



涡流检测

《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会 编

国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材

涡 流 检 测

《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会 编

主 编 徐可北 周俊华

主 审 任吉林



机械工业出版社

本书是涡流检测人员资格鉴定与认证培训教材。它系统全面地阐述了涡流检测的物理基础、检测方法、检测装置、相关标准、具体应用实践、涡流检测规程与检测工艺卡等知识。

本教材以Ⅱ级人员培训内容为主，涵盖了Ⅲ级人员的教学内容，因此适用于Ⅱ级和Ⅲ级人员的培训教学。亦可供从事涡流检测工作的技术人员和大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

涡流检测/《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会编. —北京：机械工业出版社，2004.7
国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材
ISBN 7-111-14602-6

I 涡 II 国 III 涡流检验—技术培训—教材
IV TG115.28

中国版本图书馆CIP数据核字（2004）第052593号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

责任编辑：武江 吕德齐

封面设计：鞠杨 责任印制：施红

北京忠信诚胶印厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年8月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·12.25印张·274千字

0001—4000册

定价：24.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

编审委员会

主任：马恒儒

副主任：陶春虎、郑鹏

成员：（以姓氏笔画为序）

王自明 王任达 王跃辉 史亦韦 叶云长 叶代平 付洋
任学冬 吴东流 吴孝俭 何双起 苏李广 杨明纬 林猷文
郑世才 徐可北 钱其林 郭广平 章引平

审定委员会

主任：吴伟仁

副主任：徐思伟、耿荣生

成员：（以姓氏笔画为序）

于岗 王海岭 王晓雷 王琳 史正乐 任吉林 朱宏斌
朱春元 孙殿寿 刘战捷 吕杰 花家宏 宋志哲 张京麒
张鹏 李劲松 李荣生 庞海涛 范岳明 赵起良 柯松
宫润理 徐国珍 徐春广 倪培君 贾慧明 景文信

编委会办公室

主任：郭广平

成员：（以姓氏笔画为序）

任学冬 朱军辉 李劲松 苏李广 徐可北 钱其林

序 言

无损检测技术是产品质量控制中不可缺少的基础技术,随着产品复杂程度增加和对安全性保证的严格要求,无损检测技术在产品质量控制中发挥着越来越重要的作用,已成为保证军工产品质量的有力手段。无损检测应用的正确性和有效性一方面取决于所采用的技术和设备的水平,另一方面在很大程度上取决于无损检测人员的经验和能力。无损检测人员的资格鉴定是指对报考人员正确履行特定级别无损检测任务所需知识、技能、培训和实践经历所作的验证;认证则是对报考人员能胜任某种无损检测方法的某一等级资格的批准并作出书面证明的程序。对无损检测人员进行资格鉴定是国际通行做法。美国、欧洲等发达国家都建立了有关无损检测人员资格鉴定与认证标准,国际标准化组织 1992 年 5 月制定了国际标准 ISO 9712,规定了人员取得级别资格与所能从事工作的对应关系,通过人员资格鉴定与认证对其能力进行确认。无损检测人员资格鉴定与认证对确保产品质量的重要性日益突出。

改革开放以来,船舶、核、航天、航空、兵器、化工、煤炭、冶金、铁道等行业先后开展了无损检测人员资格鉴定与认证工作,对提高无损检测人员素质,确保产品质量发挥了重要作用。随着社会主义市场经济体制不断完善,国防科技工业管理体制改革逐步深化,技术进步日新月异,特别是高新技术武器装备科研生产对质量工作提出的新的更高要求,现有的无损检测人员资格鉴定与认证工作已经不能适应形势发展的要求。未来十年是国防科技工业实现跨越发展的重要时期,做好无损检测人员资格鉴定与认证工作对确保高新技术武器装备研制生产的质量具有极为重要的意义。

为进一步提高国防科技工业无损检测技术保障水平和能力,《国防科工委关于加强国防科技工业技术基础工作的若干意见》提出了要研究并建立与国际惯例接轨,适应新时期发展需要的国防科技工业合格评定制度。2002 年国防科技工业无损检测人员的资格鉴定与认证工作全面启动,各项工作稳步推进,2002 年 9 月正式颁布 GJB 9712—2002《无损检测人员的资格鉴定与认证》;2003 年 8 月出版了《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》;2003 年 9 月国防科工委批准成立国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证委员会,授权其统一管理和实施承担武器装备科研生产的无损检测人员资格鉴定与认证工作,标志着国防科技工业合格评定制度的建立开始迈出了重要的第一步。鉴于国内尚无一套能满足 GJB 9712 和《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》要求的教材,为了做好国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考核工作,国防科工委科技与质量司组织有关专家编写了这套国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材。

本套教材比较全面、系统地体现了 GJB 9712—2002《无损检测人员的资格鉴定与

认证》和《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》的要求，包括了对无损检测 I、II、III 级人员的培训内容，以 II 级要求内容为主体，注重体现 III 级所要求的深度和广度，强调实际应用；同时教材体现了国防科技工业无损检测工作的特色，增加了典型应用实例、典型产品及事故案例的介绍，并力图反映无损检测专业技术发展的最新动态。全套教材共 11 册，包括《无损检测综合知识》、《涡流检测》、《渗透检测》、《磁粉检测》、《射线检测》、《超声检测》、《声发射检测》、《计算机层析成像检测》、《全息和散斑检测》、《泄漏检测》和《目视检测》。

由于无损检测技术涉及的基础科学知识及应用领域十分广泛，而且计算机、电子、信息等新技术在无损检测中的应用发展十分迅速，教材编写难度较大。加之成书比较仓促，难免存在疏漏和不足之处，恳请培训教师和学员以及读者不吝指正。愿本套教材能够为国防科技工业无损检测人员水平的提高和促进无损检测专业的发展起到积极的推动作用。

本套教材参考了国内同类教材和培训资料，编写过程中得到许多国内同行专家的指导和支持，谨此致谢。

《国防科技工业无损检测人员
资格鉴定与认证培训教材》编审委员会
2004 年 3 月

前 言

根据《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》的编写要求，我们承担了《涡流检测》教材的编写，并贯彻以下编制原则：一是紧密围绕考试大纲，强调解决实际问题；二是突出体现国防科技工业无损检测工作特色，适当增加典型应用及案例的介绍；三是教材内容编排应按照基础理论、相关标准、编制检测规程和实验与操作四大部分安排章节。

本教材共8章。第1、2、5章由周俊华编写，第3、4、6、7、8章由徐可北编写，全书由徐可北统稿。

本教材主要特点：一是电磁场理论部分给出了一些基本的、必要的、也是重要的公式，为加深学员对公式的理解和提高应用理论知识解决实际问题的能力，在给出重要公式之后，再通过例题形式作进一步讲解，以求学员能够正确地掌握；二是“涡流检测技术的应用”一章紧密结合涡流检测技术在国防科技工业的实际应用，不仅包括了管棒材原材料涡流检测技术方面的内容，而且较多地增加了涡流检测技术的其他应用，如采用内穿过式线圈检测热交换器管道、采用放置式线圈检测非规则形状零件、电导率测量及覆盖层厚度测量等；三是以较大的篇幅介绍了国内外涡流检测标准和检测工艺规程（卡）编制方面的知识；四是在最后一章以实验课的形式安排了关于涡流检测原理、仪器性能测试及应用方面的实际操作练习，有利于学员对相关基础理论、基本概念的学习和对实际操作基本技能的掌握。

本教材目录中标有“*”号章节的内容仅适用于Ⅲ级涡流检测人员的培训与学习，Ⅱ级人员的培训在教学过程中可以舍弃。

本教材在编写过程中，参考了国内、外出版的一些专著、教材、手册、标准及文献，并直接摘录和选用了一些参考资料上的内容及图片，编写人对相关的作者表示衷心的感谢；教材初稿完成后，请任吉林、雷银照、贾慧明、马振亚、许万忠、伍颂、李劲松、肖春燕等多位涡流检测方面的专家进行了审查，他们都提出了很好的意见和建议。编写人员根据他们的意见和建议进行了修改和补充，在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，教材中的错误和疏漏在所难免，热诚欢迎培训教师、学员及其他读者提出宝贵意见。

《涡流检测》编写组

2004年3月

目 录

编审委员会

序言

前言

第 1 章 涡流检测的物理基础	1
1.1 涡流检测的发展背景	1
1.2 涡流检测的特点	1
1.2.1 涡流检测的优点	1
1.2.2 涡流检测的缺点	2
1.3 涡流检测的基础知识	2
1.3.1 材料的导电性	2
1.3.2 材料的磁特性	6
1.3.3 正弦交流电	15
1.3.4 阻抗及其矢量图	20
复习题	20
第 2 章 涡流检测技术	21
2.1 电磁感应及涡流	21
2.1.1 电磁感应现象	21
2.1.2 涡流及其集肤效应	23
2.2 阻抗分析法	25
2.2.1 线圈的阻抗和归一化阻抗	25
2.2.2 有效磁导率和特征频率	27
2.2.3 穿过式线圈的阻抗分析	30
2.2.4 放置式线圈的阻抗分析	39
复习题	44
第 3 章 涡流检测装置	45
3.1 涡流检测线圈	45
3.1.1 检测线圈的分类	45
3.1.2 各类检测线圈的特点	47
3.1.3 涡流信号的形成	48
3.2 涡流检测仪器	49
3.2.1 检测仪器的分类	49
3.2.2 检测仪器的组成及各部分的作用	50
3.2.3 检测信号的分析与处理技术	52
3.2.4 智能化的涡流检测仪器	57
3.3 涡流检测辅助装置及其使用	60
3.4 标准试样与对比试样	62
3.5 检测仪器(系统)的性能评价	68
复习题	72
第 4 章 涡流检测技术的应用	73
4.1 概述	73
4.2 涡流探伤	73
4.2.1 涡流探伤适用的典型缺陷及响应特点	76
4.2.2 涡流探伤应用的分类	76
4.2.3 管、棒材探伤	77
4.2.4 热交换器管道探伤	81
4.2.5 非规则形状材料和零件探伤	88
4.3 电导率测量与材质分选	90
4.3.1 非铁磁性金属电导率的涡流检测	91
4.3.2 铁磁性材料的电磁分选	92
4.4 覆盖层厚度测量	93
4.4.1 非导电覆盖层厚度的涡流法测量	93
4.4.2 非铁磁性覆盖层厚度的磁性法测量	97
4.5 涡流检测技术在军工行业的典型应用与分析	98
4.5.1 原材料的涡流探伤	98

4.5.2 零件的涡流探伤	100	6.2.2 GB/T 4956—2003《磁性 基体上非磁性覆盖层 覆盖层厚度测量 磁性法》 ...	133
4.5.3 核设施的涡流探伤	104	6.2.3 GB/T 4957—2003《非磁性 基体上非导电覆盖层 覆盖层 厚度测量 涡流法》	135
4.5.4 铝合金材料电导率 的涡流检测	107	6.2.4 GB/T 12966—1991《铝合金 电导率涡流测试方法》	136
*4.5.5 叶片热障涂层厚度 的涡流检测	110	6.2.5 GB/T 7735—2003《钢管涡流 探伤检验方法》	139
复习题	112	*6.2.6 GB/T 14480—1993《涡流探伤 系统性能测试方法》	140
*第5章 电磁涡流检测新技术的发展 与应用	114	*6.3 国外相关标准	143
5.1 概述	114	6.3.1 美国军用标准 (American Military Standards)	143
5.2 远场涡流检测技术	114	6.3.2 美国材料试验学会 (ASTM) 主要相关标准	146
5.2.1 远场涡流效应原理	114	6.4 验收标准	148
5.2.2 远场涡流技术的特点	116	6.4.1 GB/T 7735—2003《钢管涡流 探伤检验方法》	149
5.2.3 远场涡流检测设备	116	6.4.2 GJB 2897—1997《铝合金 电导率和硬度要求》	151
5.3 电流扰动检测技术	117	6.4.3 BAC 5946U《铝合金状态 检验》	153
5.3.1 电流扰动的方法原理	117	6.4.4 BSS 7351《涡流电导率检验 ——直接读数法》	154
5.3.2 电流扰动线圈	117	复习题	156
5.3.3 电流扰动设备	119	第7章 涡流检测规程与检测工艺卡	157
5.3.4 电流扰动法的应用	119	7.1 概述	157
5.4 磁光涡流检测技术	120	7.1.1 相关术语的定义与技术 文件的层次划分	157
5.4.1 基本原理	120	7.1.2 检测规程与检测工艺卡 的一般要求与区别	158
5.4.2 磁光涡流检测的优点	121	7.2 典型涡流检测规程与检测 工艺卡的编制与分析	159
5.4.3 应用示例	122	7.2.1 零件或结构的探伤	160
5.5 涡流阵列检测技术	123	7.2.2 管棒材检测	164
5.5.1 涡流阵列检测的方法原理	123		
5.5.2 涡流阵列检测技术的 优点及应用	124		
复习题	126		
第6章 涡流检测标准	127		
6.1 涡流检测标准概述	127		
6.1.1 标准的基本知识	127		
6.1.2 国际、国外标准与 国内标准的代号	128		
6.1.3 国内外涡流检测标准概况	129		
6.2 国内主要涡流检测标准	131		
6.2.1 GJB 2908—1997 《涡流检验方法》	131		

7.2.3 铝合金电导率测量 规程与工艺卡.....	167	实验八 典型零件探伤实验	177
7.2.4 覆盖层厚度的涡流测量	170	8.3 电导率测试实验	178
7.2.5 飞机轮毂的检测	171	实验九 铝合金棒材电导率 测试实验.....	178
复习题	171	实验十 铝合金板材电导率 测试实验.....	178
第8章 涡流检测实验	172	8.4 覆盖层厚度测量实验	179
8.1 基础实验	172	实验十一 钢板表面镀铬层厚度 的测量实验.....	179
实验一 涡流有效透入深度实验.....	172	实验十二 铝合金表面漆层厚度 的测量实验.....	180
实验二 边缘效应实验	173	实验十三 叶片热障涂层测量 实验	180
实验三 提离效应实验	174	8.5 金属薄板厚度测量实验	181
实验四 检测频率、相位与增益 变化对响应信号的影响	174	实验十四 铝合金薄板涡流测厚 实验	181
实验五 涡流仪器增益线性 评价实验.....	175	复习题.....	182
8.2 涡流探伤实验	176	参考文献	183
实验六 铝合金管材探伤实验	176		
实验七 带铁磁性支撑板的 铜合金管探伤实验	177		

第 1 章 涡流检测的物理基础

1.1 涡流检测的发展背景

涡流现象的发现已经有近二百年的历史。早在 1820 年, Oersted (奥斯特) 就发现当一个导体通有电流时, 会产生环绕导体的磁场。同年, Ampere (安培) 发现在靠近导体的区域通一同样大小方向相反的电流将会抵消该导体电流产生的磁场。1824 年, Arago 发现当一个摆动的磁针放置于一个无磁性导体盘附近时, 磁针的摆动会迅速衰减下来, 这就是第一个验证涡流存在的实验。1831 年, Faraday (法拉第) 发现了电磁感应现象, 并在实验的基础上提出了电磁感应原理。1873 年, Maxwell (麦克斯韦) 用完整的数学方程式将前人的这些成果表示出来, 建立了系统严密的电磁场理论, 时至今日, Maxwell 方程组仍然是电磁现象的研究基础, 亦是涡流检测的理论基础。

随着电磁理论及其试验的不断发展与完善, 促使了涡流检测等电磁无损检测与评估技术的不断发展。在 1879 年, Hughes (休斯) 首先将涡流检测应用于实际——判断不同的金属和合金, 进行材质分选。1926 年, 第一台涡流测厚仪问世。但真正在理论和实践上完善涡流检测技术的是德国的 Föster (福斯特) 博士。从 20 世纪 40 年代初, Föster 在基础实验和理论推导的基础上发表了大量有关涡流检测的论文, 并创办了福斯特研究所。他的涡流检测理论与技术设备极大地推动了全世界涡流检测技术的发展。除前西德以外, 美国、前苏联、法国、英国、日本也先后做了大量的开发性工作, 发表了大量的论文, 并研制生产了一些高水平的涡流检测设备。

我国于 20 世纪 60 年代开始开展涡流检测研究工作, 70 年代中期成功研制了 FQR7501 型和 FQR7502 型涡流电导仪、FQR7503 型和 FQR7504 型膜层测厚仪以及 FQR7505 型涡流探伤仪等一系列涡流检测设备。此后又相继成功研制了 YY—17、YS—1、WTS—100、TC—200、ED—251、T—5、NE—30 等多种涡流检测仪器, 至 20 世纪 90 年代, 研制生产了 EEC—96 型数字涡流检测设备。这些设备在我国的航空航天、冶金、机械、电力、化工、核能等领域都曾经发挥过或正在发挥着重要的作用。

1.2 涡流检测的特点

涡流检测是以电磁感应原理为基础的一种常规无损检测方法, 它适用于导电材料。在实际检测中, 有着其自身特有的一些优势和不足之处。

1.2.1 涡流检测的优点

1) 检测时, 线圈不需接触工件, 也无需耦合介质, 所以检测速度快。对管、棒材检

测，一般每分钟可检查几十米；线材每分钟可检查几百米甚至更多。易于实现现代化的自动检测，特别适合在线普查。

2) 对工件表面或近表面的缺陷，有很高的检出灵敏度，且在一定的范围内具有良好的线性指示，可对大小不同的缺陷进行评价，所以可以用作质量管理与控制。

3) 由于检查时不需接触工件又不用耦合介质，所以可在高温状态下进行检测。由于探头可伸入到远处作业，所以可对工件的狭窄区域、深孔壁（包括管壁）等进行检测。

4) 能测量金属覆盖层或非金属涂层的厚度。

5) 除了能进行导电金属材料的检测外，还可以检验能感生涡流的非金属材料，如石墨等。

6) 由于检测信号为电信号，所以可对检测结果进行数字化处理，并将处理后的结果进行存储、再现及进行数据比较和处理。

1.2.2 涡流检测的缺点

1) 涡流检测的对象必须是导电材料，且由于电磁感应的原因，只适用于检测金属表面缺陷，不适用于检测金属材料深层的内部缺陷。

2) 金属表面感应的涡流的渗透深度随频率而异，激励频率高时金属表面涡流密度大，检测灵敏度高，但是涡流渗透深度低；随着激励频率的降低，涡流渗透深度增加，但表面涡流密度下降，检测灵敏度降低。所以检测深度与表面检测灵敏度是相互矛盾的，很难两全。当对一种材料进行涡流检测时，须要根据材质、表面状态、检验标准作综合考虑，然后再确定检测方案与技术参数。

3) 采用穿过式线圈进行涡流检测时，线圈覆盖的是管、棒或线材上一段长度的圆周，获得的信息是整个圆环上影响因素的累积结果，对缺陷所处圆周上的具体位置无法判定。

4) 旋转探头式涡流检测方法可准确探出缺陷位置，灵敏度和分辨率也很高，但检测区域狭小，在检验材料需作全面扫查时，检验速度较慢。

尽管涡流检测存在一些不足之处，但它独特的专长是其他无损检测方法所无法取代的，因此它在无损检测技术领域具有重要的地位。

1.3 涡流检测的基础知识

1.3.1 材料的导电性

1. 金属导电的物理本质

根据物质的导电性能可将各种物质分为导体、绝缘体和半导体三种类型。例如金、银、铜、铝、铁等金属都是具有良好导电性能的导体；而橡胶、陶瓷、云母、塑料、竹木等都是导电性能很差的绝缘体；另外还有一类物质的导电性介于导体和绝缘体之间，称它们为半导体，例如硅、锗等就是常用的半导体材料。需要指出的是，导体和绝缘体的界限不是绝对的，它们在一定的条件下可以相互转化，例如玻璃在常温时是绝缘体，高温熔化后就变成了导体。

一切物质都是由原子组成的，而原子又是由带正电的原子核和带负电的电子所组成。

电子在原子核外分层不停地绕核运动。原子核所带的正电荷数量和核外电子所带的负电荷数量相等，所以原子平时呈现电中性。不同物质的原子核所带正电荷数和核外电子数都是不同的。

由于原子核带正电，电子带负电，它们之间就有相互吸引力，电子被束缚在原子核周围绕核作旋转运动。在金属物质的原子中，外层电子受原子核的吸引力较小，在其余电子的排挤下，挣脱了原子核的吸引，使它在金属中自由“游荡”，成为自由电子。失去了外层电子的原子变成带正电的离子，在平衡位置附近作热振动，所以，金属是由热振动的正离子和无规则运动的自由电子组成的。自由电子在电场的作用下会作定向移动，形成电流，从而金属等材料会导电。而绝缘体中的原子，由于外层电子受原子核的束缚力很大，不容易形成自由电子，从而在电场作用下电流不能流过，所以导电性能很差。

2. 电流和电阻

自由电子受电场作用力的影响会向反方向作定向移动，从而形成电流。电流的强弱可用电流强度 I 来表示，它代表单位时间内通过导体横截面的电量，单位是 A（安培）。如果一个导体两端的电位差为 U ，导体的电阻为 R ，则根据欧姆定律，通过导体的电流可表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-1)$$

自由电子在运动中总要与金属晶格中的正离子碰撞，碰撞的次数非常频繁（每秒约 10^{15} 次）。这种碰撞会阻碍自由电子的定向移动，从而减小电流。这种阻碍电荷移动的能力称为电阻，其大小与导体的长度 l 成正比，与导体的横截面积 S 成反比，还与导体的材料有关，可以用下式表示

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-2)$$

式中 ρ —— 导体的电阻率，表示单位长度、单位截面积的电阻，单位是 $\Omega \cdot \text{m}$ ，用于研究金属时的电阻率用 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ （或 $10^{-8}\Omega \cdot \text{m}$ ）为计量单位。

电阻率的倒数称为电导率，用符号 σ 表示，单位是 S/m（西门子/米）。

$$\sigma = 1/\rho \quad (1-3)$$

在工程技术中还可使用 IACS（国际退火铜标准）单位来表示电导率，这种单位规定退火工业纯铜（电阻率在温度 20°C 时为 $1.7241 \times 10^{-8}\Omega \cdot \text{m}$ ）的电导率作为 100%IACS。则其他金属的电阻率 ρ_x 、电导率 σ_x 若用它的百分数表示，即为

$$\sigma_x = \left[\frac{\text{标准退火铜电阻率}}{\text{金属的电阻率}} \right] \times 100\%(\text{IACS}) \quad (1-4)$$

显然，电阻率值愈小，电导率值愈大，材料的导电性能就愈好。一些常用金属材料的电阻率、电导率及温度系数见表 1-1。

表 1-1 一些金属的电阻率、电导率和温度系数

金属	20℃时的电阻率 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	温度系数 (20℃)	电导率	
			%IASC	MS/m
铝	2.824	0.0039	61.05	35.4
铋	41.7	0.0036	4.13	2.40
砷	33.3	0.0042	5.18	3.0
铋	120	0.004	1.44	0.83
黄铜	7	0.002	25	14.3
镉	7.6	0.0038	22	13.2
高电阻铁镍合金	87	0.0007	2.0	1.15
钴	9.8	0.0033	18	10.2
康铜	49	0.00001	3.5	2.0
铜(退火)	1.7241	0.00393	1.0×10^2	58.00
铜(冷拉)	1.771	0.00382	97.35	56.46
气体碳	5000	-0.0005	0.03	0.02
德银(18%Ni)	33	0.0004	5.2	3.0
金	2.44	0.0034	70.7	41.0
铁(99.8%纯)	10	0.005	17	10.0
铅	22	0.0039	7.8	4.5
镁	4.6	0.004	38	22
锰铜(锰镍铜合金)	44	0.00001	3.9	2.3
汞	95.783	0.00089	1.8	1.044
钼(拉拔)	5.7	0.004	30	17.5
锰乃尔合金	42	0.002	4.1	2.4
镍铬合金	100	0.0004	1.72	1.0
镍	7.8	0.006	22	12.8
钨	11	0.0033	16	9.1
磷青铜	7.8	0.0018	22	12.8
铂	10	0.003	17	10
银	1.59	0.0038	108	63
锰钢	70	0.001	2.5	1.43
	15.5	0.0031	11.1	6.5
西罗铜铝锰合金	47	0.00001	3.7	2.1
锡	11.5	0.0042	15.0	8.7
钨(拉拔)	5.6	0.0045	31	17.9
锌	5.8	0.0037	30	17.2
钢(最高质量)	10.4	0.005	16.6	9.6
钢(滚珠轴承)	11.9	0.004	14.5	8.4
钢(平炉)	18	0.003	9.6	5.6

3. 影响金属导电性的主要因素

影响金属导电性的因素很多,主要有温度、应力、形变以及热处理等。

(1) 温度的影响 温度升高,导致自由电子与金属晶格中的正离子碰撞加剧,使电阻增大。当温度接近熔点或接近 0K 时,电阻与温度呈线性关系:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1-5)$$

式中 R —— 温度 T 时的电阻;
 R_0 —— 温度 T_0 时的电阻;
 α —— 电阻温度系数。

电阻温度系数随所选择的起始温度 T_0 而异。当电阻率与温度呈线性关系时, 对不同起始温度的电阻温度系数, 可用下式进行换算

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1(T_2 - T_1)} \quad (1-6)$$

式中 α_1 、 α_2 —— 温度 T_1 、 T_2 时的电阻温度系数。

由于金属在熔化时点阵的规律性被破坏了, 原子之间的键也有所变化, 所以熔化金属的电阻比固态时大 2 倍, 而且液态金属的电阻还随温度的升高而增大。

(2) 杂质的影响 纯金属具有规则的晶格, 因此电阻率 ρ 很小。杂质, 即使含量极少, 也会导致金属晶格的畸变, 造成电子散射, 使电阻率增加。

(3) 应力的影响 在弹性范围内单向拉伸或者扭转应力能提高金属的电阻率 ρ , 并存在下面的关系:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha_r \sigma) \quad (1-7)$$

式中 ρ_0 —— 无负荷时的电阻率;
 α_r —— 应力系数;
 σ —— 拉应力, 单位是 Pa (或 N/m^2)。

显然, 应力使电阻率增加了, 其原因是在拉伸时应力使原子的间距增大了。

但是在单向压应力作用下, 对于大多数金属来说使电阻率降低。如果此时的电阻率为 ρ_p , 则它和压应力间存在如下关系

$$\rho_p = \rho_v(1 + \varphi p) \quad (1-8)$$

式中 ρ_v —— 真空下的电阻率;
 p —— 压力, 单位是 Pa;
 φ —— 压力系数, 是负值。

在压应力作用下电阻率降低可用原子振幅的减小来解释。

(4) 形变的影响 金属冷加工引起的变形对电阻亦有影响, 其原因是冷加工使晶体点阵发生了畸变或产生缺陷, 造成电场的不均匀性, 从而导致电子波散射的增加。当冷变形度超过 10% 时, 电阻稍有增加, 通常纯金属由冷变形引起的电阻率的增加约为 2%~6%。

(5) 热处理的影响 导电金属经冷变形后, 强度和硬度增高, 导电性降低。退火后, 其电导率可得到恢复。退火温度对硬铜线电导率的影响见图 1-1

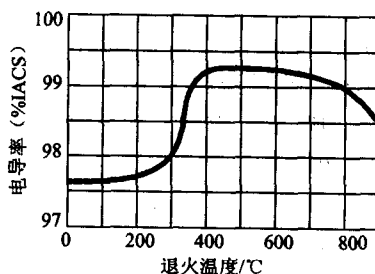


图1-1 退火温度对硬铜线电导率的影响 (铜99.92%, 冷变形度90%)

所示。

4. 典型材料的导电性

涡流检测是一种适用于导电材料质量检测的电磁检测技术。下面从涡流检测的机理和某些物理现象的应用对该检测方法适用材料的导电性作一介绍。

橡胶、油漆、金属氧化物、塑料、搪瓷等是涡流检测中会遇到的非导电材料，这些材料常被涂敷于导电材料表面，具有防止内部金属腐蚀的保护作用。搪瓷，又称“珐琅”，是一种由石英、长石、硝石和碳酸钠等加上铅和锡的氧化物涂于钢质、铜质或银质器物表面经烧制而成的具有不同颜色的保护层。金属氧化物虽由金属经氧化而得，但由于金属原子外层起导电作用的自由电子被氧原子“俘获”而形成氧化物，从而失去导电性。虽然某些金属氧化物，如采用电化学方法形成的 Al_2O_3 的阳极氧化膜层，仍然具有良好的金属光泽，因其完全丧失了导电性而成为一种典型的非导电材料。

银、铜、铝、铁、钛是工程上常见的金属材料，具有良好的导电性。但就纯金属而言，这些金属的导电能力依照上述列出的顺序依次降低，当对于更广泛应用的合金材料来说，导电能力会发生很大的变化。如退火状态下纯铜的电导率为 58MS/m ，而康铜的电导率仅为 2.0MS/m ；同样纯银的电导率为 63MS/m ，添加 18% 的镍经合金化形成的德银电导率也只有 3.0MS/m ；铝及铝合金的电导率范围约为 $8\sim 36\text{MS/m}$ ，其中导电性最差的是铝合金，纯铝的电导率最高，为 36MS/m ；钢的电导率范围约为 $5\sim 10\text{MS/m}$ ，其导电性一般优于钛合金，钛合金的电导率变化范围约为 $0.5\sim 2\text{MS/m}$ 。

石墨是碳的一种同素异构体，由于原子结构排列的特殊性，石墨材料具有一定的导电能力，与硅、锗元素同属半导体。以石墨（碳）纤维为增强体的树脂基复合材料在工程上有着广泛应用，正是由于其具有导电特性，因此国内外有一些采用涡流技术检测石墨及其复合材料制品的文献报导。

1.3.2 材料的磁特性

1. 物质的磁性

磁性是物质的基本属性之一。当外磁场发生改变时，物质的能量也随之改变，这时就表现出物质的宏观磁性；从微观角度看，物质中带电粒子的运动形成了物质的元磁矩，当元磁矩取向为有序时，便形成了物质的磁性。

根据物质磁化后对磁场的影响，可以把物质分为三大类：使磁场减弱的物质称为抗磁性物质；使磁场略有增强的物质称为顺磁性物质；使磁场剧烈增加的物质称为铁磁性物质。抗磁性物质的磁化率 χ 为负（数量级约为 $-10^{-6}\sim -10^{-3}$ ），顺磁性物质的磁化率 χ 为正（数量级约为 $10^{-6}\sim 10^{-2}$ ），而铁磁性物质的磁化率 χ 很大。抗磁性物质有氢、水、金、银、铜、铋等；顺磁性物质有氧、空气、铝、铂等，在较高温度下（高于居里温度），铁、镍和钴也具有顺磁性；铁磁性物质有铁、镍和钴。

物质的磁性是由电子循轨和自旋运动产生的。众所周知，物质是由原子组成的，而原子则是由原子核和电子构成。近代物理证明，每个电子都参与两种运动，即环绕原子核的运动和电子本身的自旋运动。这两种运动都可看作为形成了一个闭合电流，由此产生了一个个磁矩，形成了磁效应。电子绕核运动产生的磁矩称为轨道磁矩，而电子的

自旋运动产生的磁矩称作为自旋磁矩。那么原子有没有磁矩呢？理论证明，当原子中一个电子层已经排满时，这个层电子磁矩的总和就等于零，该原子就没有磁矩；若一个原子的电子层未被排满，电子磁矩的总和就不为零，该原子就有了磁矩。当原子结合成分子时，它们的外层电子磁矩就发生变化，所以分子磁矩并不是各单个原子磁矩的总和。由于不同的原子具有不同的磁矩，故当由这些原子组成不同的物质时，物质就表现出不同的磁性。

通常在无外加磁场时，物体本身内部电子的自旋和轨道磁矩和为零，所以物体对外不显磁性。但如对物体加上一个外磁场，物体被磁化后就会表现出一定的磁性。

2. 磁畴

铁磁性的基本特点是自发磁化和磁畴。由于物质内部自身的能量，使任一小区域内的所有原子磁矩都按一定规则排列起来的现象，称为自发磁化。目前已经十分清楚，自发磁化的原因是由于相邻原子中电子之间的交换作用。当原子相互接近时，它们的电子就要发生相互的交换，并由于电子的交换作用而产生一定的交换能，从而使小区域内的所有原子磁矩按一定规则排列。电子间的这一交换作用直接与电子自旋之间的相对取向有关。

人们不禁要问：既然铁磁物质的任一小区域内，由于自发磁化，所有原子磁矩都朝一个方向排列了，为什么除了磁铁（吸铁石）以外的其他铁磁物质却不具有自发吸铁的本领呢？也就是说，这些铁磁物质的总磁矩为什么不显示出来对外表现出磁性呢？这是因为铁磁物质内部存在磁畴。在铁磁物质的内部，分成了许多小的区域，这些小的区域就称为磁畴。图 1-2 为铁磁体某一截面上的磁畴示意图。虽然每一个小区域内的原子磁矩都整齐地排列起来了，但这些小区域的磁矩分别取不同的方向，因此，所有小区域的磁矩叠加起来仍然为零，即总磁矩为零。这样从铁磁体的整体来看，磁化强度为零，对外不显示磁性，如图 1-3a 所示。

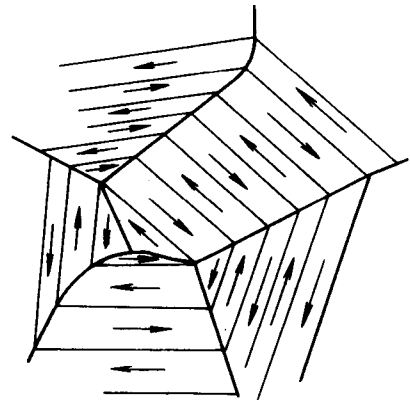


图 1-2 磁畴示意图

如果将铁磁性物质置于外磁场中，磁场作用使磁畴的磁矩从各个不同的方向转到接近磁场的方向或与磁场的方向一致，因此对外呈现较强的磁性（见图 1-3b 和 1-3c 所示），这一过程就是磁化过程。

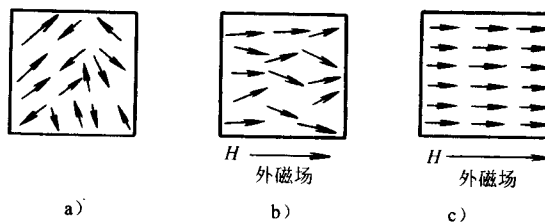


图 1-3 铁磁物质在磁场中磁矩改变示意图

a) 未磁化时 b) 未磁化到饱和时 c) 磁化到饱和时

磁畴与磁畴之间有一过渡层，称为畴壁，其厚度约等于几百个原子间距。磁畴的形