中北大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)
2026年 第47卷 第5期(总第229期)
Vol. 47 No. 5 2026(Sum No. 229)

文章编号：1673-3193(2026)05-0628-11 J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(5): 628-638.

爆炸场瞬态高温辐射测温技术研究进展与展望

郝晓剑[1,2]，张驰原[1,2]，裴 攀[1,2]，冯申翔[1,2]，郑永秋[1,2]

(1. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室，山西 太原 030051；
2. 中北大学 仪器与电子学院，山西 太原 030051)

摘 要： 爆炸场温度及其时空分布是表征能量释放、产物状态和热毁伤效应的重要参数，但火球持续时间短、温升速率高、空间梯度大且试验不可重复，传统接触式测温受热惯性、量程和结构生存能力限制。为梳理适用于该场景的非接触式辐射测温方法，本文按照温度信息由点、面到体的空间维度演进，综述了蓝宝石光纤、原子发射双谱线、高速互补金属氧化物半导体面阵成像、多光谱温度-发射率联合反演及多视角三维温度场重建的原理、系统组成和适用边界。现有研究表明：蓝宝石光纤黑体腔可提高局部高温测点的环境适应性，实测时间常数约为794 μs；双谱线法具有较快响应，但受局部热力学平衡、光学厚度和谱线自吸收约束；高速面阵成像实现二维瞬态温度映射，多光谱方法通过增加光谱约束减弱发射率不确定性，含铝炸药试验的测温误差约为2%；多视角层析与隐式辐射场可恢复三维结构，现有爆炸火球工程试验的相对误差为10.54%～14.67%。综合比较发现，发射率时变、颗粒散射、通道同步误差、动态标定和内部体素缺少独立基准仍是制约定量测温的主要因素。未来应构建“点式高速基准—二维多光谱反演—稀疏视角三维重建”的协同体系，完善光学链路联合标定、参与性介质辐射传输约束与体素级不确定度评估，为爆炸场温度测量和热毁伤评价提供可追溯的技术基础。

关键词： 爆炸场；辐射测温；蓝宝石光纤；原子发射双谱线；CMOS；多光谱测温；三维温度场

中图分类号： TH811；TP212.1 **文献标识码：** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.07.0026

引用格式： 郝晓剑，张驰原，裴攀，等. 爆炸场瞬态高温辐射测温技术研究进展与展望[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2026，47(5)：628-638.

Hao Xiaojian, Zhang Chiyuan, Pei Pan, et al. Research progress and prospects of transient high-temperature radiation thermometry in explosion fields[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(5): 628-638.

Research Progress and Prospects of Transient High-Temperature Radiation Thermometry in Explosion Fields

Hao Xiaojian[1,2], Zhang Chiyuan[1,2], Pei Pan[1,2], Feng Shenxiang[1,2], Zheng Yongqiu[1,2]

(1. State key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Temperature and its spatiotemporal distribution in explosion fields are important indicators of energy release, detonation-product states, and thermal damage. However, explosive fireballs are characterized by

收稿日期： 2026-07-27
基金项目： 国家自然科学基金面上项目(61473267, 52075504)
作者简介： 郝晓剑(1969—)，女，教授，博士，主要从事新型传感技术与高端光电仪器的理论和应用的研究。E-mail：haoxiaojian@nuc.edu.cn。

short durations, rapid temperature rise, steep spatial gradients, and poor repeatability, while conventional contact thermometry is limited by thermal inertia, measurement range, and sensor survivability. To clarify the applicability of radiation thermometry to these conditions, this review organizes existing methods according to the evolution of temperature information from point to surface and volume measurements. It examines the principles, system configurations, and application boundaries of sapphire-fiber thermometry, atomic-emission two-line thermometry, high-speed complementary metal-oxide-semiconductor array imaging, multispectral temperature-emissivity joint inversion, and multiview three-dimensional temperature-field reconstruction. Reported results show that sapphire-fiber blackbody cavities improve the environmental adaptability of local high-temperature measurements, with a measured time constant of approximately 794 μs. Two-line thermometry provides a faster response but is constrained by local thermodynamic equilibrium, optical thickness, and spectral self-absorption. High-speed array imaging extends point measurements to two-dimensional transient temperature maps, whereas multispectral methods reduce emissivity uncertainty through additional spectral constraints; an error of approximately 2% has been reported in aluminized-explosive tests. Multiview tomography and implicit radiance fields further enable three-dimensional reconstruction, with relative errors of 10.54%-14.67% reported in engineering tests of explosion fireballs. Time-varying emissivity, particle scattering, interchannel synchronization errors, dynamic calibration, and the lack of independent internal-voxel references remain the main obstacles to quantitative thermometry. Future systems should integrate pointwise high-speed references, two-dimensional multispectral inversion, and sparse-view three-dimensional reconstruction, together with optical-chain calibration, participating-medium radiative-transfer constraints, and voxel-level uncertainty evaluation.

Key words: explosion field; radiation thermometry; sapphire fiber; atomic-emission two-line thermometry; CMOS; multispectral thermometry; three-dimensional temperature field

0　引　言

温度及其时空分布直接反映爆炸过程中的能量释放速率、爆轰产物状态、金属颗粒二次燃烧和火球热辐射负荷，是连接爆炸机理研究、状态诊断与热毁伤评估的关键参量。高速相机定量成像、高速红外辐射测温以及距离和气象条件补偿已为火球温度演化测量提供了有效手段[1-3]。与接触式传感器相比，远距离辐射测温无需主体探测器进入火球，具有响应快、空间信息丰富和生存能力较强等优势。

辐射测温法经过几十年的发展，已经成为工程中应用十分广泛的技术。任何温度高于绝对零度的物体都会向外辐射热量，现有非接触辐射测温的理论基础是普朗克黑体辐射定律，该定律描述了黑体光谱辐射出射度随波长和热力学温度的变化关系，其光谱辐射出射度M_λ表达式如式（1）所示。

$$M_\lambda = \varepsilon C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)^{-1}, \quad (1)$$

式中：M_λ为光谱辐射出射度，W·m^{-2}·μm^{-1}；C_1、C_2分别为第 1、第 2 辐射常数，C_1=3.742 7×10^8（W·m^{-2}·μm^4），C_2=1.438 8×10^4（μm·K）；T为物体温度；ε为物体发射率。黑体辐射度结果如图 1 所示。

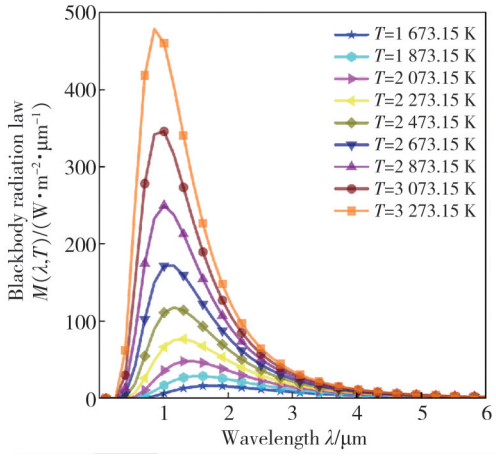


图 1　黑体辐射度结果图

Fig. 1　Blackbody radiation results

在爆炸场瞬态高温场景的测量中，特征谱线的合理选取是决定测温灵敏度、量程范围与测量精度的核心前提。谱线选择并非单一参数的择优，而是需在局部热力学平衡适用条件下，综合考量两条谱

线的激发电位差(决定温度响应灵敏度)、波长间距(弱化发射率波动与光学系统光谱响应差异的影响)、谱线独立性与邻线干扰情况、元素电离能与自吸自蚀特性,以及与光电探测器件光谱响应区间的匹配性等多重因素,通过多维度权衡实现测温性能的整体最优;围绕谱线优选开展的机理分析与实验验证,也因此成为辐射测温体系中兼具基础理论价值与工程指导意义的研究方向。

根据普朗克黑体辐射定律可知,辐射光信号经探测器光电转换后所输出的电压 $V(\lambda_0, T)$ 如式(2)所示。

$$V(\lambda_0, T)=K\int_{\lambda_0-\Delta\lambda/2}^{\lambda_0+\Delta\lambda/2}\varphi(\lambda, T)\mathrm{d}\lambda=KR(T), \quad (2)$$

其中

$$\varphi(\lambda, T)=\frac{c_1}{\lambda^5[\exp(c_2/\lambda T)-1]}, \quad (3)$$

$$K=\eta(\lambda_0)\times f(\lambda_0)\times D(\lambda_0)\times \varepsilon(\lambda_0), \quad (4)$$

式中:λ_0 和 $\Delta\lambda$ 为探测的波长和带宽;$\varphi(\lambda, T)$ 为光谱辐射出射度;$R(T)$ 可由数值积分得到;K 为与温度无关的装置常数,可由静态标定获得。

辐射测温技术均以系统标定为前提,点式传感器依赖装置常数或光谱综合常数的静态标定,二维面阵需完成空间配准、通道增益与触发同步的逐项校正,多光谱与三维重建则需建立从黑体辐射源、光学链路到现场背景的全链路联合标定体系。标定精度直接制约温度反演的不确定度,是连接辐射信号与真实温度的关键环节。

现有方法的演进不仅由空间维度扩展驱动,还受到三类共性问题约束:一是发射率未知且随温度、组分和反应阶段变化,导致亮温、颜色温度与真实温度分离;二是火球由早期高密度、强自吸收状态向后期稀薄、散射占比上升状态演化,固定的光学薄或光学厚模型容易失效;三是爆炸试验不可重复,难以依赖多次扫描、分时采集或逐次补角。由此,点测温主要解决局部快速测量,二维面阵补充空间分布,多光谱进一步约束发射率,而三维方法通过多视角或光场增加深度约束,同时也引入同步、标定和不适定反演问题,本文所述技术路线如图2所示。

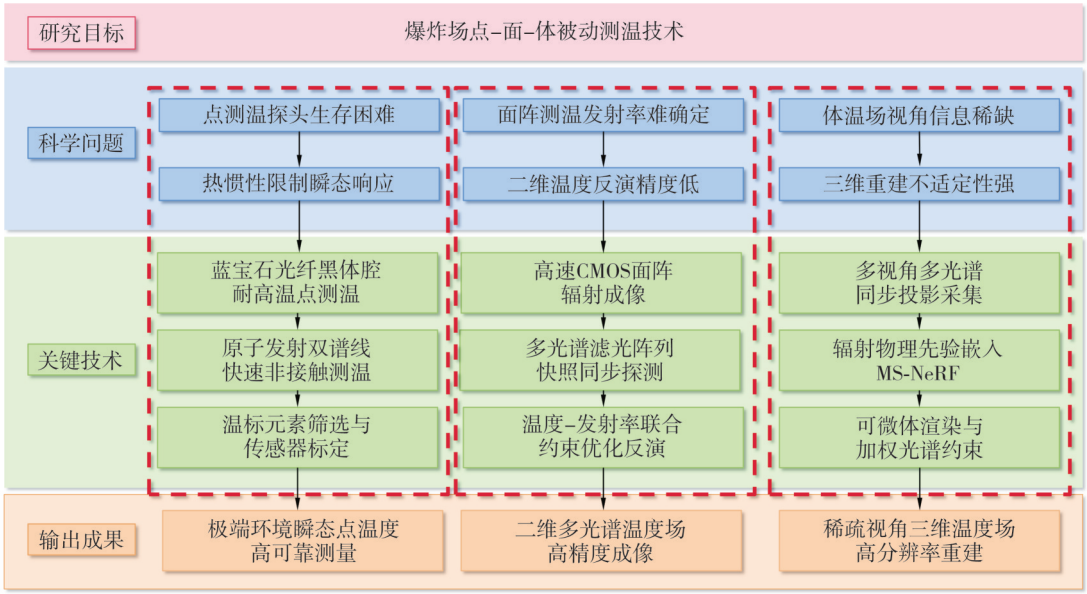


图2 爆炸场瞬态高温辐射测温技术路线图

Fig. 2 Technical roadmap of transient high-temperature radiation thermometry in explosion fields

1 爆炸场点式辐射测温技术

1.1 蓝宝石光纤传感器测温技术

爆炸场点式辐射测温通常利用光纤探头、单元光电探测器或有限视场光谱通道获取局部辐射强度随时间的变化。蓝宝石光纤黑体腔需要探头与介质换热,属于半接触式测温。其系统紧凑、触发链路短且采样频率高,适合提供局部高速基准,但不能替代二维或三维温度分布。

蓝宝石单晶具有熔点高、热稳定性好、机械强度高、耐腐蚀及近红外透过性能优良等特点。通过在蓝宝石光纤端部烧结高发射率陶瓷层或沉积贵金属敏感膜,可形成微型黑体腔;爆炸高温

作用于黑体腔后产生热辐射，辐射信号经蓝宝石光纤和传导光纤远距离传输，再由窄带滤光、低噪声光电转换和数据采集系统反演温度。早期蓝宝石光纤高温计的测温范围约为 900～1 900 ℃，后续通过改进膜层材料和固态光电探测器，测温上限可超过 2 000 ℃，响应时间缩短至 100 ms 以内[4-5]，如图 3 所示。这种方法将耐高温感温结构与远端光电处理分离，为火箭羽焰、发射箱表面和爆炸热环境中的局部高温测量提供了基础。

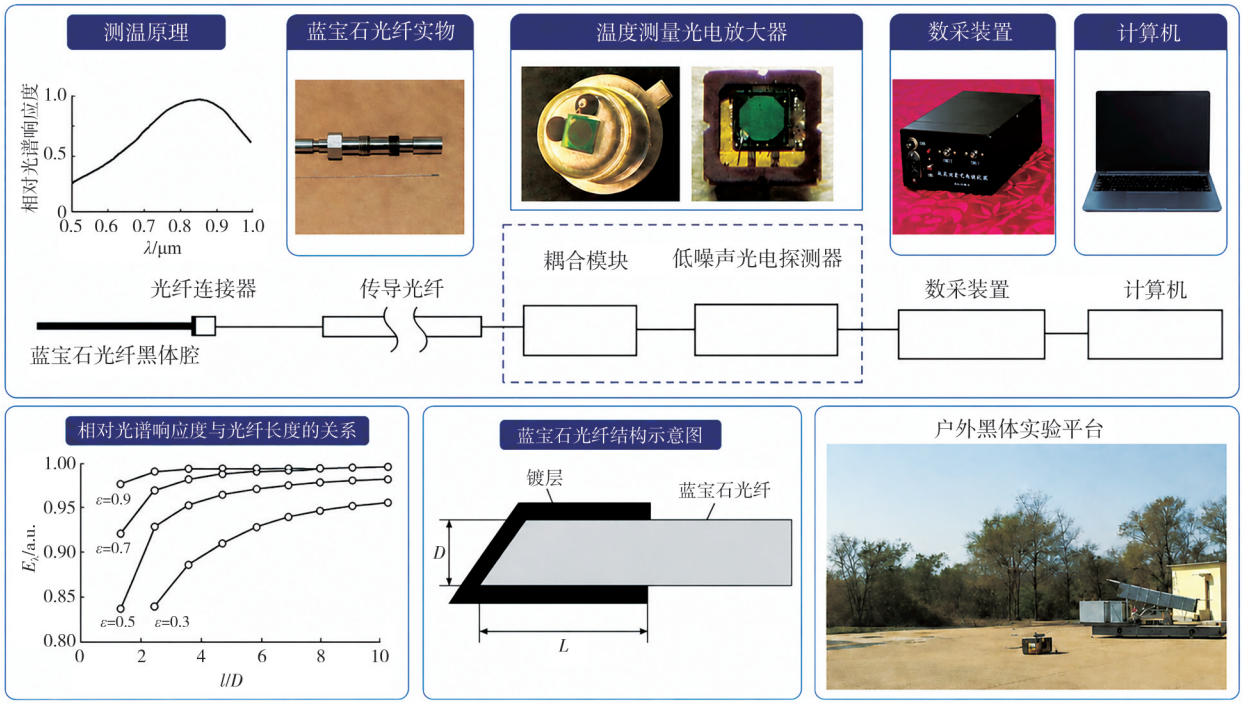


图 3　蓝宝石光纤测温技术路线

Fig. 3　Technical roadmap of sapphire-fiber thermometry

现有试验进一步说明了蓝宝石光纤黑体腔的性能边界。Takahashi 等[6]在铂膜蓝宝石探头的火焰试验中发现，波动温度测量仍受探头热容、尺寸和流动条件制约，需进行动态补偿。中北大学郝晓剑团队制备了钽-氧化锆复合膜黑体腔，分别用氧氢焰、压力加载和 CO_2 激光阶跃检验静态特性、结构承受能力与动态响应；激光阶跃试验得到约 794 μs 的时间常数[7]。Guo 等[8]采用钼薄膜黑体腔，经黑体炉在 900～1 200 ℃范围内标定后，于蓝宝石晶体生长炉测试至 1 880 ℃，与商用红外高温计的最大残差约 5 ℃。这些结果分别支持特定激励下的快速响应和高温量值性能，但其热边界与爆炸火球不同，尚不能直接推定实际爆炸场的测温精度，应用时仍需核验探头换热、冲击后结构完整性及膜层沉积或烧蚀引起的漂移。

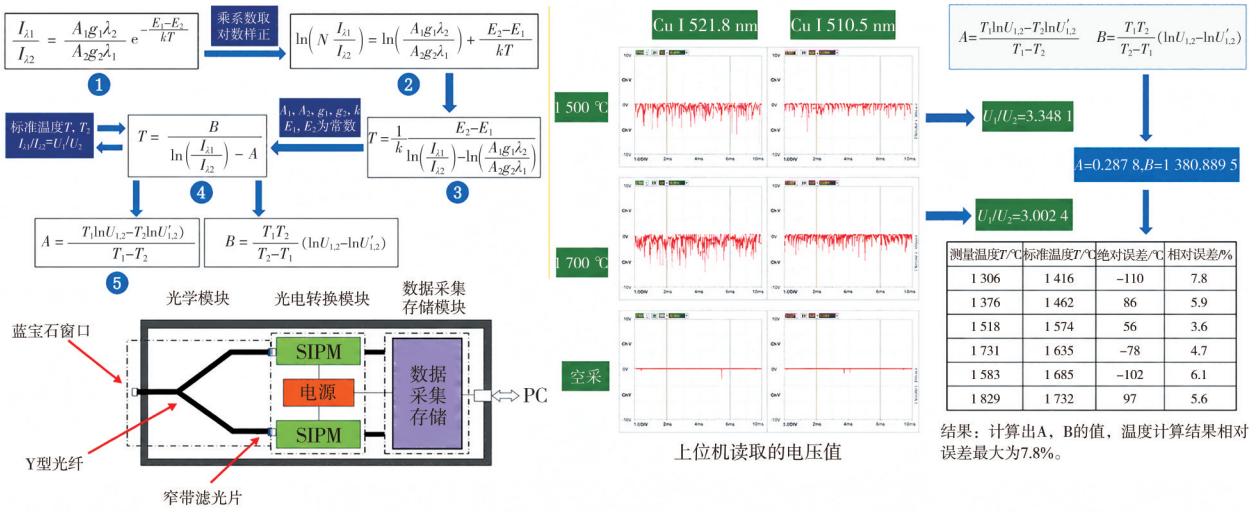
蓝宝石光纤黑体腔的测量性能可从敏感膜、腔体与电子学三层结构分别进行分析：敏感膜材料决定吸收能力、氧化稳定性与热容；腔体几何和封装决定有效发射率、导热路径与换热时间；滤光、探测和读出电路决定带宽、噪声与饱和特性。由于探头必须进入被测区并通过换热建立温度，更准确地来说，其属于半接触测温。爆炸高速对流会改变表面换热条件，烟尘和金属氧化物沉积会改变膜层吸收率与腔体有效发射率，冲击、破片与烧蚀还会引起不可逆漂移。上述误差需通过动态热响应标定、试后形貌与发射率复测以及现场不确定度评估量化，不能由静态黑体炉标定完全替代。

1.2　原子发射双谱线测温技术

原子发射双谱线测温利用同一元素、相同电离级的两条特征谱线强度比反演激发温度。在局部热力学平衡和光学薄近似下，两条谱线的相对强度由上能级能量、跃迁概率、统计权重和温度共同决定；当两条谱线波长接近时，光学系统透过率、探测器响应和均匀路径衰减的影响可在比值过程中得到削弱。Cu Ⅰ 510.5 nm 和 521.8 nm 双谱线系统经静态标定后，与计量红外测温仪相比可获得约 1%～3% 的相对误差[9]。该方法不需要感温元件首先达到热平衡，理论上具有更高的

测温上限和更快的时间响应，适合爆炸早期存在稳定原子或离子特征谱线的气相辐射阶段。

双谱线方法的核心是温标元素与谱线组合的选择。谱线应具有较高信噪比、较小波长间隔、较大激发能级差、较弱自吸收和较少的谱线重叠。相关理论研究表明，波长组合、通道带宽、标定方式和测量噪声会共同影响比值测温的不确定度[10]。原子发射双谱线测温技术如图4所示，利用激光诱导击穿光谱和NIST谱线数据库分析Cu、Al、Fe、Mg等元素，并通过蓝宝石窗口、Y型光纤、窄带滤光片和硅光电倍增管构建小型化探头。除原子发射双谱线外，两色高温计也已用于含TiH_2粉末乳化炸药爆炸温度场映射[11]，说明比值测温路线具备爆炸瞬态场应用潜力。



测量温度T/℃	标准温度T/℃	绝对误差/℃	相对误差/%
1 306	1 416	−110	7.8
1 376	1 462	86	5.9
1 518	1 574	56	3.6
1 731	1 635	−78	4.7
1 583	1 685	−102	6.1
1 829	1 732	97	5.6

图4 原子发射双谱线测温技术路线

Fig. 4 Technical roadmap of atomic-emission two-line thermometry

原子发射双谱线测温的适用性随爆炸阶段变化：早期产物较易满足局部热力学平衡，但光学厚度大、自吸收强；中期部分谱线可能同时满足近似平衡与弱自吸收，是较有利的测量窗口；晚期则易受非平衡效应和信噪比下降的影响。测量中应通过谱线反转、线宽及多组谱线比的一致性检验判断模型的有效性，优先选用配方中的可辨识元素；必须添加温标元素时，应采用微量示踪并通过对照试验评估其扰动。与蓝宝石光纤黑体腔相比，双谱线法响应更快，但更依赖热力学状态、谱线参数和光学薄假设。两类方法均以局部点温度为主，难以反映火球温度的空间非均匀性，因此，在保留点式系统高速响应优势的同时，测温技术必然由单通道探测向二维面阵成像过渡。

2 爆炸场二维面阵测温技术

2.1 高速CMOS面阵成像测温技术

二维面阵测温利用红外焦平面阵列或高速CMOS相机获取火球边界、高温核心和温度梯度。爆炸场工况下，测温内容可分为三种，即亮温、颜色温度、真实温度。亮温是在给定波段把目标按黑体解释得到的表观温度，通常受发射率影响；颜色温度由两个波段信号比得到，只有在两波段发射率相等或其比值已知时才接近真实温度；真实温度则是满足辐射传输与发射率模型的热力学温度。爆炸产物组分变化、非灰发射、自吸收、粒子散射与路径消光会使三者产生时变偏差。已有两相机比色和高速数字彩色成像用于火球二维温度映射[12-13]，近期研究还表明火球不对称会放大不同观测方向之间的温度偏差[14]。

在高温燃烧区域的二维温度分布探测过程中，由于不同时刻高温区域的内禀物化特性、介质粒子浓度与分布属性存在差异，为了获取同一时刻不同方位的高温场投影探测数据，对CMOS探测模块的单帧同步性提出了较高要求。因此，高速CMOS面阵成像测温技术研究了基于特征能量谱的高速CMOS面阵测温，如图5所示。该技术的核心优势是依托低成本高速CMOS阵列与非准直热-光耦合投影模型，实现由点温度到二维面温度的关键跃迁，可在单次曝光中同步捕捉高温核心位置、温度梯度与火球边界演化过程；配合主从式逻辑反馈同步触发控制器，可达到微秒级多通道同步采集精度，适配爆炸场这类不可重复的极端瞬态高温试验场景[15-16]。

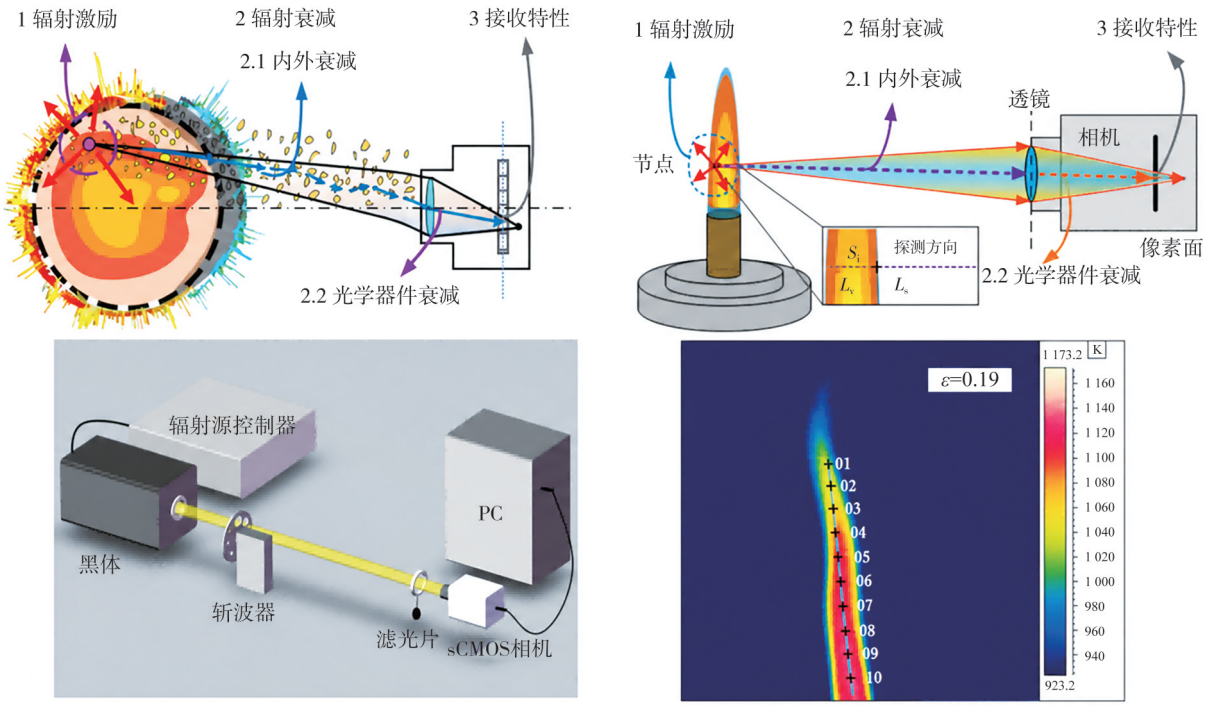


图 5　高速CMOS面阵测温技术路线

Fig. 5　Technical roadmap of high-speed CMOS array thermometry

高速 CMOS 面阵测温需依次完成时间、空间、辐射及传播校正。采用同步脉冲光源测量各通道的触发延迟和曝光中心偏差，建立统一时间基准；利用标定板和畸变模型求取相机参数，实现多通道图像的亚像素级配准；通过标准辐射源标定逐像素响应，修正暗电流、非均匀性、通道增益、响应非线性及饱和效应。同时，应标定窄带滤光器件的中心波长、带宽、透过率及温漂，并结合点扩散函数和反卷积修正离焦。对于远距离观测，还需依据光程、现场透过率和背景辐射补偿传播衰减；粒子散射与自吸收则需结合光学厚度测量或辐射传输模型来评估。

高速CMOS面阵测温在爆炸场中仍受到多重限制。火球高速膨胀且温度梯度剧烈，微小的触发、曝光或配准偏差均可能形成伪温度分布，滤光片温漂、镜头畸变、点扩散函数及通道增益的残余误差也会在比值运算中被放大。同时，单视角图像本质上是视线方向的积分辐射，其精度还受动态大气消光、粒子散射和背景辐射影响。当爆炸产物组分、粒子浓度及光学厚度快速变化，或谱线出现自吸收时，特征波段发射率将偏离预设假设。因此，单波段结果通常仍为亮温，比色结果仍依赖发射率比，要提高真实温度的可辨识性，还需增加独立探测波段，引入多光谱约束。

2.2　多光谱辐射测温技术

多光谱辐射测温在同一时刻获取多个离散波段的辐射量，通过普朗克关系与发射率约束联合估计真实温度和光谱发射率。它并不等同于自动消除发射率：当各波段发射率均独立未知时，反演仍可能欠定，必须引入光谱平滑、单调性、低维基函数、材料先验或时间连续性等约束。该技术已用于爆炸火焰真实二维温度场测量[17-18]，近期的发射率重构模型进一步说明，约束形式应与材料及工况相匹配，不能只以拟合残差判断结果可信度[19]。

面向爆炸场瞬态测量，快照式多光谱滤光阵列可直接与CMOS传感器耦合，使不同波段在同一曝光时刻被同步记录，避免滤光轮分时采集造成的时间错位。在数据处理方面，基于发射率趋势约束的遗传算法和多目标约束优化方法，可在无需预设固定发射率模型的情况下联合估计温度与光谱发射率[20-21]。多光谱辐射测温技术如图 6 所示，相关研究综合测温灵敏度、制造难度和波段冗余，构建了覆盖约 650～950 nm 的 25 波段多光谱相机，并利用中高温黑体炉获得 873.15～2 973.15 K 范围内的静态响应曲线；通过双模拟退火等全局约束优化方法，在含铝炸药爆炸试验中获得火球二维温度与尺寸随时间变化的规律，测温误差可控制在约 2% 量级[22]。中北大学郝晓

剑团队提出的CAHA多波段反演方法在同平台测试中单次耗时约0.15 s，低于BFGS(0.20 s)和IGWO(0.28 s)；5%噪声下六类模型的平均相对误差为0.10%～0.25%（IGWO为0.03%～0.33%）[23]。

快照滤光阵列可避免分时采集造成的时间错位，但波段数增加会牺牲单波段有效像素和入射光通量。分束式多相机或多传感器方案可保留较高的空间分辨率和通光量，但对同步、配准与通道一致性要求更高；多光谱光场相机可同时编码波段与角度信息[24]；快照高光谱或压缩计算成像能够提高光谱维度，但会提高编码反演的计算代价和引入模型误差[25]。算法选择也应同时比较速度、抗噪声能力和先验失配风险；灰体或低阶发射率模型速度快但易受模型偏差影响，全局优化适于离线精细求解但迭代代价较高，稀疏重构兼顾速度与约束性但依赖基模型，神经网络推理快却受训练数据覆盖和跨工况泛化限制。无论采用何种硬件和算法，单视角图像仍是沿视线的辐射积分，不能唯一确定内部深度位置。因此，二维多光谱高精度反演既是面测温的结果，也是进一步开展三维体温度场重建的输入基础。

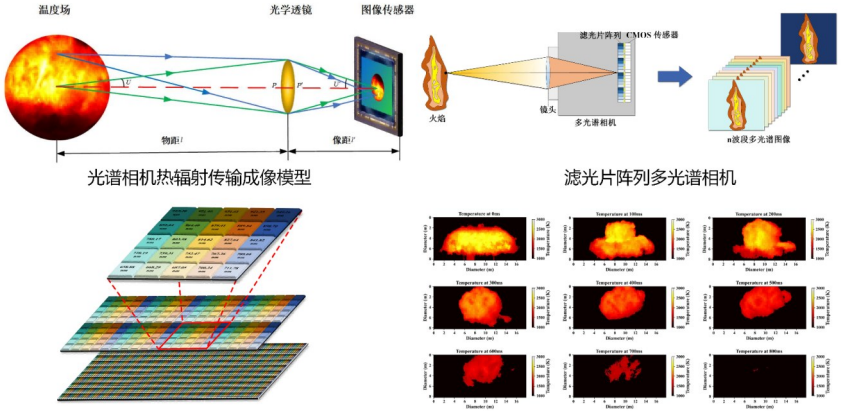


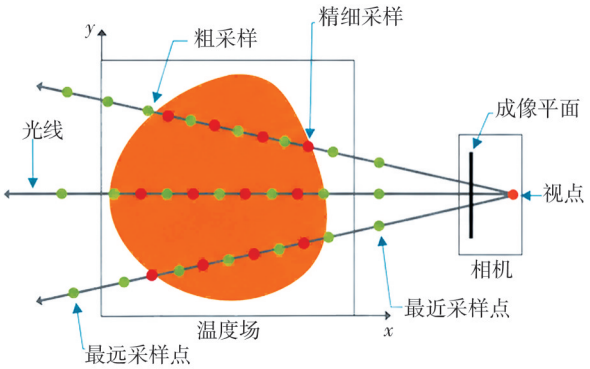
图6 多光谱测温技术路线

Fig. 6 Technical roadmap of multispectral thermometry

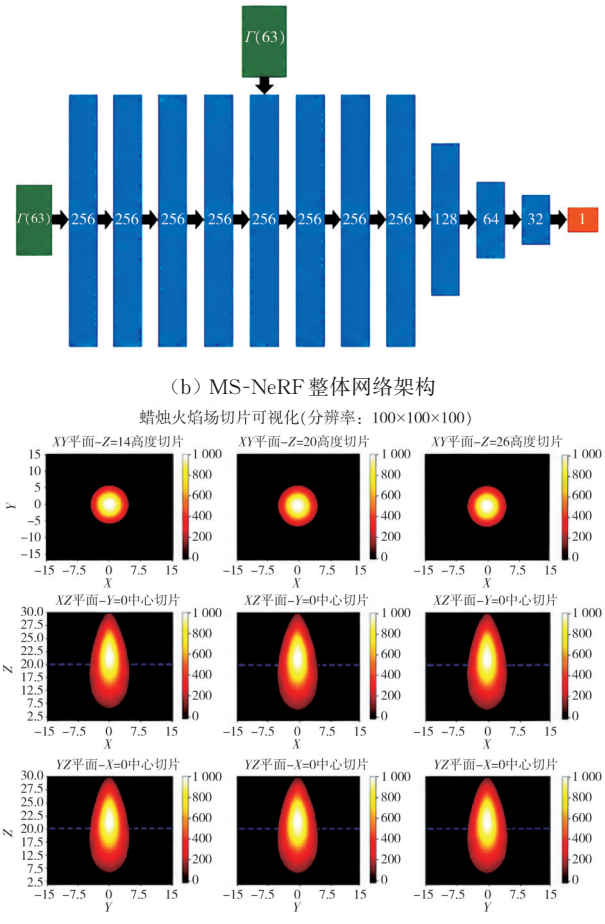
3 爆炸场三维温度场重建技术

爆炸火球是快速演化的三维参与性辐射介质。对光学薄区域，相机像素近似记录射线上各体元自发辐射的积分；对光学厚区域，外层吸收会遮蔽内部高温结构，观测更接近表层或近表层。火球在不同反应阶段的吸收、散射和发射特性均会变化，因此单一表面模型或固定投影关系难以覆盖全过程。二维温度图只能描述某一视角的投影分布，且火球不对称会造成明显视角误差[14]。针对火炮爆炸场的加权多准则迭代算法已通过模拟投影完成三维温度场重建验证[26]，若要解析高温核心、金属颗粒二次燃烧区和能量释放中心，还需增加同步角度约束，并将传播、衰减和接收过程统一纳入辐射传输模型。

在传统层析测温方面，利用两台高速相机、光纤束和分光器获取双波段多视角投影，可实现最高7.5 kHz的四维温度测量[27]；基于单台光场相机和辐射传输模型，也可完成火焰三维温度场重建[28]，如图7所示。近年来，隐式空间表示与可微渲染为三维温度场重建提供了新途径。中北大学郝晓剑团队提出空间辐射表示网络(SRRN)，其仿真温度场重建的最大均方根误差为10.17，丁烷火焰实验中相对热电偶测量的最大相对误差为4.86%[29]。这些结果说明，物理辐射约束与隐式空间表示结合，有望提高有限视角条件下的三维温度场重建能力。目前验证对象仍以黑体源、丁烷火焰或蜡烛火焰等可重复、准稳态对象为主，将其用于真实爆炸场时，还需解决火球高速形变、跨视角严格同步、冲击引起的相机抖动、动态光学厚度及弱辐射区域拟合不足等问题。



(a) 光线分层采样示意图



（b）MS-NeRF 整体网络架构

（c）蜡烛火焰温度场二维切片

（d）蜡烛火焰温度场三维切片

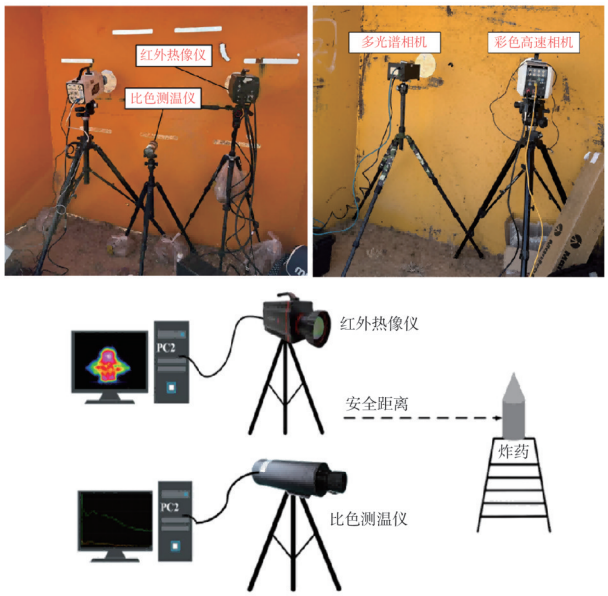
图 7　三维温度场重建算法流程

Fig. 7　Technical roadmap of three-dimensional temperature-field reconstruction

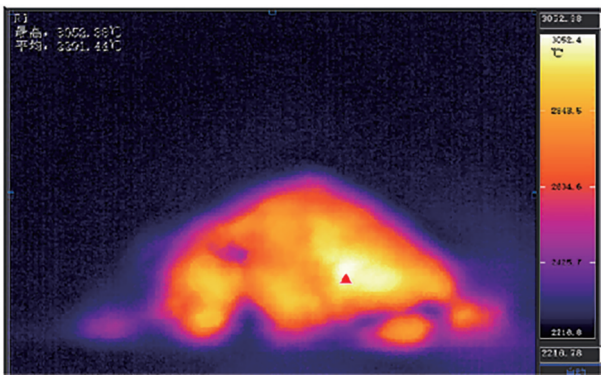
从重建机理看，传统层析方法将空间离散为体素，并依据标定后的投影关系和辐射传输模型迭代求解，具有物理含义清晰、约束可显式控制等特点，但在有限视角条件下对噪声、初值和离散尺度较为敏感；光场及单目多焦方案可在一定程度上减少相机数量[28,30]。SRRN 及神经辐射场类方法则以连续隐式函数表示温度或辐射属性，通过可微渲染协同优化三维场与多视角观测，具有减少体素离散误差和利用稀疏视角的潜力，但仍存在训练代价较高、对网络先验依赖较强、收敛稳定性不足及量值溯源困难等问题。ThermalNeRF 和 Spec-NeRF 主要用于热辐射场或多光谱辐射场表达[31-32]，若缺少可追溯辐射标定、普朗克约束和参与性介质辐射传输模型，其输出尚不能直接等同于真实温度。因此，上述方法在真实爆炸场中的适用性仍需通过工程试验进一步验证。

已有工程试验为三维温度场重建提供了初步验证。Wang 等[33]利用红外热像与优化光学层析算法重建了全尺寸天然气管道泄漏爆炸火球的三维温度场，重建结果与试验测量数据的相对误差为 10.54%～14.67%。Blankenhagel 等[34]在三次有机过氧化物火球试验中同步采用红外相机和热流传感器，根据二维温度图与等效辐射球估算了火球三维尺度，并通过点位热流验证了辐射危害预测。段鹏程等[35]采用多 CCD 同步获取蜡烛火焰和固体火箭发动机尾喷焰的多视角投影，实现了体素温度重建，经热电偶和近红外测温仪核验，实验室平均误差为 3.8%，外场误差小于 8%。上述研究验证了多视角重建在爆炸火球、燃烧场和尾喷焰测量中的应用潜力，但现有验证主要依赖外部热像、几何等效模型或可重复火焰，尚未实现真实爆炸火球内部体素温度的独立测量。因此，后续研究不仅需要提高重建精度，还应将点位温度基准、同步二维成像与三维重建统一到同一时空坐标下，形成完整的闭环验证体系。

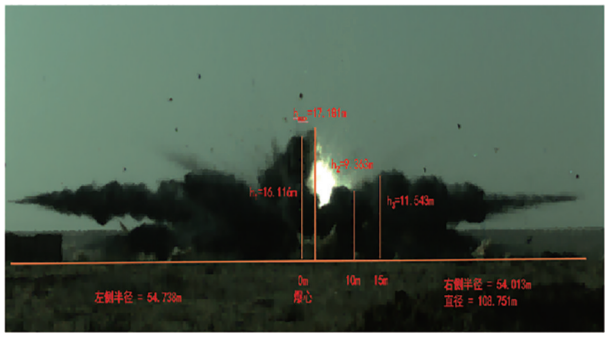
基于上述需求，面向爆炸场三维测温，未来系统应形成“点式高速基准-二维多光谱反演-稀疏视角三维重建”的协同架构。点式双谱线或比色探头提供特定时刻和视线方向的高时间分辨温度基准，二维快照多光谱相机获取高空间分辨投影，三维算法则结合辐射传输、发射率光谱平滑性、时间连续性和能量守恒等约束恢复内部温度。针对爆炸试验不可重复的问题，多相机应共用硬件时钟和统一触发基准，并以脉冲光源核查曝光时刻；同时，应建立涵盖黑体炉、滤光片、镜头、传感器响应、现场背景及大气路径的全链路联合标定体系。重建结果应综合评价温度偏差、空间分辨率、时间分辨率、体素级不确定度、投影一致性和跨工况稳定性，不能仅依据视觉形貌或单一误差指标判断系统性能。如图 8 所示，该技术已成功应用于不同类型的战斗部测试中，实现了超高温、高动态、强干扰极限环境面/体温度场的精准测量。



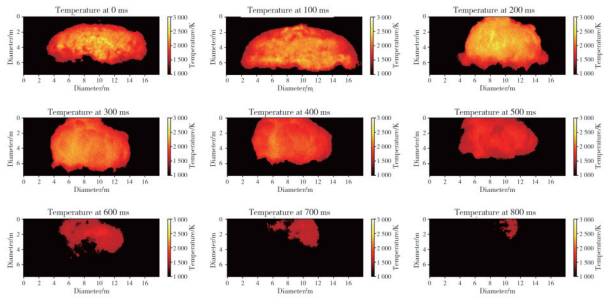
(a) 现场试验装置布设及测试系统示意图



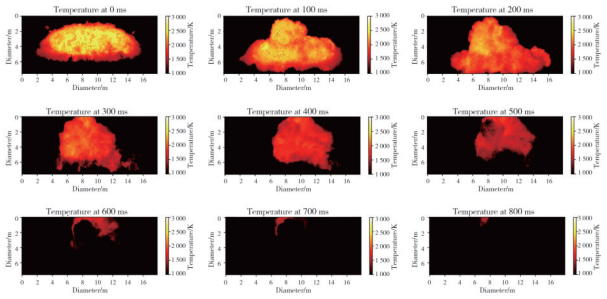
(b) 比色红外温度测试结果



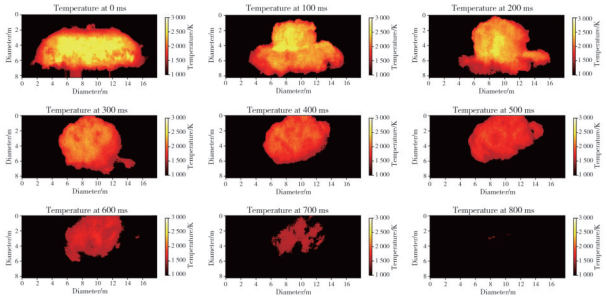
(c) 高速相机爆炸形貌测试结果



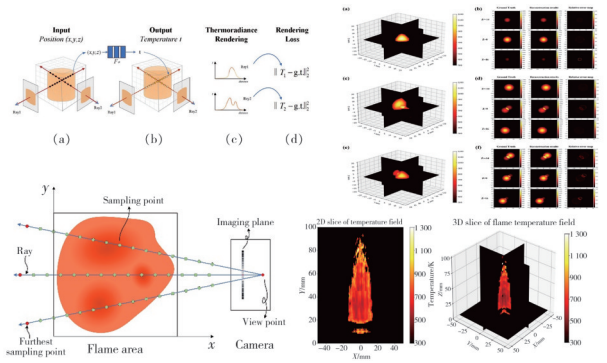
(d) A组含铝炸药多光谱温度测试结果



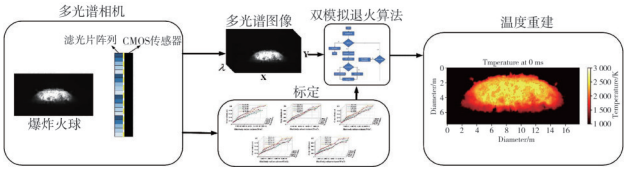
(e) B组含铝炸药多光谱温度测试结果



(f) C组含铝炸药多光谱温度测试结果



(g) 超分辨率三维温度场重建结果



(h) 多光谱温度反演流程

图8 实测实验图

Fig. 8 Experimental measurement results

4 结论与展望

爆炸场辐射测温已形成由点式探测、二维面阵成像到三维体温度场重建的演进体系，同时在光谱维度上从单波段扩展至多光谱。选型应由任务目标决定：仅需峰值时刻或局部高速基准时，优先考虑双谱线或比色点测温；允许探头介入且强调量值溯源时，可采用蓝宝石光纤黑体腔；需要火球边界、温度梯度与热毁伤面积时，宜采用高速CMOS比色或多光谱二维成像；需要内部高温核心和深度结构时，

才采用多视角层析、光场或隐式辐射场，并接受更高的同步、标定与计算成本。空间分辨成像与光谱分辨诊断具有互补性[36]，实际系统宜保留局部基准通道，形成点-面-体之间的交叉验证。

未来研究可围绕“探测-成像-验证-预测”形成可检验的技术闭环。探测端需解决核心饱和与边缘弱信号并存问题，可发展分区曝光、双增益读出与编码衰减联合标定；成像端需面向不可重复过程发展快照多光谱、稀疏视角连续重建和物理约束超分辨反演；验证端可借鉴主动吸收测温与被动辐射测温的时分复用和同路径设计，用独立机理交叉检验动态结果，并以全链路标定和不确定度传播建立量值可信度；预测端可把低阶流场表示与时序网络结合，用已测温度场预测后续演化。数值仿真应生成多工况辐射投影用于预训练和敏感性分析，实测温度、光学厚度与火球边界则反向校验反应模型、材料参数和湍流混合过程，最终形成可追溯、可解释且可预测的爆炸温度场监测与诊断体系。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] McNesby K L, Homan B E, Benjamin R A, et al. Invited article: quantitative imaging of explosions with high-speed cameras[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(5): 051301.

[2] Hobbs M J, Barr A, Woolford S, et al. High-speed infrared radiation thermometer for the investigation of early stage explosive development and fireball expansion[J]. Sensors, 2022, 22(16): 6143.

[3] Wang L Y, Du H M, Xu H. Compensation method for infrared temperature measurement of explosive fireball[J]. Thermochimica Acta, 2019, 680: 178342.

[4] 郝晓剑，孙伟，周汉昌，等. 蓝宝石光纤黑体腔高温计[J]. 应用基础与工程科学学报，2004，12(2)：218-223.
Hao Xiaojian, Sun Wei, Zhou Hanchang, et al. A sapphire fiber blackbody cavity thermometer[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 12(2): 218-223. (in Chinese)

[5] 李伟，郝晓剑，周汉昌. 基于蓝宝石光纤的黑体腔瞬态高温传感器设计[J]. 光电技术应用，2010，25(5)：54-57.
Li Wei, Hao Xiaojian, Zhou Hanchang. Design of black-body cavity transient high temperature sensor on sapphire fiber[J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(5): 54-57. (in Chinese)

[6] Takahashi T, Katsuki M, Mizutani Y. Measurement of flame temperature by optical fiber thermometer with a blackbody cavity sensor[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B, 1987, 53(495): 3417-3422.

[7] Hao X J, Sang T, Pan B W, et al. Research on characteristic parameter of Ta-ZrO_2 fiber blackbody cavity temperature sensor[J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2016, 9(2): 287-296.

[8] Guo Y Q, Xia W, Hu Z Z, et al. High-temperature sensor instrumentation with a thin-film-based sapphire fiber[J]. Applied Optics, 2017, 56(8): 2068-2073.

[9] 郝晓剑，郭玉楠，杨彦伟. 原子发射双谱线测温常数静态标定实验研究[J]. 激光技术，2020，44(6)：684-687.
Hao Xiaojian, Guo Yunan, Yang Yanwei. Experimental study on static calibration of atomic emission spectroscopy temperature constant[J]. Laser Technology, 2020, 44(6): 684-687. (in Chinese)

[10] Fu T R, Cheng X F, Yang Z J. Theoretical evaluation of measurement uncertainties of two-color pyrometry applied to optical diagnostics[J]. Applied Optics, 2008, 47(32): 6112.

[11] Yao Y L, Cheng Y F, Zhang Q W, et al. Explosion temperature mapping of emulsion explosives containing TiH_2 powders with the two-color pyrometer technique[J]. Defence Technology, 2022, 18(10): 1834-1841.

[12] Densmore J M, Homan B E, Biss M M, et al. High-speed two-camera imaging pyrometer for mapping fireball temperatures[J]. Applied Optics, 2011, 50(33): 6267-6271.

[13] Densmore J M, Biss M M, McNesby K L, et al. High-speed digital color imaging pyrometry[J]. Applied Optics, 2011, 50(17): 2659-2665.

[14] Cagle C, Pantoya M. Fireball symmetry and its influence on perspective error from thermography data[J]. Measurement, 2024, 235: 115020.

[15] Yu H, Sun Y R, Liu Y, et al. A novel measurement strategy for explosion temperature field towards enhancing the fire process safety[J]. Fire Safety Journal, 2024, 145: 104118.

[16] 张东亮，张继军，郝晓剑，等. 基于CMOS相机的比

色测温技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2025, 45(S1): 690-699.
Zhang Dongliang, Zhang Jijun, Hao Xiaojian, et al. Research on colorimetric temperature measurement technology based on CMOS cameras [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2025, 45(S1): 690-699. (in Chinese)

[17] Wang Z T, Dai J M, Yang S. The development of a multispectral pyrometer for achievable true temperature field measurements of the explosion flame [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(6): 065501.

[18] Huang H R, Zhang Z Z, Niu Y, et al. Review of multispectral radiation thermometry data processing algorithms [J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 129: 104573.

[19] Wang Z T, Dai J M. Multi-spectral radiation thermometry based on the reconstructed spectral emissivity model[J]. Measurement, 2024, 228: 114346.

[20] Wang N, Shen H, Zhu R H. Constraint optimization algorithm for spectral emissivity calculation in multispectral thermometry [J]. Measurement, 2021, 170: 108725.

[21] Zhang Y C, Zou Z, Yan F. A multispectral thermometry based on multi-objective constraint optimization [J]. Measurement, 2022, 192: 110813.

[22] 裴攀. 基于多光谱成像技术的爆炸场温度测量方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2025.

[23] You W X, Hao X J, Jia R, et al. A multi-band temperature measurement data retrieval method based on the chaotic artificial hummingbird algorithm (CAHA) [J]. Sensors, 2026, 26(7): 2210.

[24] Fahringer T W, Danehy P M, Hutchins W D, et al. Design of a multispectral plenoptic camera and its application for pyrometry [J]. Applied Optics, 2022, 61(10): 2459.

[25] Gorevoy A, Machikhin A, Bykov A, et al. Optimization of data acquisition algorithm for temperature and emissivity distribution measurement using snapshot hyperspectral imaging systems [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 26: 101154.

[26] 刘晓蔚, 祝海江, 刘兴旺, 等. 一种基于加权多准则的火炮爆炸场中高温火球三维温度场的迭代重建算法[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2021, 48(3): 65-74.
Liu Xiaowei, Zhu Haijiang, Liu Xingwang, et al. An iterative reconstruction algorithm for the 3D temperature field of the high-temperature fireball in a gun explosion field based on weighted multi-criteria [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2021, 48(3): 65-74. (in Chinese)

[27] Yu T, Bauer F J, Huber F J, et al. 4D temperature measurements using tomographic two-color pyrometry [J]. Optics Express, 2021, 29(4): 5304-5315.

[28] Sun J, Xu C L, Zhang B, et al. Three-dimensional temperature field measurement of flame using a single light field camera[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 1118-1132.

[29] Feng S X, Hao X J, Huang X D, et al. Fire in SRRN: next-gen 3D temperature field reconstruction technology [PP/OL]. arXiv (2024-05-10) [2026-07-23]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.06230.

[30] Guan J G, Huang F, Zhao Z B, et al. Tomographic radiation thermometry based on monocular multi-focal imager[J]. Measurement, 2025, 241: 115694.

[31] Lin Y Y, Pan X Y, Fridovich-Keil S, et al. Thermal-NeRF: thermal radiance fields[C]//2024 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), 2024: 1-12.

[32] Li J B, Li Y Q, Sun C L, et al. Spec-NeRF: multi-spectral neural radiance fields[C]//2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2024: 2485-2489.

[33] Wang K, He Y. Three-dimensional thermal field induced by gas pipeline explosion fireball based on predicted algorithm and experimental validation [J]. High Temperature, 2020, 58(6): 893-906.

[34] Blankenhagel P, Wehrstedt K D, Mishra K B, et al. Thermal radiation assessment of fireballs using infrared camera [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 54: 246-253.

[35] 段鹏程, 程博, 管今哥, 等. 基于多CCD同步耦合的动态燃烧场三维辐射测温[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 41-50.
Duan Pengcheng, Cheng Bo, Guan Jinge, et al. Three-dimensional radiation thermometry for dynamic combustion field based on multi-CCD synchronous coupling [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(10): 41-50. (in Chinese)

[36] Ritchie C, Dean S W, McNesby K L, et al. Thermal behavior of explosive fireballs as a function of charge size [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2025, 50(4): e12029.