

379-385

红外光纤用于低温辐射测温的研究

杨文库

(长春光学精密机械学院电子工程系, 吉林, 长春, 130022)

杨超

(吉林电力勘测设计院, 吉林, 长春, 130021)

邓文荣

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 吉林, 长春, 130022)

TH 8/11.1
0551.2
TN 215

摘要 探讨了将红外光纤(束)直接与靶目标和探测器耦合,用于低温辐射测温的理论和技術,导出了光纤的有效临界角,证明了在直接耦合时,光纤(束)接收和传输的功率与光纤和靶目标表面耦合间距无关;当耦合准直角变化在±15°范围时,与准直角无关。

关键词 辐射测温, 红外光纤, 低温测温计, 非接触式

引言

③ 用于辐射测温的红外光纤,国外目前有氟化锆、氧硫化物及卤化银三种多模光纤,可实现30~150℃范围测温,分辨率可达0.39℃^[1~3]。国内已研制的氟化锆和氧硫化物红外光纤与国外相比,主要是损耗稍大。

由于在低温段测温,用红外光纤可实现非接触测温,又可克服恶劣使用环境的影响,同时还可测流速、压力等其它参量,因此受到关注。

测量心脏氧压和心脏血流输出及血液温度的医用红外多用低温测温计^[4]的发展及在生产高度自动化的冶金、机械、化工、交通运输、电力、航空航天技术等各领域对非接触低温测温 and 控温的需求,大大地促进了红外光纤测温技术的发展。本文探讨了红外光纤用于低温辐射测温的理论和技術中的一些问题。

1 理论

靶目标温度愈低,红外辐射所占比例愈大。我们选用红外光纤做拾光型传感器,它与信号处理和显示部分一起构成红外光纤低温辐射温度计。为使系统能良好工作,应保证靶目标辐射和红外光纤传输特性及探测器的响应光谱匹配。

1.1 子午光线和斜光线

通过光纤中心轴的任何平面都称子午面,位于子午面内的光线称子午光线。入射光纤的光线经次级全反射后不经过光纤轴的光线,称斜光线。斜光线的数值孔径 $N \cdot A_s$ 为

$$N \cdot A_s = n_0 \sin \phi_s = \frac{\sin \phi_c}{\cos \gamma} = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\cos \gamma} = \frac{N \cdot A_M}{\cos \gamma} \quad (1)$$

本文1995年9月12日收到,修改稿1996年2月14日收到

式(1)中 ϕ_s 为斜光线孔径角, γ 为轴倾角, ϕ_c 为子午光线孔径角. 由于 $\cos\gamma < 1$, 所以 $N \cdot A_T$ 大于子午光线数值孔径 $N \cdot A_M$. 在长度为 L , 芯直径为 D 的光纤中, 斜光线全反射次数为

$$\eta_l = \frac{L \cdot \sin\phi}{D \cos\gamma \sqrt{(n_1/n_2)^2 - \sin^2\phi}} = \frac{\eta_M}{\cos\gamma}, \quad (2)$$

显然, η_l 大于子午光线全反射次数 η_M . 斜光线的光程 l_l 为

$$l_l = l_M = \frac{L}{\cos\theta} = \frac{L}{\sqrt{1 - (\frac{\eta_0}{\eta_1} \sin\phi)^2}}, \quad (3)$$

式(3)中 l_M 为子午光线光程.

1.2 有效临界角 ϕ_e

对弱导光纤来说, $n_1 - n_2 \leq 1$. 由式(1)可知, ϕ_c 很小. 即弱导光纤仅能收集很窄范围 ($< \phi_c$) 内的子午光线的辐射能. 当 $\sin\phi_c = \cos\gamma$ 时, $\phi_c = 90^\circ$, 可收集入射辐射的全部斜光线. 说明光纤接收和传输的主要是斜光线的辐射能. 表征光纤集光能力的临界角 ϕ_e 应大于 ϕ_c , 且小于(或等于) ϕ_s . 我们称 ϕ_e 为有效临界角.

1.3 红外光纤(束)与靶目标直接耦合时接收和传输的辐射功率

首先探讨光纤轴垂直于靶目标表面时接收和传输的辐射功率.

芯半径为 a 的多模光纤尺寸与被测表面尺寸相比时, 通常可将被测表面视为无穷大的具有均匀温度 T 的朗伯辐射表面, 两者相对位置如图 1 所示.

辐射表面面积元 dA_T 辐射到单根光纤端面面积元 dA_s 上, 并被长为 L 的光纤接收, 传输输出的功率 dP_{out} 为

$$dP_{\text{out}} = \epsilon_\lambda(T) L_{\text{bl}}(T) \cos\phi_T \rho^2 e^{-\alpha} \cdot S \cdot dA_T d\omega_s. \quad (4)$$

$L_{\text{bl}}(T)$ 和 $W_{\text{bl}}(T)$ 分别为靶目标朗伯辐射表面的辐亮度和辐出度, $L_{\text{bl}}(T) = W_{\text{bl}}(T)/\pi$. $\epsilon_\lambda(T)$ 为其光谱辐射率. dW_s 为光纤端面面积元 dA_s 对辐射表面元 dA_T 的中心所张的立体角. 光纤端面与靶目标距离为 h . τ 是光线在光纤输入端和输出端由于空气折射率 n_0 和光纤芯料折射率 n_1 之差引起的透过率, 下标 S 和 T 分别表示参量属于光纤的和辐射表面的.

$$\tau_s(\phi, \phi_T) = 1 - \frac{1}{2} [\rho_\perp(n_0, n_1) + \rho_\parallel(n_0, n_1)], \quad (5)$$

$$\rho_\perp = \left[\frac{\sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2\theta} - n_1 \cos\theta}{\sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2\theta} + n_1 \cos\theta} \right]^2, \quad (6)$$

$$\rho_\parallel = \frac{\sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2\theta} - n_0^2 \cos\theta}{\sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2\theta} + n_0^2 \cos\theta}, \quad (7)$$

式中 ρ_\perp 和 ρ_\parallel 分别代表光波振幅与表面垂直和平行部分的反射率, $\theta(\phi, \phi_T)$ 是光线在光纤端面入射后的折射角.

式(4)中 ρ 为光在光纤中传输时在芯和皮边界的反射率. 理论上全反射时 $\rho(\phi, \phi_T) = 1$, 实际上 $\rho(\phi, \phi_T) < 1$, 所以光在光纤内全反射 η 次后, 光功率只保存下来 ρ^η 部分. 由图 1 可知

$$\cos \gamma = \{1 - [(R, \sin \phi)/a]^2\}^{1/2}. \quad (8)$$

由式(2)和式(8)可求出 η ,

$$\eta = Ln_0 \sin \phi / 2(n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \phi)^{1/2} (a^2 - R^2 \sin^2 \phi_T)^{1/2}, \quad (9)$$

当角 $\gamma = 0$ 时, $\eta = \eta_M$; 当 $\gamma \neq 0$ 时, $\eta = \eta_l$.

将式(8)代入式(1), 并用有效临界角 ϕ_c 代替子午光线和斜光线的孔径角, 得到

$$[1 - (R, \sin \phi_T/a)^2]^{1/2} \sin \phi \leq \sin \phi_c. \quad (10)$$

式(10)为图 1 所示情况下, 光线在光纤中传输的条件, 它将起校正入射角 ϕ 积分限的作用. 式(4)中的 S 是反应这一条件的阶跃函数,

$$S = \begin{cases} 1 & \text{当 } [1 - (R, \sin \phi_T/a)^2]^{1/2} \sin \phi \leq \sin \phi_c \text{ 时,} \\ 0 & \text{当 } [1 - (R, \sin \phi_T/a)^2]^{1/2} \sin \phi > \sin \phi_c \text{ 时.} \end{cases} \quad (11)$$

式(4)中的 $e^{-\alpha l}$ 表示光在光纤中的传输时, 由于吸收和散射引起的光的损耗. $\alpha (m^{-1})$ 为衰减系数. 将式(5)~(11)代入式(4)中, 可计算出红外光纤接收和输出的光谱功率为

$$\rho_{\text{out}} = 4\epsilon_s(T)W_{\omega}(T) \int_0^{\pi/2} M(\phi) d\phi. \quad (12)$$

式(12)中

$$M_\phi = \int_{R_s=0}^a R_s dR_s \int_{\phi_T=0}^{\pi} \cos \phi \sin \phi e^{-\alpha l} \cdot S \cdot \tau_s^2(\phi, \phi_T) \rho^2(\phi, \phi_T) d\phi_T. \quad (13)$$

红外光纤束是由 N 个芯半径为 a 的多模红外光纤集束而成, 则红外光纤束接收和输出的光谱功率为

$$\rho_{\text{beam}} = N\rho_{\text{out}}, \quad (14)$$

当光纤轴与靶目标表面不垂直, 其夹角为 β 情况下(见图 2), 光纤接收和输出的光谱功率为

$$P_{\text{beam}}^1 = \frac{1}{\pi} \epsilon_s(T)W_{\omega}(T) \int_0^{\pi/2} M(\phi, \beta) d\phi, \quad (15)$$

$$M(\phi, \beta) = \int_0^{2\pi} d\phi_s \int_0^a R_s dR_s \int_0^{2\pi} \sin \phi (1 - \sin^2 \phi_T \sin^2 \beta)^{1/2} \cos \phi e^{-\alpha l} \tau_s^2 \rho^2 S' d\phi_T, \quad (16)$$

式中 S' 是在光纤中光线传输条件式(1)所决定的阶跃函数,

$$S = \begin{cases} 1 & \text{当 } \{1 - [R, \sin(\phi_s - \phi_T)/a]^2\}^{1/2} \sin \phi \leq \sin \phi_c \text{ 时,} \\ 0 & \text{当 } \{1 - [R, \sin(\phi_s - \phi_T)/a]^2\}^{1/2} \sin \phi > \sin \phi_c \text{ 时.} \end{cases} \quad (17)$$

$$\eta' = Ln_0 \sin \phi / 2(n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \phi)^{1/2} [a^2 - R_s^2 \sin^2(\phi_s - \phi_T)]^{1/2}, \quad (18)$$

当 $\beta=0$ 时,式(15)变成了式(12),式(16)变成了式(13).

显然在这种情况下,红外光纤束接收和输出的功率为

$$\rho'_{\text{接收}} = N \cdot \rho'_{\text{输出}}. \quad (19)$$

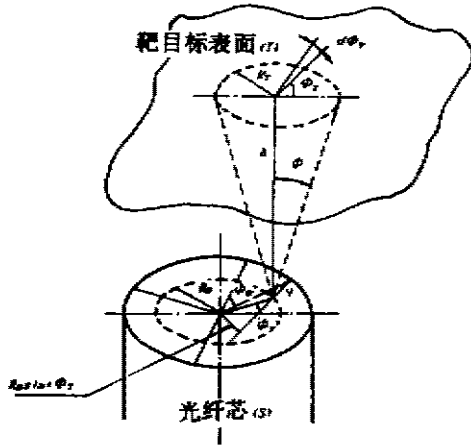


图1 光纤轴垂直靶目标表面
Fig. 1 Optical fiber axis vertical to the target surface.

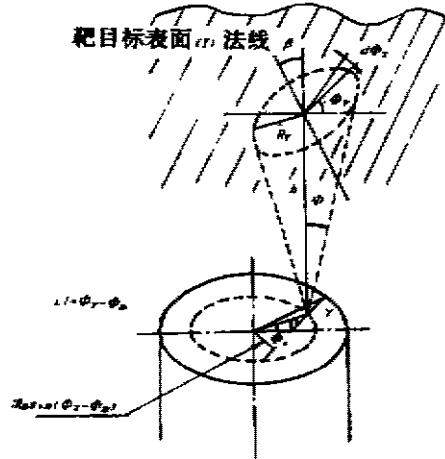


图2 光纤轴不垂直靶目标表面
Fig. 2 Optical fiber axis not vertical to the target surface.

1.4 探测器接收的功率

我们讨论简单而又实用的光纤(束)与探测器直接耦合时的情况(见图3).众所周知,光线在光纤输入端的入射角 φ 等于光纤输出光线的出射角.这样,从光纤输出端单位面积和 φ 方向单位立体角的输出功率可由式(15)得到,

$$L_{\text{out}}(\varphi) = \epsilon_2(T)W_{\text{in}}(T)M(\varphi, \beta) / 2a^2\pi^2. \quad (20)$$

探测器接收到的光谱功率为

$$P_{D\lambda} = \int_0^{\varphi_D} R_D dR_D \int_0^{2\pi} d\varphi_2 \int_0^{\varphi_D} d\varphi \int_0^{2\pi} S_D L_{\text{out}}(\varphi) \sin \varphi d\varphi_D, \quad (21)$$

式(21)中 φ_D 是探测器的视场角, S_D 是阶跃函数,用来校正积分限,

$$S_D = \begin{cases} 1 & \text{当 } R_D^2 \leq b^2 \text{ 时;} \\ 0 & \text{当 } R_D^2 > b^2 \text{ 时.} \end{cases} \quad (22)$$

式(22)中 b 是探测器灵敏面半径, R_D 为

$$R_D = R_s \cos \varphi_D + \sqrt{h_D^2 \tan^2 \varphi - R_s^2 \sin^2 \varphi_D}. \quad (23)$$

如果用红外光纤束,则探测器接收到的光谱功率为

$$P_{\text{总}} = N \cdot P_{\text{DA}} \quad (24)$$

红外光纤测温仪中采用红外光纤束,若探测器的光谱灵敏度为 S_{DA} ,则探测器输出的电压信号为

$$V_D = \int_{\lambda_s}^{\lambda_L} P_{\text{总}} \cdot S_{\text{DA}} d\lambda, \quad (25)$$

式中(25) λ_L 为光纤透过率长波限和探测器光谱响应长波限中之短者, λ_s 为光纤透过率短波限和探测器响应短波限中之长者。

2 结果与讨论

由于小于有效临界角 φ 内的子午光线和斜光线都可在光纤中传输,所以有效临界角 φ 确定了辐射表面上可被光纤接收和传输的取样面积,其直径 d_T 为

$$d_T = 2(\text{htg}\varphi + a), \quad (26)$$

这样即使靶目标辐射表面是有限的,只要取样面积 d_T 被包含其中,前面的理论就适用于指导设计直接耦合式的红外测温仪。

由公式(12)和(15)可知,不论光纤轴与靶目标表面垂直与否,光纤(束)接收和传输的功率与光纤(束)端面到靶目标表面的距离 h 无关。我们的实验结果也证实了这一点。这样测温仪的定标和使用状况不受 h 影响,这是直接耦合红外光纤测温的很重要的优点。 h 的大小只影响空间分辨率。当 $h \rightarrow 0$ 时,直接耦合红外光纤测温具有最高的空间分辨率,这时取样面积等于光纤(束)直径。

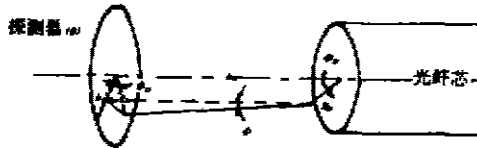


图3 探测器和光纤直接耦合
Fig. 3 Direct coupling between the detector and the optical fiber

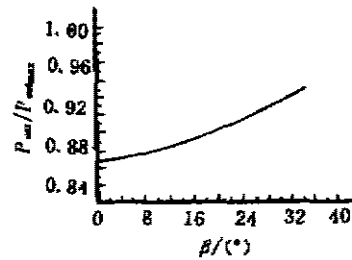


图4 相对输出功率与准直角 β 的关系
Fig. 4 Relationship between the relative output power and the collimating angle β

图4给出基于方程(15)给出的相对传输功率与准直角 β 的关系。当准直角 β 变化 $\pm 15^\circ$ 时,光纤接收和传输功率变化小于 1%。这样,用直接耦合红外光纤(束)测温仪测温时,在准直角变化 $\pm 15^\circ$ 内,可认为光纤(束)接收和传输功率与准直角 β 无关。

由公式(21)可知,探测器接收到的功率与光纤输出端面到探测器的距离无关。当光纤轴与探测器接收面的法线夹角在 $\pm 15^\circ$ 内变化时,也不影响探测器所接收到的功率。

上述直接耦合的优点,再加上光纤的可挠性和耐高温等优点,使这种测温仪的定标和使用非常方便。特别是在使用条件非常恶劣的情况下,如用于体内激光手术时的温度监控,这

些优点就更突出了。

我们研制出用液氮制冷的 PbS(日本 P819 型)探测器,采用芯料为 $As_{33}S_{67}$ 玻璃,包层为 $As_{35}S_{65}$ 玻璃的硫化物红外光纤束直接耦合式的红外光纤测温仪,可实现 $80^{\circ}\sim 300^{\circ}$ 的低温段测温。最小可分辨温度为 $0.5^{\circ}C$,稍高于理论值。主要问题在于致冷时探测器窗口结霜难以克服。

3 结语

我们研制了红外光纤束与靶目标和探测器分别直接耦合的低温测温仪,实现了 $80^{\circ}\sim 300^{\circ}$ 的辐射低温测量。理论和实验研究表明,这种测温仪的优点是,不与靶目标接触,红外光纤束接收到的功率与靶目标的距离和准直角无关,探测器接收到的功率也与红外光纤束的距离和准直角无关,最高空间分辨率为光纤芯径,另外,定标简单,使用方便,可在恶劣环境下测温。

参考文献

- 1 Belotserkovsky E, Zur A. *SPIE*, 1992, 106~114.
- 2 Mordon S R, Buys B, Brunetaud J M, et al. *SPIE*, 1989, 83~88.
- 3 Mordon S R, Cornil A B, Brunetaud J M. *Applied Optics*, 1987; 26(4): 607~609
- 4 Zur A, Katzir A. *Applied Optics*, 1987; 26(7): 1201~1206
- 5 Welty J R. *Engineering Heat Transfer*, New York: John Wiley and Sons, Inc., 1978. 任泽需等译, 工程传热学, 北京: 人民教育出版社, 1982: 318~321.
- 6 Snyder A W, Love J D. *Optical Waveguide Theory*, Canberra: Pergmon Press (Aust.) Pty. Ltd., 1990. 周幼威等译, 光波导理论, 北京: 人民邮电出版社, 1991: 31~33.
- 7 刘德森, 殷宗敏. 纤维光学, 北京: 科学出版社, 1987: 54~101.
- 8 Satito M, Takizawa M. *Applied Optics*, 1985; 24(15): 2304~2308.
- 9 Snyder A W, Mitchell D J. *Journal of the Optical Society of America*, 1974; 64(5): 599~607
- 10 Pask C, Snyder A W. *Applied Optics*, 1976; 15(5): 1295~1298.

STUDY ON RADIATION TEMPERATURE MEASUREMENT WITH INFRARED FIBER AT LOW TEMPERATURE

Yang Wenku

*(Department of Electronic Engineering, Changchun Institute of
Optics and Fine Mechanics, Changchun, Jilin 130022, China)*

Yang Tao

(Jilin Electric Prospect Design Institute, Changchun, Jilin 130021, China)

Deng Wenrong

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract The theory and technique of radiation temperature measurement with infrared fiber (bundle) at low temperature were systematically studied when the infrared optical fiber (bundle) was directly coupled with the target surface and the detector. The effective critical angle of the optical fiber was derived. It was proved that with direct coupling, the received and transmitted power of optical fiber (bundle) does not depend on the coupling distance between the target surface and the optical fiber, and does not depend on the collimating angle between the optical fiber and target surface when the coupling collimating angle is changed within $\pm 15^\circ$.

Key words radiation temperature measurement, infrared optical fiber, low temperature thermometer