

# 压气机进气用雾化式蒸发冷却器实验研究

(哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036) 林 枫 李伟顺 肖东明 闻雪友 张 平\*

**摘 要:** 从实验角度对压气机进气用蒸发式冷却器进行了研究。探讨了含有水滴的空气中的湿度测量方法。针对不同的常温蒸发加湿方案, 研究了不同喷水量对蒸发冷却效果产生的影响。对于不同形式的雾化喷嘴在不同的喷射方向下对蒸发冷却效果所产生的影响进行了实验分析。

**关 键 词:** 压气机; 进气冷却; 传热传质; 蒸发式冷却器

中图分类号: TK474.8

文献标识码: A

## 1 简介

对压气机进气进行冷却以提高整个燃气轮机组出力和经济性的技术已在实际运行中得到了广泛应用。特别是对于在高温环境下运行的机组更具有实际意义。蒸发式冷却作为压气机进气冷却的方式之一, 与其它冷却方式相比(如机械压缩式制冷, 吸收式制冷等)具有适用范围广(甚至包括在沿海等高湿度地区), 系统简单, 投资少等独特优点<sup>[1,2]</sup>。其一般投资回收期仅在半年左右。

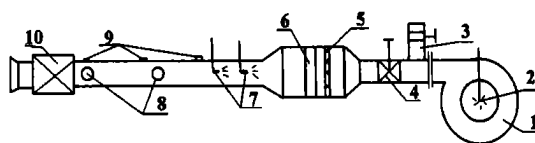
目前在实际中应用的蒸发式冷却器具有两种形式:

一为雾化式蒸发冷却器<sup>[1,3]</sup>; 另一为介质式蒸发冷却器<sup>[4,5]</sup>。前者将水高细度雾化后喷入气流中, 依靠细微的水滴颗粒对空气进行加湿/冷却。后者是使空气通过含水的多孔介质来对其加湿/冷却。两种方式的机理都是使空气经过一个绝热加湿过程来降低其干球温度。相比之下, 雾化式蒸发冷却器具有空气阻力小的特点。介质式蒸发冷却的一个主要缺点是由于受空气饱和度的限制, 对空气的冷却强度较低。在这种前提下研究如何尽可能地提高常温下蒸发效果显得尤其重要。本文将对雾化式蒸发冷却器进行实验研究及分析。

雾化式蒸发冷却器的研究, 涉及到水滴在空气中蒸发情况的研究, 到目前为止, 国内外研究者已在这方面做了大量工作。然而由于所研究的目的不同, 大部分工作针对水滴在较高的空气温度下的蒸

发情况<sup>[6]</sup>。在常温环境下空气中水滴的蒸发情况有所不同, 此时水和空气之间的传热传质过程推动力较弱, 并且空气的相对湿度对蒸发强度有较大影响。研究常温环境下各种因素对空气加湿过程的影响将对蒸发式冷却器的设计具有指导意义。

## 2 实验装置简介



1—风机; 2—湿度调节喷嘴; 3—旁通管; 4—调节阀; 5—稳流网; 6—功率可调电加热器; 7—喷嘴; 8—激光测量孔  
9—温湿度测孔; 10—水分离组件

图1 实验装置简图

本文的实验装置见图1。实验时通过流量调节阀及旁通挡板来共同调节实验段内的空气流速, 利用风机入口处的雾化喷嘴及可调功率电加热器来调节实验段入口处空气的温湿度。空气流速通过热球风速仪进行测量。各点的激光粒径测量孔处罩有光学玻璃。在进行空气湿度测量时, 考虑到气流中含有大量水滴, 如果直接将温湿度传感器置于气流中, 水滴立刻会凝聚在传感器上, 造成湿度传感器失真(此时测得的温度将接近于湿球温度), 从而无法得到气流的真实湿度。为此本文采用了一个特制的取样探针将少量气流引至设在外部的装有温湿度传感器的腔室, 之后排入大气, 见图2。实验表明, 采用这种方法进行湿度测量, 取样空气流量不宜过大, 否则会将水滴带入探针造成测量值偏大。但空气流量过小又会使得温湿度仪需较长时间才能示数稳定。

此外, 当空气流过探针时, 尽管探针内壁采取了绝热措施, 仍无法避免热量交换, 图2中仪器所直接

收稿日期: 1999-01-15; 修订日期: 1999-06-08 \*哈尔滨铁路局通讯段

作者简介: 林 枫(1966—), 男(满族), 辽宁抚顺人, 博士研究生。通讯处: 150036 哈尔滨77信箱4分箱。

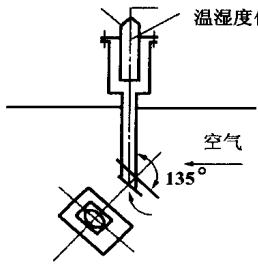


图 2 湿度测量探针

测得的温湿度有一定误差, 必须对其进行修正。所采用的修正方法如图 3 所示: 根据测得的温、湿度值可以得到空气中的含湿量  $d$ , 在湿空气图中沿含湿量为  $d$  的等湿度线与加湿前空气所在的等焓线相交, 其交点应为

加湿后的真实状态。这种方法的依据是将空气的加湿过程视为绝热加湿过程。为了尽量减小取样空气在探针内部的流动距离, 以减小传热量,

本实验中还尝试了另一种测量方案, 见图 4, 将温湿度传感器置于导热系数较小的材料制成的罩壳内并一同放到待测空气流道之中。在罩壳侧壁对称开有两排引射孔。测量时依靠空气流动

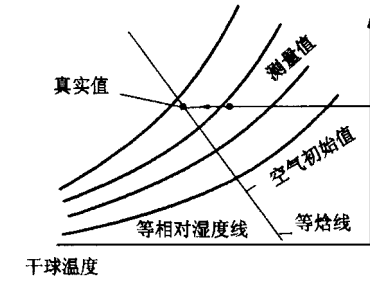


图 3 湿空气图

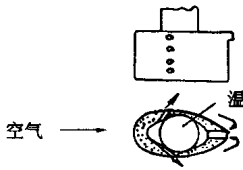
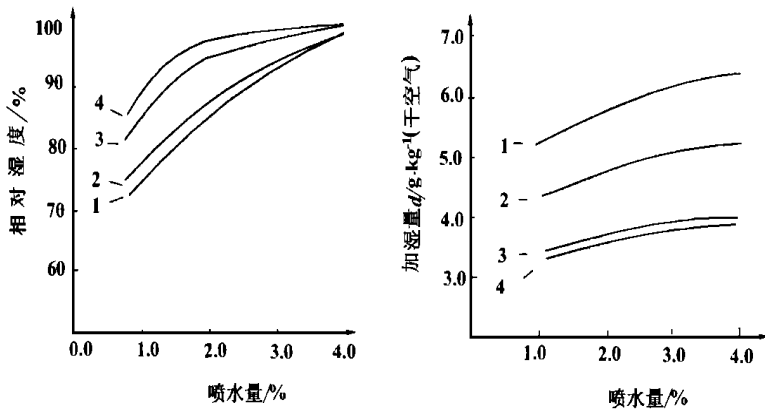


图 4 屏蔽式温湿度传感器



a. 空气在不同喷水量条件所能达到的最大相对湿度 b. 加湿量与喷水量关系  
空气初始状态 1: 32℃ 18%相对湿度 2: 25℃ 18%相对湿度 3: 20℃ 27%相对湿度 4: 25℃ 38%相对湿度

图 5 水容化蒸发实验结果

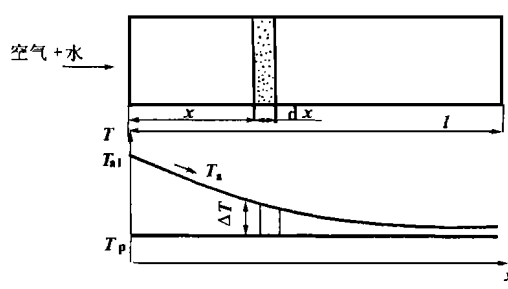


图 6 水滴与空气之间传热过程

造成的压差将少量空气从罩壳尾部吸入, 形成循环。这种方法更适

合于测量负压空气流道如 GT 进气道内的湿度, 可不必采取抽气装置来从进气道内抽取空气。这种测量方案的缺点是探头尺寸较大, 不适用于狭窄流道。实验中还发现, 当气流速度较低, 引射孔径较小时, 水膜易将引射孔封住, 造成气流无法循环。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 不同喷水量针对于不同状态的空气所产生的蒸发效果及分析

图 5 表示出了不同状态下的空气在不同喷水量条件下所能达到的最大相对湿度和获得的最大加湿量的实验结果。图中喷水量定义为: 喷水量 = 喷水质量流量 / 空气质量流量。从图 5. b 中可以发现, 对应于一定的空气初始状态, 加湿量随喷水量的增加而增加, 但曲线的斜率逐渐减小, 直至趋近于零。亦即当喷水量达到一定数值后, 其进一步增加对加湿量影响甚微。为进一步证明, 理论上分析如下:

在常温环境下, 忽略蒸发对流动, 传热及传质的影响, 取单一水滴颗粒, 其在空气中所受热量为:

$$q = \alpha 4\pi r_p^2 (T_a - T_p) = \pi d_p Nu \lambda (T_a - T_p) \quad (1)$$

其中:  $r_p$ 、 $d_p$  分别为水滴颗粒的半径、直径。

$\lambda$ : 湿空气导热系数

$Nu$ : 努谢尔特数

$T_a$ 、 $T_p$ : 空气及水滴表面处温度

图 6 表示了水滴与空气之间的传热过程: 图中空气流道的截面积取为  $1 \text{ m}^2$ , 空气流量取为  $1 \text{ kg/s}$ , 单位质量空气中的喷水量为  $m_p$ 。将全部水滴颗粒直径取为 Sauter 平均直径  $d_s$ , 并忽略水

滴直径的变化。在长度为  $dx$  的微元体内, 空气传给水颗粒群的热量  $dQ$  为:

$$dQ = N_0 \cdot \pi \cdot d_s Nu \lambda (T_a - T_p) \cdot dx \quad (2)$$

其中:  $N_0$  为 Sauter 平均直径所对应的水颗粒数 ( $N_0 \neq$  实际颗粒数)。

$$N_0 = \frac{6m_p \cdot \rho \cdot dx}{\pi \cdot d_s^3 \cdot \rho_p} \quad (3)$$

$\rho$  为空气密度;  $\rho_p$  为水滴密度

(3) 代入 (2) 得:

$$dQ = \frac{6m_p \cdot \rho \cdot Nu \cdot \lambda}{\rho_p \cdot d_s^2} \Delta T \cdot dx \quad (4)$$

式(4)中  $\Delta T = (T_a - T_p)$ ,  $Nu$  为水滴颗粒在空气中流动的  $Re$  数的函数, 实际流动中  $Nu$  处处不同, 为分析问题方便, 用平均值  $Nu$  代替上式  $Nu$ , 并认为  $Nu$  在整个流场中不变。则式(4)变为:

$$dQ = m_p \cdot K \cdot \Delta T \cdot dx \quad (5)$$

$$\text{式中: } K = \frac{6 \cdot \rho \cdot Nu \cdot \lambda}{\rho_p \cdot d_s^2}$$

水滴的吸热量等于空气的放热量: (忽略所产生的水蒸气的影响)。

$$dQ = -C_p \cdot dT_a (\text{空气流量为 } 1 \text{ kg/s}) \quad (6)$$

其中:  $C_p$  为空气定压比热

$$\text{由 } \Delta T = T_a - T_p \text{ 得: } d(\Delta T) = dT_a \quad (7)$$

由式(5)、(6)、(7) 可得

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\frac{m_p}{C_p} \cdot K \cdot dx \quad (8)$$

对式(8) 积分得:

$$\int_{\Delta T_1}^{\Delta T_x} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\frac{m_p \cdot K}{C_p} \int_0^x dx$$

$$\text{即: } \ln \frac{\Delta T_x}{\Delta T_1} = -\frac{m_p \cdot K}{C_p} X$$

$$\Delta T_x = \Delta T_1 \cdot e^{-\frac{m_p \cdot K}{C_p} X} \quad (9)$$

其中  $\Delta T_1$  为水滴与空气之间的初始温差在整个流道  $l$  内的总换热量为:

$$\begin{aligned} Q &= -\int_0^l m_p \cdot K \cdot \Delta T_1 \cdot e^{-\frac{m_p \cdot K}{C_p} X} dx \\ &= \Delta T_1 \cdot C_p (1 - e^{-\frac{m_p \cdot K \cdot l}{C_p}}) \end{aligned} \quad (10)$$

通常情况下, 环境中的水的温度为空气所对应的湿球温度, 当水以此温度喷入空气中时, 数值计算表明, 水滴在空气蒸发时温度变化很小, 因此可以近似认为水滴所受的全部热量用于蒸发, 则蒸发率  $G$  为:

$$G = \frac{Q}{r} = \frac{\Delta T_1 \cdot C_p}{r} (1 - e^{-\frac{k \cdot l}{C_p} m_p}) \quad (11)$$

其中:  $r$  为水的蒸发潜热

当喷水温度等于空气对应的湿球温度时,  $\Delta T_1$  即为空气初始状态下的干湿球温差。式(11)中第一项即为空气由初始状态变为饱和状态所放出的热量所能蒸发的水量  $G_{\max}$ , 式中可见无论喷水量  $m_p$  如何增加,  $G$  总是小于  $G_{\max}$ 。式(11)中  $G$  对  $m_p$  求导可得:

$$\frac{\partial G}{\partial m_p} = \frac{\Delta T_1 \cdot K \cdot l}{r} e^{-\frac{k \cdot l}{C_p} m_p} \quad (12)$$

由式(12)可见单位质量空气中水的蒸发量与喷水量的关系曲线其斜率随喷水量的增加而呈负指数规律减小。

### 3.2 雾化角及喷射方向对于蒸发效果影响的实验研究

实验中针对雾化喷嘴顺向和逆向气流喷射时, 对蒸发效果的影响进行了对比研究。

首先利用压力雾化喷嘴研究了大雾化角的情况。实验表明在雾化角较大(本实验为  $86^\circ$ ) 且雾化压力较高的条件下, 逆向和顺向气流喷射对蒸发效果的影响不大, 而当雾化压力较低时(低于  $0.5 \text{ MPa}$ )。喷射方向对蒸发效果有一定影响, 即顺向气流喷射时, 蒸发效果略差。分析如下: 在雾化压力较高时, 经测定表明顺向和逆向气流喷射对雾化粒度的影响不大, 高雾化压力下, 水滴离开喷嘴时的初始速度在  $70 \sim 100 \text{ m/s}$ , 当雾化角为  $86^\circ$ , 空气流速为  $15 \text{ m/s}$  时, 采用顺向和逆向气流喷射, 水滴与空气之间的初始相对速度约差  $0.2 \sim 0.35$  倍。但由于这时水的雾化粒度很小(平均直径约  $23 \mu\text{m}$ ), 水滴从喷嘴出后在极短时间内( $10^{-3}$ 秒)便达到与气流基本相同的速度, 尽管在这段时间内, 相对速度对蒸发强度有较大影响, 但对整个实验段来讲影响很小。对于低雾化压力的情况, 不同的喷射方向对雾化粒度有所影响, 因此对蒸发效果产生一定影响。

其次, 实验中利用空气雾化喷嘴对小雾化角时水的蒸发情况进行了研究。研究表明, 小雾化角情况下(本实验为  $25^\circ$ ), 不同的喷射方向对蒸发效果有较明显影响。在空气初始状态为  $32^\circ\text{C}$ ,  $16\%$  相对湿度时, 保持喷水量不变, 顺向气流喷射可将空气加湿至  $48\%$  的相对湿度, 而逆向气流喷射时, 则可将空气加湿至  $56\%$  的相对湿度。其原因是: 由于雾化角较小, 雾化后的水滴分布在较小的空间内。当采用逆向气流方向进行喷射时, 水滴群很快被主气流吹散并分布到较广阔的空间内。而顺向气流方向进行

喷射时,水滴群则要经过较长一段距离后才能分散开来。于是造成两种喷射方向下蒸发效果有着较明显的差别。

### 4 结论

对于雾化式蒸发冷却器,喷嘴的雾化角、雾化粒度等因素对蒸发/冷却效果有较明显的影响,当雾化角较小时,应采取逆向喷射的方案。

对雾化式蒸发冷却器的喷水量应进行合理控制。喷水量过小,达不到最大蒸发冷却效果,而喷水量过大,则起不到改善的作用。

### 参考文献

[1] NOLAN I B, TWOMBLY V J. Gas turbine performance improvement

direct mixing evaporative cooling system. American Atlas Cogeneration Facility Rifle, Colorado, ASME 90-GT-368.

[2] Kolp D A, Flye W M, Guidotti H A. Advantage of air conditioning and Supercharging an LM600 gas turbine inlet. Journal of Engineering for Gas Turbine and power 1995, 117: 513 ~ 527.

[3] Irwin Stambler. Spray cooling inlet and compressor flow increases hot day plant rating. Gas Turbine World, 1997, 27(3): 37 ~ 42.

[4] 'KHUS' Water Curtain cuts inlet temperatures by 10 degrees. Gas Turbine World, 1995, 25(6): 43.

[5] Johnson R. S. The theory and operation of evaporative Coolers for industrial gas turbine installations. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1989, 111:327 ~ 334.

[6] 林枫, 闻雪友. 压气机的湿压缩特性及计算模型初步研究. 热能动力工程, 1998 13(6): 402 ~ 404.

[7] Zou Baifang, Denbulck E. Van. Fuel oil evaporation in swirling hot gas streams. Int. J. Heat Mass Transfer, 1998, 41(12): 1807 ~ 1820.

(复 编辑)

(上接 251 页)

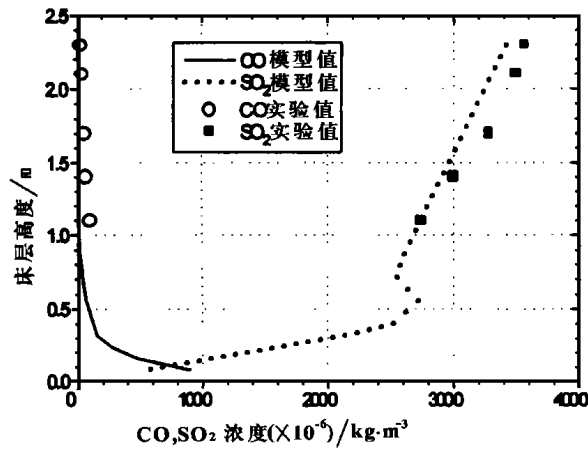


图 8 床内 CO, SO<sub>2</sub> 浓度测量值和模型结果的比较

流量瞬段增大而形成的。

### 4 结论

本文建立循环流化床内气固流动浓—淡模型,下降的浓相存在于上升的淡相周围,浓—淡两相之间进行气固质量交换和传递。淡相内气体和固体均向上运动;浓相内固体颗粒向下运动,气体流动方向取决于浓相区内颗粒向下运动的速度大小。建立床内各种气体、各种组份物料、各种组份物料的含碳量的质量平衡,以及小室总的能量平衡。在循环流化床燃烧试验台上进行实验研究,模型结果和试验数据总体上吻合良好。

### 符号说明

- $A_t$ —床层截面积,  $m^2$
- $f_d$ —浓相(dense)的体积份额, —
- $K_a$ —气体质量交换速率常数,  $l/s$
- $U$ —速度,  $m/s$
- $\Phi$ —焦炭颗粒燃烧时过程因子, —
- 下标
- $d$ —浓相(dense)
- $f$ —给料(feed)
- $C$ —物料浓度,  $kmol/m^3$ ,  $kg/m^3$
- $h$ —高度,  $m$
- $K_C$ —气体对流交换速率常数,  $l/s$
- 希腊字母
- $\epsilon$ —孔隙率,
- $c$ —对流交换 (convective transfer)
- $L$ —淡相(Lean)

### 参考文献

[1] Weß V. Mathematische modellierung zirkulierender wirbelschicht-ten fuer die kohleverbrennung. Ph D thesis, Universitat-Gasamthochschule-Siegen Gemany, 1987.

[2] 沈来宏. 循环流化床锅炉数学模型研究. [硕士论文]. 北京: 清华大学, 1992.

[3] Basu P, Takikdar J, Song W. Experimental validation of an one and half dimensional model of char combustion in a circulating fluidized bed. AIChE Symp Ser, 1994, 301:114.

[4] Horio M, Hatano H, Ogasawara etc. Local gas and cluster velocities in a large-scale circulating fluidized bed test rig. Chem Eng Sci, 1996, 70: 861.

[5] Schoenfelder H, Hinderer J, Werther J, Keil F. Methanol to olefins—prediction of the performance of a circulating fluidized bed reactor on the basis of kinetic experiments in a fixed bed reactor. Chem Eng Sci, 1994, 49: 5377.

(渠 源 编辑)

China, Post Code 210096) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2000, 15(3). — 252 ~ 255

An experimental study was conducted of the nozzle button temperature distribution on a fluidized bed test facility under start-up conditions with the under-bed ignition being carried out with the help of high-temperature gases. The heat resistance of the material used for the nozzle button is also assessed. In view of the increasing use of under-bed ignition mode for the start-up of fluidized bed boilers the above study is of great significance in providing guidance for practical engineering applications. **Key words:** temperature distribution, nozzle button, fluidized bed

压气机进气用雾化式蒸发冷却器实验研究 = **Experimental Study of a Fog-atomizing Evaporative Cooler for Compressor Inlet Air** [刊, 汉] / Lin Feng, Li Weishun, Xiao Dongmin, Wen Xueyou (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2000, 15(3). — 256 ~ 259

From an experimental viewpoint a study has been performed of evaporative coolers for the cooling of compressor air. Discussed are some methods for measuring the wetness of water drop-containing air. With respect to different schemes of wetness addition by way of evaporation at a constant temperature the authors have investigated the effect produced by different water spray quantity on the evaporative cooling effectiveness. An experimental analysis is also conducted of the evaporative cooling effectiveness resulting from the different types of atomizing nozzles under different spray directions. **Key words:** compressor, inlet air cooling, heat transfer, mass transfer, evaporative cooler

中心进气旋转盘的冷却效果实验研究 = **Experimental Study of the Cooling Effectiveness of a Rotating Disc with a Central Cooling-air Feed** [刊, 汉] / Xu Guoqiang, Ding Shuiting, Tao Zhi, *et al* (Power Engineering Department under the Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code 100083) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2000, 15(3). — 260 ~ 263

With regard to the cooling of turbine engine high-temperature components it is essential to meet the following main requirements: a minimal overall temperature of the hot components and a minimal temperature difference within the various parts of the hot components. In view of the foregoing one has to address the above-cited main requirements in addition to the study of convection heat transfer factor of the disc surface. In the present paper an engine turbine disc has been simplified to a rotating disc model with a central cooling-air feed. Under this simplification an experimental study is conducted of the effect of rotating Reynolds number, air inlet Reynolds Number, disc cowl clearance ratio and outlet air clearance ratio on the non-dimensional excessive body average temperature and non-dimensional radial temperature difference. In addition, a relevant criterion relation has also been given in the paper. **Key words:** rotating disc, heat exchange, non-dimensional excessive body average temperature, non-dimensional radial temperature difference

新型双流化床锅炉运行煤种变换仿真试验研究 = **Experimental Study of the Simulation of Fired-coal Rank Variation for a New Type of Double Fluidized-bed Boilers** [刊, 汉] / Zhao Jian, Suo Yisheng, Jiang Zikang, *et al* (Department of Thermal Engineering, Qinghua University, Beijing, China, Post Code 100084) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2000, 15(3). — 264 ~ 266, 271

A general mathematical model has been set up for a circulating double fluidized-bed boiler. On this basis a simulation test of the fired-coal rank variation was performed as a new pioneering attempt in the area of fluidized-bed boiler simulation. The results obtained can serve as useful information and data for the design and operation of fluidized beds, providing guidance for their further advancement. **Key words:** simulation, test, fluidized bed, coal

工业汽轮机增容改造技术研究 = **Technical Study of a Power Output Up-rating-oriented Modification of Industrial Steam Turbines** [刊, 汉] / Qin Xiaocheng, Gao Lei, Qiu Zufa (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2000, 15(3). — 267 ~ 268

Described in this paper is the technical modification of a Model EC-301T steam turbine for enhancing its rated power output by 15%. The power up-rating of the steam turbine has been achieved through a technical modification of such components as nozzle box, diaphragms and couplings, etc. However, the steam turbine rotor has been kept unchanged. **Key**