

文章编号: 1672-8785(2024)10-0001-07

整体式斯特林制冷机的密封泄漏分析

刘湘德 甘玉梅 段燕波 迟国春 薛 鼎

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 整体式斯特林制冷机的主要失效原因有蓄冷器污染、运动摩擦副磨损、轴承失效、驱动控制电路失效以及气体工质密封泄漏。而气体工质密封泄漏问题是影响制冷机可靠性的最主要因素。影响制冷机密封性能的主要因素为密封表面加工质量、密封材料和密封结构。选取两款典型制冷机的密封结构作为研究对象, 对制冷机的密封结构建立有限元模型。仿真结果表明, 与轴对称结构相比, 中心对称密封结构的应力分布更加均匀, 有利于制冷机密封性能的改善。该结果也为后续制冷机生产工艺过程中提高可靠性以及新研发制冷机设计思路提供了参考借鉴。

关键词: 整体式斯特林制冷机; 泄漏; 密封可靠性; 密封结构; 有限元分析

中图分类号: TB615 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.10.001

Analysis on Leakage of Integral Stirling Cryocooler Seal

LIU Xiang-de, GAN Yu-mei, DUAN Yan-bo, CHI Guo-chun, XUE Ding

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The main failure causes of the integral Stirling refrigerator are the contamination of the regenerator, the wear of the moving friction pair, the failure of the bearing, the failure of the drive control circuit and the leakage of the gas working medium seal. The leakage of the gas working medium seal is the most important factor affecting refrigerator reliability. The main factors affecting the sealing performance of refrigerators are sealing surface machining quality, sealing material and sealing structure. In this paper, the sealing structures of two typical refrigerators are selected as the research object, and the finite element models of the sealing structures of the refrigerators are established. The simulation results show that the stress distribution of the center symmetric seal structure is more uniform than that of the axisymmetric structure, which is beneficial to the improvement of the sealing performance of the refrigerator. The results also provide a reference for the improvement of reliability in the subsequent production process of the refrigerator and the design of the new refrigerator.

Key words: integral Stirling cryocooler; leakage; sealing reliability; sealing structure; finite element analysis

收稿日期: 2023-11-11

作者简介: 刘湘德(1985-), 男, 安徽淮北人, 高级工程师, 主要从事制冷机及其工艺方面的研究。

E-mail: m13581718871@163.com

0 引言

自 20 世纪 90 年代以来, 红外焦平面探测器组件就被广泛应用于红外夜视、侦察、预警、精确制导和光电对抗等军事领域, 现已成为光电武器系统的重要组成部分^[1], 同时在消防、安保和安全生产等民用领域也有广泛应用。

随着用户对红外焦平面探测器组件需求量的逐年增加, 探测器组件的可靠性提升已成为其工程化应用的关键和用户关心的首要问题。因此, 国内外探测器组件生产厂商都投入大量人力、资金与技术来建立探测器组件的可靠性模型, 并针对影响产品可靠性的因素开展试验研究, 为进一步提高产品的可靠性奠定基础。

一般情况下, 红外焦平面探测器组件主要由焦平面探测器芯片、真空杜瓦组件以及斯特林制冷机三个核心部件组成。三者的可靠性直接影响红外焦平面探测器组件的可靠性, 其中任何一个部件出现故障都会使整体组件失效^[2]。斯特林制冷机的机械结构非常精密, 受限于零件加工水平和手工装配工艺精度。在实际应用过程中, 制冷机的前期失效率要远高于焦平面探测器芯片和真空杜瓦组件。为降低制冷机在研发生产过程中的失效率, 本文首先介绍了制冷机可靠性模型的组成, 并简要分析了影响制冷机可靠性的几种失效模式; 然后选取气体工质密封泄漏作为本文的研究重点来进行机理分析和仿真; 最后针对国内外用户对制冷机高可靠性要求的现状, 提出了一些见解与思路, 为后续制冷机的研发和生产工作起到参考作用。

1 制冷机可靠性模型与失效分析

制冷机可靠性模型的建立、试验和失效分析是制冷机可靠性研究的一个重要组成部分。

国外各制冷机厂家利用试验和实际应用过程中积累的大量数据, 总结分析了制冷机的主要失效模式。目前国内整体式斯特林制冷机的可靠性模型一般参考法国 Thales Cryogenics 公司的研究成果, 即采用 Weibull 概率分布来预估制冷机的寿命。该公司认为, 蓄冷器污染、运动摩擦副磨损引起的间隙密封失效、轴承失效、驱动控制电路失效以及气体工质密封泄漏问题是导致制冷机失效的主要原因^[3]。

根据以上提及的几个影响制冷机可靠性的主要失效原因, 我们可以将其分别作为分系统来考虑, 从而确定制冷机的可靠性结构模型。因此, 制冷机系统可靠性结构模型可以视为由图 1 所示的串联分系统组成。

根据国外同类产品的相关研究, 制冷机可靠性的数学模型如下:

$$MTTF = 1/\lambda \quad (1)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (2)$$

$$\lambda_i = 1/MTTF_i \quad (3)$$

式中, $MTTF$ 为平均失效前时间; $MTTF_i$ 为第 i 个子系统的平均失效前时间; λ 为总失效率; λ_i 为第 i 个子系统的失效率。

针对蓄冷器污染、运动摩擦副磨损和轴承失效问题, 国内相关研究机构都做了大量优化工作。杨宝玉^[4]通过模拟蒙特卡罗方法与传质扩散方程对制冷机污染气体的传输扩散进行建模仿真, 并采用高温烘烤和源气提纯的方法来减少制冷机污染; 包磊^[5]研究了活塞-气缸摩擦副材料性能, 并开展了模拟实际工况的高频往复干摩擦试验, 最后通过对摩擦副磨损过程进行仿真, 确定活塞-气缸材料选择可有效降低磨损; 杨红卫等人^[6]以轴承润滑脂为主要研究对象, 总结了润滑脂的作用机理、选型、寿命评估以及润滑脂在工艺装配过程中的注意事



图 1 制冷机系统可靠性结构模型示意图

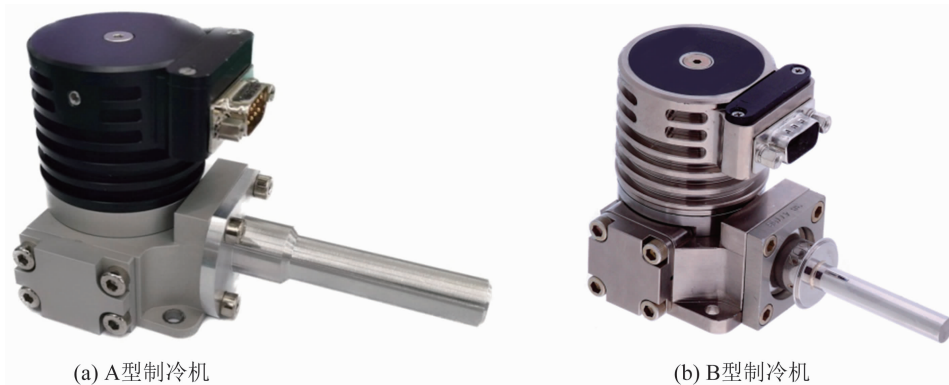


图 2 0.7 W 整体式斯特林制冷机

项。以上研究都在一定程度上为制冷机可靠性的提高提供了参考与借鉴。但是, 关于气体工质密封泄漏的研究文献相对较少, 这是由于密封是一个比较复杂的工艺。除了结构设计之外, 密封还受工艺装配状态以及用户使用环境等诸多因素的影响, 因此需要进行深入的研究分析。

下面以制冷量均为 0.7 W 且电学、机械接口及体积大小基本一致的 A 型(见图 2(a))和 B 型(见图 2(b))两款整体式斯特林制冷机为研究对象, 通过介绍制冷机密封机理及影响因素, 重点对比分析两款压缩机的密封设计差异。一方面, 该研究用于指导制冷机装配工艺, 以达到降低密封泄漏率、提高制冷机可靠性的目的; 另一方面, 也为新研发制冷机提供设计思路上的参考借鉴。

2 制冷机气体工质密封泄漏机理分析

2.1 制冷机的密封机理

对于任何制冷机, 即使设计、加工和工艺装配都很完美, 也不可能做到绝对不漏气。制冷机出现泄漏的位置随机性较大, 产生泄漏的原因也是多种多样。通常容易出现泄漏的部位是密封材料的搭接交叉处、应力集中的位置、长期遭受腐蚀和高低温及力学冲击的部位等。

当制冷机充入高压氦气后, 腔体内气体质量 m 为定值。由理想气体状态方程:

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (4)$$

可知

$$m = pV \left(\frac{M}{RT} \right) \quad (5)$$

式中, p 为氦气压力, V 为氦气体积, R 为摩尔气体常数, M 为气体的摩尔质量。

当气体温度 T 一定时, M/RT 为常数。因此, 气体的质量 m 跟气体压力与体积的乘积 pV 成正比关系。密封面处的气体泄漏量就可以用单位时间内流过密封接触面处的气体量(即泄漏率 Q)来表示^[7]:

$$Q = \frac{dm}{dt} = \frac{d(pV)}{dt} \quad (6)$$

制冷机密封的机理如下: 在金属接触表面密封槽内填充耐高低温和回弹性能良好的软金属材料; 通过紧固螺钉压紧密封材料, 使其在外力的作用下与密封面接触并发生塑性变形, 进而填充密封面之间的微小空隙。在此阶段, 随着螺钉压力的增大, 密封面截面空隙变小, 密封通道长度增加, 制冷机内部高压气体从密封面泄漏的阻力和路径也随之增大, 泄漏率减小。图 3 为制冷机密封面填充密封材料后微观变化的示意图。

2.2 影响制冷机密封性能的因素

制冷机密封性能的好坏主要取决于密封表

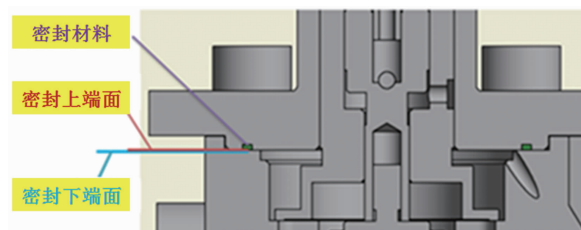


图 3 制冷机的密封面结构示意图

面的加工质量、密封通道的长度、密封材料的选择以及密封结构的设计等因素。

2.2.1 密封表面的加工质量

制冷机密封面加工表面绝对不允许出现径向贯穿性划痕(见图 4)、凹坑、磕碰痕迹等缺陷。但在表面加工中会有一个误区:表面粗糙度越高越好,甚至最好达到镜面级的粗糙度。实际上,零件表面粗糙度过高或过低都不利于制冷机密封。零件表面粗糙度过高时,密封材料在压紧变形过程中不能完全嵌入泄漏通道的微观间隙;零件表面粗糙度过低时,密封材料与密封面压紧后有效补偿减弱,无法出现足够的塑性变形。因此,零件表面粗糙度要求应根据具体密封材料的工作状况和密封面情况等综合考虑。

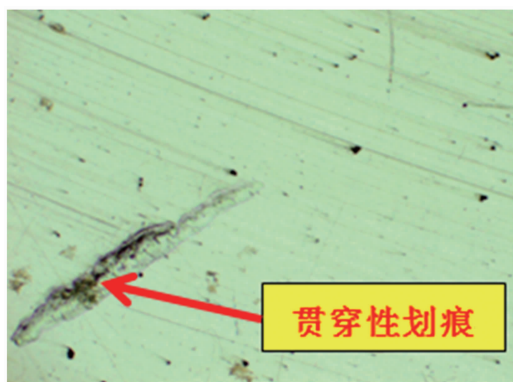


图 4 零件密封表面的贯穿性划痕

2.2.2 密封通道的长度

由制冷机密封机理可知,密封材料变形后形成的密封通道越长,高压工质气体从内部向外部泄漏所通过的路径也越长。图 5 所示为 50 倍工具显微镜下拍摄的制冷机密封表面状态。该处密封面加工方式为车削加工。从图 5 可以看出,放大后的密封面呈现出环形纹路,可等效于多个微小的密封沟槽。密封材料在外力作用下出现塑性变形,填满密封沟槽,与密封表面构成了波浪状密封通道(见图 6)。这种加工方式比采用车、铣等方式加工出的交叉纹路具有更好的密封效果。

2.2.3 密封材料的选择

为保证制冷机良好的密封稳定性,选择密

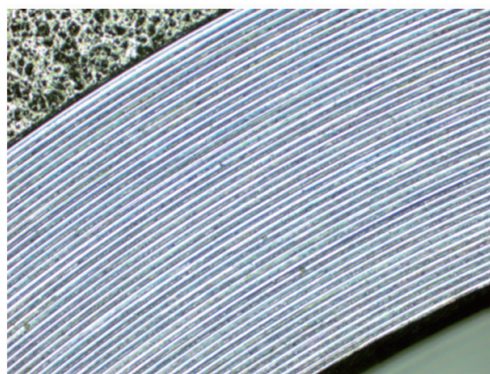


图 5 放大后密封面的环形纹路

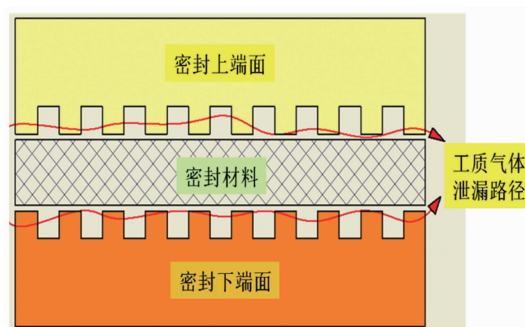


图 6 密封通道及工质气体泄漏路径示意图

封材料时需注意以下几方面:(1)密封材料和制冷机基体材料的热膨胀系数差异不可过大;(2)需选择耐高低温、耐高压、耐腐蚀且相对制冷机基体较软的密封材料;(3)密封材料在外力作用下发生压缩变形后,仍具有一定的回弹性。

综上考虑,在确定制冷机的密封材料时,一般不会选择橡胶材料,而会优先选用基体强度较高的金属材料,同时在其表面进行镀覆锡、银等软金属工艺。

2.2.4 密封结构的设计

制冷机的密封结构设计主要包括密封法兰和密封沟槽的形状设计。由于制冷机密封结构的设计主要取决于制冷机的空间结构和外形尺寸,所以在满足该要求的前提下,密封法兰及密封沟槽形状的设计可以多种多样。例如,密封法兰可以根据相应密封面结构和尺寸设计成轴对称形状,或者设计成中心对称形状(见图 7)。而密封沟槽则可根据密封材料的形状及尺寸设计成 U 型槽和 V 型槽的排列组合结构(见图 8)。

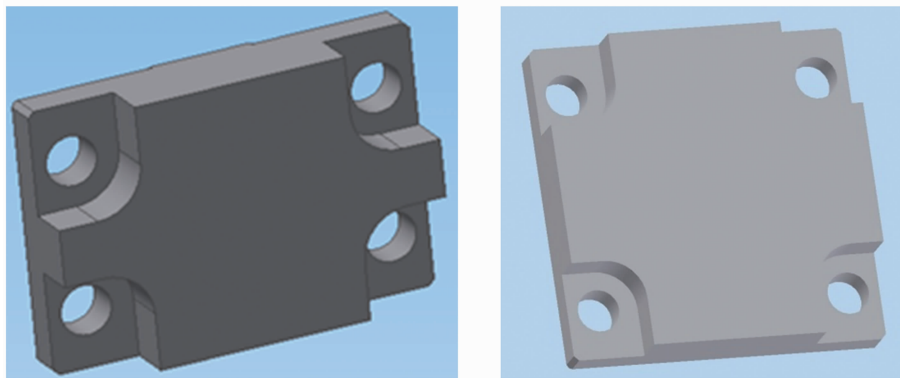


图 7 轴对称(左)和中心对称(右)结构密封法兰示意图

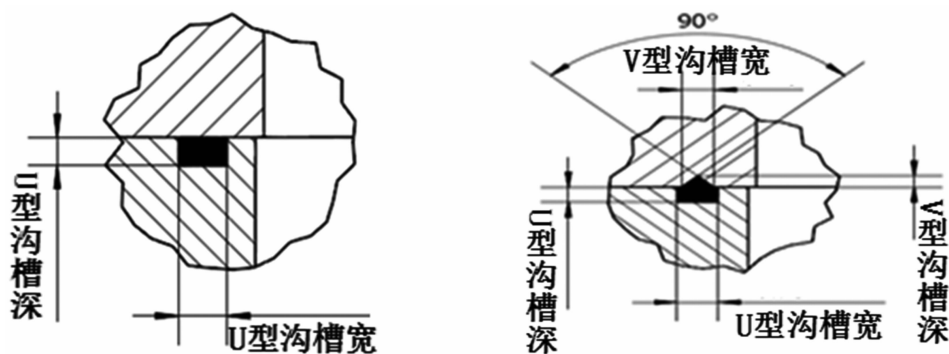


图 8 密封沟槽结构设计示意图

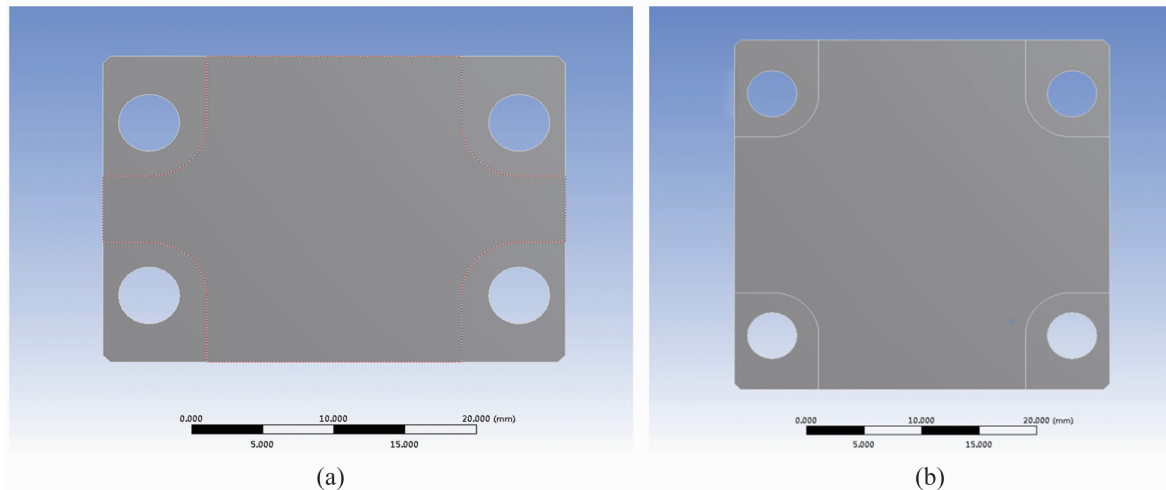


图 9 (a) A 型制冷机端盖模型图; (b) B 型制冷机端盖模型图

合理的密封结构设计可以保证密封材料在外力作用下均匀变形。同时,该部分的密封也是工艺装配过程中的难点,需要在下文中进行研究分析。

3 制冷机密封结构的有限元分析

两款整体式斯特林制冷机的密封表面加工质量、密封通道的长度、密封材料的选择和紧

固螺钉的数量完全一致,所以其密封性能的差异就主要取决于密封结构的设计。针对制冷机的压缩机密封面的压缩气缸端盖建立三维模型,运用有限元方法分析密封面上接触区域和接触压力随载荷的变化规律,讨论密封结构的设计对密封特性的影响,为不同密封结构的选用和优化设计提供理论参考。

3.1 压缩气缸端盖模型的建立

为了验证压缩气缸端盖不同结构对制冷机密封效果的影响,将两款制冷机的端盖作为研究对象,利用 ANSYS 软件建立了气缸端盖受力分析模型,如图 9 所示。

将模型导入 Workbench 中的静态力学模块进行力学计算。根据实际条件,确定仿真时的边界条件:(1)端盖底部与曲轴箱接触的面为固定约束。(2)螺钉施加给气缸端盖上表面的力为 1000 N,两款端盖各有 4 颗螺钉;图 9(a)所示为长方形分布,图 9(b)所示为正方形均匀分布。

由于该计算过程是一个典型的静态接触分析过程,零件形状较复杂。利用软件划分网格,共计划分 1634069 个节点、967688 个网格。网格划分足够精细以提高计算精度。

3.2 结果分析

两款制冷机密封端盖的主要区别在于密封结构对称性的不同,A 型制冷机的螺钉位置关于圆周不对称,B 型制冷机的螺钉位置关于中心对称。图 10 和图 11 所示为两款制冷机不同端盖结构受力仿真示意图的应力分布。可以看出,A 型和 B 型两个端盖的最大应力分别为 630.69 MPa 和 594.15 MPa,但图 10 中 4 颗螺

钉分布不均匀导致应力分布不均匀,而图 11 中 4 颗螺钉分布关于圆周对称,所以应力分布更加均匀。

在端盖压紧密封材料进行压力密封时,由于长方形应力分布不均匀,应变也更加不均匀,因此在长边的中间处(压力最小处)压力较小,不能充分挤压密封材料导致漏气;对于正方形均匀分布端盖,受力均匀,密封槽一周没有出现较大的应力差,在密封面压缩密封材料进行密封时不容易漏气。

因此,设计制冷机密封面结构时,在保证密封空间足够的前提下,应尽可能选择比较均匀的受力结构,从而保证密封结构的有效性。

4 结束语

作为红外焦平面探测器组件的重要组成部分,制冷机的密封泄漏问题在组件工程化应用过程中严重制约了其制冷性能和可靠性。为缓解制冷机密封泄漏问题,本文在简述密封表面的加工质量、密封通道的长度以及密封材料的选择对制冷机密封性能的影响后,着重针对密封结构的设计进行了分析。从理论分析和模型仿真中可以看出,在相同的外力作用下,轴对称密封结构的端盖在长边的中心位置受力较小,此处也成为了密封泄漏的最薄弱点;而中

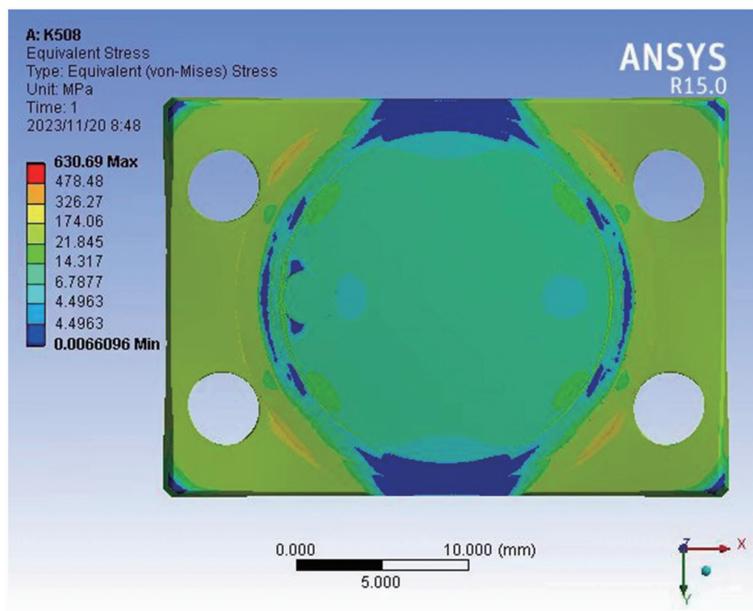


图 10 A 型制冷机压缩气缸端盖应力分布图

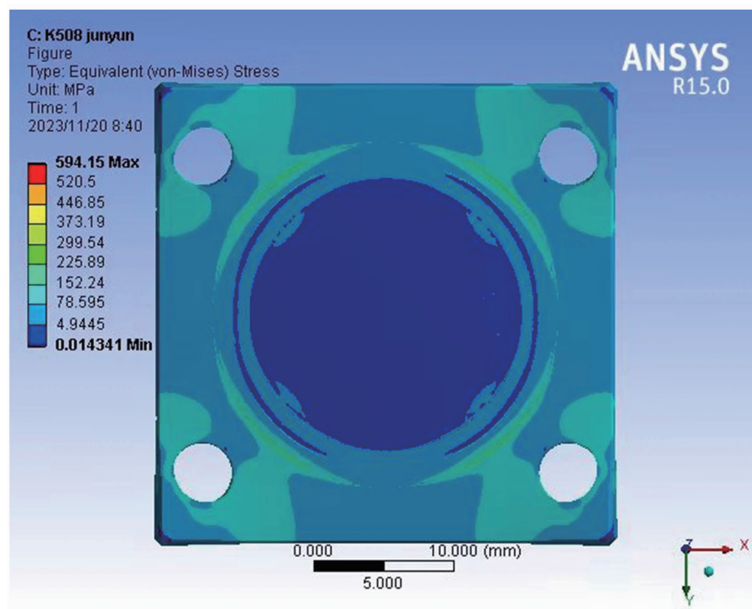


图 11 B 型制冷机压缩气缸端盖应力分布图

心对称的密封结构形式所受的力更加均匀, 更有利于密封。该研究思路及具体的设计方法对今后制冷机的可靠性研究和提升具有重要的参考借鉴作用。

由于影响密封泄漏的因素较多, 下一步将重点研究密封表面的加工质量对制冷机泄漏率的影响。同时, 后续将进一步总结和深入研究不同密封材料的选择与制冷机泄漏率之间的关系。

参考文献

- [1] 李维, 武腾飞, 王宇. 焦平面红外探测器研究进展 [J]. 计测技术, 2016, 36(1): 1-4.
- [2] 赖灿雄, 杨少华, 路国光, 等. 红外焦平面探测器制冷组件可靠性研究进展 [J]. 光学与光电技术, 2013, 11(4): 29-32.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 包磊. M42 高速钢用于斯特林制冷机工况干摩擦磨损特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [6] 杨红卫, 常振, 李兴林, 等. 润滑脂在轴承中的应用及选型 [J]. 哈尔滨轴承, 2020, 41(1): 33-36.
- [7] 吴孝俭, 闫荣鑫. 泄漏检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.