

基于梁带法的大型电站凝汽器管板刚度计算分析

陈小明¹ 赖喜德¹ 唐健¹ 徐志坚²

(1. 西华大学 能源与动力工程学院 四川 成都 610039; 2. 国电大渡河公司龚嘴水力发电总厂 四川 乐山 614000)

摘要: 根据大型电站凝汽器管板刚度的计算需要, 基于梁带法建立大型电站凝汽器管板梁带力学模型。通过在该力学模型端部添加等效弹簧来模拟钢梁对管板端部的刚性加强作用, 并给出了端部弹簧刚度系数计算公式。采用矩阵位移法求解梁带力学模型, 根据建模和求解过程开发大型电站凝汽器管板刚度计算专用软件。利用该软件分析管板厚度和端部钢梁对管板刚度计算结果的影响。结果表明: 管板厚度和钢梁对管板刚度计算影响显著, 增大管板厚度可显著减小管板最大应力, 而增大端部钢梁等效弹簧刚度系数可显著减小冷却管、钢梁的最大变形。

关键词: 凝汽器; 管板; 刚度; 力学模型

中图分类号: TM621.7 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.04.018

引言

凝汽器是凝气式汽轮机的重要辅助设备之一, 广泛应用于火力发电站、核电站, 是汽轮机的重要组成部分, 且其安全可靠对整机安全运行至关重要^[1]。凝汽器水侧零部件(如管板、水室、冷却管)良好的水密性保障凝汽器安全可靠运行, 其中管板刚强度是否能满足要求很大程度上决定了水侧水密性, 关系到冷却水的泄漏问题以及机组安全^[2]。凝汽器端管板为一带孔薄板, 面上有上万个孔并与相对应的上万根冷凝管胀焊连接, 管板边缘兼做法兰与水室通过螺栓连接, 壳体与管板通过膨胀节连接或者直接固定连接。管板的强度计算涉及管板、冷却管、水室和壳体复杂的相互关系, 其受力显得十分复杂。

凝汽器制造企业设计凝汽器管板主要参考已投入运行电站凝汽器管板参数, 根据经验确定管板厚度等重要几何参数^[3]。该设计方法仅在较小压力载荷下适用, 随着传统发电机组和核电机组容量大型化, 凝汽器体积越来越庞大, 为了克服闭式循环水

系统的沿程阻力, 水室设计压力可达 700 kPa。显然, 在如此高载荷下, 依靠经验法来确定管板厚度已不能保障凝汽器的运行安全。再之, 机组大型化、高参数化使凝汽器受力越加复杂, 管板设计需要考虑管板几何参数对结构刚强度的影响。因此掌握凝汽器管板刚强度计算的主要影响因素十分有必要, 这对凝汽器管板进一步优化设计具有重要意义。

本研究 HEI(基于美国热交换协会)“蒸汽表面式凝汽器”标准第十版建议的梁带法建立大型电站凝汽器管板刚强度计算梁带力学模型^[4], 采用矩阵位移法求解, 开发了针对管板刚强度计算的专用软件, 在此基础上分析了管板厚度、管板端部钢梁对管板刚强度计算的影响, 为大型电站凝汽器管板设计提供了参考。

1 基于梁带法建立管板梁带力学模型

梁带力学模型的建立是将以一定原则选取的管板带状窄条作为计算分析对象, 这些带状窄条可以等效为弹性基础上的梁^[5]。通过分析各连接部件与管板之间的相互作用, 并进行适当简化可建立梁带力学模型, 在建立力学模型过程中有以下简化与假设:

- (1) 不直接考虑水室、管板以及其它连接部件之间复杂的相互作用;
- (2) 管板本身不作为分析计算的对象, 仅选取少量作用在弹性基础上的梁带进行分析计算;
- (3) 将水室及其自重以及水压力作用在管板边缘的复杂作用力等效为沿管板边缘均布的等效力矩和沿上部和下部边缘均布的等效力;
- (4) 梁带模型将带状管板简化为作用在弹性基础上的梁, “梁”具有“带”的几何、弹性性能以及弹

收稿日期: 2015-03-30; 修订日期: 2015-06-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379179); 流体及动力机械教育部重点实验室(西华大学)开放课题资助项目(szjj2015-038)

作者简介: 陈小明(1987-), 男, 重庆江津人, 西华大学助教。

通讯作者: 赖喜德, 男, 西华大学教授。

性基础参数 这些参数用来反映管板和冷却管布管区的局部几何特性。

图 1 是根据 HEI 标准梁带选取基本原则确定的管板梁带三维模型,图中显示了管板与水室和冷凝管的连接情况,对于大型电站凝汽器,管板与一侧的水室通过螺栓连接,与另一侧的冷却管胀焊连接。

为避免凝汽器壳体与冷凝管受热产生胀差,在管板与壳体之间通常都安装有膨胀节。同时,为增强管板端部刚度,凝汽器管板上、下边缘焊接有钢梁。根据以上假设和简化建立梁带力学模型如图 2

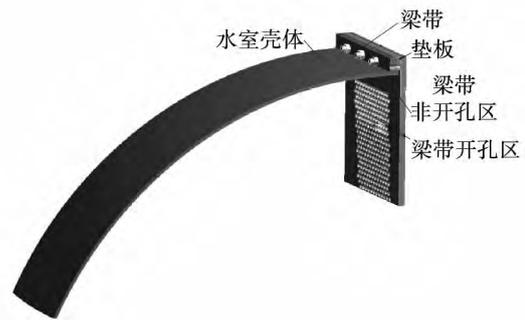


图 1 管板梁带三维几何模型

Fig. 1 3D - model of tubesheet beam strip

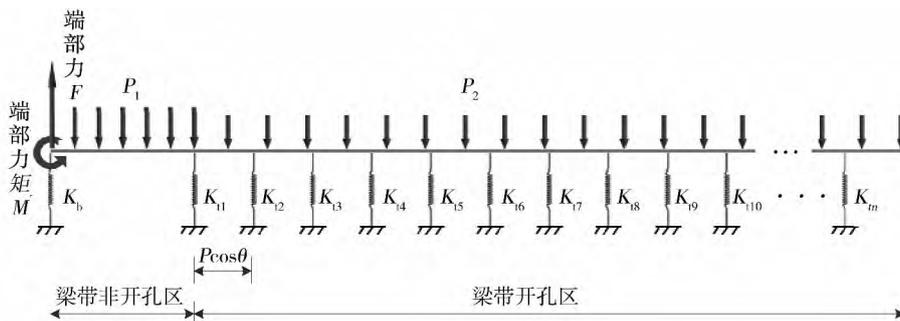


图 2 管板梁带力学模型

Fig. 2 Mechanical model of tubesheet beam strip

该力学模型将三维管板带状窄条简化为具有不同抗弯刚度的二维梁,分为非开孔区和开孔区。作用在梁带长度方向上的各列冷却管对梁带有弹性支撑作用,因此将冷却管等效为多个具有刚度系数 K_{i_i} 的弹簧。管板上下部钢梁的作用与冷却管类似,与具有刚度系数 K_b 的弹簧等效。解除水室与梁带端部的连接约束,将水室对梁带的作用力与作用在梁带非开孔区端部的力 F 和力矩 M 等效^[6]。非开孔区两弹簧间的距离由冷却管排管节距 P 和 θ 角确定, P 、 θ 与管板布管方式有关,如图 3 所示。

式中: P —作用在水室的水压力,MPa; W —梁带宽度,mm。

2 载荷、弹簧刚度和抗弯刚度计算

2.1 开孔区、非开孔区均布载荷 P_1 、 P_2

梁带力学模型单位长度非开孔区均布载荷 P_1 和开孔区均布载荷 P_2 分别按式(1)、式(2)计算,

$$P_1 = PW \tag{1}$$

$$P_2 = \psi PW \tag{2}$$

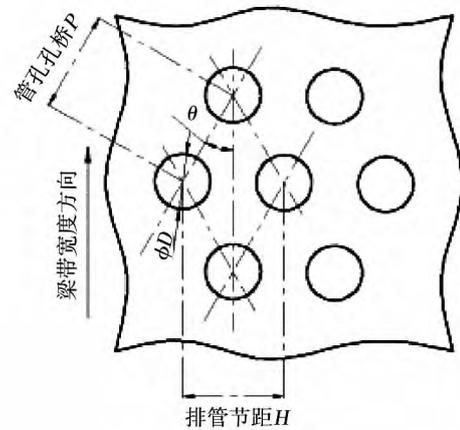


图 3 管板三角形排管

Fig. 3 Triangle pattern of tubesheet

由于梁带开孔区受压面积减小,因此作用在开孔区的均布载荷 P_2 也相应减小,式中 ψ 为小于 1 的

常数 其值与管板几何参数有关 ,计算公式如下 ,

$$\psi = \frac{A_{\text{rea}} - N \frac{\pi (d_0 - 2t_T)^2}{4}}{A_{\text{rea}}} \quad (3)$$

式中: A_{rea} —管板面积 , mm^2 ; d_0 —冷却管外径 , mm ; t_T —冷却管壁厚 , mm ; N —冷却管总数。

若考虑水室冷却水自重产生的静压作用 ,非开孔区和开孔区均布载荷按式计算。

$$P_1 = (P + \frac{H}{100\ 000}) W \quad (4)$$

$$P_2 = \psi (P + \frac{H}{100\ 000}) W \quad (5)$$

式中: H —梁带距离水室顶端高度 , mm 。

2.2 端部力 F 和端部力矩 M

根据建立梁带力学模型的基本假设 ,管板受到的端部力和力矩沿管板周界均匀分布 ,因此水室作用在梁带边缘的端部力 F 按下式计算。

$$F = \frac{PS_1 W}{l} \quad \text{kg} \quad (6)$$

式中: S_1 —管板面积 , mm^2 ; l —管板周长 , mm 。

若考虑水室静水压力作用 ,端部力 F 计算公式如下 ,

$$F_1 = \frac{PS_1 W}{PER} (P + \frac{H}{100\ 000}) \quad \text{kg} \quad (7)$$

梁带端部力矩 M 受边缘刚性、管板厚度、材料、冷却管长度等参数影响 ,特别是管板法兰与水室法兰连接处的整体刚性对冷却管负荷及管板弯曲应力合成影响较大。本研究对端部力矩 M 的计算参考文献 [7] 中的计算方法。

2.3 弹簧刚度和梁抗弯刚度

图 2 为的梁带力学模型中 ,冷却管被等效为刚度系数为 K_i 的弹簧 ,弹簧的刚度系数与每列冷却管数量相关 ,

$$K_i = \frac{n_i E_i A_m}{(L/2)} \quad (8)$$

式中: n_i —梁带宽度方向各列冷却管数; E_i —冷却管杨氏模量 , MPa ; A_m —冷却管金属截面积 , mm^2 ; L —冷却管有效长度 , mm 。

凝汽器两端管板上、下部拉筋加强了管板边缘的约束作用 在梁带力学模型中 这部分约束作用通过在梁带端部添加等效弹簧来予以考虑。该弹簧的刚度系数可类比冷却管的刚度系数进行计算 ,计算公式如下 ,

$$K_b = \frac{E \cdot S \cdot W}{L \cdot l \cdot 0.5} \quad (9)$$

式中: E —钢梁杨氏模量 , MPa ; S —拉筋截面总面积 , mm^2 。

梁带力学模型等效梁的抗弯刚度根据 HEI 标准进行计算^[8]。

3 梁带力学模型求解及软件开发

3.1 求解算法

采用矩阵位移法求解图 2 所示梁带力学模型 ,求解流程如图 4 所示。

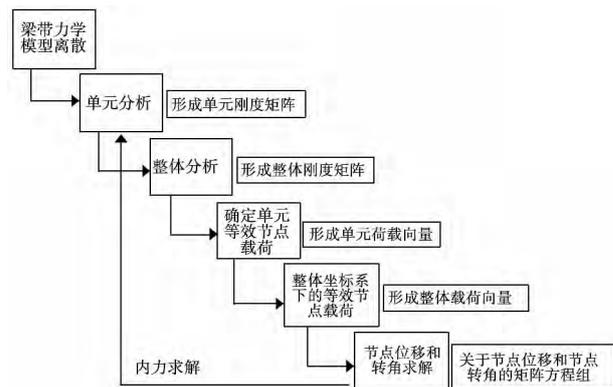


图 4 梁带力学模型求解流程

Fig. 4 Solving process of mechanical model

梁带力学模型整体刚度矩阵方程表示为:

$$Q = K\Delta \quad (10)$$

式中: Q —等效节点载荷向量 , K —结构的整体刚度矩阵 Δ —节点位移向量^[9]。

求解该方程关键在于确定整体刚度矩阵和等效结点载荷向量 ,分别按以下两式进行组装。

$$K = \sum_{e=1}^n K^e + \sum_{p=1}^n K_t^e \quad (11)$$

式中: K_e 、 K_{et} —梁单元和弹簧单元在整体坐标系中的单元刚度矩阵。

$$Q = \sum_{e=1}^n Q^e \quad (12)$$

式中: Q^e —各单元在整体坐标系中的等效节点荷载矩阵。

求解整体刚度矩阵方程得到各结点位移和转角 ,再根据单元转角位移方程求解内力。

3.2 管板刚强度计算软件开发

由于凝汽器管板刚强度计算需要对多条梁带建

立力学模型并求解,建模和求解过程繁杂,计算量大,为便于工程应用和确定影响管板刚度的主要几何特征参数,根据梁带力学模型建模方法及其求解算法开发了针对凝汽器管板刚度计算的专用软件 TSI.0。

4 管板厚度、端部钢梁等效弹簧刚度系数对刚强度计算的影响

以某 1 000 MW 核电机组凝汽器管板上部梁带为计算对象,如图 5 所示,分析管板厚度、端部钢梁对管板刚强度计算的影响,该梁带主要几何特征尺寸如表 1 所示。

管孔孔桥、排管节距、冷却管有效长度等参数受凝汽器换热性能约束,凝汽器管板刚强度设计尽可能不改变这部分特征参数。因此主要对管板厚度和

端部钢梁等效弹簧刚度系数变化对计算结果的影响进行分析。

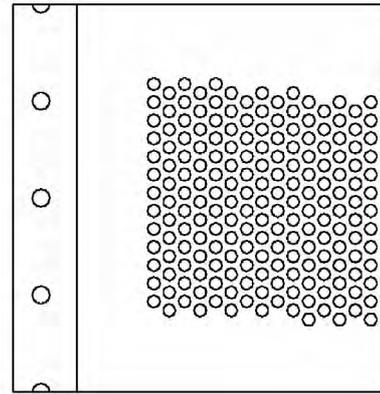


图 5 某 1 000 MW 核电机组凝汽器管板上部梁带
Fig. 5 Upper beam strip of condenser tubesheet of 1 000 MW nuclear power unit

表 1 梁带主要几何特征尺寸

Tab. 1 Main geometric dimensions of beam strip

管板类型	管板厚度/mm	冷却管壁厚/mm	冷却管外径/mm	非开孔区长度/mm	冷却管总数	管孔孔桥/mm	排管节距/mm	梁带宽/mm	冷却管有效长度/mm
梯形管板	30	0.47	24	154.34	14 643	6	32	666.5	18 471

4.1 保持端部弹簧刚度系数不变改变管板厚度

保持端部等效常数不变 ($K_b = 50\ 920.19\ \text{N/mm}$) 即钢梁数量和接触面积保持不变,在不同管板厚度下进行计算,计算结果如表 2 所示。

表 2 不同管板厚度下的计算结果
Tab. 2 Calculation results for different tubesheet thicknesses

管板厚度/mm	管板最大应力/MPa	冷却管最大变形/mm	钢梁最大变形/mm
30	158.02	2.46	5.460
31	149.89	2.462	5.454
32	142.27	2.461	5.443
33	136.13	2.459	5.432
34	131.00	2.457	5.423
35	126.17	2.454	5.415

管板应力和冷却管、钢梁变形随管板厚度的变化曲线如图 8、图 9 所示。

从表 2 的计算结果可以看出,增大管板厚度可使管板最大应力大幅下降,但冷却管和钢梁最大变

形下降幅度很小,几乎没有变化。

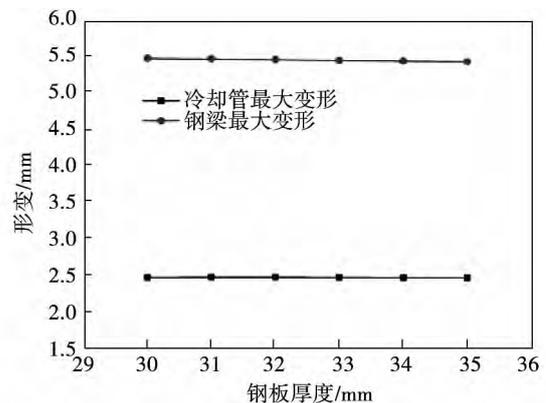


图 6 冷却管、钢梁最大变形随管板厚度的变化曲线

Fig. 6 Variation of the maximum deformation of tubes and structural bars with tubesheet thickness

4.2 保持管板厚度不变增大端部等效常数

保持管板厚度不变 $T = 30\ \text{mm}$ 增大端部等效弹簧刚度系数,计算结果如表 3 所示。

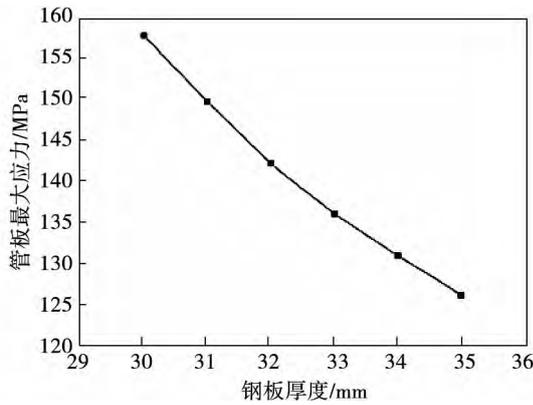


图 7 管板最大应力随管板厚度的变化曲线

Fig. 7 The maximum stress with tubesheet thickness

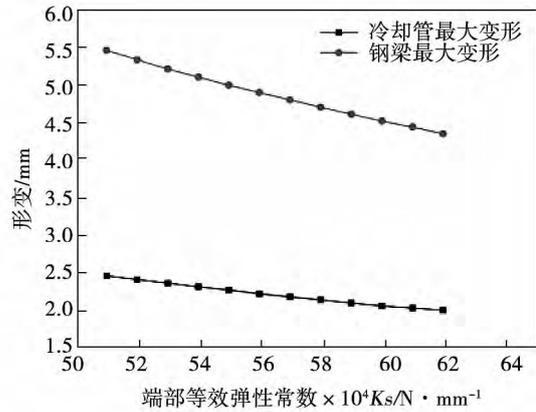


图 8 冷却管、钢梁最大变形随端部等效常数的变化曲线

Fig. 8 Variation of the maximum deformation of tubes and structural bars with end equivalent constant

表 3 增大端部弹簧刚度系数的计算结果

Tab. 3 Results of increased end spring elastic constant

$K_b / N \cdot mm^{-1}$	管板最大应力/MPa	冷却管最大变形/mm	钢梁最大变形/mm
50 920.19	158.02	2.46	5.46
51 920.19	155.35	2.41	5.34
52 920.19	154.23	2.36	5.22
53 920.19	154.23	2.31	5.11
54 920.19	154.23	2.27	5.00
55 920.19	154.23	2.22	4.90
56 920.19	154.23	2.18	4.80
57 920.19	154.23	2.14	4.70
58 920.19	154.23	2.10	4.61
59 920.19	154.23	2.06	4.52
60 920.19	154.23	2.03	4.44
61 920.19	154.23	2.00	4.35

管板应力和冷却管、钢梁变形随端部等效弹簧刚度系数的变化曲线如图 8、图 9 所示。

从图 8 和图 9 可以看出随着端部弹簧刚度系数增大,冷却管、钢梁的最大变形均有所减小,管板最大应力在略微减小后趋于稳定。

4.3 管板厚度和端部弹簧刚度系数同时改变

同时改变管板厚度和端部等效弹簧刚度系数,在管板厚度和端部等效弹簧刚度系数不同组合条件下对管板进行强度计算,计算结果如图 10 ~ 图 12 所示。

随着端部等效弹簧刚度系数和管板厚度增加,冷却管、钢梁最大变形基本呈线性减小趋势,而在图示端部弹簧刚度系数范围内,冷却管、钢梁形变随管板厚度增加的变化曲线为形变量几乎不变的直线。由此可见在管板上下部焊接钢梁能较大程度加强管板边缘刚性,避免因变形量过大引起的冷却管轴向拉力超限,大大减小靠近管板边缘冷却管的应力负荷。

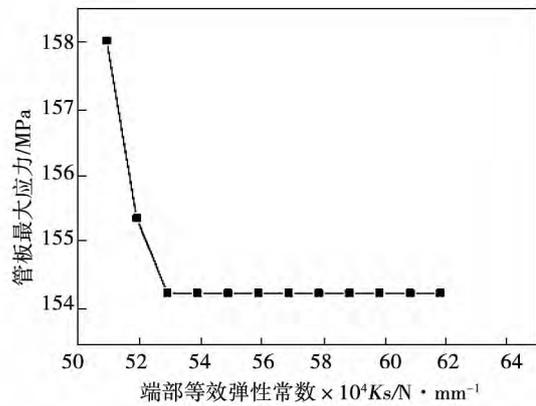


图 9 管板最大应力随端部等效常数的变化曲线

Fig. 9 Variation of The maximum stress of tubesheet with end equivalent constant

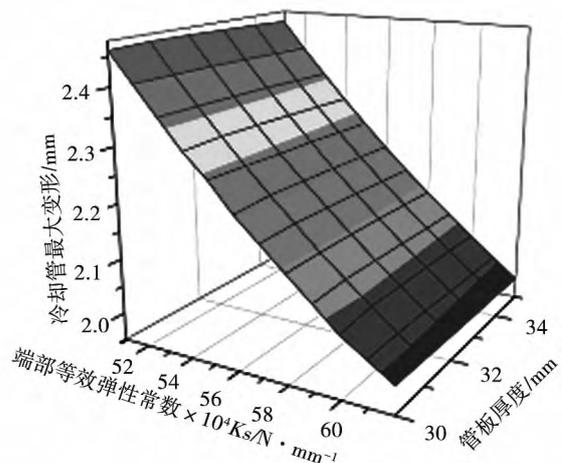


图 10 冷却管最大变形变化示意图

Fig. 10 Profile of maximum deformation of tubes

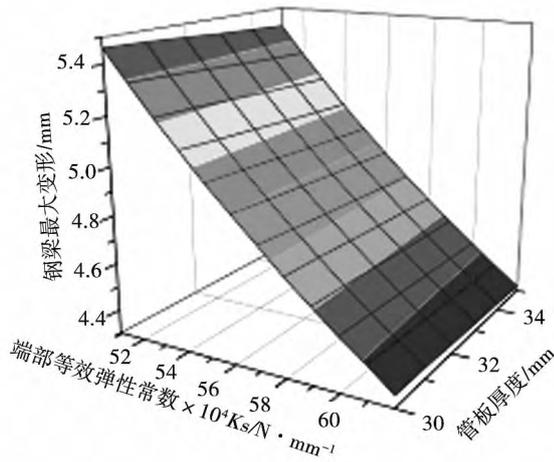


图 11 钢梁最大变形变化示意图

Fig. 11 Profile of maximum deformation of structural bars

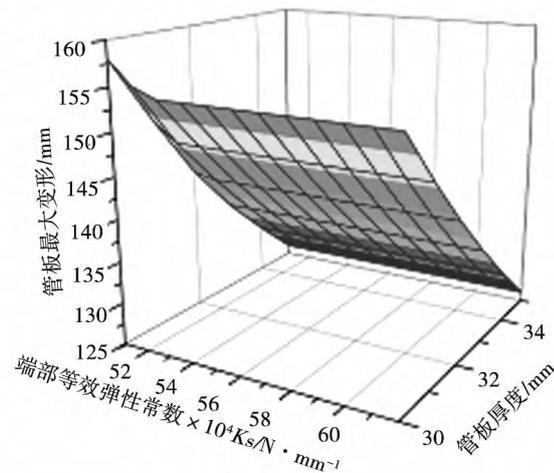


图 12 管板最大应力变化示意图

Fig. 12 Profile of maximum stress of tubesheets

5 结论

(1) 基于梁带法建立考虑管板端部钢梁约束作用的梁带力学模型较好反映了梁带端部受力情况, 而将水室对管板端部的复杂作用力简化为一组沿管板周界均布的等效力和力矩则为求解梁带力学模型奠定了基础。

(2) 采用矩阵位移法求解梁带力学模型, 该方法理论完善, 便于计算机编程。根据本文建模和求解过程开发的管板刚度专用计算软件可快速对管

板刚度进行计算分析。

(3) 管板厚度和钢梁等效刚度系数对管板、冷却管应力和变形计算结果有较大影响, 增大管板厚度可显著减小管板最大应力, 而增大端部弹簧刚度系数可显著减小冷却管、钢梁的最大变形。

参考文献:

- [1] 张小宝, 赖喜德. 大型凝汽器管板结构的有限元计算分析[J]. 能源研究与管理, 2010(2): 34-37.
ZHANG X B, LAI X D. Finite element calculation analysis of tubesheets structure of condenser[J]. Energy Research and Management, 2010, 2: 34-37.
- [2] 张卓橙. 大型电站凝汽器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993, (3): 301-311.
ZHANG Z C. Large power plant condenser[M]. Beijing: China Machine Press, 1993, 3: 301-311.
- [3] 杨建中, 洪善桃, 袁仲伊. 凝汽器管板的分析计算及程序实现[J]. 动力工程, 1991, 11(5): 54-58.
YANG J Z, HONG S T, YUAN Z Y. Calculation and analysis of condenser tubesheets and its program implementation[J]. Power Engineering, 1991, 11(5): 54-58.
- [4] Standards for steam surface condensers[S]. Heat Exchange Institute. HEI 2007.
- [5] 李又香, 龚曙光, 庞心宇. 管板结构轴对称简化模型的分析研究[J]. 机械强度, 2013, 35(4): 466-471.
LI Y X, GONG S G, PANG X Y. Study on axisymmetric simplified model of tubesheets structure[J]. Journal of Mechanical Strength, 2013, 35(4): 466-471.
- [6] 魏一, 吴炳祥. 凝汽器管板的带梁法计算方法[J]. 电站辅机, 1998(2): 4-8.
WEI Y, WU B X. Calculation of beam-strip method of condenser tubesheets[J]. Power Station Auxiliary Equipment, 1998(2): 4-8.
- [7] Blake C S, Paton A D. Design of rectangular tubeplates for large heat exchange[J]. Journal. Mech. Eng. Science, 1963, 5(3): 211-226.
- [8] Soler A I, Hill W S. Effective bending properties for stress analysis of rectangular tubesheets[J]. Journal for Engineering for Power, 1977, 7: 365-370.
- [9] 龙驭球, 包世华. 结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006, 2.
LONG Yu-qiu, BAO Shi-hua. Structural mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006, 2.

(刘瑶 编辑)

removal in the microwave field. After 10 minutes of microwave radiation ,most of the water soluble sodium from the coal has been removed. Compared with the hydro-thermal treatment ,the microwave treatment is safer ,more efficient and economic. **Key words:** high sodium coal ,sodium ,humidifying ,microwave ,sodium removal efficiency

氧气对层燃条件下烟气携带煤焦还原 NO 的影响 = **An Experimental Study on Reactions of NO and Flue Gas Carrying Char at Grate Firing Conditions** [刊 汉]XU Li ,ZHAO Wei ,WANG Jian ,LIU Qi(School of Energy Science and Engineering ,Harbin Institute of Technology ,Harbin ,China ,Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4) . -100 ~105

To meet the progressively more stringent environmental requirements ,further reducing NO_x emission is needed. To identify an effective way of reducing NO_x emission ,this paper investigated the effects of oxygen concentration and pre-oxidation treatment on char-NO reactions using tube furnace. By adding oxygen into the reacting environment , the important role of oxygen on the reaction between NO and large particle size char was studied under the condition of constant temperature heating. Results indicate that high oxygen concentrations can promote the char-NO reaction compared to the low oxygen or anaerobic conditions. With high oxygen concentration ,the change of experimental temperature has little effect on char-NO reaction. After pre-oxidation treatment ,however ,the capacity of char on NO reduction is improved. **Key words:** char , NO_x ,charring condition ,catalyst

基于梁带法的大型电站凝汽器管板刚强度计算分析 = **Stiffness-strength Calculation of Large Power Plant Condenser Tubesheet based on Beam-Strip Method** [刊 汉]CHEN Xiao-ming ,LAI Xi-de ,TANG Jian (School of Energy and Power Engineering ,Xihua University ,Chendu ,China ,Post Code: 610039) ,XU Zhi-jian (Dadu River Gongzui Hydropower Plant of China Guodian ,Leshan ,Sichuan ,China ,Post Code: 614000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4) . -106 -111

For the calculation need of condenser tubesheet of large power plant ,a corresponding structural model was established based on beam-strip method. The effect of stiffness enhancement was simulated by adding equivalent spring

at the end of structural model and formulas of spring constant were put forward. The matrix displacement method was adopted to solve beam-strip structural model and appropriate software was developed based on the model establishing and problem solving and used to analyze the effects of tubesheet thickness and structural bar. It indicates that tubesheet thickness and structural bar have significant effect on the results. Enlarging tubesheet thickness can dramatically lower the maximum stress of tubesheet, while enlarging spring constant can dramatically lower the maximum deformation of tubesheet and structural bar. **Key words:** condenser, tubesheet, stiffness-strength, mechanical model

CO₂ 气流对几种钢材的飞灰冲蚀磨损的试验研究 = **Experimental Study on Flying-ash Erosion of Steels in Air-flow Containing CO₂** [刊 汉] ZHAO Xian-ping, ZHU Chong-wu, YE Gui-lin, PAN Wei-guo (College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4). -112 ~ 116

The hot-state erosion-wear experiments of 20 carbon steel, 12Cr1MoV and 15CrMo alloy steel, which are commonly used in power boilers, were conducted at a temperature range of 250 °C ~ 500 °C and with the air-flow mixed with CO₂. The experimental results of all three kinds of materials under study show that the relative erosion rate decreases first and then increases as the temperature rises. Under the interaction between the oxidation corrosion and erosion, the injection of air-flow containing CO₂ gas significantly accelerates the erosion wear in 20 carbon steel, 12Cr1MoV and 15CrMo alloy steel. The erosion resistant performance of 12Cr1MoV is better than 15CrMo, and 15CrMo is better than 20 carbon steel. **Key words:** Flying-ash erosion, CO₂, Metals, coal-fired boiler

平板式太阳能集热器稳态热性能数值模拟研究 = **Numerical Simulation of Steady-state Thermal Performance for Flat Plate Solar Energy Collector** [刊 汉] SUN Ke-liang, ZHU Yue-zhao, YANG Mou-cun (The College of Energy, Nanjing Tech University, Nanjing, China, Post Code: 211816) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4). -117 ~ 126