

# 膜式水冷壁温度场分布的数值计算

盛春红 陈听宽

(西安交通大学)

**[摘要]** 采用有限差分方法对膜式水冷壁这一形状不规则的管壁进行温度场分布计算。其中,应用了附加源项法、扩充区域法以及区域分离法。应用本文所述方法编制的《鳍片管温度场计算程序》可用于各种工况的计算,温度场的温度偏差能收敛到 $0.1^{\circ}\text{C}$ 以内。

**关键词** 膜式水冷壁 有限差分理论 温度场

**中图法分类号** TK223.34; TK222

## 0 前言

在大型电站锅炉中,普遍采用膜式水冷壁作为炉膛受热面。所谓膜式水冷壁就是带有鳍片的水冷壁管(图1)

在锅炉运行中,膜式水冷壁外部一面受到炉膛火焰的强烈辐射,另一面敷设绝热材料,而管内则是有一定质量流速的水及蒸汽流过。水冷壁壁温的高低对锅炉工作的可靠

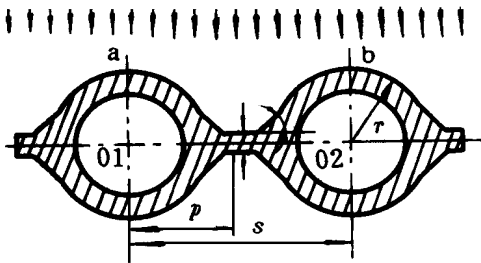


图1 膜式水冷壁结构

性影响极大。在高温条件下工作的膜式水冷壁管首先要对其进行强度计算,其次管壁温

度还受到管子外表面形成氧化皮的温度所限制<sup>[1]</sup>。因此,除确定其平均温度外,还应计算外壁面温度及鳍端温度。

## 1 物理问题和控制方程及其离散

由于管子很长,可忽略沿管子长度方向上的热流。于是,将问题简化为二维、稳定、无内热源的导热问题。要得到膜式水冷壁管壁温度的分布规律就是求解满足给定边界条件的调和方程 $\Delta T = 0$

取图2(a)阴影线部分为计算对象。由于形状比较复杂,采用区域分离法将其分解为两个部分(图2(b)(c)):一部分为半圆环形;另一部分经扩充后为长方形。并且,两者有一部分重叠区域。下面分述之。

### 1.1 半圆环形部分的控制方程<sup>[2]</sup>

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial \theta^2} = 0 \quad (1)$$

收稿日期 1996-12-16 收修改稿 1997-04-22

本文联系人 盛春红 女 1969年生 工程师 132021 吉林市火电公司2楼48号

首先,对半圆环形区域进行离散,离散方法为内节点法,离散后的网格系统见图 3 其次,对方程 (1) 进行离散:

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (2)$$

式中  $a_E = \Delta r \int_{r_p}^{(W)_e} / k_e$ ;

$$\begin{aligned} a_W &= \Delta r \int_{r_p}^{(W)_w} / k_w]; \\ a_N &= r_n \cdot \Delta \theta \int (W_r)_n / k_n]; \\ a_S &= r_s \cdot \Delta \theta \int (W_r)_s / k_s]; \\ a_P &= a_E + a_W + a_N + a_S - S_P \cdot \Delta V \\ b &= S_C \cdot \Delta V \\ \Delta V &= 0.5(r_n + r_s) \cdot \Delta r \cdot \Delta \theta \end{aligned}$$

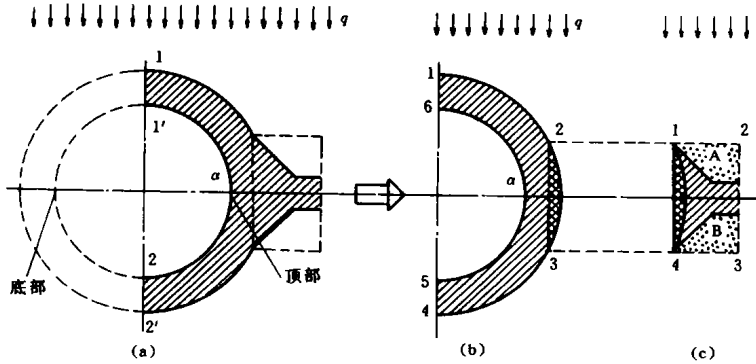


图 2 水冷壁物理问题示意图

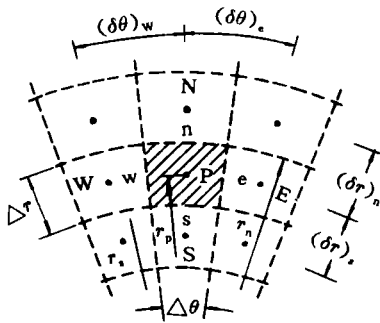


图 3 极坐标中的网格系统

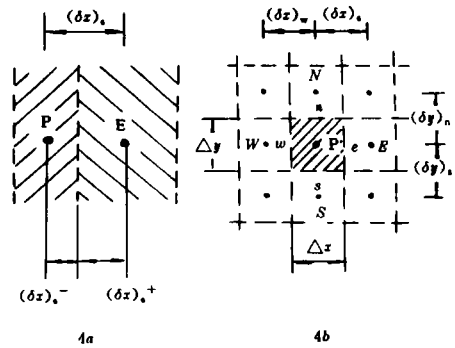


图 4a 为 e 界面两侧的几何关系  
4b 为直角坐标中的网格系统

其中源项  $S$  在任一控制容积中之值可以表示为温度的线性函数,  $S = S_C + S_P \cdot T_P$  的形式,  $S_C$  为常数,  $S_P$  为  $S = f(T)$  的曲线在  $P$  点的斜率,  $k_w, k_s, k_n, k_e$  为控制容积界面上的导热系数,按调和平均方法计算(见图 4a)

$$k_e = (W)_e / \left[ \frac{(W)_e^-}{k_p} + \frac{(W)_e^+}{k_p} \right]$$

$$\partial^2_t / \partial x^2 + \partial^2_t / \partial y^2 = 0 \quad (3)$$

对矩形区域用内节点法离散,离散后的网格系统见图 4b 对上述方程的离散结果为:

$$\begin{aligned} a_P T_P &= a_E \cdot T_E + a_W T_W + \\ a_N T_N &+ a_S T_S + b \end{aligned} \quad (4)$$

### 1.2 矩形区域的控制方程

式中

$$a_E = \frac{\Delta y}{(W_x)_e / k_e}; \quad a_W = \frac{\Delta y}{(W_x)_w / k_w};$$

$$a_N = \frac{\Delta x}{(W_y)_n / k_n}; \quad a_S = \frac{\Delta x}{(W_y)_s / k_s};$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S - S_P \cdot \Delta V$$

$$b = S_c \cdot \Delta V$$

$$\Delta V = \Delta X \cdot \Delta Y$$

按调和平均方法计算:

$$k_c = (W_x)_e / \left[ \frac{(W_x)_e^-}{k_P} + \frac{(W_x)_e^+}{k_E} \right]$$

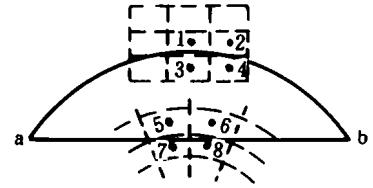
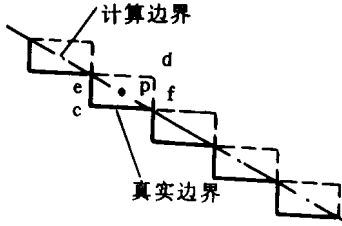
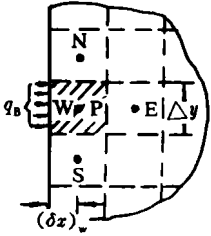


图 5 附加源项法图示

图 6 区域扩充法示意图

图 7 区域分离法示意图

## 2 边界条件的处理方法

对于半圆环形区域(图 2(b)),边界 1~ 6 3~ 4 4~ 5均为绝热条件,边界 1~ 2为给定热负荷条件,边界 2~ 3为给定温度条件(原因见 4),边界 5~ 6为第三类边界条件,即对流换热边界条件。

对于矩形区域(图 2(c)),边界 1~ 2 2~ 3 3~ 4均为绝热边界条件,边界 1~ 4为给定温度条件(原因见 4)。

边界条件处理采用附加源项法,把由第二类和第三类边界条件所规定的进入或导出计算区域的热量作为与边界相邻的控制容积的当量源项。

对第二类边界条件,见图 5,与边界相邻的控制容积 P的附加常数源项为:

$$S_{e ad} = \frac{A}{\Delta V} \cdot q_B \quad (5)$$

同时令  $a_w = 0$  其中 A为所研究控制容积在边界上的换热面积,ΔV为控制容积 P的体积。

对第三类边界条件,见图 5,边界控制容积的附加源项为:

$$S_{e ad} = \frac{A}{\Delta V} \cdot \frac{T_f}{1/T_+ + (W_x)_w / k_B} \quad (6)$$

$$S_{p ad} = - \frac{A}{\Delta V} \cdot \frac{1}{1/T_+ + (W_x)_w / k_B} \quad (7)$$

且同时令  $a_w = 0$

由于令  $a_w = 0$ ,就把未知的边界节点温度排除在外,在获得内部节点的解以后,再按边界条件来确定边界节点温度。

## 3 扩充区域的处理

由于图 2(c)阴影部分区域不够规则,采用区域扩充法把计算区域扩充到直角坐标系易于描述的矩形区域。

真实边界上作用有一定的热流,把它以附加源项的形式送到与真实边界相邻的控制容积中去,而扩充区域则处于绝热状态。如图 6所示,控制容积 P与真实边界相交。于是 P控制容积的附加源项为:

$$S_{ad} = q \cdot L_{ef} \Delta V_{ef} \quad (8)$$

其中  $L_{ef}$ 表示真实边界与控制容积 P的两条边界相交部分的长度,ΔV<sub>ef</sub>是控制容积 P的体积,q是给定的边界热流密度。在引入附加源项的同时,再令扩充区中的导热系数为零,于是控制容积 P中的热量就无法向扩充区域传递,这就实现了真实边界上的均匀加热条

件。

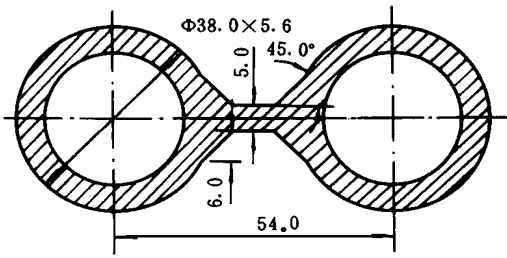


图 8 膜式水冷壁的结构参数

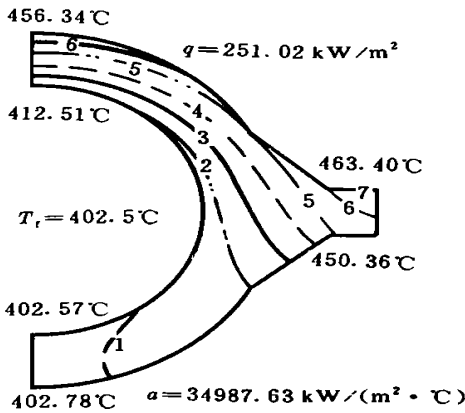


图 9 600 MW 超临界直流锅炉  
MCR 负荷下水冷壁管温度场

1- 403.0°C	2- 413.0°C	3- 423.0°C
4- 433.0°C	5- 443.0°C	6- 453.0°C
	7- 463.0°C	

### 4 分离区域的耦合

见图 7,先假设 ab 上各节点温度,算得其内部各节点(环形区域)温度分布后,ab 上各节点温度通过插值进行计算:

$$T^* = \frac{Y_{0-8}}{Y_{6-8}} \cdot (T' - T'') + T'' \quad (9)$$

其中

$$T' = \frac{X_{0-5}}{X_{6-5}} \cdot (T_6 - T_5) + T_5$$

$$T'' = \frac{X_{0-7}}{X_{7-8}} \cdot (T_8 - T_7) + T_7$$

式中  $X_{0-5}$  表示被求节点与第 5 点在 X 方向上的距离;  $Y_{0-3}$  表示被求节点与第 3 点在 Y 方向上的距离

比较前后两次算得 ab 上各节点温度,如果误差足够小,则终止迭代。

这就是第 3 部分中提到的 ab 均为给定壁温边界条件的原因

### 5 膜式水冷壁温度场

#### 计算实例<sup>[3]</sup>

应用上述方法编制出《鳍片管温度场的计算程序》,以上海石洞口第二发电厂的 600 MW 的超临界直流变压运行锅炉中所用的膜式水冷壁管为例进行温度场计算。其结构

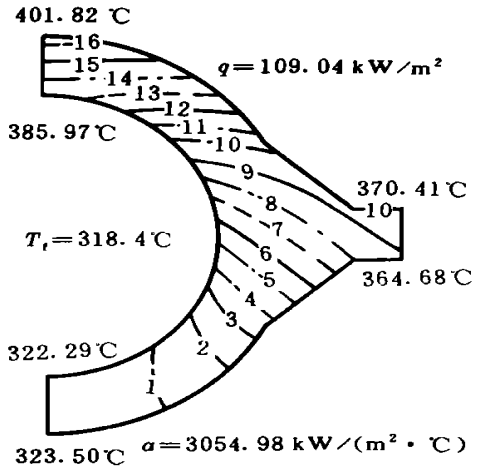


图 10 600 MW 超临界直流锅炉 37%  
负荷下水冷壁管温度场

- |             |             |             |
|-------------|-------------|-------------|
| 1- 325.0°C  | 2- 330.0°C  | 3- 335.0°C  |
| 4- 340.0°C  | 5- 345.0°C  | 6- 350.0°C  |
| 7- 355.0°C  | 8- 360.0°C  | 9- 365.0°C  |
| 10- 370.0°C | 11- 375.0°C | 12- 380.0°C |
| 13- 385.0°C | 14- 390.0°C | 15- 395.0°C |
| 16- 400.0°C |             |             |

与物理参数见表 1,结构参见图 8,算得的温度场见图 9 10

由图 9 图 10可知, MCR负荷时鳍端温度最高, 37% 负荷时管外壁温度最高,所以对此两处的温度计算都非常重要

### 参考文献

- 1 Pasquantonio F Di, Macchi A. Temperatures and stress - es in a boiler membrane wall tube. Nuclear Engineering and Design, 1974, 31: 280- 293
- 2 陶文铨. 数值传热学. 西安交通大学出版社, 1987
- 3 上海师范大学数学系. 上海锅炉厂研究所. 膜式水冷壁管壁温度计算方法. 锅炉技术, 1974(10): 23- 43

(复 编)

表 1 结构与物理参数

项 目	符 号	数 值
外径	$d$	38mm
内径	$d_n$	26. 8mm
壁厚	$d_m$	5. 6mm
节距	$S$	54mm
焊角高度	$t$	6. 0mm
焊缝倾角	$\theta$	45°
肋片厚度	$\Delta W$	5. 0mm
工质平均温度	$t_f$	402. 5°C
		318. 4°C
管壁导热系数	$K$	36. 08 W/(m·°C)
		38. 14 W/(m·°C)
炉膛辐射热负荷	$q$	251. 02kW/m <sup>2</sup>
		109. 04kW/m <sup>2</sup>
内壁换热系数	$T$	34 987. 63W/(m·°C)
		3 054. 98W/(m·°C)

### 工程消息

## 金华燃机转换到联合循环并转到燃残渣油

据“ Gas Turbine World” 1997年 1- 2月份报道,合肥的 2台 Frame bB是以简单循环运行,而金华的 2台型燃机将由独立的电力生产者(IPP)- 金华龙桥公司投入联合循环运行。最初它们将烧轻油, 2年后将转换到烧残渣油。

用于合肥的 2台燃机和用于金华的 2台燃机已于 1996年 11月运到上海,现正在安装和试运转。

在更高输出功率范围内,欧洲燃气轮机公司(EGT)卖给中国的第 1台 Frame 9E(123MW)正在湖北省武汉市安装,用于简单循环电站。

(思娟 供稿)

## 预测全球 41GW IGCC 市场

据“ Gas Turbine World” 1997年 5- 6月号报道,GE公司首创的 Cool Water整体煤气化联合循环(IGCC)电站供应发电设备。

从那时起,IGCC技术日臻完善,并且 GE当前被包括在 15项 IGCC型工程项目中,其中包括现在正在运行的 7个项目。该公司市场预测看到 2004年前全球 IGCC市场约为 41 GW。

设想 IGCC首先燃烧特定类型的煤和重油,以减少排放物。当前的 IGCC装置已被扩大应用范围,以便洁净地燃烧废弃的燃料,如下水道污泥、焦油、沥青和其它的炼油残渣。

(思娟 供稿)

but also realize the numerical analysis of the system transition process. **Key words** utility boiler, boiling system, mathematical model

膜式水冷壁温度场分布的数值计算 = (Numerical Calculation of the Temperature Field Distribution of a Membrane Water Wall) [刊, 中] / Sheng Chunhong, Chen Tingkuan (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 61~ 65

With the help of a finite difference method a temperature field distribution calculation is conducted of a membrane water wall, a tube wall with an irregular shape. In connection with the above-mentioned method used are an additional source item method, expansion zone method and zone separation method. "Finned tube temperature field calculation procedures" prepared by the use of the method described in the paper can be employed for the calculation of various kinds of operating conditions with the temperature deviation of the temperature field being converged to within  $0.1^{\circ}\text{C}$ . **Key words** membrane water wall, finite difference theory, temperature field

中间再热汽轮机调节系统响应特性的改善方法 = (A Method for Improving the Response Characteristic of an Intermediate Reheat Steam Turbine Control System) [刊, 中] / Dai Yiping, Yu Maozheng (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 66~ 69

Through the study of response characteristics in the presence of local positive feedback action in the actuating mechanism of an intermediate reheat steam turbine governing system the authors have proposed an improved system with the use of a hydraulic feedback mechanism. A contrast analysis is made of the response characteristics of two kinds of systems. The system which employs the hydraulic feedback can effectively eliminate the positive feedback action present in the spring feedback system of a slide valve sleeve. This can lead to an improvement of the system response characteristics, thus enhancing the system stability and decreasing the dynamic overspeed of the turboset at full load rejection. **Key words** governing system, feedback, stability

解决供热汽轮机调速系统卡涩、负荷突变的措施 = (Some Measures for the Prevention of Heat Supply Steam Turbine Governing System from Getting Stuck and Abrupt Load Changes) [刊, 中] / Li Baoyu, Gao Xiaoling (Harbin Turbine Co. Ltd.), Yang Quanhai, Nie Weidong (Huhehot Thermal Power Plant) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 70~ 72

**Edited and Published** by Harbin 703 Research Institute and Editorial Staff of this Journal

**Printer** Energy-saving Printing House of Harbin Institute of Technology

**Address** P. O. Box 77, Harbin China

**Tel** (0451) 5650888- 2074

**Fax** (0451) 5662885

**Post Code** 150036

**Periodical Registration** ISSN 1001- 2060  
CN23- 1176 /TK

**Distributed by China International**

**Book Trading Corporation.**

**P. O. Box 399, Beijing, China**