

无损检测的 原理和方法

李作新 主编



云南大学出版社

无损检测的原理和方法

李作新 主 编

※

云南大学出版社出版

云南大学校内

※

云南大学出版社印刷厂印刷

787 × 1092 16 开本 21.5 印张 532 千字

1989 年 3 月第一版 1989 年 3 月第一次印刷

印数 0001 — 3000 册

书号: ISBN 7-81025-009-4 / O · 1

定价: 7.00 元

出版说明

本书是受无损检测技术地区材料学科委员会的委托编写的。全书共十章，其中第一、七、八、九章由李作新编写，第二章由涂良培编写，第三、十章由李作新、涂良培编写，第四章由尹龙骧编写、李作新修订，第五、六章由杨云、徐家振、李作新编写，全书由李作新总编，本书得到云南省物理学会办公室主任张炳炎同志的大力支持。

内容提要

本书系统地介绍了各种无损检测技术的物理原理、方法和工艺特性、应用及其发展；力图以简明通俗的语言，深入浅出地描述各种检测方法和检测基础理论。内容包括射线、超声、磁粉、涡流、渗透、微波与红外、声发射等，以上为第一册。激光全息与超声全息显示、液晶、磁效应、离子散射、中子衍射、俄歇能谱、核磁共振、无反冲核的共振吸收、正电子湮没、应变技术、内摩擦和泄漏检定等，以上为第二册。可供从事材料科学、物理测试及无损检测的广大科技人员阅读，亦可选作院校及专科无损检测专业教材，并供有关工程设计、工艺施工及质量检定人员阅读和参考。

国际无损检测协会司库（秘书长）

巴丁先生为本书出版所写的贺词:

I am very glad to know that the scientists of china of the occupational trade for me who had compiled teaching material whose name be called 'The principle and method of non-destructive testing', it will be bring benefit to the scientific and technical personnel of NDT and to the benefit of the modern socialist construction of china which the book be published, and accept a congratulation with me please, very thanks.

A.E. Bardin

Jan. 13. 1986

欣悉我的同行、中国的科学家编著了《无损检测的原理和方法》教程。这部书的出版将造福于从事无损检测技术的科技人员和有益于现代中国的社会主义建设事业。请接受我的祝贺和谢意。

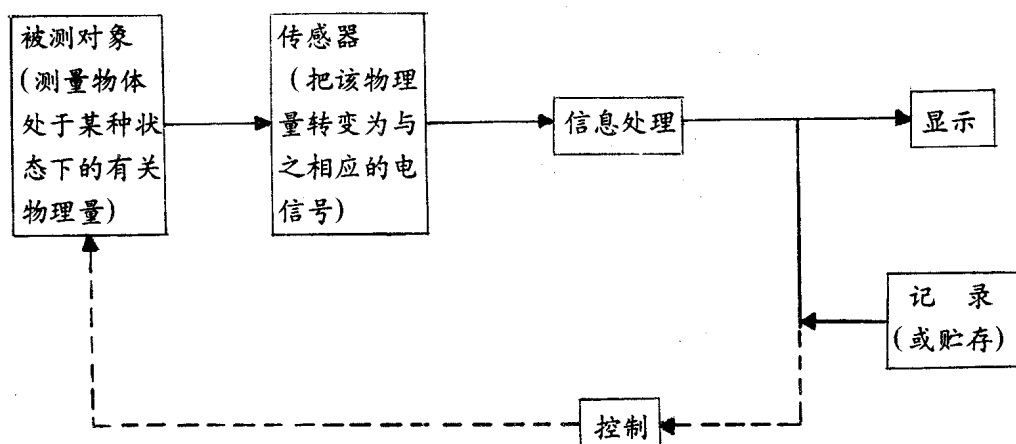
A.E.巴丁（签名）

1986.1.13.

序 言

检测技术是一门既古老又处于迅速发展阶段的新兴学科，是任何科研工作、生产实践必不可少的手段，其重要性已为人们所熟知。近年来发展起来的无损检测技术则是一项新颖的综合性测试技术，所谓无损，即非破坏性，从而具有快速、实时、高精度、稳定可靠等优点，且便于使检测过程向自动化方向发展。

通常一个比较完善的测试系统，如用一个简化模式来表示，即：



其中，信息处理、显示、记录（或贮存）、控制等系统，一般采用成熟的电子技术和计算机控制。一台测试系统的优劣和测试结果的成败，其关键在于与之相应的先进传感器的采用和对被测目标的有关物理现象、物理规律有深刻的认识，这就不可避免地要求研制测试系统的设计人员和从事测试工作的有关人员，必须具有比较雄厚的物理知识，并随时关注当前新技术的发展现状与发展趋势。

本书较为突出的优点是以物理观点贯穿全书，从物理基础出发，全面而系统地分析、阐述了各种无损检测技术所依据的基本原理、测试方法、工艺特点以及一些具体的典型应用实例。对于与被检测对象有关的一些物性方面的知识，作者也从宏观现象和微观机理两方面进行了必要的介绍，全书采用这样的处理方法是十分必要的，将使初学者便于自学，给有关从事测试技术工作的研究人员带来工作上的方便，是一本既有一定理论分析，又有实验方法和典型应用实例相结合的著作。

本书的另一特点是涉及面广、内容新颖，除了对一些目前工程技术上常用的测试方法进行了深入的讨论之外，还尽量详尽地介绍了这一新兴技术学科领域的成就和发展，熟悉这些新方法的有关知识，掌握测试和研究的手段。例如，应用射线检测材料缺陷方面的研究，声发射对材料的成分、结构和质量控制方面测试方法的阐述，激光全息图象和超声成象技术在材料的应力分析、缺陷探测等方面的应用，红外热象技术在工程热物理方面的应用，以及液晶检测技术、巴克好森效应、俄歇谱和穆斯堡谱、正电子湮没等等新技术的应用都作了系统的讲解，这些内容的选取与当前无损检测技术的发展趋势是一致的。随着科学的发展，可以相信，光测技术以及其它近代测试技术必将在今后的科学研究中和生产实

践中发挥重要作用，这是指日可待的。

本书内容全面、丰富，通俗易懂，可作为高等院校有关专业的教材，也值得从事科研、生产的科技人员参考。

焦善庆

1986年2月20日

于西南交通大学

目 录

第一章 绪 论

第一节	概述.....	(1)
第二节	有益的回顾.....	(2)
第三节	发展花絮.....	(4)
第四节	无损检测的近代物理学方法拾迹.....	(6)
第五节	发展前景	(11)

第二章 超声波的物理性能

第一节	振动和波	(13)
第二节	声波及超声波	(17)
第三节	超声波的特征量	(24)
第四节	分贝 (dB) 单位	(26)
第五节	超声波的传播速度	(27)
第六节	超声波的界面效应	(30)
第七节	超声场	(47)
第八节	超声波的衰减	(60)

第三章 超 声 检 测

第一节	压电效应与超声波换能器	(65)
第二节	检测方法	(76)
第三节	缺陷的定位	(79)
第四节	缺陷的定量	(84)
第五节	非金属材料探伤	(97)
第六节	超声波检测的推广应用.....	(107)
第七节	自动化检测.....	(112)

第四章 射 线 检 测

第一节	X-射线源	(127)
第二节	放射性同位素辐射源.....	(129)
第三节	射线产生的机制.....	(131)
第四节	射线与物质作用.....	(138)
第五节	电离与荧光作用.....	(144)

第六节	增感屏.....	(148)
第七节	X-光胶片暗室处理	(150)
第八节	工业 X-射线无损检测	(159)
第九节	γ -射线探伤	(178)
第十节	加速器与高能射线检测.....	(179)
第十一节	中子照相.....	(182)
第十二节	电离辐射的计量及其防护.....	(183)

第五章 涡流检测

第一节	基本原理.....	(193)
	1.电磁感应	(194)
	2.测试线圈的信号	(195)
	3.测试线圈的阻抗函数和阻抗图	(198)
第二节	涡流检测常用方法.....	(204)
第三节	涡流检测常用装置.....	(207)
	1.线圈型式	(207)
	2.涡流场测量装置	(209)
	3.涡流表示法的分析	(212)
第四节	涡流检测法的选择.....	(213)
	1.确定最佳频率	(213)
	2.仪器选择	(214)
	3.测试线圈的选择	(214)
	4.自动扫描	(214)
	5.参考标准的调整	(215)
	6.灵敏度的建立	(215)
	7.指示法的解释和测试	(215)
	8.周期性检查	(216)
第五节	多频涡流检测.....	(216)

第六章 磁 法 检 测

第一节	磁法的物理原理.....	(221)
	1.磁感应场的磁力线和磁通密度	(224)
	2.物质的磁特性	(228)
	3.钢铁材料的磁学性质	(231)
	4.磁滞回线	(232)
	5.磁路	(232)
	6.磁场的扰动	(235)

	7. 磁场梯度对磁粉的作用	(235)
	8. 电流分布的扰动	(236)
	9. 磁强计探头	(236)
第二节	磁粉检测	(237)
	1. 最基本的探测步骤	(239)
	2. 规范和标准	(243)
	3. 磁痕的辨别和评价	(246)
	4. 磁粉探伤装置	(247)
	5. 漏磁探伤法与录磁探伤法	(249)
	6. 磁滞现象测量法	(251)
	7. 磁场扰动法	(253)
	8. 电流扰动法	(253)

第七章 液体渗透检测

第一节	物理原理	(256)
第二节	渗透体系	(259)
第三节	渗透检测方法	(262)
	1. 荧光渗透探伤试验法	(262)
	2. 着色渗透检测法	(265)
	3. 观 察	(266)
第四节	渗透检测的发展	(267)

第八章 热学和红外检测

第一节	基本原理	(268)
	1. 热传导	(268)
	2. 红外辐射	(270)
	3. 热检测器和方法	(272)
第二节	接触温度记录方法	(274)
第三节	非接触的温度记录法 红外成像	(278)
第四节	接触温度记录法的检测元件	(282)
第五节	非接触的温度测量装置	(283)

第九章 微波检测

第一节	微波的物理性质	(286)
第二节	微波检测的专门技术	(290)
第三节	检测设备	(293)

第四节	厚度的精密计量.....	(295)
第五节	不均匀性的检测.....	(297)
第六节	金属表面裂纹的微波检测.....	(300)
第七节	介电材料的化学组分.....	(301)
第八节	微波湿度分析.....	(302)
第九节	材料各向异性的微波测量.....	(302)
第十节	应用实例.....	(302)

第十章 声发射检测

第一节	声发射的形成.....	(305)
第二节	声发射换能器.....	(308)
第三节	声发射信号的表征.....	(311)
第四节	声发射检测实例.....	(316)
第五节	声发射监测在某些工业上的应用.....	(319)

第一章 绪 论

第一节 概 述

无损检测是一门研究在不破坏或损伤受检对象的前提下,测定和评价物质内部或外表物理和机械性能并包括各类缺陷和其他技术参数的综合性应用技术科学。无损检测的含意及其应用范围已日趋广泛,几乎发展并涉及到科学技术的各种领域。随着核能、航海、航空和宇航工业的发展,以及地貌变异的窥探和海洋湖底的开发,许多金属和非金属固体材料及它们的各种机械构件,因长期和经常运转于高温、高压、高速条件下并受到复杂外力或腐蚀性气氛等恶劣环境的影响,对其性能及质量要求越来越高。若构件和材料内部存在疵瑕或缺陷,可能会造成巨大破坏;如原子反应堆的爆炸、飞机和宇宙飞船的坠毁、船舰和核潜艇的沉没等。

然而,作为一项工业技术,无损检测只被局限于对材料和工件的探测和评估,利用它对工部件的完整性和可靠性方面提供必要的质量保证;例如使原材料在加工之前进行材质分选、控制和监督冷热加工工艺和零部件及整机的装配,同时对切削机理、磨削裂纹、焊接质量、铸锻件内部缺陷、热处理应力集中、表面镀涂层以及断裂机制等的测研,并使之与应力测量所采用的光弹性试验、材质的晶粒度测定、导磁和导电性测量、和热波能谱等的分析以获得可靠的物理和机械性能及其有用和相关的信息参数。无损检测作为一种测试手段而在工业部门中应用得最为广泛的却仍然是对产品质量的控制,即对工件中缺陷的检测,故也常称之为“无损探伤”。无损检测技术的兴起,最初只是按其检测形式所适应范围和所采用手段分别隶属于各个不同的科技领域;随着各类技术科学的发展、分化、综合和相互渗透,无损检测作为一门独立的测试方法体系曾取得了惊人的成效,它的重要性已日益为人们所熟知,于是其尽快地为现代技术成就所充实,逐渐成为一门富有生命力的新兴专门技术学科。按照其与实际结合的发展进程,人们在早期开始把无损检测方法分类为射线探伤、超声检测、涡流测试、磁粉检验、渗透探查、泄漏检测及目视等七种。从工业的常规检验出发,其更普遍地被分类为射线、超声、电磁涡流、磁力和渗透着色等五种。

现代无损检测的模式萌芽于工业革命之后数十年,其紧密联系近代科学技术,特别是与近代物理研究方法及其重大进展密切相关;物理学的成果为无损检测新技术的涌现提供了必要的基础,电子技术并促使它们的测试装备日臻完善。广为使用的无损检测方法还增添了声发射、微波、红外、全息照相和光弹显示等五种新的内容。随着技术猛进的时代步伐,新的模式仍不断出现,如电子顺磁共振—原子标度的应力测试、中子和电子衍射、无反冲核的共振散射和吸收、磁效应中霍尔讯息、巴克好森跃迁、场的扰动和位错的磁显示、激光诱发激波脉冲和正电子湮没等。依据统计,目前已有近五十种方法被列入无损检测的范畴,而其中许多方法暂时还处于继续完善和实验室阶段。

无损检测是以材料作为其主要探测对象的。作为新的技术革命支柱之一的材料科学,当前其变革的主要内容是:将以越来越多的人造复合新材料代替或逐步代替包括钢铁在内的天然材料;例如具有各向异性、且其性能是位置的函数,可被大量用于国防、航空和汽车工业的、由分子长链纤维、碳纤维和玻璃纤维编织成的复合材料,精密陶瓷和非晶质金属及合金,机性能高分子材料等;相应的无损检测技术将贯穿于这些材料的全部制造过程,为其设计和制造工艺提供关键信息,并实施对材料制品质量和功能控制。

由于生命科学、生态平衡、环境保护已逐渐成为重要的研究对象,无损检测的范围在继续扩大,不仅探测非生命的物质结构,原子、电子和核量程圈的信息,也将要考虑和考察活机体组织中生物大分子的结构和各种生命活动过程及生理信息。既应探明大型固体构件的缺陷因子,也要查出河流与海湖中所可能隐藏着的污染之源。因之,除继续完善并使更新现行无损测试方法外,仍将有新技术和与之相应的特殊工艺的崛起,例如与用声发射监测地质构造的同时,还要研究和测试影响预报地震的因素(诸如地震纵波速度之比、地磁、地电、地电阻抗,甚至来自动物的前兆信息等)。又如既引入 γ 射线的能谱,也研究激光脉冲效应;认识晶体结构多样性的同时,也考查生物系统所表现的晶态特征(虽然它应系从属于一般非平衡热力学范畴)。

在实际应用中,无损检测曾表现了既综合而又直觉的特点。随着科学的发展,尤其是将近代物理学研究成果运用于无损检测之后,便出现了以仪器为主要测试手段的检测方法,由于每一种方法都有其各自特色和不同的适用范围,都不可能包罗万象和相互取代,因之出现互相渗透、取长补短、不断综合的趋势。近些年来,更因近海石油工业的迅速发展,对近海结构物(如石油钻探生产平台架设)的无损检测也日益受到重视。为了检查这些水下结构或它们的水下部分,则需要采用不同于陆地上所使用的常规无损检测方法。

近几届世界无损检测学术会议的讨论中,有人认为,所有的无损检验方法的基础是物理场与材料结构之间的相互作用。而在无损检测中用得最多的是机械场、电磁场、磁场、电场和热场等。如果能够找出各个物理场的相互联系,得到物理场的统一表达,并将几种以不同物理场为基础的检验方法统一为一种方法,那么无损检测将被大大简化,其不仅可靠性会更高,而且通用性也更强。统观的考虑,这样的趋势似已出现,例如将超声场与声发射场综合成超声-声发射技术;将热场与电磁场综合成热像-红外检测技术;还有磁场与电场综合起来的漏磁-涡流联合检测、电磁场与超声场综合起来的磁的机械声讯号检测和激光-超声检测等。

第二节 有益的回顾

在日常生活中,拍击西瓜可以判断其是否成熟;医生用扣诊的办法去判辨病变部位。今天,仍然沿用敲击车轴的简单操作去检查机车车辆,这是用可听的声音或频响来辨别有生命机体和无生命物质的“创伤”或“缺陷”。从古代开始,人们在制作和使用材料的过程中需要了解材料及其制品的质量和性能,于是作为一种生产技能便产生了远古的无损检测技术。例如,为了鉴别陶瓷制品,陶工们用手指或小锤轻轻敲击,根据发出的声音就可判断

其疵裂。同样的方法亦为制铁的工匠所掌握。我国的《天工开物》一书，曾经记载：“凡釜既成后，试法以轻杖敲之，响声如木者佳，声有差响则铁质未熟之故，他日易为损坏。”可见，古代铸造铁锅器件就有了检验制度。根据他们的“探伤准则”，如果声音伴有杂声，则是由于铁水渗碳不足成了白口铁或者因为其中有杂质而造成了缺陷，这样的锅就要报废。古代的无损检测也用于对金属材料性能和成分的鉴定，以古铜钱币为例，记载说：“凡钱高低，以铅多寡分，其厚与薄削，则昭然易见。铅贱铜贵，私铸者对半为之，以之掷阶石上，声如木石者，此低钱也，若高钱铜九铅一，则掷地作金声矣。”这里所说的铅实际上是指铍。测定含铍量的方法，一是在同样厚薄下测其重量，另一方法是将其投掷在石阶上，铜铍对半的象木头和石头的落地声，而铜铍比例九比一的，则会发出铿锵的金属声。

远在公元 132 年，我国东汉杰出的科学家张衡发明了世界上第一台观测地震的仪器地动仪，这可以说是古代的声发射技术了。据《后汉书》中记载，“地动仪以精铜制成，圆径八尺，合盖隆起，形似酒尊。”虽然它还称不上什么复杂的仪器，不过以之所进行观察的地声—岩石破裂声发射的物理机制，至今还在研究。宋应星在其科学巨著《天工开物》中总结了对于黄金的测定，试金者，既是掂其轻重，又必测其韧度是否“屈折如枝柳”。而且看成色，“其高下色，分七青、八黄、九紫、十赤”。有时还要听听声音。通过直觉所获得的关于被检测对象的信息尽管是支离破碎的，但是来自各方面的信息却能在人的大脑中得到综合。因此可以认为，古代的无损检测技术是一种既朴素简便，而又同时应用多种检测手段的综合方法，虽然它们仍然是十分粗糙的。

许多物体，当其受力变形时都要发出声音，这是一种声发射现象。除了凭听觉知道声音之外，现在已可用声学和电子仪器来捕捉人耳不能听到的声发射信号（即在每秒 20Hz ~ 20000Hz 范围以外的频率信息）。

埃及的金字塔是世界著名的古代建筑，塔中古代法老的木乃伊闻名于世，令人惊奇的是，金字塔内的温度和湿度不低，而尸体竟然不会腐烂。原来塔的内部结构巧妙地形成一种天然的微波谐振腔体，微波能量的加热效应同时起杀灭细菌的作用，并使尸体脱水成为木乃伊。人们生活在充满电磁波的世界里，在电磁波频谱中，居于红外线与无线电波之间的是波长从 1 米到 1 毫米的微波，微波与雷达探测常常被人们联系在一起，微波在第二次世界大战时期曾立过汗马功劳，英国首先制成的微波雷达当时可探查 11 公里远处海面上露出的潜望镜，使希特勒的潜水舰艇受到了沉重打击。

利用微波方法能无损地检测材料、工件、构件的有关技术参数，检视其内部或表面的不连续性缺陷，以及对温度、湿度、厚度、光洁度等非电量进行测量（例如测定烟草中的含水量其精确度可达 0.2%）。由于常规无损探伤方法在检测大多数非金属复合材料时遇到了困难，国际上于六十年代末期便开始研究微波探伤，特别是微波对“北极星”导弹 A3 固体火箭玻璃纤维增强塑料发动机壳体的检测第一次获得成功，引起工程技术界的兴趣，成为独树一帜的无损检测手段。

1974 年，我国陕西临潼出土三把秦始皇时代的宝剑，这些宝剑经历两千多年，长时期埋藏在五、六米深的土地下，不但未腐蚀生锈，犹如新制取之利器，整体乌亮，锋利无比；用激光与微区分析才揭开了宝剑中的密疑。激光具有能量高度集中、单色性和相干性好的特点，当其被聚焦成直径为十至几十微米时，激光的能量密度极高，其温度可达万度，这时任何难熔的材料都将熔化和气化成原子或离子状态，并辐射出有一定频率范围的

波谱，经光谱分析便能得出物质的组成成分。由于激光微区分析的区域可以小到 $10\sim 12$ 微米，且孔深极浅，仅消耗被检物质约 10^{-10} 克，这相当于无材料的破坏，因之，亦可被列入无损检测的行列。激光显微光谱分析除用来分析某些金属的组织及夹杂外，也开始用于考古、地质、法律鉴定、以及某些病症的临床诊断等。

激光全息照相是把激光分离成相同的两束，即物光束和参考光束，用物光束直接照射被观察物体，参考光束则照射记录材料（如全息感光胶片），被观察物体所反射的光与参考光在记录材料上互相干涉，得到的干涉图为全息图。当用与上述相同波长的激光照射全息图时，便得到了被观察物体的三维图像。但一般激光对不透明物体没有穿透能力，只能在其表面上发生反射而得到物体表面的像，借助于物体表面性状的改变以反映其内部状态，当给物体表面一定负荷，如机械的或热脉冲的加载时，如果物体内部存在缺陷，就会在相应的物体表面上产生微差位移，其有缺陷处相应表面的变形将不同于无缺陷处相应表面的变形，全息干涉条纹会产生畸变；于是，根据对加载与不加载两状态下的波前干涉图像的分析，即可确定内部缺陷的位置、性质和大小。若把激光技术与超声检测结合起来，拍摄超声全息图，并通过电视摄像系统接受激光照射呈现的全息图衍射像，以实现物体内部缺陷的直接目测，这将是无损检测技术的一项改革。

现在还能运用激光诱发冲击波，使之用来对材料的微焊缝无损检测服务。

第三节 发 展 花 絮

19 世纪末叶，原子物理学的三大成就即 1895 年伦琴射线的发现，1899 至 1900 年的 α 、 β 、和 γ 射线，以及 1897 年阴极射线的发现并同时产生了电子学说，它们的诞生揭开了现代无损检测的序幕。从 1911 年第一只 X 光管的制造，到 1915 年开始形成最早的射线照相技术，并于 1925 年初步实现了射线照相用于无损检测的实践。短短的几年，射线检测在各工业部门被广泛采用。第二次世界大战中，由于航空军事的需要，大量使用 X-射线和 γ -射线探伤技术，使之从仪器的制作到标准的完善都达到成熟并趋于实用。自 1925 年当焊接工艺引入锅炉压力容器制造业和其他工业部门之后，焊接中危害最大的缺陷——裂缝便成了无损检测的一个主要对象。而射线照相术对裂纹的灵敏度并不理想，必须另谋措施。1928 年苏联人提出了应用超声波检测的可能性，继之德国的科学家于 1936 年研制了穿透法超声波探伤仪；1940 年美国刚研究成功脉冲反射法探伤仪；不久，英国又制成了单探头的脉冲反射探伤仪。超声检测技术很快发展起来，与射线技术共同成为最常用的无损检测方法。

早期曾经利用声在各种介质中传播时各个物理量的定量方法和原理，对物体进行探测。例如把声速的测量用于超声频带范围，对铸件探伤、对球墨铸铁的研究表明，超声的传播速度受到石墨形状和分布的强烈影响，未球化的原始石墨含量越多，传播速度下降越显著；同时发现机械性能中的抗张强度与传播速度之间有明显的联系，而内部缺陷及其他参数如晶粒度、夹杂、不完全的相转变等便是直接影响抗张强度的因子。其次，还可以通过超声频率的分析去测定金属构件内裂纹的尺寸及其发展方向。碳纤维增强塑料

(cfrp) 的出现和发展提供了一族同时具有低密度、高强度特性的固体材料, 这种优裕的混合性能曾经引起人们的普遍关注; cfrp 的内部缺陷如空洞或迭层结构对超声的吸收或衰减效果显著, 同样找到了材料剪切强度与超声衰减间的严密定量关系。用超声衰减评价层迭结构已发展到多层, 以及金属合金与非金属增强复合材料的迭层等方面; 多层结构中, 从各个分界面反射的超声讯号功率用能量分配原理进行计算, 考虑超声在各媒质层中的传播和衰减时, 结合每个超声脉冲的入射与反射部分间的相位关系, 理论分析与实验符合得很好。曾建立了用热冲击-冷压方法制备的低强度结合试样考查其基本拉伸强度与超声脉冲反射测量之间的联系, 表明断裂韧性、屈服强度和金属材料的超声衰减性能之间, 以及延展性(断裂时横断面的收缩率)与来自埋藏在同一样品中的单个空穴背散射超声功率之间的关系等, 这些研究的结果便自然地吧无损检测应用于断裂力学分析缺陷(主要是带裂纹型缺陷)的范畴有机地联系起来, 而且也在超声传播的纯弹性过程和塑性变形的高滞弹性过程之间提供了有趣的物理联系。

通常, 对于铸铁、有色金属和塑料进行超声检测的应用常局限于用显示最小不均匀性的反射信号和结构噪声间的微小幅度差来表示, 这种噪声一般由反射脉冲中的高频成分引起, 这些高频成分在通常的脉冲激发时是难以避免的。以无级变频和可控频谱的发射脉冲进行超声测量, 使用狭带低频激发的振荡可获得较高的信噪比, 探头的特性参数(例如近场长度和 AVG 图)均受频率的影响, 选用一定的频率而不改变探头入射角的方法可使板波探头激发不同模式的板波。超声脉冲一般是由压电换能器、磁致伸缩换能器或电动换能器通过一个较窄的单向电脉冲激发形成。检验奥氏体铸件时, 用普通方法显示不出直径 3mm 以下的横通孔, 而采用窄带发射器并使检验频率改善为 1.1MHz 后就能清楚地显示出来。同时, 在普通的检验方法中, 到第六次背面回波约有 6 分贝的信噪比, 这恰好可以辨认出来, 但第七次回波却消失在干扰电平中。借助于窄带发射器则能清楚地辨认出第十次回波, 且还有约 30 分贝的增益余量可供使用。窄带发射器的应用决非只限于钢, 还可以检测铸定的结构疏松, 并在黄铜、铜、铅和钛等铸件上也可获得类似的结果。

在超声波穿透法测量中, 对大于声束截面裂纹的后部仍能接收能到脉冲信号的现象无法解释。当一超声波束入射到裂纹时, 其能量分布将产生下述三种情况: 即服从普通的几何光学定律、裂纹面上产生镜面反射, 沿着裂纹表面传播的 Rayleigh 波, 当到达裂纹尖端时辐射能量, 以及从裂纹尖端产生衍射柱面波; 有人把上述收到的脉冲波作为裂纹尖端的衍射波进行考查, 应用衍射原理以获得材料近表面裂纹存在的信息并确定其埋藏深度和几何尺寸, 得到了十分精确的结果; 这是目前尚在继续研究的一种超声衍射测量方法。

此外, 磁法中涡流检测在其与其他测试手段的联合运用方面亦已取得成功; 例如使涡流和 γ 扫描用于放射性反应器燃料棒的探查, 运用涡流检验与全面 γ 扫描结合的混合工艺对水冷反应堆中辐射燃料棒进行检测, 可获得棒及其外部包层的情况, 涡流试验不仅可以检查包层缺陷(包括氢化物在氧化锆中的浓缩状况), 也能测算含包层内棒表面在放射中 UO_2 颗粒端形成小圆周形隆起的大小, γ 扫描在测量中可以反映燃料堆的收缩和颗粒间间隙结构等。涡流技术已经突破最多只能给出二个信息或对二个物理量进行处理的单频涡流方式; 而采用多个频率和脉冲作为激励信号, 并产生多个信息, 然后用电子模拟装置进行数据处理, 从而把所需要的信息无干扰地反映出来。例如检视一个带翼型的管材时, 使用三种频率, 一种频率对管子翼板影响敏感, 另一种频率对管子壁厚变化敏感, 第三种频率

则对伤痕敏感，把所接收到的信号传输给电子信息处理系统，再经一系列的数字选取，将翼板和管子壁厚变化的干扰信号在信息处理的中间过程中消除后，复将伤痕信号无干扰地检出。这样的方法对信息处理具有特殊功能，并能解决一般涡流技术中的困难问题。

用发声与音响去判明物体的疵瑕是自古以来就为人们所熟知的。声发射的产生，一般认为是由于材料内部的位错运动引起的，当材料变形或断裂时，其内部结构产生位错运动，这时便有一部分弹性能释放出来，形成音频振动。由于材料中还产生频带更宽（可到1MHz）的弹性波，所以也称之为“应力波发射”。金属材料在范性变形时的声发射与作用应力之间有一种不可逆的关系，即材料在受到一定应力之后，便有声发射现象，而当停止施加应力时，声发射亦停止，但再重新施加应力时，若其不超过原有的应力水平，就不会再有声发射产生，人们曾把这种作用应力与声发射的关系称做不可逆效应。利用这一特性，可以准确地测得声发射的应力等级，从而鉴定物体和结构的受力状态。目前，声发射技术已成功地用于焊接监控，这种监控只需把探头放置于焊缝附近，通过对声发射信号的测量即可发现每个瞬时所产生的缺陷情况。用声发射技术也可以对压力容器进行定期检查，若收到较为强烈的声发射信号，表明其内部可能有裂纹产生，这对评定使用寿命、防止突然事故是有力的测试手段，用声发射还可以测出材料应力腐蚀裂纹的开裂，并以之计算应力腐蚀断裂的韧性，这对飞机上大量使用的蜂窝结构材质的检测非常方便。还有，声发射在监视矿山岩体的演变和破坏，以及监测预报地震等方面，均有着广阔的前途。

第四节 无损检测的近代物理学方法拾迹

回顾无损检测技术发展的简短历程，各种测试手段既都建立在新旧的物理学基础上，开拓和利用了包括力、热、磁、声、光、电，以及某些由之升华或分化的共振、辐射、能谱、核效应等，同时从经典的原理到现代的模式，例如声学中“多普勒效应”被重新用于微波检测和无反冲核的共振吸收，可用来作为马氏体相变、钢焊接件和铸件中的铁素体含量、表面应力等的能谱分析；电磁感应中“霍尔效应”曾在电磁无损检测内再度青春焕发，原子散射时的“康普顿效应”亦在高能与衍射的检测中显现活力；牛顿力学中动、势能的转换在磁效应与讯号检拾放大相配合下，也有局部刷新某些材料机械和热处理性能方面无损评价及鉴定的趋势；迄今，继续从物理科学宝库中开发的新技术尚在崛起，先进方法不断涌现，无损检测的科学定义和研究范围为满足实际发展的要求而被扩大了。现代无损检测与科学技术的发展，特别是与近代物理学的研究和发展密切相关。20世纪物理学领域每一项重大成果都被应用于无损检测。例如：

(1) 许多金属材质（尤其是钢铁制件热处理质量）按其硬度进行分选时，常规的机械洛氏或布氏硬度计的操作是一项费力、费时、耗损、劳动强度大、效率较低的落后方式；采用以被测试件与标准试件的感应电流之差与其磁特性如磁导率，剩磁及矫顽力之差成比例并配之以桥臂比较的电磁测量硬度类比方法；并依据超声纵波传播速度不受体积效应影响而只随材料结构产生变异，使用传播速度测量或直接以超声传感器谐振频率随材料硬度变化的特点建立了超声硬度测试方法；还有为同时改进对各类零、机、部件现场检查的随

机性及适应性，按力学中自由落体或撞击体动、势能量变换和电磁转换器感生电压为时间及运动体相对位置的函数或单值函数而创建了第三种精密类比的能量硬度方法。

(2) 磁效应检测各种铁磁材料的冶金参量、相结构、缺陷和残余应力十分灵敏。铁磁体中有许多称为磁畴的自发磁化区域，当物质被磁化时，畴壁处于突发跳跃状态，应力或缺陷能改变畴壁的这种运动状态，同时引起磁通密度的变化，如使用检测线圈，其所感生的电压脉冲经调制及放大后显示，即可了解到材料缺陷的状态，这是巴克好森效应的实际运用。

以电子流注入的方式感生磁场，这样的磁场则极易受材料缺陷或几何不均匀性所扰动，利用这一特性对非铁磁材料（如 Al、Ti 及某些超合金等）进行无损鉴定，例如查找透平叶片的疲劳裂纹和一些材料的微细表面夹杂等已获得成功。当材料中存在缺陷或局部不均匀性而产生磁场扰动时，可用一种由霍尔元件制成的无接触传感器磁敏二极管进行测试。此外，畴壁的运动同时能引起声的发射，称为磁机械的声发射，将之用来测量残余应力较用 X-射线衍射和声的表面波法有更高的灵敏度和透视深度；用磁化曲线静态特性的几个基本磁参量如磁化率或磁矫顽力去确定使位错密度作为范性变形的函数关系，并用磁性弛豫效应去判定点缺陷的原子结构和扩散特性等。

(3) 电子顺磁共振（EPR—Electron Paramagnetic Resonance）不但在结构化学化合物中对分析许多共价结合破裂的变异型式极为有用，对检测例如像物质受辐射感生的衰变、应力裂纹、削磨、截割、以及对某些呈纤维状半结晶或非结晶聚合物（聚合纤维材料）中的不同负荷历史、合成橡胶内臭氧所生应力而引起的结合破裂等都很有效，也能探查辐射或一些典型的白血病引起的血液细胞的破坏。

电子顺磁共振也叫做电子自旋共振（ESR—electron Spin Resonance）。电子自旋是指电子象一个陀螺或微小的磁体那样围绕其的轴所作的转动。量子限制要求在同一个物质分子中不能有两个电子具有全同的状态，在同一空间区域内的两个电子必然是自旋相反，称为一个电子对。物质存在奇数电子情况时，不配对的电子为单电子，固体中的晶格缺陷或局部的晶体不完整性，以及一个或多个电子陷落在缺陷中或留于其附近时最容易形成单电子。电子是一自旋的负电荷，由于运动的电荷会产生磁场，所以每个自旋电子的轴都伴随有一个与之相关的磁矩，配对的电子因其自旋相反，与之相关的磁矩也相反，实际上已相互抵消，单电子则无法由同轨道的电子来补偿，于是含这种单电子的物质便是顺磁性的。因电子磁体尚存在空间量子化问题，如果加上一个外磁场，单电子磁体将排列与外磁场平行（这是较低或较稳定的能量条件）或相反；若在顺磁体系统周围复施以第二个电场（高频场）时，其所辐射的能量恰好相当于反平行的电子磁矩之间的能量差 $\Delta E (=h\nu)$ ，则将发生跃迁，即一些平行的磁偶极子将吸收辐射能的一个量子而从较低的能态跃迁到略高的能态，同时一些反平行的电子则将翻转到平行状态，因之向电磁场释放同样大小的能量。换言之，即单电子能与辐射场共振，它们能从高频场吸收能量，同时也能放出能量，这便是“顺磁共振”，即把含有单电子的物质置于外磁场内并用高频率的电磁波（微波）辐照所出现能量的吸收或放出的现象。正是对这个共振的电磁能量净吸收予以检测并经放大而成为 EPR 波谱或样品信号。

(4) 中子能穿透很厚的重金属（如铅、铁等），但轻材料或含氢物质对它却有相当大的减弱能力；中子对物质的穿透并不象 X-射线那样与物质的原子序数有关，而主要取决