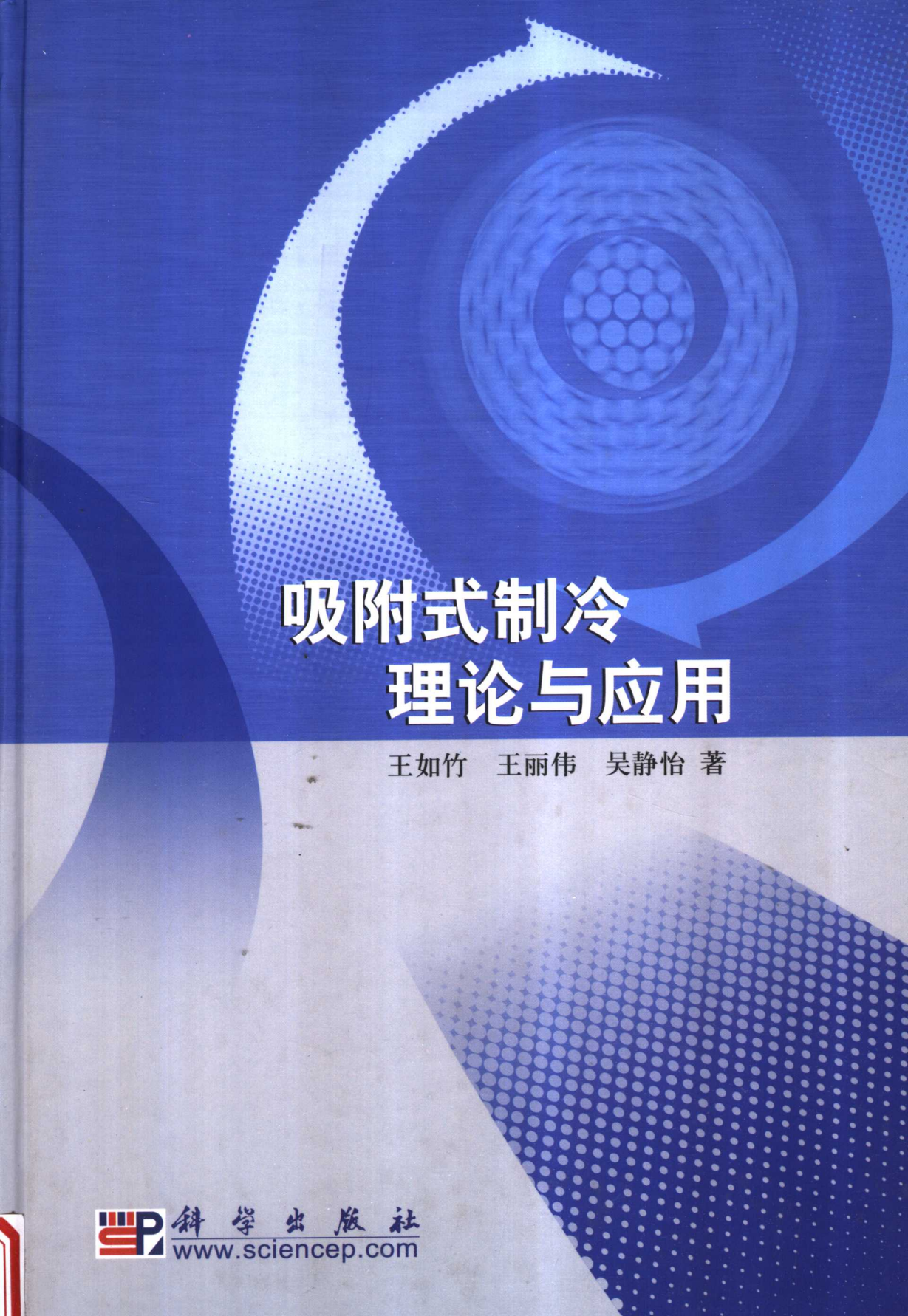




# 吸附式制冷 理论与应用

王如竹 王丽伟 吴静怡 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 吸附式制冷理论与应用

王如竹 王丽伟 吴静怡 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书的内容涵盖了物理、化学和复合吸附方面的基础、理论及应用研究。在基础方面,本书给出了不同工况条件下吸附制冷工质对的吸附解吸特性与传热传质特性;在理论方面,本书对不同吸附工质对的动力学特性、不同先进循环的优缺点及其理论、先进的吸附床设计理论进行了分析与总结。本书还从作者十余年来的研究经验出发,结合物理、化学和复合吸附工质对的不同应用工况及先进循环理念,对项目组在样机设计方面的成功经验进行了阐述;并针对太阳能与余热利用工况,总结了吸附制冷系统在太阳能生态建筑、冷热电三联供、机车空调、渔船制冰机及低温保粮等系统中的工程应用设计与运行特性。同时本书还对低温工况吸附制冷工质对其系统设计进行了概述。

本书适用于制冷与低温工程、暖通空调专业、从事吸附方面研究的化学工程专业的师生及研究人员,以及余热利用系统及太阳能利用系统的相关研究人员。

### 图书在版编目(CIP)数据

吸附式制冷理论与应用 / 王如竹,王丽伟,吴静怡著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-019886-0

I. 吸… I. ①王…②王…③吴 II. 吸收制冷-制冷技术 IV. TB66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 136726 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平 / 封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007年9月第一次印刷 印张:28 1/4

印数:1—3 000 字数:538 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

# 前 言

随着世界经济的发展和能耗的增加,能源与环境问题已经成为全世界共同关注的一个热点问题,吸附式制冷作为一种低品位热能驱动的绿色制冷技术,已经被认为会成为能源利用与环境保护的有效中间链。

推动吸附式制冷研究的因素有两个方面:一方面在于探索解决能源紧缺的可能途径。自 1973 年中东战争引起世界性石油危机以来,能源问题成为了举世瞩目的重大问题。石油的形成过程需要 700 万年,但经历了 150 年的开采历史后,这一优质能源目前已经所剩无几。煤炭等化石燃料虽然储量较多,但也将在一个有限期间内被开发殆尽。电力作为一种二次能源,近年来随着人们舒适性需求的增加,其消耗量也迅猛增加。解决世界能源问题的一个重要途径是利用低品位能源,包括可再生能源的开发利用以及各种余热的回收利用。另一方面,臭氧层的破坏和全球气候变化是当前全球所面临的主要环境问题。由于冰箱制冷、空调、热泵行业广泛采用的 CFCs(含氯无氢的氟利昂)与 HCFCs(含氯与氢的氟利昂)类物质对臭氧层的破坏作用以及温室效应等影响,使全世界的冰箱制冷、空调和热泵行业都面临新的机遇与挑战。所以寻找传统制冷剂替代物和新型制冷方式,尤其是采用天然制冷剂制冷的技术已成为制冷技术研究的热点。

吸附式制冷原理为:① 冷却吸附→制冷:通过水、空气等热沉带走吸附剂显热与吸附热,完成吸附剂对制冷剂的吸附,利用制冷剂的蒸发过程实现制冷;② 加热解吸→冷凝:吸附制冷完成后,再利用热能(如太阳能、废热等)提供吸附剂的解吸热,完成吸附剂的再生,解吸出的制冷剂蒸气在冷凝器中凝结成液体。吸附式制冷的驱动热源为 50℃ 以上的工业废热和太阳能等低品位热能,另外吸附式制冷所采用的制冷剂一般都是天然制冷剂,如水、氨、甲醇和氢等,其臭氧层破坏系数(ODP)和温室效应系数(GWP)均为零。

吸附式制冷与蒸汽压缩式制冷相比,具有节能、环保、控制简单、运行费用低等优点;吸附式制冷与液体吸收式系统相比,适用的热源温区范围大、不需要溶液泵或精馏装置,也不存在制冷剂的污染、结晶或腐蚀等问题,同时所采用的固体吸附剂也更为适合应用于颠簸、震动的场合。吸附式制冷可用于空间低温、机车空调、渔船制冰、太阳能空调或热泵以及一些废热可资利用的场合。

最早发现吸附式制冷现象是在 1848 年,并一度得到重视与应用。但是后来随着压缩式制冷技术的创新和技术进步,吸附式制冷由于无法与高效的压缩式制冷设备相比,开始淡出人们的视野。20 世纪 70 年代的能源危机,加强了人类对新能

源的开发和节能技术的重视。进入 90 年代,氟利昂对大气臭氧层的破坏和二氧化碳所造成的温室效应这两大问题严重地威胁着人类的生存与发展,可持续发展成为共识。吸附式制冷技术因此得到了发展的契机。1992 年巴黎首届国际吸附式制冷大会召开后,吸附式制冷的研究受到了国际制冷界的普遍关注,随后的研究进展迅速加快,研究力量也更加集中。

上海交通大学于 1993 年开始对吸附式制冷进行研究,迄今已经发表国际 SCI 论文百余篇,所开发的硅胶-水吸附式制冷机组也已经实现了产业化。目前上海交通大学的吸附式制冷研究团队已经成为国际知名的研究团体。2002 年国际吸收与吸附式热泵大会由上海交通大学主办,标志了项目组在国际学术领域中的影响力。这次国际会议的议题囊括了传热强化、多盐多级循环、对流热波循环、回热回质循环、吸附-吸收三效制冷、太阳能吸附式制冷系统、机车吸附式空调等。

在吸附式制冷书籍的撰写方面,目前国外较为知名的研究人员,如 Critoph、Vasieliev、Menuier、Spinner 等人,虽然都在吸附式制冷理论与应用方面进行了较为深入的研究,但并没有人撰写相关专著来对吸附式制冷技术的理论与应用进行较为系统的总结。国内方面,本书作者在 2002 年出版的《吸附式制冷》(机械工业出版社出版)一书也主要偏重于物理吸附,关于吸附式制冷应用方面的内容也不是很全面。综合以上所存在的问题,本书基于国内外对吸附式制冷的研究成果及经验,首先对原《吸附式制冷》一书中的内容进行了修订,然后从物理、化学和复合吸附方面,对不同工质对的吸附解吸特性、传热传质特性、吸附动力学特性进行了总结与分析,并对不同吸附式制冷系统的循环特性、吸附床技术进行了阐述。同时本书还总结了 10 多年来的研究经验和成功的制冷系统设计实例,从低温热源驱动的冷水机组、太阳能吸附式制冷、余热驱动的吸附式制冷、吸附式蓄热及其制冷系统、热管理论在吸附式制冷中的应用等方面,阐述了不同应用工况条件下吸附式制冷系统的设计要点及其制冷特性。并在应用方面,总结了吸附式制冷系统在太阳能生态建筑、冷热电三联供、机车空调、渔船发动机烟气余热利用及低温保粮系统中的应用成果,分析了吸附式制冷系统在不同场合的应用特性。

作者需要感谢的是项目组团队中夏再忠博士和许煜雄高工在吸附式制冷研究工作中做出了显著贡献,代彦军教授和翟晓强博士在吸附式制冷机用于太阳能空调方面做了许多工作。本书编写的内容有很多来自于作者所带领的研究团队中的博士生和博士后的研究论文,博士生主要有王丽伟、李明、曲天非、李春华、卢允庄、王树刚、刘艳玲、孔祥强、翟晓强、罗会龙、Daou、王德昌、王凯、陆紫生、滕毅等,博士后主要有王文、姜周曙、代彦军、Oliveira 等。此外一些硕士生如杨利民、汪前彬、施雯、程坚、Amadou 等工作均为本书提供了优秀的素材。

作者所带领的团队在对吸附式制冷进行的过程中,先后获得了国家重大研究计划 973 课题、国家杰出青年基金、国家自然科学基金、教育部优秀青年教师

奖励计划、霍英东教育基金会优秀青年教师基金、上海市曙光人才计划和上海市青年科技启明星计划等多项项目的支持,研究过程中项目组先后获得了美国开利公司、美国联合技术公司研究中心和日本松下公司等项目的支持。应该强调的是,本书的工作更多地反映了国家杰出青年科学基金(项目编号:50225621,2003~2006)资助下的研究成果,而先前出版的《吸附式制冷》则主要反映我们项目组在2002年以前的研究工作。

作者在研究过程中还先后得到了清华大学过增元院士、中国科学院理化技术研究所周远院士、上海理工大学华泽钊教授、浙江大学陈国邦教授和上海交通大学陈芝久教授等多位老师的指导与帮助,在此对各位专家的帮助表示深深的感谢!

由于本书作者水平有限,书中难免存在疏漏,敬请读者不吝赐教。

王如竹

2007年4月于上海交通大学

# 符号说明

## 1 英文字母变量

|             |                          |                  |                                                          |
|-------------|--------------------------|------------------|----------------------------------------------------------|
| $a$         | 反应平衡系数;范德瓦耳斯方程系数         | $A_{rx}, A_{ry}$ | Mazet 反应模型常数                                             |
| $a_t$       | 流体的热扩散率                  | $A_s$            | 太阳能集热器的面积, $m^2$                                         |
| $a_p$       | 吸附剂单位质量的颗粒表面积, $m^2/kg$  | $A_{so}$         | 固体骨架总表面积, $m^2$                                          |
| $a_v$       | 单位体积吸附剂的颗粒表面积, $m^2/m^3$ | $A_{seff}$       | 太阳能集热器有效集热面积, $m^2$                                      |
| $A$         | Clausius-Claperon 方程常数   | $b$              | 反应平衡系数;范德瓦耳斯方程系数                                         |
| $A_0$       | 动力系数                     | $B$              | 吸附剂微孔结构的参数                                               |
| $A_{ob}$    | 两管间背板面积, $m^2$           | $c$              | 吸附质的浓度, $kg/m^3$                                         |
| $A_a$       | 单元内吸附剂的横截面积, $m^2$       | $c^*$            | 平衡浓度, $kg/m^3$                                           |
| $A_{adb}$   | 吸附床的换热面积, $m^2$          | $c_i$            | 吸附剂颗粒表面吸附质浓度, $kg/m^3$                                   |
| $A_{a,eff}$ | 吸附剂内部有效传热面积, $m^2$       | $C$              | Clausius-Claperon 方程常数, 比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$      |
| $A_c$       | 冷凝侧的换热面积;散热面积, $m^2$     | $C_{0\sim 3}$    | Tykodi 模型系数                                              |
| $A_{eff}$   | 换热器在固体侧的面积, $m^2$        | $C_a, C_{pa}$    | 吸附剂的比热, $J/(mol \cdot K)$ , $J/(kg \cdot ^\circ C)$      |
| $A_{evf}$   | 热管蒸发器在流体侧的面积, $m^2$      | $C_{had}$        | 高温吸附床的吸附剂热容, $J/(mol \cdot K)$ , $J/(kg \cdot ^\circ C)$ |
| $A_f$       | 换热器在流体侧的面积, $m^2$        | $C_{lc}$         | 液体制冷工质的比热容, $J/(mol \cdot K)$ , $J/(kg \cdot ^\circ C)$  |
| $A_{fa}$    | 翅片管的内表面积, $m^2$          | $C_{lv}$         | 气体制冷工质的比热容, $J/(mol \cdot K)$ , $J/(kg \cdot ^\circ C)$  |
| $A_{fe}$    | 指前因子                     | $C_m, C_{pm}$    | 吸附床金属比热, $J/(mol \cdot K)$ , $J/(kg \cdot ^\circ C)$     |
| $A_{fin}$   | 吸附床翅片管的换热面积, $m^2$       | $C_{mal}$        | 吸附床金属材料铝的比热, $J/(mol \cdot K)$ , $J/(kg \cdot ^\circ C)$ |
| $A_g$       | 单元内气流的横截面积, $m^2$        | $C_{mcu}$        | 吸附床金属材料铜的比热, $J/(mol \cdot K)$ , $J/(kg \cdot ^\circ C)$ |
| $A_h$       | 恒温源对吸附床的辐射传热面积, $m^2$    |                  |                                                          |
| $A_m$       | 吸附剂侧金属的传热面积, $m^2$       |                  |                                                          |
| $A_{mr}$    | 回质通道的截面积, $m^2$          |                  |                                                          |

|                    |                                     |               |                                                 |
|--------------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------|
|                    | (mol · K), J/(kg · °C)              | $d_p$         | 固体颗粒的当量直径, m                                    |
| $C_{mh}$           | 加热锅炉的金属热容, J/(kg · °C)              | $d_{pi}$      | 管内径, m                                          |
| $C_p$              | 等压比热, J/(mol · K), J/(kg · °C)      | $d_{po}$      | 管外径, m                                          |
| $C_{pb}$           | 总热容值, J/(mol · K), J/(kg · °C)      | $d_v$         | 蒸气的流通当量直径, m                                    |
| $C_{pc}, C_{pg}$   | 气态工质的定压比热, J/(mol · K), J/(kg · °C) | $d_w$         | 为槽道的宽度, m                                       |
| $C_{pf}$           | 流体的热容, J/(mol · K), J/(kg · °C)     | $D'$          | D-A 方程系数                                        |
| $C_{pme}$          | 甲醇气体的定压比热, J/(kg · °C)              | $D_e$         | 微孔内扩散系数; 有效扩散系数                                 |
| $C_{pr}, C_{pl}$   | 液体工质的定压比热, J/(mol · K), J/(kg · °C) | $D_{go}$      | 外玻璃管半径, m                                       |
| $C_{ps}$           | 固体工质的定压比热, J/(mol · K), J/(kg · °C) | $D_i$         | 有效扩散系数                                          |
| $C_{pw}$           | 板壁的热容, J/(mol · K), J/(kg · °C)     | $D_k$         | 克努森扩散系数                                         |
| $C_{ra}$           | 根据蒸发器型式决定的比例系数                      | $D_{ms}$      | 质扩散系数                                           |
| $C_{vg}$           | 制冷剂气体的定容比热, J/(kg · K)              | $D_s, D_{so}$ | 表面扩散系数, m <sup>2</sup> /s                       |
| $C_{vf}$           | 制冷剂液体的定容比热, J/(kg · K)              | $e_{eff}$     | 吸附床的有效厚度, m                                     |
| COP                | 制冷系数                                | $e_{so}$      | 固相吸附剂骨架内能, kJ/kg                                |
| COP <sub>ac</sub>  | 活性炭吸附床的制冷系数                         | $E$           | 特征吸附功, J/mol                                    |
| COP <sub>hp</sub>  | 热泵系统的性能系数                           | $E_a$         | 活化能, 吸附活化能, J/mol                               |
| COP <sub>int</sub> | 间歇循环的制冷系数                           | $E_d$         | 解吸活化能, J/mol                                    |
| COP <sub>z</sub>   | 沸石吸附床的制冷系数                          | $E_{ij}$      | 热弥散系数                                           |
| $d$                | 距离, 分子间的距离, m                       | $E_p$         | 伪活化能, J/mol                                     |
| $d_a$              | 吸附剂颗粒的直径, m                         | $f$           | 对应实际压力的逸度, Pa                                   |
| $d_{ave}$          | 平均孔径, m                             | $f_0$         | 对应饱和压力的逸度, Pa                                   |
| $d_e$              | 当量直径, m                             | $f_s$         | 气流流通面积与转轮横截面积之比, m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> |
|                    |                                     | $f_v$         | 单位体积吸附剂的表面积, m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>     |
|                    |                                     | $g$           | 重力加速度, m/s <sup>2</sup>                         |
|                    |                                     | $G$           | 自由焓, J                                          |
|                    |                                     | $h$           | 长度, m; 比焓, J/kg                                 |
|                    |                                     | $h_a, h_d$    | 吸附热, 解吸热, kJ/kg                                 |
|                    |                                     | $h_{ev}$      | 蒸发段的高度, m                                       |
|                    |                                     | $h_i$         | 制冷剂液体的比焓, J/kg                                  |
|                    |                                     | $h_{gc}$      | 制冷剂气体在 $T$ 温度的比焓, J/kg                          |

|                 |                                          |                 |                               |
|-----------------|------------------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| $h_r$           | 冷凝温度下氨液体的比焓,<br>J/kg                     | $K_s a_p$       | 表面扩散速度系数, 1/s                 |
| $h_w$           | 槽道的深度, m                                 | $K_v$           | 吸附净速度, (kg/kg)/s              |
| $H$             | 整个物系的焓值, J                               | $K_x$           | Iloeje 方程的反应系数, C/s           |
| $H_a, H_d$      | 吸附热, 解吸热, kJ                             | $l$             | 长度, 传质尺度, m                   |
| $H_{adb}$       | 吸附床的厚度(即高度), m                           | $l_{ah}$        | 吸附床内热管的高度, m                  |
| $H_f$           | 势能, J/mol                                | $L$             | 制冷剂液体气化潜热, kJ/kg              |
| $\bar{H}_g$     | 摩尔焓, J/mol                               | $L_a$           | 吸附剂沿 $L_y$ 方向的厚度, m           |
| $H_r$           | 化学反应热, J                                 | $L_{ad}$        | 吸附床的长度, m                     |
| $H_{st}$        | 等压吸附/解吸热, kJ/kg                          | $L_b$           | 吸附床沿 $L_y$ 方向的宽度, m           |
| $I$             | 太阳辐射强度, W/m <sup>2</sup>                 | $L_{bw}$        | 壁面的厚度, m                      |
| $I_0$           | 直接照射太阳光强度, W/m <sup>2</sup>              | $L_B$           | 单元的横向当量宽度, m                  |
| $I_{ref}$       | 背板反射的太阳光强度, W/<br>m <sup>2</sup>         | $L_c$           | 冷凝器内制冷剂的冷凝潜<br>热, kJ/kg       |
| $J$             | 热通量, W/m <sup>2</sup>                    | $L_e$           | 蒸发器内制冷剂的蒸发潜<br>热, kJ/kg       |
| $k$             | D-R 方程常数                                 | $L_{ev}$        | 蒸发段的长度, m                     |
| $k_1, k_2, k_3$ | 稳定常数                                     | $L_{fin}$       | 吸附床两肋片之间的距离宽<br>度的一半, m       |
| $k_f$           | 传质系数, kg/(m <sup>2</sup> · s)            | $L_{hp}$        | 热管工质的蒸发换热潜热, kJ               |
| $k_{ij}$        | 介质的渗透率张量的分量, m <sup>2</sup>              | $L_m$           | 热媒通道沿 $L_z$ 方向的高度,<br>m       |
| $k_p$           | 多孔介质渗透率, m <sup>2</sup>                  | $L_{pi}$        | 管子的长度, m                      |
| $k_s$           | 固相界膜内的物质传质系数,<br>kg/(m <sup>2</sup> · s) | $L_{sat}$       | 制冷剂在 $T_s$ 温度下的蒸发<br>潜热, J/kg |
| $k_y$           | 对流传质系数, kg/(m <sup>2</sup> · s)          | $L_x, L_y, L_z$ | 三个坐标, m                       |
| $K$             | D-R 方程系数; 反应平衡常数                         | $L_{xt}$        | $L_x$ 方向的总长度, m               |
| $K_a$           | 吸附过程的反应速率常数                              | $\dot{m}$       | 从一个单元到下一单元的气体<br>的流量, kg/s    |
| $K_d$           | 解吸过程的反应速率常数                              | $m$             | 反应平衡系数; 流量, kg/s,<br>g/s      |
| $K_F$           | 流体侧的传质系数, m/s                            | $m_{am}$        | 氨的质量流量, kg/s                  |
| $K_i$           | 动力系数                                     | $m_{air}$       | 空气流量, kg/s                    |
| $K_{ms}$        | 传质项对晶体的影响系数                              | $m_C$           | 氯化钙的相对分子质量,<br>110.99         |
| $K_{md}$        | 化学动力学项对晶体的影响<br>系数                       |                 |                               |
| $K_r, M_r$      | Lu 的化学吸附模型动力学常<br>数                      |                 |                               |
| $K_s$           | 总的传质系数, kg/(m <sup>2</sup> · s)          |                 |                               |

|                    |                                         |                         |                                                    |
|--------------------|-----------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------|
| $m_e$              | 蒸气的质量流量, kg/s                           |                         | 质量, kg/m <sup>3</sup>                              |
| $m_f$              | 流量, m <sup>3</sup> /s                   | $M_{\text{madb}}$       | 吸附床的金属重量, kg                                       |
| $m_g$              | 石墨的质量, kg                               | $M_{\text{mal}}$        | 吸附床金属材料铝的质量, kg                                    |
| $m_i$              | 通过转轮单位截面积的空气流量, kg/(m <sup>2</sup> · s) | $M_{\text{mcu}}$        | 吸附床金属材料铜的质量, kg                                    |
| $m_{\text{mr}}$    | 回质流量, kg/s                              | $M_{\text{m, con}}$     | 冷凝器金属的质量, kg                                       |
| $m_{\text{N}}$     | NH <sub>3</sub> 的相对分子质量, 17             | $M_{\text{me}}$         | 吸附床解吸出来的甲醇量, kg                                    |
| $m_{\text{oil}}$   | 燃油量, kg/h                               | $M_{\text{meva, cond}}$ | 蒸发、冷凝器的金属质量, kg                                    |
| $m_{\text{ua}}$    | 单位面积质量流速, kg/(m <sup>2</sup> · s)       | $M_{\text{mh}}$         | 加热锅炉的金属重量, kg                                      |
| $m_w$              | 加热/冷却流体的质量流量, kg/s                      | $M_{\text{pbf}}$        | 无法泵入到吸附床内的液体工质质量, kg                               |
| $m_{\text{water}}$ | 水的流量, kg/s                              | $M_{\text{Re}}$         | 雷诺数的函数                                             |
| $m_x, m_y$         | 反应级数                                    | $M_z$                   | 系统中所充入的热管工质总量                                      |
| $m_y$              | 烟气流量, kg/s                              | $\dot{n}$               | 总的摩尔流量, mol/s                                      |
| $M$                | 质量, kg                                  | $n$                     | D-R 方程系数, 反应平衡系数, 反应级数                             |
| $M_a$              | 反应动力系数; 吸附状态动力系数                        | $n_2^s$                 | 固体表面的摩尔吸附量, mol <sub>制冷剂</sub> /mol <sub>吸附剂</sub> |
| $M_{\text{av}}$    | 单位体积中容纳的吸附剂质量, kg/m <sup>3</sup>        | $n_s$                   | 流道数                                                |
| $M_d$              | 解吸状态动力系数                                | $N$                     | 摩尔数, mol                                           |
| $M_{e0}$           | 平衡条件下蒸发器中制冷剂的质量, kg                     | $N_g$                   | 摩尔吸附量, mol <sub>制冷剂</sub> /mol <sub>吸附剂</sub>      |
| $M_{\text{eqh}}$   | 泵液锅炉中液体工质的质量                            | $p$                     | 压力, Pa                                             |
| $M_{\text{ev}}$    | 蒸发器中制冷剂的质量, kg                          | $p'$                    | 金属氯化物表面的压力, Pa                                     |
| $M_{\text{ew}}$    | 蒸发器中的制冷剂的液体积存量, kg                      | $p_{\text{ac}}$         | 吸附结束的吸附床所对应的压力, Pa                                 |
| $M_{\text{ha}}$    | 吸附床翅片管内管和液室内工质的质量, kg                   | $p_c$                   | 约束压力, Pa                                           |
| $M_{\text{had}}$   | 高温吸附剂吸附床的吸附剂质量, kg                      | $p_{\text{cr}}$         | 低温气体工质的临界压力, Pa                                    |
| $M_{\text{hp}}$    | 泵液锅炉中液体工质的质量, kg                        | $p_{\text{de}}$         | 解吸结束的吸附床所对应的压力, Pa                                 |
| $M_{\text{m}}$     | 单位体积中容纳的支撑载体                            | $p_{\text{ea}}$         | 吸附状态的平衡压力, Pa                                      |

|             |                       |                  |                           |
|-------------|-----------------------|------------------|---------------------------|
| $p_{ed}$    | 解吸状态的平衡压力, Pa         | $Q_{Hs}$         | 高温吸附床与制冷剂络合反应热, J         |
| $p_h$       | 反应界面的压力, Pa           | $Q_m$            | 热泵热量, J                   |
| $p_i$       | 气体与反应物界面的压力, Pa       | $Q_{seff}$       | 太阳入射能量中转变为热能的部分, J        |
| $p_m$       | 系统回质后的压力, Pa          | $Q_{st}$         | 等压吸附热, J                  |
| $P_{el}$    | 联供系统发电量, W            | $Q_{sen}$        | 吸附器升温的显热, J               |
| $P_i$       | 孔隙内的压力, Pa            | $r$              | 半径, m                     |
| PER         | 一次能源利用率               | $r_{as}$         | 膨胀空间与吸附剂体积之比              |
| $Pr$        | 普朗特数                  | $r_c$            | 反应面的直径, m                 |
| $q$         | 热流密度, $W/m^2$         | $r_g$            | 反应粒子的直径, m                |
| $q_{ads}$   | 微分吸附热, J/kg           | $r_{hc}$         | 热量回收系数                    |
| $q_c$       | 吸附剂吸收的热量, J/kg        | $r_{sh}$         | 理想吸附剂材料的等温吸附线形状因子         |
| $q_{c, st}$ | 对应于单位质量吸附剂的蓄冷量, kJ/kg | $R$              | 通用气体常数, $J/(mol \cdot K)$ |
| $q_{h, st}$ | 对应于单位质量吸附剂的蓄热量, kJ/kg | $R_0$            | 管子热阻, $m^2 \cdot C/W$     |
| $q_{in}$    | 加热量, J/kg             | $R_f$            | 流体与加热壁面间的污垢热阻, $C/W$      |
| $q_r$       | 辐射热量, $W/m^2$         | $R_{go}$         | 外玻璃管半径, m                 |
| $q_{reg}$   | 无回热过程的加热量, J          | $R_h$            | 相对湿度, %                   |
| $q_{reg}^*$ | 有回热过程的加热量, J          | $R_{hr}$         | 污垢系数; 热阻, $m^2 \cdot C/W$ |
| $q_{st}$    | 等量吸附热, J/mol, J/kg    | $R_m$            | 金属管半径, m                  |
| $Q$         | 热量, J                 | $R_{mi}$         | 冷却水管半径, m                 |
| $Q_{cad}$   | 吸附过程的冷却热, J           | $R_p$            | 吸附剂颗粒的平均直径, m             |
| $Q_{cc}$    | 制冷剂的显热, J             | $R_t$            | 吸附床金属与吸附剂颗粒间接触热阻, $C/W$   |
| $Q_{chill}$ | 蒸发器制冷段的热量, J          | $R_T$            | 吸附/解吸温度变化速率, $C/s$        |
| $Q_{c, st}$ | 蓄冷量, J                | $R_{\Delta x}$   | 吸附/解吸速率, $(kg/kg)/min$    |
| $Q_{eref}$  | 蒸发器中制冷剂的蒸发制冷量, J      | $R_{\Delta x T}$ | 非平衡吸附/解吸速率, $(kg/kg)/C$   |
| $Q_{eva}$   | 液态制冷剂的显热, J           | $Re$             | 雷诺数                       |
| $Q_{ew}$    | 蒸发器冷凝段的热量, J          | $s$              | Arrhenius 定律常数            |
| $Q_{hg}$    | 热源的能, J               | $S$              | 整个特系的熵值, J/K              |
| $Q_{hs}$    | 对流换热的热量, J            | $S_a$            | 管外面积与管内面积比值               |
| $Q_{h, st}$ | 蓄热量, J                |                  |                           |
| $Q_{Hd}$    | 外界提供给高温吸附床的解吸热, J     |                  |                           |

|             |                                |              |                               |
|-------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------|
| $S_h$       | 固相吸附剂侧单位体积内的热交换率, $W/m^3$      | $T_p$        | 吸热板的温度, $K, ^\circ C$         |
| $S_{solar}$ | 有效辐射度, $W/m^2$                 | $T_{pa}$     | 泵液与回液后热管工质的温度值, $K, ^\circ C$ |
| $\bar{S}_2$ | 偏微摩尔熵, $J/kmol$                | $T_{pb}$     | 泵液锅炉内工质的温度, $K, ^\circ C$     |
| $\bar{S}_g$ | 摩尔熵, $J/kmol$                  | $T_{sa}$     | 吸附剂表面温度, $K, ^\circ C$        |
| $Sc$        | 施密特(Schmidt)数                  | $T_{sk}$     | 天空温度, $K, ^\circ C$           |
| SCP         | 单位质量吸附剂的制冷功率, $W/kg$           | $T_v$        | 蒸气的温度, $K, ^\circ C$          |
| SHP         | 单位质量吸附剂所产生的热泵效率, $W/kg$        | $T_w$        | 壁面温度, $K, ^\circ C$           |
| $t$         | 时间变化, $s, min$                 | $T_{web}$    | 湿球温度, $K, ^\circ C$           |
| $t_c$       | 循环时间, $s, min$                 | $u, u_f$     | 流体的速度, $m/s$                  |
| $t_{hc}$    | 半循环周期, $s, min$                | $u_{f,aver}$ | 多孔介质内流体的通用变量                  |
| $t_m$       | 回质时间, $s, min$                 | $u_l$        | 热损失系数                         |
| $T$         | 温度, $K, ^\circ C$              | $u_{lo}$     | 车速, $km/h$                    |
| $T^*$       | 恒温源温度, $K, ^\circ C$           | $u_{s,aver}$ | 多孔介质内骨架的通用变量                  |
| $T_b$       | 吸附床内部空间的温度, $K, ^\circ C$      | $u_w$        | 风速, $m/s$                     |
| $T_c$       | 约束温度, $K, ^\circ C$            | $U_b$        | 集热板底部的热损失系数                   |
| $T_{chill}$ | 蒸发器制冷段的温度, $K, ^\circ C$       | $U_t$        | 集热板面部的热损失系数                   |
| $T_{cm}$    | 冷凝侧的温度, $K, ^\circ C$          | $v_{wv}$     | 水蒸气的比容, $m^3/kg$              |
| $T_{cr}$    | 低温气体工质的临界温度, $K, ^\circ C$     | $V_0$        | 孔隙容积, 极限孔隙容积, $m^3$           |
| $T_{ew}$    | 蒸发器冷凝段的温度, $K, ^\circ C$       | $V_b$        | IMPEX 块的体积, $m^3$             |
| $T_f$       | 流体温度, $K, ^\circ C$            | $V_c$        | 制冷剂所占据的体积, $m^3$              |
| $T_{go}$    | 外玻璃管温度, $K, ^\circ C$          | $V_C$        | 氯化钙的固体体积, $m^3$               |
| $T_{hb0}$   | 吸附床回液之前加热锅炉的温度, $K, ^\circ C$  | $V_m$        | 氨合氯化物的摩尔体积, $m^3/mol$         |
| $T_m$       | 集热板的平均温度, 金属管温度, $K, ^\circ C$ | $V_p$        | IMPEX 块内部的孔隙体积, $m^3$         |
| $T_{me}$    | 环境温度, $K, ^\circ C$            | $\bar{V}_2$  | 偏微摩尔体积, $m^3/mol$             |
| $T_{mi}$    | 管壁温度, $K, ^\circ C$            | $\bar{V}_g$  | 摩尔体积, $m^3/mol$               |
| $T_{mo}$    | 吸附剂所接触的金属管壁的温度, $K, ^\circ C$  | $w$          | IMPEX 块中石墨比重                  |
| $T_{mw}$    | 吸附床的金属壳体温度, $K, ^\circ C$      | $W$          | 能量密度; 功, $W$                  |
|             |                                | $W_b$        | 集热器底部热损失, $W$                 |
|             |                                | $W_{in}$     | 输入的能量, $W$                    |
|             |                                | $W_{rgb}$    | 真空管集热器对背板的辐射量, $W$            |
|             |                                | $W_s$        | 单个床的制冷功率, $W$                 |

|             |                                           |       |                                             |
|-------------|-------------------------------------------|-------|---------------------------------------------|
| $W_t$       | 集热器面部热损失, W                               |       | 率                                           |
| $W_{thref}$ | 三床系统的制冷功率, W                              | $x_i$ | 与浓度 $c_i$ 对应的平衡吸附量,                         |
| $W$         | 位移, m                                     |       | kg/kg                                       |
| $x$         | 吸附量, kg <sub>制冷剂</sub> /kg <sub>吸附剂</sub> | $x_t$ | 整个吸附剂所占体积内的吸附                               |
| $x^*$       | 当地平衡吸附量, kg <sub>制冷剂</sub> /              |       | 率                                           |
|             | kg <sub>吸附剂</sub>                         | $x_v$ | 吸附剂的体积吸附量, kg/m <sup>3</sup>                |
| $x_0$       | D-R 方程系数                                  | $X$   | 吸附器质量与吸附剂质量的比                               |
| $x_{am}$    | 回质前解吸吸附床的吸附量,                             |       | 值                                           |
|             | kg <sub>制冷剂</sub> /kg <sub>吸附剂</sub>      | $Y$   | 空气的含湿量, kg <sub>水分</sub> /kg <sub>干空气</sub> |
| $x_{conc}$  | 吸附结束时的吸附量,                                | $Y_w$ | 吸附剂表面空气含湿量, kg <sub>水分</sub> /              |
|             | kg <sub>制冷剂</sub> /kg <sub>吸附剂</sub>      |       | kg <sub>干空气</sub>                           |
| $x_{dm}$    | 回质前吸附工况的吸附床的吸                             | $Z$   | 气体压缩因子                                      |
|             | 附量, kg <sub>制冷剂</sub> /kg <sub>吸附剂</sub>  | $Z_c$ | 六氨合氯化物与二氨合氯化物                               |
| $x_e$       | 吸附剂有效吸附体积内的吸附                             |       | 的体积比                                        |

## 2 希腊与俄文字母变量

|                  |                                                                 |                   |                                                                 |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $\alpha$         | 换热系数, 对流换热系数, W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)   | $\alpha_{fi}$     | 冷却水与管壁间的换热系数,                                                   |
| $\alpha_{ab}$    | 自然对流换热系数, W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)       |                   | W/(m <sup>2</sup> · °C) W/(m <sup>2</sup> · K),                 |
| $\alpha_{ac}$    | 活性炭纤维和氨气间换热系数,                                                  | $\alpha_m$        | 吸附床金属的等效换热系数,                                                   |
|                  | W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)                 |                   | W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)                 |
| $\alpha_{am}$    | 外玻璃管与空气的自由换热系数, W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C) | $\alpha_{mi}$     | 吸附剂与冷却水管的换热系数,                                                  |
| $\alpha_{a,eff}$ | 吸附剂内部的有效换热系数,                                                   |                   | W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)                 |
|                  | W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)                 | $\alpha_{pme}$    | 甲醇蒸发换热系数, W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)       |
| $\alpha_b$       | 壁面与吸附床内部的换热系数,                                                  | $\alpha_{rg}$     | 外玻璃管与金属管辐射换热系数, W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C) |
|                  | W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)                 | $\alpha_{rs}$     | 外玻璃管与天空的辐射换热系数, W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C) |
| $\alpha_c$       | 冷凝侧的换热系数, W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)       | $\alpha_t$        | 总换热系数, W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)          |
| $\alpha_f$       | 流体侧换热系数, W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)        | $\alpha_w$        | 固体侧换热系数, W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)        |
| $\alpha_{fc}$    | 吸附床翅片管内管的换热系数,                                                  | $\alpha_{we,vap}$ | 强化管外的蒸发换热系数, W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)    |
|                  | W/(m <sup>2</sup> · K), W/(m <sup>2</sup> · °C)                 |                   |                                                                 |

|                  |                                     |                        |                                 |
|------------------|-------------------------------------|------------------------|---------------------------------|
| $\beta$          | 亲和系数,集热器的倾角(弧度)                     | $\Delta H, \Delta H_r$ | 化学反应焓或络合物生成热, J/mol             |
| $\beta, \beta_s$ | 张量方程的系数                             | $\Delta H^0$           | 标准焓值的变化, J                      |
| $\beta_1$        | 常数                                  | $\Delta H_{1\sim 3}$   | 化学反应焓, J, J/mol                 |
| $\beta_p$        | 固相吸附剂本身的多孔度                         | $\Delta H_r$           | 吸附热, 化学反应热, J, J/mol            |
| $\epsilon$       | 基准吸附质(苯)的吸附势, J/mol                 | $\Delta H_{x,y}$       | 反应物 $x$ 或者 $y$ 的反应焓, J, J/mol   |
| $\epsilon_a$     | 吸附剂的孔隙率, 吸附剂的疏松度, kg/m <sup>3</sup> | $\Delta H_{vap}$       | 蒸发温度为 0℃ 的焓值, J                 |
| $\epsilon_b$     | 吸附床的疏松度                             | $\Delta G$             | 自由焓的变化, J                       |
| $\epsilon_{ev}$  | 蒸发冷却效率                              | $\Delta G^0$           | 标准自由焓的变化, J                     |
| $\epsilon_g$     | 盖板的发射率                              | $\Delta M_a$           | 吸附/解吸的氨量, kg                    |
| $\epsilon_l$     | 非标准吸附质的吸附势, J/mol; 放冷率              | $\Delta S$             | 熵值的变化, J/K, J/(mol · K)         |
| $\epsilon_p$     | 吸热板的发射率                             | $\Delta S^0$           | 标准熵值的变化, J/K                    |
| $\epsilon_r$     | 实际气体的吸附势, J/mol                     | $\Delta T$             | 温差, C                           |
| $\epsilon_\mu$   | 由流体的黏滞性而造成的能量消耗率, W/m <sup>3</sup>  | $\Delta T_{ah}$        | 吸附剂与翅片管内气体之间的温差, C              |
| $\xi_b$          | 总的热扩散率                              | $\Delta T_{ev}$        | 蒸发温度的波动值, C                     |
| $\xi_f$          | 流体的热扩散率                             | $\Delta T_m$           | 平均温度, C                         |
| $\zeta_{go}$     | 外玻璃管对太阳光的吸收率                        | $\Delta T_{wc}$        | 冷却器中水的入口与出口之间的温差, C             |
| $\zeta_m$        | 金属管的吸收率                             | $\Delta x$             | 循环吸附量, kg 制冷剂/kg 吸附剂            |
| $\zeta_{solar}$  | 吸附床集热板的阳光吸收率                        | $\Delta x_{md}$        | 回质过程的解吸量, kg 制冷剂/kg 吸附剂         |
| $\xi_w$          | 板壁的热扩散率                             | $\Delta x_{ma}$        | 回质过程的吸附量, kg 制冷剂/kg 吸附剂         |
| $\tau$           | 加热、冷却时间, s                          | $\rho$                 | 密度, kg/m <sup>3</sup>           |
| $\tau_{go}$      | 外玻璃管对太阳光的透过率                        | $\rho_a$               | 吸附剂的密度, kg/m <sup>3</sup>       |
| $\tau_{solar}$   | 玻璃盖板的阳光透过率                          | $\rho_b$               | 石墨的体积密度, kg/m <sup>3</sup>      |
| $\mu$            | 动力黏度, kg/ms                         | $\rho_{bt}$            | 总的密度值, kg/m <sup>3</sup>        |
| $\mu_v$          | 蒸汽的动力黏度, kg/ms                      | $\rho_f$               | 液膜的密度, 流体的密度, kg/m <sup>3</sup> |
| $\sigma$         | 液体的表面张力, N/m                        |                        |                                 |
| $\sigma_b$       | 玻尔兹曼常数                              |                        |                                 |
| $\sigma_H$       | 金属材料胡克应力                            |                        |                                 |
| $\Delta h$       | 吸附/脱附热、反应热的变化值, J/kg                |                        |                                 |
| $\Delta H$       | 焓值的变化, J, J/mol                     |                        |                                 |

|                        |                                                                                                  |                             |                                            |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|
| $\rho_g$               | 气流的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$                                                                    | $\delta$                    | 厚度, 降膜厚度, $\text{m}$                       |
| $\rho_i$               | 空气的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$                                                                    | $\delta_{\text{eff}}$       | 液膜的等效厚度, $\text{m}$                        |
| $\rho_l$               | 液体的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$                                                                    | $\delta_{\text{go}}$        | 外玻璃管厚度, $\text{m}$                         |
| $\rho_m$               | 金属的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$                                                                    | $\delta_m$                  | 金属管厚度                                      |
| $\rho_{\text{reig}}$   | 吸附质气体密度, $\text{kg}/\text{m}^3$                                                                  | $\delta x$                  | 吸附量的变化值, $\text{kg}/\text{kg}$             |
| $\rho_s$               | 吸附剂颗粒表观密度, $\text{kg}/\text{m}^3$                                                                | $\nu$                       | 吸附速度, $(\text{kg}/\text{kg})/\text{s}$     |
| $\rho_v$               | 蒸汽的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$                                                                    | $\psi_a$                    | 单位吸附剂横截面气流流通面积比                            |
| $\rho_w$               | 板壁的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$                                                                    | $\eta$                      | 太阳能集热器集热效率                                 |
| $\lambda_{\text{ad}}$  | 吸附床的导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,<br>$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ | $\eta_{\text{boiler\_com}}$ | 传统分供能源系统锅炉热效率                              |
| $\lambda_{\text{eff}}$ | 有效导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$      | $\eta_{\text{el\_conv}}$    | 传统分供能源系统发电效率                               |
| $\lambda_f$            | 流体的导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,<br>$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  | $\nu$                       | 运动黏度, $\text{m}^2/\text{s}$                |
| $\lambda_{\text{go}}$  | 外玻璃管导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,<br>$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ | $\Omega$                    | 比表面                                        |
| $\lambda_l$            | 液体的导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,<br>$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  | $\mu$                       | 化学势, $\text{J}/\text{mol}$                 |
| $\lambda_m$            | 金属的导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,<br>$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  | $\theta$                    | 覆盖度, 供热输出比                                 |
|                        |                                                                                                  | $\gamma$                    | 填充密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; 空气系数        |
|                        |                                                                                                  | $\omega$                    | 转速, 弧度/ $\text{s}$ , $\text{r}/\text{min}$ |
|                        |                                                                                                  | $\varphi$                   | 角度, 弧度                                     |

### 3 通用上标与下标变量

|            |                    |              |        |
|------------|--------------------|--------------|--------|
| a, ad, ads | 吸附; 吸附剂            | d, des       | 解吸     |
| adb, bed   | 吸附床                | dil          | 稀溶液    |
| am         | 氨                  | drive        | 驱动     |
| air        | 空气                 | e, eva, evap | 蒸发; 制冷 |
| c          | 冷凝; 冷却; 饱和; 制冷; 约束 | ea           | 吸附平衡   |
| ca         | 复合吸附剂              | ed           | 解吸平衡   |
| cal        | 计算                 | eff          | 有效的    |
| cold       | 制冷                 | eq           | 平衡     |
| conc       | 浓溶液                | exp          | 试验     |
| cond       | 冷凝                 | f            | 流体     |
| cool       | 制冷; 冷却             | fin          | 翅片     |
| cycle      | 循环                 | g            | 解吸; 气体 |
|            |                    | h            | 加热     |

---

|          |              |       |        |
|----------|--------------|-------|--------|
| hb       | 热管;热管工质      | mi    | 冷却水管   |
| heat     | 加热;热泵        | ref   | 制冷剂;制冷 |
| hp       | 热泵           | reg   | 回收     |
| in       | 进口           | s、syn | 络合;合成  |
| <i>l</i> | 液体           | s、sat | 饱和     |
| m        | 冷媒介质;金属;环境冷媒 | so    | 固体     |
| max      | 最大           | w     | 壁面     |
| mb       | 金属被板         | water | 水      |

# 目 录

## 前言

## 符号说明

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                    | 1  |
| 1-1 吸附现象                    | 2  |
| 1-2 吸附式制冷基本原理               | 3  |
| 1-3 吸附式制冷的历史发展              | 4  |
| 1-4 固体吸附式制冷的研究现状            | 7  |
| 1-4-1 吸附工质对                 | 7  |
| 1-4-2 吸附床传热的强化技术            | 8  |
| 1-4-3 余热利用                  | 9  |
| 1-4-4 太阳能利用                 | 10 |
| 1-4-5 高效吸附式制冷循环             | 11 |
| 1-4-6 吸附式制冷产品               | 13 |
| 1-4-7 吸附理论研究                | 15 |
| 参考文献                        | 16 |
| 第 2 章 吸附式制冷工质对              | 25 |
| 2-1 吸附剂                     | 26 |
| 2-1-1 物理吸附剂                 | 26 |
| 2-1-2 化学吸附剂                 | 29 |
| 2-1-3 混合与复合吸附剂              | 30 |
| 2-2 制冷剂                     | 31 |
| 2-2-1 常用制冷剂                 | 31 |
| 2-2-2 其他制冷剂                 | 33 |
| 2-3 吸附式制冷工质对                | 33 |
| 2-3-1 物理吸附工质对               | 33 |
| 2-3-2 化学吸附工质对               | 36 |
| 2-3-3 吸附剂的传热强化技术及复合/混合吸附工质对 | 38 |
| 2-4 吸附式制冷工质对的吸附相平衡方程        | 39 |
| 2-4-1 物理吸附的相平衡方程            | 40 |
| 2-4-2 化学吸附的相平衡方程            | 41 |