钢制安全壳筒体吊耳载荷试验工艺研究

王建华
（中国核工业二三建设有限公司　山东　荣成　264300）

摘要：在核电站中，钢制安全壳是非常重要的一道防线，其安全性对于核电站安全生产非常重要。吊耳是钢制安全壳筒体吊装工作的重要受力部件，其承载能力会影响到钢制安全壳吊装工作的本质安全，通过对钢制安全壳筒体吊耳承载能力的试验，可以准确判断吊耳承载能力是否满足使用要求。本文介绍了钢制安全壳筒体吊耳的结构，针对吊耳受力大小和斜向受力特点进行分析，结合吊耳试验的载荷大小要求和液压同步顶升系统的设备特性，设计出吊耳载荷试验专用工装和施工工艺，通过对工装的力学验算，结果表明该工艺可行。

关键词：吊耳；斜向受力；载荷试验；同步顶升

0　引言

钢制安全壳是核电站第三道防线，是保证核安全、防止核泄漏的重要设施。某核电站钢制安全壳采用斜拉式分段吊装施工工艺，其主吊耳为斜向受力，直接焊接在筒壁上。为验证吊耳的承载能力，需要对吊耳进行荷载试验，其试验荷载需模拟吊耳实际的受力大小和受力方向。本文通过对筒体吊耳载荷试验操作方式的研究以及工装的设计、校核，来研究其载荷试验工艺。

1　工程概况

筒体采用厚度为 52mm 的钢板拼焊而成，高度为 19.34m，内径为 43m，总质量为 1270t。

筒体 16 组吊耳均匀分布在筒体内侧，耳孔中心距离筒体底部 11.62m，吊耳结构尺寸如图 1 所示。

筒体吊装时吊索与水平面夹角为 59°，如图 2 所示。

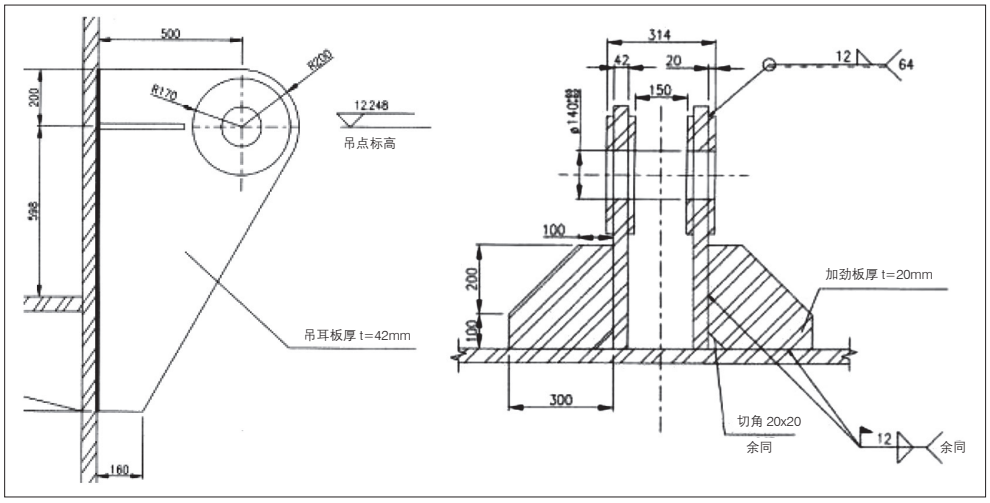

图 1　吊耳结构尺寸图

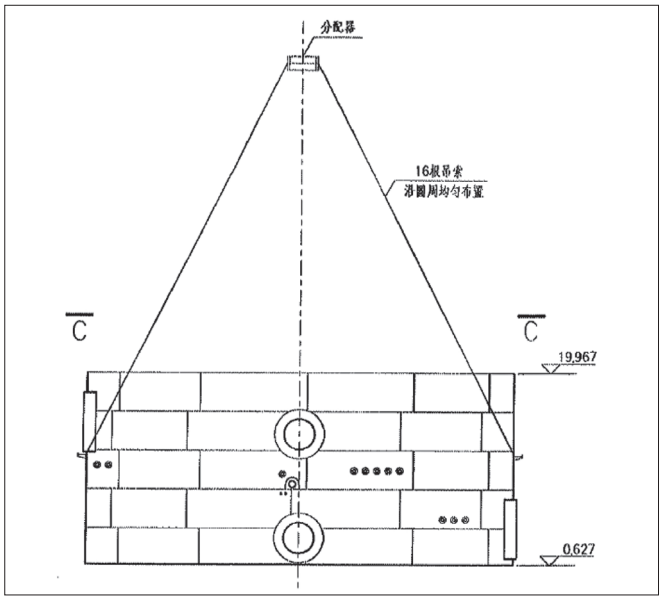

图 2　吊装示意图

则单个吊耳最大受力为：

$$F_{\max}=\frac{K_1Qg}{N\sin\theta}=\frac{1.1\times1400}{16\times\sin59^\circ}=112.3(\mathrm{t})$$

式中：K_1—动载系数，取值 1.1；

N—吊索支数，16。

试验载荷 P 为：

$$P=K_2F_{\max}=1.25\times1123=140(\mathrm{t})$$

式中：K_2—静载试验系数，取值 1.25。

加载工具为液压同步顶升系统，如图 3 所示。同步顶升系统计量单位为 bar，最大加载压强为 700bar（70MPa），配套所使用的专用千斤顶规格

为 100t，两者换算系数 K=7，单个千斤顶读数 R 为：

$$R = \frac{KP}{N} = 7 \times \frac{140}{2} = 490\text{（bar）}$$

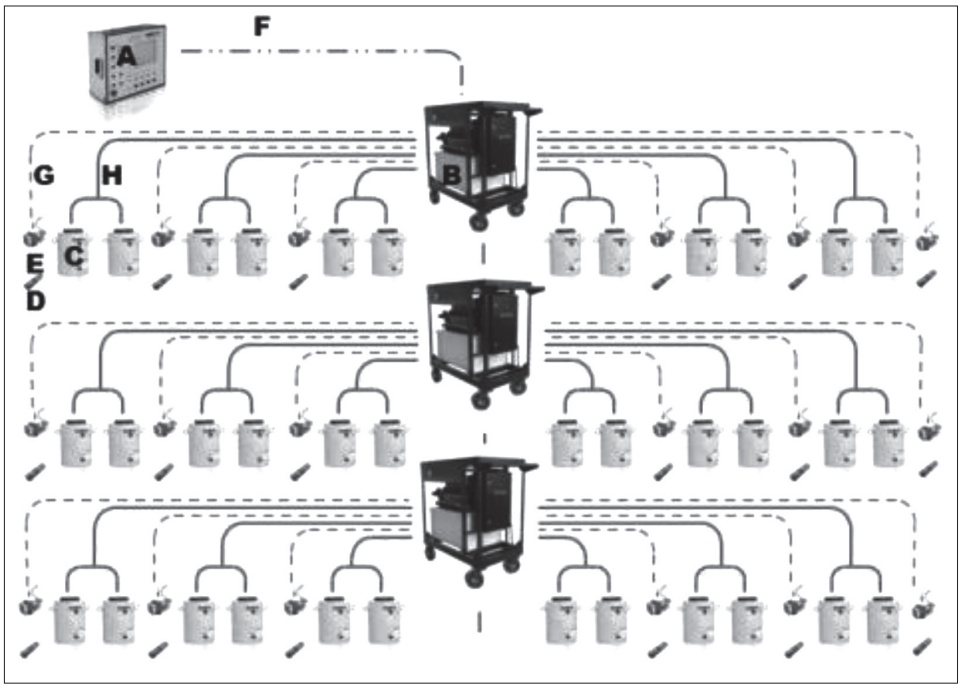

图 3　同步顶升系统结构示意图

2　试验工艺

吊耳试验采用单点顶升加载的方式进行。加载工具为恩派克 PLC 控制同步顶升系统，计量单位为 bar，最大加载压强为 700bar（70MPa），吊耳试验满载时需达到 490bar。

单机同步泵站组成及主要原理：单机同步泵站主要是由 1 台高压泵站、控制阀组、液压油缸、位移检测装置、压力检测装置和 1 套电气控制系统组成；系统利用液压驱动、压力和位移闭环自动控制的方式，实现多点位移控制。

试验装置结构如图 4 所示，2 台液压千斤顶下方设置支撑焊接在筒体上，支撑方向与吊耳受力方向相同，千斤顶通过平衡梁对筒体吊耳加载。按照图 4 布置液压千斤顶、平衡梁等顶升装置，连接液压管线，调试液压泵站，使液压系统可用。平衡梁在千斤顶受载前，应使用手拉葫芦固定，防止平衡梁倾倒发生安全事故，支座上应设有止挡块，防止千斤顶滑落。

在吊耳左右位置分别焊接临时工装作为液压千斤顶的支撑，该支撑应能保证液压千斤顶的顶升力方向与筒体实际吊装时吊耳的受力方向相同。吊索与水平面夹角为 59°。

连接液压泵站管路和线路，调试完成后，操作液压泵站进行预顶升，使各液压千斤顶稳压后的压力读数不小于 0.5R（50%），保持荷载 10min，检查并确认吊耳和筒体以及试验工装无异常变形产生，否则应停止试验。

继续缓慢加载，使各液压千斤顶稳压后的压力读数不小于 R，保持荷载 10min，当加载过程中发生吊耳、筒体或试验工装发生明显变形时，应立即卸载。

液压千斤顶卸载，使用汽车吊将平衡梁吊正后，平衡梁将千斤顶活塞杆压回，取走液压千斤顶，再拆除吊耳与平衡梁的连接销轴，防止平衡梁在拆除销轴后发生摆动弹出伤人。

保压 10min 后，拆除试验装置，对筒体吊耳及焊缝进行无损检测，确认吊耳质量。

3　安全操作要求

（1）液压管路连接前应检查快速连接接头护套是否完好，若发生损坏，应对快速接头进行检查；使用完后，应使用护套将快速接头盖好。

（2）连接液压千斤顶处的管路油阀应开到最大，以防千斤顶顶升速度不一致，导致平衡梁顶偏。

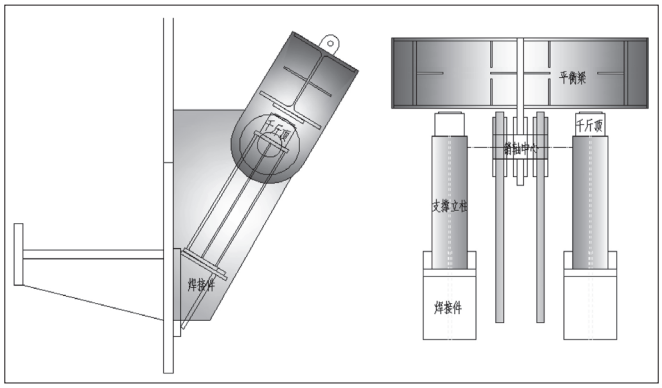

图 4　载荷试验工装布置示意图

（3）试验工装应严格按要求制作，焊缝焊接质量应符合要求。

（4）液压千斤顶应放置平稳并有防坠落措施，千斤顶与平衡梁之间的间隙应满足千斤顶行程要求，一般以 30mm 为宜，当间隙超过该值时应在千斤顶底部设置垫板增高。

（5）液压泵站操作人员应经过专业培训合格后方可上岗，应熟悉操作规程和注意事项；严禁未经培训的人员操作液压顶升系统。

（6）试验过程中要避开大功率电器的使用，防止配电箱跳闸导致试验中止。

4　结构校核

4.1　结构计算说明

平衡梁的设计载荷取 160t。

平衡梁采用 H400×400×13×19 热轧 H 型钢预制而成，材质为 Q345B，加劲板厚度为 20mm，吊耳板厚度为 40mm。平衡梁结构详图如图 5 所示。

平衡梁千斤顶支点位置设有加劲板，H 型钢与吊耳板为对接焊缝，焊条采用 E50 手工焊接，吊耳板销轴孔处设有补强圈。

4.2　平衡梁强度校核

千斤顶支点离平衡梁中心的距离 D=400mm，千斤顶支座反力为 F=80t，平衡梁所受弯矩为 $M=FD$=32t·m，焊缝截面所受剪力 $V=F$=80t。

平衡梁跨中为对接焊缝，按照三级焊缝检验，翼缘抗拉强度为 f_t^w=250MPa，腹板抗拉强度为 f_t^w=265MPa，焊缝为 H 型截面，在弯曲作用下，翼缘板主要承受弯矩作用，腹板主要承受剪力作用。

截面特性与 H 型钢相同，即 W_x=3017.3cm³，I_x=60346cm⁴，S_X=1660.74cm³。

平衡梁焊缝所受正应力为：

$$\sigma=\frac{M}{W_X}=\frac{32\times10^7}{3017.3\times10^3}=106.1\text{（MPa）}$$

经简化计算，平衡梁跨中焊缝截面所受最大剪应力为：

$$\tau_{\max}=\frac{VS_x}{t_wI_x}=\frac{80\times10^4\times1660.74\times10^3}{13\times60346\times10^4}=169.36\text{（MPa）}$$

由于翼缘与腹板相交处 1 点处的焊缝既承受正应力作用，又承受剪应力作用，该处焊缝按下式计算折算应力：

$$S_{X1}=bty=400\times19\times\frac{190.5}{1000}=1447.8\text{（cm}^3\text{）}$$

$$\tau_1=\frac{VS_{x1}}{t_wI_x}=\frac{80\times10^4\times1447.8\times10^3}{13\times60346\times10^4}=147.64\text{（MPa）}$$

$$\sqrt{\sigma^2+3{\tau_1}^2}<1.1f_t^w$$

$$\sqrt{106.1^2+3\times147.64^2}=276.9\text{MPa}<1.1\times265\text{MPa}=291.5\text{MPa}$$

故平衡梁焊缝承载力合格。

4.3　吊耳板强度校核

吊耳板板厚为 40mm，作为偏保守考虑，截面校核时不考虑销轴孔补强圈的作用，吊耳最不利位置截面面积 A=（440-140）×40=12000（mm²）。

吊耳板所受拉力为 F=100t，则所受正应力为：

$$\sigma_1=\frac{F}{A}=\frac{160\times10^4}{12000}=133.3\text{（MPa）}$$

平衡梁材质为 Q345B，板厚 δ=40mm，钢材抗拉强度设计值为 f=265MPa，故吊耳强度满足要求。

综上所述，顶升装置整体结构强度满足要求。

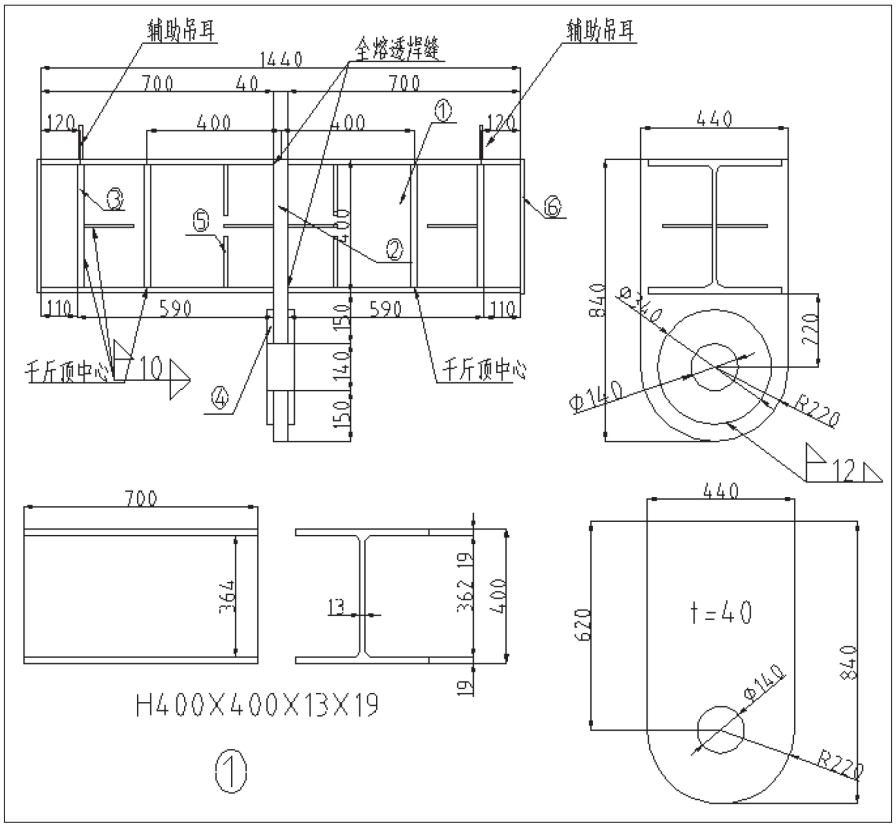

图 5　平衡梁结构详图

5　结语

经过论证，本工艺在技术方面切实可行，且存在安全管理和成本控制方面的优势，为筒体吊耳载荷试验提供了理论依据和操作方法，为筒体吊装工作提供了安全保障，同时作为一个典型案例，也可以为其他类似项目的施工提供参考。

参考文献：

[1]GB 50017-2017，钢结构设计标准[S].
[2]GB/T 3766-2015，液压传动系统及其元件的通用规则和安全要求[S].

作者简介：王建华（1989.03-），男，汉族，重庆人，本科，工程师，研究方向：核电建设和起重吊装。