

# 含微腔面式黑体温度均匀性优化设计与评价

王强<sup>1</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 戴景民<sup>2</sup>, 洪国同<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 150001 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 自动化检测与过程控制系统研究所, 150001 哈尔滨; 3. 中国科学院理化技术研究所, 100190 北京)

**摘要:**为解决同心圆V形槽结构面黑体有效辐射面的高温度均匀性需求问题,提出了以轴向温度均匀性、径向温度均匀性以及有效发射率为约束条件并基于有限元的温度均匀性优化设计方法.首先,分析了温度均匀性的种类、产生原因及变化规律;而后,研究了温度均匀性与有效发射率之间的相互影响关系;进而,基于多约束条件确定了同心圆V形槽结构面式黑体的优化设计参数并研制面式黑体;最后,通过实验对面黑体的温度均匀性进行了测试与评估.测试结果表明:面黑体在250~350 K温域范围内可达0.1 K温度均匀分布.有效辐射面及均热盘结构参数的合理设计是确保面黑体温度均匀性的关键.

**关键词:**面式黑体;温度均匀性;优化设计;性能评估

中图分类号: TP702 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2013)05-0018-07

## Temperature uniformity optimum design and performance evaluation of surface blackbody radiant source with cavity effect

WANG Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, DAI Jingmin<sup>2</sup>, HONG Guotong<sup>3</sup>

(1. Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;  
2. Dept. of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;  
3. Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, 100190 Beijing, China)

**Abstract:** To satisfy the high requirement of temperature uniformity of concentric V-grooved surface blackbody, an optimum design method based on finite element method and with axial, radial temperature uniformity and effective emissivity as constraints is proposed. Firstly, the kinds, causes and variations of temperature nonuniformity are analyzed; Secondly, the interactional relationship between temperature nonuniformity and effective emissivity is researched; Thirdly, the optimum design parameters of concentric V-grooved surface blackbody are determined based on complex constraints, and the surface blackbody is developed based on optimum parameters; Finally, the temperature uniformity of surface blackbody is tested and evaluated. The results demonstrate that the temperature uniformity can reach 0.1 K in the range from 250 K to 350 K. The structural parameters reasonable design of radiation surface and soaking disk is the key factor of ensuring temperature uniformity.

**Key words:** surface blackbody; temperature uniformity; optimum design; performance evaluation

收稿日期: 2012-08-20.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2008XX121203);  
中国博士后科学基金资助项目(20100481012);哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目(HIT.NSRIF 2013).

作者简介: 王强(1978—),男,讲师;  
张伟(1962—),男,教授,博士生导师;  
戴景民(1963—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 王强, hitwq@hit.edu.cn.

红外遥感、探测与成像技术的快速发展,对红外辐射定标手段、辐射定标精度提出了越来越高的要求.传统的小口径腔式黑体由于很难满足系统最小可分辨温差 MRTD<sup>[1-2]</sup>灵敏度的需要,因而大口径面式黑体得到了越来越广泛的研究与应用<sup>[3]</sup>.

对面式黑体的首要指标要求是其高发射特性,同时,由于其较大的辐射面积,温度分布均匀

程度也应作为同等重要的技术指标要求. 一般可以通过增加面式黑体微腔深度来增加腔式效应, 进而增加黑体的有效发射率; 但一味的增加微腔深度, 势必会破坏温度的均匀分布程度, 尤其是考虑到其较大的辐射面积时, 其温度均匀分布程度将进一步恶化. 这表明, 辐射特性和温度均匀性具有耦合关系, 为了同时满足高发射特性和高温均匀性, 二者设计时必须同时考量.

本文研究的同心圆 V 形槽面式黑体, 存在两种温度均匀性指标, 即轴向和径向温度均匀性. 轴向非均匀指的是沿微型槽高度方向的温度分布特性, 是进一步实现径向温度均匀分布的前提条件. 径向非均匀指的是沿面黑体径向方向的温度分布特性, 主要受有效辐射面均热盘的材料、结构、工艺等因素综合影响, 必须结合面黑体的工作状态进行具体分析.

由此可见, 面黑体的温度均匀性主要取决于轴向温度均匀性、径向温度均匀性以及有效发射率的综合影响, 并最终归结为有效辐射面及均热盘的合理结构设计. 辐射特性和温度均匀性具有耦合关系, 温度的不均匀会对黑体辐射特性产生影响, 但从目前所掌握的国内外研究现状来看, 此类研究还极为鲜见. 本文将在分析温度均匀性的种类、产生原因及变化规律的基础上, 研究温度均匀性与有效发射率之间的相互影响关系, 进而基于多约束条件确定同心圆 V 形槽结构面黑体的优化设计参数并研制面式黑体, 最后通过对面黑体的实验测试与评估来验证优化设计方法的正确性及准确程度.

### 1 轴向温度均匀性影响因素及规律

轴向温度均匀性的影响因素主要包括: 材料、槽深度  $h$ 、微夹角  $\alpha$  以及工作温度  $T$ , 如图 1 所示.

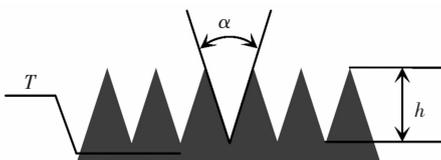


图 1 轴向温度均匀性影响因素

面式黑体辐射面应选用高导热材料, 可以保证辐射表面均匀一致的工作温度. 一般选用热导系数为  $1\ 386\ \text{kJ/mhK}$  的无氧紫铜, 对其表面进行氧化发黑处理后, 可以达到 0.9 以上的发射率.

假定在室温、真空杜瓦实验条件, 面式黑体发射面工作温度已达到均匀一致; 规定 V 形槽的深度为 1、3、5 mm; V 形槽的夹角为  $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$ ; 黑

体辐射面温度为 210、250、300、350、400、450 K, 对面式黑体的表面温度均匀性进行有限元分析, 结果如图 2 ~ 图 7 所示.

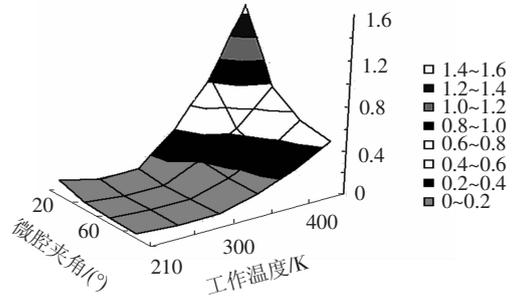


图 2 1 mm 腔深时槽夹角及工作温度对温度均匀性的影响

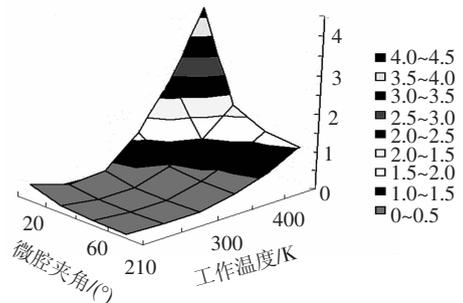


图 3 3 mm 腔深时槽夹角及工作温度对温度均匀性的影响

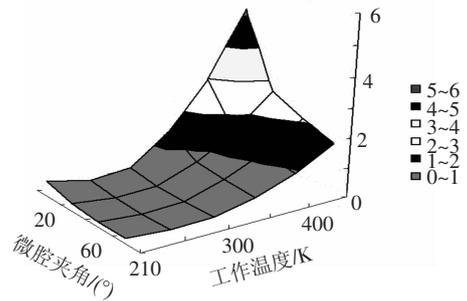


图 4 5 mm 腔深时槽夹角及工作温度对温度均匀性的影响

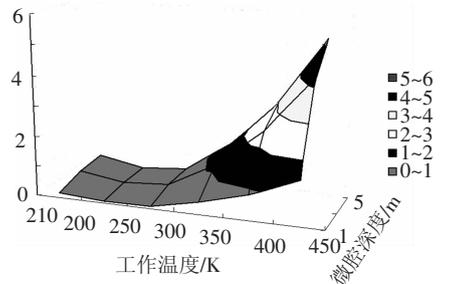


图 5  $20^\circ$  槽夹角时高度及工作温度对温度均匀性的影响

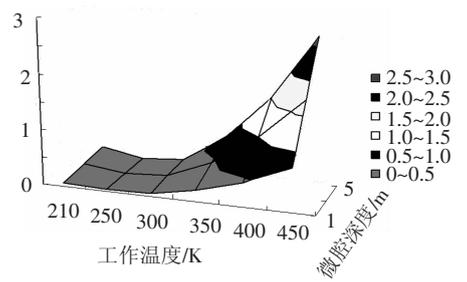


图 6  $40^\circ$  槽夹角时高度及工作温度对温度均匀性的影响

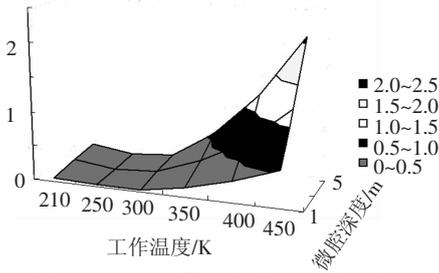


图 7 60°槽夹角时高度及工作温度对温度均匀性的影响

由图 2 ~ 图 4 的仿真结果可以看出,相同的工作温度和深度时,槽夹角越小温度均匀性越差.将 V 形槽结构视为肋结构,可以清楚地解释这一现象,即减小槽夹角,肋结构的纵横比增大,从而有效增强了肋结构的辐射散热性能,进而大幅度地影响了温度的均匀分布.从图 2 ~ 图 4 的仿真结果还可以看出,相同的深度和槽夹角时,工作温度与环境温度差异越大温度均匀性越差.这是由于面式黑体与环境温度的差异增大时,根据辐射换热原理,辐射换热量与温度的 4 次方之差成正比,这是工作温度与环境温度差异越大温度均匀性越来越差的原因.

由图 5 ~ 图 7 的仿真结果可以看出,在相同的工作温度和夹角条件下,温度均匀性会随深度的增大呈现近似线性的减小;这主要时由于深度的增大直接导致散热面积的增加,从而增强了微腔结构与环境的辐射换热,进而影响了面式黑体的温度均匀分布.

## 2 轴向温度均匀性与发射率的关系

受红外辐射测量精度的限制,黑体的辐射特性通常是利用理论计算得到的.该领域目前已形成了完善的黑体空腔理论,主要包括精确的积分方程法<sup>[4-5]</sup>、系列反射法<sup>[6-7]</sup>以及基于统计分析 Monte Carlo(MC)方法<sup>[8-10]</sup>等.由于前两种方法需要求解复杂表面间的角系数,而 MC 法可灵活地模拟实际复杂表面,显然对于 V 形槽结构面黑体更适宜采用 MC 法进行求解.

如图 8 所示为精密方法与 MC 方法有效发射率计算精度比较<sup>[11]</sup>.其中曲线和点分别表示积分方程法和 MC 法的计算结果,可以看出在材料发射率如此宽覆盖条件下都能很好地吻合,足以证明 MC 法精确程度.

基于 MC 法对同心圆 V 形槽面式黑体的某个 V 形槽  $k$  (如图 9 所示),可以视为由凹锥面  $Con_1$  和凸锥面  $Con_2$  组合而成,如图 10 所示.

当考虑同心圆 V 形槽表面的辐射特性时,对于 V 形槽圆环  $k$ ,有效发射率  $\varepsilon_{ap}(k)$  的求解方法为:

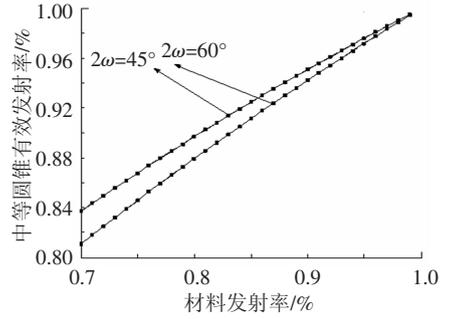


图 8 精密方法与 MC 方法有效发射率计算精度比较

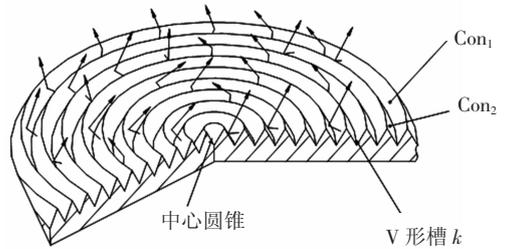


图 9 同心圆 V 形槽结构表面

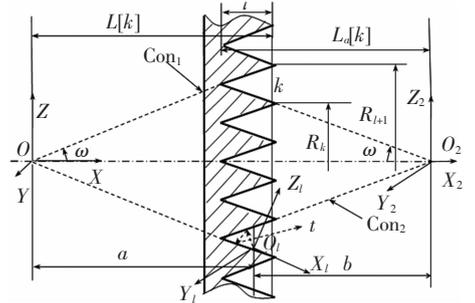


图 10 V 形槽表面光路跟踪示意图

1) 发光点位置的确定. 设凹槽  $Con_1$  面积为  $A_{Con_1}$ , 凸槽  $Con_2$  面积为  $A_{Con_2}$ . 通过随机数  $r_s$  的选取情况来确定发光点的具体位置: 如当  $r_s \leq A_{Con_1}/(A_{Con_1} + A_{Con_2})$  时, 发光点在  $Con_1$  上, 否则在  $Con_2$  上. 进而按照面积概率, 通过随机数  $r_x$  的选区情况来确定其位置为

$$a = L[k] - l + \frac{r_x(2L[k] - l) + 3l - 2L[k]}{2}$$

同理, 如发光点  $i$  在圆锥  $Con_2$  槽面上, 其位置为

$$b = L_a[k] - l + \frac{r_x(2L_a[k] - l) + 3l - 2L_a[k]}{2}$$

2) 当发光点在  $Con_1$  上时, 确定光线方向为  $(\theta, \varphi)$ , 光束  $i$  相对于坐标系  $O_1X_1Y_1Z_1$  方程为

$$\begin{cases} z_1^2 = \cot^2 \theta (x_1^2 + y_1^2), \\ y_1 = x_1 \tan \varphi. \end{cases} \quad (1)$$

判其与  $Con_2$  是否相交,  $Con_2$  相对于坐标系  $O_2X_2Y_2Z_2$  的圆锥方程为

$$x_2^2 \tan^2 \omega = y_2^2 + z_2^2. \quad (2)$$

坐标系  $O_1X_1Y_1Z_1$  与  $O_2X_2Y_2Z_2$  间的坐标变换为

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cos \omega + z_1 \sin \omega - b, \\ z_2 = -x_1 \sin \omega + z_1 \cos \omega - a \tan \omega. \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)、(2)得交点方程为

$$Ax_1^2 + Bx_1 + C = 0. \quad (4)$$

且

$$A = \cot^2 \theta (\tan^2 \omega - 1) / \cos^2 \varphi +$$

$$2 \cot \theta \tan \omega / \cos \varphi - \tan^2 \varphi,$$

$$B = -2b \tan \omega [2 \sin \omega + \cot \theta (\sin \omega \tan \omega - \cos \omega) / \cos \varphi],$$

$$C = \tan^2 \omega (b^2 - a^2).$$

通过式(4)的求解,得到  $x_{11}, x_{12}$  两根,合理值作为  $x_1$ ,进而由式(3)得到  $x_2, L[k] - a - b \geq x_2 \geq L[k] - l - a - b$  时,光线交于凸槽面  $\text{Con}_2$  上. 进而判断光线在交点处被反射还是吸收:当  $r_\varepsilon > \varepsilon$  时,表明被反射,在标记坐标及反射方向  $(\theta, \varphi)$  后,转至步骤3);若被吸收,则转至步骤4). 假若光束不与  $\text{Con}_2$  相交,判断是否与凹面  $\text{Con}_1$  相交,过程与上述步骤类似. 若与  $\text{Con}_1$  相交,如被反射,在标记坐标及反射方向  $(\theta, \varphi)$  后,返回步骤2),若被吸收,则转至步骤4). 假若与  $\text{Con}_1$  也不相交,此时表明光线已经逃逸出V形槽,累加此光束能量至总溢出能量  $E_{\text{out}}[k]$ ,而后跳转至步骤4).

3) 当发光点在凸面  $\text{Con}_2$  上时,光线只能与  $\text{Con}_1$  面相交,按照上述类似的跟踪过程,相对于坐标系  $OXYZ$  的交点坐标:  $x = x_1 \cos \omega + z_1 \sin \omega + a$ ,当  $L[k] \geq x \geq L[k] - l$  时,光线与  $\text{Con}_1$  相交;如果反射,记录反射方向  $(\theta, \varphi)$ ,转至步骤2),反之转至步骤4). 如果光线不与  $\text{Con}_1$  面相交,表明光线已逃逸出V形槽,累加此光束能量至总溢出能量  $E_{\text{out}}[k]$  后,继续下一步.

4) 当发光点抽样数  $N_s$  目递增,且还没有达到总发光点样本数  $N$  时,返回至步骤1);否则,停止光路跟踪过程,并计算  $k$  槽的有效发射率为

$$\varepsilon_{\text{eff}}(k) = E_{\text{out}} / (A_r(k) \cdot \sigma T^4).$$

其中,  $A_r(k)$  为V形槽  $k$  的槽口面积,且有

$$A_r(k) = \pi(R_{k+1}^2 - R_k^2).$$

基于以上辐射特性评估方法,考察夹角为  $60^\circ$  时的温度不均匀性与有效发射率的耦合影响关系. 此时,假定V型槽黑体的工作表面温度为  $323 \text{ K}$ ,根据工况条件,温度梯度应该按照高度方向递减. 考察不同的材料发射率  $\varepsilon$ , 分别假定温度按  $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度间隔,由  $0.01 \sim 0.10 \text{ }^\circ\text{C}$  变化时,计算黑体的有效发射率结果如图11所示;当假定温度按  $0.10 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度间隔,由  $0.1 \sim 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$  变化时,计算黑体的有效发射率结果如图12所示. 在图11、12中,横坐标的数值分别代表了  $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$  及

$0.10 \text{ }^\circ\text{C}$  的倍数.

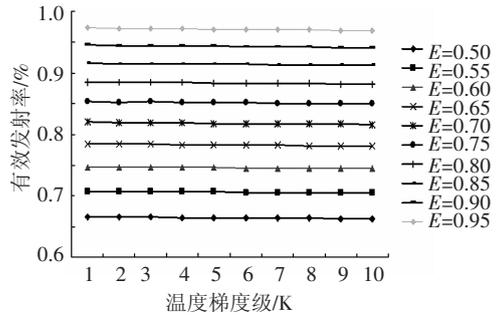


图11 0.01 °C ~ 0.10 °C 温度差值时的有效发射率

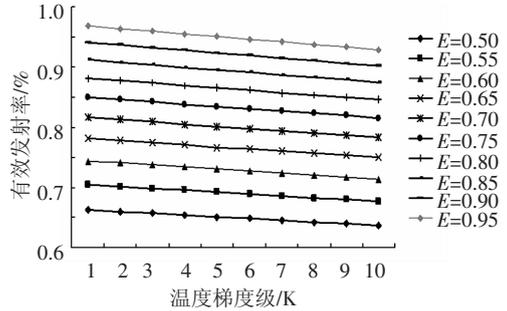


图12 0.1 °C ~ 1.0 °C 温度差值时的有效发射率

计算结果显示,温度差值由  $0.01 \sim 0.10 \text{ }^\circ\text{C}$  变化时,对有效发射率的影响并不大,即便达到  $0.10 \text{ }^\circ\text{C}$  时,有效发射率降低仅为  $0.3\% \sim 0.4\%$ ;而当温度不均匀性由  $0.1 \sim 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$  发生较大变化时,将对有效发射率产生较大影响. 特别当温度不均匀性为  $1.0 \text{ }^\circ\text{C}$  时,有效发射率下降达  $4\% \sim 5\%$ . 这表明严重的轴向温度非均匀程度将会使有效发射率发生明显下降,影响黑体的辐射特性.

### 3 面式黑体设计与温度均匀性分析

根据上述轴向温度不均匀性影响因素及与面黑体有效发射率的影响关系分析结果,为了保证面黑体有足够高的有效发射率,需将面黑体温度均匀性控制在  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ;而为了保证  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度均匀性,则需要尽量减小槽高,并采用合适的槽夹角. 结合目前加工工艺水平,设计面黑体口径为  $100 \text{ mm}$ 、槽高度为  $1.6 \text{ mm}$ 、槽夹角为  $60^\circ$ . 并在室温环境条件下,分别设定工作温度为  $200、250、350 \text{ K}$ ,利用有限元方法分析温度不均匀性如图13~图15所示.

由分析结果可以看出,在  $200 \sim 350 \text{ K}$  工作区间内,面黑体温度均匀性分别为  $0.079、0.067、0.050 \text{ K}$ ,能够满足纵向温度均匀性  $0.1 \text{ K}$  的要求.

在对有效辐射面进行设计与评估后,设计面黑体结构如图16所示. 有效辐射面通过均温板与加热膜及制冷机相连接,均温板采用紫铜材料,并在内部设置空腔结构,这将保证热量从黑体基板各位置到制冷机冷指间的热阻相等,热量沿黑体

板轴向传递,从而可以获得较好的温度均匀性;整个面黑体处于杜瓦结构中,这将避免工作状态下受大气对流换热的影响。

由于径向非均匀指的是沿面黑体径向方向的温度分布特性,主要受均热盘材料、结构、工艺等因素综合影响,必须在保证轴向温度均匀性的前提下进行具体分析。根据以上面黑体结构设计,分析面黑体在 200 K 工作温度下的径向温度均匀性如图 17 所示。结果显示,由于均热盘结构设计合理,使得面黑体有效辐射面的径向温度分布非常均匀。

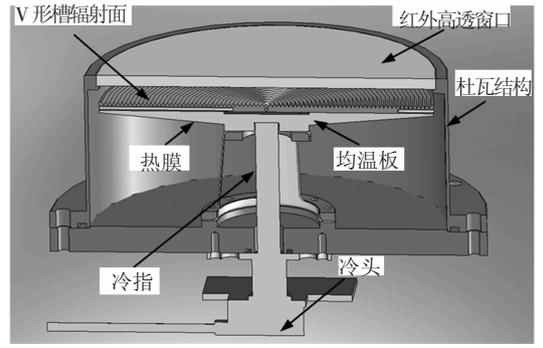


图 16 杜瓦结构面黑体结构设计示意图

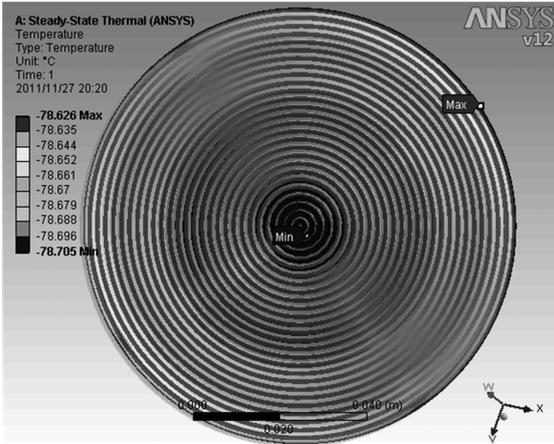


图 13 面黑体工作于 200 K 时的温度不均匀性

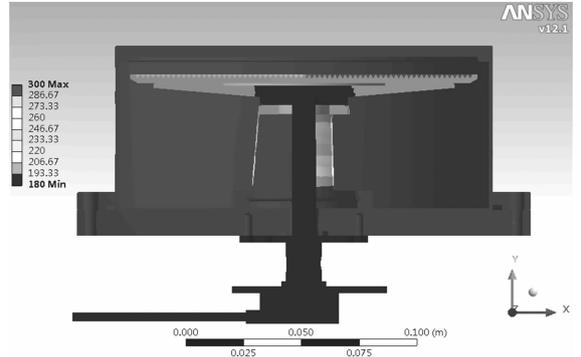


图 17 面黑体径向温度均匀性分析结果

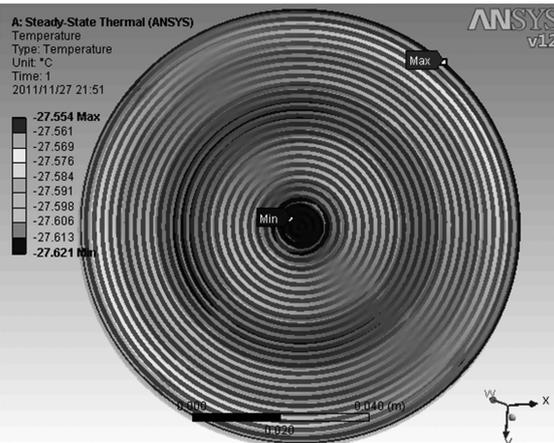


图 14 面黑体工作于 250 K 时的温度不均匀性

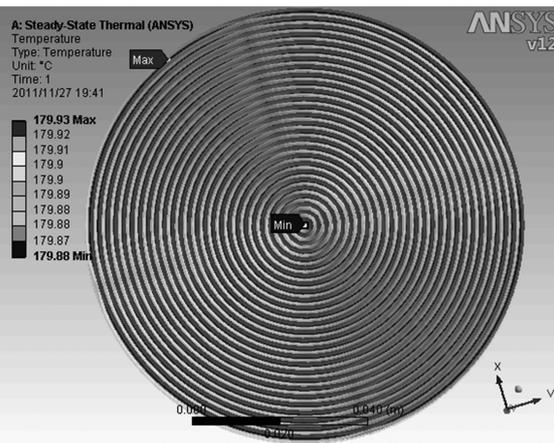


图 15 面黑体工作于 350 K 时的温度不均匀性

#### 4 面式黑体研制与性能评价

根据如图 18 所示方案研制面式黑体。均温板采用紫铜,在黑体基板与均温板之间设置环隙并在其间安装不锈钢热阻环。黑体源和均温板由低热导率、高强度的环氧玻璃钢筒支撑在杜瓦底板上。均温板下部布置多屏真空绝热,以减少杜瓦背部的辐射漏热。侧面设计有辐射屏,可减少真空罩对黑体侧面的辐射传热。面黑体采用脉冲管制冷机进行制冷,采用均温板粘贴加热薄膜进行加热,为了保证制冷机冷头热端和外壳的良好散热,采用轴流风扇完成,并在冷头热端和外壳设有散热翅片,以增强换热效果。

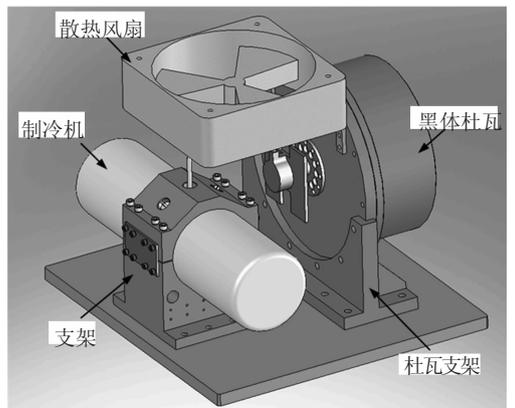


图 18 面式黑体硬件研制设计图

面黑体测温与控温采用在黑体辐射面表皮层埋置 4 支高精度铂电阻的方式,如图 19 所示。其中 3 号铂电阻按三线制传至控温仪,通过转换电

路,转换成电流输出,此电流输出通过驱动板、功率放大、驱动双向可控硅,控制负载电热膜的加热功率使电热膜加热,或启动制冷机将温度控制在所设定的温度范围内;另外 3 支经过精度检定及测值修正后,用于在线检测黑体源工作温度的均匀性。

所研制的面黑体硬件实物图如图 20 所示。

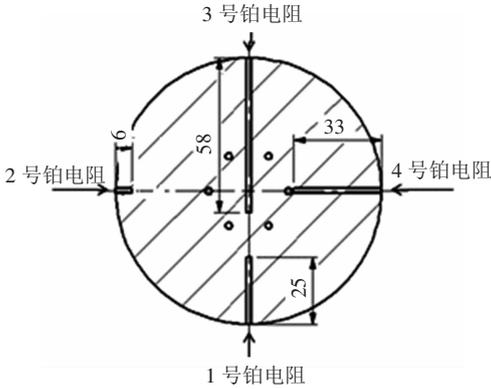


图 19 面式黑体铂电阻测温控温方案



图 20 面式黑体硬件研制实物图

为了对面式黑体的温度均匀性进行评估,在 3 个温度点上即 250、300、350 K 对温度进行测试,并参照采用该方法时行业内对温度均匀性的评价标准,与温度平均值的最大温差,即

$$\Delta T_{\max} = |T_{\max} - \bar{T}|, \Delta T_{\min} = |\bar{T} - T_{\min}|$$

采用铂电阻方案时温度均匀性测试结果如表 1 所示。

表 1 面黑体温度均匀性测试数据记录表 1

温度设定/ K	1 号	2 号	4 号	平均值	均匀性
250	-250.05	-249.95	-249.99	-250.00	0.05
300	-299.94	-299.99	-299.98	-299.97	0.03
350	-350.19	-350.26	-350.22	-350.22	0.04

除了采用 3 支高精度铂电阻在线检测外,还利用经国家 I 级标准黑体源标定后的 FLIR sc7 300 m 红外热像仪(分辨力 0.01 K,测温精度 0.2 K)对面式黑体在 250、320、370 K 等 4 个工作温度点以及  $\Phi 100$  mm 口径范围内的温度均匀性

进行了测试评估,

参照 GJB3476 - 98 热像仪定型试验规范及行业评价标准,测试方法采用在面式黑体某一圆周均等分取 9 个参照点,根据各点温度计算标准偏差,并取多次测量后的标准偏差平均值来考察面黑体的温度均匀性,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (\bar{T} - T_i)^2}{n - 1}}$$

测试图分别如图 21 ~ 图 23 所示,均匀性测试结果如表 2 所示。

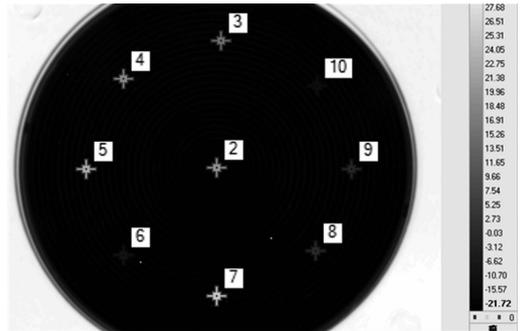


图 21 面黑体辐射源 250 K 非均匀性测试图

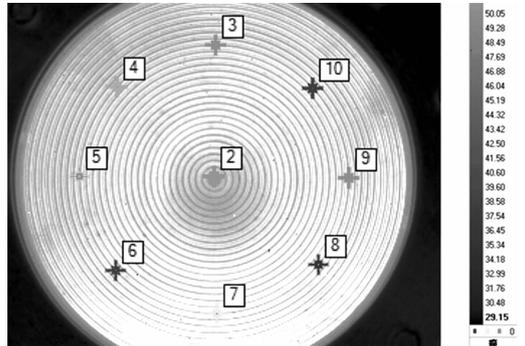


图 22 面黑体辐射源 320 K 非均匀性测试图

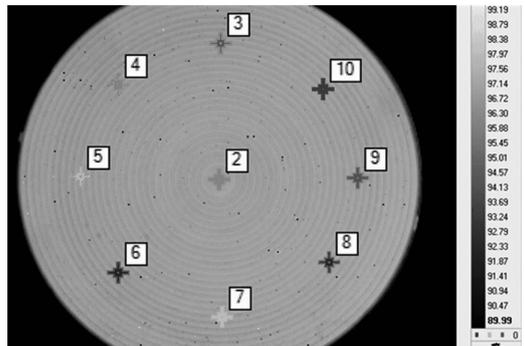


图 23 面黑体辐射源 370 K 非均匀性测试图

表 2 面黑体温度均匀性测试数据记录表 2

设置温度/K	非均匀性/°C						
	1	2	3	4	5	6	均值
250	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.07	0.09
320	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05
370	0.07	0.09	0.09	0.10	0.10	0.08	0.09

综合比表1、表2测试结果可以发现,面黑体设定温度与测试环境的温差越大,温度均匀性就越差,这与上述理论研究结果相符合;采用非接触热像仪测量方案要比接触式铂电阻测量方案的温度非均匀性结果偏大,经分析主要是由于辐射测量链路相比较而言更加复杂,并且易受周围环境因素影响的;采用两种测试方案温度均匀性的测试结果都小于0.1 K.

## 5 结 论

1) 实现轴向温度均匀是进一步实现径向温度均匀的前提条件. V形槽深度、槽夹角以及工作温度会对黑体的轴向温度均匀性产生综合影响: 深度越小, 温度均匀性越好; 夹角越大, 温度均匀性越好; 工作温度与环境温度差值越小, 温度均匀性越好.

2) 槽深度、槽夹角会对轴向温度均匀性、有效发射率产生双重影响, 必须在保证有足够高有效发射率的前提约束条件下, 确定轴向温度均匀性的合理取值, 进而结合加工工艺水平确定槽高度及槽夹角的大小. 实际设计时建议槽高低于2 mm, 槽夹角采用45°或60°.

3) 径向温度不均匀性主要会受到有效辐射面均热盘的材料、结构、工艺等因素的综合影响, 必须结合面黑体的具体工作状态进行综合分析. 其中, 合理设计均热盘的材质、结构参数、传热形式是保证径向温度均匀性的关键.

4) 以轴向温度均匀性、径向温度均匀性以及有效发射率为约束条件对面黑体进行结构参数优化设计并采用防漏热保护措施后, 面黑体温度均匀性可达0.1 K.

## 参考文献

[1] DEWITT D P, NUTTER G D. Theory and Practice of

Radiation Thermometry[M]. New York: John Wiley & Sons Press, 1989: 656 - 662.

[2] HILL K D, WOODS D J. The NRC blackbody-based radiation thermometer calibration facility [J]. Temperature: Its measurement and control in science and industry, 2003(7): 669 - 674.

[3] ZHANG Hong, DAI Jingmin. A novel radiant source for infrared calibration by using a grooved surface [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(5): 306 - 308.

[4] BEDFORD R E, MA C K. Emissivities of diffuse cavities, II: Isothermal and nonisothermal cylindrical cones [J]. Journal of the optical Society of America, 1975, 65(5): 565 - 572.

[5] CAOLA M J. Radiation from a nonisothermal spherical cavity: an exact solution [J]. Applied Optics, 2001, 40(19): 3232 - 3234.

[6] SHAN Guanghui, GAO Ke, GAO Kuinling. Study on Radiation Property of a Multi-celled Large-area Blackbody [J]. Journal of Shenyang Institute of Gold Technology, 1996, 15(4): 363 - 367.

[7] 谢植. 黑体辐射源理论研究 [M]. 沈阳: 东北工学院博士学位论文, 1992.

[8] ISHII J, KOBAYASHI M, SAKUMA F. Effective emissivities of blackbody cavities with grooved cylinders [J]. Metrologia, 1998, 35(3): 175 - 180.

[9] PROKHOROV A V. Monte Carlo method in optical radiometry [J]. Metrologia, 1998, 35(4): 465 - 471.

[10] LU Y P, LI B X, JIANG B C. Distributed characteristic of radiation transfer direction of a isothermal cylinder [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(6): 714 - 717.

[11] 张宏, 戴景民. 大口径热管面式黑体炉的研制及性能评价 [J]. 中国计量学院学报, 2006, 17(2): 95 - 118.

(编辑 张 红)