	99
3.3.2	Particularity of magnetic absorbing material	101
3.3.3	Analysis of Iron Carbonyl Magnetic Absorbing Materials	102
3.4	Analysis of Monolayer Absorbing Materials Absorption Law	105
3.4.1	Interference, absorption of Common Effects	105
3.4.2	Analysis of Reflective Decay Absorption Curves	106
3.4.3	Multiple Absorption Peak Generation	107
3.4.4	Effect of Thickness on Interference and Absorption	109
3.5	Analysis of Typical Monolayer Absorbing Materials	114
3.5.1	Interference-based Absorbing Materials	114
3.5.2	Loss-based Absorbing Materials	117

References	119
Chapter 4 Influence of Absorbent Microstructure on Composite	
Electromagnetic Parameter	121
4. 1 Calculation of Equivalent Electromagnetic Parameters	121
4. 1. 1 Equivalent Medium Theory	121
4. 1. 2 EMT Fix Formula	123
4. 2 Influence of Particle Shape on Electromagnetic Parameters in Composite System	125
4. 2. 1 Influence of Particle Shape on Dielectric Constant of Composites	125
4. 2. 2 Influence of Particle Shape on Seepage Threshold of Composites	128
4. 3 Influence of Core-Shell Structure of Particles on Electromagnetic Parameters	130
4. 3. 1 Establish a Core-shell Model	130
4. 3. 2 Influence of Core-shell Structure on Electromagnetic Parameters	133
4. 4 Influence of Interface Effect on Electromagnetic Parameters	135
4. 4. 1 Establishment of an Equivalent Dielectric Model with Interface ...	136
4. 4. 2 Comparison of Theoretical Results and Experimental Data	137
4. 4. 3 Influence of Interface Effect on Dielectric Constant	138
4. 4. 4 Effect of Interface Effect on Absorbing Performance	140
References	142
Chapter 5 Preparation and Electromagnetic Property of Rare Earth	
Doped Ferrite	145
5. 1 Analysis and Test Methods	146
5. 1. 1 Electromagnetic Parameters of the Test Methods	146
5. 1. 2 Absorption Coating Reflectivity Test Methods	147
5. 2 Preparation and Electromagnetic Property of $\text{NiNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$	148
5. 2. 1 Preparation of $\text{NiNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ Samples	148
5. 2. 2 Crystal Structure and Morphology of $\text{NiNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$	148
5. 2. 3 Effect of Nd Doping on Electromagnetic Parameters	150
5. 2. 4 Microwave Absorbing Property Analysis of $\text{NiNd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$	153

5.3	Preparation and Electromagnetic Property of $\text{NiLa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$	156
5.3.1	Preparation of $\text{NiLa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ samples	156
5.3.2	Crystal Structure and Morphology of $\text{NiLa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$	156
5.3.3	Effect of La Doping on Electromagnetic Parameters	157
5.3.4	Microwave Absorbing Property Analysis of $\text{NiLa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$	160
5.4	Preparation and Electromagnetic Property of $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$	162
5.4.1	Preparation of La – Co Doped M-type Strontium Ferrite	162
5.4.2	Crystal Structure and Morphology of La – Co Doped M-type Strontium Ferrite	163
5.4.3	Effect of La – Co Doped M-type Strontium Ferrite on Electr- omagnetic Parameters and Microwave Absorbing Property	166
5.5	Preparation and Electromagnetic Property of $\text{Sr}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$	168
5.5.1	Preparation of Nd – Co Doped M-type Strontium Ferrite	168
5.5.2	Crystal Structure and Morphology of Nd – Co Doped M-type Strontium Ferrite	169
5.5.3	Effect of Nd – Co Doped M-type Strontium Ferrite on Electr- omagnetic Parameters and Microwave Absorbing Property	170
5.5.4	Performance of Absorbing Coatings	173
	References	175

Chapter 6 Preparation of Ferrite@ Carbonyl Iron Core-Shell

	Powder by MOCVD	177
6.1	Preparation and Characterization of $\text{NiFe}_2\text{O}_4@ \alpha - \text{Fe}$ Powder	177
6.1.1	Preparation of $\text{NiFe}_2\text{O}_4@ \alpha - \text{Fe}$	177
6.1.2	Effect of Process Conditions on Crystal Structure and Morphology of $\text{NiFe}_2\text{O}_4@ \alpha - \text{Fe}$	178
6.1.3	Effect of Process Conditions on Electromagnetic Parameters and Microwave Absorbing Property of $\text{NiFe}_2\text{O}_4@ \alpha - \text{Fe}$	184
6.2	Preparation and Characterization of Strontium Ferrite @ Carbonyl Iron Core-Shell Powder	189
6.2.1	Preparation of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}@ \alpha - \text{Fe}$	189
6.2.2	Effect of Process Conditions on Crystal Structure and Morphology of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}@ \alpha - \text{Fe}$	189

6.2.3	Effect of Process Conditions on Electromagnetic Parameters and Microwave Absorbing Property of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}@ \alpha - \text{Fe}$	193
6.3	Preparation of $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}@ \alpha - \text{Fe}$ by Coated with Iron Carbonyls by Chemical Vapor Deposition	198
6.3.1	Preparation of $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}@ \alpha - \text{Fe}$	198
6.3.2	Crystal Microstructure of $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}@ \alpha - \text{Fe}$	199
6.3.3	Effect of $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}@ \alpha - \text{Fe}$ on Electromagnetic Parameters and Microwave Absorbing Property	202
6.3.4	Preparation of the ball milling method $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}@$ $\alpha - \text{Fe}$ on Electromagnetic Parameters and Absorbing Property	205
6.3.5	Absorbing Coating Performance of $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}@ \alpha - \text{Fe}$	208
References		209

Chapter 7 Design Example and Absorbing Property of Radar-

	Absorbing Materials	211
7.1	Design and Optimization of Radar-Absorbing Materials	212
7.1.1	Design Methods of Radar Absorbing Materials	212
7.1.2	Optimization Methods of Radar Absorbing Materials	213
7.1.3	Design Idea of Multi-layer Absorbent Materials	215
7.2	Optimum Design of Monolayer Absorbing Materials	219
7.2.1	Design of Non-magnetic Absorbing Materials	219
7.2.2	Design of magnetic Absorbing Materials	225
7.3	Research on Rigid Polyurethane Foam Absorbing Materials	227
7.3.1	Rigid Polyurethane-based Carbon Black Foam Absorbing Materials	228
7.3.2	Rigid Polyurethane-based Carbon Nanotubes Foam Absorbing Materials	230
7.3.3	Rigid Polyurethane Carbonyl Iron foam Absorbing Materials	232
7.4	Soft Polyurethane-Based Foam Radar Absorbing Materials	235
7.4.1	Soft Polyurethane-based Carbon Black Foam Absorbing Materials	236
7.4.2	Soft polyurethane-based Carbon Nanotubes Foam Absorbing Materials	237