

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目



先进焊接制造技术丛书

中国焊接学会 组编

焊接结构 现代无损检测技术



李生田 刘志远 编著



机械工业出版社
China Machine Press

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

先进焊接制造技术丛书

中国焊接学会 组编

焊接结构

现代无损检测技术

李生田 刘志远 编著



机械工业出版社

本书介绍了现代无损检测技术的基本原理及其在焊接构件检查中应用的概况。基础部分包括焊接结构制造与运行过程中产生缺陷规律的统计分析；检测过程中缺陷信号的提取、处理、识别与显示技术等最新进展；嵌入式与并行分布式计算机在检测设备中的应用概貌以及研究检测典型环节的模拟与仿真技术等。应用部分包括压力容器、长途油气输送管道、核容器与管道以及海洋采油平台等重要焊接结构的工况条件、缺陷形态与分布、典型的检测技术与先进的检测设备及其发展的趋势等。

本书是从事焊接结构无损检测的科研人员及从事焊接质量检验与管理的工程技术人员和高等院校师生了解和掌握现代无损检测技术的最佳参考书。

图书在版编目（CIP）数据

焊接结构现代无损检测技术/李生田，刘志远编著.—北京：机械工业出版社，1999.12

（先进焊接制造技术丛书）

ISBN 7-111-07686-9

I. 焊… II. ①李… ②刘… III. 焊接缺陷—无损检验 IV. TG441.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（1999）第 69146 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：何月秋 武江 封面设计：姚毅

责任印制：何全君

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm/32·6.125 印张·154 千字

0001—3000 册

定价：13.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、68326677—2527

先进焊接制造技术丛书

编委会名单

顾问委员会成员

潘际奎 关 桥 徐滨士 林尚阳

斯重遥 田锡唐 周振丰

主 任 陈剑虹

副主任 邹增大 单 平 崔树森

委 员 王其隆 任家烈 史耀武 霍立兴

黄石生 李志远 汪建华 蒋力培

秘 书 康 龙 武 江

序

焊接作为制造业的基础工艺与技术，在 20 世纪为工业经济的发展作出了重要的贡献。在人类引以为自豪的各个领域，如航空航天、核能利用、电子信息、海洋钻探、高层建筑等，都利用了焊接技术的优秀成果。

在今天，焊接作为一种传统技术又面临着 21 世纪的挑战。

一方面，材料作为 21 世纪的支柱已显示出五个方面的变化趋势，即从黑色金属向有色金属变化；从金属材料向非金属材料变化；从结构材料向功能材料变化；从多维材料向低维材料变化；从单一材料向复合材料变化。新材料的连接对焊接技术提出了更高的要求。

另一方面，先进制造技术的蓬勃发展，正从信息化、集成化、系统化、柔性化等几个方面对焊接技术的发展提出了越来越高要求。

为了充分反映 20 世纪焊接技术的发展成果和 21 世纪对焊接技术提出的新的挑战，中国焊接学会组织了焊接行业最重要的 10 个领域中卓有成就的知名学者编写、出版了《先进焊接制造技术丛书》。同时邀请了焊接界德高望重的著名专家作为丛书编写顾问。

本丛书旨在全面介绍国内外先进焊接技术的发展现状和趋势，对我国焊接制造技术的发展起引导作用。

本丛书是高层次的普及型丛书，以知识性为主，深层次地介绍相关领域的高新技术内容和基本规律，面向广大的焊接工作者、研究人员、高等院校师生及相关领域专家。

本丛书的特点是突出“高、新”二字，有较宽的知识覆盖面，注意相关学科的渗透，有较高的收藏价值。

中国焊接学会在世纪之交以这套丛书奉献给广大的焊接工作者，是对焊接界为祖国经济腾飞及 20 世纪焊接技术的发展所

作贡献的回眸，也是焊接界对迎接 21 世纪新技术挑战的期盼。

原机械工业部技术发展基金委员会及机械工业出版社对本丛书的编辑出版提供了经济支持（97JA0401），在此一并表示深切的感谢。

丛书编委会主任

陈剑虹

前 言

无损检测是在不破坏构件材质与性能的情况下测量构件质量的技术。内容包括缺陷检测、性能评定、产品分选、生产过程监控等。其范围涉及到构件成分、组织、性能、残余应力状态与缺陷的检验。目前已发展成材料质量评价的重要手段。无损检测又是一种跨学科多专业的技术，它包括非电量的电测量、机械结构、计算机控制、机器人与人工智能的应用等。同样它又包括产品制造阶段的检查与产品运行阶段的在役检测。

焊接结构在能源、石油化工企业的大型装置中往往是基础性的设备，承受高温高压与腐蚀性介质的作用。由于本身材质不完善，焊接过程中产生缺陷与残余应力等的影响，在产品的设计寿命期内或超期服役期间可能出现裂纹，并有扩展的可能性。因此，在设备服役期内，若能正确地应用无损检测与监控技术，就可以提前测量出设备材质是否恶化、有无裂纹出现，进而促进整个投产装置运行的安全。

除了尽可能地采用先进无损检测技术与设备以外，检验工作人员更应当熟悉与了解检测对象经常出现的缺陷与其它质量问题。只有这样，才能有目标地完成检验任务与提供正确的质量信息。

本书限于篇幅仅介绍了与焊接结构在役检查有关的技术发展现状与趋势。书中主要针对典型产品的多发性缺陷，把现代无损检测技术在核电、石油化工与采油平台等工业领域中应用的概况为读者提供一个轮廓，供从事焊接结构质量检验的工程技术人员及有兴趣的大学师生参考。

本书由李生田主持编著，刘志远参加编著，刘志远编著了2.2节的(5)、(6)，第5章7.4节、9.5节以及其它章节中有关计算机控制和机器人技术的内容，其余由李生田编著。

哈尔滨焊接研究所总工程师崔树森对本书进行了细致的审

阅，对此作者表示衷心的感谢。

限于作者的业务水平，书中难免有这样那样的错误，请读者批评指正。

作者

目 录

序 前言

第 1 章 焊接结构无损检测技术背景	1
1.1 焊接产品制造过程中引起的缺陷	1
1.1.1 车间与现场施焊接头的缺陷	1
1.1.2 焊接工艺对缺陷尺寸的影响	2
1.2 焊接结构服役过程中引起的裂纹	4
1.3 焊接产品运行中的失效	4
1.3.1 欧美对压力容器和管道失效的统计	5
1.3.2 国内外压力容器事故率的对比	8
1.4 对焊接结构无损检测技术的要求	8
参考文献	10
第 2 章 焊缝无损检测技术概述	11
2.1 焊缝无损检测的技术指标	11
2.2 焊接结构无损检测技术的进展	16
参考文献	21
第 3 章 焊缝射线检测	22
3.1 胶片方式射线检测	22
3.1.1 射线的产生	22
3.1.2 胶片	26
3.1.3 射线检测的灵敏度	26
3.1.4 射线检测裂纹的灵敏度	27
3.1.5 高能 X 射线检测的特点	29
3.2 射线检测实时显示技术	29

3.2.1 射线检测实时显示装置	30
3.2.2 实时显示系统屏幕的影像质量	31
3.2.3 提高屏幕影像清晰度	32
3.2.4 数字图像处理软件基础	34
参考文献	35
第4章 焊缝涡流检测	37
4.1 涡流检测技术基础	37
4.1.1 涡流渗透深度	38
4.1.2 线圈的类型	38
4.1.3 缺陷信号定性分析	39
4.2 缺陷信号的提取	42
4.2.1 涡流场的数字模拟	42
4.2.2 线圈结构的有限元分析	44
4.2.3 信号处理	46
4.2.4 多频涡流	47
4.2.5 脉冲涡流	48
4.3 焊缝的涡流检测技术	49
4.3.1 钢焊缝收发分离式线圈的涡流检测	49
4.3.2 钢焊缝的脉冲涡流检测	52
4.3.3 涡流检测在不锈钢堆焊层上的应用	54
参考文献	56
第5章 焊缝超声检测	58
5.1 超声检测缺陷信号的特征	58
5.2 聚焦声场	63
5.3 新型超声波传感器	65
5.3.1 聚焦探头	66
5.3.2 相控阵探头	67
5.3.3 电磁声探头	69

5.4 人工合成孔径聚焦技术 (SAFT)	71
5.5 衍射波测量缺陷的高度 (TOFD)	73
5.5.1 衍射波测量缺陷高度的原理	73
5.5.2 衍射波测量缺陷的显示方式	74
5.6 自动超声检测	76
5.6.1 自动超声检测的构成	76
5.6.2 数字信号处理与缺陷图像显示	80
5.6.3 缺陷自动识别	82
参考文献	85
第 6 章 电站锅炉与石油化工容器的无损检测	88
6.1 电厂的事故率与无损检测	88
6.2 典型石油化工设备的检测	94
6.2.1 加氢裂化反应器的检测	94
6.2.2 球形储罐的检测	99
6.2.3 带保温层管道的检测	104
6.2.4 锅炉与石油化工容器的自动超声检测设备	106
参考文献	108
第 7 章 原油与天然气输送管道焊缝的无损检测	111
7.1 输送管道铺设过程的检测	111
7.2 管道铺设过程中采用的检测技术与设备	115
7.3 输送管道的运行检测	117
7.4 在役管道检测的技术与设备	118
7.4.1 管道检测机器人	119
7.4.2 超声检测腐蚀管道机器人	121
7.4.3 超声检测裂纹管道机器人	123
7.4.4 其它类型的管道机器人	129
7.5 检测结果的评定	132
参考文献	135

第 8 章 核容器和管道的役前与在役检测	136
8.1 反应堆容器与管道无损检测技术可靠性研究的进展	136
8.1.1 厚板焊缝试件的循环试验 (PISC-II)	138
8.1.2 模拟核容器的循环试验 (PISC-III)	140
8.1.3 不锈钢管道焊缝的循环试验 (PISC-III)	144
8.1.4 接管安全端异种钢焊缝	148
8.2 检测技术与设备有效性的认定	149
8.3 反应堆容器与管道的工程检测	150
8.3.1 核容器与管道焊缝缺陷的特点	151
8.3.2 核容器在役检测技术与设备	153
8.3.3 球顶盖驱动棒管座焊缝应力腐蚀裂纹的检测	159
8.3.4 堆芯燃料元件不锈钢筒的运行检测	160
参考文献	163
第 9 章 海洋钢结构的检测	166
9.1 海上钢结构的工况条件	167
9.1.1 钢结构的特点	167
9.1.2 钢结构承受的载荷	169
9.2 海上钢结构的水下检验作业	169
9.2.1 深水作业环境	170
9.2.2 水下作业方式	170
9.3 海上钢结构的水下检验方法	171
9.3.1 检验准备	171
9.3.2 目测检验	172
9.3.3 磁粉检测	172
9.3.4 涡流检测	173
9.3.5 表面裂纹深度的测量	174
9.3.6 交流电磁场测量技术	174
9.3.7 超声检测	176
9.3.8 平台检验的其它技术	177

9.4 水下检验的可靠性与成本.....	177
9.4.1 水下检验的可靠性	177
9.4.2 水下检验的成本	178
9.5 水下检测机器人	180
9.5.1 智能型遥控潜水器	180
9.5.2 移动式水下检测机器人	182
参考文献	182

第 1 章 焊接结构无损检测技术背景

多数焊接结构都是巨大工业财富的组成部分，并兼有环保对象的特点。按照美国 90 年代的估算，因焊接接头失效引起的经济损失高达国民生产总值的 5%。因此，保证含有焊接构件装置的安全运行就成为一个富有挑战性的课题，而且要从制造、投产进而走向退役的整个工程链条中的每一个环节做起，分析影响失效的各种因素，开发出有效与可靠的检测与监控技术，实现潜在事故的早期预报，以提高焊接工程构件运行的安全性。

1.1 焊接产品制造过程中引起的缺陷

焊接产品在焊接制造过程中因焊接工艺与设备条件的偏差，残余应力状态和冶金因素变化的影响，以及接头组织与性能不均匀等往往在焊缝中产生不同程度与数量的气孔、夹渣、未熔合、未焊透以及裂纹等缺陷，对其使用性能产生不利的影晌。缺陷产生的几率与材料性能、焊接方法、熔池大小、工件形状和施工现场等因素有关。

1.1.1 车间与现场施焊接头的缺陷

一般情况下，车间的生产条件比野外现场施焊条件要好得多，因此缺陷出现的几率也比较小。在车间焊接的压力容器与管焊缝的缺陷发生率的统计值见表 1-1。现场施焊的钢结构与球形储罐和管道缺陷的发生率的统计值见表 1-2 与表 1-3。从表中的统计结果可以看出，现场施焊比车间焊接的焊缝缺陷发生率高，容器和钢结构等比管道焊缝的缺陷发生率低，这与各自的焊接施工条件大体上是对应的。另外也应当看到，上述结果基本上是按着质量控制标准对焊缝中的超标缺陷进行统计的。由于受到各个时期

检验技术水平的限制, 因此可以预见, 焊缝中会含有不少所谓合格缺陷随着产品一起投入运行。

表 1-1 在车间焊接的压力容器与管焊缝缺陷发生率的统计值 (%)

压力容器焊缝	裂纹	未熔合	气孔	夹渣	总计	管焊缝	总计	
环 缝	埋弧焊	0.25	0.11	0.11	1.89	2.36	厚壁管	—
	焊条电弧焊	0.44	0.50	0.69	1.36	2.99	热丝 TIG	2
纵 缝	埋弧焊	0.69	0.22	0.40	0.60	1.91	气体保护焊	4
	焊条电弧焊	—	—	0.08	0.11	0.19	蛇形管	—
	窄间隙埋弧焊	—	—	—	—	2.0	全位置 TIG	4

注: 1. 缺陷发生率的统计值是按缺陷区或含缺陷底片长度与焊缝总长之比计算的。

2. TIG 为钨极氩弧焊。

表 1-2 现场施焊的钢结构与球形储罐缺陷发生率的统计值

项 目	球罐		钢结构		船壳体	近海采油 平台节点
	焊条电弧焊	埋弧焊	焊条电弧焊	埋弧焊		
缺陷发生率 (%)	6.39	1.59	4.85	3.42	4.92	5.94

表 1-3 现场施焊管道焊缝缺陷发生率的统计值

项 目	油田管道 TIG 焊封底焊条 电弧焊盖面	油田管道气 体保护焊	建筑安装管道 气体保护焊	电厂蒸汽给水 厚壁管道
缺陷发生率 (%)	9~16	6	5.4	6.9

1.1.2 焊接工艺对缺陷尺寸的影响

除了缺陷数量外, 其尺寸与分布也是影响产品安全的重要参数。缺陷的尺寸与焊接方法和熔池大小有关, 采用埋弧焊与电渣焊工艺焊成的焊缝, 缺陷尺寸的统计结果见图 1-1。可见, 电渣焊缝的熔池大, 缺陷尺寸也大。

M.G.Silk 曾经对大型化工容器焊缝中缺陷自身高度的分布状况作过统计, 结果见表 1-4。

在焊接结构制造过程中焊缝的缺陷可分为两种情况: 一类属

于超过标准规定的缺陷，按照技术条件的规定应对缺陷处的焊缝进行返修；另一类是不超过标准规定的缺陷，这样的焊缝属于合格焊缝。但是，目前焊接件的检测技术还不足以完全检出所有的缺陷，特别是细小的裂纹，于是这就给焊接件以后的运行带来了潜在的危害。表 1-5 是美国 1981 年统计 139 台运行容器事故的起因，其中制造过程中漏检裂纹约占 35.3%。由此可见，不断提高焊缝的无损检测技术与设备功能是很必要的。

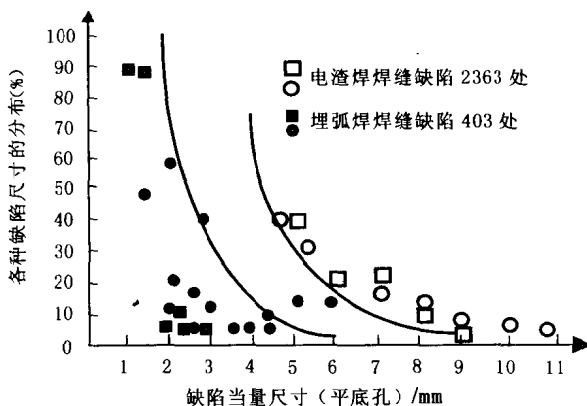


图 1-1 厚壁容器焊缝缺陷尺寸与焊接工艺的统计对应关系（是按超声检测时缺陷的当量平底孔大小统计计算的，即 AVG 法）

表 1-4 大型化工容器焊缝中缺陷自身高度的分布

缺陷高度/mm	>2.5	>5	>7.5	>10	>15	>20	>25
内部缺陷	110	40	16	6.5	1.0	0.2	0.03
表面缺陷	14	1.0	0.06	0.005	—	—	—

注：表中数字为每km焊缝的缺陷数。

表 1-5 容器制造时漏检的裂纹

缺陷类型	裂 纹			其 它 缺 陷		
	蠕变等	不明原因	制造遗留	维护不当	蠕变	制造遗留
破坏台数	27	18	48	10	1	11

1.2 焊接结构服役过程中引起的裂纹

投产后的焊接结构在服役过程中有的处于高温、高压和兼有介质腐蚀的环境，有的承受疲劳、冲击及辐照等工况条件，这往往会引起材质恶化、应力变动，并产生新的裂纹，给焊接结构的安全运行带来不利影响。例如：

1) 温度与压力 温度在 465~570℃之间的常规电厂，其主蒸汽管线中 T、Y、L 形接头会出现蠕变裂纹以及焊缝区的石墨化现象。工作温度在 350~450℃之间的热壁加氢容器要经受母材与焊缝回火脆化倾向的影响。

2) 应力腐蚀 在尿素生产装置中，液氨贮罐会出现应力腐蚀裂纹，特别是液氨的含水量（质量分数）<0.08%时更加严重。在石油加工系统中硫化氢体积分数大于 $5 \times 10^{-3} \%$ ，焊缝硬度大于 240HV 时也会引起应力腐蚀裂纹。

3) 中子辐照脆化 在反应堆压力容器的活性区，焊缝金属会呈现中子辐照脆化现象，特别是焊缝中含铜高时更加严重。

4) 焊接结构的疲劳 焊接结构的疲劳裂纹是常见的，特别是低周疲劳裂纹常发生在桥梁构件、采油平台节点与高层钢结构建筑物上。

裂纹的萌生与扩展是导致焊接结构最终破坏的主要原因之一。因此，加强焊接产品运行过程中的在役检查是防止裂纹发展到临界尺寸的有效措施。

1.3 焊接产品运行中的失效

焊接产品制造过程中遗留的缺陷与运行中发生的裂纹都在不同程度上对其失效产生影响。以压力容器和管道为例，众所周知，在石油化工与电力工业中运行的压力容器和管道是具有开裂、泄漏和爆炸危险的设备。一旦发生破裂或泄漏，往往会并发