

制冷装置柔性接触式密封机构性能提升的关键技术研究进展

刘国强¹, 赵天阳¹, 晏刚¹, 鱼剑琳¹, 刘朋^{1,2}, 汪娟², 汪昌勇²

(1. 西安交通大学制冷与低温工程研究所, 710049, 西安;

2. 安徽万朗磁塑股份有限公司, 230601, 合肥)

摘要: 柔性接触式密封机构在制冷装置中起到重要的隔热隔湿作用。针对装配状态下刚-柔多体接触对其性能提升带来的技术挑战,从柔性接触式密封机构技术特点和总体发展出发,综述了影响其性能提升的测量、建模等关键性问题的研究现状,并对未来的发展趋势进行了展望。结果表明:基于反向热平衡的热传递测量技术精度不足,引入滤波算法可降低热流信号噪声波动;现有示踪气体技术未考虑湿空气在刚柔接触界面中的流动扩散,应运用界面微观检测及接触动力学理论来明确流动型式,构建匹配的示踪源和检测回路;对柔性接触式密封机构热流固耦合建模研究尚处于空白,仅建立了传热数值模型与流动平均解析方程,可采用数值计算温度、变形场与解析计算渗流参数的迭代算法来建立耦合模型。未来,除开展测量与建模的基础研究外,还需突破“尺寸效应”技术瓶颈,实现密封组件间的良好配合,应用超低导热材料和电磁感应技术,以提升密封机构的隔热隔湿作用。

关键词: 柔性接触式密封机构;制冷装置;热湿传递;测量技术;热流固耦合

中图分类号: TB61+1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202401002 **文章编号:** 0253-987X(2024)01-0013-17

Advancements in Key Technologies for Enhancing Performance of Flexible Contact Seals in Refrigeration Equipment

LIU Guoqiang¹, ZHAO Tianyang¹, YAN Gang¹, YU Jianlin¹, LIU Peng^{1,2},

WANG Juan², WANG Changyong²

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Anhui Higasket Plastics Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: Flexible contact seals are vital components in refrigeration equipment, as they contribute to effective thermal and moisture insulation. Improving the performance of these seals faces technical challenges arising from the assembly state's combination of rigid and flexible multi-contact elements. To enhance their performance, a comprehensive understanding of the technical characteristics and overall development of flexible contact seals is crucial. Therefore, this research summarizes the current state of research on key issues affecting their performance improvement, including measurement and modeling techniques. The future development of seal performance improvement is anticipated. According to the research findings, the heat transfer measurement

technology based on reverse heat loss lacks accuracy. However, by incorporating filtering algorithms, the noise fluctuation in heat flux signals can be effectively reduced. The current tracer gas technology fails to consider the flow and diffusion of moist air within the rigid and flexible contact interface. To address this limitation, it is suggested to employ interface microscopic detection and contact dynamics theory, to elucidate the flow pattern. Additionally, constructing a tracer source and detection circuit that are appropriately matched is recommended. Currently, the research on thermal-fluid-solid coupling modeling of flexible contact seals is lacking, leaving a significant knowledge gap. Only a heat transfer numerical model and flow average analytical equation have been developed so far. To address this gap, a coupling model can be established using iterative algorithms for numerical calculations of the temperature and deformation field, along with analytical calculation of seepage parameters. In addition to conducting fundamental research on measurement and modeling, it is crucial to overcome the bottleneck of size effect, achieve good coordination between sealing components, and apply ultra-low thermal conductivity materials and electromagnetic induction technology to improve the thermal and moisture insulation performance of seals.

Keywords: flexible contact seal; refrigeration equipment; heat and moisture transfer; measurement technologies; thermal-fluid-solid coupling

国务院发布的《“十四五”节能减排综合工作方案》明确提出:实施绿色高效制冷行动,更新升级制冷装置、技术,是按期实现“双碳”目标的重要环节。近年来,我国制冷行业快速发展,2022 年冰箱、冷柜、饮料柜、医用冷柜等家用和轻型商用制冷装置销量约 7 000 万台^[1-3],配套使用的柔性密封条长度达 3.5 亿 m 以上。此外,该类型的柔性密封条在干衣机、洗衣机、环境试验箱(恒温恒湿试验箱、高低温试验箱、快速温变试验箱等)、航天空间站等领域具有广泛的应用场景。对于制冷装置,应用高性能的密封条是降低其能耗最简便、低成本的措施之一,也是提高储物长期贮藏品质的有效手段。然而,在现行密封技术下,抵消密封机构(密封条及其装配部位)热湿传递负荷的耗电占制冷装置耗电总量的 20% 以上^[4-6]。图 1 以冰箱密封为例,柔性密封条与刚性装配间隙存在复杂的“刚-柔多体接触”约束,接触状态与密封条结构、材料、装配及环境工况等因素均有关,其接触变形程度对热湿传递有重要影响,如热阻分布、接触界面孔隙尺寸等。

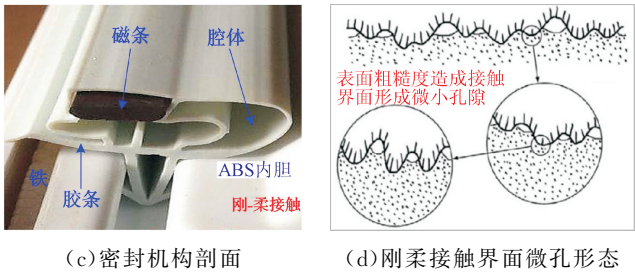


图 1 制冷装置柔性接触式密封机构装配示意图
Fig. 1 Schematic diagram of assembly state for flexible contact seals of refrigeration equipment

造成制冷装置现有密封方式下热湿传递负荷大的原因是:缺乏复杂约束条件下密封强度与隔热隔湿能力的定量关系,导致在开发设计密封机构时无法确定合理的密封强度。受到人体最佳开门力(30~80 N)约束,降低热湿传递负荷不能采用严密密封的常规思路。若箱体密封强度太高,在箱内空气降温收缩过程中,产生的强负压将使门体向内紧密吸合而无法打开。例如,一台容积 191 L 的家用冰箱,如果出于节能目的将其密封强度设计较高,当经历一次开关门箱内空气温度下降时,其内部负压差将高达 155 Pa,需 100 N 以上拉力才能把箱门打开,超过人力正常操作范围,因此密封机构强度不宜过大。否则,热湿传递负荷增大,会造成蒸发器结霜严重,冰箱耗电量变大,同时容易发生凝露现象^[7]。

可见,开发设计密封机构时,必须在保证其最佳开门力约束(30~80 N)条件下,发展高效的结构、材

料及装配技术,使得密封机构产生较小的热湿传递负荷,且具有较高的防凝露性能。然而,密封条在装配状态下会发生复杂的多体接触形变,其密封强度、热湿传递负荷和开门力的关系尚不明晰。如图 1 所示,采用柔性材料如聚氯乙烯(PVC)、热塑性弹性体(TPE)的密封条结构被设计为非均质异形,装配状态下柔性胶条通过弹性形变与刚性门体、箱体发生“刚-柔多体接触”,密封机构的温度场(热)、渗流场(流)、结构变形场(固)之间存在复杂耦合效应,是典型的热流固多向耦合问题。多体接触位置是离散的,当结构、材料、装配方式或两侧环境工况改变时,多体接触位置发生迁移,温度场、渗流场、变形场也随之发生复杂变化。为突破密封强度难以合理确定造成热湿传递负荷大的技术瓶颈,需厘清柔性接触式密封机构在复杂约束条件下的热流固耦合机理,探索多物理场下密封强度与隔热隔湿能力的定量关系。

对复杂约束条件下的柔性接触式密封机构热流固耦合机理进行深入研究,急需构建高精度的热湿传递测量技术和热流固耦合效应模型。但是存在以下困难与挑战。

(1)柔性接触式密封机构热传递量常采用间接法测量,需测量多个 $5 \sim 15 \text{ W/m}^2$ 热流密度^[8]。热传递量是一个多维时间序列小热流信号(直接测量信号为微伏直流电压,极易受干扰)耦合量,测量精度受单维误差和测量维度影响。现有测量条件下,如何降低单维误差和测量维度是提高热传递测量精度的关键。

(2)柔性接触式密封机构湿传递测量须考虑其湿空气流动类型。通常,利用流动相似原理的示踪气体技术^[9]明确湿空气的流动类型来选用合适的示踪源并构建相应的检测回路,而流动类型受到其“刚-柔多体接触”界面的渗透通道特征尺度影响。如何通过界面微观检测及接触动力学理论来明确湿空气流动类型是提高湿传递测量精度的关键。

(3)柔性密封条与刚性间隙发生离散的“刚-柔多体接触”,在两侧温度差、湿度差、气压差等推动势的时变边界条件下,其多体接触状态与热湿传递方向、大小发生同步波动,存在高度非线性耦合作用。热-湿-力-结构的相互作用关系复杂,如何建立可表征热流固耦合关系的机理分析模型极具挑战性。

基于上述困难与挑战,本文从制冷装置柔性接触式密封机构总体发展现状出发,重点分析热湿传递测量技术和热流固耦合建模的研究现状和发展趋势,以及作者团队近些年在以上方面做的一些研究工作。

1 总体发展现状

从 20 世纪 20 年代开始,随着冰箱、冷柜等小型制冷装置的兴起,开发高性能密封技术一直是制冷行业的发展方向。学者们在固定方式、结构型式、材料配方及加工工艺等方面不断改进:固定方式从门栓、螺钉转变为磁吸,并逐步开发了多内腔、多飞边、波纹管结构^[10-13]及高回弹性的改性 PVC、TPE 材料等^[14-15];柔性密封条的加工工艺较为复杂,全球知名的生产制造企业有意大利 ILPEA、德国 REHAU、安徽万朗和青岛琴科等^[16];改进了挤出、冷却、切割、入磁、焊接等多个环节。

21 世纪以来,制冷装置节能减排和用户高体验度需求越来越高,工业界对密封技术的更新迭代尤为重视。在实际应用层面上,制冷企业对密封机构进展改进的主要目的为节能、防凝露、易开门,这些均与热湿传递特性有关。然而,学术界对此类密封机构的基础性研究工作仍十分缺乏,无法对高性能密封技术的开发进行高效指导。例如,对于热湿传递负荷的精准评估尚未建立标准,小型制冷装置设计指导书中一般按箱体总负荷的 15%来粗略估算^[17],或直接沿用经验漏热系数 $0.065 \sim 0.095 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 进行估算^[18-19],或直接嵌入到箱体总热负荷中而不单独分离出来^[20],甚至因难以获取而直接忽略^[21],上述问题造成对密封强度、热湿传递负荷及开门力间关系的深入研究难以开展。

国内外关于制冷装置密封机构的学术性研究主要集中在热湿传递仿真与测量。在 20 世纪 90 年代,爱荷华州立大学 Ghassemi^[22]、伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校 Boughton 等^[23]就开始对密封机构的热传递进行了数值计算研究。随后,马来西亚马来亚大学 Hessami 等^[24]、澳大利亚莫纳什大学 Stein 等^[25]、韩国启明大学 Kim 等^[26]、美国克莱姆森大学 Gao 等^[27]和巴西圣卡塔琳娜联邦大学 Pereria 等^[9]均在热湿传递与测量方面开展了一些研究。然而,我国对制冷装置密封机构的热湿传递特性研究起步晚,最早的研究性期刊论文发表于 2015 年^[28],开展研究的高校也较少,主要有西安交通大学晏刚团队^[28-29]、何茂刚团队^[30]和上海交通大学丁国良团队^[31]等。总体上,现有研究侧重于密封机构的热湿传递数值计算与测量工作。但是,由于其热湿传递与测量具有非常规性,“刚-柔多体接触”状态复杂,现有对热湿传递高精度测量及热流固耦合传递机制的研究存在不足,从而在密封机构开发制造过程中

无法实现对其密封强度的精准设计。

2 热湿传递测量技术研究现状

2.1 现有热传递测量技术

为增强与刚性间隙的匹配度,密封条通常设计为非均质异形结构,其热传递量受“刚-柔多体接触”状态影响。然而,常规测量技术更适用于形状规则的试件,难适用于密封机构。因此,现有研究采用间接测量方法获取密封机构热传递量,测量结果如表 1 所示。

(1)近似绝热法^[22]。拆除密封条,在密封部位外加高绝热材料如气凝胶,使该部位近似绝热水平。

对比密封条正常安装和近似绝热时制冷装置的耗电量差值,便可得到密封机构热传递引起的耗电量。

(2)为防护热箱法^[24]。制造专用装置,含冷箱、热箱、辅助热箱,布置辅助热箱保证热箱热量全部传递至冷箱。冷热箱间设置有密封条安装槽,开展安装槽填充发泡材料的热平衡校正和安装槽装配密封条的热传递测量。

(3)反向热平衡法^[4,8,32-35]。搭建控温精度高的反向热平衡系统,箱体内置热源,当箱体内外温度保持稳定时,采用热流密度传感器多点测量壁面热传递,内置热源功率与壁面热传递量的差值可视作密封机构热传递量。

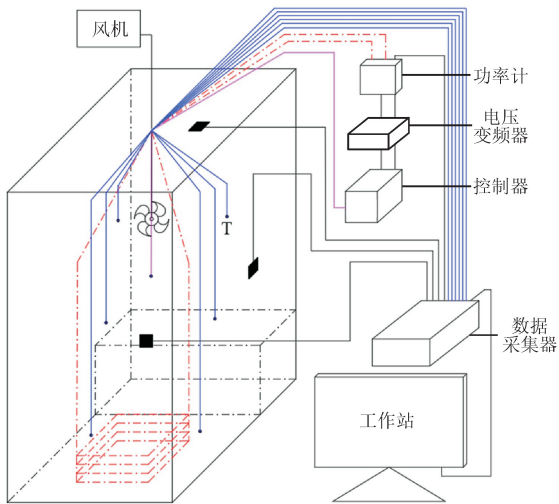
表 1 密封机构热传递测量结果
Table 1 Heat transfer load measurement of seals

作者及年份	方法	环境温度/ ℃	箱内温度/ ℃	箱体容积/ L	热传递量/ W	耗电量/ (kW·h)	密封机构漏热量占 箱体总漏热量的 百分比/%
Ghassemi(1993) ^[22]	近似绝热	29.5	-14.5	566		0.06	5
Hessami 等(2003) ^[24]	防护热箱	22.0	66.0	535	15.7		13.0
Hessami (1997) ^[32]	反向热平衡	22.0	67.0	370	14.1		13.0
Melo 等(2000) ^[33]	反向热平衡	25.4	50.4	230	1.3		3.0
Tao 等(2001) ^[34]	反向热平衡	32.2	82.4	460	17.1		18.5
Huelsz 等(2011) ^[4]	反向热平衡	25.7	69.5	283	5.4		5.3
Thiessen 等(2014) ^[8]	反向热平衡	25.1	61.1	429	5.7		8.8
Liu 等(2020) ^[37]	反向热平衡	25.0	68.0	535	13.1		20.2

近似绝热法易操作,但是很难将密封部位改进到完全绝热水平,故测量值比实际值小,且无法直接体现热传递量;防护热箱法制作成本高、过程复杂,冷热箱间设置的安装槽与实际密封装配间隙有较大差异,无法真实地模拟密封机构的“刚-柔多体接触”特性;反向热平衡法利用制冷装置自身箱体为测量箱,充分还原了“刚-柔多体接触”状态,且具有较强的可推广性,可快速拓展至其他制冷装置,但是该方法存在难点和不足,如图 2 所示。

(1)难点。箱体壁面热阻的非均匀分布,需要对壁面几十个 $5\sim 15\text{ W/m}^2$ 的时间序列热流密度进行测量,即密封机构热传递量是一个多维小热流测量信号(直接测量信号为微伏级直流电压)的耦合值,测量精度受到单维误差和测量维度的影响。单次测量误差越小、测量点数量越少,测量精度越高。因此,在现有检测条件下,如何降低单维误差和测量维度是提高热传递测量精度的难点。

传递至外侧,实际工作环境下箱内为制冷工况,热传递方向为外侧至内侧,图 1(c)展示了密封机构的非均质异形特性,正反向工况下存在热传递量差异,即采用反向热平衡法时,密封机构热传递方向与实际工况相反,有必要进行正向改进。



(a)反向热平衡系统

(2)不足。目前广泛采用箱内加热,热流从内侧

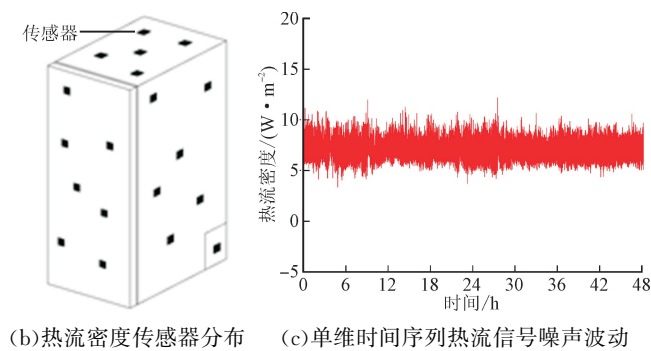


图 2 柔性接触式密封机构热传递测量装置和结果^[36]
Fig. 2 Heat transfer measurement devices and result of flexible contact seals^[36]

受仪器仪表误差以及测量环境扰动等噪声信号影响,单维误差大问题普遍存在于利用热流密度传感器测量较小热流密度的测量系统中。例如,采用误差±5%的热流密度传感器评估建筑围护结构的保温性能,稳态阶段热流密度测量值在6~12 W/m²波动^[36];采用误差±3%的热流密度传感器评估制冷箱体的保温性能,稳态热流密度测量值在15~20 W/m²波动^[27]。噪声信号波动对测量结果的重复性带来很大影响,4.4 小节表 2 绝大部分测量结果的重复性较差。当改进密封机构时,测量系统误差就已大于热传递量变化值,不利于对其热传递研究工作的开展。关于热流信号去噪,现有研究主要集中在设计新的热流密度传感器和数字滤波算法^[37-40],但是缺乏对去噪结果的重复性和保真度的多维评价,常用均方根误差、相关系数、结构相似性、峰值信噪比和对比噪声比等单一指标评估去噪效果^[41-43],容易出现“欠去噪”或“过去噪”问题,对于密封机构的热传递测量精度也会造成较大影响。

2.2 现有湿传递测量技术

密封机构“刚-柔多体接触”界面形成的微小孔隙是湿空气渗透通道,在制冷装置压缩机的周期性启停作用下,蒸发器冷量间歇输出,箱内空气发生的周期性“降温-升温”会造成箱内外压差周期性波动,从而驱动湿空气“呼出”或“吸入”箱内。箱体如同动物“肺部”,而密封机构如同“呼吸腔道”,因此将制冷装置湿空气周期性输送行为比拟为“呼吸效应”^[25,44],如图 3 所示。

“呼出”与“吸入”工况下,湿空气渗透特性存在差异:渗透通道尺寸不同;“呼出”和“吸入”工况下,门体分别受到正压和负压作用,“刚-柔多体接触”界面的接触应力与孔隙尺寸大小不同,“呼出”工况接触应力小、孔隙尺寸大,而“吸入”工况接触应力大、孔隙尺寸小。

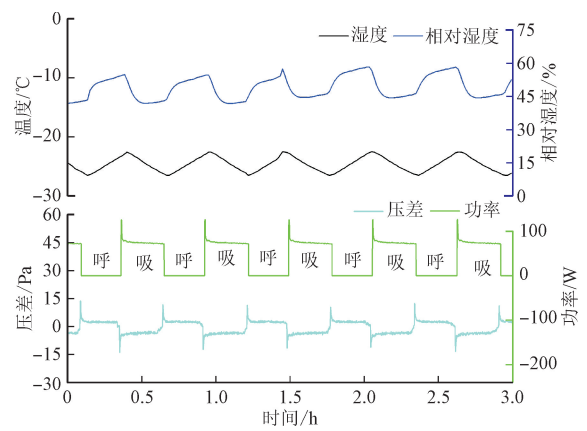


图 3 制冷装置“呼吸效应”湿空气状态参数波动趋势^[45]
Fig. 3 Curves of moisture air state parameters in the breathing behavior of refrigeration equipment^[45]

密闭空间的空气泄漏检测技术包括气泡法、压力变化法、流量法、示踪气体法、超声波法和红外热成像法^[45]。气泡法需将容器浸没于水中,不适用于大容积容器;压力变化法、流量法受限于传感器精度,不适用于微小渗透及压差测量;超声波法和红外热成像法利用波谱分析原理,成本高且极易受到环境干扰;示踪气体法利用流动相似原理,选用与空气运行规律相近的示踪源标识待测空气,检测灵敏度高,适用于检测密封微小渗透。标准 ASTM E741 给出了测试方法和数据处理方法^[46],但是该标准采用手动取样的检测方法,操作难度大、检测效率低,因此已改良为在线检测方法,测量装置如图 4 所示。

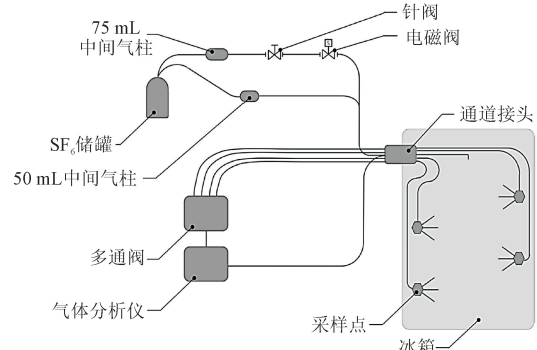


图 4 柔性接触式密封机构湿传递测量装置^[6,9]
Fig. 4 Moisture transfer measurement devices of flexible contact seals^[6,9]

Afonso 等^[6]以 SF₆ 为示踪源测量新旧柔性密封条的湿空气渗透量,结果表明旧密封条的渗透量是新密封条的 5 倍以上;Pereria 等^[9]以 SF₆ 为示踪源对比了浓度衰减法和恒定浓度法的测量结果,发现两种示踪源充注方法下的测量结果偏差在±15.0%以内。现有测量方法存在以下不足。

(1)“刚-柔多体接触”界面存在接触不均匀性。根据多孔介质渗流理论,湿空气在渗透通道可能会发生连续流、滑脱流和自由分子流等多尺度耦合流动,而要准确测量自由分子流的扩散速率,依赖于选用与空气相对分子质量接近的示踪源。 SF_6 的相对分子量为 146,远大于空气相对分子量 29,会造成测量结果小于实际值。因此,如何明确湿空气在接触面的流动类型,以选用合适的示踪源并构建相应的检测回路,是提高湿传递测量精度的难点。

(2)现有测量工况未区分“呼出”和“吸入”过程,因此测量结果是“呼出”和“吸入”过程渗透量的平均值。由前述分析可知,两个工况下的渗透通道尺寸和边界条件均发生改变,湿空气渗透量存在较大差异。为了更为精细地研究湿传递特性,有必要建立可切换测量“呼出”和“吸入”工况的实验系统。

针对湿传递测量的不足,为发展高精度的湿传递测量技术;首先,需借助微观检测技术和接触动力学理论明确渗透通道尺寸,并根据多孔介质渗流理论明确湿空气流动类型,以选用合适的示踪源;其次,需搭建可实现“呼出”和“吸入”切换的湿空气传递测量系统。此外,沿用常用的蒸发器化霜水称重法测算湿空气中水蒸气的渗透量^[25,47]。

3 热流固耦合机制研究现状

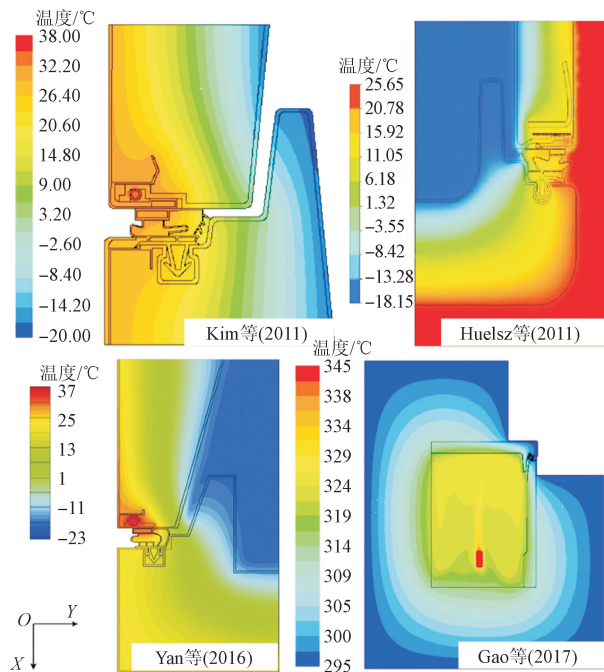
3.1 现有热流固耦合建模研究

现有研究主要对制冷装置柔性接触式密封机构进行独立的热传递和湿传递建模计算,未能体现其热流固耦合效应。

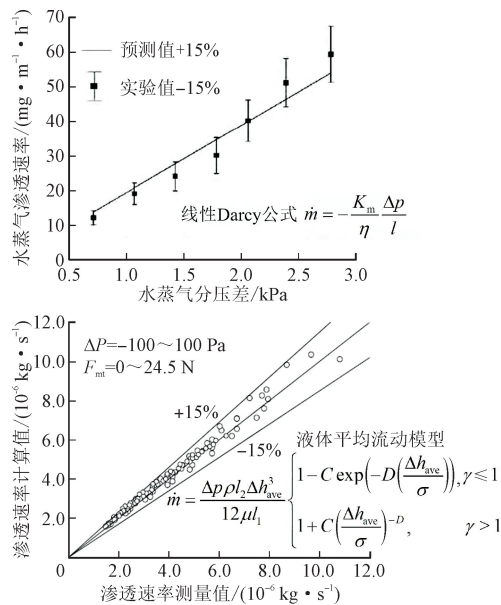
图 5(a)为近十年来关于制冷装置密封机构热传递特性的 CFD 仿真建模的部分研究,分别探讨了计算方法^[13]、胶条高度^[4]及制冷工况^[29]对热传递特性的影响,结果表明以来流温度平均值作为边界条件时,计算温度最吻合实测温度,密封机构内侧来流冷空气温度沿长度方向不均匀,模拟计算时可将密封机构离散成多段进行物理建模。同时,也可采用热流密度传感器对计算结果进行校正^[27]。但是,以上研究在建立物理模型时均未考虑“刚-柔多体接触”约束问题,甚至对装配体结构进行了简化,导致计算结果无法真实地反映热传递路径,且未准确判断密封机构封闭腔内空气热传递形式(自然对流或流动未充分发展的导热)。

图 5(b)为制冷装置柔性密封机构的湿传递解析建模研究。图中, Δh_{ave} 为平均高度。采用线性 Darcy 公式建立了水蒸气渗透速率模型,根据湿空气沿吸合面流动的动量方程,建立了渗透速率与吸

合面平均高度和流量因子的函数,误差在 $\pm 15\%$ 以内^[31,45]。线性 Darcy 公式主要描述不可压缩黏性流体在孔隙内发生定常流动压降情况,多用于石油、岩土渗流领域,不适用于描述湿空气中水蒸气流动特性。基于流量因子的液体平均流动模型,忽略了“刚-柔多体接触”界面应力与孔隙尺度的非均匀性,未从多孔介质多尺度渗透特征出发,无法从内在机理上诠释湿传递特性。



(a)热传递数值模拟研究^[4, 13, 27, 29]



(b)湿空气传递建模及进度验证^[31, 45]

图 5 柔性接触式密封机构热湿建模方法和结果
Fig. 5 Heat and moisture transfer modeling method and result of flexible contact seals

在其他机械式密封领域,对于热流固耦合问题的直接整体建模也十分困难,通常将温度场、渗流场和变形场分模块建模与求解,根据耦合关系确定各模块形成整体模型,其中耦合关系的确定最为关键。例如,Saidur等将仿生多层复合结构应用于定子迷宫式密封的热流固耦合问题,将热效应、流体效应及力效应子模型的计算结果作为其他模型的边界条件进行迭代求解^[47];对于高速轴承油气两相非接触式密封的热流固耦合问题,Cao等忽略了变形对温度的影响,分别建立了温度、流体和固体分析模块,根据耦合关系动态求解稳定状态参数^[48];对于航空发动机用的圆周密封热流固耦合问题,李世聪等对流体域进行流场分析得到压力分布,对固体域进行变形场和温度场计算,通过网格插值方式将计算结果作为边界条件建立热流固耦合分析模型^[49]。

与上述研究对象不同,制冷装置柔性接触式密封机构为静态接触式,其“刚-柔多体接触”界面的孔隙尺寸(平均尺度为微米级^[31])远小于密封胶皮厚度,难以建立研究渗流场的数值计算模型,而其非均质异形特征下又难以采用解析法建立温度场和变形场模型。因此,作者团队基于柔性接触式密封机构“非均质异形”的结构特征和“刚-柔多体接触”的装配特征,采用数值计算温度、变形特性与解析计算渗流特性相结合的方法来建立其热流固耦合模型,如何正确确定耦合关系是高精度建模与求解的关键。

3.2 现有热流固耦合效应研究

制冷装置密封机构属于静态密封,目前鲜见学者对其进行热流固耦合效应研究,仅 Huelsz等^[4]在2011年揭示了密封机构不同部位的热传递量存在差异,并解释为“刚-柔多体接触”状态差异的影响。在其他机械式密封领域,常利用仿真、解析和实验相结合的方法分析密封机构的热流固耦合效应,为其优化设计提供指导。例如,对仿生多层复合密封的热流固进行仿真分析时,为防止密封的定子温度快速升高,有必要降低泄漏流体到定子的热扩散,硬-软-硬的材料排列顺序被证明具有优异的承载和隔热性能^[48];为研究反应堆冷却剂泵的静液机械密封机理,Huang等建立了内流体流动和传热以及密封组件热传导和变形的数学模型,实验验证了模型精度,研究结果表明机械变形对密封性能的影响与热变形的影响相反^[50];与制冷装置密封机构类似,多体接触问题同样存在于静压机械密封环与其支撑件之间,当高速旋转引起的热变形载荷变化时,密封环与支撑件的接触状态也会发生变化,同时泄漏流体的入口压力也会影响接触状态^[51]。

“刚-柔多体接触”特征是制冷装置柔性密封机构热流固耦合作用的关键因素。与已有研究关注泄漏流体入口压力对渗透通道内表面的压力作用不同,作者认为应更关注两侧空气压差对湿空气渗透量的影响,因为空气压差变化除了改变传递驱动势,还会改变渗透通道孔隙尺寸和接触界面的接触应力。

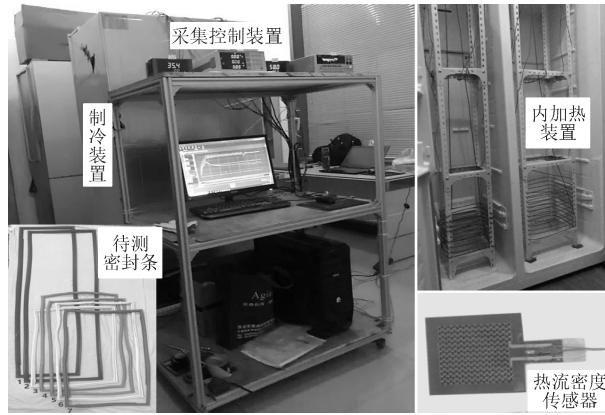
4 研究发展趋势及待解决的关键技术

从上述研究可知,在开门力、“刚-柔多体接触”、“呼吸效应”等复杂约束条件下,制冷装置柔性接触式密封机构热湿传递与测量的非常规性,对其性能提升研究带来了诸多困难与挑战。现有研究在实验测量和理论分析手段上均存在简化其约束条件的问题,造成热湿传递测量和建模计算结果的精确性不足。因此,要突破密封机构的密封强度难以合理确定而造成制冷装置热湿传递负荷大、耗电量高的技术瓶颈,发展高精度的热湿传递测量技术,并建模分析方法,研究其热流固耦合机理成为了研究趋势。在已有研究基础上,作者团队针对上述问题开展了进一步的研究,并对下一步研究提出建议并做出展望。

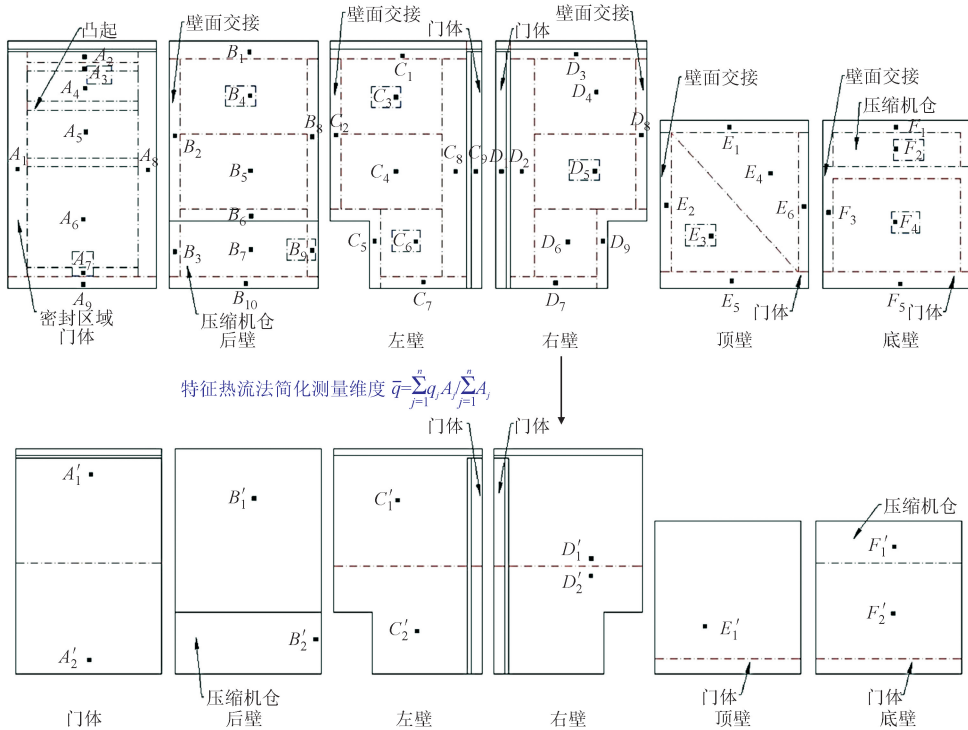
4.1 热传递测量技术研究及建议

作者团队搭建了反向热平衡热传递测量系统(图6(a)),对制冷装置箱体壁面的热阻分布特性进行了分析,探究热流测量区域分布方式对测量结果影响规律(图6(b))。图中字母表示划分区域的标号,研究建立了多维热流信号不确定分析模型,采用“特征热流法”简化热流测点数量,降低了测量维度和累积误差。

采用小热流信号最优估计方法,对图6(a)所示测量系统采集的单维热流信号开展去噪研究。如图7(a)所示,图中 q_k 是原始数据, q_{ik} 是去噪后数据, n 是采样长度, $G(q_k)$ 是高斯模版, F_k 是驱动矩阵, B_k 是控制矩阵, H_k 是测量矩阵, F_k 是状态转移矩阵, Q_k 是过程协方差矩阵, K_k 是卡尔曼滤波增益矩阵。构建中值算法、移动平均算法、Savitzky-Golay算法、限幅算法、高斯算法、卡尔曼算法数字滤波器热流信号去噪模型,引入信噪比 S 、标准差 E 、平均绝对误差 D 和相关系数 R 综合评估去噪结果,研究不同滤波算法下工作参数(窗口宽度 W 、最高阶次 p 、限定值 L 、分布参数 σ 与测量噪声协方差 P_k 等)对所采集热流信号的去噪规律,采用“相交区域规则”获得协同重复性和保真度的优选滤波算法及其工作参



(a)热传递测量系统



(b)特征热流法简化测量维度

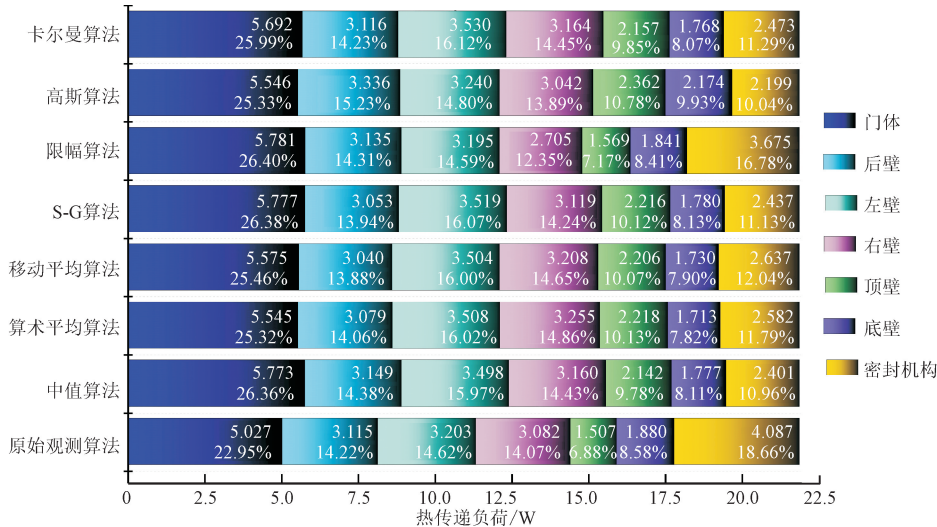
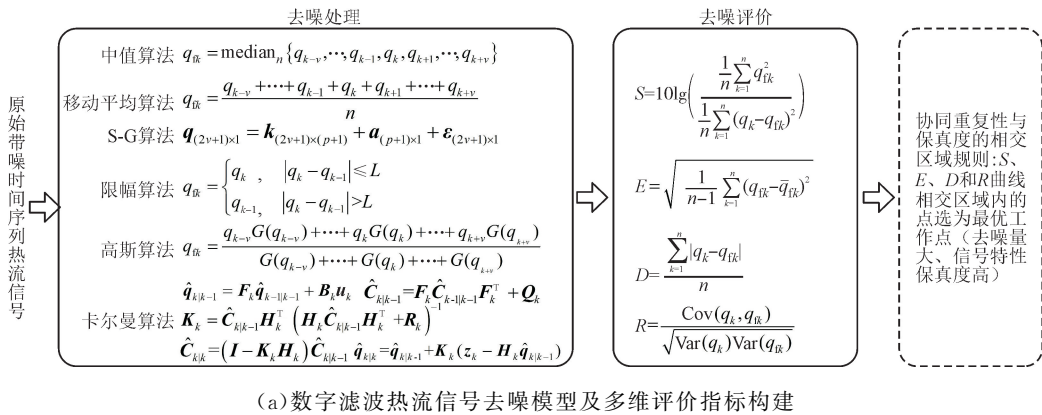
图 6 采用特征热流法简化热流信号的测量维度^[35,52]

Fig. 6 Simplifying the measurement dimension of heat flux signals using characteristic heat flux method^[35,52]

数,避免“欠去噪”或“过去噪”问题,获得热流信号最优估计值,降低单维信号测量误差。从图 7(b)看,采用不同滤波算法对各列热流信号进行去噪处理后的测量结果存在差异性,同一测量工况,不同滤波算法下密封机构的单位长度热传递负荷存在较大差异,去噪结果大小与滤波算法本身特性相关。基于前述重复性和保真性兼容原则, S 为 19.0、 R 为 0.841 的移动平均滤波器去噪处理下的密封机构的去噪量大、但保真性高,典型密封机构的单位长度等效热泄漏系数约为 $4.40 \times 10^{-2} \sim 4.90 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

然而,当采用反向热平衡法时,测量工况与实际环境工况存在差异,主要表现在热传递方向相反、防

凝露管温度和箱内流动形式不同,正向与反向工况下的密封机构热传递负荷分别为 2.47 和 3.23 W/m,偏差在 20% 以上。因此,建议对反向热平衡法进行改进,搭建如图 8 所示的正向平衡热传递测量系统,配置制冷箱体(含蒸发器、风机)、恒温水浴箱、流量计、热电偶、热流密度传感器、PLC 控制器、数据采集装置等,通过控制恒温水浴箱载冷剂的温度和流量实现对箱内温度的控制,供冷量与壁面热传递量的差值视为密封机构的热传递量。可参考反向平衡测量系统中提出的小热流信号最优估计方法^[53]和特征热流法^[35],对正向平衡测量热流信号开展去噪研究。



注:图中百分比表示热负荷与总负荷的百分比。

(b) 不同滤波算法下的热传递测量结果

图 7 数字滤波算法降低单维热流信号的测量误差^[53-54]

Fig. 7 Using digital filtering algorithm to reduce measurement error of single dimensional heat flux signal^[53-54]

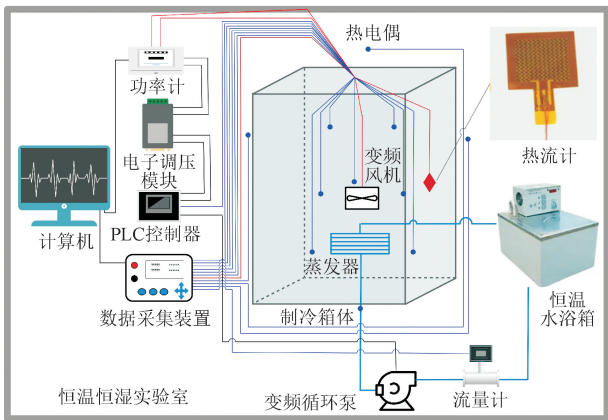


图 8 正向热平衡测量系统

Fig. 8 Forward thermal steady-state measurement system

4.2 湿传递测量技术研究及建议

制备如图 9 所示的刚-柔接触面样品,借助西安交通大学分析测试共享中心的津岛 SPM-9700HT

型高精度原子力显微镜,观测自由状态下的微观表面形貌与表面粗糙度,发现自由非接触状态下的特征尺寸 s_{c1} 在 10^{-5} m 量级。利用材料力学弹性形变公式 $s_{c2} = \delta \frac{\sigma}{Eu}$ (s_{c2} 为弹性形变量, σ 为接触应力, Eu 为欧拉数, δ 为胶条腔体厚度),估算接触状态下胶条表面的弹性形变量,引入克努森数 Kn 和湿空气平均自由程 $\bar{\lambda}$ 建立流态判断方程式 ($Kn = \frac{\bar{\lambda}}{s_{c1} - s_{c2}}$),推导临界接触应力 σ_{c1} 、 σ_{c2} 、 σ_{c3} 。由于刚柔接触界面接触应力的非均匀性,湿空气主要发生滑脱流-过渡流-分子流复合流动。

作者团队构建了“呼出-吸入”平均湿传递测量系统^[55]。由于 CO_2 的相对分子量和扩散系数与空气更为接近,能与空气混合良好,因此被选为示踪气体用于测量密封机构湿空气渗透速率,并采用易于操作和重复误差在 $\pm 5.0\%$ 以内的浓度衰减法测量。

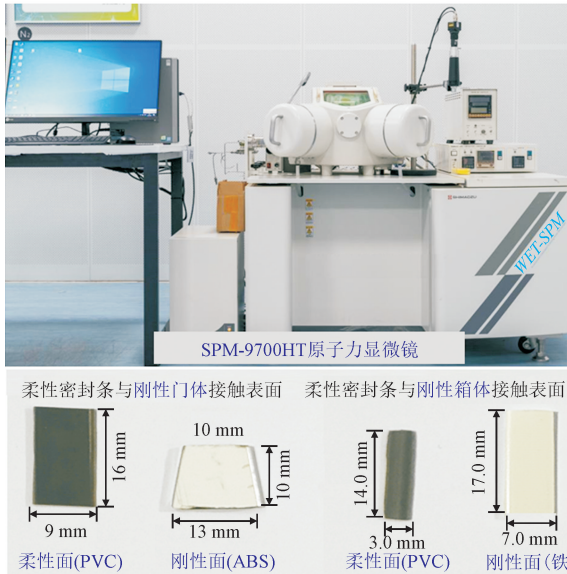


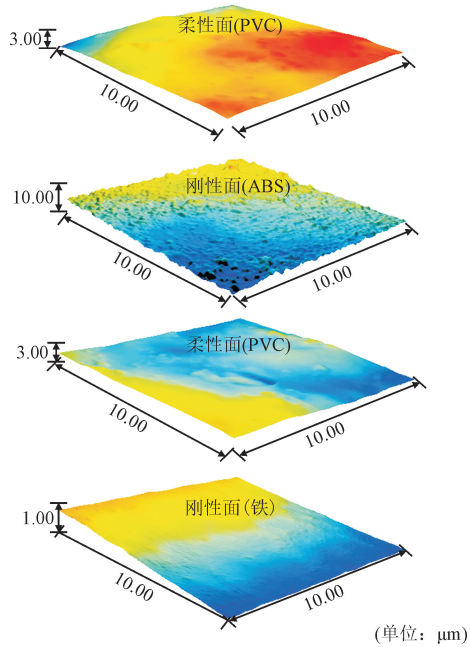
图 9 刚柔接触面微观形貌检测

Fig. 9 Microscopic morphology detection of rigid flexible and contact surfaces

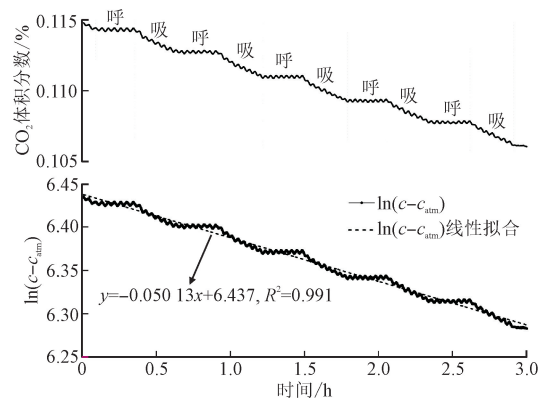
直线法和积分法求解的内外部湿空气交换率相对偏差不大于 1.07%，两者方法具有等效性。作者建立示踪气体瞬态质量平衡方程，获得示踪气体体积分数变化方程，利用直线法求解湿空气传递速率，结果如图 10(a)所示。气体体积分数对数函数线性回归线的斜率即为湿空气的体积渗透速率。

如图 10(b)所示，随着磁条吸力 F_m 的增大，湿空气渗透速率 $\dot{m}_1$ 下降；当 F_m 为 22.3 N 时， $\dot{m}_1$ 高达 5.366 g/(m·h)；当 F_m 增至 71.0 N 时， $\dot{m}_1$ 低至 2.406 g/(m·h)，下降幅度高达 55.17%。基于 30 ~ 80 N 的最适开门力范围， F_m 的最佳范围为 41.3 ~ 68.8 N，该范围内 $\dot{m}_1$ 为 4.456 ~ 2.476 g/(m·h)。根据图 10(b)中 F_m 与 $\dot{m}_1$ 的拟合关系式可知，41.3 ~ 68.8 N 磁条吸力对应的磁条厚度 m 为 2.2 ~ 3.0 mm，进而获得结构改进与磁条厚度变化对密封性能的关系为：增加辅助气囊等效于磁条厚度增大 1.4 mm（即磁力增大 19.5 N）；增加辅助飞边等效于磁条厚度增大 0.8 mm（即磁力增大 10.9 N）；非磁条面过盈设计等效于磁条厚度增大 0.1 mm（即磁力增大 2.0 N）。

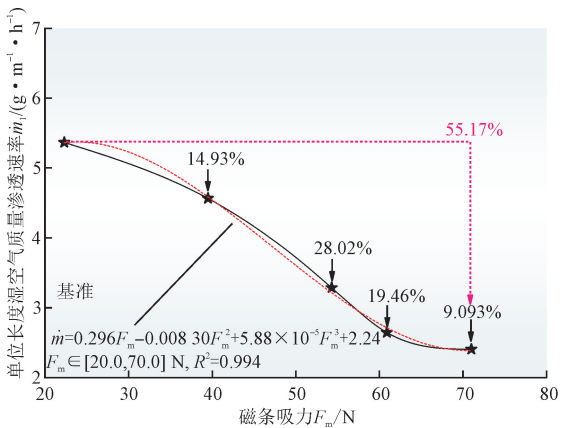
建议搭建“呼出-吸入”切换测量系统，配置包含制冷箱体（含蒸发器、风机）、恒温水浴箱、屏蔽箱体、示踪气体充注装置、红外线气体分析仪、温湿度传感器、微型压差计、氮气等，恒温水浴箱连接蒸发器维持



(单位: μm)



(a)呼吸效应下 CO_2 体积分数变化及交换率拟合



(b)湿空气渗透速率随磁条吸力的变化趋势

图 10 示踪气体法测量呼吸效应下的湿空气渗透速率^[44]
Fig. 10 Measurement of moisture air infiltration rate under breathing behavior using tracer gas technique^[44]

箱内恒温恒湿状态,通过调节实验室湿度来实现密封机构两侧的湿度差。“呼出”工况下,屏蔽箱体门开启,在制冷箱体内部充注示踪源,在线检测制冷箱内示踪气体浓度的衰减趋势;“吸入”工况下,屏蔽箱体门关闭,在屏蔽箱体内充注示踪源,在线检测制冷箱内示踪气体浓度的增长趋势。

4.3 热流固耦合建模研究及建议

针对刚-柔多体接触对热传递特性的影响,建立

了热固耦合数值计算模型,模拟计算结果表明装配间距对刚-柔多体接触状态具有很大影响。从图 11 可知,与挤压工况相比,在拉伸工况下飞边和辅助气囊脱离了门体柔性门封条与刚性门体、箱体的接触点发生迁移,从而改变各个接触面的热流方向和大小。研究案例中,装配间距从 11.7 mm 增大至 17.7 mm 时,热传递负荷先减小后增大,范围为 8.24 ~ 13.79 W/m,在 14.7 mm 时出现最小值。

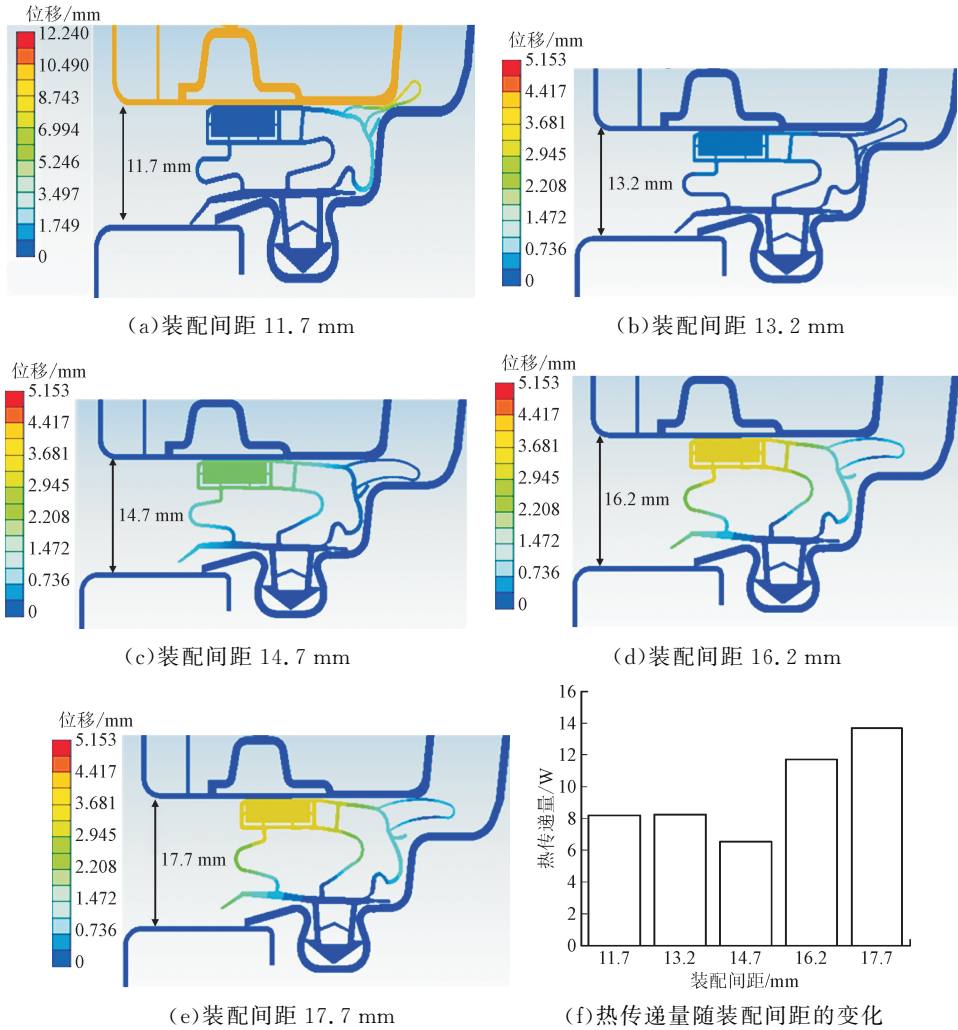


图 11 热固耦合数值模拟研究

Fig. 11 Study of numerical simulation of thermo solid coupling

热、流、固耦合各子模块的关系见图 12。可在数值模拟软件中建立热固耦合数值模型子模块,在自编程软件中建立多孔介质渗流解析模型子模块,将敏感度高的参数作为体现整体模型耦合关系的关键性因素,通过添加自定义源项方式将高敏感度材料温变物性参数和以边界条件方式将渗流特性参数添加至热固耦合数值模型子模块,将敏感度高的湿空气物性参数和结构特性参数作为数据库的方式输

入至多孔介质渗流解析模型子模块中。

建议通过热固耦合数值模拟计算,得到温度场与变形场,将计算所得高敏感度湿空气温变物性参数和结构特性参数导入至多孔介质渗流解析模型子模块,采用格拉晓夫数 Gr 判断封闭气腔内的热传递形式;其次,根据计算的接触应力分布,利用克努森数 Kn 判断湿空气在孔隙中的流动类型(分子流、滑脱流、过渡流或分子自由流),建立包含跨尺度

类型的耦合渗流模型,常见经验公式见图 13。图中: $\dot{m}_C$ 是连续流速率, $\dot{m}_S$ 是滑脱流速率, $\dot{m}_T$ 是过渡流速率, $\dot{m}_K$ 是自由分子流速率, μ 是动力黏度, Δp 是渗透压降。开展多孔介质渗流解析计算,得到渗流特性参数,将高敏感度的渗流特性参数以边界条件方式导入至热固耦合数值模型中;然后,利用本轮计算

得到的温度场和变形场以及渗流特性参数进行下一轮计算;最终,通过不断调用数值模拟和自编程软件,直到各参数在前后两轮的计算误差均小于其设定残差值时则判定计算结果收敛,得到收敛的热流固耦合下的温度场、变形场和渗流特性参数,实验测量验证模型精度,修正迭代方法。

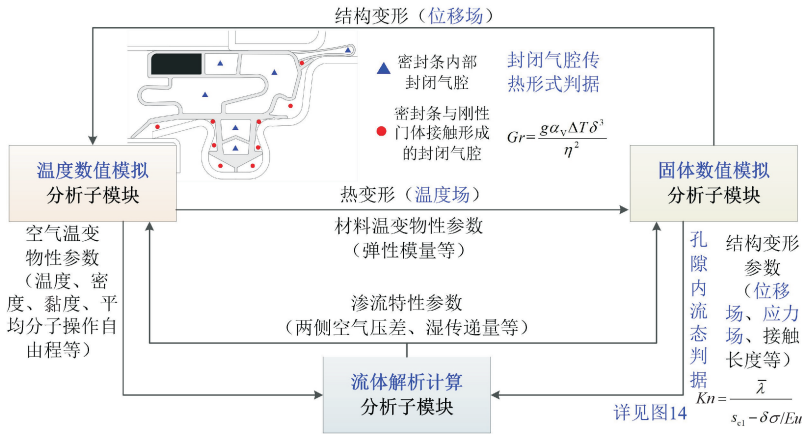


图 12 热、流、固子模块耦合关系

Fig. 12 Coupling of thermal, fluid and solid submodules

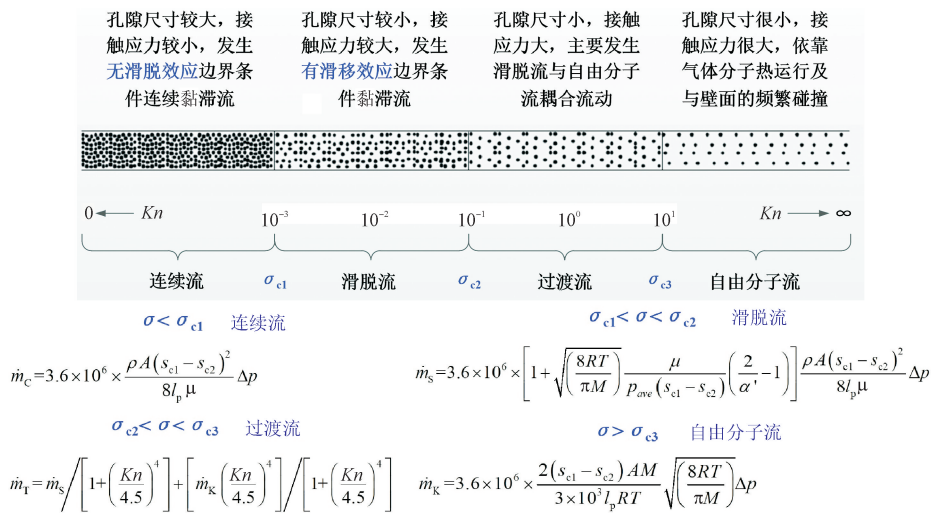


图 13 湿空气流态判断及常用渗流模型^[56-59]

Fig. 13 Flow type judgment of moisture air and commonly used percolation models^[56-59]

4.4 密封机构性能提升技术研究及建议

如前所述,密封机构由柔性密封条及刚性装配间隙组成,刚性装配间隙的改动成本较大。因此,对密封机构的性能提升通常集中在柔性密封条结构型式和材料配方的改进及两种方式的耦合。图 14 所示为采用数值模拟方法对原始结构进行细致的热传

递分析,找到热阻薄弱点,相应地设计飞边、辅助气囊、“S”筋等绝热增强结构,结合制冷箱体温度场 CFD 仿真与制冷系统动态仿真^[60],可获得密封机构热传递负荷下降率与冰箱理论节电率,以更好地评估所提性能技术的节电潜力。如表 2 所示,当改进结构和材料后,仿真计算结果表明,冰箱理论节电率

为 1.42%~7.46%，然而冰箱实际节电率为 0.96%~3.84%，呈现衰减现象。究其原因，制冷装置密封机构具有“尺寸效应”，其横纵尺寸比在 1:100 左右，如图 1 所示，目前家电行业中的箱门机加工偏差造成装配偏差普遍为±2 mm，即横向长度约为 20 mm 密封条在纵向长度为几米的狭长间隙中发生不均匀“刚-柔多体接触”，且装配间距分布具有随机性。在仿真计算时，均仅取了几十毫米宽度物理模型^[29]，纵向长度为几米的装配间隙非均匀性全部表征在内，而从图 11 热固耦合数值模拟结果可知，装配间距对热传递负荷影响较大，当装配间距从 14.7 mm 增大至 16.2 mm 后，热传递负荷增大了 77.17%。若以随机选取的某段计算结果代表密封机构整体，会造成仿真与实际节能效果的差距较大。

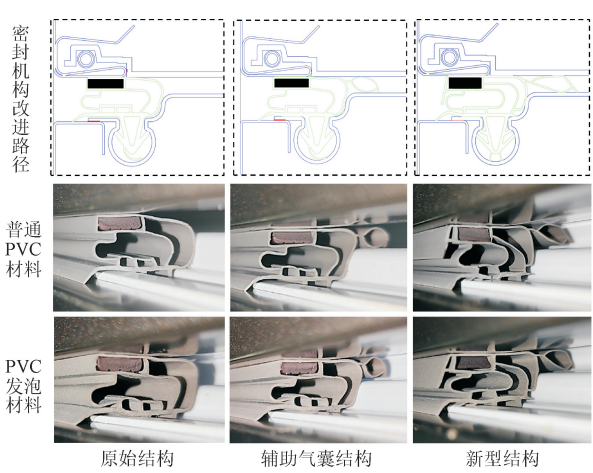


图 14 密封机构性能改进案例

Fig. 14 Case study on performance improvement of seals

表 2 密封机构性能改进节能效果

Table 2 Performance improvement effect of seals

材料	结构	密封机构热传递 负荷理论计算值/W	密封机构热传递 负荷理论下降率/%	冰箱理论 节电率/%	冰箱实际 耗电量/W	冰箱实际 节电率/%
普通 PVC 材料	原始结构	3.23			1 126.33	
	辅助气囊结构	1.94	39.9	5.73	1 115.48	0.96
	新型结构	1.66	48.6	6.97	1 090.12	3.22
PVC 发泡 材料	原始结构	2.91	9.9	1.42	1 107.64	1.66
	辅助气囊结构	1.82	43.7	6.27	1 099.29	2.40
	新型结构	1.55	52.0	7.46	1 083.08	3.84

对比表 2 中结构与材料对密封机构热传递负荷和冰箱节电率的影响可知，结构的影响程度大于材料，结构的改进依赖于热传递仿真计算。通过分析不同传热路径下的热传递负荷，找到热阻薄弱点是密封条与内部冷空气的接触部位，故而在该位置增设辅助气囊，这对密封条挤塑模具的开发成本较小，且热传递负荷下降明显。而对结构进行全方位的改进后，热传递负荷进一步下降，挤塑模具的变动较大，开发成本也相应提高。密封主要由胶条包络空气形成，封闭空气的导热系数为 0.024 2 W/(m·K)^[61]，普通 PVC 胶条的导热系数约为 0.269 6 W/(m·K)，是空气的 10 倍以上，热传递行为主要发生在胶条骨架。因此，可将胶条改性为发泡料，导热系数低至 0.177 6 W/(m·K)。采用发泡工艺制作 PVC 胶条，除 PVC 基体外，还需要发泡剂、发泡调节剂、发泡助剂、润滑油等，发泡形成的多孔气腔可有效降低 PVC 胶条的导热系数。发泡成型的核心工艺是气泡核的形成、气泡核的膨胀和泡体的固化，其中气泡

核的膨胀对发泡的质量起决定性作用。然而，发泡材料的硬度较大，导热系数下降的同时增大了硬度，对装配时的刚-柔贴合度产生负面影响。因此，从表 2 中还可知，导热系数有限的降低对密封机构热传递的影响相对较小。

密封机构改进对湿传递负荷的影响是同步的。在表 2 中，增加辅助气囊结构后，密封机构热阻增大，但是单一尺寸的辅助气囊很难匹配“尺寸效应”下非均匀装配间距，在间距小的装配部位会顶开门体，使门体装配不严，湿传递负荷增大，也造成实际节电效果远小于理论值。同时，硬质低导热材料的使用会影响装配效果。正常装配工况下，湿传递负荷对冰箱耗电量的影响占比约为 15%^[44]，门体装配不严时可能达 50%以上。

本文在探索测量与建模的基础上，对密封机构性能提升的未来发展有如下改进建议。

(1)突破“尺寸效应”技术瓶颈。针对同一制冷装置箱体不同门沿、不同制冷装置门沿的装配间隙

随机性分布的问题,在开发设计柔性密封条时,应具有“批量化”观念,提升所设计密封条的装配适用性,或抽样调研不同生产线的箱门装配间距分布规律,以指导新型密封机构的开发。

(2)密封组件间的良好配合。现有研究及技术改进主要集中于密封条,忽略了其装配部位如“冷桥”、 Ω 槽、台阶、斜槽、防凝露管等的优化布局,而组件的布局会影响密封机构热流固耦合特性的边界条件。当前,对制冷装置密封技术要求越来越高,从密封条改进逐步拓展到整个密封机构各个组件之间的良好匹配是未来的发展趋势,有助于提升密封机构的绝热性能和装配贴合性。

(3)超低导热材料的应用。目前,柔性密封胶条生产中应用的材料导热系数可低至约 $0.16 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,相对普通 PVC 材料导热系数下降了 30% 以上,但是材料硬度上升,装配性能下降,会对绝热性能产生负面作用。因此,在材料应用上,一方面继续寻求导热系数呈数量级下降的材料,如导热系数 $0.014 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的多孔真空硅;另一方面,针对低导热材料装配性能衰减的问题,可采用多元复合材料,在发生“刚-柔”接触部位焊接柔性高的材料,保证装配效果。

5 结论与展望

国内外技术发展与研究现状表明,在开门力、“刚-柔多体接触”、“呼吸效应”及“非均匀间距分布”等复合约束条件下,制冷装置柔性接触式密封机构热-湿-力-结构耦合机理复杂,相关基础性研究尚不深入,有关其性能表征、测量技术、传递机理及优化设计等方面存在诸多问题亟待解决。

(1)高精度热传递测量技术。构筑正向平衡热传递测量系统,引入数字滤波算法及去噪评价指标降低单维测量误差,分析制冷装置箱体热阻分布特性降低测量维度,为模型验证及机理研究提供高精度的热传递实验数据,同步开发可精确表征其绝热性能的评价指标,为密封机构的绝热性能提升提供基础评测手段。

(2)高精度湿传递测量技术。构筑“呼出-吸入”切换实验系统,借助微观检测手段和接触动力学理论,明确湿空气在接触界面微小孔隙中的流动类型,以选用合适的示踪源和构建相应的检测回路,为模型验证及机制研究提供高精度湿传递实验数据;同步开发可精确表征其密封性能的评价指标,为密封机构的密封性能提升提供基础评测手段。

(3)高精度热流固耦合模型。构建引入“刚-柔多体接触”约束的热流固耦合效应模型,数值模拟计算热效应和力效应,解析法计算渗流特性,明确数值模型与解析模型的耦合作用关系边界条件,为研究宽工况下热流固耦合机理和理清复杂约束条件之间的耦合规律提供理论分析手段,为新型密封机构的开发提供理论计算模型。

(4)适应于“尺寸效应”下的密封技术。针对密封机构横纵尺寸比 1:100 状态下固有机加工偏差造成装配间距非均匀、随机性分布的问题,可引入统计学对不同生产线的箱门装配间距分布进行抽样调研,形成普适性的分布规律,用以指导开发多间距分布的新型密封机构。

(5)密封组件间的精细化匹配。密封机构及其周边的细小尺寸组件众多,在复杂约束条件下,打破现有布局方式,如何精细地对各组件的结构、材料及布局进行重组、匹配以达到整件性能最佳是未来重要的发展目标。

本文以制冷装置为例总结了柔性接触式密封机构性能提升的关键技术问题,此类密封机构在航空航天器门框密封、石油化工容器密封、特种实验模拟环境舱密封、冷冻冷藏箱体密封、汽车与建筑房间门窗密封等均有应用,且具有“刚-柔多体接触”和非均质异形的特点,所总结测量、建模、机理及性能研究进展可为其他领域此类密封机构提供性能提升参考。

参考文献:

- [1] 王蕾. 更新拉动结构持续升级,供给驱动高端全线发力:2022 年中国冰箱市场回顾 [J]. 电器, 2023(1): 20-22.
WANG Lei. Renewal drives continuous upgrading of the structure and supply drives the full range of high-end development-review of the Chinese refrigerator market in 2022 [J]. China Appliance, 2023(1): 20-22.
- [2] 李曾婷. 冷柜创新步伐加速,销售高峰不会透支未来 [J]. 电器, 2023(1): 24-26.
LI Zengting. The pace of refrigerator innovation is accelerating and peak sales will not overdraw the future [J]. China Appliance, 2023(1): 24-26.
- [3] 中国制冷学会. 2022 年中国轻型商用制冷产业发展蓝皮书 [EB/OL]. (2023-04-09)[2023-06-01]. https://www.car.org.cn/index.php?s=/articles_1681.html.
- [4] HUELSZ G, GÓMEZ F, PIÑEIRUA M, et al. Eval-

- uation of refrigerator/freezer gaskets thermal loads [J]. HVAC&R Research, 2011, 17(2): 133-143.
- [5] 应雨铮, 刘国强, 晏刚. 商用冷柜热负荷分析及其绝热技术的研究进展 [J]. 制冷与空调, 2021, 21(10): 7-15.
- YING Yuzheng, LIU Guoqiang, YAN Gang. Heat load analysis and research development of thermal insulation technology for commercial refrigerated cabinet [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2021, 21(10): 7-15.
- [6] AFONSO C, CASTRO M. Air infiltration in domestic refrigerators: the influence of the magnetic seals conservation [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(4): 856-867.
- [7] 韩彦南, 侯鸿彬, 王凯, 等. 冰箱门开启力大的原因分析及解决方案 [C]//2021年中国家用电器技术大会论文集. 北京:《电器》杂志社, 2021: 64-67.
- [8] THIESSEN S, KNABBEN F T, MELO C. Experimental evaluation of the heat fluxes through the walls of a domestic refrigerator [EB/OL]. (2014-11-10) [2023-06-01]. https://www.polo.ufsc.br/portal/images/files/EXPERIMENTAL.%20evaluation%20OF%20THE%20HEAT%20_SUSAN_FERNANDO_MELO.pdf.
- [9] PEREIRA P D V, MELO C. A methodology to measure the rates of air infiltration into refrigerated compartments [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 97: 88-96.
- [10] LIU Guoqiang, YAN Gang, YU Jianlin. A review of refrigerator gasket: development trend, heat and mass transfer characteristics, structure and material optimization [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 144: 110975.
- [11] MANFRED W, MATTHIAS B. Tight seal, particularly for a refrigerator or freezer: CO 2018007579A2 [P]. 2018-07-31.
- [12] BATES-HURTADO F. Refrigerator gasket with magnetic sealing element:US D843599S [P]. 2017-06-20.
- [13] KIM C H, PARK M H, LEE J Y, et al. Gasket for refrigerator: KR 20140036773A [P]. 2019-05-07.
- [14] ORKUN K, BURAK Y. Flame-resistant PVC composition for refrigerator door gasket:WO2017/211961 A1 [P]. 2017-06-08.
- [15] 山东威高集团医用高分子制品股份有限公司. 一种TPE改性材料及其制备方法和应用: CN 202210876268.6 [P]. 2022-09-13.
- [16] 张威, 周月飞, 舒宏, 等. 基于RET的门封系统可靠性研究与应用 [J]. 环境技术, 2021, 39(6): 47-52.
- ZHANG Wei, ZHOU Yuefei, SHU Hong, et al. Reliability research and application of door seal system based on RET [J]. Environmental Technology, 2021, 39(6): 47-52.
- [17] 吴业正. 小型制冷装置设计指导 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [18] 李建周, 陈强. 变频压缩机的转速系数对北美冰箱能耗的影响的模拟 [C]//2015年中国家用电器技术大会论文集. 北京: 中国轻工业出版社, 2015: 130-133.
- [19] GRIFFITH B T, ARASTEH D K, TURLER D. Energy efficiency improvements for refrigerator/freezers using prototype doors containing gas-filled panel insulating systems [C]//Proceedings of the 46th International Appliance Technical. California, USA: Lawrence Berkeley Lab, 1995: 457-471.
- [20] NEGRÃO C O R, HERMES C J L. Energy and cost savings in household refrigerating appliances: a simulation-based design approach [J]. Applied Energy, 2011, 88(9): 3051-3060.
- [21] MITISHITA R S, BARREIRA E M, NEGRÃO C O R, et al. Thermoeconomic design and optimization of frost-free refrigerators [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 1376-1385.
- [22] GHASSEMI M. Effects of gasket heat gain and an alternative refrigerant on refrigerator/freezer performance [D]. Ames: Iowa State University, 1993.
- [23] BOUGHTON B E, CLAUSING A M, NEWELL T A. An investigation of household refrigerator cabinet thermal loads [J]. HVAC&R Research, 1996, 2(2): 135-147.
- [24] HESSAMI M A, HILLIGWEG A. Energy efficient refrigerators: the effect of door gasket and wall insulation on heat transfer [C]//ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, USA: ASME, 2003: 57-64.
- [25] STEIN M A, INAN C, BULLARD C, et al. Closed door moisture transport in refrigerator/freezers [J]. International Journal of Energy Research, 2002, 26(9): 793-805.
- [26] KIM H S, SIM J S, HA J S. A study on the heat transfer characteristics near the magnetic door gasket of a refrigerator [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011, 38(9): 1226-1231.
- [27] GAO Feng, SHOAI NAINI S, WAGNER J, et al. An experimental and numerical study of refrigerator heat leakage at the gasket region [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 73: 99-110.
- [28] 陈旗, 晏刚, 方忠诚, 等. 直冷冰箱冷藏室门封传热特性研究 [J]. 制冷学报, 2015, 36(6): 66-73.

- CHEN Qi, YAN Gang, FANG Zhongcheng, et al. A study on the heat transfer characteristics of refrigerating cabinet gasket [J]. *Journal of Refrigeration*, 2015, 36(6): 66-73.
- [29] YAN Gang, CHEN Qi, SUN Zhaolei. Numerical and experimental study on heat transfer characteristic and thermal load of the freezer gasket in frost-free refrigerators [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 63: 25-36.
- [30] TAN Haoshu, SONG Xinzhou, ZHANG Ying, et al. The mass and heat transfer process through the door seal of refrigeration [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2017, 25(8): 1115-1119.
- [31] XIA Guanghui, ZHAO Dan, DING Guoliang, et al. A model for predicting air permeation between temperature-fluctuated refrigerated room and ambience through magnetic seal [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 91: 1-11.
- [32] HESSAMI M A. Calculating energy rating of domestic refrigerators through laboratory heat transfer measurements and computer simulations [EB/OL]. (1997-01-01) [2023-06-01]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Calculating-energy-rating-of-domestic-refrigerators-Hessami/10f527a1e6314d3406d7c08614c33442dcf892e5>.
- [33] MELO C, DE SILVA L W, PEREIRA R H. Experimental evaluation of the heat transfer through the walls of household refrigerators [C]//*International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. West Lafayette, IN, USA: Purdue University Press, 2000:502.
- [34] TAO Weihai, SUN J Y. Simulation and experimental study on the air flow and heat loads of different refrigerator cabinet designs [J]. *Chemical Engineering Communications*, 2001, 186(1): 171-182.
- [35] LIU Guoqiang, YAN Gang, YU Jianlin. Research on test method of heat transfer coefficient for refrigerator gasket [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 110: 106-120.
- [36] LU Xinrui, MEMARI A M. Comparative study of hot box test method using laboratory evaluation of thermal properties of a given building envelope system type [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 178: 130-139.
- [37] KOTOV M A, SHEMYAKIN A N, SOLOVYOV N G, et al. Performance assessment of thermoelectric detector for heat flux measurement behind a reflected shock of low intensity [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 195: 117143.
- [38] GOYAL B, CHYOPHEL LEPCHA D, DOGRA A, et al. Measurement and analysis of multi-modal image fusion metrics based on structure awareness using domain transform filtering [J]. *Measurement*, 2021, 182: 109663.
- [39] SINGH S K, YADAV M K, KHANDEKAR S. Measurement issues associated with surface mounting of thermopile heat flux sensors [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 114: 1105-1113.
- [40] WEN Shuang, QI Hong, LI Yang, et al. An on-line extended Kalman filtering technique for reconstructing the transient heat flux and temperature field in two-dimensional participating media [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2020, 148: 106069.
- [41] NAIK V N, GAMAD R S, BANSOD P P. Effect of despeckling filters on the segmentation of ultrasound common carotid artery images [J]. *Biomedical Journal*, 2022, 45(4): 686-695.
- [42] ALI U, LEE I H, MAHMOOD M T. Guided image filtering in shape-from-focus: a comparative analysis [J]. *Pattern Recognition*, 2021, 111: 107670.
- [43] KHARE S, KAUSHIK P. Speckle filtering of ultrasonic images using weighted nuclear norm minimization in wavelet domain [J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021, 70: 102997.
- [44] LIU Guoqiang, LI Yinlong, XIONG Tong, et al. Study of breathing behavior and its heat load for a refrigerator through the gasket [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 146: 106944.
- [45] 许旭东, 赵丹, 夏广辉, 等. 冷柜门封吸合面水蒸气渗透速率的计算方法 [J]. *制冷学报*, 2017, 38(4): 44-49.
- XU Xudong, ZHAO Dan, XIA Guanghui, et al. Calculation method for water vapor permeation rate through contact surface of refrigerator seals [J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(4): 44-49.
- [46] ASTM. Standard test method for thermal performance of building materials and envelope assemblies by means of a hot box apparatus: ASTM C1363-11 [S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2011.
- [47] SAIDUR R, SATTAR M A, HASANUZZAMAN M, et al. Open and closed door moisture transport and corresponding energy consumption in household refrigerator [J]. *Journal of Energy & Environment*, 2007, 6: 18-27.
- [48] CAO Xiaojian, LI Jialiang, LIU Jianlin. Bio-inspired optimization design and fluid-solid-thermal multi-field verification analysis of labyrinth seal [J]. *Materials & Design*, 2022, 220: 110907.

- [49] 李世聪, 钱才富, 李双喜, 等. 油气两相动压密封动态特性的热流固耦合研究 [J]. 化工学报, 2020, 71(5): 2190-2201.
- LI Shicong, QIAN Caifu, LI Shuangxi, et al. Study of thermal-fluid-solid coupling on dynamic characteristics of oil-gas miscible backflow pumping seal [J]. CIESC Journal, 2020, 71(5): 2190-2201.
- [50] HUANG Weifeng, LIAO Chuanjun, LIU Xiangfeng, et al. Thermal fluid-solid interaction model and experimental validation for hydrostatic mechanical face seals [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(5): 949-957.
- [51] HE Qiang, HUANG Weifeng, LIU Ying, et al. Contact status between seal ring and its support: crucial factor in hydrostatic mechanical face seal [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2019, 71(7): 885-892.
- [52] 西安交通大学. 一种冰箱不同部位漏热负荷测试装置与方法: CN 201910331955.8 [P]. 2020-04-10.
- [53] LIU Guoqiang, XIONG Tong, YAN Gang, et al. Analysis of digital filters used in time-series small heat flux measurement [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 200: 117630.
- [54] LIU Guoqiang, XIONG Tong, YING Yuzheng, et al. Research on proper sampling parameters determination approach of digital filters in small steady-state heat flux measurement [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 194: 108549.
- [55] 西安交通大学. 一种小型制冷空间门封部位湿空气交换率检测装置与方法: CN202010880067.4 [P]. 2021-06-22.
- [56] JAVADPOUR F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shales and siltstone) [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(8): 16-21.
- [57] SHI Juntao, ZHANG Lei, LI Yuansheng, et al. Diffusion and flow mechanisms of shale gas through matrix pores and gas production forecasting [C]//SPE Unconventional Resources Conference Canada, Richardson, Texas, USA; OnePetro, 2013: SPE-167226-MS.
- [58] ROY S, RAJU R, CHUANG H F, et al. Modeling gas flow through microchannels and nanopores [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(8): 4870-4879.
- [59] DARABI H, ETTEHAD A, JAVADPOUR F, et al. Gas flow in ultra-tight shale strata [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 710: 641-658.
- [60] XU Shijie, WANG Min, HAN Lili, et al. A co-simulation method of refrigerator system and temperature field [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 235: 121412.
- [61] CUI Peipei, HE Liang, MO X. Flow and heat transfer analysis of a domestic refrigerator with complex wall conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 209: 118306.

(编辑 亢列梅)