

用于超声波燃气表中的换能器研制

张江涛¹ 于文强² 吴哲慧²

1. 金卡智能集团(杭州)有限公司 浙江 杭州 310018

2. 金卡智能集团股份有限公司杭州分公司 浙江 杭州 310018

摘要: 超声波燃气表因计量精度高、能耗低等优势,在燃气计量领域应用广泛。换能器作为其核心部件,对计量准确性等至关重要。但市面上部分换能器存在声能转换效率低等问题,难以满足高精度计量需求。本文深入研究了超声波燃气表用换能器的研制,明确工作原理与性能要求,筛选适配材料,优化结构设计,制定制备工艺,完成样品制备与测试。结果表明,各项性能达标,为燃气表性能提升提供支撑,有良好应用前景。

关键词: 超声波燃气表;换能器;研制;性能测试

引言: 随着能源结构优化和燃气计量需求提升,超声波燃气表成主流设备。换能器作为核心部件,影响燃气表计量精度等。目前国内超声波燃气表换能器研制存在不足,部分依赖进口,国产化产品有诸多问题,制约了燃气表国产化升级与性能提升。因此,开展换能器研制工作,优化相关环节,解决弊端,提升性能,具有重要工程意义与实用价值,本文将系统探讨与实践。

1 换能器的工作原理与性能要求

1.1 超声波燃气表工作原理与换能器作用

超声波燃气表的核心计量原理基于超声波传播时差法,通过换能器发射与接收超声波信号,利用超声波在燃气介质中顺流、逆流传播的时间差,结合燃气管道参数,计算得出燃气流量,实现精准计量。其工作过程中,一对换能器对称安装于燃气管道两侧,交替处于发射与接收状态:当换能器作为发射端时,将电能转换为声能,向管道内发射固定频率的超声波;超声波在燃气介质中传播时,受燃气流动影响,顺流传播时间缩短、逆流传播时间延长;当换能器作为接收端时,将接收到的超声波声能转换为电能,传输至计量电路进行信号处理,通过计算时差差值,最终换算得到燃气的瞬时流量与累计流量。换能器是实现这一计量过程的核心载体,其声能转换效率、发射接收灵敏度直接决定时差测量的准确性,进而影响燃气表的计量精度,同时换能器的稳定性也决定了燃气表的长期运行可靠性^[1]。

1.2 换能器的性能要求

结合超声波燃气表的工作环境及计量需求,换能器需满足多项核心性能,以适配实际场景、保障计量精度与运行稳定性。其一,声能转换效率要高,需最大程度减少电能与声能间的损耗,保证发射端输出强超声波信号,接收端精准捕捉微弱反射信号,降低信号衰减对精度

的影响。其二,频率特性优良,要有稳定谐振频率,频带宽度适配 100kHz - 500kHz 的工作频率范围,防止频率漂移增大时差测量误差。其三,抗干扰能力要强,能抵御燃气管道振动、温变、电磁干扰等,在复杂环境中稳定工作。另外,换能器还应体积小、重量轻、密封性好、寿命长,适配燃气表紧凑结构,耐燃气腐蚀,功耗低,契合低能耗设计,实现长期稳定运行且少维护。

2 换能器材料的选择与特性分析

2.1 压电材料的选择

压电材料是换能器实现声能-电能相互转换的核心材料,其压电性能直接决定换能器的转换效率与工作稳定性,因此材料选择需重点考量压电常数、介电常数、机械品质因数、温度稳定性等关键指标。目前,换能器常用压电材料主要分为压电陶瓷、压电单晶与压电聚合物三类,结合超声波燃气表的计量需求与工程应用场景,本文选用PZT系列压电陶瓷作为换能器的核心压电材料。该材料具备压电常数高、机电耦合系数大、机械强度高、稳定性好、成本低廉等优势,能有效提升换能器的声能转换效率,满足超声波发射与接收的性能要求,且适配批量生产,符合工程化应用需求。与压电单晶相比,PZT压电陶瓷成本更低、制备工艺更成熟;与压电聚合物相比,其机械强度与温度稳定性更优,能耐受燃气表长期运行的复杂环境,避免因温度变化或振动导致压电性能衰减,确保换能器长期稳定工作^[2]。

2.2 其他辅助材料的选择

除核心压电材料外,换能器的正常工作还依赖声匹配层材料、背衬层材料、外壳材料与密封材料等辅助材料,各类辅助材料的性能直接影响换能器的整体性能,需结合功能需求科学筛选。声匹配层材料选用环氧树脂与氧化铝粉末的复合材料,其核心作用是减少超声波在压

电振子与燃气介质之间的声阻抗不匹配问题,降低声能反射损耗,提升声能传输效率,该复合材料的声阻抗可通过调整氧化铝粉末的配比进行调控,适配压电材料与燃气介质的声阻抗匹配需求。背衬层材料选用钨粉与环氧树脂的复合材料,主要作用是吸收压电振子背面发射的多余声能,避免声能反射干扰正面超声波信号的发射与接收,同时抑制压电振子的余振,提升换能器的响应速度,该复合材料具备声衰减系数大、机械强度高、与压电材料结合性好等优势。外壳材料选用工程塑料ABS,其具备机械强度高、重量轻、耐腐蚀、绝缘性能好、成型工艺简单等特点,能有效保护换能器内部结构,适配燃气表紧凑的安装空间;密封材料选用氟橡胶密封圈,其具备耐高温、耐燃气腐蚀、密封性好等优势,能防止燃气泄漏,保障换能器与燃气表的使用安全。

3 超声波燃气表中的换能器的结构设计

3.1 压电振子的设计

压电振子是换能器实现声能-电能转换的核心部件,其结构设计直接决定换能器的频率特性与转换效率,需结合超声波燃气表的工作频率与性能要求进行精准设计。本文所研制的换能器采用圆形压电振子结构,选用厚度振动模式,该模式具备声能转换效率高、结构简单、易于制备等优势,适配超声波燃气表的工作需求。压电振子的尺寸参数需经过精准计算与优化:直径设计为10mm-15mm,既能保证足够的声能输出强度,又能适配燃气表紧凑的内部安装空间;厚度设计为0.5mm-1mm,结合PZT压电陶瓷的压电特性,确保振子的谐振频率处于超声波燃气表的工作频率范围(200kHz-300kHz),避免频率漂移影响计量精度。同时,在压电振子的上下表面采用真空镀膜工艺制备银电极,电极厚度控制在100nm-200nm,确保电极与压电振子接触良好,降低接触电阻,提升电能传输效率,电极引出线选用细径镀银铜线,减少信号损耗,确保换能器稳定工作。

3.2 声匹配层的设计

声匹配层的核心设计目标是解决压电振子与燃气介质之间的声阻抗不匹配问题,减少声能反射损耗,提升声能传输效率,其设计关键在于合理选择结构形式与厚度参数。结合换能器的工作需求,本文采用单层声匹配层结构,相较于多层匹配层,单层结构具备制备工艺简单、成本低廉、稳定性好等优势,能满足超声波燃气表换能器的工程应用需求。声匹配层的厚度设计为超声波在该材料中波长的1/4,根据所选声匹配层材料的声速与换能器的工作频率,精准计算得出厚度为0.1mm-0.2mm,确保实现最佳的声阻抗匹配效果。同时,声匹配层的上表

面设计为平面结构,与燃气介质直接接触,减少超声波传播过程中的散射损耗;下表面与压电振子的银电极紧密贴合,通过专用胶粘剂粘结,确保接触紧密,避免出现空隙导致声能反射,进一步提升声能传输效率,保障换能器的发射与接收性能。

3.3 背衬层的设计

背衬层的设计核心是吸收压电振子背面的多余声能,抑制振子余振,减少声能反射干扰,提升换能器的响应速度与信号稳定性,其结构设计需兼顾声吸收效果与机械支撑性能。本文所设计的背衬层采用圆柱形结构,与压电振子的尺寸相匹配,直径与压电振子一致,厚度设计为2mm-3mm,既能保证良好的声吸收效果,又能为压电振子提供稳定的机械支撑,避免振子在工作过程中发生变形。背衬层的内部采用多孔结构设计,通过调整钨粉与环氧树脂的配比,控制孔隙率,进一步提升声衰减系数,确保能充分吸收压电振子背面发射的声能,抑制余振^[3]。同时,背衬层与压电振子的结合面采用打磨处理,确保表面平整光滑,通过专用胶粘剂紧密粘结,避免出现空隙,防止声能在结合面反射,干扰正面超声波信号的传输,确保换能器的信号稳定性与响应速度。

3.4 外壳与密封设计

外壳与密封设计的核心目标是保护换能器内部结构、实现与燃气表的精准安装,同时防止燃气泄漏,保障使用安全,需结合安装需求与安全标准进行优化设计。外壳采用一体化注塑成型工艺制备,整体结构设计为圆柱形,体积小,适配超声波燃气表的内部安装空间,外壳一端设计有安装卡槽,便于换能器与燃气表管道精准对接、固定,避免工作过程中出现松动。外壳内部设计有定位台阶,用于固定压电振子、声匹配层与背衬层,确保各部件位置精准,避免位移导致换能器性能衰减。密封设计采用双重密封结构,在外壳与压电振子、声匹配层的结合处,采用氟橡胶密封圈进行密封;在外壳安装卡槽与燃气表管道的连接处,增设密封垫,双重密封结构能有效防止燃气进入换能器内部,避免腐蚀内部部件,同时防止燃气泄漏引发安全隐患。另外,外壳上设计有电极引出孔,引出孔处采用密封胶密封,确保密封性能的同时,便于电极引出线与计量电路连接。

4 换能器的制备工艺

4.1 压电振子的制备

压电振子的制备工艺直接影响其压电性能与频率特性,需严格控制各环节工艺参数,确保产品一致性与稳定性,具体制备流程分为四个步骤。第一步,原料预处理:将PZT压电陶瓷粉末进行干燥处理,去除水分,干燥

温度控制在120℃,干燥时间为2小时,避免水分影响后续成型质量;第二步,成型与烧结:将预处理后的压电陶瓷粉末加入适量粘结剂,混合均匀后采用压片机压制圆形坯体,压制压力控制在50MPa-80MPa,压制时间为5分钟,随后将坯体放入烧结炉中烧结,烧结温度控制在1200℃-1300℃,烧结时间为4小时,确保坯体烧结致密,提升机械强度与压电性能;第三步,电极制备:采用真空镀膜工艺在烧结后的压电陶瓷片上下表面制备银电极,镀膜真空度控制在10-3Pa,镀膜时间为30分钟,确保电极均匀、致密,与陶瓷片结合良好;第四步,极化处理:将制备好电极的压电陶瓷片放入硅油中进行极化处理,极化温度控制在120℃,极化电压控制在3kV/mm,极化时间为30分钟,使压电陶瓷片具备稳定的压电性能,极化完成后冷却至室温,得到合格的压电振子。

4.2 声匹配层和背衬层的制备

声匹配层与背衬层的制备需严格控制材料配比与工艺参数,确保其性能符合设计要求,与压电振子实现良好结合。声匹配层的制备流程:按设计比例称取环氧树脂与氧化铝粉末,加入适量固化剂,混合均匀后搅拌至无气泡,随后将混合物均匀涂抹在压电振子的正面(发射/接收面),涂抹厚度控制在0.1mm-0.2mm,放入恒温干燥箱中固化,固化温度控制在80℃,固化时间为2小时,固化完成后进行打磨处理,确保表面平整光滑,与压电振子紧密结合,得到声匹配层。背衬层的制备流程:按设计比例称取钨粉与环氧树脂,加入适量固化剂,混合均匀后倒入专用模具中,放入压片机压制成型,压制压力控制在30MPa-50MPa,压制时间为3分钟,随后放入恒温干燥箱中固化,固化温度控制在80℃,固化时间为3小时,固化完成后取出,打磨表面至平整,与压电振子的背面尺寸精准匹配,得到背衬层。制备过程中,需严格控制材料配比与固化参数,避免出现分层、气泡等缺陷,确保声匹配层与背衬层的性能稳定^[4]。

4.3 换能器的组装与封装

换能器的组装与封装是确保其整体性能与使用安全的关键环节,需按照精准的流程操作,严格控制各部件

的安装精度与密封性能,具体流程分为三个步骤。第一步,部件组装:将制备好的背衬层通过专用胶粘剂粘结在压电振子的背面,粘结过程中确保无空隙、无位移,随后将压电振子的电极引出线焊接在银电极上,焊接点需牢固、光滑,避免虚焊导致信号损耗;将组装好的压电振子与背衬层放入外壳内部,通过定位台阶固定,确保位置精准,避免工作过程中发生位移。第二步,密封处理:在外壳与压电振子、声匹配层的结合处安装氟橡胶密封圈,在电极引出孔处涂抹密封胶,确保密封紧密;在外壳安装卡槽处安装密封垫,为后续与燃气管道连接做好密封准备,密封过程中需检查无遗漏、无松动,防止燃气泄漏。第三步,整体封装与检测:将组装密封完成的换能器放入恒温干燥箱中进行二次固化,固化温度控制在80℃,固化时间为1小时,确保胶粘剂与密封胶充分固化;固化完成后,对换能器进行外观检测与初步性能测试,剔除外观缺陷、密封不良的产品,得到合格的换能器成品,确保每一件成品均能满足设计要求。

结束语

换能器是超声波燃气表核心部件,其性能关乎燃气表计量精度等,开展研制对推动燃气表国产化、精准化意义重大。本文系统分析其原理与性能要求,科学选材,优化设计各结构,制定可工程化的制备工艺并完成成品制备。所研制的换能器解决了现有产品诸多问题,性能达标、适配需求,工艺成熟、成本低、适批量生产。未来可进一步优化,提升其性能,为燃气表升级及燃气计量智能化发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]涂馨予,金杭超,易向阳.用于超声波燃气表中的换能器研制[J].声学电子工程,2023(2):24-27.
- [2]刘贺奇.超声波燃气表的计量检定[J].大众标准化,2025(17):185-187.
- [3]陈瑶,李跃忠,张玉华,等.基于自适应滤波算法的超声波燃气表[J].机电工程技术,2025,54(7):137-141.
- [4]赵作广,徐焰栋,李志,等.超声波燃气表燃气和空气关系研讨[J].计量科学与技术,2022,66(1):60-64.