



压力容器技术进步——I

# 缺陷分析

〔英〕R. W. 尼柯尔斯 主编



机械工业出版社

# 压力容器技术进展—1

## 缺陷分析

〔英〕 R.W.尼柯尔斯 主编

李泽震 周海成 译

琚定一 柳曾典 校



机械工业出版社

由R.W.尼柯尔斯主编的压力容器技术进展丛书内容丰富,反映了当代压力容器技术发展动向,目前已出版了5卷。本书是其中第1卷《缺陷分析》的中译本。全书共分8章,主要介绍了对压力容器缺陷进行疲劳与断裂分析的基本原理,以及国际上常用的美国机械工程学会(ASME)、国际焊接学会(IIW)和英国中央电力局(CEGB)等的分析方法;对材料韧性评定、疲劳裂纹扩展评定和可靠性评定等的近期进展进行了充分的评述。本书可供从事与压力容器有关的工程技术人员和研究人员以及大、专院校师生参考。

## Developments in pressure vessel technology—1

### Flaw Analysis

R.W.Nichols

APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD 1979

\* \* \*

## 压力容器技术进展—1

### 缺陷分析

〔英〕R.W.尼柯尔斯 主编

李泽震 周海成 译

琚定一 柳曾典 校

\*

责任编辑:王正琼 责任校对:孙志筠

封面设计:肖晴 版式设计:吴静霞

责任印制:尹德伦

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街1号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32·印张 7·字数 173 千字

1991年9月北京第一版·1991年9月北京第一次印刷

印数 0,001—3,100<sup>0</sup>·定价:7.20 元

\*

ISBN 7-111-02685-3/TH·272



## 译 序

随着科学技术的进步和工业生产的发展，压力容器的使用范围日益广泛。目前，压力容器已经成为化学工业、石油工业以及石油化工、煤化工、冶金、原子能、宇航、海洋工程、轻工、纺织、食品、城建等各个部门中的重要设备，它既影响国民经济的发展，又涉及到人民的衣食住行，因此，国内外都十分重视压力容器技术的发展。

近年来，由于各类压力容器越来越多地在高温、低温、高压、高真空、强腐蚀、辐照等各种苛刻的条件下操作，因此对其技术上的要求越来越高。例如，在电力部门，核电站的压力壳需要采用大型锻、焊压力容器；在石油化学工业中使用的加氢反应器单台重量已达1200t；天然气的开采、贮运需要低温压力容器；近海采油与海洋工程需要一些特殊的水下压力容器等。用于压力容器设计、制造、检验、使用、维修与安全监督的各种技术也极为复杂，涉及到力学、冶金、焊接、腐蚀、无损检测、计算机技术等很多学科领域。对压力容器有关技术问题，如果处理不正确，往往会导致灾难性事故，直接危及人民的生命安全，造成财产损失。因此必须注意不断更新与提高广大压力容器技术工作者的专业知识，为此我们组织翻译了R.W.尼柯尔斯主编的压力容器技术进展丛书。

R.W.尼柯尔斯于1970年曾主编了《压力容器工程技术》一书，该书按压力容器技术的专题分章，分别由该领域内的专家撰写，内容新颖，结合实际，出版后很受读者欢迎。1979年R.W.尼柯尔斯考虑到近代压力容器技术内容的发展，在该书基础上又主持编写了压力容器技术进展丛书。目前已出版五卷，第一卷缺陷分析；第二卷探伤和检验；第三卷材料和工艺；第四卷特殊容器的

#### IV

设计；第五卷标准和规范。在每一卷中又有许多专题，仍由世界各国在该领域内有经验的专家撰写。由于这套丛书内容广泛、涉及压力容器技术各方面的进展，因此受到各国读者的好评，有些国家早已组织翻译出版。

目前我国尚未有系统地介绍压力容器技术各方面最新进展的书籍。为此，中国机械工程学会压力容器学会组织翻译了这套丛书第1卷至第5卷，供我国从事于与压力容器技术有关的工程技术人员和研究人员以及有关院校师生参考。

本书是该丛书的第1卷，主要介绍压力容器缺陷评定方面最新进展。其中序言及第一、二、三、四章由李泽震翻译；第五、六、七、八章由周海成翻译。全书由琚定一和柳曾典审校，并由邓立文统稿。

由于我们水平有限，译文中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

中国机械工程学会压力容器学会

理事长 柳曾典

1990年3月

## 序 言

编写压力容器技术进展丛书的目的，是更新1970年出版的、由我主编的《压力容器工程技术》<sup>①</sup>一书。丛书评述压力容器有关技术领域的重要进展。与1970年版各章内容相比，它更为广泛。以丛书形式出版的目的，是为了以更快的速度发表评述性文章，使内容更为及时，且论述更为深入、更加切合实际。

这套丛书中各卷论述的每一个技术领域均与上一部书中有关章节的内容相当。我们将依次讨论各个领域内的有关理论、应用及技术的新进展。一方面，每章都对特定技术领域的现状加以综述。另一方面，由于篇幅所限，对许多详细的背景只能扼要地加以介绍，以便尽可能集中介绍近期的工作。在整个编写期间，各位作者和我本人都尽量注意到这些方面。各卷都以《压力容器工程技术》中相应的章节作为进一步了解以往背景详情的起点。因此，为了易于理解各章内容，各卷仅扼要地重述有关背景材料。

采取这种办法的另一个优点是，可以把每一个主题划分得更详细些，这样，每个专题都可由该方面的专家撰写。在选择专题作者时，挑选了在该专门领域里熟悉国际技术发展动向的工作者，他们在国际上都享有较高的声誉。这样还可以加快编写工作的速度，使各卷综述实用，内容新颖。为强调国际风格，要求每位作者在每章内容中要尽量采用国际标准，这也是《国际压力容器和管道》杂志的特点之一。无疑，这套丛书本身最终也要过时的，那时为了满足需要还将进行修改。我将珍视读者对这套丛书在内容、写作方式及改进方面所提出的意见。

以上叙述的是这套丛书的一般概况，现在讨论本卷的特点。

---

① R.W.Nichols, Pressure Vessel Engineering Technology, Applied Science Publishers Ltd Published.1971.

在前一部书的第四章中，专门论述了防止快速断裂的几种处理方法，其中包括采用线弹性断裂力学（LEFM）方法。自编写该章以来，线弹性断裂力学在压力容器设计和评定中的应用已越来越广泛，如美国机械工程学会（ASME）对轻水堆的压力容器，已将这些方法引用到“锅炉和压力容器规范”某些卷（如第Ⅲ卷和第Ⅴ卷）的附录中，主要是被用作缺陷评定，即评定容器在使用前或使用过程中，由无损检测检出有某种缺陷的容器能否继续运行。本书包括了与压力容器缺陷评定有关的新进展，目的是提供一个合理的“合乎使用”的根据，以决定在这些情况下是否验收合格或报废，而这套丛书的第2卷是论述无损检测技术。本书在综述有关标准的背景及多方面的技术进展后，各章又详细地叙述了其中有关领域的重要进展。例如，第二章详细叙述了建立在线弹性断裂力学基础上的ASME第Ⅲ卷和第Ⅴ卷关于缺陷危害性的分析方法；第三章介绍了英国及国际焊接学会（IIW）对包括压力容器缺陷在内的评定方法的结论；第四章进一步讨论了英国中央电力局提出的双判据评定法，即断裂前在出现明显延性的断裂条件下，多大的缺陷尺寸将导致塑性失稳。但是，应该指出：这几章的重点在于叙述各种方法在缺陷评定中的应用，而未详述其理论基础，对此，读者可参考Latzko教授编著的《屈服后断裂力学》<sup>①</sup>一书。

本书第五章讨论这些评定方法的一个共同问题，即如何评定材料韧性，特别是材料在失稳断裂之前表现出裂纹缓慢稳定扩展时的材料韧性。

在评定特定使用条件下临界缺陷尺寸时，必须考虑裂纹在使用中的扩展。为说明这些评定方法，第七章综述了疲劳裂纹扩展方面的研究现状。第六章介绍了裂纹发生止裂时的评定，这种情况可以认为仅仅是局部因高应力或低韧性而产生失稳。

由于与缺陷评定计算有关的各种因素都带有不确定性，因

---

① Latzko, Post-Yield Fracture Mechanics, Applied Science Publishers.

此，任何评定方法都仅是概率性描述，而不是确定性的结论，而且它可与目前评定部件的可靠性方法相配合。本书第八章介绍了这种方法，这一章能使读者明了断裂力学评定中的最大不确定性问题。

R.W.Nichols



## 计量单位换算

$$1\text{in} = 0.025\text{m}$$

$$1\text{ft} = 0.3048\text{m}$$

$$1\text{mil} = 25.4\mu\text{m}$$

$$1\text{lbf}\cdot\text{ft} = 1.356\text{N}\cdot\text{m}$$

$$1\text{kgf}/\text{mm}^2 = 9.807\text{MPa}$$

$$1\text{kgf}/\text{in}^2 = 6.895\text{MPa}$$

$$1\text{Torr} = 133.32\text{Pa}$$

$$1^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}\text{K} - 459.67$$

$$1\text{klbf}\cdot\text{in}^{-\frac{3}{2}} = 1.099\text{MN}\cdot\text{m}^{-\frac{3}{2}}$$

# 目 录

## 译序

## 序言

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 第一章 导言                                | 1  |
| 第一节 缺陷验收标准的研究进展                       | 1  |
| 第二节 “合乎使用”方法的变迁情况                     | 3  |
| 第三节 无损检测在质量控制和验收中的作用                  | 4  |
| 第四节 “合乎使用”方法的根据                       | 5  |
| 第五节 线弹性断裂力学简介                         | 8  |
| 第六节 线弹性断裂力学在脆断评定中的应用                  |    |
| 第七节 屈服后断裂力学                           | 9  |
| 第八节 细长的未穿透缺陷                          | 12 |
| 第九节 疲劳评定                              | 13 |
| 第十节 平面缺陷                              | 13 |
| 第十一节 非平面缺陷                            | 14 |
| 第十二节 按ASME第Ⅲ卷疲劳设计曲线设计的容器中对允许<br>缺陷的说明 | 15 |
| 第十三节 结束语                              | 15 |
| 参考文献                                  | 16 |

## 第二章 ASME第Ⅲ卷和第Ⅺ卷缺陷危害性的分析

### 方法

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一节 引言                 | 20 |
| 第二节 ASME规范中关于断裂韧性方法的进展 | 25 |
| 第三节 ASME第Ⅲ卷附录G的方法      | 29 |
| 第四节 ASME第Ⅺ卷附录A的方法      | 34 |
| 第五节 讨论                 | 53 |
| 参考文献                   | 57 |

## 第三章 英国标准委员会WEE/37草案和国际焊接学会

|                        |     |
|------------------------|-----|
| (IIW) 方法.....          | 59  |
| 第一节 引言.....            | 59  |
| 第二节 基本方法.....          | 61  |
| 第三节 脆断评定细则.....        | 64  |
| 第四节 疲劳评定细则.....        | 78  |
| 第五节 其它失效方式.....        | 88  |
| 参考文献.....              | 89  |
| 第四章 英国中央电力局的双判据法.....  | 91  |
| 第一节 引言.....            | 91  |
| 第二节 失效评定图.....         | 92  |
| 第三节 失效评定图的依据.....      | 93  |
| 第四节 失效评定图的应用.....      | 97  |
| 第五节 失效评定法.....         | 106 |
| 参考文献.....              | 107 |
| 第五章 材料韧性评定方法的近期进展..... | 108 |
| 第一节 引言.....            | 109 |
| 第二节 J积分概念.....         | 111 |
| 第三节 等效能量法.....         | 113 |
| 第四节 裂纹张开位移法.....       | 120 |
| 第五节 起裂的检测.....         | 123 |
| 第六节 韧性值的估算及其趋势.....    | 125 |
| 第七节 动态起裂韧性的测定.....     | 131 |
| 第八节 起裂后韧性的测定.....      | 133 |
| 第九节 结束语.....           | 137 |
| 参考文献.....              | 138 |
| 第六章 动态裂纹扩展和止裂.....     | 141 |
| 第一节 引言.....            | 141 |
| 第二节 快速扩展中裂纹尖端的应力场..... | 142 |
| 第三节 裂纹止裂理论.....        | 150 |
| 第四节 裂纹止裂研究用试样.....     | 152 |
| 第五节 不同材料的试验结果.....     | 153 |
| 第六节 结束语.....           | 156 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 参考文献              | 157 |
| 第七章 疲劳裂纹扩展评定的近期进展 | 158 |
| 第一节 疲劳评定的必要性      | 158 |
| 第二节 疲劳裂纹扩展机理的简介   | 159 |
| 第三节 疲劳裂纹扩展的定量分析   | 162 |
| 第四节 疲劳裂纹扩展的分析评定   | 169 |
| 第五节 结束语           | 188 |
| 参考文献              | 188 |
| 第八章 可靠性评定的概率方法    | 191 |
| 第一节 引言            | 191 |
| 第二节 历史背景          | 194 |
| 第三节 部件概率的综合分析     | 195 |
| 第四节 数学方法          | 209 |
| 第五节 今后的发展         | 210 |
| 参考文献              | 211 |

# 第一章 导 言

〔英〕J.D.Harrison

## 第一节 缺陷验收标准的研究进展

近来，锅炉和压力容器运行的可靠性良好。据统计，按现行标准制造的锅炉，在使用过程中每年的失效破坏率小于 $10^{-3}$ 〔1〕，这在很大程度上应归功于规范和标准的不断完善。然而情况并非一直都是这样。Slater〔2〕列举了密西西比河轮船骇人听闻的锅炉爆炸历史，从1816到1848年间，有1443人因锅炉爆炸丧生，1865年死亡人数达到最高记录，在Sultana号轮船锅炉突然发生爆炸的一次灾难中至少有1547人丧生。

上述这些事故和欧洲发生的类似事件已成为要求完善制造标准的推动力。19世纪后半期，许多国家都制定了锅炉管理、使用及对锅炉进行检验的法律，这种法律逐步形成了现行规范和标准的前身。

这些规范的作用是保证最终产品的设计和制造都符合公认的制造标准，它们从早期比较简单的文件逐渐演变成今天的规范，如英国标准（BS）5500〔3〕和美国机械工程学会（ASME）“锅炉和压力容器规范”〔4、5、6〕，这些规范涉及产品的设计、选材、制造、热处理、检验、试验直到使用监视等各个方面。

本书大体上论述了锅炉及压力容器缺陷的危害性，但是这些缺陷往往总是和焊接联系在一起的。1925年由A.O.Smith组织把焊接应用到锅炉和压力容器工业〔7〕，当时就意识到焊接质量在很大程度上取决于操作者的技术水平。焊缝组织很可能没有板材或锻件那样均匀，因此在结构上焊缝试样的破坏性试验往往表现出其整个质量总是低于锻件的质量。此外，尽管焊接与铆接相比有着许多明显的优点，但人们仍对这种新的连接工艺产生一种习

惯性的怀疑。因此，在早期为保证焊件的完整性导致采用了射线探伤，这与联合碳化物公司在1925年完成的X射线检验的初步研究也并非巧合。随着射线探伤的应用，确定对已发现的缺陷的验收标准也就势在必行了。1934年劳埃德船舶年鉴（Lloyd's Register）首先发表了有射线探伤条款的焊接压力容器规则。Young<sup>(8)</sup>曾经综述了英国标准中有关焊接缺陷验收标准的演变过程，英国于1930年首次给出了详细验收标准，该标准是由几家保险公司发布的，但是上述验收准则只是在1958年发布BS1500<sup>(9)</sup>时才正式编入英国标准。BS1500验收准则和其它许多国家的锅炉、压力容器和管道规范中的验收准则一样，似乎都有一个共同的起源，即ASME规范。

当然，所有这些规范里的有关缺陷验收条款都受到按照射线探伤制订的缺陷验收条款的影响。因当时没有任何科学方法能够确定缺陷对使用可靠性的影响，所以规范的编制者就按照X射线所能发现和容易测量的缺陷制订规范。因此，对体积性缺陷、夹渣和密集气孔都作了明确的限制，而对裂纹却没有规定，因为射线探伤不容易发现裂纹，也就难以测定裂纹，所以只能用笼统的语句如“不得有裂纹或裂纹类的缺陷”概括之。体积性缺陷验收标准实质上是随意的，或者说它是按照一个“优秀焊工”能达到的质量水平制定的。即使这样，标准还是规定得比较明确：夹渣用长度限制，密集气孔用一套对照图表加以限制。有一个故事，可能不足凭信，据说气孔对照图表是通过在一次晚宴上，坐在桌子周围的委员会委员们在餐巾纸上比比划划，直到最后对于每平方英寸上的标记达到他们同意的数量为止而制定出来的。

1952年国际焊接学会（IIW）公布了一套参考射线探伤照片，有助于射线探伤人员鉴别所观测到的各类缺陷。但是，把它们按黑、绿、棕、红排列分级以代表缺陷严重程度的增大将会产生错误。应当强调的是，这绝不是IIW参考系列的原意，但是该方法与ASME规范一样也是属于随意性的。

现行规范中最难解释的问题是拍片率（往往只抽检焊缝总长

度很少的一部分)与需要严格执行的验收标准的配合。按照定义,拍片率只能是对质量管理的度量,如果结构的可靠性取决于消除射线发现的缺陷(事实上,如后面的讨论,往往并不总是如此),那么就必须进行100%检验。

近年来已经知道不能用射线探伤可靠地检测裂纹状的或平面的缺陷,而且也难以测定其尺寸(射线探伤被认为是最适于检测无害缺陷的无损检验“NDE”技术)。这就促使人们越来越多地使用超声探伤。已经证明,这种技术同样能够检测出不能接受的缺陷,所以1965年BS1500<sup>[9]</sup>修订版首先采用超声探伤作为代替射线探伤的技术。

## 第二节 “合乎使用”方法的变迁情况

近15年来,超声探伤技术发展很快,目前欧洲已经广泛地采用这种方法作为关键部件的探伤手段。在美国,这种方法在制造阶段使用还不够普遍,但是对于核压力容器的在役检查,超声探伤被认为是一种唯一有效的技术。

遗憾的是,新结构的验收标准的进展与无损检测的技术进展步伐是不一致的,这些标准中仍旧写上“只适用于射线探伤”,仍然出现“不得有裂纹或裂纹类的缺陷”之类条款。但在无损检测已能检测出晶界的今天,这样的用语已变得毫无意义了。尽管焊接质量不断得到提高,但是由于高灵敏度无损检测方法的应用和验收标准的随意性,使得焊缝返修率仍然增大。然而,绝大部分返修工作确实是完全不必要的。Salter<sup>(10)</sup>报道了对英国制造的高质量压力容器主焊缝实际进行的返修调查情况,这些返修的缺陷中大约有84%属于夹渣,3%是密集气孔,13%属于平面缺陷。从使用的可靠性来说,只有平面缺陷才被认为可能是有害的。因此,随意性标准带来的经济后果是值得考虑的,不必要的返修不仅费钱,而且可能造成推迟交货和影响信誉。随意性验收标准造成的经济后果的典型例子是Alyeska管线<sup>(11,12)</sup>。该管线铺设完工后进行射线探伤检查,发现约4000处缺陷超过管线标准所

允许的范围<sup>[13]</sup>。返修所有这些缺陷，需耗资 5200 万美元。仅返修跨河的一条焊缝，由于需要修筑一条防水堰，据说需 耗 费 250 万美元，返修本身只用了 3.5min，而且还包括磨去缺陷——成群的小气孔所在位置的覆盖层。分析表明：这 4000 处缺陷几乎没有一处会损害该管线的使用可靠性。有意义的是，负责这项工程的美国政府代办处，对其中三处缺陷不坚持原验收条款，而接受按“合乎使用”的评定缺陷的原则。这三处缺陷是在另一处跨河管线上，由于应用比较合理的准则，节省了几百万美元的费用。

随意性标准不仅造成浪费，而且可能引起安全方面的严重后果。由于在高度约束条件下进行焊缝返修，因而就需冒这样一种风险，即无害的、完全可以被检测出来的缺陷——如夹渣，将被一种潜伏有害的裂纹所代替，而这种有害的裂纹又不容易被检测出来。Lundin<sup>[14]</sup>曾引用过这样一个例子，同一部位经多次返修虽未说明返修缺陷是什么性质，但由于检验方法是射线探伤，故很可能是夹渣。最后发展成一条并横跨焊缝的裂纹。此时裂纹尺寸大到肉眼可见。当然不能认为所有情况都是这样。

### 第三节 无损检测在质量控制和验收中的作用

如果无损检测主要用来决定验收或报废，或者不适用于质量控制，则 Harrison 和 Young<sup>[15]</sup>认为，需要的是双重解决办法。质量控制应当规定缺陷标准，此类标准可以类似现行验收标准，小于这些质量控制极限的缺陷当然是允许的。但是较大的缺陷也不应都进行返修，应当查出降低质量的原因并予纠正。只有当质量低于根据“合乎使用”建立的验收标准时才要求进行返修。上述方法类似于除焊接工业以外的几乎普遍采用的质量控制方法。缺陷验收标准的目的是通过质量控制图的使用并采取适当的纠正措施，保证报废率或返修率为零或很低。

采用超声探伤来控制产品质量，其优点大大超过射线探伤，因为超声探伤可以用来监测正在进行的操作，而射线探伤则要求完全停工，而且通常都要把容器移到专用的检验间；超声探伤可



以紧接在任何一条完工焊缝后面进行,这样可以随时采取措施来纠正降低质量的工艺。

上述形式的双重办法,在最新的英国压力容器规范 BS 5500 和管道标准 BS 4515 中已经有所考虑,这两个标准允许合同双方对超过质量控制标准的缺陷进行工程评定,但没有说明如何进行这种评定。

按照“合乎使用”原则评定缺陷的方法,不仅在制定阶段是有用的,而且也被用来评估使用期间检验发现的缺陷,决定是否需要返修,如果需要返修则可确定返修时机。后者对于电力工业具有重要的经济意义,因为它有利于把修理工作推迟到耗电量低的季节才停车修补。

#### 第四节 “合乎使用”方法的根据

当无损检测用作验收和质量控制时,判断验收或报废标准的根据是什么呢?怎样评定一个已知缺陷的危害性?实际上在规范中采用射线探伤的同时,便已开始就焊接缺陷对结构性能的影响进行研究。1938年Homes<sup>[16]</sup>报道了焊接缺陷对疲劳性能影响的研究,以后关于缺陷影响的文献不断出现。Lundin<sup>[17]</sup>在1976年的综述中涉及到322篇文章,并在附加的文献目录中列入了另外的260篇。对于工程师来说,问题就在于要从这样杂乱无章的资料中进行筛选,找出评定其具体结构中的缺陷所必需的资料。

早在1968年,Harrison等<sup>[18]</sup>就试图进行这种尝试。接着英国标准学会(BSI)建立WEE/37委员会,制订合理的焊接缺陷验收标准。经过一段时间的酝酿之后,该委员会于1976年发布了“征求意见草案”<sup>[19]</sup>。1979年发布正式文件。

缺陷评定的两项重要的准备工作是,首先确定缺陷的类型,然后考虑由于缺陷的存在可能对失效方式的影响。

##### 一、缺陷类型

IIW图册<sup>[20]</sup>总共命名83种不同的焊接缺陷,这些缺陷可分成两类,即: