

压力容器的可靠性

李泽震 周道祥

主编

劳动人事出版社

压力容器的可靠性

李泽震 周道祥等 主编

劳动人事出版社

内 容 提 要

本书从引起压力容器失效的主要因素断裂、疲劳、应力腐蚀入手,阐述了国内外有关的试验研究以及防止破坏、提高安全可靠性的成果;从压力容器的选材、设计、焊接、制造、质量控制系统以及无损检测等方面,对一般压力容器、超高压容器、球形容器及核容器进行了安全分析;还介绍了压力容器缺陷评定规范的核心问题及概率断裂力学分析可靠性的新方法。

本书可供从事压力容器研究、设计、制造和管理人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

压力容器的可靠性

李泽震 周道祥等 主编

劳动人事出版社出版

(北京市和平里中街12号)

一二〇一工厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 24.25印张 594千字

1987年10月北京第1版 1987年10月北京第1次印刷

ISBN 7-5045-0069-0/TH·009 统一书号: 15238·258

印数: 1—10200册 定价: 5.72元

前 言

压力容器的安全性是一个重要而急待解决的工程问题。影响安全性的因素甚多，技术也比较复杂。为防止压力容器产生灾难性事故给国家财产及人民生命安全带来严重危害，特组织编写了这本《压力容器的可靠性》。本书从引起压力容器失效的主要因素断裂、疲劳、应力腐蚀入手，对国内外有关的试验研究以及防止破坏，提高安全可靠性的成果进行论述；又从材料、设计、焊接、制造、质量控制系统及无损检测等方面，对一般压力容器、超高压容器、球形容器及核容器进行了安全分析；还介绍了压力容器缺陷评定规范的核心问题及概率断裂力学分析可靠性的新方法等。

本书由李泽震、周道祥、曾广欣、彭汝英、韩伟基、宗士英等组成编辑组，邀请了中国机械工程学会压力容器学会理事长、浙江大学王仁东教授，华东化工学院副院长吴东棣副教授撰写了概况。其他专题均邀请有关方面专家撰写，其中教授、高级工程师应邀写了近20篇文章，赴英国、日本、比利时、加拿大等国家的访问学者、进修生等应邀写了9篇文章，共30篇。

本书作为学术探讨用，希望读者对本书中不足之处提出批评和指正。实际应用以我国现行规程、标准为准。

李 毅

1986年4月9日

技 术 顾 问

李 毅 劳动人事部锅炉压力容器安全监察局 高级工程师

琚定一 全国压力容器标准化技术委员会副主任委员 全国锅炉、压力容器安全技术鉴定委员会委员 华东化工学院 教授

柳曾典 机械工业部通用机械研究所 高级工程师 中国机械工程学会压力容器学会代理理事长

王 铎 哈尔滨工业大学 教授

蔡其巩 学部委员 北京钢铁研究总院 高级工程师 清华大学 教授

目 录

三十年来的压力容器安全技术进展	1
英国压力容器安全技术动向	6
论压力容器的安全评定	17
日本深缺口试验对压力容器断裂评定的作用	28
高应变梯度异形试板试验研究	43
双判据法在压力容器上的应用	51
用于压力容器缺陷评定的统一K判据法	68
低周疲劳的回路曲线特性及其在安全性评定中的作用	81
表面裂纹疲劳扩展规律的研究	96
压力容器接管疲劳寿命的评述	109
厚壁压力容器中的焊接缺陷对疲劳性能的影响	120
压力容器的应力腐蚀开裂	129
压力容器应力腐蚀破裂及安全对策	142
中国压力容器缺陷评定规范CVDA设计曲线的试验研究	154
压力容器缺陷评定中材料性能数据的选用原则和确定方法	162
压力容器制造中的质量控制	172
现代用钢的进展与工程应用技术准则的系统关系	190
压力容器焊接及其可靠性分析	200
宽板拉伸试验在压力容器安全评定中的应用	219
实验断裂力学	235
球罐安全性与设计质量控制	249
球形贮罐开罐检查中的缺陷评定方法	265
球罐制造中的质量控制与安全度	280

超高压容器的设计与安全分析	294
核电站压力容器的安全性	307
核容器焊接热影响区的可靠性验证试验	325
轻水反应堆压力容器的安全问题	330
压力容器缺陷评定标准的可靠性分析	342
焊缝的射线与超声检测可靠性的比较	352
声发射技术对压力容器安全性的监测	362

三十年来的压力容器安全技术进展

王仁东

(浙江大学)

自从发明蒸汽机以来,人们需要用锅炉来生产蒸汽。早期锅炉压力不过几个大气压,但是这种低压容器,如果制造或使用不当也会发生爆炸,造成大量的人身伤亡。在第一次世界大战期间,德国发明了合成氨技术,采用的压力达数十以至数百个大气压,合成塔的爆炸曾使整个城镇毁灭,其危害性更大。

在第一次世界大战以前,锅炉爆炸事故大量发生,究其原因主要是设计的强度不够。当时普遍采用铆接工艺,焊接被认为不可靠而禁用。1914年制订了ASME锅炉规范,规定了满足强度要求的设计方法。规范的效用十分显著,几乎把爆炸事故一扫而光。第一次世界大战以后,逐渐出现了焊接锅炉,比之铆接工艺经济性提高甚多。由于初期焊接质量较难保证,故而锅炉爆炸的事故又有增加的趋势。1925年ASME颁布了“非直接火”的压力容器规范,它是针对化学工业部门应用的各种压力容器制定的。

为了检查焊缝的质量,人们创造了几种无损探伤的方法。最早是X光拍片检查法。ASTM在1933年即颁布了有关规范。根据所拍X光片,把焊缝质量分作几个级别。对重要的容器焊缝要求100%拍片。X光拍片检查法对焊缝中的气孔、夹渣、疏松等缺陷具有很高的灵敏度,但对最危险的缺陷,即裂缝和未焊透则很不敏感,容易漏检,这是该方法的缺点。

超声波探伤法的发展稍后于X光拍片法。它对于深埋的各种缺陷,诸如气孔、夹渣、疏松,包括裂缝和未焊透,一般都能达到适当的灵敏度。只有接近表面的缺陷,由于“盲区”的存在而无法探明。但超声波的信息仅是反射讯号,故凭此来判断缺陷的具体状况有困难,例如是气孔还是裂缝等。

探明表面缺陷的有效方法是磁粉探伤法和荧光探伤法。前者适用于磁性材料如钢铁件,而后者适用于非磁性材料如铝制件。

无论上述无损探伤法中的那一种都还没有普遍达到自动化的水平,因此探伤的效果与操作工人的技术水平以及主观判断能力有密切的关系,探伤的结论可因人而异,漏检的可能也不能排除。例如1965年英国John Thompson厂的一台合成塔和1968年日本德山和千葉两处大型贮存液化天然气的球形容器,在制造完成后做水压试验时,在试验压力低于设计压力的状态下发生炸裂。这几台容器都是事先经过无损探伤的,却没有发现任何隐患。John Thompson厂合成塔的原始缺陷按理在X光拍片和超声波检验中都应有所反映。日本两个大型球罐炸裂后的检查报告声称没有找到炸裂的真正原因。特别是德山球罐在焊接完工后曾经X射线检查及磁粉探伤,对发现缺陷的部位作了补修。千葉球罐的组装和焊接过程中有不正常情况,在某一过大的间隙中曾补嵌金属再行焊接,而裂源恰在此部位上。由于现有的无损探伤技术难免

有漏检之处，故ASME第Ⅲ篇附录G规定：核电站容器的设计须假设有一巨大的漏检表面裂缝，其深度为壁厚的四分之一，长度为壁厚的1.5倍。例如壁厚为200毫米的容器，假设的表面裂缝深50毫米，长达300毫米。还假设此漏检裂缝位于各要害部位，要求该裂纹在可能遇到的工况下，保证不会产生不稳定的扩展，借此确保容器的安全。

到目前为止，各国压力容器的规范都严禁裂缝一类缺陷的存在。其实裂缝的存在是很难避免的，一方面现代无损探伤技术不能避免漏检，特别是大型容器。例如直径达10米以上的球罐，其焊缝总长度可达数千米，依靠人力探伤，无论是超声波探伤或磁粉探伤都不可能避免漏检。另一方面，除无损探伤能够发现肉眼可见的裂缝外，还存在微观的或细观的（在微观与宏观之间）裂缝，虽肉眼不可见，但其受到张力而扩展，扩展后的效果却与宏观裂缝相似。例如德山球罐在裂口上找不到裂源，但发现有10处脆裂发生点，可能都是细观裂缝向宏观发展的痕迹。

然而裂缝存在并不一定会扩展以至造成爆炸事故。材料对裂缝存在的敏感性有很大的差异。脆性材料对裂缝的存在十分敏感，在不大的张开力作用下即快速扩展而造成容器炸裂。材料的韧性越好，则其抵抗和抑制裂缝扩展的能力越强。常规设计容器时采用的韧性指标是延伸率(δ_5 或 δ_{10})和冲击值(α_K 或 C_V)。冲击值包括U形缺口试件上测得的梅氏冲击值(a_K)和V形缺口试件上测得的 却贝冲击值(C_V)两种，而以后者较有价值。1960年以来，现代断裂力学兴起后广泛采用的断裂韧性指标有 K_{Ic} 、COD、和 J_{Ic} 。 K_{Ic} 适合于脆性材料，从理论上讲绝对尖锐的裂缝仅适合于以 K_{Ic} 为断裂的判据。实际的金属都有一定的韧性，裂缝末端不可能绝对尖锐（即尖端曲率半径不为零），则断裂的判据不可能是 K_{Ic} 。适用于韧性金属的断裂判据是COD(裂缝尖端张开位移)和 J_{Ic} 。

1971年美国焊接研究学会的压力容器研究委员会(PVRC)委托一个由全国著名专家组成的工作组草拟关于测定核容器用钢断裂韧性方法的建议书。这份建议书见美国焊接研究学会通报WRC Bulletin175号。对屈服以前断裂的情况该书建议从却贝试验的横向扩展量中得出满足扩展量为0.04英寸的温度 T_w ，然后根据容器的操作温度 T ，从图1中找出参考断裂韧度

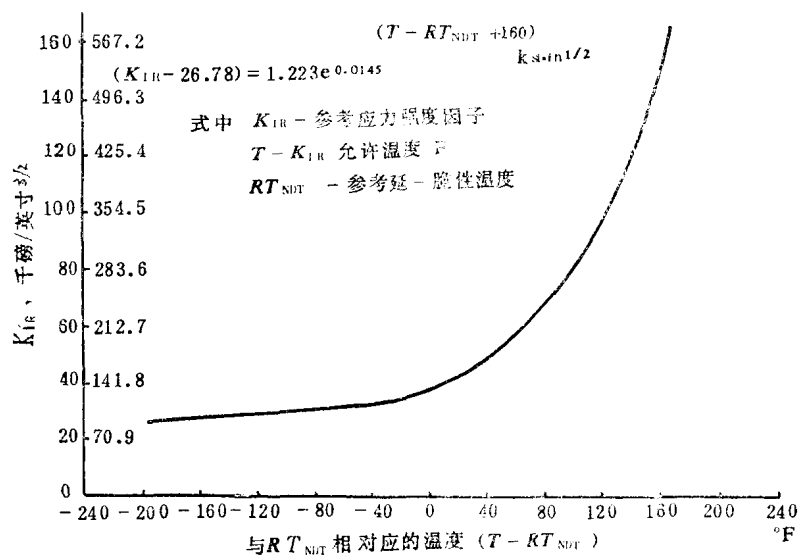


图1 附录G中 K_{Ic} 与 $(T - RT_{NDT})$ 的关系曲线

K_{IR} 。美国ASME规范第IV篇附录G采用了这份建议书。

图1的横坐标是 $T-RT_{NDT}$ 。这里的“参考转变温度” RT_{NDT} 是这样得出的：美国PVRG工作组建议，先作落锤试验得出延脆转变温度 T_{NDT} ，然后在比 T_{NDT} 高出60°F的温度下进行却贝冲击试验，要求横向扩展量达0.04英寸，或横向扩展量达0.035英寸而吸收能量同时不小于50英尺磅。

落锤及却贝试验均应在板深度为壁厚四分之一处取材，应包括母材、焊缝及热影响区、却贝试验要求至少要有三个试件。如三个试件不全满足0.04英寸横向扩展量的要求，则必须改变温度重做试验。三个试件都满足0.04英寸横向扩展量的温度为 T_{40} ，于是 $T_{40}-60^{\circ}\text{F}$ 就是参考温度 RT_{NDT} 。通过却贝试验来确定参考温度 RT_{NDT} 的方法现已上升到ASME规范第IV篇的正文NB-2300，故具有强制性。图1实际上是核容器用钢(A533-B)的延-脆性转变温度曲线。

延-脆转变温度的概念首先由美国的皮林尼(W·S·Pellini)提出。一般钢铁材料在低温下呈脆性。可以找到一个“转变温度”，在这个温度以上(上平台)，材料表现有充分的韧性，而在此温度以下(下平台)则呈脆性材料。皮林尼推荐以爆炸鼓胀试验或落锤试验来确定转变温度。却贝试验的横向扩展量(MLE, mm)或吸收能量(C_v , kgf·m)与温度的对应关系也能显示延-脆转变温度。却贝试验和落锤试验所得延-脆转变温度并不重合，但相互接近。却贝试验的吸收能量并不表示韧性，但横向扩展量MLE则能较好地表示韧性。根据延-脆转变温度的观点，如容器的操作温度在转变温度以上，在操作工况条件下材料具有韧性，对存在的缺陷不敏感，操作是安全的。如操作温度在转变温度以下，操作工况条件下，材料表现为脆性，有发生脆性断裂的危险。当然，不能说在转变温度以上操作时，不管缺陷有多大都是安全的。但在转变温度以上可以容许较大的缺陷存在而不至引起断裂，这一点是可以肯定的。

关于屈服后断裂情况，如果屈服程度小，则由Bilby、Cottrell和Swinden研究得到的“条状模型”解(BCS解、亦称D-M模型)与实验数据相符合，应用于实际问题是可靠的。在大屈服或全面屈服的情况下，经英国焊接研究所作了大量宽板试验后得出的威尔斯(A·A·Wells)公式即：

$$\delta = 2\pi e a$$

或其稍加变化的形式：蒲德金(F·M·Burdekin)设计曲线：

$$\delta = 2\pi e_y a \left(\frac{e}{e_y} - 0.25 \right)$$

已被国际焊接学会及英国标准协会采用作为“防脆断规范”的理论基础。但是我们认为威尔斯公式或蒲德金设计曲线带有较大的安全系数。例如日本规范WES-2805取 $\delta = 3.5ae$ 。其实无论是威尔斯公式或日本WES-2805公式的形式都过于简单。因为裂缝张开位移 δ (COD)与平均应变 e 之间不可能是简单的线性关系；低强度钢与高强度钢不可能适用同一个公式；此公式和材料的强化指数也不可能没有关系。现在国际焊接学会及英国标准协会的规范选取了极大的安全系数，这使工程实际应用远远偏于安全方面。在目前阶段，这可以说是无可非议的。今后随着科研工作的进展，应逐步提高学术水平和技术水平，做到不仅安全，同时也有较高的经济性。

对大量屈服以后断裂的情况，PVRC建议书认为 K_{Ic} 已不可能有效。但目前(1972年)尚未有成熟的方法。完善的方法尚有待于研究和创造。目前值得一提的有下列几种概念：

1. 弹塑性断裂状态的 J 积分概念；
2. 总应变法；
3. 根据单位体积应变能的当量能量法；
4. COD技术；
5. 临界裂缝长度法。

另一个需要考虑的问题是容器压力的波动对其寿命的影响。无论是热电厂的锅炉或石油化工压力容器，在正常操作中，压力波动是不大的。在正常生产情况下停车、开车也次数不多。故性能优良的材料中的微小缺陷，在使用期内发展成为具有危害性的缺陷的可能性是不大的；原始缺陷较大或材料的性能很差，则仍有可能发生危险。为了及时发现隐患，定期进行开罐检查，作内外表面的磁粉探伤是有必要的。新投产的球形容器可规定使用一年后即检查一次。如情况良好则可规定今后每二、三年检查一次。

日本WES-2805规范列入了计算球形容器的角变形和错边量所造成的应力一项，是其他防脆断规范中所没有的。所谓角变形是指球形容器偏离理想球形的几何偏差。例如椭圆形、扁球形、橄榄形或局部由于焊缝收缩、安装误差而造成的几何变形。在容器内压力上升时，容器向理想球形发展而上述偏差逐步被消除，同时造成弯曲内应力。日本WES-2805所采用的是矢田敏夫提出的方法，所依据的三个平衡方程式中少考虑了其中的一个，因而从根本上是错误的。没有考虑局部锐角对造成应力的影响，用一米长的规尺来测定“角变形量”显然也是不正确的。其实球形容器是由数十片以至数百片瓣片拼装焊接而成，焊后不可能有一道像圆柱形容器那样的“滚圆”工序，因而存在大量的几何偏差。经分析认为最大的应力来源是瓣片的安装误差，特别是瓣片的曲率中心偏离了整个球的中心造成的误差。在容器内压力上升时，作用在全瓣片上的内压力就对应球心存在着一个弯矩。但是在已加工完成的实际球形容器上要测定每一个瓣片的曲率中心偏离球心的距离是极为困难的，在进行设计时遇到的是各瓣片安装误差的随机分布问题。这些都是很复杂的问题，不可能在近期得到满意的解答。因此目前保证球形容器安全的首要措施还是适当选用原材料，必须保证容器的操作温度在材料的延一脆转变温度的上平台。在运行中首要的措施是定期进行开罐检查。

球形容器有大量焊缝。焊缝收缩造成复杂的残余应力，这也是某些球形容器不断地产生新的裂缝的原因之一。为了减小焊后残余应力，在改进焊接技术方面应力求：1.减小焊缝的宽度；2.减小焊接的能量消耗。正在发展中的窄间隙焊接技术可用于核容器壳体等厚板的对焊。采用这种焊接技术时，在板的边缘不需要开坡口，只需要组装成两边缘间有10~20毫米的间隙，以便扁窄形状的焊炬伸入即可。采用的保护气体是氩气与二氧化碳的混合气或单纯的二氧化碳气。往往采用双重焊炬，在一次通过时作出两道焊缝。最大的板厚可达200毫米。另外还有两种新型的焊接技术能限制焊缝的宽度在10毫米左右，即电子束焊接技术和激光焊接技术。由于核电站的发展，对于有些难于焊接的材料如钛板卷制的容器需要采用电子束焊接技术。电子束焊接需在真空室中在高电压的作用下，把阴极放出的电子束转化为热能以进行焊接。阴极用钨块制成，背后有电子枪对它轰击加热。这种新型焊接技术不需要焊丝，也不需要昂贵的保护气体，用于大型容器制造时，还可采用局部真空室。

大功率的激光焊接采用气体激光器。激光焊接技术不需要真空，故设备更为简单。它和

电子束焊接技术一样能实现厚钢板的窄缝焊接，而且其焊缝的冶金组织也比一般电弧焊接为佳。这两种新技术能大幅度降低残余应力，在容器制造业中将有更大的发展并得到广泛应用。此外，球形容器整体退火消除残余应力的技术在国内也已过关，不过成本较为昂贵。

容器有可能发生爆炸事故，这给在容器旁边工作的人员形成一种思想上的压力，可能对健康有一定的影响。为了实现文明生产，最好能保证容器绝对不发生事故，使容器旁边工作的人员，解除沉重的思想负担，而有益于健康。

有把握不会发生爆炸事故的圆柱形容器现在已制造出来。模仿地球内部高温高压状态的设备称为高温等静压装置。例如瑞典ASEA的高温等静压装置的工作温度为1500℃，压力为1500个大气压。经过这样的温度和压力处理的材料，组织将变得致密，韧性会有很大的提高。有些国家制造的高温等静压设备采用普通压力容器的结构形式，因而必须放在地下室中工作，以免发生危险。但瑞典ASEA的高温等静压设备则可放在车间中，让工人们在其周围工作。因为ASEA容器的设计原则是“无张开”。在容器内压上升时，容器内筒始终保持在压缩应力状态之下。容器外壁是一绕丝层，它把内筒箍紧，使内筒产生强大的周向压应力；在内压上升时压应力有所减小，但应仍能保持为压应力。为了同时造成轴向压应力，把容器放在绕丝机架中，绕丝机架对容器的上下封头加压，使内筒中产生轴向压应力；在容器内压上升时仍能保持为压应力。在压应力状态下，裂缝一类缺陷不可能扩展，因为裂缝只可能在张开力的作用下才会扩展。

ASEA装置因为采用了绕丝机架，故其成本较高。但是无张开容器并不是非有绕丝机架不可。例如我国创造的倾角错绕扁平钢带容器，即有可能产生必要的周向压应力和轴向压应力。普通的层板容器或绕板容器当然不可能产生轴向压应力。至于球形容器如何做成无张开的形式，至今尚无可行的方案。

英国压力容器安全技术动向

吴 东 棣

(华东化工学院)

摘 要

在压力容器的科研方面英国具有国际先进水平, 曾为压力容器的安全运行作出了很大贡献。本文就作者在旅英两年期间了解的情况, 介绍英国压力容器科研的组织机构和当前感兴趣的一些问题。英国近年来对压力容器缺陷评定方法的研究取得不少进展, 例如提出了“双判据法”的新概念。在压力容器的整体强度方面, 英国重视了温预应力处理和优先泄漏的研究。为了满足核电站和火力发电站安全运行的需要, 英国在高温压力容器的研究方面投入了不少人力物力, 最早进行超高压容器和管道研究, 现仍在继续进行。在应力分析方面, 除了采用传统的弹塑性应力分析和实验应力分析方法之外, 英国发展了大型通用有限元结构应力分析程序。

前 言

为了保证压力容器的安全运行, 并且在此前提下做到经济合理, 世界各国都很重视压力容器的科学研究工作, 将其成果作为对压力容器进行安全管理的科学依据。据七十年代统计, 英国压力容器的破坏事故率为 2×10^{-4} 台年; 又据1973年统计, 英国该年因事故死亡人数为22086人, 其中因压力容器爆炸死亡者仅4人。可见, 英国压力容器安全管理水平是比较高的, 重要原因之一就是发达的科研工作作为后盾。英国的压力容器研究工作开展较早, 并且有自己的独特风格。作者于1979年7月到1981年6月作为访问学者去英国布列斯托尔大学机械系从事研究工作, 在此期间参观访问了十几所大学和研究单位, 参加了三次重要的国际学术会议, 收集了一些资料。本文主要是根据作者自己的观感, 有重点地介绍一些英国压力容器安全研究的成就和动向, 供国内同行参考。限于篇幅, 略去了材料、制造、探伤等方面的内容。

一、英国压力容器研究的组织管理

国际上压力容器的研究工作是从本世纪初一系列锅炉爆炸事故开始的, 以后又随着化学工业走向大型化和高温高压而丰富了其研究内容。第二次世界大战以后, 世界各国的锅炉普遍趋向高参数运行。从五十年代末开始一批核电站陆续投入运行, 并且数量一直在稳定地增

长,到1975年已有201座核电站。这样,对压力容器的安全运行就提出了更加严格的要求。近年来,由于世界的能源危机,核电站的建设仍然是必要的。资料表明,英国核电站的发电量已占全国发电量的13%。并且准备在本世纪末发展到30%。可以说,战后英国压力容器安全技术的研究是以核电站压力容器为重点。因为它要求严格,可以带动一般压力容器问题的解决。在英国,除了较多的改进型气冷反应堆(AGR)以外,亦有其它型式的反应堆,下一步准备主要发展液态金属冷却快中子增殖反应堆(LMFBR)。因此,压力容器安全技术研究的内容是非常广泛的。英国火力发电厂的标准操作温度为565℃,压力1.6~1.7MPa(160~170巴),因而带来了一系列的高温问题。除电站压力容器外,英国又是首先实现超高压聚乙烯工业化的国家,对超高压容器的研究现在仍在继续进行。

英国压力容器的研究管理和组织与美、日有所不同。在美国,压力容器的研究主要在工业企业及专业研究所中进行,大学只搞基础理论研究;在日本,大学在压力容器研究方面起主导作用,不仅自身有强大的研究基地,并且领导制订全国研究计划。在英国,则是专业研究机构与大学并驾齐驱,紧密配合,而且两者都侧重电站压力容器的研究。

英国主要的专业研究机构状况如下:

1. 联合王国原子能局(UKAEA)所属研究所

这些研究所中从事压力容器研究的主要是北方分部的雷斯莱(Risley)核动力开发研究所(简称RNL)。全所有720人,其中有高等学位的215人,大学毕业的200人,其余为职员与技工。RNL与中央电力局(CEGB)的分工是:前者主要研究发展新的反应堆而后者主要研究已经投入运行的核电站与火电站的安全问题。因此,RNL中有60%的人员从事用钠冷却的快中子增殖反应堆的研究,25%从事气冷反应堆的研究。该所的所长R.W.Nichols博士是第四届国际压力容器技术会议和第五届国际断裂学术会议的主席,并主编《国际压力容器与管道杂志》。

2. 中央电力局(CEGB)所属各研究所

中央电力局总部所属有三个研究所;局所属发电单位分成五个地区,又各有其研究所。总部所属研究所搞长期课题研究,地区研究所主要研究生产中出现的问题。总部所属的三个研究所是:

(1) 巴克莱核研究所(BNL):该所人员近千人,分为四个部:燃料与芯棒,应用化学,运行与安全,结构与机构。压力容器的结构、应力分析及断裂问题主要在该所进行研究。屈服后断裂力学的研究和高温断裂的研究都是为火力发电站、快中子反应堆及锅炉、透平的安全运行服务的。

(2) 中央电力研究所(CERL):该所亦有近千人,下分七个部。与压力容器安全有关的主要是材料部,它又分为氧化和腐蚀,电站用高温材料,冶金工程(断裂、疲劳、应力腐蚀)三个分部。

(3) 马奇伍德工程研究所(MEL):该所所有人员450人,分为结构工程、燃烧工程和机械工程三个部。机械工程部的研究工作主要与压力容器有关,包括焊缝与热影响区补焊技术、高温断裂力学、大尺寸压力模拟容器的试验、残余应力的测量与估算、无损检验等。该所进行的课题工程性较强。

3. 焊接研究所(WI)

焊接研究所为一私立研究机构,商业性较强,但研究水平很高,目前由A.A.Wells教授担任所长。该所研究对象为一般焊接结构,曾经对焊接结构的缺陷评定与疲劳寿命作出过

很多贡献, 这些结果为压力容器缺陷的安全评定奠定了基础。

其他还有两个有名的国立研究所。一个是国立工程研究所(NEL), 它为各行各业服务, 在疲劳与蠕变方面有不少贡献。另一个是国立物理研究所, 该所研究的都是应用性课题, 在材料的金属学研究方面有较多的贡献。

英国高等学校的科研力量是很强的, 并且工科的各系大都搞应用性课题, 与工业生产关系密切。正在进行与压力容器有关的课题研究的大学不下十所, 此处仅举几所有名的:

1. 曼彻斯特大学理工学院(UMIST):

该校机械系以S.S.Gill教授及R.Kitching博士为首的研究小组过去曾系统地进行了压力容器部件的弹性与弹塑性应力分析工作, 并在各种形状的钢制模拟容器上进行了实验验证。目前他们正在进行玻璃钢容器的应力分析研究。土木系的F.M.Burdekin教授主要对断裂力学的光弹测试做了系统的研究工作。

2. 帝国理工学院机械工程系

机械系的C.E.Turner教授对弹塑性断裂力学中J积分的工程应用正在进行系统的研究。G.A.Webster与J.C.Radon二位博士为联邦德国、日本、美国等国家进行超高压钢管与部件的疲劳研究。

3. 布里斯托尔大学机械系

该系最初由J.L.M.Morrison教授开创的超高压容器研究仍在继续进行。目前主要的研究重点在高温断裂与疲劳方面, 试验设备相当完善, 主要以CrMoV钢与316L不锈钢为研究对象。这项工作是由E.G.Ellison博士领导的。

其他如赖斯特(Leicester)大学, 设菲尔德(Sheffield)大学, 诺丁汉(Nottingham)大学等, 都在进行有关压力容器的研究。

综合对英国压力容器安全技术研究动态的考察了解, 大体上说英国的研究工作包括以下几个方面: (1)对压力容器缺陷安全评定的研究; (2)对压力容器及其部件应力分析的研究; (3)提高压力容器安全可靠性的研究; (4)高温或超高压等严酷的操作条件下压力容器安全性的研究; (5)焊缝质量及其改进的研究; (6)无损检验及在役检查的研究。可以说, 英国压力容器安全技术的研究是相当全面而且具有先进水平的^(1,2)。下面选择几个方面作扼要的介绍。

二、英国压力容器缺陷评定方法进展

压力容器的缺陷主要存在于焊缝及其热影响区中, 它们或在制造完毕时就存在, 或是在使用过程中扩展而且可能达到危险的尺寸。各种缺陷中最危险的是裂纹型(平面型)缺陷, 虽然许多制造规范都规定“不得有裂纹”, 实际上是不可能做到的。因此, 对于缺陷有一个制造时的验收标准问题, 而对于在运行的设备上检查出来的缺陷, 则有一个允许标准问题, 既允许缺陷存在, 又要保证安全运行, 这是压力容器安全技术中大家最关心的问题之一。解决这个问题的基础是断裂力学的研究。

美国ASME锅炉与压力容器规范从线弹性断裂力学出发, 计算裂纹的应力强度因子, 即:

$$K_I = M\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中 a ——裂纹半长;

M ——校正系数。

σ ——设计应力。

规定 K_I 应小于材料的平面应变断裂韧性的低限,并在规范中规定该值为 $K_{IR}^{(3)}$ 。美国的出发点是考虑到核反应堆容器都是厚壁容器,因而裂纹也应当处在平面应变约束下。

英国一开始就认为美国的考虑是不全面的,因为制造压力容器的材料绝大多数是中低强度钢,具有很高的韧性。此外,大量的中低压容器也应当是缺陷评定安全技术的重要研究对象。国际焊接学会(IIW)1975年公布的“按脆断观点的缺陷评定标准草案”完全采用了英国的观点,即以裂纹尖端张开位移COD(δ)作为断裂判据。容许当量裂纹尺寸为

$$\bar{a}_m = C \frac{\delta_c}{E_y} \quad (2)$$

式中 δ_c ——材料的临界COD值;

E_y ——材料的屈服应变;

C ——常数,取决于应力水平及材料的屈服点 σ_y ,可由图查得⁽³⁾。

在参与制订IIW标准草案的同时,英国标准协会建立了一个WEE/37委员会,起草英国自己的标准。该委员会亦于1975年公布了一个讨论稿75/77081DC,简称为WEE/37文件,经过五年的广泛征求意见,于1980年公布了“熔焊接头中缺陷接受标准评定方法指导性技术文件”,编号BSI PD 6493, 1980⁽⁴⁾。

PD 6493的特点是比较全面地考虑了各种破坏形式,包括脆断、疲劳,剩余截面的过载屈服,容器的泄漏,腐蚀、冲蚀、腐蚀疲劳与应力腐蚀、失稳、以及蠕变或蠕变—疲劳交互作用等七个方面。

在脆断方面,PD 6493考虑得较为全面,区分为两种情况:

1. 当应力总和小于材料的屈服点 σ_y 时,采用线弹性断裂力学判据,即按式(1)计算 K_I 值,规定 $K_I \leq 0.7K_{IC}$ (K_{IC} 为材料的平面应变断裂韧性),相当于对裂纹长度取安全系数为2。

2. 当应力总和超过材料的屈服极限 σ_y 时,采用COD判据,即按式(2)计算容许裂纹尺寸 $\bar{a}_m$,实际的当量裂纹尺寸 $\bar{a}$ 应小于 $\bar{a}_m$,常数 C 的确定见图1。

关于疲劳裂纹扩展,PD 6493采用Paris公式

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

式中 da/dN ——裂纹扩展率;

ΔK ——应力强度因子变动幅;

C 、 m ——材料常数。

对其它破坏形式,PD 6493仅提出了参考意见而没有提出具体处理方法。PD 6493的优点是比IIW草案全面,但也仍然不够。比如对剩余截面的过载屈服这一重要情况就没有提出具体办法。

针对这一情况,中央电力局(CEGB)的Dowling与Townley于1975年提出了“双判据法”并经过Harrison等人的具体工作,于1978年制订了一个CEGB的内部规定R/H/R6—Rev1,于1980年修订出第二版R/H/R6—Rev2⁽⁵⁾。

Dowling与Townley归纳了大量的带裂纹的压力容器的爆破试验数据,认为有两种极端

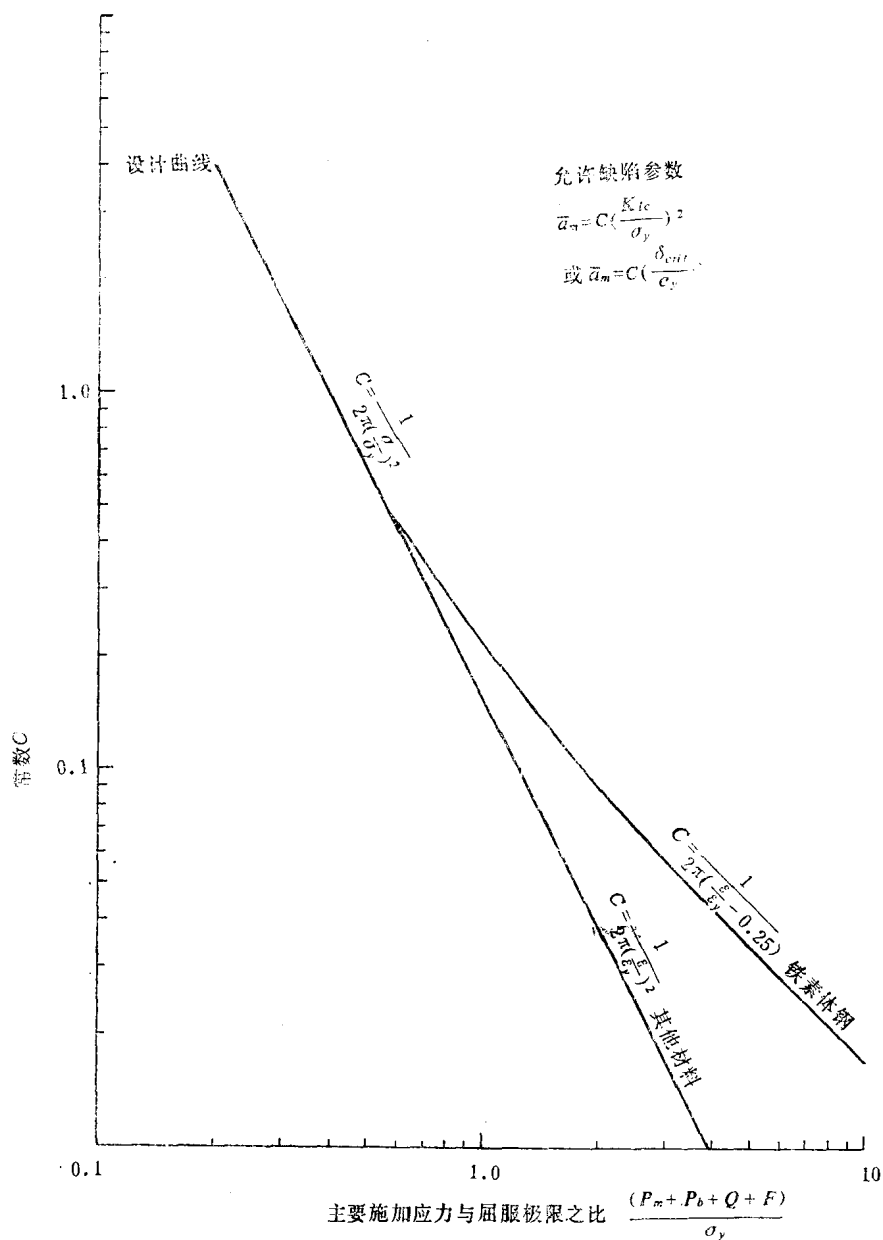


图1 不同载荷条件下的C值

情况。第一种是线弹性断裂力学控制的，令

$$K_I = \frac{K_I}{K_{Ic}} \quad (4)$$

式中 K_I ——容器中裂纹的应力强度因子；

K_{Ic} ——材料的平面应变断裂韧性。

当 $K_I \geq 1$ 时，容器发生破坏。

第二种极端情况是容器因达到剩余截面屈服而破断，即塑性极限载荷控制的情况。令