

学校编码：10384

分类号 _____ 密级 _____

学号：23120101152963

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

舰用雷达吸波涂层的磁控检测系统研究

A Magnetic-controlled Detection System
of Radar Absorbing Coatings for Ships

霍丽霞

指导教师姓名：周建华 教授

专业名称：电子与通信工程

论文提交日期：2013 年 月

论文答辩时间：2013 年 月

学位授予日期：2013 年 月

答辩委员会主席： _____

评 阅 人： _____

2013年 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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要

随着雷达等现代探测技术的快速发展,雷达吸波涂层对舰船等装备的隐身也变得越来越重要,而涂层吸波性能的好坏将直接影响舰船等装备的防探测效果,因此研究吸波性能及建立高精度的检测体系,特别是能够实时监控涂层本征性能的系统对现代隐身技术发展具有重要的意义。

本文在对国内外雷达吸波涂层吸波性能的检测及调控方法大量调研的基础上,提出了一种基于传输线理论的波导型传输/反射法的检测方案,首先设计并搭建了适合待测涂层波段的单端口和双端口网络的带磁控激励检测系统,完成了对整个检测系统可靠性的验证、灵敏度分析、系统误差分析及系统校准;完成了检测系统中适合不同波段的激励线圈设计,可为待测涂层提供大小可调控的磁场;精确分析了矩形激励线圈内部的磁感应强度分布,建立了待测涂层相对介电常数和相对磁导率的数值分析模型,实现了一种可实现跨频段在动态激励下实施的隐身涂层的检测系统。与其他检测系统相比,本检测系统能够在动态激励条件下完成对涂层性能的检测,具有结构简单、成本低、灵敏度高、测试误差小、测试性能稳定等优点。

本研究工作从搭建的单端口和双端口磁控检测系统入手,完成了新系统的建立及标定。随后重点分析讨论了在外加不同激励磁场的条件下,两种比例的经过细化和磁化处理的磁粉掺杂改性导电聚合物吸波涂层的散射系数、吸收峰偏移和电磁参数进行了实际磁控实时检测,验证了系统的实用性。利用新系统的单端口网络的检测成功地检测出两种新型涂层样品在不同的波段的吸收峰状态、随着激励磁场变化吸波性能的变化、吸收峰明显的红移等实时变化状况,进而分析了两种样品的吸波性能和红移量由于组分配比的变化规律;用新系统双端口网络的检测系统进一步验证这两种样品的衰减机理,完成了对样品相对介电常数和相对磁导率反演分析计算。结合实际应用,研究工作归纳总结了外加激励磁场大小与待测样品的吸波性能、红移量和电磁参数之间的非线性关系,实现了待测涂层吸波性能的按需调控和检测补偿技术。

通过对磁粉掺杂改性导电聚合物吸波涂层的磁控检测结果表明,该检测系统

是实用可靠的，能够很好地完成待测涂层的磁控检测，具有较好的创新性与可行性。

关键词：雷达吸波涂层；矩形波导；电磁参数；磁控检测

厦门大学博硕士论文摘要库

ABSTRACT

With the rapid development of modern detection technology, radar absorbing coatings applied to stealth ships and other equipments are becoming important. The absorbing performances of coatings will directly affect the anti-detection effect of ships and other equipments, so the study on an accurate detection system for monitoring absorbing properties and especially the intrinsic properties of coatings in real-time has a great significance for the development of modern stealth technology.

After a large number of investigations in domestic and international researches on detecting and controlling method of radar absorbing properties, a network magnetron detection system with single-port or dual-port is proposed, based on waveguide-type transmission/reflection method. And also, the verification of the reliability, sensitivity analysis, error analysis and calibration of the designed system have been completed. In the system, the excitation coils suitable for different bands are designed to provide the adjustable magnetic field. The field intensity distributions in the designed coils have been analyzed, and the numerical model for the relative permittivity and permeability of coatings has been established. Compared with other detection systems, the proposed system can complete the coating performance measurement under dynamic excitation conditions, with some advantages including simple structure, low cost, good sensitivity, small error, and stable performance.

For two selected absorbing coating samples of magnetic powder doped conductive polymers with different ratio and preprocesses, the scattering parameters, absorption offset and electromagnetic parameters are measured under magnetic field applied using the proposed magnetron detection system with a single port and dual-port, that verify the utility. The results by single-port analysis show that these two samples have obvious absorption peak in different wavelength bands. With the enhancement of the applied magnetic field, the absorbing properties are improved and the absorption peaks have a significant redshift at the same time, but with different extent for the two samples. The attenuation mechanism is verified, and also the calculations on the relative dielectric constants and relative magnetic permeabilities of the samples are completed based on the measurement using the dual-port network detection system. Thus, we can regulate the absorbing performances of coatings

on-demand according to the non-linear relationships between the applied magnetic field and the absorbing properties, the redshift and electromagnetic parameters of coatings.

The magnetron measurement results show that the designed system is practical and reliable, with better innovation and feasibility.

Key words: radar absorbing coatings; rectangular waveguide; electromagnetic parameters; magnetron detection

厦门大学博硕士论文摘要库

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 雷达吸波涂层吸波性能的检测及调控方法.....	3
1.2.1 吸波涂层吸波性能的检测方法及研究现状.....	3
1.2.2 吸波涂层吸波性能的调控方法及研究现状.....	7
1.3 论文主要研究工作及内容安排.....	10
1.4 论文创新点.....	11
参考文献.....	12
第二章 吸波涂层电磁参数的测试方法	15
2.1 吸波涂层的电磁参数及吸波条件.....	15
2.1.1 吸波涂层的电磁参数.....	15
2.1.2 吸波涂层的吸波条件.....	15
2.2 吸波涂层电磁参数常用的测试方法及比较分析.....	16
2.2.1 常用的测试方法.....	16
2.2.2 常用测试方法的比较分析.....	19
2.3 本章小结.....	20
参考文献.....	20
第三章 吸波涂层磁控检测系统的研究	22
3.1 磁控检测系统的制定.....	22
3.2 磁控检测系统的测试方法.....	23
3.2.1 双端口网络的求解及存在的问题.....	23
3.2.2 单端口网络的求解及存在的问题.....	26
3.3 磁控检测系统的磁场控制方案.....	28
3.3.1 产生磁场的方法.....	28
3.3.2 矩形螺线圈内部磁场的理论分析.....	30
3.3.3 矩形螺线圈的设计.....	33
3.4 磁控检测系统的验证.....	39
3.5 本章小结.....	40
参考文献.....	41
第四章 磁控检测系统的实现及实验结果分析	42
4.1 磁控检测系统的实现.....	42
4.1.1 待测涂层的制样.....	43
4.2 磁控检测系统的误差分析与校准.....	43
4.2.1 矢量网络分析仪的误差及校准.....	44
4.2.2 其他误差源引入的误差及分析.....	45
4.3 磁粉掺杂改性导电聚合物涂层的测试.....	47
4.3.1 单端口网络对待测涂层的测试分析.....	48

4.3.2 双端口网络对待测涂层的测试分析.....	59
4.3.3 磁粉掺杂改性导电聚合物的磁控稳定性.....	64
4.4 本章小结.....	74
参考文献.....	74
第五章 总结与展望	75
附录一 攻读硕士学位期间的研究成果	77
附录二 检测系统使用的主要仪器设备	78
致 谢	78

厦门大学博硕士论文摘要库

Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background	1
1.2 The Performance testing and regulation of radar absorbing coatings	3
1.2.1 The test methods and achievements of the detection method of radar absorbing coatings	3
1.2.2 The test methods and achievements of the controlibility of radar absorbing coating	7
1.3 The main work and content arrangements of the thesis	10
1.4 Innovative points of the thesis.....	11
References	12
Chapter 2 Detection methods of electromagnetic parameters	15
2.1 Electromagnetic parameters and absorbing conditions of absorbing coatings	15
2.1.1 The electromagnetic parameters of absorbing coatings.....	15
2.1.2 The absorbing conditions of absorbing coatings	15
2.2 The Method of electromagnetic parameters of absorbing coatings and comparative analysis.....	16
2.2.1 The method of electromagnetic parameters of absorbing coatings.....	16
2.2.2 The comparative analysis.....	19
2.3 Brief summary	20
References	20
Chapter 3 Research on the magnetron detection system of radar absorbing coatings	22
3.1 Establishment of the magnetron detection system.....	22
3.2 The test method of magnetron detection system	23
3.1.1 Solution of the two-port network.....	23
3.1.2 Solution of the one-port network	26
3.3 The magnetic field control program.....	28
3.3.1 The method of generating a uniform magnetic field	28
3.3.2 The magnetic field theoretical analysis of rectangular solenoid coil....	30
3.3.3 The design of the rectangular solenoid coil	33
3.4 Confirmation of the magnetron detection system.....	39
3.5 Brief summary	40
References	41
Chapter 4 Establishment of the system and detection	42
4.1 Establishment of detection system.....	42
4.1.1 production of sample.....	43
4.2 Error analysis and calibration of magnetron detection system	43
4.2.1 The error and calibration of vector network analyzer.....	44
4.2.2 The error introduced by other sources	45
4.3 Detection of magnetic powder doped modified conductive polymer absorbing coatings	47
4.4.1 The detection using the one-port network	48

4.4.2 The detection using the two-port network	58
4.4.3 The stability of absorbing coatings	64
4.4 Brief summary	74
References	74
Chapter 5 Conclusion and expectation	75
Appendix I The Production during graduate student.....	77
Appendix II Device and environment of testing system.....	78
Acknowledgements	79

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 绪论

1.1 研究背景

随着现代科技和雷达等探测设备的快速发展,各国对舰船的隐身也提出了越来越高的要求,隐身技术的发展也变得尤为重要。隐身技术是指在一定的探测环境中,通过控制和降低装备本身的雷达特征信号,使其在一定的范围内难以被探测、识别和攻击的技术。隐身技术主要包括雷达波隐身技术、红外光隐身技术、光学隐身技术和激光隐身技术等。在现代国防科技中,雷达是探测目标的最可靠手段,因此雷达隐身技术也成为各国研究的重点,它主要是通过缩减雷达的散射截面(RCS),降低雷达的最大作用距离,使对方雷达探测不到目标,从而达到隐身的目的。常用的雷达隐身技术主要有外形隐身技术、电子对抗技术、等离子体隐身技术、雷达吸波涂层技术(RAM)等。其中,外形隐身技术是实现舰船高性能隐身的最直接有效的手段,它是通过改变舰船的外部形状,在一定范围内减小雷达的散射面积;电子对抗技术是指通过干扰对方舰船的电子设备,如雷达、无线通信和水声等,使其无法正常工作,它主要包括电子侦察技术、电子干扰技术、电子反侦察和反干扰技术等;而等离子体隐身技术是利用等离子体回避探测系统的一种技术,它利用等离子体层对雷达波具有特殊的吸收和折射特性,来减少反射回雷达接收机的能量,使对方探测系统难以侦察和发现,从而达到隐身的效果。

雷达吸波涂层技术是目前应用最广泛的一种隐身技术,它是利用雷达吸波涂层吸收衰减入射的电磁波,并将其电磁能转换为热能而耗散掉,或使电磁波因干涉而消失的一种技术,它在隐身技术中占有重要的地位。目前,雷达吸波涂层正在向工作频带宽、重量轻、厚度薄、吸收强、强度高等高性能方向发展。传统的雷达吸波涂层按吸收电磁波方式的不同,可分为谐振型吸波涂层和吸收型吸波涂层;按涂层成型工艺和承载能力的不同,可分为涂敷型吸波涂层和结构型吸波涂层;按涂层的损耗机理的不同,可分为电阻型、电介质型和磁介质型吸波涂层。传统的雷达吸波涂层主要有石墨、导电高聚物、特种碳纤维、铁氧体系列、铁酸钡系列、超金属微粉等^[1];新型的吸波涂层主要有纳米吸波涂层、多晶铁纤维吸波涂层、手性吸波涂层、导电高分子吸波涂层和智能吸波涂层等^[2]。下面将对几

种新型吸波涂层进行详细介绍。

纳米吸波涂层是指涂层的晶粒尺寸为纳米级的超细材料,一般组分特征尺寸在0.1~100 nm的涂层,其涂层的尺寸远小于雷达发射的电磁波波长,从而大大减少了电磁波的反射,使得纳米吸波涂层成为了新一代的隐身涂层。同时纳米吸波涂层具有吸波性能好、工作频带宽、兼容性好、质量轻和厚度薄等优点。目前,国内外均大力开展纳米吸波涂层的研究。2000年,日本中央研究所的A.Kojima完成了Fe纳米复合涂层在不同温度下的硬磁特性的变化,但研究中指出纳米晶体 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相的细化机制还需要进一步探讨分析^[3];美国研制的一种“超黑粉”的纳米吸波材料对雷达波的吸收率高达99%;2003年,吉林大学的阮圣平等研究合成了 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 纳米复合材料,并与传统的微波吸收剂铁粉制成了双层复合的吸波涂层,重点分析了各涂层的排列顺序和涂层的厚度对该纳米复合涂层吸波性能的影响^[4];2007年,俄罗斯Radiosrtim公司的S.B.Bibikov等人研究了一种应用于毫米波段的复合纳米吸波涂层,该类吸波涂层能够在400~800 MHz的频率范围内有效地吸收电磁波,但是这种涂层的工作波长有限,因此扩大涂层的有效工作波长也是下一步研究的技术难点^[5]。

多晶铁纤维吸波涂层是一种轻质的磁性雷达吸波涂层,涂层质量仅为1.5~2.0 kg/m^2 。这种涂层在很宽的频带内实现高的吸收率,且在交变电磁场中具有较强的介电损耗和磁损耗。与传统的吸波涂层相比,多晶铁纤维吸波涂层具有吸收强、频带宽、面密度低等优点。1992年,美国的3M公司研制出亚微米级的多晶铁纤维吸波涂层,该涂层具有密度低、频带宽等特点^[6];2000年,同济大学的吴明忠等人研究制备了轻质的铁纤维复合涂层,研究发现该涂层在雷达波段具有很好的吸波性能,并且其吸收峰的频率可通过改变铁纤维厚度的来调控,但该类涂层是否适用于雷达吸波涂层还有待探讨^[7];2002年,华中科技大学的余小琳等人利用传输矩阵法提出了一种面向分层铁纤维涂层的反射率评价公式,并模拟研究了铁纤维吸波涂层的吸波性能与涂层的结构参数和电磁参数之间的关系,为铁纤维吸波涂层的制备提供了一种理论指导^[8];2008年,华中科技大学的李祥成等人研制了羰基铁纤维复合吸波涂层,并利用传输/反射法测试了涂层在X波段的介电常数和磁导率,研究发现该涂层在厘米和毫米波段具有良好的吸波性能,但是具有宽频带的铁纤维复合吸波涂层还需进一步研究^[9]。

智能隐身涂层是20世纪80年代发展起来的一种新型的高科技涂层,是隐身涂

层和智能涂层的有机结合。这种隐身涂层由传感器、控制器和执行器三部分组成。传感器用来感知、采集背景环境的信息变化，控制器根据感知的信息，按照预先设定的函数关系发出需要执行的指令，然后通过执行器对信息作出最佳的响应，使其与背景相融合，从而达到隐身的目的。1985年，美国空军首先提出了智能蒙皮的技术，它是指在导航设备、雷达、潜艇的外壳以及各种传感器元件内植入蒙皮技术，通过采用这种特殊功能的涂层来实现了武器装备的通信、隐身、监视等功能；美国的一种主动探测雷达的隐身装置，这种装置是在塑料涂层中集成微波探测器、相变换放大器和微波发射器^[10]；2004年，英国谢菲尔德大学的Tennat等人利用PIN二极管控制主动的FSS取代了传统的电阻层结构，实现了自适应的雷达吸波结构，该结构在9~13 GHz频带范围内的反射率具有可调性，但是该吸波结构的反射率可调性的频带范围比较有限^[11]。

1.2 雷达吸波涂层吸波性能的检测及调控方法

1.2.1 吸波涂层吸波性能的检测方法及研究现状

雷达吸波涂层吸波性能的优劣将直接影响舰船等装备的隐身效果，因此测量和评价吸波涂层吸波性能的好坏也变得尤为重要。雷达吸波涂层的反射率是表征涂层吸波性能好坏的重要指标之一，它是指在一定波长和极化条件下的电磁波以同一角度和同一功率密度分别入射到雷达吸波涂层与参考金属板平面时，再反射到接收天线的功率之比。目前，国内测量雷达吸波涂层反射率的方法主要有弓形测量法、远场RCS测量法和空间样板平移法等。

弓形测量法的测量频率范围通常为1~18 GHz，该测量方法采用一个竖直的弓形架，并装配有分离的可滑动的发射与接收天线，可以通过改变天线在弓形架上的位置来测出不同入射角的涂层反射率。样板架置于弓形架的圆心，固定在支架上的标准板用于系统的校准，测量时需将标准板换成吸波涂层样板进行涂层测试，将两次测试的输出功率值进行比较，即可得到待测涂层的反射率。测量系统的原理框图如图1-1所示^[12]。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts 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.

厦门大学博硕士论文摘要库