

# 移动式余热利用技术研究

YIDONGSHI YURE LIYONG JISHU YANJIU

• 郭少朋 著 •



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 移动式余热利用技术研究

郭少朋 著

北京

冶金工业出版社

2015

## 内 容 提 要

本书通过对移动式余热利用系统的实验和理论研究,分析了该技术在应用过程中遇到的蓄热材料筛选、蓄热器内部材料变化规律等问题,并在此基础上结合数值模拟方法给出了蓄热器优化思路与方案。此外,还在参考移动式余热利用实验系统基础上,对实际应用规模的移动式余热利用系统进行了经济性分析,以期为移动式余热利用项目的推广和立项提供参考依据。

本书可供热能存储与利用工程技术领域的科技工作者阅读,也可供相关专业的教师、研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

移动式余热利用技术研究/郭少朋著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-5024-6840-8

I. ①移… II. ①郭… III. ①移动式—余热利用—研究  
IV. ①TK11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 015235 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 李 臻 宋 良 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6840-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2015 年 1 月第 1 版, 2015 年 1 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 3.375 印张; 99 千字; 99 页

25.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

# 前 言

工业部门每年产生大量的余热、废热，不仅降低了生产过程中的能源利用效率，也加重了我国的能源负担。针对这一问题，近些年来各工业企业纷纷开展了余热资源回收利用技术的研究与应用。然而，通过对余热回收利用现状的调研不难发现，目前余热资源的利用温度主要集中在 $230^{\circ}\text{C}$ 以上， $230^{\circ}\text{C}$ 以下的低温余热资源仍未得到充分利用。另外，随着人们生活水平的提高，供暖需求量也越来越大。受到集中供暖管网的限制，部分无集中供暖的用户在冬季常常选择使用小型燃煤、燃油或燃气供暖系统。这类小型系统不仅能效低、污染大，而且成本高、经济性差。因此从以上问题出发，本书着重研究用于分散用户供暖的可移动式的余热利用系统，主要开展以下几个方面的研究工作：

(1) 本书针对 $230^{\circ}\text{C}$ 以下的低温余热资源，根据材料相变温度、相变潜热、安全性、环保性、经济性等因素筛选了蓄热材料赤藻糖醇。在此基础上，对实验选用批次的蓄热材料进行了差式扫描量热法 (differential scanning calorimetry, DSC) 测试分析，获得了较为准确的蓄热性能参数。此外，本书还针对选用的材料进行了过冷度测试分析，为系统实验中的过冷现象分析提供了参考依据。

(2) 应用筛选出的蓄热材料，根据移动式余热利用系统原理在实验室搭建了小型实验系统，进行间接式蓄热器的充放热实验研究，分析了蓄热材料在充放热过程中的温度变化情况和熔化凝固规律，并通过热效率和放热强度两个指标进行了间接式蓄热器的性能分析。

(3) 本书进行了间接式蓄热器充放热过程的数值模拟研究，通过对条件的合理简化和假设，建立了相应的物理和数学模型，

并将计算结果与实验数据进行对比分析，验证了模型的合理性。在此基础上，对通过提高蓄热材料的热导率、调整蓄热器换热管管径和布置方式以及添加直肋片等方法优化蓄热器的充放热性能进行研究。

(4) 为了进一步强化蓄热器内的换热过程，本书还设计了导热油与蓄热材料直接接触换热的直接式蓄热器，并进行了相应的充放热实验研究。为了了解系统运行参数是否会对直接式蓄热器的充放热过程造成影响，从而为实际系统运行调节提供一些参考依据，本书对不同导热油流量条件下直接式蓄热器内材料的熔化凝固速率进行了研究。针对材料凝固后造成导热油在充热过程初期流动较弱的情况，研究了应用电热棒形成快速流道的方法。另外，本书还通过热效率和放热强度这两个指标进行了直接式蓄热器的性能评价。

(5) 最后，在参考移动式余热利用实验系统的基础上，本书对实际应用规模的移动式余热利用系统进行了成本和收益估算。通过三个经济性指标（净现值、投资回收期 and 内部收益率）对移动式余热利用系统的经济性进行了研究，并结合影响系统经济性的几个不确定性因素如蓄热器充热时间、热源距离、余热价格等进行了敏感性分析。

由于编著者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

作者

2014年11月

# 目 录

1 绪论 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究进展与应用现状 .....	4
1.2.1 工业余热回收利用技术 .....	4
1.2.2 相变蓄热技术 .....	9
1.2.3 移动式余热利用技术 .....	10
2 蓄热材料的筛选与测试 .....	15
2.1 蓄热材料的分类 .....	15
2.2 蓄热材料的筛选 .....	16
2.3 蓄热材料的测试 .....	18
2.3.1 DSC 测试分析 .....	19
2.3.2 蓄热材料的过冷度测试分析 .....	21
3 间接式蓄热器的实验研究与分析 .....	24
3.1 实验系统构成和工作原理 .....	24
3.1.1 模拟热源部分 .....	25
3.1.2 蓄热器部分 .....	27
3.1.3 模拟用户部分 .....	30
3.1.4 其他测量装置 .....	30
3.2 实验研究内容、步骤及工况 .....	31
3.2.1 实验研究内容 .....	31
3.2.2 实验研究步骤 .....	31
3.2.3 实验研究工况 .....	33
3.3 实验结果与分析 .....	33
3.3.1 蓄热材料温度变化及熔化凝固规律分析 .....	33

#### IV 目 录

3.3.2	导热油流量对蓄热材料熔化凝固的影响分析	37
3.3.3	模拟用户侧放热情况分析	37
3.3.4	蓄热器性能分析	40
4	间接式蓄热器的数值模拟与优化研究	43
4.1	模型建立	43
4.2	计算设置与网格划分	46
4.2.1	边界及初始条件	46
4.2.2	计算方法	47
4.2.3	网格划分与独立性验证	47
4.3	模拟结果与分析	49
4.3.1	模型验证	49
4.3.2	熔化凝固情况分析	51
4.4	蓄热器优化研究	54
4.4.1	提高蓄热材料的热导率	55
4.4.2	优化蓄热器结构	58
5	直接式蓄热器的实验研究与分析	64
5.1	直接式蓄热器的工作原理和构成	64
5.2	实验研究内容、步骤及工况	66
5.2.1	实验研究内容	66
5.2.2	实验研究步骤	67
5.2.3	实验研究工况	67
5.3	实验结果与分析	67
5.3.1	蓄热材料熔化凝固规律分析	67
5.3.2	导热油流量对蓄热材料熔化凝固的影响分析	70
5.3.3	快速流道对蓄热材料熔化的影响分析	74
5.3.4	蓄热器性能分析	77
6	移动式余热利用系统的经济性研究	79
6.1	成本和收益估算	79

6.1.1 成本估算 .....	79
6.1.2 收益估算 .....	82
6.2 经济性评价 .....	83
6.2.1 净现值 .....	83
6.2.2 投资回收期 .....	84
6.2.3 内部收益率 .....	85
6.3 不确定性评价 .....	85
6.3.1 不确定性因素筛选 .....	86
6.3.2 不确定性因素变化范围 .....	87
6.3.3 敏感性分析 .....	87
参考文献 .....	91
附 录 .....	97



# 1 绪 论

## 1.1 研究背景

能源是人类社会存在和发展的物质基础，也是衡量人类文明进步的重要标志。历次工业及科技革命的背后无不经历了能源开发与利用的巨大变革。随着社会的发展和科技的进步，人类对能源品质的要求越来越高，需求量也越来越大。图 1-1 是 1971~2009 年全球能源消费总量情况统计<sup>[1]</sup>。从图中可以看到，全球能源消费情况总体呈现持续增长的态势，传统化石类能源消费增长缓慢，生物质能、电能及其他类型能源的消费增长较快，整体能源消费结构趋于多样化。此外，分析图中各能源消费比例情况还可以发现，传统化石类能源的消费一直都占有绝对的主导地位。长期开采化石类燃料不仅会加速该类资源的枯竭，为未来社会能源危机的爆发埋下较大的隐患，而且大量使用该类能源将导致 CO<sub>2</sub> 等温室气体的过度排放，

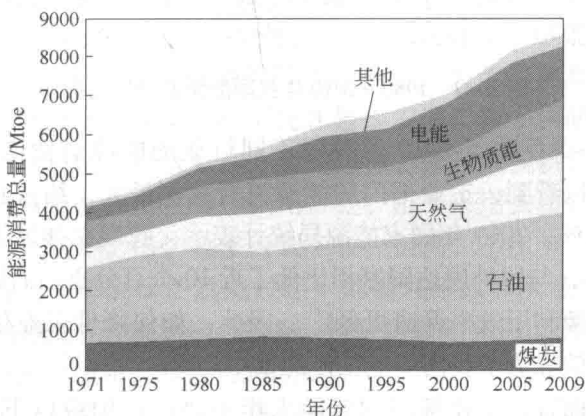


图 1-1 1971~2009 年全球能源消费总量情况统计

(1toe = 41.868GJ)

给人类赖以生存的环境资源造成严重破坏<sup>[2]</sup>。

图 1-2 是 1980~2010 年我国的能源消费情况统计<sup>[3]</sup>。对比图 1-1 可以发现,我国近 30 年来的能源消费增长速度要远高于世界平均水平。特别是 2000 年后,在我国经济快速发展的同时,能源消费总量急剧上升,其中煤炭消费量的增长尤为明显。对比我国和全球能源消费的构成情况可知,我国能源消费过度依赖于传统化石类能源尤其是煤炭资源,能源消费的结构过于单一。因此,增加其他类型能源的应用比例,完善和多样化我国的能源消费构成,就成为了目前我国能源发展的主要方向。

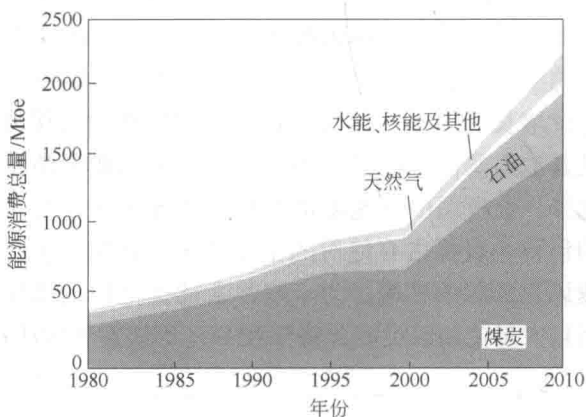


图 1-2 1980~2010 年我国能源消费情况统计

图 1-3 反映了 2010 年我国不同行业的能源消费比例情况<sup>[3]</sup>。从图中可以看到,工业部门的能源消费比例最大,约占我国总能源消费的 71%。2009 年国家能源局统计表示,我国总体能源利用效率约为 33%,与国外发达国家相比低了近 10 个百分点,而这其中工业部门的能源利用效率普遍更低<sup>[4]</sup>。因此,如何降低工业生产环节的能源消耗就成为了我国节能工作的重中之重。

总体而言,工业部门的节能工作主要可以围绕以下两点展开:  
(1) 对工业生产过程中的用能系统和设备进行优化改造,降低单位产能的能源消耗量;  
(2) 对生产过程中产生的余能、废能等及时回

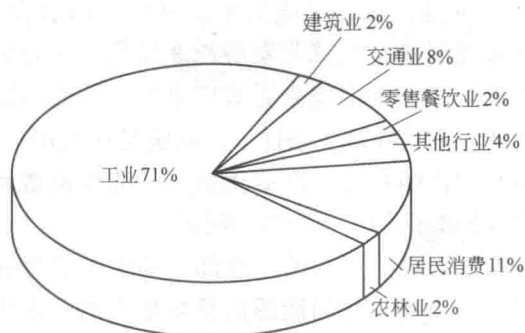


图 1-3 2010 年我国不同行业的能源消费比例情况

收和再利用，提高工业生产的能源利用效率。前者需要对现有生产系统和设备进行改造或更换，投资较大，而且对正常生产造成的影响较大；后者主要针对生产工艺流程中排放的烟气、废水、废气等资源进行回收，对主要生产环节的影响较小，更适合对现有工业生产系统进行节能改造。

此外，从图 1-3 中还可以看到，居民能源消费比例仅次于工业部门，位于我国能源消费行业的第二位，属于开展节能工作的另一个主要对象。

我国幅员辽阔，北方大部分地区属于需要冬季供暖的严寒或寒冷地区。据资料统计，近年来，我国北方地区城镇供暖能耗不断提高，已经占据了居民能源消费的较大比例<sup>[5]</sup>。为了实现高效清洁的供暖机制，我国从 20 世纪 80 年代开始逐步推广集中供暖模式。集中供暖是在用户的某一区域建立大型热源，通过敷设供热管网，将热量以热水或蒸汽的形式输送到用户处。由于采用大型锅炉代替了原有小型分散锅炉，锅炉效率得到了较大提高，不仅节约了大量燃料，而且有利于解决锅炉燃烧过程中的烟气排放和灰渣堆放问题，具有较好的经济、环境和社会效益，符合国家倡导的节能减排政策，是我国北方地区城镇供暖发展的主要方向。

然而另一方面，相比于小型分散式供暖系统而言，集中供暖系统又具有一个明显的不足之处，即受管网限制较为严重。由于管网敷设的建设周期较长、投资较大，远离热源和用户数量较少的地区

管道敷设投资成本高,造成了该类地区供暖管网敷设率低的情况。此外,近些年来我国新型城镇化发展速度较快,部分城市结构调整力度较大,出现了一大批围绕原有城市建设和改造的周边大型生活区域及公共场所。如何在现有条件下,既满足该类用户的供暖需求,又避免出现由小型供暖系统过度应用造成的能源浪费和环境污染问题就成为摆在我们面前的又一个重要问题。

综上所述,结合以上谈到的工业部门和居民能源消费中存在的问题不难发现,一方面,我国能源消费量最大的工业生产部门存在着大量余能、废能;另一方面,在我国北方城镇的大部分无集中供暖管网敷设区域存在大量需要供暖的用户。因此,从这个问题出发,本书旨在寻找和研究一种新型供暖方式,将工业生产的余能、废能回收并输送到无集中供暖管网敷设区域的用户处,既可实现余能、废能的二次利用,又满足了用户的用热需求。

移动式余热利用技术 (mobilized waste heat utilization, MWHU) 正是基于以上分析开展的一项集余能与废能回收、蓄热和供热应用为一体的综合能源利用技术。它通过蓄热材料将余热源侧的余热进行回收,通过汽车、火车或轮船等交通工具将蓄热材料运输到用户处,然后通过热交换器将热量释放到用户处的供热系统中。当完成一次放热操作后,装有蓄热材料的蓄热器被运送回余热源侧进行重新充热,并准备进行下一次放热循环。移动式余热利用技术示意图如图 1-4 所示。

## 1.2 研究进展与应用现状

### 1.2.1 工业余热回收利用技术

工业余热主要指工业生产过程中热能转换及用能设备以废渣、废水、废气等形式排放出来的热能。按照余热资源的温度范围,可将其分为高温余热 (高于  $650^{\circ}\text{C}$ )、中温余热 (高于  $230^{\circ}\text{C}$  低于  $650^{\circ}\text{C}$ ) 及低温余热 (低于  $230^{\circ}\text{C}$ )<sup>[6,7]</sup>。产生余热资源的主要工业行业有: (1) 钢铁冶金行业; (2) 石油化工行业; (3) 热电行业; (4) 造纸印刷行业; (5) 制药及食品行业; (6) 水泥建材行业等。

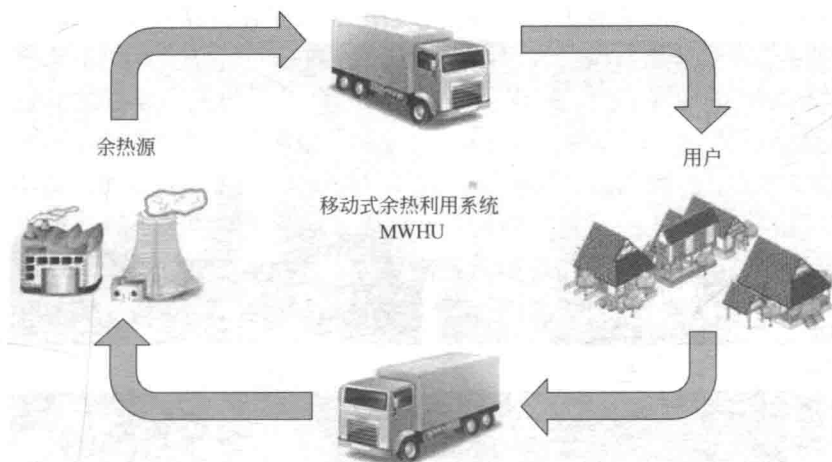


图 1-4 移动式余热利用技术示意图

如图 1-5 所示, 余热资源的类型主要有烟气余热、蒸汽余热、工业产品余热、废渣、废料余热、冷却水余热和可燃废气余热等。

虽然工业余热的温度范围较大, 来源较为广泛, 但受到工业生产流程的影响, 余热资源在某些工业部门往往存在间断性的问题。而且对于烟气类余热资源来说, 由于其中灰分和氮、硫含量较高, 容易造成余热回收装置换热表面积灰和腐蚀等问题。因此, 工业余热回收系统的设计应结合原有生产系统, 充分考虑回收设备的运行环境和使用条件, 保证回收系统安全、高效运行。

目前, 余热资源的回收利用形式较多, 按照其在回收利用过程中用途和对象的不同, 可以将其分为余热在工业生产中的利用技术、余热发电利用技术和余热制冷制热技术。

余热在工业生产中的利用技术是指通过换热器将工业部门产生的余热回收并直接用于生产过程的技术。由于热量在传递过程中的自身形式不改变, 整个能量转换过程简便高效, 是应用最为广泛的余热回收利用技术之一。目前, 各大工业企业部门应用最多的方式是通过各类换热器回收烟气和其他类型废气的余热对燃料、加热介质或助燃空气进行预热。该类换热器一般多为间壁式换热器, 冷热流体同时流过换热壁面进行间接式换热。常见的空气预热器和省煤器就属于该类型换热器。

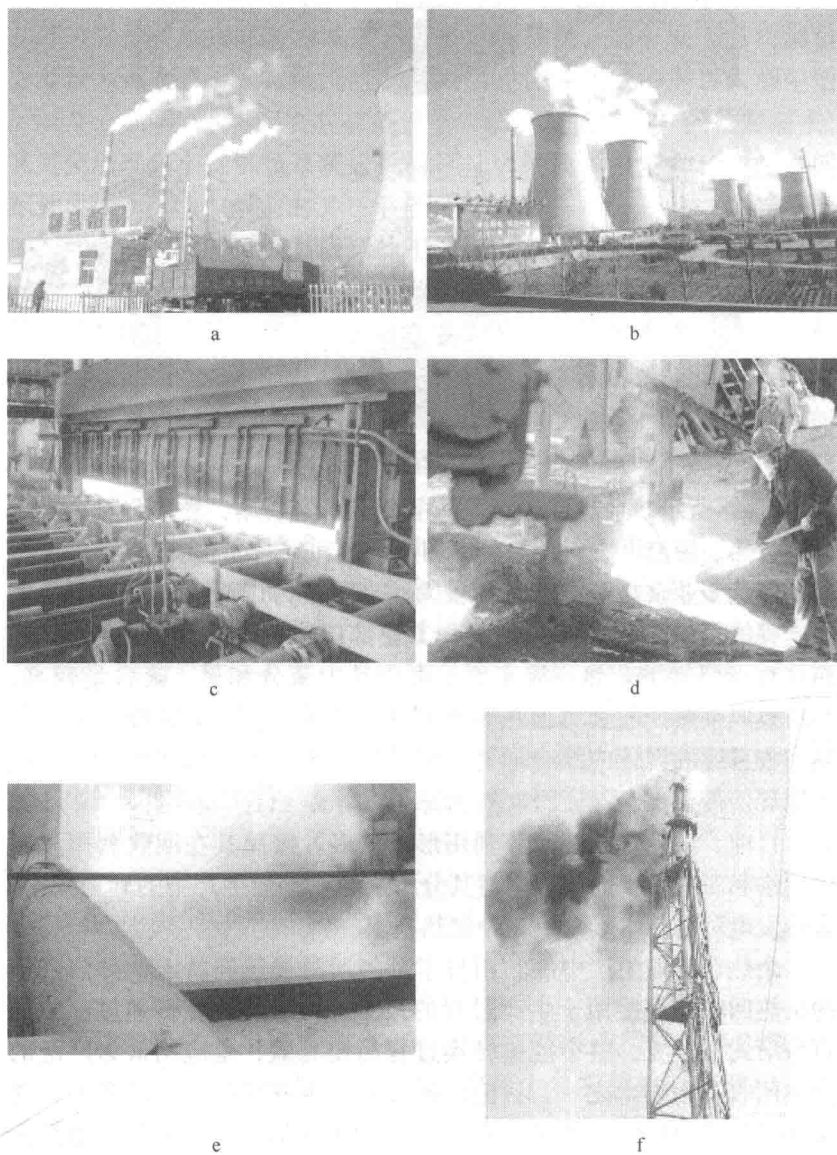


图 1-5 余热资源类型

a—烟气余热；b—蒸汽余热；c—工业产品余热；d—废渣、废料余热；  
e—冷却水余热；f—可燃废气余热

另外, 针对具有周期性生产工艺特点的工业企业, 为解决余热需求在时间上的不匹配问题, 往往需要用到蓄热技术, 如轧钢生产过程中的蓄热式燃烧技术<sup>[8]</sup>。武汉钢铁研究总院的杨柏松等人<sup>[9]</sup>进行了蓄热式燃烧技术的开发和应用研究, 并分析了蓄热式燃烧炉的技术特点。图 1-6 是蓄热式燃烧的原理图。高温烟气与助燃空气交替进入蓄热器内实现余热的不连续回收与应用, 降低了烟气排放温度, 提高了热能利用效率。根据蓄热原理的不同, 该类技术又可以分为显热式蓄热和潜热式蓄热。前者应用了材料固有的热容特性,

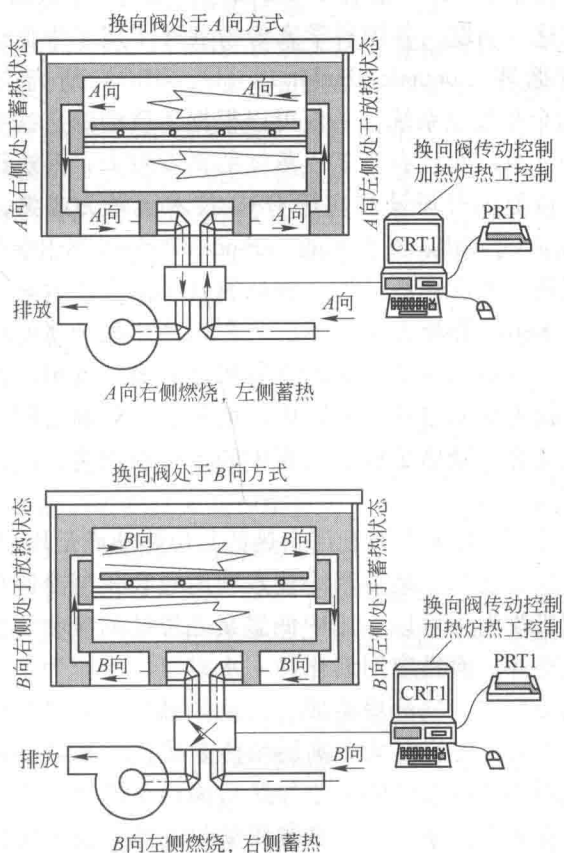


图 1-6 蓄热式燃烧的原理图<sup>[9]</sup>

系统简单、使用寿命长,但体积一般较大,蓄热量有限。后者利用了材料发生相变时伴随的能量吸收和释放特性,单位体积的蓄热量较大。

余热发电利用技术是指利用余热热能将发电系统的做功工质加热产生蒸气进入汽轮机做功发电的技术。相比于常规火力发电系统而言,它的运行参数低、功率小,主要应用于水泥窑、焦化厂、钢厂高炉烧结等部门。

目前投产应用的余热发电系统多为中高温余热蒸气类发电系统,对余热资源的温度要求一般在  $380^{\circ}\text{C}$  以上,限制了中低温余热资源的利用。针对这一问题,各国科学家纷纷展开了用于中低温余热发电的有机朗肯循环 (organic Rankine cycle, ORC) 研究<sup>[10-13]</sup>。利用 ORC 技术的余热发电系统,不仅可以根据工质的沸点选择利用合适温度的余热资源,而且有机工质蒸气的密度较大,系统设计更为紧凑、高效。目前国外设计和应用 ORC 技术已较为成熟,以色列的 ORMAT、瑞典的 ABB、意大利的 Turboden 等公司都相继开展了 ORC 技术的工程研究和应用。另外一种低温余热发电技术是以氨水混合物为工质的 Kalina 循环发电技术。它利用余热锅炉将氨水混合工质进行加热产生过热氨水蒸气送入汽轮机进行做功发电。由于工质的吸热蒸发过程为变温过程,可以更好地配合余热温度随生产工艺流程的间歇性变化,降低了换热过程中的不可逆损失,提高了余热利用效率<sup>[14-19]</sup>。

余热制冷制热技术是指利用余热低品位热能满足用户夏季供冷、冬季供热需求的技术。余热制冷技术利用吸收式制冷原理,将消耗电能的压缩机改为了可以应用中低温余热资源的吸收装置,节省了大量高品位能源,而且应用溴化锂-水或氨-水作为工质,避免了氟利昂类制冷剂对大气环境造成的污染和破坏。余热制热技术根据余热温度的不同,可以分为中高温余热制热技术和低温余热制热技术。前者利用中高温余热将回水加热后输送至换热站或用户侧,主要的换热设备为余热锅炉。后者利用吸收式热泵技术将低温余热的品位进行提升,实现了不同品位余热资源的梯级回收利用,是目前针对低温余热资源极为有效的回收利用手段。



### 1.2.2 相变蓄热技术

随着人们对能源需求的日益提高,在能源转换和利用过程中常常出现空间和时间上不匹配的矛盾。在能源供应与使用的中间环节急需一种可以根据用户要求控制能量储存和释放的技术。这种技术可以实现不连续的能量储存,并在需要时以连续的形式释放出来,从而提高能源系统的稳定性和利用效率。

根据能量类型的不同,能量存储技术又可以分为机械能存储、电磁能存储、化学能存储和热能存储。本书所要讨论和研究的重点主要集中于热能的存储与利用。目前,热能存储技术已经广泛应用于平衡电力系统峰谷差,解决某些可再生能源如太阳能的昼夜间断性问题,建筑保温和工业余热回收利用等方面。

热能存储技术又称为蓄热技术,根据原理的不同可以分为显热蓄热技术、潜热蓄热技术和化学反应蓄热技术<sup>[20]</sup>。显热蓄热技术利用了蓄热材料的热容特性,通过材料受热后内能的增大实现热能的存储。潜热蓄热技术利用了蓄热材质发生相态变化时分子间结构的改变来存储和释放热能。化学反应蓄热技术利用材料间发生可逆化学反应时释放和吸收热量来达到储存能量的目的。这三种蓄热技术的使用条件不同,各有优缺点。显热蓄热技术的稳定性较好,成本低,维护简单,但蓄热密度一般较小,适用于对热量需求不大的小规模系统应用;潜热蓄热技术和化学反应蓄热技术的蓄热密度较大,但成本相对较高,维护复杂,适用于对热量需求较大的中大规模系统应用。由于显热蓄热量较低,而化学反应蓄热过程复杂,稳定性易受环境影响,因此潜热蓄热技术是目前蓄热技术研究和应用的主要方向。

20世纪60年代后期,美国国家航空航天局将相变蓄热技术推广应用到航天领域,标志着现代蓄热技术研究和应用的开始。70年代,受到世界范围内能源危机的影响,相变蓄热技术开始受到越来越多的关注。1978年,国际能源组织(International Energy Agency, IEA)成立了蓄热技术研究机构(Energy Conservation through Energy Storage, ECES),并在此后持续开展了一系列相变蓄热的相关研究<sup>[21]</sup>。