

学校编码: 10384

分类号__密级__

学号: 33120121152671

UDC__

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

铝合金残余应力涡流无损检测若干关键
问题的研究

Research on Key Issues in Eddy Current Nondestructive
Evaluation of Residual Stress in Aluminum Alloy

汪 涛

指导教师姓名: 曾志伟 教授
李 俭 助理教授
专 业 名 称: 电子与通信工程
论文提交日期: 2015 年 4 月
论文答辩日期: 2015 年 5 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（电磁无损检测）课题（组）的研究成果，获得（电磁无损检测）课题（组）经费或实验室的资助，在（电磁无损检测）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）：汪涛

2015年5月25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）：汪涛

2015年5月25日

摘要

铝合金作为制造业发展的基础材料，在航空航天、高速铁路、建筑工程、船舶制造、汽车工业等支柱产业中有着重要地位。残余应力往往是造成铝合金结构破坏的重要因素。有效的评价应力状态，特别是导致损伤出现的临界应力状态是评价设备结构强度、可靠性的重要依据。传统的无损检测方法已广泛应用于工程实际中，但大部分局限于对已成型的缺陷进行检测。对于可能导致损伤出现的隐性、不规律变化的残余应力状态的评价则较为困难。

目前，应用较多的残余应力检测法主要有盲孔法、X射线法、超声波法以及磁测法。这些方法在使用上都存在很大的局限性，因此有必要研究一种使用方便且可靠性高的非铁磁性材料残余应力检测方法。材料的压阻效应使得涡流法检测残余应力成为可能。近年来，国内外学者开始了对铝合金残余应力涡流检测的研究，目前的研究中还存在很多不足。本文正是基于这一现状，应用电磁场理论、有限元数值模拟以及基础力学实验对铝合金残余应力的检测展开研究，解决其中的若干关键问题。

本文通过基础实验和数值模拟，研究涡流响应与应力状态之间的关系，为真实应力状态的快速反演打下基础。首先，建立涡流检测三维有限元模型，使用 Fortran 语言编写程序，计算涡流响应与单向电导率相对变化量之间的关系。然后，通过拉伸实验得到涡流响应与单向应力、应变之间的关系。接着，将仿真结果与实验结果相结合，得出电导率相对变化量与应变之间的关系。最后，根据此关系得到不同应力状态下的电导率张量，并利用无限大平板模型仿真建立涡流—应力响应曲面。

本文还对铝合金材料受力时的电导率张量进行研究，提出简化电导率张量在复杂应力状态下的不适应性并重新推导电导率张量。并且对均匀应力状态下主应力方向的识别展开研究。使用 ANSYS 建立应力仿真及涡流仿真模型，通过应力仿真得出应力状态并建立相应的电导率张量，计算矩形线圈处于不同角度时的涡流响应信号，通过分析计算结果得出主应力方向，然后对主应力方向拉伸压缩状态进行初步判断以及对应力大小的对比进行定性识别。

关键词：铝合金；残余应力；涡流检测；有限元分析

Abstract

Aluminum alloy, as one of the foundational materials for the development of manufacturing, plays an important role in many pillar industries, such as aerospace, high-speed railway, construction, shipbuilding, and automotive industry. Residual stress is often regarded as a significant factor causing damages in aluminum alloy structures. Effective evaluation of stress state, especially the critical stress state causing damage, is important for evaluating structural strength and reliability. Traditional nondestructive testing techniques have been widely used in industry, most of which are confined to the test of already-existing defects, and are difficult to evaluate implicit and irregular stress state which can cause damages.

At present, the methods of residual stress testing mainly include hole-drilling, X-ray, ultrasonic and magnetic methods. All the methods have many limitations. So it is necessary to develop a new, convenient, and reliable residual stress testing method for non-ferromagnetic materials. The piezoresistive effect of material makes it possible to evaluate residual stress state with eddy current method. Such studies began in the recent years and are still very limited. Based on this situation, the thesis attempts to make contribution in this area with the help of electromagnetic theories, finite element numerical simulation, and basic mechanic experiment, to solve some key issues.

The thesis studies the relationship between eddy current response and stress state through basic experiment and numerical simulation, laying the foundation of rapid inversion of real stress state. First of all, a three-dimensional finite element model of eddy current testing is established, and the relationship between eddy current response and relative variation of unidirectional conductivity is acquired. Then, relationship between eddy current response and unidirectional stress or strain is obtained by tensile testing experiment. Combining the results of simulation and experiment, the relationship between relative variation of conductivity and strain is acquired. Finally, with conductivity tensor under different stress state derived from the above relationship, a surface of eddy current response vs. stress state is established by simulations using infinite plate model.

The thesis also studies conductivity tensor of aluminum alloy under stress, points

out the inadaptability of the simplified conductivity tensor under complex stress state, and makes new derivation on the tensor. Moreover, the thesis studies the direction of principal stress in uniform stress states by establishing ANSYS model for the simulation of stress testing and eddy current testing, acquiring stress state, building conductivity tensor, and calculating and analyzing eddy current responses of a rectangular coil at different rotating angles. After that, preliminary judgment of stress state (tensile or compressed) is made and qualitative identification of stress magnitude is also reached.

Key Words: Aluminum alloy; residual stress; eddy current testing; finite element analysis

目录

摘要.....	I
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 残余应力及其检测方法概述.....	2
1.2.1 残余应力的形成及影响.....	2
1.2.2 常用残余应力检测方法.....	3
1.3 涡流检测技术概述.....	4
1.3.1 涡流检测基本原理及特点.....	5
1.3.2 涡流检测的趋肤效应.....	6
1.4 金属残余应力涡流检测研究现状.....	7
1.5 本文研究内容.....	9
第二章 铝合金残余应力涡流检测原理及研究方案.....	11
2.1 铝合金残余应力涡流检测原理.....	11
2.1.1 压阻效应.....	11
2.1.2 铝合金的电各向异性.....	12
2.1.3 铝合金残余应力涡流检测原理总结.....	14
2.2 研究方案.....	14
2.2.1 基本实验方案.....	15
2.2.2 数值模拟及涡流响应曲面的建立.....	16
2.2.3 应力状态反演方案.....	17
第三章 铝合金残余应力涡流检测的理论基础.....	19
3.1 电磁场分析理论基础.....	19
3.1.1 涡流分析的数学表述.....	19
3.1.2 电磁场有限元分析.....	25
3.1.3 涡流分析的数值实现.....	28
3.2 力学分析理论基础.....	32
3.2.1 应力应变关系.....	32

3.2.2 应力张量	38
3.2.3 ANSYS 力学仿真	39
第四章 铝合金涡流响应与应力关系研究	41
4.1 单向电导率变化对涡流响应的影响	41
4.1.1 仿真模型及网格划分	41
4.1.2 涡流响应与单向电导率相对变化量的关系	44
4.2 铝合金拉伸实验	45
4.2.1 实验设备及拉伸试件	45
4.2.2 数据采集及信号分析	48
4.2.3 温漂现象的研究	49
4.2.4 涡流信号—单向应力关系测量实验	52
4.2.5 涡流响应与单向应力应变之间的关系	55
4.3 电导率与单向应变的关系	57
4.4 涡流—应力响应曲面的建立	59
4.4.1 平板模型及网格划分	59
4.4.2 涡流响应曲面的建立	62
第五章 电导率张量及应力方向识别研究	68
5.1 简化电导率张量的不适应性	68
5.1.1 不带孔铝板拉伸力学仿真	68
5.1.2 带孔铝板拉伸仿真	69
5.2 复杂应力状态下电导率张量的推导	70
5.3 均匀应力情况下的应力方向识别	72
第六章 总结与展望	77
6.1 总结	77
6.2 展望	78
参考文献	79
攻读硕士期间发表的论文	83
致谢	84

Table of Contents

Abstract	II
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and significance	1
1.2 Overview of residual stress (RS) and its testing methods	2
1.2.1 Formation and influence of RS	2
1.2.2 Commonly used testing methods of RS	3
1.3 Overview of eddy current testing (ECT) technique	4
1.3.1 Principle and features of ECT	5
1.3.2 Skin effect of ECT	6
1.4 Research progress of ECT of RS	7
1.5 Main tasks of the thesis	9
Chapter 2 Principle and scheme of ECT of RS in aluminum alloy ...	11
2.1 Principle of ECT of RS in aluminum alloy	11
2.1.1 Piezoresistive effect	11
2.1.2 Electrical anisotropy of aluminum alloy	12
2.1.3 Summary of the testing principle	14
2.2 Scheme of research	14
2.2.1 Scheme of basic experiment	15
2.2.2 Numerical simulation and construction of eddy current response surface ..	16
2.2.3 Scheme of stress state inversion	17
Chapter 3 Basic theories of ECT of RS in aluminum alloy	19
3.1 Basic theories of electromagnetic field analysis	19
3.1.1 Mathematical formulations of eddy current analysis	19
3.1.2 Finite element analysis	25
3.1.3 Numerical implementation of ECT analysis	28
3.2 Basic theories of mechanical analysis	32
3.2.1 Relationship between stress and strain	32

3.2.2 Stress tensor.....	38
3.2.3 Mechanical simulation with ANSYS.....	39
Chapter 4 Relationship between eddy current response and stress of aluminum alloy.....	41
4.1 Influence of unidirectional conductivity change on eddy current response	41
4.1.1 Model and mesh for simulation	41
4.1.2 Relationship between eddy current response and unidirectional relative change of conductivity	44
4.2 Experiment of tensile testing of aluminum alloy	45
4.2.1 Equipments and specimen	45
4.2.2 Signal acquisition and analysis	48
4.2.3 Research of temperature drift.....	49
4.2.4 Experiment of measuring eddy current response vs. unidirectional stress ..	52
4.2.5 Relationship between eddy current response and unidirectional stress/strain	55
4.3 Relationship between conductivity and unidirectional strain	57
4.4 Establishment of eddy current response-stress surface.....	59
4.4.1 Plate model and mesh for simulation	59
4.4.2 Establishment of eddy current response surface	62
Chapter 5 Research of conductivity tensor and recognition of direction of stress	68
5.1 Inadaptability of simplified conductivity.....	68
5.1.1 Tensile simulation with aluminum plate without hole.....	68
5.1.2 Tensile simulation with aluminum plate with hole	69
5.2 Derivation of conductivity tensor in complex stress status	70
5.3 Recognition of direction of stress in uniform stress status.....	72
Chapter 6 Summary and prospect	77
6.1 Summary of the thesis.....	77
6.2 Future work.....	78
References	79

Appendix	83
Acknowledgement.....	84

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

铝合金作为制造业发展的基础材料，在航空航天、高速铁路、建筑工程、船舶制造、汽车工业等支柱产业中有着重要地位。并且，由于其优越的性质，铝合金经常被用于制作机械设备的关键结构件。然而，这些结构件需要长期处于高温、高压、高速以及高负载的条件下，这就使得铝合金容易产生开裂、腐蚀等损伤，这对机械设备的产品质量及安全性能造成了极大的影响。而导致这些损伤现象出现的原因中，残余应力的存在占据主要部分^[1]。

残余应力是造成构件疲劳、损伤和断裂的重要原因之一，同时也是评估构件质量的一个重要元素。有效的评价构件应力状态对于失效预测十分重要。各种宏观及微观的机械应力集中是导致构件损坏发生的主要原因。疲劳、腐蚀和蠕变的过程在应力集中区域进行得尤为剧烈，更加容易使构件出现裂纹、断裂等不可恢复的损伤。因此，有效的评价应力状态，特别是导致损伤出现的临界应力状态是评价构件结构强度、可靠性以及设备寿命预测的重要依据^[2,3]。铝合金的广泛使用在航空领域表现得尤为明显，飞机蒙皮、机翼、起落架等很大部分都是由专用航空铝合金制造而成。这类航空铝合金价格昂贵，并且比较精密的部件加工不易，因此构件的损坏不但会造成直接经济损失，而且可能造成灾难性后果^[4]。众所周知，无论是军用还是民用飞机都需要极高的安全性能，对于飞机损伤检测的要求也比较高。目前，传统的无损检测方法已广泛应用于工程实际中，但传统方法大部分局限于对已成型的缺陷进行检测，而对可能导致损伤出现的隐性、不规律变化的残余应力状态难以进行有效的评价。然而，对于这种尚未产生缺陷的构件进行残余应力检测具有极重要的意义，可以对即将达到材料损伤极限的构件进行残余应力消除处理，以延长使用寿命，减小经济损失，减少灾难性事故的发生。

目前，应用较多的残余应力检测法有盲孔法、X射线法、超声波法以及磁测法，这些方法在使用上存在很大的局限性。盲孔法是一种破坏性检测法，很多情况下不为人们所接受^[5]。X射线法仅能测量表面宏观或微观残余应力，检测设备昂贵，对检测人员技术水平要求较高，仅适合于实验室使用^[6]。超声波检测法必须使用耦合剂，难以检测形状复杂的构件^[7]。磁测法局限于铁磁性材料检测^[8]。

因此，有必要研究一种使用方便且可靠性高的非铁磁性材料残余应力检测方法。

涡流检测是根据电磁感应原理发展起来的一种无损检测方法，即交变磁场在导电材料中感应出涡流，根据涡流变化引起的磁场变化来判断材料的物理特性及结构变化。涡流检测法与其他传统的检测方法相比具有一定的优势，如方便快捷，可靠性高，对零件表面清理的要求不高。目前，有关涡流检测的研究大部分集中于对已成型缺陷的检测，对于材料基本特性检测的研究也正如火如荼的进行。材料的压阻效应使得涡流法检测残余应力成为可能^[9,10]，国内外学者对其进行了大量的研究。这种基于应力与材料电导率之间的相关性的残余应力涡流检测方法正在成为无损检测领域的一个研究热点。

铝合金残余应力涡流检测的研究是近年来才开始的，国内外相关文献都很少。目前的研究结果仍然不能对实际情况下的残余应力状态进行很好的识别，并且在研究过程中忽略了很多关键因素。本论文正是基于这一现状，对铝合金残余应力涡流检测技术展开研究，解决其中一些关键性的问题，为新型应力检测仪的开发提供理论基础。研究成果将具有很好的市场转化前景。

1.2 残余应力及其检测方法概述

1.2.1 残余应力的形成及影响

构件在制造及使用过程中，将受到各种外界作用的影响，产生应力分布。当撤销这些外界作用之后，若构件中的应力没有完全消失，仍然有部分残留在构件之中，则这种残留的应力称为残余应力^[11,12]。

残余应力的形成原因主要包括：

(1) 机械加工引起的残余应力。这是构件最易产生残余应力的方式。当构件承受足够大的外力作用时，其结构内会出现塑性变形，而卸载外力后，塑性变形部分不能恢复原状，从而影响了与其相邻的仍处于弹性变形部分结构的恢复，就导致了残余应力的出现。在很多加工工艺（如铸造、锻造、冷拔、切削）中会出现这类由局部塑性变形引起的残余应力^[11,12]。

(2) 温度不均匀引起的残余应力。这种残余应力的形成主要有两种原因。一是温度不均匀引起的局部热塑性变形。当构件处于高温环境时，其性能将发生极大的变化，弹性模量、屈服极限等特性都会随着温度的变化而变化，因此极易

产生局部热塑性变形,从而产生残余应力。二是由于相变引起的体积膨胀不均匀造成局部塑性变形。金属构件处于高温中时,其内部组织会发生相变,出现体积膨胀的现象。如果这种膨胀是均匀的,即构件内各部分没有约束,那么构件中就不会产生应力。但构件的组成成分以及各部分温度分布不均匀,这就造成了构件内各部分形成约束,也就导致了残余应力的产生^[13,14,15]。

(3) 尺寸公差引起的残余应力。在铆接、焊接、螺钉螺栓连接等工艺上通常都存在公差配合的问题,容易促使残余应力的产生。如飞机蒙皮中的铆钉连接,起落架结构的焊接,机身结构的螺钉连接等在外力作用下组合到一起的结构在外力去除后都会产生残余应力^[16]。这种应力一般来说属于结构应力,大多数情况下处于弹性应力状态,除非外界环境对它造成了影响。

残余应力的存在对金属构件的影响是两方面的,一方面是它的危害性,另一方面是它的可利用性。残余应力是一个不稳定的应力状态,大多数情况下表现为危害作用,如残余应力的存在可能会降低构件的结构强度及疲劳极限,造成应力腐蚀和脆性断裂。另外,残余应力的存在会使构件发生变形,会影响构件的尺寸精度^[17,18]。然而,任何事情都不是绝对的,残余应力在展现出它的危害性的同时也保留了可被利用的性质。人们很早就知道,构件表面的压缩残余应力会使其疲劳强度有所提高。因此,在实际应用中为了提高构件的疲劳强度,通常采用表面硬化处理的方式(如常用的表面喷涂处理^[18])来使构件表面产生压缩残余应力。但正如前面所说的,残余应力是很不稳定的,喷涂层表面的压缩残余应力会随着外部作用而改变。无论是避免残余应力的负面影响,还是有目的利用残余应力,均需对残余应力进行准确的检测。因此,如何有效地测量和评价残余应力就显得极为重要。

1.2.2 常用残余应力检测方法

盲孔法是目前工程上最常用的残余应力检测方法,美国 ASTM 已经将它纳入标准。盲孔法是指在构件的检测位置处钻一个小孔,小孔导致孔区附近残余应力得到释放,从而引起应力场的变化,通过应变片测量等手段测出该区域的应力应变变化情况即可计算出钻孔释放前的残余应力值^[19,20]。盲孔法虽然是最常用的方法,但是它毕竟是通过损伤试件得出应力的分布状况,这在很多情况下是不允许的。例如,薄壁容器、输油管道等的应力检测就不允许引入额外损伤。

X 射线法是通过测量构件内晶体的原子间距来得到因应力而产生的变形信息。当构件内存在残余应力时，晶体的原子间距会发生变化。因此，使 X 射线作用于构件表面，测定射线衍射角，便可以得出衍射晶面间距。通过衍射角的大小来反应衍射晶面间距，从而确定残余应力的大小^[21,22]。然而，由于 X 射线法通过测量原子间距来得到构件的应力变形信息，因此不适合用于粗晶材料的测量。此外，X 射线测试设备的设计制造比较复杂，使用时还需要一定的防护措施。

超声波法测量残余应力是近年来备受人们关注的一种应力测量方法。它通过超声波在材料中的传播特性，测出传播路径上的平均应力^[23]。在构件内有应力存在的情况下，由于不同位置的应力大小和方向不同，构件材料呈现各向异性状态，这就导致了超声波在构件内的传播速度发生了变化。超声波正是利用这种特性来对构件内的残余应力进行检测。超声波法测量残余应力都是采用测量声速的方法来实现^[24,25]。测量声速变化必须使用高灵敏度的设备和仪器。然而，实际测量易受到工件形状以及材料组织结构的影响，测量灵敏度低，测定过程较为繁琐。超声波法测量残余应力还有待更加深入的研究。

磁测法是一种基于压磁效应的测量铁磁材料残余应力的方法。应力变化导致物体磁导率分布呈各向异性，从而引起磁路中磁通量发生变化，使得用于检测的感应线圈中的电流发生变化。磁测法有一定的局限性，只能对铁磁性材料进行测量，并且对材质的变化比较敏感，每次测量前都需要进行标定^[26,27,28]。有关磁测法的研究还需要更加深入开展，结合其他的测量方法设计综合的测试仪器。

1.3 涡流检测技术概述

无损检测（Nondestructive testing，简称NDT）技术是现代工业发展必不可少的重要技术措施之一。无损检测是指在不伤害被检构件的前提下，对构件的物理性质、内部或表面缺陷进行判定的综合性应用技术。它在零件加工、产品组装乃至整个产品的使用过程中都有广泛的应用。无损检测技术在保证产品质量，保障安全，降低成本，节约资源，提高成品率和劳动生产率方面起到了积极的作用^[29]。

结构的损伤检测是结构修理的基础，也是评估其性能的重要依据。若能有效的对构件的损伤情况进行判定，那么就能对构件进行合理的处理以延长使用寿命，更好地保障质量和安全。针对不同的材料、缺陷形式以及物理性质，可以采用不同的无损检测手段。目前，常用的无损检测方法有涡流检测、超声检测、射

线检测、磁粉检测、渗透检测、激光检测、红外检测、声发射检测和微波检测等。涡流检测是最重要的检测技术之一，应用非常广泛。

1.3.1 涡流检测基本原理及特点

涡流检测的基本原理源于电磁感应现象。如图1.3.1所示，当载有交变电流 I 的励磁线圈接近导体表面时，线圈中的交变电流在其周围产生的交变磁场 H 会在导体中产生感应电流（即涡流） I' 。涡流也是交变的，它会产生一个附加磁场 H' 来阻碍原磁场穿过线圈的磁通的变化，导致检测线圈的感应电压及阻抗发生变化。由于涡流的大小、相位的分布与导体电导率、磁导率、形状、尺寸以及缺陷等因素相关，这些因素都会使涡流产生的感应磁场发生变化，进而引起检测线圈阻抗与感应电压的变化。涡流检测正是利用检测线圈的阻抗及电压变化来间接地发现导体内部的物理性质的变化的^[30]。

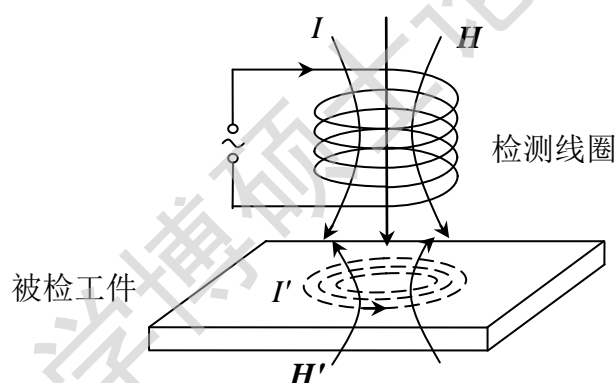


图 1.3.1 涡流检测原理示意图

由于涡流检测是以电磁感应为基础，因此它适用于金属材料以及少数导电的非金属材料（如碳纤维复合材料）的检测。涡流检测对材料表面和近表面缺陷检测的灵敏度较高。涡流检测还可以用于检测材料的电导率、磁导率等参数。在使用涡流检测的时候，探头无需与工件接触，也不需要类似于超声检测的耦合剂，可在条件恶劣的环境下检测结构较为复杂的构件。涡流检测成本较低并且速度快，适合于工业自动化检测。其检测信号为电信号，易于实现数据的存储和处理。当然，涡流检测也有一定的局限性。它不能对非导电材料进行检测。由于趋肤效应的存在，它不适合检测构件中埋藏较深的内部缺陷和物理性质变化^[29, 31]。

涡流检测因其独特优势已经在众多无损检测方法中占据了一席之地。在航空

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.