

惠 生 集 团 创 新 基 金

ASME压力容器 分析设计

沈 鋆 © 编著



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

014031963

TH490.22
06

惠生集团创新基金

ASME 压力容器 分析设计

沈 鋆 编著



 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·



北航

C1719981

TH 490.22
06

图书在版编目(CIP)数据

ASME 压力容器分析设计/沈鋈编著. —上海:华东理工大学出版社,2014.4

ISBN 978-7-5628-3812-8

I. ①A… II. ①沈… III. ①压力容器—设计
IV. ①TH490.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 036725 号

ASME 压力容器分析设计

编 著 / 沈 鋈

责任编辑 / 周 颖

责任校对 / 张 波

封面设计 / 裘幼华

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电 话: (021)64250306(营销部)

(021)64252749(编辑室)

传 真: (021)64252707

网 址: press.ecust.edu.cn

印 刷 / 常熟华顺印刷有限公司

开 本 / 710mm×1000mm 1/16

印 张 / 15.5

字 数 / 295 千字

版 次 / 2014 年 4 月第 1 版

印 次 / 2014 年 4 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-3812-8

定 价 / 48.00 元

联系我们: 电子邮箱 press@ecust.edu.cn

官方微博 e.weibo.com/ecustpress

淘宝官网 <http://shop61951206.taobao.com>



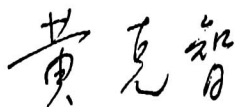
扫描进入手机购买网站

院士寄语

ASME 压力容器规范中的分析设计方法是当今世界上最重要、最先进、最权威的压力容器设计方法之一。特别是,美国机械工程学会 2007 年 7 月颁布的新一代压力容器分析设计规范 ASME VIII-2,吸收了近 40 年来分析设计方法在基本思想和基本方法等方面的重大进展,全面引入了数值分析方法和弹-塑性分析方法,对相关行业产生了重要影响力。然而,2007 年新版规范颁布至今,国内还没有一本详细讲解该设计方法的中文专著。本书的出版正好满足了行业界的这一技术需求。纵观全书,颇具学术价值、应用价值和出版价值。

作者早年在高校科研团队中从事相关科研工作,养成了严谨的学术作风和科技写作基本功,后在大型国际工程公司长期从事压力容器分析设计的工程应用和理论研究工作,一直处在技术与实践的第一线。近年来发表学术论文二十余篇,获软件著作权两项,多次在全国行业技术交流和相关学术会议上分享主题报告,作者的业务水平获得了同行的关注和认可。希望作者再接再厉,今后积极与业内同行交流分享,为不断提高我国压力容器分析设计水平做出贡献。

我衷心祝贺本书顺利出版,希望本书的出版能为我国压力容器分析设计领域的学术研究和工程应用提供有益的参考和帮助。



清华大学航天航空学院工程力学系
中国科学院院士

序

现代工业中的过程工艺都是在不同温度和不同压力的条件下进行的,为了实现这些工艺过程,需要建造各种压力容器,比如炼油装置中的千吨级加氢反应器,煤化工气化装置中的大型气化炉。这些大型压力容器广泛应用于国民经济的各个领域,其本质安全受到了全世界的高度关注。

近年来,欧盟在其颁布的一系列有关承压设备的 EEC/EC 指令和协调标准中,如 97/92/EC《承压设备指令》(PED)、EN 13445《非火焰接触压力容器》,提出了一些新的设计理念和方法,受到了全世界压力容器设计领域专家的高度重视。美国压力容器研究委员会(PVRC)专门立项,研究其对 ASME 压力容器规范的影响及应对策略。

ASME 压力容器规范是当今世界上最重要的压力容器规范,在全球范围内具有很高的权威性。为了体现近年来的技术进步同时与欧盟标准竞争,历时 9 年的专项研究和编辑,美国机械工程学会于 2007 年 7 月颁布了新一代的压力容器分析设计规范 ASME VIII-2。这次标准的发布是一次体现技术进步的总成,吸收了近 40 年来(尤其是近 15 年以来)分析设计方法在基本思想和基本理念方面的重大进展,全面引入了数值分析方法和弹-塑性分析方法。当前,全球同行都在对这部具有重要影响力的新规范进行研究。但目前,国内少有对这部新规范中分析设计方法和思想及其工程应用进行全面阐述和解读的专著。

从制造厂数量和压力容器产量衡量,我国目前已是世界压力容器的制造大国。中国的 ASME 持证厂家超过 700 家,包括一直在使用 ASME 标准设计制造压力容器的单位数以千计,都很熟悉原 ASME 规范。而这次新版 ASME VIII-2 发布,对于上述单位和人员无疑是一次挑战。为了适应经济全球化的大趋势,深刻理解和熟练运用 ASME 新规范是未来我国压力容器产

品进入国际市场的必经之路。同时,中国的压力容器标准也在更新,深入了解标准的理念和设计方法的理论基础对我国压力容器规范技术进步同样是有帮助的。

本书是国内少有的详细阐述新版 ASME 分析设计规范的专著。内容覆盖 ASME 分析设计各个部分。从总体上看,结构清晰、内容翔实,各章节环环相扣、步步推进、相互印证,形成了一个完整的论述体系。从具体章节看,本书理论推导严谨而简洁、语言规范且具逻辑性,全面且深入浅出地论述了美国 ASME 分析设计方法的各方面,对于学习和研究 ASME 压力容器建造规范,掌握其核心技术具有一定的参考价值。

本书的一些技术内容在国内鲜有文献报道,如对两倍屈服法的推导、对逐一分析法的阐述和对主 $S-N$ 曲线的剖析等等。本书还给出了一些美国 WRC 公报中未给出的结构应力推导过程。

本书可供压力容器设计人员和研究人员使用,也可供高年级本科生和研究生参考,希望本书的出版能为我国压力容器分析设计水平的提高提供有益的借鉴。



寿比南

前 言

压力容器分析设计最早源自美国机械工程师协会的 ASME III《核设施元件建造规则》，该协会于 1968 年发布 ASME VIII-2《压力容器另一规则》。此后 30 年，各国纷纷参照 ASME VIII-2 制定本国的分析设计规范，但总的来说压力容器分析设计与 20 世纪 60 年代相比变化并不大。

近 15 年来，国际上压力容器规范发生了巨大的变化。欧盟于 1997 年颁布承压设备指令 PED，随后，2002 年 5 月 30 日颁布与其配套的 EN 13445《非燃烧压力容器》建造规范，提出了很多新理念和新观点，这对 ASME 压力容器规范来说，无疑形成了挑战。

为此，ASME 提出要实现“VIII-2 规范现代化”，重新改写原 ASME VIII-2，以抗衡 EN 13445，并保持压力容器设计规范方面的统治地位。这部 2007 年 7 月 1 日颁布的新版 ASME VIII-2 前后制订历时多年，系统总结了近 40 年来分析设计方法在基本思想和基本理念方面的重大进展，吸收了诸多压力容器前沿技术，全面引入了数值分析方法和无须应力分类的弹-塑性分析方法，其主要特点如下：

- 以失效模式为主线编制分析设计的规则，考虑了四种失效模式：①整体塑性垮塌失效；②局部失效；③屈曲引起的垮塌失效；④循环载荷引起的失效，包括疲劳和棘轮。

- 全面引入数值分析方法（主要是有限元分析），对如何将数值分析应用于工程设计制定了一系列应该遵循的原则和步骤。规范所提供的各种设计和评定方法大部分都是以数值分析的结果为基础的。

- 弹性应力分析准则中的强度理论由第三强度理论改为第四强度理论。

- 除了继续应用弹性应力分析方法外，还对总体塑性垮塌、局部失效、

屈曲垮塌和循环失效等 4 种失效模式全面引入了弹-塑性分析方法。无须进行应力分类的分析设计方法是压力容器设计现代化的热点。

- 提出了基于载荷和抗力系数设计(Load and Resistance Factor Design)概念的弹-塑性设计程序。

- 对于局部失效,提出了基于局部应变失效的新设计方法。这种方法无须应力分类。

- 对于屈曲垮塌,由于采用了数值分析方法,可以计算任意形状元件的屈曲载荷,包括弹性屈曲分析和弹-塑性屈曲分析。

- 针对焊接接头疲劳评定,提出了基于当量结构应力范围的评定方法,该方法对有限元网格不敏感,也是目前世界上最先进的疲劳评定方法之一。

当前,全球压力容器分析设计规范总体上分为两大体系,即美国的 ASME VIII-2 和欧盟的 EN 13445,其他各国的分析设计规范虽然各有特色,但总的来说没有脱离这两部规范的体系。ASME 锅炉压力容器规范已被 100 多个国家接受,并作为满足当地压力容器法规的技术规范。在国内,美欧分析设计方法的工程应用也越来越受到业界的重视。截至 2013 年 12 月 31 日,我国已有 747 家厂商取得了 1 149 张 ASME 授权证书,以更有利地参与全球市场竞争。但是,就分析设计方法的应用,我国压力容器分析设计人员面临着众多挑战,主要有以下几个方面。

(1) 分析设计越来越普遍。相比常规设计(EN 13445 称为公式设计),分析设计也变得越来越“常规”,这个趋势在最近几年尤其明显。EN 13445 (2009)附录 B. 1(直接法)中也写道:分析设计为任意元件在任意载荷下的设计提供了规则。其可作为公式设计的替代或补充。附录 C. 1(弹性分析和应力分类)中也有类似表述。EN 13445 没有将分析设计与常规设计分为两部规范,新版 ASME VIII-2 规范也在其第 4 篇中列入了“规则设计”。可预见,不久的将来,分析设计不再是一项“高级技术”,而只是一种与常规设计可相互替换和补充的设计方法而已,每个设计人员都应掌握。

(2) 设计人员对计算机及程序的应用负责。ASME VIII-2 前言中写道:委员会认为设计和分析所用的工具和技术是随技术进步而进步的,希望工程师在应用这些工具时做出可靠的判断。规范既不要求,也不禁止使用计算机来对按规范要求建造的元件进行设计或分析。但是,采用计算机程序进行设计或分析的设计人员和工程师应注意:他们要对所采用的程序中固有的一切技术性假设负责,且对设计中这些程序的应用负责。也就是说,规

范只给出设计规则,至于用什么工具和技术由设计人员负责,这对设计人员而言确实是一项挑战。

(3) 数值分析的精确性和正确性由设计者负责。ASME VIII-2 中 5.1.2.3 节写道:(规范)对应力分析方法、元件建模及分析结果的证实均未提供建议。虽然设计过程中的这些方面是重要的,且在分析中必须加以考虑,但由于这些方法和设计过程的可变性,(规范)未提供这些主题的详细处理方法。但是,精确的应力分析包括所有结果的证实作为设计的一个部分必须提供。再如:ASME VIII-2 中 5.2.3 节的极限载荷分析法和 5.2.4 节的弹-塑性分析法把极限(塑性垮塌)载荷定义为数值分析不收敛的那个点,但对非线性分析求解中的收敛准则没给出任何指导。EN 13445(2009)附录 C.1(弹性分析和应力分类)中也有类似表述:确定应力所采用的方法由制造者负责。

(4) 商业有限元软件的功能强大而复杂。如:提供丰富的单元和分析类型,各种自动网格划分功能,应力线性化,应力分类,疲劳的前、后处理,焊缝的建模和评估,优化系统,专家系统,知识管理系统,甚至融入了质量管理体系。面对功能如此强大且仍在飞速发展的有限元软件,要对其熟练掌握,无疑是有一定难度的。

(5) 规范与有限元法及程序的融合。目前分析设计绝大部分采用有限元法完成,但规范对如何运用有限元法来进行压力容器及其元件的设计和评估并未给出详细的指导和明示。例如,在模型中如何设置边界条件或确定衰减长度,如何进行螺栓、焊缝、局部载荷、管口、支座、管板等的分析,如何进行后屈曲、总体塑性、安定、蠕变等高级分析,这些都没有给出详细指导。如何应用有限元软件来完成一个符合规范要求的分析成了设计人员必须掌握的技能。相比分析设计规范的制定,似乎应用有限元法来实施符合规范要求的分析更有难度。

(6) 对有限元分析过程和结果的验证。相比其他的设计方法(如 ASME VIII-2 第 4 篇中的规则设计),基于有限元法的分析设计面临的一个主要问题就是对其过程和结果的正确性验证。分析过程中来自设计者或者软、硬件的主、客观不确定因素远多于解析法或公式法。通俗地讲,不同的人采用不同的软、硬件会得出不同的结果,比如屈曲分析中,由于单元类型或网格划分的不同,可能出现不同的屈曲模式和屈曲载荷。此类问题如何验证,规范没有给出指导,仅在其前言中提到:委员会……制定的规则,不能理解为以

任何形式限制制造厂自由选择任何符合规范规则的设计方法和建造方式。换句话说,有限元分析法的不确定性是不可避免的,其过程和结果是否“符合规范规则”由设计者做出判断。

所以,对设计者而言,即使理解了规范条款,似乎还远远不够,还应掌握其他一些基本技能,如:了解工程现象及其相关的背景知识,能熟练使用有限元分析软件,能够将实际结构抽象为数值模型。简单地说,就是如何应用有限元软件来完成符合规范要求的分析和设计。这就要求分析设计人员要对设计规范有充分的认识,理解规范条款的理论基础和来源,了解有限元理论的知识,熟悉有限元软件的操作、计算原理及其与有限元理论的差异。设计者作为规范和工具间的桥梁,起着至关重要的作用,必须既懂规范又懂工具,否则,再先进的规范、再好的软、硬件设施也不能得出理想的设计方案,甚至还会带来安全隐患。

本书将围绕新版 ASME VIII-2 第 5 篇分析设计的相关内容,系统介绍该部分的规范条款、理论原理、软件应用和工程实践,试图在规范和工具(有限元软件)之间架起一座桥梁。新版 ASME VIII-2 全面引入数值分析方法(主要是有限元法),其大部分分析设计需要借助有限元分析软件来实现,本书中采用了 ANSYS 软件的新一代仿真平台 Workbench 来完成各个实例的分析。本书对 ANSYS Workbench 平台的软件操作不做详细介绍,请读者参考其他专门介绍软件操作的书籍,但本书会介绍与分析设计密切相关的操作、设置和原理。本书附录部分介绍了压力容器分析设计涉及的相关概念和基础知识,以便读者更好地理解规范条款的理论背景。

作者在本书的写作过程中得到了众多专家学者的支持和关怀。非常感谢黄克智院士的指导和鼓励,感谢钱才富教授审阅全书并给出了诸多宝贵意见。同时感谢寿比南总工、刘应华教授、涂善东教授、苏文献教授、陆明万教授、惠虎教授、吴云龙高工、黄志新博士、李建立博士和蔡国华先生给予的指导和支 持。感谢惠生集团创新基金的支持。

由于作者水平有限、经验不足,本书可能存在许多缺陷,恳请读者示教斧正,不胜感激,联系邮箱 KennyShen@vip.163.com,今后若有重要勘误,将在作者的博客 KennyShen.com 上发布。若本书尚能对我国压力容器分析设计有所帮助,作者甚为欣慰。

内容提要

美国机械工程师协会 2007 年颁布的压力容器规范 ASME VIII-2《压力容器建造另一规则》提出了很多新的设计理念,可称为新一代压力容器分析设计规范。本书详细介绍了该规范分析设计篇的主要内容,并从理论基础、技术背景、条款解读、软件实施、工程应用、美欧对比、注意事项等多个方面进行详细阐述。同时,为了更好地理解该新一代分析设计规范,本书有些章节也会简要阐述欧盟直接法的理念和相关内容以及近 20 年来压力容器分析设计的最新成果。

本书可供压力容器设计、制造、使用和检验等环节的工程技术人员使用,也可供大专院校压力容器及相近专业师生参考。

目 录

1 历史沿革	1
1.1 ASME 分析设计提出的背景	1
1.2 欧盟 EN 13445 的颁布	2
1.3 ASME VIII-2 的现代化	2
1.4 无须应力分类的分析设计方法	3
2 规范概述	4
2.1 总体要求	4
2.2 术语定义	4
2.3 符号说明	7
3 数值分析	12
3.1 规范要求	12
3.2 有限元法的求解思想和工具	13
3.2.1 离散化的思想	13
3.2.2 分段线性化思想	14
3.2.3 塑性本构关系的增量理论	14
3.2.4 有限元分析软件	14
3.3 ANSYS 软件介绍	15
3.3.1 分析类型	15
3.3.2 实体建模	16
3.3.3 网格划分	16
3.3.4 常用单元	17
3.3.5 载荷施加	22

3.3.6	后处理	23
3.4	Workbench 平台介绍	23
3.4.1	与 CAD 软件的相关性及双向相关性	24
3.4.2	完全参数化的分析环境	24
3.4.3	适应性强的网格剖分	25
3.4.4	基于知识的自动化	25
3.4.5	真正的工程向导	26
3.4.6	专利技术:基于 Web 的工程报告生成系统	26
3.4.7	自动接触识别	26
3.4.8	ANSYS 命令及 APDL 访问	26
3.4.9	客户化	26
3.5	Workbench 应用技巧	27
3.5.1	快捷的几何建模	27
3.5.2	巧用 Slice 功能划分规则六面体网格	27
3.5.3	载荷施加	28
3.5.4	便捷的耦合分析	30
4	载荷条件	31
4.1	载荷工况	31
4.2	载荷说明	32
4.3	结构对载荷的响应	33
5	载荷系数的由来	35
5.1	弹性应力分析	35
5.2	极限载荷分析	37
5.3	弹-塑性应力分析	38
5.4	局部失效准则	39
5.5	水压和气压试验工况	39
5.6	适用性	40
6	载荷和抗力系数法	41
6.1	设计理念	41
6.2	载荷与强度	41

6.3	结构可靠度理论	43
6.4	载荷系数和抗力的取值原理	43
6.5	LRFD法和ASD法对比	44
7	塑性垮塌的评定	46
7.1	弹性应力分析方法	47
7.1.1	当量应力的概念	47
7.1.2	应力分类线的选择	48
7.1.3	应力线性化的方法	50
7.1.4	应力分类	52
7.1.5	评定步骤	56
7.2	极限载荷分析法	57
7.2.1	极限分析基本概念	57
7.2.2	极限分析的应用现状	58
7.2.3	极限分析基本假设	58
7.2.4	计算极限载荷的方法	58
7.2.5	确定极限载荷的准则	59
7.2.6	屈服准则	60
7.2.7	流动法则	60
7.2.8	载荷和抗力系数法	62
7.2.9	评定步骤	62
7.2.10	合格准则	62
7.2.11	限制条件和局限	63
7.2.12	注意事项	64
7.2.13	优势与展望	64
7.3	弹-塑性应力分析法	64
7.3.1	技术背景	64
7.3.2	结构非线性的类型	65
7.3.3	本构关系	65
7.3.4	屈服准则	66
7.3.5	流动法则	66
7.3.6	强化模型	66
7.3.7	评定步骤	66

7.3.8	合格准则	67
7.3.9	优势	68
8	局部失效的评定	69
8.1	防止局部失效的必要性	69
8.2	弹性分析法	69
8.2.1	实验基础	69
8.2.2	主应力的应力类型	70
8.2.3	探讨与对比	70
8.3	弹-塑性分析法	70
8.3.1	技术背景	70
8.3.2	弹-塑性分析法的实施	72
8.4	小结	73
9	屈曲的评定	74
9.1	壳体屈曲设计概述	74
9.1.1	屈曲的定义	74
9.1.2	壳体屈曲的相关研究	74
9.1.3	设计规范中的屈曲设计	75
9.2	压力容器规范中的屈曲设计	75
9.2.1	基于弹性小挠度理论的屈曲设计	76
9.2.2	考虑各种载荷的外压元件设计方法	76
9.2.3	基于数值计算的设计方法	76
9.3	ASME VIII-2 中的屈曲分析	77
9.3.1	三种屈曲分析类型	77
9.3.2	设计系数	77
9.4	有限元软件的应用	79
9.4.1	ANSYS 中的屈曲分析类型	79
9.4.2	线性屈曲分析注意事项	80
9.4.3	非线性屈曲分析的类型	80
9.4.4	分析类型 2 的实施	80
9.4.5	扰动的施加	81
9.4.6	分析类型 3 的实施	82

9.4.7 其他注意事项	83
9.5 欧盟直接法中的稳定性校核方法	83
9.6 讨论	83
9.7 展望	84
10 疲劳的评定	86
10.1 疲劳设计方法进展	86
10.2 疲劳设计方法简介	86
10.2.1 应力参量	86
10.2.2 名义应力法	87
10.2.3 缺口应力法	87
10.2.4 热点应力法	88
10.3 ASME VIII-2 中的疲劳设计方法	90
10.4 筛分准则	91
10.4.1 基于有可比性设备经验的疲劳分析筛分	91
10.4.2 疲劳筛分 A 法	92
10.4.3 疲劳筛分 B 法	95
10.5 疲劳设计法 1——弹性应力分析和当量应力	97
10.5.1 评定方法及原理	97
10.5.2 疲劳曲线	100
10.5.3 评定步骤	101
10.5.4 变幅载荷的疲劳破坏	102
10.5.5 局限性	102
10.6 疲劳设计法 2——弹-塑性应力分析和当量应变	103
10.6.1 疲劳形成过程中的塑性	103
10.6.2 法 2 与法 1 的对比	103
10.6.3 有效应变范围的求取	103
10.6.4 疲劳曲线	104
10.6.5 循环与载荷	104
10.6.6 循环材料曲线	104
10.6.7 适用条件	105
10.6.8 逐一分析法	106
10.6.9 两倍屈服法	106

10.6.10	多轴应变	107
10.6.11	评定步骤	108
10.6.12	小结	109
10.7	疲劳设计法 3——弹性应力分析和结构应力	109
10.7.1	基本原理	110
10.7.2	主 S-N 曲线	113
10.7.3	ASME 规范对 Battelle 结构应力法的调整	114
10.7.4	评定步骤	115
10.7.5	优势和局限	116
10.7.6	美欧疲劳曲线对比	116
10.8	三种疲劳评定方法比较	117
10.9	疲劳评定方法展望	119
11	棘轮的评定	121
11.1	理想塑性下的安定	121
11.2	强化模型	122
11.2.1	等向强化与安定分析	122
11.2.2	随动强化与安定分析	123
11.3	评定方法概要	124
11.4	弹性棘轮分析方法	124
11.4.1	简化的弹-塑性分析	125
11.4.2	热应力棘轮评定	126
11.4.3	非整体连接件的渐增性变形	127
11.5	棘轮评定——弹-塑性应力分析	128
11.5.1	安定的判据	128
11.5.2	评定步骤	129
11.5.3	注意事项	130
11.5.4	探讨与展望	130
12	结构应力的计算	132
12.1	结构应力的定义	132
12.2	通用计算方法	133
12.2.1	基于单元的结构应力计算	133