

# 低温热能发电的研究现状和发展趋势

顾 伟<sup>1</sup>, 翁 一武<sup>1</sup>, 曹广益<sup>2</sup>, 翁史烈<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030; 2. 上海交通大学 电子信息学院, 上海 200030)

**摘 要:** 低温热能种类繁多, 数量巨大, 利用这部分能源意义重大。介绍了低温热能发电技术的研究现状和发展趋势。低温热能发电技术主要应用于太阳能热电、工业余热发电、地热发电、生物质能发电、海洋温差发电等方面。现阶段低温热能发电的研究重点有: 工质的热物性和环保性能、循环优化研究; 提高低温热能发电效率的研究, 包括混合工质循环、Kalina 循环、回热、氨吸收式动力制冷循环等; 基于有限时间热力学的系统最优控制等方面的研究。

**关键词:** 低温热能; 有机物朗肯循环; 热力发电

中图分类号: TK14

文献标识码: A

## 概 述

低温热能是指品位相对较低的热能, 一般温度低于 200 °C, 这些能源种类繁多, 包括太阳热能、各种工业废热、地热、海洋温差等可再生能源; 总量巨大, 以工业废热为例, 有统计指出, 人类所利用的热能中有 50% 最终以低品位废热的形式直接排放<sup>[1]</sup>。利用和回收这部分能源, 既有助于解决我国的能源问题, 又能减少能源生产过程中的环境污染。

利用低温热能的发电技术主要是基于朗肯循环的热力发电系统, 如有机物朗肯循环 (Organic

Rankine Cycle, ORC)、水蒸气扩容循环、Kalina 循环、氨吸收式动力制冷复合循环等<sup>[2~3]</sup>。有机物朗肯循环采用不同的有机物质 (或者混合物), 可回收不同温度范围的低温热能; 水蒸气扩容循环主要用于地热发电; Kalina 循环是以氨水混合物为工质的循环; 氨吸收式动力制冷复合循环是一种新型的复合循环。

国内外对于低温热能利用的研究主要开始于 20 世纪 70 年代石油危机时期。其中, 有机物朗肯循环的研究和应用最为广泛。早在 1924 年, 有人就开始研究采用二苯醚作为工质的有机物朗肯循环。到目前为止, 全世界已有 2000 多套 ORC 装置在运行, 并且生产出单机容量为 14000 kW 的 ORC 发电机组。对低温热能发电系统的研究主要集中在以下几个方面: 工质的热力学特性和环保性能; 混合工质的应用; 热力循环的优化等<sup>[1~4]</sup>。本文将介绍低温热能发电技术, 特别是基于有机物朗肯循环的发电技术国内外的研究现状和发展趋势, 以及这种技术的几个关键性问题。

## 1 低温热能发电利用的现状

低温热能发电技术主要应用于太阳能热电、工业余热、地热、

生物质能和海洋温差能等。

### 1.1 太阳能热电

除了太阳能电池外, 太阳能热电技术也是利用太阳能的方法之一。由于太阳能能量密度低, 热源温度不高, 所以太阳能热电系统主要是基于集热技术的朗肯循环 (如有机物朗肯循环) 系统。20 世纪 50 年代后期, 以色列国家物理实验室设计制造了用于有机物朗肯循环的透平, 其热源为平板集热器收集的低于 100 °C 的太阳热能。以色列 ORMAT 公司将该项技术商业化, 但未能实现广泛的商业利用<sup>[5]</sup>。石油危机时期, 人们注意到太阳能对于人类的重要作用, 美国从 80 年代开始建造的 SEGS, 其总发电量达到 354 MW, 单系统的最大装机容量达到 80 MW (SEGS VIII and SEGS IX), 是世界上最大的太阳能热电系统。太阳能热电系统有槽式、塔式、碟式 3 种。有研究指出, 在容量为 10 kW ~ 10 MW 范围内, 模块化槽式有机物朗肯循环系统可能是风险最小且投资回报效益最高的太阳能热电技术<sup>[6]</sup>, 采用抛物面集热装置可以达到 300 °C, 工作工质可以是戊烷、异丁烷等。

### 1.2 工业余热发电

回收工业余热可减少工业能源消耗和温室气体的排放。工业

余热的总量是非常巨大的: 据估计, 美国精练、化工、钢铁等行业在 2002 年所具有的余热发电潜力约为 3 000 MW。而我国单位产值能耗比世界平均水平高 2.4 倍, 能源效率比国际先进水平低 10 个百分点, 回收工业余热具有巨大的节能潜力。另外, 工业余热发电的环保效应也是非常巨大的, 例如, 利用 ORC 循环回收工业余热, 以美国 2002 年能源消耗计算, 可以减少 286 万吨 CO<sub>2</sub>、5 063 t NO<sub>x</sub>、12 159 t SO<sub>2</sub> 排放<sup>[7]</sup>。美国 MTI 公司曾经建造了利用炼油厂余热(110 °C)的 ORC 系统, 该系统以 R113 为工质, 采用单级向心透平, 输出功率约为 1 174 kW。ORMAT 公司和日本也曾经建造了利用废热的 ORC 系统, 取得了很好的经济和环保效益<sup>[5]</sup>。不过, 这些系统所采用的工质多为 CFC 类工质, 会对臭氧层产生破坏。现阶段的 ORC 循环需要采用对臭氧层没有破坏的 HFC 类工质, 因而给 ORC 系统的研究和应用带来了新的问题。

### 1.3 地热发电

地热发电一般利用地热蒸汽或者热水。地热发电系统有扩容法和中介质法, 扩容法是将地热蒸汽通过闪蒸器降压扩容, 然后通入汽轮机做功; 而中介质法是将地热热水或蒸汽作为闭式有机物朗肯循环的热源来进行发电, 采用的工质可以是各种有机物质, 如异戊烷、异丁烷等, 也可以采用 Kalina 循环来进行地热发电。我国从 70 年代开始陆续建造了一批地热电站。如羊八井地热电站使用扩容法, 首台机组于 1977 年 10 月开始试运行。那曲地热电站 1993 年底建成, 装机容量 1 MW, 采用以色列 ORMAT 公司的双工质(即中介质)机组

系统, 地热热源温度为 110 °C<sup>[8]</sup>。世界范围内已经建造了很多地热发电系统, 表 1 为一些典型的地热电站系统的相关数据<sup>[9]</sup>。从表中可以看出, 采用多级闪蒸器可以大幅度提高系统的效率。

表 1 典型的地热系统

	热力学效率	效率	工质	说明
Otake pit plant	0.129	0.539	异丁烷	18 级闪蒸器
Nigonkawa plant	0.098 1	0.216	R114	
Heber SIGC plant	0.134	0.132	—	复合循环
Husacik plant	—	—	氨水	Kalina 循环
那曲地热电厂	—	—	异丁烷	1 MW

### 1.4 生物质能发电

对于使用生物质能的小型热电系统, 与水蒸气朗肯循环相比较, ORC 系统表现出更高的性能。生物质的集中燃烧由于可以控制燃烧过程, 因而也具有很好的环保效应。Damiana Chinese 等人在仿真研究中指出, 基于 ORC 系统的集中式生物质电站其经济效益高于分散的小型系统<sup>[10]</sup>。意大利 Turboden 公司的生物质 ORC 系统采用具有回热的 ORC 系统, 其商业化产品有从 500 ~ 1 500 kW 的一系列产品, 可以为用户提供电和热, 实现分布式供电。2005 年在欧洲生产的电力达到约 17 MW, 其所采用的生物质原料主要是家具工业的废弃木材等。

### 1.5 海洋温差能发电

海洋温差能(OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion)利用海水表面和深层的温度差来进行发电。OTEC 系统主要有开式循环和闭式循环两种系统, 开式循环的工作工质为海水; 闭式循环的工质可以是各种低沸点工质, 如戊烷等。海水通过换热器与工质进行换热, 工质进入透平进行做功。1888 年 D' Arsonval 最早提出

了 OTEC 的概念, 1930 年 Claude 在古巴海岸建造了一个实验模型。在这之后 50 年左右, 由于现代技术的使用, 美国、日本等国开始重新关注 OTEC 技术, 日本东京电力服务公司在太平洋岛国瑙

鲁建造了一个 OTEC 电站, 这个电站的总电力输出为 120 kW, 净电力输出为 30 kW<sup>[11]</sup>。

## 2 低温热能发电的关键性问题

### 2.1 低温热能发电的关键性问题

到目前为止, 低温热能发电技术主要是基于朗肯循环的发电系统, 所采用的工质多为各种有机物或其它一些低沸点工质, 对有机物朗肯循环发电系统和应用过程进行重点研究。

#### 2.1.1 工质的选择

工质的选择特别是一些新的环保型工质的开发与研究是低温热电技术研究的重要内容。如何选择工质使其技术可行、经济性好, 并且符合环保要求, 是低温热电技术的重要问题之一。首先从技术可行性角度讲, 其最重要的因素就是工质在循环过程中的压力不能过高, 也不能太低, 必须在装置抗压性和密封性允许的范围之内。另外, 工质需尽量选择干性工质, 以保证透平工作的安全性<sup>[12]</sup>。其次从经济性角度讲, 主要从系统的效率因素考虑, 系统的效率尽可能高。不同的有机物质主要通

过以下 3 个方面来影响系统的效率: (1) 工质热物性影响 ORC 循环特性; (2) 工质的传热特性影响换热器换热特性以及在其它部件中的换热损失; (3) 工质的流动特性影响系统的流动损失。

从环保角度, 工质应该是环境友好的, 包括对臭氧层没有破坏作用, 且温室效应低。评价工质的环保性质主要有两个指标: 分别是臭氧层衰减指数 (ODP) 和温室效应指数 (GWP)。上世纪七八十年代建造的大量低温热能电站系统, 大多是采用各种 CFC (指含氯、氟、碳的完全卤代烃) 等对环境有破坏的有机工质 (或为异戊烷等易燃工质), 随着《京都议定书》和《蒙特利尔协议》的生效, 这些工质将被大量淘汰, 应尽量选择环保的 HFC (含氢、氟、碳的不完全卤代烃)。另外, 工质选择还需要考虑以下一些因素: 传热性和流动性、化学稳定性和热稳定性、毒性、价格等。特别还需要注意工质可燃性, 应该尽量采用不可燃的工质, 以使系统更具安全性。

从上述分析可以看到, 工质的选择需要综合考虑各方面的因素, 大多数环保型新工质在热效率等方面的性能并不是特别理想, 因而如何在工质热经济性、环保性以及毒性价等因素中作出最合适的选择, 是低温热发电的重要课题之一。

### 2.1.2 热交换器的优化

换热器特别是蒸发器的效率是影响系统整体效率的最重要因素之一, 换热器性能的优化是提高循环性能的重要途径。在表 1 中, Otake pilot binary geothermal plant 由于采用了 18 级闪蒸器, 因而, 这个电站的发电效率达到了 0.539。提高换热器效率的核心

是减小换热过程的不可逆损失, 尽量减小换热温差。从设备上考虑, 可以增加换热器换热面积、合理地设计换热器的结构、采用换热系数更高的材料等; 从工质角度考虑, 可采用换热好的有机工质, 同时尽量使工质的加热过程与热源温度变化过程相配合, 从而减小换热温差。

对换热器换热过程的分析, 特别是蒸发器和冷凝器两相换热过程的热力学分析, 是低温热电技术理论分析的难点之一。如何分析换热过程的静态和动态过程, 包括过程的流动、传热等参数的计算, 能对低温热电换热器的设计制造以及运行过程中的控制起到很好的指导作用。

### 2.1.3 系统热经济性评价

由于低温热能发电应用的热源有很多种, 因此对其进行经济性评价难度较大, 而对系统的热经济性评价将对设计建造有着非常重要的指导作用, 因而如何进行热经济性评价也是低温热电技术的难点之一。ORC 性能的评价主要从热力学第一定律和第二定律来考虑。

首先从热力学第一定律来看, ORC 系统比在相同热源下的水蒸气朗肯循环系统效率高。2000 年 Takahisa Yamamoto 等人通过 HYSYS 仿真发现, 以水作为系统的工质, 透平做功远低于其它有机工质 (如 HCFC123)<sup>[4]</sup>。此外, 从第二定律或者整个系统的性能上考虑, ORC 系统也是优于水蒸气系统。文献 [12] 以 total heat-recovery efficiency (总热回收效率) 为标准对 ORC 系统的性能进行了评价, 能较为全面地得出 ORC 系统在不同工质下的工作性能, 并且指出当热源温度低于 370 °C 时, 不适合以水作为朗肯

循环的工质。另外, 从换热效率角度考虑, 一般有机物的蒸发潜热值较小, 因此在工质等温蒸发过程占整个加热过程的比例较小, 因此工质加热过程与热源温度变化过程的配合程度较好, 换热的不可逆损失小。

上述的研究主要从工质角度分析系统经济性。对于实际的系统而言, 更需要从设备成本等各个方面分析系统的经济性, 不同的分析方式很有可能得到完全不同的结果, 因此正确的分析低温热电系统的热经济性是保证系统高效运行的前提之一。

## 2.2 提高低温热能发电性能的方法

低温热能发电的热源温度不高使得系统的效率较低, 这是其最大的局限性。如何在热力学定律允许的最大限度上最大限度地提高发电效率, 是这项技术的核心问题。下面介绍几种提高发电效率的方法, 并对这些方法进行简单评价。

### 2.2.1 混合工质循环和 Kalina 循环

低温热能发电系统所回收的低品位热能通常是变温热源, 其理想循环为洛仑兹循环 (见图 1 (a)), 即工质需要与热源温度变化紧密配合。而实际的纯工质有机物朗肯循环过程如图 1 (b) 所示, 工质的等温蒸发吸热过程与低温热源的配合不紧密, 换热平均温差大, 不可逆损失较大。为了减小换热不可逆损失, 对纯工质有机物朗肯循环提出了几种改进的方法, 如混合工质循环、Kalina 循环等。

非共沸混合工质 (见图 1 (c)) 蒸发过程中温度是不断变化的, 因此工质加热过程相比较纯工质而言能更好地配合热源温度

的变化, 从而对系统性能起到一定的改善作用。因此, 理论上讲采用混合工质可以提高蒸发器的效率。但是在冷凝过程中, 由于冷源温度变化不大, 反而会使冷凝器不可逆损失增加。在采用混合工质时, 需要综合考虑蒸发和冷凝过程, 使系统性能更好。

Kalina 循环是以氨水混合物为工质的循环系统<sup>[13]</sup>。Kalina 循环克服混合工质循环的弱点。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; 在冷凝过程中的基本工质(或基本溶液)含氨较低, 冷凝温度变化较小, 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。有理论分析认为 Kalina 循环比纯工质 ORC 循环系统性能高出 15%~50%, 但在实际运行过程中, Kalina 循环并未表现出非常高的性能<sup>[9]</sup>, 这主要可能是以下几个原因: (1) 氨水混合工质蒸发过程的复杂性导致蒸发过程并未如理论计算所期望的降低传热温差; (2) Kalina 循环由于系统的复杂性导致性能的下降; (3) 对于低温热能发电系统性能评价方式上的差异。当然, Kalina 循环在理论上具有很好的性能提升潜力, 并且其工质为自然工质, 因而具有一定的发展前景。

### 2.2.2 回热循环

回热循环主要适用于热源温度相对较高的系统中。采用回热的 ORC 系统, 在文献[6]的参数下系统的效率可以提高约 60%, 回热的效果非常明显。Turboden 公司所生产的 ORC 系统就是包含回热器的。

### 2.2.3 新型氨吸收式动力制冷

### 复合循环

在 Kalina 循环的基础上, D. Yogi Goswami 提出了一种新型的动力制冷复合循环<sup>[14~15]</sup>。

这个循环复合了朗肯循环和吸收式制

冷循环, 达到了制冷和电力输出的双重效果, 可以用于电站循环的底循环, 或其它低温热能利用场所。中国科学院工程热物理研究所和北京化工大学也对复合循环进行了研究, 指出动力制冷复合循环不仅具有 Kalina 循环的优点, 并且性能更加完善<sup>[3]</sup>。

上述几种方式的理论分析均能显著地提高热力循环的效率, 但与实际系统的运行效果有一定出入。因此实际系统设计过程中, 要权衡各方面的因素, 如设备成本、系统设计制造的可行性和难度等, 这也是低温热电系统需要考虑的因素。

## 3 低温热能发电发展趋势

随着我国《可再生能源法》的颁布, 作为可再生能源的重要组成部分的低温热能(如太阳能热、地热、工业余热等)也将有一个大的发展, 根据国家规划到 2010 年, 小水电、风力发电、生物质发电、地热发电和太阳能发电系统装机容量的目标是 6 000 万 kW, 其中相当部分是采用低温热能的发电技术。因此, 需要加强对低温热能发电技术的研究, 低温热能发电技术的发展趋势是高效、环保的能源系统。

### 3.1 环保型工质

工质是有机物朗肯循环及基于此循环的其它循环的关键性问题之一, 工质选择的发展趋势: 高效、环保、安全, 主要趋势是混合工

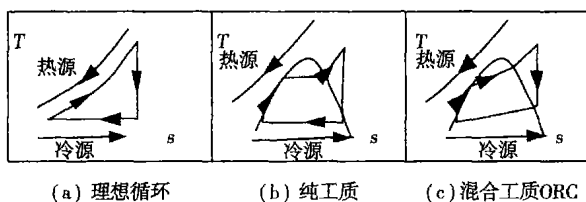


图 1 低温热能发电系统循环示意图<sup>[2]</sup>

质、自然工质、HFC 类工质等。大气环境的保护对工质的选择提出了更高的要求, 需要选择 ODP 为零, GWP 值较低的工质。自然工质如氨等工质对环境是友好的, 但是这些工质在热物性方面可能存在一些不足, 因此需要优化系统结构以提高系统性能。HFC 类工质对于臭氧层没有破坏能力, 即 ODP 值为零。但是大多数新工质在热力性能方面不尽如人意, 需要在热力性能和环保等因素中做出权衡。

### 3.2 复合循环

低温热能发电的热源品位较低, 采用复合循环是提高热能利用率的有效办法之一。自 D. Yogi Goswami 提出动力制冷复合循环以来, 国内外对此进行了大量的研究工作<sup>[3, 14~15]</sup>, 该系统在分布式供能方面有很好的应用潜力。

### 3.3 优化循环过程

对低温热能系统的优化主要包含两个方面: (1) 从系统和装置的静态特性考虑, 提高包括蒸发器、透平等装置的性能。例如通过研究工质, 特别是用于 ORC 系统的分子量较高的有机物工质流过透平时的流动特性来改进透平的设计, 以使透平效率更高<sup>[16]</sup>; 又如美国 MTI 公司通过将透平、发电机、高速齿轮箱、加压泵、真空泵、润滑油系统、轴封等整合为一个整体, 从而达到了提高质量功率比, 降低成本的目的<sup>[17]</sup>。(2) 低温热能发电系统通常工作在周围环境时变很大的工况下, 如昼夜日照的变化对太阳能热电

装置的影响、工厂作息制度对工业余热回收的影响, 因此, 需要从时变的角度来对系统进行优化控制, 对此可以采用有限时间热力学及最优控制等方法<sup>[18]</sup>。

### 3.4 低温热能利用试验研究

上海交通大学与日本鸟取大学等单位合作, 开展了基于 ORC 系统的低品位热能发电系统的研究。主要研究方向是基于太阳能集热技术的低品位热能发电, 新 ORC 工质的特性研究, 混合工质的特性研究, 基于有限时间热力学的系统动态特性研究等。

初期的研究内容主要是不同工质在低温热电系统中的热力学性能, 详细分析了 R123 等有机物工质在不同热源温度、不同冷凝和蒸发压力下的热力学性能, 得到一定功率输出要求下不同工质热力系统的效率、流量等参数, 以及 R123 等各种工质的温度适用范围。在上述分析的基础上, 已搭建了 ORC 系统的实验平台, 通过实验来研究低温热电系统的性能, 得到了一些有用的数据。之后计划在实验数据的基础上, 进一步研究系统的动态特性, 考虑的方法是半物理仿真模型的方法。另外, 还将研究混合工质系统的性能。希望通过上述的研究, 能够对低温热电技术的应用起到一定的指导作用。

## 4 结 语

介绍了国内外低温热能发电技术的研究现状和发展趋势。从近几年低温热能发电技术研究的发展情况来看, 研究工作主要集中在对动力循环工质的研究和循环过程的改进和最优控制等方面。Kalina 循环、氨吸收式动力制冷复合循环等在理论上可以达

到比简单循环更高的能量利用率。基于有限时间热力学的低温热能发电在考虑时变因素对系统的影响时具有重要意义, 可能实现系统的能量利用的最大化。

提高发电效率和环保是低温热电技术的核心内容。从热力学角度讲, 提高效率的有效方法是提高热源温度, 如改善太阳能热电的集热技术; 第二就是对于热源温度一定时(如地热等热源), 则应最大可能地减少热力学不可逆损失, 采用高效换热器、混合工质或 Kalina 循环等。

### 参考文献:

- [1] HUNG TZU CHEN. Waste heat recovery of Organic Rankine Cycle using dry fluids [J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, 42(5): 539-553.
- [2] 吕灿仁, 严晋跃, 马一太. Kalina 循环的研究和开发及其提高效率分析[J]. *热能动力工程*, 1991, 6(1): 1-7.
- [3] 王 宇, 韩 巍, 金红光, 等. 新型中低温混合工质联合循环[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 123(11): 200-204.
- [4] TAKAHISA YAMAMOTO, TOMOHIKO FURUHATA, NORIO ARAI et al. Design and testing of the Organic Rankine Cycle [J]. *Energy*, 2001, 26(3): 239-251.
- [5] AMNON EINAV. Solar energy research and development achievements in Israel and their practical significance [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2004, 126(3): 921-928.
- [6] HANK PRICE, VAHAB HASSANI. Modular trough power plant cycle and systems analysis [R]. NREL/TP-5 50-31240. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- [7] OWEN BAILEY, ERNST WORRELL. Clean energy technologies: a preliminary inventory of the potential for electricity generation energy analysis department [R]. LBNI-57451. Berkeley: University of California, 2005.
- [8] 王 恒, 黄文春. 双工质循环机组在地热电厂的运用 [J]. *四川电力技术*, 1995, 18(4): 20-24.

- [9] RONALD DIPIPO. Second law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids [J]. *Geothermics*, 2004, 33(5): 565-586.
- [10] DAMIANA CHINESE, ANTONELLA MENEGHETTI, GIOACCHINO NARDIN. Diffused introduction of Organic Rankine Cycle for biomass-based power generation in an industrial district: a systems analysis [J]. *Int J Energy Res*, 2004, 28(11): 1003-1021.
- [11] GERALD THOMAS HEYDT. An assessment of ocean thermal energy conversion as an advanced electric generation methodology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1993, 81(3): 409-418.
- [12] LIU BO TAU, CHIEN KUO HSIANG, WANG CHI CHUAN. Effect of working fluids on Organic Rankine Cycle for waste heat recovery [J]. *Energy*, 2004, 29(8): 1207-1217.
- [13] 路 铃, 严晋跃, 马一太, 等. Kalina 循环放热过程的热力学分析 [J]. *工程热物理学报*, 1989, 10(3): 249-251.
- [14] GUNNAR TAMM, GOSWAMI D YOGI, LU SHAOGUANG, et al. Novel combined power and cooling thermodynamic cycle for low temperature heat sources, part I: theoretical investigation [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003, 125(2): 218-222.
- [15] GUNNAR TAMM, GOSWAMI D YOGI, LU SHAOGUANG, et al. Novel combined power and cooling thermodynamic cycle for low temperature heat sources, part II: experimental investigation [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003, 125(2): 223-229.
- [16] PIERO COLONNA, PAOLO SILVA. Dense gas thermodynamic properties of single and multicomponent fluids for fluid dynamics simulations [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2003, 125(3): 414-427.
- [17] LARJOLA J. Electricity from industrial waste heat using high-speed Organic Rankine Cycle (ORC) [J]. *Int J Prod Econ*, 1995, 41(3): 227-235.
- [18] BJARNAEN ANDRESEN, STEPHEN BERRY R, MARY ONDRECHEN, et al. Thermodynamics for processes in finite time [J]. *Accounts of Chemical Research*, 1984, 17(8): 266-271.

(编辑 辉)

低温热能发电的研究现状和发展趋势 = **The Latest Research Findings Concerning Low-temperature Heat Energy-based Power Generation and its Development Trend** [刊, 汉] / GU Wei, WENG Yi-wu, WENG Shi-lie (College of Mechanical and Power Engineering under Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), CAO Guang-yi (College of Electronic Information under Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 115 ~ 119

The utilization of low-temperature heat energy is of major significance because of its rich variety and huge quantity available worldwide. The current research results of low-temperature heat-energy power-generation technology are described along with its development trend. The above-mentioned technology is mainly used for solar-energy cogeneration systems, industrial waste heat-based power generation, geothermal power generation as well as power generation by utilizing biomass energy and ocean temperature difference etc. Nowadays, the research on low-temperature heat energy power generation has been mainly focused on working medium thermophysical properties, environmental protection performance and cycle optimization. The effective methods employed to raise the low-temperature and high-temperature heat energy power-generation efficiency involve research on the following cycles: hybrid working medium cycle, Kalina cycle, recuperative and ammonia-absorption type refrigeration cycle. In addition to the above, system optimized control based on finite time thermodynamics etc. was also studied. **Key words:** low-temperature heat energy, organic matter Rankine cycle, thermal power generation

旋转对气冷涡轮内部流场影响的 PIV 测量 = **PIV Measurements of the Impact of Rotation on the Flow Fields in a Gas-cooled Turbine** [刊, 汉] / YUAN Feng, ZHU Xiao-cheng, DU Zhao-hui (College of Mechanical and Power Engineering under Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 120 ~ 123, 128

Experimental measurements have been performed of the flow fields in an air-cooled turbine by using PIV (Particle Image Velocimeter) speed measurement technology under both rotating and non-rotating conditions to study the impact of rotation on the flow fields in the air-cooled turbine. In the meantime, the impact of different jet-flow air blowing ratios on the flow fields in the turbine was also studied by changing the air blowing ratio ( $M=1.5, 2$ ). The test results show that there exists an evident wake zone near the downstream of the cooling hole jet-flow. Under the rotating condition, the centrifugal and Coriolis force present in the flow fields inside the turbine has changed the mixing-dilution flow field configuration of the jet flow and main stream. Compared with the flow fields in a stationary turbine cascade, the impact of rotation on the flow fields at the blade pressure side is obviously larger than that at the blade suction side. Meanwhile, an increase in air blowing ratio will expand the area of mixing-dilution flow field zone of the jet-flow and main stream and the jet-flow wake zone area. **Key words:** rotary air-cooled turbine, PIV (Particle Image Velocimeter) measurement, air blowing ratio, flow field

压气机动态模型的建立及喘振过程分析 = **Establishment of a Dynamic Model for a Compressor and Analysis of the Surge Process** [刊, 汉] / WANG Wei-cai, WANG Yin-yan (College of Power and Energy Source Engineering under Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 124 ~ 128

In environment SIMULINK, a dynamic mathematical model for a compressor has been established. To simulate the compressor surge and rotating stall phenomenon, the characteristics chart of the compressor was extended to a negative flow zone with the time delay of gas passing through the compressor being taken into consideration. The compressor surge process has been simulated and the pressure signals of the compressor have undergone a fast Fourier transformation. The compressor surge has also been tested. The simulation results show that the model can forecast the oscillation frequencies of pressure, flow rate and rotating speed as well as relevant amplitudes during the compressor surge. Structural parameters such as the rotating inertia of the compressor system and the volume of the pressure stabilizing chamber etc. may influence the surge characteristics. The model displays good dynamic regulation characteristics and can be used for a compressor control system, offering benefits of a wider-ranging practical applicability. **Key words:** compressor, dynamic model, surge, fast Fourier transformation