

脉管制冷机的研究进展及其仿真优化*

姜远镇¹, 邓家良^{1,2}, 韩雨松¹, 武义锋^{1,2}

(1. 安徽万瑞冷电科技有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 中国电子科技集团第十六研究所, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 脉管制冷机具有高稳定性、持久运行和低振动等特性, 符合高真空设备低温泵对冷源的要求, 在低温真空泵领域的关注度越来越高。本文首先介绍了脉管制冷机的基本原理和分类, 然后按照驱动方式总结了不同脉管制冷机的最新研制进展, 最后重点分析了不同仿真方法在脉管制冷机研发和优化过程中的实际应用。

关键词: 低温真空泵; 脉管制冷机; 仿真优化

中图分类号: TB752+.53

文献标识码: A

文章编号: 1002-0322(2024)04-0035-07

doi: 10.13385/j.cnki.vacuum.2024.04.07

Latest Research Progress and Simulation Optimization of Pulse Tube Cryocooler

JIANG Yuan-zhen¹, DENG Jia-liang^{1,2}, HAN Yu-song¹, WU Yi-feng^{1,2}

(1. Vacre Technology Co., Ltd., Hefei, 230088, China;

2. China Electronic Technology Corporation 16th Institute, Hefei 230088, China)

Abstract: Higher stability, longer operating time and low vibration characteristics of pulse tube cryocooler (PTC) meet the requirements of high vacuum equipment and low-temperature pumps for cold sources, so PTC is increasingly popular in the field of low-temperature vacuum pumps. First, the basic principle and classification of PTC is introduced. And then, the latest development progress of PTC is summarized according to the driving mode. Finally, the advantages and disadvantages of different simulation methods in the development and optimization process are analyzed emphatically.

Key words: cryopump; pulse tube cryocooler; simulation optimization

随着现代科学、半导体工业和低温真空泵等领域的高速发展, 对小型低温制冷机提出了越来越高的要求, 主要涉及紧凑性、高效率、可靠性以及便携性等方面。脉管制冷机同传统的 GM 制冷机、斯特林制冷机相比, 在低温区间无移动部件, 具有结构简单、成本低廉、可靠性高、机械振动低且电磁噪声小等特点^[1], 在低温真空泵领域受到越来越多的关注。本文结合脉管制冷机的发展历程, 介绍了其基本原理、分类和最新研究进展, 并且总结了多种仿真方式对脉管制冷机研制的影响, 以期推动脉管制冷机的实际应用进展。

1 脉管制冷机的发展历史及基本原理

脉管制冷机的发展经历了三个主要阶段, 分

别是基本型、小孔气库型以及双向进气型。

Gifford 和 Longsworth 在 1960 年初研发出了基本型脉管制冷机, 结构如图 1 所示^[2]。其原理为交变压力波存在于封闭中空管(脉管)时, 中空管的封闭端发热、轴向形成较大的温度梯度, 冷端连接回热器和层流化元件, 并不断将封闭端冷却至室温, 则中空管的冷端可获得冷量^[2]。通过优化性能参数, 基本型脉管制冷机的无负载温度可达 124 K, 其优势为无排除器, 但这会导致缺少调相方式, 因而效率(COP 值)较低。鉴于此, Mikulin 等^[3]在 1984 年改进基本型脉管制冷机, 在脉管热端增加小孔和气库(小孔位于脉管与热端换热器之间), 形成小孔气库型脉管制冷机, 如图 2 所示。该制冷机以空气为载体, 无负

收稿日期: 2023-12-18

作者简介: 姜远镇(1995-), 男, 辽宁省大连市人, 硕士, 工程师。

* 基金项目: 合肥市高新技术专项(GJ2022GX27)。