



中华人民共和国石油化工行业标准

SH/T 3158—2009

石油化工管壳式余热锅炉

Tubular waste heat boiler in petrochemical industry



2009-12-04 发布

2010-06-01 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

目 次

前言.....III

1 范围.....1

2 规范性引用文件.....1

3 总则.....2

4 设计基础.....2

4.1 设计压力.....2

4.2 设计温度.....2

4.3 载荷.....2

4.4 厚度附加量.....2

4.5 许用应力.....3

5 材料.....3

5.1 选材原则.....3

5.2 钢板.....3

5.3 钢管.....4

5.4 锻件.....4

5.5 保护套管.....4

5.6 受压元件常用材料使用的温度范围.....4

5.7 焊接材料.....5

5.8 非金属材料.....5

6 设计计算.....5

6.1 一般规定.....5

6.2 符号.....5

6.3 许用压力.....6

6.4 计算壁温.....8

6.5 折边挠性管板计算.....8

6.6 换热管计算.....9

6.7 换热管与管板连接焊缝剪切强度的计算.....10

6.8 换热管轴向稳定校核计算.....10

6.9 管箱壳与锅炉壳程筒体相连的环形件计算.....11

6.10 管箱非金属衬里厚度的计算.....11

7 结构设计.....11

7.1 主要元件及名称.....11

7.2 筒体及封头.....11

7.3 接管及开孔补强.....12

7.4 人孔.....12

7.5 支座.....13

7.6 管板.....13

7.7 换热管与管板的连接.....14

7.8 中心管与管板的连接.....15

7.9 管板及管箱筒体与壳程筒体的连接.....15

7.10 高温侧管板及管头的热防护.....16

7.11 支持板.....17

7.12 管箱.....18

7.13 中心管衬里.....19

7.14 汽包内部装置.....19

7.15 安全泄放装置.....19

7.16 保护装置.....19

8 制造、检验与验收.....19

8.1 管板.....19

8.2 换热管.....20

8.3 汽包内部装置.....20

8.4 余热锅炉的组装与安装.....20

8.5 无损检测.....21

8.6 焊后热处理.....21

8.7 压力试验.....21

8.8 非金属衬里的施工与检验.....21

8.9 其他.....21

用词说明.....22

附：条文说明.....23

前 言

本标准是根据国家发展和改革委员会办公厅《2006 年行业标准项目计划》(发改办工业[2006]1093 号),由中国石油化工集团公司组织山东三维石化工程股份有限公司和中国石化工程建设公司共同编制。

本标准共分 7 章。

主要内容包括石油化工管壳式余热锅炉的材料选择、设计计算、结构设计、制造、检验、安装和验收。

本标准由中国石油化工集团公司设备设计技术中心站管理,由山东三维石化工程股份有限公司负责解释。

本标准在实施过程中,如发现需要修改或补充之处,请将意见和有关资料提供给管理单位和主编单位,以便今后修订时参考。

管理单位:中国石油化工集团公司设备设计技术中心站

通信地址:北京市朝阳区安慧北里安园 21 号

邮政编码:100101

电 话:010—84877587

传 真:010—84878856

主编单位:山东三维石化工程股份有限公司

公司总部通信地址:山东省淄博市临淄区炼厂中路 22 号

邮政编码:255434

青岛分公司通信地址:山东省青岛市山东路 2 号甲华仁大厦 4 层

邮政编码:266071

主编单位:中国石化工程建设公司

通信地址:北京市朝阳区安慧北里安园 21 号

邮政编码:100101

主要起草人:何智灵 王春江 初宜军 杨本智 伍志毅 张迎恺

主要审查人:段瑞 周家祥 林衡 杨盛启 韩玉梅 勾世文 谢东 杨一凡 李樟三 陈奎显
薛玉生

本标准为首次发布。

石油化工管壳式余热锅炉

1 范围

本标准规定了石油化工管壳式余热锅炉的材料选择、设计计算、结构设计、制造、检验、安装和验收的要求。

本标准适用于石油化工装置中设计压力不大于 6.4MPa, 由锅炉和汽包组成的卧置挠性固定薄管板管壳式余热锅炉(简称余热锅炉)的设计、制造、检验和验收。对未设置汽包, 但壳程内设有蒸发空间、管板上布满换热管的挠性固定薄管板式蒸汽发生器, 其管板、换热管可按本标准进行设计计算。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件, 其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准, 然而, 鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件, 其最新版本适用于本标准。

GB 150 钢制压力容器

GB 151 管壳式换热器

GB/T 699 优质碳素结构钢

GB 1576—2008 工业锅炉水质

GB/T 1804 一般公差 未注公差的线性尺寸和角度尺寸的公差

GB/T 3077 合金结构钢

GB 3087 低中压锅炉用无缝钢管

GB 5310 高压锅炉用无缝钢管

GB 713 锅炉和压力容器用钢板

GB/T 8163 输送流体用无缝钢管

GB/T 8923 涂装前钢板表面锈蚀等级和除锈等级

GB 9948 石油裂化用无缝钢管

HG/T 20525 化学工业管式炉传热计算设计规定

HG 20582 钢制化工容器强度计算规定

JB/T 3191—1999 锅炉锅筒内部装置 技术条件

JB/T 4709 钢制压力容器焊接规程

JB/T 4711 压力容器涂敷与运输包装

JB/T 4712.1 鞍式支座

JB 4726 压力容器用碳素钢和低合金钢锻件

JB/T 4730.1~4730.6 承压设备无损检测

JB/T 4731 钢制卧式容器

JB/T 4747 压力容器用钢焊条订货技术条件

JB/T 9618—1999 工业锅炉锅筒内部装置设计导则

SH/T 3074 石油化工钢制压力容器

SH/T 3075 石油化工钢制压力容器材料选用标准

SH/T 3115 石油化工管式炉轻质浇注料衬里工程技术条件

SH 3534 石油化工筑炉工程施工及验收规范

3 总则

- 3.1 余热锅炉的设计、制造、检验和验收除执行本标准外，还应符合 GB 150、GB 151、《压力容器安全技术监察规程》及国家颁布的其他有关法规和规章的规定。
- 3.2 本标准未包括的特殊要求，均应在设计文件中注明。

4 设计基础

4.1 设计压力

- 4.1.1 余热锅炉设计压力的确定应符合 GB 150、GB 151 和 SH/T 3074 的规定。当工程设计有规定时，其设计压力应符合有关规定。
- 4.1.2 锅炉壳程及汽包的工作压力相同，为饱和蒸汽压力。

4.2 设计温度

- 4.2.1 余热锅炉的设计温度系指锅炉在正常工作情况下，设定元件的金属温度。当各元件在工作状态下的金属温度不同时，可分别设定每一元件的设计温度。
- 4.2.2 锅炉无隔热衬里的管箱壳体及法兰、接管、与锅炉壳程筒体相连的环形件等受压元件，其设计温度应按表 1 确定。

表 1 设计温度

单位：℃

最高工作温度 T_w	设计温度 T
$250 \leq T_w \leq 350$	$T \geq T_w + 20$
$T_w > 350$	$T \geq T_w + (15 \sim 5)$

- 4.2.3 对带有非金属隔热衬里的管箱壳体、接管、法兰、与锅炉壳程筒体相连的环形件，在无可靠的传热计算或经验数据的情况下进行强度计算时，其设计温度取 350℃；在确定非金属隔热衬里厚度时，其设计温度应高于管程介质的露点温度。
- 4.2.4 不与管程介质接触的锅炉壳程筒体、汽包壳体及接管、法兰等元件，其设计温度取设计压力（绝）下对应的饱和蒸汽温度。
- 4.2.5 管板、换热管及中心管的设计温度（即计算壁温）见本标准第 6.4 条的规定。
- 4.2.6 除本标准规定外，设计温度的确定还应符合 GB 150、GB 151 和 SH/T 3074 的规定。
- 4.3 载荷
- 4.3.1 设计时应考虑以下载荷：
- a) 压力；
 - b) 液柱静压力（当液柱静压力小于 5% 设计压力时可忽略不计）。
- 4.3.2 需要时，还应考虑以下载荷：
- a) 锅炉、汽包自重（包括内构件），以及正常工作条件下或试压状态下内装液体的重力载荷；
 - b) 附属设备、保温材料、扶梯、平台等集中及均布重力载荷；
 - c) 地震载荷；
 - d) 支座的反作用力；
 - e) 管道外载荷（管道推力和力矩）；
 - f) 由于热胀量或线胀系数的不同引起的作用力；
 - g) 运输或吊装时的作用力。

4.4 厚度附加量

4.4.1 厚度附加量应按式 (1) 确定:

$C = C_1 + C_2 \dots\dots\dots (1)$

式中:

- C —— 厚度附加量, mm;
- C₁ —— 厚度负偏差, mm;
- C₂ —— 腐蚀裕量, mm.

- 4.4.2 钢板或钢管的厚度负偏差应符合钢材标准的规定。当钢材的厚度负偏差不大于 0.3mm, 且不超过名义厚度的 6%时, 负偏差可忽略不计。
- 4.4.3 腐蚀裕量可按 4.4.3.1 至 4.4.3.3 条的规定确定。
- 4.4.3.1 与工作介质接触的筒体、封头、接管、人(手)孔及内部构件等均应考虑腐蚀裕量。不锈钢、法兰密封面及用涂漆可有效防止环境腐蚀的壳体外表面(不包括支座)可不考虑腐蚀裕量。
- 4.4.3.2 腐蚀裕量应根据金属材料在介质中的腐蚀速率 (mm/a) 与设计寿命 (a) 的乘积来确定。腐蚀速率可根据工程设计实践或查取有关腐蚀手册确定。
- 4.4.3.3 余热锅炉主要元件腐蚀裕量可按表 2 选取, 但腐蚀裕量不宜大于 6mm, 否则应更换成耐腐蚀材料或采取其他防腐措施。

表 2 腐蚀裕量的选取

元件类型		腐蚀裕量 C ₂ mm
汽包壳体、封头、锅炉壳程筒体		1.5~2
管箱	腐蚀速率 mm/a	≤0.1
		>0.1~0.2
		>0.2~0.3
管板		取管箱、壳程壳体腐蚀裕量之和
换热管		不小于 1
接管 (包括人、手孔等)		除工程设计另有规定外, 应分别取管箱、壳程壳体的腐蚀裕量
内部固定件		取筒体腐蚀裕量的两倍
内部可拆件		取筒体腐蚀裕量的 1/2~1/4

4.5 许用应力

锅炉筒体、封头、中心管、开孔补强、法兰、螺栓、接管、人(手)孔、管箱壳与锅炉壳程筒体相连的环形件等受压元件在不同温度下材料的许用应力按 GB 150 的规定选取。管板、换热管、换热管与管板连接焊缝在不同温度下材料的许用应力按本标准第 6.3 条的规定选取。

5 材料

5.1 选材原则

- 5.1.1 受压元件用钢的选材原则、钢材标准、冶炼方法、热处理状态、许用应力(折边挠性管板、换热管除外)、检测标准及检测项目等均应符合 GB 150、GB 151 中对材料的有关规定。
- 5.1.2 受压元件材料的选用应按 SH/T 3075 及本标准的规定。

5.2 钢板

- 5.2.1 受压元件用钢板应根据压力、温度、介质等使用条件选用 Q245R、Q345R、15CrMoR 等钢板。汽包壳体、锅炉壳程筒体宜选用 Q245R 或 Q345R 钢板制造。
- 5.2.2 对设计压力大于 1.6MPa 余热锅炉的管板用钢板, 制造厂必须对钢板进行复验。复验内容至少应包括: 逐张检验钢板的表面质量和材料标志; 按炉复验钢板的化学成分; 按批复验钢板的力学性能、冷弯性能。当钢厂未提供钢板超声检测保证书时, 应按 JB/T 4730.3 进行超声检测复验, 质量等级应

不低于Ⅱ级。当设计压力大于 2.5MPa、锅炉和汽包的壳体以及锅炉挠性管板的厚度大于 20mm 时，还应按炉（罐）号复验设计温度下的屈服强度。钢板的高温屈服强度应符合 GB 150 的要求。

5.2.3 对制造过程中要求进行焊后消除应力热处理的主要受压元件用低合金钢钢板，当设计压力大于或等于 4.0MPa、板厚大于或等于 40mm 时，钢厂和制造厂均应从经过模拟焊后消除应力热处理状态的样坯上取样，检验钢板的力学性能，其中三个试样平均值 $kV_2 \geq 31J$ ，且应满足设计要求。

5.3 钢管

5.3.1 开口接管

通常壳体上的开口接管应采用 GB/T 8163 中的 20 号无缝钢管、GB 9948 中的 20、15CrMo、1Cr5Mo 等无缝钢管。

5.3.2 换热管

换热管采用 GB 3087 中的 20 号无缝钢管，GB 5310 中的 20G、15CrMoG 等无缝钢管和 GB 9948 中的 20、15CrMo、1Cr5Mo 等无缝钢管。换热管必须逐根按相应标准的要求进行水压试验。当有成熟的使用经验时，也可选用其他牌号或其他材料的无缝钢管。换热管的精度应不低于表 3 的规定。

表 3 换热管精度要求 单位：mm

钢管尺寸		精度
钢管外径	>30~50	±0.30
	≥51	±0.8%
壁厚	≤3	+12% -10%
	>3	±10%

5.4 锻件

受压元件用碳素钢、低合金钢锻件，其级别应不低于 JB 4726 规定的Ⅱ级。当设计压力大于或等于 1.6MPa 时，其级别应不低于 JB 4726 规定的Ⅲ级，公称直径小于 250mm 的接管、法兰除外。

5.5 保护套管

当管程介质温度大于或等于 900℃ 时，应选用刚玉瓷保护套管；当管程介质温度小于 900℃ 时，宜选用刚玉瓷保护套管，也可选用高铬镍奥氏体钢保护套管（如 0Cr25Ni20）。

5.6 受压元件常用材料使用的温度范围

5.6.1 钢板使用的温度范围见表 4，钢管使用的温度范围见表 5，锻件使用的温度范围见表 6，紧固件使用的温度范围见表 7。

表 4 钢板使用的温度范围 单位：℃

钢 种	钢 号	钢材标准	使用的温度范围
碳 素 钢	Q245R	GB713	≤420
低合金钢	Q345R	GB713	≤420
	15CrMoR	GB713	≤550

表 5 钢管使用的温度范围 单位：℃

钢 种	钢 号	钢材标准	使用的温度范围
碳 素 钢	20	GB 3087 GB 9948 GB/T 8163	≤420
	20G	GB 5310	≤420
低合金钢	15CrMo	GB 9948	≤550
	15CrMoG	GB 5310	≤550
	1Cr5Mo	GB 9948	≤600

表6 锻件使用的温度范围

单位: °C

钢 种	钢 号	钢材标准	使用的温度范围
碳 素 钢	20	JB 4726	≤420
低合金钢	16Mn	JB 4726	≤420
	15CrMo	JB 4726	≤550
	1Cr5Mo	JB 4726	≤600

表7 紧固件使用的温度范围

单位: °C

螺柱材料	匹配的螺母材料	钢材标准	使用的温度范围
35	20, 25	GB/T 699 正火	> -20~350
40MnB, 40MnVB, 40Cr	30, 40Mn, 45	GB/T 3077 正火	≤350
30CrMoA	40Mn, 45	GB/T 3077 正火	-20~400
30CrMoA	30CrMoA	GB/T 3077 调质	-100~500
35CrMoA	40Mn, 45	GB/T 3077 正火	-20~400
	30CrMoA, 35CrMoA	GB/T 3077 调质	-100~500
35CrMoVA	35CrMoA, 35CrMoVA	GB/T 3077 调质	-20~425
25Cr2MoVA	30CrMoA, 35CrMoA	GB/T 3077 调质	-20~500
	25Cr2MoVA	GB/T 3077 调质	-20~550

5.6.2 对碳素钢换热管与碳素钢管板或与 Q345R 管板间的连接接头, 当与含硫、硫化氢介质接触时, 应控制管头最高温度不超过 370°C。

5.6.3 与氢介质接触的受压元件用钢, 应根据介质中的氢分压和工作温度加 28°C, 按纳尔逊曲线进行选材。

5.7 焊接材料

焊接材料应符合 JB/T 4709、JB/T 4747、SH/T 3075 的有关规定。

5.8 非金属材料

5.8.1 在还原性气体 (如 H₂、CO 等) 中, 当气体温度大于 800°C 时, 管箱、管板上的非金属衬里所用耐火、耐热材料及换热管入口刚玉瓷保护套管材料, 应限制其硅和铁的含量, 其中 SiO₂ 含量应不大于 0.5%, Fe₂O₃ 含量应不大于 0.4%。

5.8.2 刚玉瓷保护套管中的 Al₂O₃ 含量应大于或等于 98.5%, 导热系数应小于或等于 1.5W/(m·K), 耐火度应大于 1790°C。

6 设计计算

6.1 一般规定

锅炉和汽包的壳体、中心管、开孔补强、法兰等应按 GB 150 的规定进行设计计算。由上升管支撑汽包时, 上升管和壳体连接部位的局部应力, 应按 HG 20582 中的“圆筒体上局部应力的计算和校核”进行计算和校核。管板、换热管、管箱壳与锅炉壳程筒体相连的环形件、换热管与管板连接焊缝应按本章的规定进行计算。

6.2 符号

下列符号适用于本章。

- A——换热管、换热管与管板连接焊缝强度计算时, 单根换热管所支撑的面积, mm²;
- A_t——换热管稳定计算时, 单根换热管所支撑的面积, mm²;
- b——换热管管间距, mm;
- C——厚度附加量, mm;

- d_i ——换热管内径, mm;
- d_j ——假想圆直径, mm;
- d_w ——换热管外径, mm;
- E_t ——设计温度下材料的弹性模量, MPa;
- h_H ——换热管与管板连接的焊缝高度, mm;
- i ——换热管回转半径, mm;
- k ——系数;
- l_k ——换热管无支撑的距离, mm;
- p ——计算压力(表), 取管程和壳程中较大的设计压力, MPa;
- p_s ——壳程设计压力(表), MPa;
- p_t ——管程设计压力(表), MPa;
- Q ——系数;
- R ——管箱筒体内半径, mm;
- R_m ——钢材标准抗拉强度的下限值, MPa;
- $R_{el}(R_{p0.2})$ ——钢材标准常温下的屈服点(或0.2%屈服强度), MPa;
- $R_{el}^t(R_{p0.2}^t)$ ——钢材在设计温度下的屈服点(或0.2%屈服强度), MPa;
- R_i ——壳程筒体外半径, mm;
- r ——管板折边内半径, mm;
- t_{bi} ——计算壁温, $^{\circ}\text{C}$;
- t_j ——计算压力(绝)下介质的饱和温度, $^{\circ}\text{C}$;
- μ_0 ——系数;
- δ ——管板管束区厚度, mm;
- δ_c ——计算壁厚, mm;
- δ_e ——当管板折边与管束区厚度不同时, 确定支点线位置用管板的当量厚度, mm;
- δ_H ——环形件厚度, mm;
- δ_{\min} ——管板最小需要厚度, mm;
- δ_r ——管板折边处厚度, mm;
- η ——基本许用应力修正系数;
- σ_D^t ——钢材在设计温度下经10万小时断裂的持久强度的平均值, MPa;
- σ_t ——单根换热管由管程压力引起的轴向压应力, MPa;
- σ_{τ} ——剪切应力, MPa;
- $[\sigma]$ ——许用应力, MPa;
- $[\sigma]_j$ ——基本许用应力, MPa;
- $[\sigma]_{cr}$ ——换热管轴向稳定许用压应力, MPa;
- $[\sigma]_{\tau}$ ——剪切许用应力, MPa;
- ϕ ——焊接接头系数。

6.3 许用应力

6.3.1 材料的许用应力应按式(2)确定:

$$[\sigma] = \eta[\sigma]_j \dots\dots\dots (2)$$

6.3.2 常用钢材的基本许用应力 $[\sigma]_j$ 取表8所列值。对表8未列出的钢材, 基本许用应力 $[\sigma]_j$ 可按式(3)、式(4)、式(5)计算, 取其中的较小值。

$$[\sigma]_j \leq R_m / 2.7 \dots\dots\dots (3)$$

$$[\sigma]_j \leq R_{el}^t / 1.5 \dots\dots\dots (4)$$

$$[\sigma]_j \leq \sigma_D^t / 1.5 \dots\dots\dots (5)$$

计算时, R_m 、 R_{el}^t 、 σ_D^t 取GB 150中相应钢号的最低值。

表 8 常用钢材基本许用应力 $[\sigma]$

钢号	材料标准	壁厚 mm	常温指标	在下列温度 (℃) 下的基本许用应力, MPa														
				R_m MPa	R_e MPa	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550
钢板																		
Q245R	GB 713	6~16	400	245	117	112	108	103	98	94	91	84						
		>16~36	400	235	111	106	102	97	92	89	86	83						
		>36~60	400	225	107	102	98	93	88	85	82	79						
		>60~100	390	205	98	94	90	86	82	78	75	73						
Q345R	GB 713	6~16	510	345	166	159	153	148	143	138	124	93						
		>16~36	490	325	156	149	143	138	133	129	124	93						
		>36~60	470	305	146	139	133	128	123	119	116	93						
		>60~100	460	285	136	129	123	119	116	113	110	93						
15CrMoR	GB 713	>100~120	450	275	133	126	120	116	113	109	106	93						
		6~60	450	295	150	145	140	136	133	129	126	122	119	117	88	58	37	
		>60~100	450	275	140	135	130	127	124	120	117	114	111	109	88	58	37	
钢管																		
20 20G	GB/T 8163 GB 3087 GB 9948 GB 5310	≤16	390	245	117	112	108	103	98	94	91	84						
15CrMo 15CrMoG	GB 9948 GB 5310	≤16	440	235	117	112	108	104	101	97	94	92	91	89	88	58	37	

6.3.3 基本许用应力修正系数 η 应按表 9 确定。

表 9 基本许用应力修正系数 η

元件名称	η
折边挠性管板	0.85
换热管	0.55

6.4 计算壁温

6.4.1 管板、换热管及中心管的计算壁温 t_{bi} 应按表 10 确定，但任何情况下其计算壁温不得低于 250℃。

表 10 计算壁温 t_{bi} 单位：℃

受压元件形式及工作条件	t_{bi}
与温度 900℃ 以上介质接触的折边管板	$t_j + 70$
与温度 600℃~900℃ 介质接触的折边管板	$t_j + 50$
与温度低于 600℃ 介质接触的折边管板	$t_j + 25$
换热管、中心管	$t_j + 25$

6.5 折边挠性管板计算

6.5.1 管束区以内、以外管板最小需要厚度应按式 (6) 计算：

$$\delta_{\min}=kd_j\sqrt{\frac{P}{[\sigma]}}+C \dots\dots\dots (6)$$

6.5.2 式 (6) 中系数 k 应按以下规定确定：

管束区以外通过三个支撑点画假想圆时， k 值按表 11 确定；通过四个或四个以上支撑点画假想圆时， k 值降低 10%；通过两个支撑点画假想圆时， k 值增加 10%。管束区以内画假想圆时， k 值取 0.47。

表 11 系数 k

部位	支 撑 形 式		k
管束区以外	支点线	管板与锅炉筒体、中心管连接： 折边连接[图 1 a)、b)、c)]	0.35
		内部无法封焊的单面坡口型角焊缝[图 1 c)]	0.50
管束区以内	支撑点	换热管	0.47

6.5.3 如支撑点形式不同时，则系数 k 取各支撑点（线）相应值的算术平均值。

6.5.4 支点线位置应按图 1 所示原则确定。当管板折边与管束区厚度不同时，确定支点线位置的 δ_e 值按式 (7) 计算[见图 1d)]。

$$\delta_e=\frac{l_1\delta_1+l_2(\frac{\delta_1+\delta_2}{2})+l_3\delta_3}{l_1+l_2+l_3} \dots\dots\dots (7)$$

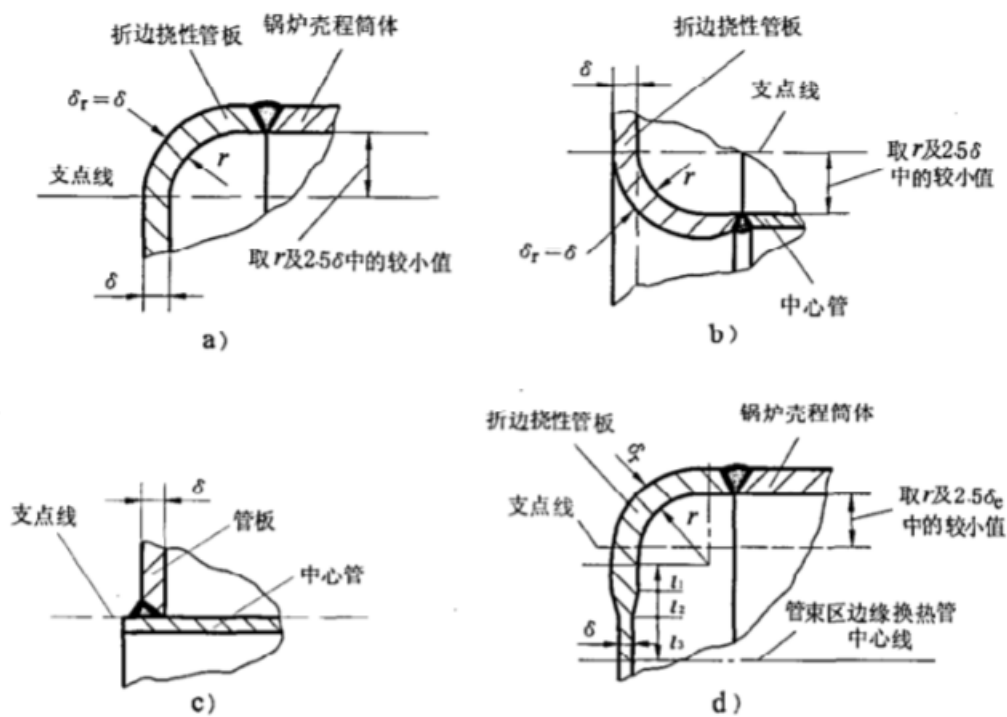


图 1 支点线位置

- 6.5.5 换热管与管板应全部采用焊接连接，每根换热管的中心点均视为支撑点。
- 6.5.6 假想圆直径 d_j 如为经过三个或三个以上支撑点画圆时，支撑点不应都位于同一半圆周上。如为二个支撑点画圆时，支撑点应位于假想圆直径的两端。假想圆的画法如图 2 所示。
- 6.5.7 管束区以外假想圆直径 d_j 应取管束区以外的最大假想圆。管束区以内假想圆直径 d_j 的计算：换热管三角形排列时， $d_j=1.155b$ ；换热管正方形排列时， $d_j=\sqrt{2}b$ 。
- 6.6 换热管计算
- 6.6.1 承受内压力管子的计算壁厚应按式 (8) 计算：

$$\delta_c = \frac{p_i d_w}{2[\sigma] + p_i} \dots\dots\dots (8)$$

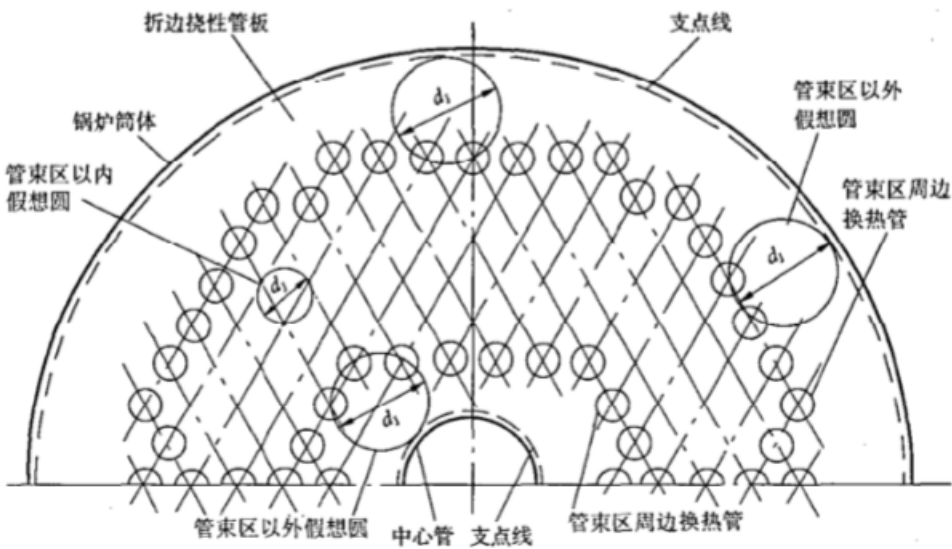


图 2 假想圆画法

6.6.2 承受外压力管子的计算壁厚应按式 (9) 计算:

$$\delta_c = p_s d_w / 170 \dots\dots\dots (9)$$

6.6.3 管束区周边换热管及管束区内换热管由支撑作用所需计算壁厚均应按式 (10) 计算:

$$\delta_c = \frac{pA}{\pi[\sigma]d_w} \dots\dots\dots (10)$$

6.6.4 式 (10) 中管束区周边单根换热管所支撑的面积 A 等于围绕管束区周边单根换热管所画的几个假想圆中心点连线所包围面积的最大值减去单根换热管外径所占面积。管束区内单根换热管所支撑的面积 A 的计算: 三角形排列时, $A=0.866b^2 - \pi d_w^2/4$; 正方形排列时, $A=b^2 - \pi d_w^2/4$ 。换热管支撑面积画法如图 3 所示。

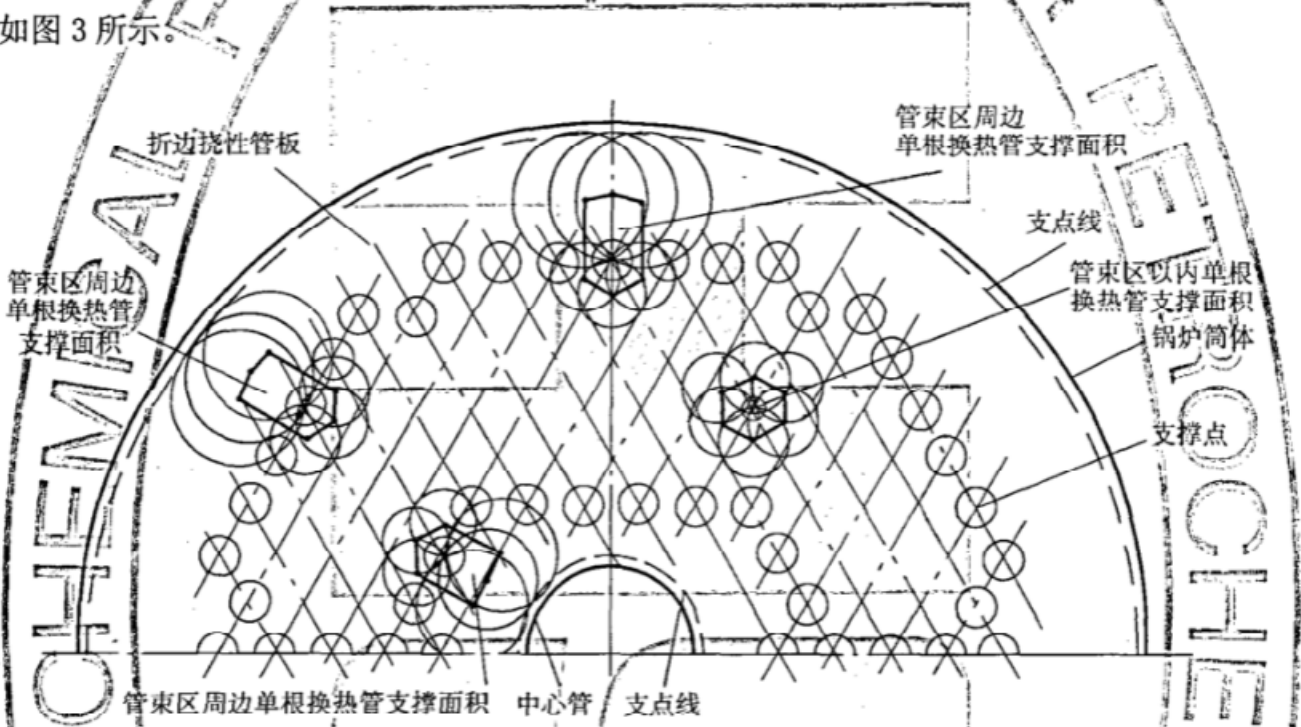


图 3 换热管支撑面积 A 的近似画法

6.6.5 管束区周边换热管及管束区内换热管壁厚均应取 (8)、(9)、(10) 三式计算结果中的最大值, 加上换热管腐蚀裕量和钢管壁厚负偏差, 并圆整到标准规格的厚度。

6.7 换热管与管板连接焊缝剪切强度的计算

6.7.1 换热管与管板连接焊缝的剪切应力应按式 (11) 计算:

$$\sigma_r = \frac{pA}{\pi d_w h_H \phi} \dots\dots\dots (11)$$

焊接接头系数 ϕ 取 0.8。

6.7.2 换热管与管板连接焊缝的剪切强度应按式 (12) 校核:

$$\sigma_r \leq [\sigma]_r \dots\dots\dots (12)$$

式中剪切许用应力 $[\sigma]_r$ 取管板和换热管设计温度下较小许用应力的一半。

6.8 换热管轴向稳定校核计算

6.8.1 单根换热管轴向稳定许用压应力应按式 (13) 计算:

$$[\sigma]_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{2\mu_0^2 (l_k/i)^2} \dots\dots\dots (13)$$

系数 μ_0 ——换热管两端为管板时取0.5；一端为管板另一端为支持板时取0.7；两端都为支持板时取1.0。

管子无支撑距离 l_k ——当无支持板时，取两管板间距离；有支持板时，取两支持板之间的距离和支持板到管板间距离的较大值。

管子回转半径 $i = \frac{1}{4} \sqrt{d_o^2 + d_i^2}$

6.8.2 管束区周边单根换热管及管束区内单根换热管由管程压力引起的轴向压应力应按式(14)计算：

$$\sigma_t = \frac{p_t A_1}{\pi (d_w^2 - d_i^2)/4} \quad (14)$$

管束区周边单根换热管支撑的面积 A_1 ：取围绕管束区周边单根换热管所画的几个假想圆中心点连线所包围面积的最大值减去单根换热管内径所占的面积。

管束区内单根换热管支撑面积 A_1 ——三角形排列时， $A_1 = 0.866 b^2 - \pi a_i^2/4$ ；

正方形排列时， $A_1 = b^2 - \pi a_i^2/4$ 。

6.8.3 单根换热管轴向压应力应按式(15)校核：

$$\sigma_t \leq [\sigma]_{cr} \quad (15)$$

当 $\sigma_t > [\sigma]_{cr}$ 时，可调小换热管的无支撑距离 l_k 值后再重新校核计算，最终换热管无支撑距离 l_k 取管束区周边换热管无支撑距离与管束区内换热管无支撑距离中的较小值。

6.9 管箱壳与锅炉壳程筒体相连的环形件计算

6.9.1 管箱壳与锅炉壳程筒体相连的环形件，最小需要厚度应按式(16)计算：

$$\delta_H = R \sqrt{\frac{Q p_t + C}{[\sigma]}} \quad (16)$$

Q 值由表12查得。

$[\sigma]$ ——有非金属衬里时取GB 150许用应力表中350℃下的许用应力，无非金属衬里时取管箱壳设计温度下GB 150许用应力表中的许用应力。

表12 环形件厚度计算系数 Q

R/R_i	≤ 1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50
Q	0.089 5	0.126 2	0.162 9	0.199 6	0.236 3	0.273 0

6.9.2 环形件最终厚度取值应大于或等于按式(16)计算出的厚度和管箱筒体厚度中的较大值。

6.10 管箱非金属衬里厚度的计算

管箱非金属衬里各层的厚度可按HG/T 20525或其他加热炉设计手册中的有关规定进行计算。

7 结构设计

7.1 主要元件及名称

余热锅炉主要元件及名称见图4。

7.2 筒体及封头

7.2.1 余热锅炉筒体及封头结构应符合GB 150的有关规定，带双鞍座汽包壳体还应符合JB/T 4731的有关规定。

7.2.2 采用碳素钢及低合金钢制作的锅炉筒体最小厚度见表 13。

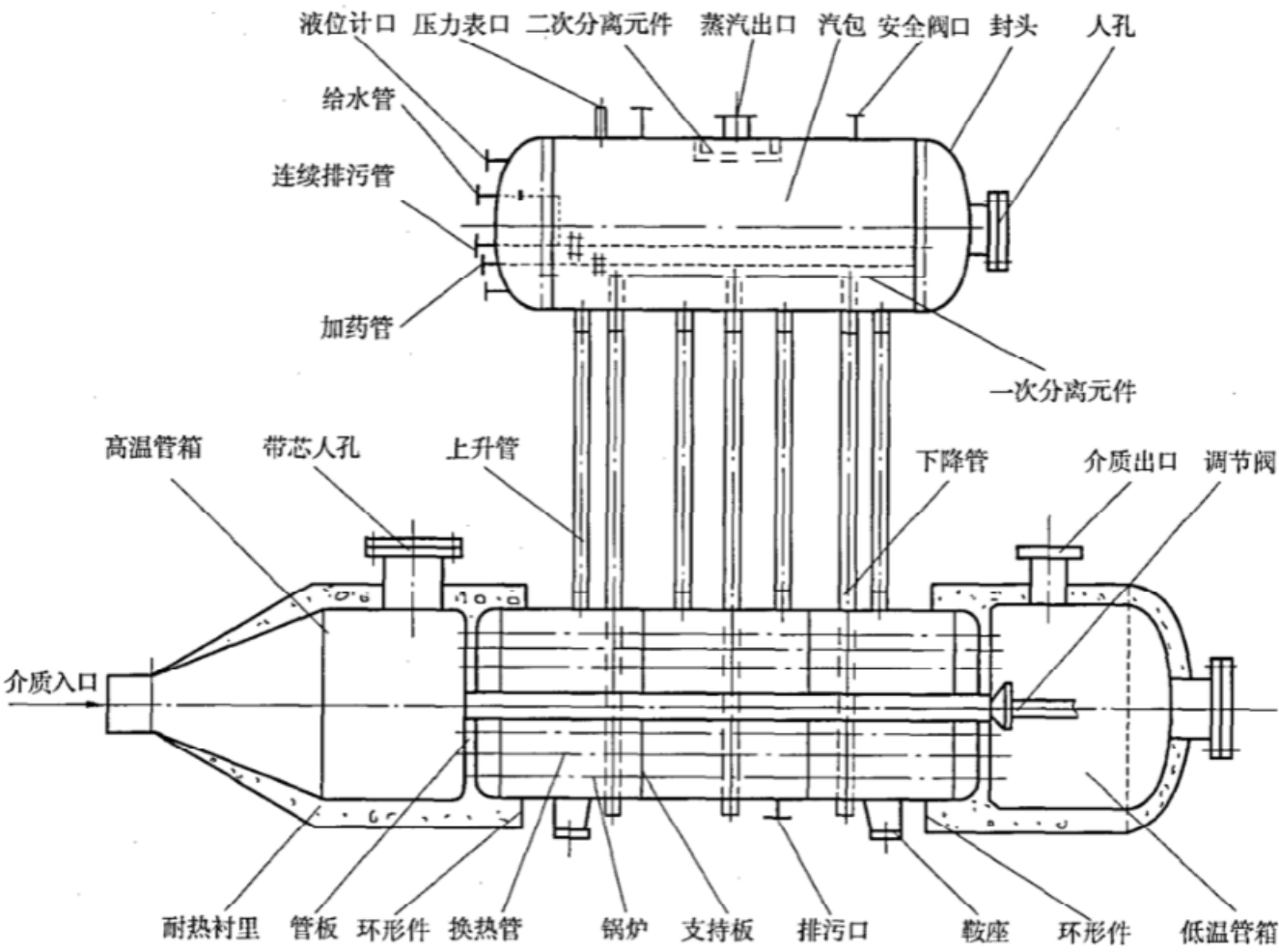


图 4 主要元件及名称

表 13 碳素钢及低合金钢制锅炉筒体最小厚度 单位: mm

公称直径	>700~1 000	>1 000~1 500	>1 500~2 000	>2 000
最小厚度	8	10	12	14
注: 表中最小厚度未包括厚度附加量。				

7.3 接管及开孔补强

7.3.1 接管的结构设计, 除应符合 GB 150、SH/T 3074 有关规定以外, 还应符合工艺、热工及自控专业的要求。

7.3.2 接管开孔补强的结构, 除应符合 GB 150 的规定外, 宜选用厚壁管或整体补强锻件补强, 也可采用增加筒体或封头整体壁厚的补强形式。

7.4 人孔

7.4.1 根据生产、维修、制造及安装的需要, 应在锅炉筒体或封头上开设人孔。人孔公称直径应大于或等于 400mm。对衬有非金属衬里的筒体或封头, 应开设带有非金属耐热衬里的带芯人孔 (见图 5), 也可选用其他结构形式的带芯人孔。

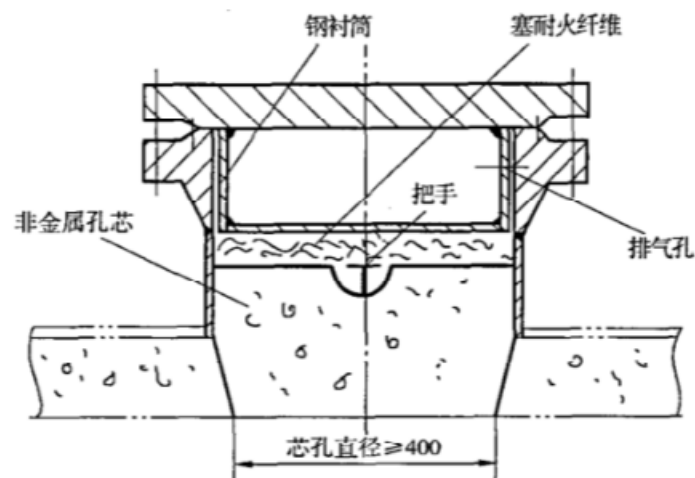


图 5 带芯人孔

- 7.4.2 汽包上应至少开设一个公称直径大于或等于 400mm 的圆形人孔，且宜开设在封头上。
- 7.4.3 余热锅炉宜选用带颈对焊法兰人孔。人孔密封面形式，垫片及紧固件的选用，除按工程设计及相应人孔标准规定之外，也可按 SH/T 3074 的规定选用。
- 7.4.4 与标准人孔的公称压力级别对应的余热锅炉设计温度下的最高无冲击工作压力，不应低于余热锅炉的设计压力。

7.5 支座

- 7.5.1 锅炉鞍式支座的设置除应符合 JB/T 4712.1 的规定外，还应符合以下要求：
- a) 当与锅炉相连的设备对其有轴向热胀推力时，锅炉的支座均应设置为滑动支座；
 - b) 为减少支座底板的摩擦阻力，宜将滑动支座设计成滚柱型或聚四氟乙烯摩擦副型支座；
 - c) 当锅炉轴向膨胀量较大时，应适当加长滑动支座底板上长圆孔的长度；
 - d) 鞍座与锅炉筒体相连的垫板，应选用与锅炉筒体相同的材料。
- 7.5.2 汽包支座的设置应符合以下要求：
- a) 当汽包置于专门设置的构架上时，支座的设置应符合 JB/T 4731 的规定；
 - b) 当汽包置于锅炉筒体上方，且无专门构架支撑时，汽包可不设支座，汽包由上升管支撑。

7.6 管板

7.6.1 管板结构

7.6.1.1 折边挠性管板结构分为管束区和过渡段两部分。过渡段的结构见图 6。管板过渡段的结构尺寸见表 14。

7.6.1.2 当管板厚度大于锅炉筒体厚度且对接边缘厚度差大于表 14 的规定时，管板直边应按图 6 b) 的要求削薄，其削薄长度 $L_1 \geq 4(\delta_z - \delta_1)$ 。

7.6.1.3 当管板管束区厚度小于锅炉筒体厚度时，管板过渡段厚度及直边厚度与锅炉筒体厚度相等，而管板宜按图 6 c) 要求进行双面削薄。其削薄长度 $l \geq 3 \left(\frac{\delta_r - \delta}{2} \right)$ 。

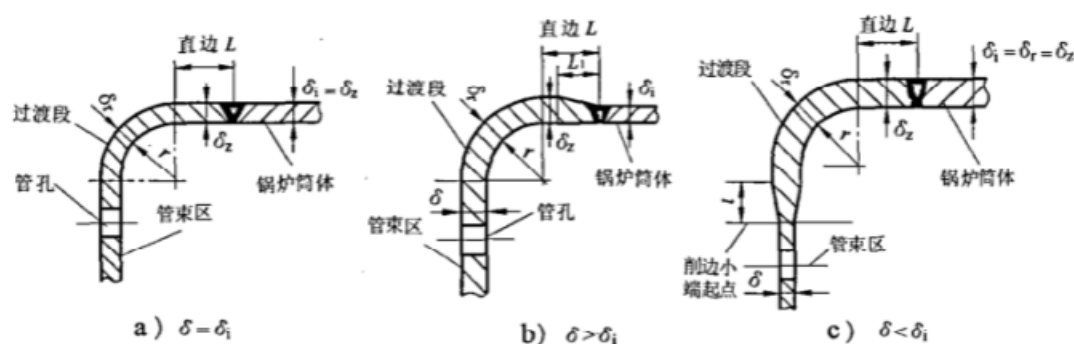


图 6 管板过渡段结构

表 14 管板过渡段结构尺寸

单位: mm

折边管板厚度 δ	折边管板直边长度 L	折边半径 r	对接边缘厚度差 $\delta_2 - \delta_1$
<10	≥ 25	不小于 $2\delta_2$ 及 38 中的较大值	$\leq 0.1\delta_2 + 1$ 且 ≤ 4
10~20	$\geq \delta_2 + 15$		
>20	$\geq 0.5\delta_2 + 25$		

7.6.2 管孔布置及中心距应以下规定:

- a) 管板管孔排列形式见 GB 151, 一般按正三角形或正方形排列;
- b) 管孔中心距不应小于 1.25 倍的换热管外径;
- c) 焊接管板孔桥应使相邻管头焊缝边缘的净距离不小于 6mm;
- d) 布置管孔时, 应留出足够大的呼吸空位, 以防止管板产生过大的温差应力, 具体要求如下:
 - 1) 管头焊缝边缘至过渡段圆弧起点或削边小端起点(见图 6) 的距离不应小于 10mm;
 - 2) 中心管外壁与换热管外壁之间的呼吸空位, 不小于锅炉筒体内直径的 5% 和 50mm 中的较大值, 如锅炉筒体内直径的 5% 大于 100mm, 可取 100mm。

7.6.3 管板管孔直径及允许偏差见表 15。

表 15 管板管孔直径及允许偏差

单位: mm

换热管径	32	38	45	51	57	60	70	76
管孔直径	32.35	38.40	45.40	51.47	57.55	60.55	70.60	76.70
允许偏差	+0.20 0			+0.25 0				

7.6.4 管板成形后的最小厚度见表 16。

表 16 管板成形后的最小厚度

单位: mm

换热管外径	强度焊+贴胀连接的管板最小厚度	强度焊连接的管板最小厚度
≤ 51	14	10
> 51	16	

7.7 换热管与管板的连接

- 7.7.1 换热管与管板连接宜采用强度焊加贴胀的结构形式, 且应先贴胀后强度焊(见图 7)。
- 7.7.2 当管程介质温度小于 600℃ 时, 换热管与管板连接可只采用强度焊结构形式, 见图 7 中强度焊部分。

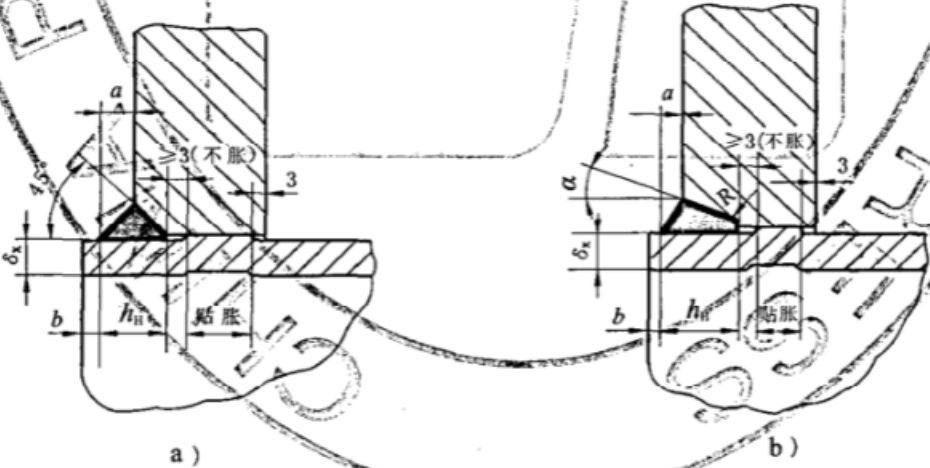


图 7 换热管与管板的连接

7.7.3 管头焊接结构形式与尺寸，应符合以下规定：

- a) 管板管孔的焊接接头坡口，采用 U 形或 V 形坡口形式；
- b) 焊缝高度 L_H 应不小于换热管壁厚加 3mm；
- c) 焊缝伸出管板长度 a 应符合下列要求：
 - 1) 当用于管程介质温度大于或等于 900℃ 时， a 宜取 $1 \sim 0.5$ mm；
 - 2) 当用于管程介质温度小于 900℃ 时， a 宜取管壁厚度与 3mm 中的较小值；
- d) 管端伸出焊缝长度 b 见表 17。

表 17 管端伸出焊缝长度 b 单位：mm

介质温度，℃	≥900	≥600~900	<600
伸出焊缝长度 b	0	≤1.5	≤5

7.8 中心管与管板的连接

7.8.1 用于管程介质温度大于或等于 900℃ 时，中心管与管板的连接宜选用图 8 a) 所示的结构，其中折边半径 r 及直边长度 L 应符合本标准 7.6.1.1 条的规定。管板厚度大于中心管壁厚时，应按本标准 7.6.1.2 条及图 8 a) 的规定削薄。

7.8.2 选用图 8 b) 所示的结构时，焊缝伸出管板长度 a 及管端伸出焊缝长度 b 应符合以下要求：

- a) 管程介质温度大于或等于 900℃ 时， a 应取 $1 \sim 0.5$ mm；
- b) 管程介质温度小于 900℃ 时， a 应取 3mm~5mm；
- c) 管端伸出焊缝长度 b 应按表 17 选用。

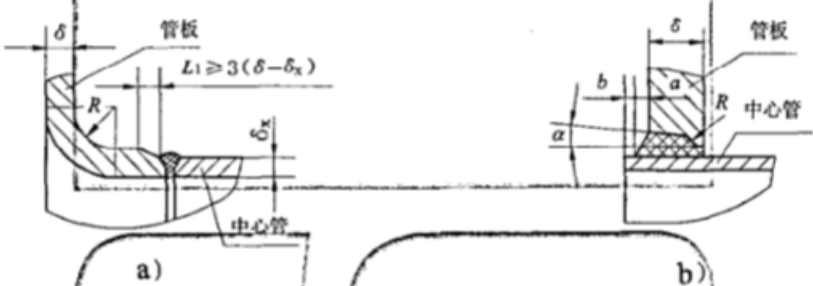


图 8 中心管与管板的连接

7.9 管板及管箱筒体与壳程筒体的连接

7.9.1 管板与壳程筒体的连接，应采用对接全焊透结构，当管板与壳程筒体壁厚不相等时，应按本标准 7.6.1.2 条的要求削薄。

7.9.2 管箱筒体与壳程筒体的连接，应符合以下要求：

- a) 当管箱设计压力小于 1.6MPa 时，连接结构见图 9 a)；
- b) 当管箱设计压力大于或等于 1.6MPa 时，管箱筒体与壳程筒体之间，应采用对接全焊透结构，为此需增设环形锻件，见图 9 b)；
- c) 图 9 中环形件厚度 δ_H 应按本标准 6.9 条确定， r_1 、 r_2 、 r_3 均大于或等于 20mm。

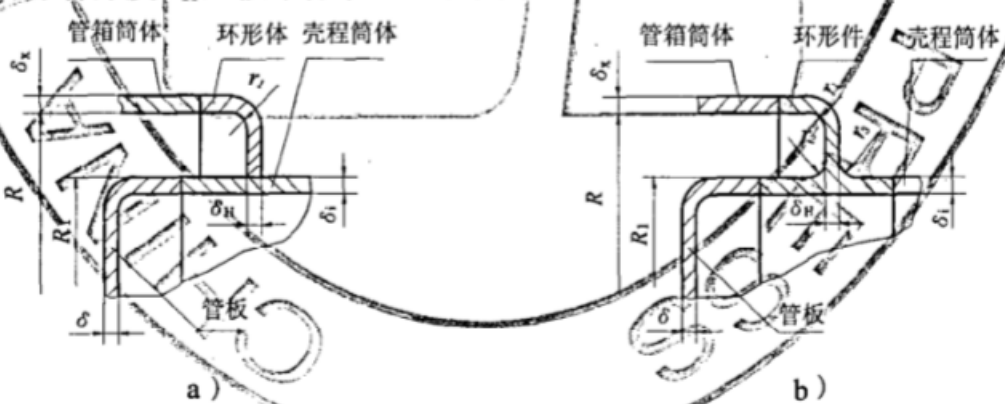


图 9 管箱筒体与壳程筒体的连接

7.10 高温侧管板及管头的热防护

7.10.1 管板的热防护结构

7.10.1.1 管程介质温度大于或等于 900℃时，管板表面应浇注一层高强度耐火浇注料耐热衬里，管板及管头热防护结构见图 10，且应符合以下要求：

- a) 浇注料中 Al_2O_3 含量应大于 90%；
- b) 耐热衬里厚度应在 50mm~100mm 之间，一般取 75mm；
- c) 耐热衬里应采用柱形锚固钉固定，其结构见图 10；
- d) 在管束区内，锚固钉应均匀分布，且应位于相邻管孔组成的三角形或正方形的形心上，其间距为 100mm~150mm，见图 11。管束区外，锚固钉应均匀交错排布，间距约为 200mm。

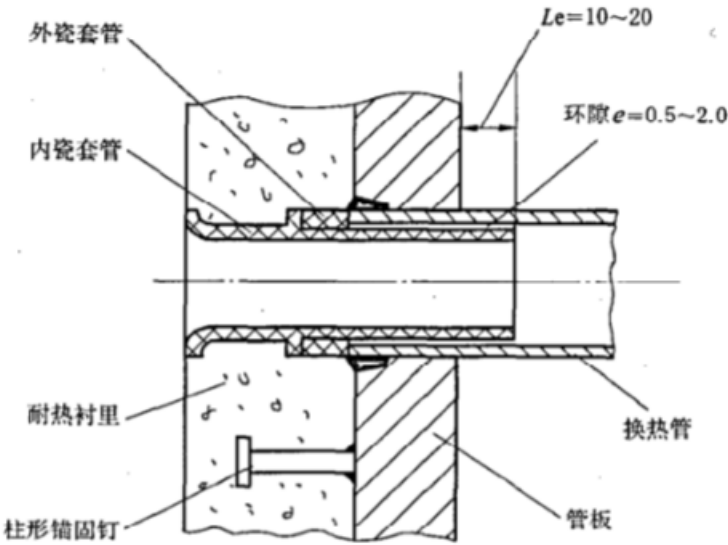


图 10 管板及管头热防护结构

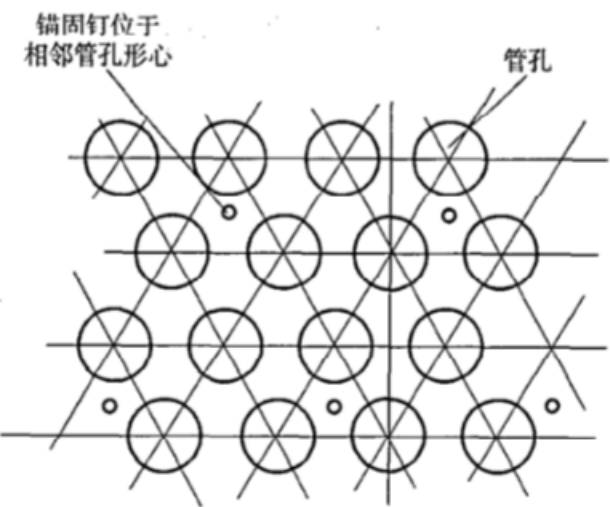


图 11 锚固钉的排布

7.10.1.2 管程介质温度小于 900℃时，管板表面除可按本标准 7.10.1.1 条的规定外，也可采用高铝质或轻质浇注料耐热衬里，并在衬里表面铺设一层钢衬板，其结构见图 12。钢衬板铺设应符合以下要求：

- a) 耐热衬里厚度与本标准 7.10.1.1 条的规定相同；
- b) 钢衬板的厚度取 3mm~5mm，材质根据介质温度选用；
- c) 钢衬板与管箱耐热衬里之间，应留出足够大的膨胀间隙；
- d) 钢衬板可用耐高温螺栓固定，螺栓间距约 300mm，但排布螺栓时，应考虑衬里锚固钉的排布情况。

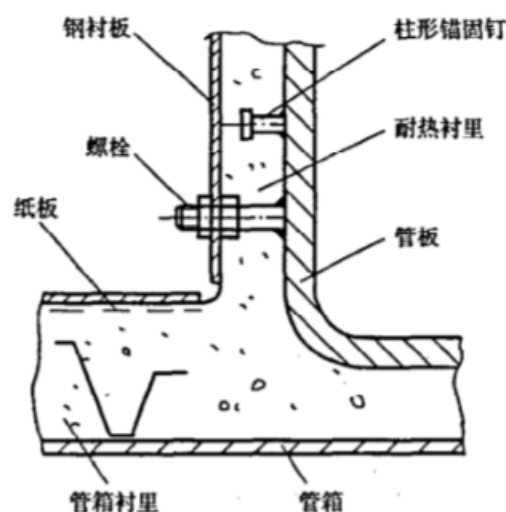


图 12 带钢衬板的耐热衬里结构

7.10.2 高温管头的热保护结构

7.10.2.1 介质温度大于或等于 900℃时，宜在换热管高温入口端安装双刚玉瓷套管，其结构见图 10。

7.10.2.2 介质温度小于 900℃时，宜在换热管高温入口端安装单刚玉瓷套管，其结构见图 13。也可在换热管高温入口端安装金属保护套管，其结构见图 14。金属套管也可根据设计经验采用其他结构形式。

7.10.2.3 刚玉瓷套管伸入管板内侧的深度 L_e 取 10mm~20mm，瓷套管与换热管内壁之间应留出 0.5mm~2mm 的间隙。

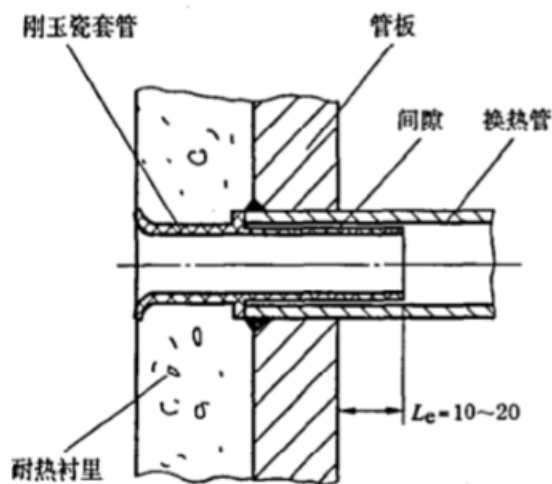


图 13 单刚玉瓷套管结构

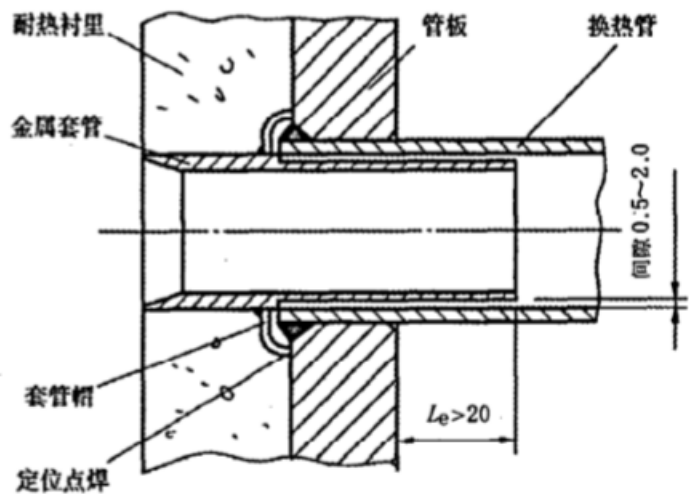


图 14 金属保护套管结构

7.11 支持板

7.11.1 换热管在其材料使用温度范围内最大无支撑跨距大于本标准 6.8 条的计算值及表 18 规定值中的较小值时，应设置支持板。

7.11.1.1 不同换热管外直径的最大无支撑跨距，可用内插法求得。

7.11.1.2 表 18 所列出的最大无支撑跨距，未考虑流体诱导振动，否则应按 GB 151 的有关规定。

表 18 换热管的最大无支撑跨距

单位：mm

换热管外径	32	38	45	51	57	60	70	76
最大无支撑跨距	2200	2500	2750	2950	3200	3250	3500	3650

7.11.2 支持板的最小厚度见表 19。

表 19 支持板的最小厚度

单位: mm

公称直径 DN	换热管无支撑跨距			
	>600~900	>900~1 200	>1 200~1 500	>1 500
>700~900	8	10	12	16
>900~1 500	10	12	16	16
>1 500~2 000	12	16	20	20
>2 000	14	18	20	22

注: 支持板最小厚度未包括腐蚀裕量。

7.11.3 支持板管孔直径及允许偏差, 应符合表 20 的规定。

表 20 支持板管孔直径及允许偏差

单位: mm

换热管外径	32	38	45	51	57	60	70	76
管孔直径	32.8	38.8	45.8	51.8	58	61	71	77
允许偏差	+0.45 0			+0.5 0				

7.11.4 支持板的结构见图 15。支持板与锅炉筒体之间, 宜采用焊接固定, 见图 15 中 A—A 剖面, 也可采用螺栓连接, 见图 15 中的 B—B 剖面。

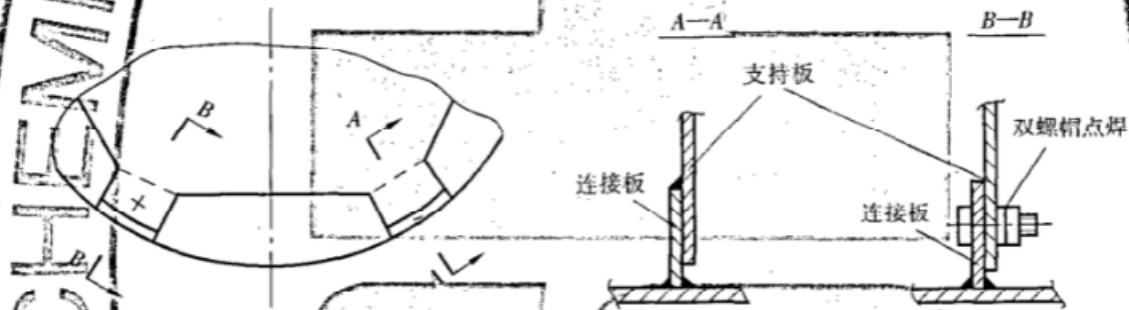


图 15 支持板的结构

7.12 管箱

7.12.1 管箱筒体与壳程筒体的连接结构见本标准 7.9 条。

7.12.2 耐热衬里结构应符合 7.12.2.1 至 7.12.2.3 条的规定。

7.12.2.1 介质温度大于或等于 900℃ 时, 其耐热衬里一般设计成耐热层和隔热层组合结构 (见图 16), 且应符合以下要求:

- a) 衬里层数及各层衬里厚度按本标准 6.10 条的规定进行计算确定;
- b) 迎火面耐热层, 应选用高强度浇注料耐热衬里, 浇注料中 Al_2O_3 含量应大于 90%;
- c) 各层衬里均由锚固钉固定, 锚固钉宜设计成 V 形或 Y 形 (结构见图 16), 锚固钉应均匀交错排布, 间距 200mm~300mm。

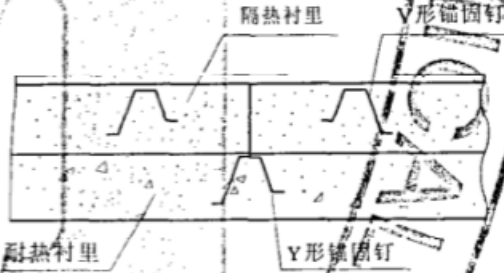


图 16 管箱耐热衬里结构

7.12.2.2 介质温度小于 900℃ 时, 耐热衬里可采用本标准 7.12.2.1 条的结构, 也可在耐热衬里表面铺设一层钢衬筒, 其结构见图 17。钢衬筒的铺设应符合以下要求:

- a) 耐热衬里可选用轻质浇注料, 厚度按本标准 6.10 条的规定计算确定;
- b) 钢衬筒的铺设, 应充分考虑钢衬筒在高温下径向及轴向的热膨胀;
- c) 钢衬筒的选用与本标准 7.10.1.2 条相同。

7.12.2.3 对锅炉出口侧管箱, 由于温度较低, 其耐热衬里的设置及结构由设计根据介质温度及介质特

性等要求确定。

7.13 中心管衬里

中心管管内分设置隔热层和不设置隔热层两种结构形式。当设置隔热层时,宜在隔热层表面铺设一层钢衬筒,衬筒的设置应考虑轴向热膨胀,其结构见图 18,衬筒也可采用其他成熟的结构形式。

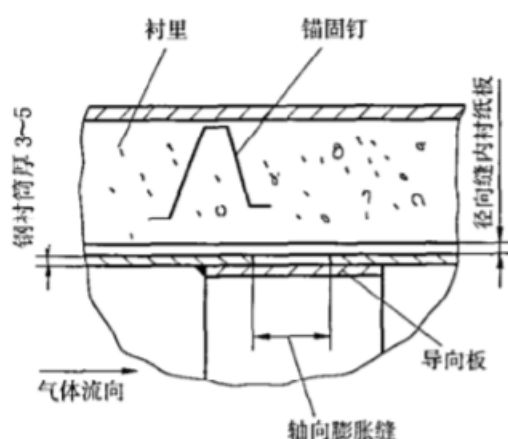


图 17 钢衬筒结构

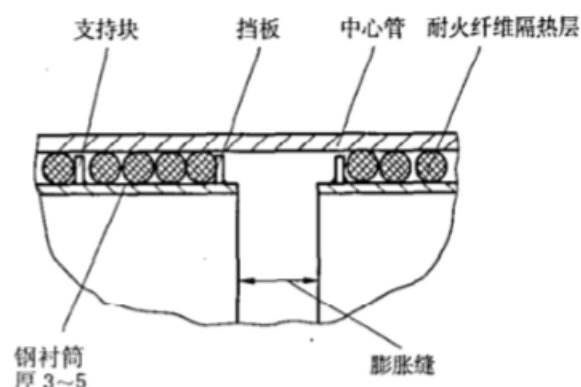


图 18 隔热层及钢衬筒结构

7.14 汽包内部装置

7.14.1 汽包内部装置包括以下元件:

- 一次分离元件: 水下孔板、缝隙挡板、旋风分离器、挡板等;
- 二次分离元件: 波形分离器(百叶窗)、匀气孔板、集气管等;
- 其他内部构件: 给水分布管、连续排污管、定期排污管、加药管等。

7.14.2 汽包内部装置,应根据计算按 JB/T 9618—1999 确定和选用。

7.15 安全泄放装置

7.15.1 安全泄放装置宜采用安全阀。

7.15.2 安全阀的设置应符合 GB 150、TSG R0004—2009 的有关规定。

7.16 保护装置

余热锅炉应装设高、低水位报警(高、低水位报警信号须能区分)、低水位连锁保护装置。低水位连锁保护装置最迟应在最低安全水位时动作。

8 制造、检验与验收

余热锅炉的制造、检验与验收除应符合本标准及 GB 150、GB 151 外,还应符合 JB/T 4731 的有关规定。

8.1 管板

8.1.1 折边挠性管板应采用整块钢板制造,仅由于超过 GB 713 标准规定的最大宽度而不能用整张钢板制造时,方可拼接,且应符合以下要求:

- 拼接接头焊缝不应多于一条,且不应通过管板孔。管板拼接接头应采用双面全焊透对接结构,在管板成形前应将焊缝磨平;
- 拼接接头应与相邻筒体纵向焊接接头错开,两接头中心线之间外圆弧长应大于钢材厚度的 3 倍,且不少于 100mm;
- 拼接接头应按 JB/T 4730 进行 100%射线或超声检测,射线检测技术等级不低于 AB 级,合格级别为 II 级;脉冲反射法超声检测技术等级不低于 B 级,合格级别为 I 级;并进行 100%磁粉或渗透检测,合格级别为 I 级。

8.1.2 管板加工成形应符合 8.1.2.1 至 8.1.2.5 条的规定。

8.1.2.1 管板的加工应根据工艺确定加工裕量,以确保成形后的厚度不小于管板相应部位名义厚度减去钢板负偏差。

8.1.2.2 中心管处折边孔直段边缘的厚度不应小于管板设计厚度的 70%且不小于中心管厚度。

8.1.2.3 管孔直径及允许偏差应符合本标准 7.6.3 条的规定。管孔表面粗糙度 R_a 应不大于 12.5 μm 。

- 8.1.2.4 管孔中心距及最小孔桥尺寸应符合本标准 7.6.2 条的规定。
- 8.1.2.5 冷冲压成形的折边挠性管板，应进行消除应力热处理。热冲压成形的折边挠性管板，应进行恢复原材料供货状态的热处理。
- 8.2 换热管
- 8.2.1 换热管应采用整根管子制作，不允许拼接。
- 8.2.2 当钢厂未提供水压试验的合格证明时，应按本标准 5.3.2 条的规定，对换热管逐根按相应标准进行水压试验复验。
- 8.3 汽包内部装置
- 汽包内部装置制造安装应符合 JB/T 3191—1999 的规定。
- 8.4 余热锅炉的组装与安装
- 8.4.1 余热锅炉零部件，在组装前应认真清理，不应留有焊疤、焊接飞溅物、浮锈及其他杂物。
- 8.4.2 换热管与管板焊接应采用填丝氩弧焊，施焊前应按 GB 151 的规定做焊接工艺评定。
- 8.4.3 管板组装焊接后其平面度应符合表 21 的规定。

表 21 管板平面度 单位: mm

公称直径 DN	$DN \leq 1000$	$1000 < DN \leq 1500$	$1500 < DN \leq 1800$	$1800 < DN \leq 2200$	$DN > 2200$
平面度	6	7	8	9	10

8.4.4 余热锅炉组装尺寸允许偏差见图 19。

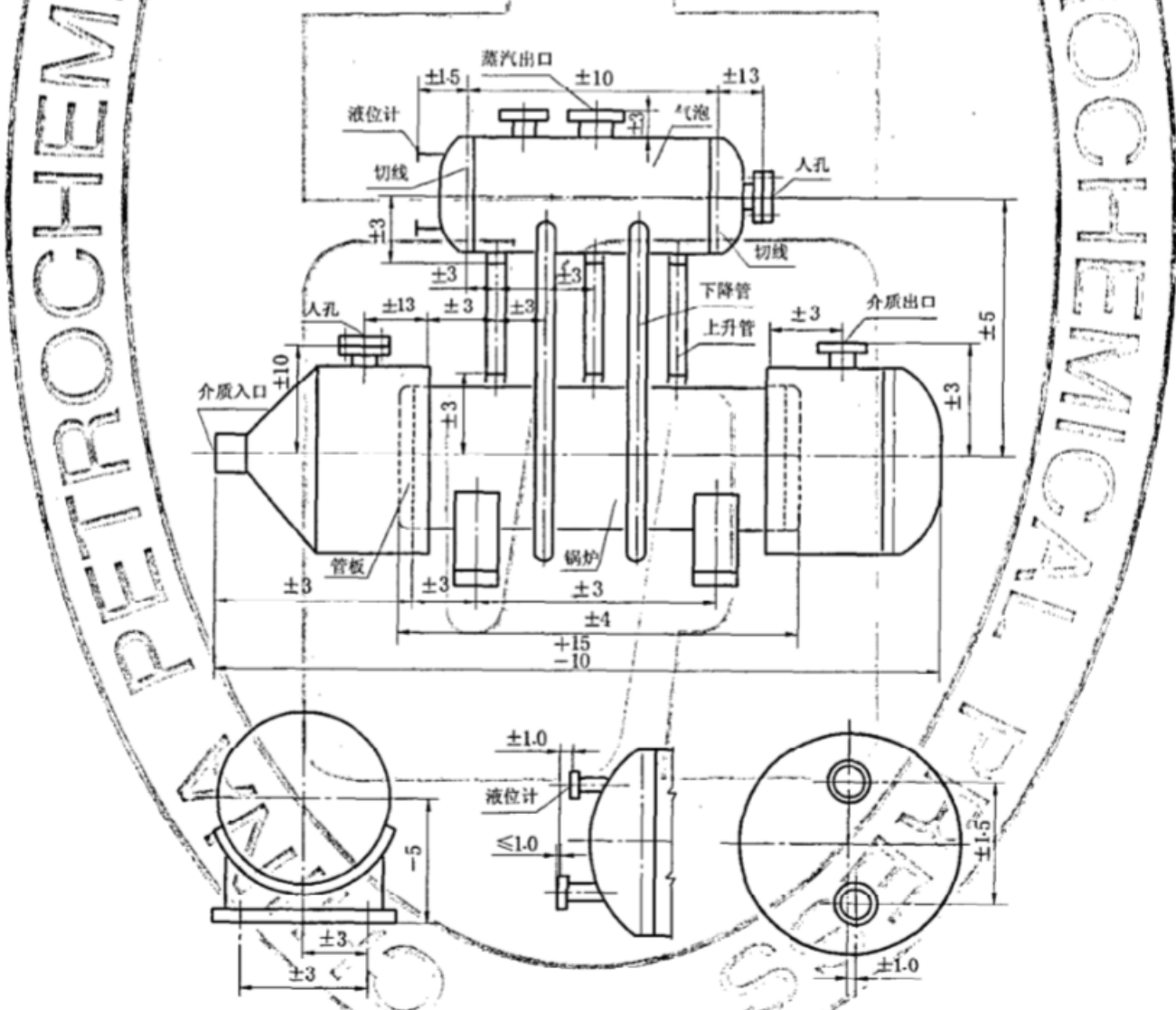


图 19 余热锅炉组装尺寸允许偏差

8.4.5 余热锅炉自由尺寸偏差应符合下列规定：

- a) 机加工面的自由尺寸允许偏差按 GB/T 1804 中 m 级；
- b) 非加工面的自由尺寸允许偏差按 GB/T 1804 中 c 级。

8.4.6 由上升管支撑的余热锅炉，当锅炉、汽包分别出厂时，制造厂应进行重叠预组装，并标有永久标记。

8.4.7 余热锅炉的其他现场安装要求按 GB 151 的规定。

8.5 无损检测

余热锅炉焊接接头无损检测的要求和评定标准，应根据锅炉管程、壳程及汽包不同的设计条件，按 GB 150、TSG R0004—2009 的规定和设计图样的要求执行。

8.6 焊后热处理

8.6.1 余热锅炉焊后热处理应符合设计图样和 GB 150 的有关规定。

8.6.2 对进行整体热处理的锅炉，应保证升温 and 降温速度小于 65℃/h。

8.6.3 热处理前应将保温钉、垫板等与壳体相焊的所有构件焊接完成，热处理后不得再进行焊接。

8.7 压力试验

8.7.1 余热锅炉压力试验的种类和试验压力值应在设计图样上注明，其试验要求应符合 GB 150 的规定。

8.7.2 压力试验应按以下步骤进行：

- a) 锅炉壳程试压，同时检查换热管与管板连接接头；
- b) 锅炉管程试压；
- c) 汽包试压；
- d) 余热锅炉现场组装后进行系统试压。

8.8 非金属衬里的施工与检验

8.8.1 非金属衬里应在压力试验合格后进行施工，衬里施工前应将设备内壁吹干，并按 GB/T 8923 中 Sa2.5 或 St3 级的要求进行除锈。

8.8.2 锅炉用轻质耐热浇注料衬里，可按 SH/T 3115 进行施工与检验。

8.8.3 锅炉用粘土质、高铝质及高强度耐火浇注料衬里，可按 SH 3534 中不定形耐火材料炉衬进行施工与检验。

8.8.4 衬里施工完成并按相应标准要求养护后，按设计图样提供的烘烤曲线及要求进行烘烤。

8.8.5 衬里烘烤时，余热锅炉壳程内应充满锅炉用水，并进行水循环保护。在任何情况下，必须保证余热锅炉的水位在安全水位以上。

8.9 其他

8.9.1 余热锅炉用水的水质应符合 GB 1576—2008 的规定。

8.9.2 余热锅炉运输包装，应符合 JB/T 4711 的规定。

8.9.3 余热锅炉现场安装后，应按设计图样的要求进行保温。

用词说明

对本标准条文中要求执行严格程度的助动词，说明如下：

(一) 表示要求很严格，非这样做不可并具有法定责任时，用的助动词为“必须”(must)。

(二) 表示要准确地符合标准而应严格遵守时，用的助动词为：

正面词采用“应”(shall)；

反面词采用“不应”或“不得”(shall not)。

(三) 表示在几种可能性中推荐特别合适的一种，不提及也不排除其他可能性，或表示是首选的但未必是所要求的，或表示不赞成但也不禁止某种可能性时，用的助动词为：

正面词采用“宜”(should)；

反面词采用“不宜”(should not)。

(四) 表示在标准的界限内所允许的行动步骤时，用的助动词为：

正面词采用“可”(may)；

反面词采用“不必”(need not)。

中华人民共和国石油化工行业标准

石油化工管壳式余热锅炉

SH/T 3158—2009

条 文 说 明

2009 北 京

目 次

1 范围.....27

4 设计基础.....27

4.2 设计温度.....27

4.5 许用压力.....27

5 材料.....27

5.1 选材原则.....27

5.2 钢板.....27

5.3 钢管.....27

5.6 受压元件常用材料使用的温度范围.....27

5.8 非金属材料.....28

6 设计计算.....28

6.4 计算壁温.....28

6.5 折边挠性管板计算.....28

6.6 换热管计算.....29

6.9 管箱壳与锅炉壳程筒体相连的环形件计算.....29

7 结构设计.....29

7.5 支座.....29

7.6 管板.....29

7.7 换热管与管板的连接.....29

7.9 管板及管箱筒体与壳程筒体的连接.....29

7.10 高温侧管板及管头的热防护.....29

8 制造、检验与验收.....30

8.4 余热锅炉的组装与安装.....30

石油化工管壳式余热锅炉

1 范围

本标准管壳式余热锅炉是指：利用工业过程中的余热以产生蒸汽，由汽包和卧置挠性固定薄管板管壳式锅炉所组成的余热锅炉。

到目前为止，国内实际投用的管壳式余热锅炉其设计压力大多数没有超过 6.4MPa。因此，本标准将余热锅炉的最高设计压力定为 6.4MPa，可满足多数余热锅炉设计的需要。当设计压力超过本标准时，可在参照本标准的基础上，对管板进行温度场和应力分析计算。

4 设计基础

本章对余热锅炉的常用基本参数（设计压力、设计温度、设计载荷、厚度附加量、许用应力）的选取作出了规定。这些规定是在 GB 150、GB 151 的基础上，参考了 SH/T 3074、GB/T 16508 等标准，作出了较为详细的补充规定。

4.2 设计温度

本标准所列的设计温度选用表 1，是引用了 SH/T 3074 中的规定。

4.5 许用应力

管箱壳体与锅炉筒体连接的环形件虽然按本标准公式计算，但环形件是属于管箱壳体的一部分，故其许用应力按 GB 150 选取。

5 材料

5.1 选材原则

按 TSG R0004—2009 的要求，管壳式余热锅炉属于其管辖范围，因此本标准规定管壳式余热锅炉应按压力容器的要求进行选材。

5.2 钢板

5.2.1 锅炉筒体、汽包壳体只与水和蒸汽接触，在 6.4MPa 设计压力（6.5MPa 绝压）下的饱和蒸汽温度只有 280.7℃，选择质优价廉、便于制造的 Q245R、Q345R 常用钢板来制造锅炉筒体、汽包壳体，一般可满足设计要求。

管箱内介质比较复杂多样，不能只选 Q245R、Q345R 材料。如制氢转化气余热锅炉管程介质中含有一定量的氢气，对管箱筒体、换热管、管板存在氢腐蚀的可能，因此需考虑选用具有一定抗氢能力的材料，如：15CrMoR 钢板、15CrMo 钢管或其他铬钼钢等。

5.2.2 管壳式余热锅炉的主要受压元件管板所承受的载荷、失效形式等均比一般压力容器管壳式换热器用厚管板复杂。本条是依据管壳式余热锅炉的特点，提出子比一般压力容器用钢板更高的复验要求。设计者也可根据其操作条件及经验对其它主要受压元件用钢板提出复验其他特殊要求。

5.2.3 本条是参考了 HG 20581—1998 中的内容。

5.3 钢管

5.3.3.3 余热锅炉为重要的压力容器，换热管与管板连接接头的质量又是余热锅炉保证安全运行和使用寿命的重要部位。因此，对换热管的精度要求较高，要求换热管与管板孔精密配合，这对保证换热管与管板连接接头的质量很重要。本标准中表 3 是选用了 HG 20581—1998 的规定。

5.6 受压元件常用材料使用的温度范围

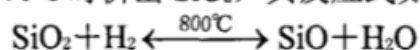
5.6.1 碳素钢和碳锰钢在高于 425℃ 温度下长期使用时, 钢中碳化物相有产生石墨化的倾向。因此, 本标准规定了 Q245R、Q345R 钢板, 20、20G 钢管及 20、16Mn 锻件使用的温度范围不大于 420℃。

5.6.2 本条是针对国内外硫磺回收装置制硫余热锅炉的多年设计和实践经验而编写的。换热管与管板间的连接接头是余热锅炉的关键部位, 当碳钢换热管与碳钢、Q345R 管板连接接头处的最高温度超过 370℃ 时, 管头会与硫、硫化氢介质产生严重的高温硫腐蚀。

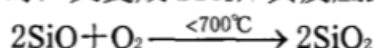
5.8 非金属材料

5.8.1 锅炉与高温气体接触的高温部位, 如管箱壳体等往往采用耐火、绝热非金属材料作衬里防护, 以降低壁温便于选材。但非金属衬里在还原性气体中必须注意硅和铁的含量。国外早期和国内的余热锅炉都有因非金属衬里中 SiO_2 和 Fe_2O_3 含量较多, 而使衬里被侵蚀产生空穴和析出 SiO_2 引起换热管堵塞造成装置停工的事故。

含硅和铁高的非金属保护层被侵蚀的原因, 据认为是耐火材料中的 SiO_2 在含氢还原性气体中, 高温下会气化流失。根据日本大阪工业所合成氨厂介绍, SiO_2 气化温度为 900℃, 而 400℃ 时就会冷凝。法国提供的资料介绍, 耐火砖会在 800℃ 时析出 SiO_2 , 其反应式如下:



SiO 成气态出现。而在小于 700℃ 时, 又变成 SiO_2 , 其反应式为:



当温度降低时, 由 SiO 生成的 SiO_2 会附着在设备上, 有时甚至带入系统内, 引起管路堵塞。 Fe_2O_3 在高温下, 可以和 CO 发生化学反应。为此, 本标准 5.8 条采用了国外标准中对非金属衬里材料要求 SiO_2 含量不大于 0.5%、 Fe_2O_3 含量不大于 0.4% 的规定。

6 设计计算

6.4 计算壁温

在任何情况下管板、换热管、中心管的计算壁温不得小于 250℃ 的要求, 计算壁温的取值是采用了 GB/T 16508 标准中的规定。

6.5 折边挠性管板计算

从 1983 年起, 管壳式余热锅炉已纳入压力容器范围内进行设计。因此, 本标准规定除折边挠性管板和换热管、环形件外的其他各受压元件均按 GB 150 规定进行计算。管板、换热管的计算是参照了 GB/T 16508—1996 标准中的有关内容加以整理而来。其中关键的问题是: GB/T 16508—1996 适用于额定蒸汽压力不大于 2.5MPa 的锅壳锅炉, 其中的薄管板厚度计算公式可否适用于设计压力不大于 6.4MPa 的锅壳锅炉, 据调查得知: GB/T 16508—1996 标准之所以将压力限制到 2.5MPa, 主要是考虑目前我国运行的锅壳式锅炉的额定蒸汽压力(表)一般都不大于 2.5MPa 的实际情况而定的, 这不说明标准中薄管板计算公式不适用于大于 2.5MPa 的设计压力。

英国 BS 2790: 1986 《焊接结构锅壳式锅炉设计制造规范》标准对设计压力并没有限制。

欧洲 EN 12953 《锅壳锅炉》标准限定设计压力不超过 40bar (4.0MPa), 但在注中写到: “本标准的规则同样适用于大于上述压力下运行的锅炉。不过, 通常认为有必要进行附加的设计分析、检验和测试”。这是因为此标准考虑了不带折边管板与筒体连接焊缝处的应力较大, 一般用应力分析法进行校核为好。

国内一家公司曾于 2004 年取得上海锅炉研究所的批准, 用 JB/T 16508—1996 标准中管板计算公式对 4.3MPa、7.2MPa 的管壳式余热锅炉折边挠性管板进行设计计算确定厚度, 同时采用应力分析法对 4.3MPa、7.2MPa 压力下不同直径的挠性管板进行过应力分析计算, 证明 JB/T 16508—1996 管板计算公式用于压力较高的管壳式余热锅炉薄管板计算校核无问题。

山东三维石化工程股份有限公司也曾对设计压力为 4.5MPa、直径分别为 $\phi 2900$ 、 $\phi 2600$ 的制硫余热锅炉管板按 JB/T 16508—1996 确定厚度, 并采用应力分析校核证明无问题。

在李之光编著的《锅炉强度计算标准应用手册》一书中写到：“管板属于双向受弯元件，按目前各国通用计算公式的安全裕度颇大”。

综上所述，本标准的管板计算公式在 6.4MPa 压力范围内是可靠的。

6.6 换热管计算

换热管壁厚的计算除采用了 GB/T 16508—1996 标准中有关计算规定外，因本标准将设计压力范围由 2.5MPa 提高到 6.4MPa，故增加了换热管与管板连接焊缝剪切强度的校核；另外考虑管程压力较高时，换热管有受压失稳的可能，又增加了换热管轴向稳定校核计算。

6.9 管箱壳与锅炉壳程筒体相连的环形件计算

对管箱壳体与锅炉壳程筒体连接的环形件壁厚计算公式，本标准是参考了“机械设计手册”（2002 年第四版第 1 卷）第 1~170 页“圆形平板计算公式”中序号 12 计算公式及表 1-1-117“圆环形平板内周边处应力计算系数表”中数据而来。

7 结构设计

7.5 支座

7.5.2 某些管壳式余热锅炉，是将汽包置于锅炉的上方而无专门构架支撑，因汽包与锅炉之间距离较小，一般由上升管支撑。如在锅炉与汽包之间设置鞍式支座，则应考虑上升管与鞍座之间热膨胀差的问题。

7.6 管板

7.6.2 余热锅炉管板管孔中心距一般较大，1.25 倍换热管外径是最小中心距。本标准中要求相邻管孔焊缝边缘之间的最小距离不小于 6mm，取自 GB/T 16508 规定。

呼吸空位是指因管、壳温度不同，所需管板上换热管外壁至筒体内壁之间的最小距离，本标准 7.6.2.d) 条规定的呼吸空位是按 GB/T 16508 的要求确定的。目的是防止管板产生过大的温差应力。

7.7 换热管与管板的连接

依据 GB/T 16508 的规定，要求强度焊缝高度 L_s 大于或等于换热管壁厚加 3mm，对于管程介质温度大于 600℃ 的场合还要求通过贴胀消除换热管与管板之间的间隙。

对于管程介质温度不小于 900℃ 的场合，多用于硫磺回收装置制硫余热锅炉，本标准 7.7 条中将伸出管板焊缝高度 a 控制在 $1 \sim 0.5$ mm，且使管端伸出焊缝的长度 $b = 0$ ，目的是尽量降低管头的最高温度，避免高温硫腐蚀。

7.9 管板及管箱筒体与壳程筒体的连接

对于管箱侧压力较高的制氢转化气余热锅炉，设计中一般采用图 9 b) 的结构，利用环形件使管箱筒体、壳程筒体形成对接全焊透结构。当管箱设计压力小于 1.6MPa 时，因压力较低，采用图 9 a) 所示的结构，使管箱与壳程筒体形成全焊透角接头结构。

7.10 高温侧管板及管头的热防护

7.10.1.1 根据试验，当管板衬里厚度在 20mm 以下时，管头温度随着衬里厚度的增加降低较快，当衬里厚度进一步增加时，管头降温并不十分明显。但考虑耐热衬里的施工及成形后结构的稳定性，其厚度一般取 75mm。

7.10.2 对于介质温度大于或等于 900℃ 的余热锅炉，如管头热保护结构采用图 13 所示的单瓷套管结构，在瓷套管与换热管管头结合处，瓷套管受管头温度的影响，会出现一个温度最低的“温谷”区，在此区内会出现较大的温差应力，使瓷套管剪断破坏。而采用图 10 所示的双瓷套管结构，使内瓷套管温度分布规律大大改善，“温谷”区外移到外瓷套管，从而延长了内瓷套管的使用寿命。

对于介质温度小于 900℃ 的余热锅炉，多采用图 13 所示的单瓷套管结构，也可采用图 14 所示的金属套管结构，因介质温度相对较低，从多年的使用情况看，没有发现问题。

换热管内壁与瓷套管外壁之间，留有 0.5mm~2mm 的环形间隙，此间隙除瓷套管的安装要求之外，间隙作为“呆滞”气层，增加了有效的热阻值，降低管头处温度，对管头起到了保护作用。

8 制造、检验与验收

8.4 余热锅炉的组装与安装

8.4.3 管板组装焊接后平面度的要求，是考虑到折边挠性管板厚度较薄的特点，依据 JB/T 1609-2002 《锅壳锅炉本体制造技术条件》中的规定提出的。

中 华 人 民 共 和 国
石 油 化 工 行 业 标 准
石油化工管壳式余热锅炉
SH/T 3158—2009

*

中国石化出版社出版
中国石化集团公司工程标准发行总站发行
地址：北京市东城区安定门外大街 58 号
邮编：100011 电话：(010) 84271850
石化标准编辑部电话：(010) 84289937
读者服务部电话：(010) 84289974
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail: press@sinopec.com.cn
版权专有 不得翻印

*

开本 880×1230 1/16 印张 2.5 字数 68 千字
2010 年 5 月第 1 版 2010 年 5 月第 1 次印刷

*

书号：155114·0129
(购买时请认明封面防伪标识)