

文章编号: 0258-0926(2016)04-0034-05; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.04.0034

# 压力容器水压试验压力及其利弊分析

张敬才, 胡幼明

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

**摘要:** 对现行压力容器规范规定的压力容器水压试验的压力、利弊等进行讨论, 指出水压试验压力约为塑性失稳压力的 40%~45%, 其应力准则允许的压力约为塑性失稳力的 50%~75%; 水压试验是压力容器检漏、强度验证的一种实用有效的试验方法和检查技术; 水压试验可以改善和提高压力容器承载能力, 减小破坏可能性; 在役水压试验可以确定可能存在的最大缺陷或最大承受的压力, 为后续安全运行和分析提供依据和数据, 但压力不宜超过首次强度水压试验压力; 对超载和温态预应力水压试验以及水压试验有害作用应进一步开展科研。

**关键词:** 压力容器; 水压试验压力; 水压试验利弊

中图分类号: TL351<sup>+</sup>.6 文献标志码: A

## Pressure for Hydrostatic Test of Pressure Vessel and Its Advantages and Disadvantages

Zhang Jingcai, Hu Youming

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** Hydrostatic test pressure and its advantages and disadvantages have been discussed in detail. The paper indicated that the hydrostatic test pressure is about 40%~45% of the plastic instability pressure; Hydrostatic test stress criteria allowable pressure is about 50%~75% of the plastic instability pressure; Hydrostatic test may improve and increase the loading capability of the pressure vessel and decrease the failure possibility by hydrostatic test mechanism; Hydrostatic test is the useful and efficiency examination method and inspection technology for the leakage and strength of the pressure vessels; Periodic hydrostatic test during operation may establish the maximum defect in the pressure vessel or the maximum loading so that to provide basis and data for continuous operation, but the pressure of the periodic hydrostatic test does not exceed the first hydrostatic test pressure. The overpressure test and the warm pre-stressing test and harmful effects of pressure test need to be researched in depth.

**Key words:** Pressure vessel, Hydrostatic test pressure, Advantages and disadvantages of hydrostatic test

## 0 引言

现行压力容器规范(如 ASMEB&PVC-III-2007 及 RCC-M-2007)都有关于压力容器水压和/或气压试验的压力试验规定。压力容器的水压试验是指使该容器承受适当的水压, 试验压力容器的密封和强度(密封水压试验和强度水压试验), 或称水力试验和水力验证试验; 运行后对容器进

行的水压试验称为定期水压试验或验证试验复验, 并遵守在役检查规则(如 ASMEB&PVC-XI-2007 及 RSE-M-2010)。本文中的水压试验均指强度水压试验, 讨论对象为反应堆压力容器。不同压力容器设计规范规定的水压试验压力值可能不同, 如 ASMEB&PVC-III-NB6000 和 RCC-M-B5000; 同一规范不同版本亦可能不同,

收稿日期: 2015-10-13; 修回日期: 2016-03-21

作者简介: 张敬才(1937—), 男, 研究员级高级工程师, 现任电站项目办技术顾问

如 RCC-M 的 2000 年版与 2007 年版。本文探讨水压试验压力、水压试验利弊、水压试验时机。

## 1 水压试验压力与应力

1930 年焊接压力容器第一次纳入 ASME 规范时, 水压试验的试验压力为工作压力的 2 倍, 设计许用应力取材料抗拉强度的 20%; 通常压力容器材料的屈强比约为 1/2, 则水压试验时的压力容器圆柱壳体中薄膜应力分别为抗拉强度的 40% 和屈服强度的 80%。

1950 年 ASME 规范第 VIII 卷将设计许用应力取为材料抗拉强度的 25%, 将水压试验压力降到设计或工作压力的 1.5 倍; 水压试验时压力容器圆柱壳体中的薄膜应力分别为抗拉强度的 37.5% 和屈服强度的 75%。

1958 年 12 月美国海军反应堆部组织编写了“反应堆压力容器和相连部件的试行结构设计基础”, 即 PB-151987 (常称为海军规范)。海军规范规定: 承压壳体的水压试验压力应等于设计压力的 1.5 倍并乘以设计许用应力强度 ( $S_m$ ) 试验温度下的值与设计温度下值的比值;  $S_m$  值从海军规范的表 5-1 上取值。海军规范将  $S_m$  规定为拉伸屈服强度的 62.5% 和拉伸极限强度 33.3% 中的较小值。由于  $S_m$  值从 700F (21.11℃) 到 7000F (371.11℃) 不变化, 水压试验时圆柱壳体中的薄膜应力分别为抗拉强度的 49.95% 和屈服强度的 93.75%。

1963 年 ASME-III 的核容器规范出现至今, 其水压试验压力降为设计压力的 1.25 倍, 材料设计应力强度值仍为规定抗拉强度的 1/3, 水压试验时圆柱壳体中的薄膜应力分别降为抗拉强度的 41.7% 和屈服强度的 83.3%。

综上所述: ①水压试验压力受控于容器承受的应力, 与容器材料及设计安全系数有关; ②强度水压试验时压力容器壁内的一次薄膜应力基本上控制在抗拉强度的 40% 和屈服强度 80% 左右, 但一般不超过抗拉强度的 45% 和屈服强度的 90%; ③当设计许用应力取比较小的屈服强度和抗拉强度份额时, 即设计安全系数较大时, 水压试验压力与设计压力 (或工作压力) 的比值可取相对较大值, 反之则取相对较小值; ④由于压力容器几何形状的不连续性和材料中缺陷的存在而在局部区域产生应力集中, 使得该区域内的应力

超过材料的屈服强度, 因而这些局部区域将会产生局部塑性应变; ⑤反应堆压力容器允许具有较高的应力水平的原因是采用了分析法设计和执行了严格的质量保证。

## 2 水压试验压力与塑性失稳压力 ( $P_{pi}$ )

利用圆筒壳体在内压作用下的应力公式可计算  $P_{pi}$ 。对在内压作用下圆筒壳体逐步增加内压, 内表面材料首先开始屈服, 其屈服压力  $P_{yp}$  为:

$$P_{yp} = \tau_{yp} (R_o^2 - R_i^2) / R_o^2 \quad (1)$$

随着内压的增加, 塑性变形越来越深入筒壁内, 若假定其材料为完全塑性或理想塑性或弹性-理想塑性材料, 最后会在  $P_{pi}$  下整个筒壁处于塑性流动状态<sup>[1]</sup>:

$$P_{pi} = -2\tau_{yp} \ln \frac{R_i}{R_o} \quad (2)$$

式中,  $\tau_{yp}$  为单向拉伸屈服点最大剪应力;  $R_i$  和  $R_o$  分别为圆筒壳体内、外半径。

当  $R_i=1920$  mm,  $R_o=2120$  mm,  $2\tau_{yp}=S_y$  ( $S_y$  为材料屈服强度) = 300 MPa 时, 则:  $P_{yp}=26.966$  MPa;  $P_{pi}=29.727$  MPa。

此状态下圆筒壳体内平均弹性膜应力  $\sigma_m$  为 300.243 MPa, 这个值略超材料的屈服强度, 但远小于材料的抗拉强度。

对压力容器圆筒壳体, 若其材料的应变-硬化曲线遵守 Hollomon 公式, 则其  $P_{pi}$  亦可按式 (3) 简化公式 (Svensson 公式的第一项) 计算:

$$P_{pi} = \left[ \frac{0.25}{n+0.227} \right] \left( \frac{e}{n} \right)^n \left[ 1 - \left( \frac{t}{2R-t} \right)^2 \right] R_m \frac{t}{R} \quad (3)$$

在  $P_{pi}$  时对应的圆筒壳体内  $\sigma_m$  为:

$$\sigma_m = \frac{P_{pi} R}{t} = \left[ \frac{0.25}{n+0.227} \right] \left( \frac{e}{n} \right)^n \left[ 1 - \left( \frac{t}{2R-t} \right)^2 \right] R_m \quad (4)$$

式中,  $R$  为平均半径;  $t$  为厚度;  $e=2.718$ ;  $n$  为与材料应变硬化有关的值, 对奥氏体不锈钢  $n$  为 0.25~0.4, 对铁素体钢  $n$  约为 0.2。

假如某一反应堆压力容器平均半径  $R$  为 2020 mm, 筒体壁厚  $t$  为 200 mm, 拉伸强度  $R_m$  为 550 MPa, 则由式 (3) 可得失稳压力为 53.573 MPa; 由式 (4) 可得  $\sigma_m$  为 541.087 MPa。这个值远远超过材料的屈服强度, 但小于材料的抗拉强度。

目前压水堆压力容器的正常运行压力  $P$  通常约为 15.5 MPa, 设计压力约取 17.23 MPa。若  $P_{pi}$  取 54 MPa, 则设计压力约为该容器  $P_{pi}$  的 1/3 左右。水压试验压力, 多为设计压力的 1.25~1.43 倍, 即为 21.54~24.64 MPa, 约为  $P_{pi}$  的 40% 左右。

RCC-M-B3237 对反应堆压力容器试验工况规定的设计准则为: ①  $P_m \leq 0.9S_y$ ; ②  $P_m + P_b \leq 1.35S_y$  ( $P_m$  和  $P_b$  分别为总体一次薄膜应力和弯曲应力),  $S_y$  取 RCC-M 附录 Z I 试验温度下材料的屈服强度表列值。

若反应堆压力容器筒体内表面半径  $R_i = 1920$  mm, 壁厚  $t = 200$  mm,  $P_m = 0.9S_y = \sigma_t = PR_i/t$ , 而  $S_y = 300$  MPa, 则强度水压试验一次薄膜应力准则允许的内压  $P_i = 28.123$  MPa, 约为  $P_{pi}$  的 50%; 按薄壳理论对筒体  $P_m + P_b = 1.35S_y = PR_i/t + 6M/t^2$  准则, 可不考虑  $6M/t^2$ , 即  $P_m = 1.35S_y$ , 则允许的内压  $P_i = 42.188$  MPa, 约为  $P_{pi}$  的 75%。上述  $\sigma_t$  和  $M$  分别为切向应力和弯曲力矩。由上述粗略估算可知, 对反应堆压力容器筒体而言, 若考虑其材料应变硬化效应, 其正常运行压力约为其  $P_{pi}$  的 1/4 或具有 4 倍安全裕度; 其设计压力约为其  $P_{pi}$  的 1/3 或具有 3 倍安全裕度; 其强度水压试验压力约为其  $P_{pi}$  的 1/2.5 或具有 2.5 倍安全裕度; 强度水压试验一次薄膜应力准则允许的压力约为其  $P_{pi}$  的 1/2 或具有 2 倍的安全裕度, 如不考虑壁厚时的弯曲则允许的压力约为  $P_{pi}$  的 75% 或其有 1.3 倍安全裕度。但若不考虑应变硬化效应, 为理想塑性或弹性-理想塑性材料, 则运行压力约为全面屈服压力的 50% 或具有 2 倍安全裕度; 设计压力约为全面屈服压力的 60% 或具有 1.5 倍安全裕度; 强度水压试验压力约为全面屈服压力的 75% 或具有 1.3 倍安全裕度。它们的安全裕度比考虑应变硬化效应时约减小了一半。

### 3 水压试验的利弊

#### 3.1 水压试验是一种试验方法或检查技术

压力容器的压力试验作为检测压力容器泄漏一种试验方法或检查技术, 是用试验压力为设计压力或者稍高于运行压力下的压力试验作为检验压力容器材料、焊缝、连接件密封处是否泄漏的一种检漏试验方法或检漏技术手段。

压力容器水压试验作为压力容器强度验证的一种试验方法和检查技术, 是用规定的强度水压

试验压力来检验压力容器的设计强度, 即在水压试验过程中对压力容器重要部位进行变形/应变测量, 以所测得总变形/总应变是否符合规定值来评定强度设计。

水压试验也是用来检查不合理设计、探测存在严重缺陷和使用不合格材料的一种检验方法。因为在这种情况下, 水压试验可导致压力容器不正常变形、泄漏、损伤或破坏。因此, 压力容器在完工出厂、系统安装完工或维修后, 以及一定运行周期后都要进行水压试验。

#### 3.2 水压试验改善容器性能

水压试验可以通过一些作用机理而使容器性能得到改善, 从而减少或排除容器在运行中产生破坏的可能性。这些机理包括塑性重新形成、机械法消除应力、应力重新分布、切口失效或裂缝纯化以及局部应变硬化等。

**3.2.1 塑性重新形成** 对于壳体的基本许用应力强度值  $S_m$ , 为讨论方便,  $S_m = 0.67S_y$ 。对圆柱形壳体若水压试验压力分别为设计压力的 1.25、1.33、1.43 倍, 当内外径差值小于 10%, 可认为壁内应力均匀分布, 同时忽略设计壁厚附加量, 则内表面的应力分别为  $0.8375S_y$ 、 $0.8911S_y$ 、 $0.9581S_y$ 。这表明只要有应力集中系数不小于 1.194 的结构不连续区, 则该区域的材料就将产生屈服, 屈服后产生应力松弛, 应力要重新分布。

**3.2.2 机械法消除应力** 对机械法消除应力效应简述如下。如有 1 台压力容器在较高温度受到压力作用, 其应力低于破坏应力时, 则将会在已存在的裂纹端部因塑性屈服形成一个塑性区。因为该塑性区受到周围弹性材料的限制, 则它的卸载是受应变而不是受应力控制的。卸载后裂纹尖端将有残余的压应力存在, 其值大约为材料的屈服强度。如果再重新在较低的温度下加载, 直到超过前次高温加载前, 都将不会发生破坏, 原因是裂纹尖端因为高温加载屈服而钝化, 已经不像初始高温加载前那样尖锐了。这种现象就是所谓“机械法消除应力效应”或者称“温态预应力效应”。

**3.2.3 切口失效或裂缝纯化** 水压试验可使切口失效或使裂缝纯化, 从而改善压力容器性能。比如 1 台带有切口状缺陷的容器, 只要在一定温度下承受了较高应力的初始水压试验, 而材料在运行中没有明显劣化, 那么以后再在那个初始温

度附近只要承受的应力不高于初始水压试验时应力，容器就不会发生破坏。即在等于或略高于初始水压试验（运行）温度下的水压试验可以作为预防容器在较低温和压力下破坏的一种方法。

基于上述，迄今为止，ASMEB&PVC-III-NB6000及RCC-M-B5000都没有规定反应堆压力容器在役检查后重新在高于（材料的参考温度 $RT_{NDT}+33^{\circ}\text{C}$ ）下进行强度水压试验，也没有规定将这种试验作为一项检查方法使用，尽管在其他容器中经常采用定期的强度水压试验进行复查。虽然反应堆压力容器运行后和/或维修后也要进行某种类型水压试验，但不是强度水压试验，而是定期水压试验和系统压力试验。定期水压试验和系统压力试验的压力低于强度水压试验压力，详见ASME-III-NB-6221RCC-M-5221、RSE-MB2141、B2222、ASME-XI-IWB5221、IWB5230规定。

### 3.3 水压试验与疲劳

“疲劳”是指“材料的某一点或某些点上经受了足够多次数变化的应力或应变作用而最终导致裂纹或完全断裂时结构局部发生的渐进的永久性的变化过程”。因此，疲劳的特点是：①疲劳只发生在变化的应力或应变作用下，而不是静应力或静应变作用；②疲劳是在经历一段时间内发生的现象，并不是一次受载时出现的现象；③疲劳过程的结果是形成裂纹、扩展或最终断裂；④疲劳只发生在结构的局部而不是发生在整个结构上；⑤疲劳过程的结果是渐进的、不可恢复的永久性的后果。高周疲劳是应力控制的疲劳，主要取决于材料强度，而低周疲劳是应变控制的疲劳，交变载荷如以应力表示，则应力水平很高，以至超过材料屈服强度的2倍，是包括塑性应变在内的一种疲劳。

按规范规定不产生疲劳破坏应满足 $P_m$ （或 $P_1$ ）+ $P_b+Q+F\leq S_a$ ，（ $Q$ 、 $F$ 分别为二次应力和峰值应力； $S_a$ 按弹性计算的许用应力振幅）；它规定了循环总应变范围，并假定了弹性分析可以对局部屈服处的循环总应变范围进行计算。这个假设成立的条件是局部屈服的区域很小并受到周围弹性材料约束。因此不连续处是允许存在少量塑性应变。对常规疲劳，RCC-M-B3237“试验工况”规定“在疲劳分析中不考虑最初的10次试验工况”；ASME-III-B3226具有同样规定。在压

水反应堆运行环境下，由于反应堆压力容器材料为低合金钢，如16MND5、SA508-3、SA533-B，其裂纹扩展速率 $da/dN$ 值很小（见RSE-M-附录5.6-2010版），对略超过ASME-III或RCC-M规范规定验收标准的缺陷疲劳计算表明，在核电厂寿期内裂纹增长值很小，水压试验导致的裂纹增长更小。由此可知，反应堆冷却剂系统的役前检查是在该系统水压试验前还是水压试验后进行，规范如ASMEB&PVC-XI、RSE-M都没有明确规定，因为仅仅从裂纹扩展方面看裂纹变化是很小的，难以分辨。

综上所述，满足现行压力容器规范的反应堆压力容器，因裂纹疲劳扩展产生破坏的可能性是不大的，一、两次水压试验产生的裂纹扩展难以探测而可以忽略。

### 3.4 水压试验与断裂

实际结构的断裂通常有2种类型，一种是断裂前出现明显的塑性变形，称为塑性或韧性断裂；另一种是断裂前无明显塑性变形，称为脆性断裂。结构发生哪种断裂取决于材料性能、受力状态及存在与厚度相关的缺陷状况。

在平面应变状态下，I型应力强度因子 $K_I$ 可表示为<sup>[2]</sup>：

$$K_I = \frac{m\pi\sigma^2 a}{Q} \quad (5-1)$$

$$Q = \varphi_2 - 0.212(\sigma/S_y)^2 \quad (5-2)$$

式中， $m$ 为裂纹位置参数，表面裂纹为1.21，内部裂纹为1.0； $Q$ 为裂纹形状参数，可查表 $\varphi_2=f(a/c)$ ； $\sigma$ 为名义应力； $a$ 为裂纹深度； $c$ 为裂纹半长度。如 $a=1/4t$ ， $c=2t$ 时 $\varphi_2=1.062$ 。

对该式进行保守的简化处理以适用于表面和埋藏内部裂纹，则可以得到材料平面应变断裂韧性或临界断裂韧性 $K_{IC}$ ：

$$K_{IC} = \frac{\sigma_c \sqrt{a}}{0.47} = 2.12\sigma_c \sqrt{a} \quad (6)$$

或者：

$$K_{IC} = 2.12\sigma \sqrt{ac} \quad (7)$$

在材料和温度一定时，对不同的2个裂纹有 $\sigma^2 a_c = \sigma_1^2 a_{1c}$ ，即破坏的（名义）应力与裂纹的深度/高度的平方根成反比。

若某一反应堆压力容器材料（16MND5）的屈服强度 $S_y$ 为300 MPa和345 MPa、 $RT_{NDT}$ 为 $-20^{\circ}\text{C}$ 、水压试验时材料温度为 $20^{\circ}\text{C}$ 、此温度下

材料临界断裂韧性  $K_{IC}$  为  $135 \text{ MPa} \sqrt{m}$  (自 RCC-M-ZG-图 ZG6110)、应力分别  $0.8375S_y$ 、 $0.8911S_y$ 、 $0.9581S_y$ 、 $1.0000S_y$ , 则对应的筒体临界裂纹尺寸  $a_c$  如表 1 所示。

表 1 水压试验时筒体临界裂纹尺寸  
Table 1 Beltline Region Critical Crack Size at Hydraulic Proof Testing<sup>①</sup>

$S_y/\text{MPa}$	$\sigma/\text{MPa}$	$a_c/\text{mm}$
300	$0.8375S_y=251.25$	64.2
	$0.8911S_y=267.33$	56.7
	$0.9581S_y=287.43$	49.1
	$1.000S_y=300.00$	45.1
345	$0.8375S_y=288.94$	48.6
	$0.8911S_y=307.43$	42.9
	$0.9581S_y=330.54$	37.1
	$1.000S_y=345.00$	34.1

注: ①材料的  $RT_{NDT}=-20^\circ\text{C}$ , 水压试验温度  $=20^\circ\text{C}$ ,  $K_{IC}=135 \text{ MPa} \sqrt{m}$

对水压试验而言, 可认为材料韧性不变(确定的材料和试验温度), 试验压力越高, 即对应的应力越大, 或者屈服强度越高, 则破坏时裂纹尺寸越小。因此, 在合适温度下提高水压试验压力对暴露漏检的较小缺陷是有益的。故此, 有人认为水压试验也是评定压力容器产生脆性/韧性断裂敏感性的一种试验方法, 但对反应堆压力容器而言水压试验发生断裂的可能性不可思议。

### 3.5 水压试验的有害作用

过高的水压试验压力对避免产生塑性区或壁厚减薄是不利的, 或者说在合适温度下提高水压试验压力对避免产生塑性区或壁厚减薄不利。因此, 有人担心水压试验时容器可能产生超过允许尺寸限制的过度变形; 容器材料或结构由于受到过高应力而产生冶金或机械的损伤; 由于容器材料的应变硬化或应变时效而产生脆化; 容器亦可能在水压试验中产生破坏等问题。这些问题的发生, 实际上并非一定就是坏事, 因为水压试验本身就具有发现设计不正确、选材有错误、制造与检验不规范等功能。就反应堆压力容器而言, 60多年来尚未见到因水压试验而导致破坏的报导, 试验容器除外。这是因为现行压力容器规范都对容器破坏的可能性从设计与选材、制造与检验、

运行与维修等方面都有规定, 并根据实践经验反馈、科技进步及法规修改等不断地改进、完善和提高规范要求。

因此, 水压试验可能的有害作用是受到法规规范抑制的, 其结果是利大于弊。

## 4 结论

(1) 现行压力容器规范中的水压试验是根据理论和实践编制的, 并依据法规、理论及实践逐步修改完善。

(2) 现行压力容器规范中规定的水压试验压力的应力准则允许的压力, 对用应变硬化低合金材料建造的薄壁容器约为  $P_{pi}$  的 50%~75%, 而水压试验压力(如 1.25~1.43 倍设计压力时)约为  $P_{pi}$  的 40%~45%。

(3) 现行压力容器规范中的水压试验可作为压力容器检漏、强度验证等一种实用有效的试验方法或检查技术。

(4) 水压试验可以有限地改善和提高压力容器的承压能力, 减小其破坏的可能性。

(5) 按现行压力容器规范建造的压力容器因水压试验产生的裂纹扩展很小, 因难以测量可以忽略; 因水压试验发生疲劳破坏和脆性断裂是不太可能的或者这种危险性很小。

(6) 规定在一定使用温度下进行的水压试验和在役后的定期水压试验是有益的, 它可能可靠地确定或近似估算容器中高应力区实际可能存在的最大缺陷或最大可能承受的强度, 为继续安全运行和分析提供依据和数据。

(7) 对水压试验产生的塑性区和可能的壁厚减薄等有害作用应予以关注。

(8) 按现代科技发展能否将超载水压试验或温态预应力试验作为防止压力容器破坏的可选措施需要继续开展深入研究。

### 参考文献:

- [1] S. 铁摩辛柯. 材料力学(高等理论及问题)[M]. 汪一麟译. 北京: 科学出版社, 1965, 330-335.
- [2] 高庆. 工程断裂力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1986, 55-58.

(责任编辑: 张明军)