

压力容器断裂与疲劳 控制设计

张永弘 黄小平 潘秉智 著

石油工业出版社



内 容 提 要

本书主要内容包括超高压容器的用钢、应力分析与强度设计、疲劳设计和断裂力学在超高压容器的应用。还对自增强技术与设计,以及安全诊断和维修决策的计算机专家系统进行了深入探讨。

本书可供从事压力容器、自增强技术研究的工程技术人员以及大专院校机械专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

压力容器断裂与疲劳控制设计/张永弘等著.

北京:石油工业出版社,1997.12

ISBN 7-5021-2189-7

I. 压...

II. 张...

III. 压力容器-疲劳断裂-控制-设计

IV. TH49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 25839 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

地矿部河北地勘局测绘院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 9%印张 240 千字 印 1—1000
1997 年 12 月北京第 1 版 1997 年 12 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2189-7/TE·1834

定价:16.00 元

前 言

随着现代工业技术的飞速发展,超高压容器日趋大型化、高参数化、复杂化,新材料、新工艺的采用也带来了新的问题,严重威胁着设备安全的疲劳断裂破坏事故日益突出,其中灾难性的事故亦时有发生,因此,控制疲劳、消除隐患,用疲劳分析方法去指导设计已成为现代工业技术中的重要课题。

本书论述了超高压容器的疲劳与断裂控制的工程应用,特别是深入地探讨了在役超高压自增强反应器的安全性、可靠性,以及损伤诊断、维修决策等工程应用问题。

本书通过大量的试验揭示了自增强残余应力的松弛机理、规律,以及计算控制方法。这些力学模型使自增强残余应力衰减过程得以量化,进而为其安全寿命、失效保护、工作可靠性预测,以及维修决策提供了可靠的依据。

本书包括了“超高压厚壁圆筒的自增强理论与技术”,“超高压自增强管式反应器安全诊断及维修决策”(潘秉智教授和王昱高工主持并完成)以及“厚壁圆筒表面裂纹应力强度因子实验研究”(陈抡元教授和黄兆芝教授主持并完成)等课题的成果。本书在潘秉智教授的倡议和主持下由张永弘副教授(第一章、第二章、第三章、第五章和第六章)和黄小平副教授(第四章、第七章、第八章、第九章和第十章)执笔完成,全书由潘秉智教授审定。作者特别强调指出,对上述科研工作有贡献的同志还有:大庆石化总厂张同达、南炳极、陈凤山、薛青利、杨继武、刘万平,大庆石油学院朱瑞东、苏红军、孙庚,以及大庆油田化学助剂厂李善春、王振东、于涛等,在此,笔者一并表示感谢。

在课题进行过程中,还得到河南济源兴华厂王春生高级工程师、哈尔滨汽轮机厂断裂力学试验室王忠谦主任等的支持,在此一并表示感谢。

对课题支持、指导过的单位和个人还有华南理工大学陈国理

教授、上海石化总厂包行方教授级高级工程师、华东工程学院韩育礼教授等,对这几位专家教授,致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者指正。

著者

1996年12月

目 录

第一章 绪论

- 1.1 疲劳断裂事故与工程断裂力学的应用 (1)
- 1.2 在役设备现状与疲劳断裂控制的意义 (2)
- 1.3 疲劳断裂控制设计思想 (3)
- 1.4 设备安全诊断技术的基本思路 (4)
- 1.5 现代压力容器安全工程学 (6)

第二章 超高压容器用钢材

- 2.1 引言 (8)
- 2.2 超高压容器用钢的基本性能 (8)
 - 2.2.1 化学成分 (9)
 - 2.2.2 常规力学性能 (10)
 - 2.2.3 疲劳强度 (13)
 - 2.2.4 回火脆化和时效脆化 (14)
 - 2.2.5 高温性能 (16)
- 2.3 超高压容器用钢的生产工艺 (17)
 - 2.3.1 冶炼 (17)
 - 2.3.2 热加工 (19)
 - 2.3.3 热处理 (19)
- 2.4 超高压容器用钢 (20)
 - 2.4.1 材料选择原则 (20)
 - 2.4.2 30CrNiMo8 钢的力学性能 (23)
 - 2.4.3 AISI4340(40CrNi2Mo)钢的力学性能 (31)
 - 2.4.4 G4335V 钢的力学性能 (32)
 - 2.4.5 30CrNiMo8 钢与 AISI4340 钢、G4335V 钢的对比与分析 (34)
- 2.5 设计选材注意事项 (36)

第三章 超高压厚壁容器应力分析及强度计算

3.1 厚壁圆筒应力分析	(37)
3.1.1 平衡方程	(37)
3.1.2 几何方程	(38)
3.1.3 应力计算	(39)
3.1.4 径向位移	(43)
3.1.5 厚壁圆筒的温差应力	(44)
3.1.6 在工作内压与温差作用下的筒壁应力	(47)
3.2 厚壁圆筒的强度计算	(48)
3.2.1 弹性失效准则及其强度计算式	(48)
3.2.2 塑性失效准则及其强度计算式	(51)
3.2.3 爆破失效准则及其强度计算式	(53)
3.3 自增强技术及自增强容器的应力分析与计算	(54)
3.3.1 自增强技术	(54)
3.3.2 自增强处理压力的计算	(55)
3.3.3 自增强压力引起的筒壁应力和应变	(57)
3.3.4 部分塑性圆筒的残余应力	(60)
3.3.5 完全塑性圆筒的残余应力	(61)
3.3.6 自增强处理的反向屈服	(62)
3.3.7 包辛格效应的影响	(63)
3.3.8 最佳自增强度的选择	(64)
3.4 双向幂硬化材料模型的自增强理论	(66)
3.4.1 自增强理论模型建立	(67)
3.4.2 实际筒体的自增强实验	(74)
3.4.3 分析与结论	(74)
3.5 自增强理论模型优化方法和实用软件研究	(76)
3.5.1 各种模型适用性分析	(77)
3.5.2 自增强优化模型及自增强技术软件开发	(79)
3.6 厚壁圆筒再次自增强残余应力的计算	(81)
3.6.1 再次自增强的计算	(81)

3.6.2	实验数据与计算结果的比较	(83)
3.6.3	结论	(84)
3.7	自增强容器的设计步骤	(84)
第四章 自增强超高压厚壁管残余应力衰减规律		
4.1	自增强厚壁管残余应力松弛的原因、特点与机理	(86)
4.1.1	残余应力松弛的原因	(86)
4.1.2	残余应力松弛的特点	(87)
4.1.3	残余应力松弛的机理	(88)
4.2	自增强反应管残余应力松弛试验	(92)
4.2.1	内压循环残余应力松弛试验	(93)
4.2.2	稳态温度场残余应力松弛试验	(96)
4.2.3	自增强筒在交变内压及稳态温度场共同作用下的 残余应力松弛试验	(98)
4.2.4	分解反应短时异常超温对自增强管残余应力损伤 的影响.....	(100)
4.3	工程上在役反应器自增强管残余应力衰减的测定 实例.....	(101)
4.4	设计注意事项.....	(104)
第五章 超高压容器的疲劳		
5.1	概述.....	(105)
5.1.1	疲劳破坏的特点.....	(105)
5.1.2	疲劳的分类.....	(106)
5.1.3	交变载荷特性.....	(106)
5.2	金属材料的疲劳特性.....	(108)
5.2.1	金属材料的拉伸特性.....	(108)
5.2.2	循环应力—应变下的材料特性.....	(108)
5.2.3	循环应力—应变曲线.....	(110)
5.2.4	无缺陷试件疲劳裂纹起因.....	(111)
5.3	疲劳曲线.....	(112)

5.3.1	高周疲劳曲线的基本特性——持久极限	(113)
5.3.2	低周疲劳曲线的基本特性——应变疲劳	(114)
5.3.3	日本超高压圆筒容器设计规则(HPIS—C—103—1989)中的疲劳曲线	(116)
5.4	裂纹形成寿命的估算	(121)
5.4.1	低周疲劳及应变—寿命曲线	(121)
5.4.2	寿命预测的局部应力—应变法(诺伯法)	(123)
5.4.3	影响低周疲劳性能的因素	(124)
5.4.4	考虑平均应力影响后的疲劳寿命计算	(130)
5.4.5	局部应力—应变法估算裂纹形成寿命的步骤	(134)
5.5	疲劳损伤累积理论	(134)
5.5.1	累积损伤的概念	(134)
5.5.2	迈内尔理论	(135)
5.5.3	损伤计算	(136)
5.6	计算实例	(138)
5.7	疲劳设计准则	(143)
5.7.1	安全寿命设计	(143)
5.7.2	破损—安全设计	(144)
5.7.3	安全寿命设计和破损安全设计的选用	(144)
5.8	设计注意事项	(145)
第六章 断裂力学在厚壁压力容器设计上的应用		
6.1	概述	(147)
6.2	线弹性断裂力学基本原理	(148)
6.2.1	应力强度因子与材料断裂韧性 K_{IC}	(148)
6.2.2	对应力强度因子 K_I 的修正	(152)
6.2.3	裂纹特征尺寸及复合型裂纹的近似处理	(157)
6.2.4	线弹性断裂判据	(158)
6.2.5	线弹性断裂力学在压力容器上的应用	(158)

6.3 厚壁圆筒内壁均布、非均布多裂缝的应力强度因子	(159)
6.3.1 内表面裂缝	(159)
6.3.2 K_I 、 K_{II} 型复合应力强度因子	(160)
6.3.3 单裂缝和环向均布多裂缝的应力强度因子	(162)
6.3.4 厚壁圆筒内壁多裂缝“载荷松弛”机理	(165)
6.3.5 单裂缝应力强度因子 $(K_I)_{e,1}$ 的计算	(170)
6.3.6 相对分布 2 裂缝的应力强度因子 $K_{e,2}$	(171)
6.3.7 环向均布多个相同纵向半椭圆形内表面裂缝 应力强度因子 $K_{e,n}$	(173)
6.3.8 环向非均布多个不同纵向半椭圆形内表面裂缝的 应力强度因子 $K_{e,N}$	(173)
6.4 非均布多个半椭圆形裂缝的应力强度因子计算的 工程实例	(179)
6.5 在役超高压容器脆性破坏的评价	(180)
6.5.1 疲劳断裂过程和断裂质量控制	(180)
6.5.2 裂纹亚临界疲劳扩展	(181)
6.5.3 设计举例	(187)
6.6 压力容器先漏后破失效分析	(192)
6.6.1 欧文准则	(192)
6.6.2 疲劳裂纹的扩展和断裂分析	(199)
6.7 设计注意事项	(209)
第七章 断裂控制设计	
7.1 引言	(211)
7.2 历史的回顾	(214)
7.3 断裂控制设计	(216)
7.3.1 工作条件和载荷的描述	(216)
7.3.2 确定各因素对元件断裂或对结构破坏的影响	

.....	(217)
7.3.3 确定各种设计方法对减少元件断裂或结构破坏的效能和相互关系.....	(221)
7.4 设计注意事项.....	(226)
第八章 专家系统理论分析	
8.1 管式反应器安全损伤模式分析.....	(227)
8.1.1 管式反应器安全损伤的特征.....	(227)
8.1.2 安全损伤参量的特征识别.....	(228)
8.1.3 诊断模式.....	(229)
8.2 在役管式反应器安全诊断的理论模型.....	(229)
8.3 安全诊断规则与事故规则推理网络.....	(250)
8.4 专家评定导则.....	(252)
8.5 在役超高压自增强容器安全诊断与评定专家系统.....	(253)
第九章 在役超高压聚乙烯反应管安全诊断的工程实例	
9.1 概述.....	(255)
9.2 安全诊断要解决的问题.....	(255)
9.3 工程实例.....	(256)
第十章 自增强处理工艺	
10.1 自增强处理技术的设计.....	(265)
10.1.1 自增强处理的总原则.....	(265)
10.1.2 自增强处理应考虑的主要因素.....	(265)
10.1.3 弹塑性交界面半径的选定.....	(266)
10.1.4 最佳应力条件下 r_c 的计算.....	(266)
10.1.5 自增强处理压力的计算.....	(267)
10.1.6 自增强处理压力的校核.....	(267)
10.2 自增强厚壁圆筒自增强度的检验与控制.....	(267)
10.2.1 理论 p_a 同 $\epsilon_{\theta 0}$ 的关系.....	(268)
10.2.2 自增强度的检验.....	(269)
10.2.3 自增强度的控制.....	(271)

10.2.4	工程实例	(271)
10.2.5	小结	(273)
10.3	液压法自增强处理工艺	(274)
10.3.1	伍德哈根厂自增强处理实例	(274)
10.3.2	大庆——济源厂自增强处理实例	(277)
10.4	挤扩自紧法	(285)
10.5	爆炸胀压法	(288)
参考文献		(289)

第一章 绪 论

1.1 疲劳断裂事故与工程断裂力学的应用

高压、超高压容器已经成为化学工业、石油化工、人造水晶、合成金刚石、等静压处理、粉末冶金,以及地质力学研究和航天技术等领域中关键设备之一。随着生产的发展,这类设备的工作条件也向高温、高压、高速发展,其结构也日趋大型化、复杂化。自 50 年代以来,一些按古典强度理论和常规规范设计、制造并通过严格质检合格的产品,先后发生了不少灾难性事故。为了保证设备安全运行,迫使人们多方探索和寻求疲劳断裂控制设计方法。

上述灾难性事故很多,兹列举数例如下:

1950 年,美国北极星导弹固体燃料发动机壳体在试验时爆炸;1965 年,美国著名的 260SL-1 固体火箭发动机压力壳在水压试验时发生脆断,断裂时应力为 657MPa,而所用材料 18NiCrMoTi 的屈服应力为 1716.2MPa;1986 年,美国挑战者号航天飞机在发射时爆炸。

1980 年 3 月 27 日北海南部一座半潜式石油钻塔 Alexander Kielland 号倾覆,使 123 人失踪丧生,事故原因就是一条塔腿中原有的焊接缺陷在风浪疲劳载荷下,裂纹扩展至 $\frac{2}{3}$ 腿周长后断裂的。

日本 4 个聚乙烯装置超高压管与管件断裂事故的统计如图 1-1,从图中可以看出自增强处理同时兼用内壁面研磨措施对避免反应管断裂提高运行安全性是十分有效的。

经过大量的研究发现,这些灾难性事故大多与结构中存在缺陷或裂纹有关,即使通过严格质检的设备,也会在运行中由于交变载荷、腐蚀、辐照等原因致使裂纹萌生、扩展直至失稳断裂。使人惊

奇的是,过去认为强度很好的结构,如采用高强度钢材和断面很厚的结构,反而易于发生低应力脆断事故,其原因在于传统的强度理

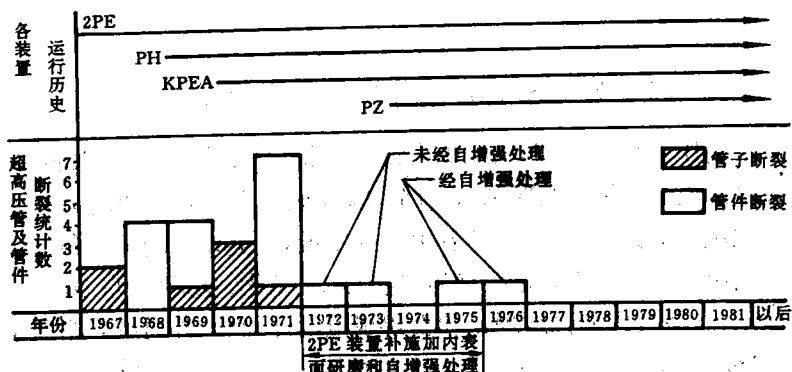


图 1-1 日本 4 个聚乙烯装置超高压管与管件断裂事故统计

论假设材料是均质的、各向同性的、无缺陷的,而实际情况与这些假设有很大差别。人们从工程构件或材料内部不可避免地存在缺陷或裂纹这一事实出发,发展起一门新的学科——断裂力学。

断裂力学是以变形体力学为基础,研究含缺陷(或裂纹)材料和结构的抗断裂性能,以及在各种工作环境下研究裂纹的扩展、失稳和止裂规律的一门学科。

1.2 在役设备现状与疲劳断裂控制的意义

过去,我们比较注意研究设备的结构、设计和施工的理论和方法,而对于设备服役后的安全评估和维理论则研究较少。今天,在役设备中相当部分已进入服役中后期,设计低指标、制造低水平和质检低标准都给设备留下了隐患和先天性不足,再加上运行期间管理上又缺乏完整的科学维修制度,这些因素就造成了在役设

备常常存在以下突出问题:

(1) 在役设备中的各种缺陷的存在,使在役设备的各种参数都不再是设备设计时的数值,而与该设备当前所处的状态有密切关系。

(2) 运行过程中超温时有发生,超温对材料性能以及自增强残余应力的损伤都是严重的。

(3) 检维修制度不健全,在长期运行过程中,设备会遭受不同程度的损伤,有功能性失效和结构性缺陷。

工程技术人员十分想知道,多年运行的设备目前的状况如何?还能用多久?是否需要维修?在未来遇到灾害性运行条件时的安全性如何?显然,这些设备最低安全度的确定以及维修、判废决策都是具有重大经济意义的课题。

为此,在重大超高压设备设计中采用疲劳断裂控制设计,将有助于提高设备的质量,保证设备的安全性和可靠性。通过疲劳断裂控制设计,应使扩展的裂纹在达到临界安全所允许的尺寸界限前及时查明其扩展情况并进行修补,以确保设备的正常运行,即使发生事故,还要保证“先漏后破”失效模式,减少不应有的损失。

1.3 疲劳断裂控制设计思想

防止脆性断裂的工程方法基于线弹性断裂力学理论,以含裂纹结构的应力强度因子的弹性解,结合材料标准试件测得的断裂韧性与温度的关系曲线,可判断结构是否将发生脆断,确定临界裂纹尺寸的大小,评定许用缺陷尺寸,按工程要求、使用环境及条件设计结构,使其满足:

$$K_I < K_{IR} \quad (1-1)$$

式中 K_{IR} ——参考临界应力强度因子值,是材料断裂韧性的下限值;

K_I ——裂纹尖端应力应变状态、控制裂纹失稳扩展的参量。

并按裂纹扩展规律定出服役设备的检修周期和设计设备,使其在检查时仍能满足(1-1)式的要求,以保证设备的安全。

设计方法的要点及程序示于图 1-2。

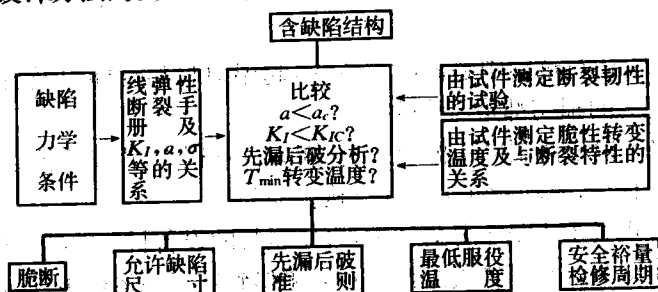


图 1-2 含缺陷结构疲劳断裂控制设计方法

1.4 设备安全诊断技术的基本思路

设备的安全诊断技术的基本思想包括识别现状和预测未来两个方面。

1.4.1 识别现状

识别现状是指对正在使用过程中的机器设备的当前状态进行一定判断,判别它是正常运行还是异常运行,这就需要有关的判据结合相应的数据进行判断。如果我们确定机器设备处于正常状态,则要求预测其未来状况,即一段时期之后的状况;若机器设备处于异常状态,即运行失常,我们要进一步判断其所产生故障的性质、程度以及引发故障产生的原因。

对于不同的范畴,应用不同的识别方法。我们通过一系列有关的参数进行运算之后来识别现状,不同的状态可能由同一原因的不同程度引起,而同一状态的出现又极有可能由于几方面的因素影响而复合构成。

1.4.2 预测未来

预测未来是指根据现状预测今后的状况。设备处于运转工作状态时,我们用一定的辨识技术来判别它是正常与否,也就是进行前面所说及的识别现状过程;在获取有关信息之后通过诊断判据以及有关的推理网络预测机器设备的未来情况。

对于正常运行状态下的机器设备,如何预测还能够正常运行多久?由于机器设备发生故障可能是多种因素共同作用的结果,因此在判断其正常运行时候要对不同因素进行分别考虑,再将它们互相联系起来,最后以最为安全的程度因素作为综合指标来预测它正常运行的寿命。

对于异常运行的机器设备,如何预测它是否可能加以改善以达到正常运行状态,同时预测它若处于异常状态下是否安全,预测该设备还允许运行多久?我们在这里提到的多久不简单的是指多少天,多少年,而是不同情况下不同的含义范围。在自增强残余应力衰减中,它可能表示开停工次数,发生分解反应还允许几次;在静力强度校核中,它表示某一工作压力下运行安全程度;在断裂力学中,它又表示温度、压力、衰减综合影响下的许用寿命。

同前面一样,对于不同因素影响作同一预测是不正确的,必须将各种影响因素综合考虑进行预测,只有这样才能使预测后评定结论成为科学性、严谨性与实践性的统一。

1.4.3. 超高压自增强管式反应器安全诊断专家系统

超高压自增强管式反应器实际运行的工作条件很苛刻,故障的起因往往是错综复杂的,一般情况下较难预测。自增强技术本身只是在管式反应器上预先施力的一种安全对策,但是其残余应力在运行中是不断衰减的,对于超高压管式反应器而言,必将降低其安全性,但其影响如何呢?自增强后的超高压管式反应器的科学检修期如何?可能发生的破坏形式如何?这种预测都是人们十分困惑的问题,同时也是亟待解决的问题。

超高压聚乙烯自增强管式反应器的安全诊断专家系统的研制旨在分析反应器全部历史的和现实的运行条件及其状况,对管式反应器的使用寿命进行随机的诊断与评定,为反应器的安全使用、预知维修、科学更换提供科学依据和确定其范围。

我们通过大量的实验室强化实验工作把自增强残余应力衰减现象上升到规律性、理论性和数学模型的高度。将它的产生、利用、衰减和判废等做到了数字化描述的程度。因此从自增强管式反应器的现场运行工况出发,用相应的数学模型,结合超高压专家的知识 and 经验,建立起安全诊断技术模型、推理网络和判识规则,备以必要的知识库、数据库,构成在役聚乙烯管式反应器安全诊断专家系统。

1.5 现代压力容器安全工程学

20 世纪以来,现代科学正在向着两个方面发展。一方面,一些学科按其固有的规律和特点向纵深发展,并且不断地揭示新的规律和创立新的理论;另一方面,各学科之间已经开始相互渗透和相互结合,因而形成了一些独具特色的边缘学科。“超高压容器断裂与疲劳的控制”就是压力容器、断裂力学与计算机技术等相结合建立的现代压力容器安全工程学。

上节所指的超高压自增强管式反应器安全诊断专家系统并不仅仅是指一块程序文件,它还包括理论部分和由实验数据、现场数据构成的数据文件。

在这一安全诊断专家系统中,最后形成的计算机软件仅仅是对一系列理论的综合总结,它依赖于理论,反映理论,并可以因理论的完善而不断地被改进。

安全诊断专家系统的理论部分主要包括:

- (1) 管式反应器安全损伤的特征及损伤参量的识别;
- (2) 自增强管式反应器失效特征安全诊断模式;
- (3) 在役管式反应器安全诊断的理论模型;