

高纯锗探测器瞬态温度场特性的模拟研究

阙子昂 郝晓勇 何高魁 刘 洋 赵江滨 田华阳

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 为确保探测器在低温环境下稳定运行,分析了高纯锗探测器的内部传热机理,基于 COMSOL Multiphysics 软件建立了探测器的三维计算模型,得到了制冷过程中三维瞬态温度分布规律以及不同探测器内部结构和材料选择对温度分布的影响,通过仿真数据与实验数据的一致性比较,验证了该模型及仿真方法的正确性。为进一步优化和改进液氮制冷和电制冷型高纯锗探测器的设计参数提供了理论支撑。

关键词 高纯锗探测器, 传热机理, 温度分布, 探测器结构

中图分类号 TL818

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.090401

Simulation study on transient temperature field characteristics of HPGe detectors simulated by the COMSOL method

QUE Ziang HAO Xiaoyong HE Gaokui LIU Yang ZHAO Jiangbin TIAN Huayang

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract [Background] High-purity Ge (HPGe) detectors are widely used in nuclear science, technology, and national defense because of their excellent energy resolution capability, which enables them to fingerprint gamma rays and accurately determine nuclide types and intensities. However, HPGe detectors typically need to be cooled to low temperatures for normal operation to prevent excessive thermal noise at room temperature. [Purpose] This study aims to investigate the heat transfer process and temperature distribution law inside a HPGe detector to ensure the stable operation of the detector in a low-temperature environment. [Methods] Through the analysis of the heat transfer mechanism of the high-purity germanium (HPGe) detector, the internal heat transfer structure and a three-dimensional heat transfer model were constructed. COMSOL software was utilized to simulate the internal temperature distribution of the HPGe detector under liquid nitrogen refrigeration, as well as to investigate the effects of varying refrigeration times and packaging structures on this distribution. Based on these simulations, the packaging structure of the HPGe detector was optimized. Additionally, a temperature testing platform for the detector was constructed, and the simulation results were compared with experimental data to validate the model's accuracy. [Results] The simulation results demonstrate that the detector model achieves dynamic equilibrium after 6 h of cooling, with the minimum internal temperature at the tip of the cold finger approximately -175°C . The utilization of oxygen-free copper as the cold chain material, combined with a low heat leakage and high-strength support material for the cold finger, enhances refrigeration efficiency. Additionally, the Dewar is designed with a sidewall thickness of 1.5 mm, and the spacing between the sidewall and the crystal cylinder is set at 3 mm. These design

国防科工局核能开发科研项目(No.HNKF20224(28))资助

第一作者: 阙子昂, 男, 1995 年出生, 2020 年毕业于中国原子能科学研究院, 在读博士研究生, 研究领域为核探测技术

通信作者: 何高魁, E-mail: hegk2012@hotmail.com

收稿日期: 2023-12-19, 修回日期: 2024-04-18

Supported by Nuclear Energy Development Research Project of State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense (No.HNKF20224(28))

First author: QUE Ziang, male, born in 1995, graduated from China Institute of Atomic Energy in 2020, doctoral student, focusing on nuclear detection technology

Corresponding author: HE Gaokui, E-mail: hegk2012@hotmail.com

Received date: 2023-12-19, revised date: 2024-04-18

features collectively facilitate the detector's attainment of a lower limiting refrigeration temperature. [Conclusions] The modeling and temperature field simulation methods for HPGe detectors are validated through a consistency comparison between simulated and experimental data. Theoretical support is obtained for the further optimization and improvement of the design parameters of liquid nitrogen and electric cooling HPGe detectors.

Key words High-purity germanium detector, Heat transfer mechanism, Temperature distribution, Detector structure

高纯锗(High-Purity Germanium, HPGe)探测器在常温下存在过高的热噪声^[1],通常需要通过液氮或电制冷的方式将其冷却到低温环境才能正常工作。这就要求高纯锗探测器能够在较短时间内冷却至工作温度,因此,在研发过程中,优化物理结构设计以减小探测器的热损失成为至关重要的任务^[2-3]。计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)是一种利用数值方法模拟流体运动和传热过程的技术,可以模拟多种流体现象。在核辐射探测器研发过程中,CFD 仿真技术已经成为物理结构设计和优化的一种有效工具,可以更快速、简便地评估大量的探测器模型设计参数,从而获取比实际物理测量更丰富的信息^[4-5]。

本课题根据高纯锗探测器的内部几何结构,分析了探测器内部的传热机理,基于 COMSOL

Multiphysics 软件建立了探测器的三维模型,模拟计算得到了探测器内部的瞬态温度场分布,并分析了不同探测器内部几何结构及材料选择对温度场的影响。对高纯锗探测器制冷过程的瞬态温度特性开展了实验验证,仿真数据和实验数据的一致性验证了该模型及其仿真计算方法的正确性。

1 高纯锗探测器传热机理

高纯锗探测器内部的传热现象如图1所示,主要包括以下几个方面:1)由于内外温差产生的支撑结构、绝缘端子、电子学连线等固体热传导;2)探测器杜瓦瓶侧壁内外之间的温差造成的辐射换热;3)探测器封装杜瓦内真空度降低,导致的内部残余气体对流换热。

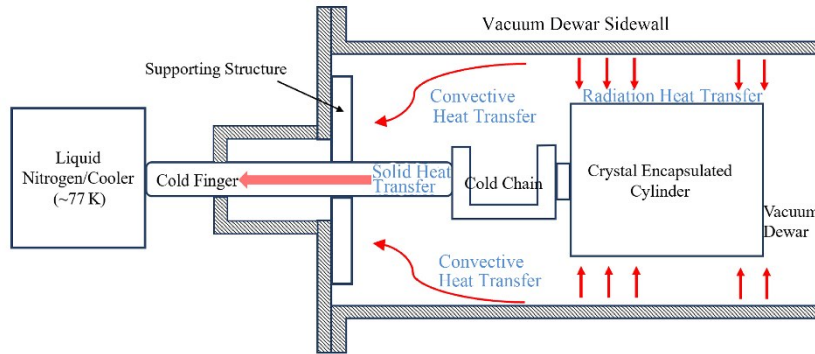


图1 高纯锗探测器内部传热原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of internal heat transfer principal of HPGe detector

傅里叶热传导定律^[6-7]:

$$\Phi = -\lambda \cdot A \cdot (dT/dx) \quad (1)$$

式中: λ 为导热系数, $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$; A 为导热面积, m^2 ; T 为介质温度, K ; x 为厚度, m 。

辐射换热修正形式^[8]:

$$\Phi = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

式中: ε 为物体的发射率,其值小于1; A 为辐射表面积, m^2 ; T 为表面温度, K ; σ 为玻尔兹曼常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} W \cdot (m^2 \cdot K^4)^{-1}$ 。

对流换热的热流量遵循牛顿冷却公式^[9-10]:

$$\Phi = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (3)$$

式中: h 为对流传热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$; A 为对流面积, m^2 ; ΔT 为温差, K 。

分析高纯锗探测器内部三维瞬态温度场,热传导是热量传递的主要形式,其中热传导微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式中: ρ 为材料密度, $kg \cdot m^{-3}$; c 为材料比热容, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$; T 为介质温度, K ; λ_x 、 λ_y 、 λ_z 为材料不同方向的热传导系数, $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$; t 为时间, s 。

2 探测器模型构建

2.1 几何模型及网格划分

影响有限元仿真分析结果准确性的因素包括分析模型合理简化、材料参数合理设置、选择合适的单

元网格划分方式及边界条件设置等。根据目前实验室同轴型高纯锗探测器的几何尺寸(表1)和组成材料的物理参数,在COMSOL Multiphysics软件中建立了同轴型高纯锗探测器的三维模型,对探测器的电子元器件、引线、螺丝、吸气剂、抽气口部分做了简化处理。在冷指顶端(测温点1)和晶体顶端(测温点2)位置分别布置了PT100温度传感器进行制冷过程的实时温度测试。具体模型几何如图2所示。

为确保有限元分析模型与探测器实际模型接近,网格划分如图3所示。为了分析仿真过程中温

度对网格大小的依赖性,进行了网格灵敏度研究。进行了5种不同大小的网格划分,完整网格包含的域单元数分别为183 355、82 513、46 316、33 129、28 137个,最小单元大小分别为4 mm、6 mm、8 mm、10 mm、12 mm,最小网格单元越小模型计算精度越好,但计算效率越低。模拟了高纯锗探测器冷指顶端温度变化过程,数据结果表明,最小单元大小为8 mm的网格模型与4 mm的相比,温度仅相差0.4 °C,而12 mm大小的网格模型与4 mm的网格模型相比温度变化较大,相差1.7 °C。综合考虑到网格模型的计算精度和计算效率,故选择了8 mm的网格尺度。

2.2 初始条件及边界条件

将高纯锗探测器初始温度(时间 $t=0$ 时)以及外界环境温度设定为20 °C,冷指底部定义为恒定的液氮温度-196 °C(77 K)。探测器杜瓦内部压力水平设置为 10^{-3} Pa,流体物理场选择为层流,壁面视为无滑移,将内部残余气体视为不可压缩的连续介质。因为加入外界环境空气的流动和传热会使计算量急剧上升,所以探测器封装杜瓦外壁与外界环境间定义为对流热通量来简化空气对流传热计算。考虑探测器封装杜瓦内各表面对辐射换热的贡献,设定晶体封装筒、冷链、冷指支撑、探测器底座的表面发射率分别为0.15、0.2、0.8、0.1,杜瓦侧壁的发射率为0,反射率为1,即不考虑与环境的辐射换热^[4]。

名称 Name	尺寸大小 Dimension / mm
晶体直径 Crystal diameter	58
晶体长度 Crystal length	60
晶体孔深 Crystal hole depth	45
晶体孔径 Crystal hole diameter	10
晶体封装筒外径 Outer diameter of crystal package cylinder	64
晶体封装筒内径 Inner diameter of crystal package cylinder	60
杜瓦瓶外径 Dewar's outer diameter	40
杜瓦瓶高度 Dewar's height	153
冷指长度 Cold finger length	750

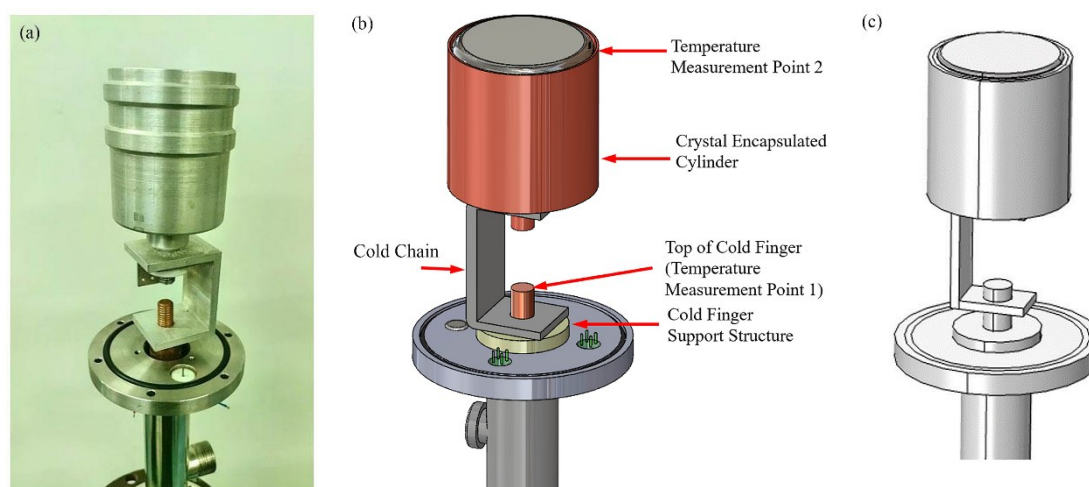


图2 高纯锗探测器内部几何结构建模 (a) 高纯锗探测器实物图, (b) CAD模型图, (c) COMSOL建模图
Fig.2 Modeling of the internal geometry structure of HPGe detectors (a) Physical image of HPGe detectors, (b) CAD model diagram, (c) COMSOL modeling diagram

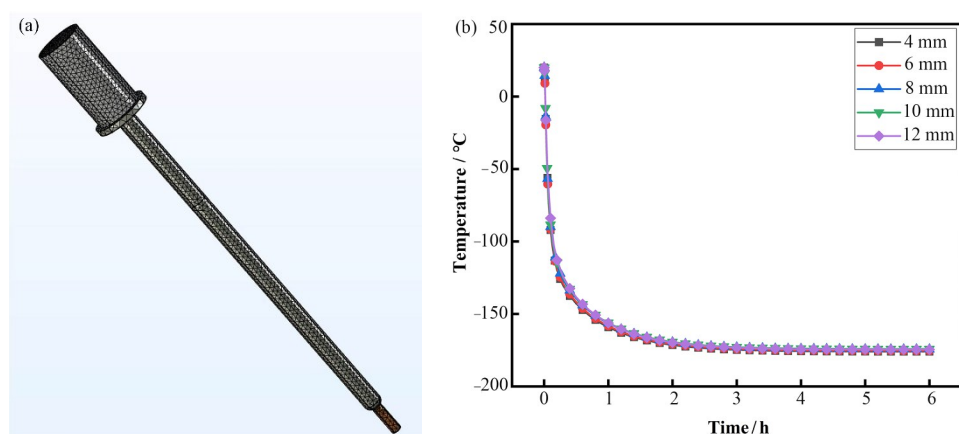


图3 高纯锗探测器模型网格划分及网格依赖性 (a) 探测器网格划分, (b) 温度对网格尺寸依赖性

Fig.3 The grid division and grid dependence of the HPGe detector model

(a) Detector grid division, (b) Temperature dependence on grid size

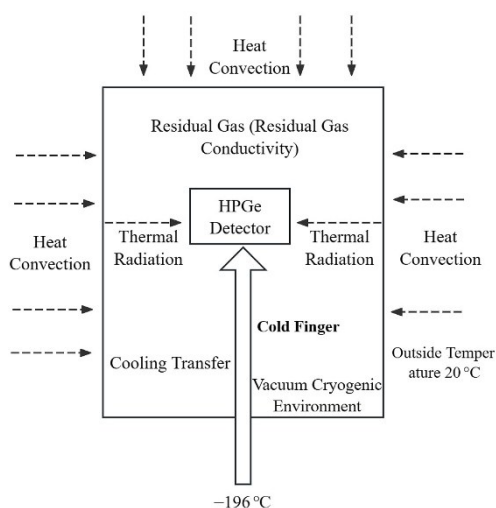


图4 高纯锗探测器边界条件示意图

Fig.4 Diagram of boundary condition of HPGe detector

3 仿真实验

3.1 探测器制冷时间对温度分布影响

对高纯锗探测器的制冷过程中的温度分布规律进行COMSOL数值模拟,得到了高纯锗探测器制冷时间0~10 h的温度变化曲线,如图5所示,在制冷时间6 h后制冷温度基本达到极限,为了节约计算资源,提高仿真效率,后续还将选取制冷时间为6 h进行分析。图6给出的是高纯锗探测器在制冷时间 $t=6$ h时,探测器内部各组成部分温度分布的情况,图7为经过制冷6 h后的探测器温度场分布云图。可以看出,整个探测器模型温度最低的部分为冷指的底端,近似为液氮温度 -196°C ,最高的部分为探测器封装杜瓦的外壁,接近于外界环境温度 20°C ,真空杜瓦内部温度最低的为冷指顶端位置,约为

-175°C ,冷量从最底部沿冷指、冷链、晶体封装筒等结构传输到高纯锗晶体,温度从下至上呈现一定梯度分布。

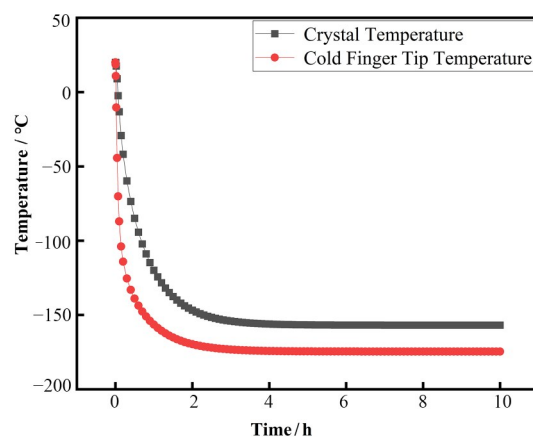


图5 制冷时间对温度分布影响

Fig.5 Effect of cooling time on the temperature distribution

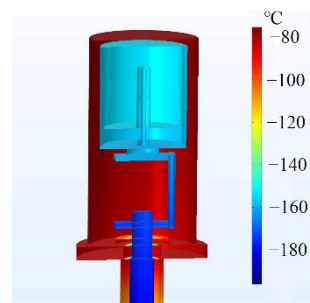


图6 探测器温度分布剖面图($t=6$ h)

Fig.6 Temperature distribution profile of the detector ($t=6$ h)

3.2 冷指支撑结构对探测器温度的影响

高纯锗探测器封装结构中,支撑结构作为固定冷指和晶体封装筒的重要组成部分,需要满足:足够

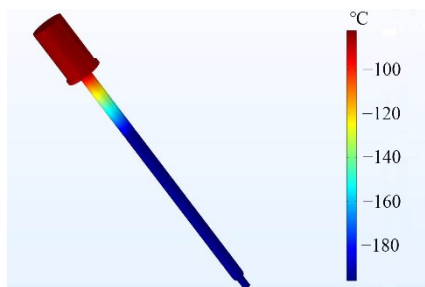


图7 高纯锗探测器温度分布云图

Fig.7 Temperature distribution cloud contour of the HPGe detector

的强度,承受探测器在工作、运输和储存过程中的冲击和振动;具有低热导率,以减小漏热;热膨胀系数要小,确保与被支撑物间的匹配;抗疲劳性好;材料

的分子逸出和放气率低,避免对真空造成严重影响^[11-12]。

图8为高纯锗探测器冷指支撑材料选择聚四氟乙烯、玻璃纤维、不锈钢、钛合金几种材料对晶体以及冷指顶端温度的影响。从图8可知,选用低热导率材料,如聚四氟、玻璃纤维,晶体及冷指顶端制冷温度最低分别能达到约 -157°C 和 -176°C ,附加漏热低,隔热效果较好。当选用金属支撑结构,如不锈钢、钛合金材料时,晶体及冷指顶端制冷温度最低只能达到约 -146°C 和 -159°C ,探测器的制冷效果明显地下降。因此冷指支撑结构材料的选择对探测器整体制冷温度的影响较大的,考虑到加工难度和支撑强度要求,聚四氟和玻璃纤维较适合作为冷指支撑材料。

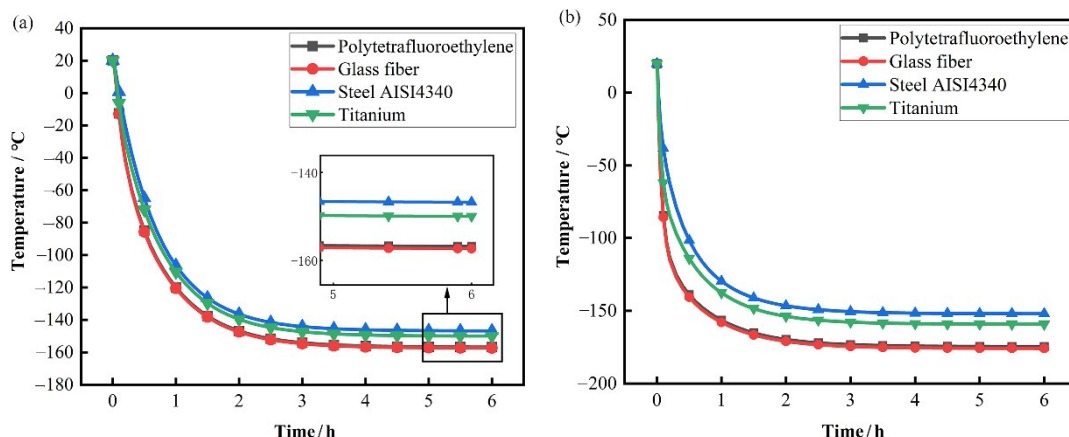


图8 冷指支撑结构材料改变对探测器温度的影响

(a) 冷指支撑材料对晶体温度影响, (b) 冷指支撑材料对冷指顶端温度影响

Fig.8 Influence of cold finger structural material changes on the detector temperature (a) Effect of cold finger supporting material on crystal temperature, (b) Effect of cold finger supporting material on temperature of cold fingertip

3.3 冷链对探测器温度的影响

冷链作为高纯锗探测器封装杜瓦中一个关键零部件,直接影响到探测器是否能够实现所需的工作温度,是冷量传输路径上重要的环节^[13-15]。为比较不同材料的导热性能,选择了无氧铜、铝、石墨、不锈钢作为冷链备选材料^[16-17]。从图9可知,在相同的制冷时间下,不锈钢冷链情况下晶体和冷指的顶端温度仅能达到约为 -120°C 和 -150°C ,显然不符合探测器工作温度的要求。进一步观察可发现,在制冷6 h的情况下,在几种不同的材料中,铜显示出了优异的导热性能,使得晶体温度达到了最低的 -158°C ,而冷指的顶端温度约为 -175°C ,其次是石墨和铝。此外,在铜冷链的情况下,晶体与冷指顶端之间的温差最小,约为 17°C ,漏热量最小,这表明了其较高的热传导效率。因此,无氧铜可以被认为

一种较为理想的冷链材料。

3.4 杜瓦外壳结构对探测器温度的影响

杜瓦主要功能是将探测器封装在真空环境中,工作时维持探测器的低温工作环境,实现与外界高温环境的绝热。另外通过杜瓦底座上的绝缘端子实现探测器信号读出。考虑到辐射换热的存在,需要分析杜瓦壁厚度以及侧壁到晶体封装筒距离对最终制冷温度的影响^[18]。为了减小杜瓦侧壁对晶体封装筒的辐射漏热,对其间距和侧壁厚度进行设计优化。取其间距在 $1\sim 5\text{ mm}$ 、侧壁厚度在 $0.5\sim 2.5\text{ mm}$ 范围内进行分析,通过模拟得到探测器经过6 h制冷后晶体和冷指顶端的最终温度。从图10、11可看出,杜瓦侧壁厚度减小、到晶体封装筒间距增大都会使得极限制冷温度降低。间距的增大能有效减小辐射传热。而杜瓦侧壁厚度的变化,不仅会影响辐射换热,

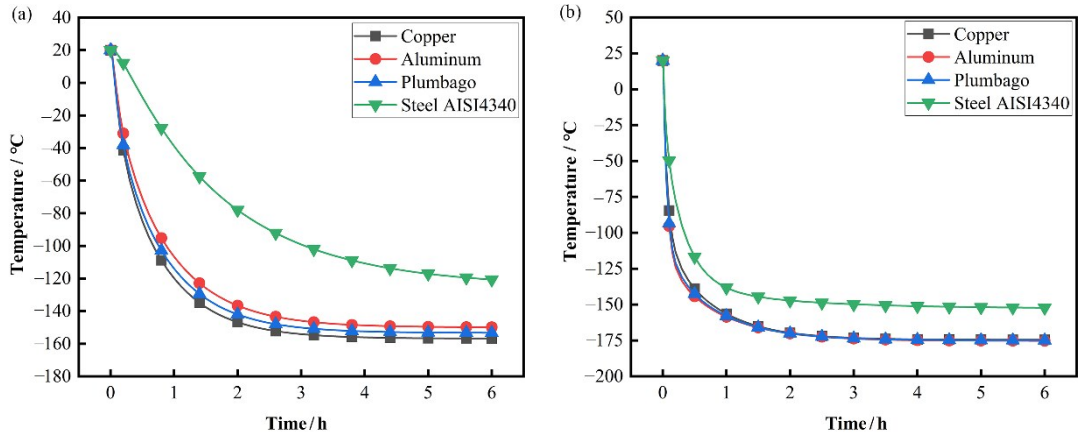


图9 冷链材料的选择对探测器温度的影响 (a) 冷链材料对晶体温度影响, (b) 冷链材料对冷指顶端温度影响
Fig.9 Influence of cold chain material selection on the detector temperature (a) Effect of the cold chain material on crystal temperature, (b) Effect of the cold chain material on temperature of cold fingertip

还包括固体传热,虽然增加侧壁厚度会减小辐射传热,但固体传热上升更为显著,导致整体制冷效率下降。然而,过小的侧壁厚度会增加加工成品率的要求,并可能引发形变和断裂等问题^[19]。考虑到机械

加工和零部件的力学可靠性、组装等问题,取杜瓦侧壁厚度为 1.5 mm,杜瓦侧壁到晶体封装筒间距为 3 mm 进行设计和分析。

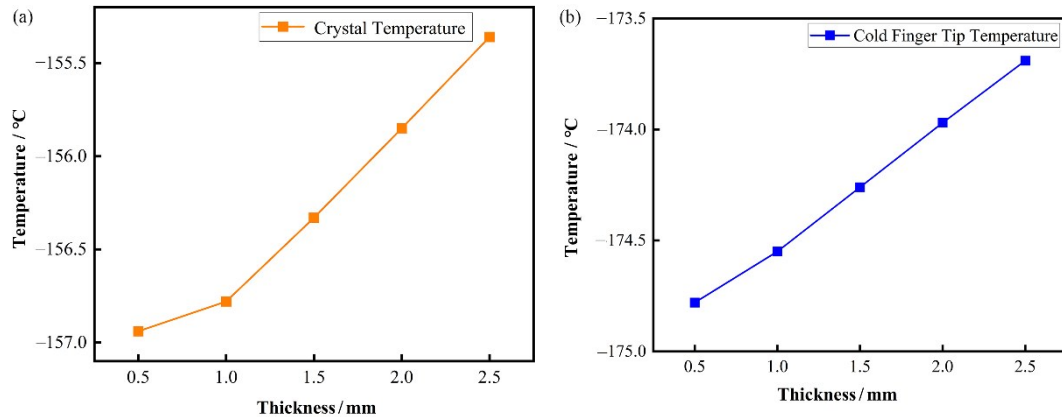


图10 杜瓦侧壁厚度对探测器温度影响($t=6$ h时)
(a) 杜瓦侧壁厚度对晶体温度影响, (b) 杜瓦侧壁厚度对冷指顶端温度影响
Fig.10 Influence of the Dewar sidewall thickness on the detector temperature (at $t=6$ h) (a) Effect of the Dewar sidewall thickness on crystal temperature, (b) Effect of the Dewar sidewall thickness on temperature of cold fingertip

4 实验验证

为了验证该模型的正确性,根据上述仿真结果对探测器结构进行设计优化,并进行了高纯锗探测器随时间变化的液氮制冷实验。从图 12 可知,模拟分析结果较为准确地印证了高纯锗探测器制冷过程的瞬态温度变化规律。由于建模过程中对探测器实际情况进行了一定简化,以及探测器制冷过程中温差过大使得材料的热胀冷缩,会导致温度传感器与金属表面间的贴合不完全,进而导致测量温度产生一定偏差,但总体在可接受的范围内。

5 结语

本研究从高纯锗探测器的传热机理出发,分析并构建出高纯锗探测器内部热量传输结构和三维传热模型,设定了探测器的热边界条件,并运用 COMSOL 软件对液氮制冷情况下高纯锗探测器内部温度分布,以及不同制冷时间和封装结构对温度分布影响进行了仿真计算。在此基础上优化了基于此模型的高纯锗探测器封装结构,完成探测器温度测试平台的搭建,并将仿真结果和实验数据进行对比,验证了模型的正确性。主要结论如下:1)通过仿

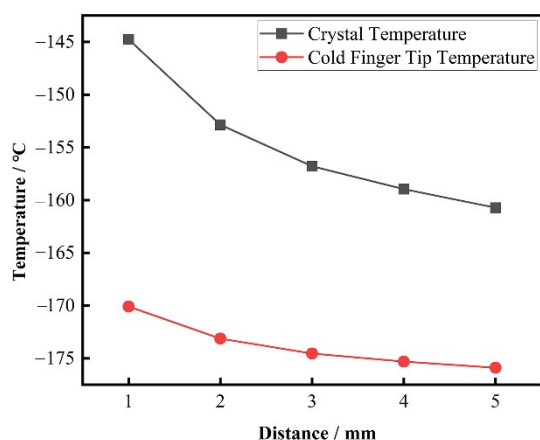


图11 杜瓦侧壁到晶体封装筒距离对探测器温度影响
($t=6$ h时)

Fig.11 Effect of the distance from the sidewall of the Dewar to the crystal encapsulation cylinder on the detector temperature (at $t=6$ h)

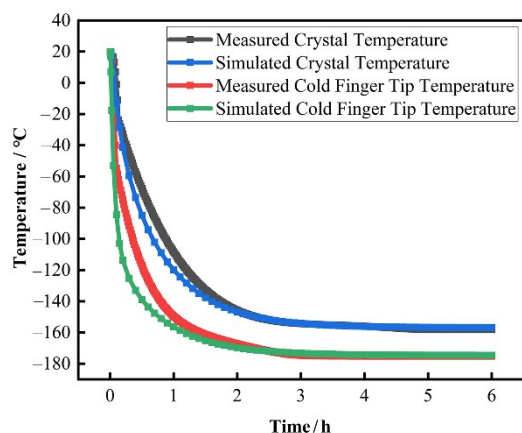


图12 实测与模拟温度曲线比较

Fig.12 Comparison of the measured and simulated temperature profiles

真计算可知该探测器模型经制冷6 h后温度达到动态平衡,内部温度最低点为冷指顶端位置约 -175°C ,沿冷量传输路径温度从下至上呈现梯度分布;2)采用导热性能优异的无氧铜作为冷链材料,能有效缩小冷指顶端与晶体间的温差至 17°C ,实现更低的探测器制冷温度;冷指支撑材料选择主要考虑低漏热高强度的要求,特别是对于电制冷高纯锗探测器,当制冷量受到限制时,需要严格控制漏热,支撑结构尺寸上尽可能减小与杜瓦底座的接触面积,避免过度热传导;3)杜瓦结构设计过程中,减小真空杜瓦侧壁厚度、增大侧壁与晶体筒间距,有利于探测器达到更低的极限制冷温度,综合考虑到整体尺寸要求、力学性能和加工难度,杜瓦侧壁厚度可设计为 1.5 mm ,侧壁与晶体筒间距为 3 mm 。

作者贡献声明 阙子昂负责文献调查研究和提出

编写思路,初稿写作和修改;郝晓勇负责技术指导和论文校对;何高魁负责全程指导,审阅修改文章内容,提供项目资助;赵江滨提供论文思路和数据处理指导;刘洋、田华阳协助实验和数据获取指导。

参考文献

- 1 Quinn L. Fabrication process development for high-purity germanium radiation detectors with amorphous semiconductor contacts[D]. Berkeley: UC Berkeley, 2014.
- 2 Upp D L, Keyser R M, Twomey T R. New cooling methods for HPGe detectors and associated electronics [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2005, **264**(1): 121 - 126. DOI: 10.1007/s10967-005-0684-y.
- 3 Keyser R M, Hagenauer R C. Performance of a portable, electromechanically-cooled HPGe detector for site characterization[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2008, **277**(1): 149 - 153. DOI: 10.1007/s10967-008-0723-6.
- 4 Malgin V, Tkaczyk A H, Jakovlevs O, *et al.* Development and computational fluid dynamics (CFD) simulation of cryostat thermal shielding for a portable high purity germanium (HPGe) gamma spectrometer[J]. Instrumentation Science & Technology, 2020, **48**(3): 310 - 325. DOI: 10.1080/10739149.2020.1715424.
- 5 Jeltsov M, Priimagi P, Malgin V, *et al.* Development and validation of a CFD-enabled digital twin of a portable HPGe gamma spectrometer[J]. Journal of Instrumentation, 2020, **15**(1): P01026. DOI: 10.1088/1748-0221/15/01/P01026.
- 6 何高魁,孙慧斌,郝晓勇,等.高纯锗能谱仪系统研制[J].核电子学与探测技术,2021,**41**(1): 55 - 61. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2021.01.010.
HE Gaokui, SUN Huibin, HAO Xiaoyong, *et al.* Development of HPGe spectrometer system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2021, **41**(1): 55 - 61. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2021.01.010.
- 7 Baudouy B. Heat transfer and cooling techniques at low temperature[EB/OL]. (2015-01-28). <https://arxiv.org/abs/1501.07153>.
- 8 Parma V. Cryostat design[EB/OL]. (2015-01-26). <http://arxiv.org/abs/1501.07154v1>.
- 9 Malgin V, Yakovlev O, Skuja L. Improvement of vacuum characteristics of cryostats for HPGe gamma-radiation detectors[J]. Journal of Instrumentation, 2021, **16**(2):

- P02012. DOI: 10.1088/1748-0221/16/02/P02012.
- 10 Sajo-Bohus L, Rosso D, Sajo Castelli A M, *et al.* HPGe detectors long time behaviour in high-resolution γ spectrometry[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, **648**(1): 132 - 138. DOI: 10.1016/j.nima.2011.03.031.
 - 11 陈芳, 高超, 罗世魁. 大面阵红外焦平面杜瓦冷指支撑结构设计[J]. 红外与激光工程, 2020, **49**(8): 198 - 204. DOI: 10.3788/IRLA20200060.
CHEN Fang, GAO Chao, LUO Shikui. Cold head supporting structure of Dewar used in large infrared focal plane[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, **49**(8): 198 - 204. DOI: 10.3788/IRLA20200060.
 - 12 王力平, 陆燕. 新型辐射制冷器用纤维支撑系统的设计和分析[J]. 低温工程, 2007(2): 15 - 20. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6516.2007.02.004.
WANG Liping, LU Yan. Design and analysis of fiber support system for radiant coolers[J]. Cryogenics, 2007(2): 15 - 20. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6516.2007.02.004.
 - 13 李俊. 超大规模线列红外焦平面杜瓦封装关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2021. DOI: 10.27581/d.cnki.gksjw.2021.000040.
LI Jun. Key technologies of Dewar packaging for ultra-large scale linear infrared focal plane array[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. DOI: 10.27581/d.cnki.gksjw.2021.000040.
 - 14 王亚妮, 张巍, 迟国春, 等. 制冷机与红外探测器冷链耦合技术研究[J]. 激光与红外, 2018, **48**(2): 148 - 152. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.02.003.
WANG Yani, ZHANG Wei, CHI Guochun, *et al.* Research of cold chain linking technology between cryocooler and infrared detector[J]. Laser & Infrared, 2018, **48**(2): 148 - 152. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.02.003.
 - 15 范广宇, 范崔, 李俊, 等. 超长线列红外焦平面杜瓦冷链设计[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(7): 2021 - 2026. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2015.07.010.
FAN Guangyu, FAN Cui, LI Jun, *et al.* Cold strap design of long linear IRFPA dewar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, **44**(7): 2021 - 2026. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2015.07.010.
 - 16 范广宇. 直线脉管集成耦合杜瓦封装设计及其关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2015.
FAN Guangyu. Research on the design and key technology of linear pulse tube cooler dewar assembly [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
 - 17 夏晨希. 超大规模红外探测器与单点冷源的低温耦合研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2017.
XIA Chenxi. Research on low temperature coupling of large scale infrared detector and single point cold source [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
 - 18 林国画, 孟令伟. 杜瓦热耗的影响因素分析[J]. 激光与红外, 2017, **47**(2): 195 - 197. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.02.013.
LIN Guohua, MENG Lingwei. Analysis on influence factors of Dewar heat consumption[J]. Laser & Infrared, 2017, **47**(2): 195 - 197. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.02.013.
 - 19 王鑫, 陈叔平, 朱鸣, 等. 高真空多层绝热夹层稀薄气体传热分析[J]. 低温与超导, 2021, **49**(12): 1 - 6, 41. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2021.12.001.
WANG Xin, CHEN Shuping, ZHU Ming, *et al.* Heat transfer analysis of rarefied gas with high vacuum multilayer insulation in annular space[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2021, **49**(12): 1 - 6, 41. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2021.12.001.