



压力容器技术进展——3

材料和工艺

〔英〕 R·W·尼柯尔斯 主编



机械工业出版社

压力容器技术进展—3

材料和工艺

〔英〕 R. W. 尼柯尔斯 主编

陈登丰 译
肖有谷
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 3 卷《材料和工艺》的中译本。全书共分 10 章,主要论述压力容器钢板、锻件、核压力容器和非核压力容器、厚板焊接、管子焊接、爆炸焊接、焊接过程控制、残余应变以及焊接缺陷等,并对近期的技术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—3

Materials and fabrication

R. W. Nichols

APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD 1980

* * *

压力容器技术进展—3

材料和工艺

〔英〕 R. W. 尼柯尔斯 主编

陈登丰 肖有谷 译

柳曾典 校

*

责任编辑:王正琼 版式设计:乔玲

封面设计:肖晴 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里一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

河北省涿水县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $10^{3/4}$ · 字数 281 千字

1989 年 5 月北京第一版·1990 年 11 月北京第二次印刷

印数 2, 511—4, 120 · 定价: 9.50 元

*

ISBN 7-111-00687-9/TH·111

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1200 t；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发展丛书。

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发展丛书。目前已出版五卷，第一卷缺陷评定；第二卷探伤和检验；第三卷材料和工艺；第四卷特殊容

IV

器的设计；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，供给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3卷，主要介绍压力容器材料与工艺技术方面最新进展。其中序言、第三、四、五、六、七、十章由陈登丰翻译；第一、二、八、九章由肖有谷翻译。全书由柳曾典审校，并由邓立文统稿。在本书翻译过程中还得到李贤芬、宗士英、徐道荣、丛希民以及苏鹏华、张承孝、常宗惠、方懿、史国平、徐冰等同志的帮助，在此一并表示感谢！

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

1987年6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》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。这套丛书已出版过几卷，读者对此评价甚高，这是对继续出版以下各卷的莫大鼓舞。

本书是《压力容器技术进展丛书》的第 3 卷。从完整性和可靠性观点出发，为了降低承压装置的失效率，必需慎重选材和采用完善的制造工艺，故本卷所涉及的内容及其重要性，专家们都推为各卷之冠。实际上，只有把此二者结合在一起，才能保证最终结构中出现有害缺陷的几率为最低。此外，欲保证结构各部位（包括邻近焊缝的部位）都具有足够的断裂韧性，以抵抗缺口削弱效应，以及保证结构局部化学成分的波动和制造偏差均在允许范围之内，则材料和制造两个方面都极为重要，并且还影响到生产的进度、经济性和可行性。

由于大多数压力容器是用钢材制造的，故本卷第一章首先讨论制造钢板材料问题，强调最近的进展主要在于改善已有材料的化学成分，特别是材料的品质。例如，改进炼钢工艺，以减少材料出现层状撕裂的危险。第二章是由日本专家所著，主要评述优质锻件，它对于核反应堆厚壁压力容器至关重要。这一章着重介绍了目前已能得到的更大、更重的优质锻件，从而可满足减少容器焊缝数量和长度的要求。

在论述材料的两章之后，有六章从不同侧面论述在现代生产中极为重要的焊接工艺。第三章论述在核电站中广为采用的压水

堆核心设备——大型厚壁压力容器的制造问题，并介绍了日本处理这一问题的方法。第四章着重介绍英国的经验，主要是英国制造非核压力容器的工艺，这类压力容器也常具有相当大的壁厚。第五章详细论述了厚板焊接的一些特殊问题，介绍了各种厚板焊接工艺近期的进展和发展趋势。第六章介绍有关较薄截面钢板的焊接问题，这一章特别把注意力放在管子以及管子与管板的焊接上，后者是换热器和锅炉用压力容器的一部分。对于这类部件的焊接，在第七章中还讨论了爆炸焊方法的进展，这一方法可用于换热器堵管和在役检修，最近又用于新设备的制造。要取得高质量和没有缺陷的焊缝，还需要开发合适的焊接工艺，以及采用自动控制来保证工艺过程的稳定。因此，焊接自动控制正在获得日益广泛的应用，本书第八章将讨论这一议题。

最后两章论述了在焊接中可能产生的残余应变及焊接缺陷问题，以及消除和减少这些问题的方法。第九章论述残余应变效应，第十章论述焊接缺陷及其防治。

鉴于很多专家对本卷的编写作出了贡献，特别是对于那些从事研究和开发工作的专家，以及允许采用他们未公开发表的成果的机构，在此特表示由衷的感谢。

最后，欢迎读者对本丛书今后的改进提出修改、批评意见和建议。

R. W. Nichols

目 录

译者的话

序言

第一章 压力容器用铁素体钢板	1
第一节 引言	1
第二节 钢板的层状撕裂	3
第三节 碳钢和碳锰钢	5
第四节 微合金钢	9
第五节 低合金高强度钢板	15
第六节 结束语	26
附录 钢板材料的验收	26
参考文献	30
第二章 核电站受压部件的锻件	33
第一节 引言	33
第二节 化学成分和性能	34
第三节 制造工艺与质量控制	39
第四节 核蒸汽供应系统主要部件用锻件实例	43
第五节 发展趋势	54
参考文献	54
第三章 压水堆用大型压力容器的生产	56
第一节 引言	56
第二节 制造车间	59
第三节 制造	62
第四节 质量保证	80
第五节 结束语	82
参考文献	82
第四章 非核压力容器的生产	84

第一节	引言	84
第二节	质量保证	85
第三节	车削平面布置和生产管理	88
第四节	材料	90
第五节	钢板的进厂验收、切割和下料	93
第六节	成形	96
第七节	组装和公差	103
第八节	焊接工艺装备	106
第九节	预热	110
第十节	焊接材料	113
第十一节	接管的焊接	116
第十二节	焊后热处理	120
第十三节	压力试验	125
第十四节	容器的保护和运输	126
第十五节	现场安装	128
第十六节	现场焊接返修	128
第十七节	卫生和安全	131
	参考文献	131
第五章	厚截面的焊接方法	133
第一节	引言	133
第二节	手工电弧焊	134
第三节	埋弧焊	139
第四节	电渣焊	143
第五节	气电焊	146
第六节	窄间隙焊	148
第七节	厚截面接头的电子束焊接	158
第八节	激光焊接厚截面材料的潜力	170
第九节	焊接方法的选择和经济性	173
	参考文献	176
第六章	有高度完整性要求的管子焊接方法	181
第一节	引言	181
第二节	TIG焊	183

参考文献	199
第七章 压力容器和换热器的爆炸焊接	201
代号与缩写	201
第一节 引言	202
第二节 爆炸焊的基本原理	203
第三节 爆炸焊接接头的特点	210
第四节 爆炸焊在压力容器和换热器中的应用	220
第五节 结束语	241
附录 公式和焊接几何	241
参考文献	245
第八章 焊接过程的控制	249
第一节 引言	249
第二节 基本情况分析	250
第三节 控制方法	254
第四节 监测	265
第五节 设备与应用	267
第六节 结束语	272
参考文献	273
第九章 残余应变及残余应变的降低	275
第一节 残余应变的起源	275
第二节 残余应变的作用	278
第三节 残余应变及其引起变形的控制	285
第四节 采用机械方法降低残余应力	289
第五节 加热的方法	291
第六节 与热处理有关的问题	298
第七节 结束语	303
参考文献	304
第十章 焊接缺陷及其防治	307
第一节 引言	307
第二节 缺陷类型及其形成原因	308
第三节 防止技术性缺陷	317
第四节 防止施工性缺陷	323

X

第五节	缺陷的分布和发生率	324
第六节	缺陷的检测	327
第七节	缺陷的危害性	329
第八节	缺陷的返修及其经济性	330
第九节	结束语	331
参考文献		332

第一章 压力容器用铁素体钢板

〔英〕 I. G. Hamilton

摘 要

本章介绍了近年来压力容器用碳钢、微合金钢及铁素体合金钢所取得的主要进展和存在的问题；微合金钢的发展和一般的设计原理、成形与焊接方面存在的问题。简单地叙述了炼钢技术的进步对提高这些钢的质量所起的作用；碳钢和碳锰钢的高温强度与低温缺口韧性的研究概况。在低合金钢中，以核容器用 A 533 Gr. B, cl. 1 钢板和石油化工中厚壁压力容器用 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 钢为例，分析了它们的制造与使用问题。在低温用钢方面，简述了低温用 9 Ni 钢。最后，在附录中列出了使用要求高的钢板的验收程序。

第一节 引 言

《钢数据手册》〔1〕是一本包括12个国家生产的 900 多种钢的评述性手册，这本手册的内容虽然不能说很全面，但是通过这本手册可以准确地了解现有压力容器用钢的数据。为了叙述简便，本章只评述下列各类压力容器用钢：

- （1）碳钢和碳锰钢；
- （2）微合金钢；
- （3）低合金高强度钢；
- （4）9 Ni 钢。

由于炼钢技术的进步，以上各类钢才能得到发展，认识到这一点是很重要的。实际上，已经提出这样一种见解〔2〕，即炼钢技术的这些变化，已对制造压力容器产生了很大的影响，包括有利的和不利的两个方面。近10~15年来，在炼钢技术中有下

列的主要变化:

- (1) 逐渐淘汰平炉炼钢;
- (2) 越来越多地用碱性吹氧炼钢(BOS)工艺生产压力容器用钢;
- (3) 二次炼钢工艺的应用日益增多;
- (4) 连续铸锭工艺的应用日益增多;
- (5) 引进直接还原法;
- (6) 引进电渣重熔炼钢;
- (7) 增加淬火加回火钢的供应;
- (8) 发展微合金钢;
- (9) 发展控制轧制钢;
- (10) 发展低硫钢;
- (11) 发展控制硫化物形状的钢;
- (12) 发展极低碳钢。

限于篇幅,不可能对所有这些变化进行深入讨论,同时,这些变化对制造压力容器的影响也并不都是相同的。尽管如此,炼钢技术的变化使得钢材用户比过去有了广泛得多的选用范围。因此,本节只简要地讨论 BOS 工艺、二次炼钢工艺和连续铸锭工艺。

随着钢厂日益增多地采用 BOS 工艺,使得钢中一般残余元素含量比通常的平炉钢低,实际上,这意味着对一定的公称成分的钢而言,BOS 钢比平炉钢的强度性能低,而延性相应地较高。

广泛地采用二次炼钢法,其中包括可用于下述用途的一系列技术^[3]:

- (1) 从钢中去除氢;
- (2) 改善钢的机械性能;
- (3) 严格控制成分范围(例如95%炉号的碳当量控制在三位小数以内);
- (4) 生产低硫钢($S < 0.010\%$);
- (5) 降低夹杂物含量,改善钢的纯净度;

(6) 生产低碳钢;

(7) 严格控制浇铸温度范围, 这对连续铸锭特别重要。

对于许多钢板的生产来说, 锭模浇注正被连续铸锭所代替。连续铸锭钢的技术优点如下:

(1) 优质钢的均匀性;

(2) 消除宏观偏析 (一般说来, 这是可能做到的, 但也有个别存在宏观偏析的事例)[^{5, 6}];

(3) 易于控制晶粒尺寸;

(4) 化学成分均匀;

(5) 改善钢板表面质量;

(6) 成品尺寸更加精确。

连续铸锭带来的一个问题是, 除非钢是全镇静的, 否则就有产生表面和皮下针孔的危险。一般采用铝脱氧, 这样就可能导致钢板中含铝量超过0.05%。

在低硫钢和控制钢中硫化物的形状方面, 有可能取得最引人注目的进展, 这些改进可以有效地消除层状断裂。评述压力容器钢板重大进展时, 无不涉及到这一成果, 由于它适用于各种类别的钢, 所以在讨论每一类钢的进展之前, 先予以介绍。

第二节 钢板的层状断裂

当钢板承受厚度方向的应力时, 因为厚度方向的机械性能通常比其他方向的性能差, 所以就发生层状断裂。这种各向异性是由于钢中存在夹杂物, 这种夹杂物在钢板轧制过程中被拉长。这种夹杂物(硫化物和氧化物)在钢锭内部的分布是不均匀的, 并有成群分布的倾向。夹杂物在轧制过程中被延伸以后, 它们的相互影响, 为裂纹的扩展提供了既长而又易于通过的路径。钢的层状断裂不仅与所含夹杂物的体积百分比有关, 而且夹杂物的形状、尺寸和分布都有很重要的影响。

最初设想通过对钢板进行严格的超声检验来解决这个问题, 结果证明是无效的。现在已经证明, 在钢板厚度方向(或短横向,

ST) 上,用断面收缩率(RA)评定层状撕裂倾向是最有效的方法,此时,拉力试样的长度沿厚度方向选取。英国焊接研究所的研究〔7〕表明,在直径为6.4mm的试样上测得的ST方向最小RA为20%时,一般能有效地将层状撕裂倾向降低到最小程度。这种试验可能存在的问题是:

(1) 所获得的断面收缩率是试样尺寸和形状的函数〔8〕;

(2) 取样可能不代表将要进行焊接的部位。

尽管如此,仍有可能买到这样的钢板,即在其四周取样时,RA(ST)值远大于20%,经实际使用也证实,在多数场合下,这些钢板焊后不会产生层状撕裂。

硫是产生拉长夹杂物的主要因素,已经知道,当硫含量超过0.010%时,试样的RA(ST)值是不容易大于20%的。随着硫含量在0.010%以下逐渐降低时,延性不断得到改善,直到硫含量达到0.003%或更低时,延性将得到更显著地改善。在炼钢过程中,要使脱硫达到这样的水平,不是一件容易做到的事,因为这要求对铁水作特殊的脱硫处理,同时在炼钢时要选用低硫废钢及低硫石灰,或者采用多次电渣重熔方法。

通过提高钢锭凝固速度也可以减小钢中硫化物粒子的尺寸,例如采用扁形钢锭模,或连续铸锭方法。轧制时如果压下量越大及终轧温度越低,则这些硫化物的分散度就越大。

为了防止层状撕裂,除了采取尽量降低钢中含硫量的方法以外,现在又开发了一种新技术,即在钢中加入某些元素,以改变硫化物的化学成分,使其产生硬的球状硫化物,这些硫化物在轧制温度下相对来说是不易被伸长的。这就是所谓控制硫化物形状。这种控制可以通过加入钙、锆或稀土金属(REM)来达到〔9〕。稀土元素可以以混合稀土的形式或者以含有主要稀土元素铈、镧、钕和锆的硅化物的形式加入。由于这些元素对氧具有高的亲合力,因此必须使钢脱氧后才能加入。如果不适当地控制这一点,就会出现粗大的稀土硫化物和氧硫化物团,从而导致低的RA(ST)值〔10〕。

采用电弧炉、铝脱氧和真空脱气等成熟的冶炼纯净钢的方法,

可以降低氧化物含量。通过这些方法,氧含量可以降低到20~30 ppm的水平。铝处理将以硬的球状夹杂物代替被拉长的硅酸盐型夹杂物,遗憾的是,铝也促进硫化夹杂物成团。

对于极低硫钢的使用也有一些限制,因为在焊接时,这些钢比硫含量较高的钢更容易在热影响区产生氢致裂纹。³⁾极低硫钢的热影响区更容易硬化,究其原因,最初认为这是起氢陷阱作用的硫化物体积减少而引起的氢扩散效应,现在认为是由于夹杂物的存在有助于冷却过程中铁素体成核,减少夹杂物数量,可以抑制这种转变,导致产生较硬的组织^[11]。大量实践证明,焊接这类钢时,如果采用预热和烘干焊接材料等预防措施,就不会出现氢致裂纹。现已知道,稀土钢不仅有利于降低层状撕裂倾向,而且在 $RE:S$ 大于4时,也会降低焊道下裂纹产生的倾向^[12]。当然,也有一些钢在焊接时仍会遇到困难^[13],因此,在焊接之前充分进行工艺试验是很重要的。

第三节 碳钢和碳锰钢

碳钢和碳锰钢是压力容器制造中使用最广泛的一类钢。这类钢虽然为人们所熟知,但近年来仍有大量的工作致力于研究它们的机械性能。

高温屈服强度性能是国际标准化组织(ISO)的主要研究课题^[14]。研究表明:其性能受晶粒尺寸影响,因而有粗晶粒钢和细晶粒钢两类。

粗晶粒钢规定为:

- (1) $Si \leq 0.10\%$ 和可溶 $Al \leq 0.010\%$ 的半镇静钢;
- (2) $Si \geq 0.10\%$ 和可溶 $Al \leq 0.010\%$ 的硅镇静钢。

细晶粒钢规定为:

- (1) 可溶 $Al \geq 0.010\%$ 的钢;
- (2) 由大家知道的只采用细晶粒工艺的国家所生产的钢。

上述两类钢按厚度 t 可进一步细分为四个范围:

- (1) $t \leq 16\text{mm}$;

(2) $16\text{mm} < t \leq 40\text{mm}$;

(3) $40\text{mm} < t \leq 63\text{mm}$;

(4) $63\text{mm} < t \leq 100\text{mm}$ 。

只考虑正火钢或正火加回火($580\sim 620^{\circ}\text{C}$, 3 h)钢。试验尽可能按 ISO R783或 ISO R205标准进行,即应变速率为 $0.001\sim 0.003\text{min}^{-1}$ 或加载速率小于 $4\text{kgf}\cdot\text{mm}^{-2}/\text{min}$ 。

钢板的化学成分见表 1-1。通过分析数据可以看到,在任何给定温度下,屈服点与室温抗拉强度呈线性关系,见图 1-1。屈服点最低值是以多重回归分析导出的95%置信度下限来定义的。可以看出,随着温度升高,用细晶粒钢代替粗晶粒钢的优越性不断减少,超过 300°C 时,就没有优越性了(参见图1-2)[15]。

表1-1 ISO高温工作组研制的C钢及C-Mn钢板的化学成分

	厚度 t (mm)	化 学 成 分 (%)				
		C	Si	Mn	Al	N
粗晶粒	$t \leq 16$	0.11~0.27	0.01~0.54	0.40~1.21	0.004~0.008	0.006
	$16 < t \leq 40$	0.10~0.27	0.02~0.44	0.50~1.62	0.004~0.008	0.0095
	$40 < t \leq 63$	0.08~0.29	0.02~0.28	0.46~1.15	0.004	0.006
	$63 < t \leq 100$	0.14~0.25	0.03~0.23	0.59~1.24	0.008	未分析
细晶粒	$t \leq 16$	0.05~0.27	0.13~0.52	0.46~1.54	0.015~0.080	0.003~0.011
	$16 < t \leq 40$	0.08~0.23	0.01~0.53	0.16~1.84	0.014~0.090	0.003~0.010
	$40 < t \leq 63$	0.09~0.23	0.06~0.37	0.40~1.38	0.012~0.090	0.004~0.007
	$63 < t \leq 100$	0.14~0.19	0.16~0.40	0.66~1.35	0.016~0.080	0.004

为了按所要求的设计准则确定100000 h的蠕变断裂强度,已经开展了大量的研究工作。由于核工业的需要,要求延长到确定250000 h的蠕变断裂强度。结果发现,在延长的时间内,应力对数值与断裂时间对数值不再保持原来假定的线性关系,按线性关系得出的长时间估计值偏高。目前,已经有了精确的外推法,如Larson-Miller, Sherby-Dorn等,但为了能精确地估计100000 h的蠕变断裂强度,采用这些方法仍然要求提供至少有在30000 h试验基础上确定的试验数据,即使在这种情况下,还有 $\pm 20\%$ 的分散度。