

冰浆技术及应用

Ice Slurry Technology and Applications

刘圣春 孙志利 代宝民 王飞波 郝 影 编著



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

冰浆技术及应用

Ice Slurry Technology and Applications

刘圣春 孙志利 代宝民 王飞波 郝 影 编著



图书在版编目(CIP)数据

冰浆技术及应用 / 刘圣春等编著. —天津:天津
大学出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-5618-5885-1

I. ①冰… II. ①刘… III. ①制冷技术—研究 IV.
①TB66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 163302 号

出版发行	天津大学出版社
地 址	天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话	发行部:022-27403647
网 址	publish.tju.edu.cn
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
经 销	全国各地新华书店
开 本	185mm × 260mm
印 张	11.75
字 数	300 千
版 次	2017 年 7 月第 1 版
印 次	2017 年 7 月第 1 次
定 价	48.00 元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

进入 21 世纪以来,节能减排已经成为经济社会的一个热点问题。目前,我国的能源和资源总量并不像“地大物博”的描述那样,反而由于人口众多使人均能源和资源占有量与世界整体水平存在明显的差距,并且我国是世界第二大能源生产国,也是第二大能源消费国。随着我国经济的持续发展,能源消耗急剧增加,高耗能成为制约我国经济发展的严峻现实问题。

近年来,公共建筑能耗逐年增加,空调能耗占建筑能耗的比例也逐年增加,蓄能技术的发展为冰蓄冷空调的应用提供了发展空间。同时,随着国家农产品中长期发展规划的实施,保鲜技术需求快速增加,冰浆作为一种有潜力的蓄冷介质,有其自身的特点,对于从事制冷空调专业以及食品冷冻冷藏专业的技术人员,有必要了解与冰浆相关的技术。本书将全面介绍冰浆技术的相关知识,其内容有绪论、冰浆相关技术研究进展、冰浆制取方式、材料表面冰晶成核理论模拟和实验研究、机械式壁面刮削冰浆制取系统实验研究、冰浆在管道中流动换热特性理论分析、冰浆在管道中流动换热特性实验分析、冰浆的应用。

参与本书编写工作的人员如下:第 0 章,刘圣春(天津商业大学)、郝影(天津市环境监测中心);第 1 章,孙志利、李正(天津商业大学);第 2 章,代宝民、宋明(天津商业大学);第 3 章,刘圣春、董紫腾(天津市丹华宏业制冷技术有限公司);第 4 章,杨旭凯(天津鼎拓科技有限公司)、饶志明(维克(天津)有限公司);第 5 章,郝玲(北京理工大学)、李叶(北京百度网讯科技有限公司);第 6 章,刘圣春、郝玲;第 7 章,孙志利、姜婷婷(天津商业大学)。全书由刘圣春、孙志利、代宝民统稿并审改。

在本书编写过程中,宁静红、刘晓红、吴利平、高珊、霍宇杰、张子涵、卢芬平、刘章、吴思成、宋力钊、刘江彬、刘敬坤、朱春元、赵玉晨、杨俊斌、张晓儒、郑通、沈英焱、董强参与了资料搜集整理工作。本书得到天津市应用基础与前沿技术研究计划(15JCYBJC21600)和“十三五”综合投资国家基金培育项目(2016ZT010513)资助。

本书可作为能源与动力工程专业本科生选修课教材和制冷及低温工程专业研究生选修课教材,同时也可作为从事蓄能行业以及冷冻冷藏行业技术人员的参考用书。

编写人员在本书的编写和修订过程中参阅了大量已有的文献,这些文献尽量在每章后面的参考文献中列举,在此对这些文献作者付出的劳动及其对本书的支持和帮助表示感谢!

限于编者水平,书中难免有欠妥之处,诚恳欢迎读者予以批评指正。

目 录

第0章 绪论	1
0.1 人与自然	1
0.2 节能减排刻不容缓	2
0.3 蓄冷技术	3
0.3.1 蓄冷技术发展	3
0.3.2 蓄冷技术	5
0.4 食品保鲜	8
0.5 冰浆的概念	8
参考文献	9
第1章 冰浆相关技术研究进展	11
1.1 冰浆在阻力部件中流动换热的研究现状及几点建议	11
1.1.1 冰浆在管道输送中的流动特性	12
1.1.2 换热器内的流动换热分析	17
1.1.3 结论及几点建议	20
1.2 冰浆储存与融化特性研究现状及展望	20
1.2.1 冰浆储存特性研究	21
1.2.2 冰浆融化特性研究	24
1.2.3 结论与展望	27
1.3 冰浆凝结相变研究现状	27
1.3.1 国外冰浆凝结相变研究现状	27
1.3.2 国内冰浆凝结相变研究现状	31
1.4 与冰浆相关的其他研究现状	32
参考文献	34
第2章 冰浆制取方式	41
2.1 传统的冰浆制取方式	41
2.1.1 机械式壁面刮削法	41
2.1.2 过冷法	43
2.1.3 流化床法	46
2.1.4 真空法	47
2.1.5 直接接触法	48
2.1.6 几种传统制冰方式的比较	51
2.2 新型的冰浆制取方式	51

2.2.1	新型螺旋管冰浆出流装置	52
2.2.2	液-液循环流化床制取冰浆装置	52
2.2.3	直接接触喷射式制取冰浆装置	54
2.2.4	LNG 冷能法制取冰浆装置	55
2.2.5	蒸发式过冷水法	55
2.2.6	改进真空法	56
2.2.7	真空搅拌法	58
2.2.8	双筒式冰浆发生系统	59
2.3	本章小结	61
	参考文献	61
第3章	材料表面冰晶成核理论模拟和实验研究	64
3.1	冰晶成核理论分析	64
3.1.1	冰晶成核的同质成核理论	64
3.1.2	冰晶成核的异质成核理论	65
3.1.3	添加剂对成核的影响	69
3.1.4	本节小结	72
3.2	不同溶液在平板表面凝固过程的数值模拟	72
3.2.1	纯水液滴在平板表面凝固的数值建模	72
3.2.2	纯水表面凝结模拟计算结果与分析	74
3.2.3	氯化钠溶液凝固过程模拟结果与分析	77
3.2.4	本节小结	78
3.3	氯化钠溶液在不同材质表面凝固过程实验研究	79
3.3.1	粗糙度测量	79
3.3.2	接触角测量	82
3.3.3	纯水在不同材料表面凝固特性实验	85
3.3.4	平板表面凝固实验结果与模拟的对比分析	92
3.3.5	本节小结	94
	参考文献	94
第4章	机械式壁面刮削冰浆制取系统实验研究	96
4.1	水冷冰浆制取系统实验研究	96
4.1.1	实验装置	96
4.1.2	实验台搭建	97
4.1.3	设计参数和测点布置	101
4.1.4	实验方法和步骤	103
4.1.5	实验结果	104
4.1.6	数据处理分析	105
4.2	风冷冷凝机组冰浆制取系统实验研究	108

4.2.1	实验装置	108
4.2.2	实验台搭建	108
4.2.3	设计参数和测点布置	111
4.2.4	实验方法和步骤	112
4.2.5	实验结果与数据分析	114
4.3	两种制冰系统的改进	121
4.3.1	即时出冰风冷冰浆系统及制冰方法	121
4.3.2	小型化紧凑型动态制取冰浆系统	122
4.4	本章小结	126
	参考文献	127
第5章	冰浆在管道中流动换热特性理论分析	128
5.1	流动换热理论及经验公式	128
5.1.1	冰浆物性参数分析	128
5.1.2	固液两相流动及颗粒动力学理论	130
5.1.3	本节小结	132
5.2	冰浆在直管中流动换热特性模拟	132
5.2.1	误差分析	133
5.2.2	压降受流动参数的独立影响	133
5.2.3	管内冰粒分布情况	136
5.2.4	本节小结	138
5.3	复杂管道流动换热特性模拟及冰堵分析	138
5.3.1	弯管的流动换热特性	138
5.3.2	T形管流动换热特性数值模拟	141
5.3.3	冰堵风险预测	143
5.3.4	本节小结	149
	参考文献	149
第6章	冰浆在管道中流动换热特性实验分析	151
6.1	实验原理和目的	151
6.2	实验台搭建	151
6.2.1	冰浆制取装置	151
6.2.2	流动换热实验测试段	152
6.3	实验设计	155
6.4	实验方法和步骤	155
6.5	实验数据处理	156
6.6	实验结果与分析	157
6.6.1	流变特性测量	157
6.6.2	换热实验	161

6.7 本章小结	164
第7章 冰浆的应用	165
7.1 冰浆在建筑空调上的应用	165
7.2 矿井降温	166
7.3 食品加工领域应用	169
7.3.1 鱼类保鲜	169
7.3.2 奶制品的冷却	171
7.3.3 食品零售	173
7.3.4 啤酒厂	173
7.3.5 面包店	174
7.3.6 包装过程	174
7.4 医疗冷却	175
7.5 动态冰浆在其他方面的应用	177
7.5.1 冰浆在大厨房中的应用	177
7.5.2 冰浆在消防上的应用	178
参考文献	179

第0章 绪论

0.1 人与自然

随着科学技术的发展,人类在创造巨大财富的同时,也造成了日益严重的环境污染,使地球环境不断偏离其原来的状态。回归自然,是环境治理的最终目标。

在世界范围内,一些数据足以说明,人类正以过量消耗资源来换取文明的进步。为了满足人类对食物、淡水、木材、燃料的需求,在过去的60年中,被人类开垦为农田的土地比18世纪和19世纪的总和还要多。地球陆地表面24%的面积已经被人类开垦为耕地。过度采伐森林可能导致疟疾和霍乱肆虐的危险增加,并有可能引发不知名的疾病。过去40年中,人类从河湖中汲取的水量比过去翻了一番。人类现今消耗的地表水占有所有可利用淡水总和的40%~50%。至少1/4的渔业储备已被人类利用,一些地区的捕鱼量已经不到开始大规模工业捕鱼前的1%。1980年以来,全世界35%的红树林、20%的珊瑚礁已经不复存在,另有20%的珊瑚礁遭到严重破坏。从工业化开始到今天,人类已耗尽2/3的世界资源。

老子的《道德经》中有一句话:“天地不仁,以万物为刍狗;圣人不仁,以百姓为刍狗。”我们曾经无视甚至批判过这种思想,高呼“人定胜天”“精神第一、物质第二”的口号。也许,老子的思想多少含有宿命论的味道,但现在回过头来看,老祖宗的思想绝不是没有道理的。在科学文明日益发达、人们日渐狂妄的今日,重温这一段话,反倒会产生一种深刻的亲切之感。

恩格斯在《自然辩证法》中说过:“我们不要过分陶醉于我们对自然界的胜利。对于每一次这样的胜利,自然界都报复了我们。”人类在享受生产力巨大发展所带来的丰厚回报的同时,也遭到自然界的无情报复。直到20世纪60年代,全球才开始对人与自然关系进行探讨。1962年,Rachel Carson的《寂静的春天》,犹如旷野中的一声呐喊,用他深切的感受、全面的研究和雄辩的论点改变了历史的进程,引起了全世界对人与自然共同生存问题的大思考;1972年3月12日,D. L. Meadaesandal执笔为“罗马俱乐部”写了其第一份研究报告——《增长的极限》,阐明为了人类社会美好的未来,我们再也不能为所欲为地向自然界贪婪地索取、恣意地掠夺。因为,“我们不只是继承了父辈的地球,而是借用了子孙的地球”,这句话寓意深刻,《联合国环境方案》曾用这句话来告诫世人。1972年6月5日,在瑞典斯德哥尔摩召开的联合国人类环境会议是世界环境保护运动史上一个重要的里程碑。它是国际社会就环境问题召开的第一次世界性会议,标志着全人类对环境问题的觉醒。1981年,当代科学家、思想家莱斯特·布朗在他影响深远的著作《建设一个可持续发展的社会》的扉页上呼吁人类社会采取有效措施,努力稳定全球人口规模,保护自然资源,开发和利用可再生资源,自觉地改变价值观念,努力探索一条人与自然协调发展的新路,建设一个可持续发展的社会。1987年,挪威首相布伦特兰夫人向联合国环境发展大会提交的报

告——《我们共同的未来》首次对可持续发展有了明确定义。

0.2 节能减排刻不容缓

节能是我国经济和社会发展的一项长远战略方针,也是当前一项极为紧迫的任务。节约资源是基本国策;节约与开发并举,把节约放在首位是能源发展战略。正如《荀子·富国篇》所言:“百姓时和,事业得叙者,货之源也;等赋府库者,货之流也。故明主必谨养其和,节其流,开其源,而时斟酌焉,潢然使天下必有余,而上不忧不足。如是,则上下俱富,交无所藏之,是知国计之极也。”译注:百姓时和(指顺应天时耕作)、事业得叙(指有秩序、有条理)者,货之源也;等(指按照等级)赋府库(指收取赋税充实仓库)者,货之流也。“财之本”,是农耕生产;“财之末”,是仓库等的储藏。“货之源”,是耕作顺利、生活安定与事业有序;“货之流”,是通过税收充实仓库。此本末不可倒置,源流不可颠倒也!“故明主必谨养其(指节气)和,节其流,开其源,而时斟酌焉,潢然(指普遍)使天下必有余,而上不忧不足。如是,则上下俱富,交无(指都没有)所藏之(指财货之多,藏不下了),是知国计之极也。”这是最懂得富国的道理与方法了。“开源节流”就出自这里。

进入 21 世纪以来,节能减排问题已经成为经济社会的一个热点问题。能源是指自然界中能够转换成热能、光能、电能和机械能等能量的物质资源。对于中国,在许多人的描绘中,经常会用到“地大物博”一词,但是越来越多的事实表明:中国的能源和资源总量并不像“地大物博”的描述那样,反而由于人口众多使人均能源和资源占有量与世界整体水平存在明显的差距,并且中国是世界第二大能源生产国,也是第二大能源消费国。表 0-1 给出了 BP 统计的 2015 年世界一次能源消费结构。图 0-1 给出了 1990—2015 年世界能源消费分项趋势图。

表 0-1 2015 年世界一次能源消费情况表(百万吨油当量)

国家及地区	原油	天然气	原煤	核能	水力发电	可再生能源	总计
美国	851.6	713.6	396.3	189.9	57.4	71.7	2 280.5
巴西	137.3	36.8	17.4	3.3	81.7	16.3	292.8
法国	76.1	35.1	8.7	99.0	12.2	7.9	239.0
德国	110.2	67.2	78.3	20.7	4.4	40.0	320.8
中国	559.7	177.6	1 920.4	38.6	254.9	62.7	3 013.9
日本	189.6	102.1	119.4	1.0	21.9	14.5	448.5
中东合计	425.7	441.2	10.5	0.8	5.9	0.5	884.6
非洲合计	183.0	121.9	96.9	2.4	27.0	3.8	435.0
世界总计	4 331.3	3 135.2	3 839.9	583.1	892.9	364.9	13 147.3

全球消费量
(单位:百万吨油当量)

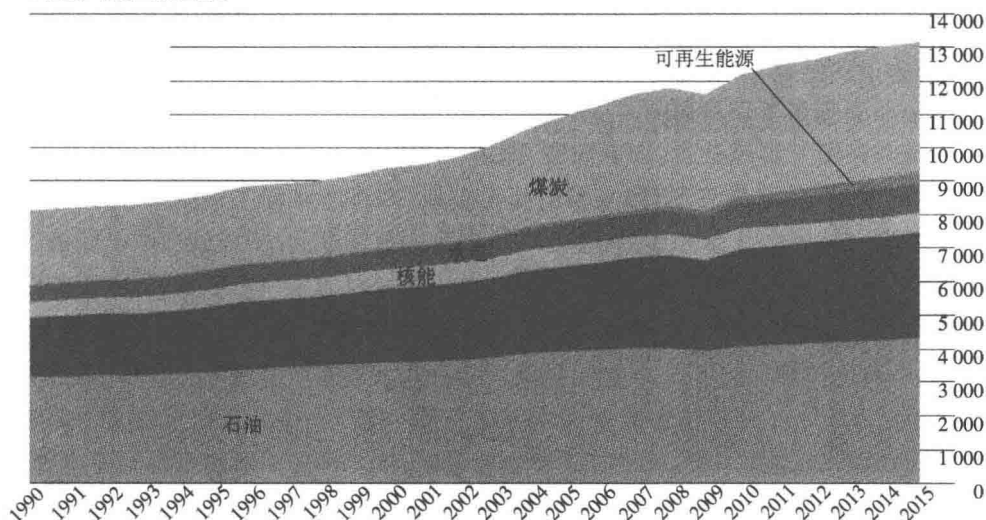


图 0-1 1990—2015 年世界能源消费分项趋势图

2015 年,世界一次能源消费增长了 1.0%,低于平均水平。这是自 1998 年以来的最低增速(除金融危机时期以外)。除欧洲及欧亚大陆以外,其他所有地区的增长均低于平均水平。除石油和核能以外,其他所有能源增长都低于过去十年平均增速。石油仍然是世界的主要燃料,并且自 1999 年以来第一次获得了更多市场份额;而煤炭的市场份额跌至 2005 年以来最低点。可再生能源发电占全球一次能源消费的比重高达 2.8%。

0.3 蓄冷技术

0.3.1 蓄冷技术发展

随着我国经济的持续发展,能源消费急剧增加,高耗能成为制约我国经济发展的严峻现实问题。尤其是在炎热的夏天,人们往往采取高耗电的空调来降温,以达到人们想要的舒适度,而且大多选择在中午或者下午天气热的时候开启空调,尤其是在城市,大多数办公楼白天长时间地开启空调,这就使得城市白天的耗电量极大,电力供应不足,有的地方只能采取限电来控制用户用电,而晚上用电量则减小很多,电网供电用不完,这种错峰用电对电网造成很大的负担,也给人们的生活带来许多不便。据国家统计局统计,中国 2015 年发电量为 5.618 万亿千瓦时,较 2014 年下降 0.2%,尽管为 1968 年以来首次出现年度下滑,但是火电比例仍然居高不下,尤其是在东部经济发达地区,越来越多的火电厂的建设给很多工业化程度比较高的地区带来酸雨,造成建筑物和植被破坏,也给人们的身体健康和正常生活带来极大的危害。京津冀地区严重的雾霾天气,对火电等基础设施改造提出了更高的要求。

冰蓄冷空调利用夜间的廉价电来制取冰并储存起来,在白天需要冷量的时候通过一定

的换热形式把冰中的冷量置换出来,用于降温。它的广泛应用具有利国利民的重要意义。从空调用户的角度来看,由于可以充分利用夜间便宜的电力,从而大大降低了空调系统的运行费用。从电网公司的角度来看,可以把白天高峰时段的电力需求大量转移到夜间低谷时段,实现电网削峰填谷,平衡峰谷用电矛盾,从宏观上大大降低了峰谷用电差带来的能源损失。蓄冷系统与常规系统的能耗比较如图0-2所示。

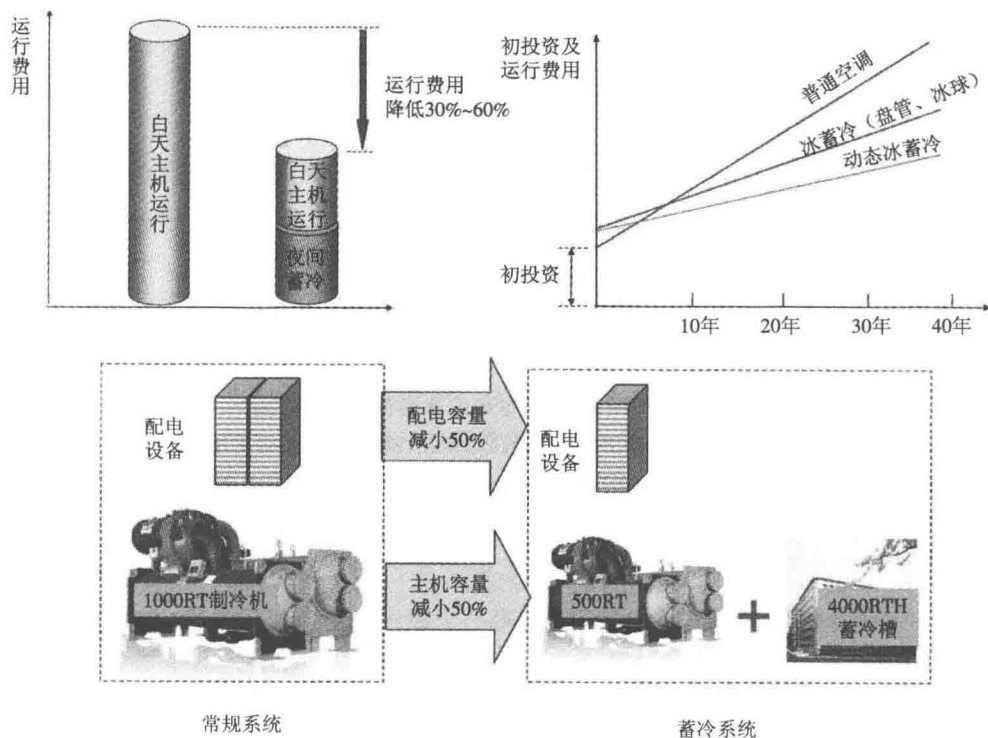


图0-2 蓄冷系统与常规系统的能耗比较

冰蓄冷空调的优点如下。

(1) 在夜间利用电能制冰储存冷量,白天转移出来利用,替换开启空调所耗的电,达到错峰用电,降低电网负荷。

(2) 冰蓄冷空调相对于常规的空调系统,其制冷容量和辅助设备小,可以减少设备的投资,在运行的时候比较节能,维护也比较简单。

(3) 冰蓄冷空调是利用夜间的廉价电力来储存冷量的,在白天电价高的时候释放冷量,大大缩减了用户的用电费用。

(4) 蓄冰系统的制冷主机在蓄冰过程中满负荷、高效率地运转,而主机在部分负荷运行下的效率比较低。

(5) 可以提供低温的冷冻水,采用冰浆可以提高温差,并通过配合低温送风来减少冷冻水的流量,进而减小泵的能耗、风机盘管的选型值以及管道和送风管道的大小。

(6) 在断电的时候可以利用小功率的发电机把蓄冰槽中冰的冷量带出,满足室内降温的需求。

(7)节能环保,减少能源消耗,有利于生态平衡。

冰蓄冷技术是利用夜间相对廉价的电力制取冰并储存起来,在白天用电高峰的时候把冷量转移出来使用,这样晚上用电多、白天用电少,与普通空调的用电负荷刚好相反,这对缓解电网负荷贡献很大。近些年来,许多学者都在对冰蓄冷技术进行研究,并取得了一定的成就。冰蓄冷技术主要包括静态制冰和动态制冰,前者制取的冰为固态冰,在制取的过程中,冰层之间存在的热阻很大,影响冰的生成,在放冷时,这些热阻又阻碍换热的进行,换热效率较低;后者制取的冰是动态冰,采取流动循环制取,不存在冰层影响换热,制取的冰晶可以跟随溶液一起流动,性能明显强于前者。目前,在用电量大的城市,为了替换传统的锅炉房和冷冻站,许多电厂采取热—电—冷三联产,在夏天高温时对用户集中供冷,这种集中供冷方式不仅能够减缓电网的峰谷差,而且采用的蓄冷介质——冰也是无污染的,系统效率比较高,并且机房的占地面积也能得到大幅度的减小。不过采取集中供冷技术要求电厂管网的初投资比较大,相比水蓄冷所增加的水泵耗能也比较大。对于常规的冷冻水供冷,工程上用的供水温度一般为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,回水温度为 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度比较高,所携带的冷量不是很高,相比供水温度可以低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰浆来说,能量的输送率低,传输的冷量相对也不是很高,用冰浆代替冷冻水可以使管网的输送能力大大增加,能耗也能相应降低很多。含冰率(Ice Percent Factor, *IPF*)为 $5\text{wt}\% \sim 30\text{wt}\%$ 的动态冰浆,其传热系数为 $3\text{ kW}/\text{m}^2$,是相同条件下常规冷冻水冷却能力的 $5 \sim 6$ 倍。

动态冰浆系统和其他的冰蓄冷系统相比,有其独特的地方:

(1)可以连续不断地制取冰浆,不需要融冰和除霜过程,换热效率高;

(2)动态冰浆冰晶粒子小且多,能与被冷却物良好接触,对比块状冰与物体换热一般存在许多空气间隙而影响换热,在融冰时也会由于冰层间的热阻使融冰速率缓慢等缺点,动态冰浆的热阻小、融冰迅速,能够满足多变的冷负荷需求;

(3)动态冰浆的供冷能力和蓄冷能力都比常规的冰强,冰浆温度低,在换热器中与换冷介质的温差大,利于冷量的传递;

(4)流动性好,作为载冷剂介质取代冷冻水可以节省能耗,减小管道尺寸。

由此可见,动态冰浆技术是目前蓄冷领域的最新技术之一,并且对大力发展动态冰浆蓄冷系统、积极推广新型动态冰浆蓄冷空调技术以及我国的能源、经济和环境的协调发展具有十分重要的意义。

0.3.2 蓄冷技术

1. 蓄冷系统的分类

蓄冷技术在制冷空调领域的应用前景非常广泛,蓄冷系统包括水蓄冷系统、冰蓄冷系统、共晶盐蓄冷系统和气体水合物蓄冷系统。水蓄冷的方式有分层式、迷宫式以及复合蓄冷槽。冰蓄冷系统分为静态冰蓄冷和动态冰蓄冷,冰晶式和冰片滑落式冰蓄冷为动态制冰;内融冰、外融冰、冰球、冰板和芯心冰球蓄冷统称为静态制冰。具体的分类情况如图0-3所示。

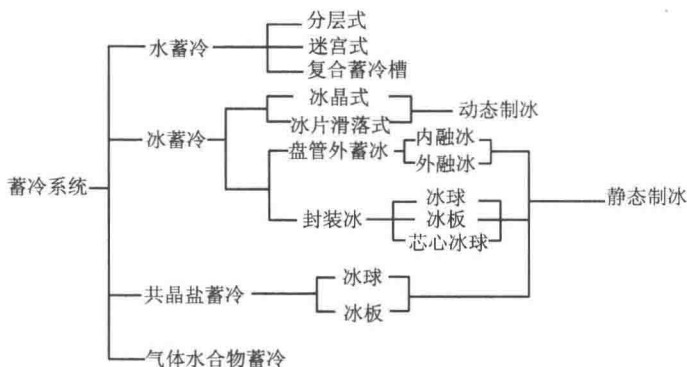


图 0-3 蓄冷系统的分类

1) 水蓄冷

水蓄冷是利用 $3 \sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温水进行蓄冷,但由于水的蓄能密度比较低,因此只能利用水的显热来储存冷量。在水蓄冷系统中,通过尽量保证供水和回水的温差来获得最大的蓄冷效率,并且在设计过程中也应该尽量避免冷热水的混合,为了达到这个效果,水蓄冷水箱的结构设计目前常用的有�蓄水罐式、迷宫式、自然分层式以及隔板式等。

2) 冰蓄冷

冰蓄冷,顾名思义是以冰为蓄冷介质,是利用蓄冷介质——冰的潜热实现冷量的储存,按照制冰的方式分为静态制冰和动态制冰。在蓄冷过程中,蓄冷介质从液态的水溶液凝固成固态的冰或者冰浆,在发生相变的过程中温度不发生变化,储存一定的相变潜热,纯水的相变潜热为 335 kJ/kg ,为了使蓄冷槽中的溶液结冰,冰蓄冷系统的制冷机必须提供 $-3 \sim -9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的制冷剂载体,或者直接用溶液与制冷剂进行冷交换,在工程中为了使蓄冷介质储存更大的冷量,通常加入一些冰点抑制剂来使溶液的冰点降低,在更低的温度下保持液态。常用的冰点抑制剂有乙醇、乙二醇水溶液及氯化钠。

3) 共晶盐蓄冷

共晶盐蓄冷是利用蓄冷介质的潜热来实现冷量的储存,在需要冷量的时候释放出来。共晶盐属于相变材料,非恒温过程相变温度高、潜热大、导热系数高、比重大、无毒、无腐蚀,并且共晶盐溶液的浓度以及成分都是可以调配的,这样可以使溶液的冰点不一样。在实际工程应用时,常用的共晶盐蓄冷材料有水、无机盐、成核剂以及稳定剂。常规的蓄冷介质的相变温度为 $5 \sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$,潜热值为 95 kJ/kg 。

4) 气体水合物蓄冷

气体水合物蓄冷,俗称“暖冰”,气体水合物的相变潜热与冰相当,相变温度在 $5 \sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对于冰蓄冷的效率低、水蓄冷的密度小、共晶盐蓄冷的换热效率低以及易老化失效等缺点,气体水合物具有与常规空调兼容性好、蓄冷密度以及效率高等优点,故被许多学者认为是理想的新一代蓄冷工质。

几种蓄冷技术性能的比较见表 0-2。

表 0-2 几种蓄冷技术性能的比较

蓄冷技术	水蓄冷	冰蓄冷	吸附蓄冷
蓄冷方式	显热蓄冷	显热 + 潜热	汽化潜热
相变温度/℃	—	0	设计温度(可调)
温度变化范围/℃	12→7	12(水)→0(冰)	-12→+10
单位质量蓄冷量/(kJ/kg)	20.9	384	1 262
每 10 ⁶ kJ 冷量所需蓄冷介质体积/m ³	47.8	2.81	1.16

2. 相变蓄冷材料

相变蓄冷材料(Phase Change Materials, PCMs), 利用材料的相变潜热来实现冷量储存和利用。一般的蓄冷材料在多次相变后, 物化性会有所改变, 使得蓄冷效果下降, 要想达到最理想的相变材料, 应该具备以下性质。

1) 对热力学性质的要求

(1) 具有较高的相变潜热。相变潜热大的材料, 在储存相当的冷量时所需的材料少, 有效地减小了蓄冷设备的体积。

(2) 具有合适的相变温度。对空调系统蓄冷, 制冷主机在空调工况下高效运行的理想相变温度为 5~8℃; 对工业蓄冷, 则需要视需要冷却的介质类型, 选择不同的冷源(不发生腐蚀、无刺激性气味等), 并且选择作为冷源的相变材料能够保证系统的高效运行。

(3) 相变过程体积变化小。体积变化小可以使盛装容器结构简单。

(4) 具有优良的热物性。高密度可以使盛装容器减小; 高比热可以提高额外的显热效果; 高热导率可以使储、放冷量时蓄冷材料内的温度梯度变小。

2) 对相变动力学特性的要求

(1) 凝固时无过冷或者过冷度小。相变材料应在其热力学凝固点(冰点)结晶, 可通过高的晶体成核速度及生长速率实现, 因此有时会加入成核剂或“冷指”(Cold Finger)来快速成核, 抑制过冷现象。

(2) 材料完全熔化, 不易发生相分离。材料应完全熔化, 这样液相和固相在组成上完全相同, 不会出现分层现象, 否则会因液体与固体的密度差异发生分离, 使材料的化学组成改变, 这样在经过多次相变后, 相变材料会失效。

3) 化学标准

化学稳定性好; 不会发生分解, 使用寿命长; 对结构材料没有腐蚀性, 兼容性好; 不易燃烧, 具有不爆炸性、无毒性、环境友好性。

4) 对经济性的要求

来源广泛, 价格低廉, 储量丰富, 易于大规模制备, 可以降低蓄冷成本。

这些因素对相变蓄冷材料的应用、推广、参考非常重要, 因为在现实中, 要找到一种能同时满足以上要求的相变材料几乎是不可能的。在实际应用中, 人们往往根据所需冷源的要求, 选择一种具有较大相变潜热的相变材料, 再通过其他的手段改善其热物性。

0.4 食品保鲜

冰浆可以在食品加工、贮藏、运输以及销售等多个环节中应用。蔬菜和鱼类的快速降温、加工、贮藏、销售及分配,也是冰浆应用的一个重要领域。表 0-3 给出了冰浆与传统冰的性能比较。

表 0-3 冰浆与传统冰的性能比较

冰种	微粒冰 (slurry ice)	薄片冰 (flake ice)	壳状冰 (shell ice)	碎冰 (crushed block ice)	平板冰 (plate ice)	管冰(tube ice)
相关比较						
冰特性						
形状及尺寸	直径 0.2~0.8 mm	厚 2~3 mm, 宽 10~20 mm	厚 2~20 mm	不定	厚 8~15 mm, 宽 30~50 mm	直径 50 mm, 长 10~12 mm
密度	约 700 kg/m ³	430~450 kg/m ³	—	660~710 kg/m ³	550~590 kg/m ³	500~620 kg/m ³
表面积	约 15 940 m ² /t	约 1 741 m ² /t	约 1 132 m ² /t	—	约 696 m ² /t	约 435 m ² /t
过冷度	小	大	大	—	大	小
流动性	可	可	不可	不可	不可	不可
制冰设施						
投资	低	中	高	高	高	高
单位制冰体积	非常小	大	小	—	大	—
设置	灵活	需在冰罐之上	用冰附近	用冰附近	用冰附近	用冰附近
保鲜上的应用						
清洁度	好	好	易污染	易污染	易污染	易污染
输送性	用泵或输送带等	用泵或输送带等	输送带	输送带	输送带	输送带
冷却效果	最快	好	一般	好	一般	差
保鲜、冷藏及 储运条件	对海鲜产品接 触密封性好	有空气间隙	有空气间隙	有空气间隙	有空气间隙	有空气间隙

0.5 冰浆的概念

冰浆是一种由水、冰晶粒子以及冰点抑制剂(乙醇、氯化钠、乙二醇等)组成的固液两相混合物溶液,有的文献中称之为“冰晶”“冰泥”。如图 0-4 所示,动态冰浆为一种絮状固液混合溶液。在图 0-5 中,冰浆在低倍显微镜下呈现球形或盘形悬浮游离状的冰晶粒子。冰晶粒子的直径一般为几十微米到几百微米,具有不错的流动性,在一般情况下可以采用类似给水泵的冰浆泵进行输送,也正因为它的这种特性,业内人士给了它“可泵送冰”的称号。

冰浆的主要特征表现在冰浆溶液中含有细小的冰晶,典型尺寸约为0.2 mm。

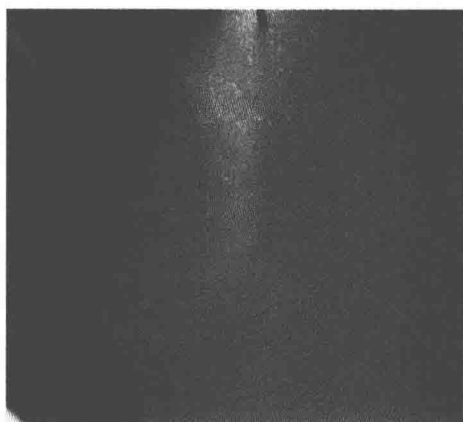


图0-4 冰浆实物图

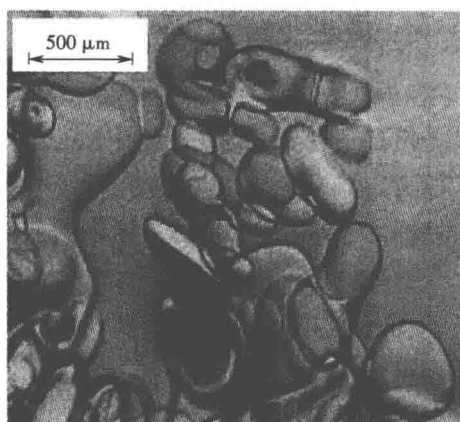


图0-5 低倍显微镜下的冰浆

动态冰浆作为蓄冷技术中的一种新型蓄冷介质,有以下几个特点。

(1)动态冰浆是冰晶粒子与水混合的固液两相溶液,具有可观的相变潜热和低温显热。它主要是通过混合物中的冰晶粒子瞬间相变释放出大量的融化潜热(冰的溶解潜热约为335 kJ/kg),流体的单位体积热容量也会随之提高,这样能够更加快速地响应冷负荷的变化,如含冰率(IPF)为5 wt% ~ 30 wt%的动态冰浆,其传热系数为3 kW/m²,比相同条件下常规冷冻水冷却能力高4~5倍。

(2)考虑动态冰浆的特性,需要对它的传输特性进行分析研究。许多学者通过实验与模拟对冰浆的传热进行了综合分析,将冰浆在蓄冷空调设计及区域供冷设计中的应用与普通制冷机组制取的冷水进行比较,指出在传热方面,由于其不同于水的相变特性,会在相变瞬间释放出大量的冷量,比同等条件下冷水的冷储存能量大很多,而且它可以及时对需冷空间的冷负荷做出响应,迅速供冷。虽然动态冰浆是固液两相混合物,但如果其固液比例控制合理,它就可以像液态水一样在储冰罐内进行储存或者在管内进行传输。更加值得一提的是,由于冰浆的蓄冷密度比常规的水蓄冷大许多,将其应用在供冷方面可以减小送、回冰浆管径的尺寸,也可以适当减小泵和换热器的尺寸以及选型。制取的动态冰浆一般对环境无污染、安全性高,并且制取过程中充分利用了夜间相对廉价的电力,对电力系统的削峰填谷、节约电费起着很重要的作用。通过改变动态冰浆的含冰率或者添加冰点抑制剂,可以将其应用到不同领域。在含冰率为20%~25%时,动态冰浆的流动阻力和水差不多,但是含冷量是相同条件下冷冻水的好几倍;在含冰率为40%~50%时,流动阻力开始增加,冰浆呈现黏稠状;若达到65%~75%,动态冰浆就相当于快要融化的冰激凌;当含冰率达到100%时,即全冰粒子时,动态冰浆就成了冰晶,可以直接用在任何产品中。

参考文献

- [1] 谭恢曾. 燃煤发电与酸雨[J]. 湖南电力, 2003, 23(3): 60-62.