

自然通风海水冷却塔填料高度计算方法

谢迎春¹, 杨友胜², 徐 震³

(1. 中国海洋大学 工程学院 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋局 南海维权技术与应用重点实验室 广东 广州 510310;
3. 中国科学院(工程热物理所) 先进能源动力重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 基于 Merkel 理论, 改进了用于海水冷却塔热力特性计算的空气湿球温度修正算法, 提出关联进气状态的湿球温差方程, 发展了一种自然通风海水冷却塔填料高度解析计算方法。分析了不同海水浓缩倍率下水气比、底部温差和进口水温对海水冷却塔填料高度的影响, 结果表明浓缩倍率为 2 时, 底部温差由 7 ℃ 降至 3 ℃, 填料高度增加约 10%, 而进口水温由 35 ℃ 增至 45 ℃, 填料高度减小约 2%。底部温差对海水塔填料高度的影响最为显著, 而进口水温几乎无影响。

关 键 词: 海水冷却塔; 填料高度; 底部温差

中图分类号: TM621.9 文献标识码: A

引 言

填料高度计算是海水冷却塔设计的重要内容^[1~5], 由于缺乏专门针对各类填料的海水冷却过程传质关联式, 通常按淡水塔选择工艺参数, 设计填料高度和结构并作为计算基准。冷却介质变为海水后, 基准塔的热力性能下降, 此时可通过增加空气流量来弥补减少的热负荷^[6]。

对基准塔热力特性修正, 早期采用含盐量每增加 10 g/kg, 基准塔热力特性降低 1% 进行估算^[7], 近年来采用数值分析和模拟海水实验的方法给出了更为准确的海水塔热力特性修正方程^[8~9]。而工程实践中更多采用的是对基准塔进气湿球温度修正法, 常按每增加 4 g/kg 含盐量, 进口空气湿球温度增加 0.055 ℃ 进行粗略估算^[10], 而未考虑冷却温度区间对修正系数的影响。

上述方法较适用于机械通风冷却塔, 因其空气流量可通过改变风机功率方便的进行调整。然而对于大型火(核)电厂使用的自然通风冷却塔, 调整空气流量需重新设计塔形和结构, 更为经济的方法是增加填料高度。本研究基于 Merkel 理论, 对用于海

水冷却塔特性计算的进口空气湿球温度修正算法进行完善, 提出关联进气状态的湿球温差方程, 在此基础上发展了一种用于自然通风海水冷却塔填料高度设计的解析方法。

1 数学模型

1.1 冷却负荷计算

火电厂的循环冷却系统如图 1 所示, 冷却负荷可由凝汽器的热平衡方程计算:

$$Q = LAC_p(T_2 - T_1) \quad (1)$$

式中: Q —冷却负荷, kJ/h; L —冷却水的质量流率, kg/(m²·h); A —冷却塔横截面积, m²; C_p —一定压比热, kJ/(kg·℃); T_1 、 T_2 —冷却水的出口和进口水温, ℃。

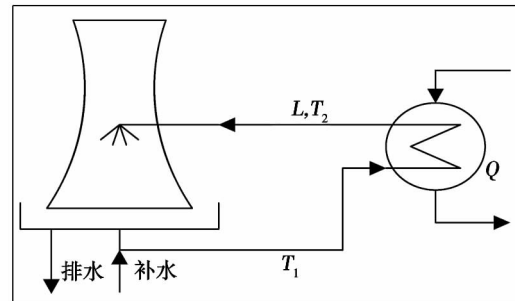


图 1 循环冷却系统流程

Fig. 1 Flow path of the circulating cooling system

按照淡水塔选定上述工艺参数, 冷却介质采用海水时, 需达到与基准塔相同的冷却负荷, 且进出口水温不变, 即满足:

$$(LC_p)_{sw} = (LC_p)_w \quad (2)$$

收稿日期: 2013 - 02 - 19; 修订日期: 2013 - 08 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275495); 国家海洋局南海维权技术与应用重点实验室开放基金资助项目(SMZS - KCF - P2013012); 国家高新技术研究发展计划(863)项目(2012AA091103); 中国海洋大学国家大学生创业训练计划资助项目(201310423065)

作者简介: 谢迎春(1977 -), 女, 安徽无为, 中国海洋大学讲师。

其中,下标 sw 和 w 分别表示海水和淡水。同温度下海水的定压比热低于淡水,由式(2)可知,海水的质量流量需增加。

1.2 冷却塔模型

冷却塔的热力特性计算采用 Merkel 提出的以焓差为推动力的传递速率方程^[11]。在冷却塔的操作条件下,引入以下假设:

- (1) 忽略水的蒸发,即水流量不变;
- (2) 冷却塔出口空气为饱和状态;
- (3) 路易斯因子等于 1。

根据假设,基准塔的特性方程为:

$$\frac{(k_H a)_w Z_w}{(LC_p)_w} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{H_i - H} \quad (3)$$

式中: H_i 和 H —相同塔截面处气水界面上饱和湿空气和空气侧的比焓, kJ/kg 干空气; $k_H a$ —基准塔的容积总传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$; Z —基准塔的填料高度, m 。

冷却塔进气条件下,其湿球温度近似等于绝热饱和温度,即可将塔底进气比焓 H_1 表示为进气湿球温度的单值函数 $H_i(T_{wb})$ 。由此,可得出基准塔的操作线方程:

$$H = H_i(T_{wb}) + \frac{(LC_p)_w}{G}(T - T_1) \quad (4)$$

式中: H_1 —塔底进气比焓, kJ/kg 。在冷却塔操作条件下,可作进气湿球温度 T_{wb} 的单值函数; G —干空气质量流率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; T —冷却水温度, $^{\circ}\text{C}$; T_1 —进口冷却水温, $^{\circ}\text{C}$ 。

联合式(3)和式(4)可得:

$$\frac{(k_H a)_w Z_w}{(LC_p)_w} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{H_i - [H_i(T_{wb}) + K(T - T_1)]} \quad (5)$$

式中: $K = (LC_p)_w / G$ 为操作线斜率。

为更直观的进行分析,将冷却过程表示于如图 2 所示的焓-温图中,实线表示淡水饱和线,直线 AB 为基准塔的操作线。冷却介质采用海水后,相同水温下的饱和湿空气比焓低于淡水,对应的海水饱和线如图 2 中虚线所示。冷却负荷不变时,根据式(2)操作线斜率不变,此时海水塔操作线仍为直线 AB 。

根据新的平衡关系,参照式(5),海水塔的热力特性方程:

$$\frac{(k_H a)_{sw} Z_{sw}}{(LC_p)_{sw}} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{H'_i - [H_i(T_{wb}) + K(T - T_1)]} \quad (6)$$

令 $\Delta H_i = H_i - H'_i$, 结合式(6)和式(2)得到与基准塔冷却负荷相同的海水塔特性方程:

$$\frac{(k_H a)_{sw} Z_{sw}}{(LC_p)_w} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{H_i - [H_i(T_{wb}) + \Delta H_i + K(T - T_1)]} \quad (7)$$

比较式(7)与式(5),令:

$$H_i(T'_{wb}) = H_i(T_{wb}) + \Delta H_i \quad (8)$$

则海水塔热力特性等效成操作线为 CD 的淡水塔进行计算,此时相当于将基准塔的进气湿球温度提高了 $\Delta T_{wb} = T'_{wb} - T_{wb}$ 。

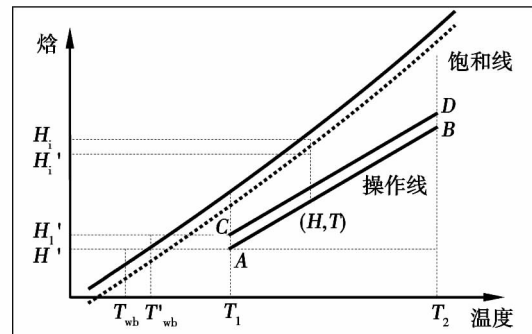


图 2 冷却塔的操作线

Fig. 2 Operation line for the cooling tower

2 数学模型求解

2.1 物性计算方法

海水与淡水的物理性质存在差异,其中密度、比热和表面蒸汽压对冷却塔热力性能影响最为显著。此外,导热系数、粘度和表面张力则会影响填料的传热传质性能。文献[12~13]提出的含盐量定义将现有的海水物性方程进行了统一,并在综合比较基础上,给出了最宜采用的关联式^[8]。湿空气的热物性采用实际气体模型进行计算^[14~15]。

2.2 湿球温差方程

首先需确定 ΔT_{wb} 的值。给定基准塔进气湿球温度,采用试差法,可由式(8)求得不同含盐量所对应的湿球温度值,进而求得湿球温差。

图 3 给出了各进气湿球温度下,不同含盐量对应的湿球温差。由图可知,本研究计算的 ΔT_{wb} 低于文献[10]给出的取值原则,这是因为后者只是针对特定条件的经验值,未考虑进气状态的影响。工程设计时,为更方便的求取修正温差,将上述计算结果拟合为温度和含盐量的二次多项式,各系数的取

值为:

$$\Delta T_{wb} = a \cdot T_{sw}^2 + b \cdot T_{sw} + c$$

$$a = -9.4381 \times 10^{-7} \cdot S + 3.1429 \times 10^{-6}$$

$$b = 2.1691 \times 10^{-4} \cdot S - 6.1629 \times 10^{-4}$$

$$c = 0.0032 \cdot S - 0.0148$$

式中: T_{sw} —海水温度, °C; S —海水含盐量, g/kg。

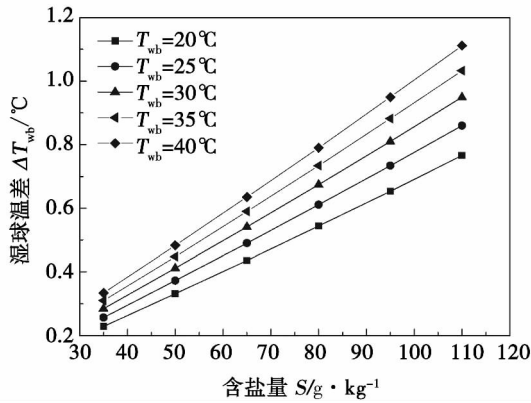


图 3 不同进气湿球温度下的 ΔT_{wb}

Fig. 3 ΔT_{wb} at various wet bulb temperatures of the air at the inlet

2.3 方程解析求解

冷却塔特性方程求解即确定方程右侧定积分的值。电厂冷却塔操作温度通常为 20 ~ 45°C, 此区间内 H_i 可表示为水温的抛物线方程^[11]:

$$H_i = 0.1424 \cdot T^2 - 3.0607 \cdot T + 63.745 \quad (10)$$

将式(10) 带入基准塔特性方程式(5) 整理后可得:

$$\lambda_w = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{0.1424 \cdot T^2 + BT + C} \quad (11)$$

式中: λ —冷却塔特性参数; $B = -3.0607 - K$; $C = 63.745 + K \cdot T_1 - H_i(T_{wb})$ 。

解得基准塔和海水塔特性后, 将式(7) 与式(5) 等式两侧分别相比, 整理后得:

$$\frac{Z_{sw}}{Z_w} = \frac{(k_H a)_w}{(k_H a)_{sw}} \cdot \frac{\lambda_{sw}}{\lambda_w} = \varphi \quad (12)$$

其中, φ 定义为填料高度修正系数。

由式(12) 可知, 要求得海水塔高度须确定冷却过程总传质系数的值。在以往研究中, 冷却塔的总传质系数通常表示为水和空气流量的幂函数, 缺乏能够关联冷却流体物性和填料结构的经验方程。工程实践中, 可针对设计选择的填料类型, 利用模型实验归纳出填料的总传质系数关联式, 进而计算海水塔填料高度。

3 分析和讨论

3.1 算法验证

为对上述方法进行评估, 目前的工作中采用 Djebbar 等人的传质关联式进行了计算和分析, 该式适用于多种常用的散堆和规整填料^[16]。文献[8] 对 Djebbar 传质关联式用于冷却塔 Merkel 数的计算结果与实验结果进行比较, 平均误差在 ±26% 以内。为验证塔特性 λ 的计算准确性, 将式(11) 的计算结果与文献[6] 中的算例进行了对比, 结果如表 1 所示。给定的工艺参数为: $T_2 = 48.8$ °C, $T_1 = 32.2$ °C, $T_{wb} = 23.8$ °C。从表中可以发现, 随水气比增加, 式(11) 的计算结果偏差增大, 然而在冷却塔常用的水气比取值范围内(约 0.8 ~ 1.5)^[11], 式(11) 的计算结果具有较好的精度。

表 1 λ 计算值与文献[6]结果对照

Tab. 1 Contrast of the calculated value of λ and the result obtained by using the literature [6]

水气比(L/G)	λ		偏差
	文献[6]	λ 计算值	
0.6	1.005	1.001	-0.4%
0.8	1.079	1.077	-0.2%
1	1.168	1.17	+0.17%
1.5	1.5	1.521	+1.4%
2	2.233	2.355	+5.5%

3.2 浓缩倍率

标准海水的含盐量一般都在 35 g/kg 左右, 在循环冷却过程中, 由于海水在冷却塔内不断蒸发导致循环水中含盐量不断增加, 海水浓度逐渐增大。浓缩倍率的概念是指循环使用后的海水含盐量与标准海水含盐量的比值, 由于不同浓缩倍率下的海水密度、蒸汽压及比热等参数不同, 因而浓缩倍率的取值对于海水塔的热力特性设计极为重要。此外, 浓缩倍率的选择还影响排污量和管道材料的选用, 是决定海水冷却塔工程造价的关键。浓缩倍率的选择受取用水量、排污条件、凝汽器材质等条件限制, 通常取值在 1.2 ~ 2.0 之间, 个别可达 2.5 以上^[5~6]。本研究着重在这一范围内研究水气比、进气湿球温度、进出口水温等工艺参数的选择对海水塔填料高度的影响。

3.3 工艺参数选择对填料高度的影响

图 4 给出了不同浓缩倍率下, 填料高度修正系

数与水气比的关系。由图可知 相同操作条件下 填料高度修正系数随浓缩倍率的提高而增加,两者基本呈线性关系。浓缩倍率相同时,填料高度修正系数随水气比提高而加速增加。典型操作条件下,水气比为 1,浓缩倍率为 2 时,海水塔填料高度较基准塔提高约 8%。

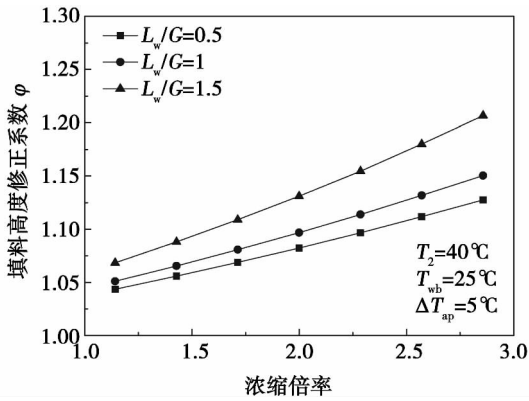


图 4 填料高度修正系数与水气比的关系
Fig. 4 Relationship between the packing material height correction factor and the water/air ratio

图 5 给出了不同浓缩倍率下,进气湿球温度(底部温差)对填料高度修正系数的影响。冷却负荷和进口水温一定时,进气湿球温度的改变主要影响冷却塔底部温差(出口水温和进气湿球温度之差)。由图可知 相同浓缩倍率下,填料高度修正系数随底部温差的减小而加速增加。浓缩倍率为 2,底部端差由 7 降为 3 °C,则海水塔填料高度增加幅度约 10%。

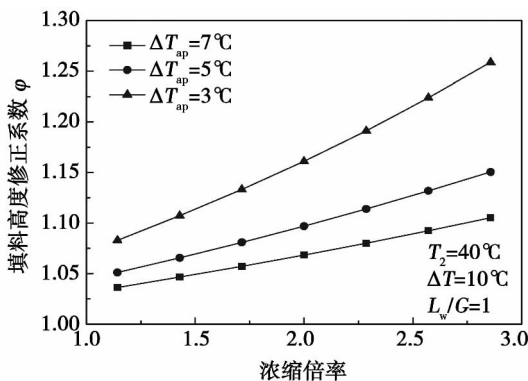


图 5 填料高度修正系数与底部温差的关系
Fig. 5 Relationship between the packing material height correction factor and the temperature difference at the bottom

图 6 给出了不同浓缩倍率下,填料高度修正系

数与进口水温的关系。由图可知 相同浓缩倍率下,随进口水温增加,填料高度修正系数减小,但影响不大。浓缩倍率为 2 时,进口水温由 35 增加到 45 °C,填料高度仅减小约 2%。

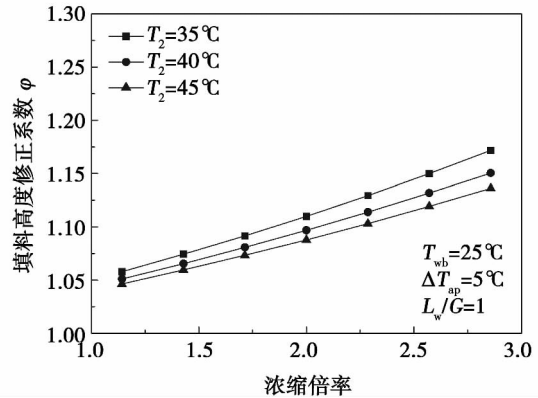


图 6 填料高度修正系数与进口水温的关系
Fig. 6 Relationship between the packing material height correction factor and the water temperature at the inlet

4 结 论

(1) 提出了关联进气状态的湿球温度修正方程,修正温差计算结果低于以往采用的每增加 4 g/kg 含盐量,进口空气湿球温度增加 0.055 °C 的经验取值;

(2) 在一定的浓缩倍率下,填料高度修正系数随底部温差的减小而加速增加。浓缩倍率为 2 时,底部温差由 7 °C 降为 3 °C,则海水塔填料高度增加幅度约 10%。底部温差对海水冷却塔填料高度的影响最为显著,设计时应根据经济性优化选择;

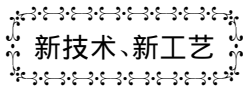
(3) 一定浓缩倍率下,进口水温增加,填料高度修正系数减小。浓缩倍率为 2 时,进口水温由 35 增加到 45 °C,填料高度仅减小约 2%。进口水温对海水冷却塔填料高度的影响较小,工程设计时可忽略。

参考文献:

[1] 候纯扬. 海水冷却技术[J]. 海洋技术 2002 21(4): 33-40.
HOU Chun-yang. Seawater cooling technology [J]. Ocean Technology 2002 21(4): 33-40.
[2] Rajamohan R, Viñita E, Venugopalan V P, et al. Chlorination by-products and their discharge from the cooling water system of a coastal electric plant. [J]. Current Science 2007 93(10): 1608-1612.

- [3] 王广珠,李承蓉,周金德,等.海水循环冷却技术的研究与应用现状[J].热力发电,2007,11:68-71.
WANG Guang-zhu, LI Cheng-rong, ZHOU Jin-de, et al. Study and current status of the application of the seawater circulation cooling technology[J]. Thermal Power Generation, 2007, 11: 68-71.
- [4] Nester D M. Salt water cooling tower [J]. Chemical Engineering Progress, 1971, 67(7): 49-51.
- [5] 刘官郡.海水冷却塔设计[J].工业用水与废水,2006,37:9-20.
LIU Guan-jun. Design of seawater cooling towers [J]. Industrial-purposed Water & Waste Water, 2006, 37: 9-20.
- [6] Maullbetsch J S, Difilippo M N. Performance cost and environmental effects of saltwater cooling towers [R]. No CEC-500-2008-043, USA: California Energy Commission, 2010.
- [7] Ying B Y, David S. The use of cooling towers for salt water heat rejection [R]. USA: the Marley Cooling Tower, 1991.
- [8] Sharqawy M H, Zubair S M, Lienhard J H. On thermal performance of seawater cooling towers [J]. J. Eng. Gas Turbines Power, 2010, 133(4): 1-7.
- [9] 赵顺安,廖内平,宋志勇,等.海水冷却塔淋水填料热力阻力特性研究[J].工业用水与废水,2007,38(2):65-68.
ZHAO Shun-an, LIAO Nei-ping, SONG Zhi-yong, TANG Yong, et al. A study of the thermal resistance characteristics of the sprinkling packing material in seawater cooling towers [J]. Industrial-purposed Water & Waste Water, 2007, 38(2): 65-68.
- [10] Eftekhazadeh S, Baasiri M M, Lindahl P A. Feasibility of seawater cooling towers for large-scale petrochemical development. No. TP03-17, USA: Cooling Tower Institute, 2003.
- [11] 时钧.化学工程手册(第二版)[M].北京,化学工业出版社,1996.
SHI Jun. Chemical engineering handbook (2nd Edition) [M]. Beijing, Chemical Industry Press, 1996.
- [12] Sharqawy M H, Lienhard J H, Zubair S M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data [J]. Desalination and Water Treatment, 2010, 16(1-3): 354-380.
- [13] Millero F J, Feistel R, Wright D, et al. The composition of standard seawater and the definition of the reference-composition salinity scale [J]. Deep-Sea Research, Part I, 2008, 55(1): 50-72.
- [14] Hyland R W, Wexler A. Formulations for the Thermodynamic Properties of Dry Air from 173.15 to 473.15 K, and of Saturated Moist Air from 173.15 K to 372.15 K, at Pressures to 5 MPa [J]. ASHRAE Transactions, 1983, 89(2A): 520-535.
- [15] Hyland R M, Wexler A. Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K [J]. ASHRAE Transactions, 1983, 89(2A): 500-519.
- [16] Djebbar Y, Narbaitz R M. Improved Onda Correlations for Mass Transfer in Packed Towers [J]. Water Sci Technol, 1998, 38(6): 295-302.

(丛敏 编辑)



优化余热锅炉热力和液压系统技术方案的制定

据《Теплоэнергетика》2012年3月刊报道,俄罗斯中央锅炉涡轮机研究所的专家列出了西北热电站1号动力机组 ПГУ-450T 的 П-90 余热锅炉工作及其蒸发管弯曲处破坏原因。分析了允许利用 ГТЭ-160 代替 V-94.2 燃气轮机的技术方案。

安装新 ГТЭ-160 燃气轮机并利用现有的 П-90 余热锅炉导致在冷凝工况下汽轮机功率减少 4.5~12.5 MW。但是,在余热锅炉和 ГТЭ-160 一起工作时,蒸汽过热器和高压蒸发器的管子应用更稠密散热片,允许在 15℃ 外部空气中在冷凝工况下使功率增加 9.5 MW。因此,在用 ГТЭ-160 取代现有 V-94.2 燃气轮机,在余热锅炉高压回路受热面同时改造的情况下,西北热电站1号动力机组的功率没有减少。

将低压蒸发器分成2个并联的管束并安装中间集流管,汽-水混合物速度能减小到 10 m/s 和 5 m/s,这是防止低压蒸发器管子弯曲处的气蚀磨损。

最佳碱化工况应该是连续的,利用计量泵可以实现这种工况。

(吉桂明 摘译)

flected in the chemical reaction control stage. **Key words:** calcium-based absorbent ,self activation ,CO₂ ,cyclic conversion rate

自然通风海水冷却塔填料高度计算方法 = **Method for Calculating the Packing Height Inside a Natural Ventilation Sea Water Cooling Tower** [刊 ,汉] XIE Ying-chun (Engineering College ,China Oceanology University , Qingdao ,China ,Post Code: 266100) ,YANG You-sheng (Key Laboratory on South China Sea Right Protection Technology and Application ,China National Ocean Administration Bureau ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510310) , XU Zhen (Key Laboratory on Advanced Energy Source and Power Engineering Thermophysics Research Institute , Chinese Academy of Sciences ,Beijing ,China ,Post Code: 100190) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(6) . -633 ~637

Based on the Merkel theory ,improved was an air wet ball temperature correction calculation method for calculating the thermal characteristics of sea water cooling towers with a wet ball temperature difference equation relating to the air inlet state being proposed and an analytic calculation method for calculating the packing height in a natural ventilation sea water cooling tower being developed. On this basis ,the influence of the water/gas ratio ,bottom temperature difference and inlet and outlet water temperature at various sea water concentration ratios on the packing height in a sea water cooling tower was analyzed. It has been found that when the concentration ratio is 2 ,the bottom temperature difference will decline from 7℃ to 3 ℃ ,the packing height will rise by about 10% ,the inlet water temperature will increase from 35 ℃ to 45 ℃ and the packing height will drop by about 2% . The bottom temperature difference has a most remarkable influence on the packing height in the sea water cooling tower while the inlet water temperature has almost no influence. **Key words:** sea water cooling tower , packing height , bottom temperature difference

600 MW 燃煤电站太阳能利用集成系统性能研究 = **Study of the Performance of a Solar Energy Utilization Integration System in a 600 MW Coal-fired Power Plant** [刊 ,汉] ZHAO Hong-bin ,BAI Yun (College of Mechanical ,Storage and Transportation Engineering ,China University of Petroleum ,Beijing ,China ,Post Code: 102249) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(6) . -638 ~643