一种计算容器水压试验边界盲板厚度的方法

**许小兵**

（苏州热工研究院有限公司 广东深圳 518116）

摘 要 本文介绍了核电厂压力容器定期进行水压试验的必要性和试验边界的重要性。根据RSE-M在役检查规范明确最低试验压力，从力学角度建立受力模型，分析推导边界盲板的最小厚度，以保证核电厂运营期间进行压力容器水压试验的安全性。

关键词压力容器；水压试验；盲板；厚度

压力容器制造完成后，需定期进行检查或维修后检验，以确保承压设备在持续承压情况下保持满意的安全水平。检查主要包括承压设备、承压附件和安全附件及定期实施的法定水压试验。首次法定水压试验由制造商在核安全管理人员的见证下完成，核电厂在役期间容器定期水压试验由运营单位负责，一般最长时间间隔不超过10 a，且试验压力必须满足规范最低要求[1]。

水压试验的主要目的是对压力容器的整体强度、刚度和稳定性及焊接接头的致密性检验，验证密封结构的密封性能，同时起到消除部分机械应力的作用[2]。由于水压试验的压力比最高工作压力大，所以应考虑压力容器进行试验过程中的安全性。特别是试验边界的选择，一般选择原则是选择容器最小的隔离边界，阀门常常作为试验边界，对于不能承压的附件或无法隔离的管道需安装盲板作为试验边界。所以确定合适厚度的盲板是保证水压试验正常进行的前提。本文根据容器水压试验压力结合盲板材质提出的一种计算盲板厚度的方法，为核电厂容器水压试验选择盲板提供了理论依据。对于不受压的盲板，只起到简单的密封和隔离作用，在此不做讨论。

1 水压试验压力

水压试验压力以考核承压部件的强度，暴露其缺陷，但不损害容器承压部件为宜。核电厂在役检查期间压力容器水压试验压力规定如下。

1.1 常规岛和电厂配套设施压力容器的试验压力

耐压试验的最低试验压力按照如下公式计算：

式中：*P*t为试验压力，MPa；

*P*为容器最高工作压力，MPa；

*η*为耐压试验压力系数，按照表1选用；

[*σ*]为试验温度下材质的许用应力，MPa；

[*σ*]t为设计温度下材质的许用应力，MPa。

表1 耐压试验的压力系数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **压力容器的材质** | **压力系数*η*** | |
| **液（水）压** | **气压、气液组合** |
| 钢和有色金属 | 1.25 | 1.10 |
| 铸铁 | 2.00 | / |

当压力容器各个附件（圆筒、封头、接管、设备法兰及其紧固件等）所用材质不同时，应取附件材质[*σ*]/[*σ*]t比值中的最小者。[*σ*]t不应低于材质受抗拉强度和屈服强度控制的许用应力最小值。

1.2 核岛压力容器试验压力

核岛压力容器，根据RSE-M[3]规范要求，压力容器中的介质不同，最低试验压力也不尽相同，具体要求见表2所示：

表2 压力容器的水压试验压力

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **介质** | **最高工作压力*P*/（MPa）** | **水压试验压力*P*t/（MPa）** |
| 蒸汽和过热水 | 0.5<*P*≤6 | 1.33*P* |
| 6<*P*<12 | *P*+2 |
| *P*≥12 | 1.17*P* |
| 气体 | / | 1.5*P* |

水压试验的目的虽然是为了检查容器承压部件的强度，使其在维修期间暴露缺陷，但其试验压力并不是越高越好。实际上，水压试验属于损伤性或破坏性试验，压力过大有可能造成压力容器不可逆的损伤，因此，一般试验选择最低要求的压力，且应低于初次水压试验压力*P*0，以保证设备安全。

2 盲板应力分析

2.1 建立受力模型

容器水压试验边界安装盲板一般有2种情况：①对于不可拆卸的管道或附件，盲板安装在2个法兰之间，2面被法兰压紧；②对于可拆卸或可切割的边界设备，通过螺栓连接将盲板固定，或通过焊接工艺将盲板焊上。无论采用哪种连接，可认为连接方式和强度均满足试验要求，即盲板基本不会对设备造成边界应力，只需考虑盲板与打压介质接触部分的强度，且盲板所受压力在盲板上是均匀分布的，受力结果是使盲板发生弯曲变形。所以，盲板受力可按边缘固定的承受均布载荷的圆平板来做应力分析[4]，即主要关注在水压试验保压过程中盲板发生弯曲变形的问题。

2.2 盲板应力强度计算

对边缘固定承受均布载荷圆形平板进行受力分析，其变形后的宏观示意图如图1所示。



图1 盲板受压示意图（其中*δ*为盲板厚度，*r*为任意点半径，*P*为压力）

盲板一面受压后，其环向和径向分别产生拉伸和压缩应力，根据盲板平衡、几何和物理方程，建立应力微分方程，推导出内、外两面所产生的最大径向弯曲应力与环向弯曲应力与载荷*P*、半径*R*和材质泊松比的关系表达式[5]：

根据上式可得出盲板未受压（外）面的应力分布，如图2所示。



图2 盲板的弯曲应力分布（盲板外表面）

由应力分布规律可知：

当时，即在盲板中心处，

当时，即在盲板的最外缘处，

（其中“－”为压应力，“+”为拉应力）

对于一般钢材泊松比，则有，所以在进行水压试验时，盲板受到的最大应力为在表面边缘位置的径向弯曲应力，且大小为

3 盲板厚度的确定

水压试验过程中，盲板受到水压存在弯曲应力，且沿盲板厚度呈线性分布，在内外表面上大小相等、方向相反。为保证试验强度和设备安全，要求盲板上所有截面上各个点的应力应小于或等于材质许用应力，即：

……………………………………………………⑴

其中为盲板的焊接接头系数，一般水压试验使用的盲板不存在焊缝，故。

按照弹性失效准则，材质的许用应力为屈服极限应力与安全系数*n*的比值：

……………………………………………………⑵

结合式（1）、（2）可得出盲板材质上任意一点的许用安全弯曲应力为：

水压试验压力*P*作用于盲板时，在其内外表面边缘处发生最大弯曲变形，若不大于材质的许用安全弯曲应力，那么盲板上其他所有截面上各个点的应力都满足要求，结构也不会失效。

由上式得出盲板的计算厚度

计算厚度未包括厚度附加量*C*，在实际设计盲板时应考虑*C*，它由材质的厚度负偏差*C*1和腐蚀余量*C*2组成，即所以盲板的设计厚度应为：

…………………………………………⑶

式中：*P*为水压试验压力，MPa，即

为材质的极限应力，MPa，查表可得

*C*1为材质的负偏差，一般盲板厚度不超过30mm，负偏差可取0~1mm

*C*2为腐蚀余量，水压试验保压时间一般为不少于10min，腐蚀可以不予考虑

通过式（3）可以得出，容器水压试验时边界所用盲板的设计厚度，影响参数主要包括盲板的半径、水压试验压力和材质本身的极限应力等。在实际设计中，一旦这些参数确定，就可计算出盲板的最小设计厚度值，为水压试验准备了充分的条件。

4 结束语

容器水压试验是核电厂在役检查期间不可或缺的预防性检查项目，而盲板作为水压试验重要边界，其强度直接影响试验能否顺利完成。本文从水压试验压力出发，提出一种确定盲板厚度的方法。结合在役检查规范确定水压试验压力大小，对盲板受力分析并建立圆平板受力模型，通过分析出盲板在受压后最大的弯曲变形位置及大小，根据弹性失效准则推导出盲板的最小设计厚度。在水压试验过程中，满足试验要求厚度的盲板既保证试验强度和安全，使试验边界完整，同时避免盲板过分笨重而浪费材料，便于现场安装使用。本文盲板的推导方法也为其他领域类似设备设计提供了经验。

**参考文献**

[1] 寿比南. 中、美压力容器检修标准的对比分析[J]. 中国特种设备安全，1999，15（1）：27-29.

[2] 李阳. 浅谈压力容器的定期检验[J]. 科学与财富，2012，8（12)：370-370.

[3] 法国核岛设备设计，建造和在役检查规则协会. 压水堆核电厂核岛机械部件在役检查规则[S].法国：2005.

[4] 姜伟之. 工程材料的力学性能[M].北京：北京航空航天大学出版社，2000：35-38.

[5] 郑津洋，桑芝富等. 过程设备设计[M].北京：化学工业出版社，2015：52-60.

**作者简介：**许小兵（1990-），性别（男），水压试验助理工程师，主要从事核岛在役检查及容器水压试验工作，通信地址：（5180116）广东省深圳市大亚湾核电基地，E-mail:xuxiaobing@cgnpc.com.cn.