

无损检测学

〔日〕 石井勇五郎 著

吴义 王东江 沐志成 译

陆振海 校



机械工业出版社

本书以材料的物理性质为基础，将声、光、电、磁和渗透等检测原理与材质联系起来，系统地论述了无损检测方法的基础理论及其应用。重点介绍：压力容器的设计、制造、检测和断裂力学评价；材料毛坯和构件缺陷的起因；缺陷对材料的机械性能和疲劳强度的影响；无损检测中的缺陷率、精度和缺陷分布规律；抽样检查对质量评价的影响等方面的理论知识和实用技术，确是一部较有价值的参考书。

本书介绍的无损检测方法，以常规手段为主，新的检测方法为辅。

本书可供无损检测技术人员和压力容器设计者使用，也可供工业院校有关师生参考。

非破壊検査工学

石井勇五郎 著

産報出版株式会社

1984年 第六版

* * *

无损检测学

【日】 石井勇五郎 著

吴义 王东江 沐志成 译

陆振海 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $13\frac{1}{2}$ ·字数290千字

1986年5月重庆第一版·1986年5月重庆第一次印刷

印数 0,001—5,150·定价 3.20 元

*

统一书号：15033·6177

译 者 的 话

无损检测（即非破坏检查）技术的应用范围极为广泛，可用于材料和产品的静态和动态检测以及质量管理，故有“技术诊断学”之称。近十几年来，随着机械、石油化工、造船、航空、航天和核能等工业的迅速发展，对产品质量的要求越来越严格；由于高强度钢的应用和断裂力学的发展，对缺陷尺寸提出了精确定量的要求。因此，促进无损检测技术获得高度的发展和广泛的应用。

从学术观点来看，无损检测已成为一门综合性较强的理论学科，而不象过去那样仅被作为一种技术手段来对待。这是由于它所涉及的领域，已不局限于无损检测和试验，而且涉及到材料的物理性质、制造工艺、产品设计和断裂力学等多种学科和专业技术领域。因此本书定名为《无损检测学》。

本书的作者是日本的石井勇五郎先生。他1949年获得理学博士学位，1964年起任教授，现任日本东京大学教授，曾任日本和泛太平洋地区无损检测协会会长。日文原版书自从1973年初版发行以来截至1984年5月，已再版六次。由此可知，此书深受日本读者的欢迎。石井先生不仅是日本有名的学者，而且在国际上也是一位知名人士。日本无损检测协会为了表彰他对无损检测学的突出贡献，特在该协会内设置一项以他的名字命名的“石井奖”。

在翻译本书时，承蒙作者石井先生的好意，自愿无偿提供原文版本，并在每次再版时，均亲自来信通知修订部分。

我们对石井先生的这种友好情谊和热情支持表示衷心感谢。本书译成中文并和我国广大读者见面，不仅是中日人民友谊的象征，而且也是中日文化技术友好交流的一项可喜成果。

本书的译文以日文《非破壊検査工学》1984年第六版为准。第一、二章由沐志成同志译；第四、五章及日汉技术名词对照表由吴义同志译；其余的章节由王东江同志译。全书系由陆振海同志审校，对此深表谢意。本书在出版过程中承蒙中国科学院学部委员、清华大学潘际銮教授大力支持，特就此表示感谢。

由于译者水平有限，倘若在译文中有错误和欠妥之处，敬请读者批评指正。

1986年11月

作 者 序

非破坏性检查技术应用于日本工业的时间并不算长，大概只有三十来年，但从世界各国的工业现状可以看出，越是重要的工业部门，非破坏性试验便越是深入地向那里渗透，而且，其技术水平似乎能够直接反映出该国的工业水平。然而，非破坏检查本身并不是一种生产技术，在过去那种过分强调生产效率的时期，并没有把它摆到工业生产第一线。但不可否认，它却起着一种类似“无名英雄”的作用。从学术观点来说，过去也没有把它当作一门工程学，而只是把它看作一种技术。可是，非破坏检查发展到今天，是不是还仅仅是一种技术而没有形成一个学术体系呢？

另一方面，由于自然科学的发展远远比精神文明的进步迅速，有人甚至把这种情况称之为“人类灭亡的危机”。在环境保护和人类安全问题已被突出地提到日程上来的今天，毋庸置疑，对人类生活来说，非破坏检查技术是一种重要的工业技术。但是，要想完成这一使命，非破坏检查技术又应该如何发展呢？非破坏检查是这样一种技术：它利用物质的物理性质因存在缺陷而发生变化这一事实来了解缺陷的存在；另一方面，则是事先搞清缺陷对强度等的影响，再通过与它的对比来估计检查对象是否达到设计性能。因此，非破坏检查的基础是物理性质，其测试技术涉及到整个物理量计测领域，其测试结果的鉴定，与设计 and 断裂力学有关。从这种观点来看，非破坏检查是一门综合性工程学，也是一种系统工

程，只应用某一方面的知识是不能解决问题的。

根据上述观点，非破坏检查是一门综合性工程学，也是在此基础上发展起来的一种综合技术。因此，从事非破坏检查工作的技术人员，不仅应具备非破坏试验方面的知识，而且还应具备物理、生产、设计和断裂力学等方面的知识。本书试论了上述领域内的有关知识，并不揣冒昧将它命名为“非破坏检查工程学”，以此作为编写目标。

然而，本人才疏学浅，要撰述这样一部涉及专业面很广的书，深感难以胜任，但却又迫切希望这样一部书能够早日问世。正值此时，受产报社的委托，让我写一部关于非破坏检查方面的书，于是便不失时机地努力撰述。要想论述自己所不熟悉的许多专业领域，必须先花时间掌握这些领域内的有关知识。因此，按期脱稿是非常困难的，虽然一再延期付稿，但调查研究不够之处，仍在所难免。

从某种意义上说，本书比起由许多作者分头执笔的专题文集更加适于非破坏检查技术人员阅读。本人深信，出版此书的意义就在于：通过学习和掌握这一新兴学科，为今后的技术开发打下基础；并以此来激励自己为本书的出版竭尽全力。

在撰述本书过程中，承蒙许多位专家学者热情支持，向我提供了很多参考文献，仅在此表示衷心感谢。特别是锻钢件缺陷这一节，转载了日本制钢公司高冲亮先生供给的原稿，在此深表谢意。

作者

1973年11月

目 录

第一章 绪言	1
1.1 无损检测的目的	1
1.2 无损检测技术与其它学科和专业之间的关系	2
(1) 非破坏试验的基础	2
(2) 非破坏检查领域与其它技术领域的关系	3
第二章 无损检测的理论基础	6
2.1 射线对材料性质的影响	6
2.1.1 可见光的吸收与折 射	6
(1) 光的吸收	6
(2) 光的折射	7
2.1.2 射线对材料性质的影响	9
(1) 射线的吸收	9
(2) 其它射线与物质的相互作用	7
2.2 弹性波对材料性质的影响	18
2.2.1 在材料中传播的弹性波的 种 类	18
2.2.2 声波的速度	20
(1) 在气体和液体中的声速	20
(2) 在固体中的声速	22
2.2.3 声强	24
2.2.4 声场	25
2.2.5 声波的指 向 性	25
2.2.6 声波在界面上的反射与透 射	28
(1) 沿法线入射时的反射与透射	28
(2) 斜入射时的反射与折射	29

2.2.7	衰减	30
(1)	在固体中的衰减	30
(2)	在液体中的衰减	34
2.2.8	声波在物体中的其它现象	35
(1)	衍射	35
(2)	散射	36
(3)	应力引起的声速变化	36
2.3	材料的电学性质	37
2.3.1	固体的电导率	37
(1)	影响电阻的因素	37
2.3.2	霍尔(Hall)效应	40
2.3.3	接触电位差	41
2.3.4	热电效应	42
(1)	塞贝克(Seebeck)效应	43
(2)	珀尔帖(Peltier)效应	44
(3)	汤姆逊(Thomson)效应	44
(4)	艾廷豪森(Ettinghausen)效应	44
(5)	能斯脱(Nernst)效应	45
(6)	里纪-勒脱克(Righi-Leduc)效应	45
(7)	菲劳(Phyro)电气效应	45
2.3.5	压电物质	46
2.3.6	热敏电阻(Thermistor)	47
2.4	材料的磁学性质	49
2.4.1	磁学量	49
2.4.2	磁性体的种类	50
2.4.3	强磁体的性质	51
(1)	磁化曲线	51
2.4.4	磁致伸缩	52
(1)	磁致伸缩机理	52
(2)	磁致伸缩现象	54

第三章 设计、应力与破坏	57
3.1 设计指导思想	57
3.1.1 设计的概念	58
3.1.2 应力	58
(1) 一次应力	58
(2) 二次应力	58
(3) 峰值应力	59
3.1.3 设计方式	59
(1) 弹性设计	59
(2) 塑性设计	62
(3) 疲劳设计	63
3.1.4 安全系数	64
3.2 应力集中系数	65
3.2.1 由表面缺陷引起的应力集中	66
(1) 有浅槽时的应力集中系数	66
(2) 无限平板上开有椭圆孔时的应力集中系数	66
(3) 带板上有圆孔时的应力集中系数	69
3.2.2 内部缺陷引起的应力集中系数	70
(1) 由球形缺陷引起的应力集中	70
(2) 旋转椭圆柱体缺陷的应力集中系数	71
3.2.3 应力集中的金属学意义	73
3.3 应力强度因子 (stress intensity factor)	74
3.3.1 应力强度因子的引入	74
3.3.2 有缺陷存在部位的应力强度因子	78
(1) 有限宽平板上有贯穿微裂纹时的情况	79
(2) 有非贯穿微裂纹时的情况	79
3.3.3 允许缺陷尺寸的取法	86
3.4 材料的断裂形式	90
3.4.1 韧性断裂	90
3.4.2 脆性断裂	90

3.4.3	冲击断裂	91
3.4.4	蠕变断裂	91
3.4.5	疲劳断裂	91
3.5	构件的破坏实例与临界缺陷尺寸	92
3.5.1	事故实例	93
(1)	例一	93
(2)	例二	93
(3)	例三	94
第四章	各种材料及其接合处的缺陷	98
4.1	铸件的缺陷	98
4.1.1	气孔	98
(1)	针孔、气孔	98
(2)	缩孔、缩松	100
4.1.2	夹砂、夹渣	102
(1)	夹砂	102
(2)	夹渣、金属夹杂物	102
4.1.3	铸件缺陷与铸件表面缺陷	103
4.1.4	裂纹	104
4.1.5	熔敷不良产生的缺陷	105
4.1.6	铸件缺陷的非破坏试验	105
4.2	锻件缺陷	106
4.2.1	镇静钢中的缺陷	108
4.2.2	非金属夹杂物	110
4.2.3	多孔性缺陷	111
4.2.4	显微裂纹	112
4.2.5	皱疤	114
4.2.6	锻件的其它缺陷	114
4.2.7	锻件的非破坏试验图象	116
4.3	轧制钢板的缺陷	118
4.3.1	钢板制造法和非破坏试验的应用	118

4.3.2 缺陷的种类	119
4.4 复合钢板中的缺陷	119
4.5 焊接缺陷	125
4.5.1 焊接过程	125
4.5.2 焊接区出现的缺陷	125
(1) 形状、尺寸方面的缺陷	126
(2) 结构组织上的缺陷	127
4.5.3 焊缝缺陷的断面形状和非破坏检查图象的关系	138
(1) 焊接区的缺陷和射线摄影图象	139
(2) 焊接区的超声波试验图象	139
(3) 磁粉探伤和渗透探伤的试验图象	139
4.6 钎焊接头的缺陷	140
4.6.1 钎焊接头产生缺陷的原因	140
4.6.2 钎焊接头出现的缺陷及其检测方法	144
4.7 压力焊边界缺陷	148
第五章 非破坏试验方法	149
5.1 射线非破坏试验法	149
5.1.1 用X射线和Y射线的直接摄影法	149
(1) 射线源的能量	150
(2) 感光材料	150
(3) 灵敏度	152
5.1.2 透视法和间接摄影法	153
(1) 直接透视法	153
(2) 间接透视法	153
5.1.3 特殊摄影法	155
(1) 放大摄影法	155
(2) 立体摄影法	155
(3) 层析摄影法	157
5.1.4 计数管检测缺陷法	159
5.1.5 粒子射线摄影	160

5.1.6	用X射线测量残余应力的方法	162
5.1.7	X射线光谱分析法	164
5.1.8	微波非破坏试验	164
5.2	超声波非破坏试验法	166
5.2.1	超声波反射法	166
(1)	A型显示法	166
(2)	MA型显示法	168
(3)	B型显示法	169
(4)	C型显示法	169
(5)	立体显示法	170
(6)	声象直观法(直接图象法)	171
(7)	计量仪器指示法	171
(8)	超声波电视法	172
(9)	闸门法	173
5.2.2	探伤方法	173
(1)	单探头法和双探头法	173
(2)	垂直探伤法	174
(3)	斜射探伤法	174
(4)	表面波探伤法	176
(5)	板波探伤法	176
(6)	液浸法	178
(7)	穿透法	179
5.2.3	声速测定法	180
(1)	脉冲反射法	180
(2)	用超声波测厚仪的方法	180
(3)	应用延迟回波法	180
(4)	脉冲干扰法	181
5.2.4	衰减的测定	182
(1)	衰减常数测定的原理	182
(2)	利用多次反射的测定法	182

5.2.5	其他方面采用超声波检查	184
(1)	用遥感探测器检查的方法	184
(2)	用接触式探测器检查的方法	184
5.3	利用电磁性质的非破坏试验法	184
5.3.1	利用电特性的方法	185
(1)	静电法	185
5.3.2	电流法	187
(1)	用电流测定裂纹深度的方法	187
(2)	用电流检查夹层	187
5.3.3	电磁感应法	188
(1)	涡流	188
(2)	对材料的电磁感应试验法	190
5.3.4	磁性检查法	191
(1)	磁化方法	192
(2)	检查方法	194
5.3.5	电磁鉴别法	198
5.3.6	利用磁致伸缩现象测定残余应力的方法	198
5.4	利用渗透现象的非破坏试验法	199
5.4.1	渗透法的原理	199
5.4.2	着色渗透法	200
5.4.3	荧光渗透法	200
(1)	水洗型荧光渗透法	200
(2)	后乳化性荧光渗透法	201
5.4.4	利用过滤作用对多孔物质的检查	201
5.5	利用热现象非破坏试验方法	203
5.5.1	利用热传导的方法	203
(1)	霜试验的方法	203
(2)	荧光温度记录法	203
(3)	利用表面张力变化的方法	204
5.5.2	利用热辐射的方法	205

5.6 其他新的非破坏试验方法	207
5.6.1 利用液晶的非破坏试验	207
(1) 液晶	207
(2) 用液晶来检查缺陷	208
5.6.2 声发射	209
(1) 声发射的性质	209
5.6.3 利用外激电子发射的非破坏试验	214
5.6.4 利用全息摄影的非破坏试验	216
(1) 全息摄影的原理	216
(2) 全息摄影技术在非破坏试验中的应用	217
5.6.5 超声波全息摄影	222
5.6.6 质子散射射线摄影	224
5.6.7 电磁超声波	226
第六章 非破坏试验方法的缺陷检出度及其精度	228
6.1 射线透照试验的缺陷检出度	228
6.1.1 象质计(透度计)	229
(1) 象质计的种类	229
(2) 象质计鉴别力的表示法	231
6.1.2 差度计(线质计)	234
6.1.3 象质计的鉴别度	235
6.1.4 射线探伤时的缺陷尺寸及位置的测量精度	237
(1) 缺陷尺寸的测量法	238
(2) 缺陷长度的测量精度	240
(3) 缺陷的深度测量	242
(4) 缺陷面积率(缺陷率)的测量	243
(5) 缺陷位置的测量	246
6.1.5 缺陷的检出度	246
(1) 立体缺陷的检出度	247
(2) 平面缺陷的检出度	249
6.2 超声波探伤试验的缺陷检出度及其精度	253

6.2.1	根据从缺陷反射的超声波评价缺陷	253
(1)	根据缺陷回波的高度进行评价	253
(2)	根据缺陷回波的出现范围对缺陷尺寸进行评价	258
6.3	磁粉探伤试验的缺陷检出度	265
6.3.1	影响磁粉探伤试验缺陷检出度的各种因素	265
(1)	材料的磁学性质	265
(2)	磁化强度及方向	265
(3)	电流	266
(4)	磁粉	267
(5)	载体	267
(6)	表面状态	268
(7)	缺陷的种类	268
6.3.2	缺陷的检测界限	268
(1)	表面裂纹的检测界限	268
(2)	内部裂纹的检测界限	269
(3)	利用测量漏磁的方法测量开口裂纹高度	271
6.4	渗透探伤试验的缺陷检出度	272
6.5	其他非破坏试验的缺陷检出度	273
6.6	各种非破坏试验法的应用范围	273
第七章	材料缺陷对机械强度的影响	275
7.1	铸件的非破坏试验图象与强度的关系	275
7.1.1	轻合金铸件的缺陷图象而强度的关系	276
7.1.2	铸铁的缺陷图象与强度的关系	278
7.1.3	铜锡合金(锡青铜)铸件的缺陷图象与强度的 关系	279
7.1.4	铸钢的缺陷图象与强度的关系	281
(1)	铸钢件的缺陷图象与静态强度的关系	283
(2)	带人工缺陷的铸钢件的旋转弯曲疲劳强度	284
(3)	有自然缺陷的铸钢件的旋转弯曲疲劳强度	286
(4)	黑皮铸钢件的缺陷对其疲劳强度的影响	287

(5) 经加工圆柱形试件的缺陷图象与交变拉伸疲劳强度的关系	289
(6) 铸钢件的缺陷对反复抗拉抗压疲劳强度的影响	291
(7) 缺陷对铸钢件热疲劳强度的影响	292
(8) 缺陷对铸钢蠕变强度的影响	294
7.2 锻钢件非破坏试验的图象与强度	295
7.2.1 锻钢件的缺陷与非破坏检查图象	295
7.2.2 缺陷的种类与强度	295
(1) 鬼线对强度的影响	296
(2) 小型试件的疲劳强度(棒的直径10~12mm)	296
(3) 大型试件的疲劳强度(棒的直径50~60mm)	300
(4) 锻钢材料疲劳强度的各向异性	304
(5) 尺寸效应	305
(6) 有裂纹材料的旋转弯曲疲劳强度	305
7.3 轧制钢板的非破坏试验图象与强度的关系	306
7.3.1 钢板的超声波探伤图象和强度的关系	307
7.4 复合钢板的缺陷和剪切强度的关系	308
7.5 焊接部位的缺陷对机械强度的影响	308
7.5.1 缺陷率计算范围	310
(1) 确定缺陷率计算范围的因素	310
(2) 载荷形式不同时的龟裂发展形态	311
(3) 缺陷率计算范围	320
7.5.2 钢铁焊接部位的缺陷率和静态强度	329
(1) 焊接部位的缺陷和静态抗拉强度	329
(2) 焊接部位的缺陷与静态弯曲强度	334
7.5.3 钢铁焊接部位的缺陷率与冲击强度	337
(1) 缺陷与拉伸冲击强度	337
(2) 缺陷与弯曲冲击强度	337
7.5.4 钢铁焊接部位的缺陷率与疲劳强度	341
(1) 无缺陷焊接部位的疲劳强度	342

(2)	含有气孔缺陷的焊缝的疲劳强度	343
(3)	含有夹渣缺陷的焊缝的疲劳强度	345
(4)	含有未焊透缺陷焊缝的疲劳强度	345
(5)	含有咬边缺陷的焊缝的疲劳强度	347
(6)	含有裂纹的焊缝的疲劳强度	349
(7)	超声波法的缺陷率与疲劳强度	353
(8)	疲劳强度数据的分散度	354
(9)	考虑了安全性的 $S-N$ 线图	354
(10)	缺陷率采集方法不同导致 $S-N$ 线图的不同	361
(11)	对302B钢材以外的钢板的实验	366
(12)	大型试件含有缺陷的焊接部位的疲劳强度	366
(13)	使用异种金属焊条时对接焊缝的疲劳强度	368
(14)	用控制应变的方式求对接焊缝的疲劳强度	372
7.5.5	钢铁材料焊接缺陷对其他强度的影响	373
(1)	焊接缺陷对蠕变强度的影响	373
(2)	焊接缺陷对应力腐蚀裂纹的影响	375
7.5.6	非铁金属的焊接缺陷及其机械强度	377
(1)	铝合金的焊接缺陷与机械强度	377
(2)	钛合金焊接缺陷与机械强度	378
(3)	聚氯乙烯焊接的缺陷与机械强度	379
第八章	应用抽样检查评定焊接质量	382
8.1	焊接部位的缺陷分布规律	382
(1)	手工焊接部位缺陷分布的周期性	382
(2)	手工焊焊接部位缺陷的分布规律	383
(3)	自动焊焊接部位缺陷分布	387
8.2	焊接部位高效抽检法	387
(1)	抽样检查的一个实例	389
第九章	补遗	391
9.1	运用超声波聚焦探头测量缺陷尺寸的方法	391