

前 言

在航空航天、高端装备制造等领域，存在高温、高转速等极端测试环境，其关键热力参数的原位精准测量不仅受到常规传感器件敏感材料耐温极限的制约，还面临测试空间受限、引线与供能困难及多物理场耦合等问题，对传感器的耐高温性能、结构集成度及长期可靠性提出了更为严苛的要求。攻克复杂极端环境中实现多参数精确测量技术，是航空航天与高端装备领域测试技术发展亟需突破的重要研究方向。声表面波(SAW)传感技术具备无源无线、抗干扰性强及稳定性好等优势，在高温及复杂环境监测中有望为上述环境中的力热参数实时原位监测提供有效解决途径。

本书围绕耐高温声表面波传感技术，系统阐述其传感理论基础、器件建模与设计方法以及工程应用验证。全书共分 8 章。从极端环境下的力热参数测试需求出发，分析耐高温 SAW 传感器发展所面临的主要技术挑战；介绍了声表面波传感器的物理基础、多物理场耦合建模方法、器件结构设计与仿真分析，以及关键微纳制造工艺与敏感结构特性表征方法；重点围绕耐高温振动、应变及多参数共面集成传感器，阐述其设计与集成思想及实现路径；探讨了高温环境下 SAW 信号的无线解调方法，形成了从基础理论到工程应用验证的研究框架。

本书凝聚了作者及其研究团队在耐高温声表面波器件与传感技术领域多年的研究积累。本研究工作得到了国家自然科学基金航天联合重点基金(U1837209)、区域创新发展联合重点基金(U24A20136)，以及山西省重点研发计划(202102030201005)等项目的资助。在此，特别感谢张永威、徐芳萌、周煦航、郭欣榕、林柏茂、薛涛、闫夏雯、王浩、郑引荣、罗忠海、李向荣、张娟等博士/硕士研究生在传感器件设计与仿真、敏感结构制造、系统测试验证等方面做出的重要贡献。

本书紧密围绕国家在航空航天、高端装备制造领域的战略需求，将理论研究与工程实践深度融合，系统总结耐高温 SAW 传感器的设计、制造与测试。期望本书能为从事特种耐高温传感器设计制造及相关测试系统研究的科研人员提供参考。受学识与研究深度所限，书中难免存在疏漏与不足，诚挚欢迎学界同仁和广大读者批评指正，以期共同推动耐高温特种传感技术的发展与进步。

谭秋林

2025 年 8 月

目 录

前言

第 1 章	耐高温声表面波传感器需求与挑战	1
1.1	航空航天与高端装备对极端环境下力热参数原位测试的迫切需求	1
1.2	声表面波技术耐高温下测试应用的优势与潜力	2
1.3	耐高温声表面波传感技术面临的关键挑战	3
1.3.1	压电敏感电极的耐高温极限突破技术	4
1.3.2	硬脆压电晶片的微纳敏感结构耐高温制造工艺	4
1.3.3	极端高温环境下信号获取与传输难题	5
1.3.4	多物理场耦合导致的参数交叉敏感与解耦难题	5
1.3.5	高温下力学参数的标校与溯源难题	6
1.4	本章小结	6
第 2 章	耐高温声表面波力热传感器敏感机理与材料体系	8
2.1	概述	8
2.2	声表面波的物理本质与传播特性	8
2.2.1	声表面波的波动方程与边界条件	8
2.2.2	压电介质中的声-电耦合效应	13
2.3	声表面波器件的基本结构与工作原理	14
2.3.1	叉指换能器的设计原理及性能参数	14
2.3.2	延迟线、谐振器与反射栅结构	15
2.4	声表面波器件的力热参数敏感机理与响应特性	19
2.4.1	温度敏感机理与频率温度特性	19
2.4.2	振动敏感机理与结构动力学响应	20
2.4.3	应变敏感机理与应变传递模型	24
2.4.4	压力敏感机理与膜片变形理论	25
2.5	典型压电晶体材料与特性分析	26
2.5.1	压电效应与压电晶体	26
2.5.2	典型高温压电材料特性分析	27
2.6	本章小结	30
	参考文献	30

第3章 耐高温声表面波传感器建模与仿真设计	31
3.1 概述	31
3.2 耐高温单一力学参数传感模型构建与仿真	31
3.2.1 高温温度敏感模型构建及特性参数仿真	31
3.2.2 单悬臂梁式高温振动敏感模型构建及参数仿真	40
3.2.3 四端固支梁式高温振动敏感模型构建及参数仿真	49
3.2.4 压电型高温振动敏感模型构建及特性仿真	64
3.2.5 高灵敏高温应变敏感模型构建及性能仿真	69
3.2.6 高温压力敏感模型构建及特性参数仿真	77
3.3 温度同测型多参数集成传感设计方法	82
3.3.1 多参数集成传感器的仿真与设计分析	82
3.3.2 集成传感器的合理布局与干扰抑制设计	88
3.3.3 多参数分频设计与信号解耦方法	90
3.4 本章小结	91
参考文献	91
第4章 耐高温声表面波传感器件的微纳制造工艺	92
4.1 概述	92
4.2 压电晶片湿法刻蚀工艺	92
4.2.1 各向异性刻蚀机理与速率调控方法	92
4.2.2 刻蚀表面微观形貌与性能表征方法	101
4.3 压电晶片高温热压键合工艺	105
4.3.1 高温热压键合机理与界面键合机制	105
4.3.2 高温热压键合方法与工艺参数优化	109
4.3.3 键合微结构强度测试与微观界面特性分析	110
4.4 多层薄膜复合电极的耐高温工艺	115
4.4.1 金属薄膜电极的高温失效分析	115
4.4.2 多层薄膜复合电极结构设计与镀膜技术	118
4.4.3 电极微结构表征与耐高温性能测试	121
4.5 本章小结	124
参考文献	124
第5章 耐高温声表面波振动传感器的设计与性能测试	125
5.1 概述	125
5.2 振动敏感结构力学模型及参数设计	125
5.2.1 单悬臂梁式传感器数学模型构建	125
5.2.2 四端固支梁式传感器数学模型及参数调控	130

5.2.3 压电型振动传感器的模型构建	133
5.3 单悬臂梁式耐高温振动传感器设计与性能测试	136
5.3.1 制备工艺流程设计与优化	136
5.3.2 器件封装技术与高温环境兼容适配性设计	138
5.3.3 高温环境下的性能测试	139
5.3.4 温度-振动耦合信号的解耦方法	144
5.4 四端固支梁式高温振动传感器性能测试	146
5.5 压电型高温振动传感器的设计与性能测试	150
5.5.1 制备工艺优化与器件设计	150
5.5.2 高温环境下温度-振动性能测试	152
5.5.3 集成铂电阻的温度补偿方法	155
5.5.4 高温稳定性测试分析	156
5.6 本章小结	157
参考文献	158
第 6 章 耐高温声表面波应变传感器的设计与性能测试	159
6.1 概述	159
6.2 高温应变-温度复合测试平台构建	159
6.3 硅酸镓钽基耐高温应变传感器设计	162
6.3.1 通用型应变传感器性能测试	162
6.3.2 梁板型增敏结构设计性能测试	168
6.4 耐高温温度-应变集成传感器性能测试	177
6.4.1 温度-应变传感器温度性能测试	177
6.4.2 温度-应变传感器应变性能测试	178
6.4.3 传感性能及误差分析	180
6.5 本章小结	182
参考文献	182
第 7 章 耐高温多参数共面集成声表面波传感器设计与解耦方法	183
7.1 概述	183
7.2 温-压集成声表面波传感器的设计与性能测试	183
7.2.1 共面集成结构设计与制造方法	183
7.2.2 温-压双参数性能测试	190
7.2.3 温-压双参数解耦算法模型构建	194
7.3 温-压-湿集成传感器的设计与性能测试	195
7.3.1 温-压-湿集成传感器制造工艺	195
7.3.2 温-压-湿集成传感器性能测试	203

7.4 本章小结	215
参考文献	216
第 8 章 基于声表面波技术的耐高温无线传感测量与解调系统	217
8.1 概述	217
8.2 面向高温环境的动态振动参数无线测量系统	217
8.2.1 系统总体架构设计与工作原理	217
8.2.2 声表面波高温振动传感特性的标定测试	220
8.2.3 集成化高温振动无线测试系统构建	225
8.3 面向高温环境的静态力热参数无线测量系统	230
8.3.1 硬件系统架构设计与关键模块实现	230
8.3.2 测量解调算法与软件系统实现	231
8.3.3 系统应用验证与性能分析	237
8.4 本章小结	242
参考文献	242

彩图

第 1 章 耐高温声表面波传感器需求与挑战

现代航空航天、高端能源装备、先进制造等战略领域的技术迭代，对极端环境下关键物理量的原位监测提出了严苛要求。其中，极端高温环境下的温度、应变、压力、振动等参数的实时原位感知，是保障装备安全服役、实现性能优化与寿命预测的核心前提。声表面波(surface acoustic wave, SAW)传感技术凭借无源无线、微型化、抗电磁干扰、可单片集成等独特优势，成为突破极端高温测控瓶颈的重要技术路径。本章系统阐述极端高温原位测试的迫切需求，分析声表面波技术的耐高温优势与应用潜力，深入剖析当前耐高温声表面波传感技术面临的核心挑战，为后续章节研究内容奠定理论与工程基础。

1.1 航空航天与高端装备对极端环境下力热参数原位测试的迫切需求

近年来，我国持续推动高端装备制造业创新发展，明确将大型飞机、航空发动机与燃气轮机、民用航天等列为战略布局重点方向。从“十三五”到“十四五”期间，航空发动机及燃气轮机研发始终被列为重大工程项目，新一代重型运载火箭、可重复使用航天运输系统等关键技术攻关也得到进一步强化，充分体现了国家在空天等前沿科技领域加快技术突破、建设科技强国的坚定布局。

在航空航天领域，航空发动机作为飞机的动力系统，因其结构复杂、故障类型多、维修成本高，通常需要对其振动参数进行实时监测，以保障安全运行。发动机工况环境复杂恶劣，不仅工作温度高，还伴有高压、高旋等严苛条件，亟需高可靠性的耐高温振动传感器满足测试需求。高超声速飞行器飞行过程中，气动加热会使表面温度急剧升高，翼、舵等结构在高温环境下振动特性发生改变，易产生剧烈振动，甚至引发颤振造成结构损伤。因此，需对飞行器关键部件开展实时监测，防范安全事故。同时，监测热环境下结构振动特性，也可为飞行器优化设计提供理论依据。然而，高速飞行器气动加热形成的超高温及跨尺度温度梯度分布，对信号采集与监测技术提出了更高要求。

大气中高马赫数飞行的火箭与导弹，受气动加热影响表面会产生超高温，体表温度可达 800℃ 以上；其表面压力分布及振动参数，是判定飞行状态、设定飞行控制模型的关键依据。航天飞行器飞行过程长期处于高温、高旋等恶劣环境，尤其是高超声速飞行器表面、航空发动机及燃气轮机等关键部位，局部温度甚至

超过 800℃。因此,恶劣环境下温度、压力、振动等参数的原位实时获取,对航天飞行器材料选型、结构优化及防护措施制定具有重要意义。例如,航天飞行器高速飞行时,表面蒙皮与大气层摩擦产生大量热量,蒙皮表面温度、气动载荷及振动测试,对蒙皮结构设计与防护方式选择至关重要;航空发动机燃烧室内温度超过 800℃、工作压力高于 1.2MPa,燃烧室内部温度与压力参数的实时监测,对材料选型及失效分析具有重要参考价值;航天发动机涡轮叶片长期处于超高温、强气流与剧烈振动的恶劣工况,极易产生损伤甚至萌生裂纹,涡轮叶片的质量直接决定航天发动机整体性能,因此,开展涡轮叶片温度、压力、振动等参数的原位实时监测,对航天发动机安全稳定运行尤为关键。

燃气轮机作为大型能源动力装备,开展实时工况监测,对提升运行效率、故障诊断及性能衰退评估具有重要作用。其中,振动信号监测是最有效的技术手段,通过监测并分析振动信号,结合各部件结构特性,可精准定位故障位置、及时采取处置措施,规避安全事故。燃气轮机主要由压气机、燃烧室、涡轮等部件构成,其内部工况同样存在高温、高压等恶劣条件,给振动监测工作带来极大挑战。在电力领域,核电是电力能源的重要支撑,保障核电反应堆结构运行安全意义重大。历史上核电泄漏事故严重破坏生态环境,危害后果触目惊心,依托振动监测系统实时监控核电机组各部件运行状态,是保障核电站安全运行的有效途径。

1.2 声表面波技术耐高温下测试应用的优势与潜力

目前,市场上的耐高温传感器主要采用硅基材料及功能陶瓷材料制备而成。随着微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)工艺的不断发展,硅基传感器受到广泛重视,各类硅基传感器不断涌现,其小型化、高集成度的特点使其应用场景十分广阔。然而,传统压阻式硅基压力传感器在 150℃以上工况下,热本征激发会导致电隔离失效、反向 PN 结丧失作用,进而造成传感器失灵。绝缘体上硅(silicon on insulator, SOI)压力传感器虽可解决反向 PN 结损坏问题,但材料本身在 500℃以上会丧失弹性,致使压力传感器无法正常工作。因此,极端恶劣工况下,传统硅基测试技术难以满足极端环境下各类参数实时、可靠的测试需求。

此外,传统耐高温传感器多为有线传感器,此类传感器需配置电缆路由与外壳,不仅增大整体体积与重量、提升安装复杂度,还会增加故障发生概率,同时易对被测目标部件或系统产生干扰,使得传感器系统的运行与维护成本增加。因此,适用于高温、高旋等恶劣工况,可实现实时、原位、可靠测试的新型传感器件已成为行业发展趋势。相较于传统有线有源器件,基于耐高温材料的无线无源传感器件,在高温、高旋、强振动等恶劣环境的参数测试中具备显著优势。目前,

适用于恶劣环境的无线无源传感器主要分为 LC 谐振式传感器、微波散射传感器和声表面波传感器三类。其中，声表面波传感器凭借独特性能，成为极端高温场景下最具应用前景的技术路径。 LC 谐振式传感器采用近电场耦合技术，能够实现特殊环境下的数据实时读取与多参数集成，但存在传输距离近、品质因数偏低的短板，难以满足极端高温场景的远程监测需求；微波散射技术虽抗干扰能力强、传输距离远，但基于该技术制备的器件体积偏大，难以实现微型化集成，无法适配航空航天等领域核心部件的多参数实时测试需求。相比之下，声表面波技术可实现传感器信号远距离无线监测，且器件结构简单、体积小、抗干扰性强、高温稳定性好，能够实现多参数集成测试，是面向航天飞行器、能源开采、机械工业等领域关键部件控制与健康状态监测极具应用前景的无线监测技术。

声表面波传感器基于压电材料的压电效应工作，其核心原理是，当传感器所处外界环境条件发生变化时，压电基底材料的属性随之改变，进而引起声表面波的波速、幅度、模态等参量发生变化。通过检测声表面波器件输出的电学参量，即可实现环境参数的定量测量。按照检测物理量的不同，声表面波传感器可分为温度传感器、压力传感器、振动传感器、湿度传感器、气体传感器等类型。

声表面波传感器凭借独特性能与广泛适用性，在诸多领域拥有广阔应用需求。其一，灵敏度与测量精度高，能够捕捉极端高温环境下微小的物理参数变化，可满足航空航天、高端装备核心部件对温度、应变等参数的精密监测需求。例如，在航空发动机涡轮叶片监测中，可精准捕捉温度与应变的细微波动，为部件健康状态预警提供可靠数据支撑；其二，具备无线无源特性，无需内置电源与复杂布线，可在高温、高旋、强振动等恶劣环境中长期稳定工作，且无需频繁维护，大幅拓宽了在密闭、旋转等传统传感器难以适用的高温场景的应用范围；其三，具备多功能集成能力，随着技术迭代升级，高温声表面波传感器可与其他功能模块集成，实现多参数同步监测，适配复杂高温场景的综合监测需求。例如，在航天设备热端部件监测中，可同步检测温度、应变、振动等多项关键参数，提供全面的设备健康状态信息。

综上，声表面波传感器凭借高灵敏度、高精度、无线无源及多功能集成等优势，在航空航天、能源开采、核电等极端高温相关领域展现出巨大应用需求与发展潜力。其优异的耐高温特性与工程适配性，使其成为突破极端高温原位监测瓶颈的核心技术路径。随着压电材料、微纳制造等相关技术的持续进步，声表面波传感器必将在极端高温监测领域发挥更为重要的作用。

1.3 耐高温声表面波传感技术面临的关键挑战

尽管声表面波技术在高温传感领域具备显著优势，但面向 600°C 以上极端高

温、长时程稳定工作的工程化需求,仍面临一系列关键技术问题。

1.3.1 压电敏感电极的耐高温极限突破技术

在耐高温声表面波传感器的高温稳定工作体系中,耐高温压电基底材料与高温可靠电极材料是两大核心制约因素,其性能直接决定传感器在极端工况下的工作稳定性与使用寿命。

从基底材料来看,耐高温性能是制约声表面波传感器适配高温应用场景的首要技术瓶颈。目前,国内外已围绕该问题开展大量研究,涉及金刚石、碳化硅(SiC)、特种陶瓷及新型复合材料等具备应用潜力的耐高温基底候选材料。此类材料相较传统硅薄膜,拥有更优异的高温热稳定性与力学性能,已在部分高温传感器领域实现应用突破。例如,基于金刚石与碳化硅制备的压力传感器,已实现规模化市场应用。但需注意的是,采用上述两种材料制备的传感器件在超高温(通常指 400℃ 以上)环境下,存在信号衰减加剧、稳定性下降等问题,难以满足严苛高温场景的使用要求。而基于耐高温压电材料的声表面波传感器,凭借其独特的压电效应与机电耦合特性,为解决传感器高温稳定工作难题提供了新的技术路径。但是压电材料的关键性能参数(如压电系数 d_{33} 、介电常数 ϵ_r 、机电耦合系数 k^2)及居里温度(T_c)对温度变化极为敏感;当环境温度接近或超过居里温度时,材料压电性能会急剧衰减甚至完全消失,极大限制了其高温应用范围。因此,筛选高居里温度、高温下性能稳定的压电材料,已成为耐高温声表面波传感器研发的核心方向之一。

另一项关键挑战在于金属电极的高温耐受能力。高温环境下,金属电极易发生团聚、脱落,严重影响传感器的使用性能与工作稳定性。该现象与金属材料的塔曼温度密切相关,当温度接近塔曼温度时,金属内部会产生明显的体积扩散行为。塔曼温度是指材料开始出现显著扩散效应的温度,对于金属材料,通常为其熔点(T_m)的 0.3~0.4 倍。因此,研发高品质、耐高温的金属电极材料,是制备高性能声表面波传感器的关键环节。

1.3.2 硬脆压电晶片的微纳敏感结构耐高温制造工艺

耐高温压电材料多为硬脆、高各向异性、难加工材料,其力学性能及加工特性与传统硅基材料差异显著,传统硅基 MEMS 加工工艺难以直接适用,致使耐高温声表面波器件的微纳制造面临诸多难题。

在材料层面,高温会显著改变压电材料自身性能。压电材料在高温下晶体结构易发生相变,如传统压电陶瓷在高温下发生铁电-顺电相变,造成压电常数急剧下降,严重影响器件功能输出。此外,高温还会诱发热扩散、氧化等化学反应,同时引发位错、空位等晶体缺陷聚集,不仅劣化材料电学与力学性能,还会降低其高温服役寿命与结构稳定性。

在制造工艺层面,现有技术难以满足高温微结构的精密加工要求。硬脆压电晶体在机械研磨、化学抛光过程中,易产生崩边、裂纹、表面划痕等缺陷,难以获得高平整度、低表面粗糙度(纳米级)的晶片表面;而晶片表面质量直接影响声表面波传播特性,表面缺陷会增大声表面波传播损耗、造成信号畸变,降低器件测量精度与工作稳定性。叉指换能器高精度微纳加工难度较大。高温声表面波器件要求叉指电极的线宽与间距达到亚微米级,以保障器件的高频响应与测量精度,但硬脆压电晶体在光刻、干法刻蚀(如反应离子刻蚀、感应耦合等离子体刻蚀)过程中,易出现刻蚀形貌不规则、侧壁倾斜、线宽偏差过大等问题,造成叉指换能器一致性变差。此外,高温电极薄膜的沉积、图形化、退火及界面改性工艺兼容性不足,高温键合、封装与抗腐蚀防护技术尚不成熟。高温电极薄膜与压电基体界面结合强度偏弱,高温退火过程中易发生膜层脱落。传统封装材料在极端高温环境下易老化、变形,无法有效保护器件核心结构免受氧化、腐蚀与热冲击作用,进一步制约了高性能耐高温声表面波器件的规模化制备与工程应用。

1.3.3 极端高温环境下信号获取与传输难题

极端高温环境不仅会影响声表面波器件本身的性能,还会对无线无源信号的获取与传输产生显著干扰,造成信号提取困难、传输可靠性大幅下降。

从信号激发与传播角度来看,极端高温会显著改变压电材料的弹性模量、介电常数、声速等物理参数,引发声表面波谐振频率漂移、回波幅度衰减、信号信噪比急剧下降。同时,高温环境下的热噪声与电磁干扰会进一步淹没微弱的回波信号,增大信号提取难度。从无线传输角度来看,高温金属结构、燃气介质、复杂腔体等会对射频信号产生反射、散射、衰减及多径干扰,导致无线传输距离缩短、耦合效率降低;传统无线询问天线系统在高温环境下存在天线失配、动态范围不足、信号解算精度低等问题,难以实现微弱回波信号的稳定提取与高精度解算。

尤其在 1000℃ 以上的超高温区域,上述问题更为突出。该工况下信号衰减严重,无线传输距离往往不足 10cm,无法满足工程现场的远程监测需求;同时,信号噪声干扰强烈,会增大测量误差,甚至导致无法有效测量。因此,如何突破极端高温环境下的信号衰减与干扰瓶颈,实现微弱信号的稳定获取与可靠无线传输,是耐高温声表面波传感技术实现工程化应用必须解决的核心难题。

1.3.4 多物理场耦合导致的参数交叉敏感与解耦难题

高端装备核心热端部件的服役环境并非单一高温环境,而是温度、应变、压力、振动、热冲击等多物理场耦合环境。声表面波器件的响应特性对多个物理量均具有敏感性,同一器件的谐振频率、振幅等参数会同时受温度、应变、压力等多种物理量调制,存在严重的参数交叉敏感问题,易造成测量结果失真,无法实

现单一物理量的精准测量。

例如,温度变化会改变压电材料的声速,进而引发声表面波频率漂移;而应变、压力变化也会通过改变器件几何尺寸与应力状态,造成类似的频率漂移。若不进行有效的补偿与解耦,无法区分频率漂移的诱因是温度还是应变、压力,将产生较大的测量误差。传统单点补偿方法(如温度补偿电阻)与线性修正模型,仅适用于窄温域、小变量程的简单场景,难以描述宽温域(800℃以上)、大变量程条件下多物理场耦合的非线性关系。在多参数同步测量过程中,交叉敏感问题更为突出,解耦难度显著提升。

此外,多物理场耦合作用还会导致器件性能发生非线性退化,进一步增加参数交叉敏感的复杂程度。因此,建立精准的多物理场耦合理论模型,揭示温度、应变、压力等物理量对声表面波器件响应特性的耦合机制,研发高精度、强鲁棒性的多参数解耦算法,实现单一物理量的独立精准测量,是耐高温声表面波传感技术亟待解决的重要科学难题。

1.3.5 高温下力学参数的标校与溯源难题

高温环境下应变、应力、压力等力学参数的精准标定与量值溯源,是保障耐高温声表面波传感器测量精度的重要前提。受极端高温环境特殊性制约,现有常温标定系统与方法无法直接应用,高温力学参数的标定与量值溯源仍面临诸多难题。

高温条件下,传感器材料的弹性模量、强度、韧性等力学性能参数会发生显著变化。同时,现有高温环境下的力学性能测试技术存在局限,测试温区范围、设备精度及可靠性等因素,均制约了对传感器性能的精准评估。上述变化导致传统标校方法不再适用,亟需研发全新的标校技术与方法。

量值溯源体系尚不健全。目前,针对800℃以上极端高温环境下的力学参数,尚未建立统一的国家计量标准与溯源体系,传感器的性能评价、寿命评估及可靠性验证缺少统一的技术规范与测试依据。此外,高温环境下传感器会出现老化与性能退化,造成测量精度随应用时间衰减,如何建立有效的长期稳定性标定方法,实现传感器动态校准,也是当前亟待攻克的难题。

1.4 本章小结

本章围绕耐高温声表面波传感技术的发展背景与应用需求,阐述了航空航天与高端装备领域对极端高温原位测试的迫切需求,分析了声表面波技术在无线无源、微型化、耐高温、多参数感知等方面的独特优势与应用潜力。在此基础上,深入剖析了当前耐高温声表面波传感技术面临的五大核心挑战:压电敏感电极的耐高温极限突破技术、硬脆压电晶片微纳敏感结构耐高温制造工艺、极端高温环

境下信号获取与传输难题、多物理场耦合导致的参数交叉敏感与解耦难题、高温力学参数的标校与溯源难题。这五大挑战既是当前耐高温声表面波传感技术研究的热点与难点，也是未来技术突破的主攻方向。围绕上述核心挑战开展系统性研究，突破关键核心技术，提升耐高温声表面波传感器的工作温区、测量精度与长期稳定性，对推动耐高温声表面波传感技术成熟化与工程化应用，支撑航空航天、高端能源等战略领域装备升级与自主可控发展，具有重要的理论意义与工程价值。后续章节将围绕上述问题，从设计仿真、微纳制造到系统验证逐一展开详细论述。

第2章 耐高温声表面波力热传感器敏感机理 与材料体系

2.1 概 述

声表面波是一种沿压电基体表面传播的弹性波，其能量主要集中在表面以下1~2个波长深度范围内。这种能量集中特性，使声表面波传感器对表面物理、化学性质的微小变化具备极高灵敏度。结合压电材料的逆压电效应与正压电效应，声表面波传感器可实现无线无源、抗电磁干扰、体积小、灵敏度高的检测优势，在极端环境传感领域具备巨大应用潜力。

本章首先介绍声表面波的物理本质及其在压电介质中的传播特性，从波动方程与边界条件出发，分析声表面波在压电材料中的声电耦合机理。随后介绍声表面波器件的基本结构与工作原理，包括叉指换能器、延迟线结构及谐振器结构等。在此基础上，分析温度、振动、应变、压力等物理量对声表面波传播特性的影响机理。最后，对典型耐高温压电材料体系开展对比分析，为后续传感器结构与材料选型提供理论依据。

2.2 声表面波的物理本质与传播特性

2.2.1 声表面波的波动方程与边界条件

物体的随机振动会激发声波，声波是机械振动以弹性波形式在介质中传播的物理现象。按照在固体介质中的传播区域与振动模式差异，弹性声波主要分为平板声波(acoustic plate mode, APM)，体声波(bulk acoustic wave, BAW)和声表面波(SAW)三大类。

声表面波是一种沿弹性固体表面或界面传播、能量高度集中于表面附近的弹性波。该类波动由 Lord Rayleigh 于 1885 年在研究地震波传播规律时首次提出，他指出除在固体内部传播的纵波与横波外，还存在沿介质表面传播的弹性波，其能量主要集中在基片表面 1~2 个波长深度范围内，包括瑞利波(Rayleigh wave)、勒夫波(Love wave)、漏波(Leaky wave)等。声表面波的传播速度通常在 1000~10000m/s，比电磁波低 4~5 个数量级。本书中所涉及的声表面波器件与理论分析均以瑞利波为基本工作模式。瑞利波传播过程中，质点振动方向与波的传播方向

既不严格平行也不严格垂直，而是纵波分量与横波分量的矢量叠加，质点运动受剪切力和压缩力的共同影响。瑞利波的速度仅取决于传播媒介的物理参数，与频率无关，因此，瑞利波为非色散波。瑞利波的速度低于介质中的体横波波速，这一特性为声表面波器件的微型化与集成化设计提供了重要基础。在瑞利波传播模式下，固体传播媒介内质点运动轨迹呈现椭圆形，质点传播越深，振幅也呈现指数级衰减。瑞利波模式下质点的运动轨迹如图 2.1 所示。

为严格描述声表面波的传播规律，在压电基片上建立三维坐标系，如图 2.2 所示。假设 $x_3=0$ 代表基片表面，当 $x_3>0$ 时，即在基片的上表面，为大气环境；当 $x_3<0$ 时，则表示基片表面以下，为固体介质。

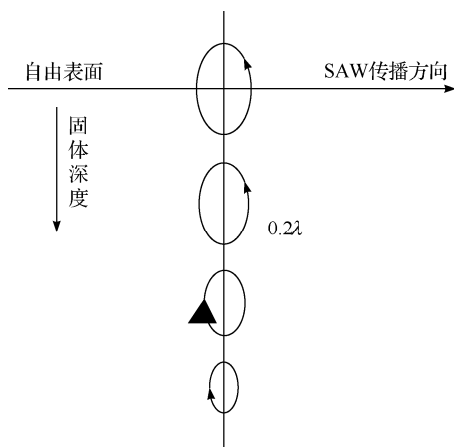


图 2.1 瑞利波模式下质点运动轨迹

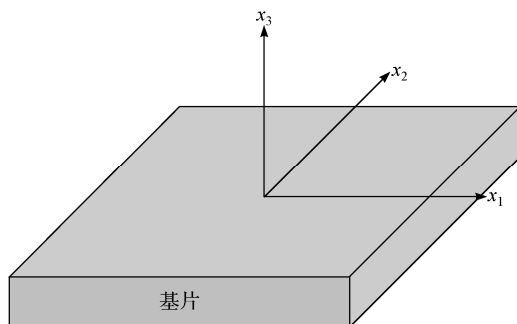


图 2.2 SAW 传播坐标系

声表面波在平面(x_1x_2)上传播时，非压电弹性基片中的波动方程为

$$\rho \frac{\partial^2 \mu_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 \mu_k}{\partial x_l \partial x_j} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (2.1)$$

式中， ρ 为基片材料的体密度； μ_i 为基片材料沿 x_i 方向的位移； t 为时间； C_{ijkl} 为衬底材料的弹性刚度常数； x_l ， x_j 表示两个不同的方向。

按照波方程的特点，可将式(2.1)解为

$$\mu_i = \alpha_i \exp \{ j[\omega t - \beta(l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3 x_3)] \} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2.2)$$

式中， l_1 ， l_2 ， l_3 分别为波传播不同方向的方向余弦； $\omega = 2\pi f$ 为角频率； $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$

为波数， λ 为波长； α_i 为波的振幅。

将式(2.2)代入式(2.1)，得到

$$\beta^2 c_{ijkl} l_i l_j \alpha_i - \rho \omega^2 \alpha_i = 0 \quad (2.3)$$

将式(2.3)两端同时约去 β^2 ，得到

$$(c_{ijkl}l_l l_j - \rho v^2 \delta_{ik})\alpha_k = 0 \quad (2.4)$$

式中， $v^2 = \frac{\omega^2}{\beta^2}$ 。

$$\begin{aligned} \delta_{ik} &= 1 \quad (i = k) \\ \delta_{ik} &= 0 \quad (i \neq k) \end{aligned} \quad (2.5)$$

式(2.4)为 SAW 在非弹性介质中传播的克里斯托弗方程。由此方程可知，假设传播媒质材料的弹性刚度常数 c_{ijkl} 一定，那么沿任意方向 (l_1, l_2, l_3) 的波速和质点位移将轻易求出。假设系数行列式为零时，克里斯托弗方程必然会解，并且这个解不为 0。沿基片表面 $x_3=0$ 传播的声波，当波的传播方向一定时，即已知方向余弦 l_1 与 l_2 ，只需要求解 l_3^2 的三个根。在具有各向同性的基底材料中，弹性刚度系数存在一定关系，即

$$\begin{aligned} c_{11} &= c_{22} = c_{33}, c_{12} = c_{13} = c_{21} = c_{23} = c_{31} = c_{32}, c_{44} = c_{55} = c_{66} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \\ c_{14} &= c_{15} = c_{16} = c_{24} = c_{25} = c_{26} = c_{34} = c_{35} = c_{36} = c_{41} = c_{42} = c_{43} = c_{45} = c_{46} \\ &= c_{51} = c_{52} = c_{53} = c_{54} = c_{56} = c_{61} = c_{62} = c_{63} = c_{64} = c_{65} = 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

假设平面波沿 x_1 方向传播，此时 $l_1=1$ ， $l_2=0$ ， l_3 存在三组两两互为相反数的 6 个根，其中， $v_t = \sqrt{\frac{c_{44}}{\rho}}$ ， $v_l = \sqrt{\frac{c_{11}}{\rho}}$ 。

$$\begin{aligned} l_3^{(1)} &= -j \left(1 - \frac{v^2}{v_t^2} \right)^{\frac{1}{2}} = -l_3^{(4)} \\ l_3^{(2)} &= -j \left(1 - \frac{v^2}{v_t^2} \right)^{\frac{1}{2}} = -l_3^{(5)} \\ l_3^{(3)} &= -j \left(1 - \frac{v^2}{v_l^2} \right)^{\frac{1}{2}} = -l_3^{(6)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

式中， v_t 为各向同性介质中体切变波的波速； v_l 为各向同性介质中体纵波的波速。

当且仅当声表面波的能量集中在基片表面上时此方程才成立，也就是说，方程存在使用条件。对基片内部情况而言，当离表面无穷深处，波的质点位移为 0，从式(2.7)的结果可得，有且只有 $l_3^{(1)}$ 、 $l_3^{(2)}$ 、 $l_3^{(3)}$ 三个负根满足要求。

基片材料必然存在表面，即 $x_3=0$ ，因此，波方程的解必须符合基片表面的边界要求。