

供热系统“单耗分析”模型

宋之平

(华北电力大学研究生部)

〔摘要〕 本文首先介绍了作者提出的〈单耗分析〉理论和方法的梗概,并在此基础上建立了现代供热系统的一般化模型,针对这一模型,计算了锅炉供热、电热供热、热泵供热和热电联产供热系统中燃料的理论单耗、附加单耗和在用户终端处供热的燃料单耗。给出了供热成本的计算公式,该计算方法适于在工程中应用。

关键词 供热 单耗 热电联产 节能 烟
分类号 TK01 TK12

0 引言

在工业、农业和民用等部门的能源消耗中,热能这种方式由于其用量大,节能潜力也大,因而占有特殊重要的地位^[1]。近年来在现代节能理论领域取得了引人注目的进展,出现了一批杰出的学者,发表了不少很有学术价值的论述^[2-9]。本文的分析完全建立在现代节能理论的基础上,并在已有的文献资料基础上加以整理与改进,目的是为了更方便节能降耗第一线科技工作者的理解和应用,称为〈单耗分析〉^[2,3,4]。本文旨在应用〈单耗分析〉的原理和方法建立一个通用的供热系统燃料单耗和供热单位成本的数学模型,以期据此使对不同类型的供热系统的研究和比较,建立在统一的理论基础和科学的评价指标上。

1 供热系统的常用方案及其热力学实质

按照现代节能理论观点,一般言之,在给定的环境下能量是由两部分构成,其中的一部分具有无限可转化性,称为烟(exergy);另一部分不具有任何可转化性,称为焓(anergy)。正是能量中的烟才体现着做功的本领域或推动过程进行的动力。对于给定的能量,在其传输使用或能量形式的转化中,其原有的总含烟量不可能提高,只可能降低,其降低的部分不可逆地转化成了焓。在技术和经济合理的范围内力图减少不可逆性乃是节能降耗的最基本原则。

现代工业或居民点,最常采用的供热系统有四种方案,即锅炉供热,电热,热电联产供热和热泵供热。它们的热力学实质示于图1。

收稿日期 1995-08-24

本文联系人 宋之平 男 1933年生 教授 100085 北京清河

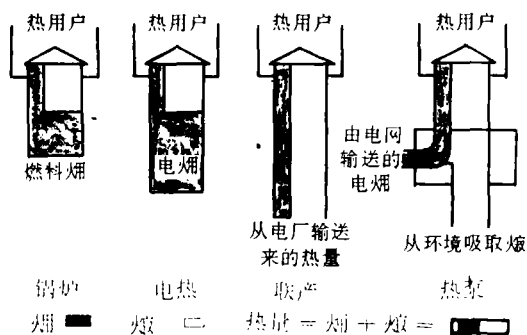


图 1 不同方案供热系统的热力学实质

如图 1 所示,锅炉是高度不可逆的供热方式。电热的不可逆程度更高,因为电厂所供出的电烟本身就是从燃料的化学烟转换来的,其转换效率即使在现代化电厂也不过为 1/3 左右。因此,图 1 中的前两种供热方式均属于“不可逆型供热方案”。

图中所示的后两种方案是热电联产供热系统和热泵供热系统。热电联产是大家熟知的一种能源梯级利用方式,符合“能质匹配”原则,如使用得当可有相当大的节能效果。热泵也是一种先进的供热方式,它利用工质的逆向循环从低温热源吸热,可以从电能中获得比电热当量大数倍的热量,在可逆的条件下热电联产供热和热泵供热具有等价性,具有相同的热力学本质,它们较前两种供热方式减少了不可逆性,增加了可逆性,同属于“可逆型的供热方案”。

2 〈单耗分析〉理论与方法中有关的内容简介

为了便于以下的推导,先把下文将要涉及的〈单耗分析〉中的有关内容简介如下:

所谓单耗是指生产单位产品所消耗的燃料/原材料和资金费用。前者,不论涉及的是燃料还是原材料,统称为产品的“燃料单耗”

(Fuel Unit Consumption),以 b 表示;后者称为产品的费用单耗 (Monetary Unit Consumption),简称成本,以 c 表示。

〈单耗分析理论〉认为:单耗(不论是燃料单耗和成本)都是由两部分组成,一是理论最低单耗 (theoretically minimum unit consumption),一是附加单耗 (unit consumption accrual)。理论最低单位耗是假设在生产中没有不可逆现象发生,构成系统的一切部件,设备没有任何耗损(它们的寿命其为无穷长),不消耗任何管理费、税金和其他的固定费用。理论(最低)单位耗可由下二式确定:

$$b_{\min} = e_p / e_f \quad (1)$$

$$c_{\min} = c_f b_{\min} \quad (2)$$

式中 e_p, e_f 分别为单位产品和单位燃料的烟值, c_f 为燃料的单价。

附加单耗是由几种原因引起的。设我们所研究的能量系统是由 n 个子系统组成,它们之间由 m 个流相联系。由于不可逆性所附加的燃料单耗向量 b 和与此相应的附加成本向量 c_F 以及子系统固定费附加成本向量 c_Z 分别为:

$$b = [b_1 b_2 \dots b_n]^T = [b_{\min} / P] A E(\tau) \quad (3)$$

$$c_F = [c_{F1} c_{F2} \dots c_{Fn}]^T = [c_f b_{\min} / P] A E(\tau) \quad (4)$$

$$c_Z = [c_{Z1} c_{Z2} \dots c_{Zn}]^T = (1/Q) Z \quad (5)$$

式中 p 为产品烟, $Q = P/e_p$ 为产品量, A 为系统中的各子系统和流的 $n \times m$ 阶联系矩阵, $E = [E_1 E_2 \dots E_m]^T$ 为流向量, $Z = [Z_1 Z_2 \dots Z_m]^T$ 为子系统固定费向量。

作为最终产品的单耗,其构成可从下列诸式中看出:

$$b = b_{\min} + b_0 + \sum b_i = b_{\min} + \sum_0^n b_i \quad (6)$$

$$c = c_{\min} + c_{F0} + \sum c_{Fi} + c_{Z0} + \sum c_{Zi} = c_{\min} + c_F + c_Z \quad (7)$$

其中 b_0, c_{F0}, c_{Z0} 等为额外附加单耗,前二者是由象启动过程这类无产品输出时的燃料消耗

D_0 引起的燃料单耗的增加和成本的增加,后者是由只与系统总体有联系的行政管理等固定费用 Z_0 引起的产品成本的增加。

上式中:

$$C_F = \sum_0^n C_{F1} \quad (8)$$

$$C_Z = \sum_0^n C_{Z1} \quad (9)$$

在能量系统中,有一类子系统的作用在于完成系统总体所规定的物质生产或能量转换任务,缺了它们中的任一个,则规定的任务将无法完成;另一类子系统则不然,它们的任务在于降低燃料单耗,降低产品成本。后者称为第二类子系统(设备),在不同的工况下,一个子系统的类属也有可能发生变化。在给定的工况下,某一第二类子系统解裂所造成的单耗提高值,称为该子系统的降耗效应,这一定义适用于燃料单耗的降耗效应 β ,也适用于成本降耗效应 θ ,对于子系统 I,二者的定义分别为:

$$\beta_I(\tau) == (\Delta b)_{I \rightarrow \text{vanish}}$$

$$\theta_I(\tau) == (\Delta c)_{I \rightarrow \text{vanish}}$$

3 一般化供热系统

为便于统一处理,不防把每种供热系统都加以分解,使它们都成为由一定数量的基本环节构成,图 2 所示,为一般化供热系统。在一般化系统中每一环节分别具有相对独立功能,便于局部分析综合或优化,而且各环节之间保持着子系统的串联连接,这是系统结构中,最简单的一种^[10]。因为每一环节也是一种特定的子系统,所以就其功能而言也有第一类环节和第二类环节之分。在以下的分析中,对所有可能的供热系统方案,其输入项均是实际耗用的化石燃料,而且均以用户得到的热量为产品,而不采用当前许多焓分析文献流行的燃料/产品的冗繁定义,且仅限于分析以化石燃料或核燃料为基础的供热系

统。

4 供热系统单耗分析模型

燃料的化学焓因燃料的种类而异,但均与其低发热量有关,前者与后者的比值见表 1^[1],根据表列数据,一般可近似假设燃料焓就等于其低发热量。

表 1

燃料的种类	天然气	燃料油	煤	焦炭	核燃料
燃料的化学焓与其发热量的比值	1.04	1.05	1.04	1.03	1.0

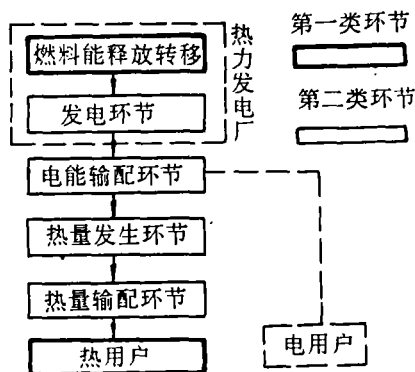


图 2 一般化供热系统

设环境温度为 T_0 ,热用户所要求的温度为 T_r 。由于

$$e_p = (1 - T_0/T_r) \text{ kWh}_{(火用)}/\text{kWh}_{(热)} \quad (10)$$

$$e_r = 814 \text{ kWh}_{(火用)}/\text{kg}_{(标煤)} \quad (11)$$

所以根据式(1)和式(2),供热系统的理论燃料单耗为: $b_{minq} = e_p/e_r$
 $= 122.86(1 - T_0/T_r) \text{ g}_{(标煤)}/\text{kWh}_{(热)} \quad (12)$

供热的理论最低成本为:

$$c_{minq} = c_r b_{minq} = 122.86 \times 10^{-6} c_r (1 - T_0/T_r) \text{ 元}/\text{kWh}_{(热)} \quad (13)$$

其中 c_r 的单位为元/t

根据式(3)(4)(5),对于供热系统中的环节 J ,不可逆附加燃料单位耗,不可逆附加成本和固定费附加成本分别为:

$$b_{jq} = (b_{\min q}/P)(E_J^n - E_J^{out}) \quad (14)$$

$$c_{PJ,q} = [c_r b_{\min q}/P](E_J^n - E_J^{out}) \quad (15)$$

$$c_{ZJ,q} = Z_J/Q \quad (16)$$

而作为供热系统产品——热量——的单耗则与理论单耗与有关环节附加单耗之和,即:

$$b_q = b_{\min q} + \sum_0^n b_{Jq} \quad (17)$$

$$c_q = c_{\min q} + c_{Pq} + c_{Zq} \quad (18)$$

供热系统附加单耗以及作为产品的热量的单耗也可以用另一种形式处理。设供热系统中从燃料化学能释放环节向用户方向的序号依次为 1,2,3,...,先考虑供热系统中第 J 环节的附加燃料单耗。如上所述 E_J^n 和 E_J^{out} 分别为环节 J 的净输入焓和有效输出焓。由于供热系统诸环节是串联结构,所以对所有环节均有如下关系:

$$E_J^n = E_{J-1}^{out} \quad (19)$$

于是根据式(14)(15)第 J 环节的不可逆附加燃料单耗与相应的不可逆附加成本分别为:

$$b_{jq} = (b_{\min q}/\prod_{i=1}^J \eta_i)(1/\eta_J - 1) \quad (20)$$

$$c_{JPq} = (c_r b_{\min q}/\prod_{i=1}^J \eta_i)(1/\eta_J - 1) \quad (21)$$

式中 $J = 1, 2, \dots, N$ 且

$$\eta_J = E_J^{out}/E_J^n \quad (22)$$

被定义为子系统 J 的焓效率或焓指数(exergy index),后者以 ε_J 表示。

由理论单耗与所有环节的附加单耗的总和可得供热系统所供热量的单耗:

$$b_q = b_{0q} + b_{\min q}/\prod_{i=1}^n \eta_i \quad (23)$$

$$c_q = c_{P0q} + \sum_0^n c_{Ziq} + c_{\min q}/\prod_{i=1}^n \eta_i \quad (24)$$

针对本文所提的一般化供热系统,上二式可写为:

$$b_q = b_{0q} + 122.86[1 - T_0/T_r]/[\eta_b \eta_w \eta_{WL} \eta_{WD} \varepsilon_Q \eta_{QL} \eta_{QD} \eta_{US}] \text{ g(标煤)}/\text{kWh}_{(热)} \quad (25)$$

$$c_q = c_{P0q} + \sum_0^n c_{Ziq} + 122.86 \times 10^{-6} c_r \times [1 - T_0/T_r]/[\eta_b \eta_w \eta_{WL} \eta_{WD} \varepsilon_Q \eta_{QL} \eta_{QD} \eta_{US}] \text{ 元}/\text{kWh}_{(热)} \quad (26)$$

其中: η_b —燃料化学能释放环节(锅炉)焓效率

η_w —发电环节(热机循环)焓效率

η_{WL}, η_{QL} —输电焓效率,输热焓效率

η_{WD}, η_{QD} —配电焓效率,配热焓效率

ε_Q —热量发生环节的焓指数

η_{US} —用户用热器焓效率

T_0 —环境平均温度

T_r —用户的用热平均温度

5 示例

为了文章的简洁,在以下的计算中暂限于考察燃料单耗,对供热的诸方案均设环境温度为 0°C ,用户的用热温度为 20°C ,在用户处供回水温度分别为 70°C 和 90°C ,对于额外燃料单耗也暂不考虑。在以下的分析中, T_R 代表在用户处的供热平均温度。

5.1 锅炉供热系统

锅炉供热系统只包含第一类环节,其损失有通常意义下 $q_1 \sim q_6$ 各项,这部分损失的大小体现在锅炉的“热效率”中,设其值为 0.65,此外它还有由于化学能的不可逆释放和向工质的不可逆传热所造成的损失,故其焓效率为^[1]:

$$\begin{aligned} \eta_b &= 0.65 \times (1 - T_0/T_R) \\ &= 0.65 \times (1 - 273/353) \\ &= 0.147 \end{aligned}$$

用户用热器焓效率为:

$$\begin{aligned} \eta_{US} &= (1 - T_0/T_r)/(1 - T_0/T_R) \\ &= (1 - 273/293)/(1 - 273/353) \\ &= 0.301 \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} b_q &= 122.86(1 - T_0/T_r)/(\eta_b \eta_{US}) \\ &= 122.86(1 - 273/293)/(0.147 \times 0.301) \\ &= 189.59 \text{ g(标煤)}/\text{kWh}_{(热)} \end{aligned}$$

其中

理论单耗[g/kWh]

$$122.86[1 - 273/293] = 8.39$$

附加单耗[g/kWh]

化学能释放转移环节

$$(8.39/0.301)(1/0.147 - 1) = 161.74$$

热用户处 $8.39(1/0.301 - 1) = 19.46$

5.2 电热

设电直接放在用户处,没有热输配问题,故 $\eta_{QL}\eta_{QD} = 1$,此外,设 $\eta_b = E_b^{out}/E_b^{in} = 0.512$, $\eta_w = E_w^{out}/E_w^{in} = 0.688$, $\eta_{WL}\eta_{WD} = 0.92$, $\varepsilon_Q = 1 - T_0/T_R = 1 - 273/353 = 0.227$,于是,根据式(25)

$$\begin{aligned} b_q &= 122.86[1 - T_0/T_r]/[\eta_b\eta_w\eta_{WL}\eta_{WD}\varepsilon_Q\eta_{us}] \\ &= 122.86[1 - 273/293]/[0.512 \times 0.688 \\ &\quad \times 0.92 \times 0.227 - 0.301] \\ &= 378.73 \text{ g}_{(标准)} / \text{kWh}_{(热)} \end{aligned}$$

其中

理论单耗[g/kWh]

$$122.86[1 - 273/293] = 8.39$$

附加单耗[g/kWh]

$$\begin{aligned} &\text{发电厂 } [8.39/(0.301 \times 0.227 \\ &\quad \times 0.92)] \times [1/(0.512 \times 0.688) - 1] \\ &= 245.34 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{电输配环节 } [8.39/(0.301 \\ &\quad \times 0.227)] \times (1 \times 0.92 - 1) = 10.65 \end{aligned}$$

热量发生环节

$$(8.39/0.301)(1/0.227 - 1) = 94.90$$

热用户处 $8.39(1/0.301 - 1) = 19.45$

5.3 热泵供热系统

热泵的性能通常用性能系数 COP 来表示。若 E_0^i 表示热泵的输入功, T_L 表示热泵从环境中吸热的低温热源温度,则理想热泵的 COP 值可按式(27)计算^[1]:

$$COP_r = [T_R/(T_R - T_L)] \quad (27)$$

热泵的焓效率为

$$\varepsilon_Q = E_Q^{out}/E_Q^i = COP/COP_r \quad (28)$$

设热泵从环境中吸热,且与用户的用热器融为一体,其性能系数按目前技术市场一般可

达 $COP = 3$,于是

$$\begin{aligned} \varepsilon_Q\eta_{us} &= COP/[T_r/(T_r - T_0)] \\ &= 3/[(293/(293 - 273))] = 0.205 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_q &= 122.86[1 - T_0/T_r]/[\eta_b\eta_w\eta_{WL}\eta_{WD}\varepsilon_Q\eta_{us}] \\ &= 122.86[1 - 273/293]/0.512 \\ &\quad \times 0.688 \times 0.92 \times 0.205 \\ &= 126.23 \text{ g}_{(标准)} / \text{kWh}_{(热)} \end{aligned}$$

其中: 理论单耗[g/kWh]

$$122.86[1 - 273/293] = 8.39$$

附加单耗[g/kWh]

$$\begin{aligned} &\text{发电厂 } [8.39/(0.205 \times 0.92)] \\ &\quad \times [1/(0.512 \times 0.688) - 1] = 81.77 \end{aligned}$$

电输配环节

$$(8.39/0.205)(1/0.92 - 1) = 3.55$$

热发生环节和热用户处

$$8.39(1/0.205 - 1) = 32.52$$

5.4 热电联产供热系统

热电联产供热系统具有与热泵供热系统相似的热力学实质,所以可把它按热泵系统处理,并把在给定的燃料消耗总量下电厂由于联产所少发的和多消耗的电作为发电环节供给热系统的当量电量,此当量简称为 $EECR$ (Electricity-Equivalent Consumption Rate)^[5],在这里没有输配电环节,其热量发生环节的焓指数被定义为热网加热器供出的焓与电厂的 $EECR$ 之比。

设有 200 MW 汽轮发电机两用机组,在额定工况下新汽初参数 12.75 MPa, 535℃, 中间再热参数为 2.15 MPa, 535℃, 给水温度 244℃, 除氧器压力 0.605 MPa, 有 3 级高加, 4 级低加, 主蒸汽流量为 610×10^3 kg/h, 供热抽汽量为 405×10^3 kg/h, 热网载热质为水, 热网加热器水侧的温度为 120/70℃, 热网终端供给用户的热水温度为 90/70℃, 热网的散热为 1℃/km, 流动阻力为 50 kPa/km。根据以上机组额定负荷数据算得

$$EECR = 55946.5 + 1230 = 57176.5 \text{ kW} \text{ (热网泵功已计入)}$$

热量发生环节的焓指数

$$\begin{aligned} \epsilon_Q &= E_{Q^{out}}/EECR \\ &= 73081 \text{ kW}/57176.5 \text{ kW} \\ &= 1.278 \end{aligned}$$

热量输配环节焓效率

$$\eta_{QL}\eta_{QD} = 25\ 037.8 \text{ kW}/73\ 081 \text{ kW} = 0.343$$

因此

$$\begin{aligned} b_Q &= 122.86[1 - T_0/T_1]/[\eta_b\eta_w\epsilon_Q\eta_{QL}\eta_{QD}\eta_{us}] \\ &= 122.86[1 - 273/293]/[0.152 \times 0.688 \\ &\times 1.278 \times 0.343 \times 0.301] \\ &= 180.44 \text{ g}_{(标准)}/\text{kWh}_{(热)} \end{aligned}$$

其中

理论单耗[g/kWh]

$$122.86[1 - 273/293] = 8.39$$

附加单耗[g/kWh]

发电厂

$$\begin{aligned} &[8.39/(0.301 \times 0.343 \times 1.278)] \\ &\times [1/(0.512 \times 0.688) - 1] = 116.91 \end{aligned}$$

热量发生环节 [8.39/(0.301

$$\times 0.343)](1/1.278 - 1) = -17.68$$

热输配环节

$$(8.39/0.301)(1/0.343 - 1) = 53.36$$

$$\text{热用户处 } 8.39(1/0.301 - 1) = 19.46$$

6 结 论

本文主要是提出了一个方法,便于对常用的几种供热系统方案作技术经济横向比较,从本文最后所提供的算例可以看出,本文所提出的供热系统(单耗分析)模型,具有通用性的特点和科学的理论依据。

参 考 文 献

- 1 宋之平,王加璇.节能原理.水电出版社,1985
- 2 宋之平.单耗分析的理论和实施.中国电机工程学报,1992,12(4)
- 3 宋之平等.能量系统的单耗分析.热力学分析与节能论文集,科学出版社,1993
- 4 宋之平.〈单耗分析〉中经济因素的处理.热能动力工程,1995,10(4)
- 5 Zhi-Ping Song, et al. Indigenous construction of sizeble desalination units for dual purpose power plant in China. Energy,1991,16(4)
- 6 Behr H D. Zur Thermodynamik des Heizens. BWK, 1980, 32(1),9~15
- 7 Behr H D. Thermodynamik,1978
- 8 Gaggioli R A, et al. A critical review of second law costing method. Journal of Energy Resouce Tehnology, Vol. 111, No. 3
- 9 Kotas T J. The exergy method of thermal plant analysis. Butterworths,1985
- 10 G. 格隆.过程系统工程.化学工业出版社,1983

我国建成一批潮汐发电站

开发无污染、可再生的能源是世界各国的努力方向。潮汐发电是这类能源中的一种。我国已建成8个潮汐发电站,总装机达6120千瓦。

我国海岸线长达1.8万公里,海水潮落产生的动能和势能每年可供发电600多亿千瓦时。

目前已建成国内最大的潮汐发电站是位于浙江省温岭县乐清湾的江厦试验电站,该电站涨、退潮都能发电,装机5台,总容量3200千瓦,年可发电1100千瓦时,是继法国、加拿大之后的第三大潮汐电站。这座电站全部由我国自己设计,全部设备均为自行开发的。

necessitates a test rig compatibility design. This paper gives a detailed description of the said design philosophy and process, and analyses the stage characteristics of the three-dimensional flow blade wheel, which provides a reliable basis for the uprating-oriented modification of the compressor. **Key words:** axial-flow test rig, centrifugal stage test, test rig compatibility test, multi-function stage characteristics.

电站锅炉汽温问题的现状及应采取的对策 = The Present Status of Utility Boiler Steam Temperature Problems and Some Countermeasures [刊, 中]/Liu Linhua, Yu Qizheng, et al. (Harbin Institute of Technology), Xu Wanli (Harbin University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(5). -297~300

Some existing problems relating to utility boiler steam temperature are reviewed and the present status of steam temperature research in China presented with the future main direction of experimental research in this field being proposed. **Key words:** boiler, steam temperature, present status, countermeasures

宽调节比燃烧器空气动力场的数值模拟 = Numerical Simulation of the Aerodynamic Field of Wide-range Burners [刊, 中]/Liu Guisu, Chen Shiyong, et al (Huazhong University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(5). -301~304

A numerical calculation was performed of the aerodynamic field of a wide-range burner through the use of $k-\epsilon$ model. Obtained were the axial speed in the flow field, turbulent kinetic energy and the dissipation rate distribution of the said energy. The difference between the wide-range burner and a conventional one was compared and analyzed with calculation results being used to analyze the location of the wide-range burner bluff body and the effect of bluff body side width on the burner flow field structure. **Key words:** burner, numerical simulation

供热系统“单耗分析”模型 = “Unit Consumption” Model for a Heat Supply System [刊, 中]/Song Zhiping (North China Electrical Engineering University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -1996, 11(5). -305~310

Starting with a simple outline of the “unit consumption analysis” theory and method proposed by the author a generalized model was set up for a modern heat supply system. With regard to this model the fuel unit consumption for boiler heat supply, electric heat supply and heat pump heat supply was calculated with a calculation formula for heat supply cost being given, which is readily applicable for specific engineering cases. **Key words:** heat supply, unit consumption, cogeneration, exergy saving, exergy

风水共冷式冷渣器的换热计算 = Heat-transfer Calculation of a Slag Cooler Cooled by Air and Water [刊, 中]/Zhao Guangbo, Zhu Qunyi, et al. (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(5). -311

水泥窑余热锅炉窄点温差 = Heat Recovery Boilers for Cement Kilns and Their Pinch Temperature [刊, 中]/Yu Zhimin, Gao Jiguo (Harbin Boiler Co. Ltd.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(5). -312~314

Key words: cement kiln heat recovery boiler, pinch point temperature