



压力容器技术进展——4

特殊容器的设计

〔英〕 R·W·尼柯尔斯 主编



机械工业出版社

压力容器技术进展—4

特殊容器的设计

[英] R.W.尼柯尔斯 主编



机械工业出版社

(京) 新登字054号

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4卷《特殊容器的设计》的中译本。全书共分8章, 主要论述高温容器、超高压容器、预应力铸铁压力容器、用于食品加工的压力容器、外压容器、用于高压和低压气体的移动式气瓶、移动式容器的设计及其腐蚀、应力腐蚀、腐蚀防护方面的内容, 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、研究人员、大专院校师生参考。

Developments in pressure vessel technology—4
Design for Specific Applications

R. W. Nichols

APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD 1983

压力容器技术进展—4

特殊容器的设计

[英] R. W. 尼柯尔斯 主编

朱磊 于伯民 译

据定一 柳曾典 校

责任编辑: 王正琼 版式设计: 郭振华

封面设计: 姚毅

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京印刷三厂印刷

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 9^{1/4}·字数 240千字

1994年5月北京第1版·1994年5月北京第1次印刷

印数 00 001—2600·定价: 13.00元

ISBN 7-111-04160-7/TH·514(X)

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 1 卷缺陷评定；第 2 卷探伤和检验；第 3 卷材料和工艺；第 4 卷特

殊容器的设计，第5卷标准和规范。在每一卷中又有许多专题，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4卷，主要介绍特殊压力容器设计方面的最新进展。其中序言由琚定一翻译；第1、2、3、4章由朱磊翻译；第5、6、7、8章由丁伯民翻译。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。

译者

1993年12月

序 言

当大家感到有需要将《压力容器工程技术》^①一书中的内容予以更新的时候,我们已作出决定,另行出版一套丛书来代替原书的再版,从书中每一本书涉及压力容器这一广泛技术领域中的某一部分。这样每个主题由几位专家和专题作者共同执笔,因而使内容更为全面,而书的篇幅仍保持合理。丛书的前三本书已经出版,涉及的主题,不仅在该主题领域内具有特殊意义,而同时又是压力容器技术的重要部分:“缺陷分析”覆盖了断裂力学方面的专题;“探伤和检验”包括无损检测和质量保证;“材料和工艺”着重介绍了近代焊接方法的进展和韧性好、纯度高的钢部件的制造。由于以应力分析和反应堆用的钢制核压力容器设计为主题的内容已有某些专著,尽管其出版目的略有不同,但其内容较充分,完全可以暂缓将这两方面的内容纳入这一套丛书。这些书籍和本丛书将成为压力容器技术百科全书。

丛书第4卷的主题仍然是压力容器设计。本卷的基本概念取材于《压力容器工程技术》一书的有关章节,但着重论述特殊应用压力容器的有关问题,特别是反应堆用核压力容器和火箭、航天用压力容器。鉴于有关反应堆核压力容器方面的进展已编入马德里专家会议的论文集中,而其它类似的内容尚待寻求。因此,我们特别关注人们普遍感兴趣的内容,尽管这些内容有些已超越英国BS标准和美国ASME锅炉与压力规范所涉及的传统压力容器。其中的实例,在一定程度上代表压力容器的许多非特殊应用场合,如:极高压力、高温、腐蚀环境、外压和真空等情况的影响,以及在运输中的危险性。

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

由 O'Donnell 和 Porowski 编写的第 1 章讨论容器承受高温时采用的设计方法，而高温容器所用的材料在温度较低时所显示的性能特征并不显著。在本章中论述了大范围的塑性、与时间有关的变形与蠕变、与速率有关的疲劳性能、蠕变与疲劳交互作用、以及晶间脆化等。这些都是高温设计中必须考虑的因素。由于二位作者在美国长期从事于 ASME 对这一专题有关的设计方法的开发，因此作者在本章中特别强调了这些设计方法，当然也讨论了其它方法。Crossland 教授长期从事承受极高内压容器的专题研究，在他编写的内容中有他自己的见解；在第 2 章中综合了极其充实的内容，几乎可单独成书。这种极高压力的容器常在高压条件下工作的化工过程中应用，所涉及的问题必然较多，例如有关极厚截面的结构，或多层和绕丝结构的问题。

化工过程仅是能引起腐蚀的诸多环境之一。实际上日常生活中的大气氧化就是腐蚀环境之一，因此，对竣工以后至安装使用以前一段时间内的压力容器部件，在停放时必须采取防护措施。然而，实际的腐蚀率受环境和部件本身的影响极大。因此，要在本书有限的篇幅中给出特殊情况下的设计数据是有困难的。为此，在第 3 章中，作者 Cowen 采用了略微不同的方法，说明某些可能发生的问题，引起读者对某些可能遇到的问题加以注意，同时，针对所发生的问题介绍目前可能采用的措施。对于“预应力铸铁压力容器”，第 4 章作者 Bounjn 和 Beine 采取了更特殊的方法。这种容器的结构在很大程度上不同于常用的钢制压力容器，应采用不同的方法进行设计。目前，尽管这类铸铁容器数量还很有限，仅在极特殊的场合中应用，但本书仍介绍了其新颖的设计方法。

要保证食品的清洁与卫生达到一定水平，腐蚀对食品生产用压力容器的影响是必须考虑的一个问题。作者 Kemper 在第 5 章中对这一问题提供了部分答案，强调了材料的选用，并在容器内壁施加涂层。Kemper 对这类容器的设计与生产有极丰富的经验。数年来，他还非常有效地主持了英国标准协会与压力容器工业有

关的委员会 (PVE/一) 工作。生产食品的容器还常在外压载荷下工作, 例如真空容器, Kemper 在第 5 章中讨论了真空容器设计方法的规范化。在第 6 章中, 作者 Kendrick 对外压容器作了更为详细的讨论, 其中包括浸没在深水中的容器。该章还叙述了当简单的规范设计方法不适合时可用的专门设计方法。

本卷最后两章是针对经常移动的压力容器, 由于容器经常移动而带来的某些特殊问题。在第 7 章中作者 Sallis 对设计与制造气瓶和类似容器所采用的规程和方法作了权威性的评述。在大部分情况下, 这些气瓶的制造已经系列化, 但由于其用途广泛, 保证高质量便显得十分重要。对气瓶已制订了有关法规。在第 7 章中, 作者讨论了这些方面的内容, 其中重点介绍英国的有关规定。同样, 对公路和铁路运输用的容器, 无论对可拆换型运输贮槽, 或对公路车辆的结构部件 (如槽车等), 都制订了相应的法规。由于目前国际情况多变, 在第 8 章中, 作者 West 将其内容集中在介绍英国的规定, 这样处理便于介绍有关范例, 以避免读者由于同时涉及多种处理方法而引起的混乱。

在此, 仅向本卷的作者、出版社, 以及为协助本书编辑出版的有关人员表示谢意。希望本书读者理解他们的工作, 并和我一起表示对他们感激的心情。

R. W. Nichols

计量单位换算

$$1\text{in} = 0.0254\text{m}$$

$$1\text{mile} = 1609.344\text{m}$$

$$1\text{lb} = 0.454\text{kg}$$

$$1\text{UKgal} = 4.546\text{dm}^3$$

$$1\text{atm} = 101.325\text{kPa}$$

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$$

$$1\text{inH}_2\text{O} = 249\text{Pa}$$

$$1\text{lbf/in}^2 = 6.895\text{kPa}$$

$$1\text{lbf/ft}^2 = 47.88\text{Pa}$$

$$1\text{tf/in}^2 = 15.2\text{MPa}$$

$$1\text{cal} = 4.187\text{J}$$

$$1\text{Btu} = 1.055\text{kJ}$$

$$1\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}) = 3.09\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$1\text{Ci} = 37 \times 10^9\text{Bq}$$

目 录

译序

序言

第1章	高温容器	1
第1节	引言	1
第2节	按照ASME规范进行高温压力容器设计	5
第3节	高温容器的基本失效模式	8
第4节	ASME规范中的许用应力和应变	8
第5节	在蠕变范围内薄膜应力和弯曲应力的组合	16
第6节	热应力循环	20
第7节	根据弹性芯部原理的界限法	21
第8节	弹性随动	31
第9节	蠕变应变集中	32
第10节	与时间有关的疲劳	38
第11节	缺陷评定技术	45
第12节	详细的非弹性设计分析	47
附录1	参考应力法	52
附录2	累积应变计算的数值实例	54
参考文献	61
第2章	超高压容器	67
第1节	引言	67
第2节	单层高压容器的设计	72
第3节	制造单层式和多层式容器的材料	101
参考文献	104
第3章	腐蚀、应力腐蚀和腐蚀防护	108
第1节	引言	108
第2节	低碳钢和低合金钢	109
第3节	不锈钢	112

IX

第4节	腐蚀防护	119
第5节	监测	123
	参考文献	124
第4章	预应力铸铁压力容器	126
第1节	引言	126
第2节	PCIV技术的基础	128
第3节	一个典型结构设计的细节	138
第4节	衬里的设计和建造	139
第5节	PCIV的分析	142
第6节	质量保证	143
第7节	制造和申请许可证	144
第8节	在不同应用场合的PCIV设计	145
	参考文献	146
第5章	用于食品加工的压力容器	149
第1节	引言	152
第2节	高强度不锈钢的应用	154
第3节	内压作用下碟形封头的皱折失稳	158
第4节	真空或外压作用下容器的失稳	164
第5节	反压泄放阀的尺寸估算	172
第6节	卧式圆筒形压力容器	174
第7节	搅拌器与压力容器的安装	179
第8节	加热和冷却夹套的设计	183
第9节	立式圆筒形容器的压力试验	185
	参考文献	187
第6章	外压容器	189
第1节	引言	190
第2节	弹性失稳	194
第3节	加强件的局部失稳	199
第4节	形状误差的影响	207
第5节	弹塑性失稳	212
第6节	形状测量	215
第7节	展望	218

第8节 结语	219
参考文献	219
第7章 用于高、低压气体的移动式气瓶	223
第1节 引言	223
第2节 规程	224
第3节 设计	230
第4节 材料选用	237
第5节 制造方法	242
第6节 质量保证、质量检验和试验	248
第7节 展望	253
参考文献	254
第8章 移动式压力容器	256
第1节 引言	256
第2节 设计	261
第3节 运输用贮槽	269
第4节 铁路槽车	271
第5节 汽油槽车	273
第6节 真空容器	276
第7节 材料	278
第8节 人员方面的考虑	280
第9节 结语	282
参考文献	282

第1章 高温容器

〔美〕 W. J. O'Donnell 和 J. S. Porowski

第1节 引言

一、背景

几十年来,蒸汽锅炉和压力容器一直采用弹性理论进行设计。这种设计方法要求沿容器壁厚的平均应力不超过许用应力。有关规范中给出了计算平均应力的简单公式以及考虑弯曲影响的修正系数。在设计碟形封头或平板时就必须考虑到弯曲修正系数。然而关键在于平均薄膜应力不得超过许用应力,所以高温下计算设计应力的计算式与常温的相同。至于是否需要另外考虑弯曲和热应力的影响则由设计者自己去判断。多数情况下,这些计算只考虑机械载荷的作用(主要由压力引起)。有关规范给出的许用应力值有足够的裕度,以补偿上述简化计算中的误差。目前这种采用最大主应力理论的常规设计方法(design-by-formulae)仍在普遍使用。但应认识到,即使不考虑蠕变的作用,该设计方法也仅适用于薄壁容器,因为薄壁容器的热应力可忽略不计且符合准稳态加载的假设。

最近人们开始充分认识到疲劳损伤是大多数压力容器的主要失效模式。采用常规设计方法不能控制疲劳损伤,因为这种损伤是由局部应力—应变状态决定的,而薄膜应力公式中并未考虑这一因素。按 von Mises 屈服准则的当量应力公式确定的最大局部剪应变幅是决定低循环疲劳损伤最重要的因素,而局部应力状态仅影响平均应力的大小。

二、高温设计

高温容器的设计存在的困难在于:容器的使用温度越高,容

器中各点的温度变化就越大,不同结构元件之间的温差也就越大,这就导致总应变幅的增大。同时,由于在高温下材料的屈服强度降低,又增加了塑性应变集中的作用。而蠕变还会增加非弹性应变集中和疲劳损伤,最终导致热疲劳载荷的增加和材料的疲劳抗力降低。因此对高温下使用的容器,疲劳将是一种更为主要的失效模式。

大多数高温压力容器用钢在低蠕变应变下易于发生断裂。蠕变应变一般集中在晶界,特别是当晶粒的滑移阻力大,使得蠕变应变速率较低时更是如此。即使条件应变(工程应变或连续应变)值很低时,晶界处的应变仍可能相当高并在晶界处形成空穴,进而产生晶间裂纹,导致低条件应变下的断裂。因此需要对高温容器引入应变极限。但对蠕变温度以下使用的压力容器,由于所用钢材大多数都具有一定的韧性,因而可不考虑其应变极限。在高温下,蠕变棘轮现象的出现使问题复杂化,因为蠕变棘轮现象会在远低于产生塑性棘轮的应力水平下发生。因此,尽管容器的设计应力很低时蠕变可忽略不计,但由于热循环的作用,实际设计中蠕变仍是需要考虑的重要因素。

蠕变断裂是高温下可能发生的另一严重失效模式。在高温下,大多数压力容器用钢会由于长期受高应力作用而受到损伤。通常把各个应力下持续的时间与同样温度和应力下达到断裂的时间的比值之和作为蠕变断裂损伤的度量。这种损伤的机理在冶金学方面尚无很好的解释;目前,对它与上述因韧性降低而受到的损伤之间的关系还不清楚。对某些材料来说,在某一温度和应变速率范围内,蠕变断裂损伤乃是由 von Mises 屈服准则的当量应力强度控制的;而在另一些情况下,最大拉伸应力对损伤起主要作用。在缺口处两者间的差异很大,因为缺口处的最大拉伸应力常高于 von Mises 当量应力强度。

壁厚的选择对高温容器的设计是很重要的。通常可通过减小壁厚来减轻热循环造成的疲劳和蠕变断裂损伤。但随着壁厚的减薄,蠕变棘轮现象会变得更加严重。为了获得最优壁厚,需要考

虑容器经受高温和压力的持续时间。当根据与时间和温度有关的许用应力和累积损伤准则来选择壁厚时，可以分析短时间的超压和超温所产生的影响。累积损伤准则可灵活运用，设计者可根据特定的材料、制造工艺和预计的温度、压力随时间变化的情况进行优化设计。用户也可用这些方法估计超温、超压的影响，以便使容器在安全使用寿命期内总的损伤量不超过允许的范围。

三、设计手段

计算机功能的提高和有限元方法的发展，使压力容器的弹性应力和应变设计分析已成为一项很普通的工作。在蠕变温度以下，设计分析中所考虑的时间因素只需包括瞬变过程的次数和变化速率。只要瞬变过程的时间间隔足够长，前后两次的瞬变作用无相互影响，时间间隔就不会影响计算结果。如果不存在其它影响因素，总的操作时间对计算结果也没有影响。

在高温下使用的材料受工作应力的长期作用会发生蠕变而受到损伤。在这种情况下，卸载时间和加载的先后顺序就变得很重要了。由于它将影响结构的承载能力，因此必须考虑其它的失效模式。更为重要的是，蠕变作用与时间的关系是非线性的，这就大大增加了设计分析的复杂性。

蠕变问题的闭式解很少，采用非弹性有限元分析似乎是高温压力容器分析方法发展的必然趋势。不过，在实际设计中使用弹性分析的界限解 (bounding solutions) 看来更加可行和可靠。

用有限元进行蠕变分析时需采用增量法，并且得由懂技术、有经验的人员来进行这项非常费时的分析。在塑性—蠕变相互作用的循环加载情况下，必需采用有效的结构方程。在用计算机进行复杂的和多次反复的计算中，很难看出计算结果中的简单误差。即使前几次循环的计算结果很精确，但仍存在需要将这一结果外推到几百次循环的问题，因为不可能对容器的整个使用寿命期进行蠕变随时间变化的增量分析。

上述方法显然非常麻烦，因此在对容器进行全面的非弹性分

析时是否将其作为一种可行的分析手段，要由分析者自己决定。现已制订了进行这种分析的推荐性方法，包括材料模型的实用处理方法；应力和应变的计算结果也应满足设计准则的要求。

由界限解得到的验收准则（即设计准则）通常很有效，这些界限解是由容器的弹性或简化的非弹性分析结果导出的。在美、英、法等国，界限解及其简化设计方法仍在不断发展，扩大了它们的应用范围并改进了功能。英国已研究出了根据能量耗散原理建立的简化设计分析方法和参考应力方法。在美国，还包括弹性芯部解（elastic core solutions）的界限解，都已被广泛用于各种高温压力容器和管道的设计。

本章重点介绍目前美国采用的高温压力容器设计方法。在简单介绍 ASME 规范中高温设计方法的历史演变后，对人们最关注的几种高温失效模式进行了总结。然后叙述了 ASME 规范中高温压力容器设计方法的基本原理，并讨论了评价部件结构完整性的基本准则。

本章主要介绍在蠕变范围内、在载荷与时间的关系较复杂的受力构件中根据弹性芯部原理求得的界限解。解释怎样将这些界限解推广应用于加载循环不均匀的情况（其中有些受载条件严重到足以产生塑性棘轮现象）。

通常认为弹性随动（elastic follow-up）仅与管道设计有关。蒸汽发生器管板的孔桥就是容器中局部弹性随动的例子。本章给出了单调和交变加载条件下确定非弹性应变集中界限的方法。

本章还介绍了计算高温损伤的蠕变疲劳和蠕变断裂的基本数据。其中对许多问题的意见还不统一，包括塑性与蠕变的相互作用及疲劳和蠕变断裂损伤的积累。本章详细介绍了规范中的弹性和非弹性分析方法，论述了缺陷评定技术的发展趋势。

本章简要讨论了有限元蠕变分析方法和软件功能，以及非弹性分析中的材料模型。

附录 1 中简要介绍了另一种设计方法，即参考应力法。附录 2 介绍了界限解在累积应变问题中的应用。

第2节 按照 ASME 规范进行高温 压力容器设计

从历史上看, ASME 规范中的设计方法首先就是为高温下使用的容器而制定的^[1]。1913年颁布的第一部 ASME 规范的目的就在于防止蒸汽锅炉的灾难性爆炸事故。上世纪末和本世纪初,在美国和世界各地的早期工业发展中,这类爆炸事故经常发生。目前该规范的许多内容都与锅炉、压力容器的设计、建造和检验有关。

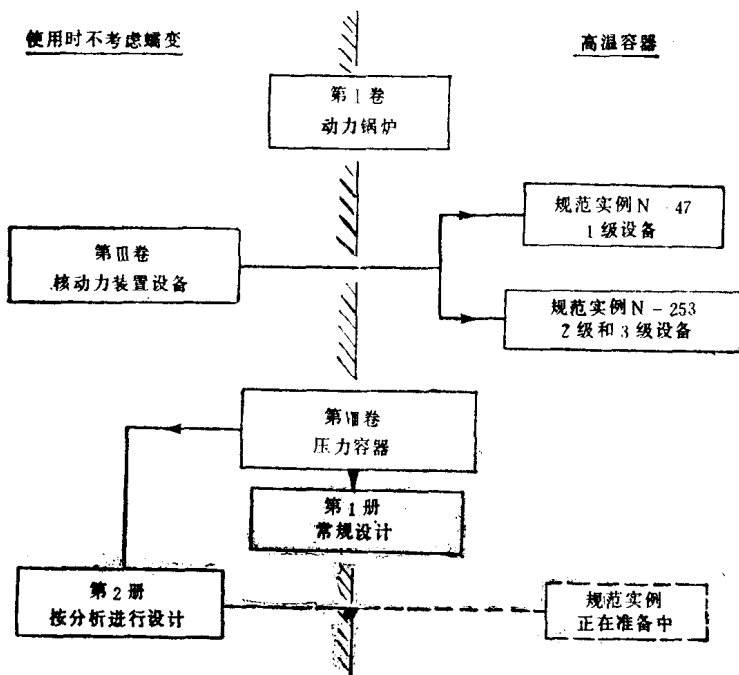


图1-1 ASME 规范中有关高温设计部分

图1-1表示该规范中直接与设计有关的几卷。与高温容器设计有关的为:第I卷——动力锅炉和第VIII卷——压力容器的第1册。这两卷中包括常温和高温用容器的设计方法,并都采用最大