

基于爆炸场的钨铼热电偶测温方法研究

李柯江¹, 梁海坚¹, 李志玲², 王高¹, 薛云朝³

(1. 中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 太原 030051;

2. 太原学院 智能与信息工程系, 太原 030051;

3. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

摘要: 针对大当量战斗部, 爆炸热效应是非常重要的毁伤参量之一, 热电偶作为使用最广泛、性价比最高的温度传感器, 确保热电偶测温稳定性和瞬态温度的测试精度, 是爆炸场试验和测试领域迫切需要攻克和解决的技术难题; 为解决这一问题, 对直径 100 μm 的钨铼热电偶进行了激光焊接, 使用辐射法进行了静态标定, 使用能够给予热电偶瞬态受迫温度激励的脉冲激光对热电偶进行了动态校准, 通过数值模拟仿真与实验验证, 表明利用光纤激光制造的热电偶可满足爆炸场需求; 传感器重复性为 98.96%、温度测试精度误差小于 0.38%、传感器响应时间 < 6 ms、响应时间测试精度优于 1%, 可检测到火球热辐射信号, 冲击波绝热压缩空气之后 1 169 $^{\circ}\text{C}$ 的温度曲线传递规律与数值模拟仿真得到的温度曲线规律吻合。

关键词: 爆炸; 钨铼热电偶; 静态校准; 动态校准; 热辐射

Research on Temperature Test Method for Tungsten-rhenium Thermocouple Based on Explosion Field

LI Kejiang¹, LIANG Haijian¹, LI Zhiling², WANG Gao¹, XUE Yunzhao³

(1. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Department of Intelligence and Information Engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030051, China;

3. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

Abstract: For large-yield warheads, the thermal effect of explosion is one of the most important damage parameters. Thermocouples are the most widely used and cost-effective temperature sensors. To ensure the temperature measurement stability of thermocouples and the test accuracy of transient temperature, it is a technical problem that urgently needs to be overcome and solved in the field of explosion field experiments and tests. To solve this problem, tungsten-rhenium thermocouples with a diameter of 100 μm were laser welded and statically calibrated using the radiation method. The thermocouples were dynamically calibrated using a pulsed laser that could give the thermocouples transient forced temperature excitation. Numerical simulation and experimental verification showed that the thermocouples made using fiber lasers could meet the needs of the explosion field. The sensor repeatability reached up to 98.96%, the temperature test accuracy error was less than 0.38%, the sensor response time was less than 6 ms, and the response time test accuracy was better than 1%. The fireball thermal radiation signal could be detected, and after the shock wave adiabatic compression of the air, the temperature curve transfer law of 1 169 $^{\circ}\text{C}$ was consistent with the temperature curve law obtained by numerical simulation.

Keywords: explosion; Tungsten-rhenium thermocouple; static calibration; dynamic calibration; thermal radiation

0 引言

现如今, 在军工领域, 探索各种战斗部爆炸场热毁

伤威力, 研究爆炸场热作用规律, 对于爆炸场热毁伤威力场构建和毁伤评估分析以及提升我军战斗力有着重要意义^[1-2]。瞬态温度测量的方法主要为非接触式测温和

收稿日期: 2024-07-28; 修回日期: 2024-09-14。

基金项目: 航空科学基金(202300340U0002)。

作者简介: 李柯江(1998-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 王高(1973-), 男, 博士, 教授。

引用格式: 李柯江, 梁海坚, 李志玲, 等. 基于爆炸场的钨铼热电偶测温方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 33(1): 114-120.

接触式测温两大类, 非接触式测温分为辐射测温 and 声学测温; 接触式测温包括膨胀式测温、压力式测温、电阻测温、热敏电阻测温、热电偶测温和光纤测温^[3-5]。其中红外辐射测温法和热电偶测温法被广泛应用于爆炸产生的温度场测量。文献 [6] 运用红外热成像仪分别对温压药剂和 TNT 爆炸火球的表面温度进行了测量, 根据实测结果分析了温度场的分布情况; 文献 [7] 利用红外热成像技术研究了具有云团爆炸性质的燃料空气炸药 (FAE) 的爆炸温度场; 文献 [8] 使用比色测温技术得到了炸药爆炸过程的温度数据。然而, 非接触法容易受到烟尘气体的干扰, 测量的多为爆炸火球的表面温度, 不能反映爆炸火球内部的温度分布情况, 且在测温过程中受到被测物体表面发射率的影响较大, 因此需要进行相应的修正, 实际测试中, 由于缺乏针对每个具体测试对象的修正表, 修正往往依赖于经验, 其准确度较低^[9-10]。相比之下, 接触式测温方法可以直接与被测物体接触, 不受中介介质的影响, 从而能够直接获取测点的温度数据, 因此被视为一种更为可靠和准确的测试手段。在接触式爆炸温度测量的探索方面, 文献 [11] 利用钨铼热电偶得到 TNT 爆炸的温度-时间曲线; 文献 [12] 和 [13] 利用钨铼热电偶对温压弹爆炸产物进行了温度响应测试; 结果表明采用钨铼热电偶观测和分析爆炸热作用的方法是可行的, 可用于评估武器系统的爆炸威力^[14-15]。

在国内, 关于爆炸场热毁伤效应的研究重点主要集中于小当量战斗部爆炸场的温度测试方面, 而对于大当量战斗部所造成的瞬态高温爆炸场的测试相对较为稀缺, 本文通过高功率光纤输出半导体激光器, 制备了 $100\ \mu\text{m}$ 的钨铼热电偶, 开展了静、动态校准实验, 对 $100\ \text{kg}$ 的战斗部爆炸进行了温度测试, 获得了良好的实验结果。

1 传感器制备

热电偶的成熟技术为研究瞬态热作用提供了简便可靠的测试方法, 在高温测量领域因其体积小、质量轻、测温范围宽等优点故得到广泛使用。热电偶种类丰富, 不同材料组成的热电偶其测温范围、适用条件、灵敏度等不同, 测量端的接触点几何尺度直接影响热电偶的时间常数, 其热接点 (偶结) 越小、热惯性就越小、响应时间越快, 因此制作合适的快速响应热电偶, 对爆炸场的准确测温非常重要。根据爆炸场的测试环境, 本文选择制作 WRe5/26 热电偶。钨铼热电偶测温上限高达 $2\ 800\ ^\circ\text{C}$, 而且稳定性好。

在使用中, 热电偶测量端焊接质量的好坏直接影响其测量温度的可靠性。焊接方法主要有 5 种, 分别是电弧焊法、气焊法、氩弧焊法、碳粉焊接、盐水焊接法。上述方法容易在焊接点和附近电极上产生渗碳沾污影响测量端的焊接质量, 同时在焊接过程中易导致热电偶丝脆断, 其中氩弧焊法焊接工艺较复杂。本文采用 $6\ \text{kW}$ 高功率光纤输出半导体激光器对 $100\ \mu\text{m}$ 的钨铼热电偶进行焊接。

焊接前将被焊热电极的顶端绞成麻花状 (负极在正极上绕 5 圈左右), 再用剪刀将端部裁剪齐整; 使用夹具将偶丝竖直放置在激光器前方, 焊接时端部将形成热结点, 通保护气体 (氩气), 防止在焊接过程中焊接处被氧化; 焊接时需选用适当的激光功率, 经过多次试验, 最终选择功率 $3\ \text{kW}$ 、脉宽 $10\ \text{ms}$ 的条件下焊接, 激光通过光纤准直光学系统进行均匀化后焊接, 焊接点由于重力作用呈微小的光滑圆球状, 焊接后继续通保护气, 防止偶丝氧化。

焊接完成后的热电偶偶结为 $350\ \mu\text{m}$, 制备现场如图 1 所示, 制备完成的传感器如图 2 所示。与传统技术相比, 激光焊接可根据热电偶的丝径调节激光功率, 且不需要焊剂, 不会引入额外的杂质, 适用于不同种类的热电偶制备。



图 1 制备现场



图 2 传感器

2 静态标定

为保证测温稳定性, 需要进行静态校准。在已有的研究工作中, 中低温温度环境比较容易建立, 能够实现

准确、温度和快速的校准，而对于超高温温度环境的静态校准标定，可用的手段比较少，需要进一步研究超高温环境下的静态校准方案，它直接关系到测试数据的有效性。

鉴于国内没有标准热电偶适用于超高温标定，所以使用辐射法进行静态标定，标准器使用光电温度计 LP4-8060，ThermoGageHT9500 型高温黑体炉为热源，ThermoGageHT9500 黑体辐射源的亮度温度由标准光电高温计 LP4-8060 给出，其温度测量标准可以溯源至国家高温基准，对热电偶进行了静态标定实验研究，选用 1 000、1 600、1 800、1 900 和 2 000 °C 五个温度点进行测量，温度稳定后间隔 15 分钟记录一次，共记录 2 次。整体实验重复一次。实验结果如表 1 所示。

对重复性试验误差进行计算，计算方程为：

$$\delta_R = \frac{\sigma_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1)$$

式中， δ_R 为重复性误差， σ_{\max} 为最大标准差， Y_{FS} 为满量程值；使用极差法可计算出试验的最大标准差为 0.16，放入公式 (1) 可得出 WRe5/26 热电偶的重复性误差为 1.04%，重复性为 98.96%。被测热电偶在 1 000、1 600、1 800、1 900 和 2 000 °C 的校准不确定度分别为 0.81、1.35、1.53、1.62、7.59 °C，计算得出测试精度误差分别为 0.081%、0.084%、0.085%、0.085%、0.38%，符合爆炸场测温需求，精度略优于美国 Nanmac 公司的 E12 系列钨铼热电偶，其测试精度为 1%。

3 动态标定

传感器的动态响应在瞬态温度测量中至关重要。现有温度动态标定方法主要有阶跃响应和脉冲响应两种方法。阶跃响应法通常利用热风洞、激波管、油浴投掷和电弧放电等途径实现，热风洞和油浴投掷由于弹射机构导致温度上升慢，激波管热作用时间短，电弧放电上限低。传统的方法无法产生理想的阶跃温度激励。脉冲响应法通常利用电加热的方式来实现，该方法可以产生微秒级别的短脉冲，但温度上限较低。上述方法无法同时产生窄脉冲、高幅值动态温度激励。针对快响应、耐高温温度传感器的高精度动态标定，用上述方法标定的动态特性必然会产生较大的相对误差而不适用^[16]，到目

前为止，对热电偶动态标定尚未有统一的方法。动态标定方法的不完善限制了热电偶在爆炸场领域的应用，是亟待解决的关键问题。高功率激光器及其调制技术和新型光电子器件的发展，为研究动态标定方法提供了新的技术路线。

3.1 脉冲测试方法

脉冲测试方法利用脉冲响应评价热电偶的时间常数，其优势为不用长时间加热，避免传感器损坏；不用考虑非理想的热平衡状态引入的标定误差；脉冲激光可以模拟爆炸场的瞬态热冲击现象，给予热电偶瞬态受迫温度激励，标定结果能有效表征热电偶在实际工况下的测温速度；适用于本文设计制备的热电偶，亚微秒级别的激光脉冲激励使得热量尽可能局限于偶结区域，测试结果能反映热电偶真实的动态特性。测量方法分为上升沿测量方法和下降沿测量方法。

1) 上升沿测量方法：

通常传感器的动态特性近似为理想的一阶或二阶系统的动态响应特性，少数复杂的系统也可近似的看作两个或多个二阶系统的串联或并联。在温度传感器的研究领域，通常将它当作一阶系统，通过激励源激励获取其动态响应，采用响应时间作为评定其动态特性的参数，响应时间越小表明温度传感器受到激励信号后达到动态平衡的时间越短，动态响应越快。热电偶阶跃温度响应方程为：

$$\frac{T - T_0}{T_c - T_0} = 1 - e^{-t/\tau} \quad (2)$$

式中， T 、 T_0 和 T_c 分别代表热电偶指示温度、热接点初始温度和阶跃温度； t 为热电偶阶跃温度响应时间； τ 为热电偶的时间常数。

当 $t = \tau$ 时：

$$\frac{T - T_0}{T_c - T_0} = 1 - e^{-1} = 0.632 \quad (3)$$

此时热电偶的时间常数是 $\tau = \rho V / Sh$ ，为热电偶指示温度 T 与初始温度 T_0 之差达到温度阶跃 $(T_c - T_0)$ 的 63.2% 所经历的时间。单位脉冲响应函数曲线如图 3 (a) 所示。

2) 下降沿测量方法：

当系统的传递函数为一阶时，单位脉冲激励信号的

表 1 WRe5/26 热电偶静态标定结果

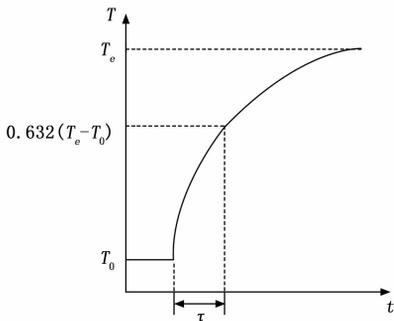
TG 炉设定温度/°C	实验一校准温度/°C	记录 1 /mV	记录 2 /mV	实验二校准温度/°C	记录 1 /mV	记录 2 /mV	实验三校准温度/°C	记录 1 /mV	记录 2 /mV	实验四校准温度/°C	记录 1 /mV	记录 2 /mV
1 000	1 001	18.295	18.295	1 001	18.295	18.295	1 001	18.411	18.411	1 001	18.411	18.411
1 600	1 592.9	28.234	28.233	1 592.9	28.233	28.233	1 592.9	28.338	28.337	1 592.9	28.337	28.336
1 800	1 791.12	31.13	31.13	1 790.83	31.128	31.128	1 791.12	31.266	31.266	1 790.83	31.27	31.27
1 900	1 902.25	32.44	32.43	1 902.25	32.44	32.43	1 902.25	32.76	32.75	1 902.25	32.76	32.74
2 000	2 001.62	33.74	33.73	2 001.6	33.70	33.69	2 001.62	33.59	33.59	2 001.6	33.56	33.55

值可近似为瞬态无限大, 其拉普拉斯变换为 $R(s) = 1$, 故系统输出量的拉氏变换与系统的传递函数相同, 即:

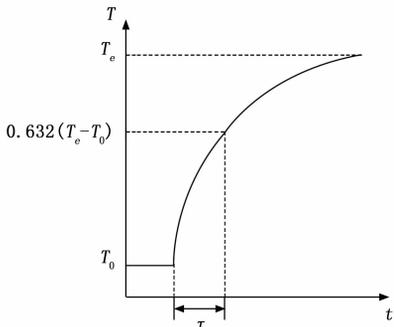
$$T - T_0 = (T_e - T_0) \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (4)$$

式中, T 、 T_0 、 T_e 分别代表温度传感器的输出温度值、温度传感器的初始温度值、单位脉冲温度激励输入后温度传感器输出温度值; t 为单位脉冲温度的响应时间, τ 为被标定温度传感器的时间常数。单位脉冲响应函数曲线如图 3 (b) 所示, 可表示为:

$$y(t) = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (5)$$



(a) 上升沿一阶系统单位脉冲响应曲线



(b) 下降沿一阶系统单位脉冲响应曲线

图 3 单位脉冲响应函数曲线

采用 $Z-t$ 变换来计算一阶系统脉冲响应的时间常数, 使用到了系统脉冲响应的全部有效数据点, 测量结果较为精确, 但通过脉冲响应下降沿测得时间常数的方法类似于正阶跃原理, 虽然重复性高, 但无法充分体现热电偶在外界受迫温度激励下的响应速度, 因此选择上升沿测量方法更为合理。

3.2 响应时间测试

本文提出了基于激光脉冲调制技术的热电偶动态标定方法。设计并构建了由 6 kW 高功率光纤输出半导体激光器为热源、激光器调制电路 (可产生脉冲、阶跃、周期性热流等激励信号)、准直聚焦光学系统、高速红外辐射温度计实现对目标温度控制的热电偶标定平台。凭借激光的发散角特性和准直聚焦光学系统二者结合精

确控制激光光束的方向, 确保激光在热电偶的偶结区域精准照射, 提升了平台的可靠性和稳定性。搭建的系统如图 4 所示。

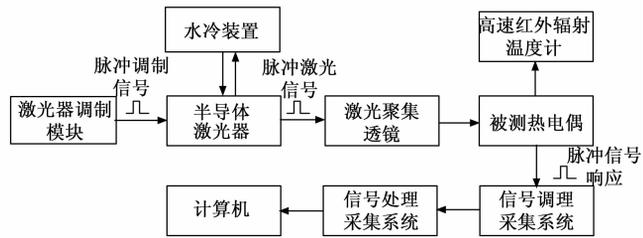
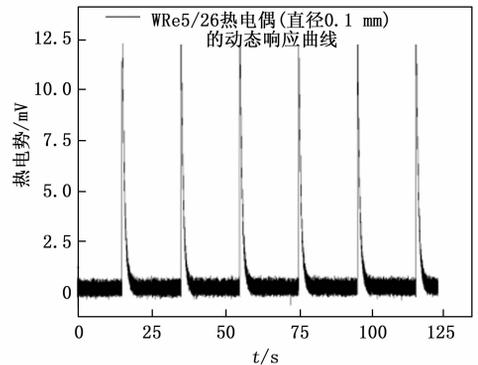


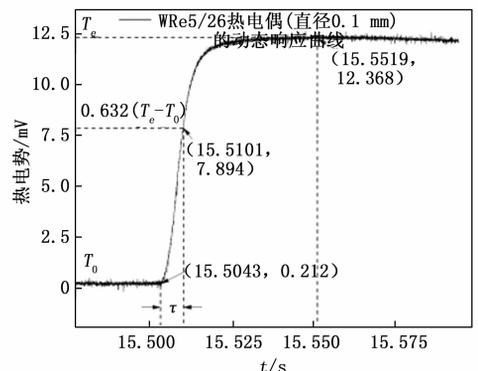
图 4 动态测试系统框图

系统关键技术利用高速红外测温方式突破了传感器高温标定的高速高温控制关键技术, 提升了超高温测量热电偶测试结果的重复性和准确性; 激光器局部可控热源突破了传统加热方式冷端易受到高温区影响而造成误差大的瓶颈, 窄脉冲高能激光能够在微秒内使偶结表面产生瞬时温升, 使热量在偶结区域传播, 可杜绝冷端温度变化引起的动态标定误差。

设置激光输出功率 1 645 W, 激光脉宽 2 ms, 脉冲激励信号每间隔 20 s 一个, 连续输出 6 个激励脉冲信号后, 采集到的动态响应曲线如图 5 (a) 所示。图 5 (b) 为图 5 (a) 第一个波的局部放大图, 计算出响应时间为 5.818 ms。



(a) 2 ms 脉冲宽度下热电偶的动态响应曲线



(b) 2 ms 单脉冲局部放大图

图 5 WRe5/26 热电偶动态响应曲线图

3.3 热电偶响应时间标准不确定度的评定

A 类评定, 实验中设置激光器的输出功率为 1 645 W, 采集装置采样频率为 59 925.09 Hz, 图 5 (a) 中 6 个脉冲信号对应的响应时间如表 2 所示。

表 2 WRe5/26 热电偶响应时间测试结果

组数	1	2	3	4	5	6
t/ms	5.818	5.937	5.924	5.964	5.944	5.882

结果表明 WRe5/26 热电偶响应时间平均值为 5.911 5 ms, 通过极差法计算被测量估计值 \bar{x} 的 A 类标准不确定度 $u_A(\bar{x})$ 为 23.559 μs , 自由度为 4.5。

B 类评定, 由于数据采集装置的采样间隔 Δt , 会引入 B 类不确定度分量, 因为响应信号中的时间常数是两个时刻之间的差值, 所以被测的响应时间的估计值会均匀分布在 $[t_s - \Delta t, t_s + \Delta t]$ 区间内。采集装置设置的采样频率为 59 925.09 Hz, 可以获得被测响应时间估计值 t_s 的 B 类不确定度 u_B , k 为置信因子^[17], 均匀分布时, $k = \sqrt{3}$:

$$u_B = \frac{\Delta t}{k} = \frac{0.000\ 016\ 687\ 5}{\sqrt{3}} = 9.634\ 8\ \mu\text{s} \quad (6)$$

合成不确定度评定, 当输入量间相关时, 需要考虑输入量间的协方差, 而当各输入量间均不相关时, 相关系数为零:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 25.453\ \mu\text{s} \quad (7)$$

因为各输入量间不相关, 计算可得合成标准不确定度 $u_c(y)$ 为 25.453 μs 。

扩展不确定度的评定, 扩展不确定度为确定测量结果区间的量, 合理赋予被测量之值的大部分可望含于此区间。在合成标准不确定度 $u_c(y)$ 确定后, 乘以一个包含因子 k 即可得到扩展不确定度, 在通常的测量中, 一般取 $k=2$ 。

$$U = ku_c = 50.906\ \mu\text{s} \quad (8)$$

测量结果可用公式 (9) 表示:

$$Y = y \pm U = (5.911\ 5 \pm 0.050\ 906)\ \text{ms} \quad (9)$$

通过计算可得出扩展不确定度为 50.906 μs , 响应时间为 $(5.911\ 5 \pm 0.050\ 906)\ \text{ms}$, 响应时间精度为 0.861 135%。

4 数值模拟仿真

建立的有限元模型由 TNT 炸药、空气和沙土三部分组成, 由于三维模型求解过程复杂计算效率低, 因此采用二维模型模拟柱状 TNT 在空气中的温度场传播过程, 采用欧拉和 ALE 算法驱动模型求解。TNT 在空气中爆炸, 对空气和沙土均造成冲击, 并在模型边缘设置无反射边界, 用来模拟实际靶场无限空气域的环境。

设定总长为 31 m, 总高 10 m, I 、 J 方向网格划分为 620 和 200, 其中空气域高 8 m, 沙土深 2 m, 建立模型时, 装药方式为长方体型裸装药, TNT 炸药模型高度设置为 1.1 m, 长为 0.56 m, 药柱中心离地面高度为 1.75 m, TNT 炸药的密度参数为 1.63 g/cm³, 结合 $m = \rho V$ 计算可得 TNT 的质量为 100 kg, 观测点共布设 4 个, 距爆心距离分别为 15、20、25、30 m, 每个测点距沙土高为 1.75 m, 起爆方式为中心点起爆, 最大程度模拟爆炸场传感器测试时的真实环境。建立的有限元模型见图 6 所示。



图 6 TNT 爆炸二维数值仿真模型

在上述模型中, TNT 爆炸产物的状态方程为标准的 JWL 状态方程, 表达式为^[18]。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (10)$$

式中, P 为爆炸产物的压力, Pa; E_0 为爆炸产物的比内能, KJ/m³; V 为爆炸产物相对比容, m³/kg; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 取决于 TNT 炸药的状态参数, A 、 B 为材料参数, R_1 、 R_2 、 ω 为物理常数。各参数取值如表 3 所示^[19]。

表 3 TNT 炸药 JWL 状态方程参数

材料参数	A/(1011Pa)	B/(109Pa)	R1	R2	ω
TNT	3.738	3.747	4.15	0.9	0.35

仿真完成后获取各高斯测点爆炸温度的数据, 各高斯测点在 12 ms 内的温度变化曲线如图 7 所示, 根据仿真结果的温度范围, 选择使用了自制的钨铼 5/26 热电偶。

5 实验结果与分析

在爆炸场近场区域, 爆炸火球的冲击波超压相当大, 若要在这种极端环境中使用接触法来测量爆炸火球内部温度, 热电偶的外壳结构必须具备足够的强度。因此, 我们设计了铠装型的 WRe5/26 热电偶, 以确保其结构坚固, 能够承受高压环境下的冲击力, 从而满足在爆炸场中进行高精度温度测量的要求, 选择使用耐高温屏蔽补偿导线连接到热电偶的两极, 既可满足爆炸场产生的瞬时高温不会将导线熔断, 又能抗电磁干扰。静爆实验选择在开阔的野外靶场内, 研究自制的 WRe5/26

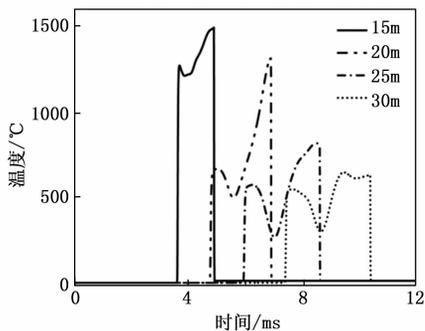


图 7 不同距离爆炸热响应温度—时间曲线

热电偶对爆炸产物的响应温度在同一方向上沿爆心不同位置的分布变化衰减规律。

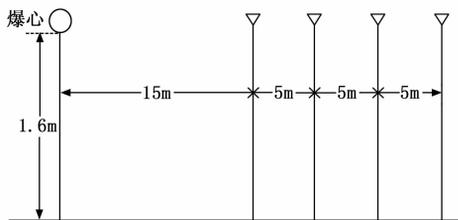


图 8 实验现场布置图

实验步骤: 实验时 100 kg 炸药放置在距地面 1.6 m 的木架上, 分别在距离爆心 15、20、25、30 m 处, 放置 4 个热电偶温度测点, 实验布置如图 8 所示; 传感器外壳与螺栓相接通过套筒固定于安装支架, 支架安装垂直于地面且高度与炸高一致^[20], 热电偶偶结正对爆心, 将安装支架砸入土地 50 cm, 将热电偶的耐高温屏蔽补偿导线用铁丝固定于支架后面, 并将导线埋入地下 20 cm 处走线到 50 m 处的数据采集器, 防止被冲击波扯断, 热电偶的安装如图 9 所示; 将采集卡开机后离场等待。



图 9 传感器安装

爆炸首先产生的是火球热辐射, 随即是冲击波绝热压缩空气, 使得气体温度急剧上升^[21-22]。距离爆心 15、20、25、30 m 处的温度曲线如图 10 所示。如图 11 所示为爆炸火球的热辐射信号, 是图 10 中 424 ms 处的

放大。

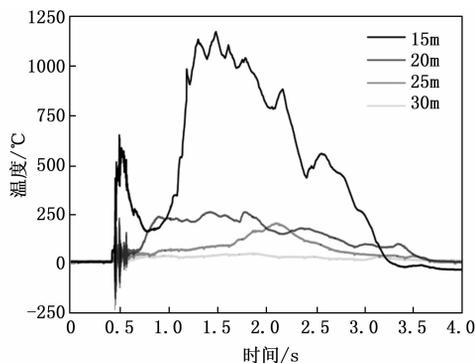


图 10 不同距离处热电偶爆炸温度实测曲线

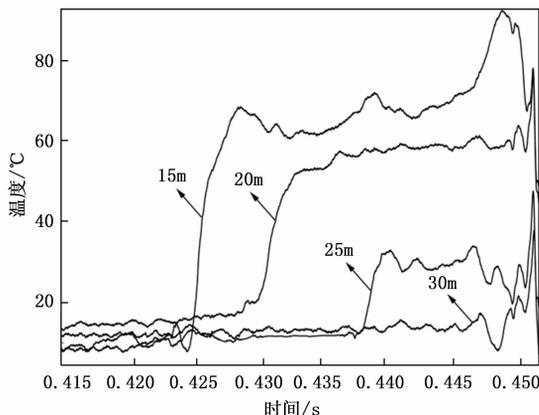


图 11 爆炸火球的热辐射信号

由于测点受到高温气体和爆炸产物的持续影响, 所以实验测得高温持续时间要比数值模拟仿真的时间长; 且试验现场位于空旷的野外, 不是基于坑洞式的模拟测试, 热量散失速度较快, 是测得温度较数值模拟仿真偏低的原因^[23]。

15 m 处的温度在 453 ms 时迅速升高至 570 °C, 然后降至 163 °C 后再次升高, 在 1 485 ms 处达到 1 169 °C 的峰值, 温度传递规律与数值模拟仿真得到的温度曲线规律吻合, 曲线为双峰形, 分析认为纵波的传播速度快, 而后是横波, 如图 10 所示先有一个陡峭上升的波峰, 然后迅速产生第二个更高温度的波峰; 随着爆心距的增加, 在 20 m 与 25 m 处, 火球与冷空气的接触面变大, 其热交换速率提高, 温度降低的速度骤然加快, 致使温度曲线变的相对平缓; 30 m 处爆炸产生的温度场基本消散, 温度值趋于常温。图 11 中 0.425 s 前由于受爆炸场地地势、风力因素和阳光直射影响, 所以造成 4 个位置的传感器初始温度有微小差别, 之后可直观的看出炸药爆炸后热辐射信号依次到达 15、20、25、30 m 处, 且随着距离的增加, 热辐射信号逐渐衰减。

6 结束语

本文利用光纤输出半导体激光器功率密度高、聚焦

光斑小的特点,对 100 μm 钨铼热电偶丝进行了光纤激光焊接实验,使用辐射法开展了静态标定实验,搭建了基于 6 kW 高功率光纤输出半导体激光器的热电偶动态标定平台,进行了 100 kg 战斗部爆炸的实验。静态标定结果表明传感器重复性为 98.96%、温度测试精度误差小于 0.38%,使用窄脉冲高能激光模拟爆炸场瞬态受迫温度激励环境,使传感器产生瞬时温升,在实验室条件下,有效评估了热电偶在极端热工况下的动态性能,测得热电偶响应时间为 (5.9115 ± 0.050906) ms,响应时间测试精度为 0.861 135%,能满足爆炸场瞬态温度测试要求;通过分析 100 kg 战斗部爆炸后检测到的火球热辐射信号,其幅值随距离增加而衰减,响应起止时刻随测点距爆心的距离增加而滞后,以及在 15 m 实际测得的 1 169 $^{\circ}\text{C}$ 的温度曲线与相同条件下数值模拟仿真得到的温度曲线规律吻合,说明了温度测试数据的有效性和设计方案的可行性。在距爆心 15 m 实测最高温度为 1 169 $^{\circ}\text{C}$,证明激光焊接的 WRe5/26 热电偶在爆炸场环境下是可靠的,可使用其探索大当量战斗部爆炸场热毁伤威力。

参考文献:

- [1] YU H, SUN Y, 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.
- [2] 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.
- [3] YAN Z G, WU J P, HE X, et al. Review on the Development of Power Field Testing Technology of High-energy Warhead [C] // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2023, 2460 (1): 012159.
- [4] NIE B, HE X, ZHANG C, et al. Temperature measurement of gas explosion flame based on the radiation thermometry [J]. *International journal of thermal sciences*, 2014, 78: 132 - 144.
- [5] ZHENG L I, QUAN W. Experimental study of explosive water mist extinguishing fire [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 11: 258 - 267.
- [6] 郭学永, 李 斌, 王连炬, 等. 温压药剂的爆炸温度场测量及热辐射效应研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2008, (5): 119 - 121.
- [7] 李秀丽, 惠君明, 解立峰. 红外热成像技术在云团爆炸测温中的应用 [J]. *含能材料*, 2008, (3): 344 - 348.
- [8] 张启威, 程扬帆, 夏 煜, 等. 比色测温技术在瞬态爆炸温度场测量中的应用研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42 (11): 105 - 117.
- [9] YAO Y L, CHENG Y F, ZHANG Q W, et al. Explosion temperature mapping of emulsion explosives containing TiH₂ powders with the two-color pyrometer technique [J]. *Defence Technology*, 2022, 18 (10): 1834 - 1841.
- [10] WANG L Y, Du H M, Xu H. Compensation method for infrared temperature measurement of explosive fireball [J]. *Thermochimica Acta*, 2019, 680: 178342 - 178342.
- [11] 郑勇杰, 苏健军, 姬建荣, 等. TNT 爆炸温度场热作用规律实验研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44 (6): 103 - 107.
- [12] 王代华, 宋林丽, 张志杰. 基于钨铼热电偶的接触式爆炸温度测试方法 [J]. *探测与控制学报*, 2012, 34 (3): 23 - 28.
- [13] WANG D, SONG L, ZHANG Z. Contact temperature measurement system based on tungsten-rhenium thermocouple [C] // *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010)*. IEEE, 2010, 12: V12-660-V12 - 663.
- [14] 闫潇敏, 苏健军, 李芝绒, 等. 坑道内温压炸药的爆炸热效应研究 [J]. *火工品*, 2015, (1): 22 - 25.
- [15] 李芝绒, 王胜强, 苟兵旺. 密闭空间爆炸温度测试方法研究 [J]. *火工品*, 2012, (5): 52 - 56.
- [16] 张根甫, 郝晓剑, 桑 涛, 等. 热电偶温度传感器动态响应特性研究 [J]. *中国测试*, 2015, 41 (10): 68 - 72.
- [17] 刘云东, 王 高, 李志玲, 等. 新型薄膜热电堆热流传感器动态特性测试研究 [J]. *舰船电子工程*, 2023, 43 (9): 178 - 181.
- [18] LEE E L, HORNIG H C, KURY J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products [R]. Univ. of California Radiation Lab. at Livermore, Livermore, CA (United States), 1968.
- [19] KOLI S, CHELLAPANDI P, RAO B L, et al. Study on JWL equation of state for the numerical simulation of near-field and far-field effects in underwater explosion scenario [J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2020, 23 (4): 758 - 768.
- [20] 饶珊珊, 孔德仁, 郭雨岩, 等. 爆炸场温度传感器工程安装方式数值模拟研究 [J]. *测试技术学报*, 2021, 35 (4): 327 - 332.
- [21] LI Z L, WANG G, YIN J P, et al. Development and performance analysis of an atomic layer thermopile sensor for composite heat flux testing in an explosive environment [J]. *Electronics*, 2023, 12 (17): 3582.
- [22] 黄 磊, 何中其, 李春光, 等. 热通量传感器在爆炸场热辐射测试中的应用 [J]. *火炸药学报*, 2011, 34 (5): 38 - 42.
- [23] 张茹开. 爆炸瞬态温度测试方法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.