

团 体 标 准

T/CMES XXXX—2026

包含非对称结构 管壳式热交换器管板的计算方法

Calculation Method of Tubesheets for Tubular Heat
Exchangers Including Asymmetric Configurations

(征求意见稿)

20XX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本文件实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

本文件版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

目 次

目 次	II
前 言	IV
引 言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和符号	1
3.1 术语和定义	1
3.2 符号说明	6
4 通用要求	11
4.1 一般原则	11
4.2 载荷	11
4.3 管板有效螺栓载荷的确定	11
4.4 载荷工况	12
4.5 管板的通用要求	12
4.6 与管板整体连接的管箱元件的结构要求	13
4.7 与管板临近的接管的要求	14
5 管板延伸结构	16
5.1 结构形式	16
5.2 设计考虑事项	16
5.3 计算程序	16
6 管板特性参数的确定	17
6.1 通则	17
6.2 设计考虑事项	17
6.3 计算程序	17
7 固定管板的计算方法	22
7.1 结构与载荷要求	22
7.2 计算程序	22

7.3 壳程圆筒分段设计的情形31

7.4 考虑管板与管箱或壳体连接处塑性影响的计算程序 32

8 浮动管板的计算方法34

8.1 结构与载荷要求34

8.2 计算程序 34

8.3 考虑管板与管箱或壳体连接处塑性影响的计算程序 43

9 U 型管式热交换器管板的计算方法45

9.1 结构及载荷要求45

9.2 计算程序45

9.3 考虑管板与管箱或壳体连接处塑性影响的计算程序 45

10 参考文献46

附录 A47

附录 B48

附录 C49

附录 D50

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国机械工程学会提出。

本文件起草单位：巴斯夫（中国）有限公司、江苏省特种设备安全监督检验研究院、中国特种设备检测研究院、合肥通用机械研究院有限公司、上海蓝滨石化设备有限责任公司、无锡化工装备股份有限公司、中国寰球工程有限公司、华东理工大学、茂名重力石化装备股份公司、上海科学技术委员会……

本文件主要起草人：

本文件的制订是基于管板设计统一理论，并参考 ASME 规范关于管板设计的相关技术内容，承认载荷及结构的“非中面对称”在热交换器中的普遍性，考虑两管板结构、材料、温度、厚度、直径及周边约束条件不同的情况，考虑重力及流体压降等重要因素的影响。

采用本方法，可考虑包含非对称结构的固定管板式、浮头式换热器，扩大了现有标准的适用范围。

本文件由 10 个章节和 4 个附录组成，包括范围、规范性引用文件、术语和符号、通用要求、管板延伸结构、管板特性参数的确定、固定管板的计算方法、浮动管板的计算方法、U 型管板的计算方法、参考文献、附录 A“函数定义表”、附录 B“向量 X_j 定义”、附录 C“辅助函数表达式”和附录 D“系统方程组”。

本文件的附录 A、附录 B、附录 C 和附录 D 为规范性附录。

本文件为首次发布。

引 言

中国机械工程学会压力容器分会在 2018 年成立了标准化工作委员会，该委员会的任务是承担压力容器及压力管道的设计、制造、安装、改造、维修、使用、检验检测等方面的团体标准（含指导性技术文件）的制修订、复审、宣贯、解释等工作。

这些团体标准的技术条款包括了压力容器建造（即指设计、制造、检验和验收工作）及使用过程中应遵循的强制性要求、特殊禁用规定以及推荐性条款，其中推荐性条款不是必须执行的部分。标准没有必要、也不可能囊括适用范围内压力容器建造及使用中的所有技术细节，因此，在满足法规所规定的基本安全要求的前提下，不应禁止标准中没有特别提及的技术内容。标准不能作为具体压力容器建造及使用的技术手册，亦不能替代培训、工程经验和工程评价。工程评价是指由知识渊博、娴于规范应用的技术人员所做出针对具体产品的技术评价。但工程评价应符合标准的相关技术要求，不得违反标准中的强制性要求和禁用规定。

这些团体标准不限制实际工程设计和建造中采用先进的技术方法，但工程技术人员采用先进的技术方法时应能做出可靠的判断，确保其满足本文件规定，特别是关于强制性的设计规定。

这些团体标准规定的技术方法和技术要求不涉及任何专利，但注意标准的工程应用可能会涉及特定专利，标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

对于标准技术条款的询问应以书面形式向委员会秘书处提交，并有义务提供可能需要的资料。与标准条款没有直接关系或不能被理解的询问将视为技术咨询的范畴，委员会有权拒绝回答。

对于未经委员会书面授权或认可的其他机构对标准的宣贯或解释所产生的理解歧义和由此产生的任何后果，委员会将不承担任何责任。

包含非对称结构管壳式热交换器管板的计算方法

1 范围

1.1 本文件给出了包含非对称结构管壳式热交换器圆形管板的计算方法。

1.2 本文件适用于固定管板式热交换器、浮头式热交换器及 U 型管式热交换器的管板计算。除包含 GB/T 151 所适用的结构外，还适用于以下任一情形以及它们之间的任意组合：

- a) 两管板材料、厚度和/或直径不同的情况；
- b) 两管板边缘连接结构不同的情况。

1.3 本文件不适用于下列管壳式热交换器管板：

- a) 管板为非圆形管板；
- b) 布管区域非均匀布管；
- c) 布管区虽为圆形但布管不均匀，如具有不同管径的换热管；
- d) 不能视为轴对称结构的管板，如管板仅部分布管的情形；
- e) 挠性管板。
- f) 双管板换热器管板。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，仅注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 150.1	压力容器第 1 部分：通用要求
GB/T 150.2	压力容器第 2 部分：材料
GB/T 150.3	压力容器第 3 部分：设计
GB/T 151	热交换器
GB/T 4732	压力容器分析设计

3 术语和定义、符号

3.1 术语和定义

GB/T 150.1-2024、GB/T 151-2026 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

固定管板式热交换器 fixed tubesheet heat exchanger

有两块固定端管板、每块管板和管箱相连接的热交换器，热交换器装有将两管板相连接的直管束，见图 3-1（a）。

3.1.2 浮头式热交换器 floating head heat exchanger

有一块和壳体与管箱相连的固定端管板，及一块能轴向移动，如图 3-1（b）所示，浮动管板的热交换器。热交换器装有将两管板相连接的直管束。

3.1.3 P 型填料函式热交换器 P type packed heat exchanger

有一块和壳体与管箱相连的固定端管板，及一块能轴向移动，如图 3-1（c）所示，P 型填料函密封管板的热交换器。热交换器装有将两管板相连接的直管束。

3.1.4 W 型填料函式热交换器 W type packed heat exchanger

有一块和壳体与管箱相连的固定端管板，及一块能轴向移动，如图 3-1（d）所示，W 型填料函密封管板的热交换器。热交换器装有将两管板相连接的直管束。

3.1.5 U 型管式热交换器 U tube heat exchanger

有一块和壳体与管箱相连的固定端管板，并装有连接在管板上的 U 型管束，示于图 3-1（e）。

3.1.6 管板结构

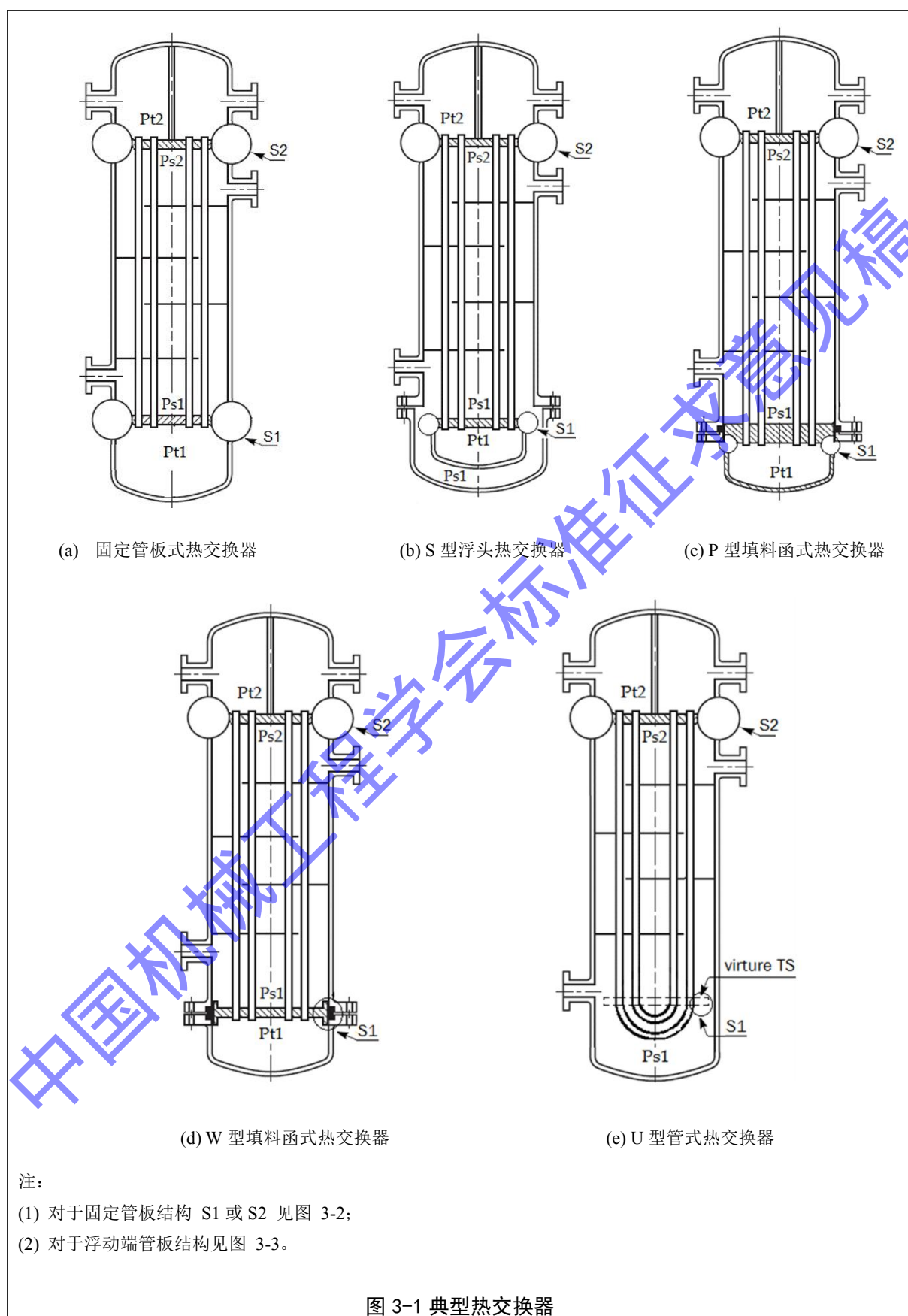
a) 固定端管板的结构定义，见图 3-2：

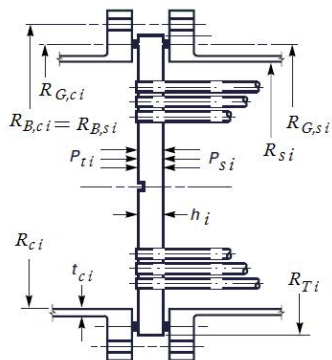
- 1) 结构 a—管板与管箱和壳体皆为垫片连接；
- 2) 结构 b—管板与管箱和壳体为整体连接；
- 3) 结构 c—管板与壳体整体连接，与管箱垫片连接、管板不兼作法兰；
- 4) 结构 d—管板与管箱整体连接，与壳体垫片连接、管板不兼作法兰；
- 5) 结构 e—管板与壳体整体连接，与管箱垫片连接、管板延伸部分兼作法兰；
- 6) 结构 f—管板与管箱整体连接，与壳体垫片连接、管板延伸部分兼作法兰。

b) S 型浮头管板—浮头管板与管箱垫片连接，管板不兼作法兰，见图 3-3（a）：

c) P 型填料函浮动管板—浮动管板与管箱整体连接，管箱与壳体间采用填料函密封，见图 3-3（b）。

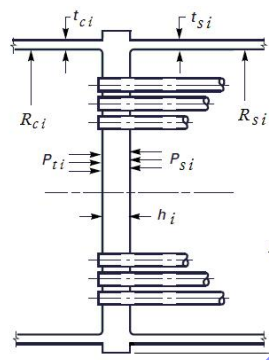
d) W 型填料函浮动管板—浮动管板与管箱无连接，管板与管箱及壳体间采用填料函密封 3-3（c）。





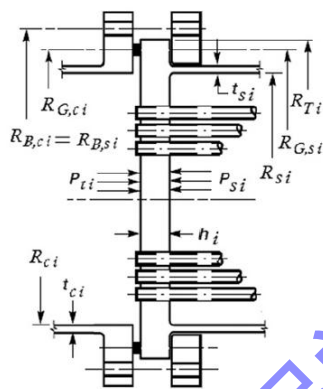
(a): 结构 a

管板与管箱和壳体皆为垫片连接



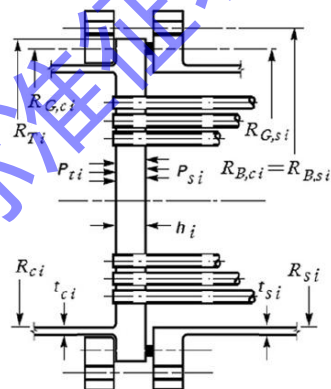
(b): 结构 b

管板与管箱和壳体为整体连接



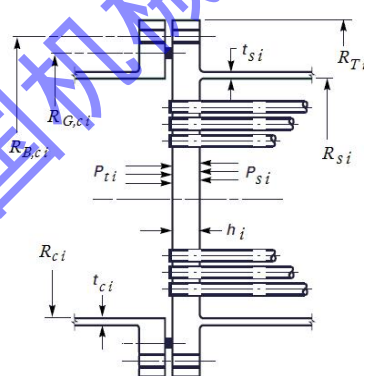
(c): 结构 c

管板与壳体整体连接，
与管箱垫片连接、管板不兼作法兰



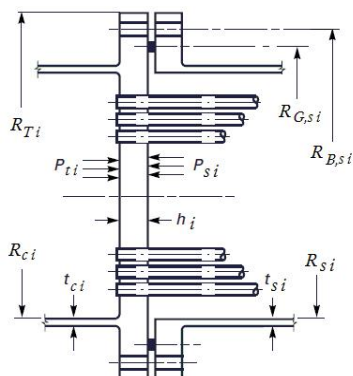
(d): 结构 d

管板与管箱整体连接，
与壳体垫片连接、管板不兼作法兰



(e): 结构 e

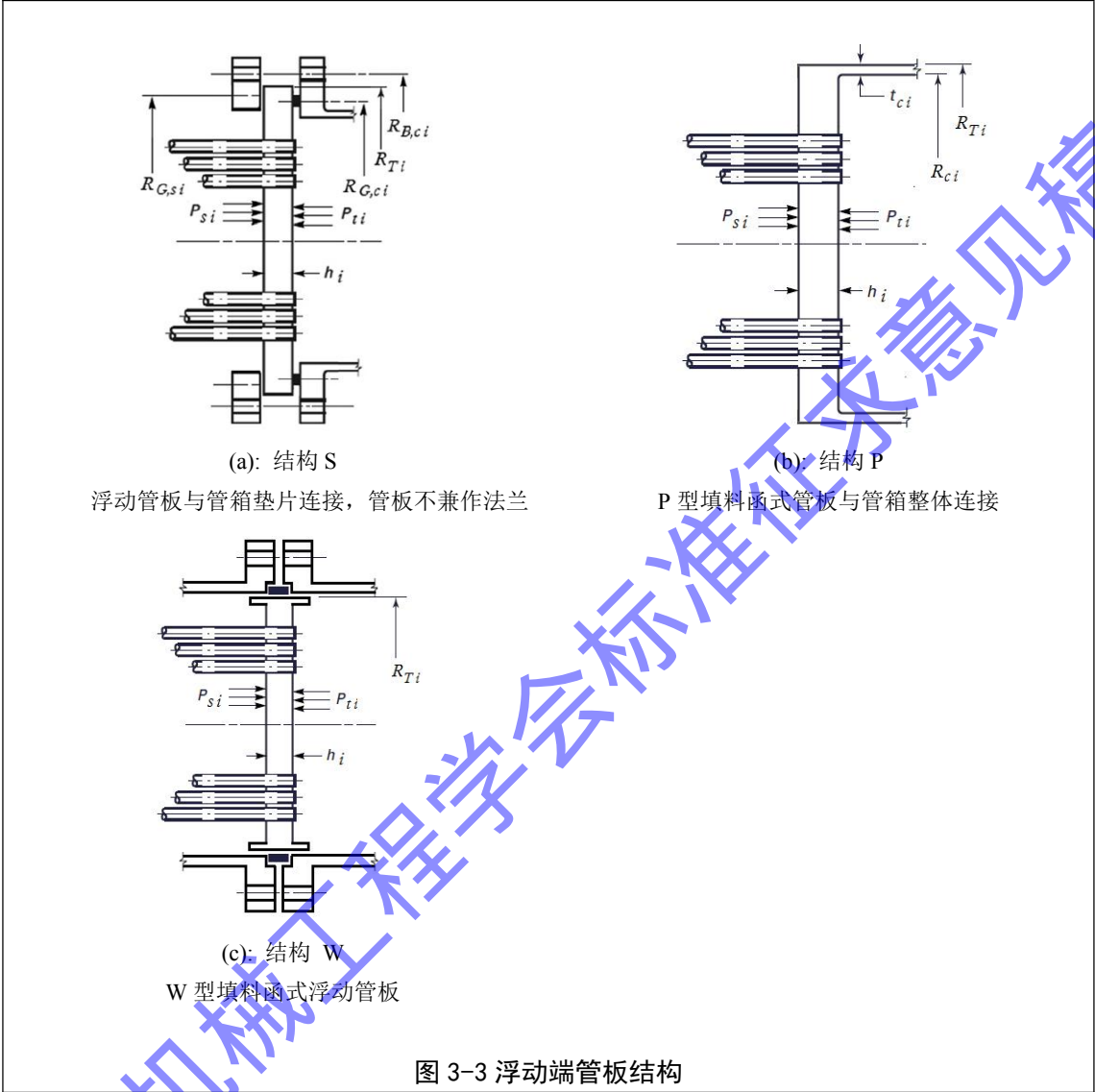
管板与壳体整体连接，
与管箱垫片连接、管板延伸部分兼作法兰



(f): 结构 f

管板与管箱整体连接，
与壳体垫片连接、管板延伸部分兼作法兰

图 3-2 固定端管板结构



3.2 符号

3.2.1 下标符号说明

i ——对于卧式热交换器： $i=1$ 表示热交换器左侧相关参数， $i=2$ 表示热交换器右侧相关参数；对于立式热交换器： $i=1$ 表示热交换器下部相关参数， $i=2$ 表示热交换器上部相关参数；

3.2.2 符号说明

下列符号适用于本文件。

$A_{0i}, \dots, A_{3i}$	——管板环板区待定积分常数，向量 $\{X_j\}$ 的元素；
A_{Li}	——不布管带的总面积， $A_{Li} = L_{L1,i}U_{L1,i} + L_{L2,i}U_{L2,i} + \dots + L_{Ln,i}U_{Ln,i}$ （极限值为 $4D_o p_i$ ）， mm^2 ；
a_o	——布管区当量半径，按7.2.2或8.2.2确定， mm ；
$ber(x)$	——以 x 为自变量的Kelvin函数，按附录A表A-1确定；
$ber'(x)$	——以 x 为自变量的Kelvin函数的导函数，按附录A表A-1确定；
$bei(x)$	——以 x 为自变量的Kelvin函数，按附录A表A-1确定；
$bei'(x)$	——以 x 为自变量的Kelvin函数的导函数，按附录A表A-1确定
$C_1, \dots, C_4$	——管板开孔区待定积分常数，向量 $\{X_j\}$ 的元素；
c_{ti}	——管程侧的管板腐蚀裕量， mm ；
D_{fi}	——管板法兰环抗弯刚度，按7.2.5或8.2.5确定， $\text{N}\cdot\text{mm}$ ；
D_i	——管板环板区抗弯刚度，按7.2.5或8.2.5确定， $\text{N}\cdot\text{mm}$ ；
D_i^*	——管板布管区抗弯刚度，按7.2.5或8.2.5确定， $\text{N}\cdot\text{mm}$ ；
D_o	——管板布管区当量直径，按6.3确定， mm ；
d_i	——管孔公称直径， mm ；
d_t	——换热管公称外径， mm ；
E_i	——管板材料在温度 T_{Ti} 时的弹性模量， MPa ；
E_i^*	——管板布管区设计温度 T_{Ti} 下的有效弹性模量， MPa ；
E_{ci}	——管箱材料在温度 T_{ci} 时的弹性模量， MPa ；
E_{si}	——壳体材料在温度 T_{si} 时的弹性模量， MPa ；
E_t	——换热管材料在温度 T_t 时的弹性模量， MPa ；
E_{tTi}	——换热管在管板设计温度 T_{Ti} 下的弹性模量， MPa ；
E_{si}^*	——中部壳体设计温度 T_{si}^* 下的弹性模量， MPa ；
F_{ai}	——管板布管区边缘面内径向力，向量 $\{X_j\}$ 的元素， N/mm ；
F_{fi}	——管板法兰环内边缘面内径向力，向量 $\{X_j\}$ 的元素， N/mm ；
F_{si}	——壳程筒体边缘轴向力，向量 $\{X_j\}$ 的元素， N/mm ；
$\tilde{F}_{ci}$	——管箱压力轴向力，按7.2.6或8.2.6确定， N ；
$\tilde{F}_{psi}$	——壳程压力轴向推力，按7.2.6或8.2.6确定， N ；
$\tilde{F}_{pti}$	——管程压力轴向推力，按7.2.6或8.2.6确定， N ；
f_{nb}	——折流板影响系数： $f_{nb} = \begin{cases} 1.0, & n_b \leq 4 \\ 0.0, & n_b \geq 5 \end{cases}$

- f_{si} ——壳体轴向柔度系数, 按7.2.7、7.3、8.2.7确定, mm^2/N ;
- f_n ——管端弯矩影响系数: $f_n = \begin{cases} 2.0, & n_b \leq 4 \\ 3.0, & n_b \geq 5 \end{cases}$
- g ——重力影响系数: $g = \begin{cases} 0.0, & \text{若热交换器水平安装} \\ 1.0, & \text{若热交换器立式安装} \end{cases}$
- h_i ——管板厚度, mm ;
- h_{fi} ——管板法兰环计算厚度 (管板位于 $R_{fi} \leq r \leq R_{Ti}$ 部分的平均厚度), mm ;
- h_{gi} ——管程侧分程隔板槽深度, mm ;
- h'_{gi} ——管程侧分程隔板槽有效深度, mm ;
- h_{ri} ——管板延伸兼作法兰的部分的所需最小截面厚度, 见图7-1, mm ;
- h_{wi} ——有效螺栓力臂, 按7.2.6或8.2.6确定, mm ;
- $I_0(x)$ ——以 x 为自变量的Bessel修正函数, 按附录A表A-1确定;
- $I'_0(x) \dots$ ——以 x 为自变量的Bessel修正函数的一阶、二阶、三阶导数, 按附录A表A-1确定;
- $I_{2i}(x)$ ——以 x 为自变量的函数, 按附录A表A-1确定;
- $I_Q(x)$ ——以 x 为自变量的函数, 按附录A表A-1确定;
- I_t ——管子截面惯性矩, $I_t = \pi[d_t^4 - (d_t - 2t_t)^4]/64$, mm^4 ;
- K_{ji} ——膨胀节轴向刚度总轴向力/伸长量, N/mm ;
注: 当某一侧不含膨胀节时, $K_{ji} = \infty$, 即值为无穷;
- k_{ci} ——管箱刚度, 按7.2.3或8.2.3确定, N ;
- k_{si} ——壳体刚度, 按7.2.3或8.2.3确定, N ;
- k_{ti} ——管端弯曲刚度, 按7.2.4或8.2.4确定, N/mm ;
- k_w ——管束轴向刚度, 按7.2.4或8.2.4确定, N/mm^3 ;
- L ——两管板内表面之间的换热管长度, 见图 7-3, mm ;
- $L_{L1,i}, L_{L2,i} \dots$ ——不布管带长度, 见图 6-2, mm ;
- L_t ——换热管长度, mm ;
- L_{si} ——壳体长度, 见图 7-1 或图 7-3, mm ;
- L'_{si} ——中间壳体长度, 见图 7-3, mm ;
- l_{cr} ——换热管当量稳长度, 按图7-2确定, mm ;
- l_{ti} ——管板到第一块临近的折流板之间的距离, 见图7-1, mm ;
- l_{ti}^c ——换热管管端计算弯曲长度, $1.5l_{ti}$ 与 $10d_t$ 取大值且不超过 L ,
 $l_{ti}^c = \text{MIN} [L, \text{Max} (1.5l_{ti}, 10d_t)]$, mm ;
- l_{tji} ——换热管与管板非开槽胀接长度或焊脚高度, 按GB/T 151-2026之7.6确定, mm ;
- l_{xi} ——换热管胀接长度, $0 \leq l_{xi} \leq h_i$, 见图 6-1 (b), mm ;
换热管对管板的胀接长度由胀管压力形成的, 这导致换热管和管板之间建立起接触。在选择胀接长度值时, 设计师需考虑初始胀接程度、热膨胀差或其它会导致胀接松弛的因素;

M_{ci}	——管箱边缘弯矩, 向量 $\{X_j\}$ 的元素, N·mm/mm;
M_{fi}	——管板法兰环边缘弯矩, 向量 $\{X_j\}$ 的元素, N·mm/mm;
M_{si}	——管箱边缘弯矩, 向量 $\{X_j\}$ 的元素, N·mm/mm;
$\tilde{M}_{fi}$	——管板法兰环计算弯矩, 按 7.2.8.3 或 8.2.8.3 确定, N·mm;
n_t	——换热管数量;
n_b	——折流板或支撑板数量;
P_a	——重力及压降的当量压力, 按 7.2.7 或 8.2.7 确定, MPa;
P_e	——管板参考计算压力, 按 7.2.7 或 8.2.7 确定, MPa;
P_{si}	——壳程管板处设计压力或操作压力, MPa;
P_{Ti}	——重力导致的当量管板压力, 按 7.2.7 或 8.2.7 确定, MPa;
P_{ti}	——管程管板处设计压力或操作压力, MPa;
$P_{min,si}$	——最小壳程设计压力或操作压力, 当为真空时压力取负值, MPa;
$P_{max,si}$	——最大壳程设计压力或操作压力, MPa;
$P_{min,ti}$	——最小管程设计压力或操作压力, 当为真空时压力取负值, MPa;
$P_{max,ti}$	——最大管程设计压力或操作压力, MPa;
p_i	——管节距, 见图 6-1 (a), mm;
Q_{ci}	——管箱边缘剪力, 向量 $\{X_j\}$ 的元素, N/mm;
Q_{fi}	——管板法兰环内边缘剪力, 向量 $\{X_j\}$ 的元素, N/mm;
Q_{si}	——管箱边缘剪力, 向量 $\{X_j\}$ 的元素, N/mm;
$R_{eL,ci}$	——管箱材料在设计温度 T_{ci} 下的屈服强度, MPa;
$R_{eL,si}$	——壳体材料在设计温度 T_{si} 下的屈服强度, MPa;
$R_{eL,t}$	——换热管材料在设计温度 T_t 下的屈服强度, MPa;
$R_{eL,Ti}$	——管板材料在设计温度 T_{Ti} 下的屈服强度, MPa;
R_{ci}	——管箱内半径, 见图 3-3、图 3-4、图 4-1, mm;
R_{ji}	——膨胀节波高处的内半径, 见图 7-3 (若无膨胀节取 $R_{ji} = R_{si}$), mm;
$R_{m,ci}$	——管箱平均半径 $R_{m,ci} = R_{ci} + 0.5t_{ci}$, mm;
$R_{m,si}$	——壳体平均半径 $R_{m,si} = R_{si} + 0.5t_{si}$, mm;
$R'_{m,si}$	——中间壳体平均半径, $R'_{m,si} = R'_{si} + 0.5t'_{si}$, mm;
$R_{B,ci}$	——管箱法兰螺栓中心圆半径, 见图 3-2, 图 3-3, mm;
$R_{B,si}$	——壳程法兰螺栓中心圆半径, 见图 3-2, 图 3-3, mm;
R_{fi}	——管板法兰环内半径, 按 7.2.2 或 8.2.2 确定, mm;
$R_{G,ci}$	——管箱垫片载荷作用力处中心圆半径, 或法兰与管板接触的中点到管板中心的距离见图 3-2, 图 3-3, mm;
$R_{G,si}$	——壳程法兰垫片载荷作用力处中心圆半径, 或法兰与管板接触的中点到管板中心的距离见图 3-2, 图 3-3, mm;
$R_{G,Xi}$	——壳程垫片与管程垫片内半径中较大值, 但不小于管箱与壳体法兰内半径中较大值, mm;
R_{si}	——壳体内半径, 见图 3-2、图 3-3, mm;
R'_{si}	——中间壳体内半径 $R'_{si} = R_{si}$, 见图 7-3, mm;
R_{Ti}	——管板外半径, 见图 3-2、图 3-3, mm; 用于计算管板外半径 R_{Ti} 值不得超过厚度小于 $0.75h_i$ 或 $h_i - 10$ mm处的管板延伸处的半径。

$R_{X,fi}$	——垫片作用反力半径, mm 对管板结构 a: $R_{X,fi} = R_{G,ci}$ 或 $R_{X,fi} = R_{G,si}$ 视情况而定 对管板结构 e: $R_{X,fi} = R_{G,ci}$ 对管板结构 f: $R_{X,fi} = R_{G,si}$
$S_{a,fi}$	——管板延伸部分材料在室温下的许用应力, 按4.5确定, MPa;
S_{fi}	——管板延伸部分材料设计温度下的许用应力, 按4.5确定, MPa;
S_t	——换热管材料在设计温度 T_t 下的许用应力, 按GB/T 150或GB/T 4732规定许用应力选取, MPa;
S_{tTi}	——换热管材料在管板设计温度 T_{Ti} 下的许用应力, 按GB/T 150或GB/T 4732规定许用应力选取, MPa;
S_{ti}	——换热管端部材料在设计温度 T_{ti} 下的许用应力, 按GB/T 150或GB/T 4732规定许用应力选取, MPa;
S_{ci}	——管箱材料在设计温度 T_{ci} 下的许用应力, 按GB/T 150或GB/T 4732规定许用应力选取, MPa;
$S_{PS,ci}$	——管箱材料在设计温度 T_{ci} 下一次应力加二次应力的许用范围, $S_{PS,ci} = 3S_{ci}$, MPa;
$S_{PS,si}$	——壳体材料在设计温度 T_{si} 下一次应力加二次应力的许用范围, $S_{PS,si} = 3S_{si}$, MPa;
$S_{PS,Ti}$	——管板材料在设计温度 T_{Ti} 下一次应力加二次应力的许用范围, 按4.5确定, MPa;
S_{si}	——壳体材料在设计温度 T_{si} 下的许用应力, 按GB/T 150或GB/T 4732规定许用应力选取, MPa;
S'_{si}	——中间壳体材料在设计温度 T'_{si} 下的许用应力, 按GB/T 150或GB/T 4732规定许用应力选取, MPa;
S_{Ti}	——管板材料在设计温度 T_{Ti} 下的许用应力, 按4.5确定, MPa;
T_a	——热交换器装配温度 ($T_a = 20$), °C;
T_t	——设计工况或操作工况下, 换热管设计温度, °C;
T_{ti}	——设计工况或操作工况下, 换热管两端的设计温度, °C;
T_{ci}	——设计工况或操作工况下, 管箱设计温度, °C;
T_{fi}	——设计工况或操作工况下, 管板法兰环设计温度, °C;
T_{si}	——设计工况或操作工况下, 壳体设计温度, °C;
T_{Ti}	——设计工况或操作工况下, 管板布管区设计温度, °C;
T'_{si}	——设计工况或操作工况下, 中部壳体设计温度, °C;
$T_{m,si}$	——壳体沿长度方向的平均温度, °C;
$T'_{m,si}$	——中部壳体沿长度方向的平均温度, °C;
$T_{m,t}$	——换热管沿长度方向的平均温度, °C;
t_t	——换热管公称壁厚, mm;
t_{ci}	——管箱公称壁厚, mm;
t_{si}	——壳体公称壁厚, mm;
t'_{si}	——中间壳体公称壁厚, 见图7-3, mm;
$U_{L1,i}, U_{L2,i}, \dots$	——不布管带相邻管排之间的中心距, 见图6-2, 但总和不超过 $4p_i$, mm;

W_{ci}	——垫片密封工况下的管箱法兰螺栓设计载荷，按GB/T 150.3式（9-9）确定，N；
W_{dci}	——管箱法兰螺栓设计载荷，按GB/T 150.3式（9-4）确定，N；
W_{dsi}	——壳程法兰螺栓设计载荷，按GB/T 150.3式（9-4）确定，N；
$W_{di,max}$	—— W_{dci} 与 W_{dsi} 的取大值， $\text{Max}(W_{dci}, W_{dsi})$ ，N；
W_{di}	——操作工况下法兰设计螺栓载荷，按GB/T 150.3式（9-4）确定，N；
$W_{i,max}$	—— W_{ci} 与 W_{si} 的取大值， $\text{Max}(W_{ci}, W_{si})$ ，N；
W_{si}	——垫片密封工况下的壳程法兰螺栓设计载荷，按GB/T 150.3式（9-9）确定，N；
W_i^*	——从表4-1中选择的对应每一个结构和载荷工况下的管板有效螺栓载荷，N；
W_{ft}	——单根换热管内填充物重，N；
$\{X_j\}$	——管板计算向量组，见附录B定义，按7.2.10或8.2.10确定；
χ_s	——换热管截面积在壳程侧的占比，按7.2.2或8.2.2确定；
χ_t	——换热管截面积在管程侧的占比，按7.2.2或8.2.2确定；
α	——管束和管板轴向系数，按7.2.5或8.2.5确定， mm^{-1} ；
$\alpha_{m,t}$	——换热管材料在 $T_{m,t}$ 温度下的平均线胀系数， $\text{mm/mm/}^\circ\text{C}$ ；
$\alpha_{m,ci}$	——管箱材料在 $T_{m,ci}$ 温度下的平均线胀系数， $\text{mm/mm/}^\circ\text{C}$ ；
$\alpha_{m,si}$	——壳体材料在 $T_{m,si}$ 温度下的平均线胀系数， $\text{mm/mm/}^\circ\text{C}$ ；
$\alpha_{m,Ti}$	——管板材料在 T_{Ti} 温度下的平均线胀系数， $\text{mm/mm/}^\circ\text{C}$ ；
$\alpha'_{m,si}$	——中部壳体材料在 $T'_{m,si}$ 温度下的平均线胀系数， $\text{mm/mm/}^\circ\text{C}$ ；
β	——管束和管板弯曲系数，按7.2.5或8.2.5确定， mm^{-1} ；
β_{ci}	——管箱特征长度系数，按7.2.3或8.2.3确定， mm^{-1} ；
β_{si}	——壳程特征长度系数，按7.2.3或8.2.3确定， mm^{-1} ；
γ	——热位移影响系数： $\gamma = \begin{cases} 0.0, & \text{对设计载荷工况} \\ 1.0, & \text{对操作载荷工况} \end{cases}$
η'_i	——管板有效孔带拉伸效率，按7.2.5或8.2.5确定；
ϕ_{si}	——壳体焊接接头系数；
μ_i	——剪切孔带效率，按6.3确定；
μ_i^*	——有效孔带效率，按6.3确定；
ρ_i	——管板环板区内外直径比，按7.2.2或8.2.2确定；
ρ_{ti}	——胀接深度比，按6.2确定；
ν_i	——管板材料的泊松比；
ν_i^*	——管板布管区的有效泊松比，按6.3确定；
ν_{ci}	——管板材料的泊松比；
ν_{si}	——壳体材料的泊松比；
ν'_{si}	——中间壳体材料的泊松比；
ν_t	——换热管材料的泊松比；
$\psi_{1i}(x)$	——以 x 为自变量的函数，按附录A表A-1确定；
$\psi_{2i}(x)$	——以 x 为自变量的函数，按附录A表A-1确定；
ω_{fs}	——壳程流体平均重度， N/mm^3 ；

- ω_{si} ——壳体材料重度，N/mm³；
 ω_{Ti} ——管板材料重度，N/mm³；
 ω_t ——换热管材料重度，N/mm³；

4 通用要求

4.1 一般原则

- a) 本文件规定的管板计算方法，还需满足 GB/T 151 或 GB/T 4732 的相关要求。
 b) 对于设计压力 (MPa) 与公称直径 (mm) 的乘积大于 4.05×10^4 或管束直径大于 6000mm 的换热器，必要时需要考虑管束振动等因素对设计的影响。

4.2 载荷

- a) 管程压力，壳程压力；
 b) 管壳程的轴向温差；
 c) 作用于管板上的有效螺栓载荷；
 d) 管壳程流体压降；
 e) 对于立式热交换器，考虑换热管、管板、壳体的重力载荷及管程、壳程介质的重力载荷；
 f) 对于立式热交换器，如有需要可考虑换热管内催化剂的重力载荷；

4.3 管板有效螺栓载荷的确定

- a) 表 4-1 提供了对每一个结构和载荷工况中，将管板有效螺栓载荷 W_i^* 传递到管板的布管区的数据。
 b) 对于固定管板及浮头热交换器，作用于两管板上的有效螺栓载荷可不同。在确定最小螺栓载荷时，应计及分程隔板处垫片作用的影响。
 c) 当管板和壳体、管箱都采法兰垫片连接时（管板结构 a），螺栓载荷应按照成对法兰处理。
 d) 螺栓设计载荷及操作载荷按 GB/T 150.3-2024 第 9 章的相关要求确定。

表 4-1 管板有效螺栓载荷 W_i^*

管板结构	设计载荷工况				操作载荷工况
	1	2	3	4	1-4
a	W_{dci}	W_{dsi}	$W_{di,max}$	0	$W_{i,max}$
c	W_{dci}	0	W_{dci}	0	W_{ci}
d	0	W_{dsi}	W_{dsi}	0	W_{si}
e	W_{dci}	0	W_{dci}	0	W_{ci}
f	0	W_{dsi}	W_{dsi}	0	W_{si}
S	W_{dci}	0	W_{dci}	0	W_{ci}

4.4 载荷工况

- a) 用户应提供用户设计规定 (UDS)，给出使用工况的载荷条件 (如管板、换热管、壳体、管箱、换热管与管板接头等) 起决定作用的工况，这些使用工况应包括但不仅限于正常操作、启动、停车、清洗、压力试验和其他可能工况等。基于用户设计规定 (UDS)，考虑载荷工况。因此，在设计中应评价所有预期的载荷条件，以确保所有危险的载荷组合都被考虑到。
- b) 对每一种工况应考虑下述载荷组合：设计工况，表 4-2 提供了设计条件下评估热交换器所需的载荷组合。操作工况，表 4-3 提供了操作条件下评估热交换器所需的载荷组合。
- c) 压差设计，仅需考虑设计工况 3 和 4 及操作工况 3 和 4。

表 4-2 热交换器所需考虑的设计工况载荷组合

设计载荷工况	壳程设计压力 P_{si}	管程设计压力 P_{ti}	压降/重力
1	$P_{min,si}$	$P_{max,ti}$	P_a
2	$P_{max,si}$	$P_{min,ti}$	P_a
3	$P_{max,si}$	$P_{max,ti}$	P_a
4	$P_{min,si}$	$P_{min,ti}$	P_a

注： P_a 按 7.2 或 8.2 的步骤 7 计算。

表 4-3 热交换器所需考虑的操作工况的载荷组合

操作载荷工况	操作压力		设计态	轴向平均金属温度	
	壳程 P_{si}	管程 P_{ti}	压降/重力	壳体	换热管
1	$P_{min,si}$	$P_{max,ti}$	P_a	$T_{m,si}$	$T_{m,t}$
2	$P_{max,si}$	$P_{min,ti}$	P_a	$T_{m,si}$	$T_{m,t}$
3	$P_{max,si}$	$P_{max,ti}$	P_a	$T_{m,si}$	$T_{m,t}$
4	$P_{min,si}$	$P_{min,ti}$	P_a	$T_{m,si}$	$T_{m,t}$

注： P_a 按 7.2 或 8.2 的步骤 7 计算。

4.5 管板的通用要求

- a) 除管板法兰区的延伸厚度不同于管板布管区外，管板应厚度均匀。用于计算管板外半径 R_{Ti} 值不得超过厚度小于 $0.75h_i$ 或 $h_i - 10\text{mm}$ 处的管板延伸处的半径。
- b) 布管区应为近似的圆形，且布管区内应均匀开孔，但允许在分程处设有不布管通道。管孔排列方式可以是正三角形或正方形。
- c) 管板材料许用应力 S_{Ti} 的确定方法：

- 1) 当材料温度处于蠕变温度限以上时, 按 GB/T 150 或 GB/T 4732 标准规定的材料许用应力 $[\sigma_{Ti}]$:

$$S_{Ti} = [\sigma_{Ti}] \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

- 2) 当材料温度处于蠕变温度限以下时, 取材料标准屈服强度的 2/3 与 GB/T 150 或 GB/T 4732 标准规定的材料许用应力 $[\sigma_{Ti}]$ 中两者中较大值:

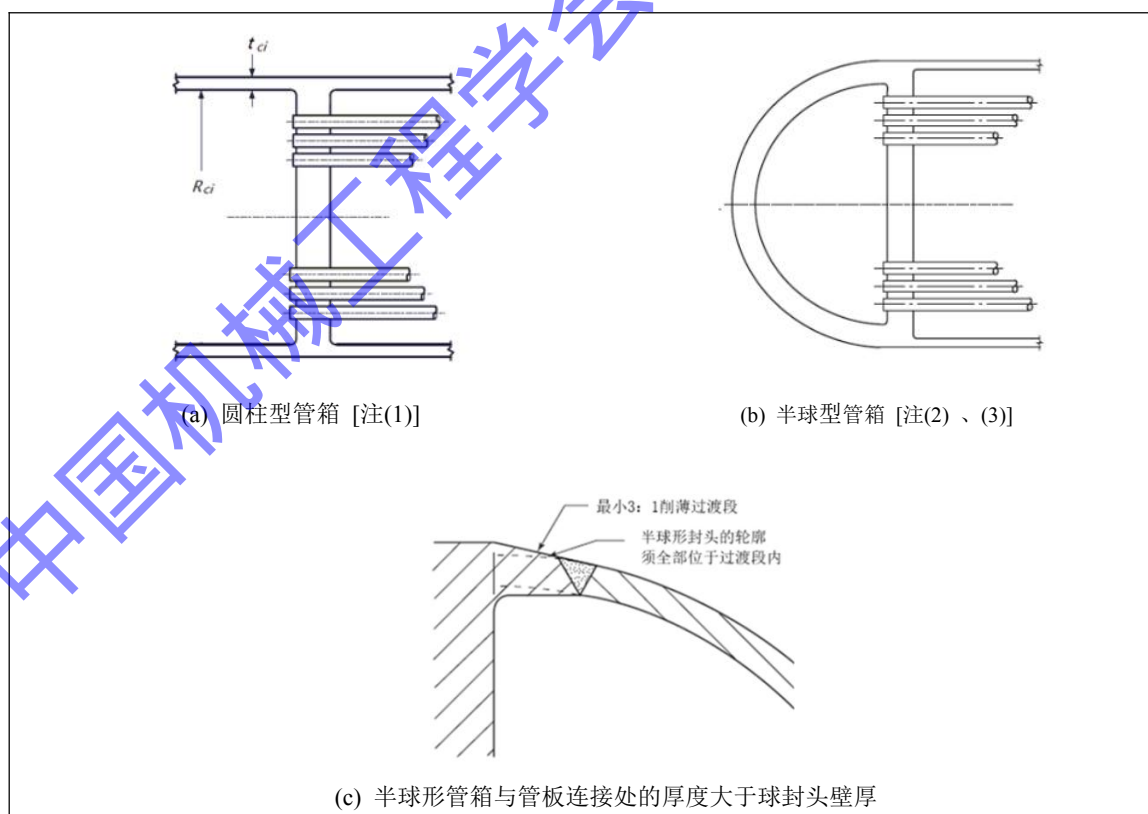
$$S_{Ti} = \text{MAX}\left(\frac{2}{3}R_{eL,Ti}, [\sigma_{Ti}]\right) \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

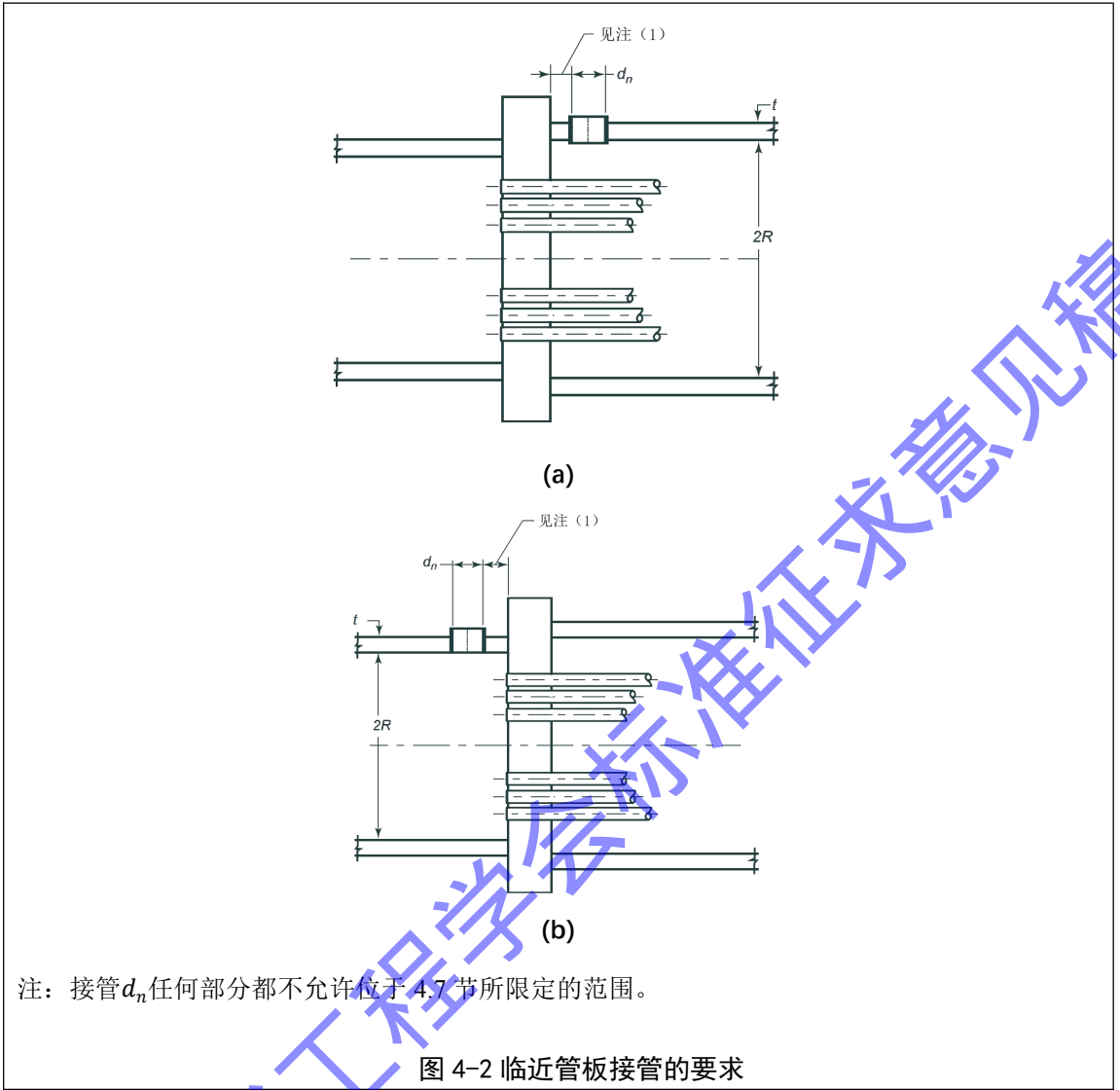
- d) 管板延伸部分材料许用应力 $S_{a,fi}$ 、 S_{fi} 的确定方法同上。
- e) 管板材料 $S_{PS,Ti}$ 的确定方法: 当材料温度处于蠕变温度限以下时, 用户指定设计标准 GB/T 150 或 GB/T 4732, 取材料屈服强度的 2 倍与标准规定的材料许用应力 3 倍中两者中较大值:

$$S_{PS,Ti} = \text{MAX}(2R_{eL,Ti}, 3[\sigma_{Ti}]) \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

4.6 与管板整体连接的管箱元件的结构要求

- a) 管板结构 b、d、f、P 应是圆柱壳或球型封头;
- b) 当圆柱壳直接与管板连接, 见图 4-1 (a), 圆柱壳长度不小于 $2.5\sqrt{R_{ci}t_{ci}}$;
- c) 当成形封头直接与管板连接, 在成形封头和管板间无圆柱壳时, 球型封头在与管板连接处的切线方向应平行于热交换器轴线方向 (即, 球型封头在与管板连接处的切线方向应垂直于管板表面), 应符合图 4-1 (b);
- d) 当球型封头在与管板连接带过渡段时, 应符合图 4-1 (c)。





注：

- (1) 圆柱壳长度不小于 $2.5\sqrt{R_{ci}t_{ci}}$ 。
- (2) 半球型封头中间无圆柱壳
- (3) 也适用于半球型封头与管板与整体连接且管板带延伸段

图 4-1 管箱与管板整体连接

4.7 与管板临近的接管的要求

- a) 除以下 (b) 和 (c) 限制外，位于壳程筒体或管箱筒体上的接管可置距临近管板面的的任何距离内（见图 4-2）。
- b) 对于圆形接管，当 $d_n/2R > 0.3$ 时，接管的任何部分都不能位于距管板面 $2.5\sqrt{Rt}$ 的距离内（见图 4-2）。
- c) 对于非圆形接管， $d_{n,max}$ 定义为 d_n 的最大值， $d_{n,min}$ 定义为 d_n 的最小值。

- (1) 当非圆形接管的主轴与管板面不平行且 $d_{n,max}/2R > 0.3$ ， d_n 需符合（b）限定要求。
- (2) 当非圆形接管的主轴与管板面平行且 $d_{n,max}/2R > 0.3$ ，接管的任何部分都不能位于距管板面 $2.5\sqrt{Rt} + 0.5(d_{n,max} - d_{n,min})$ 的距离内。
- d) 当接管符合（b）或（c）要求时，应考虑距管板面 $2.5\sqrt{Rt}$ 距离内的可能所需的补强。

中国机械工程学会标准征求意见稿

5 管板延伸结构

5.1 结构形式

- 本文件涵盖了有载荷作用的管板延伸的设计；
- 第 4 章所列的通用条件均适用；
- 本文件适用于有螺栓载荷的兼作法兰延伸结构（结构 e、f）；
- 本文件适用于不兼作法兰的延伸结构（结构 c、d、S）。若管板延伸部分厚度不小于管板厚度 h_i 则不用分析。

5.2 设计考虑事项

- 在管板两侧都设有垫片、在每一受压腔分别进行压力试验时，且在压力试验时螺栓载荷仅作用于延伸为法兰的部分时，应要求以特别考虑；
- 若管板为放置周边垫片而开槽，如图 5-1（b），则管板延伸兼作法兰的部分的最小截面厚度不应小于 h_{ri} 。图 5-1 对某些代表性结构的 h_{ri} 作了描述。

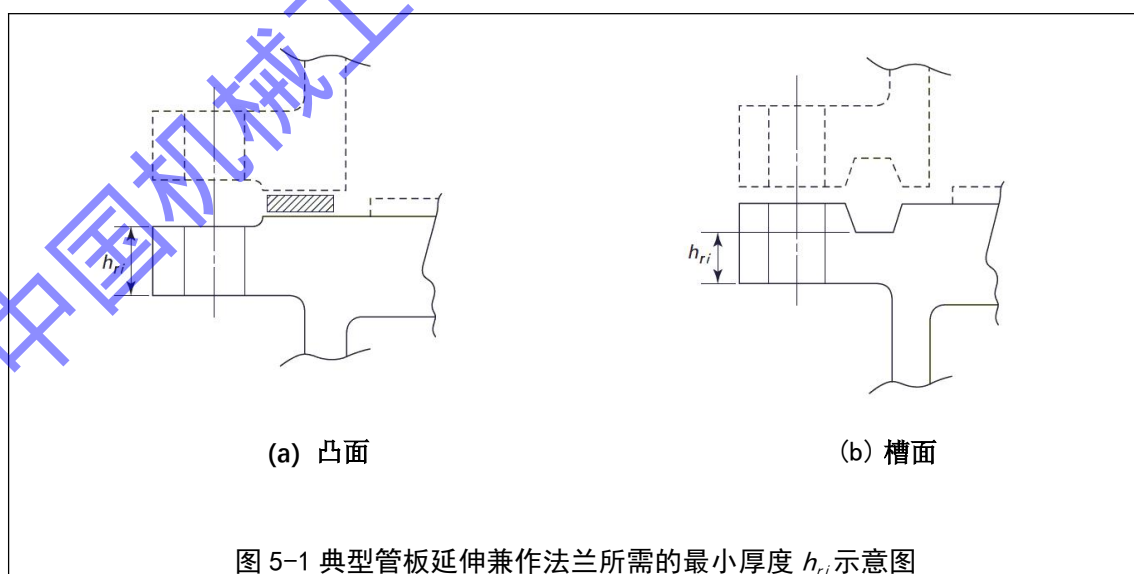
5.3 计算程序

- 对于有螺栓载荷作用的兼作法兰延伸结构（结构 e 和 f），所需最小延伸厚度 h_{ri} 为：

$$h_{ri} = \max \left(\sqrt{\frac{1.9W_{gs,i}h_{G,fi}}{2S_{a,fi}R_{X,fi}}}, \sqrt{\frac{1.9W_{d,i}h_{G,fi}}{2S_{fi}R_{X,fi}}} \right) \dots\dots\dots (5-1)$$

- 对管板不兼作法兰的结构（结构 c 和 d），所需最小延伸厚度 h_{ri} ，按 GB/T 150.3-2024 之 9.5.3.3.3 活套松式法兰的计算过程。
- 对不兼作法兰的结构（结构 S），所需最小延伸厚度 h_{ri} ，应按各设计载荷条件由下式所确定的最大值：

$$h_{ri} = \frac{R_{G,Xi}}{1.6S_{fi}} |P_{si} - P_{ti}| \dots\dots\dots (5-2)$$



6 管板特性参数的确定

6.1 通则

本节规定了管板计算中需采用的管孔削弱系数、管壳程分程隔板槽有效深度及有效弹性常数的确定。

6.2 设计考虑事项

- 弹性模量和许用应力应采用设计温度所对应的值。若考虑温差载荷，则允许采用操作金属温度而不是设计温度；
- 对固定管板式热交换器，其管板特性值采用本章计算时，应分别按腐蚀态及未腐蚀态确定；
- 胀接深度比按下式计算或按常数选定。

$$\rho_{ti} = \frac{l_{xi}}{h_i} \dots\dots\dots (6-1)$$

6.3 计算程序

- 有效尺寸和管孔削弱系数的确定由管板及热交换器连接的几何结构（见图 6-1）和材料性能，按下面方法计算所需要的各个参数。

- 按 GB/T 151-2026 之 8.4.9，计算管板布管区当量直径 D_t 。
- 参数 D_o 按下式计算：

$$D_o = D_t \dots\dots\dots (6-2)$$

- 换热管贯穿管板的结构，见图 6-1（b），计算下列参数：

$$\mu_i = \frac{p_i - d_t}{p_i} \dots\dots\dots (6-3)$$

$$d_{ti}^* = \max \left[\left\{ d_t - 2t_t \left(\frac{E_{tTi}}{E_i} \right) \left(\frac{S_{tTi}}{S_{Ti}} \right) \rho_{ti} \right\}, (d_t - 2t_t) \right] \dots\dots (6-4)$$

$$p_i^* = p_i \left[1 - \frac{4 \cdot \min[A_{Li}, (4D_o \cdot p_i)]}{\pi D_o^2} \right]^{-0.5} \dots\dots\dots (6-5)$$

$$\mu_i^* = \frac{p_i^* - d_{ti}^*}{p_i^*} \dots\dots\dots (6-6)$$

$$h_{gi}' = \max[(h_{gi} - c_{ti}), 0.0] \dots\dots\dots (6-7)$$

- 对于换热管焊接于管板壳程侧的结构，见图 6-1（d），计算下列参数：

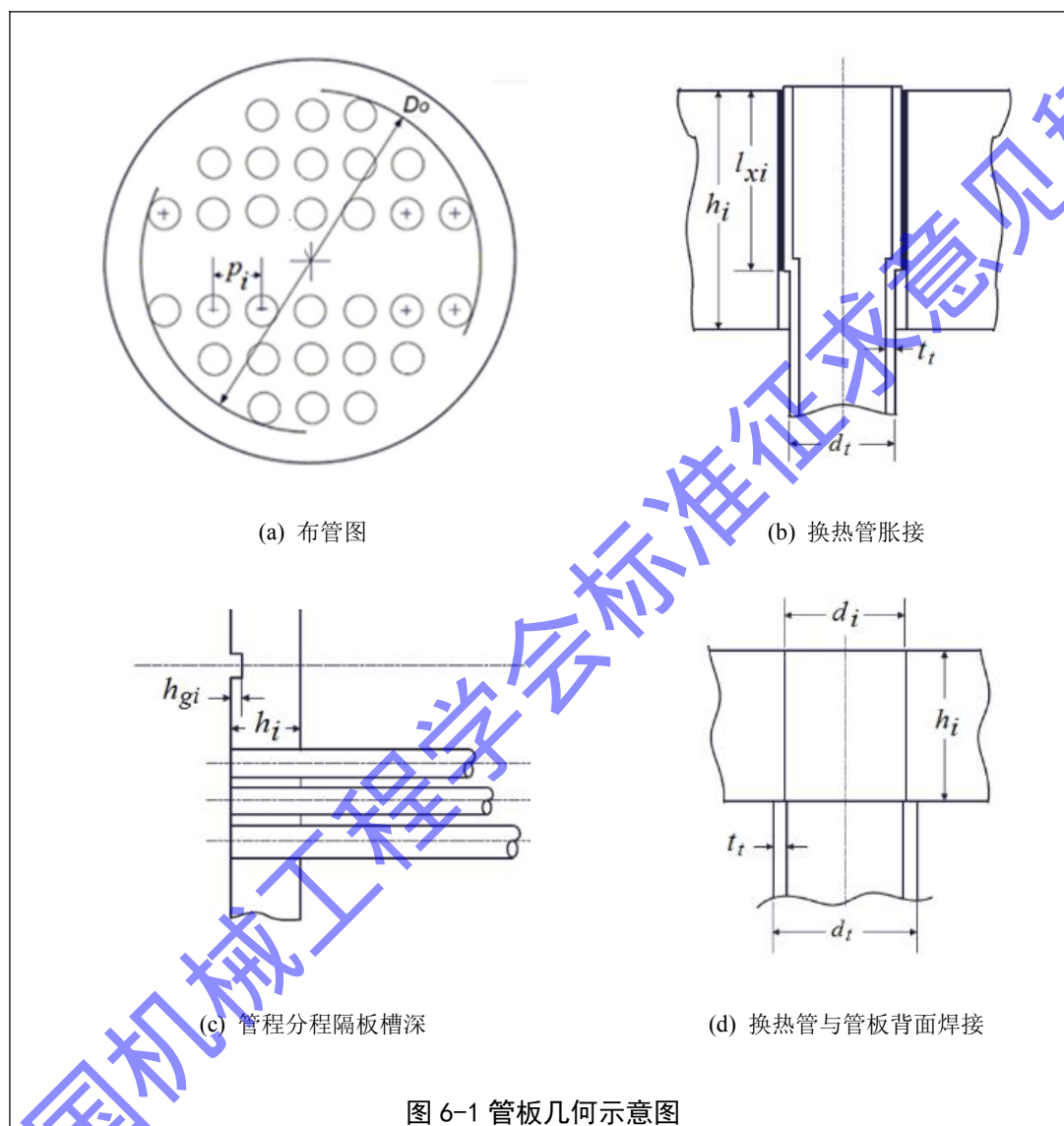
$$\mu_i = \frac{p_i - d_i}{p_i} \dots\dots\dots (6-8)$$

$$p_i^* = p_i \left[1 - \frac{4 \cdot \min[A_{Li}, (4D_o \cdot p_i)]}{\pi D_o^2} \right]^{-0.5} \dots\dots\dots (6-9)$$

$$\mu_i^* = \frac{p_i^* - d_i}{p_i^*} \dots\dots\dots (6-10)$$

$$h_{gi}' = \max[(h_{gi} - c_{ti}), 0.0] \dots\dots\dots (6-11)$$

- 5) 由 μ_i^* 、 h_i/p_i 确定有效弹性常数 E_i^* 、 ν_i^* ：对于正三角形布管，分别按表 6-1、表 6-2 确定 E_i^* 、 ν_i^* ；对于正方形布管，分别按表 6-3、表 6-4 确定 E_i^* 、 ν_i^* 。



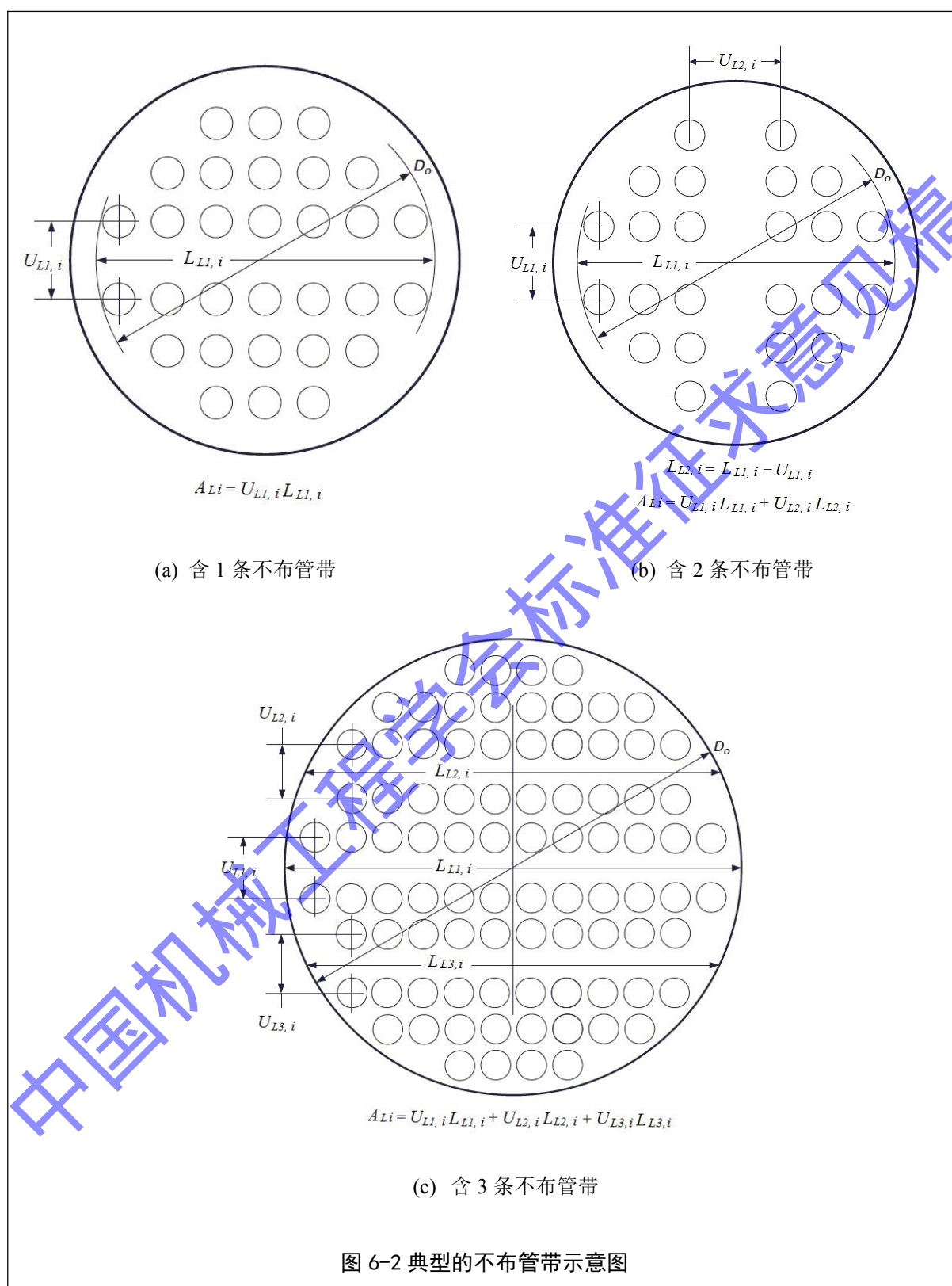


图 6-2 典型的不布管带示意图

表 6-1 正三角形排列管板的 E^* 值

系数	h/p			
	0.1	0.25	0.5	2.0
A_0	1.496410E-05	6.352630E-06	-1.333850E-03	7.285910E-04
A_1	6.620641E+01	1.151132E+03	-2.556960E+00	-7.005325E-01
A_2	4.301938E+00	1.275654E+01	6.777985E-01	1.151695E-01
A_3	-3.393999E+01	-1.643137E+03	3.994838E+00	2.440697E+00
A_4	7.672133E+01	1.202564E+03	1.550319E-01	4.439786E+00
A_5	1.497235E+00	1.257743E+03	-4.396305E+00	-5.840415E+00
A_6	-3.012851E+01	-9.998214E+02	-2.431697E+00	-8.312674E+00
A_7	1.613346E+01	-5.511521E+02	2.177133E+00	4.123150E+00
A_8	0.0	0.0	1.819010E+00	4.780299E+00
注：				
(a) $E^* = E \left[\frac{A_0 + A_2\mu^* + A_4\mu^{*2} + A_6\mu^{*3} + A_8\mu^{*4}}{1 + A_1\mu^* + A_3\mu^{*2} + A_5\mu^{*3} + A_7\mu^{*4}} \right]$				
(b) 此系数仅适用 $0.1 \leq \mu^* \leq 1.0$ 。				
(c) 如果 $h/p < 0.1$ ，则使用 $h/p = 0.1$ ；如果 $h/p > 2.0$ ，则使用 $h/p = 2.0$ 。				

表 6-2 正三角形排列管板的 ν^* 值

系数	h/p					
	0.1	0.15	0.25	0.5	1.0	2.0
B_0	1.722338E-02	-7.248304E-01	3.824487E+02	2.860400E+00	1.483591E+00	9.823512E-01
B_1	-3.203150E+01	-3.180156E+01	1.539472E+04	5.679314E+01	1.504975E+01	9.655558E-01
B_2	1.765880E+00	1.599207E+01	2.264094E+03	4.717135E-01	-1.976814E+00	-2.811381E+00
B_3	2.321240E+02	2.859222E+02	-4.175812E+04	-2.166572E+02	-6.193608E+01	4.633821E+00
B_4	-2.593198E+01	-9.517465E+01	-1.461539E+04	-3.787845E+01	-7.869233E+00	5.917858E+00
B_5	-2.171148E+02	-1.388896E+02	7.152697E+04	3.226507E+02	1.094078E+02	7.097756E+00
B_6	9.357422E+01	2.547347E+02	2.981678E+04	8.368412E+01	2.733155E+01	0.0
B_7	1.107294E+02	7.201617E+01	1.387188E+04	0.0	0.0	0.0
B_8	-4.095396E+01	-1.182527E+02	0.0	0.0	0.0	0.0
注：						
(a) $\nu^* = \frac{B_0 + B_2\mu^* + B_4\mu^{*2} + B_6\mu^{*3} + B_8\mu^{*4}}{1 + B_1\mu^* + B_3\mu^{*2} + B_5\mu^{*3} + B_7\mu^{*4}}$						
(b) 此系数仅适用 $0 \leq \mu^* \leq 1.0$ ，当 $h/p = 0.1$ ，则 $0.184 \leq \mu^* \leq 1.0$ 。						

(c) 如果 $h/p < 0.1$, 则使用 $h/p = 0.1$; 如果 $h/p > 2.0$, 则使用 $h/p = 2.0$ 。

表 6-3 正方形排列管板的 E^* 值

系数	h/p			
	0.1	0.25	0.5	2.0
A_0	-4.085600E-05	-4.828500E-04	8.925870E-05	1.589308E-03
A_1	5.231431E+02	8.372334E+00	1.783577E+01	1.814855E+01
A_2	-6.376136E+00	2.947067E+00	2.896931E+00	2.693793E+00
A_3	7.857623E+03	-9.963856E+00	-1.945644E+01	-2.374421E+01
A_4	2.284635E+03	3.710254E+00	1.377083E+01	9.002308E+00
A_5	-7.366960E+03	7.250874E+00	8.840783E+00	1.627106E+01
A_6	4.844156E+03	0.0	-8.457560E+00	0.0
A_7	6.092597E+03	0.0	0.0	0.0

注:

(a) $E^* = E \left[\frac{A_0 + A_2 \mu^* + A_4 \mu^{*2} + A_6 \mu^{*3}}{1 + A_1 \mu^* + A_3 \mu^{*2} + A_5 \mu^{*3} + A_7 \mu^{*4}} \right]$

(b) 此系数仅适用 $0.1 \leq \mu^* \leq 1.0$ 。

(c) 如果 $h/p < 0.1$, 则使用 $h/p = 0.1$; 如果 $h/p > 2.0$, 则使用 $h/p = 2.0$ 。

表 6-4 正方形排列管板的 ν^* 值

系数	h/p					
	0.1	0.15	0.25	0.5	1.0	2.0
B_0	-7.288894E-02	2.089015E+00	1.397869E+03	4.915542E-01	3.475156E-01	3.337833E-01
B_1	-1.127111E+01	1.199162E+02	8.678686E+04	2.202591E+01	-1.094083E+00	2.923681E+00
B_2	1.325618E+00	-1.535964E+01	5.003924E+03	4.392312E+00	-5.737278E-01	1.132010E+00
B_3	3.949776E+01	-7.543170E+02	-1.857192E+05	-5.969066E+01	4.985966E+00	-1.209380E+01
B_4	-8.530838E+00	6.129051E+01	-2.174219E+04	-1.407781E+01	1.875825E+00	-4.921427E+00
B_5	-2.359313E+01	1.921504E+03	2.363003E+05	6.022030E+01	6.108286E-01	1.656896E+01
B_6	2.130422E+01	-1.346693E+02	5.674145E+04	1.627461E+01	0.0	6.722375E+00
B_7	5.916208E+00	-1.921418E+03	0.0	0.0	0.0	2.496675E+00
B_8	-1.056089E+01	1.808025E+02	0.0	0.0	0.0	0.0
B_9	0.0	9.465777E+02	0.0	0.0	0.0	0.0

注:

(a) $\nu^* = \frac{B_0 + B_2 \mu^* + B_4 \mu^{*2} + B_6 \mu^{*3} + B_8 \mu^{*4}}{1 + B_1 \mu^* + B_3 \mu^{*2} + B_5 \mu^{*3} + B_7 \mu^{*4} + B_9 \mu^{*5}}$

- (b) 此系数仅适用 $0 \leq \mu^* \leq 1.0$ 。
- (c) 如果 $h/p < 0.1$ ，则使用 $h/p = 0.1$ ；如果 $h/p > 2.0$ ，则使用 $h/p = 2.0$ 。

7 固定管板的计算方法

7.1 结构与载荷要求

7.1.1 结构要求

- a) 两管板均为圆形且布管及布管间距相同，但两管板直径、厚度、材料等可不同；
- b) 两管板结构可不同，可为图 3-2 中结构 b、c、e 中任意 2 种的组合。

7.1.2 载荷要求

- a) 两管板的温度、压力载荷、有效螺栓载荷等可不同；
- b) 与两管板连接的壳体或管箱的材料、厚度、温度可不同。材料弹性模量、屈服强度和许用应力应取设计载荷工况下的温度所对应的值，也可取所考虑操作工况下部件金属温度下所对应的值；
- c) 当考虑压降影响时，对于多管程换热器，管板表面处的介质压力取各程的平均值。
- d) 所需考虑的设计及操作载荷工况按 4.4 规定。对每一种设计条件应考虑设计载荷工况（按表 4-2）及操作载荷工况（按表 4-3）。若用户指定压差设计，仅需考虑设计工况 3 和 4 及操作工况 3 和 4。

7.2 计算程序

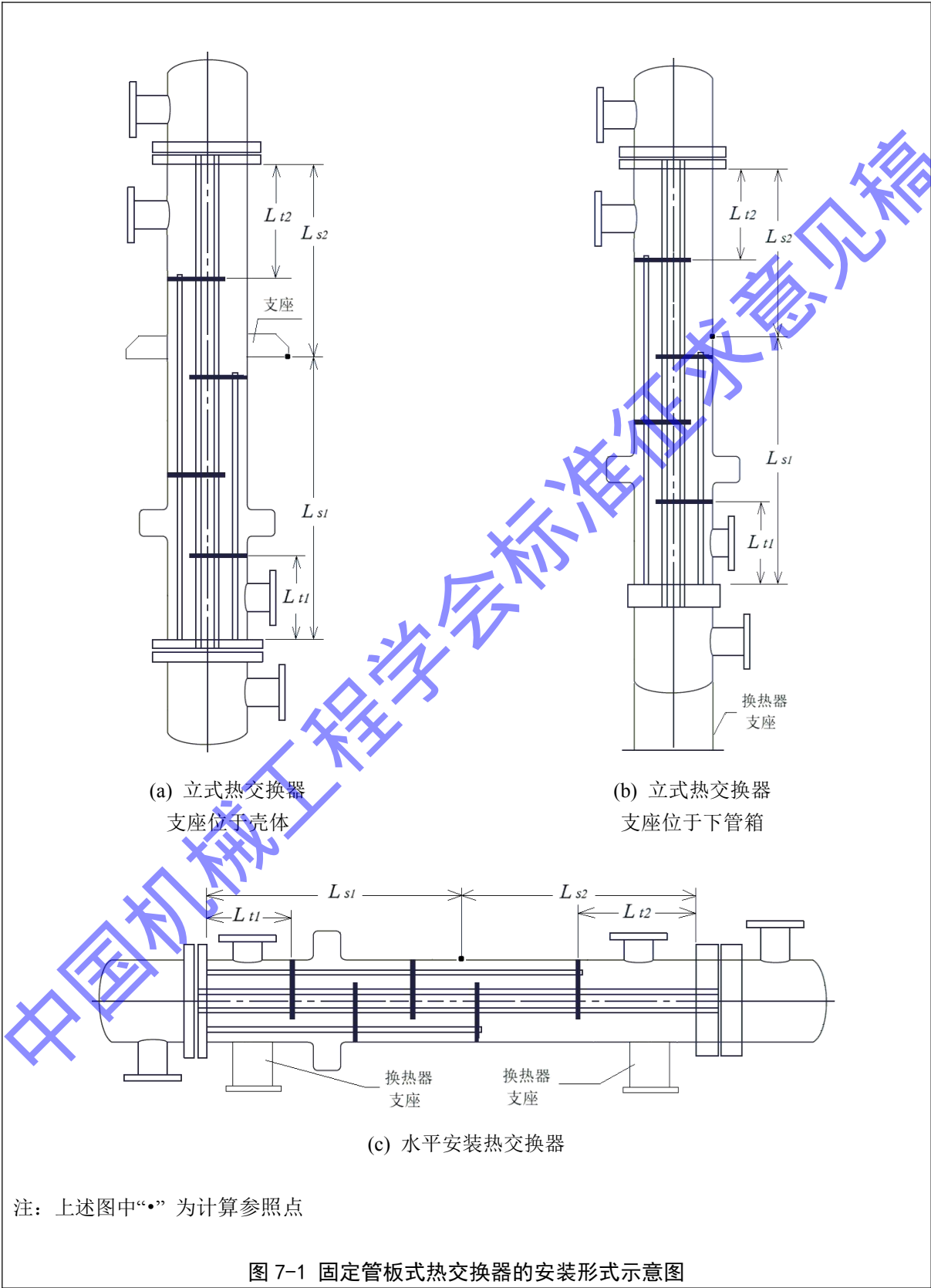
- a) 附录 B 给出了管板计算向量组 $\{X_i\}$ ，向量组中的未知量将在 7.2.10 中求解并获得具体值；
- b) 计算程序需迭代进行，应先假定管板厚度值 h_i 进行计算并校核管板、换热管、壳体和管箱的最大应力在各元件许用应力范围内，且换热管与管板接头上的载荷满足相关标准要求；
- c) 管板、壳体、管箱的厚度按腐蚀态与未腐蚀态两种情况进行校核；

7.2.1 步骤 1—确定参照点、壳体长度参数 L_{s1} 、 L_{s2}

7.2.1.1 参照点的确定：

- a) 见图 7-1 (a)，热交换器立式安装，支座位于壳体，计算参照点选如图所示的支座的支撑点；
- b) 见图 7-1 (b)，热交换器立式安装，支座位于下管箱，计算参照点选如图所示的两块管板之间的中点；
- c) 见图 7-1 (c)，热交换器水平安装，支座位于壳体或其它部位，计算参照点选如图所示的两块管板之间的中点；

7.2.1.2 确定计算参照点后，按图 7-1 确定壳体长度参数 L_{s1} 、 L_{s2} 。



7.2.2 步骤 2—确定参数 a_o 、 χ_s 、 χ_t 、 R_{fi} 、 ρ_i 7.2.2.1 参数 a_o 、 χ_s 、 χ_t 按下列公式计算：

$$a_o = \frac{D_o}{2} \dots\dots\dots (7-1)$$

$$\chi_s = 1 - n_t \cdot \left(\frac{d_t}{D_o}\right)^2 \dots\dots\dots (7-2)$$

$$\chi_t = 1 - n_t \cdot \left(\frac{d_t - 2t_t}{D_o}\right)^2 \dots\dots\dots (7-3)$$

7.2.2.2 参数 R_{fi} 按下列公式计算：

a) 对 b 型管板

$$R_{fi} = \text{MIN}[R_{si}, R_{ci}] \dots\dots\dots (7-4)$$

b) 对 c 型管板

$$R_{fi} = \text{MIN}[R_{si}, R_{G,ci}] \dots\dots\dots (7-5)$$

c) 对 e 型管板

$$R_{fi} = \text{MIN}[R_{si}, R_{G,ci}] \dots\dots\dots (7-6)$$

7.2.2.3 参数 ρ_i 按下列公式计算：

$$\rho_i = \frac{a_o}{R_{fi}} \dots\dots\dots (7-7)$$

7.2.3 步骤 3—确定参数 β_{ci} 、 k_{ci} 、 β_{si} 、 k_{si} 7.2.3.1 管箱参数 β_{ci} 、 k_{ci} 按下列公式计算：

a) 对 b 型管板

$$\beta_{ci} = \frac{\sqrt[4]{12(1-\nu_{ci}^2)}}{\sqrt{2R_{m,ci}t_{ci}}} \dots\dots\dots (7-8)$$

$$k_{ci} = \beta_{ci} \frac{E_{ci}t_{ci}^3}{6(1-\nu_{ci}^2)} \dots\dots\dots (7-9)$$

b) 对 c、e 型管板， $\beta_{ci} = 0$ ， $k_{ci} = 0$ 。7.2.3.2 壳体参数 β_{si} 、 k_{si} 按下列公式计算（b、c、e 型管板）：

$$\beta_{si} = \frac{\sqrt[4]{12(1-\nu_{si}^2)}}{\sqrt{2R_{m,si}t_{si}}} \dots\dots\dots (7-10)$$

$$k_{si} = \beta_{si} \frac{E_{si}t_{si}^3}{6(1-\nu_{si}^2)} \dots\dots\dots (7-11)$$

7.2.4 步骤 4—确定参数 k_w 、 k_{ti}

a) 参数 k_w 按下列公式计算:

$$k_w = \frac{n_t t_t (d_t - t_t) E_t}{a_o^2 L} \dots\dots\dots (7-12)$$

b) 参数 k_{ti} 按下列公式计算:

$$k_{ti} = f_n \frac{n_t I_t E_t}{\pi a_o^2 I_{ti}^c} \dots\dots\dots (7-13)$$

7.2.5 步骤5—确定参数 μ_i^* 、 E_i^* 、 ν_i^* 、 η_i' 、 D_i 、 D_i^* 、 D_{fi} 、 α 、 β 、 X_a

7.2.5.1 管板弹性参数 μ_i^* 、 E_i^* 、 ν_i^* 按第6章计算;

7.2.5.2 参数 η_i' 按下列公式计算:

$$\eta_i' = \frac{1 - \nu_i}{1 - \nu_i^*} \cdot \frac{E_i}{E_i^*} \dots\dots\dots (7-14)$$

7.2.5.3 参数 D_i 按下列公式计算:

$$D_i = \frac{E_i h_i^3}{12(1 - \nu_i^2)} \dots\dots\dots (7-15)$$

7.2.5.4 参数 D_i^* 按下列公式计算:

$$D_i^* = \frac{E_i^* h_i^3}{12(1 - \nu_i^{*2})} \dots\dots\dots (7-16)$$

7.2.5.5 参数 D_{fi} 按下列公式计算:

$$D_{fi} = \frac{E_i h_{fi}^3 \cdot \ln(R_{Ti}/R_{fi})}{12} \dots\dots\dots (7-17)$$

7.2.5.6 参数 α 按下列公式计算:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k_w}{D_1^*} + \frac{k_w}{D_2^*}} \dots\dots\dots (7-18)$$

7.2.5.7 参数 β 按下列公式计算:

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{1}{2} + f_{nb}\right) \left(\frac{k_{t1}}{D_1^*} + \frac{k_{t2}}{D_2^*}\right)} \dots\dots\dots (7-19)$$

7.2.6 步骤6—确定参数 W_i^* 、 $\tilde{F}_{ci}$ 、 $\tilde{F}_{pti}$ 、 $\tilde{F}_{psi}$ 、 h_{wi}

7.2.6.1 管板设计螺栓载荷 W_i^* 按4.3节确定。

7.2.6.2 对b、c、e型管板, 参数 $\tilde{F}_{ci}$ 、 $\tilde{F}_{pti}$ 、 $\tilde{F}_{psi}$ 按下列公式计算。

a) 对b型管板

$$\tilde{F}_{ci} = \pi R_{ci}^2 P_{ti} \dots\dots\dots (7-20)$$

$$\tilde{F}_{pti} = \pi (R_{ci}^2 - R_{fi}^2) P_{ti} \dots\dots\dots (7-21)$$

$$\tilde{F}_{psi} = \pi (R_{si}^2 - R_{fi}^2) P_{si} \dots\dots\dots (7-22)$$

b) 对c、e型管板

$$\tilde{F}_{ci} = \pi R_{G,ci}^2 P_{ti} \quad \dots\dots\dots (7-23)$$

$$\tilde{F}_{Pti} = \pi (R_{G,ci}^2 - R_{fi}^2) P_{ti} \quad \dots\dots\dots (7-24)$$

$$\tilde{F}_{Psi} = \pi (R_{si}^2 - R_{fi}^2) P_{si} \quad \dots\dots\dots (7-25)$$

7.2.6.3 参数 h_{Wi} 按下列公式计算:

a) 对 c 型管板

$$h_{Wi} = R_{G,ci} - R_{G,si} \quad \dots\dots\dots (7-26)$$

b) 对 e 型管板

$$h_{Wi} = R_{G,ci} - R_{B,ci} \quad \dots\dots\dots (7-27)$$

7.2.7 步骤 7—确定参数 f_{si} 、 P_a 、 P_e

$$f_{si} = \frac{L_{si}}{E_{si} t_{si}} + \frac{2\pi R_{m,si}}{K_{ji}} \quad \dots\dots\dots (7-28)$$

$$P_a = (P_{T1} + P_{T2}) + P_{g,t} + P_{fs} + P_{ft} + (P_{t2} - P_{t1}) \quad \dots\dots\dots (7-29)$$

$$P_e = \frac{1}{2} [\chi_s (P_{s1} + P_{s2}) - \chi_t (P_{t1} + P_{t2}) + (P_{T1} - P_{T2})] \\ + k_w (\delta_{\gamma,t} + \delta_{v,t} - \delta_{g,s} - \delta_{\gamma,s} - \delta_{v,s} - \delta_{PJ}) \quad \dots\dots\dots (7-30)$$

其中,

$$P_{Ti} = g \cdot \chi_s \omega_{Ti} h_i \quad \dots\dots\dots (7-31)$$

$$P_{g,t} = g \cdot (\chi_t - \chi_s) \omega_t L \quad \dots\dots\dots (7-32)$$

$$P_{fs} = g \cdot \chi_s \omega_{fs} L \quad \dots\dots\dots (7-33)$$

$$P_{ft} = g \cdot \frac{n_t W_{ft}}{\pi a_o^2} \quad \dots\dots\dots (7-34)$$

$$\delta_{\gamma,t} = \gamma \cdot \alpha_{m,t} (T_{m,t} - T_a) L \quad \dots\dots\dots (7-35)$$

$$\delta_{v,t} = -\frac{2v_t L}{E_t} \cdot \left[\frac{(0.5d_t - t_t)^2}{(d_t - t_t)t_t} \cdot \left(\frac{P_{t1} + P_{t2}}{2} \right) - \frac{(0.5d_t)^2}{(d_t - t_t)t_t} \cdot \left(\frac{P_{s1} + P_{s2}}{2} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (7-36)$$

$$\delta_{g,s} = g \cdot \left(\frac{\omega_{g,s1} L_{s1}^2}{2E_{s1}} - \frac{\omega_{g,s2} L_{s2}^2}{2E_{s2}} \right) \quad \dots\dots\dots (7-37)$$

$$\delta_{\gamma,s} = \gamma \cdot [\alpha_{m,s1} (T_{m,s1} - T_a) L_{s1} + \alpha_{m,s2} (T_{m,s2} - T_a) L_{s2}] \quad \dots\dots\dots (7-38)$$

$$\delta_{v,s} = -\frac{v_{s1} L_{s1} R_{s1}}{E_{s1} t_{s1}} \left(\frac{R_{s1}}{R_{m,s1}} \right) P_{s1} - \frac{v_{s2} L_{s2} R_{s2}}{E_{s2} t_{s2}} \left(\frac{R_{s2}}{R_{m,s2}} \right) P_{s2} \quad \dots\dots\dots (7-39)$$

$$\delta_{PJ} = \frac{\pi (R_{j1}^2 - R_{s1}^2)}{2K_{j1}} P_{s1} + \frac{\pi (R_{j2}^2 - R_{s2}^2)}{2K_{j2}} P_{s2} \quad \dots\dots\dots (7-40)$$

7.2.8 步骤 8—确定壳体及管箱边缘位移及转角参数

7.2.8.1 u_{ci} 、 φ_{ci} 按下列公式计算:

a) 对 b 型管板

$$u_{ci} = \begin{cases} \frac{\beta_{ci}M_{ci}-Q_{ci}}{\beta_{ci}^2k_{ci}} + \frac{R_{ci}^2P_{ti}}{E_{ci}t_{ci}} \left(1 - \frac{\nu_{ci}R_{ci}}{2R_{m,ci}}\right) & \text{对圆柱型管箱} \\ \frac{\beta_{ci}M_{ci}-Q_{ci}}{\beta_{ci}^2k_{ci}} + \frac{R_{ci}^2P_{ti}}{E_{ci}t_{ci}} \left(\frac{1}{2} - \frac{\nu_{ci}R_{ci}}{2R_{m,ci}}\right) & \text{对半球型管箱} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7-41)$$

$$\varphi_{ci} = -\frac{2\beta_{ci}M_{ci}-Q_{ci}}{\beta_{ci}k_{ci}} \quad \dots\dots\dots (7-42)$$

b) 对 c、e 型管板, $u_{ci} = 0$; $\varphi_{ci} = 0$ 。

7.2.8.2 u_{si} 、 φ_{si} 按下列公式计算:

$$u_{si} = \frac{\beta_{si}M_{si}-Q_{si}}{\beta_{si}^2k_{si}} + \frac{R_{m,si}^2P_{si}}{E_{si}t_{si}} - \frac{\nu_{si}R_{m,si}F_{si}}{E_{si}t_{si}} \quad \dots\dots\dots (7-43)$$

$$\varphi_{si} = \frac{2\beta_{si}M_{si}-Q_{si}}{\beta_{si}k_{si}} \quad \dots\dots\dots (7-44)$$

7.2.8.3 参数 $\tilde{M}_{fi}$ 按下列公式计算:

a) 对 b 型管板

$$\begin{aligned} \tilde{M}_{fi} = & R_{m,ci}M_{ci} + 0.5R_{m,ci}Q_{ci}h_i - 0.5R_{m,si}Q_{si}h_i - R_{m,si}M_{si} + R_{fi}M_{fi} \\ & + (R_{m,si} - R_{fi})R_{m,si}F_{si} - 0.25(R_{ci} - R_{fi})(R_{ci}^2 + R_{fi}^2)P_{ti} \\ & - 0.25(R_{si} - R_{fi})(R_{si}^2 - R_{fi}^2)P_{si} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7-45)$$

b) 对 c、e 型管板

$$\begin{aligned} \tilde{M}_{fi} = & R_{fi}M_{fi} - 0.5R_{m,si}Q_{si}h_i - R_{m,si}M_{si} + (R_{m,si} - R_{fi})R_{m,si}F_{si} \\ & - 0.25(R_{G,ci} - R_{fi})(R_{G,ci}^2 + R_{fi}^2)P_{ti} \\ & - 0.25(R_{si} - R_{fi})(R_{si}^2 - R_{fi}^2)P_{si} + \frac{W_i^*h_{wi}}{2\pi} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7-46)$$

7.2.8.4 u_{fi} 、 φ_{fi} 按下列公式计算:

$$u_{fi} = \frac{0.5(R_{Ti} + R_{fi})}{(R_{Ti} - R_{fi})h_{fi}E_i} [Q_{si}R_{m,si} + Q_{ci}R_{m,ci} - F_{fi}R_{fi}] \quad \dots\dots\dots (7-47)$$

$$\varphi_{fi} = \frac{\tilde{M}_{fi}}{D_{fi}} \quad \dots\dots\dots (7-48)$$

7.2.9 步骤9—计算辅助函数表达式, 按附录C计算辅助函数表达式 $w_{Ti}(r)$ 、 $\varphi_{Ti}(r)$ 、 $M_{Ti}(r)$ 、 $Q_{Ti}(r)$ 、 $w_{Ai}(r)$ 、 $\varphi_{Ai}(r)$ 、 $M_{Ai}(r)$ 、 $Q_{Ai}(r)$ 、 $u_{Ai}(r)$ 、 $u_{Ti}(r)$ 。

7.2.10 步骤10—系统方程组的建立及求解

a) 按附录D, 对每种工况建立线性方程组。

b) 求解由a)建立的线性方程组, 确定 $\{X_j\}$ 中未知量的具体值。

7.2.11 步骤11—校核管板布管区应力

a) 计算管板布管区 ($0 \leq r \leq a_o$) 径向弯曲应力表达式:

$$\sigma_{b,Ti}(r) = \left(\frac{6D_1^*D_2^*}{D_1^*+D_2^*}\right) \frac{\alpha^2[C_2\psi_{2i}(\alpha r)-C_1\psi_{1i}(\alpha r)]}{\mu_i^*(h_i-h_{gi})^2}$$

$$+ \frac{(-1)^{i+1} 3D_i^* \left[C_4 \beta^2 I_{2i}(\beta r) - \frac{(1+\nu_i^*) P_a}{(1+2f_{nb})(k_{t1}+k_{t2})} \right]}{\mu_i^* (h_i - h_{gi})^2} \quad \dots\dots\dots (7-49)$$

b) 计算 $\sigma_{b,Ti}(r)$ 在区间 $(0 \leq r \leq a_o)$ 内绝对值最大值:

$$\sigma_{b,Ti,max} = MAX[|\sigma_{b,Ti}(r)|] \quad \dots\dots\dots (7-50)$$

c) 计算管板布管区径向薄膜应力:

$$\sigma_{m,Ti} = \frac{1}{\mu_i^*} \left(\frac{F_{ai}}{h_i - h_{gi}} \right) \quad \dots\dots\dots (7-51)$$

d) 计算管板布管区径向薄膜+弯曲应力的最大值:

$$\sigma_{Ti} = |\sigma_{m,Ti}| + |\sigma_{b,Ti,max}| \quad \dots\dots\dots (7-52)$$

e) 合格准则: 对设计载荷工况, $|\sigma_{m,Ti}| \leq 1.0S_{Ti}$, 且 $\sigma_{Ti} \leq 1.5S_{Ti}$, 对操作载荷工况, $\sigma_{Ti} \leq S_{PS,Ti}$ 。否则增加管板厚度 h_i 并返回至步骤 1。

7.2.12 步骤 12—校核管板环板区应力及管板法兰环应力

a) 校核管板环板区应力

1) 计算环板区 $(a_o \leq r \leq R_{fi})$ 径向弯曲应力表达式:

$$\begin{aligned} \sigma_{b,Ai}(r) = & \frac{6D_i}{(h_i - h_{gi})^2} \left[2A_{1i}(1 + \nu_i) - \frac{A_{2i}}{r^2}(1 - \nu_i) + A_{3i}(3 + \nu_i) \right] \\ & + \frac{6D_i}{(h_i - h_{gi})^2} \left[2A_{3i}(1 + \nu_i) \ln(r) + \frac{3+\nu_i}{16D_i} (P_{si} - P_{ti}) r^2 \right] \quad \dots\dots\dots (7-53) \end{aligned}$$

2) 计算环板区 $(a_o \leq r \leq R_{fi})$ 径向薄膜应力表达式:

$$\sigma_{m,Ai}(r) = \frac{1}{(h_i - h_{gi})(1 - \rho_i^2)} \left[(F_{fi} - \rho_i^2 F_{ai}) + (F_{ai} - F_{fi}) \frac{a_o^2}{r^2} \right] \quad \dots\dots\dots (7-54)$$

3) 计算环板区径向薄膜应力 $\sigma_{m,Ai}(r)$ 的最大值:

$$\sigma_{m,Ai} = MAX\{|\sigma_{m,Ai}(a_o)|, |\sigma_{m,Ai}(R_{fi})|\} \quad \dots\dots\dots (7-55)$$

4) 计算环板区径向薄膜+弯曲应力的最大值:

$$\sigma_{Ai} = MAX\{|\sigma_{b,Ai}(a_o)| + |\sigma_{m,Ai}(a_o)|, |\sigma_{b,Ai}(R_{fi})| + |\sigma_{m,Ai}(R_{fi})|\} \quad \dots\dots\dots (7-56)$$

5) 合格准则: 对设计载荷工况, $\sigma_{m,Ai} \leq 1.0S_{Ti}$, 且 $\sigma_{Ai} \leq 1.5S_{Ti}$, 对操作载荷工况, $\sigma_{Ai} \leq S_{PS,Ti}$ 。否则增加管板厚度 h_i 并返回至步骤 1。

b) 校核管板法兰环应力

1) 按 7.2.8.3 计算 $\tilde{M}_{fi}$ 具体值。

2) 计算管板法兰环应力:

$$\sigma_{fi} = \left| \frac{Q_{si} R_{m,si} + Q_{ci} R_{m,ci} - F_{fi} R_{fi}}{h_{fi} R_{fi} \ln \frac{R_{Ti}}{R_{fi}}} \right| + \left| \frac{6\tilde{M}_{fi}}{h_{fi}^2 R_{fi} \ln \frac{R_{Ti}}{R_{fi}}} \right| \quad \dots\dots\dots (7-57)$$

3) 合格准则: 对设计载荷工况, $\sigma_{fi} \leq 1.5S_{Ti}$, 对操作载荷工况, $\sigma_{fi} \leq S_{PS,Ti}$ 。否则增加管板法兰环厚度 h_{fi} 并返回至步骤 1。

7.2.13 步骤 13—校核换热管应力及换热管与管板的接头设计

a) 校核换热管轴向应力。

1) 计算换热管轴向薄膜应力表达式：

$$\sigma_{m,ti}(r) = \frac{\chi_s P_{si} - \chi_t P_{ti}}{\chi_t - \chi_s} + \frac{k_w [C_1 ber(\alpha r) + C_2 bei(\alpha r)]}{\chi_t - \chi_s} + \frac{(-1)^{i+1} k_{ti} P_a}{(\chi_t - \chi_s)(k_{t1} + k_{t2})} \quad \dots\dots (7-58)$$

2) 确定 $\sigma_{m,ti}(r)$ 在区间 $(0 \leq r \leq a_o)$ 内的最大值和最小值：

$$\sigma_{m,ti,max} = MAX[\sigma_{m,ti}(r)] \quad \dots\dots (7-59)$$

$$\sigma_{m,ti,min} = MIN[\sigma_{m,ti}(r)] \quad \dots\dots (7-60)$$

3) 确定换热管轴向薄膜应力的最大绝对值：

$$|\sigma_{m,ti}|_{max} = MAX[|\sigma_{m,ti,min}|, |\sigma_{m,ti,max}|] \quad \dots\dots (7-61)$$

4) 计算换热管端轴向弯曲应力表达式：

$$\begin{aligned} \sigma_{b,ti}(r) = & \frac{\alpha D_1^* D_2^*}{D_i^* (D_1^* + D_2^*)} \left(\frac{f_n E_t d_t}{2 l_{ti}^c} \right) [C_1 ber'(\alpha r) + C_2 bei'(\alpha r)] \\ & + \frac{(-1)^{i+1} f_n E_t d_t}{4 l_{ti}^c} \left[(1 + 2 f_{nb}) C_4 \beta_0'(\beta r) - \frac{P_a r}{(k_{t1} + k_{t2})} \right] \quad \dots\dots (7-62) \end{aligned}$$

5) 计算换热管轴向薄膜+弯曲应力绝对值表达式：

$$\sigma_{ti}(r) = |\sigma_{m,ti}(r)| + |\sigma_{b,ti}(r)| \quad \dots\dots (7-63)$$

6) 确定 $\sigma_{ti}(r)$ 在区间 $(0 \leq r \leq a_o)$ 内的绝对值最大值：

$$|\sigma_{ti}|_{max} = MAX[\sigma_{ti}(r)] \quad \dots\dots (7-64)$$

7) 合格准则：对设计载荷工况， $|\sigma_{m,ti}|_{max} \leq 1.0 S_{ti}$ ，且 $|\sigma_{ti}|_{max} \leq 1.5 S_{ti}$ ，对操作载荷工况，

$|\sigma_{m,ti}|_{max} \leq 2.0 S_{ti}$ ，且 $|\sigma_{ti}|_{max} \leq 3.0 S_{ti}$ ，进入（b）节。否则重新考虑换热管设计并返回至步骤 1。

b) 校核换热管与管板接头的拉脱力

1) 对于非内孔焊接接头结构，计算换热管与管板接头的最大拉脱载荷 q_{ti} ：

$$q_{ti} = \frac{(d_t - t_t) t_t |\sigma_{m,ti}|_{max}}{d_t l_{tji}} \quad \dots\dots (7-65)$$

2) 确定换热管与管板接头的许用拉脱力 $[q_{ti}]$ ：对强度胀接头，按 GB/T 151 之 8.4.8 确定 $[q_{ti}]$ ；对强度焊接头，按 GB/T 151 之 8.4.8 确定 $[q_{ti}]$ 。

3) 合格准则：对内孔焊接头，无需校核拉脱力，进入（c）节；对开槽连接的强度胀结构接头， $|\sigma_{m,ti}|_{max} \leq [q_{ti}]$ ，则换热管与管板接头设计合格，进入（c）节，否则重新设计换热

管与管板接头。对其它形式的接头结构接头，设计工况 $q_{ti} \leq [q_{ti}]$ ，操作工况 $q_{ti} \leq 3[q_{ti}]$ ，则换热管与管板接头设计合格，进入（c）节，否则重新设计换热管与管板接头。

c) 如 $\sigma_{m,ti,min}$ 为负值，进入（e）节。

d) 如 $\sigma_{m,ti,min}$ 为正值，管子设计合格，进入步骤 14。

e) 校核管子的稳定性。

1) 按图 7-2 确定换热管当量稳长度 l_{cr} 。

2) 确定管子的最大许用失稳应力极限 $[\sigma]_{cr}^t$ ：

$$[\sigma]_{cr}^t = MIN \left[\frac{\pi^2 E_t}{1.5 (l_{cr}/r_t)^2}, S_t \right] \quad C_r \leq \frac{l_{cr}}{r_t} \quad \dots\dots (7-66)$$

$$[\sigma]_{cr}^t = \min \left[\frac{R_{eL,t}}{1.5} \left(1 - \frac{l_{cr}/r_t}{2C_r} \right), S_t \right] \quad C_r > \frac{l_{cr}}{r_t} \quad \dots\dots\dots (7-67)$$

其中,

$$C_r = \sqrt{\frac{2\pi^2 E_t}{R_{eL,t}}} \quad \dots\dots\dots (7-68)$$

$$r_t = 0.25 \sqrt{d_t^2 + (d_t - 2t_t)^2} \quad \dots\dots\dots (7-69)$$

- 3) 合格准则: 如 $|\sigma_{m,ti,min}| > [\sigma]_{cr}^t$, 则重新考虑换热管设计并返回至步骤 1。如 $|\sigma_{m,ti,min}| \leq [\sigma]_{cr}^t$, 则换热管设计合格, 并进入步骤 14。

7.2.14 步骤 14—校核壳体的轴向薄膜应力

- a) 计算每个壳体的轴向薄膜应力 $\sigma_{m,si}$, 对于壳程圆筒分段设计的情形参见 7.3。

$$\sigma_{m,si} = \frac{F_{si}}{t_{si}} \quad \dots\dots\dots (7-70)$$

- b) 合格准则

- 1) 若设计载荷工况, $|\sigma_{m,si}| > \phi_{si} S_{si}$, 及操作载荷工况, $|\sigma_{m,si}| > S_{PS,si}$, 则需重新考虑壳体设计, 并返回步骤 1。
 - 2) 若 $\sigma_{m,si}$ 为负值, 转入以下 (c)。
 - 3) 若 $\sigma_{m,si}$ 为正值, 壳体设计可接受。转入步骤 15;
- c) 按 GB/T 150.1-2024 之 5.4.5 确定壳体的最大允许轴向压缩应力 $[\sigma]_{cr}^{si}$: 若 $|\sigma_{m,si}| > [\sigma]_{cr}^{si}$, 调整壳体厚度并返回至步骤 1。若 $|\sigma_{m,si}| \leq [\sigma]_{cr}^{si}$, 壳体设计可接受。转入步骤 15。

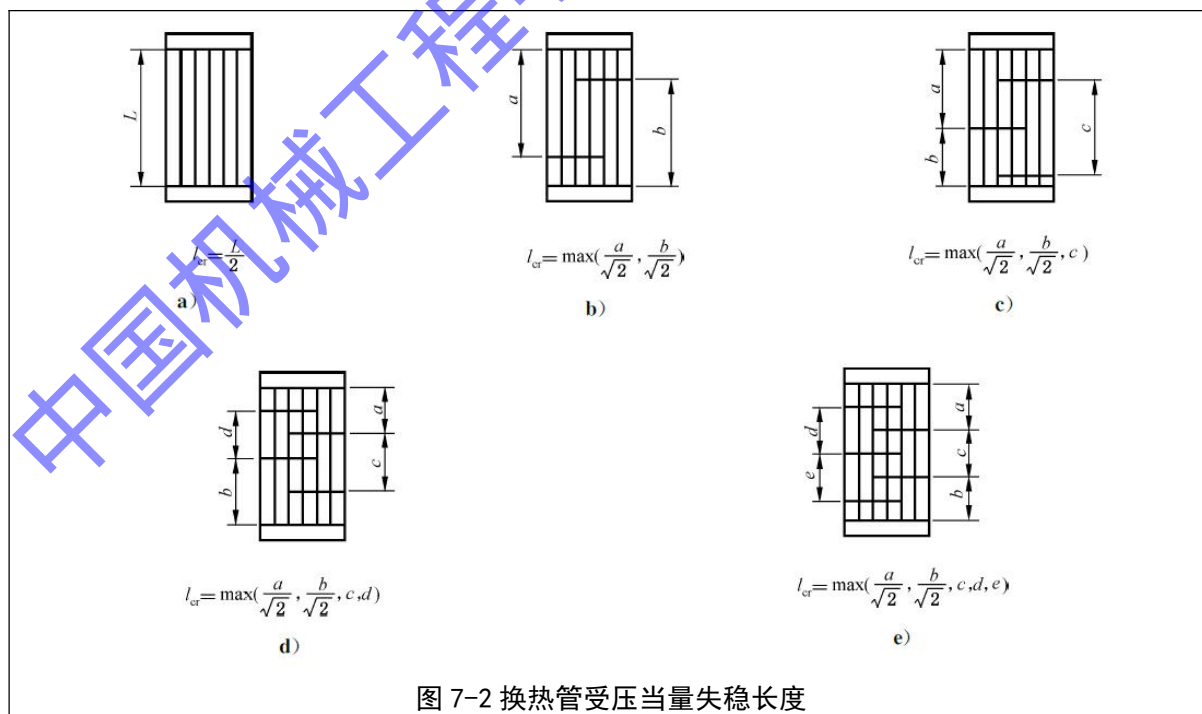


图 7-2 换热管受压当量失稳长度

7.2.15 步骤 15—校核与管板整体连接的壳体、管箱中的应力

- a) 对管板结构 b、c 和 e，计算壳体与管板连接处的轴向弯曲应力 $\sigma_{b,si}$ 和轴向总应力 σ_{si} ：

$$\sigma_{b,si} = \frac{6M_{si}}{t_{si}^2} \quad \dots\dots\dots (7-71)$$

$$\sigma_{si} = |\sigma_{m,si}| + |\sigma_{b,si}| \quad \dots\dots\dots (7-72)$$

- b) 对管板结构 b，计算管箱与管板连接处的轴向薄膜应力 $\sigma_{m,ci}$ ，弯曲应力 $\sigma_{b,ci}$ 和轴向总应力 σ_{ci} ：

$$\sigma_{m,ci} = \frac{R_{ci}^2 P_{ti}}{2R_{m,ci} t_{ci}} \quad \dots\dots\dots (7-73)$$

$$\sigma_{b,ci} = \frac{6M_{ci}}{t_{ci}^2} \quad \dots\dots\dots (7-74)$$

$$\sigma_{ci} = |\sigma_{m,ci}| + |\sigma_{b,ci}| \quad \dots\dots\dots (7-75)$$

- c) 合格准则：对管板结构 b，对设计载荷工况， $\sigma_{si} \leq 1.5S_{si}$ ，且 $\sigma_{ci} \leq 1.5S_{ci}$ ，对操作载荷工况， $\sigma_{si} \leq S_{PS,si}$ ，且 $\sigma_{ci} \leq S_{PS,ci}$ ，计算程序完成。否则进入步骤 16。对管板结构 c 和 e，对设计载荷工况， $\sigma_{si} \leq 1.5S_{si}$ ，对操作载荷工况， $\sigma_{si} \leq S_{PS,si}$ ，计算程序完成。否则进入步骤 16。

7.2.16 步骤 16—设计可采用下述 3 个选择之一或其组合考虑

- a) 选择 1—增加管板厚度 h_i 并返回至步骤 1；
 b) 选择 2—增加整体连接的壳体或管箱厚度并返回至步骤 1；
 1) 对管板结构 b、c 和 e，如 $\sigma_{si} > 1.5S_{si}$ ，则增加壳体厚度 t_{si} 。也允许仅增加邻近管板处的厚度，见图 7-3，按 7.3 要求调整计算；
 2) 对管板结构 b，如 $\sigma_{ci} > 1.5S_{ci}$ ，则增加管箱厚度 t_{ci} 。
 c) 选择 3—当满足 7.4.2 的条件时，可按 7.4 进行弹塑性分析。

7.3 壳程圆筒分段设计的情形

7.3.1 适用范围

- a) 本程序给出了壳程圆筒分段设计时，见图 7-3，如何应用 7.2 规则；
 b) 采用本程序可以获得较小的管板厚度，尤其在希望得到管板或壳体应力的最佳值时可以考虑。

7.3.2 适用条件

- a) 此计算程序只适用于壳体与管板为整体连接的结构（结构 b、c 和 e）。

7.3.3 计算程序

- a) 结构要求：与管板连接壳体厚度 t_{si} ，其长度 $L_{si} \geq 2.5\sqrt{R_{si}t_{si}}$ 。
 b) 采用 7.2 的计算程序，并作以下修正：
 步骤 7，参数 f_{si} 以下代替：

$$f_{si} = \frac{L_{si}}{E_{si}t_{si}} + \frac{L'_{si}}{E'_{si}t'_{si}} \left(\frac{R'_{si}}{R_{m,si}} \right) + \frac{2\pi R_{m,si}}{K_{ji}} \quad \dots\dots\dots (7-76)$$

步骤 7, 计算参数 P_e 时, 公式中的 $\delta_{g,s}$ 、 $\delta_{\gamma,s}$ 、 $\delta_{v,s}$ 、 $\delta_{p,j}$ 用以下代替:

$$\delta_{g,s} = g \cdot \omega_{s1} \left[\frac{L_{s1}^2}{2E_{s1}} + \frac{(L'_{s1})^2}{2E'_{s1}} + \frac{t_{s1}L_{s1}L'_{s1}}{t'_{s1}E'_{s1}} \right] - g \cdot \omega_{s2} \left[\frac{L_{s2}^2}{2E_{s2}} + \frac{(L'_{s2})^2}{2E'_{s2}} + \frac{t_{s2}L_{s2}L'_{s2}}{t'_{s2}E'_{s2}} \right] \quad \dots\dots\dots (7-77)$$

$$\delta_{\gamma,s} = \gamma \cdot [\alpha_{m,s1}(T_{m,s1} - T_a)L_{s1} + \alpha'_{m,s1}(T'_{m,s1} - T_a)L'_{s1}] + \gamma \cdot [\alpha_{m,s2}(T_{m,s2} - T_a)L_{s2} + \alpha'_{m,s2}(T'_{m,s2} - T_a)L'_{s2}] \quad \dots\dots\dots (7-78)$$

$$\delta_{v,s} = -\frac{\nu_{s1}L_{s1}R_{s1}}{E_{s1}t_{s1}} \left(\frac{R_{s1}}{R_{m,s1}} \right) P_{s1} - \frac{\nu'_{s1}L'_{s1}R'_{s1}}{E'_{s1}t'_{s1}} \left(\frac{R'_{s1}}{R_{m,s1}} \right) P_{s1} - \frac{\nu_{s2}L_{s2}R_{s2}}{E_{s2}t_{s2}} \left(\frac{R_{s2}}{R_{m,s2}} \right) P_{s2} - \frac{\nu'_{s2}L'_{s2}R'_{s2}}{E'_{s2}t'_{s2}} \left(\frac{R'_{s2}}{R_{m,s2}} \right) P_{s2} \quad \dots\dots\dots (7-79)$$

$$\delta_{p,j} = \frac{\pi [R_{j1}^2 - (R'_{s1})^2]}{2K_{j1}} P_{s1} + \frac{\pi [R_{j2}^2 - (R'_{s2})^2]}{2K_{j2}} P_{s2} \quad \dots\dots\dots (7-80)$$

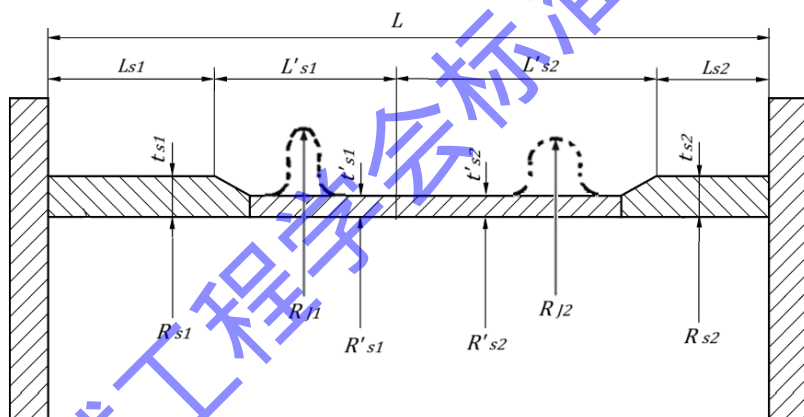


图 7-3 壳程圆筒分段

7.4 考虑管板与管箱或壳体连接处塑性影响的计算程序

7.4.1 适用范围

- 当要考虑壳体对管板和/或管箱对管板连接处的塑性影响时, 本程序阐述了如何使用 7.2 的规则;
- 当计算得的管板应力在许用极限以内, 但计算得的壳体或管箱总应力, 其任一者或二者超过了它们的许用应力极限, 则可以进行附加的“弹-塑性解”计算;
- 当弹性模量影响到连接处的旋转时, 此计算允许壳体和/或管箱弹性模量的降低, 以反映由于连接处塑性效应产生的预期载荷转移。降低了的有效弹性模量在弹塑性计算中具有降低壳体和/或管箱应力的效应, 但是, 由于载荷转移, 这样通常会导致管板应力的增高。在大

多数情况下，采用适当的降低壳体或管箱弹性模量的弹-塑性计算导致在设计中其计算得的管板应力都在许用应力极限以内。

7.4.2 适用范围的条件

- 当和时间有关的材料性能控制其许用应力时，本程序不得用于该温度；
- 本程序仅适用于设计载荷工况；
- 本程序适用于当 $\sigma_{si} \leq S_{PS,si}$ 和 $\sigma_{ci} \leq S_{PS,ci}$ 的结构 b；
- 本程序适用于当 $\sigma_{si} \leq S_{PS,si}$ 的结构 c 和 e；
- 本程序仅可在管板、壳体和管箱厚度及材料的每一迭代中使用一次。

7.4.3 计算程序

在列于 7.2 用于弹性解的计算程序完成以后，对于每一适用的载荷情况，应按下述的程序采用由 7.2 相关的步骤进行弹-塑性计算。除下述修正的那些参量以外，在弹-塑性计算中所用的参量应在对应的弹性载荷情况下所计算得的参量相同；

- 计算壳体和管箱中的最大许用弯曲应力极限

$$S_{si}^* = \min \left[(S_{y,si}), \left(\frac{S_{PS,si}}{2} \right) \right] \text{ 对结构 b、c 和 e} \quad \dots\dots\dots (7-81)$$

$$S_{ci}^* = \min \left[(S_{y,ci}), \left(\frac{S_{PS,ci}}{2} \right) \right] \text{ 对结构 b} \quad \dots\dots\dots (7-82)$$

- 采用在弹性解步骤 15 中所计算得的弯曲应力 $\sigma_{b,si}$ 和 $\sigma_{b,ci}$ 确定 $fact_{si}$ 和 $fact_{ci}$ 如下：

$$fact_{si} = \min \left[\left(1.4 - 0.4 \frac{|\sigma_{b,si}|}{S_{si}^*} \right), (1.0) \right] \text{ 对结构 b、c 和 e} \quad \dots\dots\dots (7-83)$$

$$fact_{ci} = \min \left[\left(1.4 - 0.4 \frac{|\sigma_{b,ci}|}{S_{ci}^*} \right), (1.0) \right] \text{ 对结构 b} \quad \dots\dots\dots (7-84)$$

- 对结构 b，若 $fact_{si} = 1.0$ 和 $fact_{ci} = 1.0$ ，则设计合格，计算程序完成。否则，转入以下 (d)；
对结构 c 和 e，若 $fact_{si} = 1.0$ ，则设计合格，计算程序完成。否则，转入以下 (d)。
- 按下面的方法计算降低的 E_{si} 和 E_{ci} 值：

$$E_{si}^* = E_{si} fact_{si} \text{ 对结构 b、c 和 e} \quad \dots\dots\dots (7-85)$$

$$E_{ci}^* = E_{ci} fact_{ci} \text{ 对结构 b} \quad \dots\dots\dots (7-86)$$

- 在步骤 3 中，以 E_{si}^* 代替 E_{si} ， E_{ci}^* 代替 E_{ci} ，重新计算 β_{si} 、 k_{si} 、 β_{ci} 和 k_{ci} ；
- 在步骤 8 中，重新计算 u_{ci} 、 φ_{ci} 、 u_{si} 、 φ_{si} ；
- 重新计算步骤 11-12，并校核管板布管区应力 $\sigma_{Ti} \leq 1.5S_{Ti}$ 、管板环板区应力 $\sigma_{Ai} \leq 1.5S_{Ti}$ 、管板法兰环应力 $\sigma_{fi} \leq 1.5S_{Ti}$ ，则计算程序完成。否则，应重新考虑元件的几何形状。

8 浮动管板的计算方法

8.1 结构与载荷要求

8.1.1 结构要求

- a) 两管板均为圆形且布管及布管间距相同，但两管板直径、厚度、材料等可不同；
- b) 所涉及的浮动管板式热交换器的三种类型示于图 3-1：
 - 1) 图 3-1 (b)，S 型浮头式管板。
 - 2) 图 3-1 (c)，P 型填料函密封管板。
 - 3) 图 3-1 (d)，W 型填料函密封管板。
- c) 固定端管板可以是图 3-2 中的 6 种结构任意一种。

8.1.2 载荷要求

- a) 两管板的温度、压力载荷等可不同；
- b) 与两管板连接的壳体或管箱的材料、厚度、温度可不同。材料弹性模量、屈服强度和许用应力应取设计载荷工况下的温度所对应的值；
- c) 考虑压降影响时，对于多管程换热器，管板表面处的介质压力取各程的平均值。
- d) 所需考虑的设计载荷工况按表 4-2 规定，若用户指定压差设计，仅需考虑设计工况 3 和 4。

8.2 计算程序

- a) 附录 B 给出了管板计算向量组 $\{X_j\}$ ，向量组中的未知量将在 8.2.10 中求解并获得具体值；
- b) 计算程序需迭代进行，应先假定管板厚度值 t_i 进行计算并校核管板、换热管、壳体和管箱的最大应力在各元件许用应力范围内，且换热管与管板接头上的载荷满足相关标准要求；

8.2.1 步骤 1—壳体长度参数 L_{s1} 、 L_{s2} 。换热器无论是立式或卧式安装，壳体长度参数取 $L_{s1} = L_{s2} = 0.5L$ 。

8.2.2 步骤 2—确定参数 a_o 、 χ_s 、 χ_t 、 R_{fi} 、 ρ_i

8.2.2.1 参数 a_o 、 χ_s 、 χ_t 按下列公式计算：

$$a_o = \frac{D_o}{2} \quad \dots\dots\dots (8-1)$$

$$\chi_s = 1 - n_t \cdot \left(\frac{d_t}{D_o}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (8-2)$$

$$\chi_t = 1 - n_t \cdot \left(\frac{d_t - 2t_t}{D_o}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (8-3)$$

8.2.2.2 浮动端虚拟壳体尺寸参数 R_{si} 、 $R_{m,si}$ 、 t_{si} 按下列公式计算（P、S、W 型管板）：

$$R_{si} = R_{Ti} - 10^{-6} \quad \dots\dots\dots (8-4)$$

$$R_{m,si} = R_{Ti} - 10^{-6} \quad \dots\dots\dots (8-5)$$

$$t_{si} = 10 \quad \dots\dots\dots (8-6)$$

8.2.2.3 参数 R_{fi} 按下列公式计算：

- a) 对 a 型管板

- b) 对 b 型管板 $R_{fi} = \min[R_{G,si}, R_{G,ci}]$ (8-7)
- c) 对 c 型管板 $R_{fi} = \min[R_{si}, R_{ci}]$ (8-8)
- d) 对 d 型管板 $R_{fi} = \min[R_{si}, R_{G,ci}]$ (8-9)
- e) 对 e 型管板 $R_{fi} = \min[R_{G,si}, R_{ci}]$ (8-10)
- f) 对 f 型管板 $R_{fi} = \min[R_{si}, R_{G,ci}]$ (8-11)
- g) 对 P 型管板 $R_{fi} = \min[R_{G,si}, R_{ci}]$ (8-12)
- h) 对 S 型管板 $R_{fi} = R_{ci}$ (8-13)
- i) 对 W 型管板 $R_{fi} = \min[R_{G,si}, R_{G,ci}]$ (8-14)
- $R_{fi} = R_{Ti} - 10^{-6}$ (8-15)

8.2.2.4 参数 ρ_i 按下列公式计算:

$$\rho_i = \frac{a_o}{R_{fi}} \quad \text{..... (8-16)}$$

8.2.3 步骤 3—确定参数 β_{ci} 、 k_{ci} 、 β_{si} 、 k_{si}

8.2.3.1 管箱参数 β_{ci} 、 k_{ci} 按下列公式计算:

a) 对 b、d、f、P 型管板

$$\beta_{ci} = \frac{\sqrt[4]{12(1-\nu_{ci}^2)}}{\sqrt{2R_{m,ci}t_{ci}}} \quad \text{..... (8-17)}$$

$$k_{ci} = \beta_{ci} \frac{E_{ci}t_{ci}^3}{6(1-\nu_{ci}^2)} \quad \text{..... (8-18)}$$

b) 对 a、c、e、S、W 型管板, $\beta_{ci} = 0$, $k_{ci} = 0$ 。

8.2.3.2 壳体参数 β_{si} 、 k_{si} 按下列公式计算:

a) 对 b、c、e 型管板

$$\beta_{si} = \frac{\sqrt[4]{12(1-\nu_{si}^2)}}{\sqrt{2R_{m,si}t_{si}}} \quad \text{..... (8-19)}$$

$$k_{si} = \beta_{si} \frac{E_{si}t_{si}^3}{6(1-\nu_{si}^2)} \quad \text{..... (8-20)}$$

b) 对 a、d、f、S、P、W 型管板, $\beta_{si} = 0$, $k_{si} = 0$ 。

8.2.4 步骤 4—确定参数 k_w 、 k_{ti}

a) 参数 k_w 按下列公式计算:

$$k_w = \frac{n_t t_t (d_t - t_t) E_t}{a_o^2 L} \quad \dots\dots\dots (8-21)$$

b) 参数 k_{ti} 按下列公式计算:

$$k_{ti} = f_n \frac{n_t I_t E_t}{\pi a_o^2 I_{ti}^c} \quad \dots\dots\dots (8-22)$$

8.2.5 步骤 5—确定参数 μ_i^* 、 E_i^* 、 ν_i^* 、 η_i' 、 D_i 、 D_i^* 、 D_{fi} 、 α 、 β 、 X_a

8.2.5.1 管板弹性参数 μ_i^* 、 E_i^* 、 ν_i^* 按第 6 章计算;

8.2.5.2 参数 η_i' 按下列公式计算:

$$\eta_i' = \frac{1 - \nu_i}{1 - \nu_i^*} \cdot \frac{E_i}{E_i^*} \quad \dots\dots\dots (8-23)$$

8.2.5.3 参数 D_i 按下列公式计算:

$$D_i = \frac{E_i h_i^3}{12(1 - \nu_i^2)} \quad \dots\dots\dots (8-24)$$

8.2.5.4 参数 D_i^* 按下列公式计算:

$$D_i^* = \frac{E_i^* h_i^3}{12(1 - \nu_i^{*2})} \quad \dots\dots\dots (8-25)$$

8.2.5.5 参数 D_{fi} 按下列公式计算:

$$D_{fi} = \frac{E_i h_{fi}^3 \ln(R_{Ti}/R_{fi})}{12} \quad \dots\dots\dots (8-26)$$

8.2.5.6 参数 α 按下列公式计算:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k_w}{D_1^*} + \frac{k_w}{D_2^*}} \quad \dots\dots\dots (8-27)$$

8.2.5.7 参数 β 按下列公式计算:

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{1}{2} + f_{nb}\right) \left(\frac{k_{t1}}{D_1^*} + \frac{k_{t2}}{D_2^*}\right)} \quad \dots\dots\dots (8-28)$$

8.2.6 步骤 6—确定参数 W_i^* 、 $\tilde{F}_{pti}$ 、 $\tilde{F}_{psi}$ 、 h_{wi}

8.2.6.1 管板设计螺栓载荷 W_i^* 按 4.3 节确定。

8.2.6.2 参数 $\tilde{F}_{pti}$ 、 $\tilde{F}_{psi}$ 按下式计算:

a) 对 a 型管板

$$\tilde{F}_{pti} = \pi(R_{G,ci}^2 - R_{fi}^2)P_{ti} \quad \dots\dots\dots (8-29)$$

$$\tilde{F}_{psi} = \pi(R_{G,si}^2 - R_{fi}^2)P_{si} \quad \dots\dots\dots (8-30)$$

b) 对 b 型管板

$$\tilde{F}_{pti} = \pi(R_{ci}^2 - R_{fi}^2)P_{ti} \quad \dots\dots\dots (8-31)$$

$$\tilde{F}_{Psi} = \pi(R_{si}^2 - R_{fi}^2)P_{si} \quad \dots\dots\dots (8-32)$$

c) c、e 型管板

$$\tilde{F}_{Pti} = \pi(R_{G,ci}^2 - R_{fi}^2)P_{ti} \quad \dots\dots\dots (8-33)$$

$$\tilde{F}_{Psi} = \pi(R_{si}^2 - R_{fi}^2)P_{si} \quad \dots\dots\dots (8-34)$$

d) 对 d、f 型管板

$$\tilde{F}_{Pti} = \pi(R_{ci}^2 - R_{fi}^2)P_{ti} \quad \dots\dots\dots (8-35)$$

$$\tilde{F}_{Psi} = \pi(R_{G,si}^2 - R_{fi}^2)P_{si} \quad \dots\dots\dots (8-36)$$

e) 对 P 型管板

$$\tilde{F}_{Pti} = \pi(R_{ci}^2 - R_{fi}^2)P_{ti} \quad \dots\dots\dots (8-37)$$

$$\tilde{F}_{Psi} = \pi(R_{si}^2 - R_{fi}^2)P_{si} \quad \dots\dots\dots (8-38)$$

f) 对浮头 S 型管板

$$\tilde{F}_{Pti} = \pi(R_{G,ci}^2 - R_{fi}^2)P_{ti} \quad \dots\dots\dots (8-39)$$

$$\tilde{F}_{Psi} = \pi(R_{G,ci}^2 - R_{fi}^2)P_{si} \quad \dots\dots\dots (8-40)$$

g) 对 W 型管板, $\tilde{F}_{ci} = 0$ 、 $\tilde{F}_{Pti} = 0$ 、 $\tilde{F}_{Psi} = 0$ 。

8.2.6.3 参数 h_{Wi} 按下列公式计算:

a) 对 a 型管板

$$h_{Wi} = R_{G,ci} - R_{G,si} \quad \dots\dots\dots (8-41)$$

b) 对 c 型管板

$$h_{Wi} = R_{G,ci} - R_{G,si} \quad \dots\dots\dots (8-42)$$

c) 对 d 型管板

$$h_{Wi} = R_{G,ci} - R_{G,si} \quad \dots\dots\dots (8-43)$$

d) 对 e 型管板

$$h_{Wi} = R_{G,ci} - R_{B,ci} \quad \dots\dots\dots (8-44)$$

e) 对 f 型管板

$$h_{Wi} = R_{B,si} - R_{G,si} \quad \dots\dots\dots (8-45)$$

f) 对 S 型管板

$$h_{Wi} = R_{G,ci} - R_{G,si} \quad \dots\dots\dots (8-46)$$

8.2.7 步骤 7—确定参数 f_{si} 、 P_a 、 P_e

$$f_{si} = \frac{L_{si}}{E_{si}t_{si}} \text{ 若 } i \text{ 用于固定管板} \quad \dots\dots\dots (8-47)$$

$$f_{si} = \frac{L_{si}}{E_{si}t_{si}} + \frac{2\pi R_{m,si}}{10^{-15}} \text{ 若 } i \text{ 用于浮动管板} \quad \dots\dots\dots (8-48)$$

$$P_a = (P_{T1} + P_{T2}) + P_{g,t} + P_{fs} + P_{ft} + (P_{t2} - P_{t1}) \quad \dots\dots\dots (8-49)$$

$$P_e = \frac{1}{2} [\chi_s(P_{s1} + P_{s2}) - \chi_t(P_{t1} + P_{t2}) + (P_{T1} - P_{T2})] + k_w(\delta_{\gamma,t} + \delta_{v,t} - \delta_{g,s} - \delta_{\gamma,s} - \delta_{v,s} - \delta_{PJ}) \quad (8-50)$$

其中,

$$P_{T1} = g \cdot \chi_s \omega_{T1} h_1 \quad (8-51)$$

$$P_{T2} = g \cdot \chi_s \omega_{T2} h_2 \quad (8-52)$$

$$P_{g,t} = g \cdot (\chi_t - \chi_s) \omega_t L \quad (8-53)$$

$$P_{fs} = g \cdot \chi_s \omega_{fs} L \quad (8-54)$$

$$P_{ft} = g \cdot \frac{n_t W_{ft}}{\pi a_o^2} \quad (8-55)$$

$$\delta_{\gamma,t} = \gamma \cdot \alpha_{m,t} (T_{m,t} - T_a) L \quad (8-56)$$

$$\delta_{v,t} = -\frac{2v_t L}{E_t} \cdot \left[\frac{(0.5d_t - t_t)^2}{(d_t - t_t)t_t} \cdot \left(\frac{P_{t1} + P_{t2}}{2} \right) - \frac{(0.5d_t)^2}{(d_t - t_t)t_t} \cdot \left(\frac{P_{s1} + P_{s2}}{2} \right) \right] \quad (8-57)$$

$$\delta_{g,s} = g \cdot \left(\frac{\omega_{g,s1} L_{s1}^2}{2E_{s1}} - \frac{\omega_{g,s2} L_{s2}^2}{2E_{s2}} \right) \quad (8-58)$$

$$\delta_{\gamma,s} = \gamma \cdot [\alpha_{m,s1} (T_{m,s1} - T_a) L_{s1} + \alpha_{m,s2} (T_{m,s2} - T_a) L_{s2}] \quad (8-59)$$

$$\delta_{v,s} = -\frac{v_{s1} L_{s1} R_{s1}}{E_{s1} t_{s1}} \left(\frac{R_{s1}}{R_{m,s1}} \right) P_{s1} - \frac{v_{s2} L_{s2} R_{s2}}{E_{s2} t_{s2}} \left(\frac{R_{s2}}{R_{m,s2}} \right) P_{s2} \quad (8-60)$$

$$\delta_{PJ} = 0 \quad (8-61)$$

8.2.8 步骤8—确定壳体及管箱边缘位移及转角参数

8.2.8.1 u_{ci} 、 φ_{ci} 按下列公式计算:

a) 对 b、d、f、P 型管板

$$u_{ci} = \begin{cases} \frac{\beta_{ci} M_{ci} - Q_{ci}}{\beta_{ci}^2 k_{ci}} + \frac{R_{ci}^2 P_{ti}}{E_{ci} t_{ci}} \left(1 - \frac{v_{ci} R_{ci}}{2R_{m,ci}} \right) & \text{对圆柱型管箱} \\ \frac{\beta_{ci} M_{ci} - Q_{ci}}{\beta_{ci}^2 k_{ci}} + \frac{R_{ci}^2 P_{ti}}{E_{ci} t_{ci}} \left(\frac{1}{2} - \frac{v_{ci} R_{ci}}{2R_{m,ci}} \right) & \text{对半球型管箱} \end{cases} \quad (8-62)$$

$$\varphi_{ci} = -\frac{2\beta_{ci} M_{ci} - Q_{ci}}{\beta_{ci} k_{ci}} \quad (8-63)$$

b) 对 a、c、e、S、W 型管板, $u_{ci} = 0$, $\varphi_{ci} = 0$ 。

8.2.8.2 u_{si} 、 φ_{si} 按下列公式计算:

a) 对 b、c、e 型管板

$$u_{si} = \frac{\beta_{si} M_{si} - Q_{si}}{\beta_{si}^2 k_{si}} + \frac{R_{m,si}^2 P_{si}}{E_{si} t_{si}} - \frac{v_{si} R_{m,si} F_{si}}{E_{si} t_{si}} \quad (8-64)$$

$$\varphi_{si} = \frac{2\beta_{si} M_{si} - Q_{si}}{\beta_{si} k_{si}} \quad (8-65)$$

b) 对 a、d、f、S、P、W 型管板, $u_{si} = 0$, $\varphi_{si} = 0$ 。

8.2.8.3 参数 $\tilde{M}_{fi}$ 按下列公式计算：

a) 对 a 型管板

$$\begin{aligned}\tilde{M}_{fi} = & R_{fi}M_{fi} - R_{m,si}M_{si} + (R_{G,si} - R_{fi})R_{G,si}F_{si} \\ & - 0.25(R_{G,ci} - R_{fi})(R_{G,ci}^2 + R_{fi}^2)P_{ti} \\ & - 0.25(R_{G,si} - R_{fi})(R_{G,si}^2 - R_{fi}^2)P_{si} + \frac{W_i^*h_{wi}}{2\pi}\end{aligned}\quad \cdots \cdots (8-66)$$

b) 对 b 型管板

$$\begin{aligned}\tilde{M}_{fi} = & R_{m,ci}M_{ci} + 0.5R_{m,ci}Q_{ci}h_i - 0.5R_{m,si}Q_{si}h_i - R_{m,si}M_{si} + R_{fi}M_{fi} \\ & + (R_{m,si} - R_{fi})R_{m,si}F_{si} - 0.25(R_{ci} - R_{fi})(R_{ci}^2 + R_{fi}^2)P_{ti} \\ & - 0.25(R_{si} - R_{fi})(R_{si}^2 - R_{fi}^2)P_{si}\end{aligned}\quad \cdots \cdots (8-67)$$

c) 对 c、e 型管板

$$\begin{aligned}\tilde{M}_{fi} = & R_{fi}M_{fi} - 0.5R_{m,si}Q_{si}h_i - R_{m,si}M_{si} + (R_{m,si} - R_{fi})R_{m,si}F_{si} \\ & - 0.25(R_{G,ci} - R_{fi})(R_{G,ci}^2 + R_{fi}^2)P_{ti} \\ & - 0.25(R_{si} - R_{fi})(R_{si}^2 - R_{fi}^2)P_{si} + \frac{W_i^*h_{wi}}{2\pi}\end{aligned}\quad \cdots \cdots (8-68)$$

d) 对 d、f 型管板

$$\begin{aligned}\tilde{M}_{fi} = & R_{m,ci}M_{ci} + 0.5R_{m,ci}Q_{ci}h_i + R_{fi}M_{fi} + (R_{G,si} - R_{fi})R_{G,si}F_{si} \\ & - 0.25(R_{ci} - R_{fi})(R_{ci}^2 + R_{fi}^2)P_{ti} \\ & - 0.25(R_{G,si} - R_{fi})(R_{G,si}^2 - R_{fi}^2)P_{si} + \frac{W_i^*h_{wi}}{2\pi}\end{aligned}\quad \cdots \cdots (8-69)$$

e) 对 P 型管板

$$\begin{aligned}\tilde{M}_{fi} = & R_{m,ci}M_{ci} + 0.5R_{m,ci}Q_{ci}h_i + R_{fi}M_{fi} \\ & - 0.25(R_{ci} - R_{fi})(R_{ci}^2 + R_{fi}^2)P_{ti} - 0.25(R_{si} - R_{fi})(R_{si}^2 - R_{fi}^2)P_{si}\end{aligned}\quad \cdots \cdots (8-70)$$

f) 对 S 型管板

$$\begin{aligned}\tilde{M}_{fi} = & R_{fi}M_{fi} - 0.5(R_{G,ci} - R_{fi})R_{G,ci}^2(P_{ti} - P_{si}) \\ & + 0.25(R_{G,ci} - R_{fi})(R_{G,ci}^2 - R_{fi}^2)P_{ti} \\ & - 0.25(R_{G,ci} - R_{fi})(R_{G,ci}^2 - R_{fi}^2)P_{si} + \frac{W_i^*h_{wi}}{2\pi}\end{aligned}\quad \cdots \cdots (8-71)$$

g) 对 W 型管板

$$\tilde{M}_{fi} = R_{fi}M_{fi} \quad \cdots \cdots (8-72)$$

8.2.8.4 u_{fi} 、 φ_{fi} 按下列公式计算：

$$u_{fi} = \frac{0.5(R_{Ti} + R_{fi})}{(R_{Ti} - R_{fi})h_{fi}E_i} [Q_{si}R_{m,si} + Q_{ci}R_{m,ci} - F_{fi}R_{fi}] \quad \cdots \cdots (8-73)$$

$$\varphi_{fi} = \frac{\tilde{M}_{fi}}{D_{fi}} \quad \cdots \cdots (8-74)$$

8.2.9 步骤 9—计算辅助函数表达式。按附录 C 计算辅助函数表达式 $w_{Ti}(r)$ 、 $\varphi_{Ti}(r)$ 、 $M_{Ti}(r)$ 、 $Q_{Ti}(r)$ 、 $w_{Ai}(r)$ 、 $\varphi_{Ai}(r)$ 、 $M_{Ai}(r)$ 、 $Q_{Ai}(r)$ 、 $u_{Ai}(r)$ 、 $u_{Ti}(r)$ 。

8.2.10 步骤 10—系统方程组的建立及求解

- a) 按附录 D, 对每种工况建立线性方程组。
- b) 求解由 a) 建立的线性方程组, 确定 $\{X_j\}$ 中未知量的具体值。

8.2.11 步骤 11—校核管板布管区应力

- a) 计算管板布管区($0 \leq r \leq a_o$)径向弯曲应力表达式:

$$\sigma_{b,Ti}(r) = \left(\frac{6D_1^* D_2^*}{D_1^* + D_2^*} \right) \frac{\alpha^2 [C_2 \psi_{2i}(\alpha r) - C_1 \psi_{1i}(\alpha r)]}{\mu_i^* (h_i - h_{gi})^2} + \frac{(-1)^{i+1} 3D_i^* \left[C_4 \beta^2 I_{2i}(\beta r) - \frac{(1+\nu_i^*) P_a}{(1+2f_{nb})(k_{t1}+k_{t2})} \right]}{\mu_i^* (h_i - h_{gi})^2} \quad \dots\dots\dots (8-75)$$

- b) 计算 $\sigma_{b,Ti}(r)$ 在区间 ($0 \leq r \leq a_o$)内绝对值最大值:

$$\sigma_{b,Ti,max} = MAX[|\sigma_{b,Ti}(r)|] \quad \dots\dots\dots (8-76)$$

- c) 计算管板布管区径向薄膜应力:

$$\sigma_{m,Ti} = \frac{1}{\mu_i^*} \left(\frac{F_{ai}}{h_i - h_{gi}} \right) \quad \dots\dots\dots (8-77)$$

- d) 计算管板布管区径向薄膜+弯曲应力的最大值:

$$\sigma_{Ti} = |\sigma_{m,Ti}| + |\sigma_{b,Ti,max}| \quad \dots\dots\dots (8-78)$$

- e) 合格准则: 对设计载荷工况, $|\sigma_{m,Ti}| \leq 1.0S_{Ti}$, 且 $\sigma_{Ti} \leq 1.5S_{Ti}$, 对操作载荷工况, $\sigma_{Ti} \leq S_{PS,Ti}$ 。否则增加管板厚度 h_i 并返回至步骤 1。

8.2.12 步骤 12—校核管板环板区应力及管板法兰环应力

- a) 校核管板环板区应力

- 1) 计算环板区($a_o \leq r \leq R_{fi}$)径向弯曲应力表达式:

$$\sigma_{b,Ai}(r) = \frac{6D_i}{(h_i - h_{gi})^2} \left[2A_{1i}(1 + \nu_i) - \frac{A_{2i}}{r^2}(1 - \nu_i) + A_{3i}(3 + \nu_i) \right] + \frac{6D_i}{(h_i - h_{gi})^2} \left[2A_{3i}(1 + \nu_i) \ln(r) + \frac{3+\nu_i}{16D_i} (P_{si} - P_{ti})r^2 \right] \quad \dots\dots\dots (8-79)$$

- 2) 计算环板区($a_o \leq r \leq R_{fi}$)径向薄膜应力表达式:

$$\sigma_{m,Ai}(r) = \frac{1}{(h_i - h_{gi})(1 - \rho_i^2)} \left[(F_{fi} - \rho_i^2 F_{ai}) + (F_{ai} - F_{fi}) \frac{a_o^2}{r^2} \right] \quad \dots\dots\dots (8-80)$$

- 3) 计算环板区径向薄膜应力 $\sigma_{m,Ai}(r)$ 的最大值:

$$\sigma_{m,Ai} = MAX\{|\sigma_{m,Ai}(a_o)|, |\sigma_{m,Ai}(R_{fi})|\} \quad \dots\dots\dots (8-81)$$

- 4) 计算环板区径向薄膜+弯曲应力的最大值:

$$\sigma_{Ai} = MAX\{||\sigma_{b,Ai}(a_o)| + |\sigma_{m,Ai}(a_o)||, ||\sigma_{b,Ai}(R_{fi})| + |\sigma_{m,Ai}(R_{fi})||\} \quad \dots\dots\dots (8-82)$$

- 5) 合格准则: 对设计载荷工况, $\sigma_{m,Ai} \leq 1.0S_{Ti}$, 且 $\sigma_{Ai} \leq 1.5S_{Ti}$, 对操作载荷工况, $\sigma_{Ai} \leq S_{PS,Ti}$ 。否则增加管板厚度 h_i 并返回至步骤 1。

- b) 校核管板法兰环应力

1) 按 8.2.8.3 计算 $\tilde{M}_{fi}$ 具体值。

2) 计算管板法兰环应力:

$$\sigma_{fi} = \left| \frac{Q_{si}R_{m,si} + Q_{ci}R_{m,ci} - F_{fi}R_{fi}}{h_{fi}R_{fi}\ln\frac{R_{Ti}}{R_{fi}}} \right| + \left| \frac{6\tilde{M}_{fi}}{h_{fi}^2R_{fi}\ln\frac{R_{Ti}}{R_{fi}}} \right| \quad \dots\dots\dots (8-83)$$

3) 合格准则: 对设计载荷工况, $\sigma_{fi} \leq 1.5S_{Ti}$, 对操作载荷工况, $\sigma_{fi} \leq S_{PS,Ti}$ 。否则增加管板法兰环厚度 h_{fi} 并返回至步骤 1。

8.2.13 步骤 13—校核换热管应力及换热管与管板的接头设计

a) 校核换热管轴向应力:

1) 计算换热管轴向薄膜应力表达式:

$$\sigma_{m,ti}(r) = \frac{\chi_s P_{si} - \chi_t P_{ti}}{\chi_t - \chi_s} + \frac{k_w [C_1 ber(ar) + C_2 bei(ar)]}{\chi_t - \chi_s} + \frac{(-1)^{i+1} k_{ti} P_a}{(\chi_t - \chi_s)(k_{t1} + k_{t2})} \quad \dots\dots\dots (8-84)$$

2) 确定 $\sigma_{m,ti}(r)$ 在区间 $(0 \leq r \leq a_o)$ 内的最大值和最小值:

$$\sigma_{m,ti,max} = MAX[\sigma_{m,ti}(r)] \quad \dots\dots\dots (8-85)$$

$$\sigma_{m,ti,min} = MIN[\sigma_{m,ti}(r)] \quad \dots\dots\dots (8-86)$$

3) 确定换热管轴向薄膜应力的最大绝对值:

$$|\sigma_{m,ti}|_{max} = MAX[|\sigma_{m,ti,min}|, |\sigma_{m,ti,max}|] \quad \dots\dots\dots (8-87)$$

4) 计算换热管端轴向弯曲应力表达式:

$$\sigma_{b,ti}(r) = \frac{\alpha D_1 D_2^*}{D_1^* (D_1^* + D_2^*)} \left(\frac{f_n E_t d_t}{2l_{ti}^c} \right) [C_1 ber'(ar) + C_2 bei'(ar)] + \frac{(-1)^{i+1} f_n E_t d_t}{4l_{ti}^c} \left[(1 + 2f_{nb}) C_4 \beta I_0'(\beta r) - \frac{P_a r}{(k_{t1} + k_{t2})} \right] \quad \dots\dots\dots (8-88)$$

5) 计算换热管轴向薄膜+弯曲应力绝对值表达式:

$$\sigma_{ti}(r) = |\sigma_{m,ti}(r)| + |\sigma_{b,ti}(r)| \quad \dots\dots\dots (8-89)$$

6) 确定 $\sigma_{ti}(r)$ 在区间 $(0 \leq r \leq a_o)$ 内的绝对值最大值:

$$|\sigma_{ti}|_{max} = MAX[\sigma_{ti}(r)] \quad \dots\dots\dots (8-90)$$

7) 合格准则: 对设计载荷工况, $|\sigma_{m,ti}|_{max} \leq 1.0S_{ti}$, 且 $|\sigma_{ti}|_{max} \leq 1.5S_{ti}$, 对操作载荷工况,

$|\sigma_{m,ti}|_{max} \leq 2.0S_{ti}$, 且 $|\sigma_{ti}|_{max} \leq 3.0S_{ti}$, 进入(b)节。否则重新考虑换热管设计并返回至步骤 1。

b) 校核换热管与管板接头的拉脱力

1) 对于非内孔焊接头结构, 计算换热管与管板接头的最大拉脱载荷 q_{ti} :

$$q_{ti} = \frac{(d_t - t_t) t_t |\sigma_{m,ti}|_{max}}{d_t l_{tji}} \quad \dots\dots\dots (8-91)$$

2) 确定换热管与管板接头的许用拉脱力 $[q_{ti}]$: 对强度胀接头, 按 GB/T 151 之 8.4.8 确定 $[q_{ti}]$; 对强度焊接头, 按 GB/T 151 之 8.4.8 确定 $[q_{ti}]$ 。

3) 合格准则：对内孔焊接头，无需校核拉脱力，进入(c)节；对开槽连接的强度胀结构接头，

$|\sigma_{m,ti}|_{\max} \leq [q_{ti}]$ ，则换热管与管板接头设计合格，进入(c)节，否则重新设计换热管与管板接头；

对其它形式的接头结构接头，设计工况 $q_{ti} \leq [q_{ti}]$ ，操作工况 $q_{ti} \leq 3[q_{ti}]$ ，则换热管与管板接头设计合格，进入(c)节，否则重新设计换热管与管板接头。

c) 如 $\sigma_{m,ti,min}$ 为负值，进入(e)节。

d) 如 $\sigma_{m,ti,min}$ 为正值，管子设计合格，进入步骤 14。

e) 校核管子的稳定性：

1) 按图 7-2 确定换热管当量稳长度 l_{cr} 。

2) 确定管子的最大许用失稳应力极限 $[\sigma]_{cr}^t$ ：

$$[\sigma]_{cr}^t = \min \left[\frac{\pi^2 E_t}{1.5(l_{cr}/r_t)^2}, S_t \right] \quad C_r \leq \frac{l_{cr}}{r_t} \quad \dots\dots\dots (8-92)$$

$$[\sigma]_{cr}^t = \min \left[\frac{R_{eL,t}}{1.5} \left(1 - \frac{l_{cr}/r_t}{2C_r} \right), S_t \right] \quad C_r > \frac{l_{cr}}{r_t} \quad \dots\dots\dots (8-93)$$

其中，

$$C_r = \sqrt{\frac{2\pi^2 E_t}{R_{eL,t}}} \quad \dots\dots\dots (8-94)$$

$$r_t = 0.25 \sqrt{d_t^2 + (d_t - 2t_t)^2} \quad \dots\dots\dots (8-95)$$

3) 合格准则：如 $|\sigma_{m,ti,min}| > [\sigma]_{cr}^t$ ，则重新考虑换热管设计并返回至步骤 1。如 $|\sigma_{m,ti,min}| \leq [\sigma]_{cr}^t$ ，则换热管设计合格，并进入步骤 14。

8.2.14 步骤 14

进入步骤 15。

8.2.15 步骤 15—校核与管板整体连接的壳体、管箱中的应力

a) 对管板结构 b、c 和 e，计算壳体与管板连接处的轴向薄膜应力 $\sigma_{m,si}$ 、弯曲应力 $\sigma_{b,si}$ 和轴向总应力 σ_{si} ：

$$\sigma_{m,si} = \frac{N_{si}}{t_{si}} \quad \dots\dots\dots (8-96)$$

$$\sigma_{b,si} = \frac{6M_{si}}{t_{si}^2} \quad \dots\dots\dots (8-97)$$

$$\sigma_{si} = |\sigma_{m,si}| + |\sigma_{b,si}| \quad \dots\dots\dots (8-98)$$

b) 对管板结构 b、d、f 和 P，计算管箱与管板连接处的轴向薄膜应力 $\sigma_{m,ci}$ 、弯曲应力 $\sigma_{b,ci}$ 和轴向总应力 σ_{ci} ：

$$\sigma_{m,ci} = \frac{R_{ci}^2 p_{ti}}{2R_{m,ci} t_{ci}} \quad \dots\dots\dots (8-99)$$

$$\sigma_{b,ci} = \frac{6M_{ci}}{t_{ci}^2} \quad \dots\dots\dots (8-100)$$

$$\sigma_{ci} = |\sigma_{m,ci}| + |\sigma_{b,ci}| \quad \dots\dots\dots (8-101)$$

- c) 合格准则：对管板结构 b，对设计载荷工况， $\sigma_{si} \leq 1.5S_{si}$ ，且 $\sigma_{ci} \leq 1.5S_{ci}$ ，对操作载荷工况， $\sigma_{si} \leq S_{PS,si}$ ，且 $\sigma_{ci} \leq S_{PS,ci}$ ，则计算程序完成，否则进入步骤 16；对管板结构 c 和 e，对设计载荷工况，如 $\sigma_{si} \leq 1.5S_{si}$ ，对操作载荷工况， $\sigma_{si} \leq S_{PS,si}$ ，则计算程序完成，否则进入步骤 16；对管板结构 d、f 和 P，对设计载荷工况，如 $\sigma_{ci} \leq 1.5S_{ci}$ ，对操作载荷工况， $\sigma_{ci} \leq S_{PS,ci}$ ，则计算程序完成，否则进入步骤 16。

8.2.16 步骤 16—设计可采用下述 3 个选择之一或其组合考虑

- a) 选择 1—增加管板厚度 h_i 并返回至步骤 1；
- b) 选择 2—增加整体连接的壳体或管箱厚度并返回至步骤 1；
 - 1) 对管板结构 b、c 和 e，如 $\sigma_{si} > 1.5S_{si}$ ，则增加壳体厚度 t_{si} ；
 - 2) 对管板结构 b、d、f 和 P，如 $\sigma_{ci} > 1.5S_{ci}$ ，则增加管箱厚度 t_{ci} 。
- c) 选择 3—当满足 8.3.2 条件时，可按 8.3 进行弹塑性分析。

8.3 考虑管板与管箱或壳体连接处塑性影响的计算程序

8.3.1 适用范围

- a) 当要考虑壳体对管板和/或管箱对管板连接处的塑性影响时，本程序阐述了如何使用 8.2 的规则；
- b) 当计算得的管板应力在许用极限以内，但计算得的壳体或管箱总应力，其任一者或二者超过了它们的许用应力极限，则可以进行附加的“弹-塑性解”计算；
- c) 当弹性模量影响到连接处的旋转时，此计算允许壳体和/或管箱弹性模量的降低，以反映由于连接处塑性效应产生的预期载荷转移。降低了的有效弹性模量在弹塑性计算中具有降低壳体和/或管箱应力的效应，但是，由于载荷转移，这样通常会导致管板应力的增高。在大多数情况下，采用适当的降低壳体或管箱弹性模量的弹-塑性计算导致在设计中其计算得的管板应力都在许用应力极限以内。

8.3.2 适用范围的条件

- a) 当和时间有关材料性能控制其许用应力时，本程序不得用于该温度处；
- b) 本程序仅适用于设计载荷工况；
- c) 本程序适用于当 $\sigma_{si} \leq S_{PS,si}$ 和 $\sigma_{ci} \leq S_{PS,ci}$ 的结构 b；
- d) 本程序适用于当 $\sigma_{si} \leq S_{PS,si}$ 的结构 c 和 e；
- e) 本程序适用于当 $\sigma_{ci} \leq S_{PS,ci}$ 的结构 d、f 和 P；
- f) 本程序仅可在管板、壳体和管箱厚度及材料的每一迭代中使用一次。

8.3.3 计算程序

在列于 8.2 用于弹性解的计算程序完成以后，对于每一适用的载荷情况，应按照下面的程序采用由 8.2 相关的步骤进行弹-塑性计算。除下述修正的参量外，在弹-塑性计算中所用的参量应在对应的弹性载荷情况下所计算得的参量相同。

- a) 计算壳体和管箱中的最大许用弯曲应力极限

$$S_{si}^* = \min \left[(S_{y,si}), \left(\frac{S_{PS,si}}{2} \right) \right] \text{ 对结构 b、c 和 e} \quad \dots\dots\dots (8-102)$$

$$S_{ci}^* = \min \left[(S_{y,ci}), \left(\frac{S_{PS,ci}}{2} \right) \right] \text{ 对结构 b、d、f 和 P} \quad \dots\dots\dots (8-103)$$

- b) 采用在弹性解步骤 15 中所计算得的弯曲应力 $\sigma_{b,si}$ 和 $\sigma_{b,ci}$ 确定 $fact_{si}$ 和 $fact_{ci}$ 如下:

$$fact_{si} = \min \left[\left(1.4 - 0.4 \frac{|\sigma_{b,si}|}{S_{si}^*} \right), (1.0) \right] \text{ 对结构 b、c 和 e} \quad \dots\dots\dots (8-104)$$

$$fact_{ci} = \min \left[\left(1.4 - 0.4 \frac{|\sigma_{b,ci}|}{S_{ci}^*} \right), (1.0) \right] \text{ 对结构 b、d、f 和 P} \quad \dots\dots\dots (8-105)$$

- c) 对结构 b, 若 $fact_{si} = 1.0$ 和 $fact_{ci} = 1.0$, 则设计合格, 计算程序完成。否则, 转入以下 (d);
对结构 c 和 e, 若 $fact_{si} = 1.0$, 则设计合格, 计算程序完成。否则, 转入以下 (d); 对结构
d、f 和 P, 若 $fact_{ci} = 1.0$, 则设计合格, 计算程序完成。否则, 转入以下 (d)。
- d) 按下面的方法计算降低的 E_{si} 和 E_{ci} 值:

$$E_{si}^* = E_{si} fact_{si} \text{ 对结构 b、c 和 e} \quad \dots\dots\dots (8-106)$$

$$E_{ci}^* = E_{ci} fact_{ci} \text{ 对结构 b、d、f 和 P} \quad \dots\dots\dots (8-107)$$

- e) 在步骤 3 中, 以 E_{si}^* 代替 E_{si} , E_{ci}^* 代替 E_{ci} , 重新计算 β_{si} 、 k_{si} 、 β_{ci} 和 k_{ci} ;
- f) 在步骤 8 中, 重新计算 u_{ci} 、 φ_{ci} 、 u_{si} 、 φ_{si} ;
- g) 重新计算步骤 11-12, 并校核管板布管区应力 $\sigma_{Ti} \leq 1.5S_{Ti}$ 、管板环板区应力 $\sigma_{Ai} \leq 1.5S_{Ti}$ 、管板法兰环应力 $\sigma_{fi} \leq 1.5S_{Ti}$, 则计算程序完成。否则, 应重新考虑元件的几何形状。

9 U 型管式热交换器管板的计算方法

9.1 结构及载荷要求

9.1.1 结构要求：管板结构可以是图 3-2 中所示的 6 种结构中之任意一种。

9.1.2 载荷要求

- 所需考虑的设计载荷工况按表 4-2。若用户指定压差设计，仅需考虑设计工况 3。
- 材料弹性模量、屈服强度和许用应力应取设计载荷工况下的温度所对应的值；
- 计算程序需迭代进行，应先假定管板厚度值 h_t 进行计算并校核管板、换热管、壳体和管箱的最大应力在最大许用应力范围内；
- 如有需要，按 9.3 考虑管板与管箱或壳体连接处塑性影响。

9.2 计算程序

本程序阐述了如何使用第 8 章的规则，按浸入式浮头热交换器方法设计 U 型管式热交换器。

- 取固定端管板、壳体、管箱参数与 U 型管式换热器相同。
- 对浸入式浮头 S 型管板，可假定其材料、温度、厚度等参数与固定管板相同。
- 采用 8.2 节计算程序，并作以下修正：步骤 4，计算参数 k_w 及 k_{ti} 时，取 $E_t = 10^{-3}$ MPa；
- 基于上述调整，计算获得固定管板及相连的壳体和管箱应力，这些应力等同于 U 型管换热器相关部件的应力，应力合格指标按 8.2 节要求评定。对于浮头 S 型管板的应力无需计算、评定。

9.3 考虑管板与管箱或壳体连接处塑性影响的计算程序

按 8.3 节计算程序，调整相关参数。

10 参考文献

- [1] ZHU Hong-song, and ZHAI Jin-guo. "The Unified Theory of Tubesheet Design—Part I: Theoretical Foundation." *Journal of Pressure Vessel Technology; Transactions of the ASME*. 144.2(2022):12.
- [2] ZHU Hong-song, and ZHAI Jin-guo. "The Unified Theory of Tubesheet Design—Part II: Supplement to the Theoretical Analysis." *Journal of Pressure Vessel Technology; Transactions of the ASME*. 144.2(2022):12.
- [3] ZHU Hong-song, ZHAI Jin-guo, and ZHOU Guo-yan. "The Unified Theory of Tubesheet Design—Part III: Comparison with ASME Method and Case Study." *Journal of Pressure Vessel Technology; Transactions of the ASME*. 144.2(2022):12.
- [4] 朱红松, 郑逸翔. 管板设计统一理论(1)—理论基础简介 [J]. 化工设备与管道, 2022, 59 (3) : 7—21.
- [5] 朱红松, 周帼彦. 管板设计统一理论(2)—与 ASME 的比较及案例分析 [J]. 化工设备与管道, 2022, 59(4) : 7—18.
- [6] 朱红松, 郑逸翔, 缪春生, 寿比南. 管板设计统一理论(3)—重力及压降的影响 [J]. 化工设备与管道, 2023, 60 (2) : 6—23.
- [7] 朱红松, 郑逸翔, 缪春生, 寿比南. 管板设计统一理论—非中面对称因素的系统分析[J]. 压力容器, 2025, 42 (7): 38-52.

附录 A

(规范性)
函数定义表

表 A-1 函数定义

$ber(x)$ 、 $bei(x)$ 以 x 为自变量的 Kelvin 函数及其导数:

$$ber(x) = \sum_{n=0}^{n=m-1} (-1)^n \frac{(x/2)^{4n}}{[(2n)!]^2} = 1 - \frac{(x/2)^4}{(2!)^2} + \frac{(x/2)^8}{(4!)^2} - \frac{(x/2)^{12}}{(6!)^2} + \dots$$

$$bei(x) = \sum_{n=1}^{n=m} (-1)^{n-1} \frac{(x/2)^{4n-2}}{[(2n-1)!]^2} = \frac{(x/2)^2}{(1!)^2} - \frac{(x/2)^6}{(3!)^2} + \frac{(x/2)^{10}}{(5!)^2} - \dots$$

$$ber'(x) = \sum_{n=1}^{n=m} (-1)^n \frac{2n(x/2)^{4n-1}}{[(2n)!]^2} = -\frac{2(x/2)^3}{(2!)^2} + \frac{4(x/2)^7}{(4!)^2} - \frac{6(x/2)^{11}}{(6!)^2} + \dots$$

$$bei'(x) = \sum_{n=1}^{n=m} (-1)^{n-1} \frac{(2n-1)(x/2)^{4n-3}}{[(2n-1)!]^2} = \frac{(x/2)^1}{(1!)^2} - \frac{3(x/2)^5}{(3!)^2} + \frac{5(x/2)^9}{(5!)^2} - \dots$$

注: 采用 $m=4+x/2$ (圆整到最近的整数) 计算, 可获得 Kelvin 函数及其导数足够精度的值。

$\psi_{1i}(x)$ 、 $\psi_{2i}(x)$ 以 x 为自变量的函数定义($i=1,2$):

$$\psi_{1i}(x) = bei(x) + \left(\frac{1 - v_i^*}{x} \right) ber'(x)$$

$$\psi_{2i}(x) = ber(x) - \left(\frac{1 - v_i^*}{x} \right) bei'(x)$$

$I_0(x)$ 以 x 为自变量的 Bessel 修正函数及其一阶、二阶、三阶导数:

$$I_0(x) = \sum_{n=0}^{n=m} \frac{(x/2)^{2n}}{(n!)^2} = 1 + \frac{(x/2)^2}{(1!)^2} + \frac{(x/2)^4}{(2!)^2} + \frac{(x/2)^6}{(3!)^2} + \dots$$

$$I_0'(x) = \sum_{n=1}^{n=m} \frac{n(x/2)^{2n-1}}{(n!)^2} = \frac{1(x/2)^1}{(1!)^2} + \frac{2(x/2)^3}{(2!)^2} + \frac{3(x/2)^5}{(3!)^2} + \dots$$

$$I_0''(x) = \sum_{n=0}^{n=m} \frac{(2n+1)(2n+2)(x/2)^{2n}}{4[(n+1)!]^2} = \frac{1}{2} + \frac{3 \cdot 4(x/2)^2}{4 \cdot (2!)^2} + \frac{5 \cdot 6(x/2)^4}{4 \cdot (3!)^2} + \dots$$

$$I_0'''(x) = \sum_{n=1}^{n=m} \frac{(2n)(2n+1)(2n+2)(x/2)^{2n-1}}{8 \cdot [(n+1)!]^2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 4(x/2)^1}{8 \cdot (2!)^2} + \frac{4 \cdot 5 \cdot 6(x/2)^3}{8 \cdot (3!)^2} + \dots$$

注: 采用 $m=2+x$ (圆整到最近的整数) 计算, 可获得 Bessel 修正函数 I_0 及其各阶导数足够精度的值。

$I_{2i}(x)$ 、 $I_0(x)$ 以 x 为自变量的函数定义($i=1,2$):

$$I_{2i}(x) = I_0''(x) + \frac{v_i^*}{x} I_0'(x)$$

$$I_0(x) = I_0'''(x) + \frac{1}{x} I_0''(x) - \frac{1}{x^2} I_0'(x)$$

附录 B

(规范性)

管板计算向量组 $\{X_j\}$ 定义

管板计算向量 $\{X_j\}$ 的组成式如下，其中含有 30 个待求解的元素。

$$\{X_j\} = \left\{ \begin{array}{c} C_1, C_2, C_3, C_4, \\ A_{01}, A_{11}, A_{21}, A_{31}, \\ M_{c1}, Q_{c1}, M_{s1}, Q_{s1}, F_{s1}, M_{f1}, Q_{f1}, F_{f1}, F_{a1}, \\ A_{02}, A_{12}, A_{22}, A_{32}, \\ M_{c2}, Q_{c2}, M_{s2}, Q_{s2}, F_{s2}, M_{f2}, Q_{f2}, F_{a2} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (B.1)$$

附录 C

(规范性)
辅助函数表达式

表 C-1 辅助函数计算表达式

1	$w_{Ti}(r) = \frac{D_1^* D_2^*}{D_i^* (D_1^* + D_2^*)} [C_1 \text{ber}(ar) + C_2 \text{bei}(ar)] + \frac{(-1)^{i+1} [C_3 + C_4 I_0(\beta r)]}{2}$ $- \frac{1}{2} (F_{s1} f_{s1} + F_{s2} f_{s2}) + \frac{P_e}{2k_w} + \frac{(k_{t2} - k_{t1}) P_a}{4k_w (k_{t1} + k_{t2})} - \frac{(-1)^{i+1} P_a r^2}{4(1 + 2f_{nb})(k_{t1} + k_{t2})}$
2	$u_{Ti}(r) = F_{ai} \frac{(1 - \nu_i)}{E_i h_i \eta_i} \cdot r$
3	$\varphi_{Ti}(r) = \frac{-D_1^* D_2^*}{D_i^* (D_1^* + D_2^*)} \alpha [C_1 \text{ber}'(ar) + C_2 \text{bei}'(ar)]$ $- \frac{(-1)^{i+1}}{2} \left[C_4 \beta I_0'(\beta r) - \frac{P_a r}{(1 + 2f_{nb})(k_{t1} + k_{t2})} \right]$
4	$M_{Ti}(r) = \frac{\alpha^2 D_1^* D_2^*}{D_1^* + D_2^*} [C_2 \psi_{2i}(ar) - C_1 \psi_{1i}(ar)]$ $+ \frac{(-1)^{i+1} D_i^*}{2} \left[C_4 \beta^2 I_{2i}(\beta r) - \frac{(1 + \nu_i^*) P_a}{(1 + 2f_{nb})(k_{t1} + k_{t2})} \right]$
5	$Q_{Ti}(r) = \frac{\alpha^3 D_1^* D_2^*}{D_1^* + D_2^*} [-C_1 \text{bei}'(ar) + C_2 \text{ber}'(ar)] + \frac{(-1)^{i+1} D_i^* C_4 \beta^3 I_Q(\beta r)}{2}$ $- \frac{\alpha D_1^* D_2^* k_{ti}}{D_i^* (D_1^* + D_2^*)} [C_1 \text{ber}'(ar) + C_2 \text{bei}'(ar)]$ $- \frac{(-1)^{i+1} (1 + 2f_{nb}) k_{ti}}{2} \left[C_4 \beta I_0'(\beta r) - \frac{P_a r}{(1 + 2f_{nb})(k_{t1} + k_{t2})} \right]$
6	$w_{Ai}(r) = A_{0i} + A_{1i} r^2 + A_{2i} \ln r + A_{3i} r^2 \ln(r) + \frac{(P_{si} - P_{ti})}{64 D_i} r^4$
7	$u_{Ai}(r) = F_{fi} \left[\frac{(a_o^2 + r^2) + \nu_i (a_o^2 - r^2)}{h_i E_i (R_{fi}^2 - a_o^2)} \right] \frac{R_{fi}^2}{r} - F_{ai} \left[\frac{(R_{fi}^2 + r^2) + \nu_i (R_{fi}^2 - r^2)}{h_i E_i (R_{fi}^2 - a_o^2)} \right] \frac{a_o^2}{r}$
8	$\varphi_{Ai}(r) = -2A_{1i} r - A_{2i} \frac{1}{r} - A_{3i} [r + 2r \ln(r)] - \frac{(P_{si} - P_{ti})}{16 D_i} r^3$
9	$M_{Ai}(r) = 2A_{1i} D_i (1 + \nu_i) - A_{2i} \frac{(1 - \nu_i) D_i}{r^2}$ $+ A_{3i} D_i [3 + \nu_i + 2(1 + \nu_i) \ln(r)] + \frac{(3 + \nu_i)(P_{si} - P_{ti})}{16} r^2$
10	$Q_{Ai}(r) = A_{3i} \frac{4 D_i}{r} + \frac{(P_{si} - P_{ti})}{2} r$

注：按表 A-1 计算 ber 、 bei 、 ψ_{1i} 、 ψ_{2i} 、 I_0 、 I'_0 、 I_{2i} 、 I_Q

附录 D

(规范性)
系统方程组

由以下方程 D.1~D.15, 令 $i = 1$ 及 $i = 2$, 可组成含 30 个未知量的线性方程组。其中: 30 个未知量已在附录 A 中定义; u_{ci} 、 u_{fi} 、 φ_{fi} 、 φ_{ci} 、 u_{si} 、 φ_{si} 的表达式按 7.2 节或 8.2 节确定; 函数表达式 $w_{Ti}(r)$ 、 $\varphi_{Ti}(r)$ 、 $M_{Ti}(r)$ 、 $Q_{Ti}(r)$ 、 $w_{Ai}(r)$ 、 $\varphi_{Ai}(r)$ 、 $M_{Ai}(r)$ 、 $Q_{Ai}(r)$ 、 $u_{Ai}(r)$ 、 $u_{Ti}(r)$ 按附录 C 确定, 将 r 替换为对应的数值 a_o 或 R_{fi} 。

$$u_{ci} = u_{fi} + \varphi_{fi} \cdot \frac{h_i}{2} \quad \text{..... (D.1)}$$

$$\varphi_{ci} = \varphi_{fi} \quad \text{..... (D.2)}$$

$$u_{si} = u_{fi} - \varphi_{fi} \cdot \frac{h_i}{2} \quad \text{..... (D.3)}$$

$$\varphi_{si} = \varphi_{fi} \quad \text{..... (D.4)}$$

$$w_{Ai}(R_{fi}) = (R_{m,si} - R_{fi}) \cdot \varphi_{fi} \quad \text{..... (D.5)}$$

$$u_{Ai}(R_{fi}) = u_{fi} \quad \text{..... (D.6)}$$

$$\varphi_{Ai}(R_{fi}) = \varphi_{fi} \quad \text{..... (D.7)}$$

$$M_{Ai}(R_{fi}) = M_{fi} \quad \text{..... (D.8)}$$

$$Q_{Ai}(R_{fi}) = Q_{fi} \quad \text{..... (D.9)}$$

$$w_{Ai}(a_o) = w_{Ti}(a_o) \quad \text{..... (D.10)}$$

$$u_{Ai}(a_o) = u_{Ti}(a_o) \quad \text{..... (D.11)}$$

$$\varphi_{Ai}(a_o) = \varphi_{Ti}(a_o) \quad \text{..... (D.12)}$$

$$M_{Ai}(a_o) = M_{Ti}(a_o) \quad \text{..... (D.13)}$$

$$Q_{Ai}(a_o) = Q_{Ti}(a_o) \quad \text{..... (D.14)}$$

$$2\pi R_{fi} Q_{fi} + \tilde{F}_{Psi} + \tilde{F}_{ci} = 2\pi R_{m,si} F_{si} + \tilde{F}_{Pti} \quad \text{..... (D.15)}$$

注:

- 对 a 型管板, $M_{ci} = 0$ 、 $Q_{ci} = 0$ 、 $M_{si} = 0$ 、 $Q_{si} = 0$;
- 对 c、e 型管板, $M_{ci} = 0$ 、 $Q_{ci} = 0$;
- 对 d、f 型管板, $M_{si} = 0$ 、 $Q_{si} = 0$;
- 对 S 型管板, $M_{ci} = 0$ 、 $Q_{ci} = 0$ 、 $M_{si} = 0$ 、 $Q_{si} = 0$;
- 对 P 型管板, $M_{si} = 0$ 、 $Q_{si} = 0$ 。
- 对 W 型管板, $M_{ci} = 0$ 、 $Q_{ci} = 0$ 、 $M_{si} = 0$ 、 $Q_{si} = 0$ 。