

综述与专论

DOI: 10.11949/0438-1157.

斯特林型制冷机污染失效的研究进展

朱一帆, 朱浩, 王浩熠, 陈曦

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 斯特林型制冷机结构紧凑、可靠性高、制冷温区广, 在低温区应用广泛。其应用场景大多严格要求恒温或不可维修, 目前影响其性能的最主要因素是运行过程中工质污染导致的性能失效。本文概述了国内外对斯特林型制冷机污染失效的研究进展, 归纳了污染成分与污染释放特性, 重点分析了性能变化与不同污染的关系以及污染固体的分布特性。制冷机内部表面吸附的高相变点气体, 在运行过程中逐渐脱附扩散, 随后在机器最冷端凝华, 增加流动阻力与回热损失, 导致机器性能周期性波动。最后展望了亟需明确的机理与参数, 为将来研制长寿命斯特林型制冷机提供了方向。

关键词: 斯特林型制冷机; 污染; 性能失效; 回热器; 相变; 热力学

中图分类号: TB 651

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-09

Research progress on contamination failure of stirling type refrigerators

ZHU Yifan, ZHU Hao, WANG Haoyi, CHEN Xi

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Stirling type refrigerators are compact, highly reliable, and operate across a broad refrigeration temperature range, making them widely used in cryogenic applications. Most of their applications require strict temperature control or do not allow maintenance. At present, performance degradation caused by contamination of the working gas during operation is the primary factor limiting their performance. This paper reviews the research progress on contamination-induced failure in Stirling type refrigerators in China and abroad. It summarizes the results on contaminant species and lifetime tests. The paper focuses on the relationship between performance changes and different contaminants, and on the distribution characteristics of contaminant solids. Gases with high phase transition temperatures, adsorbed on the internal surfaces of the refrigerator, gradually desorb and diffuse during operation. Then they desublimates at the coldest end of the machine, which increases flow resistance and regenerator loss and leads to periodic performance fluctuations. Finally, it points out the mechanisms and parameters that still need to be clarified, and provides guidance for the future development of long-life Stirling type refrigerators.

Keywords: Stirling type refrigerator; pollution; performance degradation; regenerator; phase change; thermodynamics

收稿日期: 2026-02-23 修回日期: 2026-06-08

通信作者: 陈曦(1974—), 男, 博士, 教授, Chenxistudy@163.com

第一作者: 朱一帆(1996—), 男, 博士研究生, zyl1186349847@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52376012)

引用本文: 朱一帆, 朱浩, 王浩熠, 陈曦. 斯特林型制冷机污染失效的研究进展[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1-9

Citation: ZHU Yifan, ZHU Hao, WANG Haoyi, CHEN Xi. Research progress on contamination failure of stirling type refrigerators[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1-9

引 言

斯特林型制冷机结构紧凑、可靠性高、制冷温区广,在低温区效率相比其他制冷方式具有极大优势^[1,2]。近年来,随着航空航天^[3]、国防军事^[4]、低温医疗^[5]、低温保存^[6]等技术和应用领域的快速发展,斯特林型制冷机市场发展迅速,需求量急剧增加。对于许多使用斯特林型制冷机的场景,都要求其能长期稳定运行。尤其是空间用制冷机,由于其投入使用后不可维修的特点,对寿命与可靠性要求极高。根据图1所示的制冷机失效率曲线,可以通过装配后进行跑合,让机器在出厂前就度过早期失效

期,以此筛选出能够稳定长期运行的制冷机^[7]。斯特林型制冷机的失效原因主要有杂质污染、氦气泄漏、机械磨损、疲劳断裂四点^[8],通过采用气体轴承、间隙密封、表面涂层等手段,制冷机寿命获得显著提高。如 Landsat 8 任务的 40 K 两级斯特林制冷机在运行超过 11 年后依然能保持初始性能^[9]。然而在数千至数万小时后,制冷机内逐渐释放出杂质气体,这些杂质在低温下相变、累积,会逐渐导致制冷性能缓慢衰退,此时仍可通过提高输入功增加制冷量来维持原有性能。随着时间推移,机器进入损耗失效期,最终发生不可接受的性能恶化。而目前气体污染是影响斯特林型制冷机寿命的最大因素^[10]。

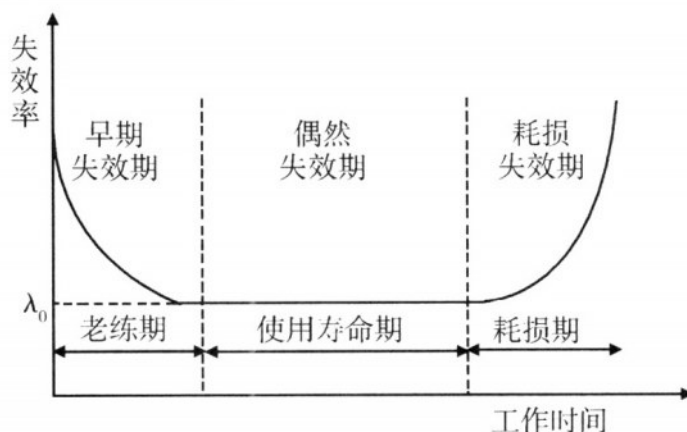


图1 失效率曲线^[8]

Fig.1 Failure curve of Stirling cooler

本文综述了斯特林型制冷机受污染失效研究的最新进展,详细介绍了制冷机内部材料的放气机理与机器内污染相变过程,最后指出了当前研究中对污染相变机理研究的不足,并展望了今后对制冷机污染研究的方向与亟待解决的问题。

1 制冷机内污染释放与扩散

1.1 污染气体成分

引出制冷机内的气体,使用质谱仪对其分析可以准确测得机器内各组分的构成与浓度。Hall等^[11]首次研究了脉管制冷机中的气体杂质,通过质谱仪分析 60 K 低温制冷机中运行前后的气体成分,运行后水、CO₂和N₂有所增加。CMC 电子公司基于型号为 B512B 的制冷机长寿命测试数据,对制冷机内部气体污染物的积累问题展开了研究,发现其中出现了丙酮^[12]。此后刘向阳研究发现还会产生氢气、甲烷等,且不同气体释放量差异巨大^[13],这是由于工作

过程中高温会导致有机材料中释放出吸附的气体。各机器运行前后污染含量如表1所示。Sato^[13]对一台两级斯特林制冷机内的杂质气体进行分析,含量从高到低依次为H₂O, H₂, O₂, CH₄, CO₂, CO。由此可见, H₂O、CO₂、N₂、CH₄等小分子气体是制冷机内最常见的污染气体,根据工艺不同,还可能会出现少量其他气体。徐少辉等^[14]将充气系统接入一个浸泡在液氮中的吸附器中,通过低温与活性炭吸附的共同作用,将氦气的纯度从 99.0471% 提高到了 99.8066%。他对不同压力下冲刷置换后的气体成分进行分析,发现不同杂质的最佳冲刷压力不同,最终作者提出以一个大气压的压力进行冲刷置换可最大化置换效率。

1.2 气体释放与扩散特性

不同的气体与壁面的结合能不同,因此在真空除气阶段的除气速率也不同。Getmanits^[15]等对此进行了研究,发现CO₂和N₂比Ar和He需要更长的时间才能除去。同时,他也发现使用氦气吹扫可以获

表1 加速寿命试验前后样机工质的分析结果^[11-13]

Table 1 Gas analysis results of cryocooler before and after accelerated life testing

污染成分	样机1浓度/ 10^{-6}		样机2浓度/ 10^{-6}		样机3浓度/ 10^{-6}
	运行前	运行后	运行前	运行后	运行后
N ₂	17	70	73	118	—
H ₂ O	2	8	6	9	23
H ₂	—	—	2	119	—
CO ₂	2	5	17	108	70
CH ₄	—	—	—	25	144
其他	Ar:1	Ar:1	—	—	丙酮:66

得与真空除气近似的除气速率。由于真空泵处与制冷机内的真空度可相差2-3个数量级,因此使用He吹扫是有效快速的除杂方法。除气时机器内部会有以下四个阶段^[16]:

- (1)制冷机内部气体的排出;
- (2)内表面多层吸附气体外层的脱附;
- (3)内表面最内层吸附气体的脱附;
- (4)材料中气体的释放。

Yuan等^[17]基于脉管制冷机在不同温度下的气体释放率,给出了制冷机内气体污染质量的释放表达式(1),并提出装配时高温烘烤部件以减少工作期间污染气体释放量。

$$m = m_0 \exp(BT) [1 - \exp(-t/A)] \quad (1)$$

其中 m_0 为污染总质量,B和A为可通过实验获得的温度相关常数和与时间相关常数,T为制冷机温度。他通过烘烤除气实验发现,水蒸气、酒精、丙酮等的抽气特性基本相同,温度越高,除气效果越好。杨宝玉等^[18]通过实验发现需要100℃高温烘烤除气7天以上才能除去大部分水蒸气,除气周期长,难以规模化生产。他还对制冷机内关键部件的放气特性进行了测试^[19],如表2所示。表中的TML、CVCMM、WVR分别为总质量损失、收集到的可凝性挥发物和水蒸气回吸量,这表明经过选择可将可凝性挥发物含量降至忽略不计,在释放出的气体中水蒸气含量可达到一半及以上。Spoor^[20]取 $e^{BT}=1$ 对表达式1进行简化后,预测制冷机性能与水蒸气含量的关系,他提出水蒸气质量与回热器表面积达到0.01 mg/mm²时,制冷机冷端温度会上升1 K这一经验参数,并在一台50 K制冷机上进行了验证。然而作者并未介绍机器尺寸与类型,也未做多款机器的比较,因此这一参数有较大的局限性。通常认为通过使用更少放气及更光滑的材料,可以减少因材料而释

放的污染气体。然而Spoor也在论文中提到,厂家宣称的“低放气”电机定子的VPI浸渍材料实际气体释放量巨大,长时间烘烤后也无法满足要求,更换产品后才解决问题。Sato等^[21]对各部件中的放气量进行测试后发现运动部件放气率恒定,而静止部件放气率随时间逐渐降低。压缩机部分含有大量运动部件,同时其中材料复杂,因此最容易在机器运行中释放污染气体。

表2 关键部件材料放气特性测试^[19]

Table 2 Outgassing characteristics testing of materials for critical components

材料名称	TML/%	CVCMM/%	WVR/s%
玻璃钢	0.33	0.00	0.15
CY-128环氧+固化	0.53	0.00	0.43
聚酰亚胺	0.95	0.00	0.49
缩醛漆包线	0.10	0.00	0.03
聚酰亚胺漆包线	0.06	0.00	0.03

污染物从压缩机释放后,通过几微米的间隙密封与几毫米的连管从压缩机运送到冷指。为了计算除气时间,杨宝玉等^[22]使用蒙特卡罗方法模拟了分子流的情况下,污染分子烘烤除气时气体杂质分子从压缩机到冷指的运动,与实验值有较好的吻合度。结果表明半径1.2 mm,长100 mm的连管传输几率为2.99%;内径15.98 mm,外径16 mm,长度16 mm间隙密封环路的传输几率为2.33%,此结果与他在污染传输实验台^[23]获得的实验基本一致。因此当压力降低至接近真空时,制冷机内部的除气将极为困难,需要消耗大量时间与能源才能完成最后阶段。

1.3 寿命测试方法

目前对制冷机寿命测试的方法分为两类,一种是在设计所需的工况下持续运行,如美国的空军研究实验室(AFRL)^[24]或NASA,然而制冷机寿命须达到数万小时至十万小时以上,因此这类实验非常耗费时间,如AFRL的实验从2002年开始至2014年报道时仍在持续。Narasake^[25]对12台运行数千小时至近10万小时的斯特林制冷机进行跟踪,发现其温度逐渐升高。另一种则是快速实现制冷机内污染释放的过程,通常将制冷机放置在更高温度的环境或提高散热温度,以加速污染释放^[26-27]。Getmanits等^[16]率先基于斯特林制冷机设计了针对材料放气速率的加速试验方法,可将材料放气速率提高20至50倍。他们将制冷机分成关键单元,每个单元都根据

自己独特的程序进行测试。完成测试和组装后,将制冷机参数与在加速测试开始之前的系统参数进行比较^[28]。Wan等^[29]将一台斯特林型脉管制冷机置于恒温箱内,在不同的加热温度下运行,并与所建立的加速模型进行验证,获得对应的加速因子,最终可将十年的寿命测试加速至一年内完成。随后他又通过将两台气库型脉管制冷机使用热端温度交替变化的热循环方式,建立了可靠性评估模型^[30]。

根据这些研究,制冷机内的除气模型与寿命预测加速模型已经基本完成,但是实际工程中对于斯特林型制冷机的污染失效防治手段还处于经验摸索阶段。主要采用雷神公司制定的高精密高洁净度的装配工艺、材料选择、器件隔离、源气提纯、高温烘烤除气等前期处理手段^[31]。需要在高标准洁净室中通过长时间烘烤除气以及多次冲刷置换,成本高且耗时长。这些措施工艺复杂,只能令制冷机污染失效得到一定程度上的延缓,适当延长制冷机寿命,尚未从结构设计层面改善制冷机污染失效的问题。

2 制冷机污染失效特性

2.1 对制冷性能的影响

污染附着是导致回热式制冷机性能衰减的核心机制之一,其导致流道堵塞,增加了流动阻力,又减小了传热面积,使传热系数减小,从而使有限传热损失增加,最终导致制冷性能的下降^[32]。杨宝玉等^[33]在斯特林制冷机中加入丙酮后制冷量先小幅升高之后略有降低,制冷量下降与污染加入量并非线性关系。加入42 mg时,衰减10%,加入121 mg后,制冷机量剧烈下降。污染物在制冷机失效前能加入的量也各不相同,在发生重大衰减前可加入的质量分别为丙酮>水>酒精^[34]。对一台两级斯特林制冷机加入0.499%浓度的CO₂后,通过排出器的感应电流来检测其位移状态。发现其运行一段时间后排出器位移迅速减小至0,与此同时冷端温度上升,因此认为是固体污染在冷端卡住了排出器,导致制冷性能消失^[36]。张晓华^[35]通过对N₂、O₂、CO₂、Ar、H₂、H₂O、酒精、丙酮等多种污染在线加入脉冲管制冷机的实验研究发现,污染气体的相变温度为其所占分压力对应的相变温度。基于这一发现,Feng等^[37]将制冷温度设定在N₂相变温度附近后快速加入N₂,发现冷端温度会波动,如图2所示。当回热器冷端温

度显著低于污染物相变温度时,加入少量污染物反而可降低冷端温度并保持稳定,这可能是污染物附着在填料表面改变了该段回热器空隙率与热容量。Ma等^[38]在制冷机内加入0.005–0.015%的N₂,发现加入的浓度越高,制冷性能越差。冷端温度持续上下波动,波动范围最高由加入的污染量决定,最低为无污染时的温度。但即使是0.015%的N₂,当冷端温度为36 K低于N₂的饱和温度时,冷端温度和出口相位并不会发生明显的波动。制冷机性能波动时内部存在如图3所示的循环:压缩过程中气团A被压缩,到达冷端。由于冷端温度接近氮气的饱和温度,冷凝后的固体N₂被压缩氮气加热并升华。膨胀过程中气团B膨胀并到达冷端,N₂在此降温并冷凝。这一结论与Feng的实验^[37]中35 K时加入8 mg N₂即发生温度波动,而25 K时加入60 mg N₂仍能保持温度稳定的结果一致。因此可推测,低温区制冷机对污染具有更高的容忍度,但是他的实验中并未复现少量加入N₂后制冷性能提高的现象。

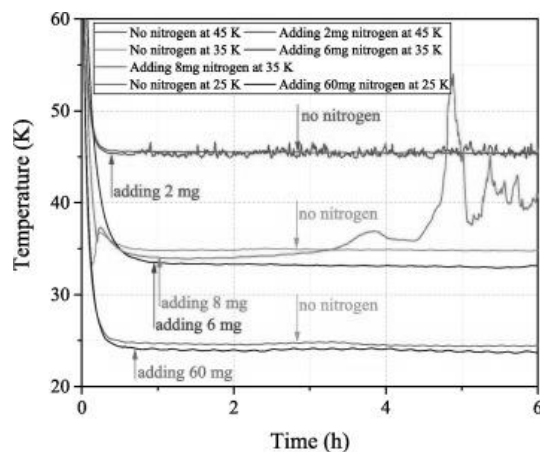


图2 最低温度与N₂加入量的关系^[38]

Fig.2 The relationship between the minimum temperature and nitrogen added

不同气体的饱和温度不同,以0.1%浓度的污染为例,较高温区运行的制冷机,会发生相变的气体种类较少,如170 K的制冷机内仅有H₂O会发生相变。且这类制冷机使用的回热器一般目数较低,因此污染物结霜后造成的影响较小。而越低温区的制冷机污染结霜的质量越大,如40 K的制冷机会有H₂O、CO₂、N₂、O₂、CH₄等多种污染物发生相变。即使对源气进行提纯,也依然会有大量低相变温度的气体残留。同时回热器冷端填料的目数会更大,孔隙更容易被堵塞,此时制冷机内污染对流动的影响会被加倍放大。目前的研究多是以单一种类污染的

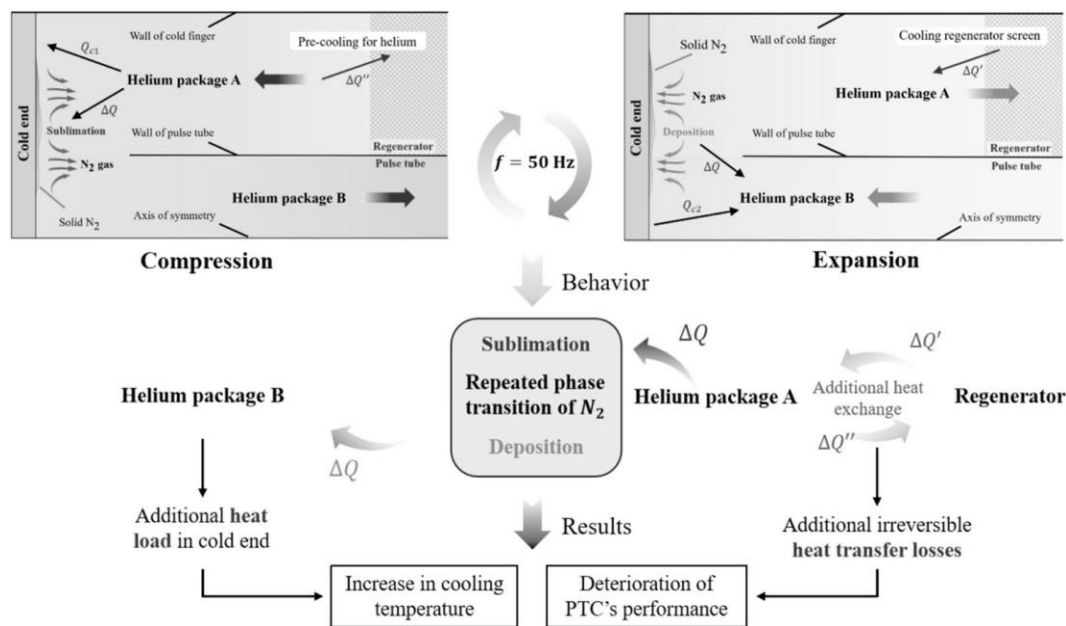
图3 制冷机内温度波动过程^[38]

Fig.3 The process of repeated phase transition occurring in PTC with trace nitrogen

加注进行分析,对低温区制冷机的多种污染混合加注仍有待进一步研究。

2.2 污染分布特性

通过制冷量与制冷温度只能通过结果倒推推测机器内部发生了污染堵塞,无法了解机器内发生的变化,因此需要研究污染物的分布情况,以此来对机器进行优化改进。何雅玲等^[39]假设水蒸气在斯特林制冷机的回热器内有三种霜层分布形式,建立了二维模型计算不同分布方式对流动及传热的影响,并通过不同分压模拟了制冷机在运行中产生水蒸气和停机启动后的结霜过程。但该研究对模型的假设较为理想化,未考虑霜层的动态迁移,且未经实验证实。因此其认为对性能恶化的制冷机停机重启后,性能会获得恢复不再恶化,这与其他研究者的停机重启实验结果相矛盾。Feng 等^[37]通过 Sage 模拟来预测制冷机内部污染情况,该方法假设污染在一小段回热器中均匀分布,获得了与实验接近的制冷量变化。但是不同温度下气体黏性阻力系数与惯性阻力系数不同,回热器冷热端温度差异巨大,需要开展二维数值模拟^[40]。Zhu 等^[41]使用分子动力学对污染在回热器内部的相变情况进行了分析,发现污染物在回热器分布的区间只受温度影响。温度越低在丝网表面附着越快,且当 50 K 时,氮分子先聚成团然后附着到丝网上。但是他的模型为了有足够的初始污染浓度远高于制冷机内污染平均水平,进行了一定的简化假设,与制冷机内

较低平均浓度的污染物逐渐富集到低温区的过程并完全不一致。以此模型为基础,他比较了 H_2O 、 CO_2 、 N_2 三种气体在回热器丝网上的生长状态,发现污染生长的形态各不相同。 N_2 凝华后呈层状生长,会均匀包裹在丝网上,而 CO_2 和 H_2O 凝华后呈岛状生长,因此对流道的干扰更明显,因此不同成分的污染对机器性能的影响各异^[42]。

由于斯特林型制冷机外壳为不锈钢,因此无法通过常规手段观察机器内的污染气体相变过程,目前主要有使用透明外壳直接观测和使用中子照相两种方式。Hall等^[43]设计了一款透明外壳的脉管制冷机以观察污染物在机器内的分布及相变过程。在机器内充入0.04%的水蒸气后启动机器,可以观察到像雪一样多孔的霜层先后出现在脉管冷端和回热器最冷端。在200 K以上时,可以观察到霜层的崩落与移动,而在200 K以下时,霜层变得坚实,不再移动。如图4所示,Jiang等^[44]也设计了一台冷指全部使用玻璃外壳的脉管制冷机,可用于观察冷指内部的情况。这证明了可以通过透明外壳的制冷机进行可视化实验,以此对内部的结霜过程进行直接观察。考虑到玻璃壁面的承压能力和漏热,这两款可视化的脉管制冷机均采用低充气压力,分别为1.5 MPa与0.68 MPa,并且难以达到更低的温度,两款机器的实验温区均为150 K以上,这限制了可实验的气体种类仅有H₂O和CO₂。为了获得更好的观察效果,这两款可视化装置均没有装有冷端换热

器或层流丝网,无法体现这两个部件对污染的吸附作用。而使用玻璃外壳的另一个缺点则是它难以承受载荷,因此在机器外进行真空绝热也是操作难点。第一个案例的冷指仅有回热器与脉管体积较小,因此将整个冷指都装在一个真空罩中。而第二个案例为气库型脉管,冷指体积巨大,因此冷端直接暴露在空气中,空气中的水蒸气在冷指外表面结霜影响对内部的观察。

Ma 等^[45]将乙烯加入同轴型制冷机后,在运行时使用中子照相拍摄机器内污染分布情况,这一方法可以研究正常运行工况下的机器。如图5所示,污染物基本都聚集在回热器冷端,并且形成了三角形的污染物,而不是均匀分布在丝网上。同时,由于脉冲管制冷机内氦气交变流动,制冷机内的污染靠浓度梯度扩散,而非流动扩散。因此他在CFD模拟中发现由于脉冲管内扩散速度显著快于回热器内,75%以上的污染物分布其中,而污染物沉积在脉管中会增强其中的湍流,影响声功转化。诺思罗普·格鲁曼公司对一台双冷指脉管制冷机进行寿命测试,在经过6年储存14年运行后低温冷指的冷端温度上升约3 K,而高温冷指的冷端温度不变,这说明污染会持续向机器内最低温度处聚集^[46]。

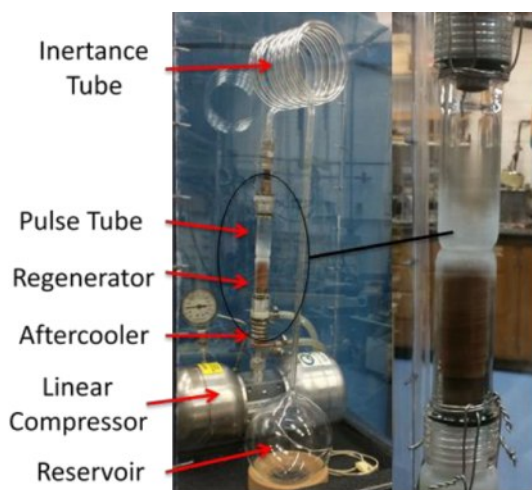


图4 脉管制冷机可视化装置^[44]

Fig.4 Visualized pulse tube refrigerator

根据已有的研究实验现象,可以认为斯特林型制冷机性能恶化主要是由于污染物在制冷机内冷端凝华,使机器内流阻与回热损失变大,冷端温度持续上升。在此过程中气体分压减小,相变温度降低。当温度上升至与相变温度平衡时,温度便达到平衡不再变化。而当冷端温度较高,固体受气流冲击发生崩落或发生动态迁移,严重堵塞流道时,制

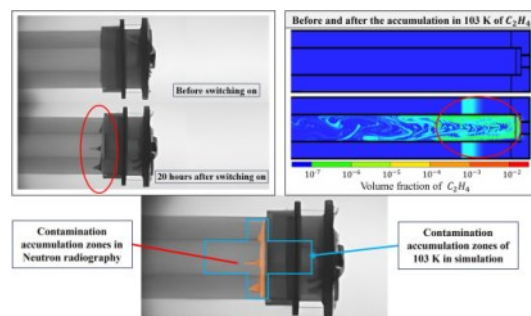


图5 脉管制冷机中污染物积累的可视化和模拟结果^[45]

Fig.5 Visualization and simulation for accumulation of contamination in pulse tube refrigerator

冷机性能会发生严重恶化,制冷温度迅速上升,固体污染升华。冷端温度降低进入下一个波动循环。

3 性能恢复措施

由于制冷机内污染气体的释放无法避免,因此需要研究制冷机污染失效后的性能恢复措施。在性能轻度恶化时,仅依靠增加输入功便可使制冷效果恢复。Ross对Aqua卫星上的大气红外探测仪中的脉管制冷机进行了跟踪,仅需略微增加输入功便可使机器稳定运行了20年^[47]。JAXA的Tanaka等^[48]通过增加的输入功使两级斯特林制冷机的冷端温度再次满足了设计要求。Narasaki^[25]发现当一台已发生性能衰减的单级斯特林制冷机因故障停机重启后,其制冷性能可以获得恢复。但是在8万小时后冷端温度大幅升高,重启策略也失去作用^[49]。在他对两级压缩斯特林制冷机也采用停机重启的策略后,一级冷头温度也获得了恢复,但是二级冷头的温度受重启影响较小。随着时间的推移,制冷机的一级冷头温度逐渐升高,停机重启的效果越来越差,直到彻底失效。刘心广等^[50]通过停机重启尝试恢复一台受污染的斯特林制冷机性能,发现重启后制冷性能会短时间改善,但是运行一段时间后便会再次恶化,无法从根本上解决失效问题,但是当第三次重启后,冷端温度上升速率减小。这两个实验中制冷机性能均在重启后获得了一定的恢复,但是在长达数年的测试中,随着时间的推移,停机重启逐渐失去效果。这说明当污染量较少时通过升温重启可以在短时间内改变污染物的分布,降低对性能的影响。但当污染量增加后,重启后短时间内污染快速在冷端聚集达到失效临界点。

Sato等^[36]在20 K两级斯特林制冷机的背压腔连管处加入吸附器,如图6所示,并比较了三种污染物

- 分析[J]. 低温工程, 2009(2): 61–64.
- Zhang Y Q, Gao Y, Wang Z C /Z/, et al. Reliability analysis of failure for linear Stirling cryocoolers[J]. Cryogenics, 2009(2): 61–64.
- [8] 闫春杰, 潘雁频, 许国太, 等. 空间斯特林制冷机失效分析[J]. 低温工程, 2009(5): 10–14.
- Yan C J, Pan Y P Xu G T, et al. Failure analysis of space Stirling cryocooler[J]. Cryogenics, 2009(5): 10–14.
- [9] R. Boyle, T. Muench, R. Taylor, et al. Landsat 8 & 9 TIRS Instrument Cryocooler On-Orbit Performance and Long-Term Trending[M]//Cryocoolers 23. Boulder, Colorado: ICC Press, 2024: 9–16.
- [10] 方雪晓, 黄燕. 空间低温制冷机可靠性试验与寿命预测方法[J]. 低温与超导, 2017, 45(2): 24–26, 34.
- Fang X X, Huang Y. The reliability test and service life prediction method for space-detecting cryocooler[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2017, 45(2): 24–26, 34
- [11] Hall J L, Ross R G. Gas contamination effects on pulse tube performance[M]//Cryocoolers 10. Boston, MA: Springer US, 2002: 343–350.
- [12] Yuan S W K, Kuo D T, Lody T D. CMCEC life test results and related issues[M]//Cryocoolers 12. Boston, MA: Springer US, 2003: 79–85.
- [13] 刘向阳, 杨少华. 斯特林制冷机磨损和污染的特性分析[J]. 低温与超导, 2010, 38(2): 27–29.
- Liu X Y, Yang S H. Wear abrasion and gas contamination characteristic analysis of Stirling cryocooler[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2010, 38(2): 27–29.
- [14] 徐少辉, 赵密广, 梁惊涛. 脉冲管制冷机充气系统的纯化研究[J]. 低温工程, 2010(1): 25–27.
- Xu S H, Zhao M G, Liang J T. Study on purification of pulse tube cryocooler's gas supplement system[J]. Cryogenics, 2010(1): 25–27.
- [15] Getmanets V F, Zhun' G G. Cryocooler working medium influence on outgassing rate[M]//Cryocoolers 10. Boston, MA: Springer US, 2002: 733–741.
- [16] Getmanets V F, Zhun G G, Stears H. Accelerated cryocooler life tests for cryodeposit failures[M]//Cryocoolers 10. Boston, MA: Springer US, 2002: 743–751.
- [17] Yuan S W K, Kuo D T. Cryocooler contamination study: temperature dependence of outgassing[M]//Cryocoolers 11. Boston, MA: Springer US, 2002: 659–664.
- [18] 杨宝玉. 微型机械制冷机污染机理及控制技术[J]. 红外, 2006, 27(6): 41–46.
- Yang B Y. Contamination mechanism and control procedures of miniature mechanical cryocooler[J]. Infrared, 2006, 27(6): 41–46.
- [19] 吴亦农, 杨宝玉, 府华. 空间斯特林制冷机的污染机理与控制研究进展[C]//第八届全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网2007年度学术交流会议论文集. 2007: 490–495.
- WU Yinong, YANG Baoyu, FU Hua. Research progress on contamination mechanisms and control of space Stirling cryocoolers[C]// Proceedings of the 8th National Conference on Cryogenic Engineering and the 2007 Annual Academic Conference of China Aerospace Cryogenic Information Network. 2007: 490–495.
- [20] Spoor P S. Quantifying cryocooler contamination[M]//Cryocoolers 19, Boulder, Colorado: ICC Press, 2016: 631–637
- [21] Sato Y, Shinozaki K, Sawada K, et al. Outgas analysis of mechanical cryocoolers for long lifetime[J]. Cryogenics, 2017, 88: 70–77.
- [22] 杨宝玉, 吴亦农, 府华. 蒙特卡罗法用于机械制冷机污染传输特性的仿真计算[J]. 低温与超导, 2006, (02): 105–108+117.
- Yang B Y, Wu Y N, Fu H. The simulation of contamination transfer mechanism of mechanical cryocooler using Monte Carlo method [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2006, (02): 105–108+117.
- [23] 杨宝玉, 府华, 吴亦农. 微型机械制冷机污染传输机理的研究[C]//上海市制冷学会. 上海市制冷学会2005年学术年会论文集. 中国科学院上海技术物理研究所, 2005: 50–53.
- Yang Baoyu, Fu Hua, Wu Yinong. Study on contamination transport mechanisms in miniature mechanical cryocoolers[C]// Shanghai Society of Refrigeration. Proceedings of the 2005 Annual Academic Conference of the Shanghai Society of Refrigeration. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005: 50–53.
- [24] Martin K W, Fraser T. Air Force Research Laboratory Spacecraft Cryocooler Endurance Evaluation Update[M]//Cryocoolers 18, Boulder, Colorado: ICC Press, 2014: 609–616.
- [25] Narasaki K, Tsunematsu S, Ootsuka K, et al. Lifetime test and heritage on orbit of coolers for space use[J]. Cryogenics, 2012, 52 (4/5/6): 188–195.
- [26] Yumoto K, Nakano K, Hiratsuka Y. Reliability Evaluation of Stirling Cryocooler for an Electric Vehicle High Temperature Superconducting Motor System[M]//Cryocoolers 19. Boulder, Colorado: ICC Press, 2016. 639–646.
- [27] 杨少华, 张晓明, 刘心广, 等. 斯特林制冷机污染退化的加速寿命模型[J]. 红外技术, 2008, (8): 462–464.
- Yang S H, Zhang X M, Liu X G, et al. An Accelerated Life Model for Contamination Degradation of Stirling Cryocooler[J]. Infrared Technology, 2008, (8): 462–464.
- [28] Eremenko V V, Getmanets V F, Levin A Y, et al. New methodology and apparatus for accelerated long-life testing of linear-drive cryocoolers[J]. Cryogenics, 1999, 39(12): 1003–1005.
- [29] Wan F B, Tan Y Y, Jiang Z H, et al. Lifetime prediction and reliability estimation methodology for Stirling-type pulse tube refrigerators by gaseous contamination accelerated degradation testing[J]. Cryogenics, 2017, 88: 116–124.
- [30] Wan F B, Chen X, Jiang Z H, et al. Effect of thermal cycling on operational characteristics and lifetime prediction of space pulse tube refrigerator[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019(1): 6410704.
- [31] Castles S, Price K D, Glaister D S, et al. Space cryocooler contamination lessons learned and recommended control procedures[M]//Cryocoolers 11. Boston, MA: Springer US, 2002: 649–657.
- [32] 杨宝玉, 府华, 吴亦农, 等. 回热式机械制冷机的污染机理与控制技术分析[J]. 低温工程, 2005(6): 37–41.
- Yang B Y, Fu H, Wu Y N, et al. Analysis of contamination mechanism and control technology of mechanical cryocooler[J]. Cryogenics, 2005(6): 37–41.
- [33] 杨宝玉, 吴亦农, 府华, 等. 丙酮污染对微型机械制冷机性能影响的实验研究[J]. 低温工程, 2006(2): 25–29.
- Yang B Y, Wu Y N, Fu H, et al. Experimental research on the effect of acetone contamination on miniature mechanical

- cryocooler performance[J]. Cryogenics, 2006(2): 25–29.
- [34] 杨宝玉, 吴亦农, 府华. 污染对斯特林制冷机性能影响的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2007, **28**(2): 199–201.
- Yang B Y, Wu Y N, Fu H. Experimental research of the effect of contamination on stirling cryocooler's performance[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, **28**(2): 199–201.
- [35] 张晓华. 污染杂质对脉冲管制冷机性能的影响机理研究 [D]; 中国科学院大学, 2018.
- Zhang X H. Study on the Influence Mechanism of Contamination on the Performance of Pulse Tube Cryocooler [D]; Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [36] Sato Y, Tanaka K, Shinozaki K. Demonstration test of gas contaminants adsorbent for space Stirling cooler[J]. Cryogenics, 2024, **141**: 103884.
- [37] Feng T S, Chen H L, Liu X T, et al. Effect of nitrogen contamination on the performance of pulse tube cryocoolers[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, **201**: 117810.
- [38] Ma J H, Hui H J, Jiang Z H, et al. Experimental study on the effect of trace nitrogen on pulse tube cryocooler in 40 K temperature range[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, **275**: 126778.
- [39] He Y L, Zhang D W, Yang W W, et al. Numerical analysis on performance and contaminated failures of the miniature split Stirling cryocooler[J]. Cryogenics, 2014, **59**: 12–22.
- [40] 张晨. 脉管制冷机回热器阻力特性实验研究与仿真分析[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2017.
- Zhang C. Experimental study and simulation analysis on the resistance characteristics of regenerator in pulse tube cryocooler [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [41] Zhu Y F, Chen X, Zheng P, et al. Molecular dynamics simulation of periodic flow containing contaminant in the regenerator[J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, **404**: 124905.
- [42] Zhu Y F, Song Y X, Zhu S L, et al. Molecular dynamics insights into contaminant phase transition and regenerator blockage mechanisms[J]. Applied Thermal Engineering, 2026, **283**: 128974.
- [43] Hall J L, Ross R G, Jr, et al. A contaminant ice visualization experiment in a glass pulse tube[J]. 2002.
- [44] Jiang Z, Bernhardt C, Pfothner J M. Design of the glass pulse-tube cryocooler[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, **278**(1): 012150.
- [45] Ma J H, Shao B, Zhao P, et al. CFD simulation analysis and visualization experimental study of gas contamination condensation distribution in coaxial pulse tube cryocooler[J]. International Journal of Refrigeration, 2025, **174**: 333–342.
- [46] Dzigiel H, Rich N, Sullivan C, et al. ABI Life Test cryocooler system 2025 update[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2026, **1344**(1): 012015.
- [47] Ross R G, Johnson D L, et. al. AIRS Pulse Tube Coolers Performance Update – Twenty Years in Space[M]//Cryocoolers 22. Boulder, Colorado:ICC Press, 2022: 43–51.
- [48] Tanaka H, Sato Y, Tanaka K, et. al. Reliability Enhancement of the Double-Stage Stirling Cooler for Space Science Missions[M]//Cryocoolers 23. Boulder, Colorado:ICC Press, 2024: 57–62.
- [49] Narasaki K, Tsunematsu S, Otsuka K, K. Kanao, A. et al. Lifetime Test and Heritage On-Orbit of SHI Coolers for Space Use[M]//Cryocoolers 19. Boulder, Colorado:ICC Press, 2016: 613–622.
- [50] Liu X G, Wu Y N, Yang S H, et al. Performance degradation of space Stirling cryocoolers due to gas contamination[J]. International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Advances in Infrared Imaging and Applications, 2011, **8193**: 81930G.