

不溶混液体双工质余热回收系统分析

张继林(哈尔滨锅炉厂)

牟尚军(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

[摘要] 本文对蒸汽/不溶混液体底循环作了较为系统的热力循环分析计算,该循环不但可以提高循环热效率,还可以解决单纯采用有机加工质循环存在的溢漏和热力性质不理想等问题,并将计算结果与传统水蒸汽底循环作了比较,认为提出该循环并对此作研究是必要的,其研究结果对于提高余热回收热效率是有意义的。

关键词 余热回收系统 不溶混液体 双工质 分析

1 前言

余热回收系统可以采用水作为循环工质,也可以采用有机工质作为循环工质,目前非共沸混合工质的应用也不断出现,而这些工质循环或多或少存在着缺点。水作为循环工质对低温应用的朗肯循环并非是一种合适的工质,因其潜热较大,从余热热源放热和循环工质吸热的 $T-Q$ 图上可以看出,如果选用较高的循环压力,因蒸发加热量需较大,在有限的余热放热范围内较难实现,而选用较低的循环压力,其循环效率又较低。而有机工质和非共沸混合工质虽然热效率较水循环要高,但有机加工质循环常常:(1)热力性质有时不够理想;(2)轴封溢漏问题不易解决;(3)换热性能较差。而由 B. M. Burnside^[1] 首先提出的不溶混双工质朗肯循环既提高了循环热效率,也改善了纯有机工质热力性能,同时也可以采用水蒸汽轴封解决溢漏问题。本文对不溶混双工质余热回收循环做了分析计算。

2 不溶混液体双工质朗肯循环

在余热回收中,一般都采用朗肯循环。在朗肯循环中,以高分子量工质代替水,有饱和汽线趋于垂直、质量流量大等内在的优越性^[2]。在所给定的循环温度范围内,较低的汽轮机焓降可以减少所需的汽轮机叶片级数,分子量为水蒸汽 5-7 倍的蒸汽,就有可能在合适的速比下使用单级透平。根据高效率的设计需要,选择或多或少的易挥发性工质,汽轮机的横向流通面积可以相应地被减少或增加^[3]。分子量大约为 100 左右的工质在 $T-S$ 图上有近似垂直的饱和汽相线,这样可避免汽轮机中出现液滴或省去再热的必要。

对蒸汽动力循环工作流体的一个主要要求是具有化学稳定性,在这方面,虽然有些化合物是非常稳定的,挥发性适当,但这些化合物在焓-熵图上饱和汽线的 $dh/ds > 0$,以致汽轮机内有较高的过热排汽发生。然而,从

收稿日期 1993-05-06 修改定稿 1993-07-25

本文联系人 张继林 男 33 工程师 150040 哈尔滨锅炉厂奥深技术开发公司

T-S 图上可以看出,这些工质的含水混合物的露点线在纯有机工质和纯水两端之间变化。只要控制双工质的组成成份,任何所需斜率的露点线都可以得到。图 1 中表示了不溶混双工质中水的比例不同时,露点线和低共沸线的形状⁽⁴⁾。

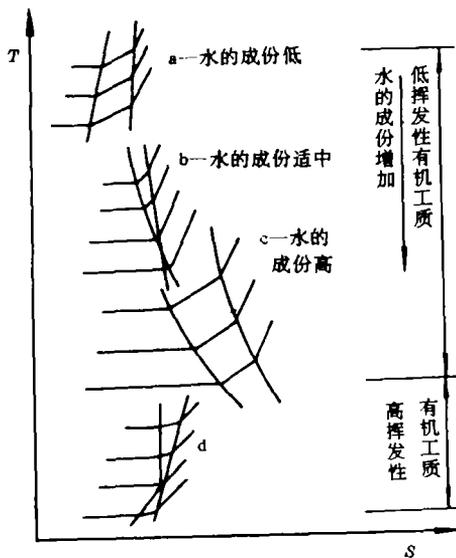


图 1 T-S 图上典型的露点线和低共沸线形状

组份(图 4 中 2'' 点到 2' 点)。在冷凝的这个阶段,在 2' 点蒸汽组份是低共沸组份。在 2' 点开始时,凝结液完全由富裕的化合物液体组成。在低共沸冷凝过程中,蒸汽组份始终保持低共沸组份,在整个冷凝过程结束时,液体组份也保持为 $X_{i,urb}$ 。

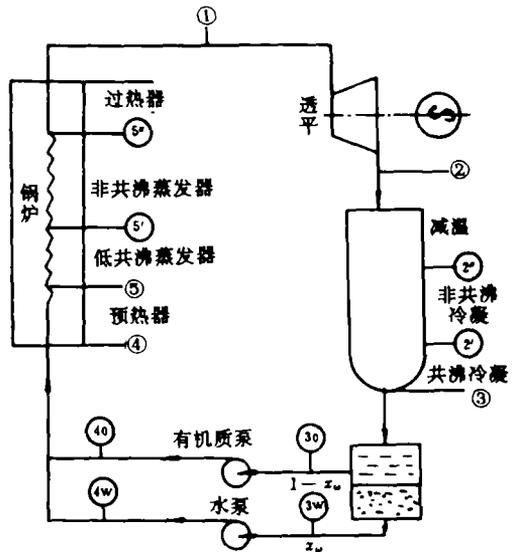


图 2 朗肯循环系统

图 2、图 3 分别表示了不溶混液体双工质朗肯循环的系统图和 T-S 图。循环设有两个循环泵:一个泵水,一个泵有机工质。分离器利用液体的不溶混性质和明显的液体密度差来分离两种液体,以便调整混合比例。当冷凝时,混合物的性质取决于它的组份,蒸汽在露点线上 PEW 开始冷凝(图 4)。如蒸汽组份是低共沸组份 $X_{i,urb}$ 冷凝在 E 点完成,在 E 点冷凝的蒸汽和与之产生相平衡的冷凝液有相同的组份,另一方面,如果蒸汽组份不是低共沸的组份 $X_{i,urb}$,则冷凝首先在较富裕的化合物的露点线上(图 4 中 2'' 点),较富裕的化合物沿着露点线冷凝直到蒸汽组份为低共沸

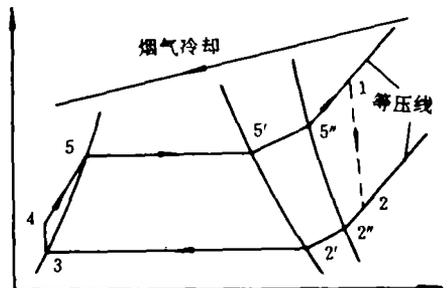


图 3 两种工质组份不变的不溶混液体双工质的 T-S 图

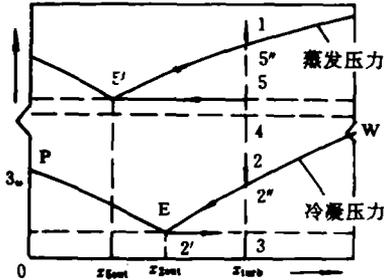


图4 双工质循环的T-X图

经分离器分离后,不溶混液体在点 3_0 和 3_w 由泵加压到 4_0 和 4_w 点锅炉压力,且在 4 点重新组成混合液流在锅炉的第一部份预热到 5 点,温度增加到双组份共沸温度——在锅炉压力下的低共沸点温度,蒸汽以低共沸组份 X_{low} 产生,直到液体混合物中组份少的液体枯竭。这个沸腾阶段,在 $5'$ 点,富裕的化合物液体与蒸汽混合物混合被加热,直到 $5''$ 点,全部液体蒸发为蒸汽。在沸腾终了,最后的组份又是 X_{high} ,在汽轮机进口前过热达到条件 1 ,然后蒸汽在汽轮机内膨胀做功,完成此循环。

3 蒸汽和不溶混液体双工质的余热回收系统

对于初温较高的余热源可以采用双压蒸汽和不溶混液体双工质的余热回收系统。见图5、图6^(5,6)。

该循环工作原理:此循环的高压部分与传统循环一样,是水蒸汽循环。在低压部分,液体强制循环通过省煤器从 1 到 2 ,加热到 P_L 下的低共沸温度,随后经过两种液体的分

离器,分离出的水加压到高压 P_H 进入锅炉高压段。按要求组份的水和有机工质液体双工质循环至低压废热锅炉的其它部分 5 至 7 。

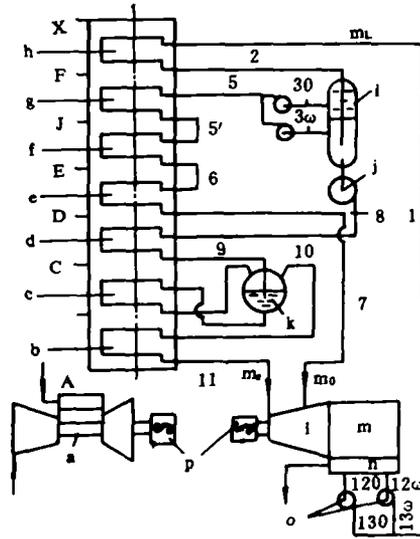


图5 先进的水蒸汽和不溶混液体循环系统

- a. 燃气透平 b. 高压过热器 c. 高压蒸发器
- d. 高压预热器 e. 低压过热器 f. 露点沸腾锅炉
- g. 低共沸沸腾锅炉 h. 省煤器 i. 分离器 j, o. 给水泵
- k. 高压锅筒 l. 混合蒸汽透平 m. 冷凝器
- n. 热井 p. 发电机

蒸汽混合物在混合透平的低压进口 7 进入低压部分,在低压混合蒸汽膨胀到冷凝压力前与高压膨胀蒸汽混合,排汽冷凝后的两种液体被分离且在冷凝器中脱氧,然后由低压给水泵加压到低压循环压力 P_L ,完成此循环。

该循环的计算可以从热回收部分的热平衡出发,导出各点状态及功的计算公式:

3.1 混合透平出口处蒸汽中水蒸汽的质量成份 x

$$x = \frac{(h_A - h_B)(h_{30} - h_{130})}{y(h_{11} - h_{10})(h_F - h_X) + (h_A - h_B)(h_{30} - h_{130} - h_{3w} - h_{13w})}$$

这里, y ——从分离器泵到高压加热器的水占整个回路中水的比例;

$$h_B = h_C + (h_A - h_C)(h_{10} - h_9)/(h_{11} - h_9)$$

$$t_c = t_9 + \Delta_1, t_F = t_5 - \Delta_2$$

$$t_5 = t_2 = t_3 = t_{out} \text{——低共沸点温度}$$

$$h_3 = h_2 = h_5 = h(P_L, t_{out})$$

$$1 \text{ 点: } h_1 = xh_{13w} + (1 - x)h_{130}$$

$$2 \text{ 点: } t_2 = t_{out}, h_2 = xh_w(P_L, t_{out}) + (1 - x)h_{org}(P_L, t_{out})$$

5' 点: 工质混合物在 5 点进入低共沸沸腾状态, 在 5' 点低共沸沸腾状态结束, 在 5' 点, 每份混合物中含水 x_{oip} , 则在 5' 点蒸汽总额为: $(1 - X)/(1 - x_{oip})$, 剩余的水为 $(X - x_{oip})/(1 - x_{oip})$, 所以 $h_5 = [(X - x_{oip})h_{3w} + (1 - X)h_{oip}]/(1 - x_{oip})$, 这里, h_{3w} 是在低共沸下水的比焓, h_{oip} 是低共沸蒸汽混合物比焓。

6 点: 首选确定 t_6, t_6 是低压部分在低共沸沸腾后, 剩下的液体在分压下的沸点,

$$h_6 = h(P_L, X, t_6) = Xh_w(P_L, t_6) + (1 - X)h_{org}(P_L, t_6)$$

$$7 \text{ 点: } t_7 = t_6 + \Delta_3$$

$$h_7 = h(P_L, X, t_7) = Xh_w(P_L, t_7) + (1 - X)h_{org}(P_L, t_7)$$

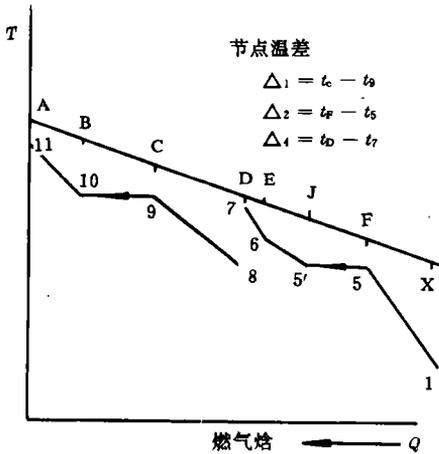


图 6 循环的 T-Q 图

3.2 由热平衡可以得到低回路中水的质量成份 X

$$X = x(1 - y)/(1 - xy)$$

3.3 各点焓的确定

Δ_3 由过热器出口允许的蒸汽和烟气之间的最小温差所限制。

3.4 功率的计算

低压透平进口总焓:

$$H_{Lpin} = m_a h_{ext} + m_0 h_7 = m_L xy h_{ext} + m_L \times (1 - xy) h_7$$

这里, h_{ext} 是高压透平排汽焓, 为了减少混合

换热的不可逆损失，高压蒸汽最好膨胀到和低压进汽条件相同，即 $h_{\text{out}} = h_w(P_L, t_1)$

汽轮机输出功率 $W_T = m_L xy(h_{11} - h_{\text{out}}) + m_L(h_{L\text{pin}} - h_{\text{exip}})$ 这里， h_{exip} 为低压汽轮机排汽焓，该焓对于汽轮机膨胀可能落在冷凝压力线上不同段，可以分别按不同状况计算。

整个给水泵功率

$$W_P = m_L \{ xyv_{3w}(P_H - P_L) + [xv_{12w} + (1 - X)v_{120}](P_L - P_C) \} / \eta_P$$

汽轮机输出净功

$$W = W_T - W_P$$

4 计算结果及比较

利用程序以燃气轮机 1 kg/s 排烟作为余热源，对循环作了计算，其计算条件见表 1。

表 1 循环计算条件

循环温度(°C)		节点温差 Δt (°C)			低压过热温差(°C)	排烟性质		内效率		
t_c	t_{11}	Δ_1	Δ_2	Δ_4	Δ_3	t_A (°C)	C_{pm} (kJ/kg·K)	泵效率	高压透平	低压透平
30	475	30	30	35	8	513	1.047	0.7	0.82	0.86

对该种循环的蒸发压力可以取得高些，从表 2 中可以看出，当压力 $P_H = 8 \text{ MPa}$, $P_L = 0.75 \text{ MPa}$ 时，该循环热效率较佳。

表 3 列出了在表 1 和 $P_H = 8 \text{ MPa}$, $P_L = 0.75 \text{ MPa}$ 条件下的输出功及各点状态的最佳值。

由计算结果可以看出，用壬烷/水和正辛烷/水作为循环工质可以回收较多的热能。对于排烟温度较高(500~560°C)的余热源，其回收热效率在 30% 以上。与同样循环条件下的水工质余热回收系统^[6]相比，热效率提高 5% 左右。通过计算比较可以看出，以不溶混

液体双工质循环代替水蒸汽循环的余热回收系统是完全可以与纯水循环竞争的。

表 2 不同压力下循环的输出功(kW)

(壬烷/水)

P_H (MPa) \ P_L (MPa)	8	5	3
0.75	144.15	—	—
0.5	129.845	—	—
0.3	120.364	120.23	119.294

表 3 所建议循环的最佳条件及输出功

循环工质类型	特 性 值		循环压力 (MPa)			水的质量成份			
	W (kW)(循环最大净功)	η_c (%) (循环效率)	P_H (高压)	P_L (低压)	P_C (冷凝压力)	z	z_{out}	X	Y
壬烷/水	144.115	32.54	8	0.75	0.005	0.417	0.34	0.066	0.902
正辛烷/水	136.565	30.84	8	0.75	0.0065	0.451	0.25	0.075	0.902

表4 循环中各点温度(°C)及工质质量流量

循环工质类型	m_L (kg/s) 工质流量	$t_{2/3}$	t_6	t_4	t_7	t_2	Δt
壬烷/水	0.2590	157.14	157.14	214.94	222.94	90	35
正辛烷/水	0.2397	150.12	150.12	180.40	188.40	90	35

5 结论

不溶混液体双工质作为余热回收的循环工质,不但可以得到比水蒸汽循环大的输出功,而且利用水蒸汽或水作轴封可以有效地解决纯有机工质存在的严重泄漏问题,这对减少生产费用,改善工质的换热性能,提高底循环热效率是很有实际意义的。

参 考 文 献

- 1 Burnside B M. The immiscible liquid binary Rankine cycle. *Journal Mechanical Engineering Science*, 1976, 18(2)
- 2 Tabor H and Bronicki L. Establishing criteria for small

vapour turbines. S. A. E. , National Transportation, Power Plant and Fuels Lubricants Meeting, 1964 (October), Paper 931c.

- 3 Horn G and Nossis T. D. The selecting of working fluids other than steam for future power generation cycle. *Chem. Engr*, 1966, 44, 298.
- 4 Burnside B M. Research Note; Thmptemperatur-entropy diagrms of the immiscible liquid binary cycle. *Journal Mechanical Engineering Science*, 1977, 19(3), 131-132.
- 5 Burnside. B. M. An improved dual-pressure bottoming cycle for waste heat recovery. *Trans I Mar E (c)*, 1981, 93, Paper, c72, P27-32.
- 6 Burnside. B. M. Dual pressure steam/immiscible liquid cycle for gas turbine exhaust heat recovery. *Transaction of the ASME, Journal of engineering for power*, 1982, 104, (1), 77-82.

【简讯】

6S60MC 新型柴油机在沪问世

由上海沪东造船厂制造的 6S60MC 新型船用低速大功率柴油机, 1993 年 7 月 13 日在上海通过了国内外专家的认可。

6S60MC 柴油机主要用于 70 000 吨级以上的大型船舶上, 是一种二冲程、单作用、十字头、直流扫气、恒压式涡轮增压器、可直接换向并由单螺旋桨推进的新型柴油机。主机转速在每分钟 90 转时, 最大持续输出功率为

9 021 千瓦。该机有 6 个气缸, 缸径 600 毫米, 活塞冲程达 2 292 毫米。该机采用液压链条张紧装置, 以及随负荷变化的气缸注油器等新颖结构, 大大提高了主动力推进装置的使用性能。来自造船、造机、航运、科研院所等的国内外专家 70 余人, 参加了由中国船舶工业总公司举行的 6S60MC 新型柴油机技术介绍会。(邵天骏)

design and construction. Taking small and medium-sized circulating fluidized bed boilers of low circulation ratio as examples, the author has made an exploratory study of the furnace lining design, structural layout, selection of suitable materials and construction methods. **Key words:** *fluidized bed boiler, furnace lining, design, construction*

- (250) **Optimization of Thermo-Chemical Factor of a Nuclear Heat supply Plant** Liu Jinsheng, Tang Jinhai (*Tianjin Thermoenergy Company*)

By employing a relatively detailed thermal load time retardation chart with the unit heat supply area net value of the nuclear heat supply system assigned as an optimization objective, an optimization of the nuclear heat supply plant thermochemical factor was conducted. The said optimization method is described in the present paper. **Key words:** *nuclear heat supply plant, thermochemical factor, optimization method*

- (258) **Analysis of a Waste Heat Recovery System Using steam/Immiscible Liquid Binary Working Medium** Zhang Jilin (*Harbin Boiler Works*); Mu Shangjun (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

A relatively systematic analysis and calculation has been performed of the thermodynamic cycle of a steam/immiscible liquid waste heat recovery system. The application of this cycle makes it possible to not only enhance cycle thermal efficiency but also solve sealing problems and the undesirable thermodynamic characteristics associated with the use of an organic working medium cycle. The calculation results are compared with those of a traditional water steam cycle. The authors maintain that the proposed study of the above cycle is necessary and the study results can play a significant role in raising the thermal efficiency of waste heat recovery systems. **Key words:** *waste-heat recovery system, immiscible liquid, binary working medium analysis*

- (264) **On-Line Communication of HP3054A System with PC-Bus Microcomputer** Zhang Ming (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

This paper describes the on-line communication of HP3054A system with PC bus microcomputer SUN286 through the use of IEEE-488 interface card. The author gives a detailed account of the system configuration, hardware connection, GPIB software package and some key points of programming procedures. With the help of the test system based on an on-line communication it is possible to achieve a better performance in data acquisition and processing, thus opening a new avenue for the full utilization of the 3054A system and HP Co. -supplied instruments.

Key words: *IEEE-488 bus, measuring and testing system, PC bus microcomputer, on-line communication, software*