

CHARLES J. HELLIER 著
戴 光 徐彦廷等 译
徐彦廷 校



无损检测与评价手册



HANDBOOK OF
NONDESTRUCTIVE
EVALUATION

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

无损检测与评价手册

【美】Charles J. Hellier 著

	戴 光	徐彦廷	译 校
李 伟	王晓巍	王亚东	
		徐彦廷	

中国石化出版社

内 容 提 要

本书由查理斯·J. 海勒(Charles J. Hellier)等 10 位美国无损检测领域的著名专家编著而成,其精彩的内容是他们几十年从事无损检测、质量保证、检测及培训的经验和智慧的结晶。书中特别详尽地介绍了无损检测技术的发展历史,由浅入深地论述了现代无损检测技术的基本理论、检测与评价方法和应用实例。正如书中的前言所说“对于许多对这种独特而有挑战性技术感兴趣的人们来说,该书将成为他们的知识来源和参考资料”。

本书可作为无损检测、安全监察、金属材料、化工机械、安全技术及工程等领域的大专院校师生、研究人员和现场技术人员的参考书。

著作权合同登记 图字:01-2004-4035 号

Copyright © 2001 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be produced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体字版权为中国石化出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司共同拥有,由中国石化出版社独家出版。未经出版者预先书面许可,任何人或机构不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

图书在版编目(CIP)数据

无损检测与评价手册/(美)赫利尔(Hellier, C.J.)编著;戴光译.
—北京:中国石化出版社,2006
书名原文:Handbook of Nondestructive Evaluation
ISBN 7-80164-982-6

I. 无… II. ①赫… ②戴… III. 无损检验-技术手册
IV. TG115.28-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 034715 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

http://www.sinopec-press.com

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京大地印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 21 印张 530 千字

2005 年 12 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

定价:78.00 元

(购买时请认明封面防伪标识)

译者的话

该书由查理斯·J·海勒(Charles J. Hellier)等 10 位美国无损检测领域的著名专家编著而成,其精彩的内容是他们几十年从事无损检测、质量保证、检测及培训的经验和智慧的结晶。书中特别详尽地介绍了无损检测技术的发展历史,由浅入深地论述了现代无损检测技术的基本理论、检测与评价方法和应用实例。正如书中的前言所说“对于许多对这种独特而有挑战性技术感兴趣的人们来说,该书将成为他们的知识来源和参考资料”。

本书的中文版由戴光(第一、二、十章)、徐彦廷(第三、四、五、六、八章)、李伟(作者简介、合译第七章)、王晓巍(前言、第九章)、王亚东(合译第七章、中英文索引)翻译。本书由戴光教授统稿,徐彦廷副教授校对了全文。参与部分翻译工作的还有大庆石油学院声发射检测与结构完整性评价实验室的龙飞飞、杨志军、张颖、赵俊茹、徒芸、方江涛等;特别感谢赵俊茹女士作了大量的文字和图表处理工作。在他们的努力和支持下,使得本书得以顺利完成,在此译者一并致以诚挚的谢意。

本书的中文版可作为无损检测、安全监察、金属材料、化工机械、安全技术及工程、石化企业和制造企业等领域的大专院校师生、研究院所的研究人员和现场技术人员的参考书。

由于时间紧和翻译工作量大,书中难免有错误和不足之处,恳请读者给与指正。本书中文版的出版如能促进我国无损检测技术的发展,我们将感到非常荣幸。

译者

前 言

人们或许想知道为什么该手册采用了“评价”一词来代替与“无损”连用的通称“检测/检验”。美国传统辞典恰当地定义了“无损”的含义：调查或检验时对材料不产生损害的一个过程，或与该过程相关。来自同一出处的“检验”一词的最合适定义是：“确定某一物质的存在或特性”及“当实施检验时显示已知的特征”。还有其他几种定义，但不太适用。另一方面，“评价”对于该手册的意图来说似乎具有更适宜的含义：“谨慎地检查与判断，然后作出评价”。按照 ASTM E-1316 的定义，“评价”是“在对记录的指示进行解释后的一种审查，以确定这些指示是否满足特定的验收准则”。

事实上，这些术语一直以来与其他的一些表达法如“检测”、“检查”及“调查”混用。一般而言，所有的这些术语均指同一技术，即一般公众仍然普遍不了解或误解的一种技术。事实上，采用这些不同的术语本身就可能引起这种误解。如果允许对这些定义做一种统一的解释，我认为 NDE、NDT 或 NDI 的合适定义应为：“在检查时对材料或零件不产生任何损害或改变的一个过程，并通过此过程可探测或测量到缺陷或不连续的存在，然后进行评价”。

该手册的目的就是向那些想概括了解最常用方法的人们介绍无损检测的技术。各种不同的方法都有许多很好的参考书，如果需要的话，可从这些书中获得更多的深入信息。

无损检测过程中的关键因素是检测人员。在许多情况下，无损检测人员都要承受不利的环境及有害工作条件的影响。这些检测人员得到检验资格的先决条件是完成广泛的训练课程和满足较长时间的经验要求。而且这种资格并不是一劳永逸的。许多法规和规范都要求定期的再训练及再取证。大多数检验员都是在用户审查员或第三方监督员的经常性详细审查下工作的。有时，检验员需要到很远的地方进行检测，离开家的时间和工作时间都很长。检测人员应该总是抱有“正确地做好检测工作”的愿望。可以想象：若遗漏了严重的不连续，而将会导致某种形式失效的后果。尽责的检测人员是谨慎认真而有同情心的人。在无损检测领域，“只做自身的工作”的人是没有存在空间的。虽然这项工作需要特殊类型的专注的人，但是回报也是巨大的！无损检测技术致力于使这个世界成为一个更安全的地方，通过专心做好该技术来帮助人类的想法成为许多从业人员的动机。对于那些正直诚实的人们来说，无损检测是一个可敬的职业。当无损检测从业人员失去了道德规范时，他们就失去了一切！

该手册已由一组专业人士编著出来，作者们都坚信该书是正确的。我们的愿望是，对于许多对这种独特而有挑战性技术感兴趣的人们来说，该书将成为他们的知识来源和参考资料。追求完美应该是无止境的。正如 Robert Browning 曾经著述的：“啊！人类所能达到的能力应该超越已达到的能力范围，否则苍天也会责备”。

☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆

谨以此手册献给无损检测领域的两位先驱者

Robert C. McMaster, 1913—1986

Samuel A. Wenk, 1914—1990

他们为如今在工业领域扮演重要角色的

无损检测技术奠定了基础。

没有这些“巨人”们的贡献,无损检测领域或许是另外一种状况。

作者简介

Charles J. Hellier (主要作者兼审稿人, 第 1、4、6 章的作者) 是该书的创始人, 现在为 HELLIER(Rockwood 服务公司的一个分支机构) 的总裁。Hellier 是一个在北美提供广泛技术服务的多学科机构。Hellier 具有 40 多年无损检测、质量保证及检测的经验。他在美国宾州的 Temple 大学完成了他的正规教育。他是一名注册的专业工程师、委员会授权的法庭鉴定官, 并持有五种无损检测方法的Ⅲ级证书。他还持有美国无损检测协会(ASNT)颁发的涵盖五种无损检测方法的一个Ⅲ级证书。

Hellier 先生是 ASNT 的前任全国会长, 且一直活跃在此组织 40 余年了, 在许多委员会、董事会及各种理事会供职。他在世界范围内发表了许多演讲和论文, 并被广泛地出版。他现在是无损检测管理协会(NDTMA)的全国会长, 并具有 ASNT(特别会员)、ASME、ASTM、AWS、ASM、ABFE(特别会员)及 NDTMA 的会员资格。

Michael W. Allgaier (作者, 第 2 章)现在是电力研究所无损评价指导部门的经理, 为位于 NC(新喀里多尼亚)Charlotte 的无损评价中心提供支持。他有 30 余年支持海军核计划及商业核能工业的经验。作为一名在无损检测、质量保证及培训计划方面的经理、主管、技术分析家和教员, 他提供了技术和程序上的支持。Allgaier 先生在 Fairleigh Dickinson 大学接受教育, 并获得了企业管理的理学士学位。他在 New Jersey(新泽西)工学院获得了理学硕士学位。他的论文是关于技术—专业人员(NDE)的资格认可。他作为目视检测、液体渗透检测、磁粉检测、超声波检测和射线检测的Ⅲ级 NDE(无损评价)人员服务于通用公共核事业。他一直积极参与美国无损检测协会的活动。他曾供职于全国资格证书委员会 6 年。他在材料评价上发表了几篇关于目视检测及人员取证方面的文章。Mike 还是由美国无损检测学会(ASNT)出版的 NDT 手册中第八卷: 目视与光学检测的技术编辑。

John Drury (合著者, 第 7 章)在作为一名皇家空军的工程师军官服役期间涉足了无损检测。离开空军后, 他继续从事无损检测的职业, 起初在军火工业和航空航天领域, 后来在钢铁、公用事业及石化领域。在 1978 年, 他的“技术员超声波缺陷探测”一书被出版, 并成为许多取证计划的标准读物。自 1983 年以来, 他开办了自己的公司: Silverwing(英国)有限公司, 该公司擅长于超声波检测、管道检测及漏磁检测。

Richard D. Finlayson (作者, 第 7 章)在 Ohio(美国俄亥俄州)州立大学获得了无损评价专业的理学硕士学位, 还在加拿大航空训练及工程军事学校获得准工程师, 以及在位于加拿大 B.C. 省 Victoria(维多利亚)及 Ontario(安大略省)Kingston 的皇家道路与皇家军事学院获得了电子学士学位。他已从事军事职业 30 余年, 并在两个不同军种中服役。他是空军的无损评价与状态监测的项目经理。他被聘为物理声学公司(PAC)市场与销售的主任。他的职责还包括含声发射技术在内的应用发展、研究与发展建议的提交及新市场的开发, 他现在是 PAC 研究、工程应用、取证及培训与新商业发展的主任。

Richard A. Harrison (作者, 第 5 章)在英国出生和受教育, 在英国航空军用飞机行业工作了 20 年, 后来从事无损检测工作 15 年, 对五种主要无损检测方法(UT、RT、ET、PT、MT)及目视检测(VT)进行“传递”和管理两种角色的工作。在 1995 年成为无损检测的分

部高级领导后，他退出并开始了一项新的角色：位于加利福尼亚州的 Hellier 无损检测培训学校的总经理兼高级 NDT 教师。在五年的时间里，他除了准备、管理和评定所有方法的 NDT 考试等级以及为众多用户提供Ⅲ级户外中介服务外，还教授了六种方法的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级 NDT 课程。在 2000 年 2 月，他成立了自己的公司：T.E.S.T. 无损检测公司，建于南加利福尼亚州。他持有一个涵盖 UT、RT、ET、PT、MT 及 VT 的 ASNT Ⅲ级证书，而且他还被授予了在 PT、MT、RT、UT、及 ET 方面的 PCN(ISO 9712)Ⅲ级证书。他现在是洛杉矶(Los Angeles)ASNT 分部的秘书，而且还是 AWS(美国焊接协会)、英国无损检测学会的成员。他还是欧洲工业委员会的会员工程师。

Robert B. Pond, Jr. (作者，第 2 章)获得了 Johns Hopkins 大学兼职教师 1995 年度奖的称号，在 1996 年获得价值奖教员的称号，并在 1999 年获得美国国际材料协会的杰出教育家奖。他的专业经历包括：任 Maryland(美国马里兰)州 Baltimore(巴尔的摩)市的金属结构有限公司总裁；任 Maryland 州 Baltimore 市 Johns Hopkins 大学的兼职教师；任 Ohio 州 Materials Park 的美国国际材料协会的兼职教员；任 Maryland 州 Baltimore 市 Johns Hopkins 大学无损评价中心的兼职研究科学家；任制造工程师协会的兼职教师；任 Maryland 州 Baltimore 市的 Loyola 大学的兼职教师；任 Karta 技术有限公司实用操作部副主任；任 Maryland 州 Baltimore 市的 Baltimore 气体与电气公司的首席冶金学家；为 Calvert Cliffs 核电站场外安全审查委员会的成员；任 Maryland 州 Annapolis 市美国海军军官学校机械工程系的助理教授；任 Maryland 州 Aberdeen 市的 Aberdeen 试验场 Ballistics 研究工作实验室的顾问；任南韩共和国国防部的顾问；任 Maryland 州 New Windsor 的 Windsor 金属晶体有限公司的总裁；任 Maryland 州 Westminster 的 Marvalaud 有限公司的首席研究员。

他的专业生涯包括：材料工程学会委员会，美国国际材料协会；美国焊接协会；Johns Hopkins 大学无损评价中心，Baltimore 气体与电气公司的代理人及兼职研究科学家；电力研究所无损评价中心的筹划指导委员会主席；Edison 电气学会材料与加工委员会的副主席。

Pond 博士的专长领域包括：采用金相学、金属断面的显微镜观察、硬度与显微硬度测试方法提供材料工程服务及材料特性；扫描电子显微镜方法及能量色散光谱学；伺服液机械检验；Charpy(夏比)冲击试验，宏观照相法；采用着色渗透检测、磁粉检测、超声波与同位素检测、X 射线检测及微焦 X 射线照相检测进行材料的无损评价；热处理炉；模拟试验的资源与经验。他是材料失效评价及材料用于新场合的专家。

George R. Quinn (作者，第 8 章)具有在 NDT 培训、疑难问题处理及开拓市场方面 30 余年的经验。他在 Vermont 州(美国)的 Saint Michael 大学获得英语的文学士学位。他后来在美国空军作为飞机维护军官服役了五年，获得了上校军衔。他在完成军队服役后，在 Branson 仪器公司作为培训主任从事超声波检测工作，并作为 Krautkramer Branson 市场服务的经理。在 Branson 机构工作了约 12 年后，Quinn 先生成立了他自己的 NDT 营销公司，其客户包括美国无损检测协会及 Hocking 电子。Quinn 先生在 Hellier NDT 作为营销的副主任工作了十年。在 Hellier 工作期间，Quinn 先生撰写了培训手册并编写了专业课程。他现在是 Rockwood 服务公司 Hellier 分部的涡流检测与超声波检测的高级教员。Quinn 先生在整个北美以及欧洲和亚洲进行了讲学。他持有电磁检测及超声波检测方法的 ASNTⅢ级证书。

Michael Shakinowsky (合著者，第 7 章)在英国得到了无损检测的培训。虽然超声波检测是他的专业，但他却持有一个涵盖超声波检测、射线照相法、磁粉检测及渗透检测的 ASNT Ⅲ级证书。在加入工程大学后，他专攻无损检测专业，并一直从事该行业 30 余年。他

的工作主要包括传感器设计、研究与开发、实际应用以及培训。他在许多国家工作过，建立自动化系统，实施检验以及进行培训。他同时供职于 ASTM 及 ASME 的国家委员会超声波检测学科，供职于 Connecticut(康涅狄格)州立社区学院之一的顾问委员会，并经常做为一名客座讲师进行授课。

John R. Snell, Jr. (合著者, 第 9 章)是热敏成像检测专业的一名领袖, 他在能量援助部的计划中及住宅防护署(ACS)的计划中提供能量咨询服务时, 率先采用了热成像设备。在 1984 年, Snell 先生创建了 Snell 红外线检测公司, 以更好地满足于他的客户需求。Snell 红外线检测公司已将其培训服务扩大到了许多新用户, 并开展了广泛的现场应用。1992 年该公司开始对热敏成像检测人员授予合格证书, 现在已成为几家大公司的资格认证机构。Snell 先生仍然继续活跃在专业领域中。他自 1990 年以来一直参加热敏指导委员会, 他是第十六届热敏委员会的主席, 并一直工作在美国无损检测协会的标准制定委员会。他举办了热敏成像法的会后研究会, 并成为其组织者和 1995 年秋季 ASNT 会议 T/IRT 分会的主持人。在 1994 年, Snell 先生有幸成为美国第一个持有 ASNT 热敏成像法Ⅲ级证书的人。他现在还与三个 ASTM 委员会以及 EPRI(电子顺磁共振协会)和 IEEE(电气和电子工程师协会)一起工作, 制定标准书面程序, 并撰写了无数的文章和专业论文。他是 Montpelier 市(美国佛蒙特州首府)地方学校系统的志愿人员, 是树木委员会的主席, 并为 Vermont(美国州名)历史协会的董事会成员。Snell 先生是 Michigan(美国密歇根州)州立大学的毕业生。

Robert W. Spring(合著者, 第 9 章)一直积极地从事热敏成像检测专业。他与 Snell 红外线检测公司一起向广泛领域的工业客户提供了热敏成像法的培训和检测服务。他在程序编制方面的研究形成了四篇热敏技术方面的合作论文。Spring 先生在热敏协会、ASHRAE(美国采暖、制冷与空调工程师学会)及 ASNT 中保持了积极的专业活动, 他供职于热敏成像检测的标准制定委员会。1995 年 Spring 先生成为 Snell 红外线检测公司的合伙人。从 1980 年到 1995 年, Spring 先生是一个专业工程咨询公司的负责人, 专门向工业、公共设施及商业提供广泛的能量管理服务。这些服务包括技术分析、项目管理、程序编制以及教育服务。在此期间, 他设想、制定并提出了一份全国范围的教育计划, 以降低社会公共机构的能量使用。Spring 先生以前的专业经历包括在美国公共健康署工作了三年, 他作为一名严格的工程师向 Alaska(美国的阿拉斯加州)和美国东部的土著美国人提供环境健康服务。在 USPHS(美国公共卫生署)工作期间, 他为遥远的阿拉斯加州村庄的水及废水设施的操作者成功地制定并提出了一种超越文化的预防性维护培训计划。Spring 先生在工程师军团还工作了五年的时间, 他的职责是管理一个很大的指导小组, 同时编制并向 800 余人介绍人事关系课程。作为 Norwich 大学的一名研究生工程师, Spring 先生是一名注册的专业工程师, 持有热敏成像技术的 ASNT 无损检测Ⅲ级证书, 他还是一名能量工程师协会的持证能量经理。

目 录

第1章 无损检测介绍

1.1 什么是无损检测?	(1)
1.2 关于 NDT 的观点	(2)
1.3 无损检测的历史	(2)
1.4 非破坏性与破坏性试验	(9)
1.5 有效地进行无损检测的条件	(11)
1.6 人员要求	(11)
1.7 证书总结	(15)
参考文献	(15)

第2章 不连续——起源和分类

2.1 金属的初次加工	(17)
2.2 铸造	(17)
2.3 裂纹	(21)
2.4 焊接不连续	(21)
2.5 塑性变形引起的不连续	(23)
2.6 腐蚀产生的不连续	(23)
2.7 操作中产生的不连续——疲劳 裂纹	(25)
2.8 操作中产生的不连续——蠕变	(25)
2.9 操作中产生的不连续——脆性 断裂	(26)
2.10 几何不连续	(26)
2.11 总结	(27)
2.12 冶金及不连续术语的汇总表	(27)
2.13 不连续指南	(30)

第3章 目视检测

3.1 历史与发展	(33)
3.2 理论及原理	(35)
3.3 设备及附件	(38)
3.4 应用与技术	(46)
3.5 检测结果评价及报告	(61)
3.6 优势与局限性	(64)

3.7 术语表和关键术语	(68)
参考文献	(71)

第4章 渗透检测

4.1 引言	(72)
4.2 历史与发展	(72)
4.3 理论及原理	(74)
4.4 渗透检测装置和材料	(75)
4.5 渗透检测程序	(80)
4.6 技术与变量	(82)
4.7 评定与处理	(87)
4.8 渗透检测的应用	(88)
4.9 质量控制的影响因素	(88)
4.10 优点和局限性	(90)
4.11 渗透检测术语表	(90)

第5章 磁粉检测

5.1 磁粉检测的历史与发展	(93)
5.2 理论与原理	(94)
5.3 设备及辅助件	(105)
5.4 技术方法	(108)
5.5 变量	(113)
5.6 检测结果评估及报告	(116)
5.7 应用	(118)
5.8 优点与局限性	(120)
5.9 主要术语的词汇表	(121)
参考文献	(122)

第6章 射线检测

6.1 历史与发展	(123)
6.2 理论与原理	(128)
6.3 射线照相设备及附件	(133)
6.4 变量	(135)
6.5 透照方式及检测程序	(144)
6.6 评片	(149)
6.7 应用	(154)

6.8 射线检测方法的优点与 局限性	(156)
6.9 射线照片的示例	(157)
6.10 术语表	(159)
参考文献	(161)

第7章 超声波检测

7.1 发展历史	(162)
7.2 理论和原理	(164)
7.3 超声波检测设备	(179)
7.4 技术方法	(191)
7.5 变量	(216)
7.6 检测结果评价	(218)
7.7 应用	(219)
7.8 优点与局限性	(221)
7.9 术语表	(222)
参考文献	(225)

第8章 涡流检测

8.1 历史和发展	(226)
8.2 理论和原理	(227)
8.3 交流电原理	(231)
8.4 涡流	(236)
8.5 检测设备	(240)
8.6 涡流应用和信号显示	(248)

8.7 优点与局限性	(260)
8.8 其他电磁检测技术	(261)
8.9 关键术语的词汇表	(262)
8.10 进一步阅读的建议	(265)

第9章 热红外线检测

9.1 发展历史概述	(266)
9.2 理论及原理	(268)
9.3 设备及附件	(273)
9.4 技术	(277)
9.5 变量	(281)
9.6 检测结果的评价和报告	(284)
9.7 应用	(284)
9.8 优点和局限性	(295)
9.9 术语表	(295)
参考文献	(298)

第10章 声发射检测

10.1 历史与发展	(299)
10.2 声发射检测的原理	(299)
10.3 声发射检测的优点和 局限性	(321)
10.4 声发射术语表	(322)
参考文献	(324)

第1章 无损检测介绍

1.1 什么是无损检测?

无损检测(NDT, Nondestructive Testing)可以广义地定义为:为了确定是否存在影响物体使用性能的条件或结构不连续,在不改变物体状态和性质的条件下所进行的各种检查、测试、评价方法。

无损检测也可以用来测量物体的其他特征,如大小、尺寸、外形、结构(包括合金成分、硬度、结晶粒度等)。无损检测最简单的定义为,对各种类型、尺寸、形状或材料的物体,为了确定是否存在结构不连续或评价材料的其他性质所进行的检查。无损检查(NDE, Nondestructive Examination)、无损探伤(NDI, Nondestructive Inspection)、无损评价(NDE, Nondestructive Evaluation),也是常用用来描述这项技术的术语。这项技术虽然已经被有效地应用了数十年,但一般人仍然缺乏了解。他们想当然地认为,建筑物不会坍塌、飞机不会坠毁、产品不会失效。

作为一项技术,无损检测(NDT)在过去的25年内经历了巨大的发展与独特的革新。实际上,从独特性与创新的角度看,它是当今发展最快的技术之一。近来的设备完善和改进,以及对材料更深入的理解和各种产品和系统的使用,都使得这项技术在许多行业成为一项非常重要的技术,并获得了广泛的应用和认同。这项技术进入了我们的日常生活。在增强安全方面,或许该技术比包括医疗行业在内的任何其他技术所做的工作更多。可以设想,若没有无损检测的有效应用,会发生多少起事故和意外损失。事实上,无损检测已成为工业中每个过程的一个主要部分,产品的失效可能引起事故或人身伤害。在某种程度上或者本质上,无损检测决定了当今每种主要工业的存在。

实际上,无损检测是人们基于日常生活,并在无预见的情况下完成的一个过程。例如,当将一枚硬币投入自动售货机的投币孔里并进行选择时,无论要买糖果还是买饮料,硬币实际上都要接受一系列的无损检测。售货机将对硬币进行尺寸、重量、形状、以及金属性质的快速检查,如果顺利地通过了这些检测,购买的产品就会从自动售货机中被弹出。再如人们比较普遍地用声音能量来确定壁骨在墙板后的位置。我们常常利用视觉来评价如颜色、形状、运动、距离等特征,以及用于鉴别目的。从广义上来说,这些例子符合无损检测的定义——物体是在未发生任何方式改变的条件下被评价的。

人体已被认为是有史以来最独特的一种无损检测仪器。把手放在热物体的附近,不用直接接触,就可以感觉到那个物体具有的相对高温。嗅觉可以让人觉察到散发出令人不舒服气味的物体在周围。无需直接观察物体,仅靠触觉就可以知道物体表面的粗糙程度、构造、尺寸、形状。听觉可以对各种声音或者噪音进行分析,据此可以对这些声源做出判断。例如,在横穿街道前,人们可以听到卡车开过来的声音,很显然的决定就是不要在这个巨大的移动物体前面迈出脚步。但在人类的所有感觉中,视觉为我们提供了最丰富和独特的无损检测方法。很明显,当我们考虑到视觉广泛的应用范围和仅靠简单的观察就可确定最终信息时,目视检测(VT)就成为一种十分广泛应用的无损检测技术。

工业中，无损检测应用得更多了，可以有效地应用在下面几个方面：

1. 加工前对原材料的检测；
2. 作为一种过程控制手段，对材料加工过程中的评估；
3. 对成品的检验；
4. 对在用产品和结构的评估。

实际上，无损检测可以看作是对人类感觉的延伸，通常使用精密的电子仪器和其他专用设备。这些仪器和设备的使用能够提高人类感觉的灵敏度和应用范围。另一方面，无损检测的错误或不恰当应用也可能引起灾难性的严重后果。如果检测未能正确地执行或对检测结果的解释不正确，就可能产生灾难性的后果。为了尽可能减少这些问题，必须让有资格的人员采用正确的无损检测方法和技术进行检验。关于有效的无损检测条件将在本章后面叙述和进一步讨论。

总而言之，无损检测是一种有价值的，由有资格的人员在考虑了所有必要的检验因素，遵守认可的步骤并进行了检验后，提供被检测物体状态信息的技术。

1.2 关于 NDT 的观点

这里必须指出对 NDT 的一些错误观点。一个普遍的误解就是，采用 NDT 后在一定程度上可以确保每个部件都不会失效或出故障。这种观点是不对的。每种无损检测方法都有它的局限性。任何一种无损检测方法本身都不是万能的。多数情况下，一个彻底的检查至少需要两种方法，一种方法检测部件的内部，另一种方法检查部件的表面状态。使用前必须知晓各种方法的局限性。例如，某种具体的无损检测方法可能对某些方向的不连续不易检测到。同样，必须理解和强调，对于每种检测方法，其探测能力的临界值是一个重要的变量。虽说有标准和规范来界定不连续性的类型和尺寸是否可以接受，但如果所用的检测方法不能揭示这些状态，那么标准和规定就变得毫无意义了。另外一个误解就存在于对被检测物体或部件的性质和特性的理解。在选择检测方案前，有必要尽可能多地了解信息。重要的事项，如部件的使用经历和部件的计划用途，以及适用的规范和标准，必须在进行无损检测之前彻底知晓。

有时，我们会做出错误的假定，即部件用某种无损检测方法或技术检查后，会有某种神秘的转换来保证部件是安全的。规范和标准仅规定了最低要求，因此并不能作为确保是否存在不连续的依据。这些标准规定了不连续是否可以接受，但是并不保证所有可接受的不连续在部件使用后不出任何问题。这样就要求在部件或结构在使用中采取某种监控或评估。

另一个普遍的误解是和执行检测的人员相关的。因为 NDT 是一种经验性的检测技术，检测人员的资格就成了一个重要因素。再成熟的设备和再先进的技术在一个不合格的检测人员使用下也可能得不到令人满意的结果。无损检测的有效性取决于检测人员及其技术水平。本章后将对此进行更详尽的阐述。

1.3 无损检测的历史

最早的无损检测开始于什么地方？有人认为，圣经上在开天辟地时就已经出现，“刚开始，上帝创造了天和地，他觉得很好(图 1-1)”。在讨论无损检测技术的历史时，这就一直是谈论的话题。由此，“天和地很好”就成为第一次无损检测的应用——目视检测！

我们不可能确切地指出，作为我们今天所知的无损检测开始于哪一天。远古时代，就曾



图 1-1 从太空看到的地球
(由美国国会图书馆提供)

从 Damascus (大马士革, 地名) 剑锋的回声来判断在战斗中用的剑的强度。同样的“声技术”也被铁匠们用了几十年(图 1-2), 他们聆听正在成形的不同金属的响声。这种方法同样为早期的铃铛制造商采用。通过聆听铃铛的响声, 就可以以某种很普通的方式确定金属的坚固性。目视检查(VT)尽管没有被正式看作早期 NDT 技术的一部分, 但被广泛地应用了许多年。对热的感觉可用于监测材料温度的变化, 声音检测早在“无损检测”这个术语出现前就已经被应用了。

表 1-1 列出了 NDT 发展历史上的一些重要事件和对这些发展做出重要贡献的人物。当然还有

许多人也对 NDT 的发展做出了重要贡献, 但不可能把他们都列举出来。

从 50 年代后期到现在, 在新仪器和新材料的推动下, NDT 经历了空前的发展、革新和增长。新装备与计算机的结合对 NDT 产生了巨大的影响。关于档案的即时海量存储技术使 NDT 提高到以前只能想象的水平, 然而 NDT 仍处在发展的初期。通过技术拓宽和特殊材料的发展, NDT 会随着新挑战得到不断发展。除非灾难性的失效不再与材料缺陷的存在有关, 否则对检测和识别更小的不连续的要求就不会终止。



图 1-2 早期的铁匠(由 C.Hellier 提供)

无损检测技术在 20 世纪 20 年代以前就萌芽了, 而今天所知的主要检测方法到 30 年代末 40 年代初才开始形成。后来许多较新的发展是在第二次世界大战期间重大事件的推动下产生的。在 20 年代, 人们已经对磁粉检测、目视检测以及当时主要用于医疗领域的 X 光照相术有了一些了解。在铁路工业的早期, 今天的渗透检测技术的前身——当时被称为“油和白垩”——就已经被广泛应用了。那时候也有些基于涡流检测(ET)

基本原理的电检测方法。声音或“响声”检测方法, 以及某些古老的以镭作为放射源的 γ 射线照相技术, 都获得了一定程度上的成功。基于这些基础发展, NDT 技术才发展成为当今的许多成熟和独特的技术。(表 1-2 为主要的 NDT 方法的综合概述。)

表 1-1 早期 NDT 技术重要事件年表

公元前	当上帝创造了天地,“发现”这很好时,目视检验就成为了第一项 NDT 检验方法
1800	William Herschel 首次做出温度记录观察报告
1831	Michael Faraday 首次观察到电磁感应现象
1840	Herschel 的儿子 John 首次做出红外线图像
1868	通过观察到磁化的枪管如何影响指南针,S.H.Saxby 首先指出对磁性物质的试验
1879	E.Hughes 早期用涡流来探测导电性、导磁性和温度的差异
1880 ~ 1920	“油和白粉”检测技术,用于铁路导轨和锅炉钢板现代渗透检测的前身
1895	Wilhelm Conrad Roentgen (伦琴) 发现了 X 光

1898	Marie 和 Pierre Curie (居里)发现了镭元素
1922	H.H.Lester 博士发明了金属的工业射线照相技术
1927 ~ 1928	Elmer Sperry 博士和 H.C.Drake 发明了用于铁轨检测的电流感应/磁场探测系统
1929	A.V.deForest 和 F.B.Doane 首次提出了磁粉检测,并提供了设备
1929	俄罗斯的 S.Y.Sokolov 首次进行了石英传感器在材料中产生超声振动的试验
1930	Robert F. Mehl 博士示范了来自镭的 γ 射线照射技术的实际应用
1935 ~ 1940	Betz, Doane 和 DeForest 发明了渗透检测技术
1935 ~ 1940 年代	H.C.Knerr, C.Farrow, Theo Zuschlag 和 F.Foerster 博士推进了涡流检测设备的发展
1940 ~ 1944	Floyd Firestone 博士在美国发明了超声波检验方法
1942	英国的 D.O.Sproule 发明了使用脉冲回声的超声缺陷探测器
1946	Branson 设计了便携式超声厚度测量仪
1950	J.Kaiser 提出了声发射作为一种无损检测方法
1950 中叶	Donald C. Erdman 发明了第一代浸入式超声检测 B/C 扫描仪

表 1-2 主要的无损检测方法综述

方 法	原 理	应用范围	优 点	不 足
目视检测 (VT)	由人眼或光敏设备对被检测物体的反射光或发射光成像	许多工业领域和场合都可以用。从原材料到成品到在用检查	廉价、简单、培训很少。范围广,优点多	只能评价表面状态,需要光源,必须能接近
渗透检测 (PT)	将可视或荧光物质的液体涂到表面,由毛细作用进入不连续处	事实上,可用于任何无覆盖层、未污染的无吸附性固体	操作相对简单、材料廉价。特别敏感、通用、培训少	只能检测到开口至表面的不连续。表面必须相对光滑且没有污染物
磁粉检测 (MT)	磁化被测部件后将细磁粉涂于表面,不连续处会呈现线条	适用于检测所有铁磁性材料的表面和近表面的不连续。大小部件均可	使用相对简单,设备或材料通常廉价,比 PT 灵敏、快捷	只有表面和较少的近表面的不连续可以检测到,只适用于铁磁性材料
射线检测 (RT)	放射线穿透试件时胶片曝光。不连续对曝光有影响	适用于大部分材料、形状和结构。例如新制造或在用的焊接件、铸件、组合件等	可提供永久性的记录,高灵敏度。最广泛地被应用和认可的体积型缺陷检查方法	检测的极限厚度与材料密度有关。平面不连续的(可检测方向)有临界值。射线有害
超声波检测 (UT)	来自传感器的高频声脉冲在试件材料中传播,遇交界面反射	只要声音传播性和表面粗糙度较好,形状不复杂,可适用于大多数材料的检查	提供快速、精确、高灵敏的检验结果。厚度信息、深度及缺陷种类等都可在此构件的一个表面得到	通常没有永久记录。材料衰减、表面粗糙度和外形影响检测。需耦合剂
涡流检测 (ET)	导电试样在电磁感应的作用下产生局部电场	几乎可以对所有导体的缺陷、冶金状态、减薄及导电性进行检验	快速、通用、灵敏,非接触式,适于自动化和现场检验	必须理解和控制变量。只穿透浅层,离地距离影响和表面条件
红外热成像法 (TIR)	用温度传感器/探测仪/照相机测量被检测表面的温度变化	适用于温度的变化与部件状态和热导性有关的大多数材料和部件	对小部件或大区域的温度微量变化非常敏感。可提供永久的记录	不能有效探测厚部件中的缺陷。只能评价表面状态。评价需要较高的技术水平
声发射检测 (AE)	在不连续扩展时,能量被释放并以应力波的形式在材料中传播。由传感器进行探测	受应力或载荷作用的焊接件、压力容器、回转设备、某些复合件及其他结构	可对大区域监测其损伤状态。可以有效预测失效	传感器必须接触检测表面。需要多个传感器来缺陷定位。需要对信号解释

在二战以前,设计工程师满足于采用异常大的安全系数来设计和制造产品,如压力容器和其他复杂部件。在战争的推动下,不连续和不完善对产品或系统的有效寿命和使用的影响得到了重视。此外,大量的由产品质量不完善引起的灾难性失效和其他事故使得人们对系统和部件质量的关注程度达到空前。制造和检测手段的改进可归功于锅炉(图 1-3)及某些早

期的灾难性失效。

在 1854 年的 3 月的一个阳光充足的非季节性温和的一天，在(美国)Connecticut(康涅狄格)州的 Hartford(哈特福德首府)发生了一次这样的灾难性破坏。在午餐后，人们正在返回办公室和车间。大约下午 2 点钟，一个人进入了(Fales and Gray Car Works)操作室，并和一个操作工程师闲聊。就在那时，锅炉突然以巨大的能量爆炸了(图 1-4)。此次爆炸毁坏了锅炉房和附近的铁匠铺，并严重毁坏了主体建筑。在此次严重的锅炉爆炸事故中，9 人当场死亡，12 人随后死亡，另有 50 多人受重伤。锅炉还是很新的，使用不到一个月。此锅炉是由一个著名的经验丰富的锅炉制造厂制造的。需要再次强调的是，这个锅炉在制造中采用了特别大的安全裕量。实际上，早期的许多锅炉在制造的时候，人们还没有深刻理解热力学的基本原理。这次锅炉爆炸事故最终被确定为是由于蒸汽过量的聚集而引起的。根据掌握的声音信息确认了事故原因和责任，据此评判委员会就今后如何避免或最大限度地减少此类事故给出了如下的建议：

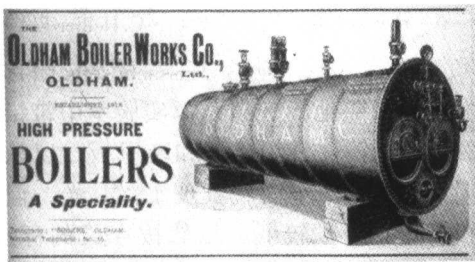


图 1-3 旧锅炉(由 C.Hellier 提供)

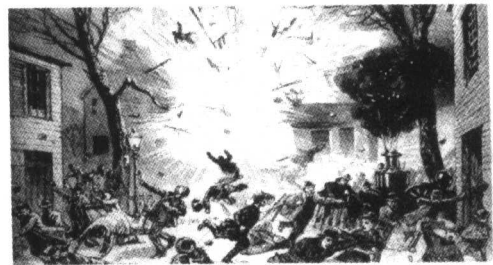


图 1-4 锅炉爆炸(由 C.Hellier 提供)

- 开始执行禁止粗心或不熟练的人员操作锅炉的规章；
- 由授权的市或州的代表进行定期安全检查；
- 锅炉应置于厂房建筑以外；
- 禁止锅炉在安全操作温度以上操作。

这是检测和 NDT 重要性和进步的转折点。10 年后的 1864 年，Connecticut 州颁布了一部锅炉检测法规。该法规要求每个锅炉必须一年检查一次，满足安全条件将获得使用证书，否则就停止使用。由这次早期锅炉爆炸事故带来的另外一个好处就是工艺协会在 1857 年成立。12 位对锅炉有兴趣的人士定期会晤并研究与蒸汽锅炉相关的问题。

在早期的锅炉中，还出了许多其他的严重事故。其中一件特别让人难忘的是一艘名为‘Sultana’的(蒸汽)轮船，它是密西西比的带两个高烟囱的侧轮船(图 1-5)。在 1865 年 4 月 27 日，它正沿 Memphis(古埃及城市)河往上进，突然 4 个锅炉中的 3 个爆炸。这次严重的灾难性爆炸的实际原因至今仍未为人知晓。Sultana 通常搭载约 375 名乘客，但是那天船头至船尾竟然拥挤上了约 2200 人，其中多数是在 Appomattox 投降后从监狱释放的联军士兵。目击者声称，在 15min 内轮船就烧毁，沉入水面下。尽管不精确，死亡人数估计 1200 ~ 1600。据准确数据，这可能是航海史上最严重的事故。实际上，极有可能这次爆炸中死亡的人数比在 1912 年的泰坦尼克号沉没死亡的 1517 人更多。

在 1866 年春，Connecticut 立法院批准了合并 Hartford 蒸汽锅炉检测和保险公司的法案(图 1-6)。这具有重要意义，因为这个公司的业务主要是提供锅炉保险。探伤是对锅炉进行保险的先决条件。1867 年 2 月 14 日，第一项业务是面值 5000 \$ 的三个卧式火管锅炉，保险

费为 60\$。首个锅炉规范委员会于 1911 年成立，首部规范在 1911~1914 年间产生并在 1915 年首次发行。目视检测(VT)是无损检测的最初的方法。当然锅炉规范的颁布和执行对无损检测多年来的发展和应用产生了重要的作用。

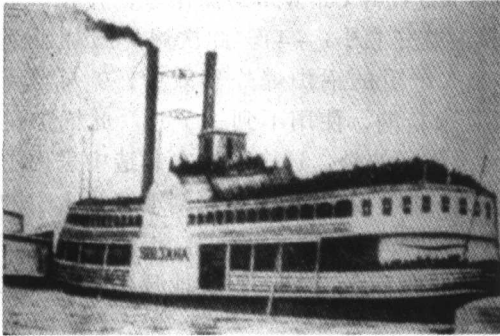


图 1-5 Sultana 号轮船(由美国国会图书馆提供)



图 1-6 Hartford 蒸汽锅炉广告(由 C.Hellier 提供)

在 1920 年, H. H. Laster 博士, 工业射线检测的负责人, 开始了他在 Massachusetts 州首府 Boston 的 Watertown Arsenal 的工作。图 1-7 描述的就是 1922 年他的 X 射线源实验室中带铅隔层的曝光室。Dr. Lester 授命发展 X-光检测技术, 用于检查铸件、焊接件和装甲板, 以从根本上提高军用材料的质量。尽管 William Conrad Roentgen 在约 27 年前就发现了 X-光, 但在材料评价的应用并不多, 主要是因为早期的 X-光设备的能量较低。虽然按今天的标准, Laster 博士实验室的设备是落后的, 但他的工作和那些早期设备确奠定了后来 X-光射线探伤技术发展的基础。

无损检测技术史上另一个重要的发展也是来自一次大灾难——一次严重的火车出轨。由此, Elmer Sperry 博士和 H. C. Drake 发明了电流感应/磁场检测系统(图 1-8)。这种方法主要应用于检测铁路导轨中的不连续。在这个进步上, 建立了“Sperry 铁路服务”的基本概念。最终生产出了更先进的铁路轨道检查车。今天的铁轨仍用相似的原理检测。这使得“Sperry 铁路服务”成为美国最古老的、一直在工作的无损检测组织。在 1929 年, Magnaflux(磁力探伤)公司成立, 致力于推广电磁原理在无损检测的工业应用。磁粉检测(MT)的原理来源于早期的

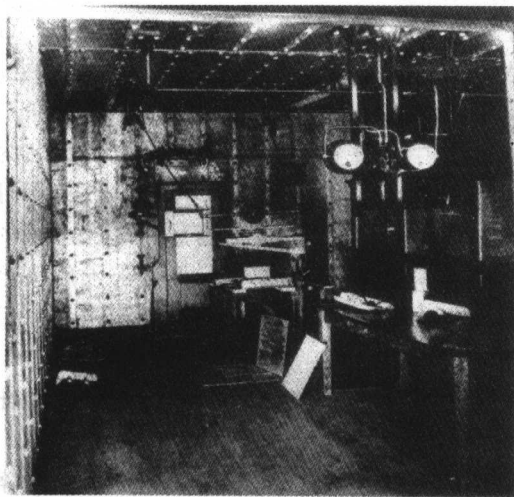


图 1-7 Dr. Lester 的 X 射线实验室
(由 C.Hellier 提供)

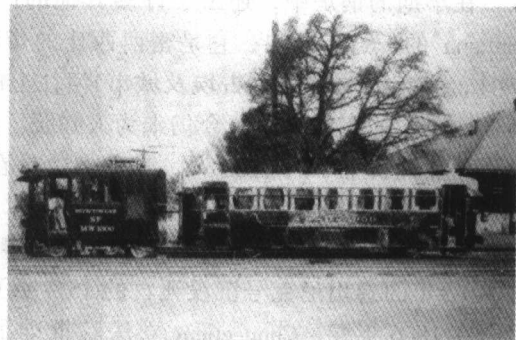


图 1-8 早期的 Sperry 铁路检测车