

Advanced Techniques NDT & E

无损检测新技术

施克仁 主编
郭寓岷 审核

无损检测新技术

施克仁 主编

高炽扬 张 平 鲍晓宇 阙开良 徐西刚

香 勇 张秀峰 蒲中奇 陈 斌 杨 平

郭寓岷 审核

著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书论述作者们研究的当前无损检测若干重要的新技术和前沿课题,内容新颖,含有创新的技术内容。

本书内容涉及采用高温超导量子干涉器(SQUIT)的弱磁场检测技术、采用先进信号处理的声发射检测技术、基于时频分析粗晶材料超声检测技术、非线性超声检测技术、相控阵超声检测技术和大型设备故障诊断技术等。其中相控阵超声检测技术包含了相控阵超声关键技术及检测系统、相控阵超声声场的仿真、阵列超声探头的设计理论、自适应聚焦和信号补偿技术、柔性阵列相控阵超声、混频相控阵超声、二位阵列相控阵超声三维实时成像等新技术。

本书适合于从事无损检测及相关领域的研究人员、工程技术人员、相关专业的教师和研究生及本科生参考阅读。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

无损检测新技术/施克仁主编. —北京:清华大学出版社,2007.12

ISBN 978-7-302-16147-9

I. 无… II. 施… III. 无损检验 IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 144890 号

责任编辑:宋成斌 洪 英

责任校对:焦丽丽

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京市世界知识印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:35.75 插 页:18 字 数:874 千字

版 次:2007 年 12 月第 1 版 印 次:2007 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:90.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:024902-01

无损检测新技术



主编 施克仁
清华大学机械工程系
教授



审核 郭寓岷
冶金建筑研究总院
教授级高级工程师

作者



高炽扬博士



张平博士



鲍晓宇博士



阙开良博士



徐西刚博士



香勇博士



张秀峰博士



蒲中奇博士



陈斌博士



杨平博士

序

PREFACE

无损检测与无损评估(Nondestructive Testing & Evaluation)是在物理学、材料科学、机械工程、电子学、计算机技术、信息技术以及人工智能等学科的基础上发展起来的一门工程技术。它是在非破坏条件下,对生产制造过程中材料、零部件和最终产品的质量及性能进行检测与评定,以及对所生产的产品在服役期间的使用可靠性及安全性进行评估的技术。1990年在清华大学原副校长张维院士和潘际銮院士的倡导和关怀下,清华大学机械工程系成立无损检测教研室,后来又成立“清华大学无损检测技术工程中心”,属于材料加工工程二级学科的一个研究方向。因为目前国务院学位办公布的学位目录中没有“无损检测”学科,1993年由学校自主审定为“电磁测量技术及仪器”硕士点,后调整为“测试计量技术及仪器”(080402),属于一级学科“仪器科学与技术”(080400)。2003年清华大学在博士学位授权一级学科范围内自主设置学科、专业,经批准,清华大学无损检测教研室的学科方向为二级学科“材料测量与检测技术”(080521)博士及硕士点,隶属于一级学科“材料科学与工程”(0805)。2000年机械工程系撤销教研室编制后,“无损检测技术工程中心”并入材料加工工程及自动化研究所。到目前为止,“无损检测技术工程中心”已毕业工学博士13名,论文博士3名,已毕业硕士生60多名,已出站博士后4人。

“无损检测技术工程中心”研究方向的学科内容包括材料科学和工程、机械工程、应用物理、人工智能、计算机科学、电工工程、电子学、生物医学工程、寿命评估等。根据我国的国情制定本学科的研究范围是:①材料加工过程中无损检测和无损评估的理论、技术、仪器和系统;②重大设备服役期间的状态监测与评估、寿命评估;③先进的超声、声发射检测技术及仪器;④相控阵超声检测技术及仪器;⑤弱磁场检测、涡流检测技术及仪器;⑥热学、光学检测技术及仪器;⑦先进的检测信号处理技术、人工智能信号识别与评估技术;⑧数字化检测仪器及系统,基于网络的检测仪器及系统。

本书主编施克仁教授,1938年1月18日出生,上海人,1962年清华大学机械工程系毕业,博士生导师,曾任清华大学第七届学术委员会委员,于1988年9月—1991年1月任焊接教研室副主任,1995年4月—2000年2月任无损检测教研室主任兼“无损检测技术工程中心”主任,2000年2月—2003年2月任机械工程系材料加工工程及自动化所副所长兼检测技术与信息管理研究室主任。在进入无损检测领域研究后,致力于研究现代无损检测技术,先后指导博士生12人。本书的审核为郭寓岷,教授级高级工程师,1941年7月9日出生,河南南阳人,1965年清华大学机械工程系毕业,原冶金工业部(现中冶集团)建筑研究总院教授级高级工程师,在主编施克仁教授的学术研究工作中,郭寓岷教授作出了突出贡献,特别是在数字化超声仪器的研究领域发挥了重要作用。

本书是根据主编施克仁教授所指导的已毕业博士生博士论文的研究成果基础上写成的。这 10 名已毕业的博士生是(按毕业先后排列):高炽扬、张平、鲍晓宇、阙开良、徐西刚、香勇、张秀峰、蒲中奇、陈斌和杨平,他们现在都已在各自的岗位上工作。他们在做博士论文期间,以他们年轻朝气、勤奋好学的精神,进行了富有创新的研究,对现代无损检测技术的研究和发展起到了不可磨灭的先锋作用。因此将本书贡献给读者,是为了将他们的研究心得和成果与大家共享,相信对我国无损检测技术的研究发展和自主开发能起有益的作用。因为本书内容涉及弱磁场检测技术、基于时频分析粗晶材料超声检测技术、非线性超声检测技术、相控阵超声检测技术、声发射检测技术、先进的信号处理技术和大型设备故障诊断技术等,均属于当前无损检测领域的前沿技术,故书名定为《无损检测新技术》。但并不是说本书涵盖了所有无损检测的新技术,而仅仅是作者们所从事这方面研究的内容。另外,主编所指导的论文博士的研究内容,因其知识产权属于其工作单位,故未予包括在本书内。

全书按章排列,为阅读方便,章目录的排列次序并未按作者毕业先后排列,而是尽量将相关的研究领域集中在一起。第 1 章高温射频超导量子干涉器弱磁场检测技术,作者高炽扬博士(完成于 2001 年 6 月);第 2 章声发射检测信号处理新技术,作者张平博士(完成于 2002 年 6 月);第 3 章基于时频分析的粗晶材料超声检测技术,作者张秀峰博士(完成于 2005 年 6 月);第 4 章非线性超声检测技术,作者陈斌博士(完成于 2006 年 6 月);第 5 章相控阵超声检测系统及其关键技术,作者鲍晓宇博士(完成于 2003 年 1 月);第 6 章自适应聚焦数字相控阵超声检测系统,作者阙开良博士(完成于 2004 年 6 月);第 7 章相控阵超声检测中的自适应信号补偿技术,作者徐西刚博士(完成于 2004 年 6 月);第 8 章提高相控阵超声检测成像分辨率的相关技术,作者香勇博士(完成于 2004 年 6 月);第 9 章面阵相控阵超声三维成像检测技术,作者杨平博士(完成于 2006 年 6 月);第 10 章水轮机空化噪声及其检测技术,作者蒲中奇博士(完成于 2005 年 6 月)。

在上述内容中,弱磁场检测技术率先采用高温超导量子干涉器(SQUIT)作为传感器,是灵敏度最高的弱磁场检测技术;声发射先进信号处理技术中引入小波分析法、神经网络法和首次采用盲目反卷积法研究声发射源信号的问题,不仅从理论上阐述了这些先进信号处理方法,还从物理意义和实践应用上进行了深入的研究和论述;视频分析是目前先进的信号处理技术之一,首次将该技术应用在噪声背景很大的粗晶材料的超声检测中,获得了良好的效果,本书在理论和应用层次上阐述了该技术的核心研究内容;非线性超声检测技术目前尚无成熟的仪器出现,但这是一种非常具有前途的超声检测技术,能检测出常规超声不易检出的缺陷(如闭合裂纹等),书中全面论述了非线性超声检测的理论问题和实践方面的研究成果,有独到之处;相控阵超声检测技术是目前最热门的超声检测技术之一,本书有 5 章内容涉及相控阵超声检测技术,从关键技术到整个系统都进行了深入的研究和论述,并阐述了诸如相控阵超声声场的仿真、阵列探头的设计理论、自适应聚焦和信号补偿技术、提高空间分辨率的关键技术、柔性阵列相控阵、混频相控阵、二位阵列相控阵超声三维实时成像等很前沿的研究内容;设备故障诊断技术也属于无损检测范畴,其研究内容涉及水轮机空化理论和空化噪声的特征提取及诊断技术,上述内容包含了作者的研究心得和所查阅的相关文献,值得读者参阅。



任何研究成果都是在前人工作的基础上发展的,因此本书中因研究工作需要参考和引用了前人的已有公式、图片与学术观点,引用部分尽量以参考文献标出(参考文献按各章独立列举),如有遗漏,敬请谅解。同样,任何研究工作都有其局限性和不足之处,本书也难免有谬误和局限性,敬请读者谅解和批评指正。

本书第2、3、5、6、7、8、9章的研究承蒙清华大学一期“985”重点基金(编号012—081100501)资助,第4章的研究得到863课题(编号:2003AA331200)的经费支持,第10章的研究得到国家自然科学基金项目(项目编号:50176022)的经费支持,在此表示衷心的感谢。

主编 施克仁

2007年8月于清华大学

目录

CONTENTS

第 1 章 高温射频超导量子干涉器弱磁场检测技术	1
1.1 超导量子干涉器与弱磁场检测技术	1
1.1.1 超导量子干涉器	1
1.1.2 超导量子干涉器在弱磁场检测中的应用	8
1.1.3 超导量子干涉器用于钛合金检测	10
1.1.4 超导量子干涉器用于航空探测潜艇	12
1.2 试验方法	14
1.2.1 钛合金铁磁夹杂物检测实验方法	14
1.2.2 超导量子干涉器用于探测潜艇可行性研究的实验方法	15
1.3 主要仪器设备	16
1.3.1 超导量子干涉器器件的制作	16
1.3.2 超导量子干涉器信号发射/接收设备	18
1.3.3 低温系统	19
1.3.4 局部电磁屏蔽系统	20
1.3.5 计算机控制三维扫查系统	23
1.3.6 数据采集系统	24
1.4 超导量子干涉器用于钛合金的检测	25
1.4.1 钛合金中铁夹杂的产生及其常规检测方法	25
1.4.2 应用超导量子干涉器对钛合金中铁夹杂物的检测	26
1.4.3 应用超导量子干涉器对钛合金中硬质合金夹杂物的检测	31
1.5 超导量子干涉器弱磁场检测中的信号提取	33
1.5.1 干扰信号的消除	33
1.5.2 系统噪声的消除	37
1.5.3 面扫描显示缺陷信号	39
1.5.4 面扫描中的噪声信号	44
1.6 超导量子干涉器对潜艇探测可行性研究	44
1.6.1 潜艇磁性的产生	44
1.6.2 采用超导量子干涉器对潜艇探测的关键问题	45
1.6.3 振动状况的模拟	45



1.6.4	模拟体试验	47
1.6.5	实测结果	48
1.6.6	磁异探测中潜艇的数学模型	49
	参考文献	51
第2章 声发射检测信号处理新技术		53
2.1	声发射检测技术与信号处理	53
2.1.1	声发射检测技术	53
2.1.2	声发射检测技术发展历程	54
2.1.3	声发射检测信号处理方法的进展	55
2.1.4	声发射检测信号处理方法集成化的发展现状	62
2.2	基于小波变换的声发射信号处理方法	63
2.2.1	声发射信号的特征分析	64
2.2.2	小波变换的物理理解	65
2.2.3	声发射信号小波分析的小波基选取的规则与方法	66
2.2.4	声发射信号小波分析算法及相关问题的研究	70
2.2.5	小波变换对声发射信号特征分析方法的研究	73
2.3	基于BP人工神经网络的声发射信号模式识别	85
2.3.1	BP网络及其模式识别原理	85
2.3.2	声发射模式识别应用中的BP算法的不足与改进	86
2.3.3	声发射信号模式识别的BP网络结构设计与优化问题	90
2.4	盲目反卷积在声发射源信号处理中的应用研究	98
2.4.1	声发射源信号的卷积模型	98
2.4.2	声发射源反卷积模型求解的研究	100
2.4.3	盲目反卷积对断铅声发射信号的分析	102
	参考文献	106
第3章 基于时频分析的粗晶材料超声检测技术		113
3.1	粗晶金属材料超声检测概况	113
3.1.1	材料晶粒度对超声检测的影响	113
3.1.2	粗晶材料的组织特点与现有检测手段	116
3.1.3	超声信号处理技术的研究现状	117
3.1.4	粗晶材料超声检测技术的研究现状	119
3.1.5	本章所论述的研究内容的意义	119
3.2	超声信号的时频分析与时频图像	120
3.2.1	超声信号的常带宽时频分析与二维信号阵列	120
3.2.2	超声信号的常Q时频分析与二维信号阵列	121
3.2.3	超声信号时频图像的物理意义	122

3.2.4 常带宽时频分析与常 Q 时频分析时频图像对比	123
3.3 脉冲超声检测时频分析“三步法”	123
3.3.1 第一步: 脉冲超声信号常 Q 时频分析图像优化	124
3.3.2 第二步: 时频图像缺陷信息提取	130
3.3.3 第三步: 缺陷信息的 A 型显示	136
3.3.4 时频分析三步法小结	137
3.4 时频分析“三步法”材料检测实验研究	137
3.4.1 实验内容	137
3.4.2 实验小结	147
3.5 脉冲超声时频分析检测系统的研究与设计	150
3.5.1 系统的信号处理功能	150
3.5.2 系统的硬件设计规划	150
3.5.3 系统的关键硬件环节设计	153
3.5.4 系统的结构特点与性能特点	157
参考文献	158
第 4 章 非线性超声检测技术	162
4.1 非线性超声检测技术概述	162
4.1.1 金属构件中的闭合裂纹及其检测方法	162
4.1.2 非线性超声无损检测技术	164
4.1.3 非线性超声无损检测技术的国内外研究现状	165
4.2 闭合裂纹超声非线性响应的建模及模拟	168
4.2.1 金属材料闭合裂纹的超声非线性响应	169
4.2.2 影响闭合裂纹超声非线性响应的因素	170
4.2.3 闭合裂纹的超声非线性响应	171
4.2.4 闭合裂纹超声非线性响应分析模型	173
4.2.5 闭合裂纹超声非线性响应的等效检测模型	182
4.3 非线性超声检测方法 with 检测系统设计	183
4.3.1 非线性超声无损检测的基本要求	183
4.3.2 非线性超声检测方法和特征参数的选取	184
4.3.3 非线性超声检测系统的指标要求与性能影响因素	187
4.3.4 基于非相干叠加原理的非线性超声检测方法	188
4.4 金属材料疲劳损伤的非线性超声无损检测	194
4.4.1 疲劳损伤超声无损检测的基本理论	194
4.4.2 45 钢疲劳试件的非线性超声检测实验研究	196
4.4.3 铁路车辆 RD2 车轴疲劳状态非线性超声无损评价	198
参考文献	201



第5章 相控阵超声检测系统及其关键技术	205
5.1 相控阵超声技术的概况	205
5.1.1 发展相控阵超声技术的意义	205
5.1.2 相控阵超声技术的应用与发展	206
5.2 相控阵超声原理及系统关键技术	212
5.2.1 相控阵超声原理概述	212
5.2.2 相控阵超声中的关键技术概述	213
5.3 相控阵超声检测系统的设计	223
5.3.1 相控阵超声检测系统总体设计	223
5.3.2 一维线性超声换能器阵	225
5.3.3 相控超声发射/接收及数据采集处理卡	225
5.3.4 系统主控计算机	242
5.3.5 相控阵超声检测系统软件设计	242
5.4 时钟同步和相控延时	244
5.4.1 相控阵超声系统的时钟与同步	244
5.4.2 相控阵超声发射/接收中相位延时的实现	247
5.5 实验结果	255
5.5.1 单阵元发射基本实验	256
5.5.2 单阵元发射声场测试	258
5.5.3 线性小振幅波叠加原理实验	259
5.5.4 相控阵超声发射实验	262
5.5.5 相控阵超声接收实验	264
5.5.6 模拟缺陷试块检测实验	266
参考文献	268
第6章 自适应聚焦数字相控阵超声检测系统	273
6.1 相控阵超声检测技术	273
6.1.1 相控阵超声检测仪器与系统	273
6.1.2 超声检测声束聚焦控制技术发展现状	274
6.2 相控阵超声检测原理及阵列探头设计	276
6.2.1 超声辐射的原理与特性	276
6.2.2 相控阵超声检测技术原理	278
6.2.3 相控阵超声阵列探头设计	280
6.3 数字相控阵超声检测系统	285
6.3.1 数字相控阵超声检测系统同步与时间延迟精度	286
6.3.2 数字相控阵超声检测系统独立通道数的优化选择	291
6.3.3 数字相控阵超声检测系统模/数转换环节的设计	295

6.3.4	数字相控阵超声检测系统发射电路设计分析·····	298
6.3.5	数字相控阵超声检测系统的设计和实现·····	301
6.4	相控阵超声检测中的自适应聚焦技术·····	309
6.4.1	相控阵超声自适应聚焦方法的选择分析·····	309
6.4.2	相关法时间延迟估计·····	310
6.4.3	声束偏转自适应聚焦研究·····	321
6.5	柔性阵列探头相控阵超声检测技术探讨性研究·····	324
6.5.1	柔性相控阵超声阵列探头分析·····	325
6.5.2	柔性相控阵超声检测·····	328
6.5.3	柔性相控阵超声检测实验结果与分析·····	331
6.6	实验结果与分析·····	332
6.6.1	数字相控阵超声检测系统基本功能实验结果与分析·····	332
6.6.2	声束的动态控制检测实验与分析·····	337
6.6.3	阵元间距与偏转角关系的验证与分析·····	338
6.6.4	钛合金的相控阵超声检测实验·····	340
	参考文献·····	341
	附录 自适应聚焦数字相控阵超声检测系统照片·····	345
第7章 相控阵超声检测中的自适应信号补偿技术·····		346
7.1	相控阵超声检测实验系统的设计及性能指标讨论·····	347
7.1.1	相控阵超声检测实验系统的结构·····	347
7.1.2	换能器阵列·····	347
7.1.3	多通道相控发射模块·····	350
7.1.4	多通道相控接收模块·····	350
7.1.5	实验系统检测指标的评价·····	351
7.1.6	线阵聚焦实验·····	352
7.2	声束的相位畸变模型·····	353
7.2.1	超声信号的畸变·····	353
7.2.2	声束畸变原因分析·····	355
7.2.3	相位偏差分析模型·····	359
7.3	基于相关分析法的相位偏差矫正·····	361
7.3.1	超声信号的相关分析法·····	361
7.3.2	邻近相关分析方法·····	364
7.3.3	集总相关分析方法·····	370
7.3.4	混合相关分析方法·····	374
7.4	超声信号幅度畸变及其补偿方法·····	378
7.4.1	超声信号幅度畸变模型·····	378
7.4.2	超声信号幅度畸变补偿方法的探讨·····	381



7.4.3	幅度畸变的自适应补偿算法	383
7.4.4	实验结果	384
7.5	超声信号畸变补偿算法的改进	384
7.5.1	声束合成信号的快速重构	385
7.5.2	检测信号的补偿	387
7.5.3	实验结果	391
7.6	基于自适应信号补偿的相控超声检测与目标分辨	391
7.6.1	基于自适应信号补偿算法的相控超声检测	391
7.6.2	主声束域中存在多个缺陷时的目标分辨	395
7.6.3	人工缺陷试块上的自适应相控超声检测实验	397
7.6.4	小结	399
	参考文献	399
第8章	提高相控阵超声检测成像分辨率的相关技术	400
8.1	相控阵超声成像技术研究概况	400
8.1.1	相控阵超声成像的特点	400
8.1.2	相控阵超声成像技术的研究现状	401
8.1.3	相控阵超声检测成像分辨率定义	403
8.1.4	本章研究和论述的主要内容	403
8.2	相控阵超声激励频率优化	403
8.2.1	对比度分辨率分析	404
8.2.2	超声衰减特征	404
8.2.3	阵元带宽的影响	407
8.2.4	相控阵列的频率优化	408
8.2.5	实验研究	413
8.3	混频相控阵	416
8.3.1	混频相控阵的提出	416
8.3.2	激励向量优化	417
8.3.3	混频相控阵的本质及实现	421
8.3.4	仿真试验	424
8.3.5	实验研究	426
8.4	空间并行波束合成	430
8.4.1	波束合成的意义	431
8.4.2	波束合成技术与实现方法	434
8.4.3	空间并行波束合成的算法	436
8.4.4	仿真算法及试验	440
	参考文献	445

第 9 章 面阵相控阵超声三维成像检测技术	448
9.1 二维阵列相控阵超声检测技术	448
9.1.1 研究二维阵列相控阵超声检测技术的必要性	448
9.1.2 二维阵列相控阵超声检测国内外研究现状	450
9.1.3 二维阵列相控阵超声检测的主要难点	451
9.2 二维阵列相控阵超声检测系统	453
9.2.1 二维阵列相控阵超声检测系统的结构与功能	453
9.2.2 二维阵列探头的设计	453
9.3 二维阵列相控阵超声三维成像	460
9.3.1 空间波束采样定理的导出和数据扫描方案的确定	460
9.3.2 波束合成简介与波束合成方案的选择	463
9.3.3 本章所研究并采用的直接波束合成方案	466
9.3.4 二维阵列相控阵超声三维成像实验	468
9.3.5 低信噪比背景下相关相位校正研究	470
9.3.6 适合于低信噪比信号的混合相关相位校正	473
9.4 相控阵超声二维稀疏阵列的应用研究	473
9.4.1 采用稀疏阵列的必要性及稀疏阵列方案选择	473
9.4.2 采用遗传算法设计二维稀疏阵列	476
9.4.3 最小冗余度阵列和遗传算法结合(MRLA+GA)设计 一维稀疏阵列	482
9.4.4 最小冗余度阵列和遗传算法结合(MRLA+GA)设计 二维稀疏阵列	486
9.5 子阵合成相控阵研究	488
9.5.1 合成孔径技术的启示与子阵合成相控阵方法的提出	488
9.5.2 子阵合成相控阵中子阵划分方案的确定	490
9.5.3 模拟实验验证	498
参考文献	500
第 10 章 水轮机空化噪声及其检测技术	504
10.1 水轮机的空化与空化噪声	504
10.1.1 水轮机的空化现象	504
10.1.2 国内外关于空化噪声检测的研究	507
10.2 水轮机空化噪声特性	509
10.2.1 试验系统	509
10.2.2 试验参数确定	515
10.2.3 空化噪声特性研究	516
10.3 多参数下水轮机空化检测研究	525

10.3.1	单位转速调节时水轮机空化检测研究	526
10.3.2	导叶开口百分比调节时水轮机空化检测研究	528
10.3.3	吸出高度调节时水轮机空化检测研究	530
10.3.4	空化检测性能评价	535
10.3.5	小结	536
10.4	水轮机空化检测中的干扰抑制技术研究	536
10.4.1	干扰抑制效果指标	537
10.4.2	非空化水动力噪声及机械噪声抑制技术	537
10.4.3	基于小波理论的背景噪声干扰抑制技术	544
10.4.4	空化检测性能评价	548
10.4.5	基于脉冲信号成分含量的水轮机空化检测研究	549
10.5	水轮机空化检测系统的实现及其应用	553
10.5.1	水轮机空化检测系统总体设计	553
10.5.2	系统的硬件设计与实现	554
10.5.3	系统的软件设计	556
10.5.4	系统的应用情况	556
	参考文献	557
	附录 Po702 模型转轮的综合特性曲线	560

第1章 高温射频超导量子干涉器弱磁场检测技术

作者 高纪扬博士

作者简介: 1974年10月出生北京市

1991年9月—1996年7月,就读于清华大学机械工程系,获学士学位

1996年9月—2001年9月,清华大学机械工程系,攻读博士学位

2002年1月,获清华大学工学博士学位

博士论文答辩时间: 2001年9月

1.1 超导量子干涉器与弱磁场检测技术

1.1.1 超导量子干涉器

1. 超导技术发展概述

某些材料在一定的转变温度 T_c 以下会转变为完全没有电阻的状态,同时具有完全抗磁性,这就是所谓的超导现象,具有这种性质的材料称为超导材料。一定的温度、磁场及电流均可以破坏超导电性,任何超导体作为实际超导材料使用时,温度、磁场和电流密度一定要低于其相应的临界值。

自从1911年 Onnes 首先发现 Hg 在温度 4.2 K 附近电阻突然消失这一现象以来,一个新的物理研究领域——超导物理被建立起来。直到20世纪50年代,超导只是作为探索自然界存在的现象和规律在研究,1957年 BCS 理论的建立揭示了长时期不清楚的超导起因。1954年 Matthias 发现新型的 A-15 型超导化合物 Nb_3Sn , 1961年 Kunzler 将 Nb_3Sn 制成超导材料,开辟了超导在强电中的应用。1962年 Josephson 效应的发现,将超导推广到一个崭新的领域。

但是,由于当时超导临界温度低,必须使用液氮,大大的限制了超导的应用。从20世纪70年代人们的注意力转向寻找高临界温度 T_c (液氮温区) 超导体,按周期表上排列的元素组合成各种二元、三元合金或化合物,但一直进展不大,人们又在四元化合物领域进行探索,仍无成效,1973年找到的最高 T_c 是 23.2 K 的 Nb_3Ge 薄膜,此后到1985年这个记录一直不变。传统的超导技术不能普及、低温超导材料未形成大规模市场,其主要原因是由于其超导转变温度太低,必须用昂贵的液氮冷却,因此人们一直致力于寻找高最低临界温度(T_c)的超导材料。

后来,研究人员把目光转向氧化物。首先在 1964 年发现了 SrTiO_3 ; 随后,1965 年发现了 Na_xWO_3 , 1973 年发现了 $\text{Li}_{1-x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_4$ 。尤其 1975 年发现 $T_c \approx 13 \text{ K}$ 的 $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$, 更引起科学界的兴趣,其实验数据表明它的费米能量状态密度虽然很低,但却有相当高的 T_c ,有不少文章讨论它的超导电性的微观机理。1986 年 4 月,贝德诺兹和缪勒观察到在 La-Ba-Cu-O 化合物中,近于 35 K 时就出现超导转变的迹象,但零电阻是在 $T_c \approx 12 \text{ K}$ 才得到的。随后他们又实验证明了材料有迈斯纳效应。1986 年底,田中(S. Tanaka)等证明了这种在 30 K 左右出现的超导转变是具有所谓 214 结构的 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ 所贡献的。紧接着美国、中国和日本的科学家都发现 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 有比 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ 更高的 T_c 。

1987 年 2 月,在美国宣布找到了 $T_c \approx 93 \text{ K}$ 的氧化物超导材料,在他们送到物理评论的文章中指出他们发现的 Y-Ba-Cu-O 高 T_c 氧化物的结构不是 214 结构。同月 21 日和 23 日,中国科学院物理所和日本的 S. Hikami 等人也都独立地发现 Y-Ba-Cu-O 化合物的 $T_c \approx 90 \text{ K}$ 。中国学者率先公布了材料的化学成分。液氮温区超导材料的出现激起了全世界范围对高临界温度超导材料研究的热潮。

1987 年底,马依达(H. Maeda)等人发现 Bi-Sr-Ca-Cu-O 化合物系列有约 115 K 的高 T_c 相。随后证实了它的组成是 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ 。同时,盛正直和赫曼(Z. Z. Sheng, A. H. Hermann)发现 Tl-Ba-Ca-Cu-O 化合物系列,后来,在 Tl 系中得到了 $T_c \approx 125 \text{ K}$ 的相,并证实其组成是 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+y}$ 。

La-基、Y-基、Bi-基和 Tl-基这四种高 T_c 氧化物超导材料都是铜氧化物,而且导电类型都是空穴型的。1988 年发现了电子型导电的铜氧化物超导材料 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 和 $\text{Nd}_{2-x-y}\text{Ce}_x\text{Sr}_y\text{CuO}_4$, 以及非铜氧化物材料 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$ 。

超导物质 T_c 提高的历史沿革如图 1-1 所示,有代表性的高温超导材料及其发现年代如表 1-1 所示。

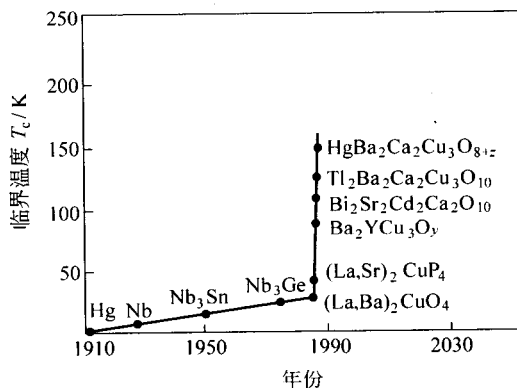


图 1-1 超导物质 T_c 提高的历史沿革^[1]

2. 金兹堡-朗道理论和磁通量子化^[2]

金兹堡和朗道理论认为,超导态应该用复有序参数 $\psi(r)$ 来描述。在高于临界温度时,序参数为零。在低于临界温度时, $\psi(r)$ 的大小是在位置 r 处电子有序度的度量。可以