文章编号：1001-1455(2014)05-0513-08 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)05-0513-08

爆炸场瞬态高温测试的实验研究*

张云明[1,2]，刘庆明[1]，李 磊[1]，汪建平[1]
(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081；
2.中国人民武装警察部队学院消防工程系，河北 廊坊 065000)

摘要：针对爆炸场瞬态高温测量需求，从辐射测温原理出发，建立红外比色测温系统。通过黑体炉实验标定出 Si/Ge 双通道比色测温仪的波长、带宽、光电转换系数等工作参数和测温范围，并将比色测温仪高温测温量程扩展至 3 500 ℃。利用大能量电火花放电产生的爆炸场标定了测温仪的响应时间，结果显示测温仪响应时间不超过 10 μs。确定了标准测温仪和超限测温仪的温度计算公式，并将比色测温仪应用于 TNT 柱状炸药和云爆剂(FAE)爆炸场温度测试，可以为爆炸反应过程诊断和爆炸温度毁伤效应评估提供依据。

关键词：爆炸力学；比色测温仪；光辐射；爆炸场；瞬态高温
中图分类号：O384 **国标学科代码**：1303599 **文献标志码**：A

近年来，随着温压武器和云爆武器的快速发展，急需解决爆炸场热效应的测量和评估问题。爆炸场温度作用时间短、变化剧烈、峰值高，测试环境复杂、条件恶劣，技术难度大，传统测温方法无法满足需求。尽管目前出现了很多快速响应和较高测试范围的温度传感器，但是面对爆炸场的特殊环境，一般仪器的响应速度、测试精度和高温量程均达不到要求，有些复杂技术又因成本过高无法在工程上应用。

非接触式测温技术主要有辐射法和光谱法[1-2]，其中辐射法应用和发展最广泛。对于爆炸场的特殊环境而言，红外比色测温技术能够较好的消除被测目标发射率估计和光路衰减等造成的误差，在准确性和便利性上都具有明显优势。比色测温技术从 N. R. Campbll[3] 应用以来已经发展了 90 多年，测温范围、精确度和响应速度都有了很大提高[4-8]。将比色法应用于爆炸场温度测量的案例较少，实验数据缺乏，测温仪的工作特性还有待研究，高温量程还有待扩展，测试精度和响应速度还有待验证。

本文中从辐射测温原理出发，建立红外比色测温系统，分析比色测温的技术特点、影响因素和标定方法，实验标定比色测温仪的工作参数，确定标准测温仪和超限测温仪的温度计算曲线，校验比色测温仪的响应时间，最后将比色测温仪应用于爆炸场温度测试，为爆炸反应过程诊断和爆炸场温度毁伤效应评估提供依据。

1 爆炸场比色测温技术

实际物体通过热辐射的方式不断的向周围空间辐射能量，辐射强度取决于温度，温度越高辐射能量越大，利用物体辐射能量与温度的关系可以获得物体的温度信息[9]。

实际物体的辐射出射度表达式为：

$$M_\lambda = c_1 \frac{\varepsilon(\lambda)\lambda^{-5}\cos\theta}{\exp(c_2/\lambda T)-1} \tag{1}$$

式中：$\varepsilon(\lambda)$为光谱发射率，λ 辐射为波长，T 为物体温度，θ 是与物体发射表面法相所成的角度，c_1 为第一辐射常量，取值$0.595\,521\times10^{-16}$ W·m^2，c_2 为第二辐射常量，取值 $1.438\,775\times10^{-2}$ m·K。

由式(1)可知利用辐射测温原理测温，除获取辐射能量外，还需要知道测试波长、被测物发射率、测试角度等参数。高温测试技术主要是在解决上述参数确定问题，如全波段测温技术、单色测温技术、比

* **收稿日期**：2013-03-22；**修回日期**：2013-05-20
基金项目：国家自然科学基金项目(51104164)；国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目(201193706904)
作者简介：张云明(1979—)，男，博士研究生。

色测温技术、多波段光谱测温技术等。全波段测温技术需要仪器对全波长都有响应,因此限制了仪器的发展和使用,目前的辐射测温技术主要采用波段测量。单色测温技术需要严重依赖被测物体光谱发射率参数,而对于复杂环境下的爆炸温度测量,准确估计爆炸产物发射率几乎不可能。比色测温技术和多波段测温技术在基本原理上属于单色辐射测温技术的组合,利用 2 个或多个波长对同一物体温度进行测量,克服了对被测物体发射率的依赖,适合爆炸场瞬态高温测试。由于多波段光谱测试技术对设备要求高,数据处理复杂,P. B. Coats 等[10-12]研究认为多波长高温计的结果并不优于比色测温仪,而测量成本要高很多,因此,红外比色测温技术成为爆炸场瞬态高温测试的首选。

比色测温技术的实质是比较不同波长对同一温度下的物体的辐射能,通过辐射能的比值获取被测目标温度。假设测试波长分别为 λ_1 和 λ_2,被测目标瞬时温度对应的辐射出射度比值为:

$$R=\frac{\varepsilon(\lambda_1)\lambda_2^5\cos\theta_1\,[\exp(c_2/\lambda_2 T)-1]}{\varepsilon(\lambda_2)\lambda_1^5\cos\theta_2\,[\exp(c_2/\lambda_1 T)-1]} \tag{2}$$

式中:λ_1、λ_2 分别代表不同波长,R 为不同波长辐射出射度的比值。

比色测温法是非接触式测量,爆炸环境下光路容易受到爆炸产物和周围环境的影响,爆炸场温度测试系统如图 1 所示。比色测温技术通过采用合成双色光敏元件等方法,统一了双通道的测试角度、测试距离和光路环境等测试参数,保证测试光通道视场条件相同,再通过双通道输出值来确定爆炸场温度,可以有效消除测试角度、光路辐射衰减等因素引起的误差。因此式(2)中的测试角度项可以忽略,比色测试结果同时排除了测试位置和测试光通道内等环境因素引起的误差,获得视场光通道上的最高温度。

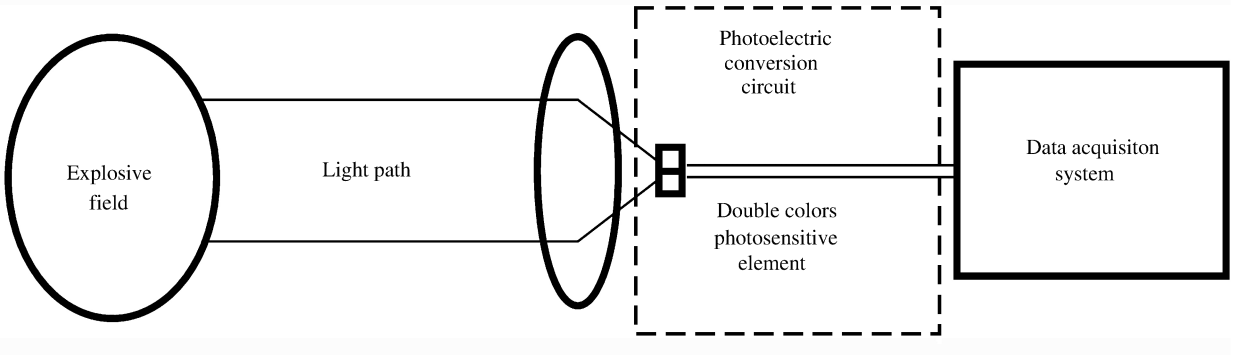

图 1 爆炸场温度测试系统组成

Fig. 1 Schematic of temperature measurement system for explosive field

在某一温度下实际物体的单色辐射力随波长的变化是不规则的,但是当实际物体表面在红外波长范围内时,工程上一般用灰体近似代替,这是所有辐射测温技术的基本假设。实际物体按照灰体处理,其发射率不随波长变化或变化趋势与黑体相似。依据被测物质的热辐射特性,通过合理地选取测试系统的两个相近的工作波长就可以减少或消除由于待测物质发射率未知或变化而产生的测温误差。比色测温法属于非发射率法测温,基于灰体假设后,式(2)中的发射率项也可以忽略。避免或减轻因发射率选取或变化引起的测量误差是比色测温法的主要优点之一。

辐射热测温通过非电量电测技术将辐射能量转换为电信号进行采集和处理,光电转换电路如图 2 所示。感光电路由光敏元件、电源、电容和电阻构成,利用光电效应将辐射能转变成电信号。考虑到爆炸场光路干扰和光电转换电路损失等不确定性因素,引进光电转换系数 k_λ 并对式(2)进行化简,可得:

$$R_U=\frac{U_{\lambda_1}}{U_{\lambda_2}}=\frac{k_{\lambda_1}\lambda_2^5\,[\exp(c_2/\lambda_2 T)-1]}{k_{\lambda_2}\lambda_1^5\,[\exp(c_2/\lambda_1 T)-1]} \tag{3}$$

式中:R_U 为双通道辐射能转换的电压比值,U_λ 为单通道辐射能转换的电压值,k_λ 为仪器输出的电信号与其接收到的辐射能量间的转换系数,以 λ_1 和 λ_2 为下脚标的参数代表与波长 λ_1、λ_2 对应的物理量。

比色测温系统中的光敏元件本身客观存在一定的吸收波段带宽,精确测试瞬态高温必须考虑测温仪的带宽影响,探测器接收到的辐射能量应按波段积分计算。考虑带宽和零点电压干扰信号的影响后,

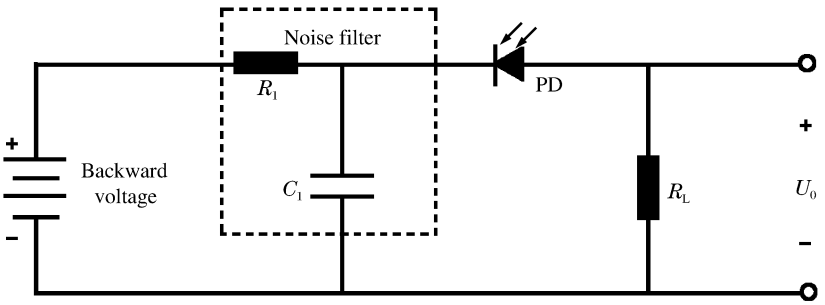

图 2 感光电路示意图

Fig. 2 Schematic of the photosensitive circuit

系统温度对应的电压比值为：

$$R_T=\frac{U_{\lambda_1}-U_{\lambda_1}^{(0)}}{U_{\lambda_2}-U_{\lambda_2}^{(0)}}=\frac{k_{\lambda_1}\int_{\lambda_1^{(a)}}^{\lambda_1^{(b)}}\frac{c_1\lambda^{-5}}{\exp(c_2/\lambda T)-1}\mathrm{d}\lambda-U_{\lambda_1}^{(0)}}{k_{\lambda_2}\int_{\lambda_2^{(a)}}^{\lambda_2^{(b)}}\frac{c_1\lambda^{-5}}{\exp(c_2/\lambda T)-1}\mathrm{d}\lambda-U_{\lambda_2}^{(0)}} \tag{4}$$

式中：$\lambda^{(a)}$ 和 $\lambda^{(b)}$ 为特定波段的上下限，$U_\lambda^{(0)}$ 为光电转换电路的零点电压值，参数直接通过实验确定。

式(4)为比色测温基本关系式，可知 T 与 R_T 成单值函数关系，由测量值 R_T 可以唯一确定被测物体温度 T。

2　测温量程扩展

比色测温系统的最高温度范围主要集中在 2 500 ℃左右，而爆炸场温度，尤其是温压药爆炸和云爆剂爆炸，温度往往超过此温度限制，为了适应爆炸场的高温测量需求，需要扩展比色测温仪的高温量程。

比色测温仪的理论测温区间是指比色测温灵敏度具有可测的最低分辨率时的响应温度区间，与感光元件接受波长 λ 和光电转换系数 k_λ 直接相关。Planck 辐射定律明确了黑体辐射强度与温度和波长的函数关系，比色测温采用双波长比值测温，波长的选择直接关系到探测器比值灵敏度和测温量程。根据吴海滨等[13]的研究，比色法的双波长必须是所测波长范围内的谱线，比色波长与比色灵敏度相互匹配，而且还应考虑灵敏度、信噪比和非对称分子结构气体对红外辐射的吸收作用。一定波长下物体辐射能随温度的上升急剧增大，感光电路的输出信号随温度变化非常剧烈，因此 k_λ 的选择应在合理的范围内，k_λ 过大高温时电流会超出量程上限，k_λ 过小低温时电流分辨率太低，信噪比太小。因此比色测温仪在使用前需要通过实验标定有效测温量程。

由于波长受仪器光敏元件的约束，变化很小，所以对特定设备测温范围的影响小。而光电转换系数 k_λ 的选取直接影响设备的有效测温量程，因此扩展高温测试范围，可以在响应温度区间范围内，通过调整测试光路和感光电路，减小高温辐射能量进入测温仪的比例，将输出电压值调节至合理范围内，避免因电路饱和引起的高温信号分辨率降低。当然扩展高温测温范围不可避免的会造成低温灵敏度降低，缩小低温量程。具体改进方法包括在光通道上增加滤光片减小光探测器带宽，调节感光电路负载和设置衰减电路。改进后的超限测温仪工作参数、测温量程和精度需要实验标定和考核。

3　比色测温系统实验标定

根据比色测温技术特点和爆炸场温度测量的特殊要求，需对测温系统进行实验标定，主要通过实验对仪器和系统的参数进行确定，分析仪器的特性和确定量程，对系统进行优化，以便实现实验数据的处理与系统的功能扩展。对于爆炸场瞬态高温测试系统而言，测温精度和瞬态特性均需要实验标定，测温系统精确性主要是根据温度量程和误差进行判断，瞬态响应特性主要根据响应速度来判定。

3.1　测温精度实验标定

对于温度标定，人工黑体辐射源是最佳选择，通过黑体炉的稳定状态温度场可以实现精确温度校

核。本实验采用中国计量科学研究院和北京理工大学的 2 台腔式黑体炉进行参数标定。本实验中标定 Si、Ge 双通道比色测温仪，标定的参数包括通道各自波段上下限 $\lambda^{(a)}$、$\lambda^{(b)}$ 和光电转换系数 k_λ，然后计算双通道信号比值 R_T 与温度 T 的关系，并确定被标定系统的测温范围。Si、Ge 双通道的工作参数需分别运算获得，对于单个通道而言，参数标定只需实验给定 3 组黑体温度及对应通道的电压值，再根据式(4)建立方程。为了求解包含积分形式的非线性方程，利用 Matlab 软件，以 Gauss 积分公式求定积分，采用梯度法求解非线性方程组[14]。

温度标定试验以 200℃为间距，分别测试黑体炉 1 000～3 000 ℃温度范围的 11 组数据。参数标定与计算只需任选 3 组温度及电压数据，其余测试点数据用以校核测试结果的精确性，经过多组数据的对比试算，确定了间隔均匀且兼顾高低温的原则选取标定温度数据。标准测温仪的标定温度为：1 400、2 000和 2 600 ℃，超限测温仪的标定温度为：1 600、2 200 和 2 800 ℃，其他参数计算结果见表 1。表中：$\lambda^{(c)}$ 为中心波长，λ_B 为波段带宽。

表 1 测温仪参数标定结果

Table 1 Calibrated results of colorimetric pyrometers

仪器	k_λ		$\lambda^{(a)}/\mu m$		$\lambda^{(b)}/\mu m$		$\lambda^{(c)}/\mu m$		$\lambda_B/\mu m$	
	Si 通道	Ge 通道	Si 通道	Ge 通道	Si 通道	Ge 通道	Si 通道	Ge 通道	Si 通道	Ge 通道
标准测温仪	0.041 0	0.029 9	0.592 2	1.098 3	1.081 9	1.753 5	0.837 1	1.426 0	0.489 6	0.655 4
超限测温仪	0.012 3	0.029 3	0.616 2	0.957 8	1.081 5	1.152 2	0.848 8	1.055 0	0.465 3	0.194 4

从计算结果来看，2 组测温仪波长均处于理论带宽范围内，标准测温仪中心波长实算结果与该仪器双通道的理论设计波长(0.957 μm，1.474 μm)接近，其中 Si 通道在 2 组实验中的中心波长和带宽相对稳定，Ge 通道带宽和波长明显减小。根据 Wien 位移定律，随着温度升高最大单色辐射强度所对应的峰值波长逐渐向短波方向移动，温度在 2 000～3 500 K 的火焰或爆轰产物，最大吸收波长应位于 0.83～1.45 μm 近红外区域内。由于超限测温仪的目的就是获得更高温度范围内的测量值，扩展高温测量范围，波长就会向着短波方向移动，维持仪器的最佳工作状态，而且波长越长，影响越大，因此 Ge 通道内的中心波长和波段宽度出现明显减小。另一方面从技术改造上来讲，超限测温仪改造方法包括减小探测器带宽，从而减小高温热辐射能辐入量，由测温仪标定结果可见超限测温仪改造的效果良好。

测温仪的工作参数标定后，由式(4)可得 3 点标定法确定的 T-R_T 关系曲线，图 3 所示为按照 3 测点标定方法获得的测点温度和标定曲线。

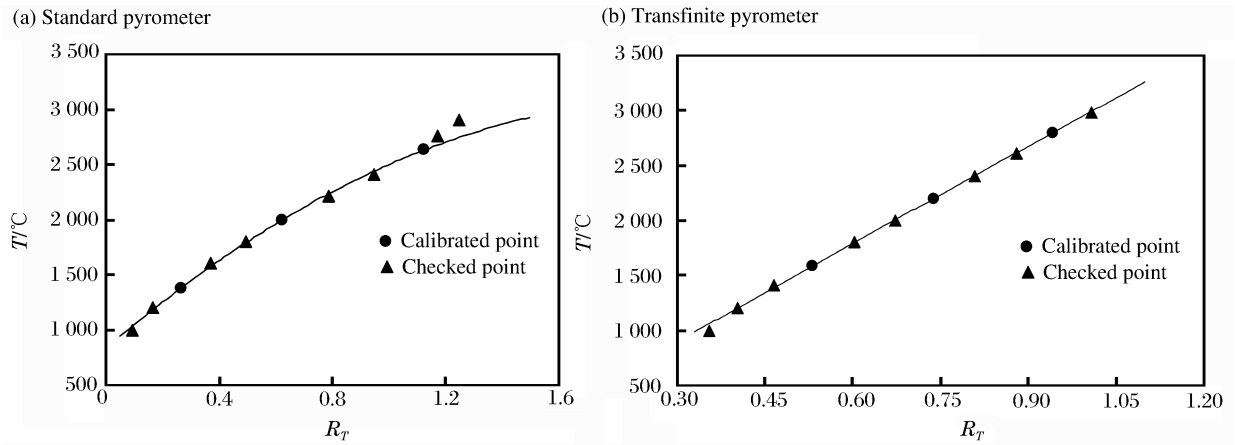

图 3 标准测温仪和超限测温仪标定及校核结果对比

Fig. 3 Comparison of calibrated results between standard and transfinite pyrometers

由图 3 中可知，标准测温仪在 900～2 600 ℃量程范围内标定曲线与校核测点的符合度很好，当实验温度接近或超过 2 800 ℃时，测点温度与计算温度曲线出现明显偏离。超限测温仪有效突破了 2 600 ℃的温度限制，而且标定温度曲线与 3 000 ℃测点实测温度数据符合度极高。中国计量科学院使用的黑体炉温度上限为 3 000 ℃，超过 3 000 ℃后温度无法标定。

为了确定超限测温仪的测温量程，我们对比了测温仪的标定误差和误差趋势线，如图 4 所示。图 4 中标准测温仪的误差向1 000 ℃以下进行了外推，由图可知测温仪在 900～2 600 ℃量程内的标定误差均不超过 1%。根据相似性原理，以 1%误差为标准，通过对超限测温仪标定误差高温段进行趋势外推，可得改造后的超限测温仪最高测试温度可达 3 500 ℃。测温仪误差趋势线及其外推区域与 1%的误差标准线相交点对应的温度与实验实测温度相吻合，从而证明超限测温仪 3 500 ℃的温度上限的可靠性，因此将超限测温仪的测温量程标定为 1 200～3 500 ℃。

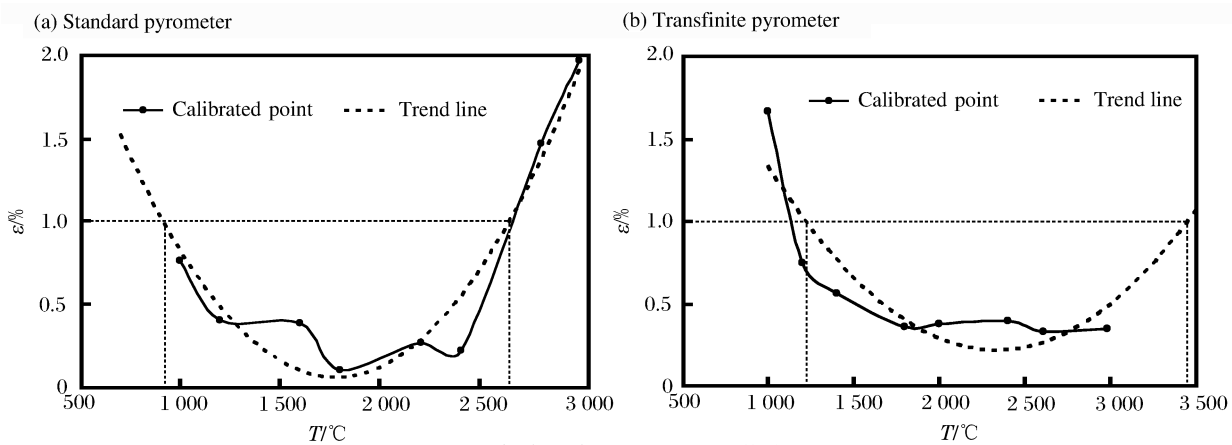

图 4 标定温度误差和误差趋势线

Fig. 4 Errors of calibrated temperature and trend line

分析 3 点标定线与校核测点的误差结果可以发现，测温仪改造前后在 1 200～2 500 ℃区间的测温精确度都很高，标准测温仪低温测试区域可以延伸至 900 ℃，超限测温仪高温测试范围得到有效扩展，但低温测试范围缩小。其原因是在于温度升高物体的辐射能量明显增强，在高温测试中当温度接近测试系统的高温极限时，感光电路中的电流趋于饱和，无法有效分辨出辐射能量的快速增长；另一方面，通道的感光元件都存在最小分辨能量的限制，当温度低于测试系统温度下限时，仪器的信噪比就会降低，误差增大。超限测温仪与标准测温仪相比，高温测试上限得到扩展，但低温测试下限收缩。因此，固定波长比色测温仪使用时都需要明确给定设计量程，测温仪的标定温度应该与测试对象温度区间匹配。

通过 3 个测点标定并计算出的 T-R_T 关系曲线未能利用全部的有效标定点，确定测温仪的量程后，为了提高多点实测数据的准确性，可以通过选择温度量程范围内的多点实测结果拟合出更能反应真实测量结果的 T-R_T 关系曲线，从而提高测试数据处理的准确性。图 5 所示为多测点比色测温仪 T-R_T 关系曲线拟合结果，通过该关系式可以方便的根据输出电压比值计算被测目标温度。拟合得到的标准测温仪 T-R_T 关系曲线为：$T = -342R_T^4 + 1\,322.4R_T^3 - 2\,202.3R_T^2 + 2\,935.4R_T + 748.8$；拟合得到的超限测温仪 T-R_T 关系曲线为：$T = -487R_T^4 + 638.5R_T^3 - 250.9R_T^2 + 2\,334.7R_T + 220.6$。

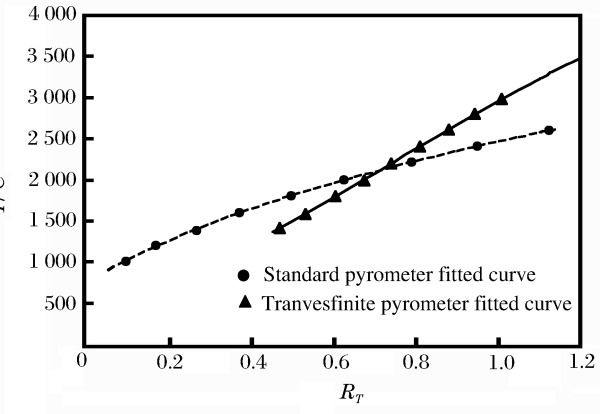

图 5 标准和超限测温仪测到的 T-R_T 拟合曲线对比

Fig. 5 Comparison of T-R_T fitted curves between standard and transfinite pyrometers

3.2 响应速度实验标定

响应速度是衡量测温设备动态特性的重要指标，通常用达到特定温度所需要的响应时间来表示。爆炸场的温度变化和运动速度都很快，为满足瞬态测试需求，针对爆炸场的测温仪需要选用快速响测温仪。比色测温仪的响应速度与光敏元件、光电转换电路、数据采样率和记录速度有关，需通过实验标定。

对测温仪响应速度的标定,目前还没有统一的方法,相关文献和实验数据极少。考虑到爆炸场瞬态高温的相似性和测温响应速度标定可行性要求,通过电容储能式高能电火花在空气中放电形成的爆炸场来标定比色测温仪的响应速度。电火花放电持续时间一般为微秒级,放电完毕温度即可达到最大值,温度变化速度极快,放电时间则可以通过电极间的电压信号或电流信号进行准确监测。当电火花电源储能达到一定量级时,电火花放电瞬间电极间会形成强烈的爆炸场。利用高能电火花放电形成的温度场和准确的峰值温度对应的时间,可以标定测温仪的动态响应速度。本实验中电火花电源为 10 J 量级,通过针状钨电极放电,采用 PEARSON 公司 110A 型电流计检测电流,电流信号采样率为 1 GHz,通过多次试验选择放电时间短的数据来标定测温仪响应速度。

图 6 所示为放电持续时间为 10 μs 的超限比色测温仪双通道电压信号和比值响应曲线。从图 6 的电压信号曲线可知,双通道的电压峰值信号出现在 10 μs 附近,电压比值 R_T 峰值也同时出现,通过 T-R_T 曲线可计算电火花的最高温度,因此,可以判断超限测温仪的响应时间不超过 10 μs。改进前的标准测温仪理论响应时间为 2 μs,由于受标定条件的限制,目前标定的测温仪响应时间为 10 μs,随标定实验水平的提高响应时间可能进一步提升。对于炸药爆炸场测温,10 μs 的响应速度完全可以满足瞬态测试需求。

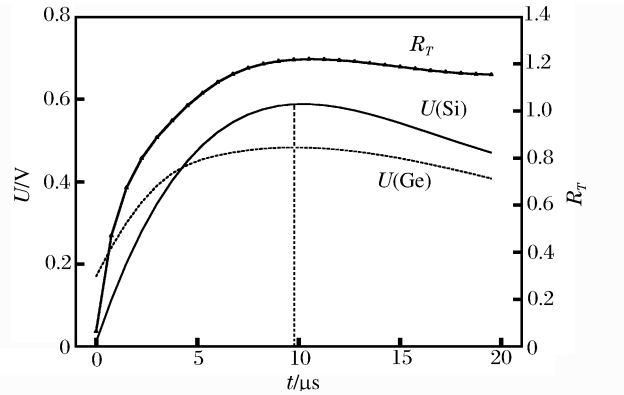

图 6 电火花放电过程中测温仪电压信号响应曲线

Fig. 6 Response curves of voltage signals during electric spark discharge process

4 比色测温仪在爆炸场中的应用

为了验证比色测温仪爆炸场瞬态高温测试效果,采用超限比色测温仪系统,分别对开放环境下的 TNT 柱状炸药和云爆剂(FAE)爆炸场进行了温度测试。测试时 TNT 药柱放置于开阔地面,测试仪距药柱 20 m,测点为爆炸中心,采用测温仪测量光路视场中所有物质的最高辐射温度。图 7 所示为 50 g TNT 药柱爆炸时,超限测温仪双通道输出电压的信号响应曲线。通过图 7 中输出结果的运算,可得不同波长的输出电压比值随温度的变化规律,再由图 5 及其拟合公式即可将电压比值转化为 TNT 爆炸温度对时间响应曲线,如图 8 所示。测试 6 kg 云爆剂时,柱状装药距地面1.5 m,引爆药距离爆心 2 m,燃料为液态碳氢化合物、铝粉、高能炸药和敏化剂。测温仪距弹心 100 m,测点距爆心 2 m。

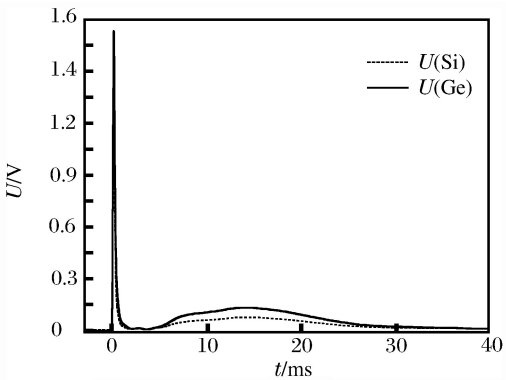

图 7 爆炸场中测温仪输出电压响应曲线

Fig. 7 Response curves of twin channel voltage signals in TNT explosive field

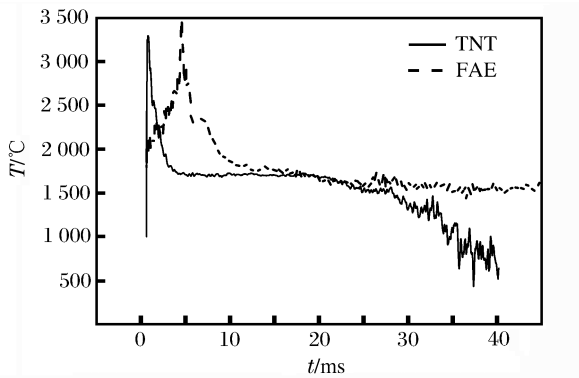

图 8 爆炸场温度响应曲线

Fig. 8 Temperature response curve of colorimetric pyrometer in explosive field

由图 8 可知,TNT 爆炸升温速度快,峰值温度达到 3 300 ℃,爆温测量结果与崔文丽等[15]的多通道比色测温结果基本吻合。FAE 爆炸时,峰值温度为 3 472℃,高于 TNT 爆心温度且高温段持续时间长。

爆炸场温度响应曲线说明云爆炸药热毁伤效果好于凝聚相炸药 TNT，测试结果同时验证了比色测温系统在爆炸场温度测量领域的动态特性和精确性。

5 结　论

从辐射热测温基本原理出发，建立红外比色测温系统，分析比色测温技术的特点和影响因素，阐述了比色测温仪的标定方法，通过实验标定标准测温系统和超限测温系统，并将该系统应用与爆炸场瞬态高温的测量，具体结论如下：

(1)理论和实验分析表明红外比色测温系统能够很好的避免爆炸产物发射率估计误差和复杂爆炸测试环境的影响，实现爆炸场环境的瞬态高温测试。

(2)分析了比色测温系统光电转换系数和波长带宽对测试结果的影响，并通过黑体炉，利用 3 点标定法，计算确定了标准比色测温仪和超限测温仪的光电转换系数、吸收波长带宽等工作参数。结果表明测温仪的标定温度应该与测试对象温度区间匹配，选定波长比色测温仪都需要明确给定设计量程。

(3)利用大能量电火花放电产生的爆炸场对测温仪的动态响应速度进行了标定，结果表明比色测温仪的响应时间不大于 10 μs，满足爆炸场温度瞬态测试要求。

(4)分析了 Si/Ge 双通道比色测温波长带宽和感光电路与温度量程范围之间的关系，通过技术改造，将比色测温系统的高温测试范围扩展至 3 500 ℃，并通过标定实验，确定了标准比色测温仪和超限测温仪的测温范围和 T-R_T 关系曲线。

(5)利用超限测温仪对 TNT 药柱和云爆剂爆炸场瞬态温度进行了实验测量，结果表明云爆剂较凝聚相炸药爆炸峰值温度高，高温持续时间长，毁伤效果好，测试结果同时验证了比色测温仪在爆炸场测试中的可行性。

参考文献：

[1] 戴景民. 辐射测温的发展现状与展望[J]. 自动化技术与应用，2004，23(3)：1-7.
Dai Jing-min. Survey of radiation thermometry[J]. Techniques of Automation and Applications，2004，23(3)：1-7.

[2] 周新利，李燕，刘祖亮，等. 炸药爆轰瞬态温度的光谱法测定[J]. 光谱学与光谱分析，2003，23(5)：982-983.
Zhou Xin-li，Li Yan，Liu Zu-liang，et al. Transient detonation temperature measurement of explosives using spectroscopic method[J]. Techniques of Automation and Applications，2003，23(5)：982-983.

[3] Campbell N R. Photo-electric colour-matching[J]. Scientific Instruments，1925，2(6)：177-183.

[4] Sharp C H. An apparatus to measure color temperature of incandescent lamp filaments[J]. Optic InfoBase，1930，20(2)：62-63.

[5] Russell H W，Lucks C F，Turnbull L G. A new tow-color optical pyrometer[J]. Optic InfoBase，1940，30(6)：248-250.

[6] Gibson A F. Infrared sensitive cell[J]. Scientific Instruments，1951，28(4)：153-155.

[7] Kawamura K，Saito A，Yaegashi T，et al. Measurement of flame temperature distribution in engines by using a two-color high speed shutter TV camera system[J]. Society of Automotive Engineers，1989，30(4)：890-902.

[8] 刘庆明，白春华. 应用比色测温仪测量燃料空气炸药爆炸过程温度响应[J]. 兵工学报，2009，30(4)：425-430.
Liu Qing-ming，Bai Chun-hua. Research on the explosive temperature response of fuel air explosive meas-ured by colorimetric thermometer[J]. Acta Armamentarii，2009，30(4)：425-430.

[9] Siegel R，Howell J R. Thermal radiation heat transfer[M]. 3rd ed. Hemispher Publishing Corporation，1992：1-3.

[10] Coats P B. Multi-wavelength pyrometry[J]. Metrologia，1981，17(3)：103-109.

[11] Coats P B. Wavelength specification in multi-wavelength pyrometry[J]. High Temperatures，High Pressures，1988，20(4)：443-448.

[12] Coats P B. The least-squares approach to multi-wavelength pryometry[J]. High Temperatures，High Pressures，1988，20(4)：433-441.

[13] 吴海滨，陈军，张杰，等. 比色测温双波长的选择及滤波片最小带宽的计算[J]. 量子电子学报，2006，23(4)：569-

572.
Wu Hai-bin, Chen Jun, Zhang Jie, et al. Selection of two-color wavelengths and minimum bandwidth calculation of filters in colorimetric temperature measurement[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006,23(4):569-572.
[14] 徐士良.数值算法与计算机实现[M].2 版.北京:清华大学出版社,2010:299-310.
[15] 崔文丽,韩焱,郭亚丽.爆轰产物温度测量技术研究[J].红外,2008(12):15-17.
Cui Wen-li, Han Yan, Guo Ya-li. Research on detonation temperature measurement[J]. Infrared, 2008(12):15-17.

Experimental study on transient high temperature measurement in explosive field*

Zhang Yun-ming[1,2], Liu Qing-ming[1], Li Lei[1], Wang Jian-ping[1]
(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Department of Fire Protection Engineering, Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang* 065000, *Hebei*, *China*)

Abstract: In order to meet the demands of transient high temperature measurement in explosive field, an infrared colorimetric temperature measurement system was established based on the theory of light radiation. The experiments with a blackbody furnace were carried out to calibrate the working parameters of the Si/Ge colorimetric pyrometer including wavelength, bandwidth, and photoelectric conversion coefficient, measurement range. And the upper limit of the colorimetric pyrometer reached 3 500 ℃. The response time of the colorimetric pyrometer was not more than 10 μs, which was determined by calibration experiments using spark discharge. The temperature formulas were given for the standard and transfinite pyrometers. And the colorimetric pyrometer was applied to measure the real temperatures in TNT and FAE explosive fields. The outstanding features of the colorimetric pyrometer in the engineering applications indicate that the colorimetric pyrometer can be used to diagnose explosion processes and evaluate heat radiation damage effects.

Key words: mechanics of explosion; colorimetric pyrometer; light radiation; explosive field; transient high temperature

---

* Received 22 March 2013; Revised 20 May 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51104164);
the National Basic Research Program of China (973 Program) (201193706904)
Corresponding author: Liu Qing-ming, qmliu@bit.edu.cn

(责任编辑 王易难)