

文章编号:1674-7607(2025)08-1211-08

DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2025.240333

不同波段下燃气轮机燃烧室辐射测温误差分析

樊雨骐¹, 廖志弘¹, 金其文¹, 林志明¹, 薛志亮¹, 周永刚¹,
张涌新², 吴学成^{1,2}

(1. 浙江大学 能源高效清洁利用全国重点实验室, 浙江杭州 310027;

2. 浙江大学嘉兴研究院, 浙江嘉兴 314000)

摘要: 针对燃气轮机燃烧室辐射测温中杂散辐射信号干扰测温准确度的问题,建立了考虑发射率、高温剩余壁面反射、高温燃气吸收/辐射的辐射测温物理模型,并提出求解真实温度的误差修正模型。在红外热像仪3个不同工作波段下,定量分析了模型输入参数的灵敏度指数。结果表明:即使在燃气透射率较高的波段,燃气的影响不可忽略,当忽略燃气影响时,工作波段为短波红外和中波红外的热像仪分别会产生最大9.7%和5.5%的温度误差;不同工作波段下输入参数的灵敏度指数不同,灵敏度指数较小的输入参数允许有较大的测量不确定度,而对于灵敏度指数较大的输入参数,则需要对其进行准确测量。

关键词: 燃气轮机; 燃烧室; 辐射测温; 误差分析

中图分类号:TK121

文献标志码:A

学科分类号:470.30

Analysis of Radiation Thermometry Errors in Gas Turbine Combustors Under Different Spectral Bands

FAN Yuqi¹, LIAO Zhihong¹, JIN Qiwen¹, LIN Zhiming¹, XUE Zhiliang¹,
ZHOU Yonggang¹, ZHANG Yongxin², WU Xuecheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China; 2. Jiaxing Institute of Zhejiang University, Jiaxing 314000, Zhejiang Province, China)

Abstract: To address the issue of stray radiation signals interfering with measurement accuracy in radiation thermometry of gas turbine combustors, a physical model was established that accounts for emissivity, high-temperature residual wall reflections, and high-temperature gas absorption/radiation. An error correction model for determining true temperatures was subsequently developed. Quantitative sensitivity indexes of model input parameters were analyzed across three distinct operational bands of an infrared thermal imager. Results show that even in spectral bands with high gas transmittance, gas influence remains non-negligible. Neglecting gas effects causes maximum relative errors of 9.7% and 5.5% for short-wave infrared (SWIR) and mid-wave infrared (MWIR) imagers, respectively. Sensitivity indexes of input parameters vary across operational bands. Parameters with lower sensitivity indexes can tolerate greater measurement uncertainties, whereas those with higher indexes require precise measurement.

Key words: gas turbine; combustor; radiation thermometry; error analysis

收稿日期:2024-06-03 修订日期:2024-08-11

基金项目:中央高校基本科研业务专项资金资助项目(2022ZFJH004)

作者简介:樊雨骐(2000—),男,浙江丽水人,硕士,主要研究方向为燃气轮机辐射测温技术。

吴学成(通信作者),男,教授,博士,E-mail:wuxch@zju.edu.cn。

目前,燃气轮机不断向高功率、高效率、低排放方向发展^[1],其功率及效率的提高意味着必须要提高燃气的进口温度。以重型燃机为例,E级、F级的进口温度分别约为1 200与1 400 °C^[2],H级、J级的进口温度甚至可达到1 430~1 600 °C^[3]。进口温度的提升对燃气轮机各部件的耐高温性提出了更高的要求。燃烧室作为燃气轮机的核心部件,一方面承受着极大的热负荷,另一方面承受着低循环的热疲劳和高温蠕变,此外还有热腐蚀等^[4]。两方面因素的共同作用下,燃烧室的使用寿命大大缩减,从而燃气轮机工作的可靠性降低。因此,燃气轮机燃烧室内壁面温度的准确、实时测量显得至关重要。

目前,燃烧室壁面温度测量方法一般可以分为接触式测温以及非接触式测温。接触式测温包括了热电偶、热电阻、示温漆、晶体测温等^[5-6]。其中,热电偶、热电阻容易受到电磁干扰,并且多点测温还需要连接复杂的线路,在燃烧室高温高压的环境下,热电偶、热电阻容易损坏失效。示温漆和晶体测温只能用于测量物体表面的最高温度,难以实现实时测量。非接触式测温主要以辐射法为主,该方法通过收集物体发射出的辐射信号进行温度测量。由于是非接触式测温,辐射测温系统的探测器可以安装于燃烧室外部,辐射信号通过光路传输,有效避免了高温恶劣环境对探测器部分产生影响,从而实现较长时间的温度监测;同时,辐射测温法能够避免破坏燃烧室壁面的温度场以及燃烧室内部的流场,具有测量速度快、无滞后性等优点。目前,主要的辐射测温装置包括红外点温仪和红外热像仪。

尽管辐射测温法优点很多,但应用到燃气轮机燃烧室中仍存在许多问题。燃烧室内部是由高温高压燃气与热端部件构成的环境,杂散辐射信号的引入会给测温的准确度带来影响^[7]。现有研究表明^[8],影响辐射测温精确度的主要因素包括待测表面发射率的准确性、高温燃气的吸收与辐射、高温剩余壁面的反射辐射等。针对上述影响因素,许多学者对测温误差进行了分析。高山^[9]结合 HITEMP 高温分子光谱数据库得到高温高压下气体的辐射吸收性,计算了高温燃气对涡轮叶片辐射测温的误差参考范围并提出解决方案;黄云伟^[10]通过建立连铸二冷区铸坯表面辐射测温物理模型,研究了不同环境温度和介质温度对测温结果的影响,并分析了各个影响因素的敏感性;李云红等^[11]推导了常规环境下被测物体表面真实温度的通用公式,并分析了不同因素对热像仪测量精度的影响。目前,国内鲜有针对燃气轮机燃烧室辐射测温误差分析的相关

报导。

为分析燃气轮机燃烧室辐射测温中的误差来源及其对误差的影响,本文以采用红外热像仪测温的方式为例,通过创建考虑多方面影响因素的燃气轮机燃烧室辐射测温误差修正模型,分别计算红外热像仪不同工作波段下影响因素所造成的误差,并分析测温影响因素作为模型输入参数时的灵敏度,以期为燃气轮机燃烧室辐射测温探测器工作波段的选择以及测温误差的修正提供参考。

1 研究方法

1.1 误差来源分析

图 1 为燃烧室辐射测温的测温方案和物理模型,其中 Φ 为辐射功率; T 为温度; ϵ 为发射率; τ 为吸收率; λ 为波长;下标 s、h、g 分别表示待测壁面、剩余高温壁面和高温燃气。图 1(a)为本研究的燃烧室辐射测温热像仪布置方案,红外热像仪安装在燃烧室外侧,通过预先安装在燃烧室壁上的红外观察窗以及光学内窥通道,接收来自观察窗口正对面燃烧室内壁面的红外辐射信号,但在实际测温过程中红外热像仪靶面接收到的能量包括 Φ_s 、 Φ_h 和 Φ_g ,如图 1(b)所示。其中,主要的误差来源包括表面发射率误差、高温剩余壁面反射辐射误差、高温燃气吸收/辐射误差。此外,在实际测温过程中,红外观察窗也会一定程度上吸收或辐射一部分能量,而针对不同工作波段可以使用该波段下高透射率的视窗材料来降低由视窗自身吸收或辐射引入的干扰,并且由于观察窗所造成的误差较为稳定,可通过预先标定的方法进行修正,本研究不考虑红外观察窗的影响。

1.1.1 表面发射率误差

目前常见的亮度法测温需要提前估计或者测量待测表面的发射率,并根据发射率对温度进行修正,所以表面发射率设置值的准确性也直接影响到温度修正的准确性。燃烧室内壁面的发射率理论上是温度、波长、视角和表面状态(氧化、腐蚀)的函数,所以表面真实发射率的确定是辐射测温过程中的难点。

燃气轮机的燃烧室壁面材料通常为耐高温的镍基合金(如 Inconel 718),其表面发射率在中红外波段处于较低水平,在中波红外段(3~5 μm)为 0.6~0.8,在长波红外(7~14 μm)处降至 0.5 以下^[12]。近年来,热障涂层(TBC)被广泛应用于燃气轮机燃烧室内壁面,用于提升燃烧室的承温能力^[13]。热障涂层的发射率在长波红外波段(7~14 μm)接近于 1,对于在该波段下的辐射测温非常有利^[14]。而在

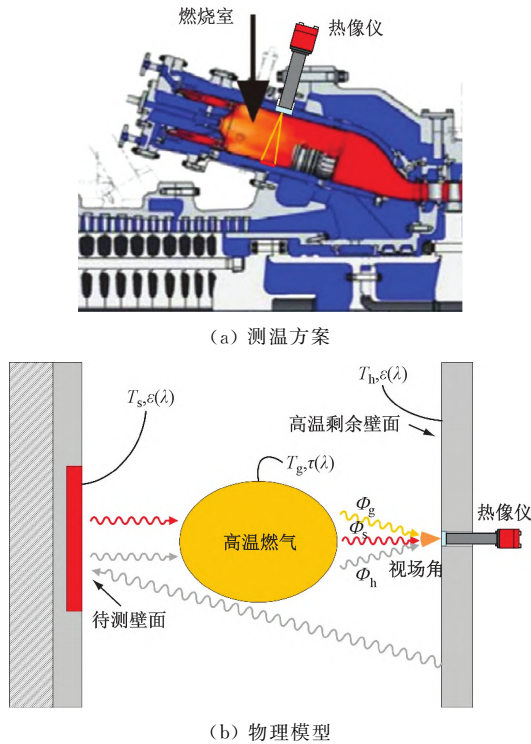


图 1 燃烧室辐射测温的测温方案和物理模型

Fig. 1 Measurement scheme and physical model for combustor radiation thermometry

中波红外波段(3~5 μm)热障涂层的发射率在 0.3 左右^[15],甚至更低。低发射率会导致红外探测器所接收到的待测表面辐射能量低于同温度下黑体发出的能量,且会造成其反射能力较强,引入一部分来自环境的反射辐射,上述均为探测器无法自动识别且需人工处理的误差来源。

1.1.2 高温剩余壁面反射辐射误差

在燃烧室辐射测温过程中,投至红外探测器的有效辐射除了待测表面自身的辐射以外,还有来自周围高温部件投射到目标区域后被反射的辐射,则辐射测温系统接收到的总能量 $E_r(\lambda)$ 为

$$E_r(\lambda) = \epsilon(\lambda)E(\lambda, T_i)_s + \rho(\lambda)E(\lambda)_h \quad (1)$$

式中: $E(\lambda, T_i)_s$ 为与被测目标温度 T_i 相同的黑体的光谱辐射强度; $\rho(\lambda)$ 为被测目标的反射率; $E(\lambda)_h$ 为由高温部件引入的反射辐射强度。

研究显示,在不理想的测温环境下,反射辐射量占红外传感器接收总辐射量的比例高达 75%,引入的测温误差不可忽略,且反射辐射一直存在,只能利用有效的数据处理方法进行修正^[16]。在燃气轮机燃烧室测温案例中,反射辐射主要来自探测器可视范围以外的区域,包括燃料喷嘴、其余燃烧室壁、排烟口等,其中某些区域的温度甚至远高于探测器测量的区域。高温部件反射辐射能量与待测表面的发射率以及高温部件温度相关,合理估算并修正该部

分造成的温度误差在燃烧室壁面辐射测温中非常重要。

1.1.3 高温燃气吸收/辐射误差

燃气轮机大多以甲烷为燃料,燃烧产物主要包括 H_2O 、 CO_2 和 N_2 ,以及少量的 CO 、 NO 、 SO_2 、 O_2 、 H_2 和其他少量种类。其中,以 H_2O 、 CO_2 气体为主的高温燃气对目标热辐射的影响较大,一方面会对目标辐射进行选择吸收,使目标辐射强度衰减,另一方面高温燃气自身会选择性发射出部分辐射能量,使得系统接收的热辐射增加^[7]。目前,高温燃气的温度高达 1 200~1 400 °C,足以在某些波长下产生比待测壁面更高的辐射能量,因此会引入较大的误差。

针对高温燃气的影响,常见的解决办法是根据燃气的吸收特性,选择合适的测量波段以避免燃气的强吸收。图 2 为基于 HITRAN 气体光谱数据库^[17]计算得到的在温度为 1 473 K、压强为 2.0 MPa 条件下 H_2O 和 CO_2 体积分数分别为 10% 和 5% 的混合气体的光谱透射率曲线。由图 2 可知, CO_2 和 H_2O 在近红外到中红外存在透射率较高的(在 0.98~1 之间)波段,选用这些波段进行测温引入的干扰辐射信号更少,主要波段有近红外(1、1.6、2.3 μm 附近)、中波红外(3.9 μm 附近),而在长波红外(10 μm 附近)透射率在 0.60 左右。

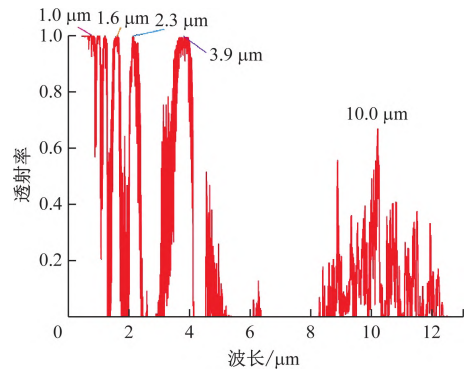


图 2 CO_2 和 H_2O 气体的光谱透射率谱

Fig. 2 Spectral transmittance spectra of CO_2 and H_2O

1.2 误差修正模型

由上述分析可知,在实际燃烧室内壁面温度测量过程中,以上误差来源往往会削弱或增强红外热像仪接收到的有效辐射,从而导致热像仪表观温度与目标真实温度不一致。为了建立燃烧室辐射测温中热像仪表观温度与目标真实温度之间的对应关系,建立一个考虑多个误差来源的辐射测温物理模型,并推导出计算目标真实温度的误差修正模型。

根据普朗克定律,黑体光谱辐射强度 $E(\lambda, T)$

在波长方向上的分布规律可以表示为

$$E(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} / \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

式中: T 为温度; c_1 为第一辐射常数, 其值为 $3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; c_2 为第二辐射常数, 其值为 $1.44 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

根据 3 大辐射来源可知, 红外热像仪接收到的辐射强度 E_r [18] 为

$$E_r = A_s d^{-2} \left[\tau_\lambda \epsilon_\lambda \int_{\Delta\lambda} E(\lambda, T_s) d\lambda + \tau_\lambda (1 - \alpha_\lambda) \epsilon_\lambda \int_{\Delta\lambda} E(\lambda, T_h) d\lambda + \epsilon_{g\lambda} \int_{\Delta\lambda} E(\lambda, T_g) d\lambda \right] \quad (3)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为热像仪探测器的工作波段; ϵ_λ 为待测壁面的发射率, 即剩余高温壁面的发射率; α_λ 为待测壁面的吸收率; τ_λ 为燃气透射率; $\epsilon_{g\lambda}$ 为高温燃气的发射率; $E(\lambda, T_s)$ 、 $E(\lambda, T_h)$ 、 $E(\lambda, T_g)$ 分别为待测壁面温度 T_s 、剩余高温壁面温度 T_h 、高温燃气温度 T_g 下的黑体光谱辐射强度; A_s 为热像仪视角所对应的可视面积; d 为目标到热像仪之间的距离。

根据灰体假设简化公式, $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda$, $\epsilon_{g\lambda} = 1 - \tau_\lambda$ 。

热像仪探测器接收工作波段上的入射辐射总能量, 并自动响应产生与能量有关的电信号, 该信号可表示为

$$V = A_s A_R d^{-2} \left[\tau_\lambda \epsilon_\lambda \int_{\Delta\lambda} R_\lambda E(\lambda, T_s) d\lambda + \tau_\lambda (1 - \alpha_\lambda) \epsilon_\lambda \int_{\Delta\lambda} R_\lambda E(\lambda, T_h) d\lambda + \epsilon_{g\lambda} \int_{\Delta\lambda} R_\lambda E(\lambda, T_g) d\lambda \right] \quad (4)$$

式中: V 为探测器响应产生的电信号; A_R 为热像仪透镜的面积; R_λ 为探测器的光谱响应度, 对于某台确定的仪器, 其为常值。

由于本文对 3 个较短的工作波段进行分析, 可以将发射率 $\epsilon(\lambda)$ 和透射率 $\tau(\lambda)$ 视为常值。取常数 $K = A_s A_R d^{-2} R_\lambda$ 。同时令 $I(T) = \int_{\Delta\lambda} E(\lambda, T) d\lambda$, 表示温度为 T 的黑体在波段 $\Delta\lambda$ 上的辐射强度。式(4)可简化为

$$V = K [\tau \epsilon I(T_s) + \tau (1 - \epsilon) \epsilon I(T_h) + (1 - \tau) I(T_g)] \quad (5)$$

则来自待测壁面的真实辐射信号强度为

$$I(T_s) = \frac{V - K [\tau (1 - \epsilon) \epsilon I(T_h) + (1 - \tau) I(T_g)]}{\epsilon K \tau} \quad (6)$$

该式即为燃气轮机燃烧室辐射测温的误差修正模型, 其中 V 由红外热像仪直接测得, K 为常值, 可计算得到, 待测壁面的温度可通过 $T_s = I^{-1}(T_s)$ 计算得到。使用该模型对辐射测温误差进行修正需要

预先测量或估计的参数包括 ϵ 、 τ 、 T_g 、 T_h , 上述参数的准确性直接影响了模型计算温度的准确性, 因此需要评估上述参数的不确定性对测温偏差的影响, 本文采用灵敏度分析(SA)方法。

1.3 模拟方法

灵敏度分析是研究某模型各输入值的不确定性影响该模型输出值不确定性的方法。本文从误差修正模型出发, 研究模型输入参数不确定性对模型输出的待测壁面温度准确度的影响, 并按照常见的红外热像仪产品, 分别对短波红外(0.9~1.1 μm)、中波红外(3.7~3.9 μm)、长波红外(10~10.2 μm)3 个工作波段进行对比, 根据现有研究数据拟定不同波段的参数标准值。表 1 给出了在某一工况下燃气轮机燃烧室辐射测温过程中不同工作波段的参数标准值。

灵敏度分析方法如下: 预先设定待测面的真实温度以及上述参数的标准值, 结合辐射测温模型计算红外热像仪接收到的真实辐射能量, 并在其余参数保持不变的情况下对每个参数进行逐一扰动, 使其偏离标准值, 通过误差修正模型计算求解待测壁面的温度, 最后通过与真实温度对比得到测温偏差 ΔT_s 。

表 1 灵敏度分析参数标准值

Tab. 1 Standard values for sensitivity analysis parameters

工作波段	发射率 ϵ	高温燃气透射率 τ	高温燃气温度 $T_g/^\circ\text{C}$	剩余高温壁面温度 $T_h/^\circ\text{C}$
短波红外	0.48	0.99	1 200	1 000
中波红外	0.32	0.98	1 200	1 000
长波红外	0.98	0.60	1 200	1 000

2 结果与分析

本文使用 Matlab 软件建立燃气轮机燃烧室辐射测温的误差修正模型, 并通过数值计算进行不同工作波段下各输入参数的灵敏度分析, 由于 $T_s = I^{-1}(T_s)$ 反函数求解困难, 计算前先通过普朗克定律正向计算得到不同波段下的 $T_s - I(T_s)$ 标准曲线, 并在计算过程中使用 spline 三次项样条插值函数对模型输出 $I(T_s)$ 在标准曲线上进行插值求解得到 T_s 。图 3~图 5 给出了不同工作波段下灵敏度分析结果。可见, 除了表面发射率参数外, 温度偏差 ΔT_s 均随着待测表面温度的升高而降低, 但是 3 个工作波段中模型输入参数不确定性对输出温度造成偏差的影响程度不同。

2.1 短波红外

图 3 给出了当红外热像仪工作波段为短波红外

(0.9~1.1 μm)时各个参数对温度偏差的影响情况。图 3 (a)为发射率 ε 对测温偏差的影响,根据文献[19],设定发射率标准值为 0.48,步长为 0.01,在发射率为 0.38~0.58 的范围内对其进行扰动。结果显示,模型计算得到的温度偏差随发射率增大呈现出先单调递减后递增的趋势,以同样幅度扰动发射率,正向幅度的扰动所造成的温度偏差更小。

图 3(b)为高温燃气透射率 τ 对测温偏差的影响,根据 HITRAN 数据库[17]的计算结果设定 τ 的标准值为 0.99,扰动范围为 0.98~1.00。计算温度偏差随高温燃气透射率增大而单调递增,且增幅逐渐降低,以同样幅度扰动高温燃气透射率,正向幅度的扰动所造成的温度偏差更小,且当透射率设置为 1.00 时,温度偏差 ΔT_s 最高可达到+72 K,相对误差约为 9.7%。

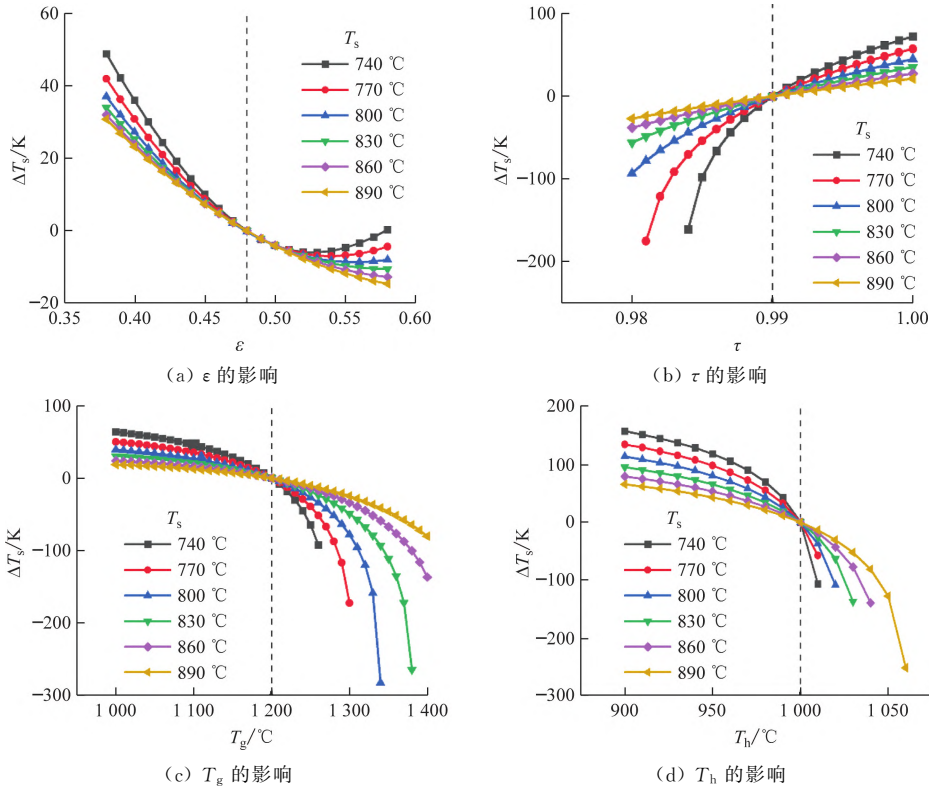


图 3 短波红外下发射率、高温燃气透射率、高温燃气温度、剩余高温壁面温度的灵敏度分析

Fig. 3 Sensitivity analysis of emissivity, high-temperature gas transmittance, gas temperature and residual wall surface temperature in short-wave infrared

图 3(c)为高温燃气温度 T_g 对测温偏差的影响,参考 E 级重型燃气轮机的燃烧温度将标准值设定为 1 200 °C,扰动范围为 1 000~1 400 °C。模型计算温度偏差随高温燃气温度增大而单调递减,且同样扰动幅度下, T_g 低于标准值所造成的温度偏差更小,同时计算过程中发现,当待测表面温度较低时,对 T_g 进行较大的正向扰动会使计算的待测面真实辐射能为负值,导致修正模型失效。根据图 3(b)、图 3(c)可知,尽管在短波红外工作波段下燃气的透射率较高(发射率较低),高温燃气造成的影响不可忽略。图 3(d)为剩余高温壁面温度 T_h 对测温偏差的影响, T_h 标准值设置为 1 000 °C,扰动范围为 900~1 100 °C。结果显示, T_h 对测温偏差的影响情况与 T_g 相似,同样扰动幅度下 T_h 低于标准值所造成的温度偏差更小,且当剩余高温表面温度扰动过大时,误差修正模型也无法适用。

2.2 中波红外

图 4 给出了当红外热像仪工作波段为中波红外 (3.7~3.9 μm)时各个参数对温度偏差的影响情况。图 4(a)为发射率 ε 对测温偏差的影响,根据 TBC 光谱发射率的数据[12],设定 ε 的标准值为 0.32,步长为 0.01,在 0.22~0.42 范围内扰动。结果显示,根据模型计算得到的温度偏差随发射率增大呈单调递减趋势,当 ε 设定为 0.22 时最大的测温偏差为+225 K。相同扰动下,ε 大于标准值时 ΔT_s 更小。图 4(b)为高温燃气透射率 τ 对测温偏差的影响,τ 的标准值 0.98 取自 HITRAN 数据库[17],其在 0.96~1.00 范围内扰动。该工作波段下 τ 整体趋势与短波红外测温类似,但是影响程度较低,同样属于高透射率(低发射率)的燃气性质,当将透射率 τ 设置为 1.00 时,待测壁面温度的计算偏差为+41 K(真实温度为 740 °C),相对误差约为 5.5%。

图 4(c)为高温燃气温度 T_g 对测温偏差的影响,结果显示,在标准值 ± 200 °C 扰动范围内,由 T_g 产生的测温偏差小于 25 K,影响较小。图 4(d)为剩余高温壁面温度 T_h 对测温偏差的影响,结果显示

相同扰动幅度下 T_h 低于标准值所造成的温度偏差更小,在标准值 ± 100 °C 扰动范围内,未出现误差修正模型失效的问题,且产生的最大温度偏差 ΔT_s 要小于短波红外时的情况。

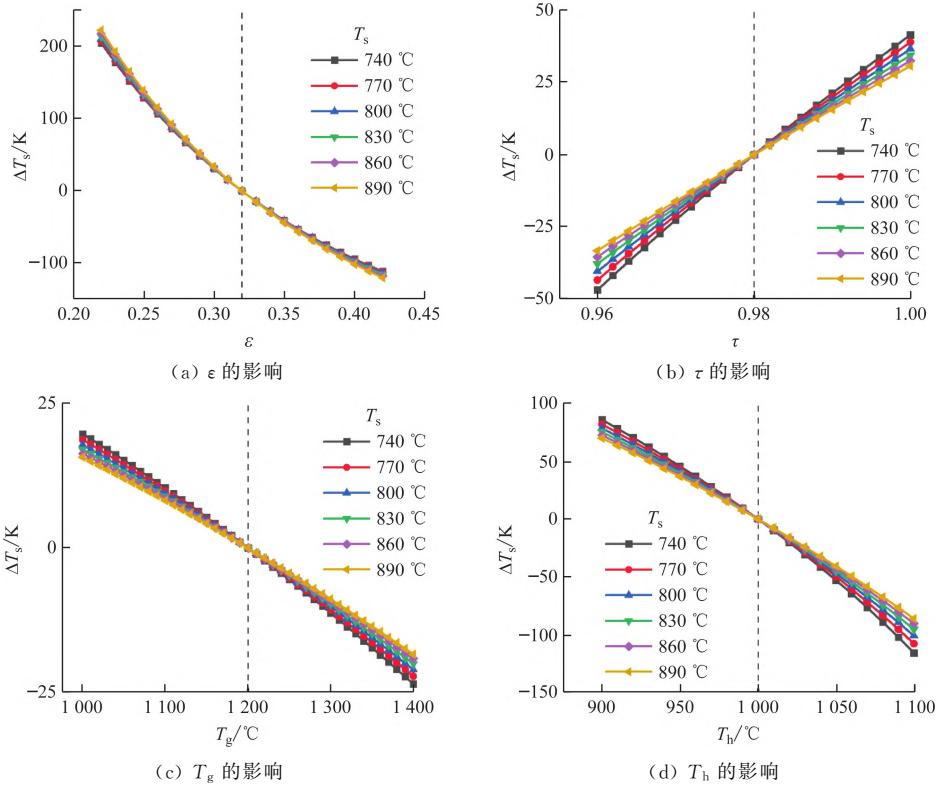


图 4 中波红外下发射率、高温燃气透射率、高温燃气温度、剩余高温壁面温度的灵敏度分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of emissivity, high-temperature gas transmittance, gas temperature and residual wall surface temperature in mid-wave infrared

2.3 长波红外

图 5 给出了当红外热像仪工作波段为长波红外 (10~10.2 μm) 时各个参数对温度偏差的影响情况。图 5(a)为该波段下待测壁面发射率 ϵ 对测温偏差的影响,根据 TBC 光谱发射率的数据^[12],设定 ϵ 标准值为 0.98,步长为 0.01, ϵ 在 0.88~1.00 范围内扰动。结果显示,在同样扰动下 ϵ 产生的测温偏差随 T_s 升高而减小,且当发射率 ϵ 设置为 1.00 时,产生的 ΔT_s 最大仅为 5 K。图 5(b)为高温燃气透射率 τ 对测温偏差的影响情况,根据 HITRAN 数据库^[17]的计算结果设定 τ 的标准值为 0.60,扰动步长为 0.01,其在 0.5~0.7 范围内扰动。结果显示,模型计算温度偏差随透射率 τ 增大呈单调递增趋势,相同扰动下 τ 高于标准值时 ΔT_s 更小,在扰动范围内产生的测温偏差最高可达到 -100 K。

图 5(c)为高温燃气温度 T_g 对测温偏差的影响情况,结果显示在 ± 100 K 的扰动范围内, T_g 所产生的测温偏差最高可达到 -153 K,可见高温燃气的影响较大。图 5(d)为剩余高温壁面温度 T_h 对测

温偏差的影响情况,结果显示 T_h 对 ΔT_s 的影响很小,在 ± 100 K 的扰动下测温偏差最高仅 2 K 左右,可以忽略不计。产生该现象的原因主要是该波段下待测壁面的高发射率(低反射率)导致反射辐射能量的份额很小。

2.4 灵敏度指数

基于上述计算结果,发射率、高温燃气透射率、高温燃气温度、剩余高温壁面温度对各个工作波段测温模型输出结果有不同程度的影响。为确定对误差修正模型性能影响较大的因素,引入灵敏度指数 S_k ^[10],假设模型输出的温度 T 是上述因素的函数 $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$,即

$$T = f(x_1, x_2, x_3, x_4) \tag{7}$$

其中, x_1, x_2, x_3, x_4 分别表示发射率、高温燃气透射率、高温燃气温度、剩余高温壁面温度,每个参数的灵敏度指数定义为

$$S_k = \left(\frac{\Delta T}{T} \right) / \left(\frac{\Delta x_k}{x_k} \right) \tag{8}$$

其中,下标 $k=1, 2, 3, 4$; Δx_k 为 x_k 的偏差。

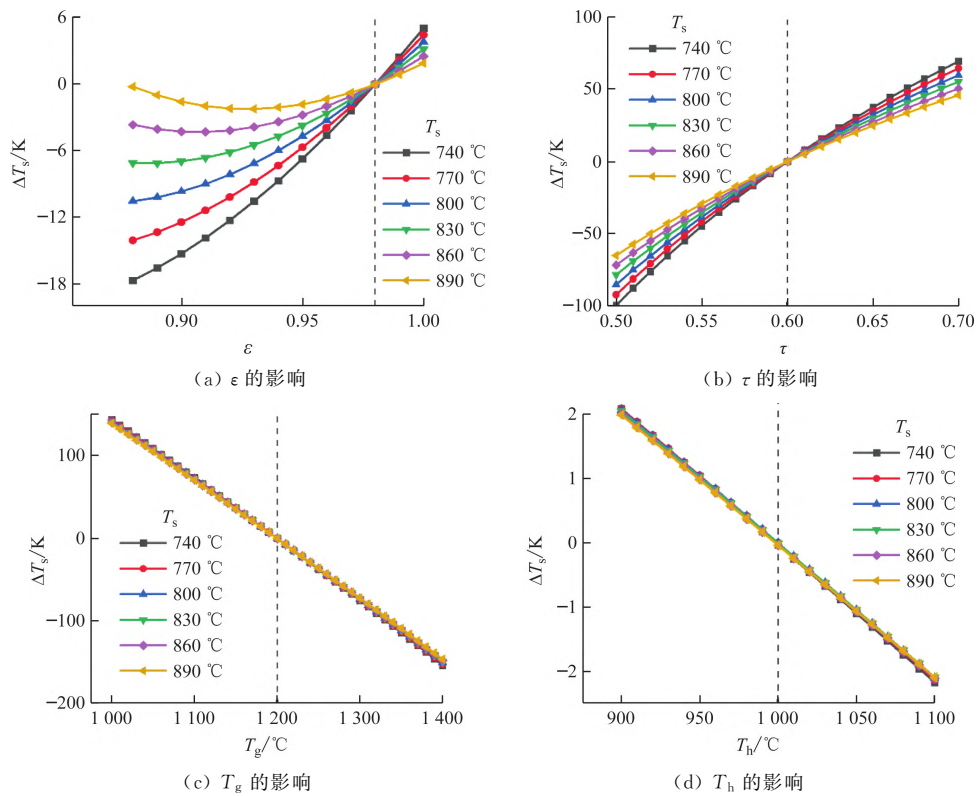


图 5 长波红外下发射率、高温燃气透射率、高温燃气温度、剩余高温壁面温度的灵敏度分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of emissivity, high-temperature gas transmittance, gas temperature and residual wall surface temperature in long-wave infrared

为定性评估灵敏度指数,采用指数分级^[20],如表 2 所示。

表 2 灵敏度指数分级

Tab. 2 Sensitivity index grading thresholds

级别	指数	灵敏度
I	$0 < S_k < 0.05$	小,可忽略
II	$0.05 < S_k < 0.20$	中等
III	$0.20 < S_k < 1.00$	高
IV	$ S_k > 1.00$	非常高

针对灵敏度指数的计算,本文根据每项参数所造成的最大测温偏差处的数据进行计算,各个工作波段下不同影响因素的标准值和灵敏度指数分别如表 3 和表 4 所示。结果显示,使用短波红外的红外热像仪进行测温时,高温燃气透射率、高温燃气温度、剩余高温壁面温度对模型计算温度的准确性影响较大,尤其是高温燃气透射率、剩余高温壁面温度的灵敏度指数非常高,而发射率对模型计算温度的准确性影响较小,所以必须非常准确地测量高温燃气透射率、剩余高温壁面温度;使用中波红外的红外热像仪进行测温时,仅高温燃气温度对模型计算温度的准确性影响较小,允许一定的不确定度,而其余参数的影响均较大,需准确测量;使用长波红外的红

外热像仪进行测温时,发射率、剩余高温壁面温度对模型计算温度的准确性影响很小,允许有较大的不确定度,但需准确测量高温燃气透射率、高温燃气温度。

表 3 3 个工作波段下不同影响因素的标准值

Tab. 3 Standard values of key parameters across three operational bands

工作波段	发射率	高温燃气透射率	高温燃气温度/°C	剩余高温壁面温度/°C
短波红外	0.48	0.99	1 200	1 000
中波红外	0.32	0.98	1 200	1 000
长波红外	0.98	0.60	1 200	1 000

表 4 3 个工作波段下不同影响因素的灵敏度指数

Tab. 4 Sensitivity indexes of key parameters across three operational bands

工作波段	发射率	高温燃气透射率	高温燃气温度	剩余高温壁面温度
短波红外	-0.166	3.000	-0.542	-4.712 0
中波红外	-0.800	1.830	-0.124	-0.965 0
长波红外	0.103	0.438	-0.988	-0.023 5

3 结论

(1) 由于燃烧室中燃气超高的温度,其自身仍

具有较强的辐射,即使在高透射率(低发射率)的工作波段,燃气的影响仍不可忽略。忽略燃气的影响时,在透射率分别为 0.99 和 0.98 的短波红外和中波红外下所测温度仍会产生误差,最大分别为 9.7% 和 5.5%。

(2) 使用工作波段为短波红外的热像仪进行燃气轮机燃烧室壁面辐射测温时,发射率的灵敏度较低,允许存在一定的不确定度,而其他 3 个输入参数的灵敏度都较高,需要对这 3 个参数进行精准测量。

(3) 使用工作波段为中波红外的热像仪进行燃气轮机燃烧室壁面辐射测温时,高温燃气温度的灵敏度较低,允许存在一定的不确定度,而其他 3 个输入参数的灵敏度较高,在实际测温过程中需要对这 3 个参数进行准确测量。

(4) 使用工作波段为长波红外的热像仪进行燃气轮机燃烧室壁面辐射测温时,发射率、剩余高温壁面温度的灵敏度较低,允许存在较大的不确定度,而针对高温燃气透射率、高温燃气温度,则需要进行准确测量。

参考文献:

- [1] HSU P S, CHEN T, ROY A, et al. A compact LWIR borescope sensor for 2D engine component surface temperature measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(6): 064004.
- [2] 李立新, 张昭昭. 某型号 F 级燃气轮机混氢燃烧的性能分析和工程实践[J]. *动力工程学报*, 2022, 42(10): 912-918.
LI Lixin, ZHANG Zhaozhao. Combustion performance analysis and engineering practice of a F-class gas turbine with hydrogen addition[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(10): 912-918.
- [3] 张利, 张子玉, 孔祥灿, 等. E 级联合循环供热机组调峰能力分析[J]. *中国电力*, 2018, 51(12): 1-6, 28.
ZHANG Li, ZHANG Ziyu, KONG Xiangcan, et al. Analysis on peak load regulation of E-stage combined cycle heating unit[J]. *Electric Power*, 2018, 51(12): 1-6, 28.
- [4] 杨啊涛, 郭雄, 李海松, 等. 燃气轮机叶片热裂缺陷的应力形成及演化研究[J]. *动力工程学报*, 2021, 41(3): 189-194.
YANG Atao, GUO Xiong, LI Haisong, et al. Research on formation and evolution of stress on hot tearing in gas turbine blades[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2021, 41(3): 189-194.
- [5] DEVOE J, THOMAS A, DEVOE R, et al. Gas temperature measurement in engine conditions using uniform crystal temperature sensors (UCTS)[C]// *ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. Oslo, Norway: ASME, 2018.
- [6] SIMPSON A, FITTON R, RATTIGAN I G, et al. Thermal performance of thermal paint and surface coatings in buildings in heating dominated climates[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 197: 196-213.
- [7] ESTEVADEORDAL J, WANG Guanghua, NIRMALAN N, et al. Multicolor techniques for identification and filtering of burst signals in jet engine pyrometers[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2014, 136(3): 031004.
- [8] FALSETTI C, SISTI M, BEARD P F. Infrared thermography and calibration techniques for gas turbine applications: a review[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 113: 103574.
- [9] 高山. 考虑运行环境影响的燃气轮机涡轮叶片辐射测温方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [10] 黄云伟. 高温参与性介质环境的辐射能传递与连铸坯表面温度在线测量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [11] 李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9): 1336-1341.
LI Yunhong, SUN Xiaogang, YUAN Guibin. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(9): 1336-1341.
- [12] GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ L, DEL CAMPO L, PÉREZ-SÁEZ R B, et al. Normal spectral emittance of Inconel 718 aeronautical alloy coated with yttria stabilized zirconia films[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 513: 101-106.
- [13] 周瑕, 汪超, 梁云飞, 等. 燃气轮机压气机叶片涂层的高温适应性研究[J]. *动力工程学报*, 2022, 42(3): 229-234.
ZHOU Xia, WANG Chao, LIANG Yunfei, et al. Research of high-temperature adaptability on compressor blade coatings of gas turbines[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(3): 229-234.
- [14] MANARA J, ARDUINI-SCHUSTER M, RÄTZER-SCHEIBE H J, et al. Infrared-optical properties and heat transfer coefficients of semitransparent thermal barrier coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 203(8): 1059-1068.

(下转第 1277 页)

- Management, 2023, 277: 116618.
- [14] WU Chuang, WAN Yuke, LIU Yu, et al. Thermodynamic simulation and economic analysis of a novel liquid carbon dioxide energy storage system[J]. **Journal of Energy Storage**, 2022, 55: 105544.
- [15] XU Cheng, ZHANG Qiang, YANG Zhiping, et al. An improved supercritical coal-fired power generation system incorporating a supplementary supercritical CO₂ cycle[J]. **Applied Energy**, 2018, 231: 1319-1329.
- [16] 周科, 李银龙, 李明皓, 等. 燃煤发电-物理储热耦合技术研究进展与系统调峰能力分析[J]. **洁净煤技术**, 2022, 28(3): 159-172.
- ZHOU Ke, LI Yinlong, LI Minghao, et al. Research progress on the coupling technology of coal-fired power generation-physical thermal storage and analysis for the system peaking capacity[J]. **Clean Coal Technology**, 2022, 28(3): 159-172.
- [17] 江蓉, 甘爽, 李小姍, 等. 基于富氧燃烧的 CO₂ 液化提纯工艺优化分析[J]. **动力工程学报**, 2023, 43(1): 102-108.
- JIANG Rong, GAN Shuang, LI Xiaoshan, et al. Optimization analysis of CO₂ liquefaction purification process based on oxygen enriched combustion[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2023, 43(1): 102-108.
- [18] 刘骏, 袁鑫, 陈衡, 等. 大规模火电 CCUS 应用的经济性评估及提升研究[J]. **动力工程学报**, 2023, 43(10): 1316-1325.
- LIU Jun, YUAN Xin, CHEN Heng, et al. Study on economic assessment and improvement for large-scale thermal power CCUS applications[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2023, 43(10): 1316-1325.
- [19] 山西省物价局. 关于居民用电试行峰谷分时电价政策的通知[EB/OL]. [2021-04-30] <http://www.sx.sgcc.com.cn/homepage/wbw/articles/202505/a1162891.html>.
- ~~~~~
- (上接第 1218 页)
- [15] DANIEL K, FENG Chi, GAO Shan. Application of multispectral radiation thermometry in temperature measurement of thermal barrier coated surfaces[J]. **Measurement**, 2016, 92: 218-223.
- [16] ARAÚJO A. Analysis of multi-band pyrometry for emissivity and temperature measurements of gray surfaces at ambient temperature[J]. **Infrared Physics & Technology**, 2016, 76: 365-374.
- [17] KOCHANOV R V, GORDON I E, ROTHMAN L S, et al. HITRAN application programming interface (HAPI): a comprehensive approach to working with spectroscopic data[J]. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, 2016, 177: 15-30.
- [18] MORRIS T A, MARCINIAK M A, WOLLEN- WEBER G C, et al. Analysis of uncertainties in infrared camera measurements of a turbofan engine in an altitude test cell[J]. **Infrared Physics & Technology**, 2006, 48(2): 130-153.
- [19] MARKHAM J R, LATVAKOSKI H M, FRANK S L F, et al. Simultaneous short and long wavelength infrared pyrometer measurements in a heavy-duty gas turbine[J]. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 2002, 124(3): 528-533.
- [20] HUANG Yunwei, LONG Mujun, ZHAO Jingjun, et al. Coupled effects of reflection and absorptive gas mixture on surface temperature determined by single color pyrometer[J]. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, 2019, 228: 111-123.
- ~~~~~
- (上接第 1242 页)
- CHEN Fuqiang, SU Tiexiong, MA Liqiang, et al. Comparative study on different numerical simulation methods of vapor condensation with non-condensable gas[J]. **Energy Conservation Technology**, 2017, 35(5): 438-443, 453.
- [14] 杨宇伟, 阴继翔, 欧龙蛟. 椭圆管外含不凝气体的蒸汽凝结传热的数值研究[J]. **科学技术与工程**, 2016, 16(5): 71-76.
- YANG Yuwei, YIN Jixiang, OU Longjiao. Numerical simulation of vapor condensation with non-condensable gas outside of elliptical pipe[J]. **Science Technology and Engineering**, 2016, 16(5): 71-76.
- [15] 钱淼, 胡恒蝶, 向忠, 等. 非均布热管换热器的流动及其传热性能[J]. **纺织学报**, 2021, 42(12): 151-158.
- QIAN Miao, HU Hengdie, XIANG Zhong, et al. Flow and heat transfer characteristics of non-uniform heat-pipe heat exchanger[J]. **Journal of Textile Research**, 2021, 42(12): 151-158.
- [16] HE Shiquan, ZHOU Xiaoqing, LI Feng, et al. Heat and mass transfer performance of wet air flowing around circular and elliptic tube in plate fin heat exchangers for air cooling[J]. **Heat and Mass Transfer**, 2019, 55(12): 3661-3673.
- [17] 胡万玲, 姜林秀, 张程, 等. 析湿工况下翅片材质对管翅式换热器性能影响的实验研究[J]. **工程热物理学报**, 2019, 40(7): 1642-1647.
- HU Wanling, JIANG Linxiu, ZHANG Cheng, et al. The effect of fin material on the airside performance of tube-fin heat exchanger under dehumidifying conditions [J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2019, 40(7): 1642-1647.