引用格式:万永涛,朱建雄.炭黑强化的柔性电子大量程发热薄膜[J].材料工程,2026,54(5):213-220.
WAN Yongtao, ZHU Jianxiong. Carbon black-reinforced flexible electronic large-range heat-generating films[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(5): 213-220.

炭黑强化的柔性电子大量程发热薄膜

万永涛,朱建雄*
(东南大学 机械工程学院,南京 211189)

摘要:在半导体行业中,温度控制至关重要,但该领域仍面临诸多研究挑战,如温控材料的选择与散热管理方案的设计等。其中,柔性电子薄膜的研发亦是重要难题。然而,目前基于石墨烯和碳纳米管的柔性电子薄膜因成本高昂,限制了其广泛的应用。因此,开发一种具有优异发热性能、广泛调控范围且适用于大规模应用的炭黑柔性电子薄膜具有重要意义。为确定炭黑的最优填充量,本工作研究制备了不同炭黑填充量的复合薄膜,并对其进行了一系列测试,包括渗透阈值、最高温度、温度快速响应、循环加热热稳定性及拉伸性能测试。实验结果显示,炭黑在聚合物基体中的渗透阈值约为20%。炭黑发热膜的调控温度范围为25~60 ℃。在32 V电压下,填充量分别为50%和55%的炭黑薄膜最高温度达到53.9 ℃和60 ℃。两种薄膜不仅展现出较大的调控范围,还在循环加热后保持良好的热稳定性,并具有优异的力学性能。

关键词:炭黑薄膜;渗透阈值;电热性能;循环加热
doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000859 **CSTR**: 32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000859
中图分类号: TB332 **文献标识码**: A **文章编号**: 1001-4381(2026)05-0213-08

Carbon black-reinforced flexible electronic large-range heat-generating films

WAN Yongtao, ZHU Jianxiong*
(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In the semiconductor industry, temperature control is of paramount importance, yet numerous research challenges persist, such as the selection of thermal control materials and the design of heat dissipation management systems. The development of flexible electronic films is also a significant challenge. Currently, flexible electronic films based on graphene and carbon nanotubes are hindered by high costs, limiting their widespread application. Therefore, the development of carbon black flexible electronic films with excellent heating performance, a broad temperature regulation range, and suitability for large-scale applications is of considerable significance. To determine the optimal carbon black loading, this study fabricates composite films with varying carbon black contents and conducts a series of tests, including percolation threshold, maximum temperature, rapid thermal response, cyclic heating stability, and tensile performance tests. The experimental results indicate that the percolation threshold of carbon black in the polymer matrix is approximately 20%. The temperature regulation range of the carbon black heating films is between 25 ℃ and 60 ℃. Under a 32 V voltage, films with 50% and 55% carbon black content reaches maximum temperatures of 53.9 ℃ and 60 ℃, respectively. Both films demonstrate not only a broad regulation range but also excellent thermal stability after cyclic heating, along with superior mechanical properties.

Key words: carbon black film; permeation threshold; electrothermal property; cyclic heating

在半导体制造行业中,温度的控制极其重要,细微的温度波动都有可能影响到半导体的性能和使用寿命。并且随着半导体制造技术的更新,芯片逐渐往集成化的方向发展,芯片的大小从几十纳米减少到几

纳米，这导致半导体制造行业的温度控制愈发困难。而柔性电子薄膜可以作为比较完美的温控元件应用在半导体行业中，柔性电子薄膜具有质量轻、耐高温、可弯折等特性[1]，这意味着柔性电子薄膜可以更紧密、更精确地覆盖在半导体器件表面，从而提高半导体器件热交换效率和温控精度[2]。而且柔性电子薄膜体积小，可以有效减小占用空间，能够满足半导体制造高度集成化的设计需求。

但是目前柔性电子薄膜的研究目前主要聚焦于石墨烯柔性电子薄膜的研究，如 Ma 等[3]研究了使用少量混合炭黑/碳纳米管导电填料来制作柔性电子薄膜，发热效果良好。Zhu 团队[4-6]研究了石墨烯在柔性传感器和电容方面的作用，效果良好。Xiao 等[7]利用高导电炭黑（SCB）制作出了低电压下的高温发热器。方梅等[8]针对碳纤维增强 Vitrimer 环氧树脂复合材料的研究，证明了 V-CFRP 复合材料的热压模塑成型能力，有利于制造寿命长的薄膜。张鹤白等[9]以海藻酸钠修饰碳纳米管制备导电油墨，经浸涂与氯化钙处理得到兼具耐水洗、导电性与力学性能的弹性导电织物，具有优异的传感性能。白家设等[10]通过化学接枝法将碳纳米管-聚酰亚胺接枝到碳纤维表面，构筑的 CF-g-CNT 增强相可显著改善复合材料界面性能。虽然石墨烯和碳纳米管作为导电填料在柔性薄膜的应用上效果良好，但其成本高昂，不利于柔性电子薄膜的大范围应用。

为了降低成本，价格低廉且导电性能良好的炭黑粉末得到了青睐[11]。Zhu 等[12]制作了炭黑柔性电子薄膜作为柔性传感器，Wang 等[13]制备了一种电纺热塑性聚氨酯（TPU）纤维膜基质嵌入炭黑（CB）颗粒的导电聚合物复合材料，具有可调节的支架网络，用于高灵敏度应变传感器。Bian 等[14]和 Li 等[15]通过多层结构和纳米复合材料的开发，利用涂膜、印刷和溶液处理等技术制备薄膜，优化了薄膜性能。然而，当前研究人员主要聚焦于炭黑粉末在柔性薄膜传感器领域的应用探究，相较而言，其在薄膜发热温控方面的应用研究则颇为匮乏。

所以本工作利用炭黑粉末制作柔性电子发热复合薄膜，薄膜由绝缘保护层和导电层两部分组成。绝缘层是绝缘聚合物材料（将脂肪族二异氰酸酯和铂催化硅酮两者 1∶1 混合反应后生成的聚合物作为基体材料），导电层则是高导电性聚合物薄膜（炭黑粉末掺杂进入聚合物基体，形成高导电性聚合物）。制作完成后，对炭黑发热薄膜进行炭黑渗透阈值测试，最高温度测试，温度快速响应，循环加热热稳定性测试以及拉伸测试，检验其能否大范围使用[16-17]。

1 炭黑柔性电子薄膜的制备

1.1 实验材料

脂肪族二异氰酸酯和铂催化硅酮购自美国 Smooth On 公司，高色素炭黑粉末 N660 购自天津宝驰化工科技有限公司。

1.2 试样制备

首先制作绝缘保护层，将脂肪族二异氰酸酯和铂催化硅酮在常温下以 1∶1 的体积比混合，在烧杯中搅拌 45 min，使得两者充分反应，保证混合物充分分散。静置一段时间后，在干净的亚克力板上进行涂膜如图 1（a）所示。为了确保薄膜厚度在（0.5±0.1）cm，且保证薄膜质量的连续性，其步骤如下：首先，将混合好的材料均匀倒在亚克力板上，使用手动辊筒均匀滚动，通过控制辊筒的压力和速度，确保材料分布均匀，形成初步的薄膜。在涂布后，使用厚度规对薄膜的不同区域进行测量，确保薄膜厚度符合（0.5±0.1）cm 的要求。如果发现厚度不均匀，可重新使用手动辊筒对材料进行调整和分布，直到各个区域的厚度达到一致。这样可以保证薄膜质量的连续性。确保薄膜均匀后，将亚克力板放入 70 ℃的电热鼓风干燥箱中干燥 4 h，最终形成均匀的绝缘聚合物薄膜。

而炭黑导电发热膜的制作是将炭黑粉末掺杂进入脂肪族二异氰酸酯和铂催化硅酮中，如图 1（b）所示。其中脂肪族二异氰酸酯与铂催化硅酮体积比是固定的 1∶1，可以调整炭黑粉末的掺入量，得到不同炭黑体积分数的薄膜，其他制作过程与绝缘聚合物薄膜相同。最后将绝缘保护层薄膜与炭黑导电薄膜组装起来得到基于炭黑强化的柔性电子薄膜。这样得到的薄膜不仅拥有良好的耐化学、耐腐蚀性能（绝缘保护层的作用），还拥有优异的导电导热性（导电薄膜的作用）。制作出的薄膜如表 1 所示。

1.4 表征与原理分析

为了清楚地观察炭黑柔性电子薄膜的微观结构以及观察炭黑粉末在柔性电子薄膜中的分布，理解炭黑薄膜的导电原理。使用电子光学显微镜对试样进行表面形貌观察和分析。

炭黑柔性电子薄膜的光学显微照片如图 2 所示，炭黑填料颗粒已融入聚合物薄膜，大量的炭黑填料颗粒覆盖在聚合物基体上。图中的炭黑填料颗粒由炭黑团聚体组成，炭黑团聚体指的是炭黑聚集体在有机聚合物液体中形成的团聚现象[18-20]。

当炭黑的填充量较低时，大部分炭黑团聚体此时是分散的，即炭黑团聚体之间没有相互连通，电子无法自由流动，导致导电导热效果很差。随着炭黑填充

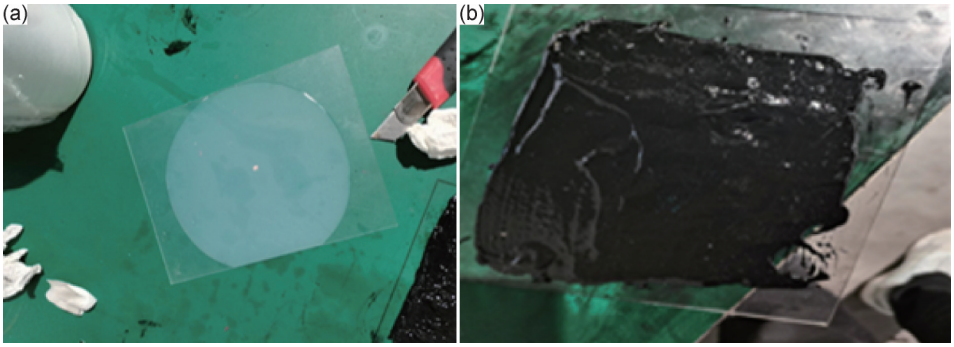


图 1　发热薄膜的制作　(a)绝缘体薄膜;(b)导电薄膜

Fig.1　Fabrication of heat generating film　(a)insulator film;(b)conductive film

表 1　炭黑导电薄膜

Table 1　Carbon black conductive films

Conductive film	Volume fraction of carbon black/%
CB1	20
CB2	25
CB3	35
CB4	40
CB5	45
CB6	50
CB7	55

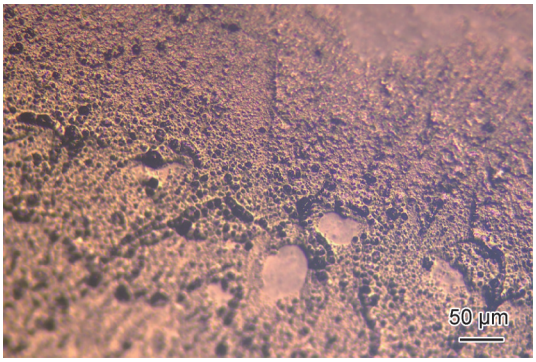


图 2　炭黑薄膜的光学显微照片

Fig.2　OM image of carbon black films

量的增加,大量炭黑团聚体逐渐聚集在一起,开始形成了炭黑链。如随着炭黑填充量进一步增加,炭黑链数量增多,逐步形成炭黑网络。炭黑的三维网络结构是连续和复杂的,这使得电子能够在薄膜中自由流动,提升薄膜的导热性,导电性。这就是炭黑发热膜的发热原理[21]。

2　性能测试

2.1　电渗流阈值测试

炭黑的渗流阈值指的是将导电填料炭黑掺入绝缘聚合物基体当中后,当导电填料浓度超过渗透阈值时,材料就会从绝缘体转变为导体[22-24]。

使用 KEITHLEY 静电计来测量不同炭黑填充量的薄膜的电阻,然后根据式(1),(2)计算电阻率ρ。

$$R=\rho\frac{L}{S} \tag{1}$$

$$\rho=R\frac{S}{L}=R\frac{\sigma B}{L} \tag{2}$$

式中:R是电阻值,S/cm;S为电热膜有效面积,cm^2;σ为薄膜厚度;L为测试两电极之间的有效距离。

实验中对每种样品测试5次取电阻的平均值,然后计算出对应的电阻率,最后处理作图,得到电阻率与炭黑体积分数之间的关系如图3所示。

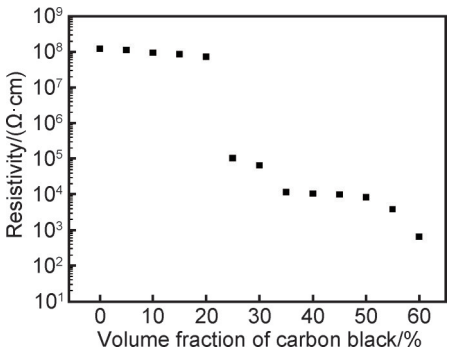


图 3　电阻率与炭黑体积分数之间的关系

Fig.3　Relationship between electrical resistivity and carbon black volume fraction

炭黑填充量为0的聚合物薄膜(即保护层薄膜)的电阻率的数量级约为10^8 Ω·cm,这表明聚合物基体是绝缘材料,不能导电。当炭黑填料的体积分数为0%~20%时,薄膜的电阻率变化不大,此时的电阻率在10^7~10^8 Ω·cm的数量级之内。这意味着在炭黑填充量较低时,薄膜依然是电绝缘体。因为导电炭黑颗粒在聚合物基体当中没有形成导电网络,无法导电。在炭黑填充体积分数达到20%左右,炭黑薄膜的电阻率迅速下降,呈现数量级的下降。由此可推断,炭黑

填充体积分数约为20%这一数值可被认定为聚合物的渗透阈值。

2.2 拉伸力学性能分析

在实际应用中,柔性电子薄膜要求有一定的拉伸性能,这是作为其柔性功能的一部分。所以对薄膜进行拉伸测试,在室温23 ℃左右对炭黑填充量为35%、45%薄膜(CB3、CB5)进行4次拉伸,并记录每次随着拉伸之后的电阻变化,测试薄膜是否拥有良好的力学性能。图4为部分炭黑导电发热膜的拉伸电阻变化关系图。

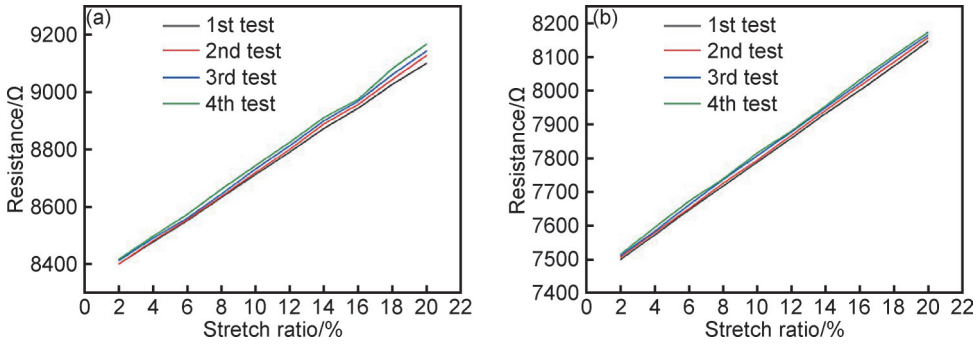


图4 炭黑薄膜的拉伸电阻变化图 (a)CB3薄膜;(b)CB5薄膜

Fig.4 Variation of tensile resistance of carbon black films (a)CB3 film;(b)CB5 film

由图4可知,在炭黑薄膜的4次拉伸的过程中,其电阻的变化规律基本一致。在一定程度的拉伸时,电阻的变化误差不大。并且,在经历拉伸并恢复至初始状态后,薄膜电阻能够近乎完全地恢复至其原始阻值,这表明该薄膜在拉伸过程中所产生的电阻变化具有良好的可逆性,即炭黑柔性电子发热膜有良好的力学性能,其可以在半导体行业中得到实际的应用[25-26]。

2.3 热性能测试

热性能测试是薄膜发热的关键,测试在室温23 ℃左右。在电压选择方面,因为本实验在低电压条件下具有高发热量的薄膜,所以使用的电压不超过36 V。在初步测试中,通过施加5、10、15 V等电压进行通电实验,结果显示薄膜的发热性能表现平平。因此,为进一步提高发热效率,实验调整了施加电压至20 V以上。经过多次实验和数据分析,最终选择在25 V和32 V电压条件下进行发热性能测试,以评估薄膜在较高电压下的热效应表现。电源使用可调直流稳压电源来提供电压,各薄膜试样大小统一为7 cm×3 cm。

以下全部热测试中使用温度数据采集器THERMES-USB记录温度,将热电偶放置在炭黑复合薄膜的绝缘导热层,当温度采集器接触实验物体后,传感器会根据物体的温度产生相应的电信号,然后采集器会对这些信号进行采集,能够精确地捕捉到微小的温度变化信号。发热测试中用温度采集器实时记录炭黑柔性电子薄膜的温度随时间的变化数据,记录各个薄膜发热的最高温;在温度响应测试中,用温度采集器记录各个薄膜温度随时间变化的曲线;在热稳定性测试中,将各个薄膜在32 V的电压下进行连续5次不间断加热冷却的过程,并且记录每个过程的温度时间变化曲线。即对炭黑发热膜进行最高温度测试,温度快速响应测试以及循环加热热稳定性测试[27-29]。

2.3.1 发热测试

在热性能测试后,对实验结果进行分析。图5为不同炭黑填充量的柔性电子薄膜组在两种不同电压下的温度变化曲线图。将试样与可调恒定直流电源相连,采用温度计记录试样温度变化,在低压下加热40 min。整个流程分为升温、平衡、冷却3个过程。由图5的两个温度时间曲线可知,在导电填料炭黑含量较低时,CB1薄膜和CB2薄膜在两种不同的电压下都没有发热,其原因是炭黑粉末还没有在聚合物基体中形成导电通路,炭黑薄膜此时是绝缘体,即使通电也不会产生热量。随着炭黑填充量的增加,薄膜的发热效果开始提升。在室温23 ℃下,CB3薄膜的在25 V和32 V下最高温分别为27.4 ℃和29.7 ℃。CB4在两种电压下的最高温度分别为27.9 ℃和31.2 ℃。此时发热效果一般,但表明炭黑在聚合物基体中形成了初步的炭黑链。随着炭黑的填充量进一步提高,炭黑在聚合物基体中形成了三维导电网络结构。在两种不同电压下,CB5薄膜的最高温度分别为31.2 ℃和33.6 ℃,CB6薄膜的最高温分别为40 ℃和53.8 ℃,CB7薄膜的最高温为43.1 ℃和60 ℃。显然薄膜的发热符合焦耳定律,电压升高,发热量增大,电阻越小,发热量越大。

除此之外,为了研究各个薄膜对电压变化的灵敏

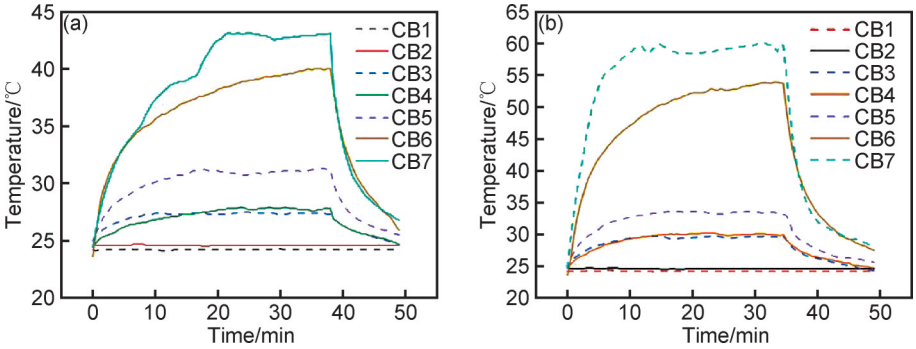


图5　两种电压下薄膜时间-温度曲线　(a)32 V;(b)25 V

Fig.5　Time-temperature curves of film at two voltages　(a)32 V;(b)25 V

度,对各个炭黑薄膜的最高温数据进行处理,图6为在两种不同电压下薄膜的温度差值随炭黑填充量的变化图。由图6分析可得,在两种电压下的薄膜的最高温度的差值随着炭黑的填充量增加而增加。在炭黑填充量较低时,两种电压下的最高温度差值在 0.5 ℃以内,但是随着炭黑填充量的增加,温度的差值逐渐上升到 14 ℃,这表明炭黑填充量越大的薄膜的温度随电压的变化越敏感。

结果表明,制作出来的炭黑发热薄膜具有良好的发热性能,能够有实际应用,且炭黑填充量为50%和55%效果最好,且调控量程也是最大。

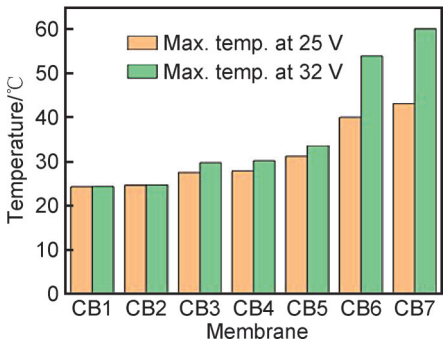


图6　各个薄膜在两电压下的最高温度

Fig. 6　Maximum temperature of each film at two voltages

2.3.2　温度响应测试

在温度响应测试中不固定通电时间,薄膜上升至最高温(最高温度的数据来自前面的发热测试中记录的数据)后断电冷却,记录相关数据,然后绘制出的各炭黑薄膜在两种不同电压下的快速反应曲线如图7所示,观察图7(a),(b)可以发现发热升温的速度随着炭黑掺入量的升高而加快。在炭黑体积分数较低时,随着炭黑的体积分数增大,升温速度变化不是很明显。但是当炭黑填充量超过35%时,升温速度就开始大幅提升了,其中通电后温度响应最快的就是CB7薄膜,其次是CB6薄膜。这表明增大炭黑量,薄膜对于电压的反应就越灵敏,温度提升速度越快。其中炭黑填充量为50%和55%时,温度响应速度最快。

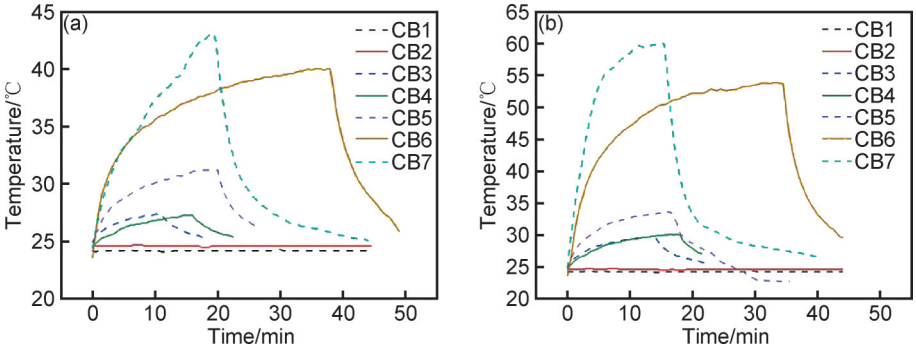


图7　两种电压下温度响应曲线　(a)25 V ;(b)32 V

Fig. 7　Temperature response curves at two voltages　(a)25 V;(b)32 V

2.3.3　热稳定性测试

对各个薄膜进行循环加热测试,这与薄膜的实际应用有关。因为要满足半导体制造行业中要长时间工作的需求,在实际工作过程中,发热薄膜需要在长时间加热后还能正常使用。所以在本次测试中,将对各个炭黑薄膜在32 V电压下连续加热冷却5次,采用5次循环测试主要用于观察薄膜在短时间内的基本稳定性,尤其是发热薄膜在初次循环中的温度响应及其

是否存在明显的性能衰减，同时还能初步检测是否存在由于热胀冷缩引起的材料热疲劳、剥离或其他物理缺陷。

测试过程中每次加热时间固定，在降到室温左右后又重新加热，每次加热时间都为加热薄膜第一次达到最高温度所用的时间（最高温度的数据来自前面的发热测试中记录的数据，所以每个薄膜的加热时间不同），同时记录发热温度的变化。接通电压之后，炭黑发热膜就会迅速升温，在各个薄膜到达固定加热时间时断开电压，发热膜迅速冷却，冷却到室温时，又再次加热。图 8 为 CB3、CB4、CB5、CB7 炭黑薄膜在 32 V 的外部电压下的循环加热曲线，因为 CB1 和 CB2 是绝缘体，没有循环加热测试的必要。由图 8 可以看出，各个基于炭黑的发热薄膜都具有十分良好的循环加热性能。同一个薄膜在循环加热的时候发热温度曲线的趋势基本相同，且每个薄膜在循环时到达的最高温度差值在 1 ℃以内，低炭黑填充量的薄膜最高温度差值甚至在 0.5 ℃ 以内。

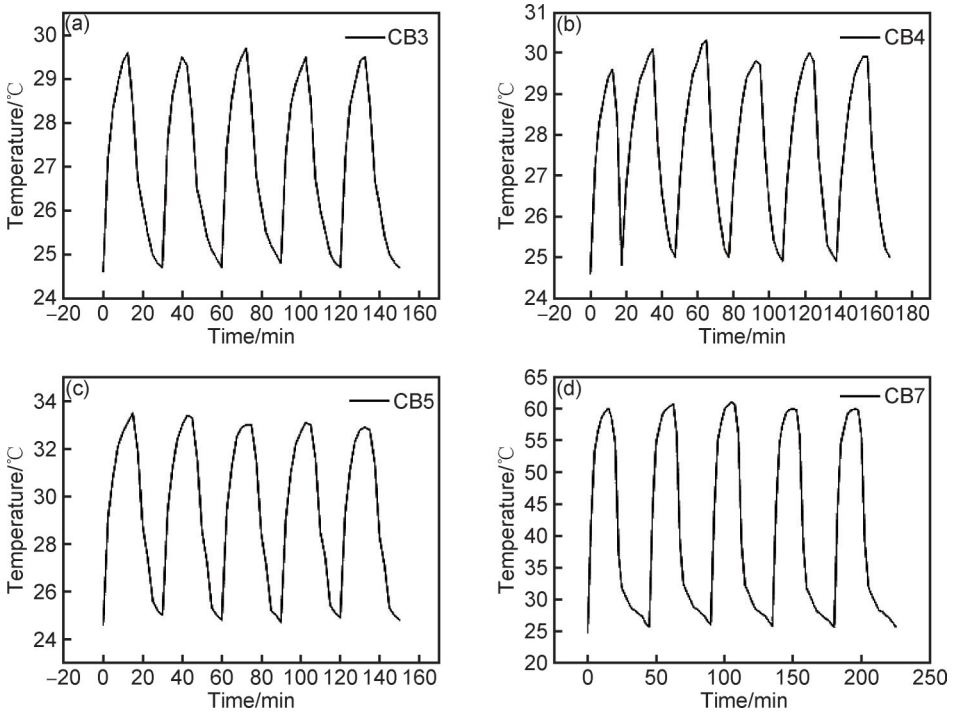


图 8　不同体积分数炭黑薄膜 32 V 下循环加热曲线

(a)35%；(b)40%；(c)45%；(d)55%

Fig.8　Cyclic heating curves of carbon black films with different volume fractions under 32 V

(a)35%；(b)40%；(c)45%；(d)55%

每个薄膜在多次循环中表现出一致的加热和冷却趋势，说明薄膜材料具有良好的热响应一致性，表明短期内材料未出现明显的热疲劳或性能衰减。而各个薄膜在循环过程中达到的最高温度差异小于 1 ℃，甚至有些薄膜差异小于 0.5 ℃。这表明薄膜在高温环境下保持了良好的热稳定性和均匀的热分布。这意味着基于普通炭黑的发热薄膜也具有良好的热循环性能，可以初步满足半导体行业的需求，但长时间的大规模应用还需要工厂进行数千次的测试本实验可以作为进一步深入测试的基础。

3　结论

（1）通过电子光学显微镜发现炭黑填料颗粒已融入聚合物薄膜，大量的炭黑填料颗粒覆盖在聚合物基体上，此时炭黑颗粒在聚合物中形成了导电网络。

（2）当掺杂进入聚合物基体的炭黑颗粒体积分数达到 20% 左右时，炭黑薄膜的电阻率呈现数量级级别的下降，此时复合薄膜从绝缘体开始转向导体。

（3）在一定程度的拉伸之后，电阻可以恢复到原来的值，这表明薄膜电阻拥有良好的力学性能。

（4）在热性能测试中，薄膜发热符合焦耳定律。即在电压不变时电阻越小，发热效果越好，所达到的最高温度也越高，在电阻不变时，电压越大，发热效果越好。在温度响应测试中，炭黑填充量越多，薄膜升温越快。且在不同电压下的最高温对比发现，炭黑填充量越多，薄膜温度对电压的变化越敏感。最后得出 50% 和 55% 填充量的薄膜热性能最好，调控量程

最大。

(5) 为了保证薄膜能够长期使用后，发热效果不减，对基于炭黑的导电复合薄膜进行了5次连续的循环加热、冷却的过程。测试结果表明炭黑导电复合薄膜在每次发热时，其最高温度基本一致，且发热曲线基本吻合，这表明制作出来的炭黑导电复合薄膜热稳定性良好。

参考文献

[1] KEUM K, YANG S, KIM K S, et al. Recent progress of stretchable displays: a comprehensive review of materials, device architectures, and applications[J]. Soft Science, 2024, 4(4): 119802.

[2] CHENG I C, WAGNER S. Overview of flexible electronics technology [M] //Flexible Electronics. Boston, MA: Springer, 2009: 1-28.

[3] MA P C, LIU M Y, ZHANG H, et al. Enhanced electrical conductivity of nanocomposites containing hybrid fillers of carbon nanotubes and carbon black [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2009, 1(5): 1090-1096.

[4] ZHU J X, CHO M, LI Y T, et al. Machine learning-enabled textile-based graphene gas sensing with energy harvesting-assisted IoT application[J]. Nano Energy, 2021, 86: 106035.

[5] SONG W X, ZHU J X, GAN B H, et al. Flexible, stretchable, and transparent planar microsupercapacitors based on 3D porous laser-induced graphene[J]. Small, 2018, 14: 1702249.

[6] ZHU J X, CHO M, LI Y T, et al. Biomimetic turbinate-like artificial nose for hydrogen detection based on 3D porous laser-induced graphene[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(27): 24386-24394.

[7] XIAO Z, GUO R, HE X P, et al. Polybenzimidazole/conductive carbon black composite driven at low voltage for high-temperature heaters[J]. Journal of Electronic Materials, 2022, 51(5): 2652-2662.

[8] 方梅，陆波，黄明，等. 碳纤维增强 Vitrimer 环氧树脂复合材料层间修复与热塑成型行为[J]. 材料工程，2023，51(6)：159-167.
FANG M, LU B, HUANG M, et al. Interlaminar repairing and thermoforming properties of carbon fiber reinforced Vitrimer epoxy resin composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(6): 159-167.

[9] 张鹤白，董瑾，李元峰，等. 碳纳米管基弹性导电织物的制备及应变传感性能[J]. 材料工程，2025，53(10)：210-217.
ZHANG H B, DONG J, LI Y F, et al. Preparation and strain sensing performance of carbon nanotube-based elastic conductive fabrics [J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(10): 210-217.

[10] 白家设，张超，沈燕，等. 碳纤维-碳纳米管增强相的构筑及其三相复合材料力学性能[J]. 材料工程，2023，51(10)：178-187.
BAI J S, ZHANG C, SHEN Y, et al. Construction of carbon fiber-carbon nanotubereinforcing phase and mechanical properties of its three-phase composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(10): 178-187.

[11] ILANCHEZHIYAN P, ZAKIROV A S, KUMAR G M, et al. Highly efficient CNT functionalized cotton fabrics for flexible/wearable heating applications [J]. RSC Advances, 2015, 5(14): 10697-10702.

[12] ZHU J X, WANG H, ZHU Y L. A flexible piezoresistive carbon black network in silicone rubber for wide range deformation and strain sensing [J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(3): 034505.

[13] WANG X, LIU X H, SCHUBERT D W. Highly sensitive ultrathin flexible thermoplastic polyurethane/carbon black fibrous film strain sensor with adjustable scaffold networks [J]. Nano-Micro Letters, 2021, 13(1): 64.

[14] BIAN J, ZHOU L, WAN X D, et al. Laser transfer, printing, and assembly techniques for flexible electronics [J]. Advanced Electronic Materials, 2019, 5(7): 1800900.

[15] LI D, LAI W Y, ZHANG Y Z, et al. Printable transparent conductive films for flexible electronics [J]. Advanced Materials, 2018, 30(10): 1704738.

[16] 迟洪涛，马传国，宋沐原，等. 层间 CNT 协同电纺取向 BNNS 增强的绝缘高导热聚偏氟乙烯多层复合薄膜[J]. 材料工程，2023，51(11)：171-181.
CHI H T, MA C G, SONG M Y, et al. Insulating and highly thermally conductive polyvinylidene fluoride multilayer composite film enhanced *via* CNT interleaf and electrospinning oriented BNNS [J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(11): 171-181.

[17] 张浩，胡道庆，程峥明，等. 钢渣基盾粉/橡胶复合材料的性能及机理[J]. 材料工程，2024，52(5)：188-194.
ZHANG H, HU D Q, CHENG Z M, et al. Properties and mechanism of steel slag based shield powder/rubber composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(5): 188-194.

[18] MAYER J K, BOCKHOLT H, KWADE A. Inner carbon black porosity as characteristic parameter for the microstructure of lithium-ion electrodes and its effect on physical and electrochemical properties[J]. Journal of Power Sources, 2022, 529: 231259.

[19] KELESIDIS G A, NEUBAUER D, FAN L S, et al. Enhanced light absorption and radiative forcing by black carbon agglomerates [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(12): 8610-8618.

[20] RAHMATABADI D, BAYATI A, KHAJEPOUR M, et al. Poly(ethylene terephthalate) glycol/carbon black composites for 4D printing[J]. Materials Chemistry and Physics, 2024, 325: 129737.

[21] JIAO Y M, SONG Q, YIN X M, et al. Grow defect-rich bamboo-like carbon nanotubes on carbon black for enhanced microwave absorption properties in X band [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 119: 200-208.

[22] ZOU J F, YU Z Z, PAN Y X, et al. Conductive mechanism of polymer/graphite conducting composites with low percolation threshold [J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2002, 40(10): 954-963.

[23] YURDDASKAL M, EROL M, CELIK E. Carbon black and graphite filled conducting nanocomposite films for temperature sensor applications [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017, 28(13): 9514-9518.

[24] KNITE M, TETERIS V, KIPLOKA A, et al. Polyisoprene-carbon black nanocomposites as tensile strain and pressure sensor

materials[J].Sensors and Actuators A:Physical,2004,110(1/2/3):142-149.

[25] ZHU Y L,CHEN X,CHU K M,et al.Carbon black/PDMS based flexible capacitive tactile sensor for multi-directional force sensing[J].Sensors,2022,22(2):628.

[26] TACHIBANA S,WANG Y F,SEKINE T,et al.A printed flexible humidity sensor with high sensitivity and fast response using a cellulose nanofiber/carbon black composite[J].ACS Applied Materials & Interfaces,2022,14(4):5721-5728.

[27] LI B,ZHANG S H,ZHANG L,et al.Strain sensing behavior of FDM 3D printed carbon black filled TPU with periodic configurations and flexible substrates[J].Journal of Manufacturing Processes,2022,74:283-295.

[28] NGUYEN V T,NGUYEN Q D,MIN B K,et al.$Ti_3C_2T_x$ MXene/carbon nanotubes/waterborne polyurethane based composite ink for electromagnetic interference shielding and sheet heater applications[J].Chemical Engineering Journal,2022,430:133171.

[29] GENG Y Q,CAO R,INNOCENT M T,et al.A high-sensitive wearable sensor based on conductive polymer composites for body temperature monitoring[J].Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2022,163:107269.

基金项目:江苏省苏州市前沿技术研究项目(SYG202314)

收稿日期:2024-12-24;**录用日期**:2025-03-04

通讯作者:朱建雄(1983—),男,副教授,研究方向为可穿戴柔性电子、人机界面及虚拟现实和气体探测与嗅觉,联系地址:江苏省南京市江宁区秣陵街道东南大学九龙湖校区机械工程学院(211189),E-mail:mezhujx@seu.edu.cn

(本文责编:解　宏)