

镍铬合金丝电热特性与 EPE 网热封工艺的研究

牛杰^a, 熊莹^b, 张慧^{a*}

(新疆大学 a.智能制造现代产业学院 b.工程训练中心, 乌鲁木齐 830017)

摘要: **目的** 研究可发性聚乙烯 (Expandable Polyethylene, EPE) 网热封质量与热封参数 (EPE 网拉伸率、电热丝直径、电热丝温度及热封时间) 的关系, 分析 EPE 网热封过程的特性, 为 EPE 网热封式包装机的设计奠定基础。**方法** 通过试验与电热耦合仿真结合研究镍铬合金丝不同电流下的电热特性, 建立电流与温度的模型, 同时开展三因素三水平全因子试验, 分析确定 EPE 网的最佳热封参数。**结果** 模型仿真瞬态温度比温度传感器实测更准确, EPE 网的拉伸率越低, 热封强度越大; EPE 网最佳热封参数如下: 电热丝直径 2 mm, 热封温度 130 °C, 热封时间 4 s。**结论** 温度传感器的热惰性使电热丝的测量值滞后于实际值, 这种影响在快速升温过程中尤为突出; 通过建立电热耦合模型可以更精准地表征电热丝的电热特性, 为瞬态温度的测量提供一种方法; EPE 网热封工艺的研究可为水果的 EPE 网套包装防护提供一种普适性更强、效率更高的包装方法。

关键词: 镍铬合金丝; EPE 网; 电热耦合; 热封参数; 全因子试验

中图分类号: TB32; TB33; TB48 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2025)07-0062-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.07.008

Electric Heating Characteristics of Nickel-chromium Alloy Wire and Heat Sealing Process of EPE Net

NIU Jie^a, XIONG Ying^b, ZHANG Hui^{a*}

(a. College of Intelligent Manufacturing Modern Industry, b. Engineering Training Center, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

ABSTRACT: The work aims to study the relationship between the Expandable Polyethylene (EPE) net heat sealing quality and heat sealing parameters (EPE tensile rate, diameter of electric heating wire, temperature of electric heating wire and time of heat sealing), and analyze the characteristics of the heat sealing process of EPE nets, so as to lay a foundation for the design of EPE net heat sealing packaging machines. The electrothermal characteristics of nickel-chromium wires under different current were studied by experiments and electrothermal coupling simulation, and current and temperature models were established. At the same time, three-factor and three-level full factor tests were carried out to analyze and determine the optimal heat sealing parameters of the EPE net. The simulated transient temperature was more accurate than that measured by temperature sensor. The lower the tensile ratio of the EPE net, the greater the heat sealing strength. The optimum heat sealing parameters of the EPE net were as follows: the diameter of electric heating wire was 2 mm, the heat sealing temperature was 130 °C, and the time of heat sealing was 4 s. The thermal inertia of the temperature sensor causes the measured value of the electric heating wire to lag behind the actual value, which is especially prominent in the process of rapid temperature rise. By establishing the electrothermal coupling model, the electrothermal characteristics of the electric heating wire can be characterized more accurately, which provides a

收稿日期: 2025-02-08

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金 (2022D01C674)

*通信作者

method for the prediction of transient temperature. The research of the EPE net heat sealing technology can provide a more universal and efficient packaging method for the protection of fruit EPE net sleeve packaging.

KEY WORDS: nickel-chromium alloy wire; EPE net; electrothermal coupling; heat sealing parameters; full factor test

新疆有着“瓜果之乡”的美誉, 位于我国西北地区。水果从产地运往市场需要经过长途运输, 容易造成机械损伤, 不仅破坏果实结构的完整性, 还会增加水分流失和微生物繁殖的风险, 最终影响果实质量, 引发潜在的食品安全问题^[1-2], 极大地限制了新疆水果行业的发展。研究表明, 缓冲材料可以有效减少果实在运输过程中的机械损伤^[3-4], 特色水果如阿克苏冰糖心苹果、库尔勒香梨、法兰西西梅和库车小白杏等都会在运输时套上可发性聚乙烯 (Expandable Polyethylene, EPE) 网套进行包装防护。EPE 网是一种以 EPE 为基础组成的网状包装材料, 由低密度聚乙烯经物理发泡产生的无数独立气泡构成, 具有质地柔软、弹性良好、缓冲性能优异等特点。相较于传统密闭结构的 EPE, EPE 网独特的网状孔隙结构在保证一定缓冲和保护效果的同时大大减少材料用量, 不仅降低了材料成本, 还减少了资源浪费, 并且网状结构使其具有良好的通风透气性, 广泛应用于水果的包装防护^[5-6]。

现有的机械式 EPE 网套包装设备对苹果、橙子等大果径球形水果的包装效率约为 25 s/个, 包装时要求果实沿果梗方向立式摆放, 效率低且存在较大的局限性, 因此仍停留在实验室阶段, 市场前景低迷^[7]。新疆特色鲜食水果如库尔勒香梨、小白杏和西梅等成熟后较软, 极易受到机械损伤, 而且其外形均为椭球形, 无法立式摆放, 现有的网套包装设备并不适配, 目前市场上仍采用人工套网套的方式包装果实, 成本高且效率低。

热封工艺可以改变热封参数, 满足不同新材料的热封需求, 并通过改变电热丝的形态和数量实现不同热封式包装的效果。包装的热封质量通常由热封部位的拉伸强度评价, 影响材料热封强度的因素主要有热封温度、热封时间、热封压力、环境温度、环境相对湿度等^[8]。刘庆伦等^[9]研究不同热封参数 (电热丝直径、热封时间、热封压强) 对 EPE 网热封强度的影响, 试验表明镍铬电热丝直径为 0.8 mm、热封压强为 0.2 MPa、热封时间为 2 s 时 EPE 网的热封质量最好。何立冬等^[10]建立热封参数与热封强度的数学模型, 并使用 LabVIEW 进行热封强度仿真计算和参数优化, 得出飞机隔音棉包覆层的最佳热封参数并进行验证。赵漫漫等^[11]设计多种试验工况研究热封参数对复合铝箔卷膜 (Polyethylene Terephthalate/Aluminum/Polyethylene, PET/AL/PE) 热封强度的影响, 确定 PET/AL/PE 复合薄膜的有效热封温度范围。彭智松等^[12]研究影响 4 层铝塑复合材料撕裂强度的因素, 通过响应面分析法得出热封温度和热封时间对撕裂强度的

影响较为显著, 热封压力对撕裂强度的影响较小。王东升等^[13]探索 PET/PE 复合薄膜热封质量的影响因素, 比较分析热封方向、热封温度、热封速度对热封质量的影响, 总结得出 PET/PE 复合薄膜的最佳热封工艺参数。综上所述, 热封温度和热封时间对热封质量的影响最为显著, 在热封不同材料时还应考虑电热丝的直径和形状。本文通过研究水果包装常用 EPE 网的热封工艺, 为不同果径及形状的水果提供一种新型的 EPE 网批量热封式包装方法。

1 电热耦合仿真与电热特性试验

通过电热耦合仿真与试验相结合的方式研究不同直径电热丝在不同电流下的电热特性, 了解电热丝的温度变化规律, 从而实现热封温度的精准控制。

1.1 材料

试验选取牌号为 Cr20Ni80 的镍铬合金丝, 其密度为 $8\ 400\ \text{kg/m}^3$, 电阻率为 $1.09\ \mu\Omega/\text{m}$, 比热容为 $460\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 熔点为 $1\ 350\ ^\circ\text{C}$ 。电热丝试样长度为 100 mm, 直径为 0.1~0.4 mm, 试样间隔 0.05 mm。

电热丝的直径越粗, 电阻率越小, 电热性能越差, 市场上现有的镍铬合金电热丝直径都在 1 mm 以内。通过在不同直径的玻璃纤维棒上缠绕较细的镍铬合金丝制作直径 1 mm 以上的粗电热丝, 并在其表面粘贴聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 耐高温胶布, 使电热丝表面温度分布更加均匀。

1.2 仪器

1) 电源。TPS3010 固测直流稳压电源最大输出功率为 300 W, 可输出不同电流为电热丝供电, 电源交互界面能够显示实时电压、电流及功率信息。

2) 温度采集模块。温度传感器采用 K 型热电偶测温线连接 MAX31855 信息采集模块, 使用单片机处理采集到的数字信号并输出温度值。通过 MLX90640 红外热成像模块观察电热丝的温度场分布情况。

1.3 方法

1) 熔断电流的确定。以 0.1 V 为步长, 停顿时间为 3 s, 逐步升高镍铬合金丝两端的电压直至合金丝熔断, 进行 9 次试验取平均值, 此时的电流为熔断电流。以此方法测试不同直径电热丝的熔断电流, 安全系数取 3, 确定不同直径电热丝的安全工作电流范围。在安全工作电流范围内选取电流区间, 进行电热

特性试验。

2) 电热耦合仿真模型的建立。通过 SolidWorks 建立不同直径镍铬合金丝的结构模型以及电热丝的实际使用场景模型, 导入 ANSYS 建立电气-瞬态热模型。使用 K 型热电偶测量镍铬合金丝的稳态温度, 根据牛顿冷却定律计算材料间的热对流系数, 结合镍铬合金丝的材料参数完善电热耦合模型。通过电热耦合模型仿真电热丝的温度情况并进行实际试验, 验证模型的准确性。

1.4 不同直径电热丝的熔断电流

研究电热丝的熔断电流对于电热设备的安全性、可靠性及耐用性至关重要, 根据实际工况的温度选择合适的镍铬合金丝可以有效避免过载、短路、熔断和过热等安全隐患。图 1 为 0.1~0.4 mm 直径镍铬合金丝的熔断电流。0.1 mm 直径镍铬合金丝的熔断电流为 1.1 A, 直径每增加 0.05 mm, 熔断电流增加 1 A 左右。根据熔断电流和安全系数确定不同直径镍铬合金丝的安全工作电流, 见表 1。

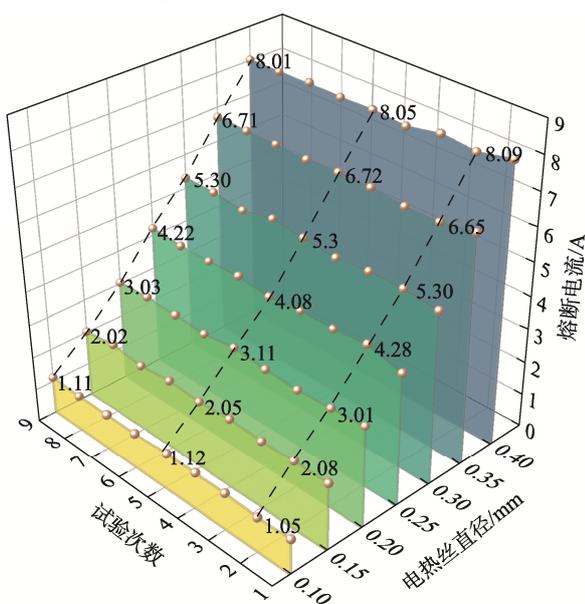


图 1 不同直径镍铬合金丝的熔断电流

Fig.1 Fusing current of nickel-chromium wires of different diameter

表 1 镍铬合金丝的熔断电流

Tab.1 Fusing current of nickel-chromium wires

镍铬合金丝直径/mm	平均熔断电流/A	安全电流/A
1.00	1.12	0.37
1.50	2.07	0.69
2.00	3.03	1.01
2.50	4.16	1.38
3.00	5.28	1.76
3.50	6.71	2.23
4.00	8.08	2.69

1.5 电热丝有限元模型

使用 SolidWorks 建立简单的电热丝模型以及实际使用场景模型, 导入 ANSYS 建立电气-瞬态热耦合求解器。设置材料各项参数属性 (表 2), 对模型进行网格划分。设置模型边界条件, 环境温度为 22 °C, 求解时间为 20 s。添加热载荷, 电热丝表面、耐高温胶布与空气间设置热对流, 热对流系数通过测量镍铬合金丝的稳态温度, 根据牛顿冷却定律计算得出。

表 2 材料属性

Tab.2 Material properties

材料	电阻率/ ($\mu\Omega \cdot m^{-1}$)	热导率/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	比热容/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
镍铬合金丝	1.09	17	8 400	460
玻璃纤维聚 乙烯棒		0.4	930	2 300
聚四氟乙 烯胶布		0.25	2 250	1 400

1.5.1 对流换热系数

当电热丝表面的热损失速率等于电阻发热的热生成速率时, 电热丝达到热平衡状态, 其表面温度趋于稳定。当电流不变时, 电热丝的温度为恒定值, 此时的温度为稳态温度^[14]。通过研究电热丝在不同电流下的温度变化规律, 实现热封温度的精准输出。当电热丝达到稳定运行状态时, 热生成等于热损失, 表达式见式 (1)。

$$Q = E = VI t \tag{1}$$

式中: Q 为生成热量, J; E 为损失热量, J; V 为电压, V; I 为电流, A; t 为时间, s。

根据对流热传递的牛顿冷却定律计算电热丝表面与空气间的对流换热系数, 表达式见式 (2)。

$$Q' = hA_s(t_s - t_c) \tag{2}$$

式中: Q' 为传递热量, J; h 为对流换热系数; A_s 为发生对流的接触面积, 即电热丝的表面积, m^2 ; t_s 为实时温度, °C; t_c 为初始温度, °C。

考虑电热丝的实际工况, 其长度较长且直径较细, 两圆形底面的面积相较于侧面积可忽略不计, 与空气的对流换热只发生在圆柱侧面, 进行有限元分析时应忽略底面积, 只计算仿真模型的侧面积。因此, 对流接触面积的表达式见式 (3)。

$$A_s = \pi DL \tag{3}$$

不考虑由电热丝热辐射引起的热传递, 只考虑电热丝与空气的对流换热, 对流换热系数可由牛顿冷却定律推导得出。表 3 为经过计算得出的不同直径镍铬合金丝与空气间的对流换热系数。

表 3 不同直径镍铬合金丝与空气间的对流换热系数
Tab.3 Coefficient of heat convection between nichrome wire of different diameter and air

接触类型	对流换热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
2 mm 直径电热丝表面与空气接触	232.1
3 mm 直径电热丝表面与空气接触	114.3
4 mm 直径电热丝表面与空气接触	93.5
耐高温胶布表面与空气接触	50

1.5.2 模型与网格划分

图 2a 为 10 mm 长镍铬合金丝和粗电热丝模型, 图 2b 为模型对应的有限元分析网格划分。

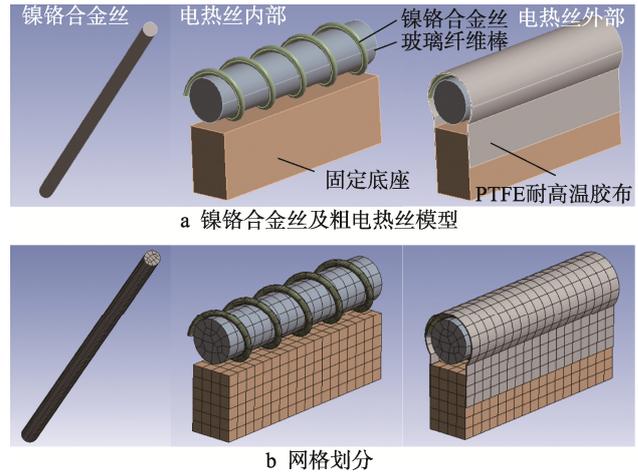
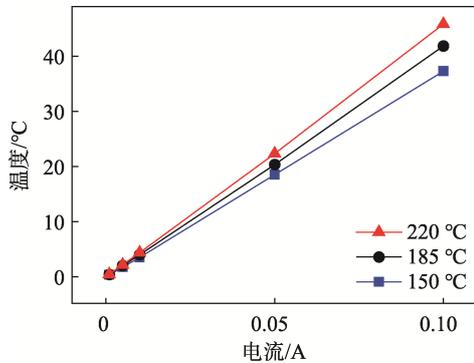


图 2 模型与网格划分
Fig.2 Models and meshing

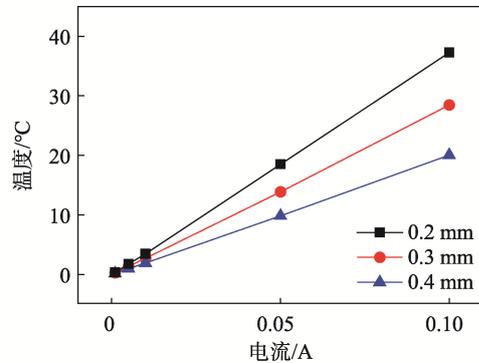
1.6 不同电流下的稳态温度变化

0.3 mm 直径电热丝在 3 个稳态温度基础上, 电流增长时的温度变化见图 3a。150 °C 时电流增长 2.9 mA, 温度上升 1 °C; 220 °C 时电流增长 2.3 mA, 温度上升 1 °C。随着电热丝温度的升高, 稳态温度对电流的变化越来越敏感, 温度变化越来越难以控制。

150 °C 时, 不同直径电热丝随着电流增长的温度变化见图 3b。直径由小到大电热丝增长 1 °C 所对应的电流分别为 2.9、3.7、5.3 mA。0.4 mm 直径的电热丝对电流变化不敏感, 但电热丝直径越大电阻越小, 精准控制电流对直流电源的精度有更高要求。



a 0.3 mm 镍铬合金丝在稳态温度下的温度变化



b 150 °C 时不同直径镍铬合金丝的温度变化

图 3 不同电流下的温度变化

Fig.3 Temperature change at different current steps

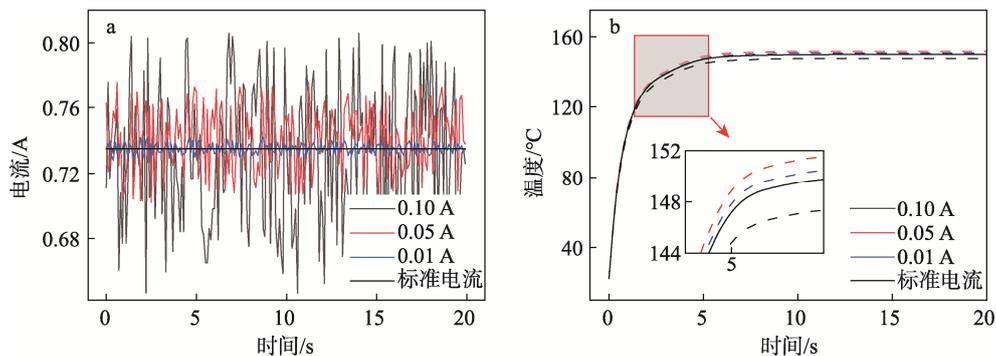


图 4 0.3 mm 直径镍铬合金丝不同波动幅值的电流纹波 (a), 相对应的瞬态温度 (b)

Fig.4 Current ripple (a) of 0.3 mm diameter nichrome wire with different amplitude fluctuations, corresponding transient temperature (b)

1.7 纹波对温度的影响

实现 0.2~0.4 mm 直径电热丝稳态温度变化 1 °C, 电源对负载电流的调节精度需要达到 3 mA。常见直流电源的纹波幅值通常为几十到几百毫安, 需要考虑直流电路中纹波对镍铬合金丝温度的影响。

图 4a 为 0.3 mm 直径镍铬合金丝电流分别为 0.10、0.05、0.01 A 时的 3 种波动幅值的直流电信号,

图 4b 为 3 种电流信号对应的瞬态温度。图 4b 表明电路中不同波动幅值的纹波对电热丝温度的影响较小, 3 种电流都能很好地贴合标准电流时的温升曲线。0.10 A 波动幅值的曲线偏离程度最大, 0.01 A 的温升曲线偏离程度最小, 这是因为不同波动幅值电流的平均值各不相同, 0.10 A 波动幅值的平均电流最小, 0.05 A 的平均电流最大。虽然不同波动幅值的纹波对电热丝温度影响较小, 但对温度的精准控制带来较大的不稳定性, 因此电路中的纹波越小越好。

1.8 温度仿真结果验证

1.8.1 稳态温度

所建立的镍铬合金丝电热耦合模型在电流为 0.7~1.2 A 时能够较好地拟合稳态温度, 误差在 2% 以内。随着电流增大至 1.2 A 以上, 实测镍铬合金丝的温度波动较为明显, 且出现实测温度高于仿真温度的趋势, 见图 5。误差产生的原因是仿真模型的电阻率为固定值, 电热丝在实际使用中, 其电阻会随着温度升高而变大。根据纯电阻电路功率计算公式, 电流不变, 电阻升高时总功率变大, 因此实际稳态温度高于仿真温度。纯电阻电路功率计算见式 (4)。

$$P = I^2 R \tag{4}$$

式中: P 为功率, W; I 为电流, A; R 为电阻, Ω 。

1.8.2 瞬态温度

0.3 mm 直径的镍铬合金丝在 1 A 与 0.7 A 电流下的瞬态温升与仿真对比见图 6, 可见实测温度小于仿真温度, 这是由于温度传感器具有热惰性, 使得仪表测量值滞后于实测温度的变化, 在快速测量时此影响尤为突出。测量滞后在瞬态温升过程中会造成极大的误差, 传感器测量并不能有效表征物体的实际温度^[15-16]。刘庆伦等^[9]采用 300 W 恒定功率研究 4 s 内电热丝的电热特性, 加热初期电热丝处于剧烈升温阶段, 温度未达到稳态; 加热 3 s 后, 0.6 mm 直径镍铬合金丝出现断裂, 此时测量温度为 260 °C。由于镍铬合金电热丝的熔点在 1 300 °C 以上^[17], 温度传感器 (热电偶、热电阻) 并不能有效实时测量瞬态温度, 误差较大, 该研究在热封温度的表征上存在很大的局限性。

由图 6a 可知, 5 s 时实测温度为 80 °C, 仿真温度为 134 °C, 已知低密度聚乙烯的黏流温度约为 130 °C^[8], 通电 5 s 时将 EPE 网按压在电热丝上, 接触部位的 EPE 网出现熔化溃缩现象, 因此 5 s 时的电热丝实际温度高于黏流温度, 低于稳态温度。在瞬态温升过程中, 模型的仿真温度更接近实际温度, 所建立的电热耦合模型能更精准地表征镍铬合金丝在不同电流下的瞬态电热特性。

1.9 镍铬合金丝直径和缠绕密度的确定

图 7 为不同直径电热丝在 0.7~1.5 A 电流下的瞬态时间-温度曲线, 可知电热丝的升温过程分为 3 个阶段, 虚线划分的 3 个区域从左至右分别为剧烈温升阶段、缓慢温升阶段和稳态阶段, 同一直径电热丝通过不同电流的时间-温度曲线变化规律基本相同。0.2 mm 直径电热丝在 0~2 s 时温度剧烈上升, 在 2~6 s 时上升趋势减缓, 在 6 s 后达到稳态温度。随着电热丝直径的增大, 达到稳态温度的时间相应增长。

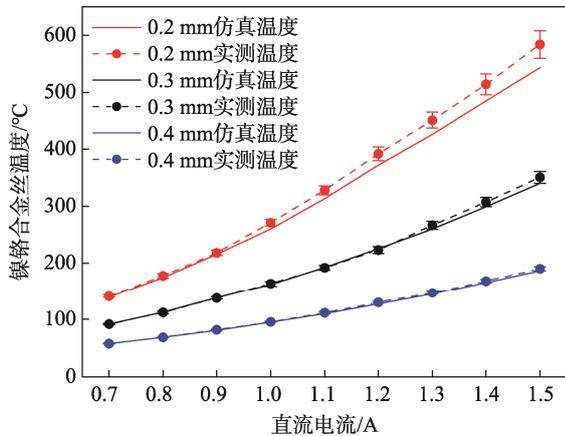


图 5 仿真与实测温度对比
Fig.5 Comparison of simulation and measured temperature

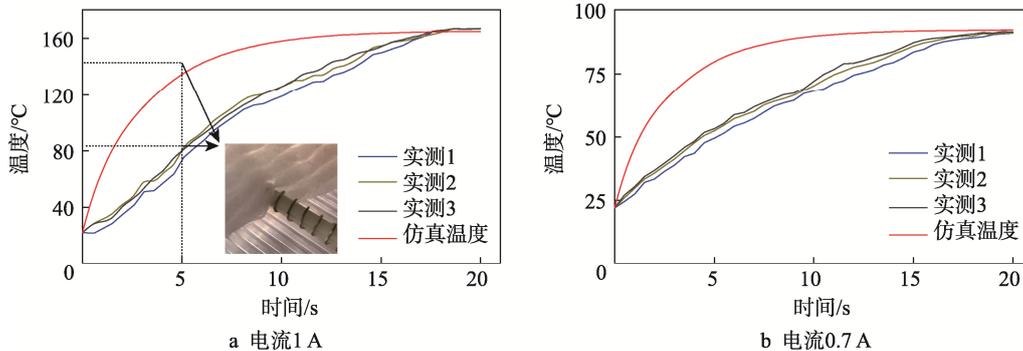


图 6 0.3 mm 镍铬合金丝瞬态温升实测与仿真数据对比
Fig.6 Comparison between measured and simulated data of transient temperature rise of 0.3 mm nickel-chromium alloy wire

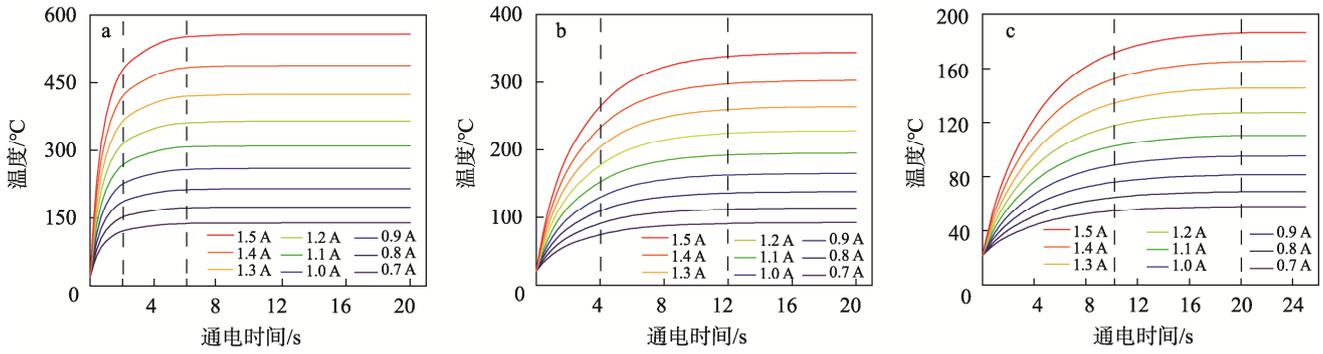


图 7 0.2 mm 直径 (a)、0.3 mm 直径 (b)、0.4 mm 直径 (c) 电热丝在不同电流下的瞬态温度
Fig.7 Transient temperature of 0.2 mm diameter (a), 0.3 mm diameter (b), and 0.4 mm diameter (c) electric heating wire under different current

由图 8 可知, 0.2 mm 直径电热丝在 220 °C 下的工作电流接近安全电流。电热丝在实际工况中的表面温度会受到环境温度及散热影响, 若散热条件过差, 电热丝将继续升温。基于安全工况和使用寿命, 0.2 mm 直径的镍铬合金丝并不适合作为缠绕电热丝。

0.3 和 0.4 mm 直径的镍铬合金丝在 220 °C 下工作仍有较大的安全余量。当使用细镍铬合金丝制作粗电热丝时, 需要确定镍铬合金丝的直径与缠绕密度 2 个参数, 其中缠绕密度用螺旋线的螺距表示。根据不同直径镍铬合金丝的优缺点, 综合考虑达到稳态温度的时间、安全可靠性和温度可控性等因素, 确定 0.3 mm 直径镍铬合金丝最适合作为缠绕电热丝。不同直径镍铬合金丝的优缺点见表 4。

图 9 为 0.3 mm 直径镍铬合金丝 3 种缠绕密度(螺距为 0.5、1、2 mm) 在 1 A 电流下的仿真与实测温度

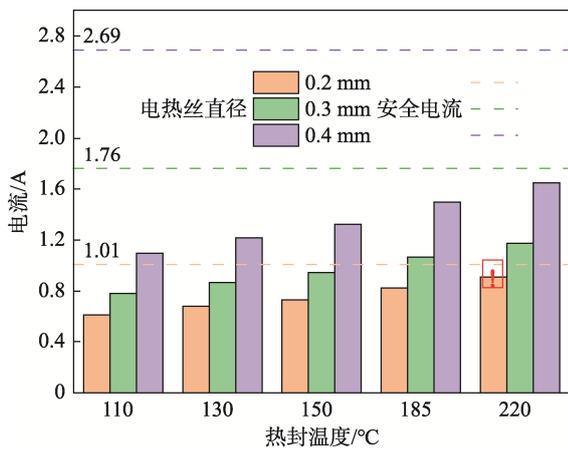


图 8 工作电流与安全电流
Fig.8 Operating current and safety current

表 4 不同直径镍铬合金丝的优缺点
Tab.4 Advantages and disadvantages of different diameter nickel-chromium wires

电热丝直径/mm	达到稳态温度 时间/s	安全性	温度可控性
0.2	6	较差	较好
0.3	12	较好	较好
0.4	20	较好	较差

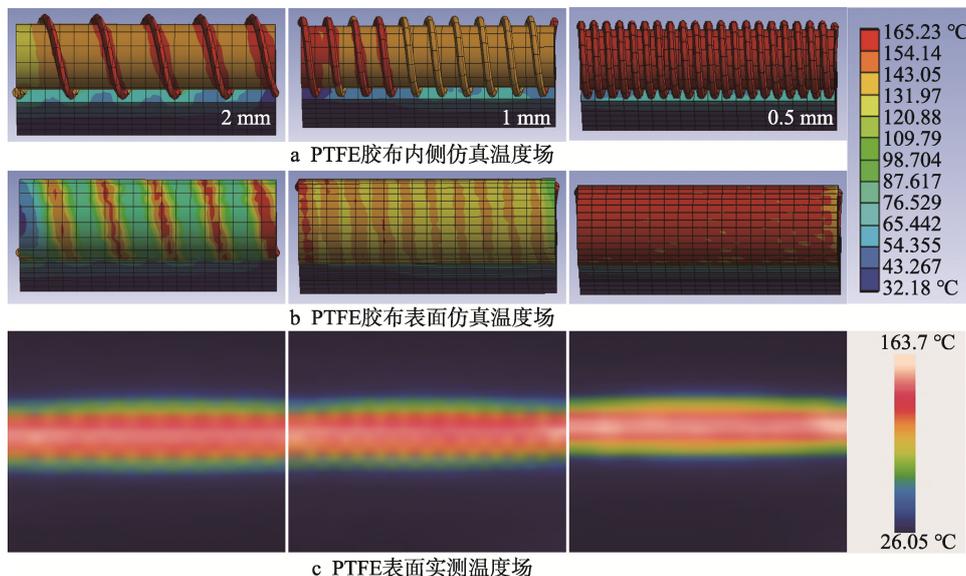


图 9 不同缠绕密度的仿真与实测温度场
Fig.9 Simulated and measured temperature fields at different winding density

度场分布,其中图9a为PTFE耐高温胶布内侧温度场分布,图9b为PTFE胶布外表面温度场分布,图9c为采用红外热成像仪拍摄的3种缠绕密度电热丝的温度场,与模型仿真温度场分布基本一致,验证了模型的准确性。由图9可知,当缠绕密度>0.5 mm时,电热丝的表面温度分布极不均匀,镍铬合金丝缠绕位置出现局部高温的情况,在热封时应避免此情况,由此确定0.3 mm直径镍铬合金丝的最低缠绕密度为0.5 mm。

温度可控性从温升1 °C的电流增长和电流可调性2个方面综合考虑,温升1 °C所需要的电流越大,温度越容易控制。根据欧姆定律可知,电压相同时,大电阻相较于小电阻能够实现更高精度电流的调节。0.2 mm直径镍铬合金丝的电阻是0.4 mm直径的4倍,0.4 mm直径镍铬合金丝温升1 °C的电流增长是0.2 mm直径的1.8倍,因此0.2 mm直径镍铬合金丝比0.4 mm直径更容易实现温度调控。不同直径镍铬合金丝的温度可控性分析结果见表5。

表5 不同直径镍铬合金丝的温度可控性
Tab.5 Temperature controllability of nichrome wires of different diameter

电热丝直径/mm	温升1 °C的 电流增长/mA	电阻/ [Ω·(10 cm) ⁻¹]	电流可调性
0.2	2.9	3.47	较好
0.3	3.7	1.54	一般
0.4	5.3	0.86	较差

2 封装试验

2.1 试验装置

热封试验装置(图10)主要由直流稳压电源和热封试验台组成。根据前期镍铬合金丝电热特性的研究确定不同温度时的电流,使用直流电源设置热封温度对应的电流,达到稳态温度后进行热封,热封时间由通断电进行控制,热封压力由热封压板上的挂钩砝码提供,通过改变砝码的质量来改变热封压力。

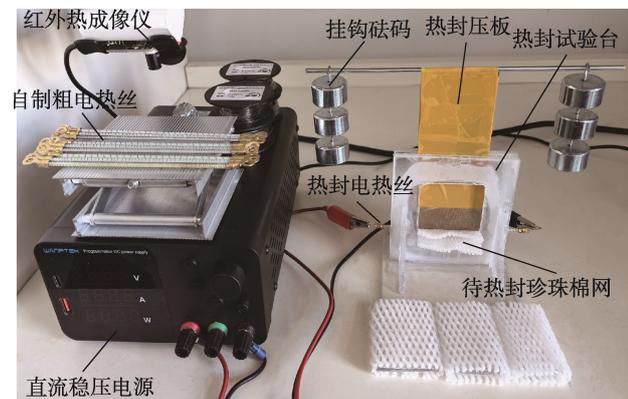


图10 热封试验装置
Fig.10 Heat seal test device

2.2 EPE网拉伸率单因素试验

当热封温度为130 °C、热封时间为4 s、热封压力为10 N时,将EPE网的拉伸率作为变量进行热封试验,测试4 cm宽试样的拉伸强度。

2.3 三因素三水平全因子试验

将热封压力固定为10 N,EPE网拉伸率为100%,考虑电热丝直径、热封温度和热封时间3个因素,每个因素选取3个水平,以拉伸断裂强度为评价指标构建一个三因素三水平全因子试验。分析各因素对EPE网热封质量(拉伸断裂强度)的影响,每组试验做5次取均值,试验方案如表6所示。

表6 全因子热封试验参数
Tab.6 Full factor heat seal test parameters

试验因素	水平		
	1	2	3
电热丝直径/mm	1	1.5	2
热封温度/°C	110	130	150
热封时间/s	2	4	6

3 热封试验结果

3.1 EPE网拉伸率对热封强度的影响

EPE网的拉伸率本质上是材料的有效热封长度,拉伸率越低,接触面积越大,有效热封长度越长,断裂拉伸强度越大。不同拉伸率下的融缝见图11。在拉伸状态下,EPE网的拉伸强度与熔接点的数量成正比,未拉伸状态下的熔池由多个熔接点构成,熔接点粘连会增大材料有效热封接触面积,进而影响断裂拉伸强度。

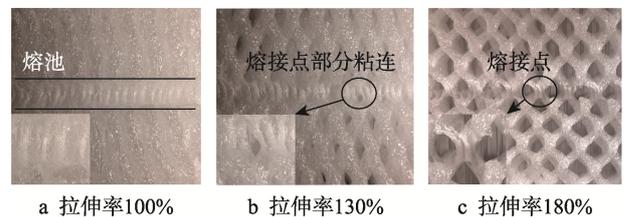


图11 不同拉伸率下的融缝
Fig.11 Melting joints at different tensile rates

3.2 全因子试验结果与分析

3.2.1 电热丝直径与热封强度的关系

不同直径电热丝的时间-热封强度曲线见图12,当热封温度与热封时间相同时,2 mm直径电热丝的热封强度明显高于1和1.5 mm直径的电热丝。当电

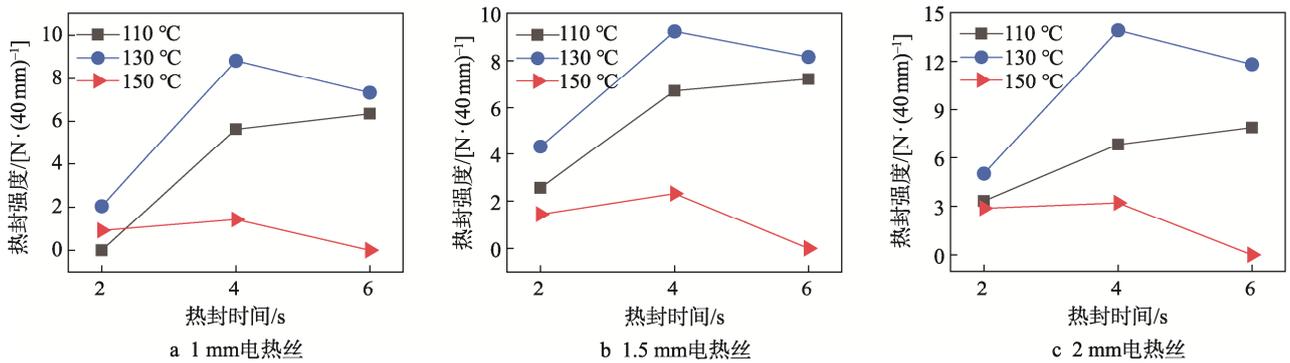


图 12 不同直径电热丝的时间-热封强度曲线
Fig.12 Time-heat sealing strength curves of different diameter heating wires

热丝直径从 1 mm 增加到 1.5 mm 时, 2 s 时的热封强度从 0 提升至 2.56 N/(40 mm); 当直径从 1.5 mm 增加到 2 mm 时, 热封强度提升至 3.34 N/(40 mm), 出现增速减缓的趋势。当热封温度为 110 °C、热封时间为 4 s 时, 1.5 和 2 mm 直径电热丝的热封强度均为 6 N/(40 mm) 左右, 热封时间延长至 6 s 时, 热封强度提升有限。由图 12 可知, 当热封时间与电热丝直径相同时, 热封温度为 130 °C 的 EPE 网热封强度最高。

3.2.2 热封温度与热封强度的关系

图 13 为 3 种热封温度下热封时间为 4 s 时的封口形貌。热封温度为 110 °C 时, 产生的热量不足以全部融化接触位置的 EPE, 融缝深度较浅, 2 层材料并未有效接触, 无法形成熔池, 导致热封质量较低。热封温度为 130 °C 时, 封口平整光滑且融缝较深, 纤维连续, 未出现断裂情况。热封温度为 150 °C 时, 整体热

封质量不高, 封口较为毛糙, 可以直观看到纤维断裂的现象, 主要原因是电热丝温度过高时, 在下压过程中接触纤维直接熔断, EPE 网不能被有效压紧, 无法形成熔池。

3.2.3 热封时间与热封强度的关系

当热封温度为 110 °C、1 mm 直径电热丝热封时间为 2 s 时, 上下接触面并没有形成熔池, 热量不能在短时间内传递至下层 EPE; 热封时间延长至 4 s 时, 断裂拉伸强度得到显著提升, 但仍未到达热封强度的峰值。热封温度为 130 °C 时, 2~6 s 的热封时间均能形成有效热封, 2 s 时的热封强度 > 2 N/(40 mm); 热封时间延长至 4 s 时, 热封强度得到显著提升且出现峰值, 2 mm 直径电热丝的最大拉伸强度达到 1.92 N/(40 mm); 热封时间延长至 6 s 时, 热封强度呈下降趋势, 这是因为长时间加热时, 融缝处的 EPE 出现部分纤维熔断的现象。热封温度为 150 °C 时, 随着热封时间延长至 6 s, 不同直径的电热丝均会融穿 2 层 EPE 网形成热切效应, 无法实现有效热封。

3.3 热封式包装效果

图 14 为传统网套包装与热封式包装效果对比, 通过改变热封隔板的数量、尺寸和排列方式等, 可以实现不同果实不同规格的批量包装。批量热封式包装方法相较于传统包装, 有效提高了包装效率, 通过阵列多组热封装置能够实现较大规模的果实包装, 且整体式的包装还能提高装筐摆放效率。

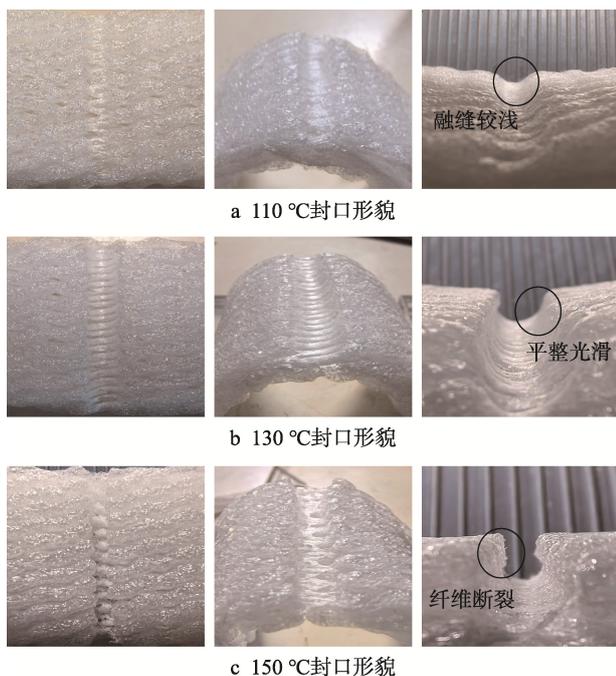


图 13 不同温度封口形貌对比
Fig.13 Comparison of sealing morphology at different temperature

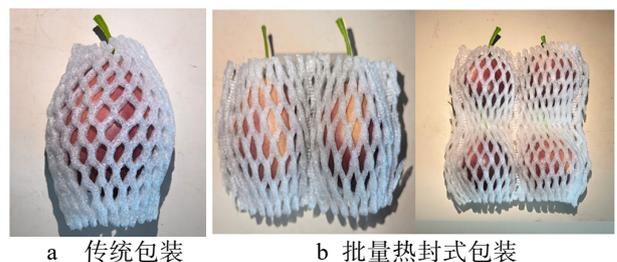


图 14 包装效果对比
Fig.14 Comparison of packaging effect

4 结语

1) 通过研究镍铬合金丝的熔断电流, 确定不同直径镍铬合金丝的安全工作电流, 建立镍铬合金丝的电气-瞬态热耦合模型, 以仿真模型为基础研究其不同电流(安全电流范围内)下的电热特性, 并对模型进行验证。90~225 °C的稳态温度仿真与试验误差均<2%, 验证了模型稳态温度的准确性。

2) 在研究镍铬合金丝瞬态温升规律时, 发现温度传感器的热惰性使电热丝的测量值滞后于实际值, 这种影响在快速升温过程中尤为突出。通过 EPE 网的黏流温度验证仿真温度的准确性, 说明仿真模型在瞬态温度的拟合上相对实测温度更加接近真实温度。

3) 通过研究不同直径镍铬合金丝的瞬态温升规律、稳态温度和安全电流, 确定 0.3 mm 直径的镍铬合金丝最适合用来缠绕电热丝, 从而制作出直径较大的电热丝。建立粗电热丝的实际使用场景模型, 研究不同缠绕密度时的温度场分布, 并用红外热成像仪验证仿真温度场的准确性, 确定 0.3 mm 直径电热丝的缠绕螺距为 0.5 mm 时能使温度场分布相对均匀。

4) 以水果包装 EPE 网为热封对象进行热封试验, 得知高温导致 EPE 网热封失效的主要原因是接触部位纤维熔断, 确定 EPE 网的最佳热封参数。通过三因素三水平全因子试验结果可知, 恒定热封压力为 10 N/(40 mm)、棉丝直径为 2 mm 的 EPE 网最佳热封参数如下: 电热丝直径 2 mm, 热封温度 130 °C, 热封时间 4 s。

参考文献:

- [1] LI H K, CHEN L C, WU X F, et al. Characterization of Volatile Organic Compounds in Food Contact Paperboards and Elucidation of Their Potential Origins from the Perspective of the Raw Materials[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023, 37: 101062.
- [2] KHALID M Y, ARIF Z U. Novel Biopolymer-Based Sustainable Composites for Food Packaging Applications: A Narrative Review[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33: 100892.
- [3] ALIASGARIAN S, GHASSEMZADEH H R, MOGHADDAM M, et al. Mechanical Damage of Strawberry during Harvest and Postharvest Operations[J]. *Acta Technologica Agriculturae*, 2015, 18(1): 1-5.
- [4] ACİCAN T, ALIBAŞ K, ÖZELKÖK I S. Mechanical Damage to Apples During Transport in Wooden Crates[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 96(2): 239-248.
- [5] 樊泽鹏, 王克俭. 塑料缓冲包装材料的现状与应用[J]. *塑料包装*, 2022, 32(1): 7-11.
FAN Z P, WANG K J. Current Status and Application of Plastic Cushioning Packaging Materials[J]. *Plastic Packaging*, 2022, 32(1): 7-11.
- [6] 周健. 新型球形水果网套包装机的研制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
ZHOU J. Development of a New Packaging Machine for Spherical Fruit Net Sleeve[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021.
- [7] 徐勤超, 陈红, 潘海兵, 等. 球形水果塑料发泡网套包装机设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(19): 56-61.
XU Q C, CHEN H, PAN H B, et al. Design and Test of Foam Net Packing Machine for Spherical Fruit[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(19): 56-61.
- [8] 杜玉宝, 骆光林. 浅谈包装材料热封性能的影响因素[J]. *塑料包装*, 2007, 17(4): 29-32.
DU Y B, LUO G L. Discussion on the Factors Affecting the Thermal Sealing Performance of Packaging Materials[J]. *Plastics Packaging*, 2007, 17(4): 29-32.
- [9] 刘庆伦, 冯嫦. 包装材料 EPE 热封工艺的实验研究与分析[J]. *包装工程*, 2017, 38(23): 111-115.
LIU Q L, FENG C. Experimental Study and Analysis of Heat Sealing Technology for Packaging Material EPE[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(23): 111-115.
- [10] 何立冬, 曹恒, 方明周, 等. 飞机隔音棉包覆层热封参数优化研究[J]. *包装工程*, 2014, 35(19): 46-51.
HE L D, CAO H, FANG M Z, et al. Cladding Layer Heat-Seal Parameters Optimization of Aircraft Sound Insulation Cotton[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(19): 46-51.
- [11] 赵漫漫, 卢立新. 有关 PET/AL/PE 复合包装薄膜热封工艺参数的研究[J]. *塑料*, 2008, 37(2): 87-91.
ZHAO M M, LU L X. Heat-Seal Processing Parameters of Packaging Laminated Film PET/AL/PE[J]. *Plastics*, 2008, 37(2): 87-91.
- [12] 彭智松, 杨传民, 黄绍祥, 等. 三维袋四层复合材料热封条件与热封性能的研究[J]. *包装与食品机械*, 2017, 35(3): 17-20.
PENG Z S, YANG C M, HUANG S X, et al. Study on

- Heat Sealing Condition and Heat Sealing Property of Three-Dimensional Bag Four-Layer Composite Materials[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2017, 35(3): 17-20.
- [13] 王东升, 郭永健, 母军. PET/PE 复合材料最佳热封工艺参数研究[J]. *包装工程*, 2012, 33(19): 72-74.
WANG D S, GUO Y J, MU J. Research on Optimal Heat-Seal Processing Parameters of PET/PE Composite Material[J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(19): 72-74
- [14] CHAPMAN B. Heat Transfer[J]. *Magnetic Resonance Materials in Biology Physics & Medicine*, 1974, 9(3): 146-151.
- [15] LIPTAK B G. *Temperature Measurement*[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993.
- [16] 叶廷东, 陈耿新, 江显群. *传感器与检测技术*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
YE T D, CHEN G X, JIANG X Q. *Sensor and Detection Technology*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 高电阻电热合金: GB/T 1234—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 11.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. High Resistance Alloys for Electrical Heating: GB/T 1234-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 11.