# 基于纳米碳材料的上光机干燥源制备与研究

朱茜琳<sup>1,2</sup>,杨梅<sup>1,2</sup>,张明鸣<sup>1,2</sup>,李晋尧<sup>1,2</sup>,杨逸函<sup>1,2</sup>, 焦慧敏<sup>1,2</sup>,张宏轩<sup>1,2</sup>,张梅蕊<sup>1,2</sup>

(1.北京印刷学院,北京 102600; 2.数字化印刷装备北京市重点实验室,北京 100005)

摘要:目的 探寻合适的纳米碳材料取代传统上光机干燥热源,使之更节能,干燥效果更优化。研究不同制备条件对该材料发热板固化和导电性的影响及其电热规律,为上光机干燥源的关键技术提供依据。 方法 采用丝网印刷技术制作纳米碳材料发热板,通过分析不同碳基材料发热板的物理性能以选择合适 的材料,并进一步研究其在含碳量比、烧制温度、涂层厚度下的导电性能,以及进行通电试验研究其电 热性能。结果 直径为 150~200 nm 纳米碳纤维更适用于本文制备方法,纯净水作为溶剂调制效果良好且 获取方便。纳米碳纤维发热板导电性随烧结温度升高而降低,随厚度、含碳量增加而增强。发热板电阻 越高、通电时间越长、电流越大,其温升越大、产生热量越高。结论 纳米碳纤维导电性和热效率高、 绿色环保,适用于制作上光机干燥设备的干燥源,以提高干燥效率、降低能耗。 关键词:上光机;纳米碳纤维;丝网印刷;导电性;导热性

中图分类号: TS801.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)11-0196-08 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.11.022

# Preparation and Research of Varnishing Machine Drying Source Based on Carbon Nanomaterials

ZHU Xi-lin<sup>1,2</sup>, YANG Mei<sup>1,2</sup>, ZHANG Ming-ming<sup>1,2</sup>, LI Jin-yao<sup>1,2</sup>, YANG Yi-han<sup>1,2</sup>, JIAO Hui-min<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong-xuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Mei-rui<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China; 2. Beijing Key Laboratory of Digitalized Printing Equipment, Beijing 100005, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore suitable carbon nanomaterials to replace the drying source of the traditional varnishing machine, making it more energy efficient and optimizing the drying effect and to study the effect of different preparation conditions on the curing and electrical conductivity of the heating plate of this material, and the electrical heating law to provide a basis for the key technologies of the varnishing machine drying source. The heating plate of carbon nanomaterials was prepared by screen-printing technology, and the suitable material was selected by analyzing the physical properties of different carbon-based material heating plates. At the same time, the conductivity of the material under the conditions of carbon content ratio, sintering temperature, and coating thickness was further studied, and the electrification experiment was conducted to study the electrical heating performance. The carbon nanofibers with a diameter of  $150 \sim 200$  nm were more suitable for the preparation method. The purified water had a good modulation effect as a solvent and was convenient to obtain. The conductivity of the heating plate of carbon nanofibers decreased with the increase of sintering temperature and increased with the increase of thickness and carbon content. As the resistance of the

收稿日期: 2022-07-11

基金项目:北京印刷学院基础研究重点项目(Ea202003)

作者简介:朱茜琳(1998—),女,硕士生,主攻印刷机干燥控制。

通信作者:杨梅(1977—),女,硕士,副教授,主要研究方向为印刷机控制系统及干燥控制。

heating plate increased, the electrifying time prolonged, and the current rose, the temperature rise became large and the heat produced was more. Carbon nanofibers are suitable for making the drying source of varnishing machine drying equipment due to the high conductivity, high thermal efficiency, and environmental protection to improve drying efficiency and reduce energy consumption.

KEY WORDS: varnishing machine; carbon nanofibers (CNFS); screen printing; electrical conductivity; thermal conductivity

上光工艺是目前印后加工中十分重要的一环,在 印刷品表面涂印上光油可增强印刷品油墨的耐磨性、 耐光性和防潮性,延长印刷品使用寿命,使印品更平 滑和美观。上光工艺加工的印刷品废弃后可回收再利 用或自行降解,传统的覆膜工艺加工的印刷品废弃后 不能自行降解回收<sup>[1]</sup>。由于其环保性,上光工艺会逐 渐取代传统的覆膜工艺,并具有广阔前景。上光油可 大致分为3类: 溶剂型上光油、UV(Ultraviolet)上 光油、水性上光油。溶剂型上光油会使用苯类、酯类 作为溶剂,有机溶剂易燃易挥发、会污染环境<sup>[2]</sup>、危 害人体健康。UV 上光油中几乎不含溶剂,减少了环 境污染,固化速度快,但其经照射干燥后会产生臭氧, 对人体皮肤有一定伤害。水性上光油无毒无味,并且 水性上光油的印品可降解回收、透明性好、平整抗卷 和成本低;其缺点是干燥速度较慢,需消耗更多电能。 从可持续性发展的角度考虑,水性上光油将在印刷上 光方面拥有巨大的发展潜力。

水性上光油印品的干燥是上光工艺的重要环节, 若干燥不充分,上光油膜层容易刮花;若干燥过度, 纸张易失水变脆断裂。干燥效果与干燥速度影响印品 质量与生产效率,上光机的干燥系统就显得尤为重 要。水性上光油干燥方法常采用红外线辐射和热风干 燥。红外灯对上光油涂层进行辐射加热,但易出现干 燥不均现象,且我国大多数管式、板式红外辐射加热 器与国外红外辐射加热器相比,热响应时间约为国外 同种红外辐射加热器的 2~3 倍,这对节约能源极为不 利<sup>[3]</sup>。这类传统的红外热源热效率低,耗能高。本文 旨在寻找一种新的热源取代传统水性上光油干燥热 源,以提高上光干燥系统性能和效率。

上光机干燥热源中最重要的就是电热材料的选用。传统的电热材料通常使用金属电热材料,但金属 元件存在着高功率、易断裂、线状发热加热不均匀<sup>[4]</sup>、 使用寿命短等不足之处,逐渐被碳系电热材料取代。 碳系电热材料包括石墨、炭黑、碳纤维等,与金属材 料相比,质量更轻,更加耐腐蚀、耐氧化。碳发热板 通电后,在电场作用下碳原子中的电子相互碰撞从而 产生热量<sup>[5]</sup>,电热转换率可达 98%<sup>[6]</sup>。近年来各种新 型纳米级碳系材料也逐渐应用于电热环境中,如碳纳 米管<sup>[7]</sup>、纳米碳纤维<sup>[8]</sup>、石墨烯<sup>[9]</sup>等。纳米碳系电热 材料还具有无毒无害、成本低、使用寿命长等优点, 在除雾除霜<sup>[10]</sup>、采暖装置等方面有许多应用。目前, 纳米碳系材料在印刷行业中主要应用于导电涂料,尚 未大量应用于印刷干燥。在我国力争实现碳达峰、碳 中和的大背景下,印刷干燥也在不断追求绿色化。本 文采用纳米碳材料作为印刷机干燥热源,促使水性上 光油干燥更节能减排。

## 1 水性上光油干燥系统介绍

#### 1.1 干燥系统介绍

本文设计了针对水性上光油的印刷机上光油干 燥系统,并制备了基于纳米碳材料的发热板作为干燥 源。干燥系统由箱体、电源、控制系统、纳米碳电热 板、通风部分等组成。印品涂布水性上光油后,传送 至干燥箱进行干燥。干燥温度直接影响印品的质量, 温度传感器检测干燥箱体内实际温度,将温度信号反 馈给控制器进行处理与计算,并驱动发热板进行加 热,调节箱体内热空气温度。同时控制变频器调节风 机转速,配合加热板进行热风干燥。上光油干燥效果 还受多种因素影响,比如印品的传送速度,控制系统 通过伺服驱动系统对其进行控制。具体水性上光油干 燥控制系统的硬件框图如图1所示。





#### 1.2 干燥源材料介绍

纳米碳是指具有分散相尺度至少有一维处于纳 米尺度范围的各种碳同素异形体<sup>[11]</sup>,包括石墨烯、富 勒烯、纳米碳纤维、纳米碳球、碳纳米管等。纳米级 的碳系材料有着优异的电学、热学、光学性能等,稳 定性好、比表面积高,其电热转换率与吸光性适用于 电热应用,且易于生产、环保无污染,符合绿色印刷 行业的需求。本文选用了 3 种纳米碳材料作为干燥热 源进行对比实验研究: 粒径为 40 nm、纯度为 99.9% 的纳米碳球; 直径为 30~50 nm, 纯度大于 95%的 CNT106 多壁碳纳米管; 直径为 150~200 nm, 纯度 为 99%的 CNT905 纳米碳纤维。均购自中科金研(北 京)科技有限公司。

1)纳米碳球。纳米碳球即球状纳米碳材料,具 有优良的导电性、热传导性、化学稳定性,其质量 轻、比表面积大<sup>[12]</sup>,广泛运用于各种复合材料中。 但是纳米碳球粒子间具有强大的范德华力,有吸附 团聚现象<sup>[13]</sup>,在复合材料中若分散不均会影响其导电 性。纳米碳球黑度高,对光的吸收能力强,但在制备 清洁方面也更复杂。本文选用的纳米碳球材料透射电 子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM) 图像如图 2 所示。



图 2 纳米碳球 TEM 图 Fig.2 TEM of carbon nanosphere

2)碳纳米管。1991年,饭岛发现了碳纳米管<sup>[14]</sup>, 自此,碳纳米管的研究飞速发展。碳纳米管结构类似于 石墨片卷曲成管状,具有优秀的导电、导热性能,很 高的纵横比、单位质量表面积,较低的密度<sup>[15]</sup>。碳纳 米管易从周围存在的大量碳原料中制备,具有可持续 发展性<sup>[16]</sup>。但碳纳米管也易团聚,表面存在凹陷,且易 吸附污染物,可分为多壁碳纳米管和单壁碳纳米管。多 壁碳纳米管比单壁碳纳米管更易制造、成本更低<sup>[17]</sup>。本 文选用的碳纳米管材料 TEM 图像如图 3 所示。

3)纳米碳纤维。纳米碳纤维是一种直径在 10~200 nm 的碳材料,与碳纳米管有着相似的形貌结构。一般实心的称为纤维,空心的称为管。纳米碳纤 维拥有着良好的导电性、灵活的纤维结构、大规模生 产的可行性<sup>[18]</sup>、高效的电热转换效率等,可被应用于 许多领域,如超级电容器、防护服装等。本文选用的 纳米碳纤维材料 TEM 图像如图 4 所示。



图 3 碳纳米管 TEM 图 Fig.3 TEM of carbon nanotube



图 4 纳米碳纤维 TEM 图 Fig.4 TEM of carbon nanofibers

# 2 纳米碳干燥源的制备方法与步骤



Fig.5 Flow chart of heating plate preparation

本设计针对每种纳米碳材料制备 5 种含碳比的 发热板,含碳量分别为 3.125%、6.25%、12.5%、25%、

纳米碳发热板制备流程如图 5 所示。

50%。首先按照质量比称量纳米碳材料与玻璃粉基料,并混合均匀。然后在混合材料中加入溶剂充分研磨形成浆料,需要注意以下2点。

 1)浆料的稠度。加入溶剂的含量影响浆料稠度, 若浆料过稠,影响浆料在基板上的流平性,浆料在丝 网网点处易形成空隙,纳米碳材料连结不紧密影响导 电性;若浆料过稀,易产生流挂、涂抹不均,干燥后 易收缩开裂。

2)浆料的分散性。在研磨时,若纳米碳材料与 基料融合不够充分,分散不够均匀,会影响涂层中导 电回路的形成,导致影响发热板的导电性,造成通电 后产生热量不均,当温差过大时基板易炸裂。因此需 添加适量溶剂,反复尝试以寻求适中的浆料黏稠度, 再充分研磨,使纳米碳浆料分散均匀。

涂布浆料采用丝网印刷的方式,根据导电回路的 需求设计网版图文形状,将基板置于丝网网版下,浆 料在刮刀的压力下均衡通过网版印到基板上。丝网网 版的目数影响涂层厚度和均匀性。目数越高,丝网越 细,网孔越小,制得涂层就越薄;目数越低,丝网越 粗,网孔越大,制得涂层就越厚。但丝网粗时,网线 交错处的网点更大,若印刷的浆料流平性不足,涂层 会在网点处留下空隙,影响碳原子的连接。

为便于后期通电实验,首先,将银浆丝印于基板 两端并高温固化;然后,将纳米碳混合浆料丝印于基 板上,印制后,将样板置于阴凉处阴干;将阴干后的 样板放入高温加热炉中,采用阶梯式升温加热固化涂 层。对温度的控制也十分重要,温度过高涂层可能会 燃烧焦化;温度过低涂层在基板上固化不牢固。因此, 需要多次尝试直至找到合适烧结温度。

# 3 发热板制备材料的选用

#### 3.1 纳米碳球

以纯净水作为溶剂,混合纳米碳球粉与玻璃粉调 制成不同比例的浆料涂布在玻璃板上,制成发热板。 在玻璃软化温度与纳米碳材料燃烧温度之间进行烧 制实验,实验结果如表1所示。

由表1可看出,在烧制温度过低时,纳米碳球材 料掉粉严重,牢固性差;烧制温度过高时,纳米碳球 容易燃烧。纳米碳球材料所烧制的发热板电阻值都非 常高,导电性极差。本次选用的粒径为40nm的纳米 碳球材料难以找到既满足导电性又满足牢固性的烧 制温度,不适合此种发热板制备方法。

#### 3.2 碳纳米管

以纯净水和松油醇 2 种溶剂分别混合碳纳米管 粉与玻璃粉,并调制成不同比例的浆料。在玻璃板上 刷制浆料待其阴干后,涂层均开裂严重,形成不连续 的平面,不宜于导电发热。当碳纳米管含量越高的浆 料制成的涂层开裂现象越严重,经烧制后涂层开裂更加严重。部分碳纳米管浆料阴干后现象如图6所示。 本尺寸碳纳米管材料不适合此种发热板制备方法。

表 1 纳米碳球发热板烧结实验 Tab.1 Sintering experiment of carbon nanosphere heating plate

编号	温度/℃	含碳量/%	方块电阻/kΩ	涂层状态
1	360	3.125	11.5	掉粉严重
2	360	6.25	4.5	掉粉严重
3	380	3.125	—	起泡
4	380	6.25	30	微焦
5	380	12.5	8	掉粉严重
6	400	6.25	—	起泡
7	400	12.5	—	起泡
8	420	3.125	—	起泡严重
9	420	6.25	—	起泡
10	420	12.5	—	起泡
11	420	50		碳材料烧尽
12	450	3.125	44 000	形成釉面
13	450	6.25	30 000	形成釉面
14	450	12.5	182 000	形成釉面
15	450	50		碳材料烧尽

注:"一"所示为超出万用表量程,电阻不可测出。



a 含碳量为12.5%的涂层

b 含碳量为25%的涂层

图 6 碳纳米管制备发热板阴干后开裂现象 Fig.6 Cracking of carbon nanotube heating plate after drying in the shade

#### 3.3 纳米碳纤维

以纯净水为溶剂,混合纳米碳纤维粉与玻璃粉, 调制成不同含碳比的浆料。调制以松油醇为溶剂的纳 米碳纤维浆料做对比实验。刷制浆料后,用不同温度 烧制固化,实验结果如表2所示。

•	200	•
---	-----	---

表 2 纳米碳纤维发热板烧结实验 Tab.2 Sintering experiment of carbon nanofiber heating plate

序号	溶剂	温度/℃	含碳量/%	方块电阻/Ω	涂层状态
1	纯净水	360	3.125	1 000	较牢固
2	纯净水	360	6.25	384	掉粉
3	纯净水	360	12.5	233	掉粉严重
4	纯净水	380	3.125	1 000	微焦
5	纯净水	380	6.25	330	较牢固
6	纯净水	380	12.5	120	掉粉严重
7	纯净水	400	6.25	400	掉粉
8	纯净水	400	12.5	230	掉粉严重
9	纯净水	400	25	120	掉粉严重
10	纯净水	420	3.125	3 000	起泡
11	纯净水	420	6.25	850	牢固
12	纯净水	420	12.5	600	较牢固
13	松油醇	420	12.5	300	掉粉严重
14	纯净水	420	50	600	掉粉严重
15	纯净水	450	3.125	10 000	起泡
16	纯净水	450	6.25	3 000	微焦
17	纯净水	450	12.5	2 000	微焦
18	松油醇	450	12.5	1 100	微焦
19	纯净水	450	50	10 000	烧尽
20	松油醇	450	50	1 000	掉粉严重

由表 2 可看出,纳米碳纤维浆料制成的发热板的 方块电阻,相较于前 2 个材料制成的发热板的方块电 阻较低,大部分低于 1 000 Ω,牢固性尚可,甚至部 分电阻低于 150 Ω。由此看来纳米碳纤维材料可以找 到合适的固化温度,能同时满足发热板的导电性与牢 固性。对比 12 号与 13 号、17 号与 18 号、19 号与 20 号纳米碳纤维发热板可看出,用松油醇调制的 13、 18、20 号发热板烧制后电阻值更低。松油醇质地稠 厚,调制的浆料通过模具刷制在玻璃板上涂层会更 厚,牢固性有所降低。松油醇不溶于水,采用丝网刷 制不便清洁,通过钢板模具刷制不便控制厚度。纯净 水制浆料通过丝网刷制更加稳定统一,可以通过丝网 目数变化改变浆料厚度。为保证制备条件统一,还是 选用纯净水调制浆料。

### 4 纳米碳纤维板制备条件

制备纳米碳纤维发热板过程中,不同因素均会影 响其导电性及烧结效果。本文通过研究不同含碳量、 烧结温度、厚度对其导电性产生的影响,寻求纳米碳 纤维发热板适合的制备条件。

#### 4.1 纳米碳纤维发热板烧结温度上下限

制备纳米碳纤维发热板的软化温度为 340 ℃左 右。实验中发现在 340 ℃烧制发热板时,烧制后的浆 料掉粉极其严重,则以 340 ℃作为烧制发热板的温度 下限;460 ℃烧制各个浓度发热板后,涂层有不同程 度烧焦、起泡甚至燃烧殆尽现象,则以460 ℃作为烧 制发热板的温度上限。

#### 4.2 烧结温度对纳米碳纤维板导电性影响

在相同条件下制备不同含碳量的纳米碳纤维板, 分别在合理固化温度范围内进行多个温度段烧制,测 量其方块电阻值。不同含碳量的发热板方块电阻值随 烧结温度变化如图 7 所示。



图 7 方块电阻值随烧结温度的变化曲线 Fig.7 Change curve of square resistance value with sintering temperature

由图 7 可看出方块电阻值变化的整体趋势是随 烧结温度的升高而增加。单纯的纳米碳纤维粉具有很 好的导电性,与玻璃粉混合后,在高温下二者在空气 中发生反应,使得浆料中纳米碳纤维含量降低,电阻 随之升高。烧制温度越高,碳的化学性质变得越加活 泼,纳米碳纤维反应越充分,纳米碳纤维越少则导电 性越差。

#### 4.3 含碳量对纳米碳纤维板导电性影响

由图 8 可看出方块电阻值随含碳量的增加而降低。涂层中的导电粒子通过相互接触构成链状导电网络,从而形成导电通道<sup>[19]</sup>。复合材料涂层中纳米碳纤维含量越高时,导电粒子越多,它们的间距越小,越易形成导电网络,导电性能越佳。

#### 4.4 厚度对纳米碳纤维板导电性影响

选取制备条件一致、几种含碳量不同厚度的发热板。测得不同厚度发热板的方块电阻值,分析厚度对 方块电阻值影响,如图9所示。

由图 9 可以看出,方块电阻值变化的整体趋势是 随涂层厚度的升高而降低。纳米碳纤维涂层在相同的 含碳量和涂制面积下,厚度越大,在此片涂层中纳米 碳纤维量越多,有效降低了发热板阻值。







图 9 方块电阻值随厚度的变化曲线 Fig.9 Change curve of square resistance value with thickness

# 5 纳米碳纤维板的发热特性研究

#### 5.1 加热板不同电流下温度随时间变化研究

选用含碳量为 3.125%的发热板,采用恒流源进 行通电、测试,得到不同电流下发热板温度随时间变 化曲线,如图 10 所示。

由图 10 可知,纳米碳纤维板通电后,发热板温 度随时间稳步升高,电流越大,温度变化越大。

#### 5.2 加热板通电后不同电流下温升变化

5 个不同含碳量发热板在不同电流下进行通电实验,测得从通电开始到结束所升高的温度值,几个样本的温升随不同通电电流变化的曲线如图 11—12 所示。



从 5 个不同含碳量样本均可看出, 温升随电流的 增加而升高。根据焦耳定律可知, 电流通过导体产生 的热量与电流的平方成正比, 电流越大, 同一样本产 生的热量就越多。

#### 5.3 加热板通电后温升随电阻的变化

由 4.3 节结论可知,含碳量越高,发热板电阻值 越低。图 12 中 4 个样本所测得的平均电阻值也正符 合此结论。含碳量为 6.25%、12.5%、25%、50%的样 本的平均电阻值依次降低。纵向观察图 12 可看出, 在同一通电电流下,温升随着样本电阻值的升高而升 高。根据焦耳定律可知,在同一电流下,电流通过导 体产生的热量与导体阻值成正比。电阻越大,产生的 热量也就越多。

# 6 结语

本文在基于丝网印刷的石墨烯印刷机干燥源的 制备工艺基础上<sup>[20]</sup>,进一步探索适合用作印刷机干燥 源的纳米碳材料。通过比较不同纳米碳材料的性能找 到合适的碳材料,进一步研究采用合适材料制备发热 板,并研究不同含碳量、烧制温度、厚度对发热板导 电性能的影响。进行通电实验,分析发热板的温度随 时间的变化趋势、温升随电流和电阻的变化趋势。主 要研究结论如下。

 1)通过对 3 种纳米碳材料进行调制烧结实验可 知,本文采用的纳米碳球材料所制发热板导电性极 差,碳纳米管材料所制发热板易皲裂,不适用于本文 发热板制备方法;纳米碳纤维发热板具备导电性、牢 固性均可的适合制备温度。

2)由实验结果可看出,纳米碳纤维发热板电阻 随烧结温度的升高而增加,随含碳量、厚度的升高而 降低;通电时间越长,发热板温度越高;发热板通电 电流、电阻越大,则温升越大。

3)纳米碳纤维导电性和热效率高,无毒无害且 成本低,作为上光油干燥源可提高效率且环保。如何 使发热板中的碳材料分布更均匀,通电热场梯度小, 将有待进一步研究。该研究在干燥热源方面具有广阔 的应用场景。

#### 参考文献:

- 郭艳玲,黄阮莹,王瑶,等.水性上光油在纸质印刷 品中的应用研究进展[J]. 丝网印刷, 2022(4): 50-52.
   GUO Yan-ling, HUANG Ruan-ying, WANG Yao, et al. Research Progress on Application of Water-Based Varnish in Paper Printed Matter[J]. Screen Printing, 2022(4): 50-52.
- [2] 董前年,罗祥涛,谷圣军,等.纸张印刷用水性上光

油的研制及性能[J]. 安徽化工, 2020, 46(6): 50-53.

DONG Qian-nian, LUO Xiang-tao, GU Sheng-jun, et al. Study and Properties of Water-Based Varnishes for Printing Papers[J]. Anhui Chemical Industry, 2020, 46(6): 50-53.

- [3] 刘相东.常用工业干燥设备及应用[M].北京:化学工业出版社,2005:116.
  LIU Xiang-dong. Common Industrial Drying Equipment and Its Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 116.
- [4] 魏杰,李昊,张亚男,等.石墨烯复合材料在电热防/除冰领域研究进展[J/OL].中国材料进展: 1-13[2022-07-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.147 3.TG.20211209.0151.002.html
  WEI Jie, LI Hao, ZHANG Ya-nan, et al. Research Progress of Graphene Composites in the Field of Electrothermal Anti-icing/Deicing[J/OL]. MaterialsChina: 1-13[2022-07-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1473.TG.20211209.0151. 002.html.
- [5] JANAS D, KOZIOL K K. Rapid Electrothermal Response of High-temperature Carbon Nanotube Film Heaters[J]. Carbon, 2013, 59: 457-463.
- [6] 李翠环.碳纤维电地暖智能温控及蓄能系统的应用
  [J].光源与照明, 2021(7): 139-140.
  LI Cui-huan. Application of Intelligent Temperature Control and Energy Storage System for Carbon Fiber Electric Floor Heating[J]. Lamps and Lighting, 2021(7): 139-140.
- [7] SHOBIN L R, MANIYANNAN S. Enhancement of Electrothermal Performance in Single-Walled Carbon Nanotube Transparent Heaters by Room Temperature Post Treatment[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 174: 469-477.
- [8] 龚勇. 纳米碳纤维的可控制备及其应用研究[D]. 绵
   阳: 西南科技大学, 2020: 12-13.
   GONG Yong. Controllable Preparation and Application of Carbon Nanofibers[D].Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020: 12-13.
- [9] MENG Xin, CHEN Tian-xing, LI Yao, et al. Assembly of Carbon Nanodots in Graphene-based Composite for Flexible Electro-thermal Heater with Ultrahigh Efficiency[J]. Nano Research, 2019, 12(10): 2498-2508.
- [10] LUO Jie, LU Hui-fen, ZHANG Qi-chong, et al. Flexible Carbon Nanotube/Polyurethane Electrothermal Films[J]. Carbon, 2016, 110: 343-349.
- [11] 杨序纲, 吴琪琳. 纳米碳及其表征[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016: 1-5.
   YANG Xu-gang, WU Qi-lin. Nanocarbons & Their

Characterization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016: 1-5.

- [12] YANG Ya-qi, SHAO Zi-qiang. Boron and Nitrogen Co-doped Carbon Nanospheres for Supercapacitor Electrode with Excellent Specific Capacitance.[J]. Nanotechnology, 2022, 33(18): 1-10.
- [13] 史哲,金鹏. 纳米碳作为唯一碳源的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C 系低碳 耐火材料[J]. 耐火与石灰, 2021, 46(4): 53-59.
  SHI Zhe, JIN Peng. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C Series Low-Carbon Refractories with Nano-Carbon as the Sole Carbon Source[J]. Refractories & Lime, 2021, 46(4): 53-59.
- [14] IIJIMA S. Helical Microtubeles of Graphitic Carbon[J]. Nature, 1991, 354: 56-58.
- [15] KALAKONDA P, KALAKONDA P B, BANNE S. Studies of Electrical, Thermal, and Mechanical Properties of Single-Walled Carbon Nanotube and Polyaniline of Nanoporous Nanocomposites[J]. Nanomaterials and Nanotechnology, 2021, 11: 1-8.
- [16] JANAS D, KOZIOL K K. A Review of Production Methods of Carbon Nanotube and Graphene Thin Films for Electrothermal Applications[J]. Nanoscale, 2014, 6(6):

3037-3045.

- [17] JIANG Jin-jin, LI Wan-peng, SHU Ying, et al. Multi-walled Carbon Nanotube/Polyurethane Electrothermal Films[J]. Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2020, 28(12): 1-10.
- [18] WANG He, NIU Hai-tao, WANG Hong-jie, et al. Micro-Meso Porous Structured Carbon Nanofibers with Ultra-high Surface Area and Large Supercapacitor Electrode Capacitance[J]. Journal of Power Sources, 2021, 482.
- [19] 李昕, 郭建喜. 导电涂料的作用机理及应用[J]. 天津 化工, 2011, 25(3): 12-16.
  LI Xin, GUO Jian-xi. The Principle and Application of Electrically Conductive Paint[J]. Tianjin Chemical Industry, 2011, 25(3): 12-16.
- [20] 靳露,杨梅,李晋尧,等.基于丝网印刷的石墨烯印刷机干燥系统研究[J].包装工程,2022,43(15): 266-273.

JIN Lu, YANG Mei, LI Jin-yao, et al. Drying System of Graphene Printing Machine Based on Screen Printing[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(15): 266-273.

责任编辑:曾钰婵