

压力容器开孔补强结构设计方法及工程应用分析

倪佳

张家港富瑞重型装备有限公司, 江苏 苏州 215000

[摘要]压力容器是石油化工以及能源等行业的重要设备,而压力容器开孔补强是其中一项重要的技术环节,直接影响着压力容器的安全性和经济性。因此,研究压力容器开孔补强具有重要意义。本文主要介绍了压力容器开孔补强的方法及其特点;并针对补强结构形式的选择、材料匹配的原则、焊接工艺的要求以及检验验收的要求等进行了论述。

[关键词]压力容器;开孔补强;等面积法;极限分析法

DOI: 10.64635/ja.2026.1055

中图分类号: TH49

文献标识码: A

Design Methods and Engineering Applications of Opening Reinforcement Structures for Pressure Vessels

Ni Jia

Zhangjiagang Furui Heavy Equipment Co., Ltd., Suzhou 215000, Jiangsu, China

Abstract: Pressure vessels are critical equipment in the petrochemical, energy, and related industries, and opening reinforcement is an important technical aspect that directly affects their safety and economic performance. Therefore, the study of opening reinforcement in pressure vessels is of considerable practical significance. This paper introduces the methods of opening reinforcement for pressure vessels and their characteristics, and discusses the selection of reinforcement structural forms, the principles of material matching, the requirements for welding procedures, and the requirements for inspection and acceptance.

Keywords: pressure vessel; opening reinforcement; area replacement method; limit analysis method

引言

压力容器是石油化工、能源、核电等行业中的重要设备,在生产过程中起着至关重要的作用,为了满足工艺操作、物料进出、仪表安装以及检修等要求,不可避免地要在压力容器壳体上开设一些孔洞并连接相应接管。

压力容器开孔补强设计主要目的是通过合理布置补强材料,使开孔附近应力集中系数降到允许范围内,保证压力容器有足够的强度。开孔补强设计包括力学计算、选用材料、结构形式、加工工艺等方面内容,在保证安全前提下还要考虑到成本和可生产性等问题。由于当今社会对设备提出了更高要求,使得压力容器越来越大并且工作条件越来越严酷,因此传统开孔补强设计方法已不能适应当前需要。近年来国内外压力容器设计规范日益完善,新的分析方法也逐渐应用到工程上,但由于各种不同的设计方法存在很大区别,在工程实践中往往会给工程技术人员带来困扰。

1 开孔补强的基本原理

压力容器开孔后出现局部高应力的基本原因是由于

结构几何不连续造成的应力集中。当壳体开孔时,在原来连续分布薄膜应力路径上被切断并改变方向而经过开孔附近,应力流线集中在开孔附近造成应力集中,在应力集中的地方出现应力集中点。从力学角度考虑,开孔附近应力集中是由两部分构成:一是由于开孔去除部分承受载荷而使整体平均应力增大;二是由于开孔周围弯曲引起弯曲应力。对于圆柱壳开孔接管结构,由于有接管的存在使得壳体与接管接触面之间存在相互作用力,从而使这个位置更加复杂。

开孔补强的主要思路是在开孔周围一定的范围加上补强材料,用来代替由于开孔所去除的受力面,另外还可以改变连接处的形状以减小应力集中程度。从受力的角度来说,补强材料与壳体一起发生变形,分担一部分薄膜应力并传递边缘弯矩,从而使应力更加均匀,开孔补强是压力容器设计中的一个重要内容,容器开孔后其整体强度有所下降,而且由于开孔的存在导致了开孔边缘的高应力区。因此要求补强件必须放在受力较大的地方并且要与容器

可靠连接以便于载荷的转移。

2 主要设计方法分析

2.1 等面积法

等面积法是在压力容器开孔补强设计中最早使用也是目前最常用的一种方法。它的依据是基于静力平衡薄膜应力理论,其基本补强原则为补强材料在穿过开孔中心线纵截面上正投影面积,应不小于被开孔切除载荷面积。在不同标准中虽然等面积法的基本思想是一致的但是具体的要求有所不同^[1]。GB 150《压力容器》和ASME VIII-1《锅炉压力容器建造规范》在有效补强区域确定、接管壁厚利用及其联合补强方面存在较大的差别。

等面积法的优点是计算简单,物理意义明确,工程技术人员只需要做面积计算即可进行加强设计,但是也有不足之处,即只考虑弥补薄膜应力而不考虑开孔周边弯曲应力影响,对于小直径开孔可以接受,但是当开孔较大时弯曲应力所占比例较大,使用等面积法计算会有一定偏差,GB 150中也规定等面积法只适用于开孔率小于等于0.5情况,大于这个值就需要采用更准确的方法来设计。

2.2 压力面积法

压力面积法是在等面积法的基础上发展出的一个改进的设计方法,在这个方法中加入了一个新的概念即压力承载面积来进行加强计算。压力面积法认为补强需要最小面积应该等于承受的压力的有效面积,然后通过改变补强材料的位置让承受压力的有效区域内的应力不超过许用应力。相比于等面积法而言,压力面积法考虑到一定的弯曲应力的作用,所以在开孔率比较大时其计算结果比较准确。

实际压力容器大开孔补强结构应用压力面积法进行计算时,因为这种方法忽略了弯曲应力的影响,在大开孔补强设计中有时是不准确。有文献报道压力面积法对于开孔率达到0.7以上的计算偏于保守,主要是由于虽然压力面积法考虑了有效承载面积的存在,但是对边缘弯曲应力还是考虑不足。压力面积法比等面积法要稍微复杂一点,需要确定有效承载部分尺寸,但是总的来说它仍是一种比较常规的设计方法。

2.3 极限分析法

极限分析是以塑性力学中上限或者下限定理为基础,根据结构所能承受的最大塑性载荷来进行补强结构的安全性判断。它是假设结构在未达到极限之前有一定的塑性储备,在不超过一定限度内可以产生塑性流动。基于极限分析的原理,经过一系列实验研究及多年的使用经验得出此种设计方案,相比等面积补强更优。极限分析可以较好

地反应出补强结构的真正承载力,对于承受恒定载荷或者压力波动的压力容器尤为适用。

随着计算机技术及数值计算的发展,基于有限元的极限分析越来越多地被应用于工程设计。如果开孔直径大于现行国家标准GB 150.3的要求,则建议使用数值分析方法,并且材料许用应力要满足现行国家标准GB 150.2中的规定。有限元法能考虑到复杂的截面形状、材料的非线性和边界等,能准确计算出补强区应力情况,有利于极限分析的进行。

3 补强结构与工程要点

3.1 补强结构形式

压力容器开孔补强结构形式不同对补强效果以及费用有很大影响。在工程中经常采用补强圈补强、厚壁接管补强以及整体锻件补强等几种主要补强方式。补强圈补强是在壳体开孔外侧或者内外两侧焊接一个环形补强板,这种补强方式简便、易实现,而且补强板容易获得,在中低压压力容器中的应用较为广泛,补强圈厚度一般等于或者接近壳体厚度,补强板通过焊接与壳体连成一体同时承受载荷。

厚壁接管补强是通过增加接管壁厚来增加补强面积,接管与壳体直接焊接在一起。这样可以避免补强圈和壳体之间搭接焊接,减少了焊接接头的数量从而减少应力集中,适合承受交变载荷或者低温的压力容器。整体锻件补强是补强效果最好的一种方式,接管以及补强部分都是用一个整体锻件制成,然后与壳体对接焊接。如果满足以下条件之一时,应该采用整体补强:设计压力大于或者等于6.3MPa;设计温度大于或者等于350℃;开孔直径大于或者等于主管内径的0.5倍;壳体开孔位置名义厚度大于或者等于38mm。这说明了整体补强的应用范围,也反映了标准针对不同类型工况所提出的不同水平的安全要求。

3.2 材料选择与匹配

补强结构材料的选择要与其所连接的壳体材料相适应,主要是从其化学成分、力学性能、焊接性和线膨胀系数等几个方面考虑,一般情况补强材料选与其壳体材料牌号一致或者相近,以便使两者有相近强度并且有较好的焊接性,如果壳体材料是高强钢,补强材料强度不能太低,否则补强作用不能很好发挥,也不能太高,以防焊接部位强度不匹配。

当容器内介质毒性和程度为极度危害或高度危害或者是具有较强渗透性的中度危害且介质是液化石油气的情况下,接管上的法兰应使用带颈对焊型管法兰,在这种情况下考虑的是介质危害较大情况下的要求,提高法兰连

接可靠性减少发生泄漏。同时还需要考虑到热处理对性能的影响,不同强度等级的材料焊接后可能需要一定的热处理来保证接头质量。

3.3 焊接工艺与残余应力控制

补强结构与壳体之间的焊接连接是实现载荷传递的重要步骤,焊接质量对于补强的效果以及设备的安全至关重要。补强圈与壳体一般采用连续角焊缝连接,其尺寸应符合设计文件的规定,如果焊脚太小会影响连接强度,而太大又会引起较大的焊接变形以及较高的残余应力。厚壁接管与壳体连接的对接焊缝应做到完全穿透,必要时要进行X射线或者超声波检测来保证焊缝的质量。

焊接残余应力对补强结构疲劳寿命及应力腐蚀有较大影响^[2]。当满足以下条件之一时,需要做消除应力热处理:符合固定式压力容器安全技术监察规程或者国家标准GB 150.4相关规定要求;处于湿H₂S腐蚀环境中压力容器;储存NaOH碱液碳素钢或低合金钢容器。焊后热处理能够明显降低焊接残余应力峰值,有利于改善焊接热影响区组织性能,提高结构抗应力腐蚀性能。热处理温度及保温时间选取要考虑材料种类、厚度以及结构形式等因素。

3.4 检验与验收要求

补强结构制作完成后检查验收也是保证设计意图实现的关键步骤之一。外观检查要检查补强结构尺寸是否满足图样要求,焊接接头是否有裂纹、未熔合、咬边等缺陷。焊接接头外形要平滑过度,不得有明显的棱角以避免产生应力集中现象。如果补强结构需要进行热处理,则热处理后应对接触到介质那一面的焊接接头硬度进行测量,不能大于规定的上限。

无损检测是检查补强结构内部质量的方法之一,射线检测用于发现焊缝内气孔、夹渣、未焊透等体积型缺陷,超声检测对于裂纹等薄片状缺陷更有效。检测方式要结合焊缝类型、板厚以及检测部位可接近情况而定,检测比例与设计压力和介质的危害性相关。

4 工程应用分析与比较

4.1 各方法适用范围对比

这三种主要的设计方法都有各自的适用场合及条件。等面积法适用于开孔率不大于0.5的一般开孔补强设计,此法简便易行,参数容易取得,在许多中低压容器开孔补强中被广泛采用。压力面积法可用于一些开孔率较大的情况,但是要注意这种方法对于弯曲应力考虑不足,在大开孔的情况下应结合实际情况进行应力校核。极限分析法则用在一些超出一般设计范围的情况,如大开孔、异形开孔

以及承受交变载荷的压力容器。

设计压力容器大开孔补强时,由于等面积法以及压力面积法都不够准确合理,而ASME方法比等面积法及压力面积法保守并接近有限元计算结果,因此推荐使用有限元计算或者ASME方法来进行强度校核及应力评价。

4.2 经济性与制造工艺性

不同的补强设计方法具有不同的经济性和可制造性。等面积法设计的补强结构所用材料较多,但是由于可以使用简单的补强圈形式,易于加工制造,焊接工作量少,检测要求不高,所以总体上来说是比较经济的。极限分析法可以准确地进行计算以优化材料布置以及降低补强所需材料,但是需要花费大量的研究开发费用,同时对可制造性的要求也会增加^[3]。从可制造性方面来看,补强圈对于制造公差有一定的包容性,在施工现场可以通过调节补强圈与筒体之间的贴合程度来达到装配的目的。厚壁接管和整体锻件补强对外加工精度要求很高,接管与壳体开孔配合尺寸要精确,否则容易出现对接困难或者焊缝间隙大等问题。

4.3 标准规范与合规性

压力容器开孔补强设计要满足有关的要求。压力容器普通设计所进行的强度校核应符合现行国家标准GB 150.3的规定,应力分析设计所进行的强度校核应符合现行行业标准JB 4732的规定,常压容器所进行的强度校核应符合现行行业标准NB/T 47003.1的规定。这是对不同类型的设计所采用的标准进行了说明,设计者按容器类型以及设计要求选用相应标准。GB 150和ASME对于等面积法的规定有所不同,但是两者都是得到业界认可的标准。在出口压力容器设计中应考虑其使用的目的地国家所采用的标准体系,在有必要的情况下要针对不同的标准分别计算来满足当地的要求。由于标准不断修订,设计者需要了解最新的标准变化情况,以便使设计满足最新标准的要求。

需要指出的是,现行有效的最新国家标准GB/T 150.3-2024已于2025年2月1日开始施行,其中对于开孔补强设计计算的要求有所调整,设计人员应依据最新版标准开展相关工作,在大开孔补强设计过程中,如果开孔率大于一般情况下的规定,则可以利用有限元分析的方法。有学者认为ASME方法要优于等面积法、压力面积法,更加保守可靠,而且接近有限元计算的结果,因此推荐用有限元或者ASME方法来进行强度校核以及应力评估。而且,在补强圈设计过程中,宽度与应力之间是非单调变化的,不是越宽越好,太宽会导致补强作用变差,因此要进行适

当计算得出最合适尺寸。

5 结束语

压力容器开孔补强结构设计是集多个方面的技术性工作,要求设计人员对补强原理有较深的认识并且要熟悉各种设计方法,而且要有一定的工作经验。等面积法、压力面积法以及极限分析法都有各自的适应范围及不足之处,在实际应用中应结合具体情况选取适当的设计方法,有时还需几种方法进行对比。补强结构的形式既要保证安全,又要经济合理,还要便于加工制造,材料匹配以及焊接质量也是不容忽视的问题。由于压力容器向着更高的参数、更大的尺寸方向发展,传统的常规设计方法已经不能满足实际工作的要求,而以数值分析为基础的新式设计方法将在开孔补强的设计中起到越来越重要的作用。这就要

求设计人员不断地学习新东西、掌握新技术,在工作中积累经验、提升能力,为中国压力容器的设计与制造事业尽自己的一份力。

[参考文献]

- [1]陈学东,崔军,陈炜,等.我国极端条件压力容器设计制造与维护技术进展[J].压力容器,2025,42(10):1-22.
- [2]倪淳.旋风分离器筒体上切向接管开孔结构优化设计[J].山东化工,2025,54(17):160-162.
- [3]谢强,杨毅晟,裴海涛.某连续式跨声速风洞压力调节系统管路设计与分析[J].机械设计,2025,42(05):175-181.

作者简介:倪佳(1996.10—),毕业院校:大邱大学,所学专业:机械设计,当前就职单位:张家港富瑞重型装备有限公司,职务:设计,职称级别:助理工程师。