

文章编号: 1671-6612 (2023) 04-526-09

新型材料在制冷空调中应用的研究进展

孙尚瑜¹ 许树学¹ 刘海波² 勾倩倩¹ 马国远¹ 荣维来¹

(1. 北京工业大学 北京 100124;

2. 北京廷越科技发展有限公司 北京 210301)

【摘要】 新型材料应用在制冷空调设备中可以提升系统性能, 或减少常规金属及非金属材料的使用, 在制冷空调行业促进我国实现“双碳”目标。对新型材料在制冷空调中应用的进展进行阐述, 包括在压缩机、换热器及其他部件中的使用, 最后对新型材料的发展趋势进行了展望。

【关键词】 制冷空调; 新型材料; 压缩机; 换热器

中图分类号 TB64 文献标识码 A

Research Progress of Application of New Materials in Refrigeration and Air Conditioning

Sun Shangyu¹ Xu Shuxue¹ Liu Haibo² Gou Qianqian¹ Ma Guoyuan¹ Rong Weilai¹

(1.Beijing University of Technology, Beijing, 100124;

2.Tingyue Technology Development Co., Beijing, 210301)

【Abstract】 The application of new materials in refrigeration and air conditioning equipment can improve the system performance, or reduce the use of conventional metal and non-metal materials, and promote China's "double carbon" goal in refrigeration and air conditioning industry. In this paper, the application progress of new materials in refrigeration and air conditioning is described, including the use in compressors, heat exchangers and other components. Finally, the development trend of new materials is prospected.

【Keywords】 Refrigeration and air conditioning; New materials; Compressor; Heat exchanger

0 引言

随着不可再生资源的不断消耗, 节能环保的新型材料开始受到广泛关注。新型材料一般具有传统材料不具备的高性能和新功能, 其应用可以提高产品的性能, 延长使用寿命, 降低成本。材料在很多国民行业扮演重要角色, 制冷空调领域也不例外。蒸汽压缩制冷空调系统在实际运行中存在能耗高, 效率低, 易结霜等问题, 新型材料的使用可以在一定程度上改善其综合使用效果。目前, 国内外有很多关于新型材料在制冷空调中应用的研究, 具体可分为压缩机电机材料, 换热器及换热器涂层材料,

用于系统热量存储和热回收的材料及其他。

本文对几种典型的新型材料在制冷空调应用进展进行了总结, 对其应用技术细节进行了介绍, 最后对材料学科在制冷空调系统的发展趋势进行了评述和展望。

1 压缩机电机材料

压缩机是制冷空调系统的核心部件, 随着人们对家用空调压缩机能效和噪声的要求不断提高, 变频压缩机的使用已经普及。变频压缩机的核心部件是永磁同步电机, 其定子绕组形式有集中式和分布

作者简介: 孙尚瑜 (1998.09-), 女, 硕士研究生, E-mail: 481143017@qq.com

通讯作者: 许树学 (1981.08-), 男, 博士, 副研究员, E-mail: xsx@bjut.edu.cn

收稿日期: 2023-03-15

式绕组, 转子一般都在内置磁铁槽中插入烧结钕铁硼永磁材料的磁铁。电磁激振力由转子励磁谐波和定子激磁谐波造成, 径向电磁激振力是导致压缩机振动噪声的主要因素^[1]。压缩机电机中用到的新型材料主要是磁性材料, 稀土永磁材料钕铁硼 (NdFeB) 的出现为变频压缩机的急速发展提供了可能^[2,3]。变频压缩机的耗电量只占定频压缩机的耗电量的 50%, 且具有体积小、重量轻、高效节能以及使用寿命长等优点^[4]。但也存在整体稳定性差的弊端^[5]。刘先起等^[6,7]设计了油冷压缩机稀土永磁同步电机, 增加了电机连接的稳固性; 且利用缓冲机构、第一气弹簧和缓冲架互相配合, 设计了压缩机直驱一体式稀土永磁同步电机, 可以有效改善其稳定性。

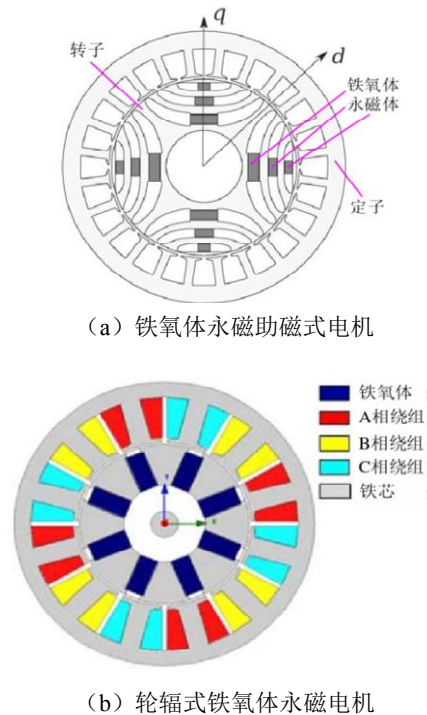


Fig.1 Ferrite permanent magnet motor

稀土是国家战略稀缺资源, 总储量不断下降。为减少稀土在电机中的使用, 研究者将目标转向铁氧体等非稀土永磁电机材料。比如格力电器将变频压缩机中的稀土永磁同步电机替换为磁阻电机, 实现了空调变频压缩机的无稀土化, 结合压缩机和电机控制技术有效解决了效率和噪声的问题^[2]。实际运行中, 铁氧体永磁电机存在低磁通密度的问题, 王帅^[8]提出了采取提高磁阻转矩利用率的方式提

高电机转矩密度, 比如, 在磁阻电机中加入铁氧体永磁材料提高轴磁通的铁氧体永磁电机 (见图 1 (a)), 采用轮辐式结构实现聚磁效应的铁氧体永磁电机 (见图 1 (b))。Jani S N 等^[9]通过添加少量稀土永磁材料到铁氧体中, 获得合适的磁通密度和更高的退磁, 制造出最佳性能的电机。周博等^[10]认为通过配合合理高度差, 铁氧体永磁电机性能有望超过稀土压缩机, 且具有成本优势。

变频压缩机的电机从稀土永磁材料逐渐向无稀土化发展, 可以有效节约不可再生资源, 降低成本。铁氧体材料有望成为稀土永磁材料的替代, 其性能的提高还需进一步研究。

2 在换热器中的应用

2.1 换热器材料

在金属换热器的材料中, 铜散热效果比较好, 但造价比铝高 3 倍以上。铝也具有优良的导热性能, 纯铝导热系数可达 237W/(m·K), 表 1 所示为换热器的几种常用金属和非金属材料的导热系数^[11]。近年来, 铝代铜换热器备受关注, 如图 2 所示铝制换热器。王丽丹等^[12]发现, 使用铝热交换器和铜铝连接管路可降低 25%以上的空调成本。目前我国已生产出耐腐蚀性好、强度高的铝合金, 如 3003 铝合金是目前平行流式换热器和整体式全铝换热器的优选材料, 其具有高效、紧凑、质量轻且成本低的优点。但铝生产过程中有大量的温室气体排放, 研究铝代铜合适的比例以及该比例与温室气体排放之间的动态关系是关键的问题, Guan Y 等^[13]建议这一比例应保持在 65%~75%的水平。

表 1 不同材质的导热系数

Table 1 Thermal conductivity of different materials	
塑料	导热系数/(W/(m·K))
聚乙烯	0.3
聚苯烯	0.22
聚偏氟乙烯	0.18
聚四氟乙烯	0.18~0.21
镁	103
铝	200
铜	401
银	417



图2 铝制换热器

Fig.2 Aluminum heat exchanger

非金属材料的换热器包括：陶瓷换热器、石棉换热器、玻璃换热器和塑料换热器等。该类换热器导热系数虽低，但具有良好的抗腐蚀能力，且表面光滑不易吸附污垢。常见的非金属换热器为陶瓷换热器和塑料换热器。陶瓷换热器多用在高温换热领域，主要制备材质有： Si_3N_4 、粘土、刚玉、锆英石、钦酸铝、莫来石、荃青石、 SiC 等^[14]。塑料换热器由聚合物材料加工而成，如聚偏氟乙烯（PVDF）、聚四氟乙烯（PTFE）、聚丙烯（PP）、聚乙烯（PE）等，其具有密度轻、耐腐蚀、抗结垢、可塑性强、成本低等优点。PP 比重小，可塑性好，价格低、热稳定性好，一般使用温度为 $-30\sim 140^\circ\text{C}$ ，熔点大于 165°C ，且机械性能和耐酸碱腐蚀性能好^[15]，图3（a）为PP列管式换热器。氟塑料换热器（见图3（b））因有较宽的温度范围、耐老化且价格低而备受关注，但氟塑料导热系数低的缺点限制了其应用范围。为解决这类换热器换热能力不足的问题，胡自成等^[16]定量比较了典型金属换热器和氟塑料换热器的热阻，认为氟塑料换热器可以通过强化管外对流换热和降低管壁导热热阻来提升换热性能。Zhang W 等^[17]基于石墨烯极高的热导率，提出了一种新型的石墨烯-PFA 复合材料用于提高换热器的换热能力，同时满足换热器传热和耐腐蚀的要求。梁佳鹏等^[18]研究发现，随着复合材料中石

墨烯含量增加，传热系数随之增加。复合氟塑料换热器有很大的发展潜力，在生产方面有很好的减排效果。



(a) PP 列管式换热器



(b) 氟塑料换热器

图3 非金属材料换热器

Fig.3 Non-metallic heat exchanger

2.2 换热器表面涂层材料

换热器表面涂层主要不是为了提高换热系数，一般用于改进其吸水性或除霜性能。Pu L 等^[19]对涂覆亲水、干燥剂和疏水涂层的微通道换热器的防冻效果进行了比较测试，结果表明疏水涂层防冻效果显著。有研究者对比了不锈钢 304、多孔 SiC 陶瓷绝缘涂层、特氟龙和特氟龙+6wt%纳米碳黑/石墨四种换热器翅片表面的抑霜能力，得出涂覆特氟龙+6wt%纳米碳黑/石墨疏水性涂层材料的换热器翅片更适用于低温高湿的环境^[20,21]。还有研究者提出了一种外表面涂覆微米或纳米疏水层的自动除霜或除冰的换热器，该类换热器不仅可以延缓霜层的生长，还可在短时间内通过热量和重力实现动态除霜^[22,23]。刘祥红等^[24]发现，纳米材料涂层除霜效果是普通材料涂层除霜效果的两倍左右。在新型复合除霜方式研究方面，周国峰等^[25]将环氧树脂石墨烯的疏水性能和电加热的除霜方式复合，其效果比传统电加热除霜方式的效果更具优势。

换热器表面涂覆干燥剂涂层可以将潜热和显

热同时处理,从而减小干燥剂冷却系统在除湿过程中释放的吸附热对能量利用率和除湿效果的影响。Ge T S 等^[26]分别将干燥剂硅胶涂层和聚合物涂层涂覆在翅片管式换热器上进行比较,得出硅胶涂层换热器的性能更优,该除湿系统和干燥剂涂层换热器如图 4、图 5 所示。这类干燥剂除湿系统由太阳能集热单元、干燥剂除湿单元和风道单元组成,采用冷却塔为干燥剂除湿单元提供冷却水,太阳能集热器为除湿过程提供热水,干燥剂除湿单元为两个带硅胶涂层的翅片管式换热器,该系统通过切换水阀和空气阀进行连续除湿,为房间提供舒适的供气条件。

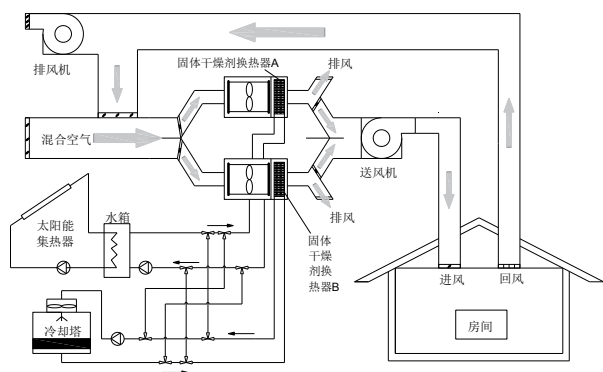


图 4 干燥剂除湿空调系统图

Fig.4 desiccant dehumidification air conditioning system diagram

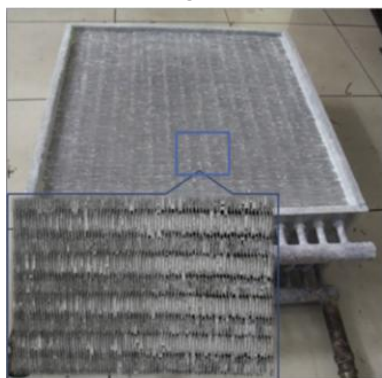


图 5 固体干燥剂涂层换热器

Fig.5 Solid desiccant coated heat exchanger

除湿换热器可有效地处理潜热负荷,但由于吸附热的存在导致其显热负荷处理能力不足。曹伟等^[27]提出在除湿换热器后串联一个显热换热器,实验中采用涂覆硅胶及硅胶复合的翅片管式换热器作为除湿换热器,未涂覆材料的翅片管式换热器作为显热换热器,图 6 为对比结果图。该系统可以实现热湿同步处理,提高系统的制冷量与性能。



图 6 除湿换热器（左）和显热换热器（右）

Fig.6 Dehumidifying heat exchanger (left) and sensible heat exchanger (right)

用于除湿换热器的干燥剂材料有硅胶、复合干燥剂和分子筛,但使用这些材料很难使其吸附能力达到数量级的提高。金属有机框架材料(MOF)是一种有机-无机杂化的新型多孔材料,具有强大的吸附能力、高比表面积及高孔隙率。公开文献报道了许多具有高吸水率和良好稳定性的 MOF 材料,图 7 为新型 MOF 材料结构图。刘忠宝等^[28]将水浴法成功合成的 MIL-101 (Cr) 材料应用到干燥剂除湿系统中,相比于硅胶干燥剂材料, MIL-101 (Cr) 除湿换热器在高湿环境下更具优势。葛镭榕等^[29]提出了一种铝基 MOF 的新型合成方式,并制备了 MOF 除湿换热器,这类换热器的除湿换热能力是硅胶除湿换热器的 2~3 倍。

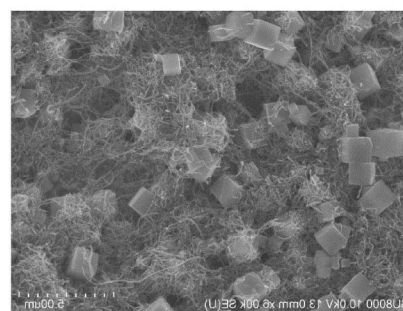


图 7 新型 MOF 材料结构图

Fig.7 Structure diagram of new MOF material

3 在蓄能和热回收中的应用

3.1 蓄能材料

蓄能技术在制冷空调中应用最成熟的是水或冰蓄冷/热,近几年相变材料的研发成为热点。相变材料可分为无机类和有机类,水合盐材料等无机类因储能密度高、相变温度固定、价格低廉、易获得,在空调蓄冷领域广泛应用;有机类相变材料的

相变温度普遍较高，在蓄热领域应用更多。表 2 所示为空调蓄冷用相变材料分类及其热物性^[30]。

表 2 空调蓄冷用相变材料分类及其热物性

Table 2 Classification and thermophysical Properties of phase change materials for air-conditioning cold storage

类别	相变材料组成（名称）	相变温度 /℃	相变潜热 /（kJ/kg）	导热系数 /（W/(m·K)）
无机类	NH ₄ Cl、KCl、K ₂ SO ₄ 、CMC、六偏磷酸钠、硼砂、硼酸	8.25	114.4	—
	NH ₄ Cl、KCl、硼砂、PAAS	6.40	141.0	0.547
	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	7.33	135.0	—
	NH ₄ Cl、TiO ₂ 纳米颗粒、硅胶粉	10.30	142.7	—
有机类	有机相变复合材料 A	7.69	149.0	0.430
	蓄冷材料 D	6.40	119.0	—
	十六烷和十四烷	9.40	145.9	—
	辛酸、肉豆蔻醇	6.90	169.1	—
	月桂酸、正辛酸	7.73	134.0	0.170
	十四烷（芯材）阿拉伯胶和明胶（壳材）	7.92	191.0	—

蓄热材料按其蓄热方式可分为显热蓄热材料、潜热蓄热材料^[31]。常见的显热材料以及相变潜热材料如表 3、表 4 所示^[32]。

表 3 显热蓄热材料

Table 3 sensible heat storage material

材料	温度范围/℃	材料成本/元/kg	优点	缺点
水	0~100	0.01	经济易得、无毒无害、环境友好、不燃、循环稳定	使用温度低、存在凝固、沸腾等现象
导热油	-30~400	2~80	传热效率高、易于调控温度、基本无腐蚀	价格高、使用温度较低、易燃、蒸气压大、易分解、寿命短
熔盐	130~850	3.5~20	传热性能好、系统压力小、使用温度较高、价格低、安全可靠	容易凝固、冻堵管路、有腐蚀性、部分有毒
岩石	<700	0.05~1.4	廉价易得、无毒、不燃、热性能稳定、无腐蚀性	热效率低、需要传热介质、循环稳定性较低
混凝土	<550	0.3~1	化学性能稳定、传热性较好、价格便宜	高温开裂、蓄热密度较差、需要传热介质
耐火砖	<1200	7~12	化学稳定、使用温度范围广、强度高	成本高、需要传热介质

表 4 潜热蓄热材料

Table 4 latent heat storage materials

材料	材料成本/ 元/kg	优点	缺点
冰	0.01	无毒无害、环境友好、不燃、价格低、无腐蚀性	相变温度单一、体积变化较大
水合盐	1~10	高热导率、相变体积变化小、热应力效应小、毒性低、价格低	相分离、过冷度较大、腐蚀性较强、长期运行循环稳定性差
石蜡	6~15	化学惰性和稳定性好、体积变化和蒸汽压力较小、无腐蚀性、无相分离、无过冷	导热率低、和塑料材料不兼容、适度可燃性
脂肪酸	8~25	价格较低、过冷度小、化学性质稳定、无相分离	导热率低、循环稳定性差
无机盐	2~15	成本低、导热性好、循环稳定性好	相变体积变化较大、部分强腐蚀性和毒性

相变材料按其相变温度可分为中低温相变材料 ($0^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$) 和高温相变材料 ($120^{\circ}\text{C}\sim 850^{\circ}\text{C}$)。中低温蓄热材料的物理稳定性、热稳定性、导热性和腐蚀性会直接影响其性能, 在热负荷的移峰填谷、太阳能取暖、新型节能建筑用材、空调蓄冷和低温蓄冷等领域应用较多; 高温相变材料主要包括单纯盐金属与合金、碱、混合盐、氧化物等, 主要在小功率电站、太阳能发电、工业余热回收等领域应用^[33,34]。邓子昂等^[35]设计了一种螺旋管式低温相变蓄热末端装置并研究其蓄放热特性, 结果表明热媒温度为 50°C 时, 蓄热和放热时间均为 8 小时, 影响因素包括热媒温度、流量、传热面积以及风速。相变材料具有潜在储能潜力的特点, 但存在导热系数低、熔化和凝固周期有限等问题。为提高相变材料辅助储热的性能, Kurnia J C 等^[36]提出多个 PCM、微囊或纳米囊 PCM 浆料等方法。陶汉中等^[37]研究发现选取水、月桂酸、石蜡 3 种蓄热工质对热管式组合工质蓄热系统的蓄热时间比热管式月桂酸蓄热系统节省了约 41.67%。郭茶秀等^[38]针对相变传热过程中存在的问题, 提出了强化相变传热的方法, 包括在蓄热器内添加泡沫金属、在蓄热材料侧添加金属固体或膨胀石墨等。

3.2 热回收材料

热回收利用的方式可分为直接利用、热电转换、提质综合利用等^[39]。热电转换是将水蒸气朗肯循环或者有机朗肯循环与循环工质吸收的热量结合, 带动发电机发电。常见的用于热回收的吸附热转化材料有沸石、硅胶、磷酸铝等。彭佳杰等^[40]将硅胶-水吸附式制冷机组用于数据中心的余热回收中, 同时为服务器提供充足的冷量, 满足了服务器直接水冷要求。王博雅等^[41]提出十四酸与月桂酸按 1:1 配比作为空调冷凝热回收的相变材料。Jihye C 等^[42]提出一种将相变材料插入介孔沸石中的吸附热回收材料, 如图 8 所示。该介孔沸石具有中孔和微孔结构, 中孔空间插入 PCM 材料储热, 微孔空间则被用作吸附场。金属有机框架 (MOFs) 是一种新型微孔材料, 与传统的吸附材料相比, MOFs 具有高比表面积、多孔性、多功能性和吸附过程特性, 多用于空调或低级废热回收, 是有前途的低品位废热材料^[43]。MOFs 结构中金属-配体框架具有长期热稳定性, 通常在 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ 之间, 很少超过 300°C , 废热回收效果远好于沸石^[44]。

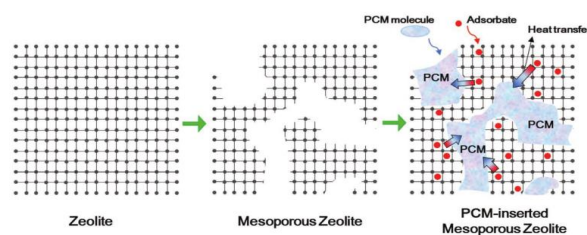


图 8 含 PCM 的介孔沸石

Fig.8 Mesoporous zeolite containing PCM

此外, 热电材料是一类具有热电转换性能的特殊半导体材料, 可用于炼钢高炉废热、汽车尾气余热、垃圾焚烧余热以及其他低品位热能的回收。热电材料根据温度分为低温领域和高温领域热电材料。低温领域热电材料主要为稀土类金属化合物, 目前室温环境下 Bi_2Te_3 系性能最佳, 应用最为广泛; 中温领域有 PbTe 、导热高分子材料聚苯胺等^[45]。

4 其他

4.1 新型保温材料

保温材料主要用在建筑及冷冻冷藏领域, 选用保温材料依据包括: 导热系数小、密度小、防火性能强、使用温度范围大、价格便宜、抗水蒸汽渗透性能好等。合适的保温材料不仅可以有效减少热媒传输过程中的散热损失、减少热能损耗, 而且能节约燃料消耗。按材料属性可分为有机、无机及金属复合材料; 按结构可分为硬质、发泡、纤维结构^[46], 图 9 为常见的保温材料产品, 包括岩棉、聚苯乙烯、聚氨酯等。



(a) 岩棉



(b) 聚苯乙烯



(c) 聚氨酯

图 9 保温材料

Fig.9 Thermal insulation materials

表 5 保温材料性能参数表

Table 5 Performance Parameters of Thermal Insulation Materials

保温材料分类	导热系数 W/(m·K)	抗拉强度 MPa	防火性	烟密度	氧指数	熔融
模塑聚苯板	0.042	0.10	阻燃 B2	68	26	带火滴
挤塑聚苯板	0.030	0.10	阻燃 B2	66	28	带火滴
聚氨酯硬泡	0.024	0.10	阻燃 B2	51	29	带火滴
岩棉	0.040	0.08	不燃 A 级	0	不燃	无
改性酚醛防火保温材料	0.030	0.10	等同 A 级	0	45	无

4.2 碳纤维材料的应用

碳纤维具有轻质量和高强度等特点,近年来,碳纤维用途趋于多样化,使用碳纤维作为制冷和采暖领域设备材料的技术逐渐普及。磁制冷技术具有高效环保的特点,但在其规模化应用中无法制备出大体积磁制冷功能的合金。针对该问题,杨元奎等^[49]提出碳纤维增强的磁制冷功能合金复合材料制备装置与制备方法。此外,吸附式制冷具有无CFCs问题、可利用低品位热能驱动、价格效用比高等特点,但其存在制冷系数偏低的问题,而提高

有机保温材料具有保温效果好、价格便宜、致密性高等优点,在国内保温材料市场的占有率达90%,表5为常用保温材料的性能参数。聚氨酯硬泡是目前无机和有机保温材料导热系数最低的一种材料,具有成本低廉和装配方便的优势,在冰箱、冰柜、冷链物流以及建筑外墙保温领域应用非常广泛^[47]。但保温材料制备过程所用的传统发泡剂含有氯、氟等卤素,产生的氯氟烃严重破坏大气臭氧层。毕戈华^[48]研发的聚氨酯发泡剂未检测出氯元素、氟元素,且ODP与GWP指标检测结果均显示为0。

制冷工质对的吸附效率是解决问题的关键。公绪金等^[50]阐述了以活性炭为吸附剂来强化吸附式制冷能效的研究进展,并认为提高活性炭调控技术和各项性能可促进吸附式制冷系统的发展。现有的复合相变材料制备工艺复杂且成本较高,导致其应用受到一定的限制,如相变胶囊、碳纳米管等。为此,罗春欢等^[51]提出了一种中低温管式碳纤维复合相变材料及其制备方法来应对现有技术的不足,如图11所示制备流程图,可有效降低制备成本和工艺复杂度。

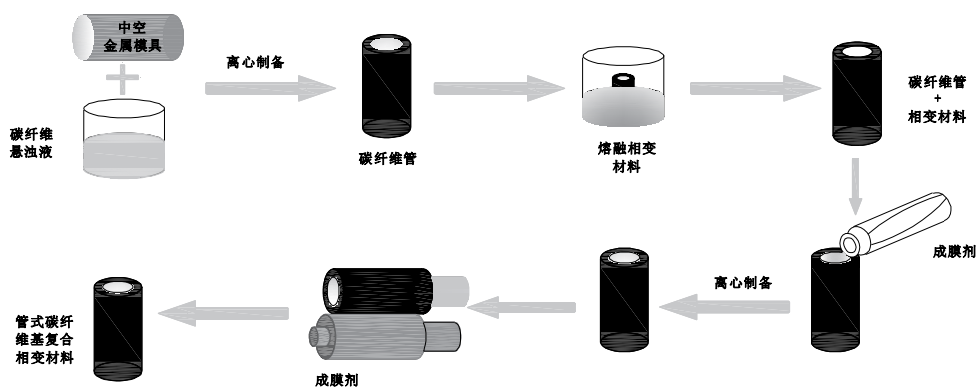


图 11 碳纤维制备流程图

Fig.11 Flow chart of carbon fiber preparation

5 结论

新型材料在制冷空调中应用,除了提高系统运行性能,还可以拓展其他方面的能力。目前,国内外有许多新型材料被研发出来应用在制冷空调领域,取得了很好的成果。在变频空调压缩机中,电机用的稀土材料,将逐渐被铁氧体代替;铝代铜换热器已被推广应用,非金属塑料换热器的导热系数不断被提高,具有广泛应用的潜力;针对换热器表面结霜结垢问题,表面涂层的选择至关重要,纳米材料、硅胶以及MOF材料涂层应用效果良好;无机类相变材料在空调蓄冷领域应用广泛,有机类相变材料则在蓄热领域应用广泛;建筑节能保温材料可分为有机、无机及金属复合材料,聚氨酯硬泡节能保温材料是导热系数最低的一种材料;碳纤维材料逐渐被广泛应用于制冷设备中,如碳纤维电地暖、碳纤维带嵌入地暖系统的新型地暖系统、碳纤维增强磁制冷、碳纤维复合相变材料等,未来更多的新型材料将会使用到制冷空调设备中。

参考文献:

- [1] 张德金,江波,邱小华.变频空调压缩机电机的振动噪声优化研究[J].家电科技,2022,4(4):16-19,24.
- [2] 黄辉.新型高效无稀土磁阻电机的研发及其在变频压缩机和空调中的应用[Z].2011.
- [3] 孙永泰.稀土永磁电机及控制器在压缩机中的应用[J].制冷,2012,31(1):41-44.
- [4] 冯仁宽.空调压缩机的控制系统研究[D].贵阳:贵州大学,2022.
- [5] Leak-Free Pumps and Compressors Handbook[M].1995.
- [6] 刘先起,高明真.一种油冷压缩机稀土永磁同步电机[P].2021-07-27.
- [7] 刘先起,高明真.一种稳定性好的压缩机直驱一体式稀土永磁同步电机[P].2022-02-11.
- [8] 王帅.空调压缩机用高凸极率非稀土永磁电机的设计与控制[D].镇江:江苏大学,2020.
- [9] Jani S N, Jamnani J G. Performance analysis and comparison of PM-Assisted synchronous reluctance motor with ferrites and Rare-earth magnet materials[J]. Materials Today: Proceedings, 2022,62:7162-7167.
- [10] 周博,米泽银,张辉.压缩机用铁氧体永磁电机定子高度差研究及应用[J].日用电器,2017,(6):51-54.
- [11] Negar M, Mohammad A, Majid B. Thermal performance of heat and water recovery systems: Role of condensing heat exchanger material[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2020,1.
- [12] 王丽丹,曾庆亚,曲华,等.“铝代铜”技术在空调制冷行业中的应用[J].家电科技,2018,(S1):254-257.
- [13] Guan Y, Shao C, Tian X, et al. Carbon footprint attributed to aluminum substitution for copper in the Chinese indoor air conditioner industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2013,51:126-132.
- [14] 栗海峰.无机非金属陶瓷换热器材料的制备与应用[D].武汉:武汉理工大学,2011.
- [15] 杨璐铭.聚丙烯中空纤维换热管蒸汽冷凝传热强化研究[D].天津:天津理工大学,2022.
- [16] 胡自成,陈开楠,殷地喜,等.翅片管氟塑料换热器的流动传热特性[J].江苏大学学报(自然科学版),2022,43(5):593-598.
- [17] Zhang W, Zuo H, Zhang X, et al. Preparation of Graphene-Perfluoroalkoxy Composite and Thermal and Mechanical Properties[J]. Polymers, 2018,10(7).
- [18] 梁佳鹏,左海滨,张万龙,等.石墨烯-PFA复合材料换热器与金属换热器的传热性能对比[J].热科学与技术,2022,21(1):51-56.
- [19] Pu L, Liu R, Huang H, et al. Experimental study of cyclic frosting and defrosting on microchannel heat exchangers with different coatings[J]. Energy & Buildings, 2020,226.
- [20] 张青莉.涂层材料在空气源热泵蒸发器除霜技术中的应用研究[D].郑州:华北水利水电大学,2016.
- [21] 单雅婷.空气源热泵涂层除霜节能特性研究[D].郑州:华北水利水电大学,2021.
- [22] 陈奇良,周孝清,李峰,等.一种可自动除霜或除冰的换热器[P].2021-06-01.
- [23] B B J, R S B, Dac N T, et al. Dynamic defrosting on nanostructured superhydrophobic surfaces.[J]. Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids, 2013,29(30):9516-9524.
- [24] 刘祥红,刘湘云,刘良德,等.不同涂层表面对结霜过程影响的实验研究[J].建筑热能通风空调,2020,39(12):25-27.
- [25] 周国峰,单雅婷,刘明辉.石墨烯电热涂层在热泵机组抑霜/除霜上的应用研究[J].能源研究与利用,2021,(1):29-35.

- [26] Ge T S, Dai Y J, Wang R Z, et al. Experimental comparison and analysis on silica gel and polymer coated fin-tube heat exchangers[J]. *Energy*, 2010,35(7): 2893-2900.
- [27] 曹伟,葛天舒,郑旭,等.除湿换热器串联换热器强化除湿降温性能实验研究[J].*制冷学报*,2017,38(4):59-66.
- [28] 刘忠宝,韩君地,郎辉伟.涂覆MIL-101(Cr)干燥剂的翅片管换热器的实验研究[J].*制冷与空调*,2021,35(1): 1-12.
- [29] 葛镭榕,王如竹,葛天舒.铝基MOF合成及其在除湿换热器中的应用[J].*工程热物理学报*,2023,44(2):283-288.
- [30] 杨晋,殷勇高.空调蓄冷用相变材料的研究进展[J].*制冷学报*,2022,43(3):37-44.
- [31] 吴会军,朱冬生,李军,等.蓄热材料的研究进展[J].*材料导报*,2005,(8):96-98.
- [32] 王俊,曹建军,张利勇,等.基于分布式能源系统的蓄冷蓄热技术应用现状[J].*储能科学与技术*,2020,9(6): 1847-1857.
- [33] 夏焱.双层相变蓄能地板辐射供冷暖空调系统构建及试验研究[D].南京:东南大学,2015.
- [34] 李洋,王彩霞,宗军,等.供暖用中低温相变储热材料的筛选与测试[J].*能源与节能*,2020,(1):44-48.
- [35] 邓子昂,张华玲.太阳能-空气源热泵供暖用低温相变蓄热末端装置蓄能单元的蓄放热特性[J].*重庆大学学报*,2022,45(S1):130-134.
- [36] Kurnia J C, Sasmito A P, Jangam S V, et al. Improved design for heat transfer performance of a novel phase change material (PCM) thermal energy storage (TES)[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013,50(1):896-907.
- [37] 陶汉中,刘士琦.热管式组合工质蓄热系统换热特性的数值模拟[J].*可再生能源*,2018,36(12):1890-1896.
- [38] 郭茶秀,刘树兰.固-液相变传热强化过程研究进展[J].*广州化工*,2011,39(12):32-33.
- [39] 陈彬,杨延春,张建海.低温工业余热回收利用典型场景与应用案例[J].*节能与环保*,2023,(1):87-88.
- [40] 彭佳杰,葛天舒,潘权稳,等.基于数据中心余热回收的硅胶-水吸附式制冷系统的实验研究[J].*制冷学报*,2019,40(4): 59-65.
- [41] 王博雅,韩志涛,刘曙光.用于空调冷凝热回收系统的相变材料特性研究[J].*建筑热能通风空调*,2019,38(2): 46-48.
- [42] Jihye C, Valentin V, Takahiko M, et al. Phase Change Material-Containing Mesoporous Zeolite Composite for Adsorption Heat Recovery[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020,8(4).
- [43] Bellocchi S, Guizzi G L, Manno M, et al. Adsorbent materials for low-grade waste heat recovery: Application to industrial pasta drying processes[J]. *Energy*, 2017, 140(1):729-745.
- [44] K H S, Felix J, Harry K, et al. MOFs for Use in Adsorption Heat Pump Processes[J]. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2011,2012(16):2625-2634.
- [45] 王伟.基于Bi₂Te₃热电材料的低温废热回收利用研究[D].上海:华东理工大学,2013.
- [46] 许磊.聚苯乙烯外墙外保温系统在竖直条件下的辐射引燃过程研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014.
- [47] 唐婷.中低温相变聚氨酯硬泡复合材料制备与性能研究[D].重庆:重庆理工大学,2022.
- [48] 毕戈华.新型无氟聚氨酯发泡剂创制[Z].2013.
- [49] 杨元奎,郑红星,徐智帅,等.一种碳纤维增强的磁制冷功能合金复合材料制备装置与制备方法[P].2021-12-03.
- [50] 公绪金,董玉奇.基于活性炭调控强化吸附制冷效能研究进展[J].*冷藏技术*,2019,42(2):44-48.
- [51] 罗春欢,张向国.一种中低温管式碳纤维复合相变材料及其制备方法[P].2020-03-10.