

基于声学定位技术的防火封堵材料密封性能检测

王新钢*

(应急管理部四川消防研究所, 成都 610036)

摘要: 防火封堵材料在现代建筑中具有重要作用, 特别是在减少火灾蔓延和烟气扩散方面。随着城市化进程的加速, 防火封堵材料的需求不断增长。新标准 GB 23864—2023《防火封堵材料》新增了“气密性”的测试, 这对材料的密封性能提出了更高要求。目前, 传统的检测方法在实际检测和施工中存在诸多不足。本文旨在研究声学定位技术在防火封堵材料密封性检测中的应用, 通过对比分析声学定位技术与传统检测方法的优劣, 为防火封堵材料的密封性检测提供科学依据。研究表明, 声学定位技术具有高精度检测、实时监控、耐火性能评估和环境适应性强等显著优势。未来的研究将进一步优化声学定位技术, 提高其在复杂环境下的检测精度和稳定性, 为建筑防火安全提供更强有力的技术支持。

关键词: 声学定位技术; 防火封堵材料; 密封性能检测

0 引言

防火封堵材料是指具有防火、防烟功能, 用于密封或填塞建筑物、构筑物以及各类设施中的贯穿孔洞、环形缝隙及建筑缝隙, 便于更换且符合有关性能要求的材料, 是现代建筑中不可缺少的重要部分, 在建筑防火、减少火灾时火情蔓延、烟气扩散方面具有重要作用^[1]。随着城市化进程的加速, 各类建筑工程不断涌现, 建筑规模持续扩大。大型商业综合体、高层住宅、工业厂房等建筑对防火安全的要求日益提高, 这使得防火封堵材料的需求不断增长。例如, 在高层建筑中, 电缆井、管道井等部位需要使用防火封堵材料来防止火灾的蔓延。新标准 GB 23864—2023《防火封堵材料》^[2]已经发布实施, 与原标准 GB 23864—2009《防火封堵材料》^[3]相比, 标准增加了“气密性”的测试, 规定了“重要公共建筑用防火封堵材料、防火封堵组件的气密性不应大于 $3.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ”。火灾时烟气的扩散性是造成火灾伤亡的一大因素, 良好的气密性可以有效减少烟气的扩散, 防火封堵材料其本身的气密性也就是密封性, 对建筑整体的气密性有重大影响。提高材料本身的气密性, 可有效减少烟气在孔洞、缝隙处的扩散、传播, 降低了烟气的危害范围^[4]。目前的防火封堵材料的密封性在实际检测和施工中还存在一些不足, 如实际检测是采用 GB/T 7106—2019《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能检测方法》^[5], 该标准主要针对门窗检验, 而

针对防火封堵材料的气密性有一定难度; 在实际施工中, 开关柜电缆仓、电缆沟等空间有限, 防火封堵材料本身的施工质量容易受到环境的影响, 水密性试验、烟雾试验这些传统检测方法在实际工程应用中都存在检测不便或无法检测的缺点, 使得防火封堵材料的密封性难以及时检测, 这些都制约了防火封堵材料密封性的提高。因此, 需要将新型检测技术纳入实际检测和工程验收范围, 运用科技手段保障防火封堵材料的密封性。本文旨在研究声学定位技术在防火封堵材料密封性检测中的应用, 通过对比分析声学定位技术与传统检测方法的优劣, 为防火封堵材料的密封性检测提供科学依据。具体研究内容包括声学定位技术的原理、检测系统的组成、在防火封堵材料检测中的应用、检测结果的分析及应用前景。本文希望通过引入新型检测技术, 提高防火封堵材料的密封性检测精度和效率, 为建筑防火安全提供更强有力的技术支持。

1 声学定位技术在密封性检测的应用

1.1 声学定位技术检测方法的原理

声学定位技术在气密性测试中具有独特的优势。其检测原理是通过分析由气体泄漏产生的声波/超声波能量, 利用波束形成技术和空间相位差异确认声源位置, 能够精确地定位到泄漏点, 即使是微小的泄漏也能被检测出来^[6]。声学定位技术通过发射特定频率的声波, 利用声波

基金项目: 应急管理部四川消防研究所基本科研业务费项目(20248807Z 基于声学定位技术的防火封堵材料密封性能检测及应用)。

* 通信作者: 王新钢, 硕士, 副研究员, 研究方向为阻燃防火材料检验。E-mail: hawk96992@qq.com

在不同介质中的传播速度和反射特性，对防火封堵材料进行密封性能检测。当声波遇到密封良好的防火封堵材料时，会按照特定的路径传播并被接收设备接收。如果防火封堵材料存在密封缺陷，声波的传播路径会发生改变，反射波的特征也会有所不同。通过对接收的声波信号进行分析处理，可以准确地判断防火封堵材料的密封性能。具体的检测步骤包括设备安装调试、声波发射与接收、信号处理与分析等。首先，将声学定位检测设备安装在待检测区域附近，根据防火封堵材料的类型和结构特点，调整设备的参数。然后，发射声波并接收反射波，将接收到的信号传输到计算机进行处理。通过专业的软件分析声波信号的

特征，如传播时间、幅度、频率等，判断密封区域是否存在泄漏点^[7]。

1.2 声学定位技术检测系统的组成

声学定位技术检测系统主要包括声发射和声成像装置，材料或结构件受外力或内力作用产生变形或断裂，以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射。声成像装置是基于传声器阵列测量技术，通过测量一定空间内的声波到达各传声器的信号相位差异，依据相控阵原理确定声源的位置，测量声源的幅值，并以图像的方式显示声源在空间的分布，即取得空间声场分布云图——声像图，其中以图像的颜色和亮度代表声音的强弱^[8]，具体参见图1。

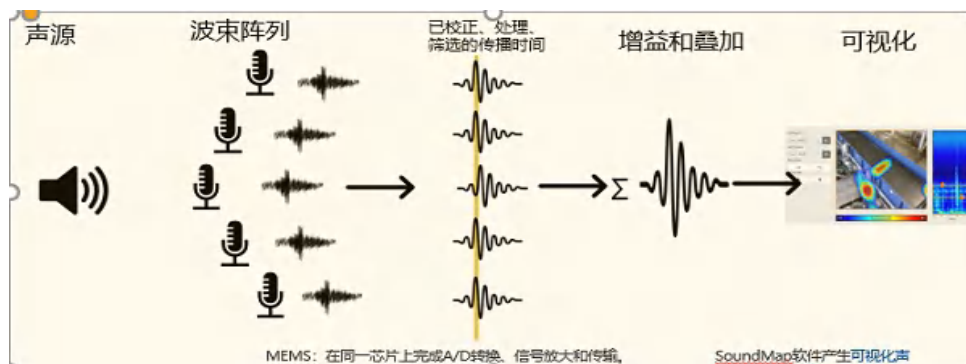


图1 声学定位技术检测系统的流程示意图

2 防火封堵材料检测

2.1 检测防火封堵材料的缺陷和松动

(1) 裂缝检测：防火封堵材料因长期使用可能会出现裂缝，这些裂缝会降低防火封堵的效果，为火灾蔓延留下隐患^[9]。声学成像技术可以检测到材料内部微小裂缝产生的声波信号。当声波在穿过防火封堵材料时，遇到裂缝会发生折射、反射和散射等现象，导致声波的传播路径和强度发生变化。声学成像系统通过接收这些变化的声波信号，并进行分析处理，能够以图像的形式呈现出裂缝的位置、大小和形状等信息，帮助检测人员快速准确地定位裂缝。

(2) 松动部位检测：由于施工质量、电缆运行振动等原因，防火封堵材料与电缆或周围结构之间可能会出现松动^[10]。松动部位在电缆运行或受到外界振动时会产生摩擦或碰撞声，这些声音信号可以被声学成像系统捕捉到。通过对声音信号的分析 and 成像处理，能够确定松动部位的位置和范围，以便及时进行修复和加固。

2.2 评估封堵结构的完整性

(1) 整体结构成像：声学成像技术可以对整个电缆防火封堵结构进行成像，直观地展示防火封堵材料在电缆周围的分布情况和封堵的密实程度。通过图像可以清晰地看到防火封堵材料是否均匀分布，是否存在空缺或薄弱区域。

例如，在电缆沟道的防火封堵检测中，声学成像系统可以生成电缆沟道内封堵结构的三维图像，检测人员可以从不同角度观察封堵结构的完整性。

(2) 界面结合情况检测：防火封堵材料与电缆、电缆桥架、墙壁等界面的结合情况对防火效果至关重要。如果界面结合不紧密，在火灾发生时，火焰和烟雾容易通过界面缝隙蔓延。声学成像技术可以检测界面处的声波反射和透射情况，根据声波信号的变化来评估界面的结合紧密程度。对于结合不良的界面，在声学成像图像上会显示出明显的异常区域，为检测人员提供准确的修复信息。

2.3 监测防火封堵的施工过程

(1) 施工质量实时监控：在电力电缆防火封堵的施工过程中，声学成像技术可以实时监控防火封堵材料的填充情况和施工质量。施工人员可以根据声学成像图像及时发现防火封堵材料的不均匀填充、漏填等问题，并进行现场调整和改进，确保施工质量符合要求^[11]。例如，在防火封堵材料的浇筑过程中，声学成像系统可以实时监测材料的流动和填充情况，避免出现空洞或不密实的区域。

(2) 施工工艺优化：通过对施工过程中的声学成像数据进行分析 and 总结，了解不同施工工艺对防火封堵效果的影响，从而优化施工工艺。例如，通过分析声波在不同防火封堵材料和施工方法下的传播特性，可以确定最佳的防

火封堵材料填充方式和压实程度，提高防火封堵的施工效率和质量。

2.4 评估防火封堵材料耐火性能指标

(1)温度变化与声学信号：在耐火试验中，防火封堵材料会经历从常温到高温的变化。在这个过程中，材料内部的应力和结构会发生变化，这些变化会通过声学信号反映出来。例如，当材料受热膨胀或收缩时，声波的传播路径和反射特性会发生改变。通过分析这些变化，可以评估材料在高温环境下的稳定性和耐火性能。

(2)声学信号与材料完整性：声学成像技术可以检测防火封堵材料内部的裂缝、空隙等缺陷。这些缺陷不仅会影响材料的密封性能，还会影响其耐火性能。例如，裂缝和空隙会导致热量更容易穿透材料，从而降低其耐火性能。通过声学成像技术检测这些缺陷，可以间接评估材料的耐火性能^[12]。

(3)实验验证与数据分析：结合耐火试验数据，可以进一步验证声学信号与耐火性能之间的关联性。例如，在一定的温度条件下，通过耐火试验观察防火封堵结构的声学信号变化，可以评估其在高温环境下的稳定性和耐火性能。在常温条件下，声学信号特征稳定，传播时间、幅度和频率均在正常范围内。当温度升高至某一阈值时，声学信号的传播时间显著增加，幅度减小，频率发生变化。这表明材料内部发生了热膨胀或收缩，导致声波传播路径的改变。通过上述实验数据，可以推断出材料在高温环境下的耐火性能。具体来说，声学信号的变化可以反映出材料内部的细微变化，从而间接评估其耐火性能。

2.5 对比参考指标

建立正常状态下的声学信号数据库，作为对比参考。在实际检测中，将检测到的声学信号与正常状态下的信号进行对比，如果偏差较大，则表示防火封堵结构可能存在问题。考虑不同类型的电缆、不同的防火封堵材料以及不同的施工工艺对声学信号的影响，制定相应的修正系数和评判标准。

2.6 辅助火灾后的事故分析

(1)火灾蔓延路径分析：在电力电缆发生火灾后，声学成像技术可以对火灾后的防火封堵结构进行检测和成像，分析火灾过程中火焰和烟雾的蔓延路径^[13]。通过对声学成像图像的分析，可以了解防火封堵在火灾中的失效部位和原因，为事故调查和后续的防火封堵改进提供依据。

(2)受损程度评估：火灾会对防火封堵材料和结构造成不同程度的损坏，声学成像技术可以对受损的封堵结构进行评估，确定损坏的范围和程度，有助于制定合理的修

复方案，尽快恢复电力电缆的防火封堵功能，降低火灾事故的影响。

2.7 气密性检测

GB/T 7106—2019《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能检测方法》试验前先把待测试件固定在固定框架上，固定好以后对待测试件与设备框架接触的部分进行密封，这样就构成了一个静压箱。测试过程中通过改变风机的转速来调节风量，试验试件内侧和外侧的压差，同时记录各个压差下对应的流量值，即为试件的气密性测试结果。在实际操作中十分繁琐和困难，最主要的就是试件的安装、固定和密封^[14]。与传统的气密性检测方法相比，利用声学装置测试气密性具有诸多优势。一方面，提高了检测效率。声学成像仪可以快速扫描大范围的区域，减少检测盲区，相比传统方法大大节省了时间和人力成本。另一方面，具有更高的精度。能够检测到微小的密封缺陷，精度可达几毫米甚至更高。

3 声学定位技术在应用中的影响因素

声学定位技术在应用过程中可能面临多种技术问题。本节将分节讨论这些影响因素及其应对措施^[15-18]。

3.1 环境因素的影响

(1)外界噪声：在嘈杂的环境中，外界噪声可能干扰声波的传播和接收，导致检测精度下降，使检测结果不够准确。

(2)温度和湿度：温度、湿度等环境条件的变化可能影响声波的传播速度和反射特性，从而使检测结果出现偏差。环境条件的变化会影响声波在不同介质中的传播特性，导致检测结果不准确。

(3)材料特性：不同类型的防火封堵材料对声波的吸收和反射特性也有所不同，从而影响检测结果的准确性。

(4)复杂结构：当检测对象的材质、结构复杂时，声波的传播路径可能变得难以预测，从而影响检测结果。

3.2 设备故障的影响

(1)发射装置故障：发射装置故障可能导致无法发射出足够强度的声波，无法准确检测到泄漏点。

(2)接收装置故障：接收装置故障可能使接收到的信号失真，影响后续的信号处理和分析。

(3)信号处理单元故障：信号处理单元故障则可能无法准确分析处理信号，影响检测结果的准确性。

3.3 应对措施

(1)环境控制：在嘈杂环境中进行检测时，可以使用隔音罩或降噪设备来减少外界噪声干扰。同时，控制检测环境的温度和湿度，确保声波传播的稳定性和准

确性。

(2)设备维护: 定期对声学定位检测设备进行检查、保养和校准, 确保设备处于良好的工作状态。配备备用设备和零部件, 以便在设备出现故障时能够及时更换, 减少对检测工作的影响。

(3)技术培训: 加强技术人员的培训, 提高其对设备故障的诊断和处理能力, 确保在设备出现故障时能够迅速响应和处理。

(4)数据分析: 通过大数据分析和机器学习算法, 提高声学信号处理的精度和稳定性, 减少环境因素对检测结果的影响。将声学定位技术与其他无损检测技术(如红外热成像、超声波检测等)相结合, 形成多技术融合的检测系统, 提供更全面、准确的检测结果^[19-20]。

4 结论

本文详细探讨了声学定位技术在防火封堵材料检测中的应用, 重点分析了其检测原理、系统组成、检测方法以及在实际应用中的影响因素和应对措施。研究表明, 声学定位技术具有高精度、高效率和非破坏性等优势, 能够有效检测防火封堵材料的裂缝、松动、界面结合情况以及整体结构的完整性。此外, 该技术还可以实时监控施工过程, 优化施工工艺, 并通过声学信号与耐火性能的关联性评估材料的耐火性能。未来的研究可以进一步优化声学定位技术的硬件和软件, 提高其在复杂环境中的适应性和检测精度。例如, 开发更先进的降噪算法和信号处理技术, 以减少外界噪声的干扰。结合人工智能和机器学习技术, 开发智能化的声学检测系统, 能够自动识别和分析声学信号, 提高检测的自动化水平和效率。制定和完善声学定位技术在防火封堵材料检测中的标准和规范, 确保检测结果的可靠性和一致性, 推动该技术在更广泛领域的应用。总之, 声学定位技术在防火封堵材料检测中展现出巨大的应用潜力, 未来的研究和技术发展将进一步推动其在工程实践中的广泛应用, 为防火安全提供更可靠的保障。

参考文献

[1] 范伟登, 周杨, 刘建志, 等. 防火封堵材料GB 23864—2023与GB 23864—2009对比分析与解读探讨[J]. 中国标准化, 2024, 17(9): 169-172.

[2] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 防火封堵材料: GB 23864—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 防火封堵材料: GB 23864—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[4] 李云浩, 沈金波. 我国电线电缆防火封堵现状[J]. 消防技术与产品信息, 2011, (5): 51-53.

[5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建筑外门窗气密、水密、抗风压性能检测方法: GB/T 7106—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

[6] 陈月. 基于声学定位技术的电力电缆防火封堵性检测研究及应用[J]. 电子技术与软件工程, 2022, 22(11): 106-109.

[7] 余立志. 基于图像处理器的传声器阵列实时声成像方法[J]. 声学技术, 2014, 33(4): 367-371.

[8] 刘哲. 阵列声成像系统的设计[J]. 微计算机应用, 2011, 32(7): 70-75.

[9] 罗勇. 防火堵料在电缆竖井封堵中的重要性及其应用[J]. 广西民族大学学报(自然科学版), 2007, (S1): 13-14+17.

[10] 谭胜兰, 郑雨欣. 变电站电缆沟新型防火封堵板材应用技术探讨[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2014, (33): 741-742.

[11] 唐浩. 10 kV变配电工程电缆防火封堵施工工艺[J]. 安装, 2023, (8): 46-48.

[12] 陈金平, 何潇, 夏水英, 等. 浅析变电站封堵存在的问题及优化措施[J]. 中国新技术新产品, 2014, (24): 181.

[13] 罗琼瑶, 甘子琼, 彭波. 高层建筑防火封堵研究综述[C]//2021年中国消防协会科学技术年会论文集. 北京: 中国消防协会, 2021: 493-496.

[14] 刘会华, 邱铭, 单波, 等. GB/T 7106—2019《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能检测方法》修订研究[J]. 工程质量, 2020, 38(10): 10-16.

[15] 高琳, 曹建国. 管道泄漏检测方法研究综述[J]. 现代制造工程, 2022, 497(2): 154-162.

[16] 王俊岭, 邓玉莲, 李英, 等. 排水管道检测与缺陷识别技术综述[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13520-13528.

[17] 赵小惠, 谭琦, 胡胜, 等. 基于LMD云模型与PSO-KELM的齿轮箱故障诊断[J]. 机械传动, 2023, 47(2): 157-163.

[18] 马一凡. 基于声学传感器的管道泄漏定位研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.

[19] 沈功田, 李涛, 姚泽华, 等. 高温压力管道红外热成像检测技术[J]. 无损检测, 2002, 24(11): 473-477.

[20] 袁朝庆. 热力管道泄露光纤光栅检测技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2008.