

热电冷联产系统节能性的 ■ 分析

中国矿业大学 华北电力大学 黄建恩[☆]

华北电力大学 郭民臣

摘要 利用 ■ 分析的方法,定义了等效发电 ■ 效率,对常用热电冷联产系统形式的节能性进行了分析。认为相对于全国平均供电煤耗而言,热电冷联产系统的节能是有条件的,应选取合理的方式,优化设计和运行方案;相对于当前有些热电厂夏季负荷不足的情况,热电冷联产是节能的,在不同的情况下节能率在 7.8%~39% 之间。建议利用现有的热电联产条件,发展热电冷联产系统,提高现有热电厂的设备利用率和运行经济性。

关键词 热电冷联产 节能 ■ 分析 等效发电 ■ 效率

Exergy analysis of energy conservation for combined cooling heating and power systems

By Huang Jian'en[★] and Guo Minchen

Abstract Applying the exergy analysis method, defines the equivalent generating exergy efficiency. Analyses the energy conservation for common combined cooling heating and power (CCHP) systems. Considers that compared with national average coal consumption for power supply, energy conservation of a CCHP system is conditioned, suitable mode and optimal design and operation scheme should be made; compared with some heat and power plants which are in shortage of heat load in summer, CCHP saves energy. Ratio of energy conservation is 7.8%~39% depending on different conditions. Suggests that a CCHP system should be developed by using existing conditions in order to improve the equipment capacity factor and operation economical efficiency.

Keywords combined cooling heating and power, energy conservation, exergy analysis, equivalent generating exergy efficiency

★ China University of Mining Engineering, Xuzhou, Jiangsu Province, China

①

0 引言

研究热电冷联产的节能性对促进热电冷联产的发展,合理利用能源具有十分重要的意义和紧迫性。已有很多学者从不同的角度对热电冷联产系统的节能性和经济性进行了分析^[1-7],由于评价和分析的方法不同,各自从一定的评价基准出发得出了相对合理的结论,但这些结论不完全一致,热电冷联产节能性成了工程界和学术界讨论的热点问题,为此有必要对热电冷联产进行合理的评价, ■ 分析方法建立在热力学第一定律和第二定律基础之上,可以揭示问题的本质和真相,正确地评价用能系统的完善程度。

■ 是这样一种能,在给定的环境下,具有无限

可转化性,可以完全地、连续地转化为任何一种其他形式的能量。电能和机械能全部为 ■,稳定流动工质的 ■ 可按下式进行计算:

$$e_{p,t} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (1)$$

式中 $e_{p,t}$ 为压力为 p 、温度为 t 时工质的比 ■, kJ/kg; h 为工质的比焓, kJ/kg; h_0 为环境状态下工质的比焓, kJ/kg; T_0 为环境的温度, K; s 为工质的比熵, kJ/(kg·K); s_0 为环境状态下工质的比熵, kJ/

① ☆ 黄建恩,男,1970年10月生,硕士研究生,讲师
221008 江苏徐州中国矿业大学建筑环境与设备工程系
(0) 13912031985

E-mail: yhgreen@163.com

收稿日期:2005-11-02

修回日期:2006-01-04

(kg · K)。

随着热量转入系统的 ■ 称为热量 ■,按下式进行计算:

$$E_Q = \int_Q (1 - \frac{T_0}{T}) dQ \quad (2)$$

式中 E_Q 为热量 ■,kJ; T 为热源的温度,K; Q 为热量,kJ。

燃料的比 ■ 按下列公式计算:

$$\text{气体燃料}^{[8]} \quad e = 0.95Q_{gr} \quad (3)$$

$$\text{液体燃料}^{[8]} \quad e = 0.975Q_{gr} \quad (4)$$

$$\text{固体燃料}^{[9]} \quad e = 1.08Q_d \quad (5)$$

式(3)~(5)中 e 为燃料的比 ■,kJ/kg; Q_{gr} 为气体或液体燃料的高位发热量,kJ/m³(气体)或 kJ/kg(液体); Q_d 为固体燃料的应用基低位发热量,kJ/kg。

为揭示热电冷联产系统节能的本质和真相,本文采用 ■ 分析法分析热电冷联产常用的几种系统形式,探讨热电冷联产的节能性和经济性。

1 吸收式制冷系统的等效发电 ■ 效率

热电冷联产系统消耗一次能源,产出两种不同种类和品质的终端产品:电和冷(本文只讨论电和冷同时生产的情况)。相对于热电冷联产,采用电厂发电和电动压缩式制冷称之为冷电分产。为比较热电冷联产和冷电分产必须有一个可供比较的标准或评价方法。文献[1]从系统的角度提出了等效发电效率的概念,将冷量转换为电量,将联产系统等效为一个发电厂,比较联产系统的等效发电效率和参考电厂的发电效率,可方便直观地判断出热电冷联产系统的经济性,是一种较为合理的方法。吸收式制冷从外界吸收热量 Q_h 和电量 W ,产出冷量 Q_1 。若采用电动压缩式制冷产出同样的冷量 Q_1 消耗电量 W_0 ,同常规压缩式制冷相比,吸收式制冷产出冷量 Q_1 ,少耗电量 $W_0 - W$,多消耗热量 Q_h ,因此可认为热量 Q_h 换来电量 $W_0 - W$ 。据此定义吸收式制冷的等效发电效率 η_c :

$$\eta_c = \frac{W_0 - W}{Q_h \eta_{sp}} \quad (6)$$

式中 η_{sp} 为电网的输配效率,本文取 0.924。

该定义是从热力学第一定律的角度出发的,没有考虑输入热量 Q_h 的品质。为揭示热电冷联产系统节能的真相,不但要考虑输入热量的大小,而且要考虑其品质。■ 既表示能量品质,又表示能量

的数量,为此用输入热量中包含的 ■ E_h (相对于一定的环境)代替式(6)中的 Q_h ,定义溴化锂吸收式制冷的等效发电 ■ 效率 η_{ce} :

$$\eta_{ce} = \frac{W_0 - W}{E_h \eta_{sp}} \quad (7)$$

选取不同制冷机组,利用厂家提供的技术参数,取电动压缩式制冷机组的 COP 为 3.8,分别计算溴化锂吸收式制冷系统的等效发电效率和等效发电 ■ 效率,结果见表 1。由于电动压缩式制冷机组性能系数 COP 不同会导致吸收式制冷机组等效发电 ■ 效率和等效发电效率的不同,表 2 列出了不同电动压缩式制冷 COP 时吸收式制冷系统的等效发电效率和等效发电 ■ 效率。

表 1 不同吸收式制冷系统的能耗分析

	电动制冷	制冷方式				直燃机	
		单效吸收式	双效吸收式			燃油	燃气
			0.1 MPa	0.4 MPa	0.6 MPa		
制冷量/kW	1 163	1 163	1 163	1 163	1 163	1 163	1 163
COP	3.80	0.60	1.11	1.17	1.18	1.32	1.32
耗电量	冷水机组	306.05					
/kW	冷水泵	32.34	32.34	32.34	32.34	32.34	32.34
	冷却水泵	26.96	63.15	48.58	48.58	48.58	48.58
	冷却塔风机	8.25	16.09	12.38	12.38	12.38	12.38
	溶液泵、制冷剂泵		7.7	4.9	4.9	4.9	6.7
	小计	373.60	119.28	98.20	98.20	100.00	100.00
热耗/kW		1928.6	1051.9	995.09	986.82	880.36	880.22
■耗/kW		468.09	310.94	312.92	323.99	916.95	927.66
吸收式制冷系统等效发电量 $(W_0 - W)/\eta_{sp}/kW$		275.24	298.05	298.05	298.05	296.10	291.10
等效发电效率		0.143	0.283	0.300	0.302	0.336	0.336
等效发电 ■ 效率		0.588	0.959	0.952	0.920	0.323	0.319

注:大气压力取 0.1 MPa。表中部分数据来源于文献[1]。水蒸气参数采用文献[8]提供的前苏联热工研究所的经验公式计算,环境温度取 25 °C(下同)。

表 2 不同电动压缩式制冷 COP 下吸收式制冷系统等效发电效率与等效发电 ■ 效率

电动制冷 COP	单效吸收式机组	双效吸收式机组				直燃机	
		0.1 MPa	0.4 MPa	0.6 MPa	0.8 MPa	燃油	燃气
		等效发电效率					
3.8	0.143	0.283	0.300	0.302	0.336	0.336	
4.0	0.134	0.268	0.283	0.285	0.318	0.318	
4.4	0.119	0.240	0.254	0.256	0.285	0.285	
5.1	0.099	0.203	0.215	0.216	0.240	0.240	
等效发电 ■ 效率							
3.8	0.588	0.959	0.952	0.920	0.323	0.319	
4.0	0.553	0.905	0.900	0.869	0.305	0.301	
4.4	0.492	0.813	0.808	0.781	0.274	0.271	
5.1	0.408	0.687	0.683	0.659	0.231	0.228	

从表 1,2 中可以看出,相同电动压缩式制冷

COP 下,单效和双效溴化锂吸收式制冷系统的等效发电 ■ 效率均高于其等效发电效率,而且两者均随电动压缩式制冷 COP 的升高而减小;对于双效溴化锂吸收式制冷,其等效发电 ■ 效率随供气压力的升高而下降,而等效发电效率表现出相反的变化趋势,这正反映了热力学第一定律效率和第二定律效率的不同。等效发电 ■ 效率高说明从能量转化的角度采用吸收式制冷在某些情况下是可取的,但随着电动压缩制冷性能的提高,其可比性会变差。

2 热电冷联产系统的等效发电 ■ 效率

将吸收式制冷机组及其热源组成的整体作为一个系统,若仅考虑系统的发电和制冷而不研究供热,系统能量输入与产出如下:热源从外界吸收燃料 ■ E_0 , 向外界输出电量 W_{ry} , 同时向吸收式制冷机组供给热量 ■ E_h , 产生冷量 Q_c 。

等效发电 ■ 效率定义如下:

$$\eta_e = \frac{W_{ry} + \frac{W_0 - W}{\eta_{sp}}}{E_0} = \frac{W_{ry} - E_h \eta_{gdc} \eta_{cc}}{E_0} \quad (8)$$

式中 η_{gdc} 为管道的输送 ■ 效率。

系统等效发电 ■ 效率表示将热电冷联产系统视为一个发电厂而相当的电厂发电 ■ 效率。判断系统是否节能,只要判断等效发电 ■ 效率是否大于参考电厂的发电 ■ 效率 η_{cke} , 系统的节能条件为 $\eta_e > \eta_{cke}$, 这等同于将热电冷联产系统与由参考电厂及压缩式制冷机组组成的系统作能耗比较。以下对几种热电冷联产运行方案加以分析。

3 直燃溴化锂吸收式制冷机组

直燃溴化锂吸收式制冷机组可以看作一种对外界没有电量输出的特殊的热电冷联产系统,系统的等效发电 ■ 效率等于吸收式制冷机组的等效发电 ■ 效率。根据厂家提供的技术资料,分别计算燃油(低位热值为 43.534 4 MJ/kg, 高位热值为 46.506 5 MJ/kg)和燃气(采用的天然气高位热值为 39.005 1 MJ/m³, 低位热值为 35.159 7 MJ/m³)的直燃溴化锂吸收式制冷机组的等效发电 ■ 效率和等效发电效率,结果见表 1 和表 2。

2003 年全国平均供电煤耗为 380 g/(kWh)^[10], 电厂用电率取 8%^[1], 由此计算出参考电厂的发电 ■ 效率为 32.54%, 供电 ■ 效率为 29.94%(本文以此作为参考电厂)。从表 2 中的数据可以看出,只有在电动压缩式制冷机组的

COP 低于 4.0 时,该系统才可与冷电分产相当,当电动压缩式制冷机组的 COP 提高到 4.4 时,该系统等效发电 ■ 效率(对直燃机组等效发电 ■ 效率和等效供电 ■ 效率相等)为 27.4%(燃油)和 27.1%(燃气),均低于参考电厂的供电 ■ 效率,说明此时直燃机是不节能的。从热能利用的角度,将燃料燃烧后的高品位热能直接用来驱动吸收式制冷,不符合按质用能、梯级利用的原则,从节能角度是不可取的。

4 燃气轮机热电冷联产系统

燃气轮机热电冷联产系统是首先用燃气轮机进行发电,燃气轮机的尾气进入余热锅炉产生蒸汽供用户使用,将蒸汽用于吸收式制冷,燃气轮机、余热锅炉、吸收式制冷机组组成热电冷联产系统(这只是燃气轮机热电冷联产的方式之一)。以某燃气轮机热电冷联产为例^[11],燃气轮机耗用天然气一次能源 17.7 GJ/h,发电功率 1 181 kW,同时利用余热锅炉产生表压 1.034 MPa 的饱和蒸汽 3.7 t/h,该系统的一次能源利用率高达 75%(第一定律效率)。用余热锅炉产生的蒸汽利用双效吸收式制冷机组进行制冷,组成热电冷联产系统。若仅考虑冷电联产,设采用的天然气高位热值为 39.005 1 MJ/m³, 低位热值为 35.159 7 MJ/m³, 计算出该系统的等效供电 ■ 效率,见表 3。

表 3 燃气轮机联产系统等效供电 ■ 效率

电动压缩式制冷的 COP	3.80	4.00	4.40	5.10
等效供电 ■ 效率	0.36	0.35	0.34	0.32

表 3 显示,该燃气轮机热电冷联产系统在电动压缩式制冷的 COP 达到 5.1 时仍具有节能优势,此时其等效供电 ■ 效率为 32%,大于参考电厂的供电 ■ 效率 29.94%。而且,由于燃气轮机热电冷联产系统使用清洁能源,环保性能好,应大力推广使用。这样不但节能、环保,而且可以缓解电力紧张的局面。

5 燃煤热电冷联产系统

目前我国许多热电厂设备效率及利用率低,其主要原因是夏季供热负荷不足。若空调系统的溴化锂吸收式制冷机以热电厂为热源,则可以使热电厂夏季供热负荷增加,提高整个系统的运行效率和经济性。同时,吸收式制冷代替压缩式制冷可节省电能,缓解当前城市供电紧张的局面。但这种热电冷联产系统是否节能一直存在争议,下面针对具体

的情况,利用等效发电效率进行分析。

实际的燃煤热电厂系统复杂,大多具有回热系统,热力计算较为复杂,为使分析的问题简化,作如下假设:

- 1) 不考虑热电厂的回热系统,系统无汽水损失。
- 2) 凝结水的温度均按 95 °C 计算。
- 3) 忽略由于冷负荷变化使得机组运行偏离设计工况而导致的汽轮机相对内效率的下降,汽轮机相对内效率为定值,取 0.8。
- 4) 不考虑热网的输送能耗。

5) 冷用户的制冷站和热电厂的汽轮机抽汽口间的压降为 0.1 MPa,大气压力取 0.1 MPa,即表 1 中各吸收式制冷的工作压力加 0.2 MPa 为抽汽口的压力。

当热网效率 $\eta_{hd} = 0.95$,热力网输送蒸汽的始端比焓为 2 998.08 kJ/kg,压力为 1.0 MPa,温度为 273 °C,凝结水回水温度为 80 °C 时,计算管道的效率约为 92%,考虑实际运行时的保温效果,管道的效率统一取为 90%。

对燃煤热电冷联产的背压式机组和仅考虑抽汽式机组抽汽部分的情况下,式(8)可变形为

$$\eta_e = \frac{(e_0 - e_2)\eta_{ie}\eta_{id} + (e_2 - e_w)\eta_{gde}\eta_{ce}}{\eta_{bc} \frac{e_0 - e_w}{\eta_{bc}}} \quad (9)$$

式中 e_0 为新蒸汽的比焓, kJ/kg; e_2 为抽汽口的蒸汽比焓, kJ/kg; e_w 为凝结水的比焓, kJ/kg; η_{ie} 为汽轮机的相对效率,定义为实际发电量和理想发电量之比,按此定义汽轮机的相对效率等于汽轮机的相对内效率,取 0.8; η_{id} 为汽轮机发电机组的机电效率,一般在 0.92~0.98 之间,取 0.95; η_{bc} 为锅炉的效率,取 0.49^[12]。

按式(9)分别计算新蒸汽压力为 12.75 MPa、温度为 555 °C,新蒸汽压力为 8.82 MPa、温度为 535 °C,新蒸汽压力为 3.43 MPa、温度为 435 °C 三种情况的热电冷联产机组在不同的抽汽压力和不同的电动压缩式机组性能系数下的等效发电效率,并把不同情况下的等效发电效率按下式转化为等效供电煤耗 b ,计算结果列于表 4。

$$b = \frac{3\,600 \times 1\,000}{7\,000 \times 4.186 \times 1.08 \times (1 - \eta_{zy})\eta_e} = \frac{113.76}{(1 - \eta_{zy})\eta_e}$$

式中 η_{zy} 为电厂的自用电率,取 8%。

表 4 不同情况下的等效供电煤耗

g/(kWh)

抽汽压力/MPa	电动压缩式机组 COP											
	3.8			4.0			4.4			5.1		
	3.43	8.82	12.75	3.43	8.82	12.75	3.43	8.82	12.75	3.43	8.82	12.75
0.3	397	384	381	408	393	389	429	409	403	461	432	425
0.6	305	309	311	317	320	320	340	339	338	378	369	367
0.8	305	309	310	317	320	321	342	341	340	384	373	371
1.0	311	315	316	325	326	327	352	348	347	397	384	380

注:表头第 3 行数据为新蒸汽压力,单位为 MPa;抽汽压力为 0.3 MPa 时使用单效吸收式机组,其余抽汽压力时使用双效吸收式制冷机组。

从表中可以看出,在所计算的各种新蒸汽参数下,抽汽压力为 0.6 MPa 时双效吸收式制冷机组和热电厂组成的热电冷联产系统均具有节能优势,而且在电动压缩式机组的 COP 小于等于 4.4 时,节能的优势还比较大,均大于 40 g/(kWh),即节能率大于 10.5%,即使电动压缩式制冷机组的 COP 达到 5.1,抽汽压力为 0.6 MPa,新蒸汽参数为 8.82 MPa 的热电联产系统等效供电煤耗比参考电厂的供电煤耗 380 g/(kWh) 仍少 11 g/(kWh),蒸汽初参数提高到 12.75 MPa 时则少 13 g/(kWh)。在相同的蒸汽初参数下,降低抽汽压力节能优势有增大的趋势,但不能低到必须使用单效吸收式机组,由于单效机组比双效机组性能系数

有较大的下降,热电冷联产反而不节能,如表 4 中抽汽压力为 0.3 MPa 的情况。表 4 同时也反映出联产系统初参数对系统节能性的影响,提高初参数,对节能整体上是有益的,当电动压缩式机组的性能系数较高时,随初参数的增大,节能能力增大。

上述分析是针对供电煤耗为 380 g/(kWh) 的情况,若针对当前大多热电联产的主力机组容量小于 25 MW 的情况,其供电煤耗高达 500 g/(kWh)^[13],则表 4 所列的所有情况均具有节能优势,每 kWh 的节煤量最小的为 39 g,最大的为 195 g,相应的节能率在 7.8%~39% 之间。因此针对我国目前有些热电厂夏季热负荷小、热电联产优势得不到应有发挥的情况,对现有的热电联产系统稍

加改造,改为热电冷联产系统,将大大提高一次能源的利用率。

6 结论

6.1 通过等效发电效率的分析可以看出,与全国供电煤耗水平相比较,目前常用的热电冷联产方式除直燃机(严格地说不是—种热电冷联产机组,本文将其视作对外输出电量为零的热电冷联产机组)外,在使用双效溴化锂吸收式机组的情况下,燃气轮机+余热锅炉为热源的热电冷联产、燃煤热电厂为热源的热电冷联产(抽汽压力为 0.6 MPa 时),在电动压缩式机组 COP 达到 5.1 时均具有节能优势,节能比例与热电冷联产的具体情况和电动压缩式机组的性能有关,随电动压缩式制冷机组 COP 提高,节能的比例呈下降趋势,这充分说明节能也要因时而异,与时俱进,选取合理的能源利用方式。

6.2 对燃煤热电冷联产,增大蒸汽的初参数,系统的节能优势有增大的趋势,在相同的初参数下降低抽汽压力节能优势也有增大的趋势,但抽汽压力的最小值应能保证双效溴化锂机组能够正常工作,因为使用单效吸收式制冷机组系统的性能会有较大的下降,同全国的平均供电煤耗相比不具有节能优势。

6.3 从式(9)可以发现,在相同的蒸汽初参数条件下,降低抽汽压力 e_2 有减小的趋势,表 2 则显示双效溴化锂吸收式制冷机组等效发电效率随供汽压力的下降而升高,因此存在一个最佳抽汽压力的优化问题,应针对不同热电冷联产情况优化设计和运行方案,使系统的经济性最佳。

6.4 对燃煤热电冷联产若与现有的热电厂主力机组供电煤耗高达 500 g/(kWh)的情况相比,均具

有节能优势,因此应以现有的热电厂和热力管网为基础,大力发展热电冷联产,为我国的能源可持续发展战略作出积极的贡献。

参考文献

- [1] 付林,江亿.几种溴化锂制冷机组应用型式的能耗分析[J].制冷学报,1998,19(1):47-53
- [2] 贾明生,凌长明.热电冷联产系统的几种主要评价模型分析[J].制冷与空调,2004,4(4):34-39
- [3] 李培生,顾昌.用做功能力法分析热电冷联产的热经济性[J].煤气与热力,2000,20(6):420-423
- [4] 王亚茹,陆亚俊.热电冷联产系统的能耗分析[J].哈尔滨建筑大学学报,2000,33(5):90-94
- [5] 严德隆,张维君.空调制冷及热电冷联产系统的能耗分析[J].暖通空调,1998,28(6):18-22
- [6] 王长庆,龙惟定,丁文婷.各种冷源的一次能耗及对环境影响的比较[J].节能技术,2000,18(4):8-10
- [7] 汤妙琴,余敏.热电冷三联供系统能耗与经济性分析[J].上海理工大学学报,2003,25(3):247-251
- [8] 董树屏,李天铎.热能转换及利用[M].北京:机械工业出版社,1985
- [9] 王加璇.方法及其应用[M].北京:中国电力出版社,1996
- [10] 国家电网公司计划投融资部,统计处.2003 年国家电网公司生产经营情况[J].中国电力,2004,37(2):7-10
- [11] 群鹰公司.燃气轮机热电联产[EB/OL].http://www.china5e.com/gasturbine/qianzhi.php
- [12] 宋之平,王加璇.节能原理[M].北京:水利电力出版社,1985
- [13] 宋之平.从可持续发展的战略高度重新审视热电联产[J].中国电机工程学报,1998,18(4):225-230
- [14] Shin S Y, Hong Y K, Lee S H, et al. Study on performance of photocatalyst plasma for air clean[C]// Proceeding of the 2003 4th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, Beijing, 2003
- [15] Mizuno A, Kisanuki Y, Noguchi M, et al. Indoor air cleaning using a pulsed discharge plasma [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(6): 1284-1288
- [16] 殷峻,方士,陈英旭.泥炭生物滤塔处理低浓度 H₂S 气体的试验研究[J].环境科学学报,2003,23(1):39-42
- [17] 吴碧君,刘晓勤.挥发性有机物污染控制技术研究进展[J].电力环境保护,2005,21(4):39-42
- [18] Aguado S, Polo A C, Bernal M P, et al. Removal of pollutants from indoor air using zeolite membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2004, 240:159-166
- [19] 黄肖容,隋贤栋,刘悦晖.用梯度氧化铝膜净化空气[J].环境工程,2001,19(3):32-36
- [20] 江思力,冯文如,钟巍,等.居室中主要挥发性有机物污染状况及其防治对策[J].中国热带医学,2005,5(2):210-212
- [21] 伊文.哪些绿色植物可以吸收有害气体[J].广东园林,2003,10(增刊):72-76
- [22] 苏金波.专家为植物去污能力“排座次”[J].家庭科技,2006(1):22
- [23] 张寅平,张立志,刘晓华,等.建筑环境传质学[M].北京:中国建筑工业出版社,2006

(上接第 27 页)