

NDT

无损检测 概论



中国机械工程学会无损检测学会 编

机械工业出版社



无损检测概论

中国机械工程学会无损检测学会 编



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书是中国机械工程学会无损检测学会推荐教材，可用于各产业部门普及无损检测知识，以满足我国工业发展、提高产品质量、维护设备安全运转的需要；同时也推荐本书用作无损检测Ⅱ级人员培训通用教材之一；教育委员会推荐本书供大专院校使用与参考。

本书取材新颖，反映了当前国内外无损检测技术的现状。内容除介绍超声、射线、磁粉、涡流、渗透5种常规无损检测方法外，还包括目视检测、声发射、红外、微波、激光全息检测等其它无损检测方法。书中附插图120余幅并分章列举有检测实例及思考题。

本书主要读者对象是工程技术人员、工科大专院校师生和生产管理人员，也适用于从事无损检测的技术工人。

无损检测概论

中国机械工程学会无损检测学会 编

*

责任编辑：方婉莹 版式设计：王 颖
封面设计：姚 毅 责任校对：肖新民
责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×116¹/₃₂·印张9³/₈·字数245千字

1993年12月北京第1版·1993年12月北京第1次印刷

印数 0 001—3 875 ·定价：12.00元

*

ISBN 7-111-03724-3/TH·447

前 言

当前全国各地正在积极开展提高产品质量工作，无损检测技术是提高产品质量的有力手段，从产品设计、加工制造、成品检测到在役检测各阶段，无损检测技术都可以发挥作用。材料与零件的无损检测与评价，对于控制和改进生产过程中的产品质量，保证材料、零件和产品的可靠性以及提高生产效率等方面起着关键性作用。为此，中国机械工程学会无损检测学会组织力量编写《无损检测概论》，目的是在我国工程技术人员和生产管理人员中普及无损检测知识；同时在编写过程中充分考虑了无损检测Ⅰ级人员培训的需要，目前对Ⅰ级人员培训来说已有5种常规检测方法的Ⅰ级教材，尚缺一本综述性教材，《无损检测概论》符合需要。

本书在绪论中综述了无损检测技术的现状与发展，各种方法的特点与选用原则。其它各章着重介绍各种方法的基本原理、优缺点和适用范围，特别在应用方面内容丰富、取材新颖。尽可能反映国内外无损检测技术的最新进展，以适应改革开放的需要。

本书由张家骏编著；第1、3章和附录由屠耀元审核，第2章由王怡之审核，第4~7章由郑中兴审核。1992年4月无损检测学会教育委员会讨论通过，并推荐本书供各高等院校使用或参考。

由于编者水平所限，书中错误、不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

1993年11月

目 录

1 绪论	1
1.1 无损检测的特点	3
1.2 无损检测方法的分类	4
1.3 无损检测技术的现状与发展	4
1.4 无损检测方法的选用	6
2 超声检测	9
2.1 超声检测基本原理	9
2.1.1 波动的种类与波型	10
2.1.2 声波的波动特性	12
2.1.3 声场及其特征值	15
2.1.4 超声波在异质界面上的透射、反射和折射	19
2.1.5 超声波传播中的衰减	23
2.2 超声检测方法	26
2.2.1 超声检测用仪器与探头的选择	26
2.2.2 试块的选用	35
2.2.3 超声检测方法分类	37
2.2.4 典型材料与构件的超声检测	40
2.2.5 超声测量技术	59
2.3 超声检测新技术	69
2.3.1 电磁超声检测	69
2.3.2 奥氏体不锈钢焊缝的超声检测	74
2.3.3 超声成像技术	78
2.3.4 超声显微镜	83
2.3.5 激光超声检测技术	84
超声检测思考题	86
3 射线检测	88
3.1 射线检测基本原理	88

3.1.1	射线的本质	89
3.1.2	射线的种类	90
3.1.3	射线的获得	90
3.1.4	射线的衰减特性	95
3.2	X射线检测方法	99
3.2.1	X射线机	99
3.2.2	象质计与几何不清晰度	104
3.2.3	增感屏与胶片的选择	109
3.2.4	散乱射线的遮蔽与曝光曲线	115
3.2.5	不同种类焊缝和工件的透照方式与原则	117
3.2.6	底片评定与实例分析	124
3.3	其它射线检测方法	127
3.3.1	γ射线检测	127
3.3.2	高能X射线检测	135
3.3.3	射线实时检测技术	142
3.3.4	中子射线检测	145
3.3.5	工业射线CT技术	147
3.3.6	背散射射线检测法	150
3.4	射线防护	151
	射线检测思考题	155
4	磁粉检测	156
4.1	磁粉检测基本原理	156
4.2	磁粉检测方法	160
4.2.1	磁化方法	160
4.2.2	磁粉探伤机	167
4.2.3	磁粉与磁悬浮液	168
4.2.4	试块与试片	173
4.2.5	退磁	174
4.2.6	磁粉检测的有效性与无关显示	176
4.2.7	磁粉检测应用举例	179
4.2.8	其它磁性检测方法	180
4.2.9	磁粉检测的适用范围	182
	磁粉检测思考题	183

渗透检测	184
5.1 渗透检测基本原理	184
5.2 渗透检测方法	190
5.2.1 方法分类	190
5.2.2 影响因素	195
5.2.3 渗透检测用设备	198
5.2.4 灵敏度试片	199
5.2.5 检测用材料	201
5.2.6 其它渗透检测方法	203
渗透检测思考题	205
涡流检测	207
6.1 涡流检测基本原理	207
6.2 涡流检测方法	216
6.2.1 检测频率的选择	216
6.2.2 涡流检测仪	217
6.2.3 检测用线圈	219
6.2.4 对比试样	220
6.2.5 缺陷检测模型分析	221
6.2.6 应用举例	223
6.3 电磁分选	226
6.4 几种表面缺陷检测方法的比较	231
涡流检测思考题	232
其它无损检测技术	234
7.1 目视检测	234
7.1.1 内窥镜	234
7.1.2 光学传感器	238
7.2 声发射技术	238
7.2.1 基本原理	238
7.2.2 定位	240
7.2.3 声发射仪	242
7.2.4 应用举例	243
7.3 红外检测	247
7.3.1 基本原理	247

7.3.2	检测方法和特点	249
7.3.3	检测用仪器	251
7.3.4	应用举例	252
7.4	微波检测	254
7.4.1	基本原理与特点	254
7.4.2	检测方法	255
7.4.3	微波检测仪	256
7.4.4	应用举例	258
7.5	激光全息检测	259
7.5.1	基本原理与特点	259
7.5.2	激光器	261
7.5.3	检测方法	262
7.5.4	应用举例	264
7.6	展望	266
附录	271
附录 I	国内外无损检测标准	271
1	国内无损检测标准	271
2	国外无损检测标准	275
附录 II	国内外无损检测期刊	290
主要参考文献	291

1 绪 论

材料的检测与评价对于控制和改进生产过程中的产品质量，保证材料、零件和产品的可靠性以及提高生产效率等都起着关键性作用。各种测试技术及有关材料科学和物理科学的发展，为无损检测技术的应用提供了新的可能性。无损检测技术就是在不损伤被检材料、工件或设备的情况下，应用某些物理方法来测定材料、工件或设备的物理性能、状态和内部结构，检测其不均匀性，从而判定其合格与否。也就是说，应用无损检测技术能够在铸造、锻造、冲压、焊接以及切削加工等每道工序中检查该工件是否符合要求，以避免进行徒劳无益的加工，合理地制造出产品。它还可以根据使用部位的不同，在不影响设计性能的前提下，使用某些有缺陷的材料。因此，无损检测是一种既经济而又能使产品达到性能要求的技术。

无损检测对应用来说，从产品设计、加工制造、成品检验到在役检查各阶段都可以发挥作用。例如在设计研制阶段，可以通过无损检测来确定设计思想；在加工制造阶段，可从原材料开始检测内在质量和工序质量，用以剔除每道工序中的不合格产品和改进制造工艺。例如为了确定焊接规范，可根据预定的焊接规范制成试样后进行射线照相或超声检测等，随后根据检测结果修正焊接规范。又如当制造铸件时，为了确定铸造工艺设计也可利用射线照相等无损检测方法，根据缺陷发生的情况来改进浇冒口设计；在成品验收阶段，用以对产品作出质量鉴定，以增加使用者对产品是否符合要求的信心；最后，在产品使用过程中经常地或定期地进行无损检测，可以做到防患于未然。虽然看起来无损检测没有在产品上增加任何东西，但是它对产品质量实际上起了保证作用。不过由于它不是一种成形技术，在工业发展初期往往

容易被人们所忽视。因此，无损检测技术的发展，在某个方面反映着一个国家的工业水平。它能降低产品成本，提高产品的可靠性和增加其竞争能力。

无损检测是利用材料的物理性质因有缺陷而发生变化这一事实，测定其变化量，从而判断材料内部是否存在缺陷。因此，它的理论根据是物理性质，目前在无损检测中所利用的材料物理性质有：材料在射线辐射下呈现的性质；材料在弹性波作用下呈现的性质；材料的电学性质、磁学性质、热学性质以及表面能量的性质等。因此，弄清楚这些物理性质以及测量材料性质细微变化的技术，就成为无损检测技术的基础。也就是说，无损检测是利用材料内部组织和结构异常时引起的物理量变化的原理，反过来用物理量的变化来推断材料内部组织和结构的异常。当然物理量的变化与材料内部的组织结构的异常不一定是一一对应的。也就是说，材料的内部异常不一定能使所有物理量都发生变化。因此，需要根据不同情况选用不同的物理量，而且有时往往需要综合考虑几种不同物理量的变化情况，才能对材料内部组织结构的异常情况作出可靠判断。

因此，不能盲目地使用无损检测，否则不但不能提高产品的可靠性，而且要增加制造成本。因而必须掌握无损检测的理论基础，选用最适当的检测方法，应用正确的检测技术，在最适当的时间进行检测才能充分发挥其效果。

为了更好地发挥无损检测技术的作用，必须掌握下列几方面知识：

- 1) 必须知道不同加工制造方法可能引起的缺陷特征，并选用最适于发现这种缺陷的无损检测方法。例如要发现锻造及冲压加工所产生的缺陷，不宜采用射线检测；对于表面淬火裂纹等则应选用磁粉检测。从事无损检测工作的技术人员也需要对制造过程具有丰富的知识。此外，产生缺陷的时间也是一个重要因素，例如，经过焊接或热处理的材料会出现延迟断裂现象，即在加工或热处理后，经过几小时甚至几天才产生裂纹。因此，必须了解

这些情况以确定检测时间。

2) 必须具备关于缺陷对材料性能影响方面的丰富知识, 以便根据检测结果来鉴定材料与工件是否符合性能要求。例如, 某一工件有缺陷存在, 但该缺陷对性能的影响在设计要求所允许的范围内, 那么就不必把该工件作报废处理。为了使这种判断正确可靠, 必须掌握关于缺陷对材料强度以及其它各种性能的影响方面的广泛知识。

3) 设计人员应该很好地了解无损检测技术, 因为如果设计的产品不能或很难进行无损检测, 那就很难保证该产品的性能要求。

1.1 无损检测的特点

(1) 无损检测与破坏性检测

无损检测的结果必须与破坏性检测的结果相比较后, 才能知道怎样来评价无损检测的结果, 否则是没有根据的。当然这个工作是事先在同样条件的试样上进行的, 生产中就不需要再破坏产品了。

(2) 无损检测的实施时间

无损检测应该在对材料或工件的质量有影响的每道工序之后进行, 例如焊缝的检测, 在热处理前是对原材料和焊接工艺的检查; 而在热处理后则是对热处理工艺的检查。另外时效变化也可能对某些焊缝的质量产生影响, 以高强度钢焊缝为例, 有时会发生延迟裂纹, 它是在焊接后几小时才开始发生, 而后逐步扩大。因此如果焊接后过早地检查, 则检查后还会发生许多裂纹, 所以通常至少要放一昼夜后再作检查。

(3) 无损检测结果的可靠性

无损检测的可靠性与被检工件的材质、组成、形状、表面状态、所采用的物理量的性质以及被检工件异常部位的状态、形状、大小、方向性和检测装置的特性等关系很大。而且还受人为因素、标定误差、精度要求、数据处理和环境条件等的影响。因此, 不管采用哪一种检查方法, 要完全检查出异常部位是不可能的。而

且往往不同的检测方法会得到不同的信息，因此综合应用几种方法可以提高无损检测结果的可靠性。

为了进一步提高无损检测结果的可靠性，必须选择适合于异常部位的检测方法和检测规范，需要预计被检工件异常部位的性质，即预先分析被检工件的材质、加工类型、加工过程，必须预计缺陷可能是什么类型？什么形状？在什么部位？什么方向？然后确定最适当的检测方法和能够最佳发挥检测方法最大能力的检测规范。

1.2 无损检测方法的分类

长期以来，无损检测大多以检测方法为中心进行分类，很少采用以原理为中心的分类方法。随着科学技术的发展，无损检测方法愈来愈多，到底有多少种说法不一。调研分析做得最多的是美国国家宇航局(NASA)，1973年提出了70种方法，归纳成6大类和两个辅助分类，并对每一种方法说明其工作原理、检测对象、适用范围、制约条件以及参考文献。1981年美国D. J. Hagemaiier根据实际应用情况，把无损检测方法归纳成32种，得到了一定程度的确认。

无损检测方法虽然很多，适用于各种不同场合，但是最常用的还是射线检测、超声检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测5种常规方法。其它无损检测方法中用得比较多的有声发射检测、红外检测和激光全息照相检测。目前95%以上的无损检测工作是采用上述8类方法。

1.3 无损检测技术的现状与发展

长期以来，无损检测有3种简称，即NDI (Non-destructive Inspection)、NDT(Non-destructive Testing)和NDE (Non-destructive Evaluation)。目前大多称之为NDT，即无损检测。实际上国外工业发达国家的无损检测技术已逐步从NDI和NDT向NDE过渡，即用无损评价来代替无损探伤和无损检测。这种发展很容易理解，因为无损评价已经包含了无损探伤和无损检测的内容，而

且其含意还不止于此，它比无损探伤和无损检测更积极和更具综合性。它要求无损检测工作者有更广泛的知识面、更深厚的基础和更高的综合分析能力。

无损检测技术的另一个发展是从NDE向ANDE和QNDE发展。也就是说，从一般无损评价向自动无损评价和定量无损评价发展。逐步减少人为因素的影响，改用计算机来进行检测和分析数据，以提高检测可靠性。

从国外近年来出版的文献资料中也可以看到无损检测技术的资料发表，其中出版最多的是美国。把文献资料发展趋势，近年来国外每年大约有3000篇关于无损检测技术的文献按不同检测方法分类，大致比例如下(%)：

超声检测	43~46
射线检测	12~14
涡流检测	9~10
磁粉检测	3~4
渗透检测	1~2
其它方法	6~7
其它内容	20~23

其中有关超声检测的文献最多，这也说明作为无损检测手段，超声检测技术研究得最多。从上述比例可以看到，前5类常规无损检测方法的文献约占全部文献数的71%~73%。在这5种常规无损检测方法中，超声检测约占62%，射线检测占18%，涡流检测占13%，磁粉检测占5%、渗透检测占2%。

但根据日本非破坏检查公司的统计，80年代中期在日本生产应用方面，5种常规无损检测方法中超声检测约占18%、射线检测占41%、涡流检测占10%、磁粉检测占24%、渗透检测占7%。这些数字虽然不见得绝对正确，但说明了一种趋势：即目前生产实际中用得最多的无损检测方法是射线检测和磁粉检测，两者之和约占5种常规方法的65%。但从发表的文献来看，射线检测和磁粉检测只占23%，相反的超声却占62%。这说明，虽然目前生

产中用得最多的是射线检测和磁粉检测，但大家更感兴趣和研究得最多的是超声检测。从我国最近几年发表的无损检测文献来看，大致也是这种趋势，以1991年10月在黄山召开的第5届全国无损检测学术年会上发表的论文来看，在5种常规无损检测方法中，超声约占54%，射线占18%，磁粉占13%，涡流占12%，渗透占3%。

从检测对象来说，尽管目前被检测材料中仍以金属材料为主，金属材料中仍以钢铁为主。但是无损检测技术在复合材料中应用的文章愈来愈多，无损检测用于工业陶瓷材料的文章也开始有了一定数量。

1.4 无损检测方法的选用

选用无损检测方法时需要考虑的主要因素有两个方面：

- 1) 需要检出的缺陷类型、大小、方向和位置，具体要求决定于被检工件本身；
- 2) 被检工件的形状、大小和材质。

对缺陷类型来说，通常可分为体积型缺陷和平面型缺陷两种，表1-1所示为不同体积型缺陷及其可采用的无损检测方法，表1-2所示为不同平面型缺陷及其可采用的无损检测方法。

表1-1 不同体积型缺陷及其可采用的检测方法

体积型缺陷类型	可采用的检测方法	体积型缺陷类型	可采用的检测方法
夹杂 夹渣 夹钎 缩松 缩孔	目视检测(表面) 渗透检测(表面) 磁粉检测(表面及近表面) 涡流检测(表面及近表面) 微波检测	气孔 腐蚀坑	超声检测 射线检测 中子照相 红外检测 光全息检测

对缺陷在工件中的位置来说，通常可分为表面缺陷和内部缺陷两种，表1-3所示为检测表面缺陷和内部缺陷分别可采用的检测方法。

对被检工件形状和大小(厚度)来说，选用无损检测方法的原则如表1-4和表1-5所示。

表1-5中所列出的壁厚大小是近似的，这是因为不同材料工件的物理性质不同。另外，除中子照相外，所有适用于厚件的检测方法都可用于薄件。而中子照相对大多数薄件来说不适用。

对被检工件的不同材质来说，可采用的无损检测方法如表1-6所示。

表1-2 不同平面型缺陷及其可采用的检测方法

平面型缺陷类型	可采用的检测方法	平面型缺陷类型	可采用的检测方法
分 层	目视检测	裂 纹	超声检测
粘 结不良	磁粉检测	未 熔 合	声发射检测
折 叠	涡流检测		红外检测
冷 隔	微波检测		

表1-3 检测表面缺陷和内部缺陷分别可采用的方法

检测表面缺陷可采用的方法	检测内部缺陷可采用的方法	检测表面缺陷可采用的方法	检测内部缺陷可采用的方法
目视检测	磁粉检测(近表面)	红外检测	中子照相
渗透检测	涡流检测(近表面)	光全息检测	红外检测(有可能)
磁粉检测	微波检测	声全息检测	光全息检测(有可能)
涡流检测	超声检测	声显微镜	声全息检测(有可能)
超声检测	声发射检测		声显微镜(有可能)
声发射检测	射线检测		

表1-4 适用于不同形状工件的无损检测技术

最简单形状 ↑ ↓ 最复杂形状	光全息检测 声全息检测 声显微镜 红外检测 微波检测 涡流检测 磁粉检测 中子照相 射线检测 超声检测 渗透检测 目视检测 射线 CT
--------------------------	---

表1-5 适用于不同厚度工件的无损检测技术

被检工件厚度	采用的无损检测方法
表面	目视检测, 渗透检测
最薄件(壁厚 $\leq 1\text{mm}$)	磁粉检测, 涡流检测
较薄件(壁厚 $\leq 3\text{mm}$)	微波检测, 光全息检测, 声全息检测, 声显微镜
较厚件(壁厚 $\leq 100\text{mm}$)	射线检测
厚件(壁厚 $\leq 250\text{mm}$)	中子照相, γ 射线照相
最厚件(壁厚 $\leq 10\text{m}$)	超声检测

表1-6 不同无损检测方法及其主要材料特性

检测方法	主要材料特性
渗透检测	缺陷必须延伸到表面
磁粉检测	必须是磁性材料
涡流检测	必须是导电材料
微波检测	能透入微波
射线检测	随工件厚度、密度及化学成分变化而变化
中子照相	随工件厚度、密度及化学成分变化而变化
光全息检测	表面光学性质

2 超声检测

2.1 超声检测基本原理

超声检测是一种利用超声波在介质中传播的性质来判断工件和材料的缺陷和异常，因此必须了解超声波的基本性质。

超声是一种看不见、听不到的弹性波，在自然界和日常生活中普遍存在，目前已被广泛应用于科学、工程和医学中许多领域。人耳能听到的声音频率为16Hz~20kHz，而超声检测装置所发出和接收的频率要比20kHz高得多，一般为0.5~25MHz，常用频率范围为0.5~10MHz。

对于材料检测来说，超声波具有下列特性：

- 1) 在液体和固体介质中可以传输相当长的距离（虽然它在气体中衰减很快）；
- 2) 超声波能量的主要部分在传输时有明确的方向性；
- 3) 一般，超声波在一定介质中传输时，速度不变；
- 4) 超声波传输通过不同材料界面时，可能会改变其振动模式。

超声检测就是利用超声波来对材料和工件进行检验和测量。在检验方面，典型的应用是超声探伤以及材料和工件的物理性能与力学性能检验。在测量方面，介质的许多非声学特性和某些状态参量，例如液位、流量等都可用超声方法来测定。当然超声波在工业中的应用还更广泛，例如超声加工和处理技术等也发展很快，它们是利用超声的能量来改变物质的特性和状态的技术，如超声钻孔、清洗、焊接、粉碎、凝聚和催化等。

超声检验与测量之间的关系非常密切，例如超声测量液位和超声探伤只是检测目的和对象不同，从技术原理上说几乎完全相