重大工程装备

自旋转条件热加载装置内部热特性研究

秦嘉阳¹,吴松¹,拜云山¹,王易君¹,黄龙²,胡宇鹏¹,李明海¹

(1.中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621999; 2.31827部队)

摘要:目的 探究自旋转效应对全局和局部加热条件下热加载装置内部流动与传热特性的影响,以指导环境 试验用热加载装置的工程设计。方法 通过数值模拟研究全局和局部实际加热情况下自旋转热加载装置内速 度场与温度场分布特征,以及加热壁面平均传热性能,获取旋转作用对温升速率、目标平衡温度、温度不 均匀度等热加载装置关键技术指标的影响。结果 装置内流动速度随旋转作用的增强先减小、后增大,当装 置以1000 r/min 旋转时,内部空气流动受到了旋转作用的抑制;当旋转速度高于1000 r/min 时,旋转作用 又促进内部空气流动。全局加热情况时,热加载装置在 0~10 000 r/min 的温升速率为 20.92~34.43 K/s,装置 内部平衡温度随旋转速度增大先增加、后略有减小;局部加热情况时,温升速率则为 3.47~4.49 K/s,装置内 部平衡温度在 1000 r/min 最高,且装置内温度不均匀性因受到侧壁受热不均匀的影响而更加复杂。结论 热 加载装置的设计需充分考虑旋转速度对装置温升速率和平衡温度的影响,加热面积越大,装置内温度不均 匀度越大,也需在热加载设计时予以关注。

关键词:热加载装置;自旋转;速度场;温度场;全局/局部加热;传热特性;数值模拟 中图分类号:V231.1 文献标志码:A 文章编号:1672-9242(2025)05-0138-09 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.05.018

Thermal Characteristics of Heating Devices under Rotating Condition

*QIN Jiayang*¹, *WU Song*¹, *BAI Yunshan*¹, *WANG Yijun*¹, *HUANG Long*², *HU Yupeng*^{1*}, *LI Minghai*¹ (1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621999, China; 2. The 31827 Unit of PLA, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the impact of self-rotational effects on the internal flow and heat transfer characteristics of a heating device under global and local heating conditions, so as to guide the engineering design of heating devices for environmental testing. Through numerical simulations, the distribution characteristics of the velocity and temperature fields within a self-rotating heating device under actual global and local heating conditions were examined, along with the average heat transfer performance of the heating wall. The impact of rotational effects on key technical indicators of the heating device, such as the temperature rise rate, target equilibrium temperature, and temperature non-uniformity, was analyzed. The flow velocity within the device initially weakened and then strengthened with the increasing rotational effects. At a rotation speed of 1 000 r/min, the internal air flow was suppressed by the rotational effect, while at the speed exceeding 1 000 r/min, the rotational

收稿日期: 2025-03-01; 修订日期: 2025-03-31

Received: 2025-03-01; Revised: 2025-03-31

基金项目:国家自然科学基金(52476093)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52476093)

引文格式:秦嘉阳,吴松,拜云山,等. 自旋转条件热加载装置内部热特性研究[J]. 装备环境工程,2025,22(5):138-146.

QIN Jiayang, WU Song, BAI Yunshan, et al. Thermal Characteristics of Heating Device under Rotating Condition[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(5): 138-146.

^{*}通信作者(Corresponding author)

effect promoted the internal air flow. Under global heating conditions, the temperature rise rate of the heating device ranged from 20.92 K/s to 34.43 K/s for the rotation speed ranging from 0 r/min to 10 000 r/min. The internal equilibrium temperature initially increased and then slightly decreased with the increasing rotation speed. Under local heating conditions, the temperature rise rate ranged from 3.47 K/s to 4.49 K/s, with the highest internal equilibrium temperature observed at 1 000 r/min. The temperature non-uniformity within the device became more complex due to uneven heating of the sidewalls. The design of heating devices must fully consider the impact of rotation speed on the temperature rise rate and equilibrium temperature. Additionally, larger heating areas lead to greater temperature non-uniformity within the device, which should also be addressed in the design process.

KEY WORDS: heating device; self-rotation; velocity field; temperature field; global/local heating; heat transfer characteristics; numerical simulation

温度是武器装备贮存、运输和使用中时刻要遇到 的环境,其时刻影响着武器装备的性能^[1-2]。温度引 起的故障多种多样,据统计,由环境影响造成的产品 故障约占全部故障的 52%,其中温度故障更是达到 40%^[3]。因此,相关温度试验是武器装备全寿命周期中 各阶段环境试验工作的重要内容。例如,杨军锋等^[4] 在分析空空导弹寿命期内典型任务剖面的基础上,分 析了空空导弹典型状态事件中涉及的温度环境应力 特征,确定了相应温度环境试验项目、环境条件以 及试验方法。高琳等^[5]针对军用车辆太阳辐射热效 应模拟试验技术开展了研究,实现了军用车辆高温 日循环温度模拟。上述温度试验中,环境应力的模 拟与加载主要依托温度试验箱、电加热装置等热加 载装置[6-8],其温升速率、温度场不均匀度等技术指 标关乎产品环境试验的考核质量。为此,较多研究人 员针对温度试验箱等热加载装置的热加载特性开展 了深入研究。周芳等^[9]开展了环境试验箱变温过程 中温度分布特性的试验研究,结果表明,试验箱在 快速变温过程中存在较大的不均匀性,应在使用过 程中注意分析这种温度场特性对参试产品的影响。 钱华等[10]针对温度试验箱在不同风向条件下的温度 场分布开展了 CFD 数值模拟,发现挡住中间部分出 风挡板后,使得气流组织在工作室前部和上部的对流 换热更加充分,有利于提高试验箱工作室温度的均匀 性。孙琦等[11]进一步对现有高温试验箱进行了温度 场分析,提出了增加热源数量以提高加热效率,以 及适当改进或提高进口风速以改善箱内温度均匀性 的优化方案。相较单一温度试验,温度-离心复合环 境试验对环境的模拟更真实,对产品的环境应力筛 洗更高效,有助于暴露一些在单一温度因素下无法 暴露的缺陷^[9]。针对温度-离心复合环境试验用热加 载装置的设计, 需充分考虑离心效应对热加载装置 温升速率、温度场不均匀度等的影响。已有研究表 明^[12-13],离心加速度是造成温度箱中温度不均匀性 的主要原因,箱体内温度场不均匀度随离心加速度 的增大而显著增大。

此外,工程实际中还广泛存在自旋转部件系统,

例如电子元器件的散热系统[14-15]、太阳能接收器[16-17]、 涡轮发动机旋转叶片冷却通道[18-19]、硅单晶生长系 统[20-21]等。这些部件在温度环境试验考核中如能进一 步引入旋转效应的影响,产品的性能考核将更加充 分。因离心力等旋转驱动力与旋转轴的位置相关,自 旋转运动状态下,热加载装置内部的流动传热特征相 比离心运动状态的热加载装置会有显著不同。20 世 纪 90 年代, Hamady 等^[22]利用 Mach-Zehnder 干涉仪 观测了自旋转封闭腔体内空气的温度场分布,结果表 明,自旋转作用对局部换热的影响显著。随着计算机 技术的发展,越来越多的研究人员对自旋转封闭腔体 内热对流特性开展了数值模拟研究。Stepan 等^[23]通过 数值模拟研究了绕水平轴旋转的立方腔体内的流动 特性,结果表明,随着旋转速度增加,流动被抑制, 但在高雷诺数条件下令流动增强。Kumar等^[24]研究了 雷诺数和旋转对热对流系统的影响,研究发现,随着 雷诺数和旋转速度的增加,流动模式从由热浮力主导 的单一循环模式转变为由科里奥利力主导的复杂螺 旋结构。Yu 等^[25]研究发现,变速旋转改变了旋转热 对流中科里奥利力与热浮力的相互作用,从而增强了 传热。

综上所述,目前研究主要集中在方形腔或矩形腔 在一面加热、一面冷却的较为基础热边界作用下的旋 转热对流方面,对于工程实践中环境试验常用的四面 全局或局部加热的热加载装置内自旋转热对流特性 研究较为缺乏。鉴于此,本文针对工程实际热加载装 置结构特征,并考虑了全局加热和局部加热实际热加 载边界特征下自旋转热加载装置内流动与传热特性 开展了数值模拟研究,以期更好指导热加载装置设计 与环境试验的工程应用。

1 物理数学模型

热加载装置物理模型如图 1 所示。参考实际使用的热加载装置尺寸,令箱体底边长 *L*=0.1 m,高 *H*= 0.14 m。整个箱体外侧壁上分布有4个恒温热源(*W*₁), 视热源面积大小,分为全局加热(*W*₁占据侧壁全局

区域)和局部加热(*W*₁占据侧壁中心区域)2类情况。 局部加热情况下,热源的边长*l*=0.04 m,侧壁未布置 热源区域(*W*₂)为热沉区域,箱体顶部和底部区域 (*W*₃)同样为热沉区域,箱体其他小面积区域(*W*₄) 视为绝热壁面,腔体内部绿色区域为流体域。整个箱 体绕其竖直中心轴(z轴)以角速度ω旋转。



a 全局加热条件

b 局部加热条件

图 1 物理模型



为简化起见,针对空气流域与固壁边界中引入适 当假设:流体为不可压缩牛顿流体,固壁满足无滑移 边界条件,除浮力项中的密度外,所有的物性参数都 为常数,即满足 Boussinesq 假设,浮力项密度随温度 变化关系表示如下:

$$\rho - \rho_0 = -\rho_0 \beta \left(T - T_0 \right) \tag{1}$$

式中: ρ 为流体密度; ρ_0 为参考温度下的流体密度,取值为 0.974 5 kg/m³; β 为热膨胀系数,取值为 0.002 7 K⁻¹;*T*为流体温度;*T*₀为参考温度,取值为 363.15 K。

根据上述物理模型,在三维直角坐标下,自旋转 热加载箱内空气流动传热的控制方程如下。

连续性方程:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{w} = 0 \tag{2}$$

式中:w为流体的速度向量,w=ui+vj+wk(i、 j、k分别为x、y、z方向的单位向量); ∇为哈密顿 算子。

动量方程:

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{w}}{\partial t} + \rho \boldsymbol{w} \cdot \nabla \boldsymbol{w} = -\nabla p + \boldsymbol{f} - 2\rho \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{w} + \rho \left[\boldsymbol{g} - \boldsymbol{\omega} \times \left(\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r} \right) \right]$$
(3)

式中: t 为时间; p 为压强; ω 为旋转角速度向量; g 为重力加速度向量; r 为 z 轴到流体微元的向径, r = xi + yj。

能量方程:

$$c_p \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \boldsymbol{w} \cdot \nabla T \right) = -p \nabla \cdot \boldsymbol{w} + \nabla \cdot \left(k \nabla T \right)$$
(4)

式中: *c_p*为流体的定压比热,取值为 1.006 kJ/(kg·K); *k*为流体的导热系数,取值为 0.032 1 W/(m·K)。

自旋转热加载箱边界条件如下所述。

热源的外表面加载恒定温度 473.15 K, 即给定第 一类边界条件:

$$T_{\rm S}\Big|_{\partial W_{\rm I}} = T_{\rm H} \tag{5}$$

式中: T_H=473.15 K_o

热沉外壁及流体域的顶部和底部为室温下的受 迫对流,即给定第三类边界条件:

$$k_{\rm S}\left(\frac{\partial T_{\rm S}}{\partial n}\right)\Big|_{\partial W_i} = h_{\rm S}\left(T_{\rm S}\Big|_{\partial W_i} - T_0\right) \tag{6}$$

绝热外壁的边界条件:

$$\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\partial \mathbf{W}_4} = 0 \tag{7}$$

以腔体作为参考系,用 *V*₁ 表示空气相对于腔体的流动:

$$V_1 = w - \omega \cdot r \tag{8}$$

为研究热加载装置内温度场特性, 腔体内设置 8 个监测点, 各监测点位于腔体顶点附近距热加载装置 壁面 12.5 mm 处, 如图 1 所示。腔体内温度以监测点 温度的平均值表示:

$$T = \overline{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} T_i \tag{9}$$

腔体内温度场的不均匀度为:

$$\Delta T_{\rm u} = \frac{\left|\sum_{i=1}^{n} (T_{\rm max} - T_{\rm min})\right|}{n} \tag{10}$$

腔体内高温壁面上传热性能以 Nusselt 数(*Nu*) 表示:

$$Nu = \frac{qL}{k(T_{\rm h} - T_{\rm c})} \tag{11}$$

2 数值计算方法

采用有限容积法对控制方程进行离散,以求解速 度场和温度场等信息。其中,动量方程、能量方程中 的扩散项和对流项为二阶迎风格式,压力-速度耦合 方程求解采用 SIMPLE 算法。为验证计算方法的合理 性,与文献[26]相同工况进行计算对比(无量纲参数 定义同验证文献),壁面局部 Nu 数沿 x 轴分布规律 基本与原文一致,且平均误差为 3.67%(如图 2 所示), 即该计算方法可信合理。



计算模型采用图 3 中六面体结构化网格,并开展 网格独立性验证工作。表1给出了1 mm×1 mm×1 mm

2.5 mm×2.5 mm×2.5 mm不同尺寸网格情况下典型位置温度与高温壁面平均 Nu 数的差异,可见典型位置温度以及高温壁面平均 Nu 数基本一致。综合考虑计算精度和计算成本,确定 2 mm×2 mm×2 mm 尺寸的网格作为计算模型的网格尺寸,如图 3 所示。

表 1 不同网格密度的计算结果 Tab.1 Results of different grid numbers

		υ		
网格尺寸/mm	温度/K	偏差/%	Nu	偏差/%
2.5×2.5×2.5	470.0	1.97	2.18	6.42
$2.0 \times 2.0 \times 2.0$	460.7	1.17	2.04	1.48
1.5×1.5×1.5	455.3	0.68	2.01	1.99
$1.0 \times 1.0 \times 1.0$	452.2		1.97	



图 3 本文所用网格 Fig.3 Grids in present work

3 结果及分析

3.1 速度场分布特征

全局加热和局部加热2类热边界条件下,不同旋 转速度作用下热加载装置的内速度云图如图4所示, 通过 x=0 m 和 z=0 m 平面速度云图分析装置内速度场 分布特征。对于全局加热情况,装置未旋转时,内部 空气流动仅受热浮升力的影响,呈装置侧壁附近流体 受热上升至顶面,再受冷下沉的流动特征,见图 4a。 当装置以1 000 r/min 旋转时,装置内空气相对速度 近似为0 m/s,即在较低转速下装置内空气流动受到 了抑制,见图 4b。装置转速增加至 5 000 r/min 时, 内部空气流动增强,整体流动以水平方向的流动为 主,呈现复杂涡流结构,即离心力起到了流动的主导 作用,见图 4c。装置转速增加至 10 000 r/min 时,内 部绝大部分区域空气已达较高流速,空气平均流速达 到装置静止时的 2.6 倍, 见图 4d。局部加热情况如图 4e~h 所示,可见装置内空气流动随转速变化的规律 大体与全局加热情况一致,都随转速的增加,流动速 度先减小、再增大。同一转速下,局部加热情况下装 置内流速高于 0.27 m/s 的区域 (云图中红色区域) 较



图 4 全局加热条件和局部加热条件下不同旋转速度对应的速度云图

Fig.4 Velocity fields corresponding to different rotation speeds under global heating conditions and local heating conditions: a) 0 r/min, global heating; b) 1 000 r/min, global heating; c) 5 000 r/min, global heating; d) 10 000 r/min, global heating; e) 0 r/min, local heating; f) 1 000 r/min, local heating; g) 5 000 r/min, local heating; h) 10 000 r/min, local heating

全局加热情况有所减小,平均流动速度也相应有所下降,表明增加装置侧壁加热元件直接作用表面积对于 内部空气流动有较好的促进作用。

3.2 温度场分布特征

全局加热和局部加热 2 类热边界条件下,不同旋转速度作用下热加载装置内温度云图如图 5 所示,通过 x=0 m 和 z=0 m 平面温度云图分析装置内温度场分布特征。对应于上述装置内速度场分布特征,装置未旋转时,内部呈现侧壁附近热羽流,顶面和底面附近冷羽流分布特征,见图 5a、e。当装置以1000 r/min旋转时,装置内温度场分布即呈现前述热浮升力主导的热羽流特征(热羽流相比静止装置时有所削弱),又呈现侧壁高温顶面和底面低温的温度分层

特征,见图 5b、f,即较低转速下,装置内空气温度 分布受热浮升和离心力的共同作用。装置旋转速度 升至 5 000 r/min 及以上时,全局加热情况装置顶部 和底部附近区域内温度场分布已呈现平行线分布特 征,中部区域已呈现均匀恒值特征,即旋转作用使高 温空气与低温空气混合得更加均匀,不再出现流体因 温度不同而聚集的现象,见图 5c~e。此时,局部加热 情况装置内温度场分布特征也与全局加热情况基本 类似,但因侧壁热加载区域表面积受限,装置内高温 空气和低温空气尚未完全混合均匀,而存在温度梯度 特征,见图 5g~h。总的来说,全局加热情况 x=0 m 平面上,高温区域几乎占据了所有被加热壁面所包围 的区域,而局部加热情况 x=0 m 平面上高温区域的面 积更小,其平均温度也低于全局加热情况。



图 5 全局加热条件和局部加热条件下不同旋转速度对应的温度云图

Fig.5 Temperature fields corresponding to different rotation speeds under global heating conditions and local heating conditions: a) 0 r/min, global heating; b) 1 000 r/min, global heating; c) 5 000 r/min, global heating; d) 10 000 r/min, global heating; e) 0 r/min, local heating; f) 1 000 r/min, local heating; g) 5 000 r/min, local heating; h) 10 000 r/min, local heating

全局加热与局部加热情况装置在不同旋转速度 时,内部平均温度随时间的变化规律如图 6 所示。对 于全局加热情况,装置在 0~1 000 r/min 旋转时,内 部平均温度(最终平衡态)随旋转速度增大而增高, 在 1 000~10 000 r/min 时,随旋转速度增大而略有降 低。对于局部加热情况,装置在旋转速度为 1 000 r/min 时,内部平均温度显著高于其他转速。全局加热和局 部加热情况下,装置内部的最终平衡温度以及平衡时 间分别见表 1 和表 2。由表 1 和表 2 可知,随旋转速 度的增大,全局加热情况和局部加热情况下装置内的 平衡温度差异增强。温升速率方面,全局加热情况装置 力 000 r/min 温升速率在 20.92~34.43 K/s,最 大值出现在 1 000 r/min 的旋转速度下;局部加热情 况装置对应温升速率在 3.47~4.49 K/s,最大值出现在 10 000 r/min 的旋转速度下。显然,全局加热情况装置温升速率受旋转速度的影响更大,且呈现显著非线性变化规律。上述结果表明,热加载装置的设计需充分考虑旋转速度对于装置温升速率和平衡温度的影响,以及全局加热和局部加热情况的差异性。

除上述讨论的温升速率和平衡温度关键指标外, 热加载装置达到目标平衡温度后,内部温度的不均匀度 也是另一关键指标,其关系到试验件是否按既定试验条 件受热均匀。全局加热情况和局部加热情况下,热加载 装置不同转速时内部温度不均匀度随时间的变化规律 如图 7 所示。由图 7 可知,全局加热时,装置在未旋 转时内部温度的不均匀度在初期峰值高达 143.8 K。随 着时间的推演逐渐变小,但也是 1 000~10 000 r/min 旋转条件下的 2~3 倍,即旋转作用促使装置内部温度 旋转速



图 6 全局加热条件和局部加热条件下的温升曲线

Fig.6 Temperature rise curves under global heating conditions and local heating conditions: a) global heating conditions; b) local heating conditions

表 1 全局加热情况下温升完成最终温度和所需时间 Tab.1 Final temperature and time required for temperature rise under global heating

衣 乙	向部加热情况下温井元成取终温度和所需时间
Гab.2	Final temperature and time required for temperature
	rise under local heating

平衡温度/K

433.94

451.38

435.58

427.41

温升速率/(K·s

3.47

3.47

4.21

4.49

速度/(r·min ⁻¹)	平衡温度/K	温升速率/(K·s ⁻¹)	旋转速度/(r·min ⁻¹)
0	435.33	29.43	0
1 000	460.29	34.43	1 000
5 000	456.81	24.09	5 000
10 000	455.5	20.92	10 000



图 7 全局加热条件和局部加热条件下的温度场不均匀度 Fig.7 Temperature field non-uniformity under global heating conditions and local heating conditions: a) global heating conditions; b) local heating conditions

场更加均匀。其中,旋转速度为1000 r/min时,装置温度场不均匀度收敛于最小值(约为9.2 K),这 与该工况下装置内空气几乎未流动现象相符。局部加 热情况下,装置内温度的不均匀性因受到侧壁受热不 均匀的影响而更加复杂。静止状态下,装置内部温度 的不均匀度全时间段都较大。小转速状态下,装置内 部温度不均匀度在初期也较大。较高转速状态下,装置 内温度不均匀度全时间段都较小。对比全局加热和 局部加热情况装置内温度不均匀度可知,加热面积越 大,装置内温度的不均匀度越大,即需在热加载设计 时予以关注。

3.3 壁面传热特性

全局加热和局部加热情况下,通过分析不同转速 条件下热壁面平均 Nu 的变化规律,以讨论其对壁面 传热性能的影响,如图 8 所示。对于 2 类加热情况, 热壁面上的平均 Nu 数在加热初期(约为 3 s)达至最 大值,此后随时间推移小幅度减小并趋于常值。相比 静止状态的热加载装置情况,旋转作用使得壁面平均 Nu 数减小,即旋转削弱了对流传热性能。当旋转速 度大于 1 000 r/min 时,不同旋转速度下热壁面平均 Nu 数基本相等,即壁面传热性能相近。这是由于此



图 8 全局加热条件和局部加热条件下的热壁面传热效率 Fig.8 Heat transfer efficiency of heating wall under global heating conditions and local heating conditions: a) global heating conditions; b) local heating conditions

时装置内空气主要作水平方向流动,装置内空气温度 较为均匀。另外,当旋转速度一定时,2类加热情况 下热壁面平均 Nu 数也基本相同,可见加热区域面积 大小不影响热壁面上的传热效率。

4 结论

针对工程实际热加载装置结构,并考虑了全局和 局部实际加热情况下自旋转热加载装置内流动与传 热特性开展了系统数值模拟研究,探讨了2类热边界 条件下不同旋转速度(1000~10000 r/min)装置内空 气速度场与温度场分布特征,以及加热壁面平均传热 性能,并与静止状态热加载装置进行对比分析,研究 旋转作用对温升速率、目标平衡温度、温度不均匀度 等热加载装置关键技术指标的影响,得出以下结论:

1)全局加热和局部加热情况下,热加载装置内 部速度场、温度场分布特征随旋转速度的变化特征基 本一致。装置内流动速度随旋转作用的增强先减小、 后增大,当装置以1000 r/min 旋转时,内部空气流动 受到了旋转作用的抑制;当旋转速度高于1000 r/min 时,旋转作用又促进内部空气流动,装置顶部和底部 附近区域内温度场呈现平行线分布特征,中部区域呈 现均匀恒值特征。

2)全局加热情况下,热加载装置在 0~10 000 r/min 的温升速率为 20.92~34.43 K/s,装置内部平衡温度随 旋转速度增大先增加、后略有减小,且旋转作用促使 装置内部温度场更加均匀;局部加热情况下,温升速 率则为 3.47~4.49 K/s,装置内部平衡温度在 1 000 r/min 最高,且装置内温度不均匀性因受到侧壁受热不均匀 的影响而更加复杂。

3)相比静止状态的热加载装置,旋转作用使得 壁面的平均 Nu 数减小,即旋转削弱了对流传热性能。 当旋转速度大于1000 r/min 时,不同旋转速度下热 壁面平均 Nu 数基本相等,即壁面传热性能相近,且 旋转速度一定时,2类加热情况下热壁面平均 Nu 数 也基本相同,即加热区域面积大小不影响热壁面上的 传热性能。

4) 热加载装置的设计需充分考虑旋转速度对于 装置温升速率和平衡温度的影响, 以及全局加热和局 部加热情况的差异性。全局加热和局部加热情况装置 内温度不均匀度差异表明, 加热面积越大, 装置内温 度不均匀度越大, 也需在热加载设计时予以关注。

参考文献:

- [1] 盛冰冰,唐瑛,马春斌.基于某型装备温度适应性研究
 [J].中国设备工程,2023(23):258-260.
 SHENG B B, TANG Y, MA C B. Research on Temperature Adaptability Based on Certain Equipment[J]. China Plant Engineering, 2023(23):258-260.
- [2] 杨国辉. 典型装备温度响应测量及平衡时间研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 128-135.
 YANG G H. Temperature Response Measurement and Balance Time of Typical Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 128-135.
- [3] 徐明. 实验室环境试验技术[M]. 北京: 航空工业出版 社, 2015.

XU M. Laboratory Environmental Test Technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015.

- [4] 杨军锋,孙敏. 空空导弹温度-高度环境适应性模拟试验方法研究[J]. 环境技术, 2015, 33(5): 43-48. YANG J F, SUN M. Research on the Simulation Test Method for Temperature-Altitude Environmental Adaptability of Air-to-Air Missile[J]. Environmental Technology, 2015, 33(5): 43-48.
- [5] 高琳,刘惠丽,刘坤,等. 军用车辆太阳辐射热效应模 拟试验室设计[J]. 装备环境工程, 2024, 21(6): 8-15. GAO L, LIU H L, LIU K, et al. Design of Solar Radiation Heating Simulation Laboratory of Military Vehicles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(6): 8-15.
- [6] 中国人民解放军总装备部. 军用装备实验室环境试验

方法 第3部分: 高温试验: GJB 150.3A—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

General Armaments Department of the People's Liberation Army. Laboratory environmental test methods for military materiel.Part 3: High temperature test: GJB 150.3A—2009[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.

- [7] 中国人民解放军总装备部. 军用装备实验室环境试验 方法 第4部分: 低温试验: GJB 150.4A—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
 General Armaments Department of the People's Liberation Army. Military equipment laboratory environmental test methods Part 4: Low temperature test: GJB 150.4A—2009[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [8] 李毅华,邓家一,季家东,等.高低温试验箱内温度场 实验及数值研究[J].科学技术与工程,2021,21(6): 2293-2299.

LI Y H, DENG J Y, JI J D, et al. Temperature Field Experiment and Numerical Study in High and Low Temperature Test Chamber[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6): 2293-2299.

- [9] 周芳, 贾业宁. 变温过程试验箱温度特性分析[J]. 装备 环境工程, 2016, 13(4): 72-77.
 ZHOU F, JIA Y N. Temperature Characteristics of the Chamber during Temperature Variation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(4): 72-77.
- [10] 钱华,陶少杰,张健健.基于 CFD 的温度循环试验箱
 温度场均匀性优化研究[J].中国集成电路,2024,33(9):
 49-55.

QIAN H, TAO S J, ZHANG J J. Optimization of Temperature Field Uniformity in Temperature Cycle Test Chamber Based on CFD[J]. China Integrated Circuit, 2024, 33(9): 49-55.

- [11] 孙琦,于兰英,吴文海. 电子产品高温试验箱的温度场 分析及优化[J]. 中国测试, 2019, 45(12): 159-164.
 SUN Q, YU L Y, WU W H. Analysis and Optimization of Temperature Field of High Temperature Test Chamber for Electric Products[J]. China Measurement & Test, 2019, 45(12): 159-164.
- [12] 黄旭, 刘思远, 朱升贺, 等. 基于离心机平台的加速度-温度综合环境试验系统设计[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(3): 356-362.
 HUANG X, LIU S Y, ZHU S H, et al. Design of an Integrated Acceleration-Temperature Environmental Test System Based on Contribute DistformIU Successful En-

System Based on Centrifuge Platform[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(3): 356-362.
[13] 何闻, 沈润杰, 陈子辰. 离心加速度与热耦合机理的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(9): 1445-1449.
HE W, SHEN R J, CHEN Z C. Coupling Mechanism be-

tween Centrifugal Acceleration and Thermo-Field[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(9): 1445-1449.

- [14] HE W, XU G H. Characteristics of Temperature Field in a Closed Cavity with Centrifugal Acceleration[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 70: 758-763.
- [15] 谭雯, 沈三民, 杨峰. 高温旋转环境下的电子设备热设 计[J]. 现代电子技术, 2022, 45(4): 19-22.

TAN W, SHEN S M, YANG F. Thermal Design of Electronic Equipment under High Temperature Rotating Environment[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(4): 19-22.

- [16] JIN L F, TOU K W, TSO C P. Experimental and Numerical Studies an a Rotating Cavity with Discrete Heat Sources with Conjugate Effects[J]. Experimental Heat Transfer, 2005, 18(4): 259-277.
- [17] HUANG S C, WANG C C, LIU Y H. Heat Transfer Measurement in a Rotating Cooling Channel with Staggered and Inline Pin-Fin Arrays Using Liquid Crystal and Stroboscopy[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 364-376.
- [18] 黄东宇. 汽车太阳能电池三自由度自动追光系统运动 控制研究[J]. 时代汽车, 2024(15): 106-108.
 HUANG D Y. Research on Motion Control of Three Degree of Freedom Automatic Chasing System for Automotive Solar Cells[J]. Auto Time, 2024(15): 106-108.
- [19] 胡宇鹏, 鲁亮, 向延华, 等. 深空探测器同位素热源环 境试验技术[J]. 深空探测学报, 2017, 4(2): 138-142.
 HU Y P, LU L, XIANG Y H, et al. Environment Testing Technology of Radioisotope Heat Source for Deep Space Exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 138-142.
- [20] 弋英民,张潼. CZ 法硅单晶生长电阻网络建模及 MPC 仿真分析[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(2): 142-148.
 YI Y M, ZHANG T. Modeling Based on Resistive Network and Simulation of MPC Method on Czochralski Growth Process[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(2): 142-148.
- [21] 庞炳远,闫萍,刘洪.旋转工艺对高阻区熔硅单晶研制的影响[J]. 微纳电子技术,2016,53(9):630-633.
 PANG B Y, YAN P, LIU H. Effect of the Rotating Process on the Preparation of the High Resistivity FZ-Si Single Crystals[J]. Micronanoelectronic Technology, 2016, 53(9):630-633.
- [22] HAMADY F J, LLOYD J R, YANG K T, et al. A Study of Natural Convection in a Rotating Enclosure[J]. Journal of Heat Transfer, 1994, 116(1): 136-143.
- [23] MIKHAILENKO S A, SHEREMET M A. Convection in a Differentially Heated Cubic Cavity Rolling about Horizontal Axis[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 179: 107639.
- [24] NARENDRA KUMAR M, PUNDRIKA G, NARASIMHA K R, et al. Effect of Rayleigh Number with Rotation on Natural Convection in Differentially Heated Rotating Enclosure[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2017, 10(4): 1125-1138.
- [25] YU G J, LIAN Z W, GAN W, et al. Numerical Investigation on the Effect of Harmonic Horizontal-Axis Rotation on Laminar Natural Convection in an Air-Filled Enclosure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 152: 119533.
- [26] KER Y T, LIN T F. A Combined Numerical and Experimental Study of Air Convection in a Differentially Heated Rotating Cubic Cavity[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(15): 3193-3210.