

容器壳体大开孔补强方法的探讨

谭 泓, 林志鸿, 金春南, 何富东

(哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 由于结构和工艺的要求, 需要在容器壳体上设置大开孔结构。容器壳体大开孔的应力状况非常复杂, 根据不同的强度失效准则, 对壳体大开孔补强问题采用等面积法、压力面积法、极限载荷法、有限元法进行了分析和比较, 探讨了几种补强方法的适用范围。针对现有补强方法的局限性, 提出了采用三维有限元数值方法来分析大开孔接管补强问题是解决复杂壳体大开孔安全问题的最好方法。

关 键 词: 大开孔补强; 等面积法; 压力面积法; 极限载荷法; 有限元法; 应力分析

中图分类号: TB115 文献标识码: B

1 引 言

随着核工业、石油化工、船舶、航天技术的发展, 容器的建造向大型化方向发展, 容器结构也变得越来复杂。由于结构和工艺的要求, 需要在容器壳体上设置大开孔结构(开孔率 $\rho > 0.5$)。壳体大开孔后, 孔区附近不仅受到压力作用, 往往还受到推力、剪力、力矩等外载荷的作用; 不仅整体强度受到削弱, 而且还因开孔引起的应力集中造成开孔边缘局部的高应力; 同时在开孔边缘产生很高的弯曲应力, 其开孔区应力分布比较复杂。用现代计算技术和实验方法, 对开孔结构进行应力分析, 结果表明应力集中系数可达 3~10 倍, 对大直径薄壁壳体大开孔尤为明显。如果按压力容器常规设计分析, 只考虑应力集中按简化公式计算, 可能就不安全, 应力集中区可能因高应力而出现裂纹; 如果按最大应力点进行塑性失效计算又显得过于保守, 因为结构尚有很大承载能力。因此在压力容器设计中必须充分考虑壳体开孔的补强问题, 特别是大开孔的补强问题。

2 现有的开孔补强方法

目前, 工程中常用的开孔补强法有等面积法、压力面积法、极限载荷法和有限元法。

2.1 等面积补强法

等面积补强法是建立在一次加载下静力强度基

础上的补强方法, 以受拉伸的无限大平板开小孔作为计算模型, 即仅考虑容器壳体中存在的拉伸薄膜应力, 且以补强壳体的一次总体平均应力为补强原则。对于大开孔, 由于壳体曲率的影响, 在开孔边缘应力状态恶化, 实际情形远不同于平板开孔。因此对于大开孔、开孔直径超过 GB150 中允许的范围, 等面积补强法是不安全的。

2.2 压力面积法

西德 AD 规范采用实验极限压力分析法, 导出压力面积法。压力面积法是西德 AD 压力容器规范中采用的开孔补强方法, 其开孔率可达 0.8, 工程上常用该法对开孔率超出等面积法适用范围的大开孔进行补强。

2.3 极限载荷法

极限载荷法采用的是塑性失效准则, 即认为结构初始屈服并不意味着承载能力的丧失, 只有当容器某一区域整个截面均进入塑性状态, 以至发生塑性流动时才视为失效, 与之相对应的载荷称为极限载荷。由于该原则对开孔附近应力集中区有较大的应力许用值, 常用于压力容器的大开孔补强。极限载荷可以通过塑性理论分析, 实验研究以及非线性有限元等方法得出。

2.4 有限元法

有限元法的主要原理是将元件“离散”成一系列由节点相连接的“单元”, 由于单元能按不同的联结方式进行组合, 且单元本身又可以有不同形状, 因此可以模拟几何形状复杂的求解域。在假设单元的“变位模式”的基础上, 利用经典理论中的能量定理求出各节点的变位, 从而求出元件的应力分布。有限单元法自 20 世纪 70 年代末至今, 由于压力容器和相应计算软件的迅速发展, 三维有限元已成为国内外工程界解决压力容器大开孔接管的主要手段, 用有限元方法完成了各式各样工程问题的计算, 由此产生和带来了巨大的社会与经济效益。三维有限

元的计算结果与采用的单元形式及划分网格的方法密切相关。在开孔壳体结构中, 孔口附近为应力集中区域, 且受力状态也比较复杂, 应力的变化也较大。在划分网格时, 应力梯度变化大的地方网格应细, 对远离孔口的壳体, 单元可划大些。通用的有限元分析软件主要有 ANSYS、NASTRAN、I-DEAS 以及 ADINA 非线性弹塑性分析程序等, 它们都可对大开孔区域进行应力分析。

3 几种开孔补强法的比较

压力面积法与等面积法虽然形式不同, 但实质是完全相同的。两者都是基于静力强度且以壳体截面的承载能力与内压作用力相平衡为准则的计算方法。

应指出的是: 这两种计算方法中对壳体有效补强范围的取法是不同的。

等面积补强法: 壳体有效补强范围 B 的取值为 2 倍开孔直径 d , 即 $B=2d$, 这是以大平板开孔的应力集中分布范围进行考虑的。

压力面积补强法: 对壳体有效补强范围 B 的取值是以壳体边界效应的局部环向薄膜应力衰减范围进行考虑的, 即 $B=\sqrt{D_i\delta}$ 其中: D_i —壳体内径, δ —壳体有效厚度。

至于引起两者补强结果差别的原因, 主要是两种方法对筒体的有效补强范围考虑不同。等面积法的壳体有效补强宽度 B 直接与开孔直径相关, 等面积法基于受拉伸开孔大平板孔边应力集中的衰减范围取为 $d/2$, 此值完全取决于开孔直径, 与筒体厚度无关。压力面积法的壳体有效补强宽度 B 与壳体直径及厚度有关, 压力面积法对筒体的有效补强范围则基于圆柱壳边界效应的衰减区域取为 $(D_i+\delta-c)(\delta-c)$ (D_i —壳体内径, δ —壳体有效厚度, c —腐蚀裕量), 它仅与筒体内径有关, 而与开孔直径无关。因此对较大直径的壳体上较小的开孔, 压力面积法的有效补强宽度 B 可比等面积法大得多。反之, 对较小直径的壳体上较大的开孔, 等面积法的 B 则比压力面积法的 B 大, 压力面积法的补强范围相对较小, 具有密集补强的特点, 可以有效降低开孔接管部位的应力集中, 这也是压力面积法常用于压力容器大开孔的最主要原因。

极限载荷法与等面积法一样, 也是建立在静力强度基础上的补强方法。所不同的是: 等面积法以受拉伸无限大平板开小孔为计算模型, 且以整个壳体截面的平均应力进行计算; 极限载荷法则以壳体模型为基础, 以极限载荷进行分析。极限载荷法的

分析结果比较符合实际的开孔情况, 计算较为准确。这种方法首先是由 ASME III 及 ASME VIII-2 采用的, 前西德的 AD 压力容器规范也采用了这种方法。

特别应强调指出的是: 压力面积法、等面积法和极限载荷法一样, 未涉及安定性问题和疲劳强度要求, 所以都不适用于有疲劳强度要求的开孔补强计算。在有疲劳强度要求的开孔补强计算时, 采用有限元方法进行详细的计算及分析是最好的。

对于复杂壳体大开孔问题, 尤其是壳体开矩形大孔和多个孔的应力分析问题, 用理论方法很难求解, 而有限元法表现出它的优越性, 在网格划分较好和合理边界条件下均能算出应力应变, 且有较高的精度和可靠性。但利用有限单元法对开孔容器进行应力分析, 只能得到危险截面上最大应力点值, 而不是平均应力、二次应力。从设计观点看, 还要对有限元计算结果进行强度评定, 对三维有限元得到的计算应力必须进行分类, 不同类的应力分别采用不同的许用值。但确定有限元计算方法的准确性时, 还必须辅助于实验方法进行验证。

4 结 论

(1) 等面积法、压力面积法是压力容器开孔补强计算中应用最广泛且较简便的方法。但对于大开孔情况, 开孔直径超过 GB150 中允许的范围, 等面积补强法是不安全的。

(2) 等面积法、压力面积法和极限载荷法都是建立在一次加载方式下静力强度基础上的开孔补强方法, 没有对开孔边缘进行应力分析, 故都不适用于有疲劳强度要求的开孔补强计算。

(3) 有限元法计算精度高且适用各种结构分析, 能真实反映结构的应力、应变分布情况。随着国内外计算机技术的飞速发展, 大型计算程序得到广泛的应用, 对壳体大开孔补强的分析计算大多数采用有限元三维分析软件, 并结合安定性准则进行评定。另外, 对于有疲劳强度要求的开孔补强计算时, 采用有限元方法计算是最好的方法。利用有限元法对解决壳体大开孔补强问题有很大的实用价值和广泛前景。

参考文献:

- [1] 薛明德. 国外关于圆柱壳开孔接管问题的研究概述[J]. 压力容器, 1991, 8(2): 9-15.
- [2] GB 150-1998. 钢制压力容器[S].
- [3] 章春亮, 张康达, 钱 逸. 内压柱壳大开孔接管实验应力分析和有限元计算[J]. 浙江工学院学报, 1991(1): 8-16.

(渠 源 编辑)

600 MW supercritical once-through boiler with a recycle pump-based start-up system the feasibility of the stable-pressure steam purging technique was investigated through tests and computations with its technological procedures being designed. Moreover, some items to which due attention should be paid are discussed and explored. The present study can provide valuable reference data and information for the commissioning tests and operation of other types of supercritical boilers.

Key words: supercritical, recycle pump, once-through boiler, steam purging

薄壁不锈钢管在淡水冷却凝汽器空冷区的应用= The Use of Thin-wall Stainless Steel Tubes in the Air-cooled

Zone of a Fresh Water-cooled Steam Condenser[刊, 汉] / XU Gao-feng (Qinhuangdao Tonghe Thermal Power Co., Qinhuangdao, China, Post Code: 066012), MENG Jing-ming (Shanxi Sunlight Power Generation Co. Ltd., Yangquan, China, Post Code: 045200), ZHANG Yun-fei (Maintenance & Overhaul Department of Qinshan Nuclear Power Joint Operation Co., Haiyan, China, Post Code: 314300) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21 (2). — 205 ~ 207

The use of brass tubes for the air-cooled zone of a power plant steam condenser can lead to serious corrosion by ammonia, while the application of copper-nickel alloy tubes or titanium ones is associated with expensive costs. Stainless steel tubes feature good corrosion-resistant performance against ammonia. The authors have performed a contrasting analysis regarding the heat transfer performance, vibration properties, tube expanding characteristics and cost-effectiveness of thin-wall stainless steels. On this basis it is concluded that stainless tube materials when used for the air-cooled zone of a fresh-water cooled condenser have the merits of a fair operation performance and low cost, resulting in a high potential for their wide applications. **Key words:** thin-wall stainless steel, air-cooled zone, ammonia corrosion, fresh water cooled, cost-effectiveness

容器壳体大开孔补强方法的探讨= An Exploratory Study of the Reinforcement Method Used for Large-openings on a Vessel Shell[刊, 汉] / TAN Hong, LIN Zhi-hong, JIN Chun-nan, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 208 ~ 209

Due to structural and technological requirements there arises the need to adopt a large-opening structure on a vessel shell. The stress state of such a large opening is very complicated. On the basis of different strength-failure criteria various methods for the reinforcement of shell large openings are analyzed and compared. Such methods include: equal area method, and also pressure area, extreme load, and finite element methods. The scope of applications of several reinforcement methods have been explored. With respect to the limitations of currently used reinforcement methods it is recommended that a three-dimensional finite element method-based numerical method for analyzing the reinforcement of nozzles of large openings may serve as the best method to solve the safety problem of complicated large openings of shells. **Key words:** reinforcement of large openings, equal area method, pressure area method, extreme load method, finite element method, stress analysis