

空气源热泵技术与应用

王伟 倪龙 马最良 著

中国建筑工业出版社

空气源热泵技术与应用

王伟 倪龙 马最良 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

空气源热泵技术与应用/王伟, 倪龙, 马最良著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017.1
ISBN 978-7-112-20035-1

I. ①空… II. ①王… ②倪… ③马… III. ①热泵-研究
IV. ①TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 257655 号

本书是国内首本内容较全面、较翔实的有关空气源热泵技术理论与应用的技术著作。

本书主要阐述了各类空气源热泵机组的流程与组成, 并归纳总结出对选用的各类压缩机及辅助部件的特殊要求、特征和容量调节; 深入地分析了空气源热泵的结霜与除霜问题、低温空气源热泵等业内的研究热点; 详细讲解了空气源热泵的应用与其工程设计要点等。

本书可供从事空气源热泵设备研究与开发的专业技术人员、热泵空调工程设计、施工、运行管理等工程技术人员参考; 也可供空调、制冷应用相关专业的本科生、研究生参考使用。

* * *

责任编辑: 石枫华 兰丽婷

责任设计: 李志立

责任校对: 王宇枢 党 蕾

空气源热泵技术与应用

王伟 倪龙 马最良 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 25 $\frac{3}{4}$ 插页: 1 字数: 654 千字

2017年5月第一版 2017年5月第一次印刷

定价: 96.00 元

ISBN 978-7-112-20035-1
(29502)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

《空气源热泵技术与应用》一书是在马最良教授的指导与参与下，由王伟教授和倪龙副教授两位青年学者主笔，终于出版了。此书的出版既是马最良教授团队三十余年大力普及与潜心研究空气源热泵技术的心血结晶，也是以王伟教授为代表的青年学者长期研究成果的体现，更是空气源热泵技术应用与发展到一定阶段的必然产物。

空气源热泵是近年来全世界备受关注的节能技术，欧盟、日本及我国相继将其纳入可再生能源技术范畴。该技术目前广泛应用于我国长江流域、华北地区以及中西部地区，也是京津冀农村地区无煤化的适宜技术，更是“多能互补”可再生能源利用系统的重要组成部分之一。可以说，空气源热泵在我国已进入前所未有的高速发展时期。然而，空气源热泵在实际应用中也存在多项技术瓶颈问题，严重制约了其应用效果与规模化推广。因此，对空气源热泵技术的全面认知是推动该技术创新与发展的必由之路。

《空气源热泵技术与应用》一书聚焦技术特点、梳理技术瓶颈、注重技术的实际应用发展，从空气源热泵机组与系统、结霜与除霜问题、寒冷地区应用技术进展、设计与应用发展等方面较系统地介绍了空气源热泵技术。本书归纳总结出一些值得关注的新理念、新技术、新系统，如：编著者将空气源热泵系统视为热能再生系统之一；空气源热泵供暖系统遵循了部分能量循环利用的科学用能原则，避免了传统供暖系统的单向性问题；多区域结霜图谱；常规 T-T 除霜控制方法导致误除霜事故频发；基于多区域结霜图谱的 T-H-T 除霜控制技术；适用于寒冷地区的单、双级热泵耦合供暖系统；建议在我国大力推广具有热回收的燃气驱动空气/水热泵供暖系统等。上述各点对空气源热泵设计、应用、技术创新等多方面均具有积极的参考价值和指导意义。本书的出版对我国空气源热泵技术进步与发展将起到重要的推动作用。

值得一提的还有一点，马最良教授同他的研究生、同事组成的热泵技术研究团队，在几十年里，始终坚持大力普及空气源热泵技术知识，并对一些感兴趣的问题开展深入研究，取得了一些可喜的研究成果，其成果载入《热泵技术应用理论基础与实践》一书的第 2、第 3、第 4 章和《空气源热泵技术与应用》中。这种抓住空气源热泵技术不放，坚持几十年的普及与研究工作，其不遗余力的奋斗精神和勇于承担推动空气源热泵技术发展的责任，值得提倡和发扬光大。



前 言

以室外空气为热源（或热汇）的热泵机组，称为空气源热泵机组。由空气源热泵机组构成的供暖与供冷系统，称为空气源热泵空调系统，它的基本特征主要有三点。

首先，空气源热泵系统可视为热能再生系统之一。众所周知，热泵是转移热量而不是产生热量。通过空气源热泵系统吸取不能直接利用的室外空气中的热能（ q ）并提高其温度，使它转变为可供暖通空调、热水供应等热用户应用的有用热能（ $q + q$ ）。这部分有用热能大部分是从不能直接应用的热能再生成可直接应用的热能。因此，暖通空调、热水供应等热用户从空气源热泵系统中获得的有用热能应为名副其实的再生热能。基于此概念，我们可将空气源热泵系统视为一种热能的再生系统。

其次，空气源热泵系统的用能遵循了能量的循环利用原则。建筑物室内热量通过围护结构散失到室外大气中，形成建筑物室内热损失。从宏观上看，空气源热泵系统又将其热量作为低温热源，再次将大气中的热量吸收，提高其品位送回室内，以补偿建筑物室内热损失，从而维持人们居住与工作所需的室内温度。这种循环用能方式避免了传统供暖方式的“热源消耗高位能（燃气、燃油、燃煤等）、向建筑物室内提供低温的热量（如 95°C 热水或 60°C 热水等）、向环境排放废物（废热、废气、废渣）”的单向性供暖方式。因此说，空气源热泵供暖系统应属于生态供暖范畴，应用前景广阔，大有发展前途。

最后，空气源热泵系统以大气环境热为低温热源，其热源在空间上，处处存在；在时间上，时时可得；在数量上，随需而取。这样为空气源热泵系统的安装和使用带来简单和方便。同时，由于不需要像地源热泵系统那样从低温热源摄取热量（如打井取地下水、埋管热存储与提取等），所以空气源热泵系统具有更低的初始成本，这将直接推动空气源热泵系统在我国的应用与发展。但是，室外空气温度及湿度波动范围大、热容量小、不同地区的气候特点差异又很大，这将直接对空气源热泵的结构、性能、运行特性产生明显的影响和带来新问题。

正因为上述特征，我国暖通空调领域中早期应用的热泵机组基本上为空气源热泵机组。由于我国大部地区的气候条件适宜使用空气源热泵，因此空气源热泵机组在我国暖通空调、热水供应中应用十分广泛，直到目前，我国仍然是全球空气源热泵应用最广泛的区域之一。展望未来，我国在低碳时代的绿色建筑中，空气源热泵系统具有潜在的应用空间和应用价值。但是，空气源热泵又有许多新问题、新技术始终是业内的研究热点，如结霜与除霜问题、低温工况下高效运行问题、适用地区与平衡点温度问题（如室外空气在多少度以上，其使用是有意义的）等问题又亟待创新与发展。而且，近年来空气源热泵供暖又被认为是替代北方农村冬季散煤供暖的最佳有效方案之一。这就是亟须解决适合于北方农村住宅冬季供暖用的低温、高效、易于维修管理、易在节能工况下运行的空气源热泵及空气源热泵供暖系统。《空气源热泵技术与应用》一书正是在此背景下问世，对人们了解和应用空气源热泵技术将会有裨益，这也是著者撰写这本书的愿望，更希望《空气源热泵技术与应用》的出版，能为空气源热泵技术在中国的普及与发展贡献微薄力量。

本书阐述了空气源热泵技术的基本原理与概念,归纳总结了空气源热泵机组与组成部件的特征、空气源热泵系统结霜与除霜的问题、空气源热泵系统的设计要点、低温工况下空气源热泵系统的运行特性、特殊问题与对策等方面的内容。其中部分内容是著者多年教学、科研和设计工作的经验总结,愿与读者共享。

本书第1章、第6章由倪龙、马最良编著,第2章、第3章由马最良、倪龙编著,第4章、第5章、第7章、第8章由王伟编著。全书由马最良统稿。在编著过程中,研究生朱佳鹤、盖轶静、王学宛、吴旭、刘景东、王丹、白晓夏、王帝、薛汇宇、李昭阳、崔一鸣、林瑶、段德星、丁梦缘等为本书成稿做了大量的辅助性工作,对此谨致谢意。本书的出版凝聚了编辑石枫华、兰丽婷的辛勤工作,在此表示敬意和感谢。

由于著者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

符号表

A	面积	f_s	摩擦阻力系数
A_a	空气源热泵系统的费用年值		翅片间距
APF	全年性能参数	F	结霜能量修正系数
b	卫生器具的同时使用百分数	$F_{PW,L}$	管壁到制冷剂液体的摩擦力
c	比热	$F_{PW,S}$	管壁到制冷剂气体的摩擦力
$c_{ave,PW}$	管壁平均材料的比热	g	重力加速度
$c_{ave,P}$	管道材料的比热	G	风量
$c_{p,fin}$	肋片材料的比热	h	比焓
C	相对余隙	h_d	对流传质系数
	蒸干率	h_{tp}	沸腾换热系数
	运行经济成本	h_L	制冷剂液相区的换热系数
C_{As}	凝结水表面水蒸气浓度	h_S	制冷剂过热区的换热系数
$C_{A\infty}$	空气的水蒸气浓度	H	焓
C_h	海澄—威廉系数		测点处实时霜高
C_t	总初投资		单片翅片的高度
C_r	运行费用	$HSPF$	季节性能系数
CFT	临界霜厚	i	基准折现率（年利率）
COP	性能系数	i_w	水蒸气的升华潜热
d	含湿量	$IPLV$	性能指标限定值
$d_{a,i}$	换热器入口空气的含湿量	k	绝热指数
$d_{a,o}$	换热器出口空气的含湿量	K	传热系数
D	水蒸气扩散系数		低温切断系数
D_{ar}	除霜准确率		机组除霜修正系数
D_f	结霜除霜损失系数		当量绝对粗糙度
D_{fm}	平均结霜除霜损失系数	K_h	小时变化系数
DT_{tot}	总除霜次数	l	长度
E	能量利用系数	L	等效配管长度
E_{ph}	加热周期能效系数	L_h	凝结潜热
E_{ly}	全年能效系数	m	质量
EER	能效比		多变膨胀指数
f	摩擦因子		用水计算单位数

	频率		室内机的数量
$\dot{m}_a$	空气的质量流量	Q_{HIF}	室内机实际制热量
m_{f}	霜的积累速率	Q_{HOF}	室外机实际制热量
m_{R}	压缩机实际质量流量	Q_{HOX}	设计工况下室外机制热量
$m_{\text{R, th}}$	压缩机理论质量流量	ΔQ_{NL}	标准化的有效供热量损失
m_z	增加霜层厚度的结霜量变化率	r	汽化潜热
m_p	增加霜密度的结霜量变化率	R	气体常数
M_{dfw}	化霜水质量		热阻
n	翅片数		负荷系数
n_g	换热管数量	RH	辅助加热消耗的能量
n_o	同类卫生器具数	s	比熵
N	供暖时数	S	熵
N_A	对流传质速率	$SEER$	制冷季节能效比
NFT	中性霜厚	$SMER$	除湿效率
p	压力	t	温度；时间
	残留存水比	t_a	干球温度
	燃料的价格	t_e	蒸发温度
Δp	压力降	t_p	室外侧换热器表面温度
p_q	水蒸气分压力	Δt	温度差
$p_{q, b}$	饱和水蒸气分压力	$\Delta t_{s, c}$	过冷度
P_e	蒸发压力	$\Delta t_{s, c}$	过热度
P_c	冷凝压力	T	温度
$PUDT_{\text{tot}}$	预测的无霜除霜总次数	T_b	平衡点温度
q_g	设计秒流量	T_c	空气源热泵切断温度
q_r	用水定额	T_{dew}	空气露点温度
q_{lat}	潜热热流密度	$T_{\text{f, s}}$	霜层表面温度
q_{sen}	显热热流密度	T_p	冷板温度
q_{tot}	总热流密度	T_{tp}	水的三相点温度
Q	建筑负荷	u	比内能
$\dot{Q}$	热流量	u_L	制冷剂液相流速
Q_{CD}	室内机的额定制冷量	u_v	制冷剂气相流速
Q_{CIF}	室内机的实际制冷量	U	内能
Q_{COF}	室外机的实际制冷量		光电测点输出电压
Q_h	换热器的全热交换量	U_{max}	光电传信号标准化之后的阈值
U_o	最大用水时卫生器具给水当量平均出流概率	η_d	除霜效率

U_{TEPS}	标准化的光电传感器的输出电压	η_v	容积效率
UDT_{MF}	轻霜区的“无霜除霜”总次数	θ	壁面接触角
UDT_{NF}	无霜区的“无霜除霜”总次数	λ	导热系数
UDT_{tot}	“无霜除霜”总次数	λ_1	泄漏系数
u	风速	λ_L	制冷剂液体的热导率
V_{max}	光电传感器所能输出的最大电压	λ_p	节流系数
V_{min}	光电传感器所能输出的最小电压	λ_t	预热系数
V_{OUT}	光电传感器实际输出的电压	λ_v	余隙系数
V_r	贮热水箱(罐)总容积	μ	气体分子量
V_R	压缩机的实际输气量	μ_L	制冷剂液相的动力黏度
V_{th}	往复式压缩机的理论排气量	μ_V	制冷剂气相的动力黏度
W	单片翅片的宽度	ξ	局部阻力系数
$\dot{W}$	功率	ρ	密度
x	干度	ρ_{f0}	初始霜层密度
x_d	蒸干点干度	ρ_L	制冷剂液相密度
X_{tt}	Lockhart-Martinelli 参数	ρ_V	制冷剂气相密度
z	高度	ρ_w	水蒸气密度
希腊字母		ν	比容
α	对流换热系数	φ	相对湿度
$\bar{\alpha}$	空隙率	无量纲参数	
α_f	吸收指数	Re	雷诺数
α_{tp}	两相区换热系数	Fo	傅里叶数
α_r	辐射换热系数	Pr	普朗克数
γ	燃烧热值	Le	刘易斯数
δ	厚度	T_a^*	无量纲空气温度
ε	霜层孔隙度	T_p^*	无量纲冷板温度
	发电厂自用电率	Δ	显热与潜热的比
η	综合供热效率		
	燃烧综合效率		
η_1	发电站效率		
η_2	输电效率		

目 录

第1章 导论与基础	1
1.1 导论	1
1.1.1 能源与环境	1
1.1.2 合理用能与热泵技术	2
1.1.3 低位热源与热泵技术	3
1.2 热泵的热力学基础	5
1.2.1 术语	5
1.2.2 状态方程与热力学定律	7
1.2.3 主要热力过程	8
1.2.4 传热的基本方程式	10
1.3 热泵的基本概念	12
1.3.1 热泵机组与热泵系统	12
1.3.2 热泵空调系统	13
1.3.3 热泵的分类	15
1.4 空气	18
1.4.1 湿空气的物理性质	18
1.4.2 我国的气候特点	19
1.4.3 空气低温热源的特点及其对机组的影响	22
1.5 空气源热泵的基础知识	24
1.5.1 几个名词术语	24
1.5.2 空气源热泵的季节性能系数 $HSPF$ 的估算方法	25
1.5.3 空气源热泵的特性	27
1.5.4 工质对热泵运行特性的影响	30
1.5.5 电热供暖与空气/空气热泵供暖的需热量	31
1.6 空气源热泵机组在我国暖通空调中的应用与发展	32
1.6.1 空气/空气热泵机组在我国的应用与发展	33
1.6.2 空气源热泵冷热水机组在我国的应用与发展	34
1.6.3 空气源热泵热水器在我国的应用与发展	36
1.6.4 空气源热泵在寒冷地区应用的展望	39
参考文献	40
第2章 空气源热泵机组	43
2.1 概述	43
2.2 热泵型窗式空调器	45

2.3	常规分体式热泵空调器	47
2.4	低温分体式热泵空调器	48
2.5	变频分体式热泵空调器	49
2.6	带热水供应的节能型分体式热泵空调器	51
2.7	空气源热泵冷热水机组	54
2.8	空气源热泵热水机(器)	58
2.9	空气源热泵多联机	64
	参考文献	69
第3章	空气源热泵机组的组成部件及其特性	71
3.1	概述	71
3.2	压缩机在空气源热泵机组的功能	72
3.3	空气源热泵压缩机的工作温度范围	72
3.4	空气源热泵对压缩机的特殊要求	74
3.5	空气源热泵机组常用的压缩机种类及主要特征	77
3.5.1	往复式压缩机	78
3.5.2	滚动转子式压缩机	83
3.5.3	涡旋式压缩机	86
3.5.4	螺杆式压缩机	92
3.6	热泵工质的替代	98
3.7	换热器	101
3.7.1	室外侧翅片管换热器	101
3.7.2	卧式壳管换热器	107
3.7.3	套管式换热器	109
3.7.4	焊接板式换热器	110
3.8	节流机构	111
3.8.1	节流机构的功能	111
3.8.2	常用的节流机构的形式	111
3.8.3	节流机构在空气源热泵中的设置方式	112
3.9	四通换向阀	113
3.9.1	四通电磁换向阀工作原理	113
3.9.2	四通换向阀型号规格	113
3.9.3	四通换向阀在运行中的问题及改进措施	113
3.10	气液分离器	115
3.10.1	低压气液分离器在空气源热泵中的作用	115
3.10.2	气液分离器设计中应考虑的问题	116
3.10.3	气液分离器对热泵机组启动的影响	118
3.11	贮液器、油分离器和过滤干燥器	118
3.11.1	贮液器	118
3.11.2	油分离器	119

3.11.3 过滤干燥器	119
3.12 蓄能及蓄能系统	119
3.12.1 空气源热泵蓄能的功能	119
3.12.2 蓄热材料	120
3.12.3 蓄热水池	121
3.12.4 空气源热泵蓄热系统	122
3.13 空气源热泵系统的特性分析	126
参考文献	128
第4章 空气源热泵的结霜	131
4.1 概述	131
4.2 结霜过程及机理	131
4.2.1 霜的形成条件	131
4.2.2 霜的形成过程	132
4.2.3 影响结霜的因素	134
4.3 描述结霜过程的数学模型	138
4.3.1 平板结霜模型	138
4.3.2 翅片管换热器结霜模型	143
4.3.3 紧凑式换热器结霜模型	148
4.4 空气源热泵结霜特性	149
4.4.1 结霜初期的传热增强现象	149
4.4.2 结霜过程对运行特性的影响	152
4.4.3 结霜过程对供热特性的影响	153
4.5 基于室外温、湿度的分区域结霜图谱	154
4.5.1 分区域结霜图谱的假定条件与范围	155
4.5.2 分区域结霜图谱主要参数的确定	155
4.5.3 分区域结霜图谱的“两线”与“三区”	157
4.5.4 分区域结霜图谱的“五域”	159
4.5.5 分区域结霜图谱的应用	159
4.6 空气源热泵抑制、延缓结霜的途径	161
4.6.1 提高入口空气温度	161
4.6.2 降低入口空气湿度	162
4.6.3 提高冷表面温度	162
4.6.4 换热器表面特性处理	163
4.6.5 无霜空气源热泵的实现途径	164
4.7 待解决问题	166
参考文献	167
第5章 空气源热泵的除霜	171
5.1 概述	171
5.2 除霜方法	171

5.2.1 常规除霜方法	171
5.2.2 新型蓄能热气除霜方法	173
5.3 除霜控制方法	176
5.3.1 常规除霜控制方法	176
5.3.2 空气源热泵的“误除霜”事故	179
5.3.3 几种典型“误除霜”事故特性	183
5.3.4 新型光—电除霜控制方法	204
5.3.5 新型 T-H-T 除霜控制方法	211
5.4 不同表面特性对结除霜过程的影响	218
5.4.1 不同表面特性动态结除霜过程	218
5.4.2 不同表面特性化霜水的排水过程	222
5.4.3 不同表面特性化霜水的蒸干过程	226
5.5 结—除霜过程的性能评价方法	229
5.5.1 结—除霜过程综合供热效率评价模型	229
5.5.2 结霜除霜损失系数评价方法	230
5.5.3 广义空气源热泵制热/除霜周期的性能模型	232
5.5.4 以用户侧出风(水)温度波动评价除霜方法	234
5.5.5 以除霜效率评价除霜方法	234
5.5.6 以测试周期内平均 COP 评价除霜控制方法	235
5.5.7 以机组性能恶化情况评价除霜控制方法	235
参考文献	236
第 6 章 空气源热泵在寒冷地区应用的技术进展	241
6.1 概述	241
6.2 空气源热泵在寒冷地区应用存在的问题	241
6.3 改善空气源热泵低温运行特性的技术措施	245
6.4 几种适用于寒冷气候的热泵循环	250
6.4.1 单级压缩喷液空气源热泵循环	251
6.4.2 准二级压缩空气源热泵循环	252
6.4.3 两级压缩热泵循环	254
6.4.4 单、双级耦合热泵循环	255
6.5 适用于寒冷地区应用的空气源热泵实例	256
6.5.1 适用于寒冷地区应用的热泵型分体式空调机	256
6.5.2 TV-ASHP 双级压缩变频空气源热泵	257
6.5.3 复叠热泵系统	259
6.6 单双级耦合热泵系统的应用基础与在寒冷地区的应用	260
6.6.1 双级耦合热泵系统形式	260
6.6.2 双级耦合热泵供暖系统在我国“三北”地区应用的预测分析	261
6.6.3 供单、双级混合热泵供暖系统用的空气/水热泵的实验研究	262
6.6.4 单、双级耦合热泵供暖系统应用实例	264

6.6.5 双级耦合热泵系统的经济性评价	268
6.7 低温空气源热泵机组的相关标准及技术指标	269
参考文献	272
第7章 空气源热泵的应用	274
7.1 概述	274
7.2 空气源热泵在暖通空调中的应用	274
7.2.1 空气源热泵不同地域的应用案例	274
7.2.2 空气源等多源组合热泵的应用案例	294
7.2.3 空气源热泵与其他热泵系统的应用案例	298
7.2.4 无霜空气源热泵的应用案例	299
7.2.5 空气源热泵在暖通空调系统中的应用前景	301
7.3 空气源热泵在余热回收中的应用	303
7.3.1 空气源热泵热回收机组	303
7.3.2 室内排风热回收系统	305
7.3.3 浴室排风热回收系统	310
7.3.4 泳池能量回收系统	311
7.4 用空气/水热泵替代传统水环热泵空调系统中的锅炉	312
7.5 空气源热泵在物料干燥中的应用	313
7.5.1 工作原理	314
7.5.2 木材的干燥	315
7.5.3 茶叶的干燥	316
7.5.4 种子的干燥	317
7.5.5 农副产品的干燥	317
7.5.6 非传统产品的干燥	317
参考文献	318
第8章 空气源热泵系统设计	320
8.1 相关规范、法规与参考资料	320
8.1.1 相关文件政策	320
8.1.2 相关设计规范及指南	320
8.1.3 设计的原始资料	321
8.2 常规空气源热泵空调系统设计	322
8.2.1 设计程序	322
8.2.2 冷热源系统设计	323
8.2.3 末端系统设计	334
8.2.4 管网系统设计	342
8.2.5 设计示例	348
8.3 空气源热泵多联机空调系统设计	354
8.3.1 设计程序	354
8.3.2 方案设计	355

8.3.3 室内、外机的设计选型 356

8.3.4 系统配管设计 364

8.3.5 设计示例 367

8.4 空气源热泵热水供应系统设计 371

8.4.1 设计程序 371

8.4.2 热源设计 371

8.4.3 管网系统设计 376

8.4.4 设计示例 385

附录 A 国内热泵技术的主要著作、教材、译著和标准、图集等 389

参考文献 395

第1章 导论与基础

1.1 导论

1.1.1 能源与环境

1. 我国能源与环境污染问题的现状与特点

能源是人类赖以生存和发展的物质基础。能源的利用是实施可持续发展战略的关键问题之一。我国能源与环境污染问题现状与特点,可归结为:

(1) 中国是世界能源消耗大国。据统计,从1978年到2014年改革开放的36年间,能源消费总量从6.3亿t标准煤增长到42.6亿t标准煤,大约增加了6.76倍;2014年,全世界一次能源总消费量为180.9亿t标准煤,大约占全世界的23.5%。但是我国人均能源消费水平很低,2014年中国人均消费量只有3.05t标准煤,不及OECD(经合组织)国家6.37t标准煤的一半。2014年美国人均能耗为10.4t标准煤,为我国的3.41倍。

(2) 我国的能源利用效率低。通常用单位国内生产总值所消费的能源量(称GDP能耗强度)来衡量能源利用率的大小。我国GDP能耗强度很高,大约是世界平均水平的2.5倍,OECD国家的4.7倍。这也表明,我国的节能潜力很大。因此,我们应积极开展节能研究工作,以满足我国经济发展对能源增长的要求。这为热泵技术的推广与应用提供了机遇。

(3) 我国是世界上煤炭最大的生产国和消费国,2014年中国煤炭生产总量为38.7亿t,占世界煤炭生产量的47.4%,我国能源消费中煤炭占66.0%。而且学者预测,在21世纪中叶之前,我国一次能源的供应与消费仍将以煤为主,并充分利用水能、天然气、石油、核能等,形成以煤为主多元化的能源结构体系。正因为这种以煤为主的能源结构体系,会对我国环境造成严重的污染。煤炭燃烧所产生的温室气体的排放量比燃烧同热值的天然气高61%,比燃油高36%。2014年我国CO₂排放量为976110万t,占世界总量的27.5%,仅次于美国,居世界第2位,其中85%是由燃煤排放的。2014年我国SO₂排放量为1974.4万t,居世界第1位,其中85%是由燃煤排放的;排放烟尘为12.36Mt,全国烟粉尘排放的70%源于煤炭为主的化石能源燃烧。我国城市大气环境污染十分严重,约有57%的城市颗粒物超过国家限制值;有48个城市的SO₂浓度超过国家二级排放标准;有82%的城市出现过酸雨,面积已达国土面积的30%;SO₂和酸雨造成的经济损失已约占全国GDP的2%。2014年,已开展空气质量新标准监测的161个城市中,16个城市空气质量达标(优于国家二级标准),占9.9%;145个城市空气质量超标,占90.1%。从各指标来看,SO₂达标城市比例为88.2%;NO₂达标城市比例为62.7%;PM₁₀达标城市比例为21.7%;PM_{2.5}达标城市比例为11.2%。2014年出现酸雨的城市比例为44.3%,酸雨频率在25%以上的城市比例为26.6%,酸雨频率在75%以上的城市比例为9.1%。上述数据明确告诉我们,化石能源的大量开发和利用,是造成环境污染的主要原因之一。

能源与环境污染问题已成为制约我国经济和社会可持续发展,保证能源安全和全面建

设小康社会的瓶颈问题。因此,如何建立可持续发展的能源与环境系统是我们急需解决的问题。为此,我国积极采取提高能源效率和改善能源结构的措施,以解决能源和与能源消费相关的重大环境问题。

2. 暖通空调领域的能源与环境污染问题

进入 21 世纪,随着人们生活水平的提高,对改善居住与工作环境的要求(健康、舒适)越来越迫切和强烈。因此,暖通空调技术将会比 20 世纪有更大的发展和更广泛的应用前景。暖通空调技术的发展和广泛的应用,将会在造福于人类的同时,也会为人类带来新的危害,其危害表现在:

(1) 暖通空调使建筑能耗急剧增长。以美国为例,建筑物中的能耗约占总能耗的 33.6%,而其中约有 80% 的能耗(约占总能耗 26.6%)用于供暖、空调和热水供应。我国建筑能耗也很巨大,随着城市化的发展、人居建筑面积的增大和人们生活水平的提高,我国建筑能耗必将大幅度增长。1996 年建筑能耗为 3.30 亿 t 标准煤,占能耗总量的 24%,到 2014 年,我国能源消耗总量为 14.1 亿 t 标准煤,占国家总能耗 33%。其中暖通空调能耗占很大比例。如我国“三北”地区 2012 年供暖能耗约为 1.71 亿 t 标准煤;据统计,2012 年全国房间空调器用电 2975 亿 kW·h,已占全社会终端用电量的 6.8%^[1]。空调系统的电力负荷比例日益增加。2012 年夏季,合肥电网负荷达 380.5 万 kW,创下今年入夏以来的历史新高,空调负荷约 120~150 万 kW,占电网负荷近四成。夏季空调负荷高峰期内,全国许多省市出现频繁的拉闸限电现象。

(2) 暖通空调用能排出大量的 CO₂、SO₂ 和粉尘等有害物,导致环境污染(如全球变暖化、酸雨等)。据统计^[2],暖通空调领域在我国温室气体排放中的贡献约为 15%,世界八大环境问题中名列前三位(温室气体排放问题、臭氧层破坏问题、酸雨问题)的均与暖通空调领域的能源消耗等直接相关。

1.1.2 合理用能与热泵技术

这里合理用能是指合理使用高位能的问题。众所周知,实际的能量利用过程有两个特性:量的守恒性和质的贬值性。任何用能过程,实质上也可以说成能的量与质的利用过程。要使热量得到合理利用,必须合理使用高位能,必须做到按质用能。因此说,由燃料(煤、燃油、燃气、电等)直接提供给暖通空调所需的低温热能,即使在不损失热量的条件下,室内所得到的热量最多为燃料发热量的 100%,也应该认为是一种巨大的浪费。因为在这种情况下,储存在燃料中的化学能所具有的做功能力未加合理利用而被贬值了。下面用个简单例子说明此问题。

某建筑物热损失为 18kW,现向室内供暖。我们可以选用两种用电能的供暖方案,如图 1-1 所示。

图 1-1 (a),采用电阻式电加热器,直接加热室内空气,向室内补充 18kW 热量,以维持室内室温 20℃,则需要供给的电能为 18kW。

图 1-1 (b),采用电动空气源热泵供暖方案。电动空气源热泵由制冷压缩机 1,室内空气/制冷剂换热器 2、节流机构 3 和室外空气/制冷剂换热器 4 组成。其制热性能系数 ϵ_h 为 3,由此可见,热泵向室内供 18kW 热量时,驱动热泵所消耗的电能仅为 6kW。

比较图 1-1 (a) 与 (b),可以明显地看出:

(1) 在维持室内温度为 20℃ 的条件下,图 1-1 (a) 需要消耗高位能(电) 18kW。而图 1-1 (b) 却只要消耗 6kW 电能,这仅用图 1-1 (a) 的 1/3 电能,却完成了同样向室内