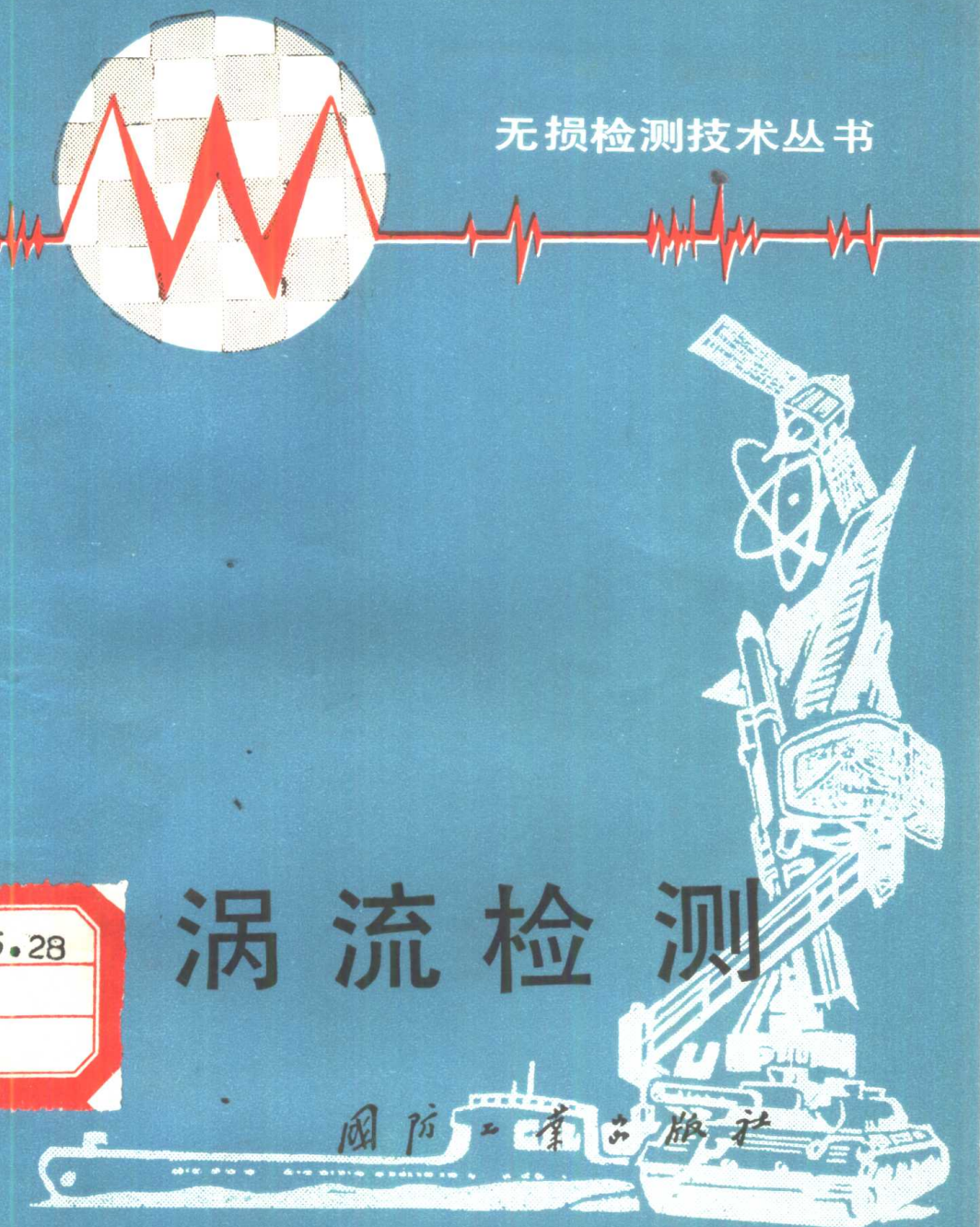


无损检测技术丛书

涡流检测

国防工业出版社

5.28



7

无损检测技术丛书

涡流检测

任吉林 吴礼平 李 林 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍涡流无损检测技术,包括涡流检测发展简史、基础知识、基本原理、检测仪器和主要用途等内容。

全书力求通俗易懂、深入浅出、简明和实用。可供从事无损检测专业工作的工人、技术人员及管理人员阅读。书中所介绍的仪器、检测对象和目的等资料,大部分取材于航空工业应用实践,但对冶金、机械、核能等工业同样有参考意义。

无损检测技术丛书

涡 流 检 测

任吉林 吴礼平 李 林 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张37/8 83千字

1985年10月第一版 1985年10月第一次印刷 印数: 0,001—1,770册

统一书号: 15034·2927 定价: 0.83元



前 言

无损检测是一门新兴的综合性科学技术。它以不损坏被检对象的使用性能为前提，应用物理和化学知识，对各种工程材料、零部件和产品进行有效的检验和测试，借以评价它们的完整性、连续性、和其它物理性能。无损检测是实现质量控制、保证产品安全可靠、节约原材料、改进工艺、提高劳动生产率的重要手段，目前已成为产品制造和使用中不可缺少的组成部分。

现代科学技术的发展，为无损检测提供了新的理论和物质基础。目前能够在生产中应用的已有五十多种检测方法，在一些领域中还实现了由电子计算机控制的自动化。在我国实现四个现代化的进程中，无损检测技术的应用已日益受到重视，并有着广阔的发展前景。

为普及和推广无损检测技术，我们编写了一套《无损检测技术丛书》。这套丛书有如下十一个分册：

- 超声检测；
- 射线检验；
- 磁粉检验；
- 涡流检测；
- 渗透检验；
- 声发射检测；
- 激光全息检验；
- 微波检测；

红外检测；

胶接结构与复合材料的无损检测；

无损检测自动化与信息处理。

编写这套丛书所选取的资料，一部分来自生产、科研实践；一部分参阅了国内外有关的技术书刊。在编写过程中，曾得到编写组各成员所在单位的大力支持。本分册的编写还得到高春法等同志的积极帮助，陈小泉同志审阅了书稿，在此一并表示感谢。

由于水平所限，书中缺点错误在所难免，欢迎读者批评指正。

《无损检测技术丛书》编写组

目 录

概述	1
一、什么是涡流检测	1
二、涡流检测发展简史	4
涡流检测的基础知识	7
一、金属的导电性	7
二、金属的磁性	12
三、电磁感应基本定律	19
四、自感和互感	21
五、涡流和趋肤效应	27
涡流检测的基本原理	31
一、线圈的阻抗	31
二、有效磁导率和特征频率	37
三、含导电圆柱体线圈的复数阻抗平面图	45
四、影响线圈阻抗的因素	50
五、其他形式线圈的复数阻抗平面图	55
涡流检测仪器	61
一、涡流检测仪线路分析	61
二、涡流检测线圈	68
三、常用的涡流检测仪器	72
涡流检测的应用	82
一、涡流检测技术	82
二、对比试件和标准	85

三、涡流探伤	89
四、材质试验	100
五、厚度测量	106
附录一、近期国外电磁涡流仪简介	112
附录二、国内外部分涡流仪性能表	116
附录三、涡流检测应用范围	118

概 述

一、什么是涡流检测

由于电磁感应，当金属处在变化着的磁场中或相对于磁场运动时，金属体内会感生出呈旋涡状流动的电流，称为涡流。

涡流在金属体内流动时，由于金属存在电阻，便会产生楞次-焦耳热。工业上利用这种热效应制成高频感应电炉来冶炼金属。高频感应电炉实际上是一个外缘绕有线圈的坩埚。当线圈同大功率的高频交流电源接通时，载流线圈会激发很强的高频交变磁场，这时，放在坩埚中待冶炼的金属便产生涡流，涡流加热金属直至熔化。

涡流产生的热有时也非常有害。例如在电机和变压器中采用整体铁心，当线圈通过交变电流时，该铁心就会产生涡流。涡流产生的热在介质或空气中散失，这不仅白白损耗了大量的电能（叫做涡流损耗），而且设备本身也容易损坏。因此，为了减小涡流损耗，通常在变压器或电机中，均采用迭合的涂有绝缘漆的硅钢片来代替整体铁心。

在另外一些场合，我们还可以利用涡流产生的阻尼作用。如果把金属做成的摆放在电磁铁的两个磁极之间。当电磁铁线圈中不通过电流时，金属的摆动要经过较长时间才会停下来，一旦电流接通，金属的摆动便会迅速停止，这就是涡流的电磁阻尼作用。在许多电磁测量仪表中安装的使指针摆动

迅速稳定下来的阻尼器，以及电气火车使用的电磁制动器等都是利用类似的电磁阻尼效应。

涡流检测是以电磁感应为基础的，它的基本原理可以描述为：当载有交变电流的检测线圈靠近导电试件时，由于线圈磁场的作用，试件中会感生出涡流。涡流的大小、相位及流动形式受到试件导电性等的影响，而涡流产生的反作用磁场又使检测线圈的阻抗发生变化，因此，通过测定检测线圈阻抗的变化，就可以引出被检测试件的导电性差别及有无缺陷等的结论。

涡流检测不需要改变试件的形状，也不会影响试件的使用性能，因此，是一种无损地评定试件有关性能和发现试件有无缺陷等的检测方法。

涡流检测只适用于能产生涡流的导电材料。同时，由于涡流是电磁感应产生的，在检测时，不必要求线圈与试件紧密接触，也不必在线圈和试件之间充填耦合剂，从而容易实现自动化检验。对管、棒、丝材表面缺陷，涡流检查法有很高的速度和效率。

涡流及其反作用磁场对代表金属试件物理和工艺性能的多种参数有反应，因此是一种多用途的试验方法。然而，正是由于对多种试验参数有敏感反应，也就会给试验结果带来干扰信息，影响检测的正确进行。

对试件中涡流产生影响的因素主要有：电导率（或电阻率）、磁导率、缺陷、试件的形状尺寸和线圈与试件之间的距离等。因此，涡流检测可以对试件进行电导率的测定、探伤、厚度测量及尺寸与形状的检查等等。表1列举了涡流检测的某些用途，其中，探伤、材质试验和厚度测量是本书主要介绍的内容。

表 1 涡流检测的几种应用

试验种类	影响涡流的因素	用 途
探 伤	缺陷（形状、尺寸、位置）	导电材料（管、棒、丝材等及零件）的缺陷检查
材质试验	电导率	非磁性材料的电导率测定及有关的材质试验
测 厚	导体-线圈间距离	金属上膜层厚度的测量
	薄板的厚度	金属薄板厚度的测量
尺寸试验	尺寸、形状	尺寸、形状之类的控制
位移、振幅等测量	试件-线圈间距离	导电试件的径向振幅、轴向位移及运动轨迹的测量

值得注意的是，由于感生涡流渗入被检试件的深度与频率的平方根成反比，这个深度不大，因此，涡流检测通常被认作是一种检测表面或近表面质量的无损检测技术。常用的试验频率范围可以从几周至几兆周（特殊的高达近百兆周）。

应用涡流法还可以对高温状态下的导电材料进行涡流检测，如热丝、热线、热管、热板。尤其重要的是，加热到居里点温度以上的钢材，检验时不再受磁导率的影响，可以像非磁性金属那样，用涡流法进行探伤、材质试验以及棒材直径、管材壁厚、板材厚度等测量。

在工业生产中，涡流检测能广泛地应用于各种金属制件（如管、棒、线、板、坯材以及各种机械零件等）和少数非金属导电材料（如石墨、碳纤维复合材料）。根据检测目的的不同，可以应用于成品检验、工艺检验、维修检验等各个品质管理环节。

与其他无损检测方法相比，涡流检测的主要优、缺点

如下:

优点:

- (1) 对导电材料的表面或近表面检测有良好的灵敏度;
- (2) 适用范围广, 能对导电材料的缺陷和其他因素的影响提供检测的可能性;
- (3) 在一定条件下, 可提供裂纹深度的信息;
- (4) 不需要耦合剂;
- (5) 对管、棒、线材等便于实现高速、高效率的自动化检测;
- (6) 适用于高温及薄管、细线、内孔表面等其他检测方法难以进行的特殊场合下检测;
- (7) 试验结果可同时得到, 记录能长期保存。

缺点:

- (1) 只限于导电材料;
- (2) 只限于表面和近表面的检测;
- (3) 干扰因素多, 需要特殊的信号处理;
- (4) 对复杂形状的零件进行全面检测时效率低;
- (5) 探伤时, 难以判断缺陷的种类和形状。

二、涡流检测发展简史

涡流检测技术基本原理的建立和发展起源于早期电磁学的发现。

早在1824年, 加贝 (Gambey) 就发现: 如果在悬挂着而且正在摆动的磁铁下方放一块铜板, 磁铁的摆动会很快停止下来。从而在世界上第一个提出了电涡流存在的实验。几年以后, 傅科 (Foucault) 在研究了这些电磁现象后指出: 在强的不均匀磁场内运动的铜盘中有电流存在。因此, 涡流

在一段时间内叫傅科电流。

1831年，法拉第 (Faraday) 在许多人进行的电磁实验的基础上，发现了电磁感应现象——变化的磁场能产生电场，并总结出电磁感应定律。他的这个发现不仅是整个电工学，也是整个电学的主要基础之一。如果用电磁感应现象从理论上解释加贝实验的问题，可见是由于金属中出现涡流所产生的结果，而涡流则是磁场变化感生的感应电流。因此，电磁感应现象一直是用来阐述涡流试验基本原理所依据的重要的客观规律。

在电磁感应现象发现以后，由于人们的广泛努力，对电磁现象的试验研究和对电磁基本理论问题的数学分析都获得了巨大的进展。到1873年，麦克斯韦 (Maxwell) 系统地总结了前人有关电磁学说的全部成就并加以发展，得出了一组以他的名字命名的新的电磁方程组。这组著名的麦克斯韦方程组严整地描述了一切宏观的电磁现象，是解决大多数电磁学问题的基本理论工具，也是分析涡流试验方法的理论基础。

有关涡流检测的实际应用是在1879年，休斯 (Hughes) 首先用感生电流的方法进行了对不同金属和合金的判断试验。他利用钟的嘀嗒声在微音器里产生激励信号，得到的电脉冲通过一对彼此相同的线圈并使放在线圈里的金属物体感生涡流。在用电话听筒谛听这个嘀嗒声的同时调节一个平衡线圈系统，使话筒里的嘀嗒声消失。休斯发现，当金属材料的形状、大小和成分不同时，平衡线圈所需调节的程度不同，从而，揭示了应用涡流对导电材料和零件进行检测的可能性。

从休斯以后的一段长时间内，涡流检测法一直发展缓慢。

尽管在二十世纪二十年代中期又出现了涡流测厚仪，第一台涡流探伤仪（用于检验焊接钢管质量）也于1935年研制成功，但是，直到第二次世界大战期间，德国和美国等少数国家的研究单位和大企业里才开始应用少量实用化的涡流检测设备。例如，1942年，德国的某航空工厂借助于西普研制的仪器对进厂的铝、镁合金管材和棒材进行100%的自动化检查。由于这一时期各种试验参数对涡流检测的影响在理论上的研究还很不充分，未能找到抑制干扰因素的有效方法，因而，没有从根本上取得有成效的突破和改进。

1950~1954年，德国的福斯特（Foerster）博士发表了一系列论文，其中包括消除涡流仪中某些干扰因素的理论 and 试验结果，开创了现代涡流检测方法和设备的研究工作。从此，涡流检测技术有较快的发展并为生产检验所采纳，各种类型和用途的涡流仪器相继出现于国际市场。近年来，涡流检测技术已成为几种基本无损检测技术中的一个重要组成部分。

随着当代的电子技术，尤其是计算机技术和信息理论的飞速发展，涡流试验法亦受到深刻的影响并展现出新的前景，已经生产和正在研制各种性能更加完善的涡流检测设备。

六十年代初期我国少数单位开始重视对涡流检测技术的研究。虽然我国底子薄、起步晚，但是，在有关所、厂工作人员的努力下，开展了对涡流检测基本理论和应用技术的研究，制成了用于探伤、材质分选、测厚等各种用途的涡流检测设备，建立了涡流仪器生产的专业工厂，在航空、航天、冶金、机械、化工、轻工等许多工业部门，涡流检测技术的应用已日益增多并日趋成熟。可以预期，随着工业生产和科学技术的进步，涡流检测技术将受到更广泛的重视。

涡流检测的基础知识

一、金属的导电性

人们很早就认识到自然界存在着“电荷”这种物质。而且还认识到，凡是有电荷的地方，周围就存在着电场。

电场的基本性质是，对处在场中的任何其他电荷都有作用力（同性相斥、异性相吸），称为电场力。同时，当带电体（或电荷）在电场中移动时，电场力要对它做功，这表示电场还具有能量。

电场强度 E 是表示电场具有力的性质的物理量，是个矢量。电场中某点的电场强度，大小等于单位电荷在该点所受的力，方向和正电荷在该处所受的电场力方向一致。单位是伏特/米。

表征电场能量性质的物理量叫电位，是个数量，用 U 表示。电场中某点 P 的电位，它的大小等于单位正电荷从该点移到无限远处时电场力所做的功。而电场中 a 、 b 两点之间电位的差叫做电位差，也叫电压，用 U_{ab} 来表示。电位和电压的单位都是伏特。

自然界中的物体按照电荷在其中是否容易转移或传导可以分为导体、绝缘体和半导体三类。凡是能够迅速转移或传导电荷的物体叫导体，如金属、石墨等；几乎不能转移或传导电荷的物体叫绝缘体，如橡胶、玻璃等；而介于两者之间的叫半导体，如硅、锗等。

金属为什么容易导电呢？人们知道，任何物质都由分子组成，而分子由原子组成，原子由带正电的核和带负电荷的电子组成。电子受到原子核的引力作用，在核的周围按照一定的规律分层排列，围绕着核作旋转运动。但是，在金属中，最外层的电子数比较少，受核的引力小，很容易挣脱核的束缚而成为自由电子。所以，在金属中存在着大量的自由电子。在一般的状态下，自由电子不断地作不规则的热运动，不断地和金属点阵碰撞，各个方向上的平均速度为零。从宏观上看，电荷不能成为有规则的定向运动，金属中并没有电流流过。如果在金属的两端提供电位差，就会在金属中产生电场。于是，自由电子在这个电场的作用下就会从低电位移向高电位，从而形成电流。由于在金属中自由电子的数量多，很容易发生电荷的移动，因此，金属容易导电。

实验证明，沿着一段金属导体流动的电流与其两端的电位差（即电压）成正比。这就是著名的欧姆定律，即

$$I = \frac{U_1 - U_2}{R} = \frac{U_{12}}{R} \quad (1)$$

式中比例系数 R 为这段导体的电阻，它表征了这段导体对电流通过的阻碍作用，与导体的材料及几何形状有关，单位是欧姆。

对于给定材料的一段导体，它的电阻与长度（ L ）成正比，与横截面积（ S ）成反比，即

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2)$$

式中 ρ 是一个仅与导体材料有关的物理量，叫材料的电阻率，单位是欧姆·米。很显然，导体的电阻率是很小的。

电阻率的倒数 $1/\rho$ ，称为电导率，用 σ 表示，是用来评价材料导电性能的另一个物理量。它的单位是西门子/米。

在一般工程技术中，电导率的常用单位是 $\text{米}^2/\text{欧姆}\cdot\text{毫米}$ 、 $1/\text{微欧}\cdot\text{厘米}$ 和IACS单位（国际退火铜标准）。IACS单位规定经过退火的、非合金化的铜（电阻率为 1.724×10^{-8} 欧姆·米）的电导率作为100% IACS，而其他金属的电导率则用它的百分率表示。例如，电阻率为 ρ_x （ $\times 10^{-8}$ 欧姆·米）的金属，如以IACS单位表示，其电导率可由下式求得

$$\sigma = \frac{1.724}{\rho_x} \times 100\% \text{ (IACS)} \quad (3)$$

金属为什么会有电阻呢？我们知道，金属是由原子按照一定的规则格子整齐排列结晶而成的，这种规则的格子叫做晶格。自由电子在电场的作用下，获得加速作定向运动中，由于不断地与原子碰撞以及它们之间的相互碰撞，速度会减慢，因此，对于电流的通过存在着一定的阻力，这种阻力就称为电阻。

由于金属电阻是由电子的碰撞引起的，因此，当金属内原子按规则整齐排列时，电子受到的碰撞次数减少，电阻也相对降低（即电阻率小，电导率高）。单晶或是经过充分退火的高纯度金属，晶格规则，属于这种情形。相反地，如果在金属中掺入杂质而成为合金，晶格由于掺入杂质原子而变形，或者，金属经冷作加工、热处理后，由于存在内应力而使晶格变形，这时，电子受到的碰撞次数就增加，电阻率也会上升。

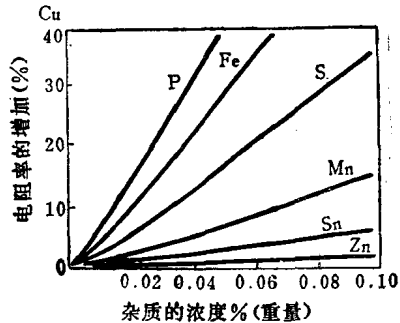


图1 铜的电阻率随杂质含量的变化

图1表示纯铜加入少量杂质时电阻率变化的情形。从图

上可以看出，电阻率与杂质含量大体上是成比例增加，并且随着杂质元素的不同而效果不同。

对于固溶合金（杂质在基体金属中均匀分布），一般来说，电阻率是随合金含量而增大的。在含两元素的合金里，如果一元素的原子浓度为 p ，则电阻率的变化正比于 $p(1-p)$ 。但是，当合金的原子以一定的比例排列成非常规则的晶格时，电阻率会有极小值。图 2 表示由 Cu 和 Au 组成的合金。图中曲线 a 表示无序固溶体结构（即 Cu、Au 原子的置换无一定规律）淬火合金的电阻率变化曲线；曲线 b 相应于有序固溶体结构（原子置换遵循一定规律）淬火合金的电阻率，它表明在组成 Cu_3Au 和 CuAu 有序合金时电阻率出现极小值。

图 3 是金属（铜线）冷作加工时电阻率的变化曲线，电

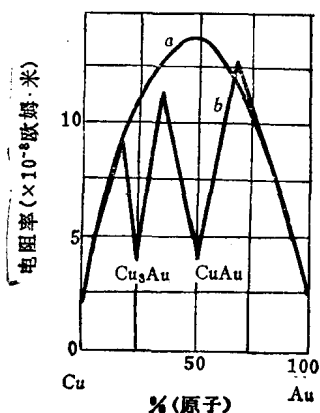


图 2 合金的电阻率

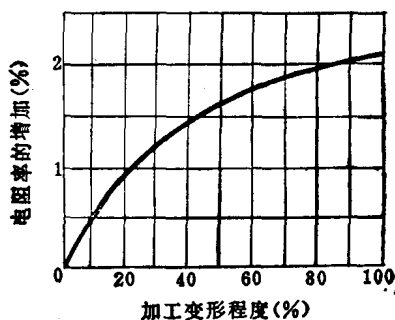


图 3 冷拉铜线的电阻率随加工变形程度变化的情况

阻率随加工变形程度有所增大。然而，这种冷作加工的金属在经过退火之类的高温长时间加热、消除了晶格变形之后，