

内部资料，请勿外传

课程设计指导书

换热器设计

哈尔滨工程大学
核科学与技术学院
2020 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课程设计目的	1
1.2 课程设计内容	1
1.3 课程设计题目	1
1.4 课程设计要求	2
1.5 课程设计时间安排	2
第 2 章 换热器设计步骤	4
第 3 章 换热器热力计算	6
第 4 章 换热器水力计算	11
参考文献	13
附录 1 设计说明书封面模板	14
附录 2 壳程摩擦系数	15
附录 3 温差校正系数	16
附录 4 水的结垢热阻	17
附录 5 液体在管内流动时的摩擦系数	17
附录 6 壳程压降结垢影响校正系数	18
附录 7 合理压降的选取	18
附录 8 参考图	19

第 1 章 绪论

1.1 课程支撑的毕业要求指标点

2.3、能够通过文献检索研究，分析问题，分析方案的合理性。

3.1、能够综合传热计算、流动计算、热力计算等过程进行方案设计和比较，对设计方案进行可行性评价和优选，体现创新意识；

5.1、掌握计算机基础知识，能针对工程问题进行编程设计；能恰当使用计算机软件及核工程仿真工具，完成核工程问题的预测、模拟与仿真分析，并能够理解其局限性；

5.2、掌握工程制图的相关基础知识，能将其用于工程设计中绘图，能用图纸表达核工程设备的设计问题；

9.2、能够在团队合作中与各成员进行有效沟通，共享信息，合作共事，在多学科背景下的团队中发挥团队协作精神；

9.3、能够倾听和综合团队成员意见，合理决策，体现管理能力。

10.1、能够通过撰写设计说明书、撰写报告等书面方式描述对核工程问题的理解和认识；

10.2、能够就报告主题进行陈述发言、答辩，能够清晰表达观点，清晰回应指令；能够就核工程领域复杂工程问题与业界同行进行有效沟通和交流；

1.2 指导书目的和要求

1、系统梳理传热学、工程流体力学等专业基础课程所学知识，掌握管壳式换热器的设计内容、设计要点和一般流程。

2、具备查阅和使用文献资料的能力，掌握弓形折流板管壳式换热器热力计算以及换热器管程、壳程的水力计算程序和方法。

3、具备利用通用计算机语言开发计算程序的能力，掌握计算机程序开发的基本流程。建议自主开发管壳式换热器设计计算程序。

4、掌握工程制图的基本规范，提高工程制图技能；完成管壳式换热器结构总图绘制。

5、在完成管壳式换热器设计程序开发及计算过程中，可通过团队合作形式完成，以使得成员能够在团队中承担个体、团队成员以及负责人的角色，增强责任感。

6、具备撰写管壳式换热器设计说明书和绘制图纸等书面方式呈现设计成果的能力，

并能够通过分析数据、方法和案例对比等，评价设计方案及设计合理性。

7、能够就管壳式换热器设计的相关问题进行口头表述，与答辩组成员进行有效沟通和交流，准确清晰表达观点，完成口头答辩。

1.3 课程设计目的

- 1、学习管壳式换热器设计与计算，掌握弓形折流板管壳式换热器设计标准流程和计算方法。
- 2、将所学的工程流体力学、传热学知识，运用到实际的换热器设计当中，通过课程设计，巩固专业基础课学习过的知识，加深认识。
- 3、掌握弓形折流板管壳式换热器的方案设计，培养换热器结构设计的能力。
- 4、培养查阅文献，利用资料的能力；培养选择方案和分析数据的能力；提高绘图基本技能。
- 5、培养工程设计素养，养成认真负责态度。

1.4 课程设计内容

- 1、完成管壳式换热器的热力计算；
- 2、完成所设计的换热器管程、壳程的水力计算；
- 3、绘制换热器结构总图。

1.5 课程设计题目

设计一台管壳式换热器，把 18000 kg/h 的热水由温度 t_1' 冷却至 t_1'' ，冷却水入口温度 t_2' ，出口温度 t_2'' ，设热水和冷却水的运行压力均为低压。

题目中的运行压力和 4 个温度由同学从以下压力和温度范围中自己任意设定 1 组，作为设计要求。

热水的运行压力：0.1MPa-0.3MPa (绝对压力)

冷却水运行压力：0.1MPa-0.2MPa (绝对压力)

热水入口温度 t_1' ： 75℃-85℃；

热水出口温度 t_1'' ： 40℃-50℃；

冷却水入口温度 t_2' ： 20℃-25℃；

冷却水出口温度 t_2'' ： 40℃-45℃；

说明：需要的公式和系数可从有关参考书或文献中查得。

1.6 课程设计要求

1、提交弓形折流板管壳式换热器的设计说明书 1 册。

2、提交弓形折流板管壳式换热器的总图 1 张。

3、设计说明书要求

使用 A4 纸，左侧装订，主体部分使用双面。

设计说明书包括

封面（注：使用附录中的统一封面格式。打印）

目录（注：标明页码。手写）

设计题目（注：按个人所选定的设计参数写设计题目。手写）

设计过程（注：简要说明设计过程。手写）

热力计算（注：可参考本课程设计指导书，使用提供的表格。表格及其中的项目和公式可以自行调整排版后打印；表格中缺少的公式或者步骤由同学自行加上；代数的过程及计算得到的数据，手写填表。）

水力计算（注：同上）

分析与总结（注：偏重技术的分析与总结。1 页以内，手写）

4、换热器总图要求

使用 A2 图纸，手绘，按规范折叠（叠成 A4 大小，露出标题栏）。

总图上包括

换热器总图（注：通过设计已经确定了尺寸的部分按比例画，标注尺寸；未确定尺寸的部分不标注尺寸。）

换热管布置图（注：同上）

标题栏、技术特性表、管口表等

技术要求（注：查参考资料填写。）

1.7 课程设计时间安排

2017 级换热器课程设计时间：2020 年 1 月 4/6 日-12 日。

2020 年 1 月 4 日/6 日，指导老师讲解课程设计及要求，布置本班答疑时间和地点。

2020 年 1 月 11 日-12 日，学生按要求进行课程设计计算和绘图，编写设计说明书。

按指导教师布置的时间和地点去答疑，有特殊问题可随时联系指导老师。

2020 年 1 月 10 日下午，各班将收齐的设计说明书和图纸交给指导教师。

2020 年 1 月 11 日 8:00-12:00, 14:00-18:00，课程设计答辩。以班级为单位，答辩老师为各班指导教师。

未通过的同学按老师要求修改设计说明书和图纸，复习，准备第二次答辩。

2020 年 1 月 12 日 8:00-12:00, 14:00-18:00，第一次答辩没通过的同学，第二次答辩。答辩老师为指导教师组。

第二次答辩未通过的同学，此门课程不及格，跟下一届重修。

课程设计授课时间和指导教师分班情况另行通知。

第2章 换热器设计步骤

换热器计算程序或步骤随着设计任务和原始数据的不同而不同，应根据换热器设计原理和方法灵活编排，要尽量使已知数据和要计算的项目顺次编排，但由于许多项目之间互相关联，无法排定次序，故往往先行根据经验选定一个数据使计算得以进行，等到该项数据通过计算得到后再与初选的数据进行比较，直到达到规定的差额要求，试算才告结束。例如，传热计算和水力计算中，不可避免地要涉及结构数据，为此，在换热器设计中，常先要根据经验资料初选一个传热系数 K_0 ，以便初步计算得到传热面积和确定结构，然后才能进行热力计算，并根据传热理论计算得到传热系数 K_j 。当 $K_j = (1.1-1.2) K_0$ 时，试算方为成功。一般条件下，换热器设计的步骤如下^[1]：

(1) 根据设计任务搜集尽量多的原始资料，包括给定的数据和查得的数据在内，例如：管、壳程的流体名称、温度、压力、允许压降、流量或热负荷等。

(2) 确定定性温度，并进而查得两侧流体的密度、粘度、导热系数、比热等。

(3) 计算换热器的总平均温差。为了决定平均温差的校正系数，需初步决定换热器流程型式。

(4) 计算热负荷，利用热平衡方程式，并初步估计一个换热器的热效率 η 以估计热量损失 Q_s ，即：

$$\text{热平衡热量: } Q_p = G_1 c_{p1} \Delta t_1 = G_2 c_{p2} \Delta t_2 + Q_s$$

$$\text{设计热负荷: } Q_0 = Q_p - Q_s$$

$$\text{或 } Q_0 = Q_p \cdot \eta = G_1 c_{p1} \Delta t_1 \cdot \eta$$

式中： G_1 、 G_2 为热、冷流体的质量流量，kg/s；

c_{p1} 、 c_{p2} 为热、冷流体的定压比热，kJ/(kg·°C)；

Δt_1 、 Δt_2 为热、冷流体的进出口温度差，°C；

(5) 初选传热系数 K_0 ，初算传热面积 F_0 ，进而利用 F_0 来选择标准型号换热器，或自行设计换热器的结构（包括管程和壳程的初步结构设计）。

(6) 管程压降及传热计算。选定允许压降 Δp ，假定壁面温度 t'_w ，并根据初选结构计算管程流通截面、流速、粘度校正系数、换热系数和压降，当换热系数远大于传热系数值且压降小于允许压降时，方能进行壳程传热计算，否则要重选 K_0 或进行结构调整。

(7) 壳程压降及传热计算。根据初选结构和 t'_w 计算壳程流通截面、流速，压降和换热系数，并核定压降及换热系数的合理性，不符合要求则改变壳程设计，调整折流板尺寸、间距或壳径，直至满意为止。

(8) 核算传热系数。根据两侧流体流速和温度决定污垢热阻，进而计得传热系数 K_j ，当 $K_j = (1.1-1.2) K_0$ 即符合要求。也可以进而计算出传热量 Q_j 与传热面积 F_j ，并与 Q_0 和 F_0 相比较，当有 10%~20% 的过剩传热面或传热量即符合要求。

(9) 核算壁面温度。根据传热系数计得的管壁温度 t_w 与假定的 t'_w 基本相符即可。

(10) 核算压降，当 6、7 步未进行压降计算时，对管、壳程的沿程摩擦阻力和局部阻力进行计算，总压降小于允许压降即为满意。

(11) 详细结构设计，并对管板、壳体进行强度校核，有时尚需核算管、壳热应力和管子接口处的拉脱应力。（本课程设计略）

为计算简明、检查调整方便，常按上述程序列表计算。

第3章 换热器热力计算

	No	计算项目	符号	单位	计算公式或图表	数值	备注
原始数据	1	冷却水进口温度	t_2'	°C	给定		绝对压力
	2	冷却水出口温度	t_2''	°C	给定		
	3	冷却水工作压力	p_2	MPa	给定		
	4	热水进口温度	t_1'	°C	给定		绝对压力
	5	热水出口温度	t_1''	°C	给定		
	6	热水流量	G_1	kg/h	给定		
	7	热水工作压力	p_1	MPa	给定		
定性温度	8	冷却水的定性温度	\bar{t}_2	°C	$\frac{t_2' + t_2''}{2}$		
	9	冷却水的密度	ρ_2	kg/m ³	查物性表		
	10	冷却水的比热	c_{p2}	kJ/(kg·°C)	查物性表		
	11	冷却水的导热系数	λ_2	W/(m·°C)	查物性表		
	12	冷却水的粘度	μ_2	kg/(m·s)	查物性表		

	No	计算项目	符号	单位	计算公式或图表	数值	备注
物 性 参 数 计 算	13	冷却水的 普朗特数	Pr_2		计算或直接查得		
	14	热水的定 性温度	\bar{t}_1	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{t_1'' + t_1'}{2}$		
	15	热水密度	ρ_1	kg/m^3	查物性表		
	16	热水比热	c_{p1}	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	查物性表		
	17	热水的 导热系数	λ_1	$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	查物性表		
	18	热水粘度	μ_1	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$	查物性表		
	19	热水的 普朗特数	Pr_1		计算或直接查得		
传 热 量 及 水 流 量	20	换热器 效率	η		取用		
	21	设计传 热量	Q_0	W	$G_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') \eta \times 1000 / 3600$		
	22	冷却水 流量	G_2	kg/h	$\frac{3600 Q_0}{1000 c_{p2} (t_2'' - t_2')}$		
有 效 平 均 温 差	23	逆流 平均温差	Δt_N	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{\Delta t_{\text{大}} - \Delta t_{\text{小}}}{\ln(\frac{\Delta t_{\text{大}}}{\Delta t_{\text{小}}})}$		
	24	参数	P		$\frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'}$		
			R		$\frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'}$		
			ϕ		附录 3 参考《传热学》		
		温差 校正系数					

	No	计算项目	符号	单位	计算公式或图表	数值	备注
	25	有效平均 温差	Δt_m	°C	$\phi \Delta t_N$		
管 程 换 热 系 数	26	试选 传热系数	K_0	W/(m ² ·°C)	参考值：500~1200		实际取 整 按 2 管 程计算
	27	初选 传热面积	F_0	m ²	$\frac{Q_0}{K_0 \Delta t_m}$		
	28	管子外径	d_0	m	选换热器管 换热器管参考规格： $\Phi 25 \times 2.5$ 、 $\Phi 19 \times 2$ 、 $\Phi 16 \times 1.5$ 无缝 钢管		
		管子内径	d_i	m	$d_0 - 2 \times \text{壁厚}$		
	29	管子长度	l	m	取换热器管标准长度 参考值：2、2.5、3、4.5、6 m		
	30	总管子数	N_t		$\frac{F_0}{\pi d_o l}$		
	31	管程 流通截面	a_2	m ²	$(\frac{N_t}{2}) \frac{\pi}{4} d_i^2$		
	32	管程流速	w_2	m/s	$\frac{G_2}{\rho_2 a_2 \times 3600}$		
	33	管程 雷诺数	Re ₂		$\frac{\rho_2 w_2 d_i}{\mu_2}$		
	34	管程 换热系数	h_2	W/(m ² ·°C)	$Nu_2 = 0.023 Re^{0.8} Pr^n$ $h_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d_i}$		

	No	计算项目	符号	单位	计算公式或图表	数值	备注
初 选 结 构	35	管子 排列方式			正三角形		正三角 形边长
	36	管间距	S	m	$\geq 1.25 d_o$ 为宜。 换热管常用中心距： $\Phi 25$ 换热管， $s = 32 \text{ mm}$ ； $\Phi 19$ 换热管， $s = 25 \text{ mm}$ ； $\Phi 16$ 换热管， $s = 22 \text{ mm}$ 。		
	37	管束中心处 一排管数	N_c		$1.1\sqrt{N_t}$		
	38	管束外沿与 壳体间距	e	m	$e = 2 d_o$		
	39	壳体内径	D_s	m	$S(N_c - 1) + 4d_o$		
	40	长径比	l/D_s		参考值：4~25 最佳值：6~10		
	41	弓形折流 板弓高	h	m	$0.2D_s$		
	42	折流板 间距	B	m	$D_s/3$		
	43	折流板数	n_B		$(l/B) - 1$		取整
壳 程 换 热	44	壳程 流通截面	a_1	m^2	$a_1 = BD_s(1 - \frac{d_o}{s})$		
	45	壳程流速	w_1	m/s	$\frac{G_1/3600}{\rho_1 a_1}$		
	46	壳程 质量流速	W_1	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	$\rho_1 w_1$		
	47	壳程 当量直径	d_e	m	参考《传热学》		

	No	计算项目	符号	单位	计算公式或图表	数值	备注
系数	48	壳程 雷诺数	Re_1		$\frac{W_1 d_e}{\mu_1}$		
	49	管间距 比值	$\frac{S_1}{S_2}$		参考《传热学》		
	50	努塞尔数	Nu_1		参考《传热学》		
	51	管排 修正系数	ε_n		参考《传热学》		
	52	壳程 换热系数	h_1	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$	$h_1 = \varepsilon_n \frac{Nu_1 \lambda_1}{d_0}$		
传热 系数	53	冷却水侧 污垢热阻	r_2	$m^2 \cdot ^\circ C / W$	附录 4		自来水
	54	热水侧 污垢热阻	r_1	$m^2 \cdot ^\circ C / W$	附录 4		
	55	管壁热阻	r	$m^2 \cdot ^\circ C / W$	忽略		
	56	总传热热阻	r_Σ	$m^2 \cdot ^\circ C / W$	$\frac{1}{h_1} + r_1 + r_2 (\frac{d_o}{d_i}) + \frac{1}{h_2} (\frac{d_o}{d_i})$		
	57	传热系数	K_j	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$	$\frac{1}{r_\Sigma}$		
	58	传热系数 比值大小	K_j / K_0		参考值: 1.1 ~ 1.2		
管壁 温度	59	管外壁 热流密度	q_1	W/m^2	$q_1 = \frac{Q_0}{N_i \pi d_o l}$		
	60	管外壁 温度	t_{w1}	$^\circ C$	$\bar{t}_1 - q_1 (\frac{1}{h_1} + r_1)$		
	61	管外壁 温度校核					

第 4 章 换热器水力计算

	No	计算项目	符号	单位	计算公式或图表	数值	备注
管程压降	1	壁温下水的粘度	μ_{w2}	Pa·s	查物性表		n_t 为管程数
	2	管程粘度修正系数	ϕ_2		$\left[\frac{\mu_2}{\mu_{w2}} \right]^{0.14}$		
	3	管程摩擦系数	ξ_i		附录 5		
	4	管子沿程压降	Δp_i	Pa	$\left(\frac{W_2^2}{2\rho_2} \right) \left(\frac{l \cdot n_t}{d_i} \right) \left(\frac{\xi_j}{\phi_2} \right)$		
	5	回弯压降	Δp_r	Pa	$\left(\frac{W_2^2}{2\rho_2} \right) 4n_t$		
	6	进、出口管处质量流速	W_{N2}	kg/(m ² ·s)	按 $\rho w^2 < 3300$ Pa 取用, w 为进、出口管流体流速		
	7	进、出口管处压降	Δp_{N2}	Pa	$\left(\frac{W_{N2}^2}{2\rho_2} \right) \times 1.5$		
	8	管程结垢校正系数	ϕ_{d2}		$\Phi 25 \times 2.5$ 管子, $\phi_{d2}=1.4$; $\Phi 19 \times 2$ 管子, $\phi_{d2}=1.5$; $\Phi 16 \times 1.5$ 管子, $\phi_{d2}=1.5$;		
	9	管程压降	Δp_2	Pa	$(\Delta p_i + \Delta p_r) \phi_{d2} + \Delta p_{N2}$		
壳	10	当量直径	d_e'	m	$\frac{D_s^2 - N_t d_o^2}{D_s + N_t d_o}$		
	11	雷诺数	Re_1'		$\frac{W_1 d_e'}{\mu_1}$		
	12	壳程摩擦系数	ξ_0		附录 2		

	No	计算项目	符号	单位	计算公式或图表	数值	备注
程 压 降	13	管束压降	Δp_0	`	$(\frac{W_1^2}{2\rho_1}) \left[\frac{D_s(n_B + 1)}{d_e'} \right] \frac{\xi_0}{\phi_1}$		
	14	管嘴处 质量流速	W_{N1}	kg/(m ² ·s)	按 $\rho w^2 < 2200$ 取用		
	15	进、出口管 压降	Δp_{N1}	Pa	$\frac{W_{N1}^2}{2\rho_1} \times 1.5$		
	16	导流板 阻力系数	ε_{ip}		由实测决定，缺乏实测数据时， 取 $\varepsilon_{ip} = 5 \sim 10$ 估算。		
	17	导流板压降	Δp_{ip}	Pa	$\frac{W_{N1}^2}{2\rho_1} \times \varepsilon_{ip}$		
	18	壳程结垢 修正系数	ϕ_{do}		附录 6		
	19	壳程压降	Δp_1	Pa	$\Delta p_0 \phi_{do} + \Delta p_{ip} + \Delta p_{N1}$		
	20	管程允许压降	$[\Delta p_2]$	Pa	附录 7		
	21	壳程允许压降	$[\Delta p_1]$	Pa	附录 7		
	22	压降校核					

参考文献

- [1] 朱聘冠. 换热器原理及计算. 清华大学出版社, 1987 年
- [2] 史美中, 王中铮. 热交换器原理与设计 (第四版). 东南大学出版社, 2009 年
- [3] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 (第四版). 高等教育出版社, 2011 年
- [4] 钱颂文, 换热器设计手册. 化学工业出版社, 2006 年
- [5] 潘继红, 田茂诚. 管壳式换热器的分析与计算. 科学出版社, 1996 年
- [6] GB151-1999 管壳式换热器
- [7] GB151-2012《热交换器》征求意见稿

换热器课程设计说明书

姓 名：

学 号：

班 级：

指导教师：

哈尔滨工程大学
核科学与技术学院
2018 年 1 月 12 日

附录 2

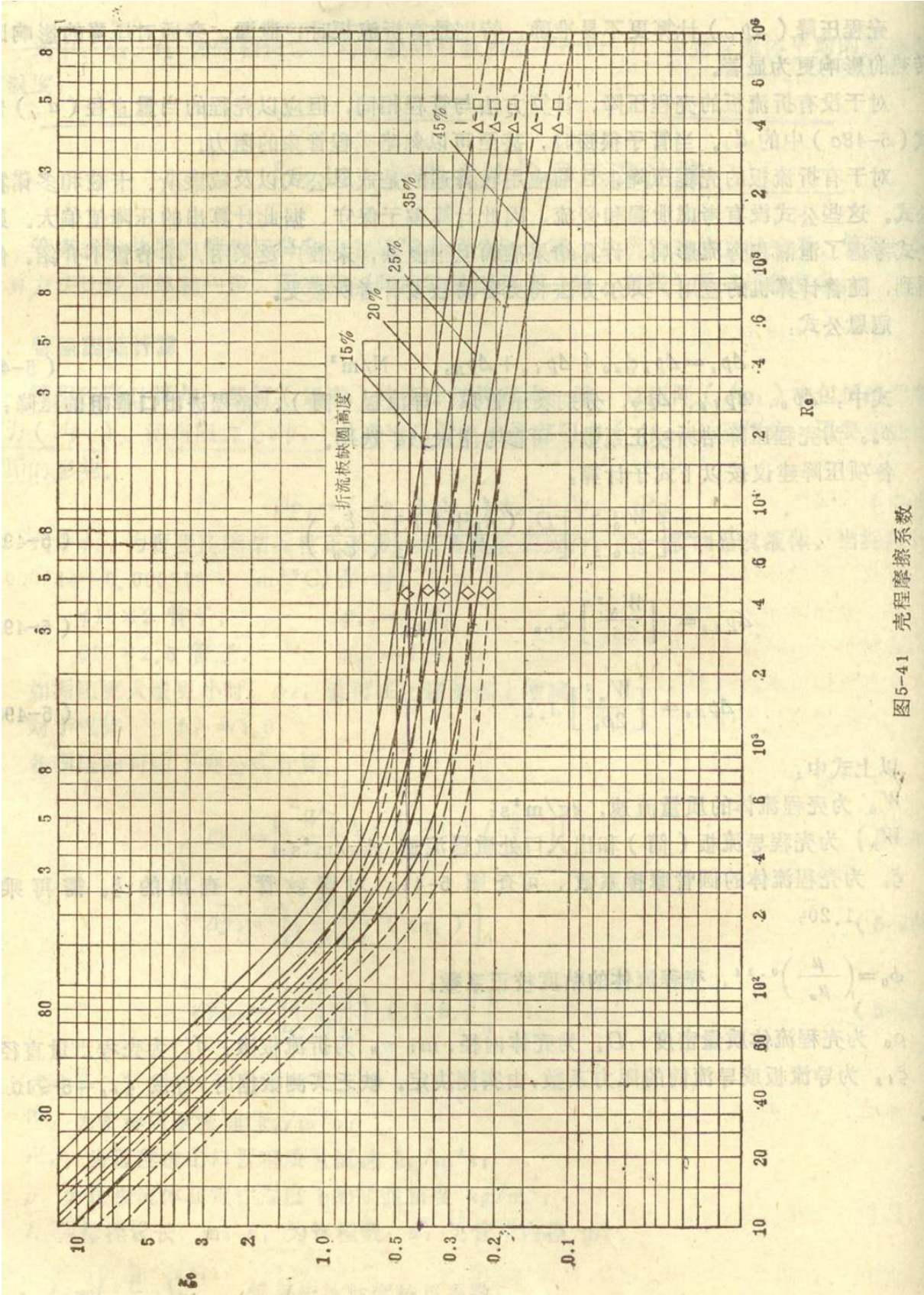
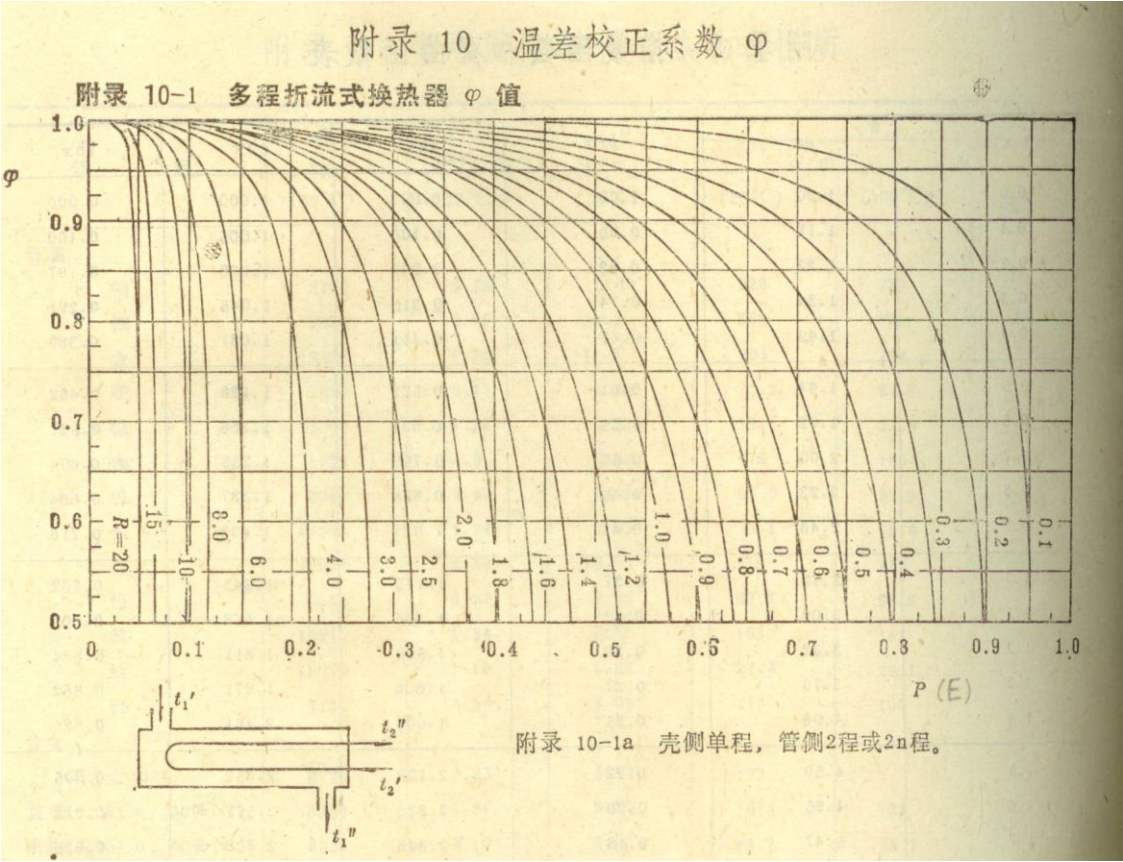


图 5-41 壳程摩擦系数

附录 3

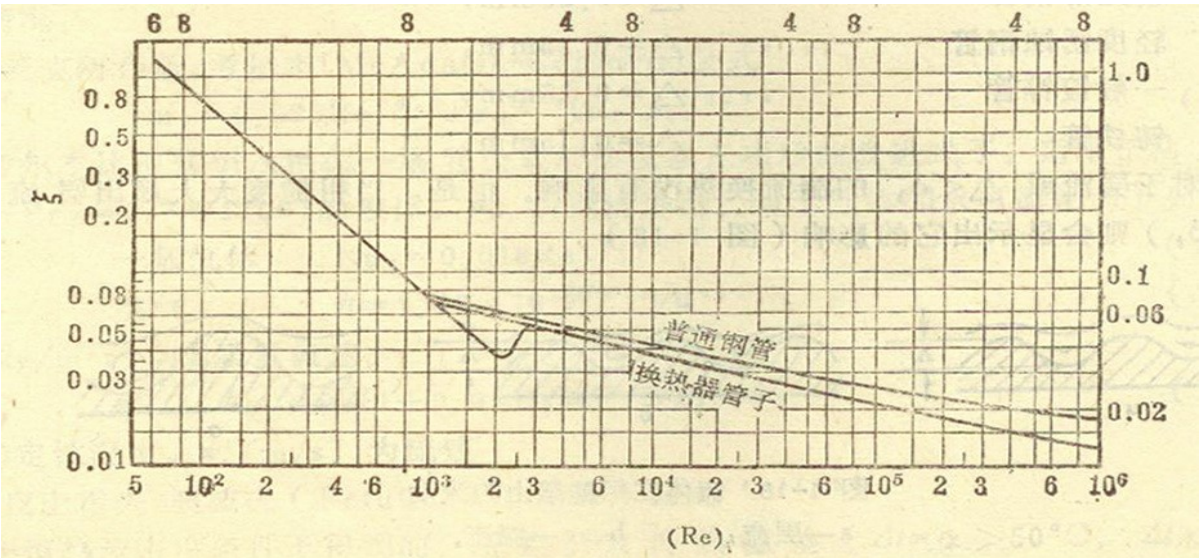


附录 4

水的结垢热阻 $10^5 r_d, \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$				
	热流体温度 $\leq 115^\circ\text{C}$		热流体温度 $115 \sim 200^\circ\text{C}$	
	水温 $\leq 50^\circ\text{C}$		水温 $> 50^\circ\text{C}$	
	水速 $\leq 1 \text{ m/s}$	水速 $> 1 \text{ m/s}$	水速 $\leq 1 \text{ m/s}$	水速 $> 1 \text{ m/s}$
蒸馏水	8.6	8.6	8.6	8.6
海水	8.6	8.6	17.2	17.2
干净软水	17.2	17.2	34.4	34.4
自来水	17.2	17.2	34.4	34.4
井水	17.2	17.2	34.4	34.4
洁净湖水	17.2	17.2	34.4	34.4
洁净河水	34.4	17.2	51.6	34.4
一般河水	60.2	34.4	68.8	60.2
凉水塔或洁水池				
用净化水补充	17.2	17.2	34.4	34.4
用未净化水补充	51.6	51.6	86.0	68.8
锅炉给水（净化后）	17.2	8.6	17.2	17.2
锅炉废水	34.4	34.4	34.4	34.4
硬水（ $>0.25 \text{ g/l}$ ）	51.6	51.6	86.0	86.0
城市河水（极浊）	146.2	146.2	172.0	146.2

注：若热流体温度超过 200°C ，结垢热阻乘以 $1.5 \sim 2.0$ 。

附录 5



流体在管内流动时的摩擦系数

附录 6

壳程压降结垢影响校正系数

层流区 ($Re_o < 10$)							
D_s/B		1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
r_{do} $m^2 \cdot ^\circ C/W$	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.000172	1.06	1.11	1.15	1.20	1.24	1.28
	0.000344	1.13	1.22	1.29	1.39	1.48	1.55
	0.000516	1.19	1.32	1.44	1.59	1.72	1.83
	0.000688	1.25	1.43	1.58	1.79	1.96	2.11
	≥ 0.000860	1.32	1.54	1.73	1.99	2.20	2.35

过渡区 ($Re_o = 10 \sim 100$) 及湍流区 ($Re_o \geq 100$)							
D_s/B		1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
r_{do} $m^2 \cdot ^\circ C/W$	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.000172	1.12	1.20	1.28	1.38	1.47	1.55
	0.000344	1.24	1.42	1.58	1.82	2.03	2.21
	0.000516	1.37	1.65	1.92	2.31	2.66	2.96
	0.000688	1.50	1.90	2.28	2.85	3.36	3.82
	≥ 0.000860	1.64	2.17	2.68	3.44	4.14	4.77

注：表中 Re_o 、 r_{do} ，表示壳程流体的 Re_o 及结垢热阻， D_s 为壳体内径， B 为折流板间距。

附录 7

合理压降的选取

运行情况	运行压力 bar (绝压)	合理压降 bar
负压运行	$p = 0 \sim 1$	$\Delta p = p/10$
低压运行	$p = 1 \sim 1.7$	$\Delta p = p/2$
	1.7 ~ 11	0.35
中压运行 (包括用泵运输的流体)	$p = 11 \sim 31$	$\Delta p = 0.35 \sim 1.8$
较高压运行	$p = 31 \sim 81$ bar (表压)	$\Delta p = 0.7 \sim 2.5$

附录 8

