

DOI: 10.19333/j.mfkj.2017020010406

压缩空气泄漏检测在纺织领域的应用

袁群, 王力平, 颜苏芊

(西安工程大学 陕西 西安 710048)

摘要: 为提高纺织领域压缩空气泄漏检测性能, 满足良好的检测效果, 以便为纺织企业深入了解压缩空气泄漏提供参考。将基于基准流量、超声波及红外技术应用到纺织领域压缩空气泄漏检测中, 结合管道模型对泄漏在理论层面进行评估, 针对喷气织机结合空压系统对整体泄漏进行检测分析。通过对比发现: 每种形式的检测方法都有其自身局限, 在某些情况下单一的检测方法并不能满足检测要求, 因此将多种检测方法过程有机结合, 可以实现优势互补。

关键词: 纺织领域; 压缩空气; 泄漏检测; 流量计; 超声波; 红外技术; 管道模型; 有机结合

中图分类号: TS 103.337.11 **文献标志码:** A

Application of compressed air leak detection in textile industry

YUAN Qun, WANG Liping, YAN Suqian

(Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: In order to improve the detection performance of the textile field leakage of compressed air, meet the good detection effect, so as to understand the textile enterprises to provide reference for compressed air leakage. Based on the datum flow, ultrasonic and infrared technology applied to the field of textile air leak detection, combined with pipeline model to evaluate leakage at the theory level. From jet loom combined with air pressure system for leak detection analysis as a whole, it found that each form of detection method had its own limitations, in some cases a single detection method cannot satisfy the detection requirements, so the organic combination of a variety of methods in the process of detection, it made them had complementary advantages.

Keywords: textile industry; compressed air; leak detection; flowmeter; ultrasonic; infrared technology; pipeline model; organic combination

压缩空气是由空压机将电能转换成机械能, 再将机械能转换成高压风能^[1], 供纺织生产使用。然而生产现场压缩空气泄漏普遍存在, 泄漏量占压缩空气总产气量的 20% ~ 30%^[2]。泄漏主要发生在过滤器、调压箱、储纬器、气路、电磁阀、螺纹连接及管网节点等处, 也就是说压缩空气输送及使用过程中由于零部件老化及破损引起泄漏^[3]。泄漏不仅使压缩空气管网压力下降, 造成运行损失, 而且产生能耗。压缩空气的能耗表现在耗电, 由泄漏压缩空气的耗电占纺织厂总耗电量的 35%, 甚至更高。由此可见, 压缩空气泄漏检测与评估, 对于纺织企业减

少及消除泄漏进而达到节能目的具有重要意义。

本文通过分析压缩空气泄漏检测现状, 提出将流量计与超声波及红外技术结合应用到纺织领域, 对比理论公式, 讨论压缩空气泄漏情况。

1 压缩空气泄漏检测现状

压缩空气泄漏是压缩空气系统能量损失的主要来源, 为了减少泄漏, 提高系统能量效率, 有必要对泄漏进行检测。目前国内外已经对石油、天然气和其他气体(丙烯、乙烯)的泄漏提出了检测方法, 主要针对管道泄漏, 通过检测管道泄漏信号, 对泄漏进行评估。常用的检测方法主要分为硬件和软件 2 种^[4], 其中, 基于硬件的泄漏检测方法有: 电缆检测法、管内探测球、示踪检测法、分布式光纤检测法等; 基于软件的检测方法有: 负压波法、压力梯度法、

收稿日期: 2017-06-08

第一作者简介: 袁群, 硕士, 研究方向为空压系统节能与优化。通信作者: 王力平, E-mail: 87341105@qq.com。

实时瞬态模型法、统计决策法等^[5]。根据检测形式分为管道内检测及管道外检测,其中,管道内检测法^[6]基于磁通、超声、涡流、录像等技术在线内进行检测,主要有:泄漏噪声探测法、系统式漏磁探测法等;管道外检测法有:红外热成像、嗅觉传感器、质量或体积平衡法、应力波检测法、声波检测法等^[7];

根据参数变化分为基于运行参数变化的检测方法和管壁运行参数变化的方法^[8]。此外,对于明显的泄漏,利用肥皂水等发泡剂以及手感也可检测。综合现有的检测形式,检测方法可以归纳为硬件、软件及生物检测3种类型。管道泄漏检测方法分类见表1。

表1 管道泄漏检测方法分类

方法类型	优点	缺点
电缆检测法	效果好、定位误差小	不能重复利用、价格相对昂贵
管内探测球	检测相对准确、定位效果好	检测时间过长、不能在线检测、易堵塞
示踪检测法	操作简单、定位精准度高	检测时间长、不易被检测
分布式光纤检测法	检测准确、具有强干扰性、易安装、远距离传感	价格稍微昂贵
传感器	实时检测、检测灵敏、精确	有待实践检验
流量计	精度高	安装拆卸麻烦、量程比小
负压波法	实时性强、响应速度快	定位较差、对于较小泄漏灵敏度不高
压力梯度	在线检测、价格合理	定位误差较大、依赖性大
实时瞬态模型	实时检测、效果好	依赖数学模型、计算复杂
统计决策法	操作简单、不受管道结构限制	对小泄漏无法检测
生物	肥皂水等发泡剂 感官知觉(听觉、视觉、嗅觉等)	操作简单易行 依赖于检测人员经验、耗时费力、检测周期长、精度不高

由表1可以看出,每种形式因各自特定属性,其应用范围及环境都有所局限。泄漏检测的目的是减少能耗满足节能要求,避免泄漏物质对人员安全及环境造成危害。因此一种高效理想的检测方法应满足适用性、准确性、灵敏性、实时性以及定位精确且容易维护等要求^[9],而针对压缩空气泄漏,国内外文献却少有提及。由于气体相似的物理性质及使用要求,压缩空气泄漏检测的处理方法可等同于油气等其他工业气体。

纺织车间由于环境等因素的限制,部分检测方法并不适用,在某些较为复杂的情况下,单一的方法不能完全检测到泄漏。结合纺织领域压缩空气的使用要求及特性,引入流量计、超声波及红外技术结合对泄漏进行检测,其中,流量计对泄漏定量,超声波及红外技术对泄漏定位。针对纺织领域压缩空气泄漏问题,本文以喷气织机为例对泄漏进行检测。

2 流量计量

2.1 概念

压缩空气的流量测量是分析和研究压缩空气系统的基础。目前现有的流量计主要分为串联接入式和并联接入式2种,其中,涡街、孔板和热式流量计属于串联接入式,流量计类型见表2。泄漏检测仪相比传统流量计,测量方便简单,因此本文利用泄漏检测仪对纺织厂压缩空气泄漏进行定量

分析。

表2 流量计类型

接入方式类型	特点
串联接入式	涡街流量计 孔板流量计 热式流量计
并联接入式	泄漏检测仪

2.2 测量原理及方法

泄漏检测仪采用基于并联接入式管道气体测量方法,测量回路包括基准流量产生回路和压力测量回路2部分,整体并联接入被测设备供气管路上^[10]。导入基准流量,根据压缩空气压力下降速度的变化得到气动回路容积^[11],回路得到压力及压力微分值。泄漏导致气路管道压力下降,根据基准流量发生前后管路中压力变化,利用气体状态方程得到泄漏量。

喷气织机压缩空气的流向见图1。压缩空气通过管网输送至气包,过滤器滤除水、油及灰尘后送至调压箱,不同部件对压缩空气的压力需求不同,经过调压后再分别送至储纬器、主喷嘴及辅喷嘴,完成引纬。

测量步骤为:

①关闭气阀,将泄漏检测仪用PU管接入到喷气织机供气管路的闲置接口。

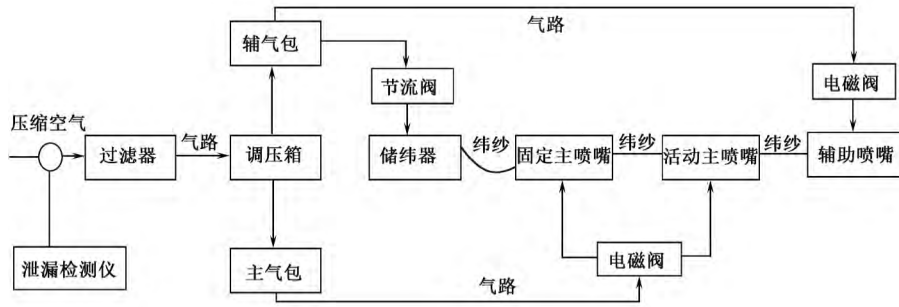


图1 喷气织机压缩空气流向

②打开气阀开启泄漏检测仪,压力稳定后此时压力即为当前管路压力。

③堵住固定主喷嘴及活动(摆动)主喷嘴,关闭气阀,待压力均匀下降时按“开始”键,开始泄漏测量。

需要注意的是,在对喷气织机引纬机构进行泄漏检测时,选择停车的织机。测量时为避免误差,对每台织机采取多次测量求均值的方法。

3 超声波

3.1 概念

超声波是短波,由各种形式的振动摩擦产生,在弹性介质中沿直线传播,符合光学规律,传播时在不同的界面上具有反射特性^[12]。

超声波检测主要基于声学 and 超声信号 2 种方法。压缩空气泄漏产生噪声,纺织车间环境嘈杂,较小泄漏往往不易被察觉,通过监听声音,对频谱和时域进行分析,对比样本后发现泄漏。管材与漏点之间存在声学性能差异,这种差异影响超声波传播波形的反射情况和往返时间,当发生泄漏时,超声波信号会发生变化,通过分析超声波在被检测工件上传播特性来评估泄漏。用有无泄漏位置反射波信号来判断是否发生泄漏,反射波信号出现的具体位置来确定泄漏方位,反射回波的幅值确定漏点的大小^[13]。

按超声波信号来源,检测方法分为主动和被动 2 种^[14]。主动超声波检测是通过发射器产生超声波,通过一定的方式进入被检测工件内部,之后发射器再接受反射波进行处理;而被动超声波信号是由气体泄漏时产生,通过过滤和转换接收到信号。超声波检测分类见表 3。

表3 超声波检测分类

分类	说明
信号种类	噪声 频谱及时域
	超声波信号 反射、散射及投射波
信号来源	主动 用于量化泄漏
	被动 用于定位泄漏

3.2 检测原理及方法

采用超声波扫描枪,基于被动超声波检测方法。当压缩空气发生泄漏时,压缩空气产生的紊流在泄漏处产生超声波^[15]。超声波是高频短波信号,其强度随传播距离的增加而衰减,使超声波具有指向性。扫描枪上面板显示被测点的声波信号,其强度以光柱节数表示,光柱节数越多表示泄漏点在扫描枪指向的方向上存在的可能性越大。

测量步骤:

①将检测区域细化,从喷气织机供气端向使用端逐一进行检测。

②通过调整仪器灵敏度对泄漏进行确定。

③检测到泄漏点时,对泄漏位置进行标注,以便修复及复检^[16]。

需要注意的是,检测时需堵住喷气织机的主、辅喷嘴,避免空气流影响检测结果。

4 红外技术

4.1 红外检测原理

红外检测基于物体的热辐射性。根据辐射定律可得任何物体红外线的强度与其自身温度高低有直接关系,温度越高,辐射能力越强^[17]。红外线的辐射特性是红外成像的理论依据和检测技术的重要物理基础。管道内压缩空气的温度与周围环境温度不同,泄漏发生时气体与环境发生热传导。压缩空气热导率与周围环境不同,将直接引起温度梯度变化而引起泄漏表面处温度不同,通过红外热像仪记录表面温度变化进而推测压缩空气是否存在泄漏。

4.2 红外热像

红外热像检测技术是利用红外辐射原理获取检测对象的表面温度场分布,实现对被检对象热状态成像^[18]。热像图与物体表面的热分布场相对应,通过分析温度场的异常确定泄漏情况。根据加热与否,红外热像检测方法分为主动和被动 2 种,红外热像检测见表 4。

表4 红外热像检测

分类	加热	对象	优点
主动法	是	冷热水或空气等	测量图像直观;非接触测量;温度分辨率高;测量迅速灵敏
被动法	否	医学、制造、交通监控及气体泄漏等	

主动方式要求利用热激励源加热待测物体,使其失去热平衡,对待测物体在其温度场分布不均匀且处于导热过程时进行红外检测的方法。按热激励形式的不同,主动法分为脉冲辐射检测、阶跃辐射检测、调制辐射检测和超声红外检测等,而被动方法是通过相关光敏元件接收待测物自身向外发射的红外辐射,通过分析红外辐射所携带的待测物特征信息来判断泄漏,一般用于本身温度与环境不同的物体^[19]。因此,针对纺织领域压缩空气泄漏,采用红外热像被动检测法进行检测。

红外热像被动检测检测过程见图2。红外辐射分布图客观存在,是红外成像的目标,由物体和背景的红外辐射,以及物体表面不同点的红外辐射构成;光学系统将目标的辐射分布图会聚在一个确定的像面上;通过红外成像探测过程将红外辐射分布转变为电信号或视频信号;输出的电信号或视频信号经放大处理在屏幕上显示。

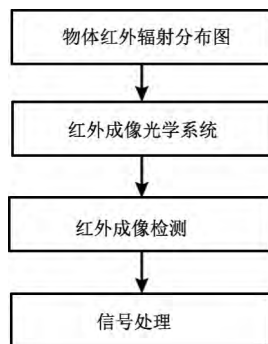


图2 红外热像被动检测过程

测量步骤:

①将红外热像镜头对准测试区域,选取合适的工作距离。

②调节焦距保证待测对象完整出现在镜头中。

③开启热像仪,分析热像图。

需要注意:测量时需消除背景光干扰以保证测量的准确性,多次测量,通过对比确定泄漏情况。

5 模型法

5.1 压缩空气管道瞬变流动模型

气体在管道内流动时,沿流动方向压力、流速、温度和密度等参数都在发生变化,为了更好地描述

这些参数之间的关系,利用质量平衡、动量平衡和能量平衡建立管道内气体瞬态流动模型。假设管内气体为一元流动^[20],管路任一截面上所有参数看作是均匀的;管道视为刚体,忽略管壁的膨胀,对一段管线,其倾斜度视为固定。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + g \rho \sin \theta + \frac{\lambda}{d} \frac{v^2}{2} \rho = 0 \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho v h)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(u + \frac{v^2}{2} \right) \right] + g \rho v \sin \theta + \frac{4K(T - T_0)}{d} = 0 \quad (3)$$

气体状态方程:

$$\rho = \frac{P}{ZRT} \quad (4)$$

气体焓方程:

$$h = f(p, T) \quad (5)$$

式中: t 为时间; ρ 为气体密度; v 为气体流速; μ 为比内能; Z 为气体压缩因子; R 为气体常数; h 为比焓; T 为气体温度; T_0 为环境温度; P 为管道中气体压力; g 为重力加速度; λ 为摩擦阻因数; K 为传热系数; d 为管径。

5.2 压缩空气管道泄漏模型

通常将压缩空气管道泄漏视为孔口泄漏,不同泄漏程度下,泄漏孔平均直径不同,泄漏工况也不同。根据不同泄漏程度,分别对小孔泄漏、管道裂缝及大孔泄漏进行分析。为了便于计算,将气体在管道内流动视为绝热流动;泄漏点处为等熵流动;泄漏过程看作一维流动;遵循理想气体的运动规律^[21]。由气体状态方程、泊松方程及连续性方程得到孔口泄漏流量。

5.2.1 小孔泄漏

小孔泄漏量与压缩空气泄漏过程中流速是亚音速还是音速有关,判断依据为临界压力比。

若 $\frac{P_a}{P_2} > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$, 小孔流速为亚音速流动,此

时泄漏量为:

$$Q = C_d A P_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{M}{ZRT_2} \left[\left(\frac{P_a}{P_2} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_a}{P_2} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (6)$$

若 $\frac{P_a}{P_2} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$, 小孔流速达到音速,将

$\frac{P_a}{P_2} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ 代入式(6) 此时泄漏量为:

$$Q = C_d A P_2 \sqrt{\frac{Mk}{ZRT_2} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (7)$$

5.2.2 管道裂缝

当压缩空气泄漏孔径比大于90% 此时泄漏为管道裂缝^[22] 其泄漏量为:

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2kM}{ZR(k-1)} \frac{T_2 - T_1}{\left[\left(\frac{T_1}{P_1}\right)^2 - \left(\frac{T_2}{P_2}\right)^2\right]}} \quad (8)$$

5.2.3 大孔泄漏

根据压缩空气在管道内和泄漏孔口处流动状态不同 对大孔泄漏进行以下3种情况^[23] 分析:

管道内亚临界流、孔口临界流 此时泄漏量为:

$$Q = C_d A P_2 \sqrt{k \frac{M}{ZRT_2} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (9)$$

管内孔口均为亚临界流 此时泄漏量为:

$$Q = C_d A P_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{M}{ZRT_2} \left[\left(\frac{P_a}{P_2}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_a}{P_2}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} \quad (10)$$

管内孔口均为临界流 此时泄漏量为:

$$Q = C_d A P_1 M_a \sqrt{\frac{M}{ZRT_1} k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (11)$$

式中: P_1 、 T_1 为压缩空气管端入口处的压力及温度; P_2 、 T_2 为泄漏前的压力及温度; k 为绝热指数; M 为气体物质的量; C_d 为孔口泄漏系数; A 为泄漏口面积; P_a 压缩空气压力; M_a 为马赫数。

5.3 泄漏位置及压力

当压缩空气发生泄漏时 泄漏位置处压力和流量变化以声速向管道两端传递 通过建立参数变化和传播模型 根据泄漏位置参数变化可以对泄漏位置进行估算^[24]。由于泄漏时压缩空气处于瞬变 流动状态最终又会达到新的稳态 因此采用管道泄漏稳态流动关系进行泄漏位置的定位计算。以泄漏位置将管道分界成2个管段 泄漏位置为:

$$L_e = \frac{\frac{P_1^2 - P_2^2}{G_1^2 RT} - 2 \ln \frac{P_1}{P_2}}{\frac{\lambda}{d}} \quad (12)$$

$$P_2 = \sqrt{\frac{\frac{\lambda L}{d} + 2 \ln \frac{P_1}{P_4} + \frac{P_4^2}{G_2^2 RT} - \frac{P_1^2}{G_1^2 RT}}{\frac{1}{G_2^2 RT} - \frac{1}{G_1^2 RT}}} \quad (13)$$

式中: G 为管内压缩空气质量流量; G_1 为泄漏位置上游质量流量; G_2 为泄漏位置下游质量流量; P_4 为

管道终点压力; L 为管段全长; L_e 为管道有效长度。

管道内压缩空气流动状态分为稳态和瞬态2种形式 流动方式差异见表5。

表5 管道内压缩空气流动状态

流动状态	定义	特点
稳态	任一点参数仅与该点位置有关 与时间无关	根据守恒方程得到孔口泄漏流量 根据等温定位法得到泄漏位置
瞬态	与位置和时间有关 又称瞬变流动	流动过程复杂 无法稳定定位

以压缩空气管道泄漏稳态模型为基础 利用压力及流量参数关系推导出孔口流量及定位公式。4种检测方法对比见表6。

表6 4种检测方法对比

类型	原理	形式	作用	处理方法	特点
基准流量	压力变化	串联	定量	多次测量	求均值
		并联			
硬件	超声波	信号强度	主动	定量	无损检测
		噪声强度	被动	定位	
	红外	温度变化	主动	定量	
软件	模型	参数变化	稳态	定量定位	建立准确的理论管道模型 模拟
			瞬态	描述流动状态	

注: 历史法为采用同一种测试方法从同一角度对(超声波、红外)信号强度的变化进行分析; 比较法为在一定时期内 记录并比较同一检测对象的变化趋势。

6 结论

①压缩空气泄漏在纺织领域普遍存在 泄漏主要分为管路输送及连接部件的泄漏及使用点设备在使用过程中随零部件老化及破损造成的泄漏2类 泄漏造成的能耗损失巨大。然而目前针对纺织领域压缩空气泄漏检测方法研究较少 根据气体相似的物理特性及使用要求 将压缩空气泄漏检测等同于油气及其他工业气体处理。

②检测方法主要基于硬件、软件及生物3种。根据纺织领域压缩空气的使用特性及要求 引入泄漏检测仪、超声波扫描枪及红外热像仪并结合管道泄漏模型对泄漏进行评估。以喷气织机为例进行检测 对比发现 每种方法都存在自身的局限 单一的泄漏检测方法难以满足检测要求 因此将其有机结合 使多种方法优势互补 从而提高检测性能。

③温度、流量、压力及定位是过程控制中的4个参数 检测方法基于参数变化又以参数作为测量结果。利用泄漏检测仪对泄漏定量时 采取多次测量求均值对数据进行处理; 利用超声波扫描枪和红外

热像仪对泄漏定位时,采用历史法及比较法,即用同一种测试方法从同一角度对信号强度的变化进行分析的历史法,及在一定时期内,记录并比较同一检测对象变化趋势的比较法。

④基于基准流量、超声波及红外技术的检测方法属于无损检测,也就是在不损伤被测对象的前提下,通过检测被测对象内部缺陷或结构异常所引起的变化,进而了解及评价泄漏。压缩空气管道模型是管道泄漏检测定位的基础,因此利用模型法对泄漏在理论层面评估时,建立准确的管道模型尤为重要。

⑤针对纺织领域压缩空气的泄漏问题,以纺织车间喷气织机为例对其引纬机构进行泄漏检测分析,结合空压系统对整体泄漏进行评估。通过有效检测,对纺织企业认识泄漏,进而减少及消除泄漏以满足节能要求具有重要意义。

参考文献:

- [1] 陈才发, 华优基. 压缩空气系统的检漏与节能[J]. 通用机械, 2015(3): 61-63.
- [2] 秦宏波, 胡寿根, 闵圣恺. 压缩空气系统泄漏量测定方法及控制技术[J]. 流体机械, 2006(10): 41-44.
- [3] 蔡茂林. 压缩空气系统的能耗现状及节能潜力[J]. 中国设备工程, 2009(7): 42-44.
- [4] ELLUL I R. Advances in pipeline Leak Detection Techniques [J]. Pipes and Pipelines International, 1989, 34(3): 7-12.
- [5] 喻勇. 红外热成像管道检测方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015: 3-5.
- [6] HAMCED A, MALHOTRA V N. Detection of leak from process pipes [J]. Pipes and Pipelines International, 1999, 44(5): 23-32.
- [7] 袁朝庆, 庞鑫峰, 刘燕. 管道泄漏检测技术现状及展望[J]. 大庆石油学院学报, 2006(2): 76-79.
- [8] 吴欣明, 郝晓军. 基于混沌的超声波管道泄漏检测系统研究[J]. 微计算机信息, 2009(1): 312-314.
- [9] 章品书. 基于模型的天然气管道泄漏检测技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2006.
- [10] 黄亮, 苏智勇, 蔡茂林. 基于压力波传送的管道气体流量测量方法[J]. 机床与液压, 2008(12): 138-140.
- [11] 蔡茂林. 基准流量气体泄漏检测: 101363767A [P]. 2009-02-11.
- [12] 林铁. 超声波检测技术的应用[J]. 中国设备工程, 2012(7): 42-44.
- [13] 张鹏, 蒲正元. 管道缺陷漏磁和超声波检测数据的对比分析[J]. 中国安全科学学报, 2014(10): 113-119.
- [14] DUDI Ć S. Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography [J]. Measurement, 2012, 45(7): 1689-1694.
- [15] 王涛, 王东颖, 范伟. 气体泄漏检测新方法的研究进展[J]. 液压与气动, 2015(10): 1-11.
- [16] 潘志. 压缩空气泄漏评估[J]. 通用机械, 2013(8): 40-42.
- [17] 孙春庆. 钢板及铝板红外探伤的定量化研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2011.
- [18] 郭天太. 红外热成像技术在无损检测中的应用[J]. 机床与液压, 2004(2): 110-111.
- [19] 邓昌海. 金属管常见缺陷的红外无损检测研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- [20] 黎洪珍. 天然气集输管网稳动态仿真模拟基本原理及应用探索[J]. 天然气与石油, 2001(3): 3-7.
- [21] 桑博. 长输天然气管道泄漏扩散的数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [22] 赵金辉. 燃气管道泄漏检测定位理论与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [23] 侯庆民. 燃气长直管道泄漏检测及定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [24] 孙良. 基于模型的油气管道泄漏检测与定位方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.