

引用格式: SONG Chao-xin, LEI Xiao-hua, XIE Lei, *et al.* Coupling Efficiency of Light Intensity from Blackbody Cavity into Spherical Optical Fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(9):0906001

宋超鑫, 雷小华, 谢磊, 等. 球形端面光纤与黑体光源耦合效率分析[J]. 光子学报, 2020, **49**(9):0906001

球形端面光纤与黑体光源耦合效率分析

宋超鑫, 雷小华, 谢磊, 刘显明, 陈伟民

(重庆大学 光电工程学院, 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 为提高黑体光源的入纤强度, 采用球形端面光纤为接收光纤, 建立球形端面光纤与黑体辐射腔光能耦合模型, 分析球形端面光纤参数、黑体腔参数等对光能耦合效率的影响. 搭建黑体腔与球形端面光纤的光能耦合实验系统, 在 800~1 000 °C 条件下开展了光能耦合实验, 结果表明: 随着球形端头直径的增加, 耦合光能先增大后减小; 当曲率半径约为 85 μm 时, 光能耦合强度最高. 相对于平端面光纤而言, 耦合效率提高约 60%.

关键词: 球形端面光纤; 黑体光源; 理论耦合模型; 耦合效率; 光能耦合实验

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204909.0906001

Coupling Efficiency of Light Intensity from Blackbody Cavity into Spherical Optical Fiber

SONG Chao-xin, LEI Xiao-hua, XIE Lei, LIU Xian-ming, CHEN Wei-min

(Key Lab of Optoelectronic Technology & Systems Ministry of Education, College of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To improve coupling efficiency from blackbody source into fiber, a coupling model of light intensity from the blackbody cavity into a spherical optical fiber was proposed. Influence of parameters of spherical fiber and blackbody cavity on coupling efficiency was analyzed. Results show that coupling efficiency firstly increases and then decreases with the increase of radius of spherical fiber. When radius is around 85 μm , coupling efficiency reaches the maximum. Spherical fibers with radius from 65 μm to 105 μm were fabricated by fusion splicer. Experiments were carried out with spherical fibers and a fiber with flat end face. Results show that compared with the fiber with flat end face, coupling efficiency of spherical fiber is greatly improved, when radius is around 85 μm , coupling efficiency is improved by approximately 60%. The experimental results are consistent with the theoretical analysis.

Key words: Fiber with spherical end face; Blackbody cavity; Theoretical coupling model; Coupling efficiency; Coupling experiment

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 120.2230; 280.4788

0 引言

飞机发动机、核电站等重大装备工作在高温环境, 对其进行高温应变监测可保障设备的正常运行^[1,2]. 高温应变监测可采用光纤传感系统, 如光纤光栅与光纤法珀传感系统^[3]. 这类传感系统在测量时需外置宽带光源, 且应尽量增加光源的带宽来提高应变测量的解调精度. 在高温极端环境下, 由于黑体辐射强度高, 黑体辐射的光谱带宽大^[4,5], 若直接利用高温下材料的黑体辐射特性设计黑体腔为光纤传感系统提供光源, 既能节

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.51675068, 61875023, 51805054), 重庆市基础研究与前沿(No.cstc2017jcyjAX0399)

第一作者: 宋超鑫(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤法珀传感技术. Email: 1766592389@qq.com

导师(通讯作者): 雷小华(1980—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: xhlei@cqu.edu.cn

收稿日期: 2020-03-16; 录用日期: 2020-06-28

约系统成本并简化系统,还有利于提高系统解调精度.TIAN Zhi-peng^[6], CHEN Tao^[7]等报道了采用平端面光纤与黑体光源进行光能耦合,但耦合效率较低,使得传感器的输出信号信噪比低,传感器信号极易淹没在光源噪声之中,给测量和解调带来不便.为提高耦合效率,XIE Lei^[8]采用腐蚀型锥形光纤作为接收光纤,研究了锥形光纤与黑体辐射腔的光能耦合效率,使光能耦合效率提高约40%.但与传统外置光源相比,强度还需进一步提高.球形端面光纤是将光纤端面进行熔融处理,在表面张力的作用下,在端面形成小球的光纤.已有研究报道,利用球形端面光纤可提高入射平行光、激光光源等入纤强度^[9, 10].与其他光源不同,黑体光源为朗伯发光体,研究如何利用球形端面光纤与黑体光源进行光能耦合效率具有重要的理论与实用意义.本文采用球形端面光纤为接收光纤,建立球形端面光纤与黑体辐射腔光能耦合模型,分析球形端面光纤参数、黑体腔参数等对光能耦合效率的影响.

1 光能耦合效率分析

1.1 光能耦合模型

建立的球形端面光纤端面与黑体辐射腔光能耦合模型如图1.假设黑体腔为圆柱形空腔,建立以球形端面光纤顶点为 xOy 平面,纤芯中心为坐标原点,黑体腔轴线为 z 轴的柱坐标系 (r, φ, z) .

为简化模型便于后续计算,作以下两点假设:

1) 黑体腔由同种材料构成,各处的发射系数相同,故黑体腔内温度一定时,黑体腔表面上每个黑体辐射微元的辐射强度相等.

2) 和黑体腔的尺寸(毫米量级)相比,光纤直径(微米量级)很小,因此假设球形端面光纤的端面每个单位面积微元接收到的光强均相等.

为分析光能耦合效率,首先应分析基于黑体腔的黑体辐射发光特性,进而分析球形端面光纤端面接收入射光的特点,最后结合二者分析光能耦合效率.

1.2 黑体辐射光源的发光特性

根据黑体普朗克定律,黑体辐射的光谱分布满足^[11]

$$I_0(\lambda, T) = \epsilon \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda KT}\right) - 1} \quad (1)$$

式中, ϵ 为发射系数, h 为普朗克常数, c 为光速, λ 为辐射波长, K 为玻尔兹曼常数, T 为热力学温度.

在高温下,圆柱形空腔可视为黑体发光体.取任一发光面元 dA ,其发光可视为朗伯发光体,发光强度满足式(1),光强空间分布满足式(2).即垂直于发光面方向的光强最大,偏离垂直方向的角度越大,发光强度越小,平行于发光面方向上的发光强度为零^[12].

$$I_\theta = I_0 \cos \theta \quad (2)$$

式中, I_0 为发光面在法线方向的发光强度, I_θ 为和 I_0 法线夹角为任意角度 θ 方向上的发光强度.由式(2)可知,发光面元 dA ,其单位面积上一点 O 在法线方向上的光强为 I_0 . O 点的辐射能量以球形形式向外传递,当传递一定距离 R 时,辐射出的能量分布在半径为 R 的球面上,如图2.

能够被光纤端面有效接收到的光强满足关系式

$$I_a = S_{in} \int_0^{2\pi} \int_0^\alpha I_0 \sin \theta \cos \theta d\theta d\varphi \quad (3)$$

式中, S_{in} 为光能够入射到光纤内的有效范围; α 为光能够入射到光纤内的有效孔径; I_0 为式(1)所描

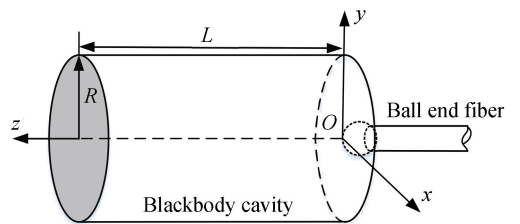


图1 光锥型黑体辐射腔光能耦合模型
Fig.1 Light-energy coupling model of light-cone blackbody radiation cavity

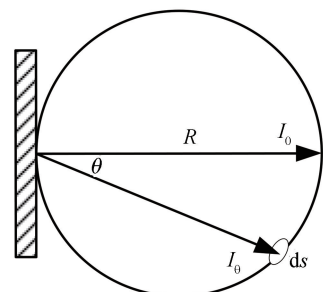


图2 一定距离处的朗伯发光体辐射强度示意图
Fig.2 Schematic diagram of Lambertian radiant intensity at a certain distance

述的黑体辐射。

由式(3)可知,耦合效率与黑体温度 T , 光纤数值孔径角 α , 进光面积 S_{in} 有关, 当光纤端面为普通平端面时, S_{in} 为纤芯面积, 但当光纤接收端面为球形时, S_{in} 与球形端面的参数有关, 下面将深入分析球形端面作为光纤接收端面时的光能耦合情况。

1.3 球形端面光纤接收入射光的特性分析

首先, 对光入射到球形端面光纤端面的情况进行分析, 如图 3 所示, 由于端面烧制为球型结构, 使得球端面上不同点的孔径角不同, 如图 3(a), 而对于球端面上同一个圆环上的不同点, 由于处在同一平面内, 其孔径角相同, 如图 3(b)。在球端面定点建立 xz 坐标系, 当光线入射在球端面时, 不同位置的孔径角范围及进光的面积不同, 从而可以得到不同球端面上不同点的耦合光强度^[10]。

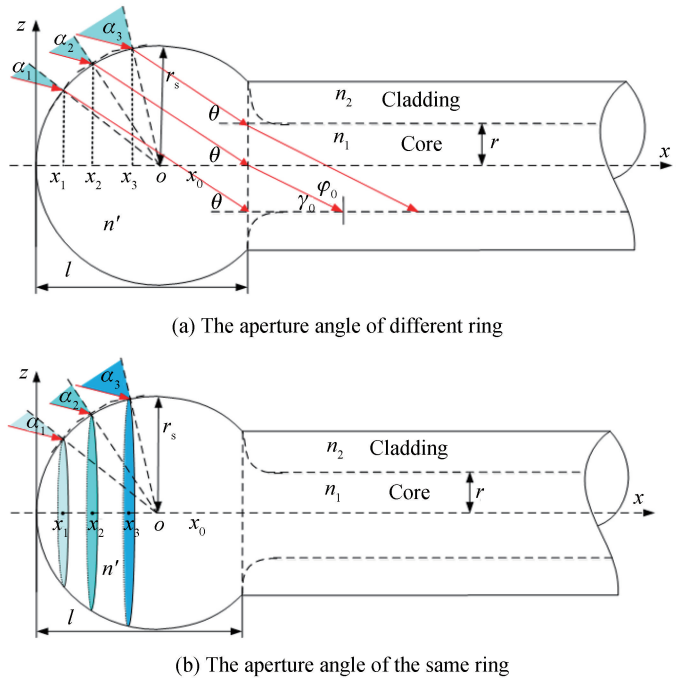


图 3 熔球型光纤端面示意
Fig.3 Schematic of the end of fused-ball fiber

根据不同情况下光线的横坐标参数 x , 建立孔径角 α 和纵坐标 z 与 x 的关系, 而 x 又与曲率半径 r 紧密关联, 从而可以求得耦合光强与球端面曲率半径 r 的关系, 由此, 可以分为以下三种情况进行讨论:

1) 当 $0 \leq x < r_s(1 - \cos \theta)$ 时, 该情况和光直接耦合进平端面情况相同, 如图 4 所示, 只有在满足孔径角范围内的光才能耦合进光纤, 并进行稳定地传输, 但是和平端面不同的是其临界角在不同位置是不相同的, 且会在 $x = r_s(1 - \cos \theta)$ 处发生翻转。

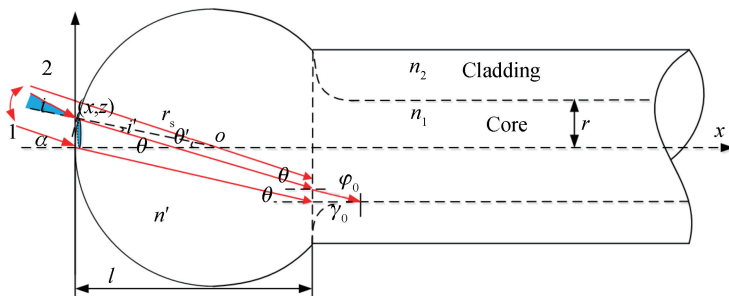


图 4 辅助光路 ($0 \leq x < r_s(1 - \cos \theta)$)
Fig.4 Auxiliary light path ($0 \leq x < r_s(1 - \cos \theta)$)

根据图 4 所示关系, 借助全反射临界条件 $\gamma_0 = \arccos\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ 及发生在纤芯和球端面分界处的折射条件满足

$$\begin{cases} n_1 \sin \gamma_0 = n \sin \theta \\ n_0 \sin i = n' \sin i' \end{cases} \quad (4)$$

可求得

$$\theta = \arcsin \frac{NA}{n'} \quad (5)$$

而 $\theta' = \arccos \frac{r_s - x}{r_s}$ 根据 $i' = \theta - \theta'$, 再一次利用折射定律, 可求得孔径角为

$$\alpha_1 = i = \arcsin \left[n' \sin \left(\arcsin \frac{NA}{n'} - \arccos \frac{r_s - x_1}{r_s} \right) \right] \quad (6)$$

此时, 可求得 $z_1 = r_s \sin \arccos \left(\frac{r_s - x_1}{r_s} \right)$, 不同圆环上的点构成有效进光面积 S .

2) 当 $r_s(1 - \cos \theta) \leq x < 0.4r_s$ 时, 该情况和光直接耦合进平端面情况不同, 如图 5 所示, 在孔径角范围内的光不能耦合进光纤, 只有满足在孔径角范围外的光才能有效地耦合进光纤纤芯内, 并进行稳定地传输.

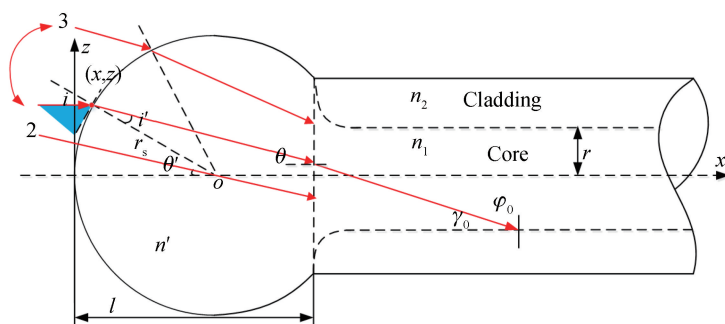


图 5 辅助光路 ($r_s(1 - \cos \theta) \leq x < 0.4r_s$)

Fig.5 Auxiliary light path ($r_s(1 - \cos \theta) \leq x < 0.4r_s$)

同 1) 原理, 可求得该情况下

$$\alpha_2 = i = \arcsin \left[n' \sin \left(\arccos \frac{r_s - x_2}{r_s} - \arcsin \frac{NA}{n'} \right) \right] \quad (7)$$

$$z_2 = r_s \sin \arccos \left(\frac{r_s - x_2}{r_s} \right) \quad (8)$$

3) 当 $x \geq 0.4r_s$ 时, 即使有光线进入到球端面, 在纤芯内也不满足全发射条件, 从而不能在纤芯内稳定地传输.

综上, 光在球端面光纤的耦合强度主要由两部分构成, 耦合强度表示为

$$I_{\text{couple}} = \int_0^{r_s(1-\cos\theta)} dx \int_0^{z_1} 2\pi dz \int_0^{\alpha_1} \sin \alpha d\alpha + \int_{r_s(1-\cos\theta)}^{0.4r_s} dx \int_{0.1854r_s}^{z_2} 2\pi dz \int_{\alpha_2}^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha d\alpha \quad (9)$$

由式(9)可知, 耦合强度与光纤数值孔径角 α 、纤芯折射率 n 、球形端面半径 r_s 参数有关.

将光纤参数 $NA = 0.275$, $n_1 = 1.496$ 代入进行仿真, 得到仿真曲线如图 6. 随着球形端头直径的增加, 耦合光能先增大后减小; 当直径约为 $82.5 \mu\text{m}$ 时, 光能耦合强度最高.

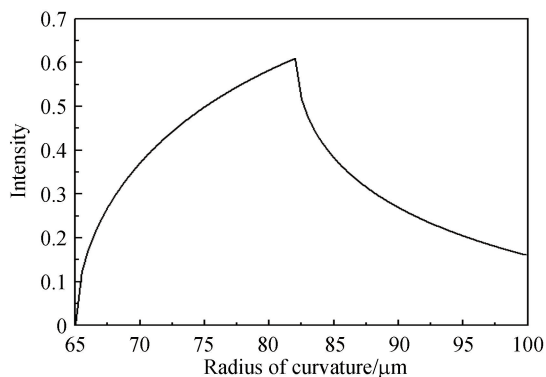


图 6 球形端面光纤端面耦合光强与曲率半径之间的关系
Fig.6 Relationship between coupling light intensity and curvature radius of the end face of spherical fiber

2 球形端面光纤与黑体辐射腔的制作

采用古河 S179C 型熔接机制作球光纤端面,在清洁放电模式下,使用光纤切割刀将剥除涂覆层的多模光纤(光纤类型选用 Corning G651.1 MMF)切平,并放置在电极放电区域,由于电极放电区域温度很高,导致光纤烧熔,在表面张力的作用下,光纤端面会形成一个小球^[13].由于放电次数、放电时间、放电强度及光纤放置的位置均会对熔球的曲率半径造成影响.通过优化放电参数,得到不同曲率半径的球端面光纤结构^[14],如图 7 所示.

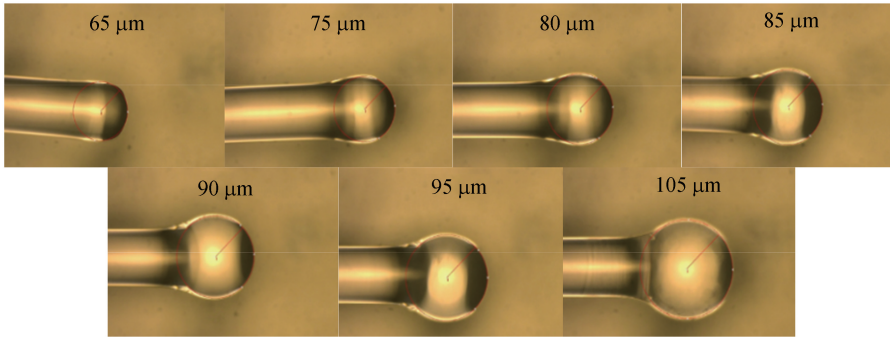


图 7 不同曲率半径的球端面光纤
Fig.7 Spherical fiber with different curvature radius

将制作完成的球形端面光纤表面涂覆黑体增强材料^[15],该黑体材料由铝酸镁粉末与高温 AB 胶混合而成,三者比例为 1…3…2^[16].再将锥形光纤置入氧化铝陶瓷管内,用高温胶密封,制作完成的黑体腔结构如图 8 所示^[17].

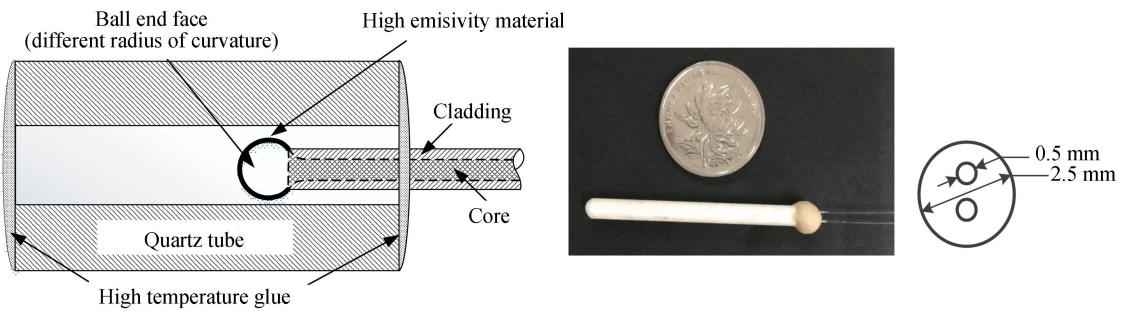


图 8 球形端面光纤涂覆黑体增强材料的黑体腔结构
Fig.8 Black-body cavity structure of spherical end-face fiber coated with black-body reinforcement

3 实验与分析

为验证上述理论分析,搭建实验系统如图 9.将平端面多模光纤曲率半径为 75~95 μm(梯度为 5 μm)的球端面光纤制作的黑体腔置入高温炉,引出光纤通过光开关再接入 ocean optics USB4000 光谱仪进行光强探测^[5].

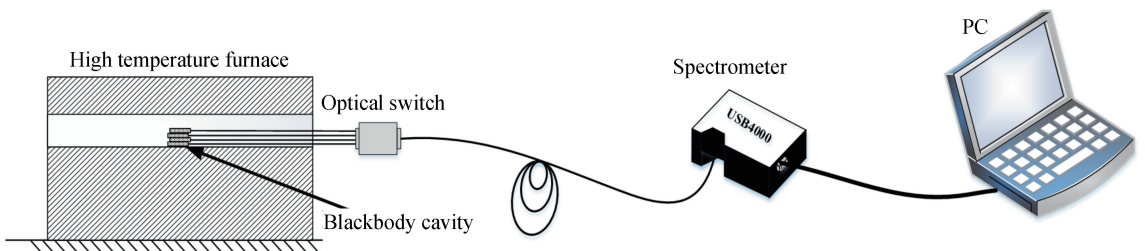


图 9 实验系统示意
Fig.9 Schematic of the experimental system

黑体辐射可产生 500~4 000 nm 的光谱,但由于实际条件限制,仅采用光谱范围为 750~1 000 nm 的光谱仪进行光谱探测,而该光谱区段并非黑体辐射强度最强区域.因此,当温度为 800 °C 以下时,耦合到光纤内的强度低,光谱仪无法探测.当 800 °C、900 °C、1 000 °C 时,光谱仪探测得到的耦合强度结果如图 10 所示.随着温度升高,黑体辐射增强,光纤接收到的光强整体增大.同一温度下,随着球形端面光纤半径增大,耦合光强先增大后减小,与平端面光纤相比,耦合强度提高约 60%.

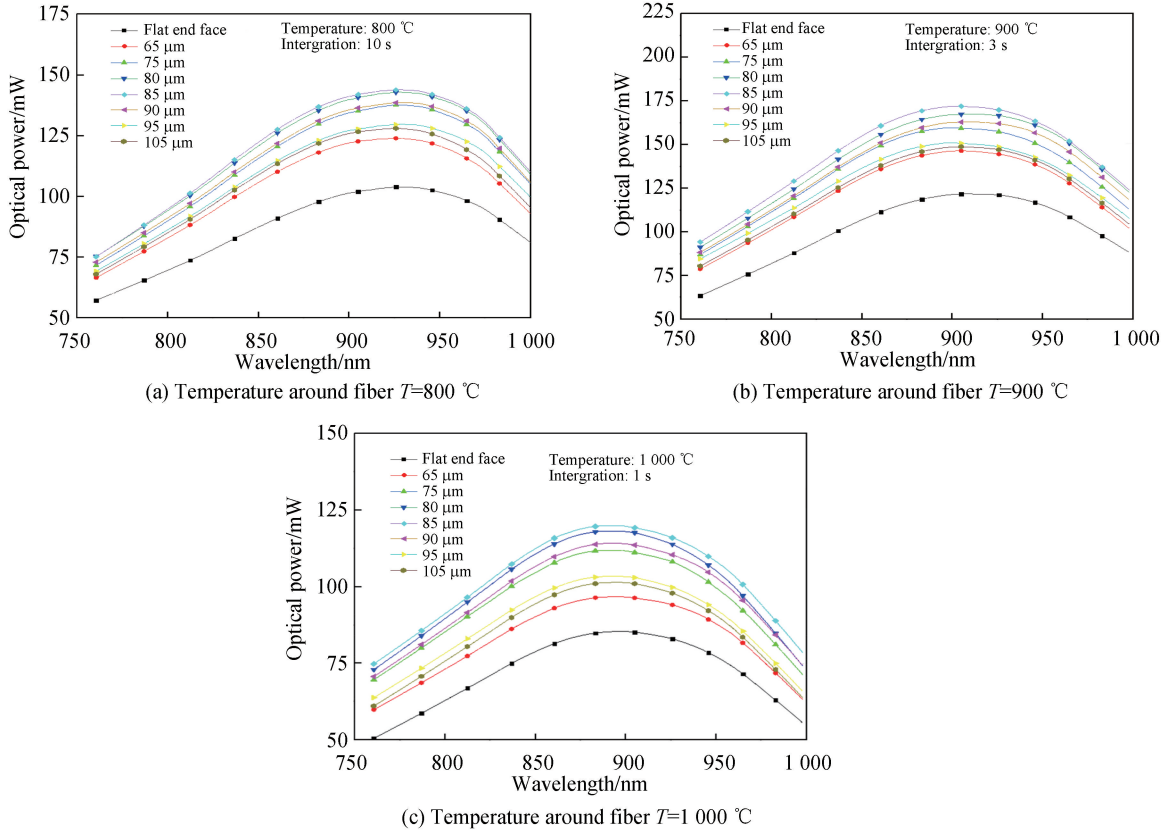


图 10 不同温度和球端面光纤直径下耦合光强与波长之间的关系

Fig.10 Relationship between coupling light intensity and wavelength at different temperatures and spherical fiber diameters

按照不同温度,将图 10 中结果按照不同曲率半径与耦合强度的关系进行整理,结果如图 11.由于实验所用曲率点数少,实验结果与仿真结果(图 6)有一定的差异,但其变化趋势相同.随着球形端面曲率增大,耦合强度先增大后减小.当球形端面光纤直径约为 85 μm 时,光纤耦合强度最高.

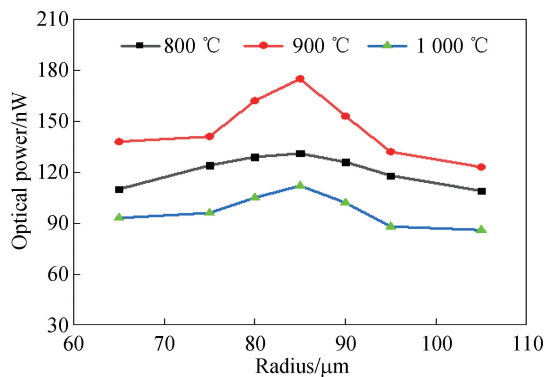


图 11 不同温度下曲率半径与耦合强度的关系

Fig.11 Relationship between curvature radius and coupling strength at different temperatures

4 结论

采用球形端面光纤为接收光纤,建立球形端面光纤与黑体辐射腔光能耦合模型,分析球形端面光纤参

数、黑体腔参数等对光能耦合效率的影响.搭建了黑体腔与球形端面光纤的光能耦合实验系统,在 800~1 000 °C 条件下开展了光能耦合实验,结果表明:随着球形端面曲率半径的增加,耦合光能先增大后减小;当曲率半径约为 85 μm 时,光能耦合强度最高.相对于平端面光纤而言,耦合效率提高约 60%.

参考文献

- [1] SONG Zu-rong, LI Xiao-yang, LI Yi-xuan, *et al.* Research on the application of optical fiber sensing technology in the nuclear power plant safety monitoring[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2017, **23**(3): 297-304.
宋祖荣,李晓洋,李懿轩,等. 光纤传感技术在核电站安全监测中的应用研究 [J]. 量子光学学报,2017,**23**(3):297-304.
- [2] 杨钰. 光纤传感技术在飞机结构健康监测中的应用研究 [D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [3] WANG Zhi-yong, WANG Ze-li, GONG Wen-ran, *et al.* Discussion on the development of high temperature strain optical measurement technology for thermal structure[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2019, **46**(6): 1-8.
王智勇,王则力,宫文然,等. 热结构高温应变光学测量技术发展探讨[J]. 强度与环境,2019,**46**(6):1-8.
- [4] 李亚. 低温黑体辐射源温控系统设计[D]. 杭州:中国计量大学,2018.
- [5] 马超. 黑体辐射测量系统设计与实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.
- [6] TIAN Zhi-peng, YU Zhi-hao, LIU Bo, *et al.* Sourceless optical fiber high temperature sensor[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(2): 195-8.
- [7] CHEN Tao, XIE Lei, DENG Yi-jun, *et al.* Optical fiber Fabry-Perot sensing system based on Blackbody radiation in high temperature applications[C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2017.
- [8] LEI Xiao-hua, XIE Lei, Qi Lian-shan, *et al.* Coupling efficiency of light intensity from the blackbody cavity into a cone-shaped optical fiber[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(7): 1707.
- [9] 马士杰. 单模光纤球形探针光波模式演变与传输分析[D]. 南京:东南大学,2018.
- [10] 王艳. 基于球形光纤耦合结构的干涉式光纤传感器的研究[D]. 天津:天津理工大学,2017.
- [11] JIAN B, DUBE P, MADEJ A A. Evaluation of the blackbody radiation shift uncertainty for NRC's strontium ion clock [C]. proceedings of the 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), F, 2016.
- [12] YANG Zhen, YANG Li, ZHANG Shi-cheng, *et al.* Infrared temperature measurement technology on lambertian based on the dual temperature and dual-band method[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, **34**(11): 2132-2135.
杨桢,杨立,张士成,等. 基于双温双波段法的郎伯体红外测温技术[J]. 工程热物理学报,2013,**34**(11):2132-2135.
- [13] 陈涛. 基于黑体光源的光纤法珀应变测量技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [14] LUO Ya-mei, LIANG Yi-ping, XIONG Ling-ling. The relation of parameters and coupling efficiency for optical fiber coupler with spherical surface[J]. *Laser Journal*, 2006, (3): 10-12.
罗亚梅,梁一平,熊玲玲. 球状光纤耦合器参数与耦合效率的关系[J]. 激光杂志,2006,(3):10-12.
- [15] 田海霞. 高温黑体腔传感器结构优化设计[D]. 秦皇岛:燕山大学,2016.
- [16] HOU Hai-li, XU Guo-yue, TAN Shu-juan, *et al.* Preparation and performance of high temperature and high infrared emissivity packing[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2016, **39**(5): 61-64.
侯海丽,徐国跃,谭淑娟,等. 高温高红外发射率填料的制备及性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, **39**(5): 61-64.
- [17] HU Zhang-zhong, WANG Kai, SHEN Yi-xin, *et al.* Analysis of ANSYS for the sensing cavity of blackbody based high-temperature fiber sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014, **27**(12): 1606-1610
胡章中,王凯,沈宜昕,等. 光纤黑体腔高温传感器感温腔体的 ANSYS 分析[J]. 传感技术学报,2014,**27**(12):1606-1610.