

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514285

气体光谱吸收及传热对内窥式红外测温的影响

杨瑶光¹, 胡若楠¹, 刘恭智^{1,2}, 冯李军¹, 贺 博¹

(1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室 西安 710049; 2. 咸阳亚华电子电器有限公司 咸阳 712000)

摘 要:内窥式红外热像仪对气体绝缘电力设备内部温度场的测量值,是设备腔体中目标辐射、背景辐射和气体选择性吸收辐射共同作用的结果。当前的热像仪测温校正主要面向大气环境,未考虑腔体内表面之间的热辐射多次反射,以及短光程、高压强气氛下的能量吸收。为此,提出了一种在特定选择性热辐射吸收气氛下对封闭式腔体测温的热像仪表观温度补偿方法。首先,基于单条路径下热辐射反射传输模型,采用光谱透过率计算、封闭式腔体中气体状态分布有限元模拟,进行了热辐射波长、气体压强、气体温度及光程对热辐射透过率的影响程度分析,从而建立综合路径下的热像仪表观温度解析模型;其次,开展电力设备空气和 SF₆ 气氛下温升实验,依据实测数据推导了不同温度场分布、气体压强下表观温度解析模型参数,并完成了不同气氛下的目标温度反演。研究表明:即使电力设备温升,气体透过率仍可近似于设备充气后初始状态的值;腔体中不同目标和背景离散表面之间的气体透过率可近似为常数;仅需在热辐射第 1 次反射前经过的光程中考虑透过率对能量的衰减。最后,不同气氛下对表观温度预测的平均绝对误差 < 1 K。研究结果为快速量化空气和 SF₆ 气氛对于腔体内窥式红外测温的影响,提供了简洁的计算模型支持。

关键词: 背景热辐射; 气体光谱透过率; 红外测温; 温度解析

中图分类号: TH741.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Effects of gas spectral absorption and heat transfer on endoscopic infrared temperature measurement

Yang Yaoguang¹, Hu Ruonan¹, Liu Gongzhi^{1,2}, Feng Lijun¹, He Bo¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Xianyang Yahua Electronic Apparatus Co., Ltd., Xianyang 712000, China)

Abstract: The temperature-field measurements obtained by endoscopic infrared thermography for gas-insulated electrical equipment are the combined result of target radiation, background radiation, and gas-selective absorption within the equipment enclosure. Current infrared temperature-calibration methods are mainly developed for atmospheric environments and do not account for the multiple reflections of thermal radiation between cavity surfaces or the energy attenuation caused by short optical paths and high-pressure gas atmospheres. To address this issue, this paper proposes an apparent-temperature compensation method for infrared thermography in closed cavities under specific selectively absorbing gas atmospheres. First, based on a single-path thermal-radiation reflection-transmission model, spectral transmittance calculations and finite-element simulations of gas-state distributions in closed cavities are conducted. The influences of radiation wavelength, gas pressure, gas temperature, and optical path length on thermal-radiation transmittance are analyzed, leading to the establishment of an analytical model for the thermograph's apparent temperature under composite paths. Subsequently, heating experiments of electrical equipment under air and SF₆ atmospheres are carried out. Model parameters for different temperature-field distributions and gas pressures are derived from the measured data, enabling temperature inversion under different gas conditions. The results indicate that the gas transmittance can be approximated by its initial value after equipment inflation even during temperature rise. The gas transmittance between discrete target and background surfaces in the cavity can be treated as a constant, and only the energy attenuation along the optical path before the first radiation reflection needs to be considered. Finally, the mean absolute error of apparent-temperature prediction under different gas atmospheres is less than 1 K. The

findings provide a concise computational model for rapidly quantifying the effects of air and SF₆ atmospheres on endoscopic infrared temperature measurement in closed cavities.

Keywords: background thermal radiation; gas spectral transmittance; infrared temperature measurement; temperature analysis

0 引 言

内窥式红外测温是一种新型的气体绝缘电力设备内部状态检测方法,基于采集到的设备腔体内关键部位温度分布信号,可进一步判别设备运行状态,从而保障设备安全运行^[1-3]。通常,根据采集信号的来源及传递过程,可将能量分解为目标发出的热辐射信号、由目标反射的背景辐射、辐射传播过程中气体光谱选择性吸收造成的能量衰减,以及微弱的气体辐射 4 个环节^[4-6]。因此探究热辐射在气体介质中传递过程的能量变化,有助于热像仪解析真正的目标温度^[7-8]。

已知物体的发射率等于其对同温度黑体辐射的吸收率^[9-10]。当前,对于气体吸收率的探究主要集中在建立更为精细的谱线吸收模型^[11-12]。2013 年尹增谦等^[13]基于洛伦兹和高斯线型推导了 Voigt 线型的最大值解析式,为从光谱线形提取关键物理信息提供了技术支持;2014 年朱湘飞等^[14]用双光束差分技术,探究了温度压强对 1 572.018 nm 处 CO₂ 吸收谱线展宽的影响;2023 年袁洪瑞等^[15]利用超声射流冷却和像散型多程吸收池技术,探究了³²SF₆ 和³³SF₆ 同位素分子在 10.6 μm 波长附近的吸收光谱。HITRAN 高分辨率气体光谱数据库,其数据来源于直接观测、理论计算和半经验值,通过不断新增和修正数据,被行业广泛应用于气体吸收率分析,但对于电力设备常用绝缘介质 SF₆ 仅收录³²SF₆ 的吸收谱线^[16-18]。气体谱线吸收模型的深入发展,推进着气体吸收率模拟结果逐步趋近真实值,为气体对传输能量的影响提供辅助参考。

而气体对红外辐射的影响主要集中于大气环境下的研究^[19-21]。学者们采用渲染技术模拟空中目标红外成像时,通常基于 CAMEL、GHRST 和 MODTRAN 等地球尺度数据库,进行地表背景辐射和大气辐射对目标辐射的影响研究^[22-23]。当模拟大气中辐射传输时,通常采用气体分层逐级计算,从而考虑气压、温度、粒子局部变化对于能量的影响^[24-26]。上述研究适用于地球大尺度、开放式空间环境,但在电力设备腔体内部测温场景中,热辐射在封闭式壁面间多次反射,使得进入镜头的能量叠加增强^[27-28]。此外,短光程、高浓度的气体会对热辐射产生光谱选择性吸收。因此,已有研究尚不能解析热辐射在密闭腔体空间内传播时的能量变化。

为此,针对电力设备典型气体介质空气和 SF₆,开展了气体光谱选择性吸收及传热对内窥式红外测温的影响

探究。首先从气体传热、气体光谱吸收以及热像仪能量转换 3 个方面介绍了表面热辐射能量的光电传递过程;其次,通过 HITRAN 数据库气体吸收率模拟和实验样机气体传热模拟,探究了温度、压强和光程对能量在气体中传输透过率的影响,并建立简洁的热像仪表观温度解析模型;最后,为探究目标、背景和气体 3 个环节对于热图信号的影响,基于电力设备实际工况的温度、气压范围,开展了典型气氛下的温升模拟实验,完成了不同目标温度下的红外热图及背景温度采集,为温度解析提供数据支持。研究结果将为进一步推广内窥式热像仪在特殊气氛密闭场景中的测温应用,提供简洁的温度解析思路。

1 理论模型

在气体绝缘电力设备运行过程中,导体(观测目标)为热源,壳体(背景)温度分布由导体温度、腔体中气体传热和外部环境温度共同决定,其中气体传热过程中热传导、热对流和热辐射能力受气体种类、压强和温度 3 个因素影响^[29-30]。图 1 为根据气体绝缘电力设备结构简化的样机示意图,由于热辐射会在腔体表面间反射,因此热像仪采集到的红外热图是观测目标、背景和气体 3 部分辐射、衰减能量的综合结果。

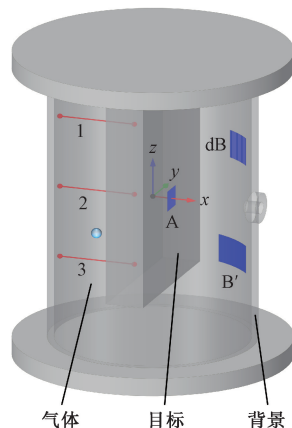


图 1 样机示意图

Fig. 1 Diagram of the prototype

1.1 气体传热模型

气体绝缘电力设备中的气体介质通过自然对流促进内部导体与外部壳体的热量交换,该对流传热过程遵循质量、动量和能量守恒方程^[31]。其中,能量守恒方程中的热辐射源项可根据热辐射传输方程^[32]得到,即:

$$\frac{dL(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} + (a + \sigma_s)L(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} L(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}') d\Omega' \quad (1)$$

式中: L ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) 为辐射亮度; \mathbf{r} 为位置矢量; \mathbf{s} 为方向矢量; s (m) 为光程; a (m^{-1}) 为气体吸收系数; σ_s (m^{-1}) 为散射系数; n 为气体折射率; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), Φ 为相函数; \mathbf{s}' 为散射方向矢量, Ω (sr) 为立体角。 $(a + \sigma_s)L(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ 表示热辐射 $L(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ 在 \mathbf{s} 方向因气体吸收和散射导致的能量衰减; $an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi}$ 表示气体微元体向 \mathbf{s} 方向辐射的能量; $\frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} L(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}') d\Omega'$ 表示 4π 空间入射至微元体后经散射出射至 \mathbf{s} 方向的能量 (图 2)。

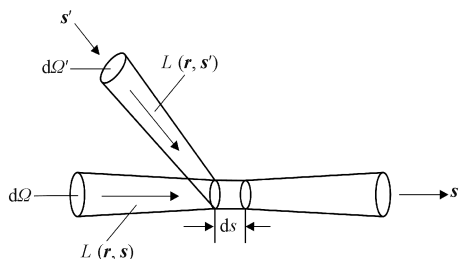


图2 热辐射传输方程示意图

Fig. 2 Diagram of the thermal radiation transfer equation

1.2 气体光谱吸收模型

入射至气体的热辐射通常会发生米氏和瑞利散射。由于电力设备中纯净气体的分子尺寸远小于热辐射波长,故可以忽略米氏散射,而瑞利散射强度与波长四次方成反比,红外波段下散射非常微弱,同样可以忽略。基于比尔-朗伯定律,波数为 ν 的热辐射 $P_{\nu,0}$ 穿过厚度为 L (10^{-2} m) 的气体后,能量变为^[33-34]:

$$P_{\nu,L} = P_{\nu,0} e^{-\int_0^L a_{\nu}(T, p, s) ds} = \tau_{\nu} P_{\nu,0} \quad (2)$$

式中: T (K) 为气体温度; p (0.101 325 MPa) 为气体压力; a_{ν} (cm^{-1}) 为光谱吸收系数; τ_{ν} 为气体光谱透过率。

1.3 探测器光电转换模型

当红外热像仪最小空间张角所对应的观测目标可视面积为 A_0 、观测目标到测量仪器的距离为 d 时,面积为 A_r 的镜头入瞳接收的光谱辐射功率 $P_{\nu\lambda}$ ($\text{W}/\mu\text{m}$)^[35] 为:

$$P_{\nu\lambda} = A_r L_{\lambda} \frac{A_0}{d^2} \quad (3)$$

式中: L_{λ} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) 为光谱辐射亮度,由目标自身辐射、反射背景辐射和气体辐射 3 部分组成。当能量传递至探测器时,对其施加偏置电压或偏置电流,可得红外辐射热像仪的刻度函数 $I_R(T_r)$ 为:

$$I_R(T_r) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(T) d\lambda = CT_r^4 \quad (4)$$

式中: C 为常数; T_r 为热像仪表观温度, $10T_r$ 即为热像仪输出的数字响应值 V_{response} 。

2 表观温度解析

2.1 单条路径热辐射反射传输模型

依据图 1,背景微元面 dB 对热像仪最小空间张角对应的某一观测目标可视面 A 所张立体角为 $d\Omega$, A 的面积 A_0 在 $d\Omega$ 方向的可见面积为 A_{\perp} 。由立体角定义与投影定律可知, $d\Omega$ 与 A_{\perp} 分别是由样机构型决定的几何因子,故为常数。

将背景面离散化为多个温度均匀的小面, dB 所在小面 B 的单位波长热辐射经 A 反射向表面 B' 的光谱辐射亮度 $L_{\lambda, BB'}$ 为:

$$L_{\lambda, BB'} = \rho_{\lambda, AB'} \tau_{\lambda, 1} \tau_{\lambda, 2} L_{AB} \int A_{\perp} d\Omega = L_{AB} \tau_{\lambda, 1} \tau_{\lambda, 2} C_1 \quad (5)$$

式中: $\rho_{\lambda, AB'}$ 为反射向 B' 的光谱辐射亮度占 A 接收的光谱辐照度的比例; $\tau_{\lambda, 1}$ 、 $\tau_{\lambda, 2}$ 分别为热辐射在气体中由 B 至 A、由 A 至 B' 传输时的能量光谱透过率; L_{AB} 为 B 的光谱辐射亮度; C_1 为热辐射由 B 至 A 传输时与表面可视面积、立体角及材料吸收率、反射率相关的常数。进而 B 的辐射沿某一路径经过 n 次反射入射至 B' 的过程,仍可表示为 L_{AB} 与固定系数的乘积,有 B' 接收的光谱辐射亮度 $L'_{\lambda, BB'}$ 为:

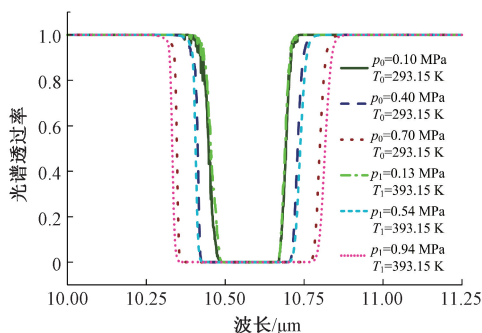
$$\begin{cases} L'_{\lambda, BB'} = L_{AB} C' \tau'_{\lambda} \\ C' = \prod_{i=1}^{n-1} C_i \\ \tau'_{\lambda} = \prod_{i=1}^n \tau_{\lambda, i} \end{cases} \quad (6)$$

由于 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 为大气窗口,可默认此波段下空气为透明介质,即空气下的热辐射光谱透过率为 1,而 SF_6 会对 $10.56 \mu\text{m}$ 波长附近热辐射进行选择性吸收。 SF_6 光谱吸收能力与热辐射经过的气体分子数有关,而分子数由气体压强、温度和光程决定。因此,需进一步分析在封闭腔体中,多因素影响下 SF_6 对 $10.56 \mu\text{m}$ 波长附近热辐射能量的透过率。

2.2 吸收性气氛光谱透过率模拟

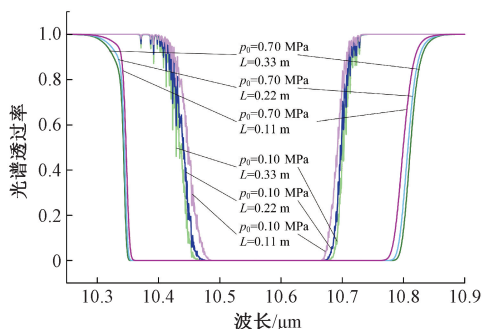
基于气体光谱吸收模型,采用 HITRAN 数据库数据对 SF_6 中的光谱透过率进行模拟计算,谱线线形为 Voigt 线形。图 3 为 $10 \sim 11.25 \mu\text{m}$ 波段、光程 L 为 0.11 m 时 SF_6 中的热辐射光谱透过率 τ_{λ} 。

图 3 中包括当气体初始温度 T_0 为 293.15 K 时,在样机中分别充入气压 p_0 为 0.1、0.4、0.7 MPa SF_6 的光谱透过率曲线;保持样机密封后将气体温度升至 T_1 为 393.15 K 后的光谱透过率曲线,根据理想气体方程此时气压为 $p_1 = 393.15 p_0 / T_0$ 。由图 3 可知,初始气压和温度

图 3 不同压强、温度下 SF_6 光谱透过率Fig. 3 SF_6 spectral transmittance under different pressure and temperature conditions

为影响光谱透过率关键因素, 气压越大, 不可通光波段越宽; 而从相同初始充气温度使气体升温, τ_λ 变化较微弱。

同时由式(2)可知, 气体中的光谱透过率还与光程有关。由图 4 可知, 当气温保持 20°C 时, 随着光程的增加, 热辐射穿过的气体分子数增加, 故不通光波段逐渐变宽, 在 0.11 m 时 $10.56\text{ }\mu\text{m}$ 波长附近的能量透过率已为 0, 即样机腔体内的热辐射在目标与背景间反射时, 仅需在一次反射前的光程中考虑透过率的影响。但相较于气压变化对光谱透过率的影响, 光程的影响可以忽略。

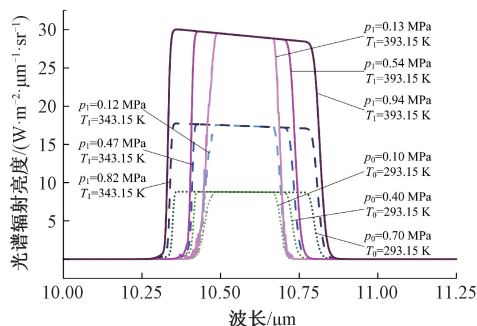
图 4 不同压强、光程下 SF_6 光谱透过率Fig. 4 SF_6 spectral transmittance under different pressure and path lengths

气体在吸收外来热辐射能量的同时, 自身也会向外辐射能量。根据普朗克定律, 其光谱辐射亮度 $L_{\text{SF}_6, \lambda}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) 可以表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} L_{\text{SF}_6, \lambda} &= (1 - \tau_\lambda) \frac{10^{-6} c_1}{\pi \lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \\ c_1 &= 3.7419 \times 10^{-16} \\ c_2 &= 1.43879 \times 10^{-2} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中: λ (m) 为波长; T (K) 为气体温度。由式(7)可知, 在热平衡条件下, 气体在某一波长的光谱辐射亮度, 等于

他在该波长的吸收率乘以相同温度下的黑体光谱辐射亮度。图 5 为光程 0.11 m 时不同温度和压强下的气体光谱辐射亮度, 其中点线、划线、实线曲线簇对应的气体温度分别为 293.15 、 343.15 、 393.15 K 。由图 5 可知, 相同气体温度下, 气压越大辐射波段范围越宽; 在相同气压下, 辐射能量随气体温度逐级升高。

图 5 不同压强、温度下 SF_6 光谱辐射亮度Fig. 5 SF_6 spectral radiance under different pressure and temperature conditions

工程材料通常近似认为是灰体以及漫反射表面, 故材料的光谱发射率 $\varepsilon_{G, \lambda}$ 可近似为常数, 其光谱辐射亮度为同温度下黑体光谱辐射亮度与 $\varepsilon_{G, \lambda}$ 的乘积。因此灰体材料热辐射在吸收性气体中的透过率 τ_G 可以近似表示为:

$$\tau_G = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{G, \lambda} \tau_\lambda L_{B, \lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{G, \lambda} L_{B, \lambda} d\lambda} \approx \tau_B \quad (8)$$

表 1 为光程 0.11 m 、 T_0 为 293.15 K 时, 黑体辐射在不同气氛中的透过率。 $L_{B, \alpha 1}$ 、 $L_{B, \alpha 2}$ 表示黑体温度为 40°C 和 120°C 时分别所对应的被气体吸收的黑体辐射能量。 τ_{B1} 、 τ_{B2} 分别代表黑体温度为 40°C 和 120°C 时, $8 \sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波段的黑体辐射在气体中的透过率, 相应温度下黑体辐射亮度为 $47.3\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 和 $125.1\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。由表 1 可知, 气体初始状态是决定透过率的关键因素。

且图 3 和表 1 表明, 气体选择性吸收对黑体辐射的影响强烈依赖于压强。故图 6 直观展示了光程为 0.11 m 、气体温度为 70°C 、黑体温度为 120°C 时, 不同压强 SF_6 对黑体辐射光谱的吸收作用。

2.3 封闭式腔体中气体状态分布模拟

样机中的气体随热源升温后, 受浮升力的影响, 气体各处的密度、压强和温度分布并不完全一致。因此, 利用有限元仿真可为分析热辐射在选择吸收性气体中的能量透过率提供参考。以充入 293.15 K 、 0.7 MPa SF_6 为例, 探究图 1 和 7 所示的从热源至腔体 3 条路径上气体的温度、密度以及相对于圆点气压的变化结果。这 3 条路

表 1 不同气氛中黑体辐射透过率
Table 1 Blackbody radiation transmittance under different atmospheres

p_0/MPa	$T_1/^\circ\text{C}$	p_1/MPa	$L_{\text{SF}_6}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1})$	$T_{\text{B}}=40^\circ\text{C}$		$T_{\text{B}}=120^\circ\text{C}$	
				$L_{\text{B},\alpha 1}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1})$	τ_{B1}	$L_{\text{B},\alpha 1}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1})$	τ_{B2}
0.1	20	0.10	2.155 5	2.909 7	0.938 6	7.181 4	0.942 7
0.4	20	0.40	2.812 3	3.796 2	0.919 9	9.369 0	0.925 2
0.7	20	0.70	3.994 6	5.392 0	0.886 2	13.306 4	0.893 8
0.1	45	0.11	3.104 7	2.897 1	0.938 9	7.150 2	0.942 9
0.4	45	0.43	4.127 2	3.851 4	0.918 7	9.504 8	0.924 1
0.7	45	0.76	5.898 5	5.504 2	0.883 8	13.583 0	0.891 6
0.1	70	0.12	4.224 7	2.871 7	0.939 4	7.087 0	0.943 4
0.4	70	0.47	5.730 0	3.894 9	0.917 8	9.611 9	0.923 3
0.7	70	0.82	8.237 5	5.599 6	0.881 8	13.817 9	0.889 7

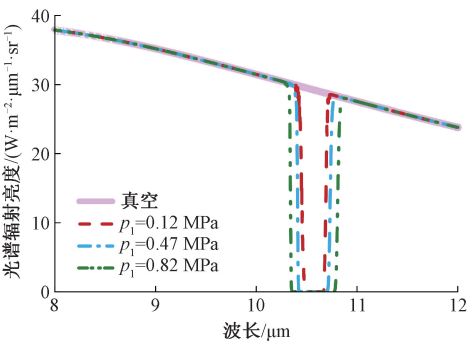


图 6 不同压强 SF₆ 下黑体辐射光谱透射图
Fig. 6 Transmitted blackbody radiation spectrum under different SF₆ pressures

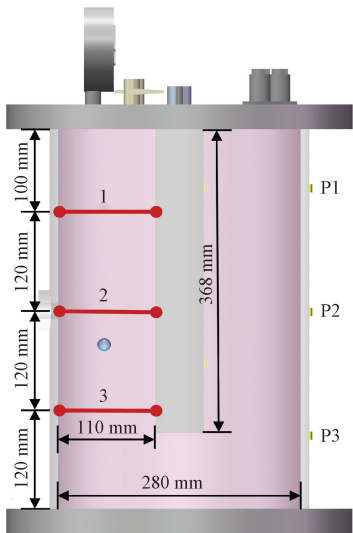
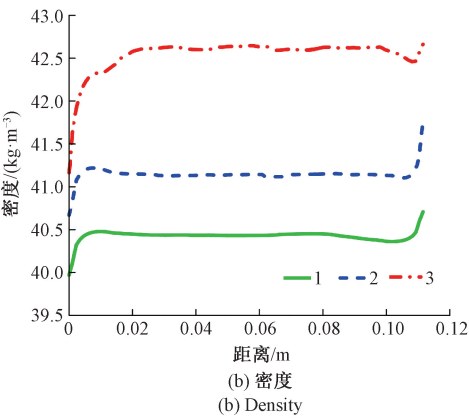
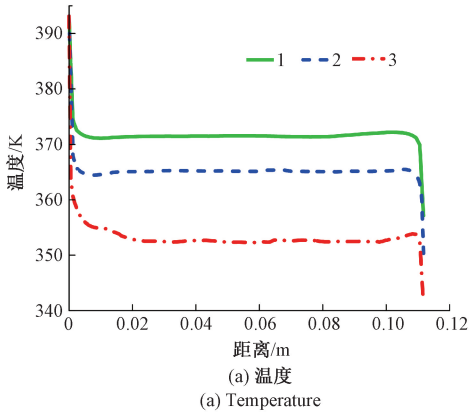


图 7 有限元模型示意图
Fig. 7 Finite element model schematic

径均定义在热像仪观测目标热源时的中心对称平面上。在该二维截面内,路径垂直于热源平面,起点为热源,终点为腔体内壁面。

结果如图 8 所示,在靠近表面的边界层外,3 个参数从热源至腔体的变化基本为常数,且基于 HITRAN 透过率模拟可知 3 条路径之间的相对压强和温度变化量,远小于使透过率发生显著变化的数量级。并且由于腔体充气后保持密封,气体整体密度应为常数。同时,根据仿真



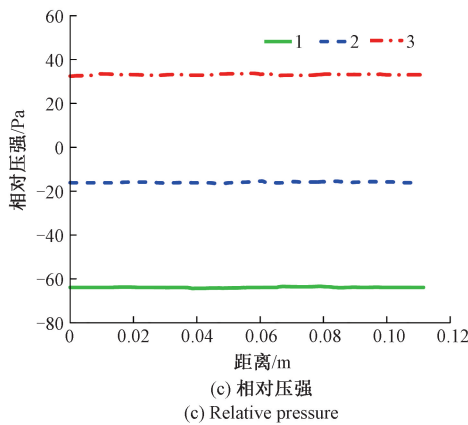


图 8 有限元仿真结果

Fig. 8 Finite element simulation results

结果, 罐壁 P1 点温度为 357 K, 气体的平均温度为 358 K, 因此气体温度可近似等于 P1 点温度。基于上述分析, 可将不同气压等级下的热辐射能量透过率近似等于气体初始状态下的透过率。

2.4 表观温度解析模型

基于上述分析, 将样机中目标面 t 和背景面 b 分别离散为 m 和 n 个元表面, τ_A 不随光线传播路径改变, 进而由光谱辐射亮度为 L_{AA} 的 A 入射至镜头的光谱辐射亮度 L_A 为:

$$L_A = \sum_{j=0}^{\infty} \tau_A C_{Aj} L_{AA}(T_A) + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=2}^{\infty} \tau_A C_{t,ij} L_{t,\lambda i}(T_{t,i}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\infty} \tau_A C_{b,ij} L_{b,\lambda i}(T_{b,i}) + (1 - \tau_A) L_{A,i}(T_{gas}) \quad (9)$$

式中: $L_{\lambda i}$ 为第 i 个温度为 T_i 的微元表面发出的光谱辐射亮度; C_{Aj} 、 C_{ij} 为常数; $C_{ij} L_{\lambda i}$ 为 τ_A 为 0 时第 i 个微元面辐射能量经 j 次反射后, 进入镜头的光谱辐射亮度。通常工程材料可以认为是灰体, 故有:

$$T_r^4 = \sum_{j=0}^{\infty} \tau C_{Aj} T_A^4 + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=2}^{\infty} \tau C_{t,ij} T_{t,i}^4 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\infty} \tau C_{b,ij} T_{b,i}^4 + (1 - \tau) T_{gas}^4 \quad (10)$$

3 气体对测温影响实测分析

在理论仿真基础上, 通过实验采集不同气氛、压力及温度下的腔体表面红外热图, 可获取实际工况三维空间中气体吸收-辐射效应、对流传热与壁面热传导等多物理场综合作用下的能量演变规律。

3.1 实验平台及方法

实验样机(图 9)依据气体绝缘电力设备简化而成, 主体由表示背景的外部圆柱壳体和作为目标的内部长方体热源两部分组成。样机上端盖通过接口, 依次连接用于控制气体充放的加压系统, 用于控制目标温度和采集腔体 P1、P2、P3 点温度的温控系统, 以及为保证目标平面温度均匀而使油体循环流动的油流系统。样机内部的红外热图, 由自主设计的光纤束结构的内窥式红外热像仪通过正对目标平面的腔体小孔进行观测, 并通过上位机数据分析系统进行数据分析。其中, 热像仪的响应波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 。

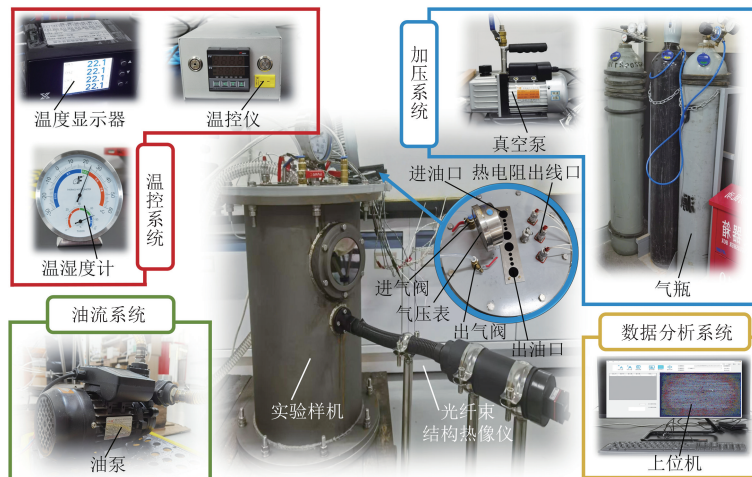


图 9 实验平台示意图

Fig. 9 Experimental platform schematic

基于实验平台, 分别在室温下开展空气、 SF_6 两种气体不同气压等级下的目标热源温升实验, 记录红外热像仪光纤束纤芯对应像元的响应平均值。气压等级范围为绝对压强 $0 \sim 0.7 \text{ MPa}$, 步长为 0.1 MPa , 其中

0 MPa 表示真空, 相应实验编号分别为真空 v. p0、空气 a. p1 ~ a. p7 和 SF_6 s. p1 ~ s. p7。温度范围依据国标 GB/T 11022—2020 设计为 $40^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$, 步长为 5°C 。当热源温度、充入气体一定时, 腔体温度分布受外界环

境影响,可以通过改变热源温升间隔时间,即控制对流传热时长来改变腔体壁面温度,以模拟不同温度的背景辐射对红外热图的影响。其中,时间隔间即传热时间,分别为 240、600、1 200 s,对应实验编号为 t1、t2 和 t3。

图 10 展示了传热时间为 1 200 s 时,热像仪分别在真空(v. p0)、空气(a. p7)和 SF₆(s. p7)气氛下采集到的灰度图。为突显不同气氛对能量吸收的影响,各子图的灰度值均基于图 10(a)~(f) 的全局最大值和最小值,统一线性映射至 0~255。

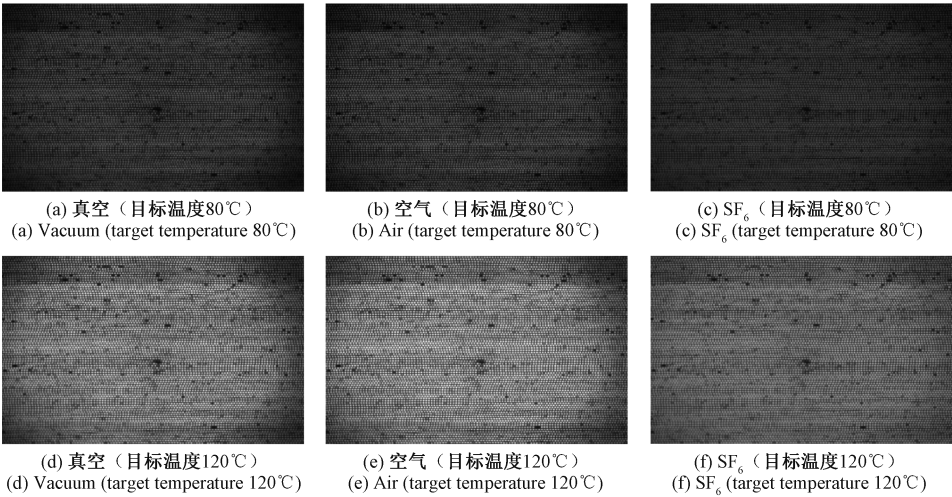


图 10 真空、0.7 MPa 空气与 SF₆ 气氛下热像仪采集灰度图

Fig. 10 Grayscale images captured by thermal imager under vacuum, 0.7 MPa air, and SF₆ Atmosphere

3.2 气体类型影响分析

气体类型对红外测温的影响,采用温升间隔为 1 200 s 的数据组。图 11 为真空以及不同气体各自在 0.2 和 0.6 MPa 下,响应值随目标温度的变化趋势,图 11 中划线曲线簇、实线曲线、点线曲线簇分别对应空气、真空和 SF₆ 气体。

热像仪镜头的能量升高的程度。由图 11 可知,当目标温度为 40℃~120℃,不同气氛中响应值随温度升高基本成线性升高。并且由图 11 中空气曲线簇和 SF₆ 曲线簇可知,以 0.4 MPa 步进的气体压力变化并非影响斜率的主要因素,气体种类则是影响斜率的关键因素。以真空斜率 4.47 为分界线,空气斜率居上, SF₆ 斜率居下。如图 12(a) 所示,P1、P2、P3 点的温度 T1、T2 和 T3,由于对流传热,实验样机充入空气或 SF₆ 时的背景温度均高于真空,故目标温度相同时时在空气氛围中由目标反射至镜头的背景辐射能量增加,因此空气斜率高于真空,均值为 4.72。而 SF₆ 气氛下虽增加对流传热环节,但气体对 10.56 μm 波长附近的热辐射能量具有选择吸收性,导致进入镜头的各来源能量均被部分衰减,因此 SF₆ 气氛下斜率最低,均值为 3.73。

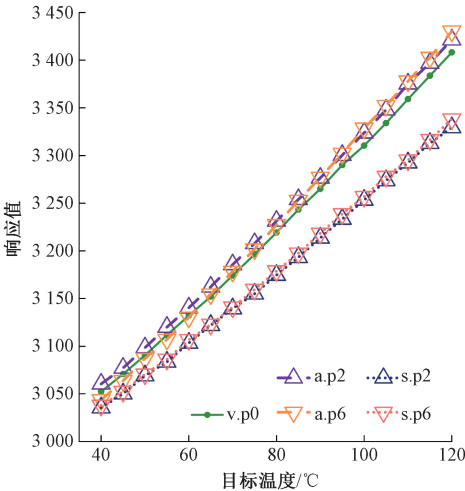
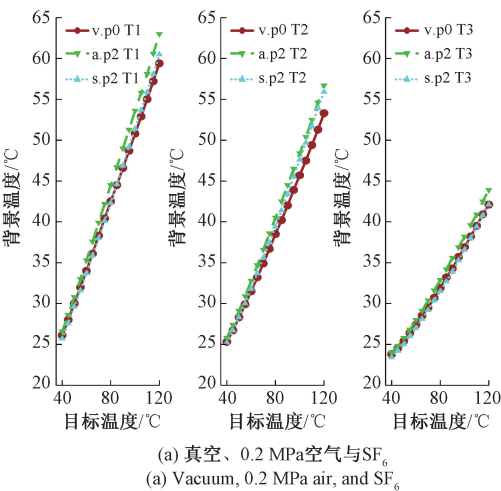


图 11 不同气压下响应值随目标温度变化

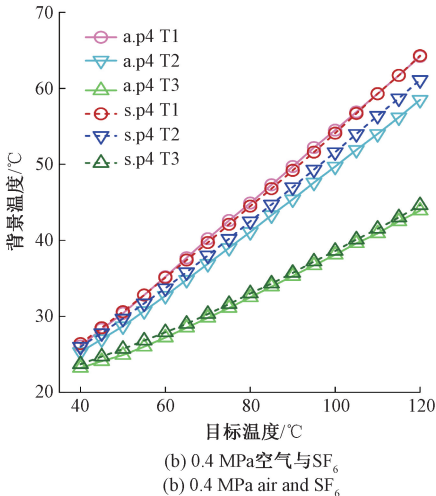
Fig. 11 Response value variation with target temperature under different pressures

对比图 12(a)~(c) 可知,随着气体压强的增强,空气下的各点温度逐渐小于 SF₆ 下的值。由气体对流传热时的能量守恒方程可知,低压时以热传导为主,空气热导率($\approx 0.024 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 高于 SF₆ ($\approx 0.013 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),故此时空气传热效果较好;随着气压增强,气体密度增大,对流传热影响逐渐增大,表征自然对流强度的格拉晓夫数 Gr 与密度平方成正比,而 SF₆ 的分子量 (146.06 g/mol) 远高于空气 ($\approx 29 \text{ g/mol}$),在相同压力下密度更高(约为空气的 5 倍),故此时 SF₆ 传热效果较好。

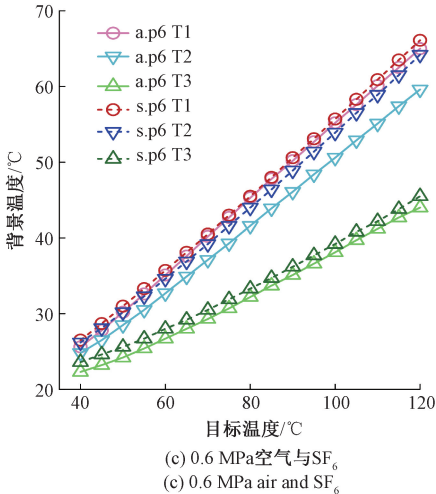
图 11 中斜率表示目标温度升高 1℃,响应值即进入



(a) 真空、0.2 MPa 空气与 SF₆
(a) Vacuum, 0.2 MPa air, and SF₆



(b) 0.4 MPa 空气与 SF₆
(b) 0.4 MPa air and SF₆



(c) 0.6 MPa 空气与 SF₆
(c) 0.6 MPa air and SF₆

图 12 不同气氛下背景温度随目标温度变化
Fig. 12 Background temperature variation with target temperature under different atmospheres

以目标温度 120℃ 时为例,比较相同目标温度下,不同气氛对同一背景下温度分布的影响,结果如表 2 所示。

由表 2 可知, SF₆ 气氛下 T1 与 T3 温差 Δ 小于空气,即 SF₆ 气氛下背景中段表面温度分布更均匀。

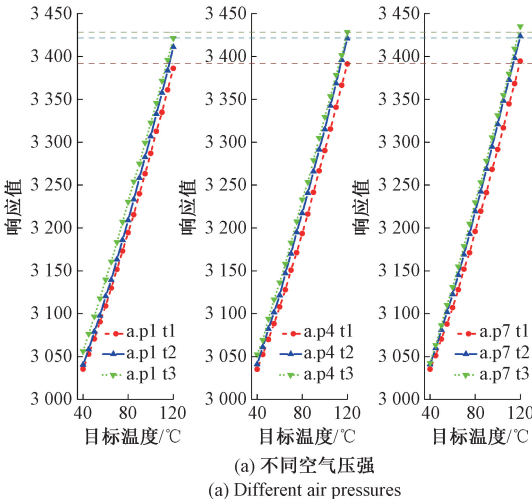
表 2 不同气氛下背景温差
Table 2 Background temperature difference under different atmospheres (°C)

实验编号	T1	T3	Δ
s. p1	57.9	40.7	17.2
s. p4	64.3	44.6	19.7
s. p7	66.7	46.3	20.4
a. p1	62.2	43.4	18.8
a. p4	64.2	43.9	20.3
a. p7	65.5	44.5	21.0

3.3 传热时间影响分析

采用 P1 点数据集,探究传热时间对红外测温的影响。当样机的充入气体、热源温度一定时,样机腔体温度将随环境温度改变。通过改变热源温升时间间隔,可以在相同目标温度下得到不同背景温度。虽然样机整体传热过程并未达到稳态,但在热像仪拍摄瞬间,近于光速传播的红外热图已是稳态,因此通过改变传热时间可以探究背景热辐射对红外测温的影响。

图 13 为不同传热时间下空气和 SF₆ 分别为 0.1、0.4、0.6 MPa 时,响应值随目标温度的变化趋势,图 13 中带有圆形、上三角形、下三角形符号的曲线簇分别对应 t1(240 s)、t2(600 s)和 t3(1 200 s)实验结果。由图 13 可知,当目标温度一定时,响应值随传热时间的延长而增大,这是由于样机的气体 and 腔体背景温度在逐步升高,使得相同目标辐射能量下进入镜头的气体辐射能量和反射背景辐射能量增大。并且由于气体的密度提升有助于其提高传热能力,因此短时间高压下的曲线斜率将会大于长时间低气压的斜率,表现为图中不同线型曲线的交叉。



(a) 不同空气压强
(a) Different air pressures

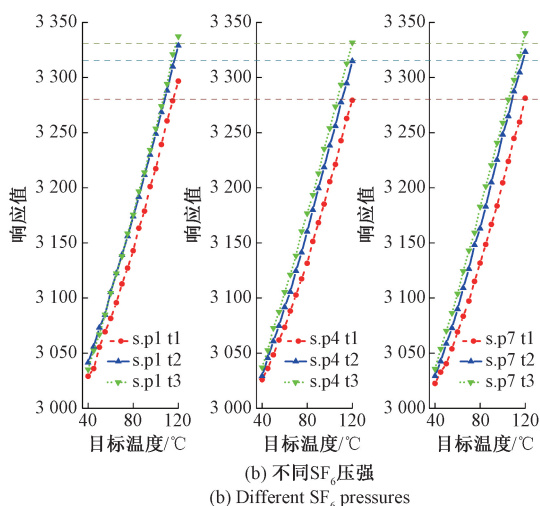


图13 不同传热时间下响应值随目标温度变化

Fig. 13 Response value variation with target temperature under different heat transfer times

分别观察图13(a)和(b),相同传热时间下空气中的斜率随气压增长而增大, SF_6 中则存在拐点,其斜率随气压增长先减小后增大,具体如图14所示。这是由于在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段,空气对穿过其中的热辐射为透明介质,而 SF_6 会吸收波长为 $10.56\ \mu\text{m}$ 的辐射,且由气体光谱吸收模型可知,压强越大相同光程中气体对辐射能量的吸收率越大。因此, SF_6 的斜率趋势是气体传热及光谱吸收的综合作用。在单位目标温升下,低压时气体对进入镜头的能量吸收衰减作用显著,斜率表现为下降;高压时随着气体、背景温升变大,辐射能量的增长大于衰减的能量,故斜率转为上升。

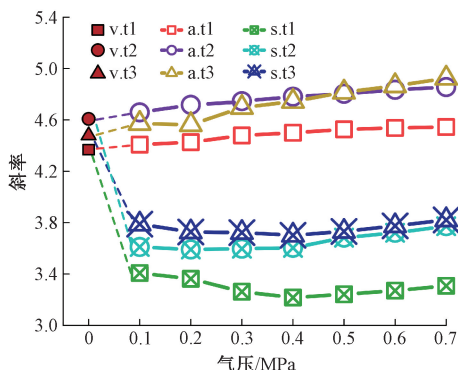


图14 不同传热时间下斜率随气压变化

Fig. 14 Slope variation with pressure under different heat transfer times

由图14可知,相同气压下,随着传热时间的延长,进入镜头的能量逐渐增多,真空、空气和 SF_6 气氛中均表现出斜率的增长。虽然240、600、1200 s三者之间的间隔变长,但由图14可知同种气体相同气压下斜率的变化间隔变小。这是由于当热源温度升高一个步长后,样机整

体温度随之上升。随着各区域间温差减小,热传导速率逐渐降低,导致样机整体温升速度减缓,最终当温度分布达到稳态时停止变化(图15)。

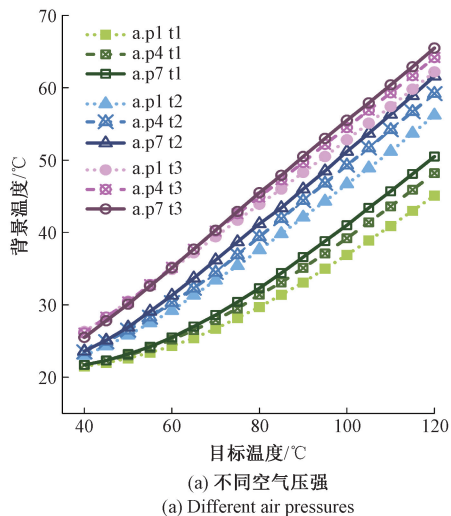
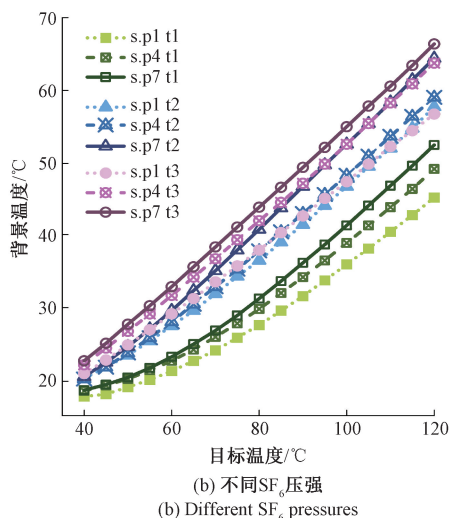
(a) 不同空气压强
(a) Different air pressures(b) 不同SF6压强
(b) Different SF_6 pressures

图15 不同传热时间下背景温度随目标温度变化

Fig. 15 Background temperature variation with target temperature

3.4 表观温度解析模型参数分析

气体种类、压强通过对流传热改变样机腔体温度,从而间接影响红外热图采集时的背景辐射能量,而气体种类、压强和温度则通过选择性吸收进入其中的辐射光谱能量直接衰减进入镜头的能量。因此,以实验数据为基准,综合考虑目标、气体和背景辐射关系,标定表观温度解析模型关键参数,即可实现真实目标温度反演。

根据式(10),当目标表面温度一致、背景温度根据P1、P2、P3点温度离散为3段时,有:

$$T_r^4 = \left(\frac{V_{\text{response}}}{10} \right)^4 = \tau (C_1 T_{b,1}^4 + C_2 T_{b,2}^4 + C_3 T_{b,3}^4 + C_4 T_t^4) + (1 - \tau) T_{\text{gas}}^4 \quad (11)$$

1) 空气气氛测温分析

在 8~12 μm 波段范围,空气对热辐射的透过率为 1。基于式(11)中的变量 $T_{b,1}$ 、 $T_{b,2}$ 、 $T_{b,3}$ 和 T_t ,开展与因变量 T_r 的 Pearson/Spearman 相关性分析、方差膨胀因子 (variance inflation factor, VIF) 分析以及 Lasso 回归分析,相关结果如表 3 所示。

表 3 自变量统计指标分析结果

Table 3 Independent variable statistical analysis results				
因变量	Pearson 相关系数	Spearman 相关系数	VIF	Lasso 回归系数
$T_{b,1}$	0.932 1	0.936 2	261.23	0.178 9
$T_{b,2}$	0.925 6	0.934 0	204.47	0.039 1
$T_{b,3}$	0.869 5	0.894 9	58.05	0.054 9
T_t	0.992 4	0.993 4	8.941 6	0.365 1

由表 3 可知, T_t 与 T_r 的相关性最强; $T_{b,3}$ 与 T_r 的相关性虽略低,但仍属于强相关水平。尽管 $T_{b,3}$ 方差膨胀因子较高 (58.05), 存在一定共线性, 但其值远低于 $T_{b,1}$ (261.23) 和 $T_{b,2}$ (204.47)。此外, Lasso 回归结果显示 T_t 对模型的贡献最大。

综合上述分析, $T_{b,3}$ 与 T_t 的组合在保留预测能力的同时,对数值稳定性影响较小,进而有:

$$T_r^4 = 0.798\ 64T_{b,3}^4 + 0.258\ 5T_t^4 \tag{12}$$

利用空气 0.55 MPa 时的实验数据进行验证,对 T_r

解析的均方误差 (mean squared error, MSE) 为 0.794 K,均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 为 0.891 2 K,平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 为 0.722 3 K,决定系数 (coefficient of determination, R^2) 为 0.994。空气气氛下,对于 T_t 的量化偏差 $\leq \pm 1$ K。

2) SF₆ 气氛测温分析

当 SF₆ 气氛下样机腔体内表面状态与空气相同时,结合式 (11)、(12) 从工程角度将气体温度近似于 P3 点温度, SF₆ 的拟合函数可以近似表示为:

$$\begin{cases} T_r^4 = \tau C_3 T_{b,3}^4 + \tau C_4 T_t^4 + (1 - \tau) T_{gas}^4 = \\ \quad C_3' T_{b,3}^4 + C_4' T_t^4 \\ \tau = C_4' / 0.258\ 5 \\ C_3' = 0.798\ 64\tau + (1 - \tau) \end{cases} \tag{13}$$

依据实测数据,由式 (13) 分别计算不同压强下的透过率 τ_{true} 。并进一步建立透过率与初始压强的拟合函数,有透过率 τ_{fit} 为:

$$\tau_{fit} = -326.802\ 9p_0^6 - 825.307\ 9p_0^5 - 832.008\ 3p_0^4 + 424.538\ 3p_0^3 - 113.249\ 7p_0^2 + 14.106\ 5p_0 - 0.019\ 8 \tag{14}$$

表 4 所示为依据实测数据计算的参数,以及根据透过率拟合函数计算出的参数。由表 4 可知,基于实测系数对表观温度 T_r 解析的 $MAE_{true} < 0.6$ K,基于拟合系数解析的 $MAE_{fit} < 3$ K。

表 4 SF₆ 气氛拟合系数

Table 4 SF₆ atmosphere fitting coefficients table

p_0 /MPa	实测				推导			
	$C_{3,true}'$	$C_{4,true}'$	τ_{true}	MAE_{true}/K	$C_{3,fit}'$	$C_{4,fit}'$	τ_{fit}	MAE_{fit}/K
0.1	0.911 5	0.157 1	0.607 7	0.654 9	0.877 6	0.157 1	0.607 7	2.306 1
0.4	0.941 5	0.125 7	0.486 5	0.552 5	0.902 0	0.125 7	0.486 5	2.751 1
0.7	0.941 0	0.122 9	0.475 3	0.615 9	0.904 3	0.122 9	0.475 3	2.598 7

利用 SF₆ 0.45 MPa 时的实验数据进行验证,对 T_r 解析的 MSE_{fit} 为 1.633 3 K, $RMAE_{fit}$ 为 1.278 K, MAE_{fit} 为 1.115 9 K, R^2_{fit} 为 0.979 9。

3) 不同气氛目标温度反演

在电力设备样机实际工况中,可以采集到表观温度 T_r 和背景温度 $T_{b,3}$, 因此根据式 (12) ~ (14), 反演得到目标温度,即校正温度 T_t 。以 0.55 MPa 空气、0.45 MPa SF₆ 气氛中的数据为例,结果如图 16 所示。表观温度与目标实际温度 T_{true} 之间的 MAE 在空气和 SF₆ 下分别为 32.051 和 35.928 K,校正温度与目标实际温度之间的 MAE 则分别下降至 2.006 和 5.956 K。

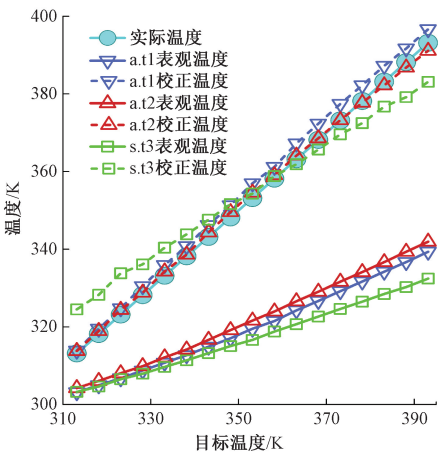


图 16 不同气氛下目标温度校正结果
Fig. 16 Target temperature calibration results under different atmospheres

4 结 论

针对空气和 SF_6 气氛对于腔体内窥式红外测温的影响,首先基于 HITRAN 光谱透过率、有限元气体状态分布仿真,从局部解析了气体密度、温度以及光程对热辐射透过率的影响,并建立起热像仪表观温度拟合模型。其次,基于实验获得了不同气氛下的红外热图数据,探究了气体传热对于背景辐射的影响以及气体光谱选择性吸收对于场景红外测温整体结果的作用。结果表明:

1) 在符合电力设备运行工况的温度、压强和光程变化范围内,压强是影响 SF_6 气体光谱透过率的决定因素,因此不同 SF_6 气氛对热辐射的吸收率可以近似为腔体充入气体初始状态时的数值,且仅需在热辐射第 1 次反射前的光程中考虑透过率对能量的衰减;

2) 将气体沿腔体径向分割为不同高度层,各层气体密度、压强和温度数值保持稳定,仅在与表面接触的薄层发生急剧变化,结合光谱分析, SF_6 对于在腔体壁面间反射的热辐射能量透过率可以近似为常数;

3) SF_6 的传热能力优于空气,相同目标温度下 SF_6 气氛中腔体温度略高于空气气氛中的温度,且腔体中段温度分布更加均匀,即 SF_6 气体下的腔体背景辐射能量更大;

4) 基于分析建立的简化热像仪表观温度解析模型,在不同气氛下对表观温度进行预测的平均绝对误差 (MAE) < 1 K; 对于目标温度反演的精度在空气和 SF_6 气氛下,分别为 ± 2 和 ± 6 K。

综上,利用简化的分析模型量化空气和 SF_6 气氛对于腔体内窥式红外测温的影响,基本准确。然而,模型仍存在一定的局限性。首先,模型将腔体内气体温度和压力视为均匀分布,虽然在简化样机中该假设基本合理,但在结构复杂的实际电力设备腔体中,气体状态分布梯度更为显著,从而影响测温精度。未来,可结合热辐射仿真技术,将腔体空间及气体进行网格划分,为每个网格赋予局部的温度、压强及光谱透过率参数,并采用蒙特卡洛法积分计算非均匀气体场对辐射能量的影响。

此外,模型假设所有内表面为灰体且具有漫反射特性,而实际工程材料的发射率与反射特性往往具有光谱依赖性与方向性,这会对多次反射能量的计算带来不确定性。后续研究中,可引入表面的双向反射分布函数,以更精确地描述热辐射的反射路径与能量分布。

在完成对气体与表面辐射影响的精确量化后,基于光纤束结构的内窥式红外热像仪有望获取电力设备内部

连续温度场信号,从而发现新的运行特征,实现更全面、快速的故障预警。若保持光路结构不变,将工作波长匹配至紫外波段,该监测系统还可用于检测腔体内的局部放电现象,为全面掌握设备运行状态提供多维度数据支撑,进一步提升电力设备的运检能力。此外,建立的温度反演模型,也可推广至冶金、核电等其他涉及特殊气氛下密封腔体测温的工业领域。

参考文献

- [1] YE X X, WEN R, JIANG L. Monitoring and diagnosis of equipment defects in electric power substation through remote infrared temperature measurement[J]. Nonlinear Optics Quantum Optics-Concepts in Modern Optics, 2024, 60(3/4): 253-261.
- [2] 张明泽, 韩嘉言, 王炳杰, 等. 低温环境条件下电力设备红外测温缺陷识别方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2726-2733.
ZHANG M Z, HAN J Y, WANG B J, et al. Identification method for infrared temperature measurement defects in power equipment under low-temperature environment [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2726-2733.
- [3] 江飞, 闫全全, 王媚, 等. 基于无源无线红外测温技术的特高压电力设备监测系统[J]. 电力与能源, 2023, 44(4): 370-372, 375.
JIANG F, YAN Q Q, WANG M, et al. UHV power equipment monitoring system based on passive wireless infrared temperature measurement technology[J]. Power & Energy, 2023, 44(4): 370-372, 375.
- [4] 徐非凡. 基于 OptiX 并行光线追踪计算的红外成像仿真软件研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
XU F F. Development of infrared imaging simulation software based on OptiX parallel ray tracing calculation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [5] 喻良瑜. 基于路径追踪的三维红外场景仿真算法及实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
YU L Y. Research and implementation on 3D infrared scene simulation based on path tracing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [6] 李建兵. 基于光线追踪的天基红外成像仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
LI J B. Space based infrared imaging system simulation based on ray tracing[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.

- [7] 张广军, 李亚萍, 李庆波. 小型红外 CO₂ 气体分析仪[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(5): 1032-1036.
ZHANG G J, LI Y P, LI Q B. Study on small infrared CO₂ gas analyzer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(5): 1032-1036.
- [8] 张天宇, 吴嘉雯, 方弘毅, 等. 复杂背景下三维弯曲表面红外测温修正[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 184-192.
ZHANG T Y, WU J W, FANG H Y, et al. Infrared temperature measurement correction of three-dimensional curved surface under complex background [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 184-192.
- [9] 潘冬, 蒋朝辉, 桂卫华. 基于方向发射率校正的红外测温补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 213-220.
PAN D, JIANG ZH H, GUI W H. An infrared temperature compensation method based on directional emissivity correction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 213-220.
- [10] AVRAHAM M, BOUSCHER S, NEMIROVSKY J, et al. Measurement of emissivity with a new grey body and novel IR thermal sensor dubbed TMOS [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2025, 44(1): 17-24.
- [11] HAZRA S, PATIL U, SANVITO S. A charge-density machine-learning workflow for computing the infrared spectrum of molecules [J]. The Journal of Chemical Physics, 2025, 163(17): 174104.
- [12] 黄知秋, 李启正, 张猛, 等. 扫描波长调制光谱高精度复现分子吸收率函数方法[J]. 物理学报, 2025, 74(6): 138-149.
HUANG ZH Q, LI Q ZH, ZHANG M, et al. A method of high-precision reproduction of molecular absorbance profile by scanning wavelength modulation spectroscopy [J]. Acta Physica Sinica, 2025, 74(6): 138-149.
- [13] 尹增谦, 武臣, 宫琬钰, 等. Voigt 线型函数及其最大值的研究[J]. 物理学报, 2013, 62(12): 212-216.
YIN Z Q, WU CH, GONG W Y, et al. Voigt profile function and its maximum [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(12): 212-216.
- [14] 朱湘飞, 林兆祥, 刘林美, 等. 温度压强对 CO₂ 吸收光谱的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 161-167.
ZHU X F, LIN ZH X, LIU L M, et al. Influence of temperature and pressure on CO₂ absorption spectrum [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 161-167.
- [15] 袁洪瑞, 刘涛, 朱天鑫, 等. SF₆ 分子的 10.6 μm 高分辨射流冷却激光吸收光谱[J]. 物理学报, 2023, 72(6): 154-160.
YUAN H R, LIU T, ZHU T X, et al. High-resolution jet-cooled laser absorption spectra of SF₆ at 10.6 μm [J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(6): 154-160.
- [16] ROTHMAN L S, RINSLAND C P, GOLDMAN A, et al. The HITRAN molecular spectroscopic database and hawks (HITRAN atmospheric workstation): 1996 edition [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1998, 60(5): 665-710.
- [17] ROTHMAN L S, GORDON I E, BARBE A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110(9): 533-572.
- [18] GORDON I E, ROTHMAN L S, HARGREAVES R J, et al. The HITRAN 2020 molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2022, 277: 107949.
- [19] 李金萍, 蔡友林, 刘其涛. 不同高度不同大气模式下红外图像仿真[J]. 红外技术, 2024, 46(10): 1218-1223.
LI J P, CAI Y L, LIU Q T. Simulation of infrared images at different heights and atmospheric modes [J]. Infrared Technology, 2024, 46(10): 1218-1223.
- [20] 吕琪, 李凌, 余松林, 等. 红外场景仿真方法及发展现状研究综述[J]. 防护工程, 2024, 46(5): 60-66.
LYU Q, LI L, YU S L, et al. An overview of infra-red scenario simulation methods research [J]. Protective Engineering, 2024, 46(5): 60-66.
- [21] LI X S, LUO Z J, YANG Q R, et al. Airborne infrared imaging simulation for target recognition [J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2022, 6: 846-850.
- [22] 李晨阳. 基于三维场景的红外成像仿真系统及实现[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2019.
LI CH Y. The infrared imaging simulation system based on three dimensional scene and its implementation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, Chinese Academy of

- Sciences), 2019.
- [23] 王霄. 空中目标红外辐射特性分析与成像仿真技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2021.
- WANG X. Infrared radiation analysis and imaging simulation of aerial target [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences), 2021.
- [24] ZHU M Y, YANG CH B, QIE L L, et al. Using Rayleigh scattering over the ocean for satellite in-flight polarization calibration[J]. Optics Express, 2025, 33(17): 36876-36894.
- [25] 贾娜, 齐振恒. 远距离中波红外水平大气透过率修正研究[J]. 激光与红外, 2025, 55(6): 928-932.
- JIA N, QI ZH H. Study on correction of horizontal atmospheric transmittance of long-range mid-wave infrared[J]. Laser & Infrared, 2025, 55(6): 928-932.
- [26] 王亮, 童忠诚, 吴俊. 红外系统对战机的探测性能仿真分析[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(5): 99-109.
- WANG L, TONG ZH CH, WU J. Simulation analysis of detecting capability of infrared system for fight plane[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(5): 99-109.
- [27] 周晶晶, 郝小鹏, 宋健, 等. 大口径宽温区真空黑体辐射源的研制[J]. 计量科学与技术, 2024, 68(5): 57-64.
- ZHOU J J, HAO X P, SONG J, et al. Development of a vacuum blackbody radiation source with large aperture and wide temperature range[J]. Metrology Science and Technology, 2024, 68(5): 57-64.
- [28] 许鑫, 夏蔡娟, 周晶晶, 等. 地球静止轨道干涉式红外探测仪(GIIRS)星载黑体辐射源的研制[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(10): 82-91.
- XU X, XIA C J, ZHOU J J, et al. Development of on-board blackbody radiation source for Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(10): 82-91.
- [29] 孙国霞. 基于电接触理论的 GIS 母线接头过热性故障的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- SUN G X. Research of GIS busbar connector overheating fault based on electrical contact theory [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [30] CAO H Y, LUO L G, SHENG G H, et al. Radial identification of the temperature rise rate of GIS busbar conductors based on temperature gradients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(6): 3514-3524.
- [31] 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019: 183-192.
- TAO W Q. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2019: 183-192.
- [32] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算——计算热辐射学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 1-40.
- TAN H P, XIA X L, LIU L H, et al. Numerical computation of infrared radiative properties and radiative transfer: Computational thermal radiation [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006: 1-40.
- [33] 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.
- [34] ŠIMEČKOVÁ M, JACQUEMART D, ROTHMAN L S, et al. Einstein A-coefficients and statistical weights for molecular absorption transitions in the HITRAN database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2006, 98(1): 130-155.
- [35] 杨立, 杨桢. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 47-56.
- YANG L, YANG ZH. Principles and technology of infrared thermography for temperature measurement [M]. Beijing: Science Press, 2012: 47-56.

作者简介



杨瑶光, 2019 年于中北大学获得学士学位, 现为西安交通大学博士研究生, 主要研究方向为电力设备红外监测技术。

E-mail: sxjxyyg@163.com

Yang Yaoguang received her B. Sc. degree from North University of China in 2019. She is currently a Ph. D. candidate at Xi'an Jiaotong University. Her main research interest includes infrared monitoring technology for electrical equipment.



胡若楠, 2023 年于郑州大学获得学士学位, 现为西安交通大学硕士研究生, 主要研究方向为电力设备红外监测技术。

E-mail: huu_ruonan@163.com

Hu Ruonan received her B. Sc. degree from Zhengzhou University in 2023. She is currently a M. Sc candidate at Xi'an Jiaotong University. Her main research interest includes infrared monitoring technology for electrical equipment.



刘恭智, 2017 年于太原理工大学获得学士学位, 现为咸阳亚华电子电器有限公司初级工程师、西安交通大学硕士研究生, 主要研究方向为电力设备绝缘性能分析。

E-mail: liugongzhi@yahooadz.com

Liu Gongzhi received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 2017. He is currently a junior engineer at Xianyang Yahua Electronic Apparatus Co., Ltd., and a M. Sc candidate at Xi'an Jiaotong University. His main research interest includes insulation performance analysis of power equipment.



冯李军, 2008 年于西安电子科技大学获得学士学位, 2011 年于西安交通大学获得硕士学位, 现为国网山西省电力公司运城供电公司高级工程师、西安交通大学博士研究生, 主要研究方向为电力设备绝缘性能分析。

E-mail: fengljun065@163.com

Feng Lijun received his B. Sc. degree from Xidian University in 2008, his M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2011. He is currently a senior engineer in State Grid Shanxi Electric Power Company Yuncheng Power Supply Company, and a Ph. D. candidate at Xi'an Jiaotong University. His main research interest includes insulation performance analysis of power equipment.



贺博(通信作者), 2006 年于西北工业大学获得博士学位, 现为西安交通大学教授, 主要研究方向为电力设备状态在线监测、智能评估及早期预警。

E-mail: hebo@xjtu.edu.cn

He Bo (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2006. He is currently a professor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include online condition monitoring, intelligent assessment, and early warning of power equipment.