

余热回收和利用 ——

余热回收和利用学术会议论文选编

中国工程热物理学会能源利用学会
中国机械工程学会动力工程学会 合编

余热回收和利用——

余热回收和利用学术会议论文选编

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国工程热物理学会能源利用学会 合编
中国机械工程学会动力工程学会

北京·1990

前 言

中国工程热物理学会能源利用学会和中国机械工程学会动力工程学会，在1987年6月联合召开了余热回收和利用的座谈会，在此基础上，1988年7月召开了全国性的余热回收和利用的学术会议。《余热回收和利用》是由这二次会上所交流的论文中选编的。

本选编较全面地介绍我国现代余热利用的技术水平和研究成果，并讨论了目前存在问题及今后方向。有理论上的研究，有技术的应用，还有对管理的建议。内容涉及各行各业，是一本余热利用综合性的材料。因篇幅所限，某些论文作了不同程度的删改。

本选编由蔡睿贤、尹锡勋主编，徐辉任责任编辑，由马同泽、赵秉增、杨士正、刘登瀛、吴正宽、李德平、廖万彬等编辑。本专刊各篇文章均反映作者自己的看法，并不代表学会或编辑们的意见，数据也未经一一核实。选编中难免有错误和不当之处，欢迎批评指正。

编 者

1989年3月

目 录

第一部分 总能系统的优化与评价

确定可用余热基准的方法	陈之航 黄 晨 宋 慧 陈红兵 刘 海 (1)
热力装置的能源利用性能评价准则	蔡睿贤 (8)
炼油厂蒸汽系统最优改造方案的确定	沈幼庭 石维潭 袁小雄 (12)
热泵供热的节能判据与评价	李 晔 (17)
中低品位余热动力回收系统的热力学优化和烟分析	李 明 (21)
一个热电冷联产工程方案介绍及经济分析探讨	赵吉生 (28)
余热和余热利用的热力系统	赵秉增 (33)

第二部分 高品位余热回收系统

我国高温余热利用的现状与前景	刘登瀛 贾建国 (39)
余热锅炉的现状与展望	吴亦三 (44)
余热回收与换热器的发展	王盛沧 (50)
旋转管式换热器的试验研究	裘烈钧 王立秋 孙云凤 (54)

第三部分 中低品位余热回收系统

炼油厂低品位余热动力回收的实验性ORC装置	王补宣 朱明善 王维城 刘 颖 石维潭 赵 波 (57)
运用有机质全流系统回收余热	胡亮光 王之安 范文伯 庞风彪 吕灿仁 (61)
强化相变传热及其对低位余热回收利用的重要作用	王维城 王补宣 朱明善 张立宁 (68)
水蒸汽—CO ₂ 地热发电汽轮机工作特性的热流体力学分析	魏保太 赵 峰 王 艳 (73)
玻璃管空气预热器在工业锅炉上的应用	阎玉英 卓 宁 孙家庆 马其良 (80)
热管技术在工业余热利用中应用的现状和前景	马同泽 张正芳 (83)
余热利用热管换热器的设计与热管元件的传热性能实验	辛明道 陈远国 石程名 黄大钟 倪德斌 陈 岗 夏吉良 谢欢德 高明聪 何 川 (90)
热管空气预热器在工业锅炉上应用的合理性	陈听宽 俞建洪 (94)
回转式热管的试验研究	吴金土 (99)
我国热泵技术现状、应用前景和存在问题	吕灿仁 (109)
热泵用于干燥	张如一 (115)
蒸汽喷射式热泵在工业节能中的应用	阎尔平 胡 杰 王 剑 (120)

膜式吸收式热泵的模型化、模拟和实验.....陈耀东(125)

地热吸收式热泵在农村供热中的应用.....张 启 顾维隼(131)

公路客车热管采暖装置的研究.....苏俊林 吴淑美 郝玉福(137)

第四部分 行业余热资源及利用

我国工业余热利用现状及发展方向.....尹锡勋(141)

上海市余热资源分布及回收概况.....万寿柏 刘正武 陈之航 赵学端(149)

钢铁工业余热利用的我见.....范志增(155)

我国化学工业余热利用的现状与前景.....廖万彬(162)

有色冶金余热利用情况及展望.....刘忠义 吴幼奋(167)

制浆造纸企业的供热及热能利用.....毛元章(172)

从糖厂总能系统优化中解决余热回收利用的重要性分析.....陈振林(177)

燕山石化公司余热利用动态.....乌美芳 李德平 石维潭(184)

长岭炼油化工厂低温余热发电——供热装置的应用及评价.....黄孔德(190)

※ ※ ※ ※

余热回收和利用学术会议纪要.....(194)

附表1：全国余热资源及利用情况.....(198)

附表2：主要耗能行业余热利用措施、成绩与潜力.....(199)

附表3：建议可推广应用的项目.....(202)

附表4：建议的研究课题和开展的试验项目.....(204)

附件一：“总能系统的优化与评价”学术组小结.....(198)

附件二：“高品位余热回收系统”学术组小结.....(208)

附件三：“中、低品位余热回收系统”学术组小结.....(212)

附件四：“行业余热资源及利用”学术组小结.....(214)

第一部分 总能系统的优化与评价

确定可用余热基准的方法

上海机械学院 陈之航 黄 晨 宋 慧 陈红兵 刘 海

摘 要

本文以余热的质和量为依据,考虑余热回收的技术因素和经济因素,分析了余热的可用性。并以此为基础建立了用回收年限判别可用余热基准的数学模型,得出了判别余热可用程度的可用余热基准线。文中最后以工业锅炉烟气余热为例,计算得到了工业锅炉烟气可用余热基准线。

一、问题的提出

所谓可用余热,就是工业生产排放余热中可以进一步回收利用的余热,而可用余热基准,则是判别余热是否可用的准则,如果余热状态处于可用余热基准时,则该余热的可用余热量为零。如何正确确定可用余热基准以及计算可用余热,是指导余热利用深入开展的一个关键问题。

目前余热量的计算方法一般有两种:焓计算法和熵计算法。焓计算法以 0°C 为基准,根据热力学第一定律确定能量;熵计算法则以环境状态参数为基准,以热力学第二定律为依据,确定理论上的可用能量。前者计算简便,反映了余热的量,但缺少余热质的体现;后者则同时反映了余热的质和量,并用能级(熵值与焓值之比)进一步确定理论上余热做功的能力⁽¹⁾。然而,余热的可用性不仅仅取决于余热的质量,还取决于余热回收的技术水平,以及余热回收所带来的经济效益等实际因素。设想略高于环境状态的余热,其熵值不为零,而它的利用价值是极小的。众所周知,余热利用是以达到一定的经济效益为宗旨,如果回收一定量的余热所带来的经济效益还不够补偿余热利用本身所耗的费用,那么,该余热利用就失去了意义,其中经济效益又与所用的余热设备密切相关。为此,本文提出:以余热的质和量为依据,考虑回收利用的技术水平和经济等因素建立可用余热基准,采用焓差计算法确定可用余热量。

对于可用余热量的计算,目前常用的方法是:针对某一具体余热利用事例,以从换热设备中回收的实际热量作为可用余热量⁽²⁾。对某一余热流,如果采用这种方法,似乎很难确定其可用程度以及可用的余热量,因此本文所提出的可用余热基准,应能对某一还未被利用的排放余热进行可用性判别,进而确定其可用余热量。

二、影响基准的主要因素

可用余热基准是划分余热是否具有可用性的判别依据,因此,它的确定必须尽可能地反

映余热的可用性。有人将烟气回收基点定为200℃，忽略了余热的量的影响。高于基点的300℃烟气，如果量少，可用性未必高于200℃量多的烟气。因此，高品位量少的余热和低品位量多的余热可能具有同等的可用性，所以，可用余热基准不是一个确定的数值，而是一个变量，是随余热质量的不同而变化。实际上，余热质量相同的液态余热与固态余热其可用性也是不同的，因此，可用余热基准必须按余热形式分别确定。

由于可用余热基准是余热可用与不可用的界限，所以它所涉及的余热一般是低温余热。低温余热利用的途径通常借助于换热设备，以换热的手段回收一定量的余热，得到一定的经济效益。基准越低，余热回收的技术难度就越高，所带来的经济效益也就越低，因此余热利用所选用的设备在技术上必须是可行的，经济上是合理的。即：在当前科学技术发展的水平下，选用目前已经批量生产的低温余热设备作为确定可用余热基准的技术依据，以其回收余热所带来的经济效益低到能被用户所接受的余热质量作为可用余热基准。

一般低温余热利用的设备形式不是唯一的，这可以通过社会调查确定。余热利用经济性评价方法一般有许多，评价指标各不相同，其中余热利用投资回收年限是企业界们比较关心的一个指标，为此本文以回收年限作为建立可用余热基准的经济性因素。

三、建立模型和提出方法

回收年限的概念就是每年所得净利润用于回收总投资所需的年限。假定每年偿还能力相同，考虑项目贷款至设备开始服务的建设期，⁽⁸⁾如果将余热设备运行后的每年收入与支出折算至设备建设初期，则：

$$C = \frac{P-S}{(1+i)^J} \left[\frac{1}{1+i} + \frac{1}{(1+i)^2} + \cdots + \frac{1}{(1+i)^{R-J}} \right]$$

$$\text{即：} \quad C = (P-S) \frac{(1+i)^{R-J} - 1}{i(1+i)^R} \quad (1)$$

C ——余热利用初投资 元

P ——余热回收年总收益 元/年

S ——余热回收年运行、维修等开支费用 元/年

i ——贴现率 %

J ——建设期 年

R ——回收年限 年

设余热流的焓为 I 、流量为 G 。一般余热利用的投资和年收支与余热流焓和流量有关，但投资与年支出主要取决于余热流量，故存在：

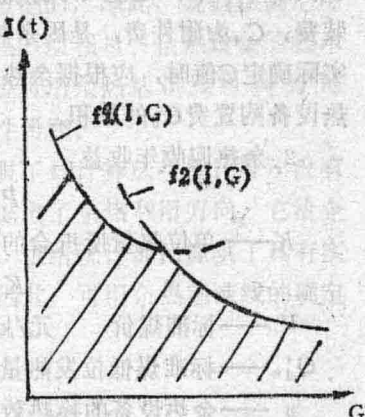
$$C = f_1(G); \quad P = f_2(I, G); \quad S = f_3(G)$$

因此，对于某一余热形式，采用一定的余热设备，在一定的工业贴现率下，有：

$$R = f(I, G) \quad (2)$$

即：回收年限是余热质量的函数。如果以余热流焓或者温度作为余热品位，以余热流量或余热量 Q 作为余热的量，从以上分析及本文后面的论证，可以得出结论：余热品位越高，达到同样回收年限的余热量就可以减少，反之，余热品位越低，达到同样回收年限的余热量就必

须增加。在 $I-Q$ 或者 $t-Q$ 二维坐标系上, 根据式 (2) 便可以画出一根等 R 线。如果某一余热形式的低温余热回收设备有两种, 便可画出两根等 R 线, 如图1所示, 两根等 R 线相交将整个平面划分为二部分, 左下侧阴影区为不可用余热区, 右上侧为可用余热区, 其交界线为可用余热基准线。如果有 M 种低温余热设备, 则可根据不同区域最低的等 R 线连接得到可用余热基准线。当某一余热形式的可用余热基准线确定后, 便可判别这一余热形式的某一状态是否可用。如果已知排放余热的焓 I (或温度 t) 和余热量 Q (或流量 G), 就可以在上图找到该余热的状态点, 如果位于可用余热基准线的右上侧, 则该余热可用, 如果位于左下侧则为不可用。



在计算可用余热量时, 还必须了解余热设备技术上可回收的最低余热品位 I_0 (或 t_0), I_0 (或 t_0) 与余热的形式有关, 对于烟气余热一般采用热交换器回收余热, 可取烟气酸露点为技术上可回收的最低品位, 对于采用具有耐腐蚀性能的热交换器, I_0 值还可降低, 对于空气余热可以环境状态作为 I_0 ……。如图2画入已确定的 I_0 (或 t_0) 线, 当某一余热状态处于可用区内状态点 W , 则由 W 点作斜率 $1/G$ 的直线, 与 I_0 线相交得点 Z , (如果 $t-Q$ 坐标, 斜率为 $1/GC$ 直线与 t_0 线相交, C 为余热流比热), 或者 W 点与坐标原点 $(0, 0)$ 相连接 I_0 线于 Z , 则 W 状态点余热的可用余热量为:

$$\Delta Q = Q_w - Q_z \quad (3)$$

由于可用余热基准线的确定采用了几种设备形式, 所以, 实际使用时还可根据余热状态所处的区域, 推荐合适而又节能的回收设备。如图2在 A 、 B 两种余热设备基准线的连接点 V 上, 向右上侧作斜率为 $1/G$ (或 $1/GC$) 的直线, 将可用区划分为 A 和 B 两个区域, 对于 A 可用区, 推荐采用回收设备 A , 如图中状态点 W ; 对于 B 可用区的状态点, 则推荐采用回收设备 B 。当然回收设备还应根据现有条件及实际情况等因素综合选择, 这里仅从节能的角度提供选择设备的考虑因素。

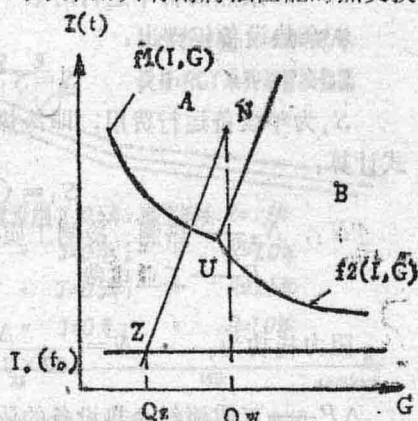


图2 可用余热量的作图求解

四、各参数的确定方法

1. 初投资: 作为一个余热利用系统, 其初投资不仅应包括余热回收设备的购置费、安装费等, 还应包括整个系统所有设备费用 (如果是热水余热采暖系统, 则应包括管道、阀门、散热片、水箱等), 但要说明一点, 如果没有余热可用, 用热单位本身也需要设计提供一次或二次供暖系统满足用热需要, 因此本方法中采用的初投资仅计算因采用余热设备回收余热所增加的追加投资, 即:

$$C = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad \text{元} \quad (4)$$

上式中: C_0 为余热设备购置费; C_1 为余热利用设计费用, 一般根据工程难易程度取总

投资的2~5%，这量可取余热设备总投资的2~5%； C_2 和 C_3 分别是余热设备的运输费和安装费； C_4 为附件费，是因余热回收所增的附件费用； C_5 为其他费用（如征地费用等等）。实际确定 C 值时，应根据余热形式和性质，广泛调查，尽可能将各项费用归为某一系数与余热设备购置费 C_0 的乘积。

2. 余热回收年收益：

$$P = K \eta G (I - I_0) H \quad (5)$$

K ——单位热量所折合的人民币，这里建议采用标准煤作为中间量，即：

$$K = V / Q_{dw} \quad \text{元/kJ}$$

V ——标准煤价 元/kg标准煤

Q_{dw} ——标准煤低位发热量， $Q_{dw} = 29260 \text{ kJ/kg 标煤}$

η ——余热设备的换热效率，它是冷侧工质吸热量与热侧工质放热量之比 %

I ——余热流焓，即余热设备热侧介质进口焓 kJ/kg

I_0 ——余热设备技术上可回收的最低品位，即设备热侧介质出口焓 kJ/kg

H ——余热设备年运行时数 h/a

3. 余热设备年支出：

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 \quad (6)$$

S_1 为年设备运行费用，即冷热两侧工质采用余热设备换热所增阻 P 的耗能费用，可用下式计算：

$$S_1 = (N_1 + N_2) H D \quad \text{元/a} \quad (7)$$

N_1, N_2 ——热侧、冷侧工质阻力所耗功率 kW

D ——工业电费 元/kWh

$$\text{阻力耗功为：} N = \frac{\Delta P G}{102 \times 3600 \times \eta_p \times \gamma} \quad \text{kW} \quad (8)$$

ΔP ——工质流经余热设备的阻力 mH_2O

η_p ——风机或泵的效率 %

γ ——工质比重 kg/m^3

S_2 为余热设备维修费， S_3 和 S_4 为余热设备的保险费和税金， S_5 为其它支出费。为避免重复计算，支出费用中没有考虑设备折旧费。

4. 年运行时数 H ：从以上年收支计算中可知，回收年限的计算与年运行时数选取密切相关， H 值选得越大，在其他条件都相同的情况下，回收年限就减少，反之亦然。

用等回收年限确定可用余热基准线还受到科学技术进步的影响。随着科学技术的发展，余热利用会逐步突破低温余热的技术难关，对更低品位的余热加以利用，可用余热基准线就会逐步下移。所以，基准必须划年代确定，一旦采用某种新技术突破了基准线，并且这种新技术得到社会一致公认，新设备得以批量生产，那么就应该在新技术的条件下，重新确定新的可用余热基准线。

实际上，影响可用余热基准线的因素还有许多。例如：供求的合理性，某一状态的余热是否存在相应的用户，如果单纯为回收余热而回收热量，那就是浪费；又如年收支中没有考虑因回收余热而节省的人工费用和减少的维修费用，以及余热利用对污染影响等社会性问题。可用余热基准要同时考虑众多因素，会使可用余热基准确定复杂化，不适用于工程应

用,况且,可用余热基准本身是对现有余热进行可用性的初步判别,所运用的经济、技术因素是在假想余热借助于设备得以利用后可能带来的效益基础上考虑的,因此,我们在确定可用余热基准时仅仅考虑几个主要影响因素,即余热的形式、余热的质和量、余热设备的技术和经济性,以及可用余热基准的确定年代。对于某一余热形式经可用余热基准线判别为可用,并准备实施该余热利用项目,则还需对其进行细致的可行性研究。

本文提出的可用余热基准线确定方法,在某种程度上,克服了焓算法与熵算法没有考虑经济性因素,而难以判别实际余热可用性的缺点,宏观地提出了余热利用方向,它给企业决策者提供了粗略确定余热可用性及其利用潜力大小的依据,也给统计部门提供了具有实际意义的余热统计方法,它将促使我国余热利用的深入开展,因此,可用余热基准线的确定具有一定的现实意义。

五、工业锅炉烟气可用余热基准线的确定

经过多方调查,一般低于 350°C 的低温烟气余热回收设备形式有热管换热器和硼硅玻璃管空气预热器,通常作锅炉空气或给水预热,以提高锅炉热效率。现以上海地区生产的RGY和RGK系列的热管换热器,玻璃管空预器进行计算,基准线确定时采用 $t-Q$ 坐标系。其结果见图3至图6。

图3为贴现率和建设期对可用余热基准线的影响,计算采用RGY系列热管换热器,由图可知:贴现率和建设期的影响不大。因此在后面的计算中均采用贴现率 $i=15\%$ 与建设期不考虑的组合进行计算。

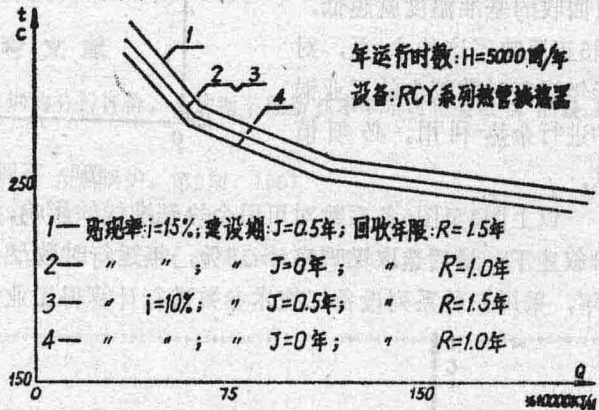


图3 不同贴现率和建设期的可用余热基准线

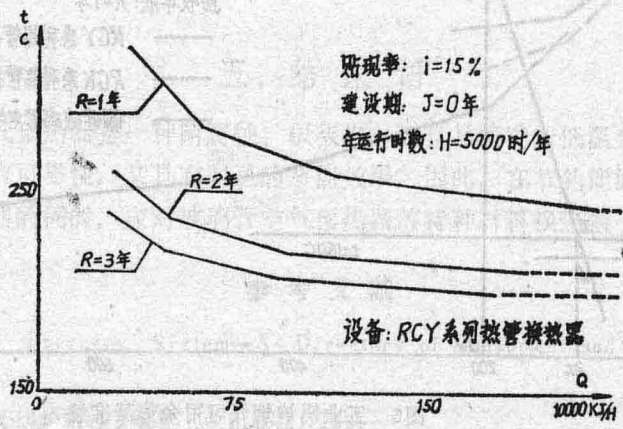


图4 不同回收年限的可用余热基准线

图4清楚地显示了回收年限对基准线的影响,回收年限越长,达到回收年限的基准温度

就越低,回收年限对基准线的影响也就越小。如果某一余热状态点用回收年限为1年的基准线判别为可用,则用大于1年的基准线(如2年)判别必然可用,反之就不然。因此建议采用

回收年限为1年确定可用余热基准线。对于超出系列容量范围的大容量余热,若仍采用原系列设备,均采用并联方式确定基准线,由于并联后投资、年收支几乎均成倍增加,所以基准温度不变,基准线为一水平线,如图4中虚线所示。

设备年运行时数越多,在同样回收年限的条件下,可回收的基准温度就越低,图5正反映了这种关系,对于年运行时数较少的工业锅炉进行余热利用,必须慎重。

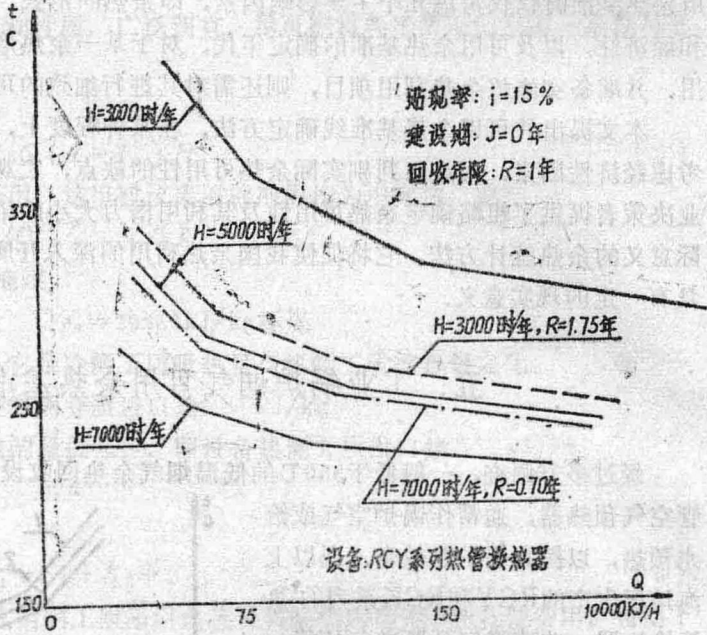


图5 不同年运行时数的可用余热基准线

以上图3至图5各系数对可用余热基准线的影响,其他换热设备也同样存在,这里就不逐一叙述了。最后选取贴现率 $i=15\%$,年运行时数 $H=5000\text{h/a}$ 。建设期不考虑,回收年限为1年,采用三种系列设备二技术参数进行计算得工业锅炉烟气可用余热基准线,见图6。当然

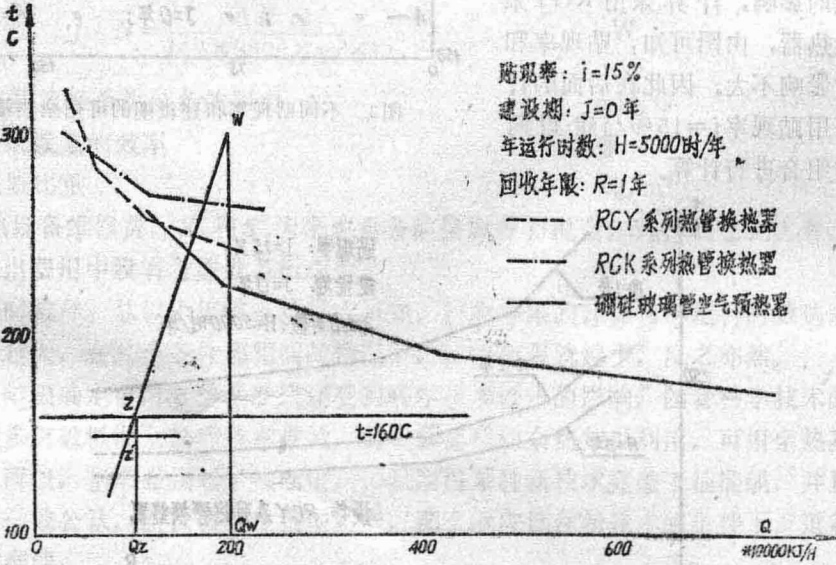


图6 工业锅炉烟气可用余热基准线

工业锅炉低温烟气余热利用的设备不仅仅是图中三种,这里选用三种设备计算仅为说明本文所提出基准线的确定方法。由于本文采用的热管换热器要求烟气进口温度不得超过 350°C ,玻璃管空预器烟气进口温度不得超过 260°C ,所以实际使用时还必须根据余热品位选择适合的

换热设备。作为判别余热的可用性,图6中所提供的可用余热基准线还是比较可靠的,计算选用的设备越多,可靠性就越大。现以一例说明基准线的使用方法,某工业锅炉排放烟气余热温度为 300°C ,流量 6000kg/h ,则 $Q=GCt=202\times 10^4\text{kJ/h}$ 得状态点 W ,由图6中可用余热基准线判别,如果锅炉年运行时数多于 5000h ,按回收年限为一年的基准线判别,该状态余热是可用的,由于烟温大于 260°C ,在图中提供的设备中可选用RGY、RGK系列热管换热器回收热量,余热的可用程度在选用RGY系列时要大些,将 W 点与坐标原点 $(0,0)$ 相连得 WO 线,和 $t_0=160^{\circ}\text{C}$ 相交于 Z ,则可用余热量 $\Delta Q=Q_w-Q_z=96\times 10^4\text{kJ/h}$ 。如果该炉所烧的煤种含硫量较低为 $S''=2.4\%$,则由〔4〕中式(14)计算得 t_0 为 150°C ,那么图6中的可用余热基准线的热管设备部分均下移 10°C ,可用余热量为 $\Delta Q=Q_w-Q_z=102\times 10^4\text{kJ/h}$, Z' 为 WO 线与 $t'_0=150^{\circ}\text{C}$ 线的交点。

可用余热基准线要真正用于统计部门作为余热统计和企业余热可用性判别,还有许多地方需要完善,本文将继续探索可用余热基准线的细化问题,使其真正推动和促进余热利用的深入开展。

(说明:本文图中RCY和RCK均应分别为RGY和RGK。)

参 考 文 献

- 〔1〕 徐业鹏等:对冶金企业余热资源的焓和烟的分析评价,《沪浙节能新技术学术讨论会论文汇编》1983.5
- 〔2〕 韩岷:“余热回收利用的几个计算公式”,余热锅炉,第2期,1987
- 〔3〕 黄志杰等编:《能源管理》,能源出版社,第一版,1982.9
- 〔4〕 黄晨、陈之航等:“确定可用余热基准的方法”,余热(含低品位)回收和利用学术会议论文,北京,1988.7

(上接第82页)

料(碳钢管)的酸腐蚀;2)受热面积灰和堵灰(而且清灰较困难)。这些问题都会影响热管的使用寿命。腐蚀现象严重时还会导致热管报废。而玻璃管恰恰在这些方面有其独特的优越性。

五、结 束 语

硼硅玻璃管空气预热器是一种耐腐蚀、积灰少,而且易清洗的低温余热回收装置,在工业锅炉上应用既具有可靠性,又具有明显的节能效果。因此,在节约能源的工作中,在大力开发各种高效换热器的同时,应对玻璃管空气预热器等特种材料换热器予以充分重视。

参 考 文 献

- 〔1〕 Reay D.A: Heat Recovery System—A Directory of Equipment and Techniques London Spon, PP42—52, 1979.
- 〔2〕 陈学俊、陈听宽:《锅炉原理》机械工业出版社,1981
- 〔3〕 上海机械学院,上海化工机械二厂:“工业锅炉用硼硅玻璃管空气预热器工业性试验报告,1985,3
- 〔4〕 阎玉英、卓宁、孙家庆:玻璃管空气预热器的阻力特性研究,上海机械学院学报 1987,第一期P33—38
- 〔5〕 阎玉英、卓宁、孙家庆:玻璃管空气预热器的优化设计,上海机械学院学报,Vol10, No. 1, P33—40.

热力装置的能源利用性能评价准则

中国科学院工程热物理研究所 蔡睿贤

摘 要

如何评价热力装置、尤其是功热并供装置能源利用性能的好坏,目前国内外还有不少模糊认识,有时甚至会影响到生产与生活的发展。本文从工程热力学、经济效果及国民经济需要等方面分析了此问题,提出了广义炯效率的概念,并建议使用其中的经济炯效率或当量炯效率作为通用的评价准则。

一、序 言

人们要评价任何事物,都会用某一定的准则来进行比较,以决定其优劣。以体育运动为例,跳高、赛跑、十项全能、体操……就都有不同的评价准则,而且越后越复杂。可见,评价准则是随着事物的不同而不同;对内容越复杂的事物,越要全面评价,评价的准则也就越繁或越难,然而却又是必须的。对热力装置中能源利用得好坏的评价,也有类似情况:越是复杂的装置——例如功热并供,越要全面评价——例如要区分功与热的不同,就越不能用简单的评价准则。但是,作为评价准则,只要能够基本反映所评价事物好坏的总体情况,还应该是越简单越好,而且最好能以一个单一明确定量的总的准则来表达。如果有多个准则,就得设法将它们定量综合为一个。体育运动大都如此(如十项全能和体操比赛),否则就不能评出名次。热力装置中也有类似情况。我们应当努力研究确定出一个单一的能全面定量综合评价热力装置的但又越简单越好的评价准则。

另一方面,从上面体育运动的举例,也可看到,评价准则并不是可以任意规定或者很容易规定的。如果定得不好,就会难以或没有实际反映出所评价事物的好坏,甚至会直接影响所评价事物的发展。对热力装置,也有类似情况;评价不真实、不公平,会影响到它的发展以及对国民经济的贡献。所以,研究与正确定出评价准则,并不是脱离实际、咬文嚼字、不起作用的学究气钻牛角尖,而是对促进四化有重大作用的一项工作,应予重视。

二、总能利用效率(系数)

现在比较普遍采用的评价热力装置的准则是总能利用效率(总能利用系数),有时也名为总效率、热效率……等等,定义是:

$$\eta = (W + Q) / E \quad (1)$$

其中分母是输入的能量 E ,分子则是输出的能量,不论是功 W 或热 Q ,都一样看待。在输入能量是化石燃料的化学内能时, E 通常用燃料总的低发热值来表示,于是公式变为:

$$\eta = (W + Q) / f H_u \quad (1a)$$

式中 f 为燃料耗量, H_u 为其低发热量。这个定义对只出功的热力装置是合适的,但对功

热并供装置,就有一定问题;因为原来经典热力学中热机热效率的严格定义是:

$$\eta_t = W/E \quad (2)$$

其分子只包括输出功 W ,而现在总能利用效率(借用的热效率)公式(1)的分子却连输出的有用热 Q 也都包含在内了。大家知道,根据热力学第二定律,功能够全化为热,而热是不能全化为功的。换句话说,它们虽然都是能量交换的表现,可以用同一量纲表达,但都有明显的品位差别,功的品位比热高。总能利用效率式(1)仅按照热力学第一定律的热、功当量概念而将之混为一谈,简单相加,显然是不全面的。另外,从促进国民经济发展与提高人民生活水平来看,这样做也没有反映四化的需要,历史上随着生产的发展与生活的改进,对功的需求比对热的需求也会越来越多。估计近来我国一次能源总的功、热利用比值约为0.4^[1]。但从我国目前电力与运输的紧张程度可见,实际上对功的需求要大得多。80年代初日本与美国相应的比值约各为1.0与1.5。可以预期,我国的功利用近年内还需要有更快的发展。所以,总能利用效率式(1)中将功与热混为一谈,也不反映生产与生活发展的客观需要。还有,功与热在经济上的价格也不是等量的。实际上当功(电)与热都按同样的能量单位来出售时,功比热值钱得多,一般要差五、六倍。所以,从纯经济观点看,将功与热混为一谈的评价准则——总能利用效率,也有不当之处。

因此,虽然总能利用效率或热效率是目前应用最广的热力设备评价准则,也很简单明了,但却有不少缺点。例如,常常会宣传某一热力设备的热效率很高,已经高达70~80%。但是实际上很可能它们是只供热或出功比例很小的热力装置,在各种意义上都不一定是个很好的设备。如果只供热,较大型锅炉可以很轻而易举地超过上述指标数据。

既然总能利用效率的不足是功热不分,于是有人提出了一个补救措施,补上另一个准则,热力装置输出的功热比 R :

$$R = W/Q \quad (3)$$

评价时要同时用上总能利用效率和功热比两个准则。两个指标都高的才是性能较好的热力装置。这样评价当然是更全面而合理,但也有很大欠缺,就是同时有两个独立的评价准则,往往还是难以评定不同装置的优劣。例如两台装置各有一种评价准则指标较高,就很难说那一台较好。所以,最好还得有一个单一的综合评价准则。

三、炯效率与当量炯效率

最普遍的将功与热合并到一个合理的综合指标中来统一评价的准则是炯效率。它是将热力装置输出的炯比输入的炯而得,写成公式就是:

$$\eta_c = A_{\text{输出}}/A_{\text{输入}} \quad (4)$$

式中 A 是炯(意义见后)。当输入能量主要是燃料的化学内能是,为了使炯效率能与一般的热效率或总能利用效率相对应,经常将(4)式中的分母也与(1a)式一样改用 fH_u ,得到所谓当量炯效率:

$$\eta_c = A_{\text{输出}}/fH_u \quad (4a)$$

它的数值通常与(4)式定出的值差别很少。于是,当不输出热时,当量炯效率及总能利用效率均可退化为普通的热效率。

炯表示一定参数工质在已知环境下所能做功的最大可能性(开口体系的炯 $A = H - T_0 S$,其中 H 与 S 分别是工质的焓与熵, T_0 为环境的绝对温度)。所以,炯的定义是以功为准的。

输出功本身所反映的焓值与功量一样,而输出热的焓值则低于热量本身,要打一个折扣,由卡诺循环效率所表达的热转化为功的限度来确定。按照这个概念,当量焓效率也可写成:

$$\eta_e = (W + BQ) / fH_u \quad (4b)$$

式中 B 是热力学上热的价值(焓值)与功的价值的比值。它不是一个常量,而是随着不同的供热参数而变化的。

因此,焓效率的确在热力学上正确地看待了热与功的不同,能够比较全面合理地用单一准则评价热力装置。由于 B 总小于1,即热的品位,价值总不如功,所以同样的装置性能,用焓效率来表达的数值,总不如用总能利用效率来表达的数值(只出功时两者数值正好一样是例外);出热比例越大,焓效率的数值就越显得比总能利用效率的数值低。所以在比较效率数值时,一定要弄清楚是怎样定义的效率。只能用同样定义的效率自己与自己比,否则是不正确的。经常会有这样的情况,有较低数值焓效率的装置会比有更高数值总能利用效率的装置实际上有更好的性能。

焓效率既然比较合理,为什么至今还未能广泛普遍推广使用呢?可能有下列原因:一个是习惯势力作用很大,人们一直习惯于使用总能利用效率或误称的热效率,已有数据也很多。尤其是搞热力装置的人总想把性能说得好听点。如果功、热不分,以供热为主的装置就比较容易在数字上把“热效率”“提高”到70~80%或更高,有利于名声或销售。如果同样的装置用焓效率表示性能,数字上想超过50~60%就比较困难了。另外,焓效率是从热力学第二定律理论的角度来分析性能的,对现在大多数生产第一线的工程技术人员来说,总觉有点学究气,计算起来也略为麻烦一些,所以推广较慢。

然而,为了正确反映功热并供装置的性能,以焓效率来表达是比用总能利用效率更为科学与合理的,应该提倡。对于只出功的装置,则两者定义是同一的,用那个都一样。

四、广义焓效率与经济焓效率

由上节可见,焓效率比总能利用效率更合理与更科学之处,就在于前者对功与热的品位或者价值有不同的评价。在(4b)式中通过 B 来表达的价值不同是用热力学来定量评定的, B 是一个与供热参数有关的变数。

由此类推,如果有另外一种定量评价热与功的办法,亦即有另外一种规定 B 值的论点,可以设想,还可以定义出别的评价准则,或者说广义的焓效率。当然,这种办法或论点应该有理论上或实际上的意义。例如,可以定义 B 为热力装置供热的售价 P_Q 与供电(功)售价 P_E 之比,由此就可以得出另外一个焓效率:

$$\theta = (W + BQ) / fH_u \quad (\text{式中 } B = P_Q / P_E) \quad (4c)$$

由于它主要从经济上的角度来区别热与功,故可名为经济焓效率。它模拟了热力学区别热、功不同的公式,但却联系实际的收益而从售能收入方面来评价热与功,有可能更易为实际工作者所接受,并能更实际地反映功热并供装置的性能。同样,在不供热时,经济焓效率也是与前面两种效率等价的。不同的只是在有供热时对功、热的评价标准不一样。。

经济焓效率的优点在于它与国民经济的收益密切相联系,通过由价格最后反映出来的功与热的贡献(价值)不同及生产难易不同,从而能够较好地反映出热力装置的能源利用好坏;另外,与热力学上的效率还有一定的联系,有学术上的意义。例如,我们曾为一些大型功热并供装置的选型作过较详细的可行性分析,工作中发现,凡是在初步估算中经济焓效率

较高的选型, 都在后来详细分析中得到较高的评价, 而其它很多常用的评价准则都没有这么明显的相应关系。由于它与普通的炯效率形式上极为相近, 所以以前用当量炯效率分析热力循环的公式, 也可以很简单地转用于表达用经济炯效率的情况, 非常方便〔2〕。

目前在我国, 官价供热/供电售价比 B 值一般约为1:6; 世界各国的常用数据也差不多或略大。这个 B 值比普通炯效率中完全按热力学分析而得到的 B 值一般要小一半左右。这是合理的。因为热力学只分析热功转换在科学上的最大可能性, 实际上由热到功还要花很多投资与设备, 也不可能按理论上100%将热转化为功; 所以, 相对于学术上而言, 在经济上功(电)会更为明显地比热价值高。目前我国很缺电, 所以有些地区 B 值实际上还要低。这也反映了社会上的客观需求。

因此, 经济炯效率有其一定优点, 可以考虑推广作为一个常用的热力装置评价准则。

经济炯效率只考虑了热与功的售价比, 没有考虑不同燃料的价格不同, 这在比较使用不同价格的燃料的装置时是不够恰当的。为了改进这一点, 可以在经济炯效率的基础上再加上考虑燃料价格的措施:

$$\theta' = \theta (P_E/P_F) = [(W+BQ)/fH_u] (P_E/P_F) \quad (4d)$$

式中 P_E/P_F 是单位能量的功与燃料的价格比。由公式可见, 当各种价格为一定时, θ' 正比于 θ 。而且实际上 θ' 是热力装置售能总收入与投入燃料成本之比, 通常是个大于1的数; 它部分反映了该装置在能量转换中经济上的增值, 所以可以称为增值系数或经济炯系数。当然, 实际上完全的增值系数还要考虑从初投资到维修费用、工资支出乃至滑油、给水消耗等等很多其它成本因素, 非常复杂; 也因此难以简单判定, 而且与热力学公式关系不明显, 是个热经济学中的指标。(4d)式的增值系数(经济炯系数)则正好能够比较简单概括地反映了装置在建成以后主要的经济增值情况, 也与工程热力学中的炯效率有一定相似之处, 作为热力装置能源利用好坏的评价指标, 有其一定优点。

经济炯效率只是广义炯效率的一种。对 B 值的不同处理, 亦即对热与功的价值比值给出某种不同的定义, 都能给出不同的广义炯效率。但是, 它们必须有足够的理由根据, 能够反映能源利用好坏的主要客观表现, 才有使用上及学术上的价值。

五、结 束 语

要评价任何事物, 都要有合适的评价准则, 才能正确认识该事物, 并促进其发展。对热力装置也是如此。而常用的总能利用效率(或称总效率、热效率等)不足以全面反映热力装置能源利用性能的好坏。它对功与热没有区别对待, 只合用于单纯出功装置; 而对功热并供装置就会给出不恰切的评价, 引起误会。本文推荐的经济炯效率及当量炯效率则从不同的角度以类似形式((4b)式)比较全面地反映了热与功的不同, 对任何热力装置(单纯出功、单纯出热或功热并供)都能作比较合理的评价, 建议推广使用。

本文的工作得到自然科学基金的资助, 并在成文中得到国内、外很多专家, 尤其是本所一室同志们的宝贵讨论意见。特此感谢。

参 考 文 献

- 〔1〕蔡睿贤:“发展总能系统是提高能源利用水平的有效途径”,《节能》,1984年第4期,(1984)PP2~6。
- 〔2〕蔡睿贤:“功热并供评价准则及燃气轮机功热并供基本分析”,《工程热物理学报》,8卷3期(1987),PP201~205。

炼油厂蒸汽系统最优改造方案的确定

清华大学热能工程系 沈幼庭 袁小雄

东方红炼油厂 石维潭

摘 要

本文提出了企业在确定余热利用方案时,应考虑整个动力系统最优的思想。并以东方红炼油厂为例,介绍了应用系统工程的概念,确定蒸汽系统改造(包括余热回收)的最优方案的方法。

一、引 言

余热回收的途径有很多,如利用换热器加热不同温度的热水或产生不同压力的蒸汽,此外,烟气余热还可直接利用烟气轮机发电。回收余热所产生的热水,蒸汽或电力直接影响到企业的整个动力系统。因此,在确定余热回收方案时,必须考虑整个系统。如果在考虑余热回收的同时,考虑整个系统的综合改造,那么企业将会获得更好的效益。

由于余热回收的途径多,动力系统又是个复杂系统,因此用传统的方法很难全面考虑各种影响因素,选取最优的方案。本文以东方红炼油厂为例,介绍如何应用系统工程的概念,确定蒸汽系统改造(包括余热回收)的最优方案的方法。

二、蒸汽系统现状

东方红炼油厂于1969年投产,现年加工原油能力为7Mt。全厂拥有14套炼油生产装置,能够生产汽油、煤油、柴油、润滑油、重燃料油、石蜡、沥青、液化气、石油苯、甲苯、二甲苯及其它化工原料。全厂按地形及发展先后形成老区及新区。

目前全厂的主要余热源是新、老催化裂化装置的尾气。新催化尾气的温度约 400°C ,流量约 $100\text{km}^3/\text{h}$ 。老催化尾气的温度约 620°C 。流量约 $95\text{km}^3/\text{h}$ 。

炼油厂用汽来自三方面,一是厂内共有六台中压 3.4MPa 锅炉,每台蒸发量为 65t/h ,分别设置在两个锅炉房内;二是从外部购入一部份 3.4MPa 及 1.0MPa 蒸汽;三是新、老催化装置产生的副产蒸汽,有盘管产生的 3.4MPa 蒸汽, 1.0MPa 蒸汽以及更低压力的蒸汽

全厂设有三种蒸汽管网:〈1〉 3.4MPa 蒸汽管网,供催化主风机透平用汽。〈2〉 1.5MPa 压力管网,供减压抽真空和重整加热器用汽。〈3〉 0.8MPa (设计为 1.0MPa)管网,供气压机透平用汽。供全厂各装置不同用途的用汽,储运系统及生活用汽。此外,系统中还装设有一台B35/15背压机组。

三、蒸汽系统改造方案

原有蒸汽系统能耗较高的原因是多方面的,主要原因有:余热没有得到充分利用;蒸汽压力等级的使用不恰当,大量可采用低压蒸汽 0.3MPa 或 0.45MPa 的用户采用 0.8MPa 的蒸汽,需要应用较高压力蒸汽(如 1.5MPa)去加热的用户也用 0.8MPa 蒸汽,导致耗汽量大大增加,