

基于红外探测的新型热流密度传感器设计

姜 韬 孔德仁 郭雨岩

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘 要:目前爆炸场热毁伤效应越来越受到人们的重视,针对爆炸场恶劣的测试环境要求,设计了一种基于红外探测的新型热流密度传感器。该传感器利用其热敏元件与爆炸产物直接接触使热敏元件温度升高进而产生红外辐射,基于红外测温的原理得出热敏元件的温升情况,通过热传导数学模型理论间接得出环境中的入射热流密度。相比于传统的热流密度传感器而言,这种新型热流密度传感器响应时间快、测试范围广、测量精度高、能够较好地用于爆炸场热毁伤测试评定。

关键词:爆炸场;热毁伤效应;红外探测;热流密度传感器

中图分类号: TH811 TN215 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Design of a new type of an infrared heat flux density sensor

Jiang Tao Kong Deren Guo Yuyan

(College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: More and more attention has been paid to the thermal damage in explosion field recently. In view of the abominable test environment of explosive field, a new type of an infrared flux density sensor is designed. This sensor uses its thermal sensitive element to be in direct contact with the explosive product, then the thermal element rises in temperature to produce infrared radiation, and based on the principle of infrared temperature measurement, the temperature rise of the heat sensitive element is obtained, finally, the heat flux can be indirectly obtained by the mathematical model theory of heat conduction. Compared to conventional heat flux sensors, this new type of heat flux sensor has fast response time, wide testing range and high measurement accuracy, it can be used in thermal damage test and evaluation of explosion field effectively.

Keywords: explosion field; heat damage effect; infrared acquisition; heat flux density sensor

0 引 言

目前,战斗部爆炸场的毁伤破坏效应主要表现在高压冲击波和热毁伤方面,随着大当量战斗部的研制不断深入,爆炸场热毁伤效应越发明显,因此,针对爆炸场热毁伤效应的测量与评定越来越受到人们的重视。现阶段,爆炸场热毁伤测试大体上可分为接触式和非接触式两种方式。非接触式测试方法主要通过光学仪器,采用非接触式的方式对爆炸火球表面的热通量进行测量;接触式测试方法主要以热电偶为热电转换原件,通过传感器与爆炸产物直接接触的方式测试爆炸场毁伤范围内的热流密度。

在爆炸场热毁伤效应的研究上,李斌等人^[1]使用红外

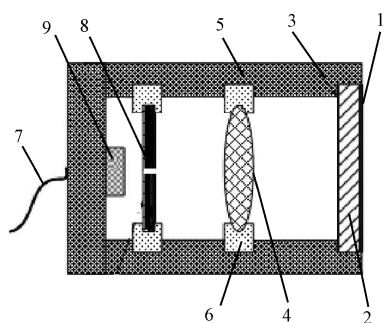
热成像仪分别对不同质量的温压炸药和 TNT 爆炸火球的表面温度进行了测量,根据实测结果拟合出了温压药剂爆炸火球直径、持续时间与装药量的关系式,并初步确定了温压炸药爆炸的热毁伤准则,为后续研究学者提供了一定的理论基础;张维克^[2]利用原子光谱多谱线测温法研究了爆炸火球瞬态高温的测量技术测试了高能云爆炸药以及 TNT 的瞬态温度场;郭学永等人^[3]采用红外成像技术分别测量了温压炸药和 TNT 炸药爆炸的火球表面温度,确定了两种炸药爆炸的热毁伤范围;钟倩等人^[4-6]对云爆战斗部的毁伤效果进行了全面的评估,初步建立了战斗部各毁伤源毁伤效果的评估方法;姬建荣等人^[7]利用 WRe5/26 热电偶对 TNT 爆炸产物进行了温度响应测试,获得了爆炸场内部相应位置的温度变化曲线,同时指出热

流密度才是评定热毁伤程度的重要参量。

由此可知,现阶段我国主要通过非接触式测试方法对爆炸场热毁伤效应进行有效评估,但是该方法只能测试爆炸火球表面辐射换热产生的热毁伤,无法测试爆炸场内部对流换热产生的热毁伤,因此也就无法全面有效的评估爆炸场的热毁伤效应,而接触式测试方法一般以热电偶为测量元件,其响应时间一般都在2 s以上^[8],无法满足爆炸场的测试要求。同时,无论接触式法还是非接触式法,国内研究者大多只关注爆炸场的温度测量,而与温度相比,热流密度更能表征爆炸场的热毁伤效应。因此,针对爆炸场的恶劣测试环境要求,本文设计了一种快速响应的基于红外探测的接触式热流密度传感器。

1 传感器结构组成及工作原理

传感器结构组成如图1所示。



1. 高吸收比涂层; 2. 热敏元件; 3. 高发射率涂层; 4. 透镜; 5. 壳体;
6. 镜片夹持装置; 7. 输出导线; 8. 透光孔; 9. 光-电转换模块

图1 传感器结构组成

传感器放置于爆炸场工作时,通过高吸收比涂层与炸药爆炸产物直接接触并吸收环境中的热流密度,使得热敏元件温度逐渐升高,其后壁面的黑体涂层发射出红外辐射,红外辐射经过透镜聚焦后到达透光孔,再通过透光孔后将能量传递给光-电转换模块,随后,光-电转换模块将接受到的红外线光信号转化为电压信号,进而对热敏元件后壁面的温度进行间接测量,最终通过热敏元件后壁面温度结合传感器的数学模型得出环境中的入射热流密度。

在实际情况下,传感器接受热源时,其热敏元件吸收和发射的热量不可能是100%,所以吸收和发射的热通量是不相等的,为了增加传感器灵敏度需要在传感器前后壁面涂抹涂层材料以提高热敏元件前后壁面的吸收率和发射率,根据涂层材料的吸收率和发射率,可以推得热敏元件吸收和发射的热通量关系^[9]如式(1)所示。

$$q_{\text{out}} = \epsilon q_{\text{in}} = \epsilon \epsilon' q \quad (1)$$

式中: q 为爆炸场中的真实热通量, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; q_{out} 为热敏元件后壁面发射热通量, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; q_{in} 为热敏元件前壁面吸收热通量, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; ϵ 为发射率; ϵ' 为吸收率。

对热敏元件热传导模型进行研究,建立传感器热流密度测试数学模型。由能量守恒定律可知,输入传感器的热量导致热敏元件温度上升,而 q_{out} 可表示为:

$$q_{\text{out}} = \rho c l \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

式中: ρ 为热敏元件的密度, kg/m^3 ; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; l 为厚度, m ; T 为热敏元件后壁面温度, K 。

通过式(2)可知,只要已知热敏元件后壁面温度随时间的变化情况,便可以求得其后壁面发射的热流密度,进而可根据式(1)求得传感器入射热流密度即爆炸场环境中的热流密度。

2 热敏元件的设计

对于一个阶跃变化的热流信号,定义传感器的响应时间为响应信号与激励信号相差1%以内所需要的时间,传感器响应时间可表示为:

$$t = 0.5 \frac{l^2}{\alpha} \quad (3)$$

式中: l 为热敏元件厚度, m ; α 为热敏元件材料热扩散系数, m^2/s 。

通过式(3)可知传感器的响应时间与热敏元件厚度的平方成正比,与热敏元件材料热扩散系数成反比,因此为了减小传感器的响应时间,应选择高热扩散系数材料,并尽量减小热敏元件厚度。

爆炸场环境温度可达2 000 K以上,且伴随强烈的冲击波超压,因此需要热敏元件材料具有一定的耐高温抗烧蚀能力。钨渗铜熔点可达2 500 K以上,导热性能优良,其热扩散系数约为0.000 1 m^2/s ,在常见金属中相对较大,且具有较高的热强度,为此本文选用钨渗铜作为所设计传感器的热敏元件材料。同时,爆炸场的热作用时间十分短暂,要求传感器响应时间应当小于10 ms,代入式(1)可得热敏元件厚度应小于1.414 mm,可以设计热敏元件厚度为1 mm,直径为10 mm,其结构如图2所示。

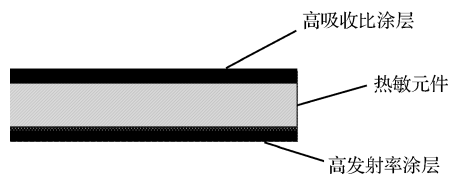


图2 热敏元件结构

为了提高传感器的灵敏度,一方面要求热敏元件前壁面尽量多的吸收环境中的入射能量,另一方面又要求热敏元件后壁面尽量多的辐射出能量。因此,如图2所示,在热敏元件前后壁面涂抹合适的涂层材料来提高其能量的吸收率以及发射率。碳化硼作为一种涂层材料,其吸收率以及发射率均高达0.9,且在大部分光谱波长范围内相对稳定,同时此材料熔点可达2 500 K,硬度接

近金刚石,能够在爆炸场的恶劣环境中起到保护热敏元件的作用,因此,本文选用碳化硼作为热敏元件的涂层材料^[10-11]。

3 光学系统的设计

根据文献[12-13]可知,在不同的工况条件下,光学原理的温度传感器具有其他测试方法所无法比拟的优势,本文基于红外探测理论设计了一种新型的接触式热流密度传感器,其主要核心技术是光学系统的设计。众所周知,红外技术是一门研究红外辐射产生、传播、转换、探测以及应用的技术,红外测温是通过测量物体辐射出来的能量来计算出温度的,其物理基础就是基本的辐射定律,如果光电元件不能有效地接收热敏元件辐射出的红外光谱,将导致传感器无法准确地测出热敏元件后壁面的温度,进而使得计算出的热流密度误差会很大。因此,需要模拟出爆炸场中传感器热敏元件吸收热量后的大致温升范围,进而选择合适的光电转换元件来实现此热流密度传感器的有效测量。

3.1 热敏元件对流换热仿真

为了得知热敏元件在爆炸场中的大致温升情况,需要知道施加于热敏元件上的热流载荷的大致范围即爆炸场爆炸环境的大致温度范围。本文以 TNT 炸药为例,模拟了其爆炸时周围环境的温升情况,建立的仿真模型主要由 TNT 炸药、空气和沙土 3 部分组成,3 种材料参数均来自 Autodyn 程序的材料库。由于模型的对称性,可以采用二维模型仿真替代,TNT 炸药长径比为 1:1,总质量为 40.966 kg,空气域高 8 m,半径长 20 m,沙土深 2 m,半径长 20 m。空气、沙土和炸药均采用欧拉和 ALE 算法,炸药以填充的方式填入空气域中,流体外边界采用流出边界,测点离地面高 10 cm,距爆心轴线每隔 1 m 布置一个。物理模型如图 3 所示^[14]。



图3 TNT爆炸物理模型

数值仿真结果如图 4 所示。

由上图各高斯点处的温度变化可知,TNT 炸药爆炸瞬间将产生非常高的冲击波压缩空气使得空气温度急剧升高,压缩至近处测量点的温度高达 1 000 K 以上,持续时间很短只有 10 ms 不到,这是因为此仿真软件仿真的仅为冲击波压缩空气波阵面产生的温升效应,并不能完全反应爆炸场内部的温度情况,爆炸曲线中有两个波峰,第 2 个波峰是由于地面沙土反射冲击波产生的。

由上面的仿真结果可知,爆炸场爆炸环境温度可达 1 000 K 以上,基于 ANSYS APDL 对热敏元件作对流换

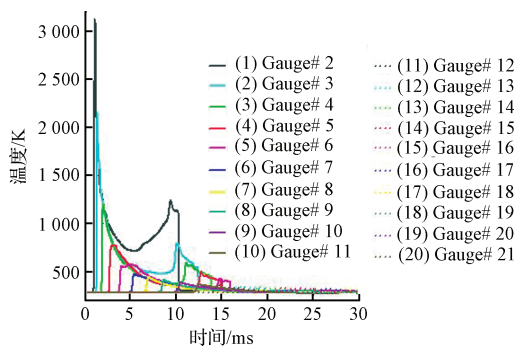


图4 波正面温度随时间变化曲线

热仿真。建立直径 10 mm,厚度 1 mm 的热敏元件结构模型,材料为铜,在其前壁面施加一个持续时间为 100 ms,大小为 1 237 K 的恒定温度,吸收率和发射率均设为 0.94,搜索资料显示爆炸场较近处对流换热系数可达 10^4 级别^[9],可设对流换热系数 h 为 10 000,根据模型的对称性,可以简化为二维模型如图 5 所示。

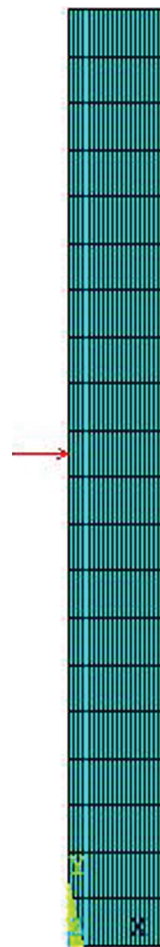


图5 二维仿真模型

观察热敏元件后壁面随时间的温升情况,仿真结果如图 6 所示。

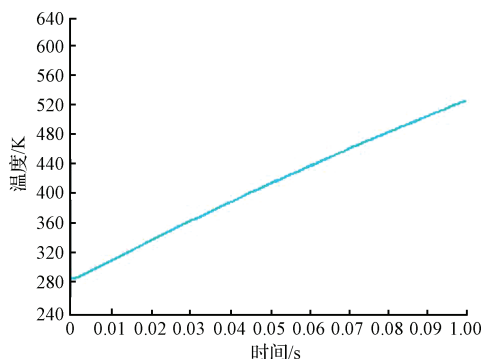


图6 热敏元件后壁面温度变化曲线

结果显示,100 ms 的时间内,热敏元件后壁面温度随时间逐渐升高到 500 K 左右,因此可知,需要选择工作范围集中于 500 K 左右的光电转换元件来保证此传感器的正常工作。

3.2 光学元件的选择

一般涂层表面可近似认为是黑体表面,根据普朗克定律可知,黑体的辐射力随波长的变化关系如式(4)所示:

$$E_{\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda} - 1} \quad (4)$$

式中: E_{λ} 为黑体光谱辐射能力, W/m^2 ; λ 为波长, m ; T 为黑体热力学温度, K ; e 为自然对数底; c_1 为第 1 辐射常量, $3.7419 \times 10^{-16} \text{ W}/\text{m}^2$; c_2 为第 2 辐射常量, $1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

通过 MATLAB 拟合出了在 300 K、400 K、500 K、600 K 温度时黑体的光谱辐射力随波长变化的曲线如图 7 所示。

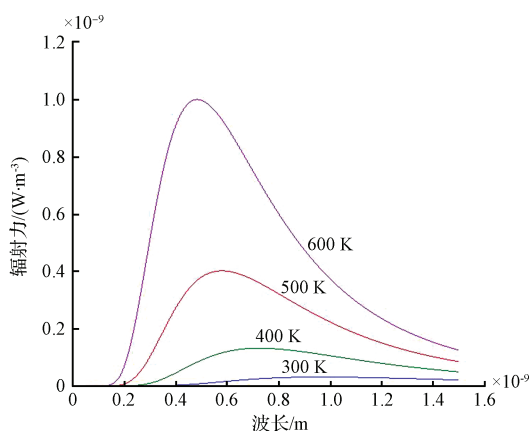


图7 普朗克定律图示

可知,当热敏元件后壁面黑体涂层理论温度在 500 K 左右时,其发射红外能量的波长主要集中在 $4 \sim 10 \mu\text{m}$ 左右。

透镜作为光学系统中的重要组成部分,选择合适的材料才能确保红外光谱辐射能够更多地传递到光电转换元件中。硫化锌晶体作为一种重要的透红外材料,对于

波长在 $3 \sim 12 \mu\text{m}$ 之间红外线透射率可达 73%,符合光谱范围,因此可以选择该材料作为光学系统中的透镜材料^[15]。

红外光谱透过透镜后,由光电元件接收光信号并将其转换为电信号,这就需要传感器有合适的光电转换元件。目前,传统光—电转换元件主要包括:光敏电阻、光电管、光电池及红外热电堆等,不同光电元件的光谱响应范围也有所不同,光敏电阻主要响应范围在 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 之间,光电池的光谱响应范围为 $0.4 \sim 1.4 \mu\text{m}$,两者响应范围太窄,不能满足测试要求,红外热电堆的响应范围较宽,但是响应时间普遍不高,也不适用于爆炸场热流密度测试。碲镉汞光电管响应时间在微秒级,且光谱响应范围在 $1 \sim 20 \mu\text{m}$ 之间^[16],完全覆盖热敏元件的光谱范围,故选用碲镉汞光电管作为传感器的光电转换元件可以使得传感器有效地工作。

4 结 论

本文基于红外探测理论,设计了一种新型爆炸场用的接触式热流密度传感器,详细介绍了其结构组成及工作原理,并通过仿真与理论的分析此传感器的工作范围与可行性,为后续实物制作奠定了坚实的基础。

1) 这种新型传感器体积小、结构简单、容易制作、便于安装,并且耐磨性好,在爆炸场的恶劣环境中不易损坏,同时针对传统热流密度传感器响应时间长、精度不高等问题,本文采用碲镉汞光电元件作为这种新型热流传感器的光电转换模块,其响应时间快,测试精度高。

2) 相较于非接触式测试方法只能测试辐射换热产生的热流密度,此热流密度传感器通过与爆炸产物直接接触的方式,同时接收爆炸场内部热辐射与热对流的作用,能够得到更加准确全面的爆炸场热毁伤数据。

3) 本文设计的热流密度传感器还处于设计的初级阶段,通过仿真与理论分析可知,传感器热敏元件在爆炸场中的理论温升范围在 500 K 左右,但是实际与理论是有一定的误差的,爆炸场恶劣的爆炸环境的真实情况是复杂多变的,我们需要通过实验来进一步验证这种基于红外探测的热流密度传感器的可行性与准确性。

参 考 文 献

- [1] 李斌,郭学永,解立峰.温压药剂的热持续杀伤能力研究[J].弹道学报,2009,21(4):99-102.
- [2] 张维克.爆炸场温度的多谱线测试方法研究[D].南京:南京理工大学,2009.
- [3] 李斌,郭学永,解立峰.温压药剂的热持续杀伤能力研究[J].弹道学报,2009,21(4):99-102.
- [4] 仲倩.燃料空气炸药爆炸参数测量及毁伤效应评估[D].南京:南京理工大学,2012.
- [5] 仲倩,王伯良,王凤丹,等.温压炸药爆炸过程的瞬态温度[J].含能材料,2011,19(2):204-208.

- [6] 仲倩,王伯良,黄菊,等.火球动态模型在温压炸药热毁伤效应评估中的应用[J].爆炸与冲击,2011,31(5):528-532.
- [7] 姬建荣,苏健军,刘艳萍,等.非理想炸药爆炸热作用的实验研究[J].火炸药学报,2010,33(4):49-52.
- [8] 徐立新,谢建斌,杨智伟,等.微细热电偶的制作与时间常数标定方法[J].电子测量与仪器学报,2016,30(7):1023-1028.
- [9] 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.
- [10] 刘坤楠,孙帆,谭章娜,等.碳化硼的研究进展[J].广州化工,2015,43(5):21-23.
- [11] 严茜,都兴红,龙孟,等.碳化硼的制备、应用与碳化硼研磨料的回收前景[J].中国陶瓷,2015,51(4):9-12.
- [12] 张巍巍,史凯兴.基于染料荧光多个特征的光纤温度传感器[J].仪器仪表学报,2016,37(11):2620-2627.
- [13] 丁浩,李军,商和龙,等.基于最小二乘法的光纤互感器双路温补技术[J].电子测量技术,2016,39(6):190-195.
- [14] 周保顺,张立恒,王少龙,等.TNT炸药爆炸冲击波的数值模拟与实验研究[J].弹箭与制导学报,2010,30(3):88-90.
- [15] 甘硕文.热压多光谱硫化锌制备工艺研究[D].天津:天津大学,2013.
- [16] 高赞.近红外光谱仪光电传感器模块设计[D].长春:吉林大学,2010.

作者简介

姜韬,1993年出生,硕士研究生,主要研究方向为机械工程、仪表与测试技术、基于红外探测的热流密度传感器设计。

E-mail:814113232@qq.com

NI 推出自动化解决方案,将复杂的大模拟数据(Big Analog Data™)转化为有价值的技术洞察

数据管理软件套件提供完整的工作流程,将测量数据转化为可执行的技术洞察

新闻发布——2017年11月10日-NI(美国国家仪器公司,National Instruments,简称NI)作为致力于为工程师和科学家提供基于平台的系统解决方案来应对全球最严峻工程挑战的供应商,近日发布了数据管理软件套件(Data Management Software Suite)。这一企业软件解决方案提供了一个完整的工作流程来标准化不同团队的测量数据,挖掘数据获取有用的信息、通过自动分析转换数据,最终提供有技术洞察价值的报告。

NI平台软件副总裁Dave Wilson表示:“测试设备、监控实体资产和分析产品设计的数据量持续激增,数据量呈指数级增长所带来的挑战是需要建立一个可复用的自动化流程来提取有价值的信息。错误的数据和前后不一致的数据就会产生错误的结果,这就需要工程师在将数据发给下一步人工或自动化分析之前必须进行手动数据检查和验证。”

数据管理软件套件旨在通过引入基于服务器的软件功能和Analysis Server这一新产品来简化工作流程。这款新产品可以帮助工程师和科学家将大量测量数据的搜索、标准化、分析和报告悉数自动化。这一完整的套件可以灵活地整合客户现有的数据格式和IT基础架构,因此任何拥有Windows系统电脑和网络的团队都可以基于网络获得强大的数

据管理功能。NI平台可以提供边缘端的纳秒级分析、数据读/写分析、以及对用于自动化分析的元数据进行标准化。

“借助数据管理软件套件,我们成功帮助一家大型汽车制造商将组件测试所需要的数据分析时间从10小时缩短到7分钟。这是将测试周期缩短了整整一天。”专业从事数据管理的NI联盟合作伙伴Viviota首席执行官Barry Hutt表示。

Analysis Server是NI在DIAdem和DataFinder服务器的基础上开发的基于服务器的数据管理解决方案,随着该软件的发布,数据管理软件套件也可实现自动化数据处理。现在,工程师无需任何手动交互,即可获得第一手有用的信息,同时保留原始测量数据以供搜索和进一步研究。数据管理软件套件将这些高度相互支持的软件产品组合到一个企业解决方案中,可以更好地对测试数据进行标准化,并通过更快地将数据转化为有用信息来缩短产品上市时间。

数据管理软件套件能够得到合作伙伴、附加IP和应用工程师组成的活跃生态的支持,属于NI软件和硬件平台的一部分,有助于大幅降低测试成本、缩短产品上市时间,并让测试系统能够适应未来各种挑战。

访问www.ni.com/datamanagement,了解更多信息。