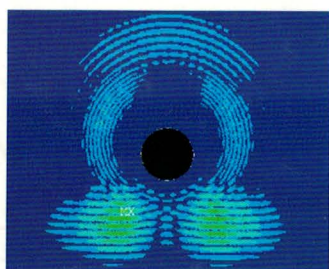


制 · 造 · 业 · 高 · 端 · 技 · 术 · 系 · 列

激光熔覆再制造零件的 超声检测



闫晓玲 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



制造业高端技术系列

激光熔覆再制造零件的 超声检测

闫晓玲 著

北京工商大学学术专著出版项目
(项目批准号 ZZCB 2016-06) 资助出版



机械工业出版社

本书以激光熔覆再制造零件（包含涂层及毛坯）为对象，对其服役性能和服役寿命的缺陷和应力的超声检测评价进行了研究。

本书介绍了激光熔覆再制造毛坯材料缺陷超声检测数值模拟，激光熔覆再制造试样中超声波传播及缺陷超声检测数值模拟，超声检测信号处理，激光熔覆再制造零件缺陷检测，激光熔覆再制造涂层应力检测等内容，着重于解决工程实际问题，具有较强的实用性。

本书可供无损检测及相关专业研究生、科研人员阅读，也可作为无损检测技术人员的培训或辅助教材。

图书在版编目（CIP）数据

激光熔覆再制造零件的超声检测/闫晓玲著. —北京：机械工业出版社，2017. 10

ISBN 978-7-111-58036-2

I. ①激… II. ①闫… III. ①激光熔覆-机械元件-超声检测 IV. ①TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 230542 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：雷云辉 责任编辑：雷云辉 责任校对：刘秀芝

封面设计：马精明 责任印制：常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2017 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·10.25 印张·2 插页·200 千字

0001—1500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-58036-2

定价：79.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工微博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

前 言

激光熔覆凭借其技术优势，已成为废旧产品绿色再制造的重要手段之一，但实践表明，激光熔覆再制造涂层（以下简称激光熔覆层）应力及涂层、毛坯缺陷，是影响再制造零件服役性能和服役寿命的关键因素，因此，必须采用安全、可靠的方法对激光熔覆再制造零件的质量进行检测及评价。超声无损检测技术是五大常规检测技术之一，也是目前应用最广泛、技术最成熟的无损检测方法。与其他无损检测技术（如射线检测、涡流检测、磁粉检测和渗透检测等）相比，具有检测对象范围广、检测深度大，对裂纹类缺陷敏感、灵敏度高，成本低，使用方便，速度快，对人体无害，以及便于现场使用等特点。目前，国外每年发表的约 3000 篇涉及无损检测的文献中，约有 45% 和超声无损检测相关。因此，本书将重点介绍超声无损检测技术在激光熔覆再制造零件质量评价中的应用。研究如何实现评价结果定量化、提高评价结果的可靠性，为保障激光熔覆再制造产品质量提供理论与技术支持，这将对建设资源节约型、环境友好型社会具有重要意义。

一门技术成熟或上升为科学，最基本、最显著的标志是进入了误差很小的定量化阶段。要提高超声检测的可靠性，必须把握声场在零件中的传播规律，建立超声声场与零件结构、材质、应力、缺陷类型、位置、取向、尺寸的定量关系。超声检测模拟仿真的形成和应用，极大丰富了超声检测技术的理论及应用基础，本书采用模拟仿真与实验相结合的方法，研究激光熔覆再制造零件缺陷及应力的超声无损评价方法；探讨影响缺陷与应力评价结果的内在及外在因素；结合熔覆层内部组织结构，分析超声检测信号噪声产生的原因，探讨信号消噪的原理及方法。

本书力求在开展超声学理论基础研究的同时，侧重解决工程实际问题。从理论分析的角度阐述解决实际问题的原理及方法，以便更多的无损检测工作者能够掌握和应用，成为解决更多类似工程问题的重要手段。

本书共分 6 章，第 1 章为绪论，介绍了超声无损检测技术在工业产品质量检测中的应用和研究现状。第 2 章介绍了激光熔覆再制造毛坯材料缺陷超声检测数值模拟，并且利用建立的模型模拟了激光熔覆再制造毛坯材料中不同类型缺陷的散射声场，分析了超声波声场与不同类型缺陷相互作用的规律。第 3 章介绍了激光熔覆再制造试样中超声波传播及缺陷超声检测数值模拟，对于包含各向异性涂层及各向同性毛坯材料的超声检测建模还很少，本章建立了 Fe314 激光熔覆再制造零件的超声检测数学模型，利用该模型分析了各向异性激光熔覆层中晶粒取向和探头类型两种因素对超声波传播的影响；计算了 Fe314 激光熔覆再制造零件中横通孔、裂纹缺陷的回波信号，数值模拟结果为合理设计该类零件的超声检测工艺提供了重要的理论

依据。第4章介绍了超声检测信号处理方法,结合激光熔覆层内部组织特点,分析了超声检测信号噪声产生的原因,探讨了信号消噪处理的原理和方法。第5章结合工程实例介绍了对激光熔覆再制造零件缺陷进行超声无损检测及评价的方法。第6章介绍了基于表面超声波的激光熔覆再制造涂层应力检测的机理及方法,探讨了影响应力评价结果的内在及外在因素。本书内容侧重激光熔覆再制造复合材质中的声场分析及应用,方法上着眼于解决工程实际问题,列举了一些激光熔覆再制造产品缺陷、应力的超声检测方法。

本书由闫晓玲博士独立撰写完成,相关的研究成果得到了国家自然科学基金面上项目基于微单元形态表征的钛合金 MIG 焊增材再制造生长调控(编号:51375493)的资助。中国工程院的徐滨士院士、中国人民解放军装甲兵工程学院的董世运教授、北京理工大学的张之敬教授自始至终关心和支持本书的创作,仔细阅读了本书的手稿并提出了许多宝贵的修改意见,在此谨向各位教授致以衷心的感谢。

鉴于笔者水平有限,缺点和不足之处在所难免,欢迎广大读者批评、指正。

闫晓玲

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 超声检测技术的应用领域	3
1.1.1 缺陷检测	3
1.1.2 应力检测	5
1.1.3 涂层性能检测	8
1.2 超声检测技术的研究现状	9
1.2.1 超声检测数值模拟方法	9
1.2.2 超声检测信号处理技术	12
1.2.3 超声检测仪器的研发	14
第 2 章 激光熔覆再制造毛坯材料缺陷超声检测数值模拟	17
2.1 固体介质的波动方程	18
2.2 波动方程的有限元解法	19
2.2.1 波动方程的变分问题	20
2.2.2 波动方程的有限元公式	20
2.2.3 波动方程有限元公式的解法及其稳定性	22
2.3 网格大小和时间步长的选取	24
2.3.1 网格大小	24
2.3.2 时间步长	24
2.4 边界条件	24
2.4.1 基于势函数的应力人工边界条件	25
2.4.2 超声检测数值模拟应力人工边界条件	26
2.4.3 应力人工边界条件的施加	28
2.5 激光熔覆再制造毛坯材料中超声波传播的数值模拟	29
2.5.1 碳素钢中超声波传播的数值模拟	29
2.5.2 碳素钢中常见缺陷的散射声场分析	31
2.5.3 碳素钢中常见缺陷的定性分析	41
2.5.4 碳素钢中缺陷的定性分析实验	43
2.6 主要结论	47
第 3 章 激光熔覆再制造试样中超声波传播及缺陷超声检测数值模拟	49
3.1 Fe314 激光熔覆层显微组织分析	50
3.2 激光熔覆再制造试样超声检测数学模型	51
3.2.1 理论模型	51
3.2.2 声场计算模型	52

3.2.3	缺陷远场散射模型	56
3.2.4	横通孔及裂纹缺陷回波预测及实验验证	60
3.3	激光熔覆层中的声场分析	63
3.3.1	纵波直探头辐射声场分析	63
3.3.2	横波斜探头辐射声场分布	68
3.4	激光熔覆再制造试样缺陷超声检测实验	71
3.4.1	试样的制备及检测工艺参数的选择	71
3.4.2	实验结果分析	72
3.5	主要结论	73
第4章	超声检测信号处理	75
4.1	超声检测信号噪声分析	75
4.2	超声检测信号处理方法	78
4.2.1	激光熔覆层超声检测信号降噪方法	79
4.2.2	激光熔覆再制造零件缺陷超声诊断方法	86
4.2.3	超声应力检测声时差分析方法	91
4.3	主要结论	96
第5章	激光熔覆再制造零件缺陷检测	98
5.1	检测设备及方法	98
5.2	检测结果分析	99
5.2.1	横通孔缺陷检测结果	99
5.2.2	裂纹缺陷检测结果	101
5.2.3	影响缺陷检测可靠性的主要因素	101
5.3	应用实例	105
5.3.1	横通孔缺陷定量检测	105
5.3.2	激光熔覆再制造齿轮缺陷检测	106
5.4	主要结论	108
第6章	激光熔覆层应力检测	110
6.1	表面超声波声弹理论	111
6.2	激光熔覆层声弹系数标定实验	112
6.2.1	实验材料及设备	112
6.2.2	试样的制备	116
6.2.3	实验方法	116
6.2.4	激光熔覆层声弹系数标定	117
6.3	影响应力检测可靠性的主要因素影响分析	120
6.3.1	激光熔覆层微观形貌影响分析	121
6.3.2	表面超声波传播时差计算精度影响分析	126
6.3.3	加载变形影响分析	126
6.4	应用实例	128
6.4.1	服役状态下激光熔覆层应力检测	128

6.4.2 激光熔覆层残余应力检测	129
6.5 主要结论	131
附录 A 基于 ANSYS 的超声波传播模拟命令流	132
附录 B 超声检测信号消噪及缺陷诊断程序	137
附录 C 超声应力检测相关计算程序	143
参考文献	146

第1章

绪 论

再制造工程^[1-2]是以产品全寿命周期为指导，以优质、高效、节能、节材、环保为准则，以先进的技术和产业化生产为手段，来修复、改造废旧产品的一系列技术措施和工程活动的总称。激光熔覆^[3]凭借其技术优势，已成为废旧产品绿色再制造的重要手段之一。有关资料^[1-3]表明，激光熔覆修复后的零件强度可达到原强度的90%以上，而其修复费用不到重置价格的1/5，更重要的是缩短了维修时间，解决了许多再制造难题。但实践表明，激光熔覆层的应力和涂层与毛坯中的缺陷^[4-5]，是影响其服役性能和服役寿命的关键因素，因此如何保证再制造产品的质量是再制造工程的核心，直接关系到用户对再制造产品的信心以及再制造产业的推广和应用。

多年来，激光熔覆再制造零件的质量和性能，主要靠激光熔覆材料和工艺参数的优化^[6]来保证，然后通过对再制造零件进行着色或通过渗透^[7]、涡流等方法，检测零件表层是否存在气孔、裂纹等缺陷；采用超声波^[8]、X射线检测零件内部是否存在缺陷；采用钻孔法或X射线衍射法^[9]、磁记忆法^[10]、超声波法^[11]检测激光熔覆层的应力；采用光学显微镜（Optical Microscope, OM）和扫描电子显微镜（Scanning Electron Microscope, SEM）^[12-13]检测熔覆层内部组织特征。虽然每种检测方法都有其特色和优缺点，但所测量的结果仍有局限性，如着色或渗透、涡流属于表层缺陷检测方法，只能检测激光熔覆再制造零件表层缺陷（裂纹、气孔、夹杂物等）；X射线虽然可检测材料内部缺陷，但消耗的X射线胶片等器材费用较高，检验速度较慢，此外，射线对人体有害，需要采取适当的防护措施；钻孔法在被测零件上钻孔，会破坏零件的整体结构，另外，钻孔过程常常会引起材料的损伤和屈服，影响测量效果，在工程实践中无法对每个零部件都进行钻孔检测；X射线对金属的穿透深度有限，只能无破坏性地检测表层应力，将X射线衍射法与剥层法结合虽然可以测定激光熔覆层沿厚度方向的深层应力分布，但需破坏零件；磁记忆法只能对铁磁性材料进行检测；光学显微镜和扫描电子显微镜不适合检查实际零部件内部的组织特征。

超声检测技术^[14-15]是五大常规检测技术之一，也是目前应用最广泛、技术最成熟的无损检测方法。与其他无损检测技术（如射线检测、涡流检测、磁粉检测和渗透检测等）相比，具有检测对象范围广、检测深度大，对裂纹类缺陷敏感、灵敏度高，成本低，使用方便，速度快，对人体无害，以及便于现场使用等特点。另外，目前，国外每年发表的约 3000 篇涉及无损检测的文献中，约有 45% 和超声检测相关。因此，采用超声检测技术对激光熔覆再制造零件质量进行评价具有明显的技术优势。

目前，超声检测技术在机械零件宏观缺陷评价^[16-17]、几何特性测量^[18-19]、力学性能^[20-23]表征领域均具有一定应用，并取得了一定的研究成果。但实践表明，影响激光熔覆再制造零件服役性能和服役寿命的关键因素是缺陷和应力^[24-25]，图 1-1、图 1-2^[26]所示为激光熔覆制备的 $\text{Fe}_{55}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{10}\text{B}_2\text{Si}_2$ 铁基自熔合金激光熔覆层微观形貌图，从图中可以看到明显的微裂纹、微孔洞缺陷，这些缺陷的存在，会使零件在服役过程中出现疲劳、磨损和腐蚀等破坏形式。因此结合激光熔覆再制造产品质量无损检测需要，本书将重点介绍超声波在缺陷和应力评价方面的应用。

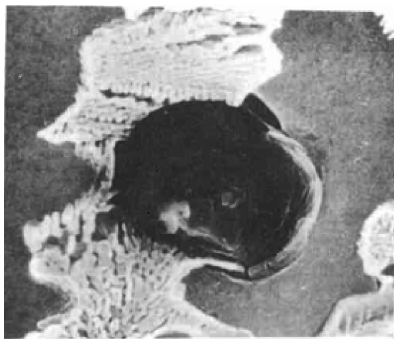


图 1-1 夹杂及其边界处的
微裂纹 ($\times 2000$, SEM)

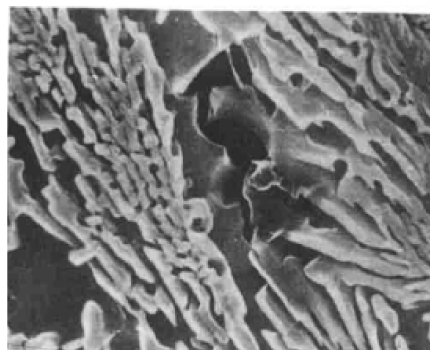


图 1-2 先共晶组织及共晶态组织
界面处的微孔洞 ($\times 5000$, SEM)

超声检测主要是基于超声波在介质中的传播特性，通过超声波在介质中传播时与声阻抗不同的异质性界面相互作用，就反射、折射和散射的波进行研究。传统的超声检测是根据回波信号^[27-29]凭经验对被检测对象的质量进行评价。激光熔覆以高能激光束作为移动热源，通过快速加热、熔化和冷却为材料加工提供了常规手段无法实现的极端非平衡条件，使成型件具有优异的综合性能，但激光熔覆层为快速凝固组织，其弹性性能呈现明显的各向异性特征，导致超声波传播时出现偏转、聚焦、分离等复杂物理现象，即使有经验的检测人员也很难根据回波信号准确判断激光熔覆层的质量状况。另外，由于局部受热不均匀及熔覆层不同成分材料线胀系数的差异，激光熔覆层应力分布也比较复杂^[30-32]。鉴于激光熔覆再制造零件的结构和应力情况不同于简单的各向同性或各向异性材料，因此这类再制造零件的缺陷、

应力的超声检测评价还需要进一步深入研究。

对于采用超声检测技术检测激光熔覆再制造零件的缺陷,设计合理的超声检测工艺非常关键^[33],为此需要深入了解激光熔覆层的各向异性对声束传播行为的影响,掌握超声波声场与材料内部缺陷相互作用的规律。这些研究可以为合理设计超声检测工艺提供有益的帮助。由于通过实验手段无法了解超声波在激光熔覆层及基体材料中的传播过程,而数值模拟在模型“制作”、参数选取和变动及对模拟结果的数据处理方面,较之实物模型实验皆具有无比的灵活性和优越性,能够突出实验中不易观察的某些细节^[34-35]。因此研究过程中采用数值模拟与实验相结合的方法,从超声传播理论入手,建立激光熔覆再制造零件缺陷超声检测系统数学模型,通过数值模拟探明缺陷检测的物理机制,同时利用数值模拟结果指导相应的实验研究,实现检测方法的优化。

数值模拟需要以成熟的理论为前提,目前,激光熔覆层应力分析理论还不是很成熟,所建立的理论分析模型往往只考虑了应力形成的某一因素,如双层材料模型^[36]只考虑了再制造涂层与基体材料线胀系数差异造成的失配应力,增层模型^[37-38]只考虑了再制造涂层沉积冷却过程中由于相变和状态的变化引起的应力。而激光熔覆层应力通常是由多种因素(如失配应力、相变应力、热应力等)引起的,现有的理论分析模型并不具有典型应用价值。因此本书结合超声传播及声弹理论分析影响检测结果可靠性的内在及外在因素,通过实验研究探索提高激光熔覆层应力超声检测可靠性的方法。

一门技术成熟或上升为科学最基本、最显著的标志是其进入了误差很小的量化阶段^[39]。超声检测的发展方向必然以定量化和提高检测可靠性为目标,因此采用超声检测技术对激光熔覆再制造零件的缺陷和应力进行检测与评价,可以为再制造产品质量的提升及生产过程的安全提供有力的保障,对再制造工程的产业化和建设资源节约型、环境友好型社会具有重要意义。

1.1 超声检测技术的应用领域

1.1.1 缺陷检测

材料的缺陷总体来分有表层缺陷和内部缺陷,无论是表层缺陷还是内部缺陷都会给材料、结构带来严重的力学性能下降,因此缺陷的无损评价一直是无损检测领域重点研究的问题之一,超声检测技术是目前应用最为广泛、最为成熟的缺陷无损检测方法。目前的缺陷检测技术越来越好,但在缺陷评定与评价方面存在相当的不足,例如缺陷的等级评定只重视大小、长度,不重视高度和深度^[40];零件检测执行中忽视经济效益,重工艺,轻评价^[41]。无损检测与评价是一个多领域、多层次的综合技术,每种技术都有特定的应用范围和优缺点,随着再制造工程的不断发

展, 包含涂层及基体的再制造零件缺陷评价也逐渐成为超声无损评价领域中的研究热点。研究表明, 相比于轧制或锻造材料而言, 这类零件超声波信号信噪比低, 影响缺陷评价结果的因素较多, 在现有的条件下, 很难同时兼顾效率、安全、成本、质量等多方位要求, 研究人员要做的就是不断丰富无损检测的理论与技术, 将最新的技术应用于生产实际。

针对材料内部缺陷的无损评价, 目前实验研究主要采用的是体波(纵波和横波)。采用最常用的脉冲反射法(体波)检测时, 由于检测仪阻塞时间和始脉冲宽度的影响, 存在着检测盲区^[42](盲区是指从探测面到能够发现缺陷的最小距离, 表征系统的近距离分辨能力)。对于表层缺陷的检查, 目前实验研究主要采用的是表面波(瑞利波)。由于表面波的能量集中于表面下 2 个波长之内, 检查表层缺陷灵敏度极高。但是, 要想同时检测出材料表层和内部缺陷, 就需要更换检测探头(将表面波探头更换为纵波或横波探头), 非常不方便。

针对上述问题, 国内外很多学者提出了各自的解决方案, 北京航天材料及工艺研究所的吴时红、陈颖^[43]等人针对特种涂层内部缺陷的检测设计了涂层专用超声显微检测系统, 该套系统的表面/亚表面成像原理^[43]如图 1-3 所示, 入射纵波以 θ_R (瑞利波入射角) 入射到样品表面激发出瑞利波。内部成像原理^[43]如图 1-4 所示, 入射纵波在样品内部沿着与入射纵波对称的路径返回透镜。采用该系统对特种涂层的内部质量进行检测后的结果表明, 该系统能检测出涂层内部的裂纹、气孔和涂层与基体脱粘等缺陷。采用超声瑞利波声透镜, 可有效检测出涂层表面及亚表面的缺陷。清华大学的姜宇、张华堂^[44]等人利用可调节聚焦深度的超声显微成像技术, 将聚焦声束投射到物质表面或穿透到内部, 从而实现对材料表层、亚表层和内部缺陷的检测。

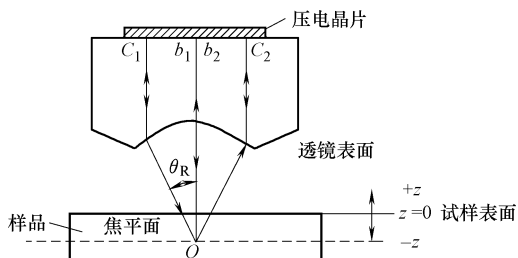


图 1-3 表面/亚表面成像原理

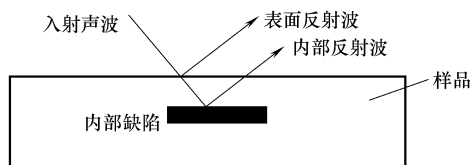


图 1-4 内部成像原理

再制造零件内部小缺陷(如小裂纹)的发现对提高零部件的服役寿命非常重要, 对于处于萌芽状态的表层小缺陷, 及时采用表面工程技术进行修复可显著提高零部件的服役寿命。近年来, 国内外已经有采用非线性检测方法检测微裂纹、微小缺陷及胶接层质量的报道^[45-47], 利用超声波的非线性效应能够实现材料早期损伤的无损表征。非线性超声检测的原理为: 超声波在传播过程中与材料微观结构(包含纤维增强层合板中的纤维基体, 各种内在的或外部环境作用产生的缺陷和损

伤区)相互作用,并经过界面的多次反射与波形转换后被换能器接收,对接收到的波形信号进行分析,提取一个能反映材料力学性能的参量,称为应力波因子。美国 RITEC RAM-5000 SNAP 非线性高能超声测试系统是世界上第一套专门用于材料无损评估的非线性效应研究的超声测试系统,性能非常优越。

1.1.2 应力检测

激光熔覆是再制造工程中常用的表面工程技术之一,实践表明,再制造涂层中的应力会显著影响再制造零件的性能。因此对激光熔覆层应力进行检测及评价就成为保证其质量的重要手段和方法。

现有的应力检测方法主要有弯曲法、钻孔法^[48-49]、X 射线衍射法、中子衍射法^[50]、拉曼光谱法^[51-52]和云纹干涉法^[53-55]等。每种检测方法的检测原理、特点及使用范围都各不相同。

弯曲法的特点是不破坏原有涂层,但只能测量厚度方向上的平均残余应力。英国剑桥大学的 Tsui Y C、Doyle C 和 Clyne T W^[55]等人采用原位曲率检测法实现了对等离子喷涂层全过程应力的监测。钻孔法的特点是检测方法简单、可靠,缺点是由于要在被测零件上钻孔,会破坏零件的整体结构,另外,钻孔过程常常会引起材料的损伤和屈服,影响测量效果。清华大学工程力学系的戴福隆教授等人将云纹干涉法与钻孔法相结合^[56],在残余应力检测方面做了大量有效的工作。中子衍射法可以检测零件更大深度范围内的残余应力,但中子源的流强度较弱,需要的测量时间比较长,另外中子源的建造和运行费用昂贵,因此中子衍射法检测残余应力还未在实际中得到广泛应用。

超声波检测应力的方法是以声弹理论和非线性超声理论为基础建立的^[57]。声弹理论的应用基于一系列假设条件的成立,例如物体具有连续性、均匀性,物体是超弹性的,声波的小扰动叠加在物体的有限变形上,变形过程等熵等。非线性超声应力检测是基于超声波在固体介质(应力作用下)中传播时表现出的非线性特性。非线性超声波检测应力的研究还比较少。2009 年,美国加州大学的 Ivan B^[58]等人采用非线性超声导波对混凝土结构中预应力钢筋的应力进行了检测,发现某相邻绞线之间的接触应力与超声导波的非线性效应密切相关。2010 年, Liu M^[59]等人利用非线性瑞利波检测了喷丸处理过的铝合金表面残余应力,结果表明瑞利波非线性系数与应力大小呈线性比例关系。2016 年,北京理工大学的徐春广^[60]课题组对 2024 铝合金拉伸过程中表面波的非线性系数进行了测量,发现二阶与三阶非线性系数对拉伸应力具有不同的灵敏度,三阶非线性系数更为敏感。上述针对各向异性材料应力超声检测的研究,具有较强的新颖性和借鉴意义,但不容忽视的是,上述研究大多停留在实验观察的层面,缺乏深层次的理论分析。

国内外基于声弹理论检测应力的理论和实验研究较多。激光熔覆层通常为各向异性组织,并且在涂层制备过程中材料会发生弹塑性变形,完全与之符合的声弹理

论有待进一步发展。美国、日本、英国的一些大学和科研机构从 20 世纪 80 年代开展了一系列相关的研究,并且取得了一些有意义的成果。1981 年,Johnson George C^[61]以 Green 的弹塑性连续介质模型为基础,推导了弹塑性条件下的声弹公式,由于公式中包括弹性应变、塑性应变、主拉伸率和强作硬化参数,通过弹塑性实验才能确定这些复杂参数的值,所以很难在实际中推广应用;同年,Kenichi Okada^[62]在微各向异性材料的非线性弹性本构假设下,推导出弱正交各向异性材料的声弹公式;1983 年,Johnson George C 进一步发展了弹塑性条件下的声弹公式,显著的进步是声弹公式中不包含塑性应变,常数取恒定值,应力可以直接与速度关联;1985 年,Yih-Hsing Pao^[63]推导了具有初始应力、正交各向异性材料介质中的声弹公式。上述研究成果都是对弹塑性变形条件下,各向异性材料中声弹理论的有益探索,但这些研究成果大都只停留在理论推导的层面,距实际应用还很远。

鉴于声弹理论研究工程应用进展缓慢,相关的大学和科研机构更多地开展了实验研究。1983 年,King R B^[64]采用斜入射水平方向偏振剪切波(SH 波)实现了微弱正交异性条件下平面应力状态的测定,此方法有效地分离了织构效应和应力效应。假设主应力与材料对称轴重合,平面应力状态下的声弹公式为

$$\frac{SH_{23}-SH_{13}}{SH_0}=\frac{c_{55}-c_{44}}{c_{44}}\cos^2\theta+\alpha(\theta)(T_{22}-T_{11}) \quad (1-1)$$

式中, SH_{ij} 为在面 ij 中传播的 SH 波声速; SH_0 为两种波速的平均值; c_{44} 、 c_{55} 为材料的弹性常数; $\alpha(\theta)$ 为不同角度下的声弹常数; T_{22} 、 T_{11} 为主应力。

1984 年,Thompson R B^[65]采用传播方向互相垂直的平面 SH 波分离织构效应和应力效应,提出的表达式为

$$\rho(v_{ij}^2-v_{ji}^2)=\sigma_{ii}-\sigma_{jj} \quad (1-2)$$

式中, ρ 为材料密度; v_{ij} 、 v_{ji} 为在面 ij 中传播的 SH 波声速; σ_{ii} 、 σ_{jj} 为主应力。

1984 年,牛津大学的 Allen D R、Sayers C M^[66]使用聚焦纵波与横波双折射相结合的方法分离组织影响,并在裂纹尖端残余应力测量中进行了验证。1992 年,Rokhlin S I^[67]提出了 GAO 技术,使用两种横波和一种纵波,在横波偏振角度和应力之间建立了关系。2001 年,Bray Don E^[68]等人用表面波评估了钢板中的表面应力。2002 年,法国机械工业技术中心^[69]使用临界折射纵波,考虑了热影响区和焊缝区组织效应对检测结果的影响,对对接平板焊接纵向残余应力进行了测量,结果与小孔法比较吻合很好。2008 年,同济大学的李勇攀、王寅观^[70]等人采用反射纵波法对钢轨中的残余应力进行了检测。2015 年,笔者所在的课题组^[71]使用瑞利波检测激光熔覆层表面应力,结合塑性变形理论分析了各向异性微观组织对检测结果的影响,提出了削弱组织效应影响,提高检测结果可靠性的方法,并通过实验进行了验证。上述研究极大地推动了各向异性材料应力超声检测技术的发展,具有较强的借鉴意义,但其探索分离组织效应的方法存在一定盲目性,没有将超声传播理论与材料的微观形貌相结合,深入分析组织效应影响应力检测结果的机理,在分离组

织效应的同时做出令人信服的解释。

通常情况下金属材料的声弹效应很微弱, 100MPa 应力导致的速度变化约为 0.1% (铝) 和 0.01% (钢)^[72], 因此, 声弹效应表征参量的精确测量是超声应力检测技术的关键环节之一。随着科技的发展, 声弹效应表征参量的检测精度逐步提高, 这主要得益于两方面的改善: ①提高了检测仪器的精度, 例如基于压电超声换能器的脉冲干涉法、脉冲叠加法、脉冲回波技术、连续波技术等^[73-74]; ②采用了现代信号处理技术, 如阈值法、互相关函数法、基于分数低阶协方差法及互功率谱相位法等^[75-77], 提取表征声弹关系的特征参量 (如声时差)。目前, 非接触超声技术也得到发展, 包括电磁超声技术、激光超声技术、超声显微镜技术和空气耦合超声技术, 可以实现不接触测量, 提高检测效率, 避免了耦合状态引起的测量误差, 测量重复性好。

利用超声波测量应力的主要途径有: 利用声速与应力的关系; 超声波振幅衰减程度与应力的关系; 超声波非线性特性与应力之间的关系; 瑞利波入射角与应力的关系; 回波功率谱与应力之间的关系; 应力影响声束相互作用的情况等, 其中声速与应力关系^[78]是当前研究的热点。由于激光熔覆层通常为各向异性材料, 材料中的织构、夹杂物、缺陷必然会引起超声应力检测表征参量的某种波动, 进而影响检测结果的准确性、可靠性。因此提高应力检测结果可靠性的首要问题就是明确向超声波在各向异性材料中的传播规律, 找到定量检测应力大小的最佳声透信道。

相比于实验研究, 数值模拟在模型“制作”、参数选取和变动及对模拟结果的数据处理方面, 更为灵活和方便, 能够突出实验中不易观察的某些细节。以声场分析和缺陷回波预测为研究目标的超声检测数值模拟技术近年来获得了迅速发展, 其应用主要包括: ①不同类型缺陷散射及回波预测^[79]; ②各向同性及各向异性材料中超声传播及探头辐射声场分析^[80-81]; ③超声成像模拟^[82]。针对各向异性材料应力的超声检测, 尚未发现有其他学者采用数值模拟技术开展相关研究工作的报道。

目前提高超声应力检测结果可靠性研究目标的途径主要有三种: ①通过尝试性实验^[83-84]探索检测系统参数 (温度、耦合方式、表面粗糙度等) 对应力检测结果的影响规律, 提出修正误差方法; ②提高超声应力检测特征参量 (如超声波速度、振幅等) 的检测精度; ③结合弹塑性变形理论、超声波传播理论推导有效分离或削弱各向异性材料组织效应的理论公式, 并通过实验进行验证。通过尝试性实验探索误差修正方法时, 由于缺乏理论支持, 一旦检测对象和实验条件发生变化, 又需要进行多次实验才能找到修正误差的方法。采用现代信号处理技术^[85-88]可以在某种程度上提高应力检测结果的可靠性、准确性, 但仍然局限于检测仪器许可的精度范围之内。针对超声应力检测技术中, 各向异性材料组织效应的分离, 目前国内学者提出的方法局限性较强。例如通过理论推导得到的公式比较复杂, 难以在实际中推广应用。实验研究提出的方法, 仅停留在实验观测水平, 不具有普遍适用性。由于没有全面掌握各向异性材料中超声传播的细节信息, 所以无法深入揭示组织效应

影响应力检测结果的机理,从而找到分离组织效应的有效方法并做出令人信服的解释。更为重要的是上述几种方法均存在一定的盲目性,缺乏优化检测方法和提高检测结果可靠性的指导性、系统性方法。因此,有关各向异性材料应力超声检测的研究尚处于经验、模糊层面,相关的理论及实验研究有待进一步深化。

1.1.3 涂层性能检测

随着无损检测方法的不断进步,无损检测也正朝着无损评价的方向发展。国内外很多学者进行了相关的工作,Lian D 和 Suga Y^[89]等人利用超声反射波强度或超声波在涂层中的传播速度来评价界面结合强度,结果表明反射波强度越高,界面结合强度越低,建立了超声波反射强度和界面强度之间的关系。Kawas 和 Cox R L^[90]等人研究了超声波在涂层中传播时的衰减,发现涂层组织结构、气孔率与衰减系数之间有一定的相关性。Haines^[91]等人对铝表面喷涂的环氧树脂层进行了研究,借助反射系数谱得出了涂层中的声速、密度和衰减系数。大连理工大学的林莉、李喜孟、赵扬^[92]采用强流脉冲离子束(High Intensity Pulsed Ion Beams, HIPIB)辐照方式获得了特性(孔隙率、微裂纹及致密度)不同的 Cr_2O_3 陶瓷涂层,对原始试样和辐照次数不同的试样,分别进行超声检测,试验结果表明,随着辐照次数的增加,声速越来越大,声速提高表明涂层弹性性能增强。涂层经辐照后孔隙及裂纹减少,涂层变得致密,同时其表面显微硬度提高。超声试验结果与理论分析一致,因此利用声速能够对HIPIB改性的 Cr_2O_3 陶瓷涂层进行超声表征。

再制造零件的涂层厚度不仅是表征涂层本身几何尺寸的一个参量,而且与涂层的使用寿命、涂层材料消耗及再制造的生产成本等问题直接相关,因而,对涂层厚度的无损测量就成为再制造涂层质量评价中至关重要的参数之一。由于超声检测技术在测量涂层厚度中的优势,国内外很多研究人员采用该项技术进行了涂层厚度的检测。意大利的Lakestain Fereydoun^[39]等人利用表面波法测量了等离子喷涂金属涂层的厚度。Moreno Eduardo Acevedo Pedro^[93]等人利用兰姆波法实现了复合材料表面薄层的厚度测量。目前涂层厚度的超声测量方法大体上可分为脉冲反射法、共振法、干涉法三种。三种方法在涂层测厚中都有各自的局限性,如脉冲反射法不适合测量比较薄且界面不规则的涂层厚度,因为这种情况下,超声波在涂层内发生多重反射,基体/涂层界面产生的回波相互干涉叠加,难以从接收的回波信号中分离出涂层界面回波信号;共振法不适合测量涂层厚度变化超过20%或声波半波长的情况;超声干涉法可以用来检测薄涂层厚度,但由于基体及涂覆层种类繁多,基体与薄涂层之间的性质可能彼此接近,也可能相差悬殊,某些情况下会导致干涉信号幅度变化过小、反射系数谱极值位置难以判断,从而造成薄层厚度测量误差偏大。

随着计算机、数字信号处理技术及人工智能的发展,采用数字信号处理与人工智能结合的方法测量涂层厚度在实际应用中越来越普及。大连理工大学的徐志辉、林莉^[94]等人了解决脉冲反射法测量薄涂层厚度时,表面涂层介质中不同界面的