

Energy Storage Air Conditioning Technology

方贵银 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

蓄能空调技术

第2版

方贵银 等编著



机械工业出版社

本书系统地阐述了蓄能空调系统的工作原理,详细地介绍了相变蓄能材料的种类及性能、相变蓄能材料的合成及蓄能特性、蓄能空调系统与设备、蓄冷空调系统的设计及控制、蓄冷空调系统的动态性能及测试、蓄热系统与设备。此次修订新增了相变蓄能材料的合成及特性、蓄冷球堆积床蓄冷空调系统、盘管式蓄冷空调系统、分离式热管蓄冷空调系统、太阳能堆积床蓄热系统、太阳能光伏光热蓄热系统、热管蓄热系统等内容。本书取材新颖,内容丰富,层次清晰,便于读者学习与掌握。

本书可供制冷空调、能源动力、电力工程、建筑等领域的工程技术人员使用,也可供相关专业的在校师生及研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

蓄能空调技术/方贵银等编著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2018. 6
ISBN 978-7-111-60089-3

I. ①蓄… II. ①方… III. ①蓄能器—应用—空气调节系统 IV. ①TU831.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第115601号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:陈保华 责任编辑:陈保华 王海霞

责任校对:郑婕 封面设计:陈沛

责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018年8月第2版第1次印刷

184mm×260mm·29.5印张·806千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-60089-3

定价:79.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

策划编辑:010-88379734

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着风能、太阳能等可再生能源和智能电网技术的快速发展,蓄能技术已成为人们关注的一个热门领域。“十三五”期间,我国将推动能源发展与变革,以可再生能源逐步替代化石能源,建立可持续发展的清洁能源系统,在此过程中,离不开起关键作用的蓄能技术。

在日常生活和生产实践中,在不同的时间能量的供应和需求常常出现不平衡,为了高效地利用能量,需要设置蓄能系统或装置。从能源供应方面来看,在均衡负荷、补偿负荷变动及稳定能源系统方面,需要使用蓄能装置。从用能方面或需求方面来看,为了有效地利用能源,特别是特定时间内的廉价能源,也需要使用蓄能装置。蓄能是通过物理或化学的方法将电、热等形式的能量储存起来,在需要用能时再将其释放出来。根据蓄能方式和工作原理的不同,可分为机械能蓄存、电磁能蓄存、化学能蓄存和热能蓄存。其中热能蓄存涉及面较广,如太阳能热利用、余热回收利用、建筑蓄能(包括墙体、地板、吊顶等)、制冷空调系统(蓄冷、蓄热)等。

2006年我们编写出版了《蓄能空调技术》,该书深受读者欢迎。但近年来,随着蓄能技术的发展和进步,涌现出一些新的蓄能技术和研究成果,为了让工程技术人员和相关专业的大专院校学生及时了解和掌握一些新的蓄能技术,特对《蓄能空调技术》进行修订,出版第2版。根据读者反馈和需求,第2版新增了相变蓄能材料的合成及蓄能特性、蓄冷球堆积床蓄冷空调系统、盘管式蓄冷空调系统、分离式热管蓄冷空调系统、太阳能堆积床蓄热系统、太阳能光伏光热蓄热系统、热管蓄热系统等内容,同时删去了我国能源发展现状与趋势、蓄冷空调系统辅助设备确定、地源热泵空调等内容。

参加修订的人员有方贵银、李辉、张诵华、李平、许春宁、罗四银、李晓晶,研究生张曼、吴双茂、刘旭、陈智、单锋、曹磊、唐方、唐耀杰、苏棣、刘凌焜、黄香、林雅雪、贾雨婷等也参与了修订工作。在修订过程中,参阅和引用了一些文献资料,在此一并向相关作者表示感谢。

限于编著者的水平,书中难免有缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编著者

目 录

前 言

第一章 蓄能技术概述 1

第一节 蓄能技术的类型 1

- 一、机械能蓄存 1
- 二、电磁能蓄存 2
- 三、化学能蓄存 3
- 四、热能蓄存 3

第二节 相变蓄能技术的发展现状与趋势 6

- 一、相变蓄能技术的发展现状 6
- 二、相变蓄能技术的发展趋势 11

第二章 相变蓄能材料的种类及性能 16

第一节 相变蓄能材料的选择要求 16

- 一、热力学方面的要求 16
- 二、相变动力学方面的要求 17
- 三、化学性质方面的要求 17
- 四、经济性方面的要求 17

第二节 相变蓄能材料的相平衡 17

- 一、相律 17
- 二、相图中的有关理论 19
- 三、相平衡特性 19
- 四、水合盐相图分析 21

第三节 相变蓄能材料的结晶动力学特性 25

- 一、结晶机理 25
- 二、晶核的形成和成长过程 26
- 三、影响晶核的形成率和成长率的因素 28

第四节 相变蓄能材料的性能测试 29

- 一、相变温度、比热容、相变潜热测试 29
- 二、热导率和膨胀系数测试 35

第五节 相变蓄能材料的种类及性能 36

- 一、显热蓄能材料的种类及性能 37
- 二、潜热蓄能材料的种类及性能 39
- 三、化学反应热蓄能材料的种类及性能 55

第三章 相变蓄能材料的合成及

蓄能特性 58

第一节 相变蓄能材料的合成方法 58

- 一、基体与相变蓄能材料共混法 58
- 二、微胶囊封装法 59
- 三、化学合成法 60

第二节 复合相变蓄能材料的合成及蓄能特性 60

- 一、十八烷/分子筛复合相变蓄能材料 60
- 二、月桂酸/活性炭复合相变蓄能材料 63
- 三、月桂酸-硬脂酸/纤维素复合相变蓄能材料 66
- 四、硬脂酸/二氧化钛复合相变蓄能材料 70
- 五、癸酸-棕榈酸/硅藻土复合相变蓄能材料 74
- 六、肉豆蔻酸-硬脂酸/碳纳米管复合相变蓄能材料 78
- 七、肉豆蔻酸/高密度聚乙烯/纳米石墨粉/纳米氧化铝复合相变蓄能材料 82
- 八、软脂酸/高密度聚乙烯/石墨烯复合相变蓄能材料 88
- 九、十八醇/高密度聚乙烯/膨胀石墨复合相变蓄能材料 94

第三节 微胶囊相变蓄能材料的合成及蓄能特性 100

- 一、复凝聚法制备微胶囊相变蓄能材料 100
- 二、原位聚合法制备微胶囊相变蓄能材料 104
- 三、溶胶凝胶法制备微胶囊相变蓄能材料 107
- 四、相变微胶囊溶液的换热特性 124

第四章 蓄冷空调系统与设备 135

第一节 蓄冷空调系统的工作原理 135

- 一、蓄冷空调系统分类 135

二、蓄冷空调系统的运行策略及 工作模式	141	二、设计实例一	283
三、蓄冷空调系统的工作流程	148	三、设计实例二	287
四、蓄冷空调系统的控制策略	149	第六章 蓄冷空调系统的动态性能及 测试	294
第二节 蓄冷空调系统的构成	153	第一节 水蓄冷空调系统	294
一、水蓄冷空调系统	153	一、水蓄冷自然分层动态性能	294
二、冰蓄冷空调系统	166	二、水蓄冷系统动态性能模拟	296
三、共晶盐蓄冷空调系统	185	第二节 冰蓄冷空调系统	302
四、小型蓄冷空调系统	188	一、盘管式冰蓄冷系统	302
五、冰蓄冷低温送风空调系统	193	二、封装式冰蓄冷系统	307
第三节 蓄冷空调冷水机组的 类型及性能	203	三、动态冰蓄冷系统	321
一、活塞式冷水机组	203	第三节 蓄冷球堆积床蓄冷空调系统	326
二、螺杆式冷水机组	205	一、蓄冷球堆积床蓄冷空调系统 动态性能	326
三、离心式冷水机组	215	二、蓄冷球堆积床蓄冷空调系统 试验性能	342
四、涡旋式冷水机组	216	第四节 盘管式蓄冷空调系统	346
第四节 蓄冷设备的种类及性能	218	一、盘管式蓄冷空调系统动态 特性模型	347
一、盘管式蓄冷设备	218	二、盘管式蓄冷空调系统蓄冷特性	348
二、封装式蓄冷设备	228	三、盘管式蓄冷空调系统放冷特性	352
三、冰片滑落式蓄冷设备	236	第五节 分离式热管蓄冷空调 系统	355
四、冰晶式蓄冷设备	238	一、分离式热管蓄冷空调系统 蓄冷特性	356
第五章 蓄冷空调系统的设计及控制	242	二、分离式热管蓄冷空调系统 放冷特性	364
第一节 蓄冷空调系统冷 负荷的确定	242	三、分离式热管蓄冷空调系统 试验性能	367
一、近似估算法	242	第六节 其他相变蓄冷系统	375
二、动态计算法	244	一、蓄冷系统数学模型建立	376
第二节 蓄冷空调系统制冷机组的 确定	263	二、结果与分析	376
一、蓄冷空调用制冷机组的选择	263	第七节 蓄冷空调系统性能测试	379
二、蓄冷空调用制冷机组容量的确定	264	一、水蓄冷系统性能测试	379
第三节 蓄冷设备的确定	266	二、蓄冷空调多功能试验装置	380
一、运行策略选择和流程配置	266	三、蓄冷空调系统的测试和评价	385
二、蓄冷设备容量确定	270	第七章 蓄热系统与设备	391
三、蓄冷槽体积及蓄冷空调系统配电 容量计算	271	第一节 热泵蓄热系统	391
第四节 蓄冷空调系统的自动控制	272	一、工作原理	391
一、自动控制系统组成	272	二、热泵蓄热材料	391
二、制冷机组控制	272	三、热泵蓄热容量计算	392
三、蓄冷装置控制	273		
四、低温送风系统控制	275		
第五节 蓄冷空调系统设计实例	276		
一、蓄冷空调系统设计方法	276		

第二节 相变蓄热器	394	二、太阳能堆积床蓄热系统的 蓄热特性	409
一、相变蓄热电供暖器	394	三、太阳能堆积床蓄热系统的 放热特性	413
二、相变蓄热电热水器	394	第六节 太阳能光伏光热蓄热系统 ...	416
第三节 蓄热式电锅炉	395	一、不同工质的光伏光热蓄热 (PV/T) 系统	416
一、蓄热式电锅炉的蓄热方式	395	二、太阳能光伏光热蓄热系统的 动态特性	436
二、蓄热式电锅炉的工作原理及蓄热 供热系统	396	第七节 热管蓄热系统	453
三、蓄热式电锅炉容量选择与匹配	398	一、热管蓄热系统的工作过程	453
第四节 相变蓄能建筑系统	399	二、热管蓄热系统的动态特性	455
一、相变蓄能建筑材料	400	参考文献	461
二、相变蓄能建筑结构	401		
三、相变蓄能建筑系统的性能	404		
第五节 太阳能堆积床蓄热系统	407		
一、太阳能堆积床蓄热系统数理模型	407		

第一章 蓄能技术概述

第一节 蓄能技术的类型

由于在日常生活或工业生产中,能量的产生和需求在时间上和数量上是不一致的,因此为了有效地利用能量,就必须设置一些蓄能装置。从电力供应方面来看,在均衡负荷、补偿负荷变动及稳定电力系统方面,需要使用蓄能装置。通过均衡负荷,可减少发电和输变电设备的需要量,或有效地利用发电和输变电设备。如将谷期的电能蓄存起来供峰期使用,将大大改善电力供需矛盾,提高发电设备的利用率,节约投资。

从用电方面或需求方面来看,为了有效地利用能源,特别是特定时间内的廉价能源,也需要使用蓄能装置。在用户方面可设置蓄能装置和蓄电装置。

按蓄能形态分,有储存石油、煤炭和天然气等方式,这些物质本身就是一种含能体,因此将这些含能体(或含能的物质)储存起来就能达到能量蓄存的目的。也有与此不同的方式,即进行能源转换的蓄能方式。采用能源转换的蓄能方式,可把要蓄存的能源转化为机械能、电磁能、化学能和热能等。为此而开发的技术已有蓄存显热和潜热能的蓄热(冷)技术,使用蓄电池的化学蓄能技术,使用电容器和超导线圈的电磁蓄能技术,抽水蓄能、压缩空气蓄能及飞轮蓄能等机械能蓄存技术。

一、机械能蓄存

(一) 飞轮蓄能

飞轮蓄能是机械蓄能的一种方式,它将电能转化成可蓄存的动能或势能。当电网电量富裕时,飞轮蓄能系统通过电动机拖动飞轮加速以动能的形式蓄存电能;当电网需要电量时,飞轮减速并拖动发电机发电以放出电能。飞轮转子选用比强度(抗拉强度/密度)较高的碳素纤维材料制造,运行于密闭的真空系统中。系统中的高温超导磁悬浮轴承是利用永磁铁的磁通被超导体阻挡所产生的排斥力,使飞轮处于悬浮状态的原理制造的。

在风力-柴油系统中,飞轮蓄能装置是较理想的辅助支撑能源装置。随着风力发电技术的成熟和推广应用,风力发电机组+内燃机组+飞轮蓄能系统的组合装置将承担局部冲击负荷和起调峰作用。

欧洲已有 $215\text{MW}\cdot\text{h}$ 的飞轮蓄能装置;日本飞轮公司已将飞轮蓄能装置进行商品化生产,设计了蓄能 $8\text{MW}\cdot\text{h}$ 的飞轮蓄能装置;美国于1994年研制了飞轮直径为 3.81m 、质量为 11.35kg 、极限蓄能容量为 $2\sim 5\text{kW}\cdot\text{h}$ 的高温超导飞轮蓄能装置,并于1997年研制了 $1\text{MW}\cdot\text{h}$ 、飞轮质量为 19kg 的系统试验装置。

(二) 抽水蓄能

抽水蓄能是利用电力系统负荷低谷时的剩余电量,由抽水蓄能机组以水泵工况运行,将下水库的水抽至上水库,即将不可蓄存的电能转化成可蓄存的水的势能,并蓄存于上水库中的。当电网出现峰荷时,由抽水蓄能机组以水轮机工况运行,将上水库的水用于水力发电,满足系统调峰需要。其能量转换效率为 $60\%\sim 70\%$ 。

抽水蓄能的优点是运行方式灵活,起动时间较短,增减负荷速度快,运行成本低。其缺点是

初期投资较大,工期长,建设工程量大,远离负荷中心,需要额外的输变电设备以及一定的地质和水文条件。

我国已建造了天荒坪抽水蓄能电站、十三陵抽水蓄能电站、广州抽水蓄能电站、台湾日月潭抽水蓄能电站等抽水蓄能电站。

(三) 压缩空气蓄能

压缩空气蓄能利用电力系统负荷低谷时的剩余电量,由电动机带动空气压缩机,将空气压入作为储气室的密闭大容量地下洞穴,即将不可蓄存的电能转化成可蓄存的压缩空气的气压势能,并蓄存于储气室中。当系统发电量不足时,将压缩空气经换热器与油或天然气混合燃烧,导入燃气轮机做功发电,满足系统调峰需要。其能量转化规律为: $0.8\text{kW}\cdot\text{h}$ 的低谷电 + 3794kJ 的天然气能提供 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 的高峰电,能量转换效率为 $65\%\sim 75\%$ 。

压缩空气蓄能的优点是运行方式灵活,起动时间短,污染物排放量、运行成本均只有同容量燃气轮机的 $1/3$;可在短时间内以模块化方式建成;投资相对较少,单位蓄能发电容量的投资费用为抽水蓄能电站的一半;特别适合缺乏自然条件建造抽水蓄能电站的电网蓄能。其缺点是远离负荷中心,需要一定的地质条件。

德国于1978年利用2个地下岩盐层的空洞作为储气室,进行压缩空气蓄能。洞室容积各为 15万 m^3 ,储气压力最高为 761MPa ,额定容量为 $290\text{MW}\cdot\text{h}$,有 4h 的发电能力。该系统运行至今,可用率为 90% 。

二、电磁能蓄存

(一) 电容器蓄能

电容器蓄能也是蓄存能量的一种方式。电容器是储存电荷的“容器”,其储存的正、负电荷等量地分布于两块中间隔以电介质的导体板上。同电池等蓄能元件相比,电容器可以瞬时充放电,并且充放电电流基本上不受限制,可以为熔焊机、闪光灯等设备提供大功率的瞬时脉冲电流。

韩国 NESS 公司生产了一种名为 Ultra Capacitor 双层电解电容器的能量蓄存装置。在充电时,通过电解液将电荷蓄存在两端的电极表层上。电容器中的电解液并不发生化学反应,产生的是物理变化。使用时,充放电的速率很稳定。相对于传统的电解电容器来说,其电极使用多孔性的活性炭,活性炭粒子拥有相当大的表面积,可以吸附更多的电荷,保存更多的能量,是一种高容量型电解电容。它在释放能量时,比利用化学反应的电容器更快,电量更多,也更稳定。

(二) 超导电磁蓄能

超导电磁蓄能是将超导体材料制成超导螺旋管,通过功率调节器,将低谷电转化成直流电,以磁场的形式蓄存于超导螺旋管中。当系统负荷超过可供电量时,通过功率调节器的逆向输送,将蓄存于超导螺旋管中的磁场能转换成交流电,以补充电网电力。

其优点是不经过其他形式的能量转换,可长期无损耗地蓄存能量,蓄能效率可达 $92\%\sim 95\%$;蓄能密度可达 $40\text{MJ}/\text{m}^3$;单位蓄能量的成本低;不受地形限制,占地面积小;反应速度快,操作和维护方便。其缺点是初期投资大;冷却技术较复杂;强磁场对环境可能有影响。

研究表明: $0.1\text{MW}\cdot\text{h}$ 等级的小型超导蓄能装置主要用于改善电网稳定性,小波动负载调平,电压波动调平,间断型电源调平输出; $10\text{MW}\cdot\text{h}$ 等级的中型超导蓄能装置主要用于负载调平后减少传输容量和小电站建设,大波动负载调平,电压波动调平,减少无功功率调节,减少频率调节装置和瞬时备用功率,改善电源可靠性,防止中间连接功率波动等; $1\text{GW}\cdot\text{h}$ 等级的大型超导蓄能装置,除了具有中型装置的功能外,还具有负载调平后减少峰值电源装置、减少传输损失、改善发电设备的热效率等功能。

目前,美国、日本在研制 $5000 \sim 5500 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 的地下式超导蓄能装置,效率约为 91%。

三、化学能蓄存

(一) 化学燃料蓄能

化学燃料,如煤、石油、天然气以及由它们加工而获得的各种燃料油、煤气等,其本身就是一种含能体,因此,将这些含能体储存起来就能达到能量蓄存的目的。这种蓄能方式相对简单,以至常常被人们忽略,例如,汽车的油箱,飞机和飞行器的燃料储存箱,燃煤电厂的堆煤场,以及天然气储气罐等,都是化学燃料蓄能的常见例子。

(二) 电化学蓄能

电池是一个电化学系统。电池在工作时,化学能转化为电能。电池一般分为原电池(一次电池)、蓄电池(二次电池)和燃料电池。原电池经过连续放电或间歇放电后,不能用充电的方法将两极的活性物质恢复到初始状态,即反应是不可逆的。蓄电池在放电时,通过化学反应可以产生电能,而充电(通以反向电流)时则可使体系恢复到原来的状态,即将电能以化学能的形式重新蓄存起来,从而实现电池两极的可逆充放电反应。燃料电池又称为连续电池,与其他电池相比,其最大的特点是正负极本身不包含活性物质,活性物质被连续地注入电池,就能够使电池源源不断地产生电能。

1. 蓄电池蓄能

高效电池蓄能系统由电池、直-交逆变器、控制系统、安全和环保等辅助设备所组成。为得到较大的蓄能效果,需按“单电池→组合电池→电池群→发电单元”的程序组合。新型蓄能电池主要有硫化钠电池、氧化还原硫电池、氯化锌电池、溴化锌电池和过锌铁氰化物电池等。

其优点是蓄存效率高。日本研制的 $100 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 新型钠硫电池系统的充放电效率可达 90% 以上,负荷响应快,无振动、噪声,符合环保要求,可作为太阳能和风能发电的补充电源,可设计成安装在用户配电侧的用户电池蓄能装置。

2. 燃料电池蓄能

燃料电池是一种新型发电技术,它不同于普通的干电池。燃料电池实际上是进行电化学反应的反应器,不储存燃料和氧化剂。燃料电池的种类很多,目前世界上较流行的是质子交换膜电池,其核心是三合一电极,它由两块涂有催化剂的电极和夹在中间的质子交换膜压合而成。

质子交换膜既有质子交换的功能,又有隔离燃料气体和氧化剂的作用。当作为燃料的氢气被通入“氢”电极时,在催化剂的作用下,氢分子分解成电子和质子。质子穿过质子交换膜到达“氧”电极,在催化剂的作用下与空气中的氧气发生反应产生水。电子通过外电路产生电流,对外供电。

由于氢气的制造、储存技术已相当成熟,燃料电池的转化效率又相当高,故燃料电池可作为一种有效的蓄能手段。在热电联供情况下,燃料电池的燃料总利用率可达 80%。可根据需要进行串联、并联,且能量转化效率基本不变,可在几秒钟内从最低负荷升至最高负荷,并可短时间过载运行,污染物排放很少。

四、热能蓄存

热能是最普遍的能量形式,热能蓄存就是把一个时期内暂时不需要的多余的热量通过某种方式收集并蓄存起来,等到需要时再提取使用的一种蓄能形式。

热能蓄存的方法可分为显热蓄存、潜热蓄存和化学反应热蓄存三大类型。

(一) 显热蓄存

显热蓄存通过蓄热材料温度升高来达到蓄热的目的。蓄热材料的比热容越大,密度越大,所蓄存的热量就越多。太阳能采暖系统中必须配备蓄热装置。对于采用空气作为吸热介质的太阳能

采暖系统,通常选用岩石床作为热能蓄存装置中的蓄热材料;对采用水作为吸热介质的太阳能采暖系统,则选用水作为蓄热材料。

1. 蒸汽蓄能

在外界低负荷时,将多余的中压(4.8MPa左右)蒸汽导入蓄热器蓄存。当外界需要负荷时,再将蓄热器中的蒸汽补充给汽轮机组发电,从而保证电厂锅炉、汽轮机以最佳参数运行,起到调峰机组的作用。以地下式蓄热器为例,蓄热器建造在地下岩体中,岩洞的深度应位于岩层静压力等于最大蓄热压力的1.33倍处,以保证岩洞受压后不会产生裂缝。

2. 热水蓄能

将火电或核电机组在夜间低谷时产生的部分热量,以高压热水的形式储藏起来;在白天高负荷时,利用二相流的热水透平设备和闪蒸汽轮机将储藏的热水用于发电。

运行时,将热水槽中的热水直接导入热水透平发电。热水透平的排汽导入分离装置和多级喷酒装置,并在各自的压力下减压分离,使饱和蒸汽进入闪蒸蒸汽透平做功发电,最后进入凝汽器。热水的抽出点一般应选择在火电或核电机组运行影响最小,且能稳定抽出热水的管段,如设在高压给水加热器出口处。

热水蓄能系统的输出功率由蓄热发电的热水量、热水压力、火电或核电机组的最大发电功率、储藏发电效率等决定。通过选择闪蒸蒸汽透平的级数和热水透平的形式,可以增加功率输出。

(二) 潜热蓄存

潜热蓄存是利用蓄热材料发生相变来蓄能的。由于发生相变时的潜热比显热大得多,因此潜热蓄存有更高的蓄能密度。通常潜热蓄存都是利用固体-液体相变蓄热,因此,熔化潜热、熔点是否在适应范围内、冷却时的结晶率、化学稳定性、热导率、对容器的腐蚀性、是否易燃、是否有毒、价格是否低廉,是衡量蓄热材料性能的主要指标。

液体-气体相变蓄热应用最广的蓄热材料是水,因为水有汽化潜热较大、温度适应范围较大、化学性质稳定、无毒、价廉等优点。不过水在汽化时有很大的体积变化,因此需要较大的蓄热容器。

1. 相变蓄热供暖

为了减少城市用电的峰谷差,应充分利用夜间廉价的电能加热相变材料,使其产生相变,以潜热的形式蓄存热能。白天这些相变材料再将蓄存的热能释放出来,供房间采暖。

在利用相变蓄热的采暖方式中,应用最广的是电加热蓄热式地板采暖。与传统的散热器采暖相比,其优点是舒适性好。普通散热器主要靠空气对流散热,而地板采暖主要利用地面辐射,人可同时感受到辐射和对流加热的双重效应,更加舒适,且运行费用远低于无蓄热的电热供暖方式。

另外,吸收太阳能辐射热的相变蓄热地板、利用楼板蓄热的吊顶空调系统,以及相变蓄能墙等建筑物蓄能的新方法也正在开发研究之中。

2. 蓄冷空调

所谓蓄冷空调是指在夜间电网低谷时间(同时也是空调负荷很低的时间),制冷主机开机制冷并由蓄冷设备将冷量蓄存起来,待白天电网高峰用电时间(同时也是空调负荷高峰时间),再将冷量释放出来满足高峰空调负荷的需要。这样,制冷系统的大部分耗电发生在夜间用电低谷期,而在白天用电高峰期只有辅助设备在运行,从而实现了用电负荷的“移峰填谷。”

目前,在蓄冷空调中主要采用水蓄冷和冰蓄冷。对共晶盐蓄冷和气体水合物蓄冷,国内外也都进行过一些研究。

水蓄冷是利用蓄水温度在 $4 \sim 7^{\circ}\text{C}$ 之间的显热进行蓄冷。它可以使用常规的制冷机组,可实现蓄冷和蓄热的双重用途。蓄冷、释冷运行时冷水温度相近,制冷机组在这两种运行工况下均能维持额定容量和效率。但水蓄冷存在蓄能密度低、蓄冷槽体积大及槽内不同温度的冷水易混合的缺点。

冰蓄冷是利用冰的相变潜热进行冷量的蓄存,具有蓄能密度大的优点。但冰蓄冷相变温度低(0°C),且蓄冰时存在较大的过冷度($4 \sim 6^{\circ}\text{C}$),使得其制冷主机的蒸发温度须低至 $-8 \sim -10^{\circ}\text{C}$,这将使制冷机组的效率降低。另外,在空调工况和蓄冰工况时,要配置双工况制冷主机,增加了系统的复杂性。

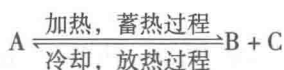
共晶盐蓄冷的优点是其相变温度与制冷主机的蒸发温度相吻合,选用一台制冷主机即可进行制冷、蓄冷工况运行。其缺点是蓄冷密度较低,相变凝固时存在过冷现象,且材料易老化变质、蓄冷性能易发生衰减。

气体水合物蓄冷是利用某些制冷剂蒸气与水作用时,能在 $5 \sim 12^{\circ}\text{C}$ 的条件下形成水合物,而且结晶相变潜热较大。其蓄冷温度与空调工况相吻合,且蓄冷、释冷时传热效率高。但该方法还存在一些问题,如制冷剂替代、制冷剂蒸气夹带水分的清除、防止水合物膨胀堵塞等。

(三) 化学反应热蓄存

化学反应蓄热是利用可逆化学反应通过热能与化学热的转换蓄热的。它在受热和受冷时可发生可逆反应,分别对外吸热或放热,这样就可把热能蓄存起来。典型的化学蓄热体系有 $\text{CaO} - \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO} - \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ 等。

例如,某化合物 A 通过一个吸热的正反应转化成高焓物质 B、C,即热能储存在物质 B、C 中;当发生可逆反应时,物质 B、C 化合成 A,热能又被重新释放出来。其蓄热和放热过程可表示为



可作为化学反应热蓄能的热分解反应很多,但要便于应用则要满足一些条件,如反应可逆性好、无明显的附带反应;正、逆反应都应足够快,以便满足对热量输入和输出的要求;反应生成物易于分离且能稳定蓄存,反应物和生成物无毒、无腐蚀性和无可燃性等。

1. 水合物系

水合物系是利用无机盐 A 的水合-脱水反应,结合水的蒸发、冷凝而构成的化学热泵。其反应式为



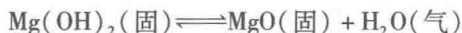
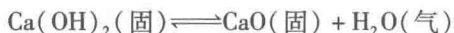
硫化钠(Na_2S)是典型的蓄热型水合物,其反应可逆性、稳定性好,且 Na_2S 产生的热量可达 1kW/kg 。其反应过程为



由于水合物是在较低温度下分解,因此适用于有效利用低温、中温的太阳能和工业余热。

2. 氢氧化物系

它利用的是碱金属、碱土金属氢氧化物的脱水-加水反应,目前大多是利用 $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{MgO}$ 的可逆化学反应。反应式为

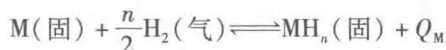


$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粉末经热分解脱水就能完成化学蓄热。当水蒸气通入填充了 CaO 粉末的绝热填充床时,即发生放热反应,出口水蒸气温度便可达到 500°C ,接近 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在一个大气压下的分解

温度。

3. 金属氢化物

当被储存的热源温度较低时,可以利用金属氢化物蓄热。某些金属或合金具有吸收氢的能力,它们在适当的温度和压力下可与氢反应生成金属氢化物,同时释放出大量热能;反之,金属氢化物在减压、加热的条件下,可发生吸热反应并释放出氢。其反应式为



式中, M 是储氢合金; MH_n 是金属氢化物。

目前,已开发的储氢合金主要有稀土镍基、钛铁基、镁基三类合金。稀土镍基合金可用于热源温度低于 100°C 的场合,钛铁基合金用于 200°C 的场合,而镁基合金则可用于 300°C 的场合。为了降低成本,改进储氢、释氢特性,通常对合金进行多元合金化,主要以 Al 、 Mn 、 Fe 、 Cr 、 Cu 、 Zr 等元素部分取代 Ni ,如 $\text{LaNi}_{4.7}\text{Al}_{0.3}$ 等。

稀土镍基储氢合金的典型代表是 LaNi_5 、 MnNi_5 。在 25°C 和 0.2MPa 压力下,其储氢量约为 1.4% 。钛铁基储氢合金的典型代表是 FeTi ,在室温下可进行可逆的储放氢操作,最大储氢量可达 2.2% 。镁基储氢合金的代表是 Mg_2Ni ,其储氢量为 3.6% ,缺点是放氢需在相对较高的温度($200\sim 300^{\circ}\text{C}$)下进行,且放氢动力学性能差。

第二节 相变蓄能技术的发展现状与趋势

一、相变蓄能技术的发展现状

(一) 相变蓄热技术的发展现状

1. 相变蓄热式太阳能热水系统

太阳能热水器可充分利用太阳能,清洁节能,使用费用低,近年来发展迅速。但太阳能热水器受气候条件影响大,阴雨天和夜间无日照时不能产生热水,必须依靠辅助热源及庞大的保温热水箱来保证热水需要。相变蓄热式太阳能热水系统利用一种高效的相变材料进行蓄热,可以减小保温热水箱的体积,并能充分利用低谷电,从而弥补了常规太阳能热水器的缺点。

图1-1所示为相变蓄热式太阳能热水系统流程的组成原理。该系统热源以太阳能为主,在日照不足的连续阴雨天和冬季则辅以电能。系统由太阳能集热器、太阳能保温热水箱、相变蓄热水箱和电热锅炉等组成,并采用变频恒压供水。

该系统的工作流程如下:利用太阳能并采用温差强制循环加热方式产生热水,并储

存在太阳能保温热水箱中。当太阳能保温热水箱内的温度不能达到设定温度时,起动循环水泵使太阳能保温热水箱同相变蓄热水箱构成循环,使太阳能保温热水箱的温度升高达到设定温度;而相变蓄热水箱的热量补充是在低谷电时运行电热锅炉辅助加热,浴室供水采用变频恒压供水系统。系统的补水直接补充到太阳能保温热水箱中。

(1) 太阳能技术 该系统选用热管真空玻璃管式集热器,由于集热器采用了热管技术,因而热效率高,同时克服了真空玻璃管式集热器易结垢、易爆管的缺点。

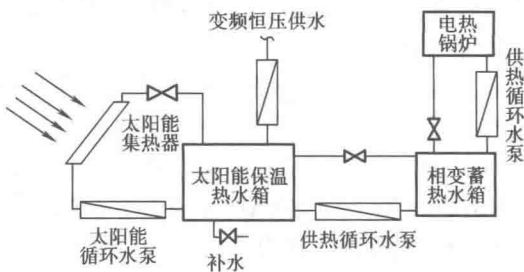


图1-1 相变蓄热式太阳能热水系统的组成原理

(2) 相变蓄热技术 为了弥补太阳能易受气候影响的缺陷,并降低运行费用,在低谷电时段运行电热锅炉蓄热。被锅炉加热的高温热水循环流过相变蓄热水箱,相变蓄热水箱内的相变材料由固态变成液态,吸收大量的热;当连续阴雨天太阳能保温热水箱的温度无法达到设定温度时,启动循环水泵,相变蓄热水箱开始放热,相变材料由液态变成固态,放出大量的热,使太阳能保温热水箱内的水温升高。

(3) 变频恒压供水技术 为了节约供水用电,该系统采用变频恒压供水。恒压供水以出水总管上的压力为信号,自动调节水泵的转速和台数,使水泵供水量与用水量平衡,使管网始终保持设定压力值,压力波动可控制在 0.2MPa 范围内。同时,控制系统设有缺水、过电流等保护功能。

2. 相变蓄热地板采暖

地板低温辐射采暖,由于利用了低温辐射方式供暖,室内水平温度分布均匀,垂直温度梯度小,符合脚暖头凉的人体生理需要,使得热舒适感较理想。另外,地板辐射采暖时的实感温度比非地板采暖时的实感温度要高 2℃ 左右,因此,其室内设计温度可比通常方式低 2℃,具有明显的节能效果。再者,地板采暖在水平面上不占用面积,不妨碍室内家具的布置和移动,而且空气对流效应小,可减少室内的尘土飞扬和扩散。由于这些优点,地板采暖越来越受到人们的青睐。目前,这种采暖方式主要有两种类型:一是利用低温热水(温度小于 60℃)作为热源,在地下预埋管道进行采暖;二是利用电能,将电热缆埋在地板下进行采暖。前者需要配套热源(一般采用户式燃油或燃气热水器)及管路布置,施工和使用均不太方便;后者由于直接使用电能,运行成本较高。地板采暖在国外应用较早,现在一种利用相变蓄热材料进行采暖的新方法正在国内外兴起。相变蓄热材料利用夜间廉价电加热,产生相变,以潜热形式蓄存热量,白天放出热量向房间供暖。相变蓄热供暖的运行费用低于无蓄热电热供暖方式,并可缓解电网峰谷差。

目前,广泛使用的相变蓄热材料是水合无机盐化合物,采用相变温度为 29℃ 的蓄热材料进行地板采暖是比较理想的。通过人体舒适感试验,当地表面温度为 24℃,1.7m 高处温度为 19℃ 时,人体的感觉是最舒适的。相变材料在蓄热和放热过程中,其潜热的吸收和释放过程是一个等温过程。用相变材料作为热源进行采暖,室内温度波动小,可以维持一个非常稳定的热环境。

相变材料采用独特的封装形式,既可用热水管,也可用电热缆进行蓄热。由于对热水的要求不高,该系统可以利用太阳能热水器、热泵以及余热等作为热源。

(1) 太阳能采暖 通过循环水泵,把白天太阳能集热器得到的热量通过热水管送给地板下的相变材料蓄存起来,供晚上使用。

(2) 电热缆采暖 把电热缆布置在相变材料封装板的中间,利用晚间的低谷电进行蓄热,供白天使用。这种方法既节约运行费用(低谷电价是一般电价的 1/4 ~ 1/3),又符合国家的用电政策。

3. 相变蓄热电暖器

直供式电暖器存在运行费用高的问题,具有蓄热功能的电暖器可利用低谷电蓄热,蓄存热量可随时供采暖使用,这不仅有利于缓解电力峰谷差,减少城市的燃煤污染,而且在实行峰谷电价分计政策的地区可节约运行费用。

(1) 相变蓄热材料 其所用的相变蓄热材料是由几种化学原料复合而成的一种新材料,其热物性参数见表 1-1。

表 1-1 相变蓄热材料的热物性参数

相变温度/℃	相变潜热/(kJ/kg)	密度/(kg/m ³)	比热容/[kJ/(kg·℃)]	热导率/[kW/(m·℃)]
70 ~ 80	288	2200	4.5	0.7

(2) 相变蓄热电暖器的结构 电暖器采用电加热管直接加热，电加热套管布置在电暖器中间部位。为了避免在蓄热过程中电暖器中局部过热，在此设备中采用了4根电加热管，每根加热管的功率为200W。电加热管的加热由时间和温度控制器控制。因蓄热材料的热导率较小，在蓄液芯内部增加了横向导热翅片，以达到强化内部传热的目的；为了增加向外部空间散热的能力，在内芯的外壁上加装了散热翅片，其内芯结构如图1-2所示。内芯外部罩有封闭外壳，为了调节散热量，在外壳正面的上下部位分别加装了活动风门，如图1-3所示。

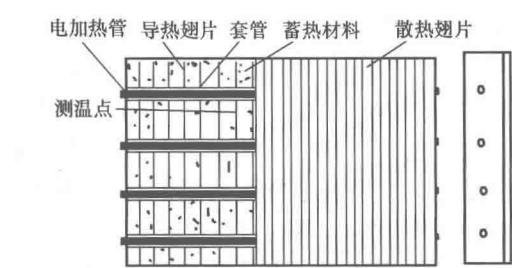


图 1-2 相变蓄热电暖器内芯结构

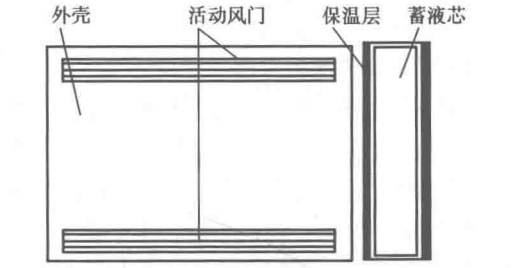


图 1-3 相变蓄热电暖器外部结构

4. 相变蓄能建筑围护结构

现代建筑向高层发展，要求所用围护结构为轻质材料，但普通轻质材料的热容较小，导致室内温度波动较大。这不仅会造成室内热环境不舒适，还会增加空调负荷，导致建筑能耗上升。通过向普通建筑材料中加入相变蓄能材料，可以制成具有较高热容的轻质建筑材料。利用相变蓄能复合材料构筑建筑围护结构，可以减少室内温度波动，提高舒适度，使建筑供暖或空调不用或者少用能量；可以减小所需空气处理设备的容量，同时可使空调或供暖系统利用夜间廉价电力运行，降低空调或供暖系统的运行费用。

相变蓄能材料是一种熔化时吸热、凝结时放热的材料。液态相变蓄能材料靠表面张力保持在多孔隙的主体材料中。因为潜热比显热大得多，所以在建筑材料中加入适量（质量分数为5% ~ 25%）相变蓄能材料，即可对其蓄热能力产生很大的影响。目前，可采用的相变材料的潜热可达到170kJ/kg左右，而普通建材在温度变化1℃时蓄存同等热量将需要180倍于相变材料的质量。因此，相变蓄能建材具有普通建材无法比拟的热容，对于保持房间内温度的稳定及空调系统工况的平稳是非常有利的。

目前常用的相变蓄能材料主要包括无机物和有机物两大类。绝大多数无机物相变蓄能材料具有腐蚀性，而且在相变过程中具有过冷和相分离的缺点，影响了其蓄能能力；而有机物相变蓄能材料不仅腐蚀性小，在相变过程中几乎没有相分离的缺点，而且化学性能稳定，价格便宜。但有机物相变蓄能材料普遍存在热导率低的缺点，致使其在蓄能系统的应用中传热性能差，能量利用率低，从而降低了系统的效能。

目前国内外的研究都集中于有机相变蓄能材料，主要有烷烃、酯、酸、醇及石蜡等五类。相变蓄能材料与建材基体的结合工艺主要有三种：①通过浸泡，将相变蓄能材料渗入多孔的建材基体中，可供选择的孔隙建材主要包括石膏板、膨胀黏土、膨胀珍珠岩、多孔混凝土等；②使高密度交联聚乙烯颗粒在熔化的相变蓄能材料中膨化，然后加入建材板材原料中；③将相变材料吸入半流动性的硅石细粉中，然后掺入建材板材中。

在建筑节能领域，通过建筑材料与蓄能材料复合，可以增加建筑物的温度调节能力，达到节能和提高舒适性的目的。

相变蓄能材料与陶瓷复合制作蓄能材料,采用直接接触换热方式,不需要换热器,能减少蓄能材料用量和缩小容器尺寸,从而可以大幅度提高蓄能系统的经济性。其中的相变蓄能材料可以看做是陶瓷微细孔隙中的胶囊结构,因表面张力和毛细管吸附力的作用,熔化的液态相变蓄能材料不会渗漏。此时的蓄热量包括相变蓄能材料的相变潜热与混合材料的显热,属于混合型蓄能方式。

将相变蓄能材料裹入聚合物的空间网络中,相变蓄能材料受界面张力和化学键的作用而保留在聚合物中间,在蓄放热的循环中液相不泄漏。用这种方法制成的水/聚丙烯酰胺系统,可以用在直接接触式蓄热系统中。

用浸制的方法将相变蓄能材料渗入基体材料(石膏板、混凝土、塑料板和泡沫材料等)中,可以制成具有蓄能功能的墙体材料。将93%~95%的软脂酸与7%~5%的硬脂酸的混合物浸入石膏板材中,浸入相变蓄能材料的质量分数为23%。该蓄能墙体材料在23~26.5℃时熔解吸热,在22~23℃时凝固放热,其蓄能容量为381kJ/m²,可用于空调建筑节能。

目前存在的问题是蓄能建筑材料的耐久性以及经济性问题。其耐久性主要有三类问题:其一是相变蓄能材料在循环相变过程中热物理性质退化;其二是相变蓄能材料从建筑基体材料中泄漏出来;其三是相变蓄能材料对建筑基体材料的作用。其经济性问题表现为相变材料的价格较高,导致其费用上升。

为了解决上述问题,必须从以下两方面着手:一是相变蓄能材料的筛选与改进;二是相变蓄能材料与建筑基体材料的复合方法。相变材料的选择是进一步筛选符合环保要求的低价有机复合相变材料,如可再生的脂肪酸及其衍生物。有机相变蓄能材料混合物的使用对蓄能建材的研究开发具有十分重要的意义。其一是突破了纯物质熔点对选用相变蓄能材料的限制,有可能以两种或几种价廉、供应充裕、不同熔点的纯物质来组成熔点合适的相变蓄能材料混合物,从而解决价格问题。其二是由于选用不同组元和改变成分,几乎可以连续调整蓄能建材的相变温度,使得相变温度的优化有了实际意义。其三是适当选择组元,可使混合物部分保留某些组元的优点,例如,烷烃与酯类混合,可能既保留了相当大的相变潜热,又能抑制表面结霜趋势。

5. 高温固液相变吸热/蓄热器

随着航天技术的进一步开发利用,对空间电源的要求也越来越高,要求其具有可靠性高、功率大、质量小、寿命长、成本低的特点。把太阳能转换为航天器所需要的电能,目前主要有两种方法:一种是光电直接转换系统,采用太阳能光伏电池阵与化学蓄电池组合的供电方式;另一种便是太阳能动力发电系统,与光伏发电系统相比,它的能量储存/释放效率高,寿命长,且具有较小的比质量和比面积。由于其效率高、尺寸小、阻力小,因而可节省轨道提升成本。此外,较小的太阳能聚光器面积还增强了空间站的飞行稳定性,改善了空间站的视野。

高温固液相变吸热/蓄热器是空间太阳能热动力发电系统四大部件之一,其质量大约占总系统质量的1/3,它集吸热、传热和储热三项功能为一体。在日照期,吸热器吸收太阳反射器反射进来的太阳光,一部分能量直接传递给循环工质,剩余能量利用蓄热材料储存起来。在轨道的阴影期,蓄热材料向循环工质放热,以保证系统在阴影期的正常运行。为了保证轨道阴影期仍能连续供电,吸热器内装有相变材料蓄热器,它与吸热器组成一个整体。在日照阶段,由聚光器反射到吸热器内的太阳能除加热循环工质外,多余的热由相变蓄能材料(PCM)吸收,PCM部分或全部由固相变为液相。当进入轨道阴影期时,PCM由液相变为固相,并用释放的潜热来加热循环工质,从而保证热机连续供电。图1-4所示为高温固液相变吸热/蓄热器结构。工质从入口总导管进入吸热腔内的多根工质导管,经过吸热腔后合并进入出口总导管。循环工质导管上套装着多个分离的PCM容器,相变蓄能材料封装在容器中。

北京航空航天大学进行了吸热/蓄热器关键技术的研究。他们分析了微重力下 PCM 容器内的三维相变传热过程,编写了热分析计算软件;在地面环境模拟的真空环境下,完成了吸热/蓄热器单元换热管的蓄、放热试验;完成了 2kW 吸热/蓄热器热设计;研制出了可用于吸热/蓄热器样机的单根换热管样件;验证了换热管样件的热性能;对 2kW 整机吸热器各部件的材料和制造工艺进行了初步研究。

(二) 相变蓄冷技术的发展现状

自改革开放以来,我国的综合国力和人民生活水平都有了较大幅度的提高。电力工业作为国民经济的基础产业之一,已取得了长足发展。但是,电力的增长仍然满足不了国民经济的快速发展和人民生活用电急剧增长的需要,全国缺电局面仍然存在。目前,电力供应紧张主要表现在下述方面:

1) 电网负荷率低,系统峰谷差加大,高峰电力严重不足,致使电网经常拉闸限电。峰谷差占高峰负荷的比例已高达 30% 以上。

2) 城市电力消费增长迅速,但城市电网与此不相适应,造成有电送不出、配不下的局面。而在夏季高温天气时,许多城市都出现配电设备超载运行的情况。

目前峰谷电价政策的出台及不断完善,将为促进我国蓄冷空调的发展和应用创造良好的外部环境,蓄冷技术在我国的应用将形成不断发展的趋势。一方面,随着峰谷电价比的加大,用户侧采用电力蓄能技术将大大减少其空调运行费用,降低用电成本,提高企业效率;另一方面,采用蓄能空调技术“移峰填谷”,有利于提高电网负荷率,也有利于电网的安全经济运行。电力蓄能技术不仅是应对当前电力供应紧张形势的有效手段,即使是在今后电力供求平衡时期,它也是 DSM 重要的“移峰填谷”技术措施。

20 世纪 70 年代以来,世界范围的能源危机促使蓄冷技术迅速发展。美国、加拿大和欧洲一些国家重新将冰蓄冷技术引入建筑物空调,积极开发蓄冷设备和系统,实施的工程项目也逐年增多。1994 年年底,美国约有 4000 多个蓄冷空调用于不同的建筑物,其中水蓄冷占 10%,共晶盐蓄冷占 3.3%,冰蓄冷占 86.7%。

美国不仅冰蓄冷工程数量占多数,在蓄冰设备方面也有发展。FAFCO 蓄冰槽、Calmac 蓄冰筒等日趋完善,同时 BAC 外融冰蓄冷槽也向内融冰蓄冷槽方面扩展。美国 Mueller 公司动态制冰设备在美国、日本、韩国、中国等地有众多工程在运行。

法国 CIAT-Cristopia 公司在欧洲、亚洲、美洲的几十个国家有经销商。

日本在冰蓄冷开发研制阶段,约有 30 多家公司的 40 余种不同的装置和系统进入市场,有些技术是从美国 BAC、FAFCO、CALMAC、TRANSPHASE,法国 CRISTOPIA-STL,加拿大 SUNWELL 引进的。

我国从 20 世纪 90 年代初开始建造水蓄冷和冰蓄冷空调系统,至今已有建成投入运行和正在施工的工程 400 多个,分布在 4 个直辖市和 17 个省,全国 2/3 的省市都建造了蓄冷空调系统。已建的蓄冷空调工程主要集中在城市建设和经济发展迅速、同时电力紧缺的北京市和东南沿海地区。

我国水蓄冷空调工程采用了十几项专利技术,载冷体工作温差达 8~10℃,甚至更大,使蓄

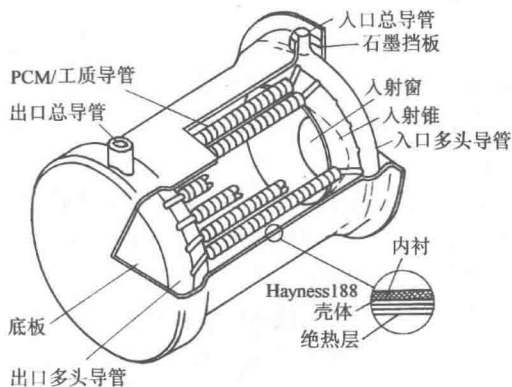


图 1-4 高温固液相变蓄热/吸热器结构