文章编号：1007 - 4252(2021)06 - 0006 - 565

# 不锈钢纤维电热膜的电热特性及老化性能探究

颜　俏*，葛　鹏
(西部金属材料股份有限公司联合技术中心，西安 710016)

**摘要：基于国家“十四五”规划关于节能减排和电能替代的政策，针对传统的燃煤采暖和碳系电热膜采暖方式，提出更为节能、安全、高效的金属纤维毡电热膜替代方案。实验研究了不锈钢金属纤维烧结毡和针刺毡的静态电阻特性、动态电热特性及针刺毡的老化特性，结果表明由于两种纤维毡成型工艺的不同，加热后电热性能也不同。烧结毡电热膜的阻温特性稳定、温度响应特性良好；针刺毡电热膜电阻率更高、电热转换效果好、温度分布均匀、老化特性良好。**

**关键词：节能减排；电能替代；电热膜；金属纤维；电热性能**
**中图分类号：**TB383　　**文献标志码：**A

# Study on electrothermal characteristics and aging properties of stainless steel fiber electrothermal film

YAN Qiao*，GE Peng
(United Technology Center，Western Metal Materials Co.，Ltd.，Xi'an 710018，China)

**Abstract:** Based on the policy of energy saving，emission reduction and electric energy replacement in the 14th Five-year Plan of The People's Republic of China，a more energy saving，safe and efficient alternative scheme of metal fiber felt electric film was proposed to replace traditional coal-fired heating and carbon heating. The static resistance characteristics，dynamic electrothermal characteristics and aging characteristics of stainless steel metal fiber sintered felt and needled felt were studied experimentally. The resistance-temperature characteristics of sintered felt electrothermal film are stable and the temperature response characteristics are good. Needled felt electrothermal film has higher resistivity，better electrothermal conversion effect，uniform temperature distribution and good aging characteristics.

**Key words:** Energy conservation and emissions reduction；Electric energy replacement；Electrothermal film；Metal fiber；Thermoelectric performance

## 0　引言

传统锅炉燃煤采暖方式下，未经洁净处理的散烧煤直接用于燃烧，产生的污染物严重威胁大气环境。李金平等[1]的实验表明锅炉燃煤采暖方式下室内颗粒物浓度超标严重。此外，城市集中供暖方式投资大、成本高，不适用于农村地区[2]。2016 年

收稿日期：2021-10-20；　修订日期：2021-11-22
通信作者：颜　俏(1992-)，女，硕士，工程师，主要研究方向为换热材料及设备，两相流换热(E-mail：yqsarah@163.com)。

《关于推进电能替代的指导意见》从多方面为全面推进电能替代提供了政策依据[3]，今年国家“十四五”规划纲要提出“碳达峰”和“碳中和”[4]，并提出“单位国内生产总值能源消耗和二氧化碳排放分别降低 13.5%、18%”、“大力提升风电、光伏发电规模”、“合理控制煤电建设规模和发展节奏，推进以电代煤”等一系列目标。电力化将成为新一轮能源革命的根本路径，实施电能替代对推动能源消费革命、落实国家能源战略、促进能源清洁化发展意义重大。电能替代的电量主要来自风力、光伏和生物质等可再生能源发电，我国可再生能源年发电量已多年居世界第一[5]，可再生能源对煤炭的替代，将对提高清洁能源消费比重、减少大气污染物排放做出重要贡献。因此电热膜采暖作为低碳环保、经济普适的采暖方式，是有益于生态发展的新型采暖方式[6]。

《中国散煤综合治理调研报告 2018 执行报告》[7]指出，近年来农村居民对居住环境、取暖方式及相关消费的预期逐步提高，但对取暖成本的承受能力仍有限。电热膜采暖以其低排放、低能耗、体感舒适、安装便捷、安全可靠、使用寿命久等优势展现了广阔的市场前景。实验室制备的电热膜主要由导电物质与成膜材料组成，导电物质包括银系材料和碳系材料，成膜材料需具备反射、绝缘和隔热作用[8]。工艺方法有的是将膜直接制备在被加热载体上，形成的薄膜不能和载体分离[9]；有的是将电热膜元件化，如将导电物质和成膜物质混合成浆料后干燥成膜，以粘结的方式贴在被加热物体上[10]；也有采用物理气相沉积、真空喷涂、离子喷涂、溅射等方法，使导电物与膜状基片组成一体[11]，或将电热膜浆料制成转印纸等[12]。当前市场上的电热膜地暖主要是在无纺布铝膜上铺设或涂覆石墨或碳纳米材料导电膜而成，具有高导电和超轻薄特性，但碳系导电材料因其易氧化、易燃烧、温度不均等特点，在实际采暖过程中安全性较低。为探究更安全、更稳定、温度均匀性更好的电热膜材料，本研究对不锈钢金属纤维烧结毡和针刺毡的电热特性及老化特性展开了实验研究。

## 1 电热特性及老化特性实验设计

### 1.1 电热膜实验样品

铺设电热膜时，主要的结构如图 1 所示，从上到下依次为地板/地砖、绝缘导热层、电热膜层（导电加热层）、绝缘绝热层、地面，其中发热主体是电热膜，因此本文主要针对金属纤维毡做电热膜进行电热性能探究。

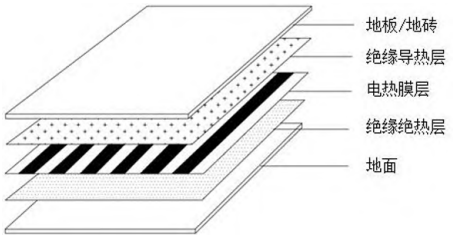


图 1 电热膜铺设结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrothermal film laying structure

实验分别选取不锈钢纤维烧结毡和不锈钢纤维针刺毡做研究对象，如图 2 所示，其中烧结毡的纤维丝径为 20 μm、孔隙率为 80%、厚 1 mm；针刺毡的纤维丝径为 12 μm、孔隙率为 85%、厚 2 mm。实验中两种样品的长宽尺寸均为 327 mm×36 mm。由于生产工艺的不同，烧结毡的纤维之间接触点为焊接，而针刺毡的纤维之间接触点则为搭接，如图 3 所示。因此前者的机械强度高于后者，但后者的柔性可变形量远大于前者。

图 2 不锈钢纤维烧结毡和针刺毡电热膜样品

Fig. 2 Samples ofstainless steel fiber sintered felt and needled felt electrothermal films

### 1.2 实验系统

实验测试系统如图 4 所示，主要实验仪器包括：0~10 A 直流稳压恒流电源 SS-L3010SPV（自带电参数测试功能），电热膜实验样品，数据采集仪 Agilent 34972A 和计算机。

电热膜样品通过电极夹、电极铜片及正负极导线连接至直流稳压电源，恒定电流流经电热膜样品对其加热。实验中加热电流变化范围为 0~10 A，从

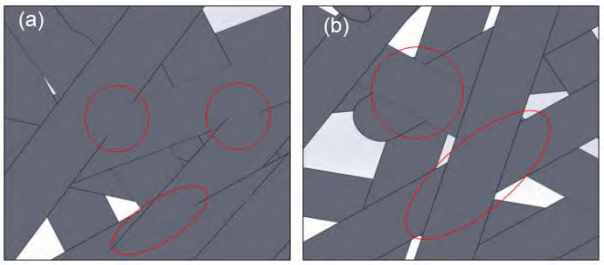


图 3　(a) 烧结毡电热膜与(b) 针刺毡电热膜纤维接触点示意图

Fig. 3 Diagram of fibers contact points of(a) sintered felt and (b) needled felt

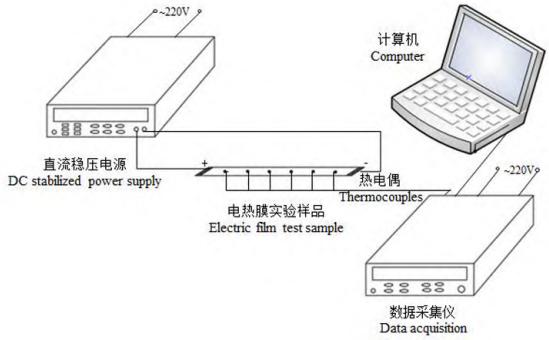


图 4　实验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimentl system

0.5 A 开始调节，每间隔 0.5 A 调节一个工况。电热膜样品上表面间隔均匀地布置有 6 支热电偶，用以测量 6 个位点的温度；热电偶的测试数据传至数据采集仪，并通过计算机实施监测。每个工况下采集的数据包含温升过程和 10 min 稳定过程。实验结束后取各个位点稳定后的平均温度作为电热膜样品在该加热电流下的表面温度。

烧结毡成型过程已经对纤维进行了高温烧结，循环电加热不会明显加速其老化，因此本文的老化特性实验主要针对针刺毡样品进行。用上述方法对针刺毡样品进行了 3 次循环实验(20 个工况，大于 600 min)，通过扫描电子显微镜(SEM) 和 X 射线衍射(XRD) 分析样品微观层面变化。

## 2　实验数据处理

### 2.1　材料电阻率

电阻率是表示物质电阻特性的物理量，反映物质对电流的阻碍作用。电阻率与材料种类有关，同时受温度影响，在较小温度变化范围内，几乎所有金属的电阻率都随温度作线性变化。材料的电阻率在数值上等于常温(20 ℃) 下长 1 m，横截面积 1 $m^2$ 的导体的电阻，因此电阻率表示为：

$$\rho = RS/L \tag{1}$$

其中，$\rho$ ——电阻率，Ω · m；$R$——电阻，Ω；$S$——横截面积，$m^2$；$L$——导体长度，m。

### 2.2　温度增长参数

电热膜升温所用时间表示了电热膜的温度响应性能。升温特性采用随时间变化的温度增长参数[13] 来描述，将测量值 $\tau$ 代入下式中计算即可得到[13-16]：

$$\left(\frac{T_t - T_i}{T_m - T_i}\right) = 1 - e^{-\tau/\tau_g} \tag{2}$$

其中，$T_i$ ——初始温度，℃；$T_m$ ——稳定时最高温度，℃；$T_t$ ——任意时刻 t 的温度，℃；$\tau$ ——随时间变化的温度增长参数，s。

### 2.3　电热转换率

电热转换率是衡量材料电热性能的重要参数，其大小表示升高单位温度时需要消耗的电功率，其值越小说明电热转换性能越好[13]。将测量值代入下式计算电热转换率[13-17]：

$$h_{r+c} = \frac{I_c V_i}{T_m - T_i} \tag{3}$$

其中，$I_c$ ——稳态电流，A；$V_i$ ——对样品施加电压大小，V；$h_{r+c}$ ——电热转换率，W/ ℃。

## 3　实验结果与分析

### 3.1　静态电阻特性

电热材料的电阻率越大，相同的截面和长度下电阻越大，流经相同的电流产生的焦耳热越多，则电热转化效果越好。目前市场常见的金属导电材料及石墨导电材料的电阻率如表 1 所示，其数值大小在 $10^{-8}$ ~ $10^{-6}$ 量级。

表 1　常见金属导电材料及石墨导电材料的电阻率(20 ℃)[17]

Table 1 Resistivity of common metal and graphite conductive ma-

terials(20 ℃)[17]

| 导电材料 | 电阻率/Ω·m | 导电材料 | 电阻率/Ω·m |
|---|---|---|---|
| 银 | $1.65\times10^{-8}$ | 汞 | $9.6\times10^{-7}$ |
| 铜 | $1.75\times10^{-8}$ | 康铜 | $5.0\times10^{-7}$ |
| 铝 | $2.83\times10^{-8}$ | 镍铬合金 | $1.0\times10^{-6}$ |
| 钨 | $5.48\times10^{-8}$ | 铁铬铝合金 | $1.4\times10^{-6}$ |
| 铁 | $9.78\times10^{-8}$ | 铝镍铁合金 | $1.6\times10^{-6}$ |
| 铂 | $2.22\times10^{-7}$ | 石墨 | $(8\sim13)\times10^{-6}$ |
| 锰铜 | $4.4\times10^{-7}$ | | |

图 5 所示为不锈钢纤维烧结毡和针刺毡电热膜的电阻率随加热电流的变化曲线。加热电流的增大会引起电热膜温度的提高,因此该变化规律反映了材料本身与温度对材料电阻率的共同影响。

结果表明初始加热时,烧结毡电热膜的电阻率约为 $1.9\times10^{-5}\Omega\cdot m$,针刺毡电热膜的电阻率约为 $1.8\times10^{-4}\Omega\cdot m$,后者约为前者的 10 倍,且二者电阻率均大于表 1 中常见金属导电材料及石墨的电阻率,均可作为电热材料。分析认为由于材料成型工艺的不同,针刺毡毡体疏松,相互搭接的纤维之间接触电阻更大。此外相比于焊接接触,搭接不良导致纤维丝之间形成的并联电路少,同时纤维丝径更细,因此针刺毡电热膜整体电阻率更大。

两种电热膜在加热过程中电阻率变化趋势不同。电流的变化对烧结毡电热膜的电阻率影响较小,烧结毡电阻率随电流缓慢增大,但增幅很小,表明不锈钢烧结毡的电阻率比较稳定;针刺毡电热膜的电阻率在低电流加热下较为稳定,当电流大于4 A 时,其电阻率随着加热电流的增加逐渐减小,且减幅越来越大,这是由于毡体温度升高纤维丝变软,原本疏松的毡体出现“塌陷”,纤维间的接触增强而电阻降低,因此电阻率在高温下大幅降低。综上所述烧结毡电热膜与针刺毡电热膜的电阻率均大于普通电热材料,但前者相较于后者更稳定,电阻率受温度影响更小。

### 3.2 动态电热特性

电热膜材料的动态电热特性包括材料的阻温特性、温度响应特性、温度均匀性和电热转化特性等,均是反映材料加热性能的关键。电热膜电阻值在温度变化时的稳定性决定了功率调节和温度控制的精确性,升、降温过程的快慢反映了电热膜材料的温度响应能力,温度均匀性决定了电热膜使用过程的安全性,电热转换率则是衡量电热效率的关键指标。

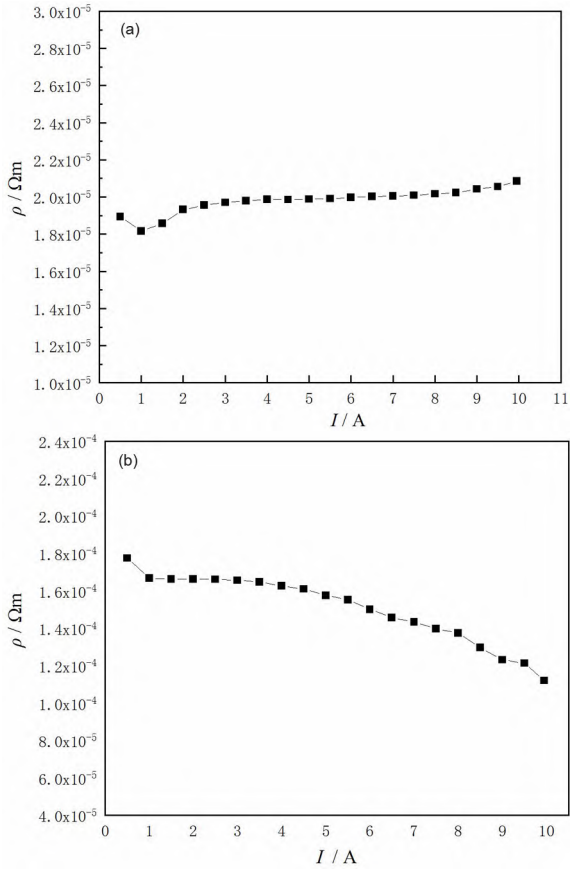


图 5 电热膜的电阻率随加热电流的变化:(a) 烧结毡电热膜;(b) 针刺毡电热膜

Fig. 5 Resistivity of (a) sintered felt and (b) needled felt films varies with heating current

图 6 所示为不锈钢纤维烧结毡电热膜和不锈钢纤维针刺毡电热膜的电阻随温度变化的曲线。实验数据表明,由于材料本身电阻率大小的不同,在相同的起始温度和电流变化范围下,针刺毡电热膜可达到的最高温度为烧结毡最高温度的 2 倍。观察发现,烧结毡电热膜在 25~65 ℃温度范围内的电阻值随着电热膜表面温度的升高无明显变化,电阻稳定性很好,有利于电热膜的精准控温;而针刺毡电热膜在 25~130 ℃温度范围内电阻值随着电热膜表面温度的升高持续降低,且幅度越来越明显,与上述结论吻合,温度的升高使得纤维丝变软,相互搭接的纤维之间接触电阻不断减小。

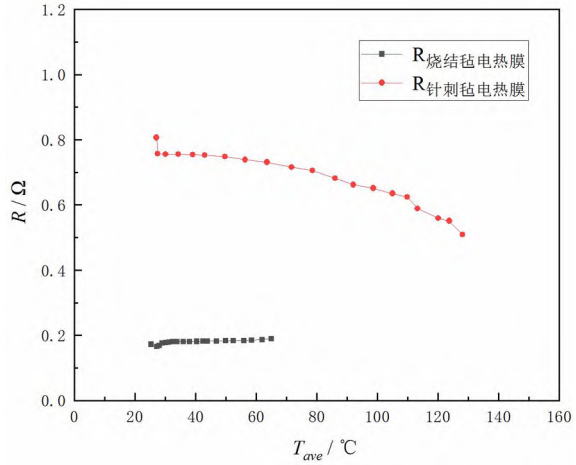


图 6　电热膜的阻温特性

Fig. 6 Thermal resistance characteristics of electrothermal films

综上所述,相同输入条件下针刺毡电热膜因其较高的电阻值,可以更高效地将电能转化为热能,但烧结毡电热膜比针刺毡电热膜具有更稳定的阻温特性,更便于精确控制。

图 7 所示为特定加热电流下( 3.5 A) 不锈钢纤维烧结毡电热膜和不锈钢纤维针刺毡电热膜的温度响应曲线,包括升温过程及断电后自然降温过程。本文研究中仅讨论其升温过程。

两种电热膜在加热过程中的时间-温度曲线变化规律一致,可分为三个区域,即快速升温区、过渡升温区和温度稳定区。快速升温区的曲线斜率直观地反映了电热膜的升温速率,快速升温区曲线斜率越大,该电热膜升温速率越快。由图 7( a) 和 7( b) 可看出,在相同的加热电流和初始温度条件下,烧结毡电热膜与针刺毡电热膜的快速升温区耗时均在 100 s 以内,烧结毡电热膜的升温速率更快,更早进入温度稳定区,而针刺毡电热膜在稳定区达到了更高的表面温度。魏炜[18] 等人对碳与陶瓷复合电热材料的研究中也发现了试样的电阻率越低,其升温速率越快,且温度越高,这与本文不锈钢金属纤维电热膜的实验结果相反。

此外图 7 还反映了同一工况稳定温度时两种样品上表面的各个位点的温度均匀性,发现烧结毡电热膜的各个测点温度值存在一定差异,最高温度和最低温度之间相差 3 ℃左右; 而针刺毡电热膜表面温度分布均匀,且无明显高温点。通过 SEM 观察( 图 8) ,针刺毡相较于烧结毡纤维分布更加均匀,纤

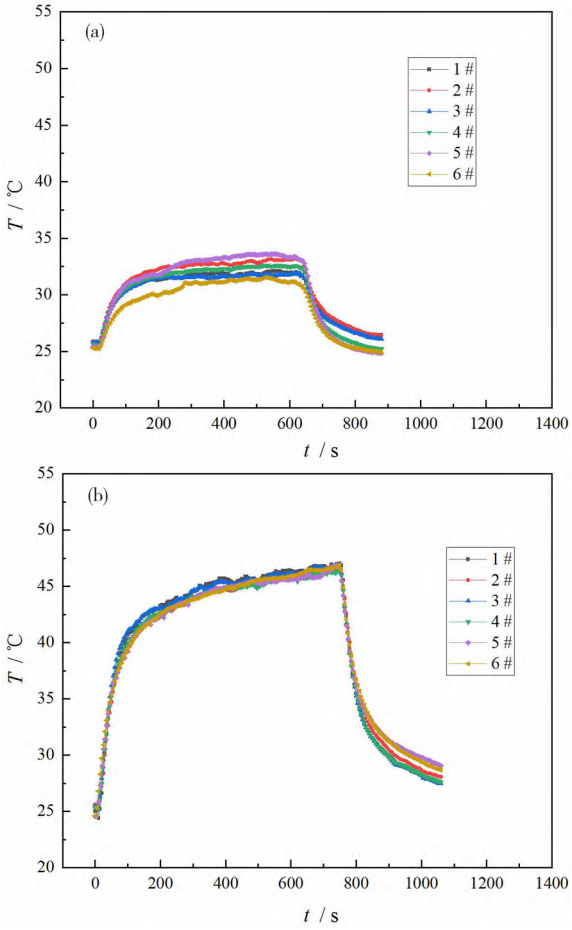


图 7　电热膜的温度响应曲线: ( a) 烧结毡电热膜; ( b) 针刺毡电热膜

Fig. 7 Temperature response curves of( a) sintered felt and ( b) needled felt films

维间形成的并联网络更多,因此电流通过时会分布得更加均匀,也不会产生局部过热现象。

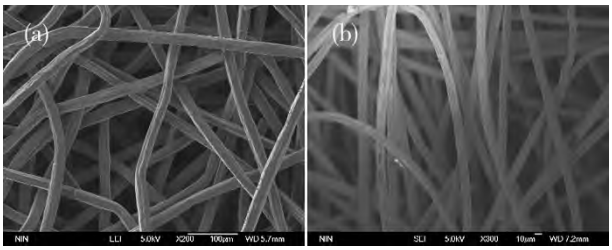


图 8　两种电热膜样品材料的电镜照片: ( a) 烧结毡电热膜; ( b) 针刺毡电热膜

Fig. 8 SEM images of( a) sintered felt and ( b) needled felt films

随时间变化的温度增长参数定量地反映电热膜

的温度响应性能。根据公式(2)计算了两种电热膜在相应加热工况下的温度增长参数,见表2。表中数据剔除了偏离误差允许范围的烧结毡1 A数据及针刺毡10 A数据。随时间变化的温度增长参数的值越小,表示电热膜从室温升温至稳定温度,即快速升温区和过渡升温区所需的时间越短,电热膜的温度响应性能就越好。烧结毡电热膜样品随时间变化的温度增长参数为221.37 s,针刺毡电热膜样品随时间变化的温度增长参数为310.22 s,前者比后者小28.6%,说明烧结毡电热膜的温度响应性能更好,加热后升温速率更快,与上述结论相一致。

表2 电热膜随时间变化的温度增长参数与电热转换率

Table 2 Temperature growth parameters of electrothermal films and electrothermal conversion efficiencies

| 电热膜样品 | 电流/A | 随温度变化的温度增长参数 $\tau_g$ /s | 电热转换率 $h_{r+c}$ /(W/℃) |
|---|---|---|---|
| 烧结毡 | 2~10 A | 221.37±135.81 | 7.14±6.43 |
| 针刺毡 | 1~9 A | 310.22±265.43 | 2.97±2.18 |

根据公式(3)计算了两种电热膜的电热转换率,结果见表2。由表中数据可知,通电电流在2~10 A条件下,不锈钢纤维烧结毡电热膜的电热转换率变化范围在7.14±6.43 W/℃;通电电流在1~9 A条件下,不锈钢纤维针刺毡电热膜的电热转换率在2.97±2.18 W/℃之间变化。相比之下针刺毡电热膜升高单位温度所消耗的电能更少,呈现出更好的电热转换效果。

### 3.3 电热循环与老化特性

本实验对针刺毡电热膜进行了三次循环加热实验,每次实验20个工况,每个工况持续加热10 min,因此针刺毡电热膜累计循环加热600 min。如图9所示为针刺毡电热膜三次加热过程的电热循环特性。随通过电流的增大,样品两端加载的电压随之增大,曲线的整体斜率随电流增大而逐渐减小,曲线趋于平缓,见图9(a);随通过电流的增大加载给样品的加热功率也随之增大,见图9(b);样品表面平均温度也逐渐增大,见图9(c)。总体来说第二次加热过程中电压、加热功率和表面温度相比于第一次均有明显的增大或提高,但第三次循环加热过程的电压、功率和表面温度相比第二次则变化很小,曲线几乎重合。

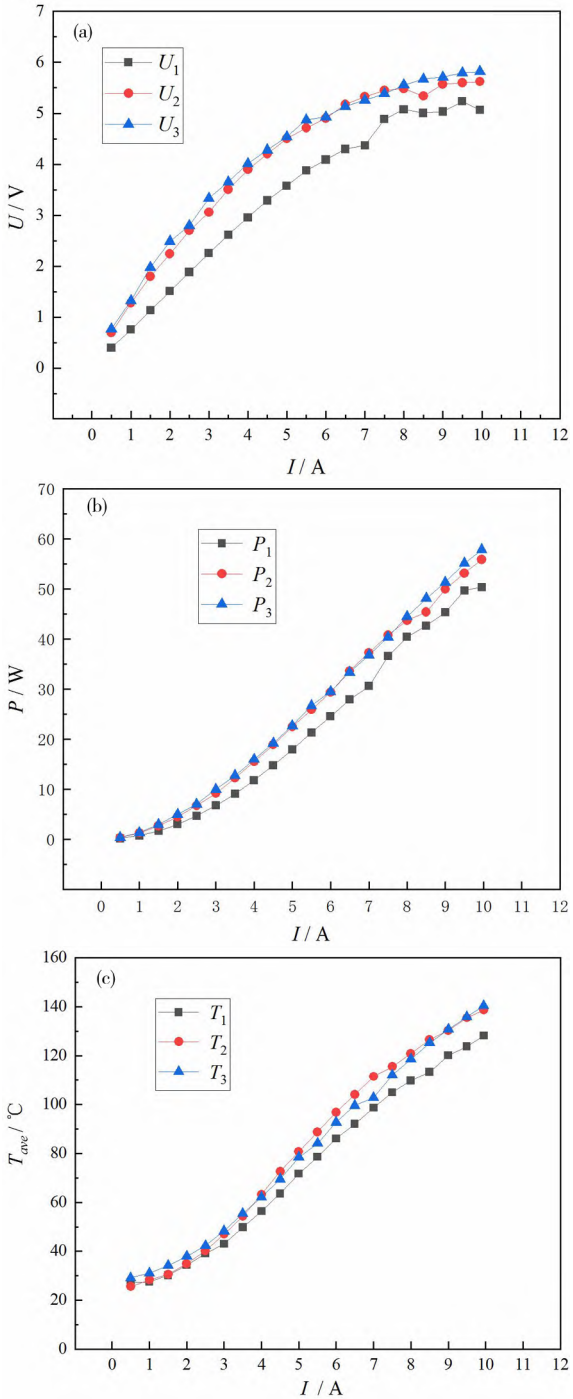


图9 针刺毡电热膜循环加热特性:(a)电流电压关系;(b)电流功率关系;(c)表面平均温度

Fig.9 Cycling heating characteristics: (a) $I-V$; (b) $I-P$; (c) $I-T_{avg}$ of needled felt electrothermal film

如图10所示为三次循环加热过程针刺毡电热

膜的电阻值变化情况。循环加热后针刺毡电热膜的纤维丝有所氧化,电阻明显增大,因此导致了图 9 所示的电压及功率的增大,从而温度上升。第二次加热相比于第一次,毡体电阻大幅增加,低电流下阻值增幅超过 50%; 第三次加热相比于第二次,毡体电阻增幅较小,高电流时电阻的增幅接近于 0。分析认为这是由于第一次加热过程大部分纤维丝已发生了表面氧化,其整体电阻值已达到一个较高值,再次加热后仅有少部分未充分氧化的纤维发生进一步氧化,因此电阻值增幅有限。

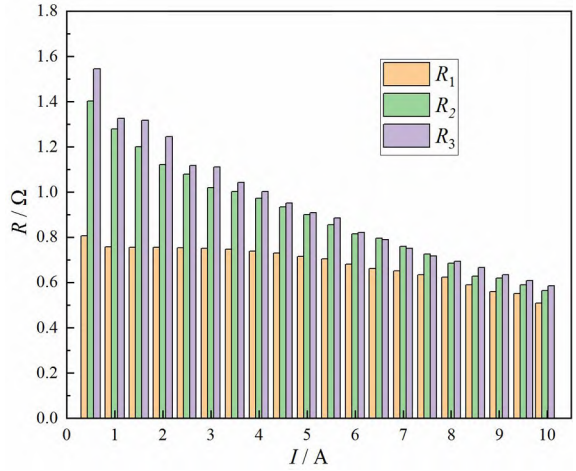


图 10　针刺毡电热膜循环加热过程电阻值的变化

Fig.10 Change of resistance value of needled felt electrothermal film during cycle heating

为验证纤维表面氧化物的生成,分别通过 500 倍、3000 倍和 5000 倍扫描电镜 SEM 观察未加热样品和循环加热后样品表面的微观形态。观察氧化层在电热膜表面的分布情况如图 11,其中( a) ( b) ( c) 为未加热样品,( d) ( e) ( f) 为三次循环后的样品。由图可知未加热不锈钢针刺毡表面光滑,可见金属切削的痕迹,未见明显的金属氧化物附着。循环加热后的纤维丝表面出现明显的块状和颗粒状物质,分析认为循环通电高温加热后纤维表面确实生成了某种金属氧化物,这是造成电阻增大的主要原因。

为进一步分析金属氧化物的成分,对未加热样品和三次循环后的样品进行了 XRD 衍射图谱分析,如图 12,测试条件为: 40 kV、40 mA、步长 0.02°、2$\theta$ 范围 30°~90°连续扫描。图中下方为未加热图谱,上方为循环加热后图谱。将图中衍射峰与各物相的标准卡片比对,获得未加热不锈钢针刺毡样品主要

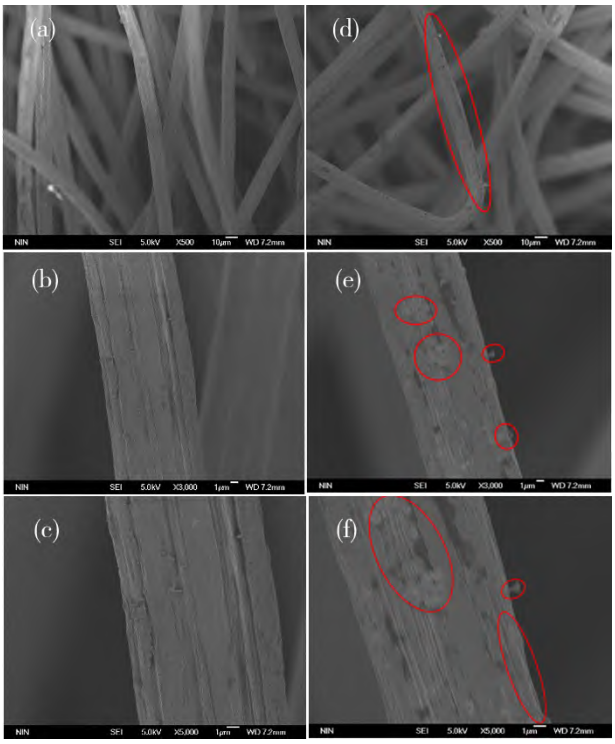


图 11　三次循环加热前、后的针刺毡电热膜表面电镜

Fig. 11 SEM images of needled felt electrothermal film's surface before and after three cycles of heating

的化学成分为 Fe、Mn、Cr、C、Mo 等。经过三次循环电加热( 最高温度约 140 ℃) 后的样品图谱与未加热样品图谱相比,多了一个较小较窄的衍射峰,这说明在加热温度范围内形成了少量大晶粒的氧化物。通过比对分析发现该氧化物为 $Fe_3O_4$,使得针刺毡电热膜的电阻有所增大。

总体而言,无论通过 SEM 观察还是 XRD 衍射峰分析都可以看出生成的 $Fe_3O_4$ 较少,综合图 9 和图 10 的实验数据分析可得,Fe 的氧化过程在样品初次加热时十分显著,随着时间的推移氧化会越来越慢,第二次和第三次加热中样品成分已相对稳定,认为针刺毡电热膜的老化性能较好,可以反复循环加热而电热性能稳定。

## 4　结论

1) 不锈钢纤维烧结毡与针刺毡的电阻率均大于普通电热材料,针刺毡电阻率约为烧结毡的 10 倍,呈现出更好的电热转换效果,但烧结毡阻温特性更好,更便于温度控制。

2) 烧结毡电热膜的整体响应时间更短,更快达

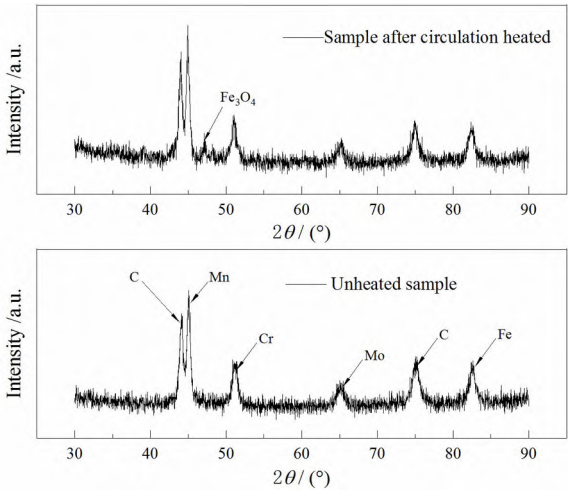


**图 12 三次循环加热前、后的针刺毡电热膜 XRD 衍射图谱**

Fig. 12 XRD patterns of needled felt electrothermal film before and after three cycles of heating

**到稳定温度。针刺毡电热膜纤维间形成的并联网络更多，表现出更好的温度均匀性。**

**3) 针刺毡加热后纤维表面生成了少量 $Fe_3O_4$，使得材料电阻值有所增大，且该氧化过程在初次加热中十分显著，在后续加热过程中氧化速率降低，逐渐趋于稳定，表现出良好的老化特性。**

**参考文献:**


[1] 李金平，关文静，李红博，等. 采暖方式对严寒地区农村室内空气质量的影响研究 [J]. 太阳能学报，2020，41(02)：238-245.

[2] 张甫仁，王乐祥，王建辉，等. 农村沼气和太阳能联合供暖系统的实验研究 [J]. 太阳能学报，2019，40(11)：169-175.

[3] 栾 松. 电热膜在建筑采暖市场应用前景 [C] // 全国第十六届红外加热暨红外医学发展研讨会论文及论文摘要集，2017.

[4] 国家能源局. 实施电能替代推动能源消费革命——解读《关于推进电能替代的指导意见》 [J]. 中国经贸导刊，2016，18：51-52.

[5] 农村电工编辑部. 构建现代能源体系，布局能源高质量发展—— “十四五”规划和 2035 年远景目标纲要发布 [J]. 农村电工，2021，29(5)：1.

[6] 李 鹏，陈一言. 引领可再生能源由高速发展转向高质量发展——专访清华大学教授，青海大学副校长梅生伟 [J]. 太阳能，2020，319(11)：7-10.

[7] 何永丽.《中国散煤综合治理调研报告 2018 执行报告》[R]. 中国煤炭网，2018.

[8] 王立平. 柔性电热膜的研究与制作 [D]. 武汉：华中科技大学，2009.

[9] 刘春玲，韩 啸，姜玉淼，等. 无线石墨烯电热膜加热器的设计 [J]. 吉林师范大学学报(自然科学版)，2019，148(03)：65-69.

[10] 陈达亮，徐诗鸣. 金属电热膜在家电领域的应用前景 [J]. 家电科技，2000，012：41-41.

[11] 郝晓辉. 高温红外电热膜的制备及特性研究 [D]. 保定：河北大学，2004.

[12] 王 芳. 新型低温辐射金属电热膜的开发和应用 [J]. 节能技术，2005，05：409-410.

[13] 王慧翀. 纳米碳材料电热膜制备及其电热特性研究 [D]. 北京：北京林业大学，2019.

[14] Jeon G W，Jeong Y G. Electric heating films based on m-aramid nanocomposites containing hybrid fillers of graphene and carbon nanotube [J]. Journal of Materials Science，2013，48(11)：4041-4049.

[15] Jeong Y G，An J E. Effects of mixed carbon filler composition on electric heating behavior of thermally-cured epoxy-based composite films [J]. Composites Part A Applied Science and Manufacturing，2014，56(1)：1-7.

[16] Lee T W，Lee S E，Jeong Y G. Carbon nanotube/cellulose papers with high performance in electric heating and electromagnetic interference shielding [J]. Composites Science & Technology，2016，131：77-87.

[17] 李立碑，孙玉福. 金属材料物理性能手册 [M]. 机械工业出版社，2011.

[18] 魏 炜，夏金童，李 劲. 新型炭/陶复合电热材料的研制 [J]. 功能材料，2011，42(09)：1619-1622.