doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20250022

钨铼热电偶性能退化及自诊断方法

陈春华[1]，张梦琳[1]，杨英华[1]，王魁汉[2]
（1. 东北大学 信息科学与工程学院，辽宁 沈阳 110819；2. 沈阳东大传感技术有限公司，辽宁 沈阳 110179）

摘 要：热电偶是工业领域中应用广泛的一种温度传感器,其自身材料成分及性能对温度测量结果的准确性有直接影响,在不借助标准仪表等外部设备的情况下,难以进行性能退化和准确程度的验证. 本文提出了一种新的热电偶性能退化度量方法,采用智能变送器在热电偶正常测温工作过程中自动记录温度及其内阻值,进而利用内阻及其扩展特征对热电偶的退化性能指标建模. 通过探究内阻与热电偶健康状态之间的关系获得健康因子,实现运行状态的检测与自诊断,同时对热电偶的剩余使用寿命进行预测,为进一步实现带寿命预测等功能的智能热电偶温度测量仪表奠定良好的基础.

关 键 词：热电偶；智能变送器；性能退化；自诊断；健康因子
中图分类号：TH 811 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026(2026)04-0008-08

Performance Degradation and Self-diagnosis Method of Tungsten-Rhenium Thermocouple

CHEN Chun-hua[1], *ZHANG Meng-lin*[1], *YANG Ying-hua*[1], *WANG Kui-han*[2]
(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shenyang Dongda Sensor Technology Co., Ltd., Shenyang 110179, China. Corresponding author: YANG Ying-hua, E-mail: yhyang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Thermocouples are widely used temperature sensors in the industrial field. The material composition and performance of thermocouples directly affect the accuracy of temperature measurements. Verifying the performance degradation and accuracy is challenging without the assistance of external equipment, such as standard instruments. Therefore, a novel method for assessing thermocouple performance degradation was proposed. The intelligent transmitter automatically recorded both the temperature and internal resistance during the normal temperature measurement process of thermocouples. The degradation performance of the thermocouple was modeled by analyzing the internal resistance and its extended characteristics. By exploring the relationship between internal resistance and the thermocouple's health status, the health index could be derived, enabling the detection and self-diagnosis of the thermocouple's operational status and the prediction of its remaining useful life. This approach lays a solid foundation for the development of intelligent thermocouple temperature measurement instruments with life prediction and other functions.

Key words: thermocouple; intelligent transmitter; performance degradation; self-diagnosis; health index

随着微电子技术的发展,学者提出智能传感器的概念[1],开始研究集自诊断及信号采集、处理、交换等功能于一体的新型集成化智能仪表[2]. 近年来,不少学者加入该领域的研究. Mukhopadhyay等[3]探讨了智能传感器技术的研究进展及应用前景. 殷毅[4]研究了MEMS、CMOS、光谱学等智能传感器的基本发展情况. Xiao等[5]设计了一款用于智能可穿戴设备的双模式压力-温度传感器,具有优异的分辨率和稳定性. Singh等[6]分析讨论了智能物联网传感器在高

收稿日期：2025-03-17
基金项目：国家自然科学基金资助项目(62073062)；2025"东大传感"大学生科技创新基金资助项目.
作者简介：陈春华(1967—),男,辽宁沈阳人,东北大学讲师.
通信作者：杨英华,E-mail:yhyang@mail.neu.edu.cn.

速公路数字化和脆弱道路安全方面的应用.智能传感技术是智能制造和物联网的先行技术,在制造业智能化转型升级过程中具有非常重要的意义.

温度是生产生活中需求最多的热工参数之一.随着装备制造业、热处理行业的发展,各行各业对测温精度、准确度的要求越来越严格[7].研究人员为减小热电偶的测量误差,往往从提升制作工艺、外加保护套管、优化测量方案等角度进行改进,如Assumpcao等[8]对材料和工艺进行改进,设计了具有增强热灵敏度的柔性硅基热电偶.也有学者开展了在线诊断热电偶是否失效的研究.Jun等[9]提出一种在线原位校准的内置自检方案.Ulanovskiy等[10]开发了一种高温校准装置,能够在一次操作中校准多个接触式热电偶.

是否可以使热电偶在提供温度检测信号的同时还能提供信号的可靠性信息? 是否能够不借助其他标准仪器实现热电偶健康状态的自诊断? 如何判断何时应更换某一热电偶? 这一系列问题的解决,将是提升热电偶测温智能化程度的重大进步.基于此,本文将热电偶内阻作为其性能退化指标,在明确热电偶使用寿命定义的基础上,结合大量针对钨铼热电偶的实验研究,提出了能够有效表征热电偶性能退化的健康因子(health index,HI)指标,并基于健康因子探究热电偶自诊断的方法以及剩余使用寿命(remaining useful life,RUL)预测方法.为提升热电偶智能化检测能力、实现其自诊断与寿命预测提供理论基础和实践指导.

本文分析了热电偶的性能退化原因,给出了基于允许误差的热电偶使用寿命终点定义;提出了基于内阻的研究思路,并给出了基于自编码网络的健康因子模型,基于健康因子的自诊断方法,以及基于长短时记忆神经网络的寿命预测模型.设计了实验系统获取钨铼热电偶性能退化数据,并利用数据验证了基于内阻的性能退化研究可行性,以及热电偶自诊断方法和寿命预测模型有效性.

1　预备知识

1.1　热电偶工作原理

热电偶是一种温度传感器,其A、B电极在温度T下产生的电动势$E_{AB}(T)$与热电极材料和接触点温度有关.

$$E_{AB}(T)=\frac{kT}{e}\ln\frac{N_A}{N_B}. \tag{1}$$

式中:k为玻尔兹曼常数;e为元电荷;T为接触处的温度;N_A,N_B为温度T下电极A和B的电子密度.

国际电工委员会规定了标准热电偶的电极材料,并给出了各自的分度表[11].

钨铼热电偶作为众多热电偶类型之一,其热电极丝熔点高(3 300 ℃),在非氧化性气氛中表现出良好的化学稳定性,电动势大且灵敏度高,具备较高的性价比,因此在许多场合可替代贵金属热电偶作为温度传感器.然而,在氧化性气氛中,电极易发生氧化,其正负极稳定性的差异与钨铼合金的氧化行为密切相关.为了确保其正常使用,通常需要采用致密的保护管将其与氧气隔离.

1.2　热电偶的性能退化

热电偶在各种不同的工业现场使用时处于多种不同的氧化/还原气氛中,可以采用保护管等措施进行防护,但随着时间推移,难免会发生化学反应,造成电极材料成分的变化,热电特性及性能也会发生相应变化[12-13].

由金属或合金构成的热电偶在高温环境下晶粒逐渐长大,部分元素向晶界扩散,并同周围环境中的气体发生反应,出现一定程度的劣化[14].这些变化会影响热电偶测温的准确性,最终使其无法满足测量精度等级要求而失去仪表功能,这就是热电偶的性能退化过程.

标准热电偶的电极材料不同,其稳定性(材料成分发生变化的难易程度)也不同.如分度号为B、S、K等金属或合金高温氧化速度慢,更稳定耐用.而分度号为C的钨铼热电偶则比较容易发生高温氧化.钨铼热电偶氧化到一定阶段后会发生电动势突变,这不是合金元素选择性氧化引起的成分变化,而是某一极因氧化使钨铼合金完全变成氧化物.钨铼合金破坏性氧化遵循一种开裂线性氧化规律,即氧化形成开裂、疏松的氧化物层难以抑制氧的扩散,使氧化反应发生在金属与氧化层界面上.铼对氧的亲和力远不及钨,因而在氧化过程中不会发生铼的选择性氧化,氧化层均是由钨和铼的氧化物混合而成.随着氧化过程的进行,合金丝的截面不断收缩,但成分不发生变化,直到最终完全氧化后,材料的性质发生根本变化,与之相关的热电特性也完全改变,从而导致钨铼热电偶电动势的突变[15].

作为工作中的检测仪表,热电偶的退化速度无论快慢,均难以直接得知.在实际应用中,无法通过实验手段监测材料成分的变化.因此,目前除了离线标定和依赖人工参与的在线校准方法以外,无法知道热电偶性能是否退化以及退化程度如何.

1.3 热电偶使用寿命终点定义

按照GB/T 30429—2013《工业热电偶》标准,热电偶型式检验内容包括外观、常温绝缘电阻、热响应时间、允差、热电动势稳定性等7项指标,在应用过程中,其他指标退化速度都较慢或对测量精度影响极小,而测温仪表关键指标主要是允差.因此,本文提出基于允差的热电偶使用寿命定义,将测量误差超出允差点作为热电偶寿命终点(失效点),即当被测热电偶测温值与标准热电偶测温值两者的偏差超过规定范围时作为寿命终点.

对于出厂检定合格的检测仪表,热电偶在使用过程中测量误差超差主要可归纳为两类:其一为极端情况,即断偶,这种故障通常容易判断,且部分控制系统已设计有断偶保护机制;其二为热电偶仍能输出合理信号,但测量值不准确.后者在实际应用中较难被及时识别,更容易导致控制系统根据错误的反馈值进行控制决策,最终导致产品质量不合格甚至生产事故等损失.

2 钨铼热电偶性能退化及自诊断方法

2.1 基于热电偶内阻的性能退化研究思路

热电偶的性能退化呈现出由量变到质变的渐进过程,准确预测其在线性能变化依赖一个与退化过程紧密相关的参考变量.根据热电偶测温原理,热电特性受温度和电极材料影响,排除安装误差后,性能退化的主要原因可归结为电极材料的变化.工业热电偶材料成分变化时,其内阻也会发生变化.根据标准热电偶的性能属性,正常工作状态下,热电偶的内阻值可通过平均温度电阻率进行计算.因此,正常状态下热电偶内阻值位于一个相对稳定的区间内,不会无限增大.基于此,本文提出将热电偶自身内阻信号作为性能参考变量,以实现对其退化过程的有效监测与自诊断:

1) 在智能变送器中设计热电偶内阻测量回路,在检测电势信号的同时检测电阻信号;

2) 结合温度偏差信号,通过对内阻进行特征提取和退化建模,给出反映其退化过程的健康因子,从而实现热电偶的自诊断目标;

3) 使用深度学习方法对内阻退化特征建模,预测热电偶全周期的剩余使用寿命.

前期研究结果表明,传统几大类标准热电偶材料较稳定,退化实验时间过长.因此,本文选择了材料更容易氧化的C型钨铼热电偶(钨铼5-钨铼26)开展实验.

2.2 热电偶健康因子的构建

1) 基于电阻值扩展的多维特征. 实验证明热电偶内阻与其性能退化有很强的相关性,但单一电阻信息还不足以定量评估热电偶的健康状态.本文提出将电阻特征扩维生成基于电阻信号的多维特征,将内阻增量r_{d}和内阻增长率r_{p}作为扩充特征:

$$r_{\mathrm{d}}(t)=r(t)-r(t-1), \tag{2}$$

$$r_{\mathrm{p}}(t)=\frac{r(t)-r(t-1)}{r(t-1)}. \tag{3}$$

式中:$r(t)$为t时刻的内阻;$r(t-1)$为$t-1$时刻的内阻;$r_{\mathrm{d}}(t)$为t时刻内阻增量;$r_{\mathrm{p}}(t)$为t时刻内阻增长率.

2) 基于单层自编码网络构建健康因子.作为表征退化性能的指标,单变量描述是最为直观且便于判断的方式.鉴于自编码网络(autoencoder, AE)[16]具有无监督自学习的特点,本文提出了基于单层自编码神经网络的健康因子模型,如图1所示,从多维电阻特征信息中提取能够有效描述热电偶退化情况的健康因子指标.

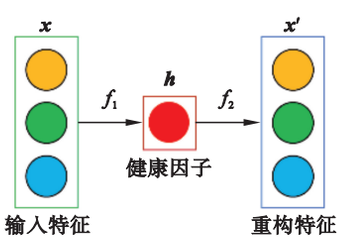


图1 自编码网络构建健康因子

Fig. 1 Autoencoder network for health index construction

图1中,自编码网络结构由编码器和解码器两部分组成.编码器对输入数据进行特征提取,解码器将提取到的特征重构为原始数据.给定输入$\boldsymbol{x}=\{x_i\}_{i=1}^{N}\in\mathbf{R}^{N\times d}$,其中$N$为样本个数,$d=3$为输入特征维数.则编码器输出$\boldsymbol{h}\in\mathbf{R}^{N\times d_h}$和解码器重构数据$\boldsymbol{x}'\in\mathbf{R}^{N\times d}$可表示为

$$\boldsymbol{h}=f_1(\boldsymbol{W}_1\boldsymbol{x}+\boldsymbol{b}_1), \tag{4}$$

$$\boldsymbol{x}'=f_2(\boldsymbol{W}_2\boldsymbol{h}+\boldsymbol{b}_2). \tag{5}$$

其中：$f_1(\cdot)$和$f_2(\cdot)$分别为编码器和解码器网络的激活函数；$\boldsymbol{W}_1$和$\boldsymbol{W}_2$为权重矩阵；$\boldsymbol{b}_1$和$\boldsymbol{b}_2$为偏置参数.网络损失函数计算公式为

$$\mathrm{Loss}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i-x_i')^2. \tag{6}$$

设置编码器输出的中间特征维度d_{h}=1，并通过损失函数反向传播训练整个网络.训练完成后，将数据输入编码器部分，即可通过其输出$\boldsymbol{h}$完成一维健康因子的构建.

2.3　基于HI的热电偶自诊断方法

基于无监督学习得到的HI没有实际物理意义和量纲，只是热电偶内阻信息的多维特征提取结果.因此，需要建立HI与热电偶寿命终点的量化关系，才能实现基于HI的自诊断.

通过多次破坏实验可以获取多支热电偶的全寿命温度、内阻数据，并根据健康因子模型计算全生命周期的HI值.依据寿命终点定义，找出热电偶数值超差点附近的HI值即可确定HI阈值.

在实际工业过程中，除了要考虑检测的灵敏度以外，对仪表设备健康状态的超前检测能够给技术员足够的反应时间，便于对仪表设备及时进行调整和更新，可以很大程度避免反应延迟给企业生产带来的损失.本文综合考虑热电偶自诊断的灵敏性和超前性，采用超前均值法确定热电偶的失效阈值.取每支热电偶失效前5 min的HI均值作为该热电偶的失效阈值，并对训练集中n支同类型热电偶的失效阈值求取平均值，作为该类型热电偶的失效阈值T_{f}.公式如下：

$$E_k=\frac{1}{5}\sum\nolimits_{j=1}^{5}\mathrm{HI}_j^k, \tag{7}$$

$$T_{\mathrm{f}}=\frac{1}{n}\sum\nolimits_{i=1}^{n}E_i. \tag{8}$$

式中：E_k为第k支热电偶失效前5 min的HI均值；HI_j^k为第k支热电偶失效前第j min的HI值.

按照上述定义，当运行中的某支热电偶HI值低于该类型热电偶的T_{f}值时，则表明该热电偶可以判定为失效，从而实现热电偶的自诊断功能.

2.4　热电偶剩余使用寿命预测方法

1）寿命标签的制定. 结合热电偶劣化过程数据的变化规律，定义热电偶到达寿命终点时的寿命$l_t=0$.RUL标签的制定采用线性逆推法，此前每隔一个采样间隔，寿命值依次加1，可表示为

$$l_{t-1}=l_t+1. \tag{9}$$

对于整个寿命周期的寿命值，应区分健康状态与退化状态.在到达初始退化点(t_0)之前为健康状态，寿命值恒定不变；当热电偶进入退化阶段，寿命值开始递减，线性分段函数定义为

$$l_t=\begin{cases}l_{\max}, 0\leqslant t\leqslant t_0;\\ l_{\mathrm{R}}-t, t>t_0.\end{cases} \tag{10}$$

式中：l_{R}为热电偶的全寿命；$l_{\max}$为最大寿命值；t为当前时间.RUL变化与实际劣化过程基本一致.

2）基于深度学习预测剩余寿命. 热电偶的退化特征随时间变化明显，考虑到长短时记忆神经网络(long short-term memory，LSTM)[17]处理时间序列问题的出色能力，提出了基于LSTM的RUL预测模型，使用多维电阻特征信息提取热电偶退化特征，进而预测对应的RUL.LSTM网络结构如图2所示.

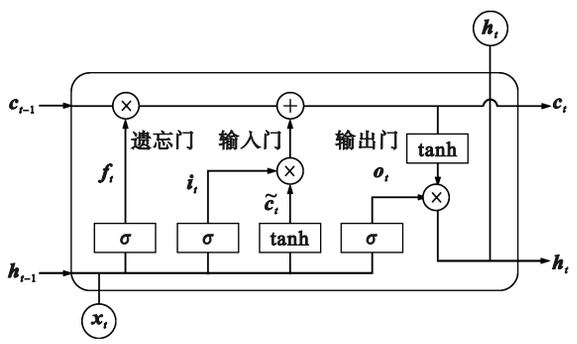


图2　LSTM网络结构

Fig. 2　LSTM network structure

LSTM网络具有链式结构，由循环单元重复而构造出隐藏层，由隐藏层不断堆叠形成完整的神经网络.典型的LSTM网络单元包含遗忘门、输入门、输出门和记忆单元，通过控制门结构对当前时刻和历史时刻数据通过的比例进行调节，从而调整网络状态.数学公式如下：

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{c}_t&=\boldsymbol{f}_t\otimes\boldsymbol{c}_{t-1}+\boldsymbol{i}_t\otimes\tilde{\boldsymbol{c}}_t,\\ \boldsymbol{f}_t&=\sigma(\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}\cdot\left[\boldsymbol{h}_{t-1},\boldsymbol{x}_t\right]+\boldsymbol{b}_{\mathrm{f}}),\\ \boldsymbol{i}_t&=\sigma(\boldsymbol{W}_{\mathrm{i}}\cdot\left[\boldsymbol{h}_{t-1},\boldsymbol{x}_t\right]+\boldsymbol{b}_{\mathrm{i}}),\\ \boldsymbol{o}_t&=\sigma(\boldsymbol{W}_{\mathrm{o}}\cdot\left[\boldsymbol{h}_{t-1},\boldsymbol{x}_t\right]+\boldsymbol{b}_{\mathrm{o}}),\\ \tilde{\boldsymbol{c}}_t&=\tanh(\boldsymbol{W}_{\mathrm{c}}\cdot\left[\boldsymbol{h}_{t-1},\boldsymbol{x}_t\right]+\boldsymbol{b}_{\mathrm{c}}),\\ \boldsymbol{h}_t&=\boldsymbol{o}_t\otimes\tanh(\boldsymbol{c}_t).\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{x}_t$和$\boldsymbol{h}_t$是t时刻LSTM单元的输入和输出；$\boldsymbol{c}_t$是t时刻存储单元的状态；$\tilde{\boldsymbol{c}}_t$是状态的更新值；$\boldsymbol{f}_t$，$\boldsymbol{i}_t$和$\boldsymbol{o}_t$分别为遗忘门、输入门和输出门；权重系数$\boldsymbol{W}_{\mathrm{f}}$，$\boldsymbol{W}_{\mathrm{i}}$，$\boldsymbol{W}_{\mathrm{o}}$和$\boldsymbol{W}_{\mathrm{c}}$及偏置向量$\boldsymbol{b}_{\mathrm{f}}$，$\boldsymbol{b}_{\mathrm{i}}$，$\boldsymbol{b}_{\mathrm{o}}$和$\boldsymbol{b}_{\mathrm{c}}$是构建门的参数；$\sigma(\cdot)$为sigmoid激活函数；$\otimes$表示哈达玛积.

3）预测评价指标. 为了对模型的预测效果进行具体的评价，选择平均绝对误差(mean absolute error，MAE)和均方根误差(root mean square error，RMSE)两个评价指标对预测结果进行综合评估，指标数值的大小反映模型的

RUL 预测效果.计算公式如下:

$$\mathrm{MAE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|x_i-\hat{x}_i|, \tag{12}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\hat{x}_i))^2}. \tag{13}$$

式中:x为真实值;$\hat{x}_i$为预测值;n为采样点个数.

3 实验平台与方案

3.1 实验平台设计

实验平台由高温加热环境和数据采集系统两部分组成.高温加热环境由箱式电阻炉和电炉温度控制器构成;数据采集系统由5个智能型变送器(具有定制开发的内阻检测功能)和1台无纸记录仪组成.设备清单如表1所示.实验平台系统如图3所示,热电偶与智能变送器模块之间用补偿导线进行连接,无纸记录仪通过RS-485通信获取温度及内阻数据,并保存在记录仪中.

在实验过程中,通过调整电炉温度控制器的设定值,控制电阻炉升温、保温以及降温,从而为热电偶提供测温环境.炉内为正常空气,属于较强的氧化气氛.

本文研究团队早期实验证明,K型热电偶(简称K偶)退化速度较慢,在1 000 ℃及正常空气氧浓度下裸丝氧化损坏至少需2个月,因此选用K偶作为标准测温仪表,其测温值作为每次实验时温度的真实值.实验时,将多支C型热电偶(简称C偶)与1支K型热电偶一起插入电阻炉中,处于同一温度场,共同经历低温和高温过程,直至C偶与K偶的温度测量值出现较大偏差,实验结束.

表1 实验设备信息

Table 1 Laboratory equipment information

设备	型号	生产厂家
热电偶(裸偶)	分度号K,C	沈阳东大传感技术有限公司
箱式电阻炉	SX2-8-10	沈阳通用电炉制造有限公司
电炉温度控制器	KWG-8-10	沈阳通用电炉制造有限公司
液晶智能型变送器	SYG-101	沈阳瑞琦高新技术有限公司
无纸记录仪	DSC1010	沈阳瑞琦高新技术有限公司

根据GB/T 29822—2013钨铼热电偶的电动势允差规定,在0~400 ℃允差±4.0 ℃,400~2 315 ℃允差±1%t(t为被测温度值).因此,当加热到1 000 ℃时,允差为10 ℃.排除实验过程中产生的系统误差,判定热电偶失效的标志为C偶与K偶的温度测量值偏差大于10 ℃.

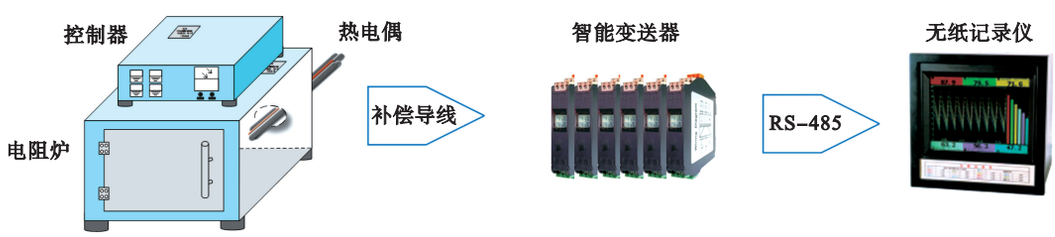


图3 实验平台示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental platform

3.2 实验准备

1)为消除响应时间等因素对测温的影响,K偶和C偶采用同样结构:偶丝长1 000 mm,直径0.5 mm,绝缘支架长度500 mm.

2)在实验室环境下以研究热电偶退化过程为目的,并非实际工业应用场景.为加快热电偶的退化速度,在绝缘支架前端开15 mm条形孔,增大与炉内空气的接触面积.

3)为使标准热电偶和实验热电偶处于一致的温度场和气氛,一次实验只用5支热电偶,包括1支K偶和4支C偶,紧密扎在一起,从电阻炉测温孔插入炉内,插入深度均为200 mm.热电偶结构如图4所示.

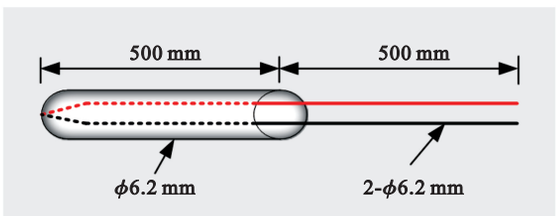


图4 实验用热电偶结构

Fig. 4 Structure of thermocouple in experiment

3.3　实验步骤

1）常温环境启动实验系统,目标温度 150~180 ℃,达到后保温 30 min.

2）目标温度 930 ℃,达到后保持.

3）当全部 C 偶与 K 偶的测温值出现大于 10 ℃的偏差时,实验结束.

为了获取更多条件下的数据,实验中有开炉门、关炉门、开炉门且开窗等不同工况,在不同工况下,热电偶失效时间长短也有所不同.

4　实验结果与分析

本文数据来源于 6 次实验,获得了 6 支标准 K 偶和 24 支 C 偶的实验数据.

4.1　热电偶外观变化

实验后标准 K 偶外观形状没有明显变化,仅由于高温导致颜色略有加深.而 C 偶测量端表面被黑色粉末状物包裹,质地脆且易脱落.从陶瓷支架内取出后,可观察到 C 偶测量端的偶丝变得很细,几乎断裂.用手即可剥落表面粉末,剩余偶丝呈针状,如图 5 所示.



图 5　实验后热电偶外观形态

Fig. 5　Appearance of thermocouple after experiment

4.2　热电偶性能退化过程数据分析

从多次实验获得的退化数据中,任意选取同一次实验的 2 支 C 偶和 1 支标准 K 偶的实验数据,采样间隔为 1 min. 图 6 给出了实验全程温度和内阻的变化情况.

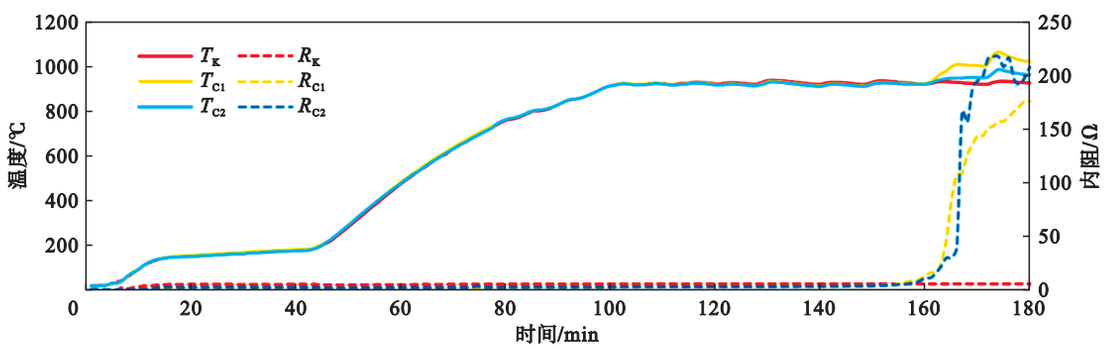


图 6　全过程温度和内阻曲线

Fig. 6　Full-process temperature and internal resistance curves

图中实线 T_K 为 K 偶的温度值,虚线 R_K 为 K 偶的内阻值;实线 T_{Cn} 为第 n 支 C 偶的温度值;虚线 R_{Cn} 为第 n 支 C 偶的内阻值.由图可知,在退化实验前期,即 C 偶与 K 偶的测温值偏差很小时,C 偶的内阻值几乎保持不变,接近一条直线;在实验后期,随着 C 偶由于氧化带来的性能劣化,C 偶与 K 偶的温度偏差开始逐渐增大,C 偶的内阻值也相应出现明显的增大趋势.而 K 偶由于其耐氧化特性,内阻没有发生明显改变.由图 6 可知,C 偶与 K 偶两者测温值的偏差可以反映 C 偶的退化过程,并且退化过程也与热电偶内阻变化情况有关.

为了进一步验证内阻变化与 C 偶退化过程之间的关系,本文从获得的实验数据中任意选取单支 C 偶的实验结果,对实验后半段热电偶开始发生退化到完全失效期间的实验数据进行分析,图 7 给出了 C 偶的内阻与测温偏差两者的变化曲线.图中虚线 R_C 为 C 偶的内阻值,T_d 为测温偏差.可以得出以下结论:

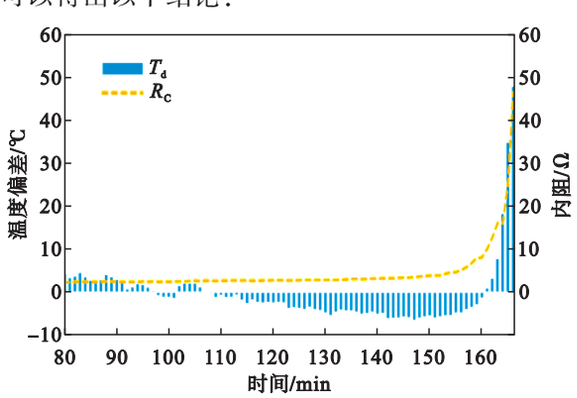


图 7　退化过程内阻和温度偏差

Fig. 7　Internal resistance and temperature deviation during degradation process

1）在实验前期 C 偶正常时,其内阻值变化很小,且温度偏差始终在很小范围内波动,平均温度偏差不超过 3 ℃,最大值不超过 5 ℃.

2）在 C 偶退化过程中,每次温度偏差出现增

大趋势时,内阻都相应出现一定幅度的波动.

3) 在实验后期C偶失效时,温度偏差突然出现显著的增大趋势,且增长速度很快,同时内阻也相应快速增大到几百欧姆.

4.3 热电偶的健康因子

将实验获得的退化过程内阻信号进行特征扩维,采用AE模型计算HI,结果如图8所示.从图中曲线的变化可以看出:热电偶状态良好时,HI值变化幅度很小;随着时间推移,退化程度增加,对应的HI值越来越小.

图9给出了任意选取6支C偶的HI曲线,对应热电偶(S1~S6)失效前10 min内的HI值如表2所示,HI=0表示热电偶失效.

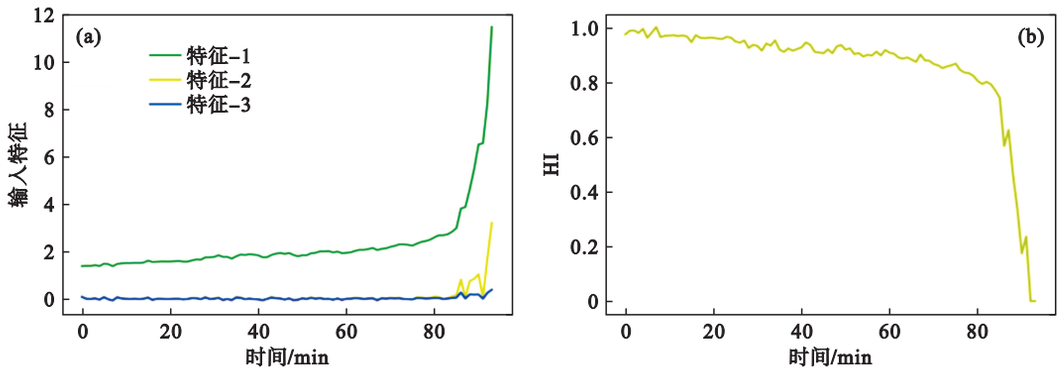


图8 健康因子曲线构建

Fig. 8 Health index curves construction

(a)—原始特征曲线;(b)—健康因子曲线.

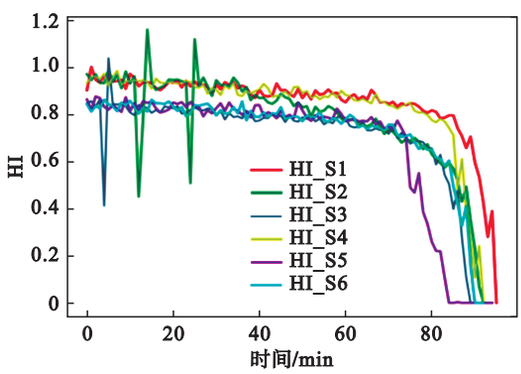


图9 多支热电偶HI曲线

Fig. 9 HI curves of multiple thermocouples

表2 失效前10 min的HI值

Table 2 HI values 10 minutes before failure

时间/min	热电偶					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
9	0.79	0.57	0.40	0.74	0.00	0.58
8	0.79	0.51	0.48	0.71	0.00	0.60
7	0.73	0.43	0.28	0.48	0.00	0.49
6	0.70	0.49	0.11	0.61	0.00	0.42
5	0.59	0.35	0.00	0.40	0.00	0.33
4	0.53	0.23	0.00	0.27	0.00	0.41
3	0.42	0.06	0.00	0.10	0.00	0.15
2	0.28	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00
1	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

观察图9中C偶HI曲线可以发现:不同热电偶初始阶段HI值不同,但变化趋势大致相同;当接近寿命终点(失效点)时,HI值快速减小到0.

综合曲线和HI数据结果来看,由AE构建的健康因子模型获得的热电偶HI指标能够很好地描述热电偶性能退化过程.

4.4 热电偶自诊断实验结果

基于模型得到的C偶健康因子HI,采用2.3节方法计算其失效阈值.由式(7)和(8)求得C偶失效阈值$T_f=0.103$.

图10展示了采用上述阈值进行自诊断的实验结果.选择不同寿命的8支C偶,均截取92 min的退化数据进行诊断测试.可以看出,该时段内失效的4支热电偶(#3,#16,#19和#22),其HI值分别在89,87,90和82 min低于阈值;其余4支热电偶在92 min时HI值有所下降,其值均高于阈值,表明有所退化,但是温度检测值没有超差.

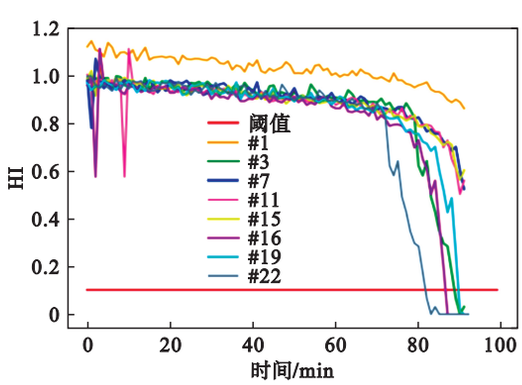


图10 自诊断实验结果

Fig. 10 Self-diagnosis experiment results

4.5　热电偶剩余使用寿命预测结果

将实验获得的内阻特征数据分为训练集、验证集和测试集,对LSTM网络进行有监督训练.对图10中一支热电偶(#3)进行全寿命周期预测,采样间隔为10 s,预测结果如图11所示.从图中可以看出,整个退化过程分为平稳运行阶段和快速退化阶段.在健康阶段内,由于退化过程变化没有明显的趋势,较难预测出准确的RUL.而在劣化阶段,退化程度增加,预测效果较好,并且越接近失效时RUL预测越准确.

模型评价指标的计算结果为:MAE=17.378 4,RMSE=25.123 2.

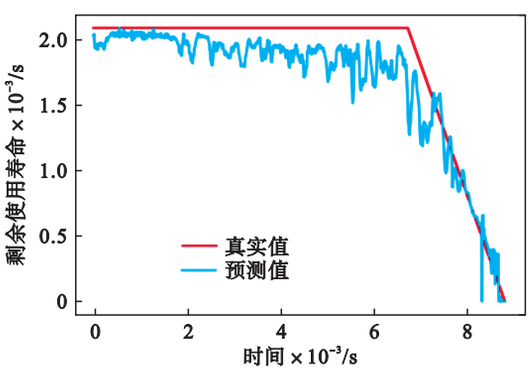


图11　剩余使用寿命预测结果

Fig. 11　Result of remaining useful life prediction

综合曲线和模型评价结果,由LSTM构建的寿命预测模型能够通过历史内阻特征数据很好地预测热电偶的RUL.

5　结　　语

1)本文对钨铼热电偶性能退化过程进行研究,从热电偶退化现象及原理等方面进行了综合分析,通过实验验证了钨铼热电偶内阻与其退化过程之间的关系.

2)采用AE网络对退化过程进行退化建模并获得健康因子,进而提出了一种基于失效阈值的热电偶自诊断方法.

3)使用LSTM网络对退化过程的RUL进行建模,实时预测热电偶的剩余使用寿命.实验结果表明,该模型越接近失效时预测值越准确.

参考文献:

[1] Lee J H, Morioka K, Ando N, et al. Cooperation of distributed intelligent sensors in intelligent environment[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9(3): 535-543.

[2] Clarke D W. Intelligent instrumentation[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2000, 22(1): 3-27.

[3] Mukhopadhyay S C, Tyagi S K S, Suryadevara N K, et al. Artificial intelligence-based sensors for next generation IoT applications: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(22): 24920-24932.

[4] 殷毅.智能传感器技术发展综述[J].微电子学, 2018, 48(4):504-507.
(Yin Yi. An overview of smart sensors technology developing[J]. *Microelectronics*, 2018, 48(4): 504-507.)

[5] Xiao H Y, Li S B, He Z D, et al. Dual mode strain-temperature sensor with high stimuli discriminability and resolution for smart wearables [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(16): 2214907.

[6] Singh R, Sharma R, Akram S V, et al. Highway 4.0: digitalization of highways for vulnerable road safety development with intelligent IoT sensors and machine learning[J]. *Safety Science*, 2021, 143: 105407.

[7] Li W J, Cui Z W, Jin M J, et al. Dynamic temperature measurement with a dual-thermocouple sensor based on a dual-head one-dimensional convolutional neural network [J]. *Measurement*, 2021, 182: 109679.

[8] Assumpcao D, Kumar S, Narasimhan V, et al. High-performance flexible metal-on-silicon thermocouple [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 13725.

[9] Jun S, Kochan O, Kochan R. Thermocouples with built-in self-testing [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2016, 37: 37.

[10] Ulanovskiy A A, Ankudinov S S. Tungsten-rhenium thermocouples calibration in ultra-high temperature range [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2023, 44: 66.

[11] 肖红练.热电偶电动势规范和允差国家标准修订解读[J].自动化仪表, 2018, 39(7): 51-55,60.
(Xiao Hong-lian. Interpretation of revision of national standard about thermocouples EMF specifications and tolerances[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2018, 39(7): 51-55,60.)

[12] Pearce J V, Edler F, Elliott C J, et al. A systematic investigation of the thermoelectric stability of Pt-Rh thermocouples between 1 300 ℃ and 1 500 ℃ [J]. *Metrologia*, 2018, 55(4): 558-567.

[13] 谌立新,郭卫芳,陈东.镍铬-镍硅热电偶老化失效机理初探[J].功能材料, 2011, 42(7): 1166-1168.
(Chen Li-xin, Guo Wei-fang, Chen Dong. Primary study of nickel chromium-nickel silicon thermocouple aging failure mechanism [J]. *Gongneng Cailiao/Journal of Functional Materials*, 2011, 42(7): 1166-1168.)

[14] 王魁汉,吴玉锋,侯素兰,等.热电偶的劣化及对策[J].工业计量, 2005, 15(6): 24-26.
(Wang Kui-han, Wu Yu-feng, Hou Su-lan, et al. The wastage of thermocouple and prevent countermeasures[J]. *Industrial Measurement*, 2005, 15(6): 24-26.)

[15] 王魁汉.温度测量实用技术[M].北京:机械工业出版社, 2020.
(Wang Kui-han. Temperature measurement practical technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.)

[16] He Z P, Shi T L, Xuan J P. Milling tool wear prediction using multi-sensor feature fusion based on stacked sparse autoencoders[J]. *Measurement*, 2022, 190: 110719.

[17] Shi Z Y, Chehade A. A dual-LSTM framework combining change point detection and remaining useful life prediction [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 205: 107257.