

# 吸收式热泵技术及应用

XISHOUSHIREBENG JISHU JI YINGYONG

钟晓晖 勾昱君 著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 吸收式热泵技术及应用

钟晓晖 勾昱君 著

北京  
冶金工业出版社  
2014

## 内 容 提 要

我国能源形势和环境问题日益严峻,必须加快开发新能源,提高能源利用效率。吸收式热泵是以热能为补偿,实现从低温向高温输送热量的设备,可以达到余热利用的目的,具有节约能源、保护环境的双重作用。目前,吸收式热泵在工业余热回收利用中的应用越来越广泛。本书从吸收式热泵技术的应用背景和研究进展出发,论述了开式循环吸收式热泵和余热-地热源吸收式热泵的原理、数值模拟和热力学分析,以及吸收式热泵在工业余热回收利用中的应用。

本书可供相关学科的研究人员、技术人员阅读、参考,也可供高等院校动力、能源等相关专业学生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

吸收式热泵技术及应用/钟晓晖,勾昱君著. —北京:  
冶金工业出版社, 2014. 9

ISBN 978-7-5024-6759-3

I. ①吸… II. ①钟… ②勾… III. ①热泵—基本知识 IV. ①TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 217123 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 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6759-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京佳诚信缘彩印有限公司印刷

2014 年 9 月第 1 版,2014 年 9 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 9.5 印张; 181 千字; 141 页

29.00 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

---

随着经济社会的发展,人类正面临着可能出现的能源危机以及日益严重的环境污染和生态环境破坏问题。人类生活质量的进一步提高及生存环境的进一步改善,迫切要求解决这两个世界性难题。吸收式热泵是以热能为补偿实现从低温向高温输送热量的设备,可以达到余热利用的目的,具有节约能源、保护环境的双重作用,吸收式热泵在工业余热回收利用中的应用也越来越广泛。

本书从吸收式热泵技术的应用背景和研究进展出发,论述了开式循环吸收式热泵和余热-地热源吸收式热泵的原理、数值模拟和热力学分析以及吸收式热泵在工业余热回收利用中的应用。全书共分5章。第1章介绍了世界能源现状、采用热泵回收余热的意义和热泵技术概述。第2章介绍了溴化锂二元溶液的性质、溴化锂吸收式热泵制热原理、分类和特点。第3章介绍了开式吸收式热泵的应用背景、研究进展、开式吸收式热泵与冷凝方式燃气潜热回收效果的比较、开式吸收式热泵系统的热力学评价和实验研究。第4章介绍了余热-地热源吸收式热泵研究背景、实验研究、热力学分析和地埋管换热性能研究。第5章在吸收式热泵热力过程模拟分析的基础上,介绍了热电联产集中供热三种方式对比分析和汽轮机乏汽余热能综合利用研究。

本书由钟晓晖撰写第1章、第4章、第5章,勾昱君撰写第2章、第3章。

作者在吸收式热泵技术的研究过程中,曾获得河北省自然科学基

## II 吸收式热泵技术及应用

金的资金支持，并且得到了河北联合大学冶金与能源学院老师和领导们的关心，书中的部分内容由赵斌教授提供并整理，在此一并致谢！

由于作者学术水平所限，书中不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2014年6月

于河北联合大学

## 冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
热能转换与利用 (第2版)	32.00
冶金与材料热力学	65.00
金属学及热处理	25.00
金属材料与热处理	32.00
材料热工基础	40.00
冶金炉热工基础	37.00
热工测量仪表 (第2版)	46.00
金属学与热处理	42.00
加热炉基础知识与操作	29.00
钢铁冶金的环保与节能 (第2版)	56.00
钢铁产业节能减排技术路线图	32.00
冶金工业节能与余热利用技术指南	58.00
冶金工业节水减排与废水回用技术指南	79.00
钢铁工业烟尘减排与回收利用技术指南	58.00
冶金工业节能减排技术	69.00
冶金过程污染控制与资源化丛书	
绿色冶金与清洁生产	49.00
冶金过程固体废物处理与资源化	39.00
冶金过程废水处理与利用	30.00
冶金过程废气污染控制与资源化	40.00
冶金企业污染土壤和地下水整治与修复	29.00
冶金企业废弃生产设备设施处理与利用	36.00
矿山固体废物处理与资源化	26.00
电炉炼钢除尘与节能技术问答	29.00
钢铁工业废水资源回用技术与应用	68.00
电子废弃物的处理处置与资源化	29.00
工业固体废物处理与资源	39.00
物理性污染控制	48.00
冶金资源高效利用	56.00

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 世界能源现状 .....	1
1.2 采用热泵回收余热的意义 .....	2
1.3 热泵技术概述 .....	3
1.3.1 吸收式热泵在国内外研究进展 .....	3
1.3.2 吸收式热泵在余热回收方面的应用 .....	5
参考文献 .....	6
<b>2 溴化锂吸收式热泵制热原理及分类</b> .....	7
2.1 溴化锂二元溶液的性质 .....	7
2.1.1 溴化锂二元溶液的一般性质 .....	7
2.1.2 溴化锂二元溶液的热物理性质 .....	7
2.1.3 溴化锂-水二元工质对溶液的腐蚀性 .....	8
2.2 溴化锂吸收式热泵制热原理 .....	9
2.2.1 溴化锂吸收式热泵各部件作用与高、低温制热循环 .....	9
2.2.2 溴化锂吸收式热泵制热原理 .....	12
2.3 溴化锂吸收式热泵的分类与介绍 .....	12
2.3.1 溴化锂吸收式热泵的分类 .....	12
2.3.2 第一类溴化锂吸收式热泵 .....	14
2.3.3 第二类溴化锂吸收式热泵 .....	16
2.4 溴化锂吸收式技术的特点 .....	17
参考文献 .....	18
<b>3 开式吸收式热泵</b> .....	19
3.1 开式吸收式热泵的应用背景 .....	19
3.2 开式吸收式热泵的研究进展 .....	22
3.3 开式吸收式热泵与冷凝方式燃气潜热回收效果的比较 .....	25
3.3.1 开式循环吸收式热泵系统描述 .....	25

## IV 目 录

3.3.2	开式循环吸收式热泵工质的选择及参数确定	26
3.3.3	供暖工况算例	30
3.3.4	流程模拟及结果分析	31
3.4	开式吸收式热泵系统的热力学评价	33
3.4.1	热力学第一定律分析	34
3.4.2	开式循环吸收式热泵系统的焓分析	43
3.5	开式吸收式热泵实验研究	47
3.5.1	开式循环吸收式热泵系统实验装置	47
3.5.2	溶液再生实验	51
3.5.3	溶液吸收实验	53
	参考文献	61
4	余热-地热源吸收式热泵	63
4.1	余热-地热源吸收式热泵研究背景	63
4.2	双源热泵系统实验研究	65
4.2.1	实验台搭建	66
4.2.2	实验控制系统	67
4.2.3	实验方法	68
4.2.4	全工况实验研究	69
4.3	U型埋管换热性能研究	79
4.3.1	实验系统	80
4.3.2	理论分析	81
4.3.3	数值模拟	82
4.3.4	结果分析	87
4.4	双源热泵系统热力学分析	91
4.4.1	评价指标	92
4.4.2	焓效率	93
4.4.3	热泵机组热力学分析	95
4.4.4	U型埋管换热器焓分析	99
	参考文献	100
5	吸收式热泵在工业余热回收利用中的应用研究	102
5.1	研究背景及现状	102
5.1.1	研究背景	102
5.1.2	吸收式热泵回收余热技术	103



5.1.3	螺杆膨胀机回收低温余热技术 .....	104
5.1.4	汽轮机余热能利用现状 .....	105
5.2	吸收式热泵热力学过程模拟分析 .....	107
5.2.1	模拟概述 .....	107
5.2.2	数学模型建立 .....	107
5.2.3	热力学过程模拟计算 .....	110
5.2.4	结果分析 .....	113
5.3	热电联产集中供热三种方式对比分析 .....	115
5.3.1	集中供热三种方式概述 .....	116
5.3.2	循环水吸收式热泵系统余热回收方案 .....	118
5.3.3	循环水吸收式热泵系统数学模型 .....	119
5.3.4	额定工况方案对比 .....	122
5.3.5	最大工况方案对比 .....	127
5.3.6	变工况方案对比 .....	131
5.4	汽轮机乏汽余热能综合利用研究 .....	134
5.4.1	乏汽源余热高效利用 .....	134
5.4.2	乏汽余热回收综合利用系统 .....	135
	参考文献 .....	139

# 1 绪 论

## 1.1 世界能源现状

进入 20 世纪以来,人类面临着环境与社会发展问题的严峻挑战。在人类文明高速发展的今天,能源已经成为影响人类可持续发展进程的重要因素之一。世界经济的现代化得益于化石能源,如石油、天然气、煤炭与核裂变能的广泛投入与应用。伴随着现代工业的迅速发展,人类对能源的依赖性越来越大。然而,能源消耗的急剧增加导致了环境污染、臭氧层破坏和地球变暖等问题。不仅如此,绝大部分化石能源将在 21 世纪中叶迅速地接近枯竭。据预测,按现有的已探明储备量和开采速度,石油只够开采 50 年,天然气只够开采 60 年,煤炭储量稍微多一些,但也只能开采不到 200 年。化石能源的枯竭必将导致世界经济危机和地区冲突的加剧。实际上,近些年来中东战争和美军攻打伊拉克等归根到底还是属于能源战争。这种军事冲突在今后还将更猛烈、更频繁。

目前,世界上各个国家使用的能源主要是石油、天然气、煤等一次性不可再生能源,占能源总消耗量的 90% 左右,现有的能源供应和消耗模式是与可持续发展战略背道而驰的。但是,如何以可持续发展的方式满足人类日益增长的能源需求成为了难题。改善能源结构、开发利用新能源和提高能源利用率成为了能源、经济、环境和社会可持续发展的必经之路。我国的能源现状可以概括为总量丰富,但人均不足。中国是发展中国家,人口众多,人均能源资源相对匮乏。其中,煤炭居主导地位。2010 年,中国煤炭探明可采储量为 1145 亿吨,占世界的 13.3%,位居世界第三,仅次于美国和俄罗斯;石油资源丰富,2011 年基础储量约为 2158 亿吨,产量仅为 32 亿吨,占基础储量的 1.48%;2011 年天然气基础储量为 4 万亿立方米,产量只有 1025 亿立方米,占基础储量的 2.56%。中国的水资源十分丰富,其理论蕴藏量相当于 6.19 万亿千瓦时的年发电量,占世界水力资源量的 12%,居世界首位;2010 年中国核电产量为 738.8 亿千瓦时,占全球的 2.7%,位居世界第九;2011 年比 2010 增长 16.9%、达到 863.9 亿千瓦时。按目前估计,中国拥有世界第三位的煤炭探明可采储量,第一位的水力资源蕴藏量和第九位的核电产量<sup>[1]</sup>。但是,中国的单位 GDP 能耗却很高,为发达国家的 4~6 倍。中国每公斤标煤 GDP 仅为 0.36 美元,日本为 5.58 美元,是我国的 15 倍<sup>[2]</sup>。

目前我国是世界第二大能源消费国,能源年产量以4%~5%的速度增长,而这样的增长速度还远远满足不了国民经济发展的需要,供需矛盾日益显现。全国各地频频传出有拉闸限电的报道。自1990年以来,我国的煤炭产量一直稳居世界第一。2013年我国全年发电量达到了5.24亿千瓦时,是美国的1.3倍。煤炭作为燃料直接燃烧掉是一种极大的浪费,而且还会对环境造成严重的污染。在用煤炭发电的过程中会产生大量的CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和粉尘,对大气环境造成严重的破坏,并加剧了温室效应,产生大面积的酸雨,破坏我国的生态环境。2013年年初以来,我国中东部地区出现了严重的雾霾天气,特别是北京、天津、西安等大城市的雾霾现象尤为严重。雾霾产生的原因很多,主要原因包括汽车尾气排放、城市建设污染、煤炭排放等。雾霾最严重的城市同时也是堵车最严重的城市,如北京、上海,当然不是偶然,但是治理汽车尾气如油品升级不会很难;城市建设污染也是可控的。PM<sub>2.5</sub>是形成雾霾最重要的直接内因,而二氧化硫、氮氧化物及烟尘又是形成PM<sub>2.5</sub>最重要的污染物。2012年我国二氧化硫排放总量2118万吨,氮氧化物排放2338万吨,烟尘排放1234.3万吨。美国环保局数据表明,美国2012年二氧化硫排放为562万吨,氮氧化物排放1116万吨,烟尘排放约为443万吨。欧洲环境署给出的2011年数据中,欧盟28国二氧化硫排放458万吨,氮氧化物排放884万吨,烟尘排放487万吨。可见,我国的排放是美国和欧盟28国的2~3倍,其中二氧化硫排放接近欧盟28个国家总和的5倍。这样的排放背景下,雾霾很难避免。而煤炭消费正是中国三大污染物排放的主要来源。世界上有一半的煤炭在中国燃烧,我国二氧化硫、氮氧化物及烟尘的排放绝大部分来自于煤炭燃烧。我国2013年煤炭消耗占一次能源比重达66%,而美国和日本煤炭消耗在一次能源中一直维持在25%左右。在我国煤炭消耗中,大约一半用来发电,虽然目前的燃煤发电减排技术已经相当成熟,但由于煤炭消费的基数庞大,导致每年的排放量依然非常惊人。按照目前燃煤发电的节能减排技术,二氧化硫、氮氧化物以及烟尘的减排效率分别可以达到95%、70%~90%和99%。但即使有这样的减排技术,燃煤发电每年还是排放了二氧化硫884万吨、氮氧化物949万吨以及烟尘156万吨。仅燃煤发电排放的二氧化硫和氮氧化物就几乎占到了总排放量的一半<sup>[3]</sup>。目前,我国在短期内还无法大规模替代煤炭,那么,雾霾治理政策的另一个关注点应该是低阶煤提质和煤的清洁利用<sup>[4~5]</sup>。因此,面临着如此严峻的能源和环境形势,我们必须加快开发新能源,提高能源利用效率。

## 1.2 采用热泵回收余热的意义

目前世界上能源利用率较高的国家有日本(57%)、美国(51%)、欧盟(40%以上)。即使是工业发达国家,他们的能源利用率也不是很高,有40%~60%的热量被浪费掉。而我国的能源利用率与发达国家相比差距较大,能源利用

率不到 30%，相当一部分废热被排放到环境中，不仅浪费了大量的能源，增加了生产成本，而且对环境也造成了污染。由此可见，余热、废热利用有着重要的意义，可以降低生产成本，减少环境污染，提高经济效益。我国有着丰富的余热资源，余热利用潜力很大，其中有很多具备余热温度高、热流体流量稳定等较好利用条件的地方还没有得到利用，比如，火力发电厂中的汽轮机冷凝水放热，由于其品位低而一直没有被利用。虽然近年来鲜有电厂采用低真空运行方式用循环冷却水来给用户供暖，但是数量还很少，而且供热量也不大，大部分冷凝水中的热量还是排放到环境中去了。据统计，我国东北地区每年大概有  $5.5 \times 10^8$  GJ 的低温热源热量未被利用，低温热源热量的利用有重要的意义。利用热泵技术可以很好地利用这部分低温余热。

我国建筑能耗超过全国总能耗的四分之一，这部分能耗还将随着人民生活水平的日益提高而快速增长。我国建筑能耗中用于空调、采暖与生活用水的占 60%<sup>[6]</sup>，这部分能耗有几个特点：（1）所需热源品位低。热能根据其温度的高低可以分为低品位热能和高品质热能。热能温度越接近环境温度，则热能品位越低；反之，则越高。而建筑采暖所需的热能温度一般低于 100℃，空调所需的冷源温度一般高于 5℃，都属于低品位热源。（2）所需热源温度范围窄。建筑供热热水温度为 45~60℃，空调冷冻水温度通常为 5~12℃。（3）所需热源温度与自然环境温度接近。以北京为例，土壤和地下水温度全年约为 14℃、电厂冷却水温度在 30℃ 以上、空气温度一般为 15~40℃。这些温度范围与空调供暖供热所需的温度范围很接近。虽然自然能源与建筑能源的温度比较接近，但是这种低品位能源用来发电是几乎不可能的。为实现利用低品位热量的目的，我们可以借助热泵技术来实施。热泵是一种高效节能的低温余热利用设备，这种设备可以从自然界和工业余热、废热中吸收热量，提高低温热源的品位，满足建筑空调和采暖的需要。使用热泵系统可以达到为建筑物夏季制冷、冬季制热以及全年生活用热水的需要，不仅可以提高低品位热源的品位，达到节约能源的效果，还可以一机多用，并且具有使用运行稳定、使用寿命长等优点。使用热泵供暖与直接用电采暖相比较，可以节省 70% 左右的电能。利用热泵技术是节约能源的有效途径。

## 1.3 热泵技术概述

### 1.3.1 吸收式热泵在国内外研究进展

吸收式热泵（absorption heat pump，简称 AHP）作为一种以一定量高温热量为补偿，从低温位热源汲取热量并将之输送给高温位热水的设备，可以达到有效回收利用余热的目的，因此其在节能方面有广阔的应用前景。常用的吸收式热泵

溶液工质有以水为溶剂的氨水溶液及以水为工质、溴化锂稀溶液为溶剂的溴化锂溶液。由于氨水溶液的发生作用需要增加一套精馏设备,而溴化锂溶液对金属材料的腐蚀作用已经通过隔绝氧气和添加缓释剂等多种措施得到有效控制,因此目前主流吸收式热泵机组基本上都是以溴化锂溶液作为系统循环制热工质。

热泵技术的诞生最早可追溯到 1824 年,卡诺提出:“制冷机也可以有效地用于供热。”这一经典的表述似乎就预示了当今热泵技术的飞速发展和全面进步。世界上第一台热泵机组在 20 世纪中叶的欧洲诞生,它把莱茵河的河水作为低温热源,机组循环系统设计为冬季供暖、夏季供冷。其输出的热水温度达到了 60℃,但是由于当时技术不成熟及制造成本等原因,热泵技术的发展一直比较缓慢<sup>[8]</sup>,直到了 1852 年,由 L. Kelvin 提出了基于热泵技术的新型供暖模型,人们才逐渐意识到基于热泵技术的供暖系统与现有的供暖系统相比,其节能效果十分明显<sup>[7]</sup>,随之人们对热泵技术的研究推向高潮,但是由于当时化石燃料供应充足、价格十分低廉,因此热泵技术并没有得到大规模的推广。直到 20 世纪 70 年代全球性石油危机爆发,导致原油价格大幅上涨,热泵技术才迎来了全球发展的春天。美国、日本等发达国家在热泵领域内的研究和发处于领先地位。除美国和日本以外,其他一些能源紧缺的国家如英国、法国、意大利、德国、瑞典等都对热泵技术做了大量的研究工作。目前,工业热泵主要应用在酿造、纺织、木材、食品加工、石油化工、海水淡化、热电以及冶金等领域。

国内热泵技术的发展从 20 世纪 60 年代开始,但限制于当时粗放经营、计划经济等社会因素影响,且加上国家对节能技术的相关扶持政策较少,最终导致热泵技术在国内相当长一段时间内发展十分缓慢。直到改革开放以后,国内经济飞速发展,一定程度上促使了热泵技术在国内的普及与发展。尤其是近些年来,伴随着全球能源危机的加剧,国家相关节能扶持政策的出台,我国的热泵技术迎来了发展的春天。其中,《中华人民共和国节约能源法》第三十九条指出:“将热、电、冷联产技术列为国家鼓励发展的通用技术”。国家经贸委《2000~2015 年新能源和可再生能源产业发展规划要点》指出:“积极推广地热采暖和地热发电技术”、“加快地源热泵技术的引进和开发,加速国产化”。

现阶段国内有关吸收式热泵技术的研究状况主要集中在以下两点:

(1) 对新工质的研发。吸收式热泵机组采用何种溶液工质决定了其机组运行的条件、性能以及设备配套所选用的管件材质和投资规模等。吸收式热泵系统常用的循环工质基本上是  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  溶液和  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  溶液两种,但是  $\text{NH}_3$  毒性和  $\text{LiBr}$  溶液对金属材料的腐蚀性使这两种工质的广泛应用受到限制。因此,对新型工质的研究仍在进行中。同时,还有一些研究人员致力于传统工质的改进,比如针对  $\text{LiBr}$  溶液的通过添加缓蚀剂等方法来减小其腐蚀性,并且已经有了阶段性成果,如  $\text{LiBr-LiNO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 、 $\text{LiBr-ZnCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  等工质对的出现。

(2) 对溶液吸收-发生循环的改进。为了得到更高温升、更高效的热泵系统,在研究过程中对溴化锂溶液吸收-发生循环的优化进行了许多尝试。如现在的双效、三效吸收循环技术,实现了更高的机组制热效率;单效式与双效式联合循环运行的形式等。并且在吸收式热泵的驱动能源选择上也扩展到了利用太阳能、地热等可再生能源<sup>[9]</sup>。

### 1.3.2 吸收式热泵在余热回收方面的应用

在国外,利用吸收式热泵系统回收余热技术的研究已有多年的发展。早在1976年,美国 B. C. L. (Batttle Clumber Labs) 就已经提出这一概念并进行市场预测,确信该项技术有很高的实用价值,并于1980年与 A. C. 公司 (Adolphcooc Compange) 合作,共同研发出较为完善的吸收式 AHT 系统,1983年已能规模化生产,并将它用于回收炼油厂中汽提塔和蒸馏塔塔顶蒸汽的冷凝余热,以及造纸厂制浆工艺和食品加工过程中泄漏蒸汽的余热。日本在吸收式热泵的制造和应用方面也较为先进,1981年以来,日本的三洋公司已为日本和全球各地建立了20套大型吸收热泵装置,部分机组已成功运行十年以上。同时在日本的千叶工厂,已将吸收式热泵装置集成于橡胶装置中的凝聚釜顶废热回收系统中,并且取得了良好的效果,据记载其改造投资回收期只有15年。

在溴化锂吸收式热泵技术上我国已经积累了雄厚的技术基础,但在吸收式热泵系统的应用技术上还比较落后。近几年来,大量的研究工作者对吸收式热泵技术用于回收利用工业余热方面做了很多工作:

(1) 2007年,太原理工大学根据山西某热电厂冷凝抽汽工况条件设计了基于单效吸收式热泵机组的新型热电联产系统。改造后的热电联产系统在原有汽轮机抽汽量不变的条件下回收汽轮机冷凝余热,实现热网供热负荷增大、热电厂一次能源利用率提高、节能减排的目标,实际运行工况良好,经济效益和社会效益显著。

(2) 辽河油田进行了吸收式热泵用于稠油污水余热回收的仿真和优化,利用单效第一类吸收式热泵回收稠油污水的余热并为石油长输管线伴热、用户供暖及锅炉自来水加热等提供热源。运行工况良好,获得较大的经济效益和社会效益。

(3) 大庆石油学院结合油田的实际情况,通过对油田污水热源和油田用热要求的分析,探讨了采用单效第一类吸收式热泵为油田的生产过程供热的可行性、节能和经济效益<sup>[10]</sup>。

(4) 2008年,清华大学提出了基于 Co-ah 循环的热电联产集中供热方法。其中,对热电厂的冷凝余热利用双效吸收热泵机组配合单效吸收热泵机组的方式,其设计目标是实现依靠热电厂冷凝乏汽、冷凝余热及汽轮机抽汽并以此对热网回水进行升温<sup>[11]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] 刘进科. 中国能源经济可持续发展研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2013.
- [2] 冯世良. 我国新能源发展现状及开发前景 [J]. 中国石油和化工经济分析, 2007 (16): 16~21.
- [3] 林伯强. 从调整能源结构入手治理雾霾 [N]. 中国电力报, 2014-03-04 (1).
- [4] 陈贵锋, 罗腾. 煤炭清洁利用发展模式与科技需求 [J]. 洁净煤技术, 2014, 2 (20): 99~103.
- [5] 南峰, 钟晓晖. 蔚州单侯矿长焰煤振动混流干燥实验研究 [J]. 煤炭技术, 2012, 4 (31): 241~243.
- [6] 戴永庆, 等. 溴化锂吸收式制冷技术及应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [7] Pongsid Srihirin, Satha Aphornratana, Supachart Chungpaibulpatana. A review of absorption refrigeration technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2001 (5): 343~372.
- [8] 隋军, 李淞平, 袁一. 工业环保与节能的有效手段——吸收式热泵技术 [J]. 化工进展, 2001, 6: 46~49.
- [9] 耿惠彬, 戴永庆, 蔡小荣. 世界各国吸收式制冷技术的研究与开发 [J]. 机电设备, 2003, V20 (2): 28~34.
- [10] 张永贵. 油田污水余热回收方案及其经济效益测算 [J]. 节能技术, 2003, V21 (119): 8~9.
- [11] 付林, 江亿, 张世钢. 基于 Co-ah 循环的热电联产集中供热方法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2008, 48 (09): 1377~1380.

## 2 溴化锂吸收式热泵制热原理及分类

### 2.1 溴化锂二元溶液的性质

#### 2.1.1 溴化锂二元溶液的一般性质

溴化锂溶液是由固体溴化锂溶解于水中生成，且金属锂与钠同族、溴又属于卤族元素，因而溴化锂的性质与食盐很相似，在自然环境中不会变质、分解或挥发，吸水性极强，是一种较为稳定的物质。溴化锂无水晶体粉末的基本性质见表 2-1。

表 2-1 溴化锂无水晶体粉末的基本性质

项目	相对分子质量	质量分数 /%	外观	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$
数据	86.856	Li: 7.99; Br: 92.01	无色粒状 结晶体	3464	1265	549

溴化锂存在的物性特征除了无水粉末和水溶液外还会产生带水结晶物等，其最大的特征就是强烈的吸水性，且相同压力下溴化锂的溶解、蒸发温度远远高于水的饱和温度，这是实现吸收式热泵循环的工质基础<sup>[1]</sup>。溴化锂-水溶液的化学性质见表 2-2。

表 2-2 溴化锂-水溶液的化学性质

成分	溴化锂	缓蚀剂 /%	碱度	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$
质量指标	86.856	Li: 7.99; Br: 92.01	无色粒状 结晶体	3464	1265	549

#### 2.1.2 溴化锂二元溶液的热物理性质

##### 2.1.2.1 结晶温度

同大多数盐类的性质相似，一定浓度下的溴化锂溶液会随着温度降低到一定程度而出现结晶现象，此时的溶液温度即为该浓度下的溴化锂结晶温度。因此，



在实际工程应用中应当严格控制溴化锂溶液的温度降,防止因工质结晶造成的装置堵塞。

### 2.1.2.2 溴化锂溶液的 $p-t$ 关系、 $h-\xi$ 关系

溴化锂的溶解蒸发温度非常高,而且在自然环境中不会挥发,所以溴化锂溶液的气相蒸气压力为水蒸气压力。同时随着对溴化锂溶液热物性的不断研究,许多研究者逐渐总结模拟出了溴化锂溶液热物性的多个重要经验公式,其中最主要的有溴化锂溶液的  $p-t$  关系和  $h-\xi$  关系。

溴化锂溶液的  $p-t$  关系是指水蒸气与溴化锂溶液处于气-液平衡状态时溶液的质量浓度、饱和水蒸气压力、温度三者之间的关系,不同压力和溴化锂溶液浓度下气-液平衡时的饱和温度数据可通过查表获得。在溴化锂溶液中溶质溴化锂是非挥发性物质,因此,溶液的气相蒸气压力为纯水蒸气压力。实验表明:在温度不变时,溴化锂溶液的饱和蒸气压与溶液的浓度有关,随着浓度的增大,蒸气压力越小;而浓度不变时,溶液的饱和蒸气压与溶液的温度有关,温度越高则压力越大。溴化锂溶液的  $p-t$  图展示了溶液的压力、温度和浓度三个状态参数间的相互关系,它是主要的热力性质图之一。这三个状态参数之间只要知道其二,就可根据  $p-t$  图或者查表找出对应的第三个状态参数。用溴化锂溶液的  $p-t$  图可以判断热泵机组运转是否正常,热泵机组内溶液的浓度是否合适,也可用来确定热泵机组的正确调整。

规定温度为  $0^{\circ}\text{C}$ 、质量分数为  $0\%$  时溴化锂溶液的焓为  $4.1868\text{kJ/kg}$  时。溴化锂溶液的焓随温度和质量分数变化也可通过查表获得。

在忽略工质流动时进出口的动能和位能的影响时,溴化锂吸收式热泵各部件与外界的热交换,可用稳定流动能量方程式 (2-1) 来计算:

$$q = h_2 - h_1 \quad (2-1)$$

若能知道各点的焓值,则各部件与外界的换热量就可以计算出来。

溶液中水蒸气的饱和压力比同温度下纯水的饱和压力低,因此与溶液相平衡的水蒸气是过热状态(相对于纯水的饱和状态而言)。当已知这三个状态参数 ( $p$ 、 $t$ 、 $\xi$ ) 中的任意两个时,就可以用  $h-\xi$  图或者表格来确定相应点的焓值,得到了焓值就可以算出热泵各部件的热交换量。也可以把各点的参数标注在  $h-\xi$  图上分析吸收式循环的完善程度<sup>[2]</sup>。

### 2.1.3 溴化锂-水二元工质对溶液的腐蚀性

溴化锂溶液对金属具有一定腐蚀性,影响其腐蚀性的主要因素有如下几方面:

(1) 氧气。大量研究表明<sup>[3]</sup>,当吸收式装置中进入空气(氧气)时,溴化