中北大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)
2026年 第47卷 第5期(总第229期)
Vol. 47 No. 5 2026(Sum No. 229)

文章编号：1673-3193(2026)05-0770-09 J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(5): 770-778.

基于红外辐射加热的封闭空间温度控制方法

张自强[1]，吴云龙[1]，张婧毓[1]，张学伟[1]，李岳峰[1]，王立峰[1]，陈　峰[1]，刘　瑾[1]，张　晨[2]，高博生[2]

(1. 北京新风航天装备有限公司，北京 100854；2. 北京中海技创科技发展有限公司，北京 100070)

摘　要：密闭包装箱存放于低温恶劣环境下时，封闭空间内存储的精密产品受存储低温环境温度的影响会导致内部温度敏感机构工作性能下降，甚至导致精密产品无法使用。针对密闭包装箱内精密产品对环境温度的实际要求，本文面向工程应用设计了一套基于碳纤维红外辐射加热技术的温度控制装置，考虑了密闭包装箱及精密产品散热、传热等参数，提出了采用碳纤维电加热单元的设计，对碳纤维电加热膜的设计过程进行了理论推导，避免设计过程中忽略密闭箱体材料传热参数、环境因素等而导致加热单元尺寸设计不满足加热要求，理论推导可直接指导工程应用。设计了密闭空间精密产品的模拟工装对温度控制装置进行低温加热能力测试，实验结果表明：环境温度为－40 ℃时，有效容积1.27 m^3的模拟工装内温度维持在12～28 ℃，选用0.97 m^2的碳纤维电加热单元，1 h通电周期内产生热量约842 kJ，升温速率为0.27 ℃/min。本文提出的基于红外辐射加热的封闭空间温度控制方法，适用于密闭包装箱内加热控制，可以使存放于－40 ℃包装箱内的精密产品温度处于12～28 ℃温度区间。但是，本文的结果仅针对－40 ℃环境条件进行了工程实验，该方法需要经过大量工程实际检验和样本量积累，才能有效提升理论推导中经验系数的鲁棒性。

关键词：密闭空间；温度控制；红外辐射；碳纤维；电加热

中图分类号：TJ089　　**文献标识码：**A　　**doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.04.0004

引用格式：张自强，吴云龙，张婧毓，等. 基于红外辐射加热的封闭空间温度控制方法[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2026，47(5)：770-778.

Zhang Ziqiang, Wu Yunlong, Zhang Jingyu, et al. A temperature control method for enclosed spaces based on infrared radiation heating[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(5): 770-778.

A Temperature Control Method for Enclosed Spaces Based on Infrared Radiation Heating

Zhang Ziqiang[1], Wu Yunlong[1], Zhang Jingyu[1], Zhang Xuewei[1], Li Yuefeng[1], Wang Lifeng[1], Chen Feng[1], Liu Jin[1], Zhang Chen[2], Gao Bosheng[2]

(1. Beijing Xinfeng Aerospace Equipment Co., Ltd., Beijing 100854, China;
2. Beijing Zhonghai Jichuang Technology Development Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: When a sealed packaging box is stored in a low-temperature harsh environment, the precision products stored inside are affected by the ambient temperature, which can degrade the performance of internal temperature-sensitive mechanisms or even render the precision products unusable. To meet the actual temperature requirements of precision products in sealed packaging boxes, this paper designed a temperature control device based on carbon fiber infrared radiation heating technology for engineering appli-

收稿日期：2026-04-13

作者简介：张自强(1988－)，男，研究员，硕士，主要从事先进电气互联及机电控制技术的研究。E-mail：htjc283@163.com。

cations. Parameters such as heat dissipation and heat transfer of the sealed packaging box and precision products were taken into account, and a design using carbon fiber electric heating units was proposed. The design process of the carbon fiber electric heating film is theoretically derived to avoid the situation where the size of the heating unit fails to meet heating requirements due to neglecting the heat transfer parameters of the sealed material and environmental factors. The theoretical derivation can directly guide engineering applications. A simulated fixture for the precision products in the sealed space was designed to test the low-temperature heating capability of the temperature control device. The experimental results show that when the ambient temperature is －40 ℃, the temperature inside the simulated fixture with an effective volume of 1.27 m^3 is maintained between 12 ℃ and 28 ℃. Using a 0.97 m^2 carbon fiber electric heating unit, 842 kJ of heat is generated within a 1-hour power-on cycle, with a heating rate of 0.27 ℃/min. The temperature control method for enclosed spaces based on infrared radiation heating proposed in this paper is suitable for heating control in sealed packaging boxes, enabling the precision products stored in a packaging box at －40 ℃ to remain within the temperature range from 12 ℃ to 28 ℃. However, the results of this paper are based on engineering experiments conducted only under -40 ℃ environmental conditions. This method requires extensive engineering practice verification and sample size accumulation to effectively improve the robustness of the empirical coefficients in the theoretical derivation.

Key words: enclosed spaces; temperature control; infrared radiation; carbon fiber; electric heating

0　引　言

多功能智能化存储设备是精密仪器系统的重要组成部分，主要由内壁、固定机构、保温装置和调温装置等组成[1-3]。密闭箱体是承载和运输精密产品的专用装置，能够在贮存、运输中提供稳定、良好的存储环境，从而确保产品的性能[4]。为了适应未来系统轻便、机动、灵活的需求，作为重要保障产品的密闭箱体，其结构和功能材料也由传统金属基向复合材料过渡[5]。纤维增强复合材料具有比强度和比刚度高、耐腐蚀、破损安全性好、热传递系数低、疲劳寿命及可设计性好等优点[6-7]，是目前密闭箱体比较成熟且应用最为广泛的材料。对于温度敏感的精密产品，低温环境会使其内部的温敏机构失效，从而影响其使用可靠性[8]。因此，密闭箱体内一般设计有调温装置，通过对箱内气体加热，进而以热传导的方式使精密产品的温度敏感机构维持在合理的使用温度条件下，保证其效能正常发挥。如果调温装置的发热功率小于密闭箱体散热功率，或温度调节组件出现故障，精密产品温敏机构的温度会受环境低温影响而持续下降，导致精密产品温敏机构内化学燃料等的温度偏离其允许工作温度而发生燃料供应不充分现象，进而引起推力室阻塞、不稳定燃烧等问题[9-10]，最终会导致精密产品无法使用。另外，存储状态下的密闭箱体内通常会充入一定压力的干燥惰性气体（一般为高纯度干燥氮气）[11]，并定期监测箱内气体湿度、压力等参数[12]，如果超出规定条件时就及时采取除湿、补压等措施，避免精密产品与环境气体发生氧化、腐蚀等电化学反应而失效[13]。

为了解决精密产品存储系统的环境适应性问题，国内外学者从不同方面提出了解决方案。彭小波[14]针对空天飞机热防护系统与机体的连接结构进行了结构热载与强度计算，提出了采用对流换热的方法分析结构热应力，但对流加热的方法存在能量损耗大、加热不均匀、占用空间大的问题。王江宁等[15]研究了基于螺压工艺制备的Pb、Cu、CB单组分、双组分和三组分催化剂在改性双基推进剂中的催化性能，实现了推进剂－55 ℃～＋70 ℃的使用宽温性能，但这种方案对技术参数和工艺控制要求极高，成本会大幅提升。姜丽萍[16]提出了一种红外辐射非金属导电发热材料，是将纳米级碳纤维纸基体与绝缘基材层压构成面状结构电阻材料，通电后辐射发热实现保温效果，将其应用于军用加固计算机中，解决了低温环境下计算机主板不工作、电源不启动等问题。赵凯璇等[17]设计了不同布线形式来提升空间产品薄膜电加热器的热均匀性，将单条水平线内的均方根差控制在2.79％以内，可以满足较高的加热控制需求。徐飞等[18]采用碳纤维作为红外加热笼的加热体，开展了碳纤维加热条带加工工艺及试验的研究，对其结构形式及加热指标进行了分析和验证，将其成功应用于产品试验中的红外热流模拟装置。

钟锐等[19]以PIC12F629单片机为核心设计了基于碳纤维加热模块的恒温自动控制系统，控温精度达±0.5 ℃，实现了温度恒定控制。张海波等[20]采用半导体制冷器对现代舰载光电设备中的CCD表面温度进行控制，使CCD整体温度降低20 ℃左右，提升了CCD系统的成像质量。宋延超[21]提出了红外辐射预热利用技术，利用单位红外辐射加热产生的多余热量对临近工位空气进行加热，，满足双工位结构件涂层烘干固化的要求。汪佰龙[22]开展了基于红外辐射加热的GF/PP构件冲压成型工艺研究，设计并搭建了红外辐射加热试验平台，通过增加输入电压或减小加热距离可将GF/PP复合材料层合板的面内温差从最大11.5 ℃减小至6.1 ℃，有效提高了红外辐射加热的均匀性。但是，目前的技术研究局限于实验室验证阶段，设计方案缺少对密闭箱体散热、箱体内气体状态、调温装置发热功率等参数的工程化考虑。

基于上述问题，本文从工程化应用出发，提出了基于碳纤维红外辐射加热的产品温度控制装置通用设计方法，综合考虑密闭箱体散热、箱内气体状态以及调温装置发热、温敏机构合理的使用温度等工程化参数，给出了基于碳纤维电加热单元的设计过程和理论推导，并基于温度继电器提出了滞回冗余控制方法，对理论推导进行了工程化验证。本文方法的传热路径是碳纤维电加热单元通电后，红外辐射加热固体表面(精密产品)，再通过对流/传导将温度传递给箱内气体，通过温度监测使低温环境下精密产品的温度维持在合理范围，避免产品受存储环境因素影响。

1 密闭空间电加热单元的设计方法

1.1 基于设计参数的密闭空间内气体的质量

设定精密产品存储在环境温度为T_E的密闭箱体内，箱内高纯度惰性气体的摄氏温度在t时间内从允许下限阈值T_L上升至允许上限阈值T_H。

密闭箱体为相对密闭的容器，充入一定压力的高纯度惰性气体并保持微正压状态，箱内气体满足克拉伯龙方程。因此，密闭箱体内惰性气体的质量m可以表示为

$$m=M\cdot\frac{P_d\cdot(V_c-V_d)}{RT},\tag{1}$$

式中：M为密闭箱体内高纯度惰性气体的摩尔质量；p_d为密闭箱体内的绝对压力；V_c为密闭箱体的容积；V_d为精密产品的体积；R为比例常数；T为密闭箱体内气体当前的热力学温度。

1.2 基于工程实际的密闭箱体热量消耗模型

根据牛顿冷却定律，温度高于周围环境的物体向周围媒质传递热量并逐渐冷却，当物体表面与周围媒质存在温度差时，单位时间从单位面积散失的热量与温度差成正比。密闭箱体单位时间内通过内筒壁传热面的功率φ可以表示为

$$\phi=Ah\cdot\Delta T_d,\tag{2}$$

式中：A为密闭箱体的传热面积；h为物质对流传热系数，即密闭箱体内筒壁的导热系数；ΔT_d为密闭箱体内外的热力学温度差。依据设定参数，精密产品存储的环境低温为T_E，密闭箱体内气体的允许下限温度阈值为T_L，则$\Delta T_d=T_L-T_E$。

根据物质吸热方程，密闭箱体内气体在温度滞回周期内由下限温度升高至上限温度，吸收总热量Q可以表示为

$$Q=cm\cdot\Delta T_{gas},\tag{3}$$

式中：c为气体定容比热容；m为密闭箱体内气体的质量；ΔT_{gas}为密闭箱体内气体的摄氏温度差，即允许上限温度阈值与允许下限温度阈值之差，则$\Delta T_{gas}=T_H-T_L$。

1.3 基于红外辐射加热单元的热量增加模型

密闭箱体内的电加热单元将电能转换为热能并将热量对外辐射传递，根据电做功方程，加热单元做功总量为气体吸收的热量，因此气体维持温度滞回周期所需加的热功率P_m可以表示为

$$P_m=\frac{Q}{t}=\frac{c\cdot(T_H-T_L)}{t}\cdot M\cdot\frac{P_d\cdot(V_c-V_d)}{RT}。\tag{4}$$

考虑密闭箱体传热功率、加热单元电热转换效率及热辐射传递效率等因素，需求总功率P可以表示为

$$P=\gamma\cdot(\phi+P_m),\tag{5}$$

式中：γ为经验系数。需要说明的是，考虑了热传递效率等影响，需求总功率与理论总功率的经验系数γ一般取1.5～2。

1.4 基于密闭箱体参数的电加热单元尺寸模型

碳纤维电加热单元为面状发热体，且在圆柱形密闭箱体内无折叠铺设，加热单元整体具备发热条件。因此，工程化设计电加热单元面积S可以表示为

$$S=\frac{P}{\rho}=\frac{\gamma}{\rho}\cdot\left[Ah\cdot(T_{\mathrm{L}}-T_{\mathrm{E}})+\frac{c\cdot(T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}})}{t}\cdot M\cdot\frac{P_{\mathrm{d}}\cdot(V_{\mathrm{c}}-V_{\mathrm{d}})}{RT}\right],\quad(6)$$

式中：ρ 为电加热单元的功率密度。

以上变量均采用国际单位制进行计算，且为已知或采取测量手段、查询常见物质参数表、技术手册等可以获得的参数。针对任意尺寸和散热参数的低温存储精密产品，依据式(6)即可求出精密产品温敏机构的温度维持在最佳范围所需的电加热单元总面积，进而选择合适尺寸的碳纤维电加热单元。

2　密闭箱体内的温度控制装置

温度控制装置是密闭箱体内气体调温、控温的主要实现部分，包括电加热单元、温度控制组合、电气互联组件。电加热单元采用柔性材料，可以弯曲成圆弧状并通过安装支脚固定在密闭箱体内壁；温度控制组合结构中设计了安装支耳，可以将组合结构固定在密闭箱体内的支架上；电气互联组件通过卡箍将互联电缆固定在密闭箱体内的支架上。温度控制装置在密闭箱体内的布设示意如图 1 所示。

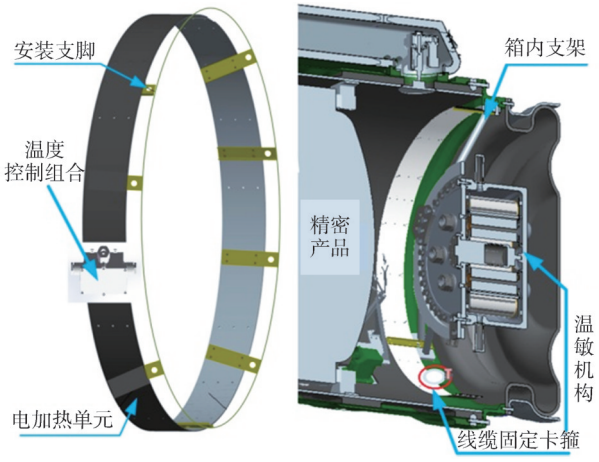
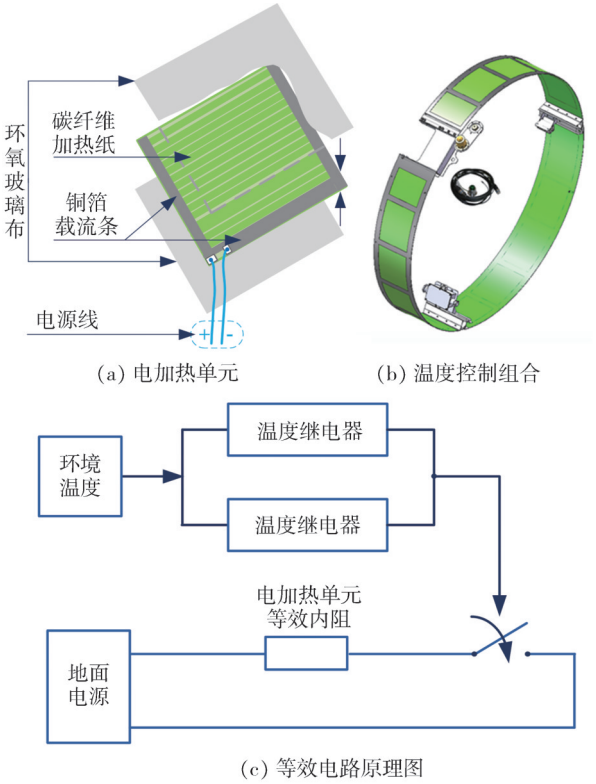


图 1　温度控制装置在密闭箱体内的布设示意

Fig. 1　Layout of the temperature control device in the enclosed box body

温度控制装置中，电加热单元由碳纤维加热纸、铜箔载流条、环氧玻璃布、电源线组成，通电后发热辐射；温度控制组合采用两组温度继电器冗余并联控制一组电磁继电器，基于温度滞回周期实现电加热单元通断电控制；电气互联组件包括互联电缆和气密封连接器，用于温度控制装置供电输入、电加热单元与温度控制组合间电气互联。温度控制装置组成如图 2 所示。

温度控制装置由外部电源提供 220 V/50 Hz 的交流电，当精密产品存储于低温环境时，环境低温通过密闭箱体的筒壁传导至箱内气体，进而使精密产品温敏机构温度下降。根据传感器的技术资料，选择处于精密产品温敏机构最佳存储温度范围内的温度继电器。



(a) 电加热单元　　(b) 温度控制组合

(c) 等效电路原理图

图 2　温度控制装置组成示意图

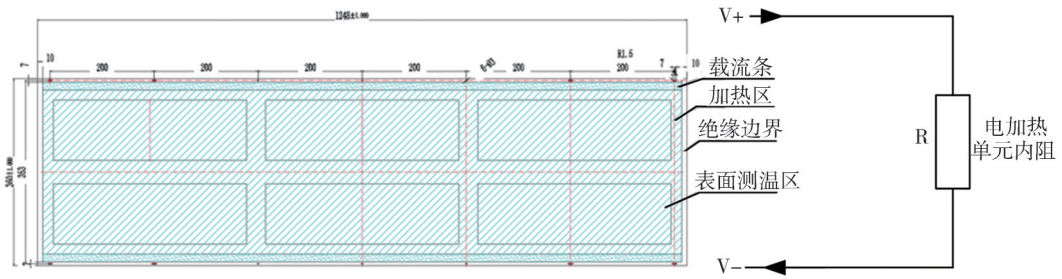
Fig. 2　Composite diagram of the temperature control device

当密闭箱体内气体温度下降至温度继电器下限阈值时，温度继电器控制电磁继电器开关闭合给电加热单元通电，碳纤维加热纸以面状热辐射的形式实现密闭箱体内气体的升温，气体将热量传导至精密产品温敏机构进行温度回升。当密闭箱体内气体温度上升至温度继电器上限阈值时，温度继电器控制电磁继电器开关断开，电加热单元断电后停止发热，密闭箱体内气体在环境低温作用下温度下降。依此循环，确保密闭箱体内精密产品温敏机构的温度维持在合理的使用温度范围。

2.1　基于碳纤维的热辐射电加热单元

电加热单元的核心是纳米级碳纤维材料，其结构中含有共轭双键，化学性能稳定。通过湿法造纸工艺生产出碳纤维加热纸，纤维材料均匀分布在纸基体中，呈三维网络搭接状态，形成面状

结构等效电阻，纤维材料的高结晶度和高定向度特点使碳纤维加热纸具有良好的导电和导热性[16]。碳纤维加热纸与铜箔载流条、环氧玻璃布、电源线采用层压的形式，形成超薄、阻燃、环境适应性好的红外辐射电加热单元。电加热单元示意及等效电路如图3所示。



(a) 单元组成　　(b) 等效电路

图3　电加热单元示意

Fig. 3　The electric heating unit

电加热单元以电磁波的形式向周围气体辐射热量，热量传播过程中没有其他能量损耗，电热转换效率达90%以上[16]。碳纤维电加热单元最高发热温度为60 ℃，不会损坏密闭包装箱内的设备或装置。为了评估电加热单元的电稳定性，持续通电200 h，每1 h测量1次加热单元的电阻值，实验结果如图4所示。可以看出，随通电时间的增加，电加热单元电阻值稳定在(71.26±0.01) Ω，电功率恒定，表明该材料发热稳定。

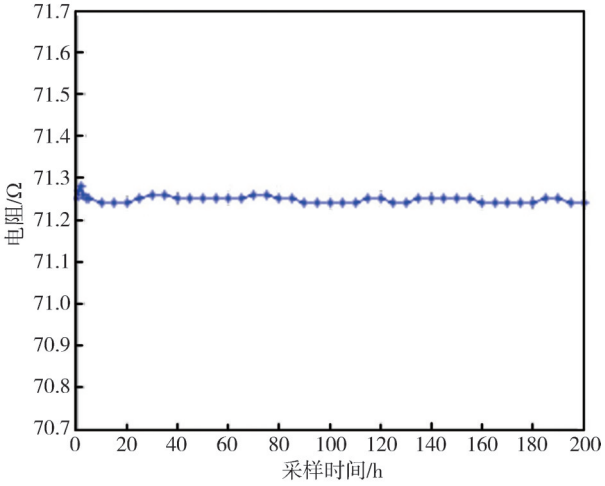


图4　电加热单元的通电时间与电阻的关系曲线

Fig. 4　Relationship curve between time and resistance of electric heating unit power

基于碳纤维的电加热单元通电后以均匀红外辐射的形式对周围气体加热，通过对密闭箱体内气体的加热进而以热传导的形式实现温敏机构温度的调节，使精密产品温敏机构处于其合理的使用温度范围内，并且不会对温敏机构及其内部的其他部件产生局部过热、电磁等影响。

2.2　基于冗余设计的温度控制组合

220 V/50 Hz交流电源的供电电流根据密闭箱体、电加热单元尺寸的不同而变化，为了提高温度控制装置的通用性，避免供电电流超出温度继电器开关导通电流的限值而导致器件损坏，本文提出并联冗余温度继电器来控制大功率电磁继电器的方法以提高导通电流，提升了温度控制装置的通用性。温度控制组合电路原理图如图5所示。

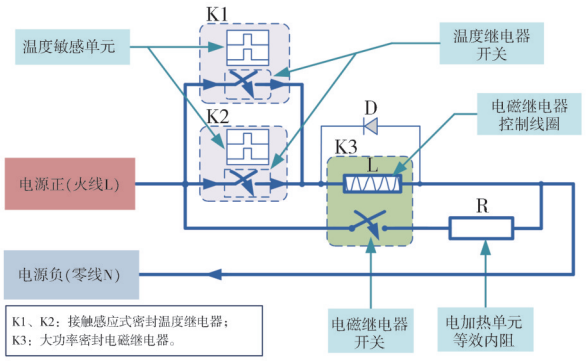


图5　温度控制组合电路原理图

Fig. 5　Schematic diagram of the temperature control combination circuit

图5中，D为反峰抑制二极管，R为电加热单元等效内阻。因电磁继电器线圈L为感性材料，掉电后会产生较大的反向电动势，通过反峰抑制二极管消除反向电动势对回路器件造成的高电压冲击。设计两个接触感应式密封温度继电器K1、K2，将两者并联后控制大功率密封电磁继电器K3，避免单一温度继电器失效而导致电加热单元无法通电。

精密产品温敏机构内部为易燃、易爆燃料，在密闭箱体内温度控制组合控制继电器通断电的过程中，为避免产生的电火花损坏温敏机构，需对温度控制组合进行隔爆设计，如图6所示。

温度控制组合主壳体采用304不锈钢材料制造，依据GB 3836.2—2021《爆炸性环境第2部分：由隔爆外壳“d”保护的设备》中规定的隔爆要求设计结构

外壳，壳体为密闭设计，温度继电器通过热传递系数高的铝块紧贴内壁外壳，以热传导的方式感知敏感壳外气体温度。壳体上下端面设计呼吸装置，采用钢丝网隔离，用于密闭箱体内气体的热对流；壳体左右端面设计线缆连接保护接口，采用密封圈将线缆紧固后接入组合。采用上述设计的温度控制组合防爆等级达 ExdIIBT6 Gb，防爆证书编号：YEx19. 11226。

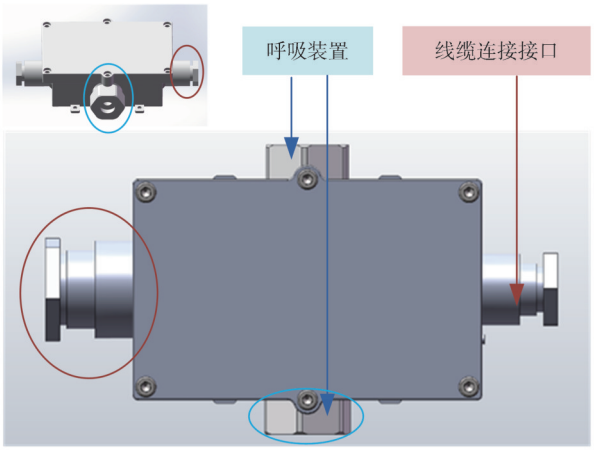


图 6　隔爆型温度控制组合

Fig. 6　Flameproof temperature control combination

温度控制组合外壳防护部分按照 GB4208—2008《外壳防护等级（IP 代码）》进行结构设计，目标等级为 IP65。

3　实验与验证

以精密产品温敏机构为研究对象，结合密闭箱体内壁尺寸参数及精密产品存储使用环境要求，采用本文提出的电加热单元设计方法和基于冗余控制的温度控制组合电路原理，设计了温度控制装置样机，如图 7 所示。采用精密产品温敏机构模拟工装进行了加热能力验证实验。

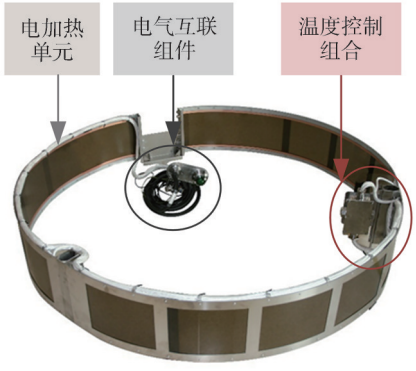


图 7　温度控制装置实物图

Fig. 7　Physical diagram of temperature control device

3.1　实验参数选型

为了验证密闭箱体内电加热单元对精密产品温敏机构的加热能力，研制模拟工装进行加热能力验证实验。设计中空圆柱体结构的模拟密闭箱体进行实验测试，其内壁的传热面积、导热系数与密闭箱体一致，密闭箱体内设计了与精密产品温敏机构尺寸相同的工艺实验件，以模拟精密产品占用的空间。密闭箱体内装有温度传感器，采集内部气体温度。设定精密产品存储的最低环境温度为－40 ℃，密闭箱体充入高纯度氮气，温敏机构的合理使用温度需维持在 10～30 ℃。

将上述设定作为温度继电器敏感参数的选型依据。选择下限阈值（15±3）℃、上限阈值（25±3）℃的温度继电器，结合本文提出的冗余控制方法，密闭箱体内温度可控在 12～28 ℃。模拟加热实验用技术参数如表 1 所示。

表 1　模拟加热实验用技术参数

Tab. 1　Technical parameters for simulation heating experiment

序号	参数	数值
1	密闭箱体传热面积 A	—
2	保温层面积 A_1/m^2	9.42
3	后盖面积 A_2/m^2	1.13
4	前盖面积 A_3/m^2	1.57
5	密闭箱体导热系数 h	—
6	保温层导热系数 h_1/(W•m^{-2}•K^{-1})	0.33
7	后盖导热系数 h_2/(W•m^{-2}•K^{-1})	1.85
8	前盖导热系数 h_3/(W•m^{-2}•K^{-1})	1.31
9	密闭箱体内气体允许下限阈值 T_L/ ℃	12
10	密闭箱体内气体允许上限阈值 T_H/ ℃	28
11	精密产品存储低温环境温度 T_E/ ℃	－40
12	氮气定容比热容 c/(J•kg^{-1}•K^{-1})	741
13	氮气摩尔质量 M/(g•mol^{-1})	28.01
14	氮气比例常数 R/(J•mol^{-1}•K^{-1})	8.31
15	密闭箱体内氮气压力 p_d/Pa	1.1×10^5
16	密闭箱体内当前开氏温度 T/K	285.15
17	密闭箱体容积 V_c/m^3	1.96
18	模拟温敏机构体积 V_d/m^3	0.69
19	电加热单元功率密度 ρ/(W•m^{-2})	700
20	需求升温时间 t/s	3600
21	经验系数 γ	1.8
22	碳纤维加热膜电阻 R_M/Ω	71.3
23	碳纤维加热膜红外光谱半球发射率 ε	0.90

将模拟加热用实验参数代入式（6），可以得出－40 ℃环境下密闭箱体内气体温度维持在 12～28 ℃，所需电加热单元面积为

$$S=\frac{\gamma}{\rho}\cdot\left[(A_1h_1+A_2h_2+A_3h_3)\cdot(T_L-T_E)+\frac{c\cdot(T_H-T_L)}{t}\cdot M\cdot\frac{P_d\cdot(V_c-V_d)}{RT}\right]\approx 9\,702\ \text{cm}^2。\tag{7}$$

依据模拟密闭箱体结构布局和尺寸参数，设计电加热单元尺寸S=1 560 mm×641 mm。

根据功率密度关系计算可知，电加热单元可提供的功率为$P=S/\rho$=679.15 W。依据式(2)可计算出密闭箱体散热功率$\varphi=\sum Ah$=377.301 6 W，考虑电加热单元的电热转换效率不低于90%，则密闭箱体内气体的加热功率P_m=90%·$P-\varphi$=233.933 4 W。

根据式(4)可知，实验用电加热单元在单个通电周期(1h)提供的总热量$Q=P_m\cdot t\approx$842 kJ。

3.2 实验过程

依据参数选型确定电加热单元尺寸，将装有温度控制装置的模拟工装放入恒温箱中进行低温环境实验。首先，模拟工装充入绝对压力为110 kPa的高纯度氮气；然后，打开220 V/50 Hz交流电源，温度控制装置通电，恒温箱启动并快速冷却至−40 ℃后保持；最后，通过模拟工装内的温度传感器实时监测气体温度。精密产品温敏机构模拟工装如图8所示。

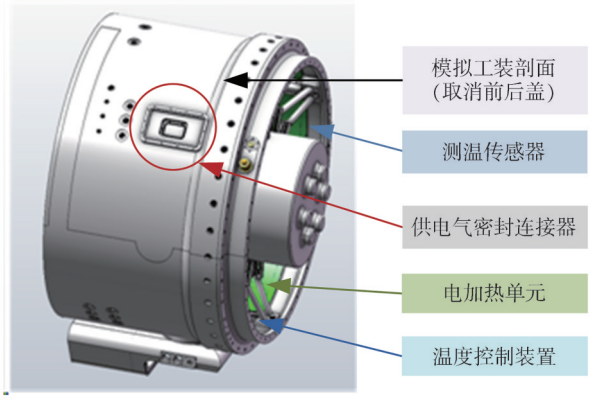


图8 装有温度控制装置的模拟工装

Fig. 8 Simulation tool with temperature control device

3.3 实验结果

模拟工装内使用的温度传感器选用瑞士盛思锐(Sensirion)生产的SHT21-DIS-D型传感器，采用完全标定的数字量输出，测量精度为±1.0 ℃，测温位置位于模拟工装温敏机构外的空间内，考虑密闭箱体温度流动性，只安装了一个温度传感器，传感器与温敏机构、工装内部壁不接触(如图8所示)，且传感器处于计量校准有效期内。箱内温度采样周期设置为5 min/次，记录工装内气体温度，3 h温度变化情况实验的结果如图9所示。

由图9可以看出，依据本文设计方法确定的电加热单元面积，精密产品在−40 ℃环境下存储时，温敏机构温度维持在其允许工作范围(10~30 ℃)。温度控制装置启动后，密闭箱体内气体的温度在1 h内由12 ℃升高至28 ℃，电能向红外辐射转换的效率不低于90%，红外辐射加热效率为0.27 ℃/min，精密产品温敏机构处于合理的使用温度范围。

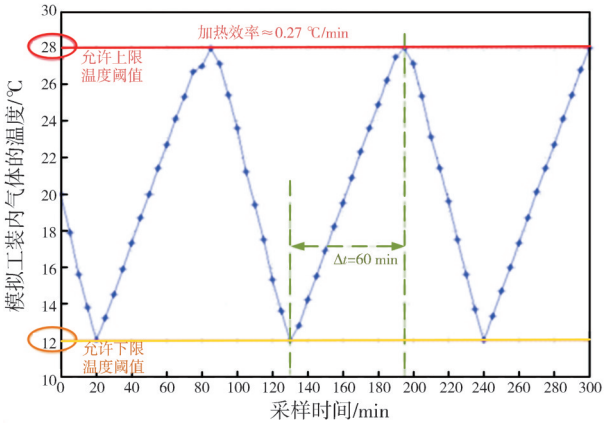


图9 −40 ℃低温环境下模拟工装内的温度曲线

Fig. 9 Temperature curve inside the simulation tool at −40 ℃

4 结 论

本文针对存储在低温恶劣环境下密闭箱体内精密产品温度控制的实际需求，提出了基于碳纤维电加热单元的设计方法，工程化研究了密闭箱体传热、导热、温度等参数对电加热单元尺寸设计的影响，基于冗余控制设计了防爆型温度控制组合，完成了密闭箱体温度控制装置样机的研制。设计了精密产品温敏机构模拟工装对本文提出的设计方法进行了实验验证，当环境温度为−40 ℃时，在有效容积1.27 m^3的范围内，0.97 m^2的电加热单元可以将精密产品温敏机构温度维持在12~28 ℃，升温速率为0.27 ℃/min，从而为精密产品恶劣低温环境存储提供了最佳的内部环境。本文从工程化的角度出发，提出了用于精密产品存储的密闭箱体温度控制方法，并完成了实验验证。后续需要考虑系统外部能源和热管理技术，并结合系统工程方法研究电加热控制的策略，以进一步降低精密产品加热过程中的系统能耗。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] 韦坚，王小军，梁财海，等. 一种针对大尺度发射筒

的温控技术[J]. 导弹与航天运载技术，2016(3)：89-92.
Wei Jian, Wang Xiaojun, Liang Caihai, et al. Temperature control technology of large-scale launcher canister[J]. Missiles and Space Vehicles, 2016(3): 89-92.（in Chinese）

[2] 李洪涛. 某型增强型复合材料发射筒强度特性评估[J]. 海军航空大学学报，2022，37(2)：217-223.
Li Hongtao. Evaluation of the strength characteristics of a certain type of reinforced composite material launch tube[J]. Journal of Naval Aviation University, 2022, 37(2): 217-223.（in Chinese）

[3] 王磊，郭保全，朱家萱，等. 发射筒破损位置对燃气弹射影响机理研究[J]. 火炮发射与控制学报，2023，44(5)：46-52.
Wang Lei, Guo Baoquan, Zhu Jiaxuan, et al. Study on the influence of damaged position of launch tube on gas ejection[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2023, 44(5): 46-52.（in Chinese）

[4] 张志利，王自杰，李国英，等. 某型导弹发射筒的弹射工况建模仿真研究[J]. 系统仿真学报，2007，19(17)：3880-3882.
Zhang Zhili, Wang Zijie, Li Guoying, et al. Study on launch work condition simulation modeling of certain missile launch canister[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(17): 3880-3882.（in Chinese）

[5] 李永康，赵亚鹏，李苗. 复合材料发射筒筒体发射力学特性仿真分析与优化[J]. 舰船科学技术，2024，46(2)：180-184.
Li Yongkang, Zhao Yapeng, Li Miao. Simulation analysis and optimization of launch mechanics characteristics of comoposite launch tube barrel[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(2): 180-184.（in Chinese）

[6] 安庆升，孙立东，武秋生. 碳纤维增强复合材料发射筒设计研究[J]. 空天防御，2021，4(2)：13-19.
An Qingsheng, Sun Lidong, Wu Qiusheng. Design of carbon fiber reinforced composite launch tube[J]. Air & Space Defense, 2021, 4(2): 13-19.（in Chinese）

[7] 沈克纯，潘光，施瑶，等. 静水压力下碳纤维缠绕复合材料圆柱壳体应变特性及承载能力研究[J]. 西北工业大学学报，2020，38(5)：937-943.
Shen Kechun, Pan Guang, Shi Yao, et al. Exploring strain characteristics and bearing capacity of a carbon filament - wound composite cylindrical shell under hydrostatic pressure[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(5): 937-943.（in Chinese）

[8] 李锦冬，李润成. 某型导弹多功能发射车调温系统的优化控制[J]. 兵工自动化，2006，25(10)：7-9.
Li Jindong, Li Runcheng. Temperature regulation system optimizing control for multi-function launch vehicle of certain missile[J]. Ordnance Industry Automation, 2006, 25(10): 7-9.（in Chinese）

[9] 海军，罗雷. 物资装备运输环境条件研究[J]. 国防交通工程与技术，2013，11(1)：6-9.
Hai Jun, Luo Lei. Research on the environmental conditions of the transportation of materials and equipments [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2013, 11(1): 6-9.（in Chinese）

[10] 张仕念，何敬东，颜诗源，等. 导弹贮存延寿的技术途径及关键技术[J]. 装备环境工程，2014，11(4)：37-41.
Zhang Shinian, He Jingdong, Yan Shiyuan, et al. Basic approaches and key techniques for missile storage life extension[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 37-41.（in Chinese）

[11] 张自强，曾庆煌，王宇，等. 一种基于膜法除湿的换气设备研究[J]. 制造业自动化，2021，43(9)：93-96.
Zhang Ziqiang, Zeng Qinghuang, Wang Yu, et al. Research on a ventilation device based on membrane dehumidification [J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(9): 93-96.（in Chinese）

[12] 张自强，吕秀梅，张学伟，等. 气密包装箱气体状态监测装置设计[J]. 包装工程，2022，43(1)：236-244.
Zhang Ziqiang, Lü Xiumei, Zhang Xuewei, et al. Design of gas state monitor for airtight packaging box [J]. Packaging Engineering, 2022, 43(1): 236-244.（in Chinese）

[13] Zhang H J, Huang Y Y, Zhang Z Q. Relative humidity detection method of air-tight storage box for weapon equipment[C]//2023 IEEE 16th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2023: 35-41.

[14] 彭小波. 空天飞机热防护系统连接结构热载与强度分析[J]. 导弹与航天运载技术，2012(6)：1-4.
Peng Xiaobo. Thermal load and strength analysis of space plane thermal protection system's connecting structure[J]. Missiles and Space Vehicles, 2012(6): 1-4.（in Chinese）

[15] 王江宁，张晓宏，谢波，等. 一种宽平台宽温改性双基推进剂燃烧性能研究[J]. 火工品，2016(2)：53-56.
Wang Jiangning, Zhang Xiaohong, Xie Bo, et al.

Study on the combustion performance of a kind of wide platform CMDB propellant[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(2): 53-56. (in Chinese)

[16] 姜丽萍. 红外辐射超薄电加热元件在加固计算机中的应用[C]//全国抗恶劣环境计算机第十五届学术年会, 2005: 164-166.

[17] 赵凯璇, 马海龙, 张丽新, 等. 空间用薄膜电加热器设计及热均匀性测试[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(4): 417-420.
Zhao Kaixuan, Ma Hailong, Zhang Lixin, et al. Structure design and thermal uniformity of film-circuit heater for spacecrafts [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(4): 417-420. (in Chinese)

[18] 徐飞, 李玉忠, 杨万青, 等. 碳纤维用作红外加热笼电热辐射材料的可行性研究[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(6): 668-671.
Xu Fei, Li Yuzhong, Yang Wanqing, et al. The feasibility of using carbon fiber as electro-thermal radiant material for infrared heating cage[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, 33(6): 668-671. (in Chinese)

[19] 钟锐, 屈大强, 胡玉婷. 基于单片机的恒温自动控制系统[J]. 电子制作, 2017, 25(24): 7-8.

[20] 张海波, 董宇星, 李焱. 舰载光电设备CCD温控系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(3): 651-653.
Zhang Haibo, Dong Yuxing, Li Yan. CCD temperature control for ship-based optoelectronic equipment [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(3): 651-653. (in Chinese)

[21] 宋延超. 红外辐射余热利用技术在结构件烘干工艺中的应用及能耗分析[J]. 现代涂料与涂装, 2022, 25(12): 29-32.
Song Yanchao. Application and energy analysis of infrared radiation waste heat utilization technology in the drying process of structural parts[J]. Modern Paint & Finishing, 2022, 25(12): 29-32. (in Chinese)

[22] 江佰龙. 基于红外辐射加热的GF/PP构件冲压成型工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2024: 16-23.