

# Kalina 循环的研究和开发及其 提高效率的分析\*

吕灿仁 严晋跃 马一太

(天津大学)

〔摘要〕 本文依据国外最新研究与开发动态综合分析和评价Kalina 循环的热力学原理、技术性能、经济可行性和存在问题。并利用作者提出的“P”准则分析揭示Kalina 循环改善效率的本质和方向。

关键词 Kalina循环 热力学分析 循环效率 P准则

## 1 引言

在世界范围内,尤其在发达国家中,联合循环(Combined Cycle)作为一种高效、经济和低环境污染的动力转换方式,越来越为人们所重视。典型的循环模式是燃气轮机加底部蒸汽动力循环。联合循环的改进和完善将集中体现在如下三个方面:

(1) 顶部燃气轮机循环的改进和完善; (2) 底部蒸汽动力循环的改进和完善; (3) 底部循环和顶部循环二者的合理安排与匹配。

Kalina循环是针对上述(2), (3)方面而提出的一种与顶部燃气轮机循环有较好匹配性能的底部蒸汽动力循环模式。在Kalina循环首次于1983年公开之后(Kalina, 1983), 世界各国能源和电力学术界引起了较大的反响。Kalina声称: 该循环技术亦可使燃煤的发电厂提高效率。这一点特别引起以燃煤为主的国家的注意。

然而,对Kalina循环技术的现实性和可行性一直是尚未证实的问题,各国学者结论也不尽一致。本文旨在综合近年来国外Kalina循环的研究和进展,分析评价Kalina循环在热力学、技术和经济等方面的特性,为我国进行此项技术的研究和发展提供信息。

## 2 Kalina循环的基本思想

Kalina循环的最初应用对象是显热源(变温热源)的动力转换,它是一种热回收技术。从Kalina公开发表有关该循环的各种模式看来,均是针对余热显热利用,主要是以燃气轮机排气余热进行发电为背景的。

图1给出了变温热源(显热源)理想循环的“三角形”特性。图2是纯工质(通常是水)Rankine循环。由于纯工质的物性特点决定了锅炉中工质相变过程定温特性,从而降低了能源的利用率。在常规蒸汽发电系统中,蒸发过程是导致循环效率、尤其是热

\*本课题承国家自然科学基金和国家教委科研基金资助

收稿日期 1990-07-06

力学第二定律效率较低的根本原因。图3是以非共沸混合工质(定组分)作为工质的Rankine循环。该循环在工质吸热过程中显著地减少了热能传递过程的不可逆性,而在工质放热过程中,却呈现不利情况,增大了循环冷凝过程的不可逆性。整体循环的特性将取决于蒸发、冷凝过程得与失的权衡。简单的改变纯工质为混合工质,未必能够改进动力循环的性能。

Kalina循环的不同之处,在于该循环利用改变混合工质成分浓度的方法,使循环在整体上与热源和冷源有较好的匹配关系。

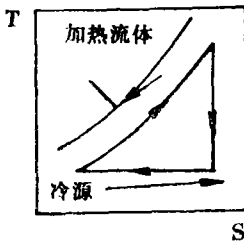


图 1 理想循环

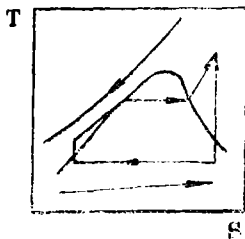


图 2 纯工质Rankine循环

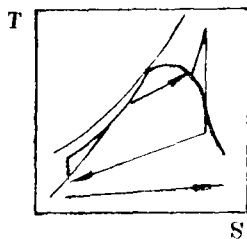


图 3 定组分非共沸混合工质 Rankine循环

图4是Kalina循环原则(或基本)系统图。与Rankine循环区别在于循环系统中有一个分馏子系统(Distillation Subsystem),

其它设备则与Rankine循环相似。图4和图5给出了Kalina循环基本模式的热力过程。各过程工作如下:

(1) 在锅炉中二元氨/水混合工质,称“工作溶液”(Working Solution)从热源吸收热量用于动力循环;

(2) 混合物过热蒸气送至透平膨胀做功;

(3) 透平排气余热用于分馏过程所需能量,分离形成“富氨蒸汽”(enrich Vapor)和“富水溶液”或“稀溶液”(Lean Liquid);

(4) “富水溶液”与“工作溶液”混合形成含氨浓度较低的“基本溶液”,在低压冷凝器中实现完全冷凝;

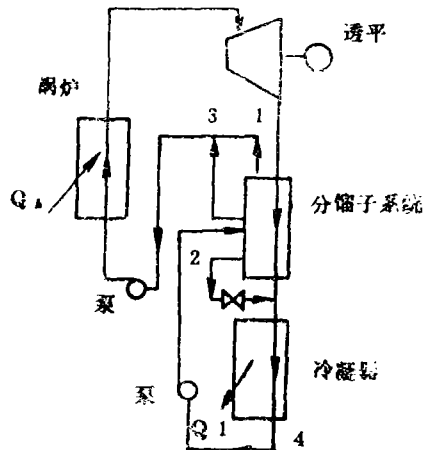


图 4 Kalina循环原则(或基本)系统图  
1.富氨蒸汽 2.富水溶液 3.工作溶液 4.基本溶液

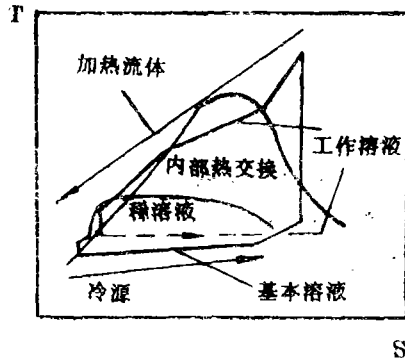


图 5 Kalina循环系统基本原理

(5) “基本溶液”升至相对较高压力后与“富氨溶液”混合,重新形成“工作溶

液”在高压冷凝器冷凝后，再度升至蒸发压力送入锅炉，重复上述过程，完成整个循环。

Kalina循环具有如下基本优点：

(1) 在蒸发过程中工质变温蒸发，减少工质吸热过程的不可逆性，降低了热源的排烟温度，提高了热源的利用率，改善了循环性能；

(2) 冷凝过程中的基本工质（或基本溶液）含氨较少，减少了混合工质在冷凝过程中的不可逆性，抑制了混合工质在动力循环“冷端”部分的不利因素，同时实现了在较低压力下工质完全冷凝的问题。

(3) 利用内部回热技术，将透平排气的部分余热用于分馏过程所需能量，既解决工艺用热，又节约了能量。

Kalina循环的基本构思，是以氨/水混合物为工质、在系统中工质浓度可以变化的Rankine循环的改进循环。工质浓度的改变是应用回热技术和吸收式制冷（或热泵）技术完成的。

### 3 Kalina循环热力系统及其多种组合形式

图4的Kalina循环系统可以认为是由高温部分锅炉——透平子系统和低温部分分馏——冷凝子系统构成。按照分馏——冷凝子系统形成工作溶液的方式不同，Kalina将其分类为五种分馏——冷凝子系统。同时，Kalina又将高温部分锅炉——透平子系统按照系统构成方式和功能划分为七种类型。如果认为所有锅炉——透平子系统与所有分馏——冷凝子系统可以任意组合，总计Kalina循环系统可有 $5 \times 7 = 35$ 种组合形式。

从近年Kalina公开发表的文献看，研究和开发的重点是如下两个系统：锅炉——透平系统1加分馏——冷凝系统2（KCS1D2）和锅炉——透平系统6加分馏——冷凝系统2

（KCS6D2）。见图6和图7。

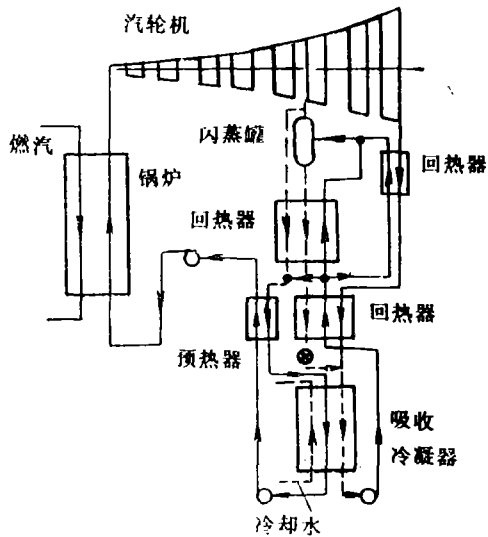


图6 KCS1D2原理系统图

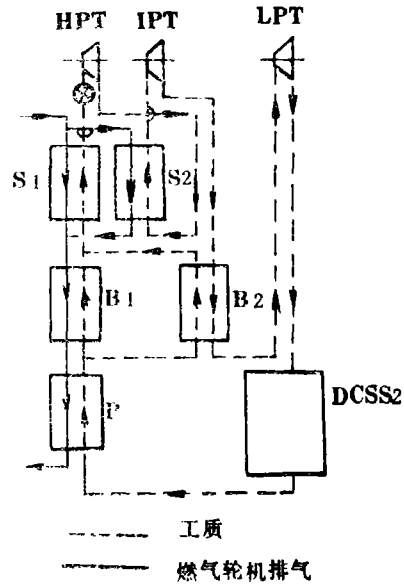


图7 KCS6D2原理系统图

S1, S2过热器 B1, B2回热器 P预热器  
DCSS2 第二类型分馏冷凝系统

## 4 Kalina循环系统的热力学分析

### 4.1 基本Kalina循环的热力学分析

自Kalina（1983）公开循环后，围绕Kalinn循环的热效率、烟效率、不可逆性损

失分布以及循环参数的分析和优化等进行了广泛的探讨。虽然各学者分析方法不尽相同,分析循环的对象也有出入,但得到的结论是肯定的,即 Kalina 循环的热力学性能比 Rankine 循环优越。它与燃气轮机组成的联合循环总效率可达50%以上 (Kalina, 1984a, 1987, 1989, Marston, 1990), 比 Rankine 循环效率提高5% (最低值) 以上

(Kalina 1983, 1984, 1987, 1988, 1989, E1-Sayed 和 Tribus 1985b, Stecco等1989a, Marston 1990, Park, 1990)。尚未见到不如 Rankine 循环的文献。

在循环参数分析上,除 E1-Sayed 和 Tribus (1985b) 较早发表的文献外,最近 Stecco (1989a) 和 Marston (1990) 的分析结果较为深入。参数涉及到循环的压力(锅炉压力和冷凝压力)、浓度(工作浓度和基本浓度)、温度(工质的最高温度、热源的最高温度和排气温度的极限,循环节点温差)等热力参数。根据以往参数分析结果看,关键性热力参数是循环的工作浓度、基本浓度、节点温差等,循环的其它参数往往受到循环的外部条件即热源和冷源的温度水平和变化所制约。

Kalina 循环的内部不可逆损失的分布比例方面,锅炉中的烟损失仍然占有显著比例 (Stecco, 1989), 其次是传热损失。值得指出的是,这一结论只是 Kalina 循环系统内部的比较结果,并非表明 Kalina 循环在高温是不利的。相反, Kalina 循环在效率改进方面的最大收益是在锅炉。只不过原来 Rankine 循环在高温部分(锅炉)中的不可逆损失太大,用 Kalina 循环所作的改进仍未打破锅炉是不可逆损失比例最大的状况,从这个意义上说, Kalina 循环在高温部分仍有改进的潜力。

#### 4.2. Kalina 循环 KCS1D2 和 KCS6D2 的比较

Kalina 循环 KCS1D2 和 KCS6D2 系统在低温部分都采用分馏——冷凝子系统 2, 而

在高温部分系统布置不同(见图6, 图7)。

从热力学角度看 KCS1D2 和 KCS6D2 的不同之处在于: 循环的热源与工质换热过程不同。按我们的观点 (1987), 两系统的差别主要在于热源与工质的匹配性能不同, 或“非必要不可逆损失” (Non-necessary Irreversible Losses, 原称“无效不可逆损失”, 严晋跃等, 1987) 不同, 这可用我们提出的“P”准则进行分析。

本文对作者 (1987) 提出的“P”准则定义作如下修正:

$$\text{定义 } P = \frac{(m C p)_{\min}}{(m C p)_{\max}}, P \in [0, 1]$$

这里  $(m C p)_{\min}$  或  $(m C p)_{\max}$  可以是热源或工质流体。当  $P=0$  时, 工质与热源的匹配最差;  $P=1$  时, 工质与热源匹配最佳, 这时非必要不可逆损失为 0, 在  $T-Q$  图中, 热源与工质的过程线呈“平行”现象。

根据 Kalina (1988, 1989) 的计算 KCS1D2 和 KCS6D2 中锅炉的热源与工质  $T-Q$  曲线的结果, 我们可将其“P”值算出(见表1)。如果以热量传递相对值  $(Q/Q_{tot})$  为权的 P 值加权平均计算  $\Sigma P = \Sigma (Q_i/Q_{tot}) P_i$ , KCS6D2 的  $\Sigma P$  为 0.763, 而 KCS1D2 却为 0.460。可见 KCS6D2 大大地减少了锅炉传热的不可逆损失, 改善了工质与热源的匹配性能。所用的方法是改变传热流体之间的流量比, 即利用“分流”和“合流”手段, 减少 P 值较小的热量传递。

由 KCS1D2 和 KCS6D2 的“P”准则分析, 进一步推而广之, 可以发现这样一个改进循环过程的思路: 改进循环可以通过两条途径去实现, 一条途径是利用改变工质的性能来改变循环(尤其是工质与热源的匹配性能); 另一条是利用改变传递能量的流体的流量比来改变循环的性能(通过“分流”或“合流”来实现)。两条途径都遵循一个原则, 即选择 P 值最低的部分去着手改进, 以

表1 两种系统P准则的比较

系 统	项 目	预 热 段	蒸 发 段	过 热 段
KCS1D2	Q/Q <sub>tot</sub>	0.216	0.446	0.338
	P	0.810	0.251	0.514
	ΣP	0.460		
KCS6D2	Q/Q <sub>tot</sub>	0.219	0.217	0.175/0.389
	P	0.948	0.449	0.538/0.935
	ΣP	0.763		

利有的放矢。由 Rankine 循环到 Kalina 循环是沿着第一条途径，而由 Kalina 循环的 KCS1D2到KCS6D2是沿着第二条途径。

## 5 Kalina循环的经济评价

到现在为止，对Kalina循环的经济性评价的文献还很少。其原因在于，Kalina循环的商业性和技术可靠性还未得到验证，实用化还有一定的距离。

美国 Electric Power Research Institute (EPRI)1986年就Kalina循环的技术经济性立题(Project 2358-4)进行了可行性评估。其结论是：作为小型，联合电站的底部循环系统，Kalina循环比相应的蒸汽Rankine循环的计算投资费用稍低。然而，对这一新技术需要进一步分析，尤其在换热器和循环性能间颇费权衡。

## 6 Kalina循环的技术评价

Kalina循环的技术性问题主要是：氨—水混合工质在高温下的稳定性，氨—水工质对材料的腐蚀性，循环排烟温度，和循环运行变负荷特性等等。

### 6.1 氨—水混合工质在高温下的稳定性

此问题是许多学者疑虑最多的一个技术性问题，它直接影响系统的安全性。针对Kalina循环工质氨—水稳定性的实验只是最近由Kalina(1989)和Leibowitz首次公开发表。实验结果表明氨—水混合物的稳定性很好，其分解速度(1.5%/480小时)甚至比水的分解速度(1.5%/小时)还低。然而，有关此方面的结论还有待于其他学者的重复性实验证实。关于氨—水分解方面的机理研究很少，Kalina认为氨—水混合物与纯氨的高温分解性能有较大的不同，氨—水混合物中的水有抑制氨分解的作用。

**6.2 氨—水工质对材料的腐蚀性** 氨—水混合物比纯水的腐蚀性要大。Kalina(1989)报导的氨—水腐蚀性实验结果表明，标准的商业性材料可以在Kalina循环中使用，材料不是Kalina循环应用的障碍性问题。然而同氨—水稳定性问题一样，腐蚀性问题亦有待进一步证实。

**6.3 循环排烟温度问题** Kalina循环由于采用氨—水混合工质，改善了热源与工质的匹配性能，可以降低热源的排放温度，提高能源利用率。然而，与此同时带来排烟温度太低(低于露点温度)，烟气中的酸性成分结露而腐蚀换热器的问题。在Kalina(1989)关于KCS6D2系统分析中，排烟温

度提高至95℃左右（比以前Kalina循环的排烟温度要高），其目的在于解决此问题。

### 6.4 循环部分负荷下的运行特性

Kalina(1989)分析了KCS6D2在部分负荷条件下的特性。在蒸汽 Rankine 循环中,调整部分负荷是依靠节流减小膨胀比和容积流量来实现。这样会使得透平效率降低。而在 Kalina 循环中,由于增加了成分浓度这一个自由度,改变运行负荷可以通过改变工质浓度来实现。其原理是利用氨-水二组分对应一定压降的焓降不同的特点,当需要改变运行负荷时,改变工质的浓度,进而改变了焓降,达到改变负荷又保持循环处于高效率状态。

## 7 Kalina循环的示范电站

Kalina 循环的示范电站早在1985年就试图建立。在总容量为 6MW 的联合循环中,2.5MW 的 Kalina 系统作为其底部循环。厂址选在 California 的 Tracy。然而此项计划未能实现。1986年再度提出建立Kalina循环示范电站计划。该示范电站计划建在美国能源部(DOE)的能源工程中心(ETEC—Energy Technology Engineering Centre),位于 Los Angeles 西北大约40公里处。电站容量 3MW,采用KCS1D2系统。据 Kalina (1988)文献称,计划1989年初此示范电站就投入运行,但至今尚未有关它运行的信息。示范电站运行的成功与否,对今后 Kalina 循环的研究与开发有着重要的影响。

## 8 结 束 语

Kalina 循环在热力学原理上利用混合工质的物性特点,改进了传统 Rankine 循环的效率。提高循环效率的本质是改善了热源与工质的匹配性能,减少了“非必要不可逆损失”。Kalina循环在热力学方面的优越性是

可信的,是提高循环效率的有效途径。

Kalina 循环的经济性分析还远不够,其影响因素的不确定成分较多,尚有待进一步研究探讨。

Kalina 循环的技术性问题,包括工质的稳定性、腐蚀性等有待进一步重复实验验证,循环中有可能通过改变工质的成分实现负荷调节。由于涉及工程应用问题,对于 Kalina 循环技术的进一步研究开发,示范电站的运行结果有着重要的影响。

### 参 考 文 献

- 1 Berta G L, Pini Proto A. A more general approach to regenerative cycle: theory and applications. 23rd IECEC, 1988, No.889429
- 2 El-sayed Y M, Tribus M. Thermodynamic properties of water-ammonia mixtures theoretical implementation for use in power cycles analysis, The winter annual Meeting of the ASME, Miami, Florida, 1985
- 3 El-sayed Y M, Tribus M. Theoretical comparison of the Kalina and Rankine Cycles, ASME Publication AES 1985, Vol. 1
- 4 EPRI, Technology assessments of Advanced power generation systems II—Kalina bottoming cycle, EPRI AP-4661 1986,
- 5 Frie, W. Untersuchunge zu einem Prozeß für ein Wasserkraftwerk mit Ammonia-Wasser als Arbeitsmedium, Siemens Forsch. -u. Entwickl. -Ber. Bd. 1986 15, (2)
- 6 Fruttschi H U, Plancherel A. Comparison of combined cycle with steam injection and evaporation cycles, 1988 ASME COGEN-TURBO, 2nd Int. Sym. on turbomachinery, combined-cycle Technologies and cogeneration, 1988, IGTI-Vol.3
- 7 Gajewski Von W. et al. Der Kalina-Prozeß Thermodynamische Grundlagen und Realisierbarkeit, VGB

- Kraftwerkstechnik 1989,69 (5)
- 8 Kalina A I. United States Patent 1982, No. 4,346,561
  - 9 Kalina A I. Combined cycle and waste heat recovery power system based on a novel thermodynamic energy cycle utilizing low-temperature heat for power generation, 1983, ASME Paper 83-JPGC-GT-3
  - 10 Kalina A I. Combined-cycle system with novel bottoming cycle J. of Eng. for Gas Turbines and Power, 1984, 106(4)
  - 11 Kalina, A I. United States Patent 1984, No. 4,489,563
  - 12 Kalina A I. Discussion on combined-cycle system with novel bottoming cycle. J. of Eng. for Gas Turbines and Power, 1985, 107, (10)
  - 13 Kalina, A I. United States Patent 1985, No. 4,548,043
  - 14 Kalina A I, Tribus M, El-Sayed Y. A theoretical approach to the thermophysical properties of Two-Miscible-component mixtures for the purpose of power-cycle analysis. ASME Paper 1986, 86-WA/HT-54
  - 15 Kalina A I, Leibowitz H M. Applying Kalina technology to a bottoming cycle for utility combined cycles. ASME Paper 87-GT-35
  - 16 Kalina A I, Leibowitz H M. The design of a 3MW Kalina Cycle experimental plant. ASME Paper 88-GT-140
  - 17 Kalina A I, Leibowitz H M. Off-design performance equipment considerations and material selection for Kalina System 6 Bottoming Cycle, 1989 ASME COGEN-TURBO, 3rd Int. Sym. on Turbomachinery, Combined-Cycle Technologies and Cogeneration, Nice, France, 1989, Aug. 30-Sep. 1
  - 18 Leibowitz H M. A study to estimate the installation cost of a 6MWe combined cycle using the Kalina bottoming cycle final technical report, 1985, MTI 85TR18, (EPRI Research Contract No. RP2528-4)
  - 19 Marston C H. Parametric analysis of the Kalina Cycle. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1990, 112(1)
  - 20 Park M Y, Sonntag R E. Preliminary study of the Kalina Power Cycle in connection with a combined cycle system, Int. J. of Energy Research 1990, Vol 14, 153-162
  - 21 Silvertri Jr G J. Discussion on combined-cycle system with novel bottoming cycle, J. of Eng. for Gas Turbines and Power, 1985, 107, (10)
  - 22 Smith I K. Power from low-grade heat sources-project SPHERE-an evaluation of the triateral wet vapour cycle, 1985, CME January
  - 23 Stecco S S, Desideri U. A thermodynamic analysis of the Kalina Cycles, Comparisons, problems and perspectives, ASME Paper 89-GT-149
  - 24 Stecco S S, Desideri U. Optimization of the heat recovery section in combined power-plants, IECEC, 1989, 24th No. 899069
  - 25 严晋跃, 路岭, 马一太, 吕灿仁. 循环工质与变温热源匹配的热力学分析. 工程热物理学报. 1987, 8(4)

(下转第12页)

# The Calculation of Turbine Blade Vibration Characteristics by Use of a Coagulative Impedance Matrix Integrated Method

Wang Jian

(National Defense Science & Technology University)

Hu Deming

(Naval Engineering Academy)

## Abstract

An analysis of the free vibration problems of turbine single blade and shroud as well as lacing wire-connected blade groups has been undertaken by employing a coagulative impedance matrix integrated method involving finite element dynamic substructures. Specific computation procedures and calculation examples are given. Eight-node curvilinear superparametric shell unit is utilized for blade discretization. Calculation results have shown that the coagulative impedance matrix integrated method is easy to use and features a relatively high precision when it is applied for the vibration analysis of complicated structures.

**Key words:** *finite element method, matrix, integrated method, blade vibration,*

(接第7页)

# The Research and Development of Kalina Cycle and An Analysis of Its Efficiency enhancement Potentiality

Lu Canren, Yan Jinyue, Ma Yitai

(Tianjin University)

## Abstract

This paper presents a comprehensive analysis and evaluation of Kalina Cycle, including its thermodynamic principles, technical performance, economic feasibility and existing problems. Using "P" criterion suggested by the authors, the paper has analysed and further clarified the essence and direction for improving cycle efficiency.

**Key words:** *Kalina Cycle, thermodynamic analysis, cycle efficiency, P criterion*