

哈尔滨工程大学 核科学与技术学院

核工程与核技术

课
程
设
计
说
明
书

课程名称： 课程设计（三）

设计题目： 蒸汽发生器

专业班级： 核工程与核技术 17 级 6 班

学号： 2017151613

姓名： 刘铭

指导老师： 张楠

学期： 2020-2021 学年第一学期

日期： 2021 年 3 月

摘要

在压水堆核电站中，蒸汽发生器是一回路系统中的一个主要设备，具有尺寸大，重量重，设计、制造复杂，作用大的特点，再设计和制造方面被称为当代热交换器技术的最高水平。长期以来国际上压水堆核电站蒸汽发生器经常发生传热管腐蚀破损，在可靠性上存在严重问题，是核蒸汽供应系统的唯一致命弱点，保证蒸汽发生器的制造质量有助于提高其安全可靠性。由于蒸汽发生器制造相当复杂，技术密集程度高，要求制造质量符合设计说明书上的要求，因此，设计说明书在蒸汽发生器的制造过程中就尤为重要。

本设计说明书是针对压水堆设计的立式 U 型管自然循环蒸汽发生器。作者在参考了孙中宁老师编写的《“蒸汽发生器”课程设计指导书》和《核动力设备》，在阅读了大量文献后，提出了蒸汽发生器的一种新的方案设计，并进行了论证。通过强度计算和结构设计，确定了蒸汽发生器的结构尺寸，然后分别进行了蒸汽发生器的热力计算、水动力计算，希望能获得更佳的设计方案。

由于编者水平有限，实践经验不足，加之时间仓促，设计说明书中难免有疏漏和错误之处，诚恳希望读者批评指正。

关键字：自然循环式蒸汽发生器；热力计算；水力计算；强度计算

目录

1 绪论	1
1.1 蒸汽发生器的发展现状	1
1.2 蒸汽发生器的基本技术要求	1
2 课程设计内容	2
2.1 给定条件	2
2.2 蒸汽发生器的热力计算	3
2.3 蒸汽发生器的水动力计算	3
2.3.1 一回路侧水动力计算	4
2.3.2 二回路侧循环倍率的计算	5
2.4 蒸汽发生器的强度计算	6
2.4.1 传热管的强度计算	6
2.4.2 筒体的强度计算	6
2.4.3 封头的强度计算	7
2.4.4 管板的强度计算	7
2.5 蒸汽发生器的结构设计	7
2.5.1 管束组件的结构设计	7
2.5.2 衬筒的结构设计	7
2.5.3 下筒体结构设计	7
2.5.4 管板	8
2.5.5 分离器组件	8
2.5.6 给水管装置	8
2.5.7 排污装置	8
3 结论与评价	8
3.1 结论	8
3.2 评价	8
A 附录 1 蒸汽发生器热力计算表	ii
B 附录 2 蒸汽发生器水力计算表	vi
B.1 一回路水阻力计算	vi
B.2 二回路水循环阻力计算	viii
B.2.1 下降空间阻力	viii
B.2.2 上升空间阻力	ix
B.2.3 汽水分离器阻力	xii
B.2.4 循环总阻力	xii
B.3 运动压头计算	xiii

C	附录 3 蒸汽发生器强度计算表	xiv
C.1	传热管	xiv
C.2	下筒体	xiv
C.3	上筒体	xv
C.4	球形下封头	xv
C.5	管板	xv
D	附图 1 蒸发器总图	xvi
E	附图 2 蒸发器部件图	xvii
E.1	蒸汽发生器主体	xvii
E.2	蒸汽发生器俯视图	xvii
E.3	蒸汽发生器顶部剖面	xviii
E.4	蒸汽发生器中部剖面	xviii
E.5	蒸汽发生器底部剖面	xix
E.6	蒸发发生器局部切面	xix

1 绪论

1.1 蒸汽发生器的发展现状

蒸汽发生器是核动力设备中的一个主要部件,产生汽轮机所需蒸汽的换热设备 [1]。在核能反应堆中,核能产生的热量由冷却剂带出,通过蒸汽发生器传给二回路的给水,使其产生具有一定压力、一定温度和一定干度的蒸汽,此蒸汽再进入汽轮机中做功,转换为电能或机械能。在这个能量转换过程中,蒸汽发生器既是一回路设备,又是二回路设备,所以被称为一、二回路的枢纽。实际运行经验表明,蒸汽发生器能否安全、可靠地运行,对整个核动力装置的经济性和安全性具有十分重要的影响。

国外压水堆核电站的运行经验表明,蒸汽发生器的性能 (无论是静态性能还是动态性能) 均能满足使用要求,但在可靠性方面却难以令人满意。在运行中发生蒸汽发生器传热管破损事故的装置数目,接近压水堆动力装置总数的一半。各国都把研究和改进蒸汽发生器当做完善压水堆核电技术的重要环节,并制定了庞大的研究计划,主要包括蒸汽发生器的热工水利分析; 腐蚀理论和传热管材料的研制; 无损探伤计数: 振动、磨损、疲劳研究; 改进结构设计, 减少腐蚀化学物的浓缩; 改进水质控制等。

1.2 蒸汽发生器的基本技术要求

在核动力装置中,由于一回路为带有放射性回路,而二回路为无放射性回路,因此在研制蒸汽发生器时对结构、强度、材料抗腐蚀性、密封性等都提出了很高的要求,其中最基本的技术要求为:

1. 蒸汽发生器及其部件的设计,必须供给核电站在任何运行工况下所需的蒸汽量及规定的蒸汽参数。只有满足这个要求才能保证电站在任何负荷下经济运行。
2. 蒸汽发生器的容量应该最大限度地满足功率负荷的需要,而且要求随着单机容量的增加,其技术经济指标得到相应改善。
3. 蒸汽发生器的所有部件应该绝对地安全可靠。
4. 蒸汽发生器个零、部件的装配必须保证在密封面上排除一回路工质漏入二回路中去的可能性。
5. 必须排除加剧腐蚀的任何可能性,特别是一回路中的腐蚀。
6. 蒸汽发生器必须产生必要纯度的蒸汽,以保证蒸汽发生器在高温下可靠地运行,并保证汽轮机也可靠而经济地运行。
7. 蒸汽发生器应设计得简单紧凑,便于安装使用,同时易于发现故障而及时排除,并有可能彻底疏干。
8. 保证蒸汽发生器具有较高的技术经济指标。

在设计蒸汽发生器时,要考虑一、二回路两种工质的种类和参数,正确地选择结构方案、材料、传热管尺寸、传热系数以及冷却剂等,对取得蒸汽发生器最佳技术经济指标是非常重要的。另外,必须采取减少向外散热损失的措施。

2 课程设计内容

课程设计是在给定的条件下，完成蒸汽发生器的方案设计，并进行蒸汽发生器的热力计算、水动力计算、强度计算、结构设计，然后根据所涉及的方案绘制蒸汽发生器的总图。

2.1 给定条件

1. 蒸汽产量: $D = 126kg/s$
2. 蒸汽干度: $x = 0.99$
3. 蒸汽发生器的热效率: $\eta = 0.99$
4. 一回路侧额定工作压力: $p_1 = 15.0MPa$
5. 一回路侧设计压力: $p_{\text{设},1} = 1.25p_1$
6. 一回路侧冷却剂入口温度: $t'_1 = 310^\circ C$
7. 一回路侧冷却剂出口温度: $t''_1 = 290^\circ C$
8. 二回路侧给水温度: $t_f = 220^\circ C$
9. 二回路侧额定工作压力: $p_s = 5MPa$
10. 二回路侧设计压力: $p_{\text{设},s} = 1.25p_s$
11. 传热管壁导热系数: $\lambda_w = 17.4W/m^\circ C$
12. 传热管壁许用应力: $[\sigma_1] = 18kg/mm^2$
13. 下筒体许用应力: $[\sigma_2] = 18kg/mm^2$
14. 上筒体许用应力: $[\sigma_3] = 18kg/mm^2$
15. 球形下封头许用应力: $[\sigma_4] = 14.5kg/mm^2$
16. 管板许用应力: $[\sigma_5] = 1800kg/mm^2$
17. 传热管最小节距: $t = 1.25d_o$ ，一般取为 1.35 1.45 d_o
18. 上筒体内径 3200mm，高度 4000mm
19. 下降空间:
 - (a) 入口阻力系数 = 1
 - (b) 出口阻力系数 = 1
 - (c) 定位装置阻力系数 = 1
 - (d) 绝对粗糙度 $\Delta = 0.15mm$
20. 流量分配管板:
 - (a) 单元面积 = 533mm²
 - (b) 单元开孔面积 = 216mm²

2.2 蒸汽发生器的热力计算

1. 完成一回路冷却剂对传热管内壁的强迫对流放热计算，确定 α_1 值：

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d_i} Re_f^{0.8} \cdot Pr_f^{0.4}$$

2. 完成传热管壁的导热计算，确定管壁热阻 R_W 值：

$$R_W = \frac{d_o}{2\lambda_w} \ln \frac{d_o}{d_i}$$

3. 确定污垢热阻 R_f 值：

- 对于不锈钢： $R_f = (0.52 \sim 0.69) \times 10^{-4} \cdot m^2 \cdot ^\circ C/W$
- 对于镍基合金： $R_f = 0.56 \times 10^{-4} \cdot m^2 \cdot ^\circ C/W$

一般污垢层厚度为 $0.05mm$ 。

4. 完成传热管外壁对二回路工质的沸腾换热计算，确定 α_2 值：

$$\alpha_2 = 0.557 p^{0.15} q^{0.7}$$

式中： $p \rightarrow Pa; q \rightarrow W/m^2$

5. 完成传热系数 k 值的计算：

$$\frac{1}{k} = \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{\alpha_i} + R_w + \frac{1}{\alpha_o} + R_f$$

6. 确定传热面积 F 值：

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t}$$

式中： $Q \rightarrow$ 传热量； $\Delta t \rightarrow$ 传热温差

设计传热面积 $F_{\text{设}} = C \cdot F$

式中， $C \rightarrow$ 设计储备系数，一般取 $C = 1.1$

2.3 蒸汽发生器的水动力计算

水动力计算主要包括：

1. 一回路侧水动力计算
2. 二回路侧循环倍率的计算

2.3.1 一回路侧水力计算

计算的具体步骤:

1. 传热管内的摩擦阻力 (ΔP_f)

$$\Delta P_f = \lambda \cdot \frac{H}{d_i} \cdot \frac{\rho_1 u_1^2}{2}$$

式中: λ —摩擦阻力系数, 按有关公式或图表求取;

H —管子长度, m ;

d_i —管子直径, m ;

ρ_1 —一回侧路冷却剂的平均密度, kg/m^3 ;

u_1 —一回侧路冷却剂的平均流速, m/s ;

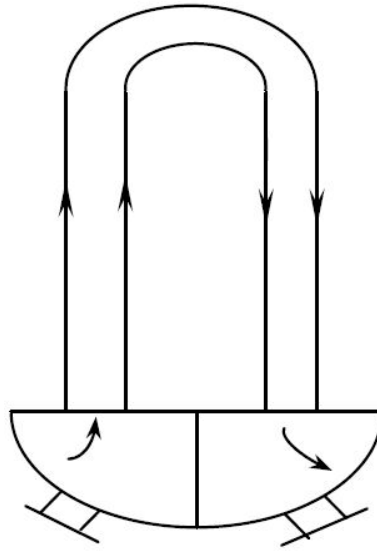


图 1: 一回路侧水力计算简图

2. 局部阻力: (ΔP_l):

$$\Delta P_l = \xi \frac{\rho_1 u_1^2}{2}$$

式中: ξ —局部阻力系数。 ξ 值主要取决于通道的结构型式, 通过实验求得, 属于经验数据。

一回路侧总的局部阻力:

$$\Delta P = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C + \Delta P_D + \Delta P_E + \Delta P_F + \Delta P_G$$

其中:

- 由进口管至进口水室, 通道截然突然扩大的局部阻力— ΔP_A

$$\Delta P_A = \xi_A \cdot \frac{\rho_A \cdot u_A^2}{2}$$

- 在进口水室内转弯的局部阻力— ΔP_B

$$\Delta P_B = \xi_B \cdot \frac{\rho_B \cdot u_B^2}{2}$$

- 由进口水室至传热管束，通道截面突然缩小的局部阻力— ΔP_C

$$\Delta P_C = \xi_C \cdot \frac{\rho_C \cdot u_C^2}{2}$$

- 在 U 型管弯头内转弯 180° 的局部阻力— ΔP_D

$$\Delta P_D = \xi_D \cdot \frac{\rho_D \cdot u_D^2}{2}$$

- 由传热管束至出口水室，通道截面突然扩大的局部阻力— ΔP_E

$$\Delta P_E = \xi_E \cdot \frac{\rho_E \cdot u_E^2}{2}$$

- 在出口水室内转弯的局部阻力— ΔP_F

$$\Delta P_F = \xi_F \cdot \frac{\rho_F \cdot u_F^2}{2}$$

- 由出口水室至出口接管，通道截面突然缩小的局部阻力— ΔP_G

$$\Delta P_G = \xi_G \cdot \frac{\rho_G \cdot u_G^2}{2}$$

一回路侧的水阻力： $\Delta P_H = \Delta P_f + \Delta P_l$

考虑贮备系数。其值为计算阻力的 10%

因此： $\Delta P = 1.1\Delta P_H$

2.3.2 二回路侧循环倍率的计算

在设计中，常用图解法来确定循环倍率 C_R 值和循环速度 u_o 值。即先假定几个不同的循环倍率 C_{R1} 、 C_{R2} 、 $C_{R3} \cdots$ 值。分别计算其运动压头 P_m 和总阻力 ΔP ，在直角坐标系里做出相应的曲线，二根曲线的交点即为稳定工况时的 C_R 值，同时也可求出 u_o 值。

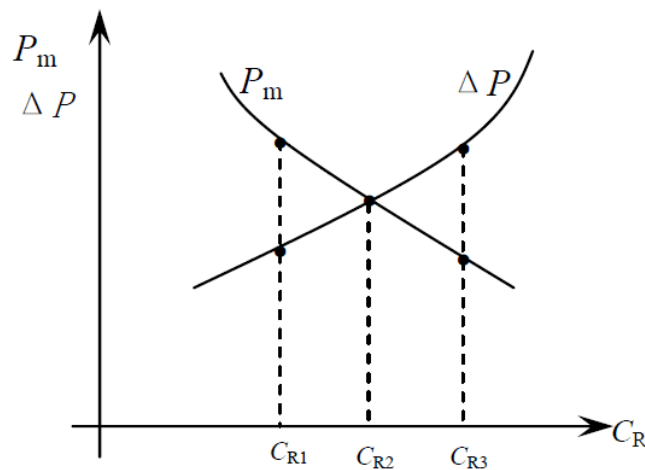


图 2: 用图解法计算循环倍率的曲线

1. 运动压头 P_m 的计算:

$$P_m = (\rho_l - \rho_g) g \varphi H_r$$

式中： H_r —上升空间含汽段高度；

ρ_l, ρ_g —分别表示饱和水和饱和汽的密度；

φ —表示上升空间平均截面含汽率。

2. 水循环总阻力 ΔP 的计算：

$$\text{总阻力 } \Delta P = \Delta P_d + \Delta P_r + \Delta P_s$$

其中： ΔP_d 、 ΔP_r 和 ΔP_s —分别表示下降空间、上升空间和分离器的阻力。

一般 $\Delta P_d \approx 10\% \Delta P$ ， ΔP_s

$$\text{而 } \Delta P_r = \Delta P_f + \Delta P_l + \Delta P_b + \Delta P_a$$

式中： ΔP_f ， ΔP_l ， ΔP_b ，和 ΔP_a 分别表示摩擦阻力、局部阻力、弯头区阻力和加速度阻力，可按相应的公式进行计算。

2.4 蒸汽发生器的强度计算

主要内容有：

1. 传热管的强度计算
2. 筒体的强度计算
3. 封头的强度计算
4. 管板的强度计算

2.4.1 传热管的强度计算

计算管壁厚度：

$$S' = \frac{P_{\text{设}} \cdot d_0}{200[\sigma] + 0.8P_{\text{设}}} \cdot \varphi \cdot \phi_R$$

式中： $P_{\text{设}}$ —设计压力(kg/cm^2)

d_o —管子外径(mm)

$[\sigma]$ —许用应力

φ —负公差修正系数，一般取 $\varphi = 1.102$

ϕ_R —弯曲减薄系数

$$\phi_R = 1 + \frac{d_o}{4R}$$

式中： R —弯曲半径，取最小节圆半径。

2.4.2 筒体的强度计算

计算筒体厚度

$$S' = \frac{P_{\text{设}} \cdot D_i}{200[\sigma] - 1 \cdot 2P_{\text{设}}} (mm)$$

式中： D_i —筒体内径 (mm)

2.4.3 封头的强度计算

计算壁厚

$$S' = \frac{P_{\text{设}} \cdot D_o}{400[\sigma] + 1 \cdot 6P_{\text{设}}} (mm)$$

式中： D_o —球型封头外径 (mm)

2.4.4 管板的强度计算

计算壁厚

$$S' = \frac{1}{2} \cdot F \cdot D \sqrt{\frac{P_{iz}}{[\sigma]}} (mm)$$

式中： F —系数，查 TEMA 标准 $F = 1.04$

D —水压部分直径 (mm)

2.5 蒸汽发生器的结构设计

主要完成下列工作：

1. 管束组件的结构设计
2. 衬筒的结构设计
3. 下筒体结构设计
4. 管板
5. 分离器组件
6. 给水管装置
7. 排污装置

2.5.1 管束组件的结构设计

确定流程数，完成传热管的排列，确定管束直径及高度，最佳高-径比一般取为 3；确定管子的固定支撑，确定隔板的数目和结构。

2.5.2 衬筒的结构设计

确定衬筒的几何形状和尺寸。

衬筒内径： $D_{wi} = D_{\text{管束}} + 2\delta_t$

式中： δ_t 为装配间隙，约 10 ~ 20mm。

衬筒外径： $D_{wo} = D_{wi} + 2\delta$

式中： δ 为衬筒壁厚，约 12mm。

2.5.3 下筒体结构设计

下筒体内径 $D_{i,\text{下}} = D_{wo} + 2B$

式中： B 为下降流道宽度，取为 88mm。

2.5.4 管板

确定开孔数及有关几何尺寸，确定堆焊层与筒体的连接。

2.5.5 分离器组件

采用三级汽水分离方式，但不做详细设计，其相应于循环倍率为 3,4,5 时的流动阻力人为设定为 $12600Pa$, $14900Pa$, $17090Pa$ 。

2.5.6 给水管装置

确定给水管的结构，布置及有关几何尺寸。

2.5.7 排污装置

确定排污管的结构、布置及有关几何尺寸。

3 结论与评价

3.1 结论

3.2 评价

按照设计要求，本次蒸汽发生器的设计完成了结构设计、热力计算、水动力计算、强度计算，但由于设计者经验上的不足和时间有限等原因，所设计的蒸汽发生器并不是十分满足要求。首先是“高径比”比较小，使得汽水的重力分离不能很好的起到作用，造成这一结果的原因可能是结构参数设计的不够合理。另外，一些经验值的选定不够合理，这主要是由于阅读的文献资料不足。当然，还有很多不尽人意之处，就不在这里赘述了，望读者见谅。

参考文献

- [1] 船舶核动力装置. 原子能出版社, 2009.

A 附录 1 蒸汽发生器热力计算表

表 1: 热平衡

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	一回路放热量	Q	kW	给定	2312.11
2	一回路工作压力	p_1	Pa	给定	15.0
3	一回路水进口温度	t_1'	$^{\circ}C$	给定	310
4	一回路水出口温度	t_1''	$^{\circ}C$	给定	290
5	一回路水平均温度	t_a	$^{\circ}C$	$\frac{1}{2}(t_1' + t_1'')$	300
6	一回路水进口焓	i_1'	kJ/kg	查表	1369.04
7	一回路水出口焓	i_1''	kJ/kg	查表	1285.82
8	蒸发器热效率	η		给定	0.99
9	一回路水流量	G_1	kg/s	$Q/\eta \cdot (i_1' - i_1'')$	2118.94
10	二回路工作压力	p_s	Pa	给定	5
11	二回路饱和温度	t_s	$^{\circ}C$	查表	264.0
12	二回路水饱和焓	i_s	kJ/kg	查表	1155.14
13	二回路给水温度	t_f	$^{\circ}C$	给定	220
14	二回路给水焓	i_f	kJ/kg	查表	944.88
15	汽化潜热	r	kJ/kg	查表	1639.04
16	蒸汽干度	x		给定	0.99
17	排放系数	C_s		给定	0.01
18	二回路蒸汽产量	D	kg/s	$\frac{Q}{rx+1.01(i_s-i_f)}$	126
19	二回路排污量	D_{bd}	kg/s	$C_s D$	1.26

表 2: 传热计算

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
20	传热管外径	d_o	kW	选定	0.022
21	传热管内径	d_i	Pa	选定	
22	单管流通面积	a	$^{\circ}C$	$\frac{1}{4}\pi d_i^2$	
23	U 型管数目	n	$^{\circ}C$	结构设计定	
24	一回路流通面积	A	$^{\circ}C$	$n \cdot a$	
25	一回路水平均比容	\bar{v}_1	kJ/kg	查表	
26	一回路水流速	u_1	kJ/kg	$G_1 \bar{v}_1 / A$	
27	一回路水导热系数	λ_1		查表	
28	一回路水动力粘度	η_1	kg/s	查表	
29	一回路水普朗特数	Pr_f	Pa	查表	
30	一回路水雷诺数	Re_f	$^{\circ}C$	$u_1 d_i / \eta_1 \bar{v}_1$	
31	一回路侧放热系数	α_1	kJ/kg	$0.023 \frac{\lambda_1}{d_i} Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4}$	
32	传热管导热系数	λ_w	$^{\circ}C$	给定	
33	传热管壁热阻	R_w	kJ/kg	$R_W = \frac{d_o}{2\lambda_w} \ln \frac{d_o}{d_i}$	
34	污垢热阻	R_f	kJ/kg	按 Inconel—600 选定	
35	二回路侧放热系数	α_2		$\alpha_2 = 0.557 p_s^{0.15} q^{0.7}$	
36	传热系数	k		$\frac{1}{k} = \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{\alpha_i} + R_w + \frac{1}{\alpha_o} + R_f$	
37	大端温差	Δt_{max}	kg/s	$t'_1 - T_s$	
38	小端温差	Δt_{min}	kg/s	$t''_1 - T_s$	
39	对数平均温差	Δt_{ln}		$\frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln(\Delta t_{max} / \Delta t_{min})}$	
40	热负荷	q		$q \cdot \Delta t_{in}$	
41	计算传热面积	F		$Q / (10^{-3} q)$	
42	传热裕度系数			选定	
43	设计传热面积	$F_{设}$	m^2	$C \cdot F$	

表 3: 管束结构

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	传热管总长	$L_{\text{总}}$	m	$F_{\text{设}}/\pi d_o$	
2	排列方式			正方形	
3	节距	t	m	选定	
4	最小 U 型管节园直径	$D_{\text{节}}$	m	$4t$	
5	实际布管数	n	根	结构设计定	
6	管束直径	D_{tb}	m	结构设计定	
7	弯管总长	$L_{\text{弯}}$	m	结构设计定	
8	直管总长	$L_{\text{直}}$	m	$L_{\text{总}} - L_{\text{弯}}$	
9	管束直段高	$H_{\text{直}}$	m	$L_{\text{直}}/2n$	
10	管束弯段高	$H_{\text{弯}}$	m	R_{max}	
11	管束总高	H_{tb}	m	$H_{\text{直}} + H_{\text{弯}}$	
12	传热管实际平均长度	l	m	$(L_{\text{总}}/n) + 2 \text{ 管板厚}$	
13	最长管子长	l_{max}	m	$\pi R_{\text{max}} + 2H_{\text{直}} + 2 \text{ 管板厚}$	
14	最短管子长	l_{min}	m	$\pi R_{\text{min}} + 2H_{\text{直}} + 2 \text{ 管板厚}$	

表 4: 主要管道内径

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	冷却剂平均比容	\bar{v}_1	m^3/kg	查表	
2	主管道计算流速	u'_{10}	m/s	选取: $8 \sim 12m/s$	
3	主管道计算内径	d'_{1i}	m	$\sqrt{4G_1\bar{v}_1/\pi u'_{10}}$	
4	主管道设计内径	d_{1i}	m	选取	
5	主管道设计流速	u_{10}	m/s	$4G_1\bar{v}_1/\pi d_{1i}^2$	
6	新蒸汽比容	v_2	m^3/kg	$v''x + v'(1-x)$	
7	蒸汽管计算流速	u'_2	m/s	选取: $30 \sim 40m/s$	
8	蒸汽管计算内径	d'_{2i}	m	$\sqrt{4G_2\bar{v}_2/\pi u'_2}$	
9	蒸汽管设计内径	d_{2i}	m	选取	
10	蒸汽管设计流速	u_2	m/s	$4G_2v_2/\pi d_{2i}^2$	
11	二回路给水比容	v_3	m^3/kg	查表	
12	给水管计算流速	u'_3	m/s	选取: $2 \sim 5m/s$	
13	给水管计算内径	d'_{3i}	m	$\sqrt{4G_3v_3/\pi u'_3}$	
14	给水管设计内径	d_{3i}	m	选取	
15	给水管设计流速	u_3	m/s	$4G_3v_3/\pi \cdot d_{3i}^2$	

B 附录 2 蒸汽发生器水力计算表

B.1 一回路水阻力计算

表 5: U 型管内摩擦阻力计算

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	传热管实际平均长度	l	m	结构设计	
2	当量直径	d_i	m	结构设计	
3	一回路水流量	G_1	kg/s	热工计算定	
4	一回路水平均比容	\bar{v}_1	m^3/kg	查表	
5	一回路水流速	u_1	m/s	热工计算定	
6	考虑堵管后流速	u'_1	m/s	$1.05u_1$	
7	一回路水雷诺数	Re	$\frac{u'_1 d_i}{\eta_1 \bar{v}_1}$	热工计算定	
8	摩擦阻力系数	λ		$0.3164Re^{-0.25}$	
9	平均温度下动力粘度	η_1	$kg/m \cdot s$	查表	
10	壁温下动力粘度	η'_1	$kg/m \cdot s$	按 $\frac{1}{2}(t_a + t_s)$ 查表	
11	温度修正系数	φ		$(\eta_1/\eta'_1)^{0.14}$	
12	摩擦阻力	ΔP_f	Pa	$\lambda \cdot \frac{H_{\text{直}}}{de} \cdot \frac{u'^2_1}{\varphi \bar{v}_1}$	

表 6: 局部阻力计算

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
13	下封头内径	D_1	m	结构设计定	
14	水室截面积	F_c	m^2	$\frac{\pi}{8} D_1^2$	
15	进口管内径	d_{1i}	m	选定	
16	进口管截面积	A_1	m^2	$\frac{\pi}{4} \cdot d_{1i}^2$	
17	比值			A_1/F_c	
18	突扩阻力系数	ξ_1		查表	
19	一回路水入口处比容	v_{1i}	m^3/kg	查表	
20	一回路水入口处密度	ρ_{1i}	kg/m^3	$1/v_{1i}$	
21	入口管内流速	u_{1i}	m/s	热工计算定	
22	从入口管至水室阻力	ΔP_1	Pa	$\xi_1 \cdot \frac{u_{1i}^2 \cdot \rho_{1i}}{2}$	
23	水室转弯 45° 阻力系数	ξ_2		查表	
24	水室转弯 45° 阻力	ΔP_2	Pa	$\xi_2 \cdot \frac{u_{1i}^2 \cdot \rho_{1i}}{2}$	
25	传热管流道截面	A	m^2	热工计算定	
26	考虑有堵管后截面	A'	m^2	$A/1.05$	
27	系数			A'/F_c	
28	传热管入口阻力系数	ξ_3		查表	
29	传热管入口阻力	ΔP_3	Pa	$\xi_3 \cdot \frac{u_{1i}^2 \cdot \rho_{1i}}{2}$	
30	U 型管转 180° 阻力系数	ξ_4		查表	
31	U 型管转 180° 阻力	ΔP_4	Pa	$\xi_4 \cdot \frac{u_{1i}^2 \cdot \rho_{1i}}{2}$	
32	传热管出口阻力系数	ξ_5		查表	
33	出口处水比容	v_2	m^3/kg	查表	
34	出口处水密度	ρ_2	kg/m^3	$1/v_2$	
35	传热管出口阻力	ΔP_5	Pa	$\xi_5 \cdot \frac{u_{1i}^2 \cdot \rho_2}{2}$	
36	出口管内流速	u_2	m/s	$G_1 v_2 / A_1$	
37	水室转弯阻力系数	ξ_6		查表	
38	水室转弯阻力	ΔP_6	Pa	$\xi_6 \cdot \frac{u_2 \rho_2}{2}$	
39	出口管突缩阻力系数	ξ_7		查表	
40	出口管突缩阻力	ΔP_7	Pa	$\xi_7 \cdot \frac{u_2^2 \rho_2}{2}$	

表 7: 总阻力

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
41	总阻力	ΔP	Pa	$\Delta P_f + \sum_{i=1}^7 \Delta P_i$	
42	设计阻力	$\Delta P_{\text{设}}$	Pa	$1.1 \Delta P$	

B.2 二回路水循环阻力计算

B.2.1 下降空间阻力

表 8: 下降空间阻力

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	循环倍率	C_R		假定	
2	给水温度	t_f	$^{\circ}C$	给定	
3	二回路饱和温度	t_s	$^{\circ}C$	查表	
4	下降空间水比容	v_d	m^3/kg	近似取饱和比容	
5	下降空间水密度	ρ_d	kg/m^3	$\frac{1}{v_d}$	
6	入口阻力系数	ξ_{in}		选取	
7	出口阻力系数	ξ_{out}		选取	
8	定位装置阻力系数	ξ_f		选取	
9	下降空间高度	H_0	m	结构设计定	
10	套筒外径	D_{w0}	m	结构设计定	
11	下筒体内径	D_{si}	m	结构设计定	
12	下降空间当量直径	D_{si}	m	$D_{si} - D_{wo}$	
13	绝对粗糙度	Δ	m	选定	
14	摩擦系数	λ_d		$\frac{1}{(1.74+21g\frac{D_e}{2\Delta})^2}$	
15	下降空间截面积	F_d	m^2	$\frac{\pi}{4}(D_{si}^2 - D_{wo}^2)$	
16	下降空间水流速	u_d	m/s	$C_R \cdot D \cdot v_d / F_d$	
17	下降空间阻力	ΔP_d	Pa	$(\lambda \frac{H_0}{D_e} + \sum \xi) \frac{u_d^2 \cdot \rho_d}{2}$	

B.2.2 上升空间阻力

表 9: 摩擦阻力

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	饱和水比容	v'	m^3/kg	查表	
2	饱和水密度	ρ'	kg/m^3	$1/v'$	
3	饱和蒸汽比容	v''	m^3/kg	查表	
4	饱和蒸汽密度	ρ''	kg/m^3	$1/v''$	
5	套筒内径	D_{w1}	m	结构设计定	
6	传热管外径	d_0	m	热工计算定	
7	支撑板定位拉杆数量	n'	根	结构设计定	
8	上升空间流通面积	F_u	m^2	$\frac{\pi}{4}[D_{w1}^2 - (2n + n')d_o^2]$	
9	上升空间当量直径	de	m	$\frac{4F_u}{\pi[D_{wi} + (2n + n')d_o]}$	
10	循环速度	u_o	m/s	$\frac{C_R D v'}{F_u}$	
11	出口水相折算速度	u'_{o2}	m/s	$\frac{(C_R - 1) D v'}{F_u}$	
12	水相平均折算速度	$\overline{u'_o}$	m/s	$\frac{1}{2}(u_o + u'_{o2})$	
13	出口汽相折算速度	u''_{o2}	m/s	$D v'' / F_u$	
14	汽相平均折算速度	$\overline{u''_o}$		$\frac{1}{2}u''_{o2}$	
15	水相运动粘度	v_1	m^2/s	查表	
16	汽相运动粘度	v_g	m^2/s	查表	
17	水相雷诺数	Re_{lo}		$\overline{u'_o} de / v_l$	
18	汽相雷诺数	Re_{go}		$\overline{u''_o} de / v_g$	
19	判别流态			临界值: 1000	
20	管束直段高	H_s	m	结构设计定	
21	水相摩阻系数	λ_{lo}		$0.3164 Re_{lo}^{-0.25}$	
22	汽相摩阻系数	λ_{go}		$0.3164 Re_{go}^{-0.25}$	
23	按折算速度计算的水相摩擦阻力	$(\Delta P_f)_{lo}$	Pa	$\lambda_{lo} \frac{H_s}{de} \frac{\overline{u'^o_2}^2 \cdot \rho'}{2}$	
24	按折算速度计算的汽相摩擦阻力	$(\Delta P_f)_{go}$	Pa	$\frac{1}{3} \lambda_{lo} \frac{H_s}{de} \frac{\overline{u''_o}^2 \cdot \rho''}{2}$	
25	参量 X			$\sqrt{(\Delta P_f)_{lo} / (\Delta P_f)_{go}}$	
26	Φ_l^2			查图或计算	
27	Φ_g^2			查图或计算	
28	水相摩擦阻力	$(\Delta P_f)_l$	Pa	$\Phi_l^2 \cdot (\Delta P_f)_{lo}$	
29	汽相摩擦阻力	$(\Delta P_f)_g$	Pa	$\Phi_g^2 \cdot (\Delta P_f)_{go}$	
30	摩擦阻力	ΔP_f	Pa	$[(\Delta P_f)_l + (\Delta P_f)_g] / 2$	

表 10: 局部阻力

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	支撑板数目	N	个	结构设计定	
2	上升流道单元面积	A_u	mm^2	结构设计定	
3	支撑板单元开孔面积	a_u	mm^2	结构设计定	
4	面积比			a_u/A_u	
5	局部阻力系数	ξ_l		查图	
6	按折算速度计算的水相局部阻力	$(\Delta P_l)_{lo}$	Pa	$N\xi_l \frac{u_o'^2 \cdot \rho'}{2}$	
7	按折算速度计算的汽相局部阻力	$(\Delta P_l)_{go}$	Pa	$\frac{1}{3}N\xi_l \frac{u_o''^2 \cdot \rho''}{2}$	
8	参量 X			$\sqrt{(\Delta P_l)_{lo}/(\Delta P_l)_{go}}$	
9	二回路工作压力	p_s	Pa	给定	
10	临界压力	p_c	Pa	查水蒸汽表	
11	参数 Z_R			$(0.19 + 0.92 \frac{p_s}{p_c})^{-1}$	
12	参数 K			$Z_R + \frac{1}{Z_R}$	
13	Φ_l^2			$1 + \frac{K}{X} + \frac{1}{X^2}$	
14	Φ_g^2			$1 + KX + X^2$	
15	水相局部阻力	$(\Delta P_l)_l$	Pa	$\Phi_l^2 \cdot (\Delta P_l)_{lo}$	
16	汽相局部阻力	$(\Delta P_l)_g$	Pa	$\Phi_g^2 \cdot (\Delta P_l)_{go}$	
17	局部阻力	ΔP_l	Pa	$[(\Delta P_l)_l + (\Delta P_l)_g]/2$	

表 11: 弯管区阻力

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	管束弯头最大节园直径	d_b	m	结构设计定	
2	弯管区重心至园心距离	y_s	m	$0.2122d_b$	
3	节距	t	m	结构设计定	
4	计算冲刷排数	N'		$\frac{y_s}{t} - 1$ (取整数)	
5	系数	$x_1 = x_2$		t/d_o	
6	系数	n		$0.43 + \frac{1.13}{x_1}$	
7	水相雷诺数	Re_{lo}		$u'_{o2}de/v_l$	
8	汽相雷诺数	Re_{go}		$u''_{o2}de/v_g$	
9	水相磨擦阻力系数	λ_{lo}		$4 \left[0.044 + \frac{0.08x_2}{(x_1-1)^n} \right] Re_{lo}^{-0.15}$	
10	汽相磨擦阻力系数	λ_{go}		$4 \left[0.044 + \frac{0.08x_2}{(x_1-1)^n} \right] Re_{go}^{-0.15}$	
11	水相阻力	$(\Delta P_b)_{lo}$		$N' \lambda_{lo} \cdot \frac{u'_{o2} \rho'}{2}$	
12	汽相阻力	$(\Delta P_b)_{go}$		$\frac{1}{3} N' \lambda_{go} \cdot \frac{u''_{o2} \rho''}{2}$	
13	参量 X			$\sqrt{(\Delta P_b)_{lo}/(\Delta P_b)_{go}}$	
14	Φ_{lo}^2			查图或计算 (同摩擦阻力)	
15	Φ_{go}^2			查图或计算 (同摩擦阻力)	
16	水相阻力	$(\Delta P_b)_l$		$\Phi_{lo}^2 \cdot (\Delta P_b)_l$	
17	汽相阻力	$(\Delta P_b)_g$		$\Phi_{go}^2 \cdot (\Delta P_b)_g$	
18	弯管区阻力	ΔP_b		$[(\Delta P_b)_l + (\Delta P_b)_g]/2$	

表 12: 加速阻力

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	管束出口质量含汽率	x_2		$1/C_R$	
2	管束出口体积含汽率	β_2		$\frac{x_2/\rho''}{x_2/\rho'' + (1-x_2)/\rho'}$	
3	系数	C		$0.833 + 0.05 \ln(\frac{p_s}{10^6})$	
4	管束出口截面含汽率	ϕ_2		$C\beta_2$	
5	质量流速	\dot{G}	kg/m^2s	$u_o \rho'$	
6	加速阻力	Δp_a	Pa	$\dot{G}^2 \left[\frac{(1-x_2)^2}{\rho'(1-\phi_2)} + \frac{x_2^2}{\rho''\phi_2} - \frac{1}{\rho'} \right]$	

表 13: 流量分配孔阻力

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	单元面积	A'_u	mm^2	结构设计定	
2	单元开孔面积	a'_u	mm^2	结构设计定	
3	系数			a'_u/A'_u	
4	阻力系数	ξ_h		查文献	
5	孔板局部阻力	ΔP_h	Pa	$\xi_h \frac{u_0^2 \rho'}{2}$	

表 14: 上升空间阻力

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	上升空间阻力	ΔP_r	Pa	$\Delta P_f + \Delta P_l + \Delta P_b + \Delta P_a + \Delta P_h$	

B.2.3 汽水分离器阻力

表 15: 汽水分离器阻力

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	汽水分离器阻力	ΔP_s	Pa		

B.2.4 循环总阻力

表 16: 循环总阻力

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	循环总阻力	$\Delta P_{\text{总}}$	Pa	$\Delta P_d + \Delta P_r + \Delta P_s$	

B.3 运动压头计算

表 17: 预热段高度计算

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	循环倍率	C_R		假定	
2	二回路给水焓	i_f	J/kg	查表	
3	二回路饱和水焓	i_s	J/kg	查表	
4	液面高度	H_o	m	结构设计定	
5	下降空间水密度	ρ_d	kg/m^3	取 $\rho_d = r h o'$	
6	下降空间下端压力	p_{low}	Pa	$p_s + g \rho_d H_o$	
7	p_{low} 压力下的饱和水焓	i_{sl}	J/kg	查表	
8	$\Delta i / \Delta P$		$\frac{J}{kg \cdot Pa}$	$(i_{sl} - i_s) / (p_{low} - p_s)$	
9	热负荷	q	W/m^2	热工计算定	
10	循环水量	G	kg/s	$C_R \cdot D$	
11	预热段高度	H_p	m	$\frac{\frac{i_s - i_f}{C_R} + \frac{\Delta i}{\Delta P} (\rho_d g H_o - \Delta P_d)}{\frac{2\pi d_o n q}{G} + \frac{\Delta i}{\Delta P} \rho_d g}$	

表 18: 运动压头计算

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	蒸发段高度	H_{r1}	m	$H_{tb} - H_P$	
2	管束上方区段高度	H_{r2}	m	$H_o - H_{tb}$	
3	蒸发段平均质量含汽率	\bar{x}_1		$x_2 / 2$	
4	蒸发段平均体积含汽率	$\bar{\beta}_1$		$\frac{\bar{x}_1 / \rho''}{\bar{x}_1 / \rho'' + (1 - \bar{x}_1) / \rho'}$	
5	蒸发段平均截面含汽率	$\bar{\phi}_1$		$C \bar{\beta}_1$	
6	管束上方区段平均截面含汽率	$\bar{\phi}_2$		$\bar{\phi}_2 = \phi_2$	
7	蒸发段运动压头	P_{m1}	Pa	$(\rho' - \rho'') g \bar{\phi}_1 H_{r1}$	
8	管束上方区段压头	P_{m2}	Pa	$(\rho' - \rho'') g \bar{\phi}_2 H_{r2}$	
9	运动压头	P_m	Pa	$P_{m1} + P_{m2}$	

C 附录 3 蒸汽发生器强度计算表

C.1 传热管

表 19: 传热管

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	设计压力	$P_{\text{设}1}$	kg/cm^2	选定	
2	许用应力	$[\sigma]$	kg/mm^2	查表	
3	管子外径	d_o	mm	选定	
4	直管计算壁厚	S''	mm	$\frac{P_{\text{设}1} \cdot d_o}{200[\sigma] + 0.8P_{\text{设}1}}$	
5	负公差修正系数	ϕ		技术条件测定	
6	弯曲减薄系数	Φ_R		$1 + d_o/4R$	
7	计算壁厚	S'	mm	$S'' \cdot \phi \cdot \Phi_R$	
8	设计壁厚	S	mm	选取	

C.2 下筒体

表 20: 下筒体

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	设计压力	$P_{\text{设},2}$	kg/cm^2	选定	
2	许用应力	$[\sigma]$	kg/mm^2	查表	
3	筒体内径	$D_{i,\text{下}}$	mm	结构设计定	
4	设计壁厚	S'	mm	$\frac{P_{\text{设}2} \cdot D_i}{200[\sigma] - 1.2P_{\text{设}2}}$	
5	设计壁厚	S	mm	选定	
6	筒体外径	$D_{o,\text{下}}$	mm	$D_{i,\text{下}} + 2S$	
7	与管板连接壁厚	S_I	mm	选定	

C.3 上筒体

表 21: 上筒体

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	设计压力	$P_{\text{设},2}$	kg/cm^2	选定	
2	许用应力	$[\sigma]$	kg/mm^2	查表	
3	筒体内径	$D_{i,\text{下}}$	mm	结构设计定	
4	设计壁厚	S'	mm	$\frac{P_{\text{设}2} \cdot D_{i\text{上}}}{200[\sigma] - 1.2P_{\text{设}2}}$	
5	设计壁厚	S	mm	选定	

C.4 球形下封头

表 22: 球形下封头

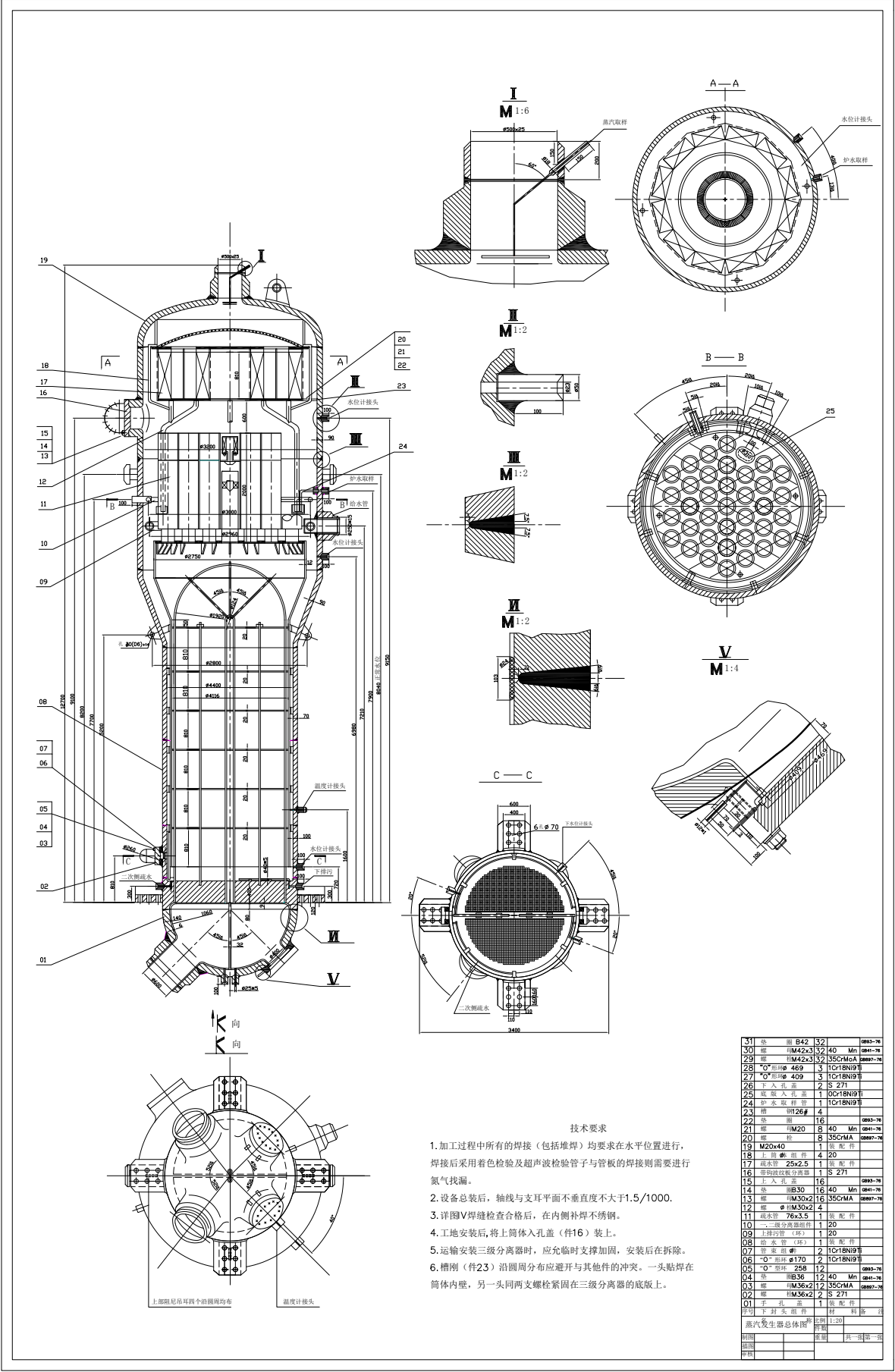
序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	设计压力	$P_{\text{设},1}$	kg/cm^2	选定	
2	许用应力	$[\sigma]$	kg/mm^2	查表	
3	球形封头外径	D_o	mm	结构设计定	
4	计算壁厚	S'	mm	$\frac{P_{\text{设}1} \cdot D_o}{400[\sigma] + 1.6P_{\text{设}1}}$	
5	设计壁厚	S	mm	选取	

C.5 管板

表 23: 管板

序号	项目	符号	单位	公式及来源	数值
1	设计压力	$P_{\text{设},2}$	kg/cm^2	选定	
2	许用应力	$[\sigma]$	kg/mm^2	查表	
3	承压部分直径	D	mm	结构设计定	
4	筒体根部壁厚与直径比			S/D	
5	系数	F		查 TEMA 标准	
6	计算壁厚	S'	mm	$\frac{1}{2}FD\sqrt{P_{\text{设}}/[\sigma]}$	
7	设计壁厚	S	mm	选取	
8	堆焊层厚度	S'	mm	选取	

D 附图 1 蒸发器总图



E 附图 2 蒸发器部件图

E.1 蒸汽发生器主体

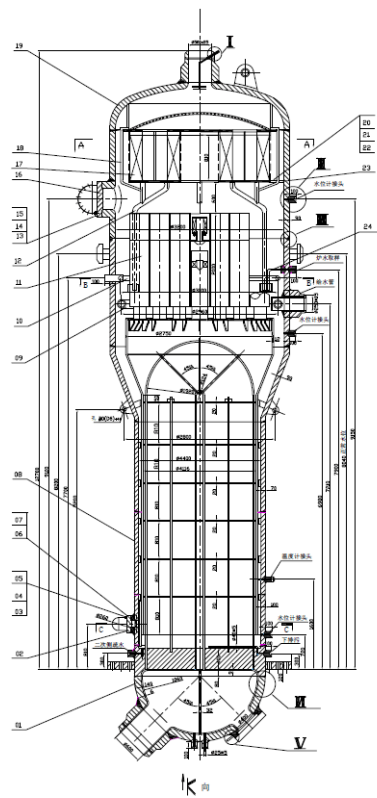


图 3: 蒸汽发生器主体

E.2 蒸汽发生器俯视图

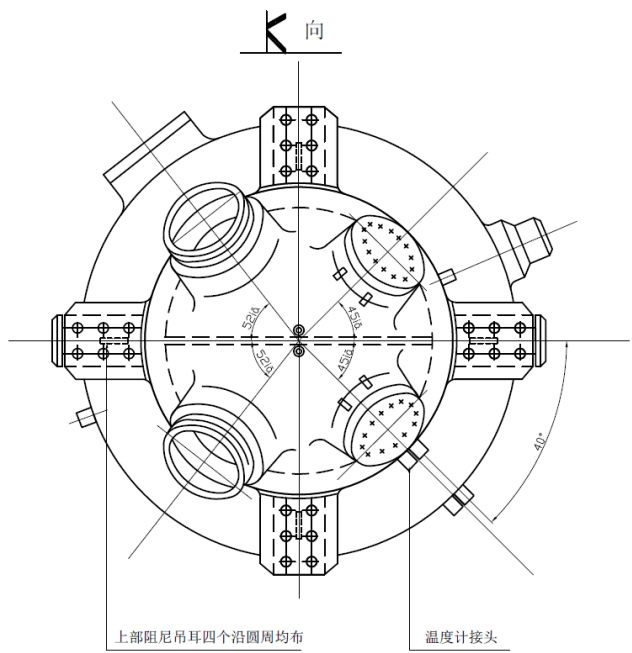


图 4: 蒸汽发生器俯视图

E.3 蒸汽发生器顶部剖面

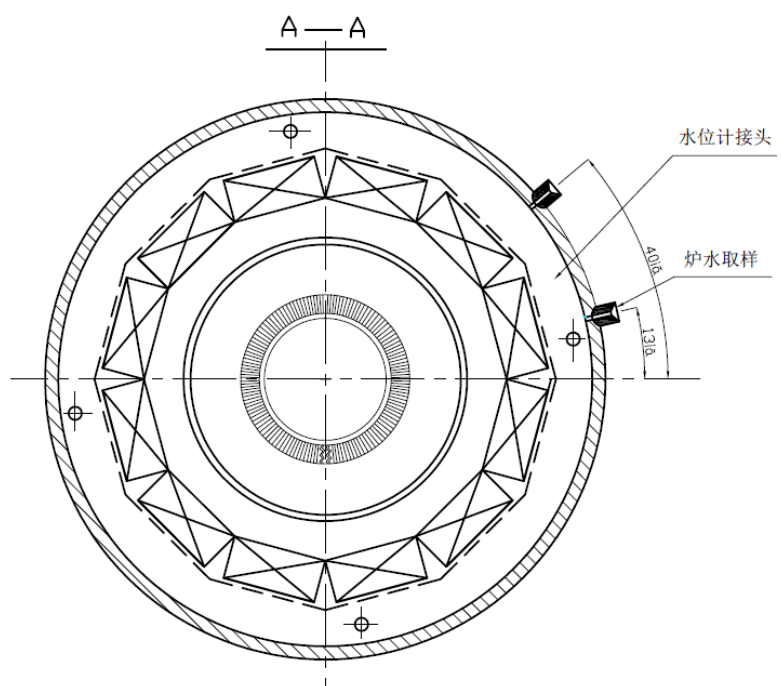


图 5: 蒸汽发生器顶部剖面

E.4 蒸汽发生器中部剖面

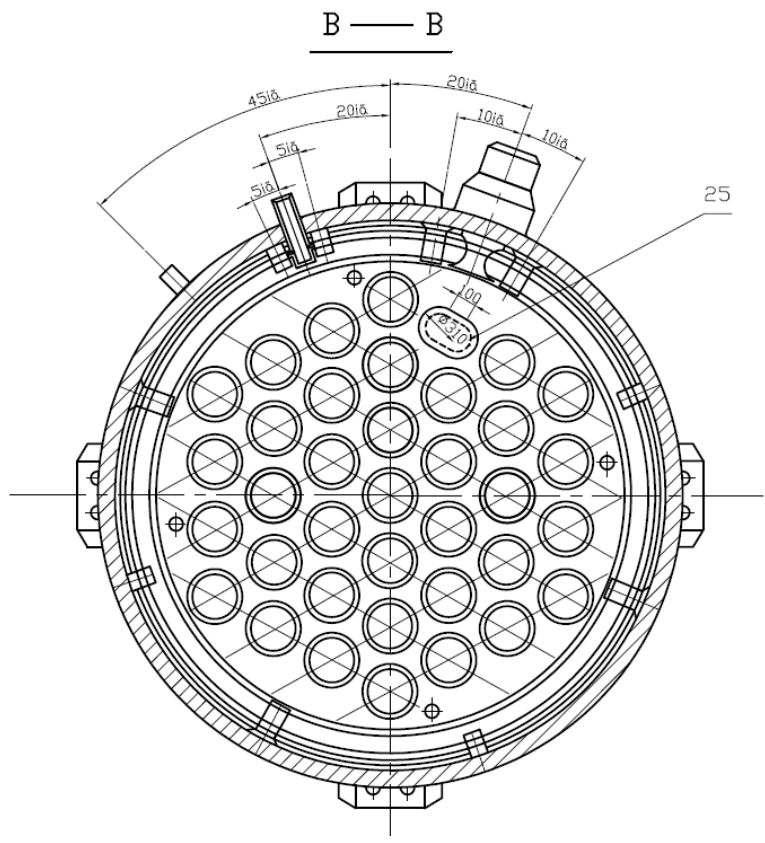


图 6: 蒸汽发生器中部剖面

E.5 蒸汽发生器底部剖面

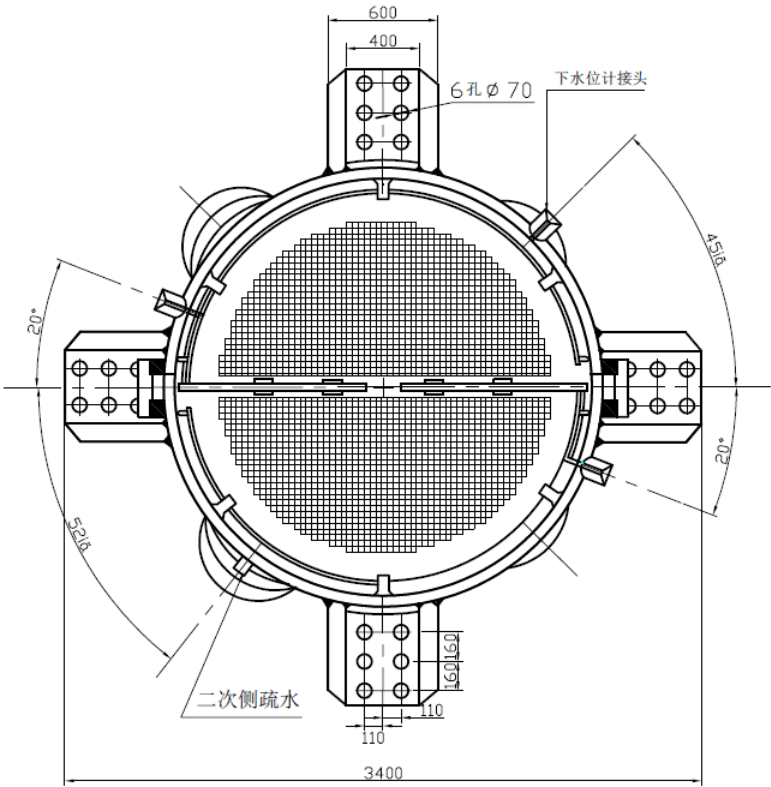


图 7: 蒸汽发生器底部剖面

E.6 蒸发发生器局部切面

