

核素恒温器散热结构设计与分析*

吕璇, 柳飞洪, 汪鹏程, 闫赛飞, 张 龙

(安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243000)

摘 要:为解决放射性合成自动化模块散热问题,文中设计了一款新型多尺寸翅片结构的铝合金核素恒温器,利用有限元分析软件ANSYS Workbench对核素恒温器进行了热力学分析。采用控制变量法进行翅片参数设计,采用翅片的非等高设计进行散热性能优化,在保证恒温时温差小于 5°C 的前提下得到散热性能最佳时的结构参数。结果表明:当核素恒温器的翅片高度为11.5 mm、翅片间距为2 mm、翅片的厚度为1 mm、翅片长度为42 mm时,恒温器表面的最高温度为 78.745°C ,比无翅片时低了 25.205°C ;经过翅片非等高设计,圆筒内壁与翅片距离为3.5 mm,其他参数不变,恒温器表面的最高温度比优化前低了 0.294°C ,在此结构参数下恒温器的散热性能最佳。

关键词:散热性能;结构设计;非等高设计

中图分类号:TK124 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-5300(2021)05-0035-05

Design and Analysis of Heat Dissipation Structure of Nuclide Heater

LV Xuan, LIU Feihong, WANG Pengcheng, YAN Saifei, ZHANG Long

(School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, China)

Abstract: In order to solve the heat dissipation problem of the radioactive synthesis automation module, a new type of multi-size fin structure aluminum alloy nuclide thermostat is designed and the thermodynamic analysis of the nuclide thermostat is conducted by the finite element analysis software ANSYS Workbench. The fin parameter design is carried out by the controlled variable method and the heat dissipation performance is optimized by unequal height design of the fin. The structure parameters for the best heat dissipation performance are obtained under the premise that the temperature difference at a constant temperature is less than 5°C . The results show that when the fin height of the nuclide thermostat is 11.5 mm, the fin spacing is 2 mm, the fin thickness is 1 mm and the fin length is 42 mm, the maximum temperature on the surface of thermostat is 78.745°C , which is 25.205°C lower than that on the surface of thermostat without fins. After unequal height design of fins, the distance between the inner wall of the cylinder and the fin is 3.5 mm and other parameters remain unchanged, the maximum temperature on the surface of thermostat is 0.294°C lower than that before optimization. Under this structure parameter, the thermostat has the best heat dissipation performance.

Key words: heat dissipation performance; structure design; unequal height design

引 言

将放射性核素搭载在蛋白质分子上,用来标定肿瘤或对其进行放射性治疗是当前医疗领域普遍采用的一种技术手段。大部分正电子核素具有相对短的半衰期,因此将正电子药物标记在活性分子上的时间要短。最初此类药物均采用手工合成,但辐射会危害人体健康,于是出现了药物自动合成装置。早期的自动合成

装置结构复杂,合成时间长且产率较低^[1-3]。近年来,高度集成的自动合成模块因具有合成过程稳定、合成时间短、合成产率高等优势而被广泛采用^[4]。

自动合成模块目前普遍采用的加热方式主要有油浴和水浴2种。但水浴、油浴容器存在加热温度波动大、不易安装、易污染等缺点,并且在长期使用过程中普遍存在锈蚀、渗漏等问题。与传统的液体浴不同,核素恒温器温控技术(采用程序控制的恒温技术)控温

* 收稿日期:2021-03-17

精准,可控温范围广,绿色环保,无毒无害,易于集成,可提高效率,可节省空间^[5]。

核素恒温器采用一种带有发热元件且具备温度调控功能的金属结构件。在放射性药物合成过程当中,为缩短2个药物合成步骤温度区间的过度时间,要求将恒温阶段恒温器的温差控制在 5°C 以内,因此提高其散热性能是其关键。结合热仿真技术进行结构设计是常用的研究方式^[6],目前为提高散热性能对结构件的研究多集中在矩形翅片的结构设计上。韩宁等^[7]采用复合法对型材散热器结构(如肋长、肋高、肋间距、翅片数、翅片形状等)进行了优化;金开等^[8]研究了散热器内外翅片的间距和高度等因素对其散热性能的影响,为散热器的各部分结构尺寸提供最优的结构参数;Manivannan等^[9]采用Taguchi实验设计方法,考虑矩形散热器的肋长、肋宽、肋高、肋厚、翅片数目及基座高度多个影响因素,以平均换热系数、热阻、压力降和辐射为目标进行多目标优化;李琴等^[10]通过改变各种设计参数进行热仿真模拟,直到找到最佳的设计方案,从而缩短了分析计算时间,减少了生产实际样机的时间和费用;Ma等^[11]提出了冷却大功率LED灯的前表面散热方式。本文针对散热问题,设计散热翅片结构,利用有限元分析软件ANSYS Workbench对其进行热力学仿真分析,采用非等高设计法对结构参数进行优化,获取散热性能最佳时恒温器的结构参数。

1 模型建立

图1(a)是无散热翅片结构核素恒温器的模型。为提高散热性能,设计了有散热翅片的结构模型,如图1(b)所示。设计金属件结构翅片的厚度(H)、间距(T)、高度(D)和长度(L),并对初始结构尺寸进行优化,以获得散热性能优异的适用于核素恒温器的结构模型,设计成散热翅片结构还能减轻恒温器的质量。采用极差分析法(即将恒温阶段最高温度与最低温度的差值作为评判指标)评判恒温阶段的散热效果。

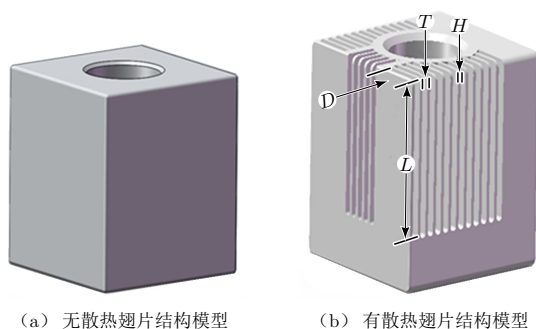


图1 恒温器模型

2 核素恒温器结构模型仿真分析

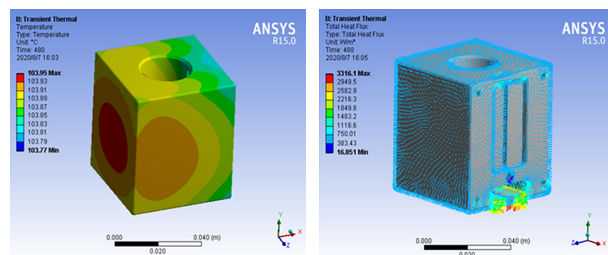
2.1 原料及实验设计

利用有限元分析软件ANSYS Workbench对恒温器结构进行稳态热力学仿真分析。核素散热片材料为铝合金(牌号A6061)。在计算恒温时温度极差时,将外部环境设置为常温自然对流状态,环境温度为 26°C ,核素恒温器的初始温度设置为 26°C ,目标温度设置为 120°C ,对流换热系数是 $5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$,采用外部仿真计算模式。在计算散热时的温度分布时,核素恒温器的初始温度是微型核素恒温器恒温时的温度,对流换热系数是 $5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$,采用外部仿真计算模式。

2.2 结果与分析

2.2.1 无翅片对散热性能的影响

图2(a)和图2(b)分别是恒温器冷却一定时间后的温度分布云图及冷却时的热流分布图。无翅片时该恒温器的最高温度出现在底部加热口处,温度为 103.95°C 。因为在恒温阶段正温度系数(Positive Temperature Coefficient, PTC)发热片区域的温度最高,铝合金材料存在一定的热阻且恒温器与空气介质之间存在热对流,因此在距离PTC发热片较远的区域热量有一定损失。在加热源处热流密度最大,温差最大,热量转移较快,其他区域的结构差异小,所以热流密度分布较均匀。



(a) 无散热翅片结构冷却阶段温度分布云图 (b) 无散热翅片结构冷却热流分布图

图2 恒温器模拟图

2.2.2 翅片厚度(H)对散热性能的影响

由于合成药物标准容器的直径为 23.5 mm ,所以研究翅片厚度对散热效果的影响时,将内部加热圆筒的直径定为 23 mm 。翅片高度影响着散热性能和保温性能,如果过高,则不能起到很好的恒温作用,如果过低,则散热翅片的散热性能就会降低。当翅片高 11 mm ,即翅片与圆筒内壁的距离为 2.5 mm 时,微型核素加热器在保温的同时还能存储一定的热量,同时在散热时也会散发一些热量。因此将散热翅片的高度

设为11 mm,长度设为42 cm,厚度取为1.0~2.0 mm,每间隔0.2 mm进行一次模拟实验,根据设计要求,厚度 ≥ 1 mm,其他几何参数和边界条件不变。

图3中带圆点的曲线为散热阶段翅片厚度与散热温度的关系曲线。由该曲线可知,恒温器散热一定时间后的温度随翅片厚度的增加呈现上升趋势,但在翅片厚度为1.6 mm时存在一个拐点,低于此点时,温度升高比较快,高于该点时,温度上升比较缓慢。其原因在于厚度的增加使翅片的散热能力下降。同时,翅片间距减小也是使温度升高的一个原因。带方块的曲线为恒温阶段不同结构参数下的极差曲线。由该曲线可知,极差随着翅片厚度的增大而减小,翅片厚度在1.0~2.0 mm范围内时,恒温器恒温时极差均小于5 °C,符合设计标准。综合起来看,散热翅片厚度为1 mm时,散热性能最好。

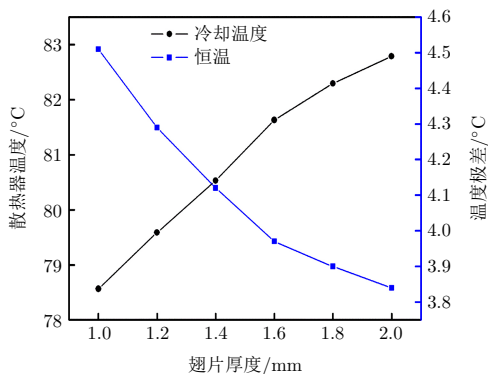


图3 翅片厚度与温度关系曲线

2.2.3 翅片间距(T)对散热性能的影响

研究翅片间距对散热效果的影响时,与翅片厚度设计同理,翅片高度设为11 mm,长度设为42 cm,厚度设为1 mm,翅片间距取1.0~3.5 mm,每隔0.5 mm进行一次模拟实验,其他几何参数和边界条件不变。

图4中带方块的曲线为散热阶段翅片间距与散热温度的关系曲线。由该曲线可知,减小翅片间距(翅片数目增加)能够提高核素加热器的散热性能。在翅片间距2.0 mm和3.0 mm处有比较明显的拐点,因为间距在1.0 mm与2.0 mm之间,翅片的数目减少得多,而在2.0 mm至3.0 mm之间翅片数目减少得较少,间距在3.0 mm至3.5 mm之间,翅片数目相差2个。由此可见,散热性能的强弱与翅片间距(翅片数目)密切相关。翅片数量增加,散热面积增大,散热性能就得到提高。但恒温器模型的整体结构尺寸是一定的,核素加热器翅片的数量也是一定的。当翅片间距小于2 mm时,机加工刀具的尺寸加工难度大,有损害道具的风险,加工

成本也高,因此设定翅片间距 ≥ 2 mm。带圆点的曲线为恒温阶段不同结构参数下的极差曲线。由该曲线可知,极差随着间距的增大而减小,当间距 ≥ 2 mm时,极差均小于5 °C,均符合设计标准。综合起来看,恒温器散热翅片的间距为2 mm时,散热性能最好。

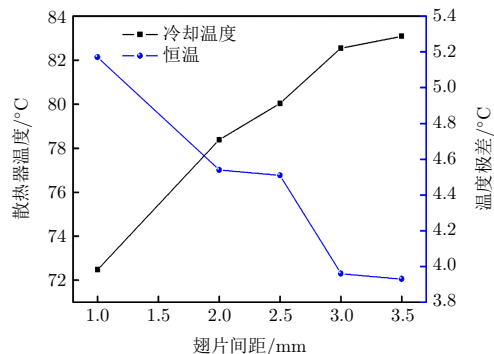


图4 翅片间距与温度关系曲线

2.2.4 翅片高度(D)对散热性能的影响

研究翅片高度对散热效果的影响时,与翅片厚度设计同理,厚度设为1 mm,长度设为42 cm,翅片间距设为2 mm,翅片高度取10.0~12.0 mm,每隔0.5 mm进行一次模拟实验,其他几何参数和边界条件不变。

图5中带圆点的曲线为散热阶段翅片高度与散热温度的关系曲线。由该曲线可知,当翅片高度增加时,恒温器的散热性能得到提高,且曲线符合二元一次方程。因为三维模型的散热面积随着高度的增加而增大,且每次增大的面积是一定的,因此其散热性能与面积紧密相关。带方块的曲线为恒温阶段不同结构参数下的极差曲线。由该曲线可知,极差随着高度的增加而增加,当高度为12 mm时,在恒温阶段恒温器的极差大于5 °C,影响合成效率。同时当翅片的高度持续增加时,与内部加热圆筒的距离会逐渐减小,加工难度和成本也会增加,所以翅片的高度要保持在合理的数值,不能盲目追求高翅片。

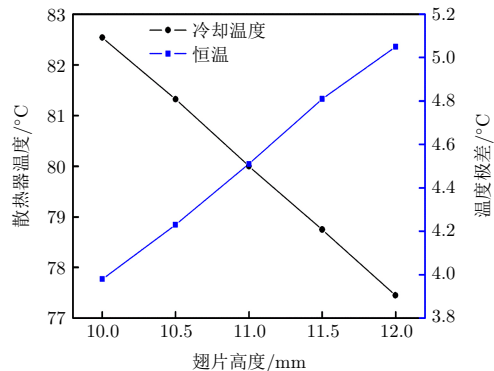


图5 翅片高度与温度关系曲线

2.2.5 翅片长度(L)对散热性能的影响

研究翅片长度对散热效果的影响时,与翅片厚度设计同理,翅片高度设为11.5 mm,厚度设为1 mm,间距为2 mm,翅片长度取36 ~ 44 mm,每隔2 mm进行一次模拟实验,其他几何参数和边界条件不变。

图6中带圆点的曲线为散热阶段翅片长度与散热温度的关系曲线。由该曲线可知,加长翅片确实能够降低恒温器的温度,且曲线符合一次模型。三维模型的散热面积随着长度的增加而增大,散热性能与面积紧密相关,且每次增大的面积都是一定的,所以散热性能与翅片长度符合一次模型。带方块的曲线为恒温阶段不同结构参数下的极差曲线。当翅片长度为44 mm时,恒温器恒温时的极差大于5 °C,影响合成效率。恒温器翅片的长度有限,过长的翅片会导致热量不能被及时传递到翅片末端,影响散热。翅片的长度接近加热圆筒基体的长度时,散热效果较好,翅片长度为42 mm时散热性能最佳。

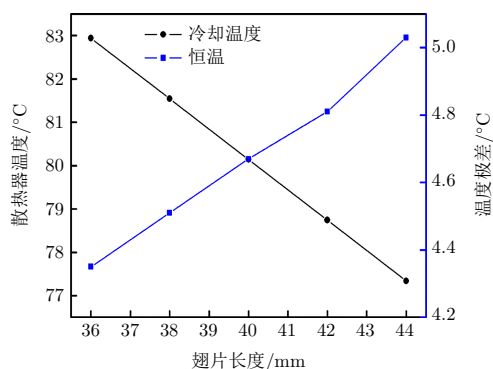


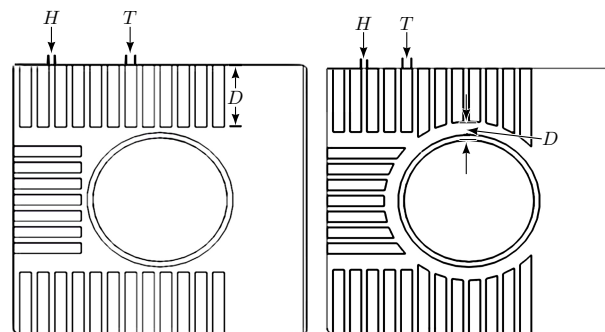
图6 翅片长度与温度关系曲线

3 翅片的非等高设计

传统等高翅片的设计使得空气在翅片之间流动时的流阻较大,翅片温度较高,换热效果差。本文基于散热器等高翅片的传热特性,提出非等高翅片阵列设计,其目的在于减小空气流入翅片时的流动阻力,加快空气在翅片间的流动,提升恒温器的整体散热性能,并减小恒温器的质量,降低成本。

将翅片阵列轮廓设计由等高直线形改为非等高圆弧形,如图7所示。原本的翅片高度(D)在非等高设计中是翅片与圆筒内壁的最小距离,实验中圆筒内壁与翅片的距离 D 取2.5 ~ 4 mm,每隔0.5 mm进行一次模拟实验,其他参数不变。

图8中带圆点的曲线为散热阶段翅片与圆筒内壁距离的散热关系曲线。由该曲线可知,散热性能随着



(a) 等高直线形轮廓 (b) 非等高圆弧形轮廓

图7 翅片恒温器非等高设计

翅片与圆筒内壁间距的增大而降低,且曲线符合一次模型。其原因是随着翅片与圆筒内壁间距的减小,散热面积会增大,只是每次增大的幅度是一定的。带方块的曲线为恒温阶段不同结构参数下的极差曲线。当圆筒内壁与翅片的距离小于3.0 mm时,恒温器的极差大于5 °C,所以内壁与翅片的距离为3.5 mm和4 mm时,恒温器的设计符合设计要求。但当距离大于3.5 mm时,散热性能得到增强,优于4 mm时的散热性能。所以在恒温器内壁极差小于5 °C的前提下,恒温器在内壁与翅片距离为3.5 mm时的散热性能最佳。

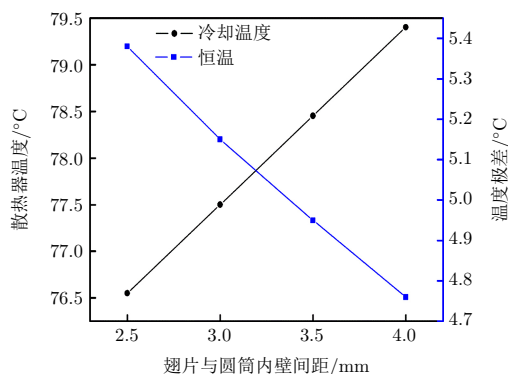
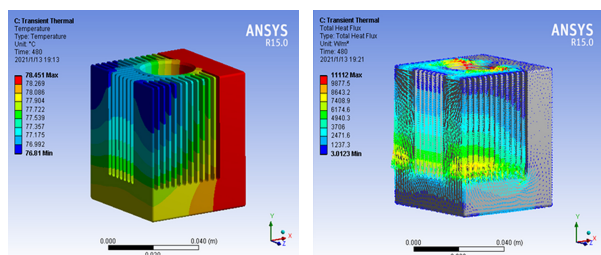


图8 翅片与圆筒内壁不同间距下散热一定时间后的温度

优化后,圆筒内壁与翅片的距离为3.5 mm,核素恒温器冷却一定时间后的温度分布云图以及冷却时的热流分布图如图9所示。从图9(a)可知,与无散热翅片时的温度分布图相比,有散热翅片时散热性能得到极大提高,比无翅片时低了25.309 °C。在非等高设计前,恒温器表面的最高温度为78.745 °C,非等高设计后,恒温器表面的最高温度为78.451 °C,比等高设计时低了0.294 °C。从图9(b)可以看出,在加热源和散热翅片处热流密度较大,这进一步表明散热翅片的改进设计提升了散热性能。



(a) 冷却一定时间后的温度分布云图 (b) 冷却时的热流分布图

图9 优化后的恒温器模拟图(内壁与翅片间距为3.5 mm)

4 结束语

本文将核素恒温器的散热翅片作为研究对象,在保证恒温时温差小于5 °C的前提下,研究翅片高度、间距、厚度、长度等因素对散热性能的影响,得出以下结论:

1) 无翅片微型核素加热器表面的最高温度为103.95 °C。经单因素研究,当翅片高度为11.5 mm、翅片间距为2 mm、翅片厚度为1 mm、翅片长度为42 mm时,恒温器表面的最高温度为78.745 °C,比无翅片时低了25.205 °C。

2) 通过非等高设计优化,当圆筒内壁与翅片的距离为3.5 mm、翅片间距为2 mm、翅片厚度为1 mm、翅片长度为42 mm时,恒温器表面的最高温度为78.451 °C,比等高设计时低了0.294 °C。

参考文献

- [1] SOOD S, FIRNAU G, GARNETT E S. Radiofluorination with xenon difluoride: a new high yield synthesis of [18F]2-fluoro-2-deoxy-D-glucose[J]. The International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 1983, 34(4): 743-745.
- [2] MACHULLA H-J, BLOCHER A, KUNTZSCH M, et al. Simplified labeling approach for synthesizing 3'-

deoxy-3'-[18F]fluorothymidine ([18F]FLT) [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2000, 243(3): 843-846.

- [3] YUE X, XIN Y, ZHANG S, et al. Automated production of 1-(2-[18 F]fluoroethyl)-L-tryptophan for imaging of tryptophan metabolism [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2020, 156: 663-675.
- [4] 张锦明, 田嘉禾, 宦定才, 等. 固相萃取柱上水解法合成¹⁸F-FDG [J]. 同位素, 2003, 16(3-4): 222-225.
- [5] 章青, 邹姝文, 徐慧娟. 恒温金属浴温度偏差校准结果的不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(12): 121-122.
- [6] 吴进凯, 钱吉裕, 魏涛. 基于烟囱效应的电子设备自然散热设计[J]. 电子机械工程, 2020, 36(6): 42-45.
- [7] 韩宁, 王世萍, 谢少英. 强迫对流散热器优化设计[J]. 计算机工程与科学, 2001(4): 66-68.
- [8] 金开, 郑磊, 朱蕾, 等. 散热器翅片参数对其性能的影响研究[J]. 汽车实用技术, 2020(5): 126-128.
- [9] MANIVANNAN S, DEVI S P, ARUMUGAM R, et al. Multi-objective optimization of flat plate heat sink using Taguchi-based Grey relational analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(5-8): 739-749.
- [10] 李琴, 刘海东, 朱敏波. 热仿真在电子设备结构设计中的应用[J]. 电子工艺技术, 2006(3): 165-167.
- [11] MA L, YANG Y, LIU J. Cooling of high power LEDs through ventilating ambient air to front surface of chip [J]. Heat and Mass Transfer, 2013, 49(1): 85-94.

吕璇 男, 1994年生, 硕士, 主要研究方向为智能温控核素恒温器技术。

张龙 男, 1983年生, 副教授, 主要研究方向为造型材料制备与成形以及金属液态精确成型技术及其应用。

(上接第34页)

- [J]. 系统仿真学报, 2005, 12(2): 13-17.
- [14] 应文江. 座舱瞬态热载荷的计算方法[J]. 南京航空航天大学学报, 1994, 26(3): 407-410.
- [15] 方玉峰. 歼击机环控系统动态仿真[J]. 北航学报, 2003, 17(10): 51-53.
- [16] 宋俊虢, 袁修干. MATLAB在飞机环境控制系统仿真中的应用[J]. 北航学报, 2002, 9(1): 102-103.
- [17] 穆景阳, 陈江平, 陈芝久, 等. 动态数值仿真在飞机环控系统中应用[J]. 大连理工大学学报, 2002, 11(41): 19-25.
- [18] 赵俊如, 史忠科. 飞机环境控制系统的仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(6): 542-544.

- [19] 姚伟. 平流层飞艇热力学模型和环境控制方案设想[C]//中国空间技术研究院近空间研讨会. 北京: 2006.
- [20] 姚伟, 李勇, 王文隽, 等. 平流层飞艇热力学模型和上升过程仿真分析[J]. 宇航学报, 2007, 28(3): 603-607.
- [21] 艾青, 夏新林, 唐尧. 一种求解飞机蒙皮内外耦合热效应的壁面热流函数法[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 636-638.
- [22] 夏新林, 艾青, 任德鹏. 飞机蒙皮红外辐射的瞬态温度场分析[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3): 174-177.

包胜 男, 1987年生, 高级工程师, 主要从事电子吊舱环境控制、电子设备热管理研究工作。