

文章编号: 0253-4339(2012)02-0007-05

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.02.007

两级双效溴化锂制冷-热泵复合循环

黄少君¹ 卢玫¹ 朱家贤² 李凌¹

(1 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2 上海青浦工业园区热电有限公司 上海 201700)

摘要 在热电冷联产系统中, 溴化锂吸收式制冷机在制冷过程中排放了大量的废热, 这些废热品位低, 难以直接回收利用。在此提出了两级双效溴化锂制冷-热泵复合循环, 该循环具有冷凝温度较高的特点, 便于直接回收冷凝排放热。系统以背压汽轮机的背压蒸汽为热源, 制冷的同时利用循环所排出的废热加热锅炉补充水至较高温度。以具有相同功效的双效溴冷机与单效溴化锂热泵联合运行作为对比循环, 制冷-热泵复合循环系统省去了一台蒸发器与冷凝器, 减少了两个换热温差, 并且通过热力计算、能量分析和焓分析表明, 该循环的能量利用率与焓效率均有很大的提高, 焓效率对比循环提高了45%。

关键词 热工学; 制冷-热泵复合循环; 两级双效; 溴化锂

中图分类号: TB61⁺6; TQ051.5; TB657

文献标识码: A

Hybrid Two-stage and Double-effect Lithium Bromide Refrigeration-heat Pump Compound Cycle

Huang Shaojun¹ Lu Mei¹ Zhu Jiexian² Li Ling¹

(1. School of Energy and Power Engineering (SEPE), University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. Thermal Power Co., Ltd. of Shanghai Qingpu Industrial Park, Shanghai, 201700, China)

Abstract In CCHP system, The waste heat quantity emitted from lithium bromide absorption refrigeration is large and low grade, so it is difficult to use directly. This paper proposes a hybrid two-stage and double-effect Lithium Bromide refrigeration - heat pump compound cycle. In this cycle, the condenser could emit higher temperature heat, which could increase the utilization rate of emitted waste heat. The cycle's heat source is the back pressure steam, and it can take advantage of the low-grade thermal energy emitted from the refrigeration process to heat up the boiler make-up water. This paper takes existing double-effect lithium bromide absorption refrigeration and the single effect lithium bromide heat pump as contrast, the refrigeration - heat pump compound cycle system omits an evaporator and a condenser, which could decrease the temperature difference in heat exchange. And the energy analysis and the exergy analysis show that the compound cycle can improve exergy efficiency and energy utilization efficiency.

Keywords Pyrology; Refrigeration-heat pump compound cycle; Two-stage and double-effect; Lithium bromide

对于溴化锂吸收式机组很多文献都已从不同角度进行了讨论研究, 如利用热管回收气态余热的热管型溴化锂吸收式冷热水机组的研究^[1], 三效吸收式溴冷机的开发设计^[2], 太阳能溴化锂吸收式制冷的研究^[3]等。这里则是从高效利用溴冷机制冷时排出的废热的角度出发, 提出一种复合型的两级双效溴化锂制冷-热泵复合循环。

在背压机组供热供电基础上建立热电冷联产系统, 通常以背压蒸汽来驱动溴化锂吸收式制冷机组来提供冷量。溴冷机组在制冷过程中排出大量的废热, 对于一台580kW冷量的双效溴冷机组,

所需0.8MPa的饱和热源蒸汽约0.65t/h; 如果进出溴冷机的冷却水温度分别为30℃和36℃, 则所需冷却水约145t/h; 而联供系统供给热用户的蒸汽通常都不回送凝水, 因此锅炉有很多环境温度的补充水需加热。如果用锅炉补充水替代冷却水, 溴冷机可将进口温度为28℃的补充水加热至36℃, 当补充水量(即供热用户蒸汽量)约为108t/h时才能完全用尽溴冷机排出的废热, 此时供冷供热比很小; 若是增大供冷供热比, 溴冷机排出的废热就不能被完全利用。如果系统中增加一热泵, 可使补充水从36℃加热至更高温度, 则可提高供冷供热比。对于

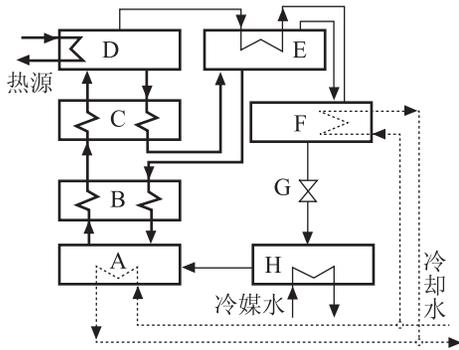
基金项目: 国家自然科学基金(51006071)资助项目。(The project was supported by the National Nature Science Foundation of China (No. 51006071).)

收稿日期: 2011年7月10日

12000kW背压机组, 当制冷量大于1100kW时, 使用热泵回收废热比直接利用更经济节能。基于这一应用背景, 提出了两级双效溴化锂制冷-热泵复合循环, 该循环能在提供冷媒水的同时提供较高温度的热水(锅炉补充水)。这里不仅对两级双效溴化锂制冷-热泵复合循环进行了热力性能计算, 同时从热能与焓两个角度进行热力性能分析, 并将计算结果与对应的双效溴化锂制冷和单效溴化锂热泵的联合运行进行了对比。

1 两级双效LiBr制冷-热泵复合循环

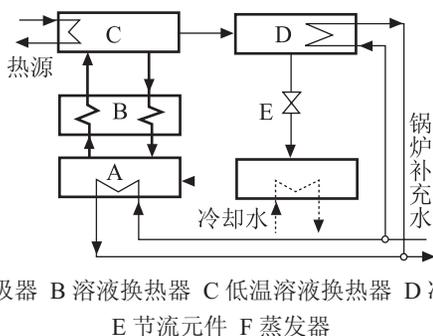
图1所示为双效溴冷机系统示意图, 图2所示为单效溴化锂热泵系统示意图。联合运行时, 双效溴冷机出来的冷却水(图1)进入单效溴化锂热泵的蒸发器(图2)被冷却, 而后再回到双效溴冷机的吸收器与冷凝器, 如此循环, 使两个系统串联在一起运行。溴化锂热泵系统中的吸收器、冷凝器放出的热用于加热锅炉补充水。



A 吸收器 B 低温溶液换热器 C 低温溶液换热器 D 高压发生器 E 低压发生器 F 冷凝器 G 节流元件 H 蒸发器

图1 双效LiBr制冷系统示意图

Fig.1 Double-effect LiBr absorption refrigeration



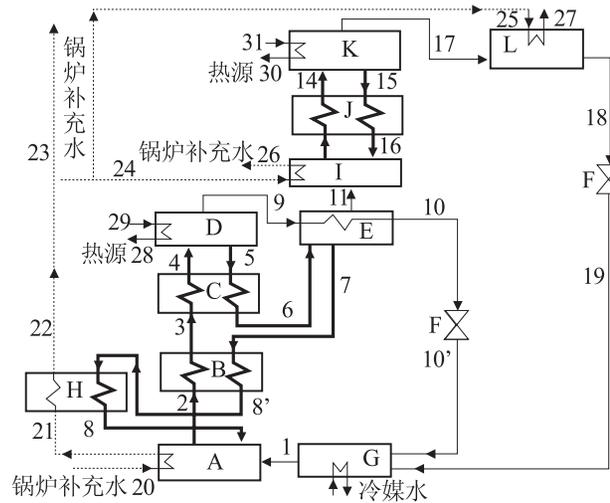
A 吸收器 B 溶液换热器 C 低温溶液换热器 D 冷凝器 E 节流元件 F 蒸发器

图2 单效LiBr热泵系统示意图

Fig.2 Single-effect LiBr absorption refrigeration

这里提出的两级双效溴化锂制冷-热泵复合循环主要设备如图3所示, 由1台冷凝器、1台蒸发器、2个节流阀、2台吸收器、3台发生器、4台换热器组成。相比而言, 两级双效溴化锂制冷-热泵复

合循环省去一台蒸发器与冷凝器, 整体更加紧凑。该循环有三个回路: 一个是制冷剂回路(图3中为细实线表示), 两个是溴化锂溶液回路(图3中为粗实线表示), 图4为两级双效溴化锂制冷-热泵复合循环对应的焓-浓度($h-\xi$)图。



A 吸收器1 B 溶液换热器1 C 溶液换热器2 D 发生器1 E 发生器2 F 节流元件 G 蒸发器 H 水-水换热器 I 吸收器2 J 溶液换热器3 K 发生器3 L 冷凝器

图3 两级双效LiBr制冷-热泵复合循环系统示意图

Fig.3 Hybrid two-stage and double-effect Lithium Bromide refrigeration-heat pump compound cycle

在溶液回路2-3-4-5-6-7-8-2中, 由吸收器1流出的稀溶液(状态2)经溶液换热器1、溶液换热器2被加热后(状态4)进入发生器1, 被热源加热至压力、溶液浓度对应的饱和温度后蒸发产生水蒸气(状态9); 蒸发后的中浓度溶液(状态5)从发生器1流出经溶液换热器2放热降温后(状态6)进入发生器2, 被状态9的水蒸气加热至饱和温度后产生水蒸气(状态11); 蒸发后的浓溶液(状态7)从发生器2流出后, 经过溶液换热器1、水-水换热器降温后达到状态8, 回到吸收器1。

在溶液回路11-13-14-15-16-11中, 吸收器2中的溶液吸收来自发生器2的水蒸气11后成为稀溶液13, 经溶液换热器3加热后14进入发生器3被热源进一步加热至饱和温度后蒸发, 产生水蒸气17; 而蒸发后的浓溶液(状态15)离开发生器3后经过溶液换热器3放热降温后(状态16), 回到吸收器2。

在制冷剂回路中, 发生器1产生的蒸气9在发生器2放热后凝结成水(状态10)后, 经节流元件节流降压后(状态10')进入蒸发器; 发生器3产生的水蒸气(状态17)在冷凝器中放热凝结(状态18), 然后经节流元件节流降压(状态19)后也进入蒸发器。

在蒸发器中的制冷剂水吸收冷媒水放出的热量而蒸发(状态1)。从在蒸发器出来的制冷剂水蒸气,被吸收器1中的溴化锂溶液吸收。

而在吸收器1、2中由于浓溶液吸收水蒸气而放出的热量及冷凝器、水-水换热器放出的热量全部用于加热锅炉补充水。

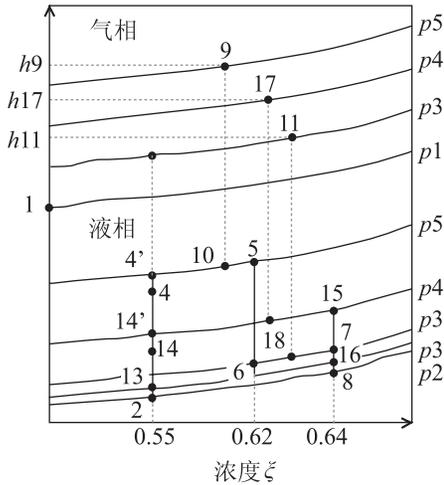


图4 两级双效溴化锂制冷-热泵复合循环 $h-\xi$ 图

Fig.4 $h-\xi$ figure of hybrid two-stage and double-effect Lithium Bromide refrigeration-heat pump compound cycle

2 热力计算

2.1 设备热力计算方程

质量平衡方程

$$\sum q_{m,in} - \sum q_{m,out} = 0 \quad (1)$$

$$\sum (q_m \xi)_{in} - \sum (q_m \xi)_{out} = 0 \quad (2)$$

能量平衡方程

$$Q + \sum (q_m h)_{in} - \sum (q_m h)_{out} = 0 \quad (3)$$

2.2 计算参数

计算参数为: 制冷量 $\varphi_{\text{冷}}=580\text{kW}$; 冷媒水进出口温度 $t_e'=12^\circ\text{C}$; $t_e''=7^\circ\text{C}$; 驱动热源蒸汽 $p_{ry}=0.8\text{MPa}$, 饱和温度 $t_{ry}=170^\circ\text{C}$; 锅炉补充水进两级双效LiBr机组温度为 $t_a'=28^\circ\text{C}$, 两级双效LiBr制冷-热泵复合循环吸收器2与冷凝器的锅炉补充水出口温度都为 $t_a''=65^\circ\text{C}$ 。

根据文献[4]可知: 蒸发器的蒸发温度 t_{eo} 与冷媒水出口温度差 $\Delta t_{eo}=2^\circ\text{C}$; 吸收器1与蒸发器蒸发的压力差 $\Delta p_{eo}=0.035\text{kPa}$, 与其中锅炉补充水出口温度差 $\Delta t_{ae}=2^\circ\text{C}$; 冷凝器的冷凝温度 t_{co} 与其中锅炉补充水出口温度差 $\Delta t_{ac}=3^\circ\text{C}$; 吸收器2压力与低压发生器的压力差 $\Delta p_{glo}=0.035\text{kPa}$, 与其中锅炉补充水出口温度差 $\Delta t_{ad}=2^\circ\text{C}$; 假定发生器2进出口溶液浓度差 $\Delta \zeta_{glo}=0.02$, 发生器1进出口溶液浓度差

$\Delta \zeta_{gho}=0.03$, 发生器3进出口溶液浓度差 $\Delta \zeta_{gd}=0.09$ 。

2.3 部分参数的选定

1) 蒸发温度 t_{eo} 与压力 p_{eo}

$t_{eo}=t_e''-\Delta t_{eo}=7-2=5^\circ\text{C}$, 对应饱和蒸发压力 $p_{eo}=0.8726\text{kPa}$ 。

2) 吸收器1的吸收压力 p_{ao} , 出口稀溶液温度 t_{ao} , 出口浓度 ζ_a 。

$p_{ao}=p_{eo}-\Delta p_{eo}=0.8726-0.035=0.8376\text{kPa}$; 吸收器1冷却水进出口温度 $t_a'=28^\circ\text{C}$, $t_{ac}''=40^\circ\text{C}$,

所以 $t_{ao}=t_{ac}''+\Delta t_{ac}=40+2=42^\circ\text{C}$; 由于 $p_{ao}=0.8376\text{kPa}$, $t_{ao}=42^\circ\text{C}$ 查得 $\zeta_{ao}=0.59$ 。

3) 发生器1压力 p_{gho} 、出口溶液浓度 ζ_{gho} 、出口溶液温度 t_{gho} 。

根据参考文献[4]可假定 $p_{gho}=62.556\text{kPa}$ 。
 $\zeta_{gho}=\zeta_{ao}+\Delta \zeta_{gho}=0.59+0.03=0.62$, 由 p_{gho} 与 ζ_{gho} 可查得 $t_{gho}=146^\circ\text{C}$ 。

4) 发生器2

根据参考文献[5]可知采用冷凝压力和蒸发压力的几何平均值做为发生器2的压力较合理,

$$p_{glo}=\sqrt{p_{co} \cdot p_{eo}}=\sqrt{0.8726 \times 28.599}=4.996\text{Pa},$$

所以: $\zeta_{glo}=\zeta_{gho}+\Delta \zeta_{glo}=0.62+0.02=0.64$, 由 p_{glo} 与 ζ_{glo} 可知 $t_{glo}=87^\circ\text{C}$ [4]。

5) 冷凝温度 t_{co} , 冷凝压力 p_{co}

$t_{co}=t_a''+\Delta t_{ac}=65+3=68^\circ\text{C}$, 对应饱和压力为 $p_{co}=28.599\text{kPa}$ 。

6) 吸收器2压力 p_{ado} , 温度 t_{ado} , 出口溶液浓度 ζ_{ado} 。

$p_{ado}=p_{glo}-\Delta p_{glo}=4.961\text{kPa}$, $t_{ado}=t_a''+\Delta t_{ad}=65+2=67^\circ\text{C}$, 由 p_{ado} 、 t_{ado} 得 $\zeta_{ado}=0.55$ 。

7) 发生器3压力 p_{gd}

因为 p_{gd} 可以近似冷凝器冷凝压力 p_{co} , 即

$p_{gdo}=p_{co}=28.599\text{kPa}$; $\zeta_{gdo}=\zeta_{ado}+\Delta \zeta_{gd}=0.55+0.09=0.64$, 由 p_{gdo} 与 ζ_{gdo} 可知 $t_{gdo}=129^\circ\text{C}$ [6]。

3 计算结果和分析

3.1 计算结果

对照图3, 通过热力计算, 各点热力参数如表1所示。

3.2 热力性能分析

对于单效、双效吸收式制冷机很多文献都已使用不同方法从不同角度讨论循环的节能性。如吸收式制冷机等效发电效率 η_c [7]等。这里从能量利用和焓效率角度进行比较分析。

表1 两级双效LiBr制冷-热泵复合循环各状态点热力参数

Tab.1 Thermodynamic parameters of the hybrid two-stage and double-effect lithium bromide refrigeration-heat pump compound cycle

序号	名称	温度/°C	压力/kPa	浓度/%	焓/(kJ/kg)	流量/(kg/s)
1	蒸发器出口水蒸气	5	0.8376	—	2510.07	0.267
2	吸收器1出口稀溶液	42	0.8376	0.59	279.44	3.412
3	换热器1出口稀溶液	52	—	0.59	298.97	3.412
4	换热器2出口稀溶液	130.4	—	0.59	450	3.412
5	发生器1出口溶液	146	62.556	0.62	474.43	3.246
6	换热器2出口溶液	61	—	0.62	315.67	3.246
7	发生器2出口浓溶液	87	4.996	0.64	365.71	3.145
8	换热器3出口浓溶液	48	—	0.64	295.83	3.145
8'	换热器3进口浓溶液	76	—	0.64	344.52	3.145
9	发生器1出口冷剂蒸汽	146	62.556	—	2771.47	0.165
10	发生器2出口水	87	62.556	—	364.35	0.165
10'	节流后水	86.85	0.8726	—	364.35	0.165
11	发生器2出口冷剂蒸汽	87	4.996	—	2663.4	0.102
13	吸收器2出口稀溶液	67	4.961	0.55	333.9	0.725
14	换热器4出口稀溶液	99	—	0.55	400	0.725
15	发生器3出口浓溶液	129	28.599	0.64	441.75	0.623
16	换热器4出口浓溶液	86.5	—	0.64	364.85	0.623
17	发生器3出口冷剂蒸汽	129	28.599	—	2741.15	0.102
18	冷凝器出口水	68	28.599	—	284.64	0.102
19	节流后水	67.83	0.8726	—	284.64	0.102
20	锅炉补充水	28	100	—	117.47	12.88
21	锅炉补充水	40	100	—	167.62	12.88
22	锅炉补充水	42.84	100	—	179.49	12.88
23	锅炉补充水	42.84	100	—	179.49	7.41
24	锅炉补充水	42.84	100	—	179.49	2.769
25	锅炉补充水	42.84	100	—	179.49	2.701
26	锅炉补充水	65	100	—	272.14	2.769
27	锅炉补充水	65	100	—	272.14	2.701
28	热源蒸汽进口	179.89	1000	—	2773.04	0.216
29	热源蒸汽出口	150	1000	—	632.51	0.216
30	热源蒸汽进口	179.89	1000	—	2773.04	0.119
31	热源蒸汽出口	133	1000	—	559.61	0.119

能量分析是根据收益与代价之比进行的。在此, 收益由两部分构成, 一部分是冷量 Q_c , 另一部分是加热锅炉补充水所获得的热量 Q_b , 而代价为消耗的蒸汽热量 Q_r 。在此提出了复合制冷-热泵系数 $\varepsilon_c = (Q_c + Q_b) / Q_r$ 。该系数表示单位耗能产生的冷量及有用的热量总和。而焓分析则是从能量品质

的角度来进行评价的。焓效率是冷量焓 $E_{x,c}$, 与加热锅炉补充水所获得的热量焓 $E_{x,b}$ 之和与消耗的蒸汽焓 $E_{x,r}$ 的比值, 即 $\eta_{Ex} = (E_{x,c} + E_{x,b}) / E_{x,r}$ 。

以双效溴冷机和单效溴化锂热泵组成的具有相同功效的联合循环作为对比循环。据表1的数据, 通过热力性能计算, 结果如表2所示。

表2 比较分析结果

Tab.2 The results of calculation and analysis

		制冷-热泵复合循环		对比循环	
热源供热量 / kW		726.7		1667	
热源供热分布		发生器1	461.9	双效溴冷机	466.6
其中:		发生器3	264.8	单效溴化锂热泵	1200.4
能量分析	冷却水带走热量 / kW	1307.72		2247	
	制冷量 / kW	580		580	
	复合系数 ε_c	2.598		1.696	
焓分析	耗总驱动蒸汽焓 / kW	237.5		544.7	
	冷却水获得焓 / kW	59.8		115.9	
	冷量焓 / kW	37.99		37.99	
	焓效率	0.412		0.283	

从表2所列数据可知, 制取580kW的冷量时, 制冷-热泵复合循环需热源提供726.7kW的热量, 而对比循环则需耗能1667kW, 即每单位制冷量耗能制冷-热泵循环较小。这是因为现在普遍使用的双效溴冷机和单效溴化锂热泵组合(即对比联合循环)将大部分的热源用于单效热泵加热锅炉补充水, 用于制冷过程的热量则很少。这样热源的热量从质量的角度看并没有很好的被利用, 并且单位冷量所需要的锅炉补充水流量很大, 热电厂在实际运行中锅炉补充水是一定的, 所需的锅炉补充水流量过大则限制着热电厂的供冷供热比。而这里提出的制冷-热泵复合循环则能有效的解决这个问题。

制冷-热泵复合循环复合性能系数 ϵ_c 为2.598, 而对比循环则为1.696, 两级双效制冷-热泵复合循环的制冷-热泵综合耗能较少。这是因为在热源热量消耗中, 对比循环的制冷耗热量所占比例很小。

从能量的质量角度看, 制冷-热泵复合循环的焓效率为0.412, 对比循环为0.283。这一方面是因为制冷-热泵复合循环能解决对比循环将大部分的热源用于加热锅炉补充水的问题, 从能量质量角度提高效率, 另一方面是因为制冷-热泵复合循环系统省去了一台蒸发器与冷凝器, 使得在换热过程中减去了两个换热温差, 从而提高了换热效率。

4 结论

通过以上热力计算和分析, 可以得到以下几点结论:

1) 与双效溴化锂制冷循环和单效溴化锂热泵循环的联合运行循环相比, 制冷-热泵复合循环的结构省去了一台蒸发器与一台冷凝器, 节省了初投资, 增加了总体的紧凑度。

2) 制冷-热泵复合循环复合性能系数 ϵ_c 达到2.598, 而对比循环的性能系数只有1.696, 前者比后者提高了53%。

3) 制冷-热泵复合循环的焓效率为0.412, 而对比循环的焓效率为0.283, 前者比后者提高了45%。

本文受上海市重点学科建设项目(J50501)资助。
(The project was supported by Shanghai Leading Academic Discipline Project (No. J50501).)

参考文献

- [1] 金苏敏, 刘坚. 热管废热溴化锂制冷机[J]. 流体机械, 1999, (8): 28-31. (Jin Sumin, Liu Jian. Lithium bromide absorption refrigeration of heat pipes' waste heat [J]. Fluid Machinery, 1999, (8): 28-31.)
- [2] 姜培朋, 马永志. 三效吸收式溴化锂制冷机开发设计[J]. 暖通空调, 2009, 2(39):84-86. (Jiang Peipeng, Ma Yongzhi. Design and development of triple-effect LiBr absorption chillers[J]. HVAC, 2009, 2 (39): 84-86.)
- [3] 王永刚, 钟水库. 太阳能溴化锂吸收式制冷技术的研究进展[J]. 能源研究与信息, 2009, 3(25):160-165. (Wang Yonggang, Zhong Shuiku. Progress of solar-driven LiBr absorption refrigeration technology[J]. Energy Research and Information, 2009, 3 (25): 160-165.)
- [4] 樊庆堂, 吴进发. 实用制冷工程设计手册[M].北京: 中国建筑工业出版社,1994.
- [5] 卢玫, 李冰, 李美玲. 低温热驱动两级吸收式制冷系统中中间压力的确定[J]. 上海理工大学报,2001, 23(1):79-82. (Lu Mei, Li Bing, Li Meiling. Prediction of medium pressure in two-stage absorption refrigeration system driven by low-temperature hot source[J]. Journal of USST 1, 2001, 23(1): 79-82.)
- [6] 贾明生. 溴化锂水溶液的几个主要物性参数计算方程[J]. 湛江海洋大学学报, 2002,22(3):52-58. (Jia Mingsheng. Several Main Calculating Equations of Properties Parameter of LiBr-H₂O[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2002, 22(3):52-58.)
- [7] Havelsky, V. Energetic efficiency of cogeneration systems for combined heat, cold and power production[J]. International Journal of Refrigeration, 1999(22): 479-485.

作者简介

黄少君, 女(1985-), 硕士研究生, 上海理工大学军工路校区能源与动力工程学院热工程研究所, 200093, (021) 55271990, E-mail: rose_luu@yahoo.com.cn. 研究方向: 能源高效利用。

About the author

Huang ShaoJun(1985-), female, postgraduate student, University of Shanghai for Science And Technology, School of Energy and Power Engineering, Thermal Engineering Research Institute, 200093, (021)55271990, E-mail: rose_luu@yahoo.com.cn. Research fields: energy efficient utilization.