

压力容器安全评估与检测*

李明星

(山东省特种设备检验研究院潍坊分院, 山东 潍坊 261061)

摘要:随着科学技术和工业生产的不断发展,压力容器使用范围日益广泛,作为多个工业行业的重要设备,对压力容器设备的安全评估与检测越来越受到重视。本文针对压力容器安全评估与检测,介绍了国内外在该领域的研究现状,提出了压力容器失效的主要原因及在该方面的检测方法。

关键词:压力容器;安全评估;失效;检测

中图分类号:TH49

文献标识码:A

文章编号:1671 - 4288(2010)04 - 0013 - 03

压力容器是内部或外部承受气体或液体压力,并对安全性有较高要求的密封容器或管道。压力容器早期主要应用于化学工业,压力多在 10MPa 以下。随着科学技术和工业生产的不断发展,压力容器的使用范围日益广泛。目前,压力容器已经成为化工、石油工业、冶金、原子能、宇航、海洋工程、轻工、纺织、食品、城建等各个行业中的重要设备,对国民经济的发展有着重要的影响。各类压力容器越来越多地在高温、高压、高真空、强腐蚀、辐射等各种苛刻的条件下操作,且现代化工业装置正逐渐向系统化、综合化方向发展。因此,对压力容器设备结构技术上的要求越来越高,其完整性维护、安全评定工作的地位和作用越来越受到重视。加强压力容器安全与检测具有十分重要的意义,一直是从事安全工作的人员研究的重点课题。

1 国内外研究现状

国内外科学家对各种金属构件在腐蚀环境下的断裂失效进行了多方面的研究,取得了丰硕的成果。早在 20 世纪 30 - 40 年代,国际上就开始了概率安全评定(PSA)的研究,在建立模型中考虑了参数的实际离散性。1980 年代后期,我国也开展了一些这方面的研究工作,取得了良好效果。

骆红云^[1]等选取了 Q420、Q345、Q235 和 $ICr_{18}Ni_9$ 等材料进行了国产压力容器用钢的概率失效评定曲线的研究。1971 年,美国公布了第一部以断裂力学为基础的压力容器缺陷评定规范。目前世界上已经有近十部压力容器缺陷评定规范或指导性文件。1980 年代以前,裂纹尖端位移量(COD)设计曲线在压力容器缺陷评定标准中占有统治地位,但是 COD 法本身有其固有的缺点,定义不严格,无力学解释,各国在应变测量时所取的标距也不一致,同一断裂试验所得的 COD 设计曲线差别很大。

弹塑性分析中还有另一种方法 J 积分,在数学、力学上都有非常严格的断裂力学参量,有着明确的物理意义,随着计算机技术的发展,各种基本的含缺陷结构的 J 积分都可以计算。美国电力研究学会(EPR)提出的弹塑性断裂分析的工程方法,提供了各种含缺陷结构 J 积分全塑性解的韧性断裂手册,解决了 J 积分的工程计算问题。

1980 年代后期,英国中央电力局(CEGB)研究人员提出了利用 R6 失效评定曲线来计算结构失效概率的方法,美国 EPR 的新 R6 失效评定曲线是在英国老 R6 失效评定曲线的基础上发展起来的,反过来又促进了老 R6 曲线的发展。目前世界各国的缺陷评定标准均向 R6 方法靠拢,相继采用失效评定图技术。1999 年,欧洲委员会完成了欧洲工业结构性完整评定方法(FINTAP)。2000 年,美国石油学会颁布了针对在役石油化工设备的合乎使用的评定标准(API579)。

一般产品的检维修周期是根据预测寿命确定的,但是压力容器和管道这样的特种设备,其检验计划是根据法规制定的。在这种按照事先规定的检验周期进行检修的情况下,简单的寿命预测已经无法保证压力容器的安全。对于石化行业里面的封闭的且打开和拆卸比较麻烦的结构部位,要求检修周期尽可能长

* 收稿日期:2009 - 10 - 12

作者简介:李明星(1973 -) ,男,山东高唐人,山东省特种设备检验研究院潍坊分院技工。

一些,检测手段可以复杂一些。傅惠民^[2]等通过计算出指定寿命下允许的最大初始的裂纹尺寸,制定相应的最佳检测方案,防止超标裂纹出现和漏检的方案来保证压力容器安全。

目前,国内外主要针对特定的装置进行风险评估,或者对材料在某种介质下的特殊行为进行实验研究。基于弹塑性力学和断裂力学的含缺陷压力容器安全评估研究已经比较深入,在《压力容器安全技术监察规程》中也允许开展缺陷评定来处理一些存在难以消除的严重缺陷但又有使用价值的压力容器,但这是以牺牲安全为前提条件的,国内还有争议,西方国家官方也未认可,目前在国内尚处于控制使用,仅限于在大型关键和确需的前提下开展。

我国石化企业里面压力容器普遍存在超期服役的现象,均匀腐蚀与局部冲刷腐蚀的比例偏高,凹坑与局部减薄很多,属于体积型缺陷,主要失效模式是由塑性极限载荷控制的。一类是原始先天缺陷,由于表面缺陷打磨形成凹坑,在使用中没有介质腐蚀的话,这类凹坑或局部减薄一般不会发生变化,是死缺陷,而且位置固定,容易发现与监控,危害性相对较小;另一类是使用中产生的凹坑与减薄,如腐蚀坑、冲刷、磨损、沟槽等等,这类缺陷是活缺陷,局部减薄尺寸会不断加大,可能存在于管道与设备的任何位置,难于发现且危害性较大。

基于风险的检验 RBI可以实现优化的检验策略,但是费用很高,RBI的推广不仅与企业相关,还与政府的政策与决策有很大关系,需要争取政府的支持与宏观管理。软件编制本身也有一些不足,如管线分析不能对整条管道进行分段,没有定性分析功能,后果分析中没有考虑商业损失等。管壳式换热器管束腐蚀,中国承压设备存在的先天性缺陷与材料性能不稳定等问题也都未考虑^[3]。

我国从1970年代初开始研究压力容器断裂理论,经过十年的研究工作,汲取国际上先进的压力容器缺陷评定技术,于1984年颁布了我国的压力容器缺陷评定标准,即“压力容器缺陷评定规范(CVDA-1984)”。该标准直接引用了国外标准中比较成熟的方法,即以CTOD理论为基础,对脆断、疲劳、泄漏、塑型失稳给出了比较具体的评定方法,对应力腐蚀、腐蚀疲劳、蠕变和疲劳的评定也给出了一般性的指导原则。

2 压力容器主要失效原因

压力容器的失效形式有强度失效、刚度失效、稳定性失效、密封失效等。

容器的基本要求是安全性和经济性。安全是核心问题,在充分保证安全的前提下尽可能做到经济。保证安全,不是盲目地增加壁厚,提高材料材质,而应从合理的结构设计、精确的强度计算、合理的材料选用以及正确的技术要求等方面入手。通常应使所设计的压力容器满足有足够的强度、刚度、使用寿命以及合理的结构。

容器的失效无论是爆炸还是泄露往往都会造成巨大的损失甚至人员伤亡。因此,压力容器作为特种设备之一必须按照规范进行设计、制造、使用与管理,以保证其强度、刚度、稳定性及密封性能够满足要求。

在实际使用中,容器的失效大多是由于腐蚀、疲劳和容器器壁中存在过大的缺陷等原因造成,因此除满足常规的强度条件外,还应根据不同情况进行特殊考虑和分析。比如,对高温压力容器必须按持久强度进行计算,对操作压力或温度频繁变动的压力容器进行疲劳强度设计,对存在缺陷的情况还应根据疲劳裂纹扩展理论对容器的使用作出估算。

腐蚀只能控制而不能杜绝,这是一条自然规律。国内企业一直将防腐蚀工作定位在附属和服务的地位,腐蚀控制技术发展缓慢。只有当腐蚀严重影响企业的发展时,才得到足够的重视,腐蚀控制总要落后于腐蚀的发生。世界各国的工程技术界都注意到了腐蚀的严重性,对腐蚀控制技术研究投入了很大的力量,取得了显著的成效,腐蚀控制技术使得腐蚀损失减少了15%左右。但是各国采取的腐蚀控制技术,都处在发展阶段,这是因为现代技术的应用越来越快,所带来的腐蚀问题从种类上不断增加,总有新的课题出现。

大型的炼化企业都专门设有防腐车间,但是防腐蚀工作还仅仅停留在防范和防止层面,没有提高到腐蚀控制的高度。腐蚀控制是个系统工程,它包括设计、制造、安装、使用、维修等一系列过程,并要求从技术和经济的角度来衡量腐蚀控制的效果。防腐蚀措施多种多样,有耐蚀金属材料及设备、耐蚀非金属材料及

设备、防腐蚀涂料及涂装、耐蚀施工技术及机具、缓蚀剂、腐蚀测试、监控、分析和电化学保护等内容。对于腐蚀磨损、应力腐蚀和材质变化方面的研究成果,可以从选择材质、设计、运行、防护等方面指导生产,促进相关产业生产水平的提高。

3 压力容器检查方法

压力容器检查的主要内容包括压力容器外表面有无裂纹、变形、泄漏、局部过热等不正常现象;安全附件是否齐全、灵敏、可靠;紧固螺栓是否完好、全部旋紧;基础有无下沉、倾斜以及防腐层有无损坏等异常现象。外部检查既是检验人员的工作,也是操作人员日常巡回检查项目。发现危及安全现象(如受压元件产生裂纹、变形、严重泄渗等)应予停车并及时报告有关人员。压力容器内外部检验必须在停车和容器内部清洗干净后才能进行。检验的主要内容除包括外部检查的全部内容外,还要检验内外表面的腐蚀磨损现象;用肉眼和放大镜对所有焊缝、封头过渡区及其他应力集中部位检查有无裂纹,必要时采用超声波或射线探伤检查焊缝内部质量;测量壁厚,若测得壁厚小于容器最小壁厚时,应重新进行强度校核,提出降压使用或修理措施;对可能引起金属材料的金相组织变化的容器,必要时应进行金相检验。

通过检验,对检验出的缺陷要分析原因并提出处理意见。修理后要进行复验。压力容器内外部检验周期为每三年一次,但对强烈腐蚀性介质、剧毒介质的容器检验周期应予缩短。运行中发现有严重缺陷的容器和焊接质量差、材质对介质抗腐蚀能力不明的容器也均应缩短检验周期。压力容器全面检验除了上述检验项目外,还要进行耐压试验(一般进行水压试验)。对主要焊缝进行无损探伤抽查或全部焊缝检查。但对压力很低、非易燃或无毒、无腐蚀性介质的容器,若没有发现缺陷,取得一定使用经验后,可不作无损探伤检查。容器的全面检验周期,一般为每六年至少进行一次。对盛装空气和惰性气体的制造合格容器,在取得使用经验和一两次内外检验确认无腐蚀后,全面检验周期可适当延长。

压力容器受压元件承受的的载荷形式多种多样,但就其受力性质而言,可分为热应力分析、机械应力分析及稳定性分析。压力容器在频繁交变的机械应力和热应力作用下,将使金属材料发生疲劳损伤,缩短容器的使用寿命。

有限元分析作为一种先进的分析计算手段,目前已经越来越广泛地应用于压力容器的分析与设计中。有限元的核心思想是结构的离散化,就是将实际结构假想地离散为有限数目的规则单元组合体,实际结构的物理性能可以通过对离散体进行分析,得出满足工程精度的近似结果来代替对实际结构的分析,这样可以解决很多实际工程需要解决而理论分析又无法解决的复杂问题^[4]。

4 压力容器安全研究的方法

(1) 数值算法,主要采用有限元法分析计算,常用于科学研究,应用于工程上还有一定的局限性。

(2) 基于断裂力学理论的评定方法,这类评定方法主要是根据弹性断裂力学或塑性断裂力学的分析方法,对含缺陷容器的裂纹起裂和塑性破坏失效进行定量的分析描述,方法有多种,如 GE/EPRI法、PARIS/TADA法、LBBNRC法,该方法比数值计算简单。

(3) 工程评定法,它是从简单的材料力学和塑性力学出发,在大量实验的基础上总结出工程上计算容器极限承载能力的简便公式。这种评定方法考虑了脆性断裂失效、塑性失稳失效,还考虑了弹塑性裂纹。

参考文献:

- [1] 骆红云,张玉波,钟群鹏. 国产压力容器用钢的概率失效评定曲线[J]. 北京航空航天大学学报:自然科学版,2006,32(4): 450 - 454.
- [2] 傅惠民,马学荣. 压力容器寿命控制方法[J]. 机械强度,2004,26(5):506 - 509.
- [3] 王正方. 基于灰色系统理论的压力容器安全运行研究[D]. 东营:中国石油大学,2008.
- [4] 何显平. 基于有限元技术的压力容器设计方法研究[D]. 贵阳:贵州大学,2007.

(责任编辑:肖恩忠)