

锅炉构架抗震设计标准

1 主题内容与适用范围

1.1 本标准规定了锅炉构架所在场地的场地指数计算方法, 构架的地震作用计算方法, 地震作用效应与其它荷载效应的组合方法及构架的抗震构造措施, 使锅炉构架在地震时尽量减少损坏, 避免造成电力系统大面积长时间的停电。

1.2 本标准适用于抗震设防烈度为 6~9 度地区的锅炉构架的抗震设计。抗震设防烈度为 10 度时, 锅炉构架的抗震设计应进行有关专门研究和设防。

2 基本规定

2.1 锅炉构架的设防烈度一般按国家规定的基本烈度。

2.2 已经进行了地震危险性分析的建设场地, 可采用地震危险性分析得到的地震动参数设计锅炉构架。

2.3 基本烈度为 6 度地区的锅炉构架一般可不设防。建在 6 度地区的重要电站, 当用户需要按 7 度设防时, 可按本标准第 5.10 条采取抗震构造措施。

2.4 单机容量小于 6MW 的电站锅炉构架一般不需设防。

2.5 进行抗震设计时, 除本标准规定外, 其它尚需符合《电力设施抗震设计规范》、《钢结构设计规范》和《建筑结构荷载规范》的有关规定。

3 场地、地基和地基可液化判别

3.1 场地

3.1.1 场地的评定以场地的平均剪切模量 G , kPa 和覆盖层厚度 H , m 为指标。

场地的平均剪切模量按式 (1) 计算

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \rho_i V_{si}^2}{\sum_{i=1}^n h_i} \dots\dots\dots (1)$$

式中: G ——场地的平均剪切模量, kPa;

h_i ——第 i 层土的厚度, m;

ρ_i ——第 i 层土的密度, t/m³;

V_{si} ——第 i 层土的剪切波速, m/s;

n ——覆盖层的分层层数。

当覆盖土层厚度超过 20m 时, 取地表以下 20m 深度范围内的平均剪切模量; 当覆盖土层厚度小于 20m 时, 取实际厚度范围内的平均剪切模量。

场地覆盖厚度 H 是地面至坚硬土层 (平均剪切模量 G 不小于 500000kPa 或剪切波速 V_s 大于 500m/s 的土层) 顶面的距离。

3.1.2 根据锅炉构架所在场地的平均剪切模量和覆盖土层厚度, 按式 (2) 计算场地指数, 并以它作为场地综合评定标志。

$$\mu = a_1 \mu_g + a_2 \mu_h \dots\dots\dots (2)$$

式中： μ ——场地指数；

a_1 、 a_2 ——分别表示场地土层刚度和厚度对地震效应的影响比例。

例：取值如下：

$a_1 = 0.7$

$a_2 = 0.3$

μ_a ——平均剪切模量对场地指数的贡献，按式(3)计算：

$$\mu_a = 1 - e^{-0.66(C-30000) \cdot 10^{-5}} \dots\dots\dots (3)$$

当 $G \leq 30000 \text{kPa}$ 时，取 $\mu_a = 0$

μ_b ——覆盖土层厚度对场地指数的贡献，按式(4)计算：

$$\mu_b = e^{-0.5(H-5)^2 \cdot 10^{-2}} \dots\dots\dots (4)$$

当 $H \leq 5\text{m}$ 时，取 $\mu_b = 1$

H ——覆盖土层厚度；

当 $G > 50000 \text{kPa}$ ，或 $H \leq 5\text{m}$ 时，式(2)中取 $\mu = 1$

3.1.3 当确定锅炉构架抗震措施时，场地名称与场地指数的对应关系按表1确定。

表1 场地指数

场地名称	硬场地	中硬场地	中软场地	软场地
场地指数	$1 \geq \mu > 0.75$	$0.75 \geq \mu > 0.35$	$0.35 \geq \mu > 0.05$	$0.05 \geq \mu \geq 0$

3.1.4 锅炉构架的建筑场地选择按《电力设施抗震设计规范》与电站一并考虑确定。一般随电站确定；场地的平均剪切模量和覆盖层厚度由电站设计部门提供。或根据电站设计部门提供的场地名称按表1确定。

3.2 地基和地基可液化判别

3.2.1 天然地基的地基土抗震承载能力的确定和验算按《电力设施抗震设计规范》执行。

3.2.2 地基地震时可液化的判别按《电力设施抗震设计规范》执行。

4 锅炉构架地震作用计算方法

4.1 地震作用计算

4.1.1 计算锅炉构架地震作用，除4.1.7条规定外，一般在锅炉构架的两个主轴方向分别计算水平地震作用，并进行抗震强度校核。

4.1.2 锅炉构架的地震作用计算应分两部分

4.1.2.1 构架的地震作用计算(基底剪力法)

$$Q_0 = C\alpha W \dots\dots\dots (5)$$

式中： C ——结构系数，取 $C = 0.3$ ；

α ——地震影响系数，根据构架的基本周期按4.1.2条确定；

Q_0 ——结构总水平力地震作用标准值；

W ——结构等效总重力荷载，为总重力荷载代表值，包括构架全部自重和支承荷载(不含悬吊炉体重)。

构架*i*计算质点的地震作用 P_i 按式(6)计算，见图1。

$$P_i = \frac{W_i H_i}{\sum W_i H_i} (1 - C_k) Q_0 \dots\dots\dots (6)$$

式中： W_i ——*i*质点的重力荷载代表值；

C_k ——构架顶部地震作用的修正系数，由式(7)计算：

$$C_k = 0.081T + 0.01 \dots\dots\dots (7)$$

式中: T ——构架的结构自振周期, s 。

由式 (6) 求出各质点的地震作用后, 构架顶部再附加一水平地震作用 ΔP_n 。 ΔP_n 由式 (8) 计算。

$$\Delta P_n = C_e Q_n \dots\dots\dots (8)$$

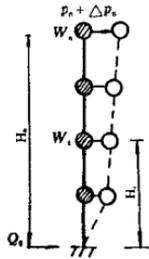


图 1

4.1.2.2 悬吊炉体通过导向装置 i 作用在构架上的地震作用

$$P_i = C\alpha W_i \dots\dots\dots (9)$$

式中: P_i ——第 i 质点的水平地震作用标准值;

C ——结构系数, 取 $C=0.3$;

α ——地震影响系数, 取值与式 (5) 相同;

W_i ——悬吊炉体集中于第 i 个导向装置的重力荷载代表值。

锅筒的集中下降管悬吊的冷、热风管道、再热管道和煤粉管道等作用到构架上的地震作用, 计算方法与炉体相同。

4.1.3 锅炉构架的水平地震影响系数, 按图 2 确定。水平地震影响系数的最大值 α_{max} 按表 2 采用。

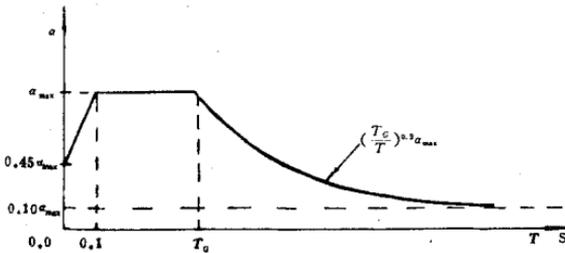


图 2

T_0 ——构架的特征周期, s 。

图 2 中, 构架的特征周期 T_0 按式 (10) 计算

$$T_0 = 0.65 - 0.45\mu^{0.4} \dots\dots\dots (10)$$

式中: μ ——场地指数, 见式 (2)。

当 μ 小于 0.2, 且构架的基本周期大于 1.5s 时, 由式 (10) 计算的 T_0 值应增加 0.15s。

表2 水平地震影响系数最大值

烈度	6	7	8	9
α_{max}	0.14	0.28	0.56	1.12

- 4.1.4 由式(6)算出的地震作用按炉架节点的竖向荷载大小分配到该刚性层各节点上。
- 4.1.5 无导向装置的悬吊锅炉, 构架的地震作用按式(5)和式(6)或附录A计算。炉体的地震作用只作用于构架顶端, 按以下取值:
- 7度地震 $P=0.015W_0$ 。
- 8度地震 $P=0.030W_0$ 。
- 9度地震 $P=0.060W_0$ 。

其中: W_0 ——炉体重力荷载代表值。

- 4.1.6 在条件具备时, 可用振型分解反应谱计算锅炉构架的地震作用。具体方法见本标准附录A。
- 4.1.7 跨度大于24m和较大悬臂的结构, 在8度和9度地震区需要计算竖向地震作用(此竖向作用不向其它构件传递)。8度地震的竖向地震作用取计算结构重力的10%; 9度取计算结构重力的20%。

4.2 抗震强度校核

- 4.2.1 锅炉构架断面的抗震强度校核应满足式(11)

$$S \leq f_r / \gamma_R \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中: S ——荷载效应值, 由式(12)计算;

f_r ——构件的材料强度设计值;

γ_R ——抗力调整系数, 按表3采用。

表3 抗力调整系数

构 件	γ_R
柱	0.75
其它构件	0.80
构件焊缝和螺栓	1.00

- 4.2.2 锅炉构架的地震作用效应与其它荷载效应按式(12)组合。

$$S = 1.2S_D + 1.4S_{Eh} + 1.4\varnothing S_w \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中: S_D ——恒荷载效应值;

S_{Eh} ——水平地震作用效应值;

\varnothing ——风荷载组合系数。一般取 $\varnothing=0$; 但对高度大于80m的塔式构架和高宽比大于及等于5的构架, 取 $\varnothing=0.2$ 。

S_w ——风荷载效应值。

5 锅炉构架抗震设计的构造措施

5.1 整体布置

- 5.1.1 地震区的锅炉构架, 一般应设计成独立式的体系。当与厂房有联系时, 应采取有效措施, 避免承受厂房的地震作用。
- 5.1.2 构架的平面和立面布置应规则、对称、质量均匀, 尽量避免刚度突变的结构。
- 5.1.3 构架宜采用桁架式结构。
- 5.1.4 垂直支撑和水平支撑应连续布置, 使地震作用直接传递至基础。
- 5.1.5 合理地布置垂直支撑, 避免柱产生过大的上拔力作用。

5.1.6 对于有护板的支承式框架结构构架，凡有护板布置的区域，且护板与柱、梁之间为嵌固连接时，可视作刚盘平面。

5.1.7 应加强构件之间的连接设计，保证构架体系的整体稳定性和协调构件之间变形。

5.2 柱脚

5.2.1 铰接柱脚的锚固螺栓应能承受地震作用产生的上拔力。

5.2.2 若铰接柱脚的底板端面侧面压强超过基础混凝土抗压强度时，宜设置抗剪板，见图 3。

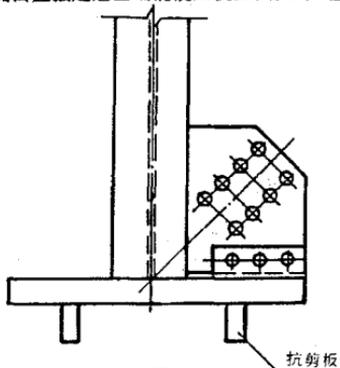


图 3

5.2.3 柱脚宜采用埋入式结构，埋入深度按承载大小确定，一般 300~1000mm。

5.3 柱段连接接头

5.3.1 柱段连接接头的位置及形式按构架的形式(即框架或桁架结构)确定。对于框架结构，接头应靠近两节点的中部位置，且节点设计为刚性连接。对桁架结构，接头应靠近下节点上标高 1m 左右为宜。

5.4 梁与柱的连接

5.4.1 应根据构架的形式设计梁与柱的连接，刚性连接不应低于被连接梁的强度，且柱的相应位置须设置加劲肋。见图 4。

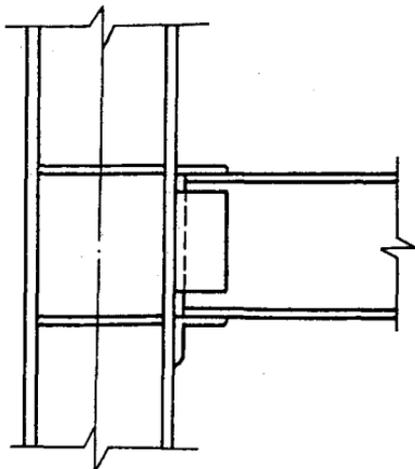


图 4

5.5 炉顶板梁与柱顶连接

5.5.1 主梁搁支在柱顶上,采用弧形支座或其它形式宜采用紧固件以铰接形式连接固定,螺栓数量按地震作用配置待锅炉本体水压试验后,用连接板将主梁与柱顶焊接固定。见图 5。

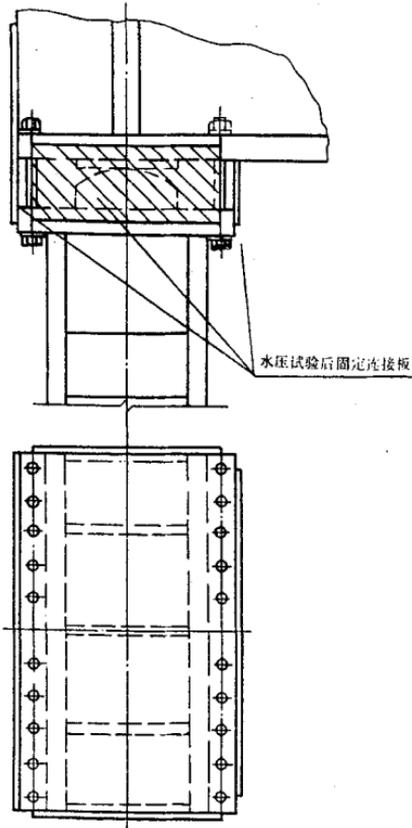


图 5

5.6 炉顶梁格

5.6.1 炉顶梁格是锅炉主要承重部件,除保证强度、刚度要求外,尚需设置主梁端部支撑和平面支撑,以保证炉顶梁格的整体稳定和提高平面刚度,见图 6。

5.7 限位装置

5.7.1 支承式锅炉的锅筒抗震限位装置可设在锅筒长度方向的中间,即锅筒膨胀零点位置,其结构形式见图 7。对于垂直于锅筒方向的地震作用是通过与锅筒刚性连接的各种受压平衡,可不再设置限位结构。

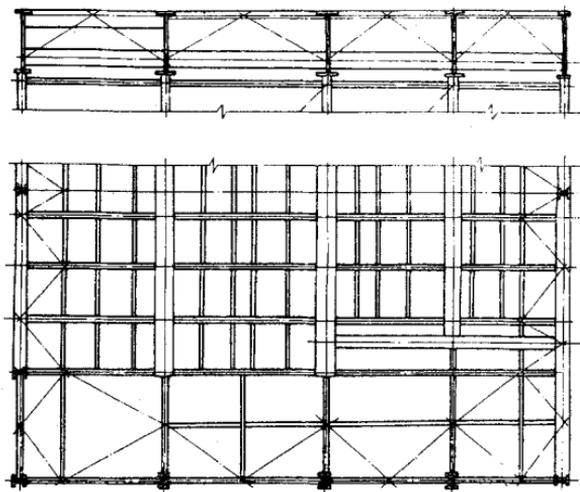


图 6

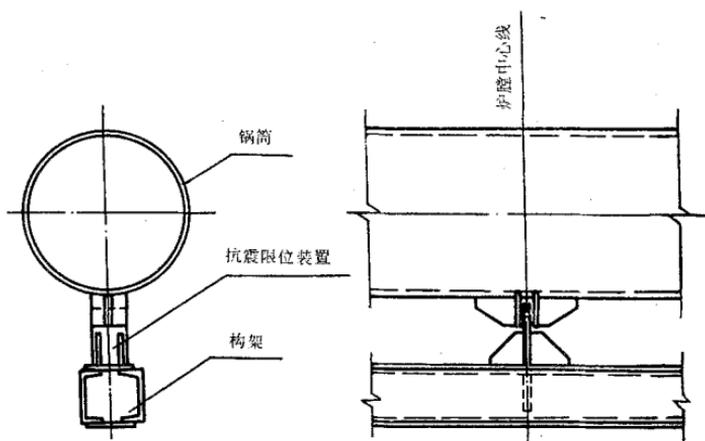


图 7

5.8 导向装置

5.8.1 悬吊锅炉炉体导向装置应布置在锅炉膨胀中心线处，使炉体定向膨胀。同时，应能承受风荷载和地震作用。锅炉本体的悬吊质量因地震引起的水平力是通过导向装置传递给水平支撑然后作用到立面框架或桁架上。导向装置在炉膛部分沿高度方向布置 3~5 层，竖井烟道至少为二层，上层导向装置应尽可能设在顶棚管处。II 型钢炉的导向装置布置见图 8。

5.8.2 汽包下降管导向装置沿高度方向一般设置 2~3 层，且直接固定在各水平支撑上，见图 9。

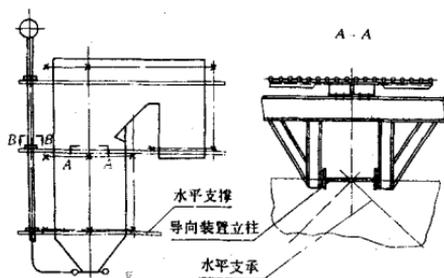


图 8

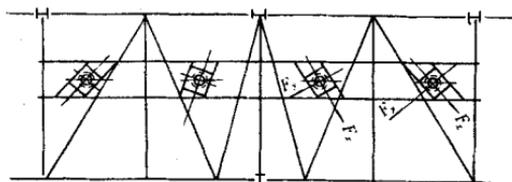


图 9

5.9 各种烟、风、管道

5.9.1 烟、风、管道；煤粉管道；主、再热蒸汽管道以及炉顶密封结构等均须设置抗震和膨胀中心装置，并尽可能直接或间接地将力作用至水平和立面支撑结构上。当因结构布置受到限制时须对受弯杆件进行校核后方可设置，图 10 为二次热风道抗震装置示意图。

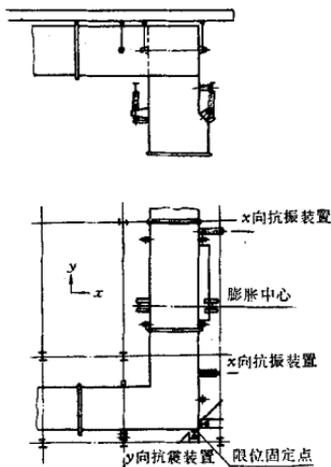


图 10

5.10 基本烈度为6度地区的锅炉构架的抗震构造措施

建在6度地区的重要电站，当用户需要按7度设防时，其抗震构造措施可按以下要求设计。

- 5.10.1 6度地区的锅炉构架其整体布置应符合第5.1.1条规定。
- 5.10.2 构架之间的连接承载力设计值应为计算承载力的120%。
- 5.10.3 单机容量大于200MW的锅炉构架，铰接柱脚的锚固螺栓直径不应小于M20，且宜设置抗剪板。
- 5.10.4 有较大荷载作用的单腹板梁，应适当加强横向刚度。
- 5.10.5 框架柱的高度较大时，可采取适当设置垂直支撑或梁等措施。

附录 A

振型分解反应谱法计算悬吊锅炉构架水平地震作用

(补充件)

用平面多质点体系计算锅炉构架的地震作用时, j 振型 i 质点的地震作用 P_j 按式 (A1) 计算, 简图见图 A1:

$$P_j = C\alpha_j \gamma_j X_{j(i)} W_i \dots\dots\dots (A1)$$

第 j 振型 i 质点的位移 D_j 按式 (A2) 计算:

$$D_j = C\alpha_j T_j^2 \gamma_j X_{j(0)} g / 4\pi^2 \dots\dots\dots (A2)$$

- 式中: C——结构系数取 0.35;
- α_j ——j 振型地震影响系数, 由 4.1.3 条求得;
- $X_{j(i)}$ ——j 振型第 i 质点的位移;
- W_i ——i 质点的重力;
- T_j ——j 振型周期;
- g——重力加速度;
- γ_j ——振型参与系数, 按式 (A3) 计算;

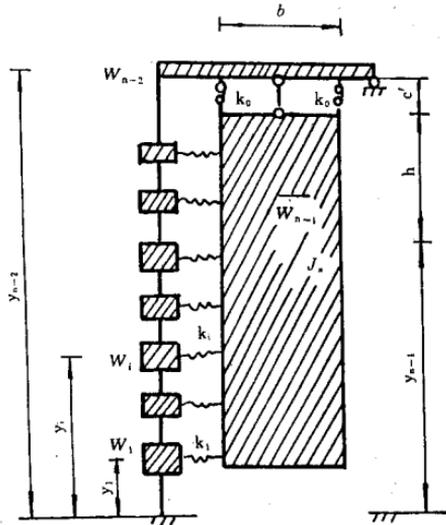


图 A1

$$\gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} W_i X_{j(i)}}{\sum_{i=1}^{n-1} W_i X_{j(i)}^2} \dots\dots\dots (A3)$$

炉体作用在构架导向装置 i 上的力 PS_i 按式 (A4) 计算:

$$PS_i = K_i [(D_j)_{(n-1)} - D_j] - (Y_{(n-1)} - Y_i) \theta_j \dots\dots\dots (A4)$$

注: $i=1, 2, \dots, n-3$;
 $j=1, 2, \dots, n$.

第 j 振型炉体通过吊杆作用于顶板梁上的水平力 $PS_{j(n-2)}$ 按式(A5)计算。

$$PS_{j(n-2)} = K_{n-2} [(D_{j(n-1)} - D_{j(n-2)}) + \theta_n h] \dots\dots\dots (A5)$$

式中: K_i ——第 i 个导向装置的弹簧常数, $i=1, 2, \dots, n-3$;

$D_{j(n-1)}$ ——第 j 振型第 n-1 质点的位移;

θ_n ——第 j 振型炉体的旋转角;

h——炉体重心到吊杆下端的距离;

$Y_{(n-1)}$ ——第 n-1 个质点到地面的距离;

K_{n-2} ——悬吊炉体水平向刚度, 按式(A6)计算:

$$K_{n-2} = \frac{W_{n-1}}{l} + \frac{6EI}{l^3} m \dots\dots\dots (A6)$$

式中: l——吊杆长度;

E——吊杆材料弹性模量;

I——吊杆断面惯性矩;

m——吊杆的总根数。

锅炉构架第 j 振型的地震作用按 4.1.4 条规定分配到构架节点上, 第 j 振型的制晃力作用于构架导向装置上, 然后计算各振型的地震作用效应。将各振型的地震作用效应按式(A7)组合得到总地震作用效应

$$S = \sqrt{\sum_i S_i^2} \dots\dots\dots (A7)$$

式中: S_i ——第 j 振型地震作用效应;

S——组合后的总地震作用效应。

附录 B

锅炉构架简化计算自由振动方程

(补充件)

悬吊锅炉构架计算简图见图 A1, 自由振动方程见式(B1):

$$MX + KX = 0 \dots\dots\dots (B1)$$

式中: M——质量矩阵;

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & 0 \\ & m_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_{n-1} \\ 0 & & & & J_n \end{bmatrix}$$

式中: J_n ——炉体旋转惯量;

X——位移向量

$$X = (X_1, X_2, \dots, \theta_n)^T$$

式中: θ_n 为炉体旋转角;

K——锅炉构架的弹性重力刚度矩阵

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_{11} + k_1 & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1,n-2} & -k_1 & k_1(y_{n-1} - y_1) \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} + k_2 & \dots & \alpha_{2,n-2} & -k_2 & k_2(y_{n-2} - y_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{n-2,1} & \alpha_{n-2,2} & \dots & \alpha_{n-2,n-2} + k_{n-2} & -k_{n-2} & -k_{n-2}h \\ -k_1 & -k_2 & \dots & -k_{n-2} & k_A & -k_B \\ k_1(y_{n-1} - y_1) & k_2(y_{n-1} - y_2) & \dots & -k_{n-2}h & -k_B & k_C + \frac{k_0}{2}b^2 \end{bmatrix}$$

式中： α_{ij} ——锅炉构架刚度系数。

$ij=1, 2, \dots, n-2$;

$k_A = k_1 + k_2 + \dots + k_{n-2}$;

$k_B = k_1(y_{n-1} - y_1) + k_2(y_{n-1} - y_2) + \dots + k_{n-2}(y_{n-1} - y_{n-2}) - k_{n-2} \cdot h$;

$k_C = k_1(y_{n-1} - y_1)^2 + k_2(y_{n-1} - y_2)^2 + \dots + k_{n-2}h(h+1)$;

$$k_0 = \frac{EA}{bl}m;$$

式中：A——吊杆截面积；

b——炉体顶部宽度。

其它参数与附录 A 中的取值相同。

附录 C

锅炉构架周期

(补充件)

根据实测，各种型号小功率锅炉构架的自振周期由表 C1 确定，200，300，600MW 悬吊锅炉构架的自振周期由式 (C1) 确定：

$$T = 0.112H_m / \sqrt{B} \dots\dots\dots (C1)$$

式中： H_m ——地面到炉顶总高，m；为地面到炉顶主梁上标高的距离；

B——锅炉主构架宽度，m；为有垂直支撑的锅炉构架宽度；

T——锅炉构架的结构自振周期，s；又可称基本周期。

表 C1 各种型号小功率锅炉构架的结构自振周期

炉型	重量型	轻型炉墙	半悬吊式	全悬吊式		
容量 t/h	≤50	≤120	230	75	410, 230, 220	410
基本周期 s	0.34	0.44	0.56	0.50	0.70	0.80

附加说明：

本标准由机械电子工业部上海发电设备成套设计研究所提出。

本标准由机械电子工业部上海发电设备成套设计研究所归口。

本标准由国家地震局哈尔滨工程力学研究所负责起草。