

低温可视化力学装置传热分析与计算研究

吴姗姗^{1,2}, 王珏³, 张恒成¹, 刘辉明¹, 黄传军¹, 黄荣进^{1,2}, 李来风^{1,2}, 周远^{1,2}

(1. 中国科学院理化技术研究所航天低温推进剂技术国家重点实验室, 100190, 北京;

2. 中国科学院大学, 100049, 北京; 3. 航天科工空间工程发展有限公司, 100854, 北京)

摘要: 为优化干冷式宽温域低温可视化力学测量装置的内部传热特性,降低装置传导和辐射漏热,提高样品的温度均匀性,基于 Sage、COMSOL 研究了不同尺寸试样的温度场分布,对比了两种计算方法的一致性。研究了试样表面发射率、窗口表面发射率以及窗口尺寸对试样温度的影响。结果表明:Sage、COMSOL 两种方法计算的试样最低温度分别为 4.211 5、4.219 4 K,温度基本一致,且 Sage 一维计算方法可以更直观地分析低温装置内各个传热节点参数;当试样尺寸为 3 mm×30 mm×2.5 mm 的小规格尺寸,试样表面发射率低至 0.01 时,试样自身温度最为均匀,两端温差仅为 0.005 K;降低窗口的表面发射率、减小窗口的辐射面积均有利于试样温度的均匀分布;小尺寸试样的温度分布几乎不受材料表面发射率和窗口参数的影响,自身温差始终保持最小。

关键词: 低温力学测试;传热分析;一维;三维;温度场

中图分类号: TB65 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202304013 **文章编号:** 0253-987X(2023)04-0122-11

Thermal Analysis and Calculating Study of Low-Temperature Optical Mechanical Device

WU Shanshan^{1,2}, WANG Jue³, ZHANG Hengcheng¹, LIU Huiming¹, HUANG Chuanjun¹,
HUANG Rongjin^{1,2}, LI Laifeng^{1,2}, ZHOU Yuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Aerospace Science and Industry Corporation Limited Space Engineering Development Co., Ltd., Beijing 100854, China)

Abstract: To optimize the internal heat transfer characteristics of dry-cooled wide-temperature range low-temperature visualization mechanical measuring device, reduce the conduction and radiation heat leakage of the device, and improve the temperature uniformity of specimens, the temperature distribution of specimens of different sizes was studied based on Sage and COMSOL, and the consistency of the two calculation methods was compared. The effects of the surface emissivity of the specimens, the surface emissivity of the windows and the window size on the specimen temperature were studied. The results showed that the lowest temperatures of the specimens calculated by Sage and COMSOL were 4.211 5 K and 4.219 4 K, respectively. The results were ba-

收稿日期: 2022-09-06。 作者简介: 吴姗姗(1997—),女,博士生;张恒成(通信作者),男,高级工程师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52007186);国家重点研发计划资助项目(2017YFE0301403);航天低温推进剂技术国家重点实验室基础研究基金资助项目(SKLTSCP202001)。

网络出版时间: 2022-11-29

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20221129.1358.004.html>

sically consistent, and the Sage calculation method could analyze the parameters of each heat transfer node in the cryogenic device more intuitively. When the specimen's dimensions were $3\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$ and the surface emissivity of the specimen was 0.01, the temperature of the specimen was the most uniform, with the temperature difference between the two ends being only 0.005 K. In addition, lowering the surface emissivity of the window and reducing the radiation area of the window were conducive to the uniform temperature distribution on the specimen. The temperature distribution of small-sized specimens is almost independent of the material surface emissivity and window parameters, and the temperature difference is maintained at a minimum level.

Keywords: cryogenic mechanical testing device; thermal analysis; one dimension; three dimensions; temperature field

材料的低温力学性能与实际工程应用息息相关,ITER 计划通过全超导 Tokamak 产生的强磁场来实现大规模的核聚变反应^[1-2]。然而,超导电缆产生强磁场时在电磁力的作用下容易发生变形甚至破坏,从而影响超导磁体正常运行^[3-4]。超导磁体在极端温度(4.2 K)下运行,此过程中材料的力学性能发生改变^[5]。因此,超导磁体材料以及线圈外部的保护夹套在工作环境下的力学性能是保证超导磁体安全运行的重要因素^[6]。此外,材料的低温性能在航空航天液体燃料储存系统、材料改性等应用中也引起了众多学者的关注。材料的力学性能与材料的成分、组织结构、结构缺陷以及材料所处的环境温度有关,特别是在低温下应用时,其力学性能与室温下截然不同^[11-13]。以金属材料为例,面心立方的金属在低温下仍具有较好的韧性与强度,体心立方的金属在低温下易发生低温脆性,而 316LN 不锈钢材料在低温环境中则会发生应力诱导马氏体相变,因此需要了解材料随温度变化的综合力学行为^[14-15]。

在材料的变形测试中,位移和应变是保证测量精度的重要数据,而机械引伸计测量和光学测量是应变测量中常用的方法。其中机械引伸计受测量环境(温度、震动)的影响大,且测量范围有限,无法测量位移场及应变场,在使用时受到诸多限制^[16]。数字图像相关(DIC)光学测量方式是通过对比试样变形前后的数字图像来获取力学性能的测试方法,可以对试样表面进行高精度全场动态测量^[17-22],本文中的低温力学性能测试装置采用后者对试样进行测量。

为了将 3D-DIC 技术应用到材料的低温变形测试中,需要为试样提供便于采集数字图像的低温环境。目前,常用的低温冷却方式包括低温液体冷却和制冷机冷却两种方法。低温液体冷却包括液氮(4.2 K)、液氢(20.3 K)、液氮(77.4 K)和液化天然

气(111 K)等,这种冷却方式是通过低温液体的汽化潜热和气体显热将物体进行冷却^[23-26]。然而,低温液体会使采集到的数字图像出现扭曲与变形,低温氦气的热对流也会引起折射率的变化,从而使相机拍到的数字图像模糊,影响 DIC 方法测量的准确性。制冷机冷却方式通过有效的传热方式将物体温度在一定温度范围内连续、可调、可控地降低,且无需采用其他低温工质^[27-29],本文采用制冷机冷却的方式来提供连续可调可控的低温环境。由于低温装置需要配置光学窗口,其发射率较大,无疑增加了被测样品与外界的辐射换热量,且制冷机在低温下提供的冷量有限,为了在更低温度下测得材料的力学性能,需可靠估计低温装置内的漏热量,选取直观的传热分析方法尤为重要。

本文首先介绍了 4.2~300 K 温区内材料力学性能测试的可视化低温装置的几何结构,并对装置进行了传热过程分析;其次,对此研究对象中各部件之间的传热关系进行了介绍,并分别采用了 COMSOL、Sage 软件对试样进行传热计算;最后,分析对比了两种计算方法的温度分布,并基于 Sage 研究了试样尺寸、试样发射率、窗口尺寸、窗口表面发射率对试样温度分布的影响,为低温装置中传热分析与计算提供理论参考。

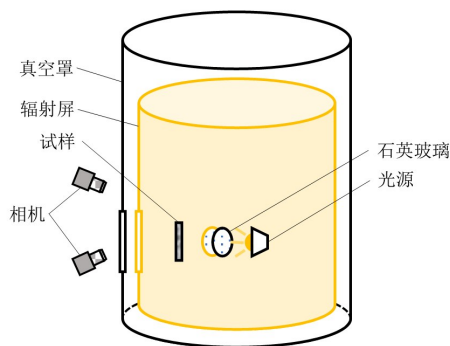
1 研究对象及传热过程分析

本文中低温 DIC 力学性能测试系统的结构具有不同的换热方式,需要对其进行理论传热分析。

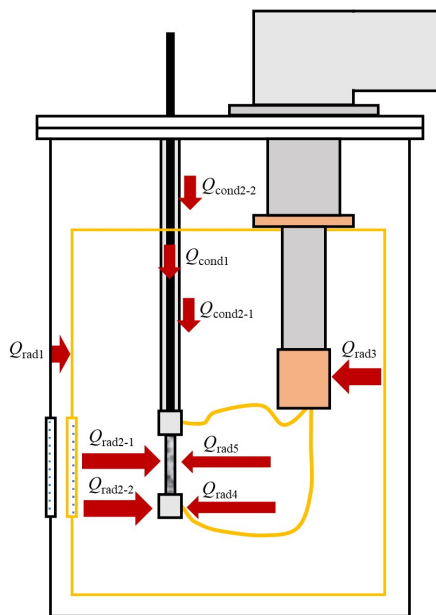
1.1 研究对象

本装置中使用的 3D-DIC 光学成像系统主要由两台高速摄像机和普通白光组成,其中 DIC 测量系统主要包括光学成像系统、光电转换传感器和数字图像处理系统,光学成像系统将试样表面的散斑图

像通过摄像机读取至图像卡中,通过计算机中的数字图像处理系统将图像进行相关计算转换。低温-DIC力学性能测试装置结构及其传热关系示意图如图1所示,整个装置为偏置式,真空罩和辐射屏上分别开设了两个窗口,一个为 $50\text{ mm}\times 230\text{ mm}$ 的矩形石英玻璃窗口,另一个为 $\Phi 50\text{ mm}$ 的圆形石英玻璃窗口。真空罩内真空度可达 $1.3\times 10^{-5}\text{ Pa}$ 。试样测试前需均匀喷涂一层哑光漆便于图像识别,两台相机在竖直方向上通过两层矩形窗口呈 $15^\circ\sim 45^\circ$ 对试样表面进行图像采集,白光光源通过两层圆形窗口在试样表面形成均匀光场。低温力学测试装置内主要部件如图1(b)所示,真空罩、支撑管与夹具均为



(a) 低温-DIC 装置外部示意图



(b) 装置内部几何结构及传热关系示意图

图1 低温-DIC力学性能测试装置结构及其传热关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the cryogenic-DIC mechanical testing device and its heat transfer relationship

不锈钢材质,拉伸杆为钛合金材质,辐射屏、热桥以及制冷机冷头为铜质,矩形窗口和圆形窗口均为石英玻璃,热桥与连接端面均匀涂覆 Apiezon N 脂并压接。真空罩内部在实验过程中始终保持真空,两台住友 RDK-415D 制冷机作为冷源安装在真空罩法兰上,辐射屏通过制冷机一级冷头连接并冷却,制冷机二级冷头通过铜质柔性热桥连接至力学拉伸部件使其冷却。力学拉伸组件主要由拉伸杆、支撑管、拉伸夹具组成,拉伸杆直接连接真空罩法兰(室温端,300 K)和低温夹具(低温端,4.2 K),支撑管分别连接真空罩法兰、辐射屏以及低温夹具,夹具通过热桥与冷头相连,且直接与试样接触。

1.2 传热过程分析

热量通过拉伸杆和支撑管从高温端向低温端传导,材料的导热换热量为

$$Q_{\text{cond}} = \frac{A}{L} \int k_s dT \quad (1)$$

式中: A 为横截面积; L 为导热长度; k_s 为热导率,是固体材料温度依赖的特性; Q_{cond} 为净热流。

除热传导外,部件间的辐射传热亦不可忽略。装置内存在温差的部件间皆存在辐射换热,如真空罩与辐射屏间的辐射换热 Q_{rad1} 、辐射屏窗口与试样间的辐射换热 $Q_{\text{rad2-1}}$ 、辐射屏窗口与拉伸组件表面的辐射换热 $Q_{\text{rad2-2}}$ 、辐射屏对制冷机组件的辐射换热 Q_{rad3} 、辐射屏与拉伸组件表面的辐射换热 Q_{rad4} 以及辐射屏与试样间的辐射换热 Q_{rad5} 等。

两表面间的辐射换热量为

$$Q_{\text{rad}} = A_1 X_{1,2} J_1 - A_2 X_{2,1} J_2 \quad (2)$$

$$J_i = \epsilon_i C_0 \left(\frac{T_i}{100} \right)^4 \quad (3)$$

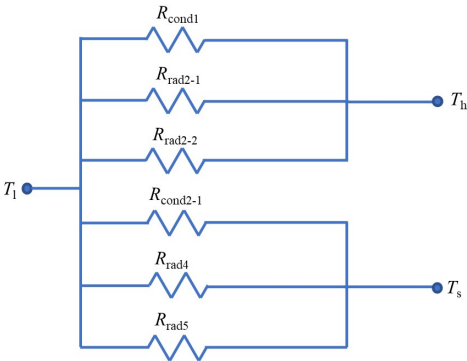
式中: Q_{rad} 为两表面间的辐射换热量; A_1 、 A_2 分别为两辐射表面的辐射面积; $X_{1,2}$ 、 $X_{2,1}$ 分别为从表面 1 到表面 2 的角系数和从表面 2 到表面 1 的角系数; J_i 为 i 表面的有效辐射力; ϵ_i 为 i 表面的表面发射率; C_0 为黑体辐射系数,其值为 $5.67\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_i 为 i 表面的温度。

在实验过程中,真空罩内恒为高真空(10^{-4} Pa)环境,因此忽略对流换热。若 T_h 、 T_l 、 T_s 在此装置内分别表示室温、低温以及辐射屏温度,根据以上装置结构和传热分析结果,与试样有关的导热和辐射换热关系可表示为热阻关系图,如图2所示。热阻 R 可表示为

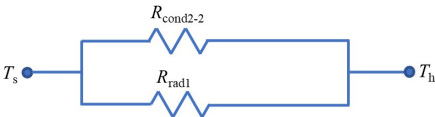
$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad (4)$$

式中: ΔT 为物体两端的温差; Q 为辐射换热量或导

热交换热量。



(a)低温端 T_1 向室温 T_h 及辐射屏 T_s 间的传热



(b)辐射屏 T_s 向室温 T_h 的传热

图 2 低温力学拉伸装置传热关系图

Fig. 2 Heat transfer relationship diagram of the internal structure of the device

2 模型简化及计算方法

为了探索更准确简洁的传热计算方法,针对上节中的几何模型和传热关系,首先使用 COMSOL 三维求解方法计算了各个传热结构的传热量,然而此方法所需的计算模型复杂,且计算时间较长。因此,使用 Sage 一维求解方法分别开发出导热模型和辐射模型,此方法的计算成本显著降低。

2.1 COMSOL 三维求解

COMSOL Multiphysics 可将单一类型物理场扩展到耦合的物理场模型,且可以同时进行计算。对整个低温力学拉伸装置建立涵盖两台制冷机、真空罩、辐射屏、石英窗口、被测试样、拉伸夹具、拉伸杆、支撑管、热桥等结构的三维辐射场与导热场的耦合求解域物理模型。根据以上结构分析与传热分析结果,在 COMSOL 软件仿真中做出如下假设:①除与热桥接触的界面外,其余所有界面间为理想接触;②所有参与导热的结构温度呈线性分布;③玻璃窗口与真空罩、辐射屏的温度始终保持一致。

首先建立几何模型,为节约软件计算成本,三维耦合求解时只关注辐射屏以内的传热情况。用于 COMSOL 软件的三维简化几何模型如图 3 所示,辐射屏内部为制冷机、热桥、夹具、试样、拉伸杆、支撑

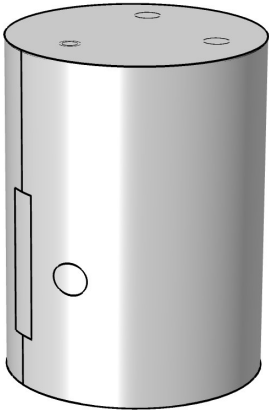
管等组件,各个配合结构间均简化为简单的面接触,忽略法兰结构。本仿真中采用固体传热与表面对表面辐射耦合的多物理场,以稳态求解方式计算温度场的分布情况。

在稳态传热场中,定义在固体区域的温度方程为傅里叶定律的微分形式,即

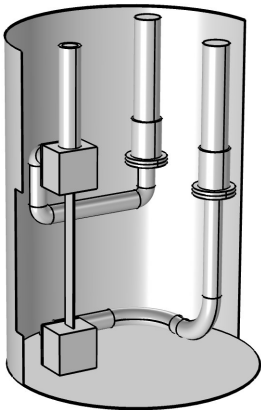
$$\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = Q \tag{5}$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \tag{6}$$

式中: ρ 为密度; c_p 为比定压热容; $\mathbf{u}$ 为速度矢量; T 为绝对温度; $\mathbf{q}$ 为热传导通量; $\mathbf{q}_r$ 为辐射热流; Q 为外加热源; k 为导热系数。



(a) 辐射屏



(b)辐射屏内部组件

图 3 用于 COMSOL 软件的三维简化几何模型
Fig. 3 Simplified model for COMSOL software

辐射屏和二级冷头处的温度初始值分别为 50、4.2 K。边界条件设置如下:考虑实际装置中支撑管上端面、内层石英玻璃、制冷机一级冷头均与辐射屏紧密接触,将其温度统一设置为 50 K;二级冷头及其接触表面温度为 4.2 K;制冷机冷头与热桥界面、夹具与热桥界面的热接触均设为等效热阻。计算中

需要的材料的导热系数、密度、恒压热容等相关特性数据均来源于 COMSOL 软件中内置材料库,具体参数如表 1 所示。

初始温度为软件计算的多场耦合结果。边界条件分别设置如下:将试样表面、制冷机冷头表面、回热器表面、拉伸结构表面、玻璃表面以及辐射屏内表面分别设置为漫反射表面,均匀地向各个方向反射辐射强度,将辐射属性的波长相关性简化为常数,各

表面的表面辐射率如表 2 所示。由于辐射屏内为真空环境,环境辐射率和散射辐照度均定义为 0。辐射传热的计算方法为 Hemicube(半立方体法),模型为稳态研究。通过表面对表面辐射传热耦合接口建立了传热-表面对表面辐射模型,分析了固体传热和辐射换热对温度场的影响。由于计算网格较密时,软件所需内存超出计算机内存能力,在满足网格独立性的基础上,本计算中将网格划分为 24 264 个。

表 1 COMSOL 模型中材料的导热参数
Table 1 Thermal conductivity parameters of materials in COMSOL model

导热部件	材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	比定压热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)
辐射屏	紫铜	$8\,010.066-0.355\,102\,3T-6.993\,965\times 10^{-5}T^2$	863.55	96.27
光学窗口	石英玻璃	2 210	1.40	730
试样	316LN 不锈钢	7 980	0.29	2.23
拉伸杆	钛合金	4 940	7.50	710
夹具、支撑管	304 不锈钢	7 850	3.09	24.26
制冷机回热器	不锈钢	7 980	3.09	24.26
柔性铜结构	紫铜	$8\,010.066-0.355\,102\,3T-6.993\,965\times 10^{-5}T^2$	334.35	390
固体界面	Apiezon N 脂	2 600	0.095	1 200

表 2 表面对表面辐射场中各个表面的辐射率^[21-22]
Table 2 Emissivity of each surface in the surface-to-surface radiation field^[21-22]

部件	表面辐射率
4K 不锈钢	0.048
27K 不锈钢	0.048
辐射屏	0.015
喷涂哑光漆后试样	0.950
回热器壁面	0.048
玻璃表面	0.940
二级冷头表面	0.010

2.2 Sage 一维求解

对于辐射换热,Sage 中两表面之间的辐射通过将它们连接至自带的辐射交换模型组件来实现建模,每个辐射面均以这种方式连接至其他辐射面并与之交换辐射。由于实际装置的模型的复杂度较高,因此对于低温力学拉伸装置中的局部结构特征,需要将其近似为 Sage 中可提供的模块。本装置结构转化为 Sage 模型的简化如下:装置中偏置的试样及拉伸组件在 Sage 中将采用与真空罩同轴的方式表达;在辐射换热计算中将拉伸组件统一视为一个整体,由于其形状复杂,简化为具有固定辐射面积的表面;初步假设室温端温度为 300 K,试样、夹具、制冷机二级冷头等低温部件温度为 4.2 K,辐射屏及

其连接界面温度为 50 K。
首先采用 Sage 计算导热传热量,根据上述装置的传热关系分析可知,参与导热的部件包括拉伸杆和支撑管,其材料、尺寸及传热参数如表 3 所示,Sage 模型如图 4 所示。该模型为简单的固体传导,主要包括热端、冷端和导热体,导热体设置为一维导热。

表 3 导热部件尺寸及温度参数
Table 3 Dimensional and temperature parameters of thermal conductive components

部件	材质	直径/ mm	长度/ mm	热端 温度/K	冷端 温度/K
拉伸杆	钛合金	24	377	300	4.2
支撑管 (4~50 K)	不锈钢	内径 25 壁厚 5	121	50	4
支撑管 (50~300 K)	不锈钢	内径 25 壁厚 5	162	300	50

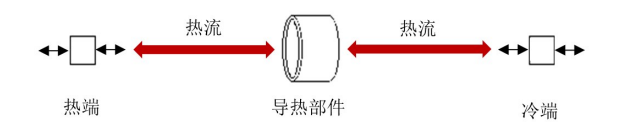
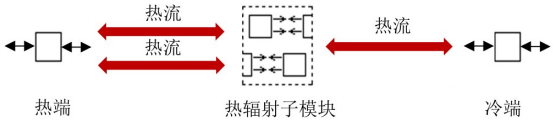
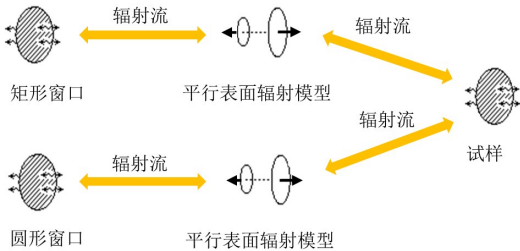


图 4 低温拉伸装置中导热部件的 Sage 模型图
Fig. 4 Sage model of thermal conductive components in cryogenic mechanical testing device

各表面之间辐射换热的 Sage 模型均由热端、冷端和视图配置组件组成,视图配置组件根据两个相邻辐射表面的几何形状以及它们在空间中的相对方向在 Sage 自带的组件中选取,辐射换热的 Sage 模型如图 5 所示。视图配置组件汇总在子模块中。以辐射屏窗口与试样表面的辐射传热为例,图 5(b)展示了子模块中辐射换热关系的基本结构,可以看出矩形窗口表面和圆形窗口表面为两个连接至热端点热源的辐射表面,试样表面连接至冷端点热源。假设试样表面与两窗口表面为平行放置,选取 Sage 中的平行表面组件,通过设置辐射流将辐射表面与组件连接。通过输入各表面计算参数,可计算出自热端表面至冷端表面的辐射换热量。计算过程中各表面的计算参数如表 4 所示。采用 Sage 计算时,共划分为 420 个节点。



(a)辐射屏窗口与试样的 Sage 辐射模型



(b)辐射模型子模块的基本结构

图 5 辐射换热的 Sage 模型

Fig. 5 Sagemodel of radiation heat transfer

表 4 Sage 辐射换热模型中采用的参数

Table 4 Parameters applied in the Sage radiant heat transfer model

辐射表面 1				辐射表面 2			
部件	温度/K	发射率 ^[21-22]	结构参数	部件	温度/K	发射率 ^[21-22]	结构参数
真空罩	300	0.08	直径 410 mm 高度 715 mm	辐射屏	50	0.015	直径 410 mm 高度 548 mm
辐射屏窗口	50	0.94	矩形窗口 50 mm×230 mm 圆形窗口直径 60 mm	试样	4.2	0.95	30 mm×100 mm
辐射屏	50	0.015	直径 410 mm 高度 548 mm	夹具	4.2	0.048	总面积 0.03 m ²
				制冷机冷头	4.2	0.01	直径 50 mm 高度 68 mm
				拉伸部件	4.2	0.048	总面积 0.15 m ²

根据上述计算的低温部件与外部环境的总换热量计算每个部件的热阻,还原部件自身因热阻产生的温差。

Apiezon N 脂两侧的界面温差、导热部件两端温差为

$$\Delta T_1 = \frac{\varphi}{h_{Ap}A_{1-2}} \tag{7}$$

$$\Delta T_2 = \frac{\varphi L}{\lambda A_1} \tag{8}$$

式中: φ 为换热量; A_{1-2} 为界面换热面积; A_1 为导热截面积; h_{Ap} 为界面换热系数; λ 为导热系数。

装置中的热阻如图 6 所示,图中 C 为冷头,tb1 为热桥冷端,tb2 为热桥热端,jig1 为夹具冷端,jig2 为夹具热端,Sam1 为试样端部,Sam2 为试样中部。热桥端部与其他部件的接触面之间界面换热系数

h_{Ap} 取 $1\,835\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[12]。部件的导热参数取平均温度对应的值,其结构参数与三维仿真中模型的取值相同。

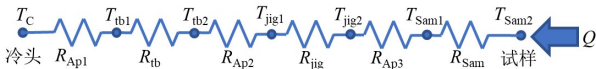


图 6 低温力学拉伸装置内热阻简化图

Fig. 6 Simplified diagram of thermal resistance in the device

3 计算结果及讨论

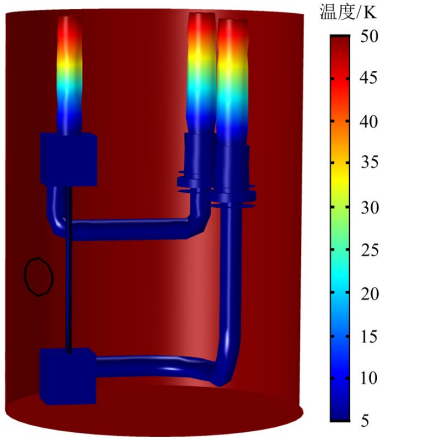
对比分析了三维和一维求解方法对试样温度的计算结果,在保证计算精度的前提下,选择计算成本相对较低的一维求解方法分别计算了试样尺寸、试样表面发射率、窗口表面发射率和窗口尺寸对试样

温度影响,为后续实验提供了参考。

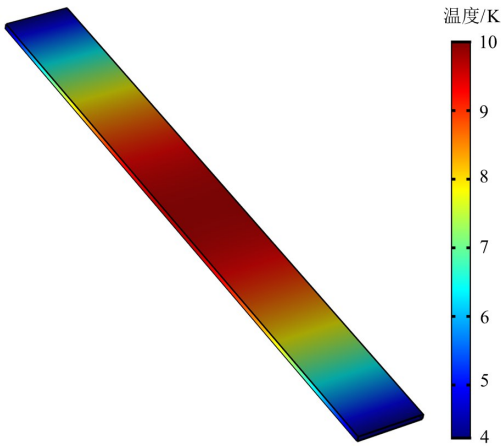
3.1 三维求解方法与一维求解方法的计算结果对比

三维物理场计算结果如图 7 所示,导热部件的温度均呈线性分布,试样的两端温度为 4.219 4 K,试样中部温度(最高温度)为 9.676 5 K。

一维计算中,导热和辐射换热量如表 5 所示。从图 1(b)可以看出,热阻计算中从试样至冷头的换热量为 $Q_{\text{rad2-1}} + Q_{\text{rad5}}$,从夹具至冷头的换热量为 $Q_{\text{rad2-1}} + Q_{\text{rad5}} + Q_{\text{rad2-2}} + Q_{\text{rad4}}$ 。各部件或接触面间的温差如表 6 所示,试样自身的最低温度(即两端温度)、最高温度(即中部温度)分别为 $T_{\text{Sam1}} = 4.211\ 5\ \text{K}$ 、 $T_{\text{Sam2}} = 9.612\ 9\ \text{K}$ 。对比三维计算与一维计算的结果,可以看出两种计算结果几乎一致,认为在三维传热模型中可以将其解耦为各部件的一维传热单独计算,节约了计算时间,降低了操作难度。此外,由于一维计算中各部件被拆分为单独的模型,因此各部件的传热路径更加清晰,且传热参数更易提取。



(a)各部件的温度分布情况



(b)试样温度分布

图 7 三维物理场耦合计算结果

Fig. 7 Calculated results using COMSOL software

表 5 Sage 一维方法计算的制冷机二级冷头负载

Table 5 Heat load of the second cold head of the cryocooler calculated by Sage software

参数	换热量/W
Q_{cond1}	1.595 0
$Q_{\text{cond2-1}}$	0.510 9
$Q_{\text{rad2-1}}$	6.489×10^{-4}
$Q_{\text{rad2-2}}$	4.330×10^{-4}
Q_{rad3}	6.696×10^{-4}
Q_{rad4}	7.576×10^{-4}
Q_{rad5}	7.597×10^{-4}

表 6 各温度节点间的温差

Table 6 Temperature difference between the temperature nodes

各节点间的温差	各节点间的换热量表达式	温差计算值/K
$T_{\text{tb1}} - T_{\text{c}}$	$Q_{\text{rad2-1}} + Q_{\text{rad5}} + Q_{\text{rad2-2}} + Q_{\text{rad4}}$	$1.950\ 1 \times 10^{-4}$
$T_{\text{tb2}} - T_{\text{tb1}}$	$Q_{\text{rad2-1}} + Q_{\text{rad5}} + Q_{\text{rad2-2}} + Q_{\text{rad4}}$	$1.929\ 0 \times 10^{-3}$
$T_{\text{jig1}} - T_{\text{tb2}}$	$Q_{\text{rad2-1}} + Q_{\text{rad5}} + Q_{\text{rad2-2}} + Q_{\text{rad4}}$	$1.531\ 6 \times 10^{-4}$
$T_{\text{jig2}} - T_{\text{jig1}}$	$Q_{\text{rad2-1}} + Q_{\text{rad5}}$	$1.050\ 4 \times 10^{-2}$
$T_{\text{Sam1}} - T_{\text{jig2}}$	$Q_{\text{rad2-1}} + Q_{\text{rad5}}$	$3.070\ 5 \times 10^{-4}$
$T_{\text{Sam2}} - T_{\text{Sam1}}$	$Q_{\text{rad2-1}} + Q_{\text{rad5}}$	5.585 8

3.2 试样尺寸对其温度分布的影响

为进一步验证两种计算方法的一致性,保持其他结构参数不变,比较了 3 种不同尺寸的试样温度分布情况,其中试样 1、2、3 的尺寸分别取 25 mm×230 mm×2 mm、12.5 mm×100 mm×2.5 mm 和 3 mm×30 mm×2.5 mm。试样尺寸对其温度的影响如图 8 所示,分别使用 COMSOL、Sage 计算的试样最低温度、最高温度,可以看出两种计算方法的结果基本吻合。3 种尺寸的试样最低温度始终保持在 4.20~4.22 K 之间;最高温度却因尺寸不同有较大差别,试样 1 的最高温度高达约 9.7 K,而试样 3 的最高温度最高约为 4.4 K,说明试样尺寸是影响试样温度是否均匀的重要因素,且试样尺寸越小,其温度分布越趋于均匀。

根据图 8 中两种方法的结果,将其存在差异的原因总结如下:COMSOL 通过三维几何模型可以将计算模型与实际装置中各部件的关系完好的呈现与匹配;而 Sage 的默认模型中只能根据各部件的关系选择较为合适的固有模型,在此基础上设置各参数

的值。然而此装置中的很多部件与辐射屏为偏心放置,无法在 Sage 中匹配到完全适用的模型,故只能做近似处理与计算。COMSOL 中将所有参与辐射换热的表面设置为漫反射表面,最终可获得综合辐射换热的结果;Sage 中只考虑了各部件与辐射屏或光学窗口之间单独的辐射关系,而未将辐射屏内各部件之间的辐射关系考虑在内。

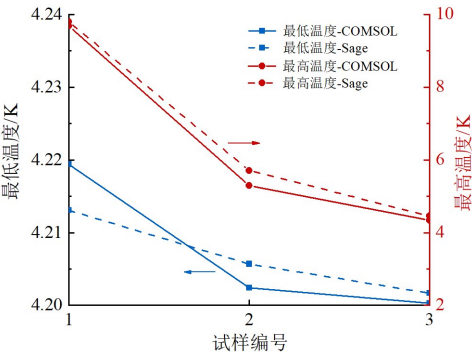


图 8 试样尺寸对其温度的影响

Fig. 8 Effect of specimen size on specimen temperature

3.3 试样表面发射率对其温度分布的影响

由一维和三维计算方法的对比可知,两种方法的计算结果几乎一致,而 Sage 的计算时间和操作难度远小于 COMSOL。因此,使用 Sage 研究了上述 3 种尺寸的试样在表面发射率分别为 0.01、0.25、0.5、0.75 以及 0.95 时试样的温度分布情况。试样尺寸与试样表面发射率对其温度的影响如图 9 所示,以试样 1 为例,随着试样发射率由 0.95 减小至 0.01,试样最低温度由 4.213 K 降至 4.202 K,降低幅度较小;而试样最高温度降低幅度较大,由 9.799 K 降至 4.447 K。随着试样尺寸减小,表面发射率对温

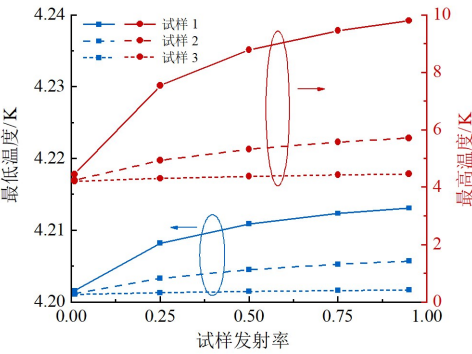


图 9 窗口发射率为 0.94 时试样尺寸与试样表面发射率对其温度的影响

Fig. 9 The effect of sample size and specimen surface emissivity on its temperature for a window emissivity

度的影响显著减小,其温度分布逐渐趋于均匀。试样 3 在发射率为 0.01 时,端部、中部温度分别为 4.201、4.206 K,由此可见,在低温力学拉伸装置的实际使用中,减小试样尺寸和试样的表面发射率是使试样温度均匀分布的有效方法。

3.4 窗口的表面发射率及其尺寸对试样温度分布的影响

使用 Sage 计算了窗口参数对 3 种试样温度分布的影响,其中试样的表面发射率均为 0.95。玻璃窗口的表面发射率对试样温度的影响如图 10 所示,由图 10 可知:随着表面发射率由 0.94 降至 0.01,试样 1 的自身温差由 5.586 K 降至 3.195 K,尤其在窗口表面发射率从 0.25 降至 0.01 时,试样自身温差降幅显著;对于小尺寸试样 3,试样自身温差始终保持最低,当窗口发射率为 0.94 时,试样自身最大温差仅为 0.295 K。由此可见,降低窗口的表面发射率对大尺寸试样具有较为明显的效果,但小试样的温度分布几乎不受窗口表面发射率的影响。

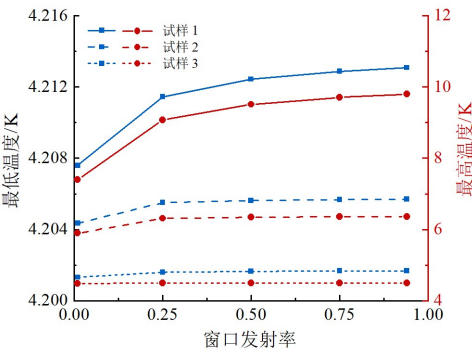


图 10 试样发射率为 0.95 时窗口表面发射率对试样温度的影响

Fig. 10 Effect of window surface emissivity on sample temperature at sample emissivity of 0.95

窗口表面发射率为 0.94、试样表面发射率为 0.95 时,窗口的有效辐射面积对 3 种试样温度的影响如图 11 所示。由图 11 可知,随着窗口的有效辐射面积增大,试样温度近似呈线性增长。随着窗口有效辐射面积由初始面积减小至初始面积的 25%,试样 1 的自身温差由 5.586 K 减小至 3.796 K,试样 3 的自身温差由 0.294 K 减小至 0.264 K。因此,窗

口的有效辐射面积对大尺寸试样的温度分布影响较大,对小尺寸试样几乎没有影响。

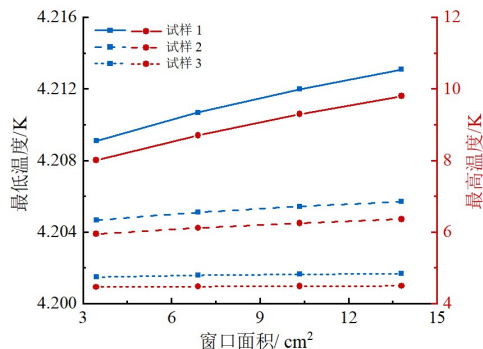


图 11 试样发射率 0.95、窗口发射率 0.94 时窗口有效辐射面积对试样温度的影响

Fig. 11 Effect of window effective radiation area on sample temperature for sample emissivity of 0.95 and window emissivity of 0.94

4 结 论

本文基于低温力学拉伸装置,分别使用 COM-SOL 三维计算方法和 Sage 一维计算方法对装置中部件的传热情况进行了详细的数值研究,在此基础上对不同尺寸的试样温度进行了对比,最后研究了试样参数与窗口参数对试样温度分布的影响。得到如下主要结论。

(1)在相同的简化条件下,Sage 一维计算方法与 COMSOL 三维仿真方法在传热计算与试样的温度场分析中得到的最低温度仅相差 0.007 9 K,结果基本吻合。使用 Sage 软件建立的导热和辐射模型有助于对装置内的传热路径和热阻进行更为直观的分析。在传热场分析中,可以利用各部件间的空间关系选取 Sage 模块来代替复杂的三维耦合场计算,为低温装置的传热计算提供了新型计算方法与参考依据。

(2)对于大尺寸试样,将其表面发射率由 0.95 降至 0.01 后才可得到较为均匀的温度分布,自身温差由 5.586 K 降至 0.245 K;随着试样尺寸减小,试样自身温度分布逐渐趋于均匀,对于本文中的小尺寸试样 3(尺寸为 3 mm×30 mm×2.5 mm),其自身温差几乎不受自身表面发射率的影响。

(3)随着窗口的表面发射率由 0.94 降至 0.01,大尺寸试样 1 的自身温差由 5.586 K 降至 3.195 K,而小尺寸试样 3 始终保持较为均匀的温度分布,其

温差由 0.295 K 降至 0.286 K。因此,小尺寸试样的温度分布几乎不受材料表面发射率和窗口参数的影响,且自身温差始终保持最小,满足实验要求。

参考文献:

- [1] PILLAI S S, RAJPUT M, PATEL H, et al. A study on irradiated welding joints in ITER materials and its effects on FMECA analysis of components [J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 158: 111905.
- [2] YANG Huihui, HUANG Chuanjun, WU Zhixiong, et al. Analysis on the structural transformation of ITER TF conductor jacket tube [J]. Advanced Engineering Materials, 2015, 17(3): 305-310.
- [3] FOUSSAT A, WU Weiyue, WEI Jing, et al. Mechanical design and construction qualification program on ITER correction coils structures [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 269: 116-124.
- [4] GASPAROTTO M, FEDERICI G, CASCI F R. Design and technical status of the EU contribution to ITER [J]. Fusion Engineering and Design, 2009, 84(2/6): 143-149.
- [5] ZHANG Hengcheng, HUANG Chuanjun, HUANG Rongjin, et al. Influence of pre-strain on cryogenic tensile properties of 316LN austenitic stainless steel [J]. Cryogenics, 2020, 106: 103058.
- [6] MITCHELL N, DEVRED A. The ITER magnet system: configuration and construction status [J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 123: 17-25.
- [7] 陈威, 高义民, 邢建东, 等. 一种低合金低温铸钢及其组织与性能 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 875-879.
CHEN Wei, GAO Yimin, XING Jiandong, et al. Composition design of low alloy cryogenic cast steel with analysis of microstructure and mechanical properties [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(7): 875-879.
- [8] 张旺峰, 陈瑜眉, 朱金华. 一种新型的拉伸应力应变曲线规律研究 [J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(10): 64-67.
ZHANG Wangfeng, CHEN Yumei, ZHU Jinhua. Study on a new type of tensile curve [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(10): 64-67.
- [9] LI Jiansheng, ZHOU Zhongchen, WANG Shuaizhuo, et al. Deformation mechanisms and enhanced mechanical properties of 304L stainless steel at liquid nitrogen temperature [J]. Materials Science and Engineering, 2020, 798: 140133.

- [10] WENG Zeju, GU Kaixuan, CUI Chen, et al. Microstructure evolution and wear behavior of titanium alloy under cryogenic dry sliding wear condition [J]. *Materials Characterization*, 2020, 165: 110385.
- [11] KALIA S. Cryogenic processing: a study of materials at low temperatures [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2010, 158(5): 934-945.
- [12] PRIETO G, IPÍÑA J E P, TUCKART W R. Cryogenic treatments on AISI 420 stainless steel: microstructure and mechanical properties [J]. *Materials Science and Engineering*, 2014, 605: 236-243.
- [13] MALLICK P, TEWARY N K, GHOSH S K, et al. Effect of cryogenic deformation on microstructure and mechanical properties of 304 austenitic stainless steel [J]. *Materials Characterization*, 2017, 133: 77-86.
- [14] BOTSHEKAN M, DEGALLAIX S, DESPLANQUES Y. Influence of martensitic transformation on the low-cycle fatigue behaviour of 316LN stainless steel at 77 K [J]. *Materials Science and Engineering*, 1997, 234/235/236: 463-466.
- [15] CHAN J W, CHU D, TSENG C, et al. Cryogenic fracture behavior of 316LN in magnetic fields up to 14.6 T [M]//*Advances in Cryogenic Engineering Materials*. Boston, MA: Springer US, 1994: 1215-1221.
- [16] MOTRA H B, HILDEBRAND J, DIMMIG-OSBURG A. Assessment of strain measurement techniques to characterise mechanical properties of structural steel [J]. *Engineering Science and Technology*, 2014, 17(4): 260-269.
- [17] VENKATACHALAM S, BANJARE R, MURTHY H, et al. Mechanical testing of micro-specimens of Al6061-T6 using DIC for strain measurement [J]. *Experimental Techniques*, 2019, 43(2): 125-135.
- [18] 程振进, 王全保, 陈吉安, 等. 基于混合遗传算法的数字图像相关方法 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(S10): 710-717.
- CHENG Zhenjin, WANG Quanbao, CHEN Ji'an, et al. Digital image correlation method based on hybrid genetic algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(S10): 710-717.
- [19] 陈志新, 梁晋, 郭成. 数字散斑相关法在变形测量中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7): 1480-1485.
- CHEN Zhixin, LIANG Jin, GUO Cheng. Application of digital speckle correlation method to deformation measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1480-1485.
- [20] 付白强, 王立忠, 张振, 等. 数字图像相关中的裂纹变形测量方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(10): 174-183.
- FU Baiqiang, WANG Lizhong, ZHANG Zhen, et al. A measurement method of crack deformation in digital image correlation [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(10): 174-183.
- [21] HASELDEN G G. *Cryogenic fundamentals* [M]. London: Academic Press, 1971.
- [22] 阎守胜, 陆果. *低温物理实验的原理与方法* [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 207-208.
- [23] SALERNO L J, KITTEL P, SPIVAK A L. Thermal conductance of augmented pressed metallic contacts at liquid helium temperatures [J]. *Cryogenics*, 1994, 33(12): 1104-1109.
- [24] 陈双涛, 王鑫, 曲林锋, 等. 开式通道内液氮喷雾的降温特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(10): 144-150.
- CHEN Shuangtao, WANG Xin, QU Linfeng, et al. Cooling performance of liquid nitrogen spray in an open tunnel [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(10): 144-150.
- [25] 巫松桢, 吴欣延, 殷富昌, 等. 低温下聚合物电介质中的空间电荷及其对介电性能的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 1990, 24(4): 11-16, 24.
- WU Songzhen, WU Xinyan, YIN Fuchang, et al. Space charges in polymer dielectrics at cryogenic temperatures and its influence on dielectric properties of polymers [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1990, 24(4): 11-16, 24.
- [26] 张杨, 厉彦忠, 谭宏博, 等. 天然气与电力长距离联合高效输送的可行性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(9): 1-7.
- ZHANG Yang, LI Yanzhong, TAN Hongbo, et al. Efficient long-distance energy transmission conception [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(9): 1-7.
- [27] 祁云, 沈偃, 苏峙岳, 等. 基于斯特林制冷机的磁体冷却系统实验研究 [J]. *低温与超导*, 2022, 50(3): 1-5, 46.
- QI Yun, SHEN Qie, SU Zhiyue, et al. Experimental study on a magnet cooling system based on Stirling cryocooler [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2022, 50(3): 1-5, 46.
- [28] 赵阳, 夏芳敏, 曹雨军, 等. 超导电缆循环冷却系统用制冷机 [J]. *电工材料*, 2021(3): 24-27.
- ZHAO Yang, XIA Fangmin, CAO Yujun, et al. Refrigerator for the cryogenic system of superconducting

cable [J]. Electrical Engineering Materials, 2021(3): 24-27.

- [29] 王惠龄, 饶荣水, 李敬东, 等. 超导电力低温技术展望 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(17): 65-68.

WANG Huiling, RAO Rongshui, LI Jingdong, et al. Progress on cryogenic technology applied in superconducting electric engineering [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(17): 65-68.

(编辑 赵炜 亢列梅)