

# 超高温极端环境下的超声测温技术研究进展

王高<sup>1</sup>, 梁海坚<sup>2\*</sup>, 魏艳龙<sup>3</sup>, 王欣辉<sup>3</sup>, 赵俭<sup>4</sup>, 李欣<sup>5</sup>

(1. 中北大学信息与通信工程学院, 山西太原 030051; 2. 中北大学软件学院, 山西太原 030051;  
3. 太原师范学院计算机科学与技术学院, 山西太原 030619; 4. 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 5. 中国航空工业集团公司北京长城航空测控技术研究所, 北京 101111)

**摘要:** 介绍了接触式超声导波测温技术、超声波内部温度梯度测温技术、对射式超声波测温技术的原理, 阐述了超声测温技术的研究现状以及超声测温技术在发动机燃烧室温度测试的应用案例和测试结果。分析了各项超声测温技术的技术特点和潜在问题, 指出研究抗高温氧化波导材料是超声导波测温技术发展的重中之重。提出可通过研发新材料、新工艺和新设备, 并不断迭代特征信号识别算法模型, 以扩大测温范围、提高测温精度, 为促进声学测温技术的进一步发展提供借鉴。

**关键词:** 超高温; 极端环境; 超声测温; 温度梯度

中图分类号: TB52; TB95

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2024) 05-0001-13

## Research progress of ultrasonic temperature measurement technology in ultra-high temperature extreme environments

WANG Gao<sup>1</sup>, LIANG Haijian<sup>2\*</sup>, WEI Yanlong<sup>3</sup>, WANG Xinhui<sup>3</sup>, ZHAO Jian<sup>4</sup>, LI Xin<sup>5</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. School of Software, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. College of Computer Science and Technology, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030619, China; 4. AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 5. AVIC Beijing Changcheng Aeronautic Measurement and Control Technology Research Institute, Beijing 101111, China)

**Abstract:** This paper introduces the principles of contact ultrasonic guided wave temperature measurement technology, ultrasonic internal temperature gradient temperature measurement technology, and cross-beam ultrasonic temperature measurement technology. It describes the research status of ultrasonic temperature measurement technology, and the application cases and test results of ultrasonic temperature measurement technology in engine combustion chamber temperature measurement. This review analyzes the technical characteristics and potential problems of various ultrasonic temperature measurement techniques. It is pointed out that the study of high temperature oxidation resistant waveguide materials is the top priority in the development of ultrasonic guided wave temperature measurement technology. It is proposed that the temperature measurement range can be extended and the temperature measurement accuracy can be im-

收稿日期: 2024-10-03; 修回日期: 2024-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(62106238, 62403440); 173基础加强项目(2020-ZD-XXX); 航空科学基金项目(202300340U0002); 山西省基础研究计划(自由探索类)项目(20210302124541, 202203021212185)

引用格式: 王高, 梁海坚, 魏艳龙, 等. 超高温极端环境下的超声测温技术研究进展[J]. 计测技术, 2024, 44(5): 1-13.

Citation: WANG G, LIANG H J, WEI Y L, et al. Research progress of ultrasonic temperature measurement technology in ultra-high temperature extreme environments[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(5): 1-13.



proved by developing new materials, new processes and new equipment, and constantly iterating the feature signal recognition algorithm model. This provides reference for further development of acoustic temperature measurement technology.

**Key words:** ultra-high temperature; extreme environments; ultrasonic temperature measurement; temperature gradient

## 0 引言

现代武器装备以实现快速打击、精准打击、智能打击为目标,这不仅对军事装备关键设备的性能提出了更高要求,还对其在极端环境工作时的测试技术提出了更高要求。例如,在超高声速飞行器飞行的过程中,飞行器鼻锥部分的空气受到强烈压缩和剧烈摩擦,导致大部分动能转化为热能,从而使飞行器鼻锥和机翼前缘气动加热现象异常,瞬间温度可达 $2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (及以上)。这种异常高温会破坏飞行器热防护系统,进而影响飞行器的轨迹、姿态、射程,甚至安全。因此,对超高声速飞行器表面温度进行准确、实时、稳定、可靠的测量尤为重要<sup>[1-3]</sup>。现代战斗机发动机向小涵道比、高推重比、高涡轮进口温度方向快速发展,发动机热端部件的工作温度不断升高,尤其是燃烧室中的燃气温度和燃气压力持续升高,涡轮进口温度已经达到甚至超过了 $2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。燃烧室作为航空发动机的核心部件,位于压气机和涡轮之间,其出口温度场直接影响涡轮的寿命和可靠性,是评估燃烧室的重要性能指标。燃烧室一旦发生恶化,极易在涡轮叶尖或叶根处产生局部高温区,导致叶片出现烧蚀、断裂等故障<sup>[4-7]</sup>。因此,在新一代发动机研发过程中,精确监测发动机燃烧室的温度至关重要。综上,长时间(超过 $0.5\text{ h}$ ),超高温(不低于 $2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ )温度场及分层温度的原位测试,是面向多种航空航天装备、科学研究需求的共性测试技术。

航空发动机燃烧室、固体发动机燃烧室、高超声速飞行器表面等超高温极端环境下的温度测试是亟待解决的关键问题。本文主要介绍超声导波测温技术、超声波测试内部温度梯度、对射式超声波测温技术的工作原理及研究进展,以及超声测温技术在航空航天发动机领域的测试应用,并对未来超声测温的具体研究方向进行分析。在此基础上,总结了超声导波测温、超声波测试内部温度梯度和对射式超声测温的优势及不足,为

促进声学测温技术进一步发展和完善奠定基础。

## 1 超声导波测试技术

早在17世纪,牛顿就推导出了声速与气流温度之间存在特定关系。1817年,在拉普拉斯的修订下,这一理论得到完善,拉普拉斯验证了声速与气流温度的平方根存在函数关系。20世纪60-70年代,随着核工业蓬勃发展,核电站核燃料堆芯 $2\,000\sim 3\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的超高温测试成为了技术难题,工程师应用超声导波测温技术以实现这种恶劣环境下的温度测试。

### 1.1 超声导波测试技术原理

超声波在固体中传播速度数学模型如式(1)所示<sup>[8]</sup>,超声波在固体介质中传播时,随着温度 $T$ 的逐渐升高,声速 $v$ 会逐渐减小,且二者有着较好的单值函数关系。

$$v(T) = \sqrt{\frac{E(T)}{\rho(T)}} \quad (1)$$

式中: $E$ 为固体材料的杨氏模量, $\rho$ 为固体材料的密度。

超声导波测温是通过测量不同温度环境下超声波在屈截内的传播时间,以屈截长度除以传播时间,获得超声波速度。超声导波测温方案如图1所示。

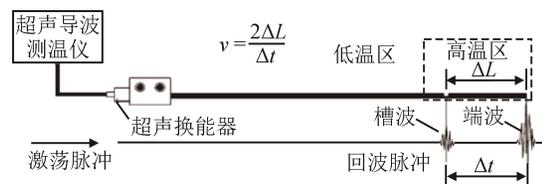


图1 超声导波测温方案<sup>[9]</sup>

Fig.1 Ultrasonic guided wave temperature measurement scheme<sup>[9]</sup>

图1中,经超声换能器激励超声信号,信号沿着波导传播到波导凹槽、端面,由于声阻抗不匹配,将产生回波信号,通过测量不同温度条件下凹槽波、端面波的传播时间,获得温度-特征时间对应关系曲线,如图2所示。

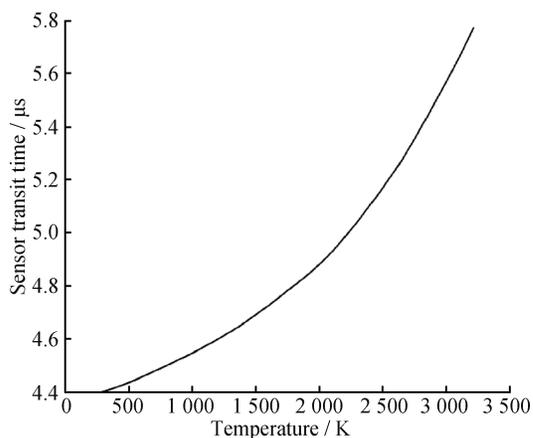


图2 温度-特征时间对应关系图<sup>[10]</sup>

Fig.2 Temperature-characteristic time mapping diagram<sup>[10]</sup>

### 1.2 超声导波测试技术研究现状

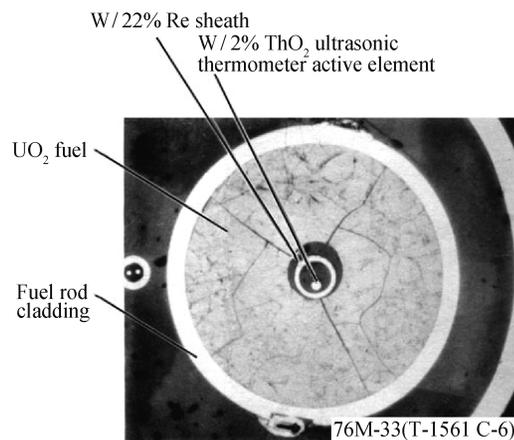
20世纪60-70年代, LYNNWORTH L C等人<sup>[11]</sup>利用超声导波技术, 在理想实验室条件下成功实现超过3 000 °C的温度测量, 并探讨了在核火箭发动机和快中子增殖反应堆等极端环境中的实际应用。

2010年, 美国能源部、欧盟联合研究中心、法国辐射防护与核安全研究所、法国计量与测试国家重点实验室联合开展了核燃料堆芯设计研究<sup>[10]</sup>, 该研究进行了大量的超声测温实验工作, 在熔融的氧化铀浴中用钨丝超声传感器测得温度达到3 133 K, 与预期值3 123 K基本吻合。图3(a)为插入到氧化铀浴中的钨丝超声传感器, 图3(b)为钨丝超声传感器测温方案。

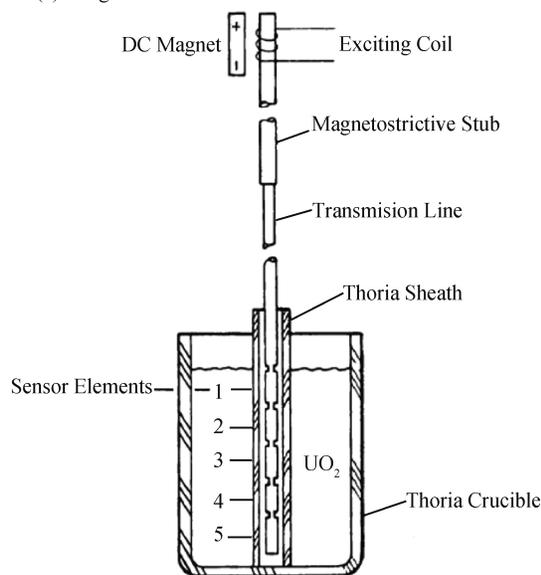
美国爱荷达国家实验室对超声高温传感器在核燃料堆芯温度测试方面做了深入研究, 相关实验在温度为2 200 °C的高温炉中进行, 测试数据显示出很好的重复性, 在1 400 ~ 2 000 °C误差不超过± 10 °C。

2024年, 爱达荷国家实验室开发了一种超声波温度计<sup>[12]</sup>, 能够在极高温环境下进行多点温度测量。该研究通过改进超声波温度计的所有组件, 包括磁致伸缩换能器和声波导材料等, 提高了其辐射耐受性和性能。其中, 磁致伸缩换能器中使用的螺线管线圈经过重新设计, 可以在更高频率下工作, 如图4所示。

国内清华大学孙崇正<sup>[13]</sup>介绍了超声导波测温技术, 并对铝液温度进行了接触式测量, 研究表明: 该方法可以测到接近材料熔点的高温, 在高



(a) 氧化铀浴中的钨丝超声传感器  
(a) Tungsten wire ultrasonic sensor in uranium oxide bath



(b) 钨丝超声传感器测温方案  
(b) Temperature measurement scheme of tungsten wire ultrasonic sensor

图3 反应堆钨直杆超声温度测试系统应用<sup>[10]</sup>

Fig.3 Application of ultrasonic temperature measuring system for tungsten straight rod in reactor<sup>[10]</sup>

温测量方面具有良好的应用前景。

中北大学王高教授团队<sup>[14]</sup>针对高温陶瓷超声导波开展研究, 使用氧化铝高温陶瓷作为声波导传感器, 在高温氧化环境中进行了实验验证, 确定了26 ~ 1 600 °C陶瓷材料的温度和延迟时间之间的关系。这项研究以高熔点的金属氧化物陶瓷作为波导传感器, 可在高温氧化环境中进行超声波温度测量, 并通过定制系统和传感器, 成功实现了在极端高温环境下的稳定温度监测。在前期研究基础上, 该团队进一步研发了一种兼具工作稳定性、抗氧化性、抗声衰减的单晶蓝宝石超声温度传感器<sup>[15]</sup>。该传感器利用具有良好的声传输

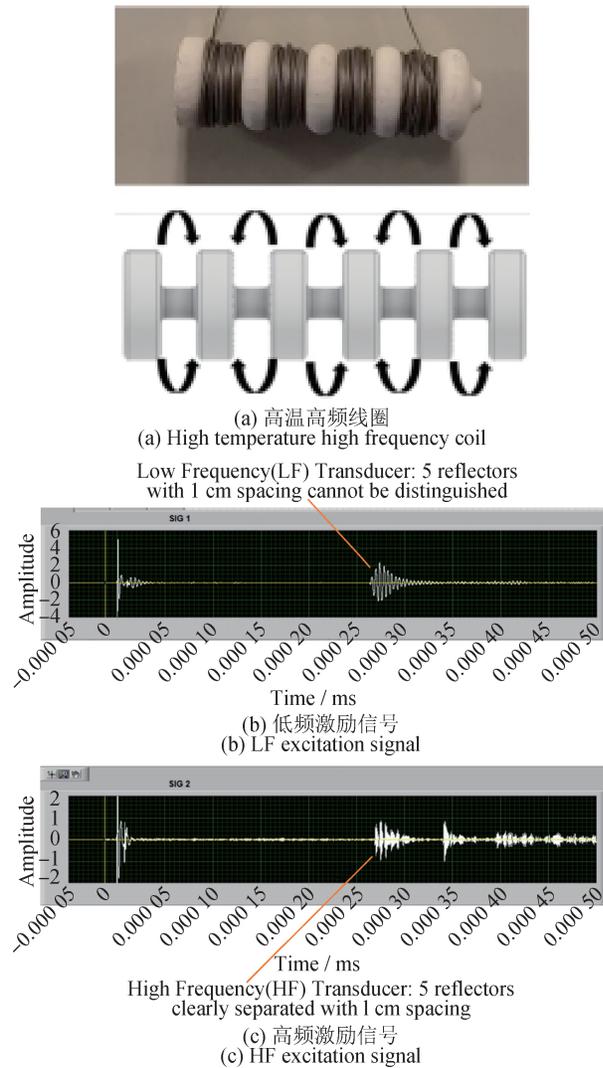


图4 磁致伸缩换能器的高温高频线圈与激励信号<sup>[12]</sup>  
Fig.4 High temperature high frequency coils and excitation signals for magnetostrictive transducers<sup>[12]</sup>

性能、高导热性的蓝宝石单晶( $Al_2O_3$ )作为超声波导体,在 $1\ 600\ ^\circ C$ 高温环境下有效工作了360 min,表现出优良的稳定性和可靠性,为超高温极端环境下快速响应温度测量提供了一种新的解决方案。另外,通过采用飞秒激光为蓝宝石光纤刻蚀凹槽,并将其作为波导介质,成功测得燃烧室出口峰值温度及径向上两点的温度-时间曲线。实验结果表明:燃烧室出口处高温燃气气流分布不均匀,温度分布呈现中心高、边缘低的近壁低温现象<sup>[16]</sup>。

2018年,该团队采用铱-铈合金作为声波导传感器材料<sup>[17-18]</sup>,在高温氧化环境中进行了初步测试,成功建立了 $1\ 600\sim 2\ 200\ ^\circ C$ 的理想校准曲线。经校准后,超声温度传感器实现了97%的测量重

复性,在模拟固体火箭发动机试车时进行了温度测试实验,该传感器检测到的峰值温度为 $1\ 765\ K$ ,如图5所示。这项研究为固体火箭发动机燃烧室内的温度监测提供了新的解决方案。

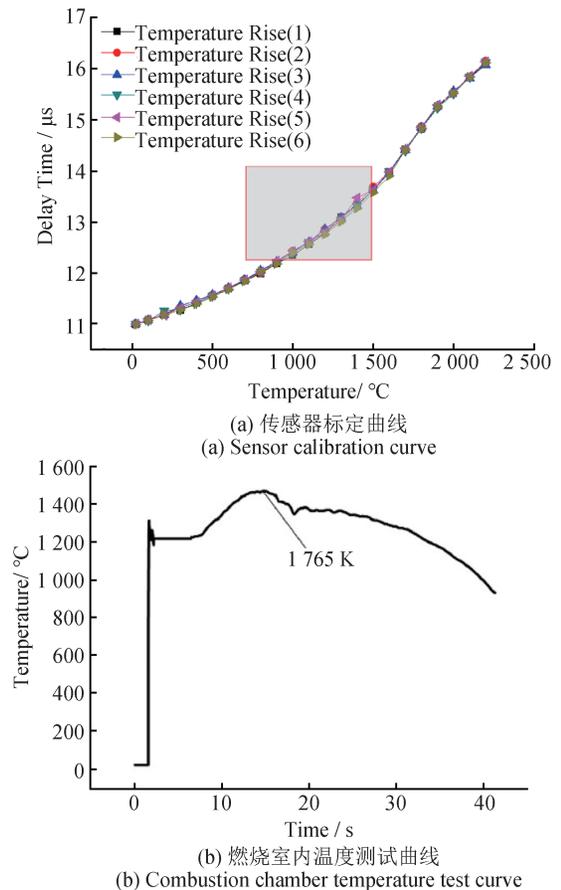
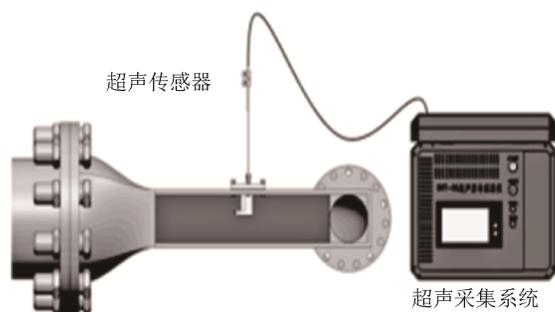


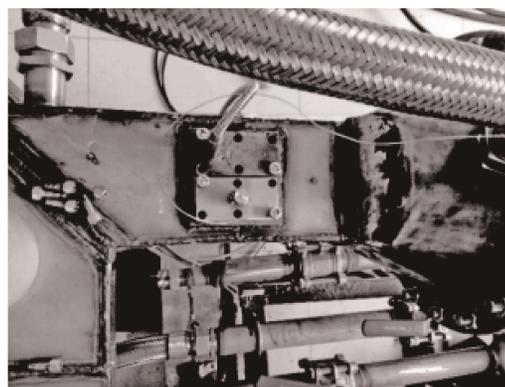
图5 传感器标定曲线与燃烧室内温度测试曲线<sup>[17-18]</sup>  
Fig.5 Sensor calibration curve and combustion chamber temperature test curve<sup>[17-18]</sup>

2019年,该团队开发了一套基于铱-铈合金的超声测温系统<sup>[9]</sup>,在 $1\ 600\ ^\circ C$ 环境下多次标定校准,并成功应用于模拟航空发动机燃烧室出口气流温度的测量试验,如图6所示。

同期,JOHN M等人<sup>[19]</sup>用Inconel 625合金作为导波材料,开发了空间分辨超声波测温技术,并利用该技术成功测量了大尺寸锅炉的燃烧区域的温度,解决了极端环境下长期热表征的挑战性问题。此外,超声导波测试技术也可应用于一些特殊结构的测量,SCHMIDT P L等人<sup>[20]</sup>利用声波在大口径火炮典型膛线结构中传播时的几何不连续性反射,测量了火炮内壁的温度。典型的大口径火炮膛线如图7所示。



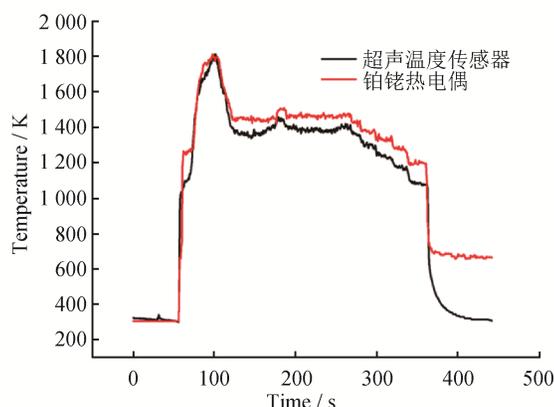
(a) 测温系统示意图  
(a) Temperature measurement system diagram



(b) 传感器安装位置实物图  
(b) Sensor installation position diagram



(c) 传感器与热电偶安装位置示意图  
(c) Sensor and thermocouple installation position diagram



(d) 测试结论  
(d) Test conclusion

图6 测温系统示意图及传感器安装位置及测试结论示意图<sup>[9]</sup>

Fig.6 Schematic diagram of temperature measuring system, sensor installation position and test conclusion<sup>[9]</sup>

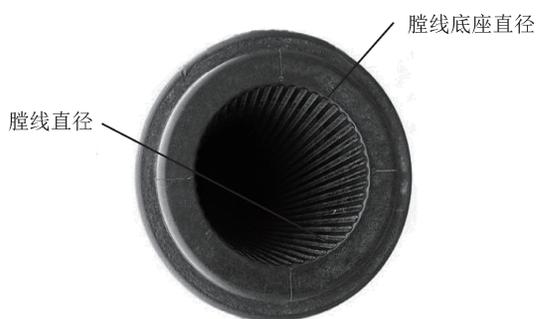


图7 典型的大口径火炮膛线<sup>[20]</sup>

Fig.7 Typical large-caliber gun rifling<sup>[20]</sup>

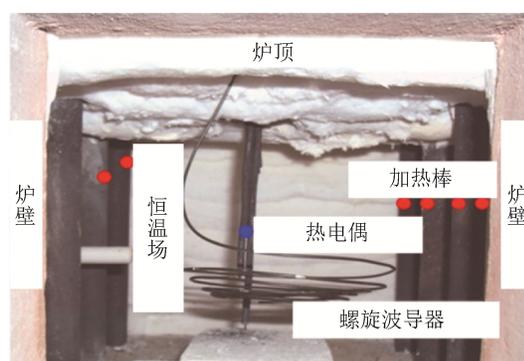


图8 螺旋波导系统实验装置<sup>[21]</sup>

Fig.8 Experimental device of spiral waveguide system<sup>[21]</sup>

PERIYANNAN S 等人<sup>[21]</sup>研究了一种超声螺旋波导温度传感器,如图8所示,能够在平面上进行多屈截分布式温度测量,为极端测试环境下的温度测量提供了新思路。

综上所述,超声导波测试技术目前主要应用于核燃料堆芯温度以及发动机燃烧室温度等原位测量,可实现单点或多点测量。然而,在超高温氧化极端环境下,声波导材料易被氧化、腐蚀,

进而影响声波延时的测量,因此,研究抗高温氧化波导材料成为了重中之重。超声换能器以及信号采集系统的优化对此技术的进一步应用具有重要意义,现阶段,超声换能的方式主要包括压电式和磁致伸缩式。压电式换能器激励超声波长短,适用于高频超声,优点是屈截小,测温精度高,但是波导与压电式换能器耦合效率较低,不适宜

长时间工作；磁致伸缩式换能器激励波长较长，屈截较大，波导温度分辨率低，但磁致伸缩式换能器与难熔金属焊接，可实现波导耦合，适用于长时间工作，更利于应用在工业测试中。

## 2 超声波测试内部温度梯度

在材料合成和制造中，需要对高温下加工材料的温度和瞬态变化进行测量，这些温度参数对最终产品的品质至关重要。在金属和聚合物铸造或成型工艺中，在线监测模具或模具内部的温度梯度是改进铸造工艺的必要手段，因为温度梯度与加工材料的温度状态密切相关。因此，开发一种有效在线测量内部温度分布的方法至关重要。目前，结构内部的温度测量主要采用内嵌传感器的接触式探测方式，但这种方式存在一定局限性，如打孔安装传感器易破坏结构的原有形态，并可能导致结构局部的温度变化或产生应力集中等问题。

### 2.1 超声波测试内部温度梯度原理

超声波测温技术可以实现对结构内部温度场的无损非接触探测。超声波换能器在结构的某一端面激发超声波至结构内部，如图9所示，通过监测来自另一端面反射波渡越时间的变化情况，实现内部温度分布的测量。

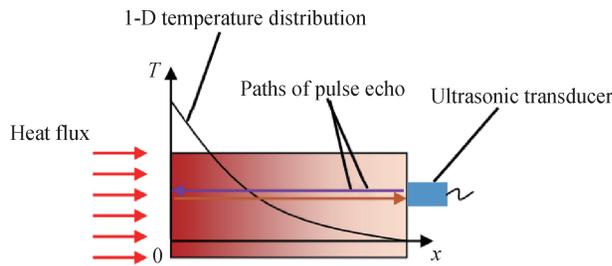


图9 超声固体测温示意图<sup>[22]</sup>

Fig.9 Schematic diagram of ultrasonic solid temperature measurement<sup>[22]</sup>

超声波在介质中的传播时间 $t_L$ 可表示为<sup>[23]</sup>

$$t_L = 2 \int_0^L \frac{1}{V(T)} dx \quad (2)$$

式中： $L$ 为超声波在介质中单向传播的距离（即被检测结构的厚度）； $x$ 为受热结构的温度分布方向； $T$ 为温度； $V$ 为介质中声波的传播速度，与材料性能和结构所受温度相关，通常可以表示为结构所

受温度的线性函数，即

$$V(T) = mT + n \quad (3)$$

式中： $m$ 、 $n$ 为常数。

基于超声波声速与温度的相关关系，采用超声波回波法可以准确获得超声波在固体介质的渡越时间。依据式(2)，计算超声波传播速度<sup>[22]</sup>；基于式(3)，利用超声波传播速度反演介质温度。

如式(4)所示，依据热传导方程，固体结构一端受到温度作用后，在一段时间后温度向结构另一端扩散，热传导结构内部的温度 $T$ 可以表示为位置 $x$ 和时间 $t$ 的函数， $T(x, t)$ 为待求的一维结构内部非均匀温度场分布状态。

$$\frac{\partial}{\partial x} [k(T) \frac{\partial T}{\partial x}] = \rho c_D \frac{\partial T}{\partial t}, x \in (0, L), t > 0 \quad (4)$$

式中： $\rho$ 为介质材料的密度， $c_D$ 为介质材料比热容。

### 2.2 超声波测试内部温度梯度研究现状

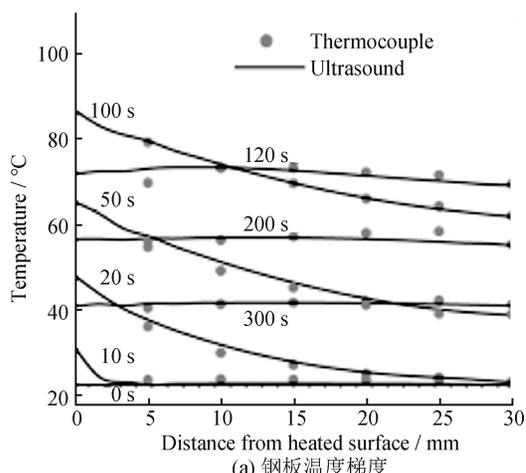
IHARA I等人<sup>[24]</sup>提出了一种用于材料加热或冷却过程中温度梯度监测的新方法。该方法结合超声脉冲回波测量和逆分析技术，以确定沿超声脉冲在材料内部或材料表面传播方向的一维温度分布。他们基于该方法研究了钢板和氧化铝的温度梯度，如图10所示。

JIA Y等人<sup>[25]</sup>提出了一种超声测量分段温度分布(Ultra Sound Measurements of Segmental Temperature Distribution, US-MSTD)的方法。该方法通过对每个分段的温度分布进行参数化分析，重建固体样品内的温度分布。实验结果表明：超声测量分段温度分布方法能够成功重建固体样品的轴向温度分布，如图11所示。

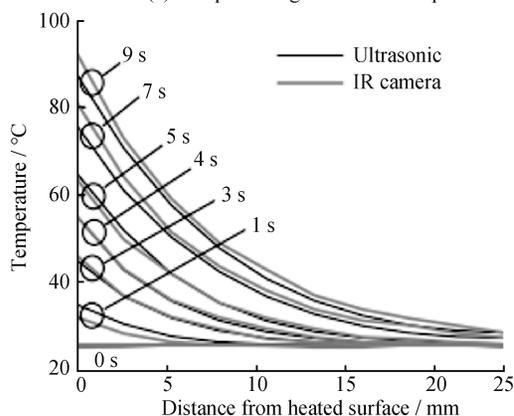
WEI D等人<sup>[26]</sup>分析了非均匀温度场中超声波传播路径的弯曲效应，并基于费马理论提出了一种二维声波传播路径预测方法。通过超声脉冲回波测量和热声耦合问题的逆分析，重建了二维表面和内部温度场，可高精度非破坏性地确定加热结构中表面和内部瞬态温度分布。

魏东等人<sup>[27]</sup>在灵敏度法的基础上，提出了一种新的反演加热材料内部温度分布的方法。通过热水加热钢板的实验，验证了该方法的可行性。

施超等人<sup>[28]</sup>针对内部温场的测试需求，设计了一套微秒级超声声时测量的超声测温系统，用于重建结构内部的温度场。通过温度-声速的标定



(a) 钢板温度梯度



(b) 氧化铝温度梯度

图 10 钢板和氧化铝的温度梯度<sup>[24]</sup>

Fig.10 Temperature gradient of steel plate and alumina<sup>[24]</sup>

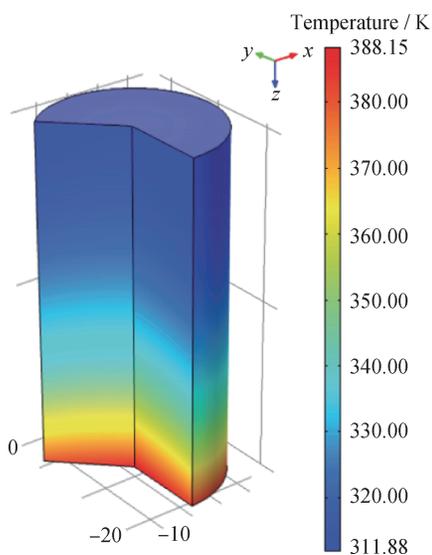


图 11 轴向温度分布<sup>[25]</sup>

Fig.11 Axial temperature distribution<sup>[25]</sup>

实验和一维稳态非均匀温度场的重建,显著提升了内部温度场的测温精度和可靠性。

石友安等人<sup>[29]</sup>基于多路超声探测方法,建立了超声测量二维固体结构内部温度分布的理论模型,如图 12 所示。基于射线声学,建立了二维声波传播路径预测方法。在此基础上,将二维温度场的重建问题转化为声波传播路径预测和热边界的反演问题,构建了一种高分辨力的结构内部二维非均匀温度场重建方法。

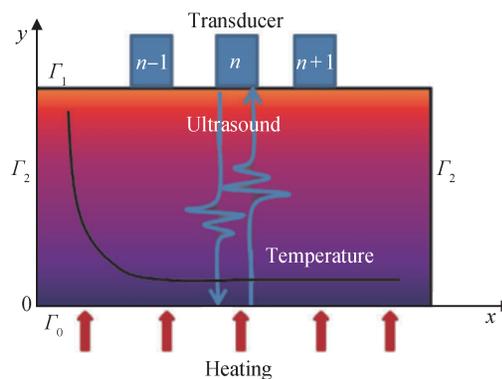


图 12 二维超声固体测温示意图<sup>[29]</sup>

Fig.12 Diagram of two-dimensional ultrasonic solid temperature measurement<sup>[29]</sup>

石文泽等人<sup>[30]</sup>通过三角形向展开法和弯曲效应,实现了高温铸锻件温度场的精确测量和重建。研究表明,斜入式横波相较直入式横波对温度梯度的变化更加敏感。同时,通过测量越渡时间和出射位置的偏移量,均可重建温场。

崔悦等人<sup>[31]</sup>针对高温结构内部温度场及厚度的多参数同步在线无损测量问题,提出了同步测温测厚实验方案。该研究建立了基于超声脉冲回波法的测温测厚理论模型,采用共轭梯度法和最速下降法相结合的交替迭代辨识方法,实现了固体结构内部温度场和厚度的同步测量。该方法为高温环境下同步测温测厚提供了一定的技术支撑。

综上,超声波测试内部温度梯度的方法,可用于高温部件内部温度的测量。该方法测温范围广,适用于高温氧化环境,可重建高温部件表面及内部的温度分布,在极端环境的温度测试中具有良好的应用前景。现阶段测试研究主要集中在 200 °C 范围内的原理和模型验证<sup>[32]</sup>,对于 2 000 ~ 3 000 °C 超高温领域的需求应用,仍需要进一步探索。

### 3 对射式超声波测温技术

随着经济的蓬勃发展, 电力需求呈几何倍数增加, 保障发电锅炉稳定运行是保证电力持续输出的关键。目前, 我国电站锅炉存在高温、湍流、变负荷等固有特性, 准确测量炉膛温度场一直是煤粉燃烧领域的重点和难点。传统热电偶接触式测温技术, 因其工作量大、实时性差、易损毁、成本高等局限性, 无法实现温度场信息的准确测量。而对射式超声测温技术凭借其测温范围广、精度高、速度快、可靠性高等特点, 被广泛应用于燃煤锅炉温度场测试。

#### 3.1 对射式超声波测温技术原理

非接触式测温技术基于超声波在气流介质中声波的传播速度  $c$  与该介质的温度  $T$ 、介质常量  $z$  之间的关系, 其具体函数关系为<sup>[33]</sup>

$$c = z\sqrt{T} \quad (5)$$

使用一组声波发射接收探头即可对单路径的温度进行测量<sup>[34]</sup>, 单路径对射式超声测温原理如图13所示。

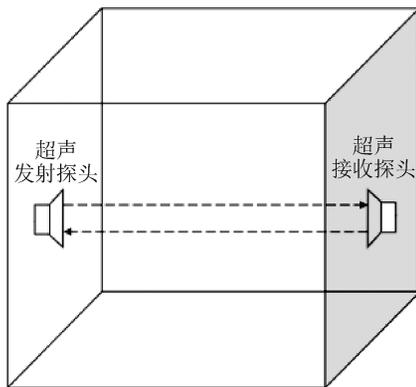


图13 单路径测温原理<sup>[34]</sup>

Fig.13 Principle of single path temperature measurement<sup>[34]</sup>

由于超声发射和接收传感器之间的距离以及被测介质的介质参数是已知的, 只需确定声波的渡越时间便可计算出该传播路径上的平均温度。通过测量声波从不同方向穿过被测区域的传播时间, 可以获取相应数据, 这些数据反映了声波在不同位置的传播速度, 间接表征出该区域的温度分布情况。

#### 3.2 对射式超声波测温技术研究现状

影响对射式超声波测温技术的因素较多, 例

如声波飞行时间的测量方案、声传感器的性能以及传感器之间的位置和距离、重建温场算法、信号衰减、噪声干扰、弯曲效应等<sup>[35]</sup>。其中, 最重要的是重建算法, 算法的优劣直接影响温场重建的质量和精度。常用的重建算法包括最小二乘法、代数重建算法 (Algebraic Reconstruction Technique, ART) 和同步迭代代数重构算法 (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique, SIRT)<sup>[36]</sup>。这些算法通过对数据进行处理和分析, 可以有效推算出整个区域的温度分布。

赵俭等人<sup>[37]</sup>通过对比单一频率信号及宽带频率信号发现, 宽带频率信号具有较强的抗噪能力, 在计算声波渡越时间时, 其不受声波信号周期、信号延时时间等因素的限制, 从而提高了对射式超声测温的测量精度。

针对最小二乘法因插值范围有限而无法得到全部温度值的问题, JIA R X 等人<sup>[38]</sup>提出了一种基于径向基函数近似和奇异值分解的二维温度场重构方法。与传统最小二乘法相比, 该方法能够更好地反映温度场分布信息, 具有较高的重建精度。

REN S Y 等人<sup>[39]</sup>提出了一个新的超声测量温度分布系统, 该系统结合了数据采集卡和单片微型计算机, 在硬件层次缓解了惯性延迟现象。基于径向基函数方法和 Tikhonov 正则化技术框架, 提出了一个分为2个阶段的重建方法, 减轻了逆运算的病态性, 重建的温度分布与传热原理吻合较好。

KONG Q 等人<sup>[40]</sup>提出了一种基于径向基函数逼近和多项式重构的新型温度场重建模型, 该模型考虑了非均匀温度场中声波路径的折射效应, 通过使用截断奇异值分解重建方法, 改善了重建质量和抗噪性能, 并引入广义互相关和二次相关方法估计声波越渡时间, 有效抑制噪声干扰。研究表明: 该方案具有更高的重建精度和较强的抗噪声能力。

ZHOU X Z 等人<sup>[41]</sup>提出了基于反射S形径向基函数和正交三角分解的温度场重构算法。模拟实验结果表明, 与常用的温度场重建算法相比, 采用该算法得到的重构结果平均提高了2.03%, 温度场边缘的重构准确性提高了1.88%。该算法解决了传统声学测温算法在温度场边缘信息丢失的

问题，并实现了基于温度场信息平滑近似的高精度温度场重构。

针对重建温度场中出现的噪点问题，颜华等人<sup>[42]</sup>提出了改进的SIRT算法，并将平滑滤波器融入其中。通过设计专门的内、外平滑滤波器，成功抑制了重建温度场中的噪点，提高了复杂温度场的重建能力。

姚鹏搏等人<sup>[43]</sup>提出了一种基于塔克分解和声学测温的三维温度分布重建算法。该方法通过计算温度分布数据构建经验数据集，对数据集进行塔克分解提取温度场的主要特征，结合声学测温 and 二维温度场插值技术，实现了三维温度场的重建。研究结果显示，这一算法能够在短时间内重建复杂的三维温度场，且相较于传统声学测温方法，重建误差降低了10%以上。

孟睿等人<sup>[44]</sup>研制出一种基于均匀圆环温度传感器阵列的对射式超声波温度场检测系统。该系统实现了1200℃的气体温度测量，测量准确度可达97.98%，为超高温气体温度测量提供了新的解决方案。

2013年，西门子能源公司开发了一种燃气轮机排气温度测量系统<sup>[45]</sup>，该系统应用于燃气轮机引擎排气的测试，使用含有8组发射器和接收器的对射式超声测温系统，如图14所示。通过传感器测量结果的交叉相关分析，获取了平面中气体等温线的地形图，对射式超声测温系统的稳态测量结果与测量的排气热电偶数据相差不到10℃。

OTERO R等人<sup>[46]</sup>收集了马赫数为0.48和0.72的喷流条件下(总温度为675 K)3个方位角的声波数据，使用乘法代数重构算法重建了喷气式飞机喷射口附近的温度场。这是声学方法首次应用于高亚音速马赫数条件下并且同时测量发动机喷流速度和静态温度分布，如图15所示。

综上所述，对射式超声测温技术属于非接触式测温，具有测温范围广、受极端环境影响小等特点，能够实现多维度重建发动机燃烧室内部温度分布以及发动机尾部火焰温度。目前，实验和分析主要集中于低温低流速环境<sup>[47]</sup>。在高温高流速环境下进行实验并不断改进，对于对射式超声测温技术在高温极端环境下的应用有重要意义。

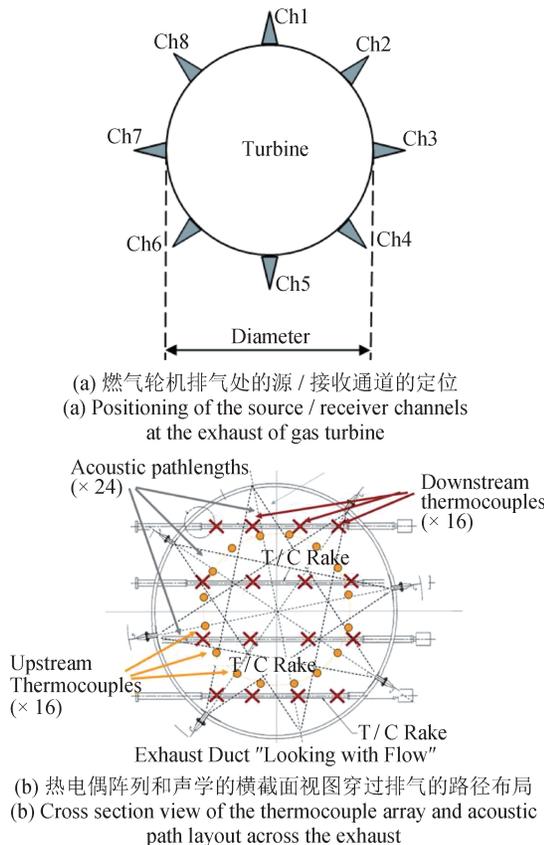


图14 对射式超声测温示意图<sup>[45]</sup>  
Fig.14 Schematic diagram of cross-beam ultrasonic temperature measurement<sup>[45]</sup>

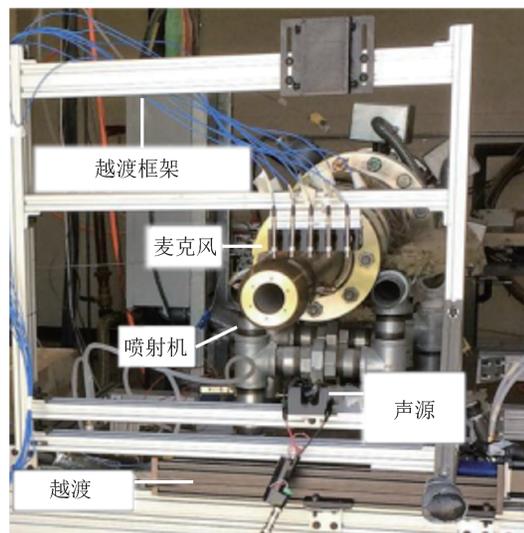


图15 声波装置位置<sup>[46]</sup>  
Fig.15 Location of the sonic device<sup>[46]</sup>

#### 4 总结与展望

随着航空航天技术的发展，高推重比、超音速已成为现代飞行器的基本特性。现有超声导

波测温技术在发动机燃烧室测温的应用中表现良好。未来,针对发动机燃烧室、超高音速飞行器表面等飞行器热端部件在超高温极端环境下的测温需求,可进一步尝试新的耐高温、抗氧化、耐腐蚀材料作为导波介质。现阶段对于超声波测试内部温度梯度的技术,重建温度一般在200℃以下,其原理模型、重建算法验证已有一定的基础,而2000℃高温环境下的内部温度梯度测试技术鲜有报道。因此,针对高温需求开发适用的传感器及硬件系统成为重要研究方向之一。

对射式超声测温技术属于非接触测温,不与被测物直接接触,具有测温范围广、受极端环境的影响小的特点。尽管其重建算法的研究报道较多,但主要集中于实验室环境、静态发电锅炉环境的测温研究,温度环境偏低。对于航空发动机燃烧室、固体火箭发动机喷口等高温、高压、高流速应用环境下的研究,还处于原理型探索阶段。超高温极端环境温度测试技术要取得重大突破,需要基于新材料、新工艺和新设备,并不断迭代特征信号识别算法模型。

### 参考文献

- [1] 孟松鹤,丁小恒,易法军,等. 高超声速飞行器表面测热技术综述[J]. 航空学报, 2014, 35(7): 1759-1775.  
MENG S H, DING X H, YI F J, et al. Overview of heat measurement technology for hypersonic vehicle surfaces [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(7): 1759-1775. (in Chinese)
- [2] 谢永旺,夏雨,许学伟,等. 航天飞行器热防护系统研究概况及其发展趋势[J]. 空天技术, 2022(4): 73-86.  
XIE Y W, XIA Y, XU X W, et al. Research status of thermal protection system for spacecraft and its development trend [J]. Aerospace Technology, 2022(4): 73-86. (in Chinese)
- [3] 王晓晖,王智勇,宫文然,等. 高速飞行器热结构力热参数先进测试技术概述[J]. 强度与环境, 2023, 50(6): 97-107.  
WANG X H, WANG Z Y, GONG W R, et al. Overview of advanced testing technologies for mechanical and thermal parameters of thermal structure in high speed aircraft [J]. Structure & Environment Engineering, 2023, 50(6): 97-107. (in Chinese)
- [4] 邓进军,李凯,王云龙,等. 航空发动机内壁高温测试技术[J]. 微纳电子技术, 2015, 52(3): 178-184.  
DENG J J, LI K, WANG Y L, et al. High temperature measurement technology of aero-engine internal surface [J]. Micronanoelectronic Technology, 2015, 52(3): 178-184. (in Chinese)
- [5] 徐毅,黄明镜,程新琦,等. 航空发动机涡轮叶片涂层热电偶测温技术[J]. 航空发动机, 2021, 47(1): 91-95.  
XU Y, HUANG M J, CHENG X Q, et al. Coating thermocouple measurement technique of aeroengine turbine blade temperature [J]. Aeroengine, 2021, 47(1): 91-95. (in Chinese)
- [6] 胡娜,赵伟,晋小超,等. 航空发动机涡轮叶片接触式测温技术应用进展[J]. 航空工程进展, 2023, 14(1): 1-12.  
HU N, ZHAO W, JIN X C, et al. Advances in application of contact temperature measurement technology for aero-engine blade [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(1): 1-12. (in Chinese)
- [7] 王燕山,董祥明,刘伟,等. 航空发动机高温测试技术的研究进展[J]. 测控技术, 2017, 36(9): 1-6.  
WANG Y S, DONG X M, LIU W, et al. Research on developments of high temperature testing technology for aero-engine [J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(9): 1-6. (in Chinese)
- [8] 田苗,王高,刘争光,等. 超声脉冲测温技术初步研究[J]. 声学技术, 2017, 36(1): 27-31.  
TIAN M, WANG G, LIU Z G, et al. A preliminary study of pulse - echo ultrasonic thermometry [J]. Technical Acoustics, 2017, 36(1): 27-31. (in Chinese)
- [9] 许琳,王高,吕国义,等. 超声测温技术在模拟航空发动机燃烧室温度测量中的应用[J]. 测试技术学报, 2019, 33(2): 178-184.  
XU L, WANG G, LYU G Y, et al. Ultrasonic temperature measurement technology for simulated aero-engine combustion chambers [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2019, 33(2): 178-184. (in Chinese)
- [10] LAURIE M, MAGALLON D, REMPE J, et al. Ultrasonic high - temperature sensors: past experiments and prospects for future use [J]. International Journal of Thermophysics, 2010, 31(8): 1417-1427.

- [11] LYNNWORTH L C, CARNEVALE E H, MCDONOUGH M S, et al. Ultrasonic thermometry for nuclear reactors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1969, 16 (1): 184-187.
- [12] DAW J, ZHONG B. Development of INL ultrasonic thermometer[R]. United States, 2024.
- [13] 孙崇正. 超声波测温技术进展[J]. *宇航计测技术*, 1995(2): 34-42.
- SUN C Z. Progress of ultrasonic thermometry[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 1995 (2) : 34-42. (in Chinese)
- [14] WEI Y L, GAO Y, XIAO Z, et al. Ultrasonic  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic thermometry in high-temperature oxidation environment [J]. *Sensors*, 2016, 16 (11). DOI: 10.3390/s16111905.
- [15] LIANG H J, YANG F B, YANG L, et al. Research and implementation of a 1 800 °C sapphire ultrasonic thermometer[J]. *Sensors*, 2017, 7. DOI: 10.1155/2017/9710763.
- [16] 王棒, 李亦军, 王高, 等. 发动机燃烧室出口温度分布测试的新型传感器[J]. *中国测试*, 2019, 45(8) : 112-117.
- WANG B, LI Y J, WANG G, et al. A new type sensor for measuring the temperature distribution of engine combustion chamber outlet [J]. *China Measurement & Test*, 2019, 45(8): 112-117. (in Chinese)
- [17] WEI Y L, WANG G, GAO Y B, et al. A measurement system of high-temperature oxidation environment with ultrasonic  $\text{Ir}_{0.6}\text{Rth}_{0.4}$  alloy thermometry [J]. *Ultrasonics*, 2018, 89: 102-109.
- [18] WEI Y L, LIANG H J, WANG G, et al. Ultrasonic thermometric measurement system for solid rocket combustion chambers[J]. *Ultrasonics*, 2021, 113. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106361.
- [19] JOHN M, WALTON K, KINDER D, et al. Ultrasonic measurement of temperature distributions in extreme environments: electrical power plants testing in utility-scale steam generators[J]. *Ultrasonics*, 2024, 138. DOI: 10.1016/j.ultras.2023.107205.
- [20] SCHMIDT P L, WALKER D G, YUHAS D J, et al. Thermal measurements using ultrasonic acoustical pyrometry [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(4): 1029-1036.
- [21] PERIYANNAN S, RAJAGOPAL P, BALASUBRAMANIAM K. Multiple temperature sensors embedded in an ultrasonic "spiral-like" waveguide [J]. *AIP Advances*, 2017, 7(3). DOI: 10.1063/1.4977965.
- [22] 施超, 胡斌, 梁晓瑜. 固体结构内部温度的超声测量 [J]. *中国计量大学学报*, 2016, 27(4): 355-365.
- SHI C, HU B, LIANG X Y. Ultrasound measurement of the internal temperature of solid structures [J]. *Journal of China Jiliang University*, 2016, 27 (4) : 355-365. (in Chinese)
- [23] TAKAHASHI M, IHARA I. Ultrasonic sensing of internal temperature distributions in heated materials [C]// *SICE-ICASE International Joint Conference*, 2006: 1071-1074.
- [24] IHARA I, YAMADA H, KOSUGI A, et al. New ultrasonic thermometry and its applications to temperature profiling of heated materials [C]// *Fifth International Conference on Sensing Technology*, 2011, 6137054: 60-65.
- [25] JIA Y, SKLIAR M. Noninvasive ultrasound measurements of temperature distribution and heat fluxes in solids [J]. *Energy Fuels*, 2016, 30(5): 4363-4371.
- [26] WEI D, YANG X F, SHI Y A, et al. A method for reconstructing two-dimensional surface and internal temperature distributions in structures by ultrasonic measurements [J]. *Renewable Energy*, 2020, 150: 1108-1117.
- [27] 魏东, 石友安, 杜雁霞, 等. 结构内部非均匀温度场的重建方法研究 [J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(5) : 1055-1060.
- WEI D, SHI Y A, DU Y X, et al. Reconstructions of internal non-uniform temperature distributions in solid structures [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(5): 1055-1060. (in Chinese)
- [28] 施超, 胡斌, 梁晓瑜. 基于超声波的结构内部温度场重建方法研究 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(12) : 44-51.
- SHI C, HU B, LIANG X Y, et al. Reconstruction of internal temperature distribution in solidstructure by ultrasound thermometry [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(12): 44-51. (in Chinese)
- [29] 石友安, 魏东, 曾磊, 等. 超声固体测温中的二维温度场重建算法研究 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49

- (5): 518-530.
- SHI Y A, WEI D, ZENG L, et al. Research on reconstruction method for two-dimensional temperature field in solid using ultrasound [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2019, 49(5): 518-530. (in Chinese)
- [30] 石文泽, 童艳山, 卢超, 等. 高温铸锻件内部温度场电磁超声重构方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 41(8): 218-229.
- SHI W Z, TONG Y S, LU C, et al. An electromagnetic ultrasonic reconstruction method for internal temperature field of high temperature casting and forging [J]. *Instrumentation*, 2021, 41(8): 218-229. (in Chinese)
- [31] 崔悦, 魏东, 朱丽艳, 等. 高温固体结构内部动态温度场及其厚度的超声同步测量实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(10): 2826-2833.
- CUI Y, WEI D, ZHU L Y, et al. Experimental study on ultrasonic synchronous measurement of temperature field and thickness in structure [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(10): 2826-2833. (in Chinese)
- [32] 杨永军. 温度测量技术现状和发展概述[J]. *计测技术*, 2009, 29(4): 62-65.
- YANG Y J. Current status and development of temperature measurement technology [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2009, 29(4): 62-65. (in Chinese)
- [33] 颜华, 崔柯鑫, 续颖. 基于少量声波飞行时间数据的温度场重建[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(2): 470-475.
- YAN H, CUI K X, XU Y. Temperature field reconstruction based on a few sound travel-time data [J]. *Instrumentation*, 2010, 31(2): 470-475. (in Chinese)
- [34] 李强. 基于声层析技术的超声测温系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- LI Q. Research on ultrasonic temperature measurement system based on acoustic tomography [D]. Taiyuan: North University of China, 2022. (in Chinese)
- [35] 常蕾, 赵俭. 超声波测温技术在高温气流温场测量中的应用[J]. *计测技术*, 2014, 34(1): 1-4.
- CHANG L, ZHAO J. Application of ultrasonic thermometry in measuring temperature field of high-temperature gas flow [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2014, 34(1): 1-4. (in Chinese)
- [36] 魏元焜. 基于压缩感知理论的声层析成像温度场重建研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- WEI Y K. Research on temperature field reconstruction of acoustictomography based on compressed sensing theory [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [37] 赵俭, 常蕾. 基于声学法测温的声波飞渡时间研究[J]. *计测技术*, 2013, 33(6): 31-34.
- ZHAO J, CHANG L. Study of acoustic travel-time based on acoustic temperature measurement method [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2013, 33(6): 31-34. (in Chinese)
- [38] JIA R X, XIONG Q Y, XU G Y, et al. A method for two-dimensional temperature field distribution reconstruction [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 111: 961-967.
- [39] REN S Y, LEI J, JIA Z P. Reconstruction method for temperature field measurement using ultrasonic tomography [J]. *Chemical Engineering Science*, 2018, 183: 177-189.
- [40] KONG Q, JIANG G S, LIU Y C, et al. Numerical and experimental study on temperature field reconstruction based on acoustic tomography [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 170. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114720.
- [41] ZHOU X Z, DONG C L, ZHAO C P, et al. Temperature-field reconstruction algorithm based on reflected sigmoidal radial basis function and QR decomposition [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 171. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.114987.
- [42] 颜华, 孙灿烽, 王伊凡. 基于改进SIRT算法的声学CT温度场重建[J]. *沈阳工业大学学报*, 2021, 43(5): 550-556.
- YAN H, SUN C F, WANG Y F. Temperature field reconstruction of acoustic CT based on improved SIRT algorithm [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2021, 43(5): 550-556. (in Chinese)
- [43] 姚鹏搏, 孙铭阳, 王元, 等. 基于塔克分解和声学测温的三维温度场重建[J]. *动力工程学报*, 2024, 44(4): 557-565.
- YAO P B, SUN M Y, WANG Y, et al. Three-dimensional temperature field reconstruction based on tucker decomposition and acoustic thermometry [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2024, 44(4): 557-565. (in Chinese)
- [44] 孟睿, 杨录, 刘康驰, 等. 超声穿透式测温传感器设计与系统实验研究[J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(7):

77-81.

MENG R, YANG L, LIU K C, et al. Design and systematic experimental study of ultrasonic penetrating temperature measurement sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 44(4): 557-565. (in Chinese)

[45] DESILVA U, BUNCE R, CLAUSSEN H, et al. Novel gas turbine exhaust temperature measurement system [C]// *ASME Turbo Expo*, 2013.

[46] OTERO R, LOWE K T, NG W F, et al. Coupled velocity and temperature acoustic tomography in heated high subsonic Mach number flows [J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(10). DOI: 10.1088/1361-6501/ab24a3.

[47] 赵义黎, 赵俭. 声学测温研究现状及发展总结[J]. *计测技术*, 2021, 41(6): 7-16.

ZHAO Y J, ZHAO J. Current research status and development review of acoustic thermometry [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2021, 41(6): 7-16. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩, 孟薇)



**第一作者:** 王高(1973—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为爆炸毁伤评估。中国兵工学会、光学学会会员, 中国计量测试学会温度专业委员会、中国指挥与控制学会火力与指挥控制专业委员会委员。主持国家自然科学基金、“973”基础重大项目专题、“173”基础重大项目专题、装发预研、总装基础预研, 山西省留学基金和多项横向科研项目。国家自然科学基金、科技部重大项目、博士后基金评审专家。《兵器材料科学与工程》、《火力指挥与控制》期刊编委。获山西省科技进步奖3项, 主编教材6部, 获国家发明专利25项, 发表文章200余篇。



**通信作者:** 梁海坚(1992—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为超声温度传感器设计及测试、特种温度传感器及恶劣环境测试技术研究、爆炸毁伤评估和弹药安全性测试。

中国兵工学会、光学学会会员。主持国家自然科学基金、航空科学基金、山西省基础研究计划和多项横向科研项目, 发表论文20余篇, SCI收录10余篇。