

## 黑体腔高温传感器结构设计

吴 飞<sup>1</sup>, 董 杰<sup>1</sup>, 田海霞<sup>1,2</sup>, 蔡璐璐<sup>1,2</sup>

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 基于积分方程理论建立了黑体腔的结构模型, 分析了腔体长径比、孔径比、接收器到腔口的距离、腔体材料本身发射率等参数对腔体发射率的影响, 提出了黑体腔优化参数设计, 同时, 应用有限元分析法分析了不同形状黑体腔腔体对接收器稳态温度、动态响应时间的影响。研究表明: 黑体腔结构参数的改变直接影响黑体腔发射率、接收器稳态温度、动态响应时间, 进而影响黑体腔性能, 积分方程法和有限元法结合分析为黑体腔研究以及优化设计提供了新思路。

**关键词:** 黑体腔; 积分发射率; 有限元; ANSYS 仿真

**中图分类号:** TH811 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2609-06

## Structure design of high-temperature blackbody cavity

Wu Fei<sup>1</sup>, Dong Jie<sup>1</sup>, Tian Haixia<sup>1,2</sup>, Cai Lulu<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Key Laboratory of Measurement Technology and Instrumentation of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Based on integral equation theory, the structure of the blackbody cavity model was established. Analyzed the length to diameter ratio of cavity, the aperture ratio, the distance between the aperture and the receiver, the cavity material itself emissivity and other factors that have influence on the cavity emissivity, and the optimization parameters of the blackbody cavity was designed, at the same time the finite element analysis method was used to analysis the influence of different shapes of blackbody cavity on the receiver steady temperature and the dynamic response time. The result shows that the change of the blackbody cavity structure parameters have direct influence on the blackbody cavity emissivity, the receiver steady temperature, and the dynamic response time, and then affects the performance of the blackbody cavity, and the method of the combination of the finite element method and integral equation method analysis provides a new idea for the study and optimization design of the blackbody cavity.

**Key words:** blackbody cavity; integral emissivity; finite element; ANSYS simulation

收稿日期: 2015-01-16; 修订日期: 2015-02-17

基金项目: 河北省自然科学基金(E2014203182)

作者简介: 吴飞(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光纤传感技术方面的研究。Email: ysu-fbg@163.com

## 0 引言

传统的高温测量一般采用光纤辐射式温度测量系统,针对其测温精确度低、易腐蚀、寿命短等不足,采用黑体腔结合光纤辐射式测温系统组成的接触式高温测试系统受到人们的重视<sup>[1]</sup>。利用黑体腔接触温度源,应用光纤辐射温度测量系统对黑体腔辐射进行测量,以此实现温度源的测量。为了得到最优化黑体腔传感探头,必须对影响黑体腔有效发射率、黑体腔传感器动态测温过程的因素进行分析。黑体腔传感器由于受几何结构特点以及腔外环境温度等因素的影响,其积分发射率必然小于 1,且具有较大的不确定性。因此建立黑体腔腔体的结构模型和有限元模型,并研究其几何特性、温度分布等因素对腔体发射率的影响,对于黑体空腔的优化设计和提高测温系统的准确度具有重要的意义。近年来,人们采用各种方法计算黑体腔发射率,主要有多次反射法、Monte-Carlo 法<sup>[2]</sup>和积分方程法。20 世纪 90 年代,国内外研究人员采用 Monte-Carlo 法计算黑体腔发射率,但其算法较为复杂,建模不太直观,难以对一些不规则腔体的发射率进行计算。2004 年东北大学的谢植等人提出了一种连续测温方法,建立了黑体空腔有效发射率、积分发射率的计算模型<sup>[3]</sup>。哈尔滨工业大学在黑体辐射测温方面取得了一些成果,建立了很多黑体发射率模型,在高温均匀性需求以及连续加热过程中温度与发射率的测量问题等方面进行了分析研究,并对其优化结构参数进行了研究<sup>[4-7]</sup>。2008 年刘仁学等建立了圆筒形黑体空腔有限元模型,运用 ANSYS 对黑体腔腔体发射率进行了仿真,仿真结果与公式计算结果具有较好的一致性<sup>[8]</sup>。2011 年郑龙江等人采用有限元热分析方法建立了黑体腔传感器模型,并对其腔体发射率进行了分析,取得了较好的结果<sup>[9]</sup>。以上方法所建模型较简单,只分析了腔体热传递过程,并未对黑体腔辐射传热过程中接收器的温度变化、动态响应时间进行分析。文中采用积分方程理论,建立了黑体腔结构模型,对黑体腔的结构参数进行研究,同时应用有限元热分析方法模拟黑体腔动态测温过程,分析各个参数对黑体腔腔体发射率、接收器稳态温度、动态响应时间的影响。

## 1 黑体腔静态特性分析

### 1.1 黑体腔结构模型

以常用的圆筒型黑体腔为例,其结构模型如图 1 所示。图中, $r$  为黑体腔筒底坐标轴; $x$  为侧面坐标轴; $z$  为盖面的坐标轴; $L$  为圆筒筒长; $R$  为圆筒半径; $R_0$  为圆筒开口半径; $R_D$  为接收器半径; $H$  为接收器到腔口的距离。

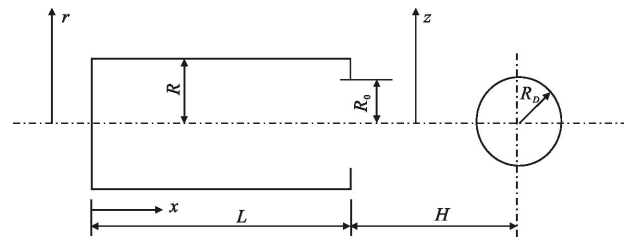


图 1 圆筒型黑体空腔与接收器模型

Fig.1 Structure model of cylindrical blackbody cavity and acceptor

黑体腔腔体的有效发射率  $\varepsilon_a$  定义为:

$$\varepsilon_a = \frac{E_a(T, \lambda)}{E_b(T_0, \lambda)} \quad (1)$$

根据以上圆筒型腔体模型,可以求解得到黑体腔内各个节点的有效发射率,然后根据以下公式得到黑体腔积分发射率:

$$\varepsilon^c = \frac{\int_0^R \varepsilon_a(r) dF_{r,D} dA_r + \int_0^L \varepsilon_a(x) dF_{x,D} dA_x + \int_{R_0}^R \varepsilon_a(z) dF_{z,D} dA_z}{\int_0^R dF_{r,D} dA_r + \int_0^L dF_{x,D} dA_x + \int_{R_0}^R dF_{z,D} dA_z} \quad (2)$$

通过计算黑体腔积分发射率分析各个结构参数对黑体腔发射率的影响,提高黑体腔性能。

### 1.2 圆筒型腔体发射率分析

以常用的带盖圆筒形黑体腔为例,分析黑体腔腔体长度、开口半径大小、腔体材料发射率、接收器到腔口的距离对黑体腔发射率的影响。

以腔体底面半径  $R$  为标准,当  $R=1$ ,长径比  $L/R=5$ ,材料发射率  $\varepsilon$  分别取 0.1、0.5、0.8,孔径比  $R_0/R$  分别取 0.1~0.9,腔体发射率如图 2 所示。

由图 2 可知,腔体发射率受腔体开口大小的影响,孔径比  $R_0/R$  值越小腔体发射率越大,但从应用上考虑,黑体腔的开口应足够大,可为接收器提供较大的视场。腔体的材料发射率  $\varepsilon$  对黑体腔的影响与腔体的其他因素相关;当  $R_0/R$  较大时,腔体的材料发射率对腔体发射率的影响较大,但当  $R_0/R$  较小时,腔体的材料发射率对腔体发射率的影响就很小了。

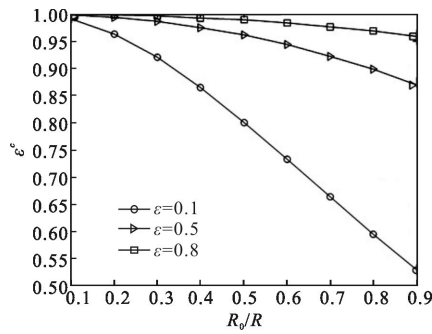


图2 不同  $\epsilon$  与  $R_0/R$  下圆筒型腔体发射率

Fig.2 Cylindrical blackbody cavity emissivity under different  $\epsilon$  and  $R_0/R$

当孔径比  $R_0/R=0.5$  时, 材料发射率  $\epsilon$  分别取 0.1、0.5、0.8, 长径比  $L/R$  分别取 1~10, 腔体发射率如图 3 所示。

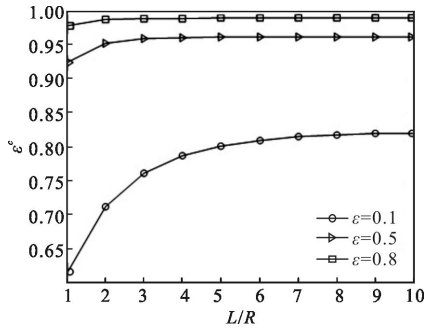


图3 不同  $\epsilon$  与  $L/R$  下圆筒型腔体发射率

Fig.3 Cylindrical blackbody cavity emissivity under different  $\epsilon$  and  $L/R$

由图 3 可以得出, 长径比  $L/R$  是影响黑体腔发射率的重要因素之一,  $L/R$  越大, 腔体发射率越大, 但是随着  $L/R$  增大到一定程度时, 其腔体发射率的变化已不大, 而且腔体长度过长会增加黑体腔的制造成本。

当圆筒形黑体腔结构参数为:  $L=10, R=2, R_0=1, \epsilon=0.1, H$  分别取 0~40 时, 黑体腔积分发射率的变化如图 4 所示。

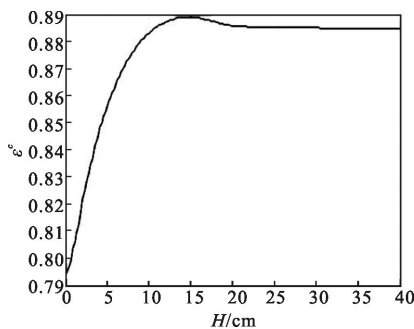


图4 不同  $H$  下圆筒型腔体发射率

Fig.4 Cylindrical blackbody cavity emissivity under different  $H$

接收器到腔口的距离  $H$  对黑体腔的影响很大,  $\epsilon$  随着  $H$  的增大先增大后减小, 逐渐趋于稳定, 这主要是由于腔壁分布不均匀性导致。考虑具体现实条件,  $H$  取值范围在 10 左右。

综上所述, 黑体腔腔体长度、开口半径、材料本身发射率、接收器到腔口的距离对黑体腔发射率都有影响。当黑体腔长径比为 3~5、孔径比为 0.5、接收器到腔口的距离为 10 左右、腔体材料本身发射率较高时, 黑体腔腔体发射率较高。

### 2 黑体腔动态特性分析

黑体腔理论分析计算属于静态特性分析, 由于测温环境复杂, 黑体腔传感器受各种因素影响, 静态分析无法实际计算黑体腔传感器动态过程中的温度, 以及传感器达到稳态时的响应时间, 因此采用有限元热分析法对黑体空腔的动态测温过程进行仿真。

#### 2.1 黑体腔动态测温模型

黑体腔的腔体发射率直接影响黑体腔辐射性能, 根据定义, 腔体发射率就是从黑体空腔内壁各点辐射到接收器上的实际辐射能与处在腔体参考温度下壁面为理想黑体时辐射到接收器的辐射能的比值。因此腔体发射率近似由接收器达到稳态时的温度与腔体材料发射率为 1 时接收器达到稳态时的温度的比值得到, 以圆筒型黑体腔为例, 建立模型如图 5 所示。

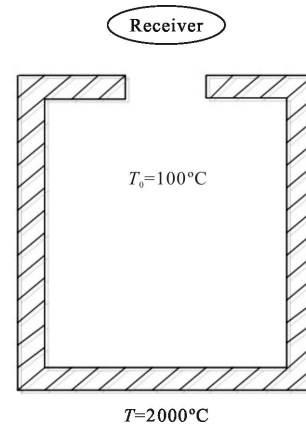


图5 黑体腔动态测温模型

Fig.5 Dynamic model of blackbody cavity temperature measurement

建立黑体腔模型, 把模型划分为有限个节点, 定义初始条件并施加一定的边界条件, 初始温度  $T_0=100\text{ }^\circ\text{C}$ , 环境温度  $T=2000\text{ }^\circ\text{C}$ , 黑体腔全部插入被测环境。根据能量守恒定律求解每一节点处的热平衡方

程,由此解出各节点温度,进而求解出其他相关量。

### 2.2 黑体腔动态传热过程分析

以常用圆筒型黑体腔为例,讨论黑体腔腔长、开口大小、材料发射率、接收器到腔口的距离对黑体腔动态传热过程中接收器的稳态温度、动态响应时间的影响。

假设  $\epsilon=0.1$ , 长径比  $L/R=5$ ,  $H$  分别取 1~10 中 100 组数据,取其中具有代表性数据 1、5、10,孔径比  $R_0/R$  分别取 0.1~0.9 中 100 组数据,取其中 10 组数据进行分析,黑体腔传感器接收器达到稳态时的动态响应时间值如表 1 所示,黑体腔动态响应时间变化如图 6 所示。

表 1 黑体腔动态响应时间( $\epsilon=0.1, L/R=5$ )

Tab.1 Blackbody cavity dynamic response time ( $\epsilon=0.1, L/R=5$ )

$R_0/R$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$H=1$	460	470	550	450	400	400	450	440	490
$H=5$	1 200	1 160	1 200	1 210	1 150	1 170	1 250	1 440	1 170
$H=10$	2 420	2 720	3 100	2 400	2 300	3 020	2 800	2 760	3 080

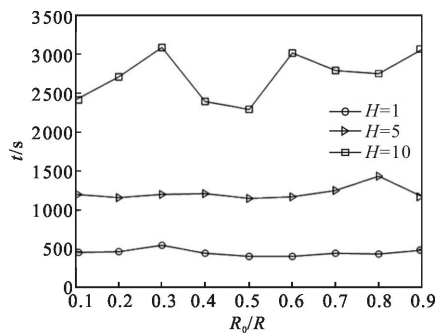


图 6 不同  $R_0/R$  下黑体腔动态响应时间( $H=1, 5, 10$ )

Fig.6 Blackbody cavity dynamic response time under different  $R_0/R(H=1,5,10)$

由图 6 可知,在长径比  $L/R$ 、材料发射率  $\epsilon$  一定、黑体腔传感器温度达到稳态时,响应时间随孔径比增大逐渐增大然后减小,接收器到腔口的距离  $H$  越大,响应时间越长。综上所述,为了减少黑体腔传感器工作响应时间,孔径比  $R_0/R$  最佳值为 0.5 左右。

假设  $\epsilon=0.1, R_0/R=0.5, H$  分别取 1~10 中 100 组数据,取其中具有代表性数据 1、5、10,长径比  $L/R$  分别取 1~10 中 100 组数据,取其中 10 组数据,黑体腔传感器动态传热过程中接收器的稳态温度值如表 2 所示,接收器温度变化曲线如图 7 所示,黑体腔动态响应时间变化如图 8 所示,黑体腔发射率变化

如图 9 所示。

表 2 接收器温度变化( $\epsilon=0.1, R_0/R=0.5$ )

Tab.2 Receiver temperature change( $\epsilon=0.1, R_0/R=0.5$ )

$L/R$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$H=1$	1252	1383	1450	1486	1509	1519	1527	1531	1533	1535
$H=5$	689	784	835	867	890	903	907	912	913	915
$H=10$	447	521	571	601	612	621	628	630	625	633

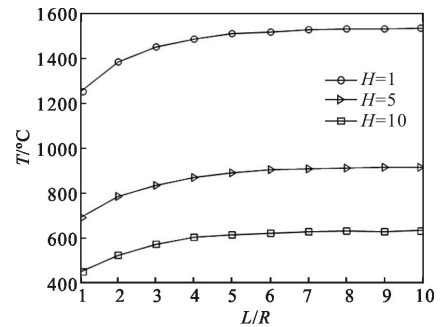


图 7 不同  $L/R$  下接收器温度变化曲线( $H=1,5,10$ )

Fig.7 Receiver temperature change curve under different

$L/R(H=1, 5, 10)$

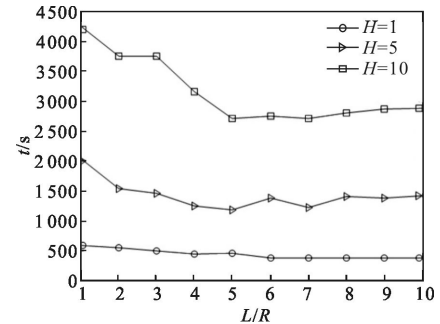


图 8 不同  $L/R$  下黑体腔动态响应时间( $H=1,5,10$ )

Fig.8 Blackbody cavity dynamic response time under different

$L/R(H=1,5,10)$

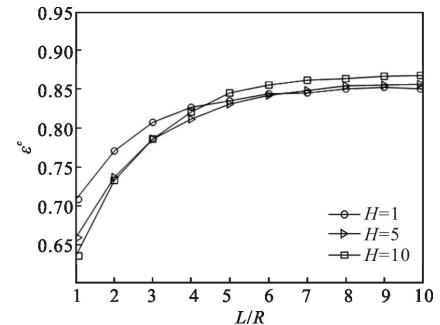


图 9 不同  $L/R$  下黑体腔发射率( $H=1,5,10$ )

Fig.9 Blackbody cavity emissivity under different  $L/R(H=1,5,10)$

由图 7~9 可知,  $L/R$  越大,黑体腔达到稳态时的温度越高,  $L/R$  达到一定值时,黑体腔稳态时的最高温度变化不大。黑体腔达到稳态时的响应时间随  $L/R$  的增

大而减小,接收器到腔口的距离  $H$  越小,稳态时达到的温度越高,响应时间越短。黑体腔的发射率随  $L/R$  的增大而增大,而后趋于稳定,与积分方程法得到的曲线具有较好的一致性。综上分析, $L/R$  最优值为 4~6。

假设  $L/R=5, R_0/R=0.5, \varepsilon$  分别取 0.1~0.9 中 10 组

表 3  $\varepsilon$  不同时接收器温度变化( $L/R=5, R_0/R=0.5$ )

Tab.3 Receiver temperature change under different  $\varepsilon$  ( $L/R=5, R_0/R=0.5$ )

$H$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\varepsilon=0.1$	1508	1285	1118	986	890	813	750	703	642	612	585	545	508	461	437
$\varepsilon=0.5$	1740	1496	1302	1145	1033	940	866	813	738	704	680	637	605	552	533
$\varepsilon=0.9$	1798	1550	1348	1183	1068	968	891	836	757	721	699	655	627	572	556
$\varepsilon=1.0$	1807	1559	1356	1189	1074	972	894	839	759	723	702	658	631	575	559

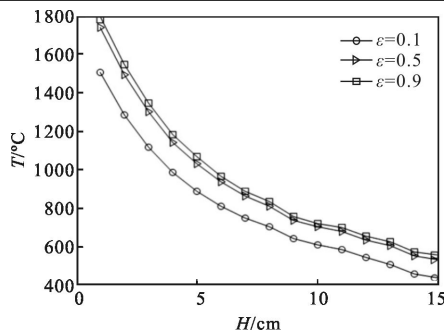


图 10 不同  $H$  下接收器温度变化曲线( $\varepsilon=0.1,0.5,0.9$ )

Fig.10 Receiver temperature change curve under different  $H$

( $\varepsilon=0.1,0.5,0.9$ )

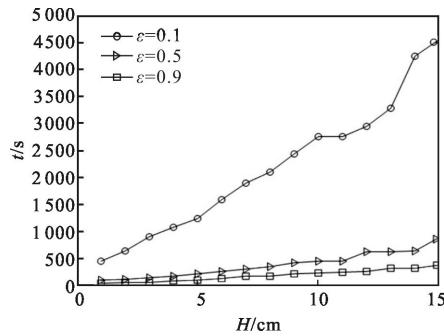


图 11 不同  $H$  下黑体腔动态响应时间( $\varepsilon=0.1,0.5,0.9$ )

Fig.11 Blackbody cavity dynamic response time under different  $H$

( $\varepsilon=0.1,0.5,0.9$ )

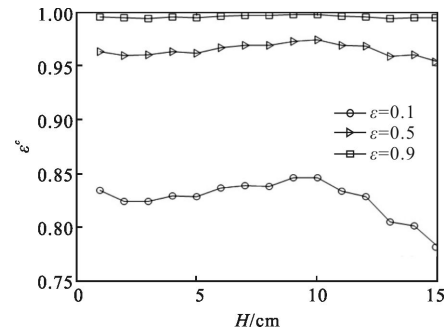


图 12 不同  $H$  下黑体腔发射率( $\varepsilon=0.1,0.5,0.9$ )

Fig.12 Blackbody cavity emissivity under different  $H$ ( $\varepsilon=0.1, 0.5, 0.9$ )

数据,取其中的 0.1、0.5、0.9,  $H$  分别取 1~15 中 100 组数据,取其中具有代表性的 15 组数据,黑体腔传感器动态传热过程中接收器的温度数据如表 3 所示,接收器温度变化曲线如图 10 所示,黑体腔动态响应时间变化如图 11 所示,黑体腔发射率变化如图 12 所示。

由图 12 可知,改变接收器到腔口的距离  $H$ ,黑体腔传感器发射率随  $H$  的变化而变化,黑体腔动态响应时间随  $H$  的增大而增大,材料发射率  $\varepsilon$  越大,黑体腔发射率越大。综上所述, $H$  为 10 左右时,黑体腔发射率达到最大值。

假设  $R_0/R=0.5, L/R=5, H$  分别取 1~10 中 100 组数据,取其中的 1、5、10,  $\varepsilon$  分别取 0.1~0.9 中 100 组数据,取其中的 10 组数据分析,黑体腔传感器动态传热过程中接收器温度数据如表 4 所示,接收器温度变化曲线如图 13 所示,黑体腔动态响应时间变化如图 14 所示,黑体腔发射率变化如图 15 所示。

表 4  $H$  不同时接收器温度变化( $L/R=5, R_0/R=0.5$ )

Tab.4 Receiver temperature change under different

$\varepsilon$  ( $L/R=5, R_0/R=0.5$ )

$\varepsilon$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$H=1$	1508	1623	1678	1713	1738	1757	1772	1784	1795	1804
$H=5$	891	964	998	1018	1034	1045	1054	1061	1067	1072
$H=10$	612	662	684	696	704	710	715	718	721	724

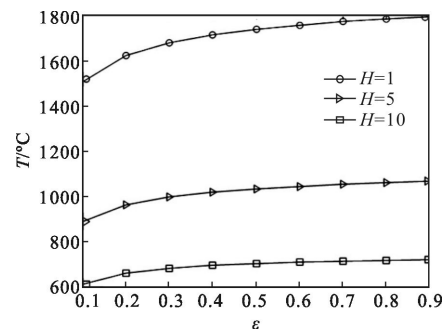


图 13 不同  $\varepsilon$  下接收器温度变化曲线( $H=1,5,10$ )

Fig.13 Receiver temperature change curve under different  $\varepsilon$  ( $H=1,5,10$ )

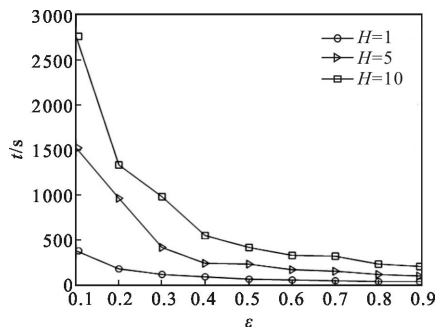
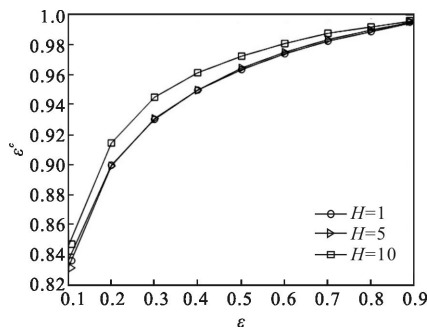
图 14 不同  $\varepsilon$  下黑体腔动态响应时间( $H=1,5,10$ )

Fig.14 Blackbody cavity dynamic response time under different

 $\varepsilon(H=1,5,10)$ 图 15 不同  $\varepsilon$  下黑体腔发射率( $H=1,5,10$ )Fig.15 Blackbody cavity emissivity under different  $\varepsilon(H=1,5,10)$ 

由图 13~15 可知,材料发射率  $\varepsilon$  越大,黑体腔传感器达到稳态时的最高温度越高,黑体腔发射率先增大后趋于稳定。当接收器到腔口的距离  $H$  较小时,增大材料发射率  $\varepsilon$  对黑体腔发射率变化趋势影响不大。随着材料发射率  $\varepsilon$  增大,黑体腔传感器达到稳态时的响应时间越小。

综上所述,当黑体腔腔体结构参数改变时,接收器稳态温度、动态响应时间随之改变;用有限元法分析得到的腔体发射率与积分方程法得到的腔体发射率变化规律一致;当长径比为 4~6、孔径比为 0.5、接收器到腔口的距离为 10 左右,腔体材料本身发射率较高时,黑体腔传热过程中的动态响应时间短,腔体发射率较高。

### 3 结论

文中分析了黑体腔结构中长径比、孔径比、材料本身发射率、接收器到腔口的距离等结构参数的变化对腔体动态传热过程中接收器达到稳态时的温度变化、动态响应时间、腔体发射率的影响,结果表明:黑体腔腔体结构参数的变化直接影响腔体发射率以

及腔体动态特性,进而影响黑体腔的辐射能力,积分方程法可方便、准确、快速计算出不规则腔体的发射率,有限元法建模直观,可以对一些复杂结构腔体的传热过程进行分析,由有限元法得到的腔体发射率与积分方程法计算结果一致,有限元法具有优越的计算能力,解决了理论上不能直接计算的黑体腔传热过程中接收器的动态温度变化、动态响应时间的缺陷以及现实试验不易操作的问题,为黑体空腔研究以及优化设计提供了一种新思路。

### 参考文献:

- [1] Castellon Uribe J. Experimental results of the performance of a laser fiber as a remote sensor of temperature [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(6): 633-644.
- [2] Fang Qianqian, Fang Wei, Wang Kai. Calculation of effective emissivity of blackbody cavities by Monte-Carlo method[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 167-173. (in Chinese)
- [3] Zhang Hua, Liu Wei, Xie Zhi, et al. Finite element analysis of thermometric sensor for liquid steel [J]. *Journal of Northeastern University*, 2006, (12): 1315-1318. (in Chinese)
- [4] Xiao Peng, Sun Xiaogang, Dai Jingmin. Temperature and spectral emissivity measurement of the metallic thermal protection blanket based on multi-wavelength thermometry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(8): 59-63. (in Chinese)
- [5] Dai Jingmin, Song Yang, Wang Zongwei. Review of spectral emissivity measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 710-715. (in Chinese)
- [6] Wang Qiang, Zhang Hong, Zhang Wei, et al. Radiant characteristics evaluation and structural parameter optimization design of V-grooved surface blackbody [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2013, 46(5): 463-468. (in Chinese)
- [7] Wang Qiang, Zhang Wei, Dai Jingmin, et al. Temperature uniformity optimum design and performance evaluation of surface blackbody radiant source with cavity effect [J]. *Journal of Harbin institute of Technology*, 2013, 45 (5): 18-24. (in Chinese)
- [8] Liu Renxue, Wang Lei. ANSYS method on cavity emissivity [J]. *Measurement Technique*, 2008(4): 6-8.
- [9] Zheng Longjiang, Chang Lei, Zhao Jing, et al. Finite element analysis of high-temperature blackbody cavity emissivity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1640-1645. (in Chinese)