



蒙烯玻璃纤维织物及其红外辐射加热应用

苏清旭^{1,2}, 元月^{1,2*}, 刘忠范^{1,2*}

1. 北京大学化学与分子工程学院, 北京 100871

2. 北京石墨烯研究院, 北京 100095

* 联系人, E-mail: qiyue-cnc@pku.edu.cn; zfliu@pku.edu.cn

2024-08-31 收稿, 2024-11-14 修回, 2024-11-15 接受, 2024-11-19 网络版发表

国家自然科学基金(T2188101, 52272032, 52021006)资助

摘要 红外辐射是一种无需介质、穿透性强、兼容性高、应用广泛的热管理技术. 随着该领域的不断发展, 人们对先进红外辐射材料的需求不断增加. 石墨烯作为一种新型柔性导电材料, 具有优异的红外发射性质和辐射可控的特点; 玻璃纤维作为一种良好的灰体辐射材料, 发射率可达~0.7. 因此, 由石墨烯与玻璃纤维复合得到的蒙烯玻璃纤维有望成为一种良好的红外电加热材料. 本工作采用化学气相沉积方法, 以玻璃纤维为衬底, 在其表面生长了一层连续态石墨烯薄膜, 制备得到一种新型红外热辐射材料——蒙烯玻璃纤维(graphene-skinned glass fiber fabric, GGFF). 蒙烯玻璃纤维织物具备轻质、柔性的结构特点和可调的红外辐射特性. 这种由石墨烯和玻璃纤维结合组成的“双辐射体”具有很高的红外发射率(~0.90)和电热辐射转换效率(~80.2%). 由GGFF制成的电加热元件在 4.5 W cm^{-2} 的电功率密度下能够以 $\sim 255.5^\circ\text{C s}^{-1}$ 的响应速率迅速升温至 $\sim 580^\circ\text{C}$, 实现快速的电热响应并达到均匀的加热温度. 这种新型电加热材料综合了石墨烯和玻璃纤维良好的红外辐射性质, 其红外辐射性能明显优于传统商用电加热片, 有望实现电热辐射领域高效节能的目标.

关键词 石墨烯, 玻璃纤维织物, 双辐射体, 新型红外辐射加热体

热辐射是一种广泛存在于自然界和工业界中的热传递方式, 日常应用场景中的辐射波长范围主要集中在红外区域. 基于红外辐射的电加热技术具有无需中间介质、穿透性强、加热效率高、响应速度快、节能环保等优势, 因此被广泛应用于工业窑炉、防除冰、医疗健康等诸多领域^[1,2]. 传统的商用电加热材料主要由金属合金材料(如镍铬合金、铁铬铝合金等)组成, 然而它们存在热辐射效率低、柔性差、密度大等缺陷^[3]. 尽管通过在其表面涂覆新型红外辐射材料的方式能够提升其红外辐射能力, 但依然难以避免短波段发射率低、界面结合力弱、易脱落、耐高温性差等问题^[4]. 因此, 发展一种具有优异辐射特性、轻量化的新型柔性电加热材料, 使其满足不同的红外加热场景需求, 对

于实现高效节能加热的目标至关重要.

石墨烯作为一种新型的柔性导电材料, 具有从可见光到红外光的宽波段吸收, 并且其吸收率能够随着层数的增加而增加. 根据基尔霍夫热辐射定律, 对于漫射灰体, 其吸收比等于同温度下的发射率. 因此, 多层石墨烯表现出宽带高发射率以及辐射可调控的特性^[5,6]. 玻璃纤维作为一种成熟的工程材料, 具有轻质、高强度、耐高温、耐腐蚀等优异性能, 已经在航空航天、风能发电等各个行业发挥着重要作用^[7]. 将二者的结构相结合, 形成以玻璃纤维为基底, 石墨烯层共形包覆在其表面的新型复合材料, 有望发挥石墨烯与玻璃纤维的双重优势, 作为一种新型红外辐射加热材料, 克服传统红外电加热材料存在的弊端, 走向实际应

引用格式: 苏清旭, 元月, 刘忠范. 蒙烯玻璃纤维织物及其红外辐射加热应用. 科学通报, 2025, 70: 4752–4758

Su Q, Qi Y, Liu Z. Graphene-skinned glass fiber fabric and its application in infrared radiant heating (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 4752–4758, doi: 10.1360/TB-2024-0932

用^[8,9].

本研究利用化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD)在玻璃纤维织物表面直接生长石墨烯,使得织物中每一根纤维表面均匀共形包覆连续态石墨烯薄膜,成功制备了以石墨烯为“蒙皮”的蒙烯玻璃纤维织物(graphene-skinned glass fiber fabric, GGFF). 基于石墨烯与玻璃纤维良好的灰体辐射性质,这种优异的红外辐射材料具有独特的“双辐射体”可调控的红外辐射机制. 将蒙烯玻璃纤维应用于红外电加热领域时,与商用金属加热丝相比,蒙烯玻璃纤维表现出高效节能的特点,展现出巨大的应用潜力. 其发射率可达~0.90, ~573 K温度下的电热辐射转换效率可达~80.2%. 由蒙烯玻璃纤维织物构成的电加热元件具备超快的电热响应、很高的电热辐射转换效率和稳定的电加热循环性能. 当功率密度为 4.5 W cm^{-2} 时,其响应速率和饱和温度最高可以达到~ 255°C s^{-1} 和~ 580°C ,在电加热领域展现出广阔的应用前景.

1 结果与讨论

石墨烯在玻璃纤维丝束和玻璃纤维织物上的CVD生长过程如图1(a)所示. 在该CVD工艺中,玻璃纤维是绝缘衬底,催化活性很弱. 因此,甲烷分子作为碳源先驱体,主要通过热裂解的方式,形成大量碳活性物种,并相互碰撞形成碳团簇,吸附在玻璃纤维表面成核、生长、拼接,形成石墨烯层^[10]. 本文提出的CVD制备策略还具备一定的成本优势. 传统制备策略有浸渍涂覆法、表面改性法等. 但是这些策略制备得到的石墨烯存在大量缺陷,且不可避免地会引入杂质,不利于石墨烯本征性能的发挥. 另一方面,复杂的工艺流程难以做到可控和规模化制备,这也限制了石墨烯玻璃纤维的工业化生产应用. 而CVD方法具备可控化、规模化的优势,有望让蒙烯玻璃纤维从研究走向实际应用. 利用市售玻璃纤维和自主研发的批量CVD生产设备,本工作实现了蒙烯玻璃纤维织物GGFF的批量制备. 图1(b)中的扫描电子显微镜(scanning electron microscopy,

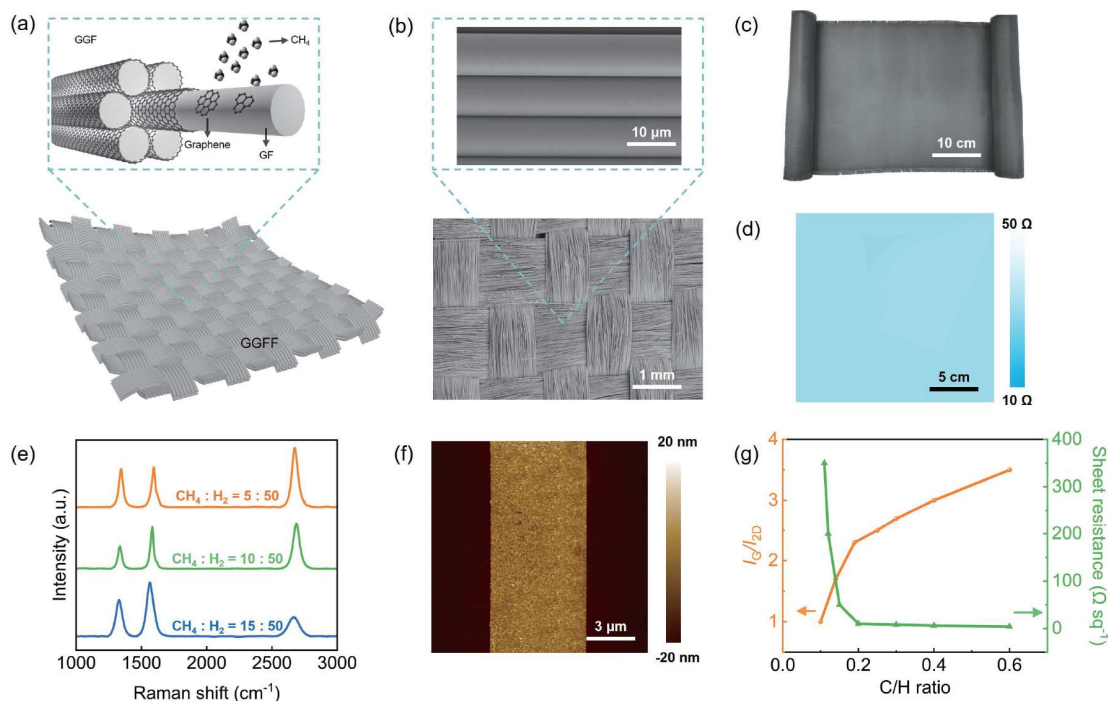


图 1 (网络版彩色)蒙烯玻璃纤维及其织物的化学气相沉积制备. (a) 蒙烯玻璃纤维及其织物的化学气相沉积制备示意图; (b) 蒙烯玻璃纤维及其织物的扫描电子显微镜图片; (c) 柔性蒙烯玻璃纤维织物的实物图; (d) 蒙烯玻璃纤维织物的面电阻面扫描图; (e) 不同甲烷/氢气比例生长条件下制备的蒙烯玻璃纤维织物的拉曼光谱图; (f) 刻蚀玻璃纤维后石墨烯纳米带的原子力显微镜图片; (g) 不同甲烷/氢气比例下生长的石墨烯 I_G/I_{2D} 值以及面电阻变化

Figure 1 (Color online) Fabrication of GGF and GGFF by CVD method. (a) Schematic of GGF and GGFF by CVD method; (b) SEM image of GGF and GGFF; (c) image of flexible GGFF; (d) sheet resistance mapping of GGFF; (e) Raman spectra of GGFF grown with different C/H ratios; (f) AFM image of a graphene ribbon obtained after etching the core glass fiber; (g) I_G/I_{2D} and sheet resistance of GGFF grown with different C/H ratios

SEM)图像表明, 石墨烯完整包覆在每根玻璃纤维束的表面, 制备得到的GGFF表面保持了均匀的编织结构. 图1(c)为GGFF的实物图, 其长度和宽度可达300和40 cm, 呈现出均匀的黑色. 对20 cm×20 cm的蒙烯玻璃纤维织物利用四探针面电阻测试仪进行面电阻扫描(图1(d)), 其面电阻均值为 $30.24 \pm 0.15 \Omega \text{ sq}^{-1}$, 面电阻不均匀性在1.2%以内, 具有极高的电学均匀性. 拉曼光谱可以对石墨烯的质量与厚度做进一步的评估. 如图1(e)所示, 石墨烯的质量和厚度受到甲烷/氢气比例(C/H比)的显著影响. 随着C/H比的增加, 碳源的供给变得充足, 而氢气对无定形碳的刻蚀效果减弱, 这使得石墨烯层的厚度逐渐增加, 但质量有所降低. 通过调控通入CVD反应体系的甲烷/氢气比例, 能够有效调节拉曼光谱中D峰、G峰和2D峰的强度与展宽, 从而调节石墨烯层的缺陷密度与厚度. 为了获取石墨烯层厚度的精确信息, 利用氢氟酸蚀刻去除玻璃纤维芯层, 将由此得到的石墨烯纳米带转移到硅片上, 并用原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM)进行厚度表征(图1(f)). 图1(g)表明, 随着C/H比的增加, 越来越多的碳活性物种进入反应体系, 使得 I_G/I_{2D} 不

断增大, 生长的石墨烯厚度逐渐增加, 因此蒙烯玻璃纤维织物的面电阻也随之降低. 通过调控石墨烯的生长条件, 本工作可实现蒙烯玻璃纤维织物的面电阻从 $1 \Omega \text{ sq}^{-1}$ 到 $3000 \Omega \text{ sq}^{-1}$ 可调.

为进一步评估蒙烯玻璃纤维织物的柔性和其他结构特点, 本工作对样品进行了形变与弯曲测试. 本工作测试了蒙烯玻璃纤维织物在发生几种常见的形变^[11,12](由抓揉、扭转、折叠、展开4个操作组成一次形变循环, 如图2(a))之后的电阻变化. 实验表明, 在100次形变操作循环后, 蒙烯玻璃纤维织物的电阻变化率仅为3.6%, 表现出极强的电学性质稳定性(图2(b)). 其原因是, 石墨烯层与玻璃纤维表面附着均匀且结合牢固, 形变测试并不会对石墨烯层的本征结构造成破坏, 因此导电性得以完好保留. 与此同时, 弯折稳定性是衡量柔性导电材料能否走向实际应用的重要指标. 图2(c)展示了在不同弯曲半径(5~25 mm)下, 蒙烯玻璃纤维织物经过100次弯折后的电阻没有明显变化(变化率均在5%以内), 说明其具有优异的变形稳定性. 利用拉伸试验机对蒙烯玻璃纤维织物进行拉伸测试, 其应力-应变曲线以及断裂后的纤维束SEM图片如图2(d)所示. 在经过

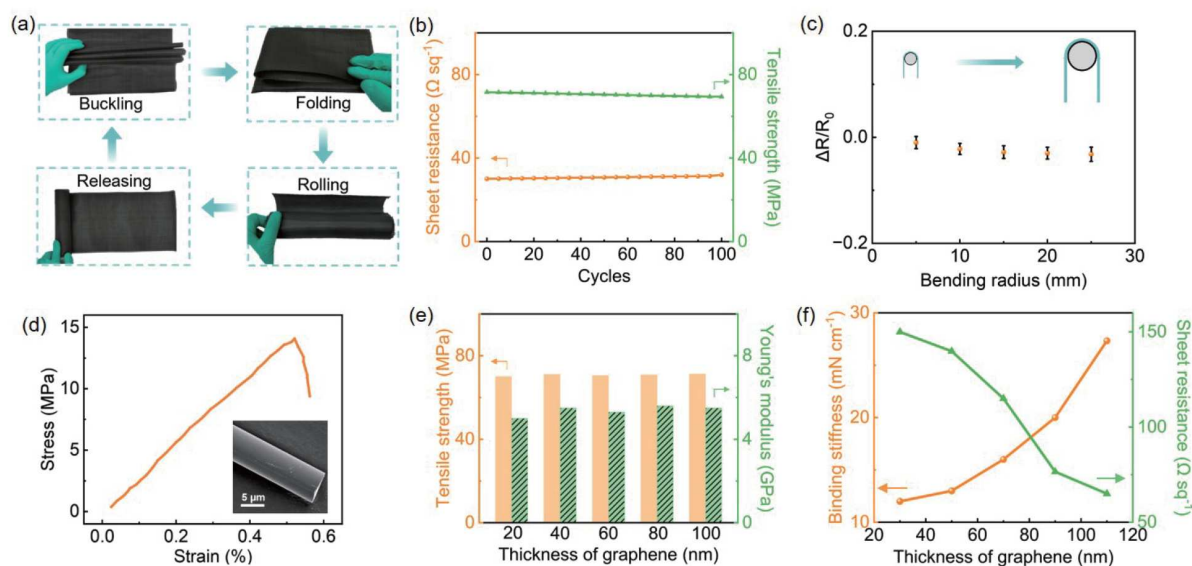


图2 (网络版彩色)蒙烯玻璃纤维织物的结构及其稳定性. (a) 对蒙烯玻璃纤维织物进行的4种形变操作(堆叠、弯折、卷曲、释放); (b) 蒙烯玻璃纤维织物形变循环操作后的面电阻变化和拉伸强度变化; (c) 蒙烯玻璃纤维织物面电阻变化率随弯折半径从5 mm增加至25 mm时的改变情况; (d) 蒙烯玻璃纤维织物的应力-应变曲线和断裂后纤维的SEM图片; (e) 玻璃纤维织物与蒙烯玻璃纤维织物的拉伸强度与杨氏模量对比; (f) 不同石墨烯层厚度的蒙烯玻璃纤维织物抗弯刚度和面电阻变化图

Figure 2 (Color online) Structure and stability test of GGFF. (a) Four deformation operations on GGFF (buckling, folding, rolling and releasing); (b) electrical resistance and tensile strength variation of GGFF after deformation operation cycles; (c) electrical resistance variation of GGFF with bending radius from 5 to 25 mm; (d) stress-strain curve of GGFF and SEM image of the broken fiber; (e) comparison of tensile strength and Young's modulus of GFF and GGFF; (f) binding stiffness and sheet resistance of GGFF with different thickness of graphene

100次形变操作后,其拉伸强度变化率依旧在3%以内(图2(b)),因此其机械结构也具有很高的稳定性。并且,在20~100 nm的石墨烯厚度范围内,蒙烯玻璃纤维织物的拉伸强度和杨氏模量基本保持不变(图2(e)),说明纳米厚度的石墨烯不会影响织物的机械强度。进一步地,本工作利用斜面法测量了织物的抗弯刚度,以表征蒙烯玻璃纤维织物的柔性^[13]。如图2(f)所示,随着石墨烯层厚度的增加,样品的抗弯刚度也随之增加。原因是微观结构下堆叠组装的石墨烯层能够在一定程度上抑制平面外的变形,从而使得材料整体的柔性变差。另一方面,石墨烯层的厚度与蒙烯玻璃纤维织物的面电阻呈负相关。因此,在生长过程中需要选择合适的条件生长得到理想厚度的石墨烯层,以兼顾蒙烯玻璃纤维织物的柔性和导电性。

为研究蒙烯玻璃纤维织物的红外辐射特性,本工作测试了面电阻为~100 $\Omega \text{ sq}^{-1}$ 的蒙烯玻璃纤维织物(GGFF-100)分别在~473, ~573, ~673 K温度下的红外发射光谱(波长范围: 2~25 μm)。如图3(a)所示,该蒙烯玻璃纤维织物的红外辐射强度实测数值用空心点表示,

根据普朗克公式绘制的灰体辐射理论发射曲线用实线所示。理论灰体辐射曲线可以由普朗克公式 $E(\lambda, T) = (2\pi\epsilon_0hc^2)/(\lambda^5(\exp(hc/\lambda k_B T) - 1))$ 绘制得到(其中, E , ϵ , λ , T 分别为光谱辐射强度、发射率、波长、温度; h , c , k_B 分别为普朗克常数、光速、玻尔兹曼常数)。图3(a)表明,蒙烯玻璃纤维织物的发射曲线与理论灰体辐射曲线高度吻合,说明蒙烯玻璃纤维织物的红外热辐射可以认为是灰体辐射。随着温度的升高,蒙烯玻璃纤维织物的发射光谱峰值不断升高,且峰值波长不断向短波方向移动,473 K下的峰值波长为~5.95 μm , 673 K下的峰值波长为~4.95 μm , 满足理论灰体辐射的变化特点。并且由于其面电阻具有可调性,当面电阻从2500 $\Omega \text{ sq}^{-1}$ 下降至100 $\Omega \text{ sq}^{-1}$ 时,其在673 K下的发射率从0.85提升至0.90, 峰值辐射强度从0.116 $\text{W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 提升至0.121 $\text{W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ (图3(b), 其中GGFF-2500, GGFF-500, GGFF-100分别代表面电阻为2500, 500, 100 $\Omega \text{ sq}^{-1}$ 的蒙烯玻璃纤维织物)。通过调控工作温度,可实现对其发射峰值波长的调节,从而满足不同加热场景的需求。

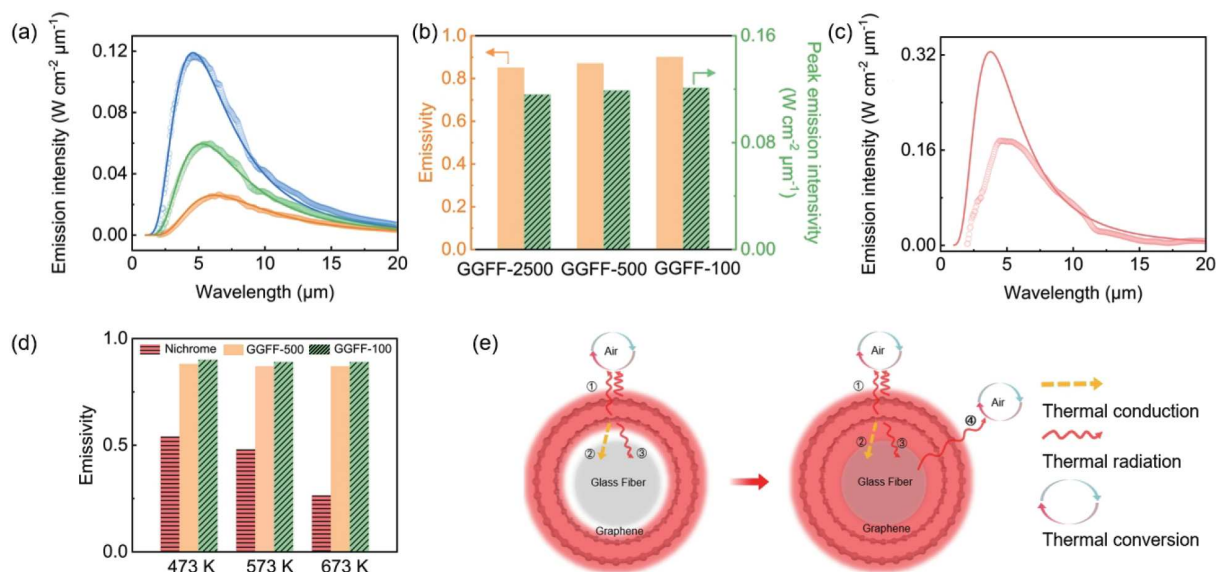


图 3 (网络版彩色)蒙烯玻璃纤维织物的红外辐射性质。(a) 蒙烯玻璃纤维织物GGFF-100在473, 573, 673 K下的红外发射谱图(空心点)与相应温度、相应发射率下的理论灰体辐射曲线(实线); (b) 具有不同面电阻的蒙烯玻璃纤维织物(GGFF-2500, GGFF-500, GGFF-100)在673 K下的发射率与峰值辐射强度; (c) 传统商业发热片在773 K下的红外发射谱图(空心点)与相应温度、相应发射率下的理论灰体辐射曲线(实线); (d) 传统商业发热片和蒙烯玻璃纤维织物(GGFF-500, GGFF-100)在473, 573, 673 K温度下的发射率对比; (e) 具有双发射体的蒙烯玻璃纤维织物的热传递过程示意图

Figure 3 (Color online) Infrared radiation characteristics of GGFF. (a) Infrared emission spectra (hollow dots) and theoretical gray-body radiation curves (solid lines) of GGFF-100 at 473, 573, and 673 K; (b) emissivity and peak emission intensity of GGFF with different sheet resistances (GGFF-2500, GGFF-500, GGFF-100) at 673 K; (c) infrared emission spectra (hollow dots) and theoretical gray-body radiation curves (solid lines) of Nichrome at 773 K; (d) comparison of emissivity of nichrome, GGFF-500, and GGFF-100 at 473, 573, and 673 K; (e) schematics of the heat transfer process in the system of GGFF with a dual emitter

为了对比蒙烯玻璃纤维织物与传统商业发热片的红外辐射性能差异, 本工作测试了一种常见的市售电加热片的发射光谱与发射率, 它由镍铬合金与耐高温陶瓷复合而成. 图3(c)表明, 这种传统商业发热片的发射光谱谱图与相应发射率的灰体辐射曲线并不吻合, 实测发射强度明显低于理论强度, 说明其并不满足灰体辐射性质, 难以通过灰体辐射规律预测它的辐射性质. 同时, 图3(d)表明, 蒙烯玻璃纤维织物在不同温度(473, 573, 673 K)下均表现出较高的发射率(稳定在0.90左右). 而传统电加热材料的发射率则随温度升高出现了明显的下降, 在温度为673 K时其发射率仅有~0.26. 因此, 与传统电加热片相比, 蒙烯玻璃纤维织物具有相同温度下更高的光谱辐射强度和发射率, 并且其发射率不随温度发生明显变化, 具有更好的辐射加热效果.

由于单层石墨烯的理论发射率为0.023, 根据 n 层石墨烯的理论发射率公式: $\epsilon = \alpha = 1 - (1 - 0.023)^n$, 可以估算出具有20层左右的蒙烯玻璃纤维理论发射率为0.37^[14], 但实际上其发射率却达到了0.90. 因此, 被石墨烯包覆在内部的玻璃纤维也对整体材料的发射率具有较高的贡献. 图3(e)为蒙烯玻璃纤维单根丝束的截面示意图, 在蒙烯玻璃纤维热辐射过程中, 石墨烯层作为发热体,

一方面通过红外辐射对外部环境进行加热(过程1), 另一方面通过热传导(过程2)和热辐射(过程3)的方式对其内部的玻璃纤维进行加热. 玻璃纤维凭借其内部Si-O键的振动, 发射率能够达到0.7左右, 升温后的玻璃纤维能够穿过纳米尺度的石墨烯层向外部环境辐射红外能量(过程4), 有效提高了蒙烯玻璃纤维织物的红外辐射性能. 因此, 石墨烯和玻璃纤维有效结合, 表现出了一种“双辐射体”的红外辐射机制.

综上所述, 理论和实验研究均表明, 相比传统商用红外辐射材料, 蒙烯玻璃纤维织物具备更高的发射率以及更加优异的红外辐射性能, 并且通过调节面电阻等参数, 其辐射性质能够得到有效调控. 这些优势为蒙烯玻璃纤维织物在红外电加热领域的应用奠定了坚实的基础.

为进一步深入研究蒙烯玻璃纤维织物的红外电加热性能, 本工作构建了如图4(a)所示的电加热器件. 具体的操作方法是: 在样品两侧边沿, 通过等离子体喷涂的手段附加一层铜电极, 并在电极上焊接导线. 得到的实物图如图4(b)所示. 将导线连接到电源后, 施加一定的电压, 并利用红外热成像仪对该元件的表面温度进行实时监控. 图4(c)展示了该蒙烯玻璃纤维织物的热成

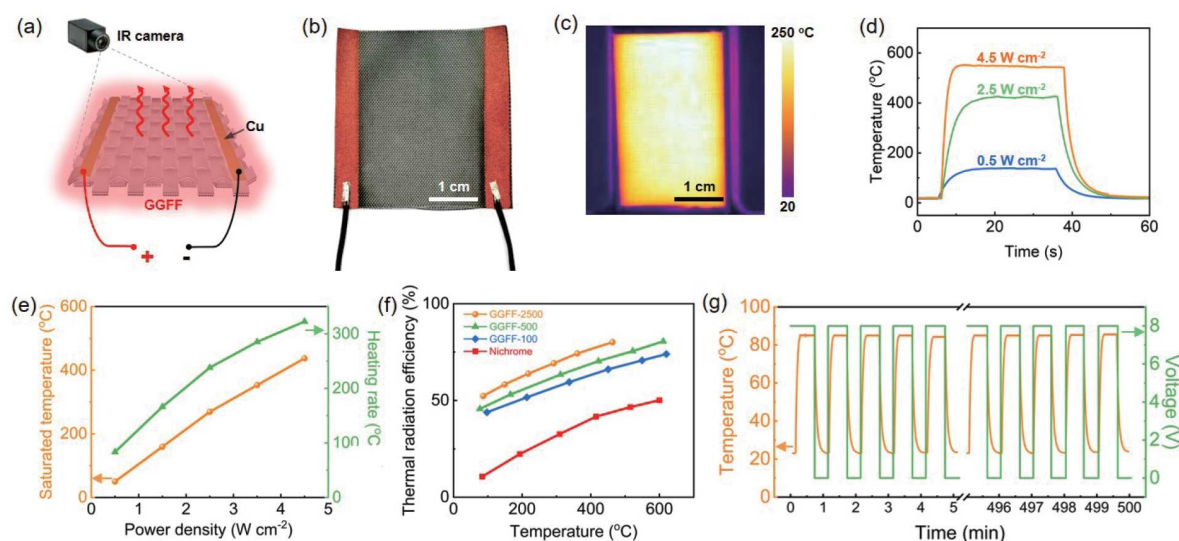


图 4 (网络版彩色)蒙烯玻璃纤维织物的红外电加热应用. (a) 蒙烯玻璃纤维织物电加热元件示意图; (b) 蒙烯玻璃纤维织物电加热元件实物图; (c) 蒙烯玻璃纤维织物的红外热成像图; (d) 蒙烯玻璃纤维织物电加热元件在不同功率密度下的升降温曲线; (e) 不同功率密度下蒙烯玻璃纤维织物电加热元件的饱和温度及升温速率; (f) 蒙烯玻璃纤维织物电加热元件和传统商用发热片的电热辐射转换效率随温度变化曲线; (g) 对蒙烯玻璃纤维织物电加热元件施加周期为1 min, 大小为0~8 V的方波, 进行500次循环的升降温曲线

Figure 4 (Color online) Infrared radiant heating performance of GGFF. (a) Schematic of the GGFF heater; (b) image of the GGFF heater; (c) infrared image of the GGFF heater; (d) temperature profiles of the GGFF heater at different power densities; (e) saturated temperature and heating rate of the GGFF heater with different power densities; (f) thermal radiation efficiency of the GGFF heaters and Nichrome with different sheet resistances and temperatures; (g) temperature profiles of the GGFF heater while applying a square wave from 0 to 8 V with a period of 1 min for 500 cycles

像图,其表面平均温度在 $220\pm 2^{\circ}\text{C}$ 并且分布均匀。图4(d)展示了该蒙烯玻璃纤维织物电加热元件在不同功率密度下的升降温曲线。通过调节电功率密度从 $0.5\sim 4.5\text{ W cm}^{-2}$,可实现对电加热元件的饱和温度进行 $150\sim 580^{\circ}\text{C}$ 的大范围调控。与此同时,元件的加热速率也随功率密度的增加而增加。当功率密度为 4.5 W cm^{-2} 时,升温速率可达 $255.5^{\circ}\text{C s}^{-1}$,可实现高效的升温加热过程(图4(e))。对材料表面平均热辐射温度进行测量,并利用公式 $\eta=[S\sigma(T^4-T_0^4)]/P$ (其中, η 为电热辐射转换效率, S 是电热材料的面积, T 是平均热辐射温度, T_0 是环境温度, P 是输入电功率, σ 是斯特藩-玻尔兹曼常数)计算出电加热材料的电热辐射转换效率。如图4(f)所示,随着温度和面电阻的升高,其电热辐射转换效率不断增加。当面电阻为 $3200\ \Omega$ 时,温度仅在 400°C 下的电热辐射转换效率就高达 $\sim 80.2\%$,明显高于相同条件下的传统商用电加热材料的电热辐射转换效率(600°C 时仅为 50.2%)。图4(g)展现了蒙烯玻璃纤维织物电加热元件优异的循环稳定性。对电加热元件施加 $0\sim 8\text{ V}$ 的周期为 1 min 的方波,在 500 次循环内,其升降温曲线几乎不发生变化。因此,由蒙烯玻璃纤维织物构成的电加热元件能够发挥出高效、可调控、稳定、节能的巨大优势。

2 结论

本文采用化学气相沉积工艺成功制备了一种新型的红外辐射材料——蒙烯玻璃纤维织物。它综合了石墨烯和玻璃纤维的优良特性,具备良好的柔性和导电性,并且具有“双辐射体”的红外辐射特点。与传统商业电加热材料对比,蒙烯玻璃纤维织物在红外辐射性质和电热辐射转换效率等方面均具有显著优势。它具备灰体辐射特性,发射率高达 ~ 0.90 ,且不会随温度变化而发生明显变化。将蒙烯玻璃纤维织物用作红外辐射电加热器件时,它具有超快的电热响应和均匀的加热温度,在 4.5 W cm^{-2} 的电功率密度下响应速率达到 $\sim 255.5^{\circ}\text{C s}^{-1}$,加热温度达到 $\sim 580^{\circ}\text{C}$ 。在相同温度下,蒙烯玻璃纤维织物具有更高的电热辐射转换效率($\sim 400^{\circ}\text{C}$ 时达到 $\sim 80.2\%$),表现出高效节能的特点。原子级厚度的石墨烯为玻璃纤维带来了导电导热等新的功能,大大拓宽了其应用领域。由于蒙烯玻璃纤维优异的电加热性能,它已经在飞机和风电叶片的防除冰领域实现了实际应用,为石墨烯材料的发展开辟了新的路径。未来,蒙烯玻璃纤维织物有望成为新一代轻质、高效、节能的柔性电加热材料,在工业烘干等领域展现出巨大的应用潜力。

参考文献

- 1 Hsu P C, Song A Y, Catrysse P B, et al. Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile. *Science*, 2016, 353: 1019–1023
- 2 Tang K, Dong K, Li J, et al. Temperature-adaptive radiative coating for all-season household thermal regulation. *Science*, 2021, 374: 1504–1509
- 3 Liu H Z, Ouyang J H, Liu Z G, et al. Microstructure, thermal shock resistance and thermal emissivity of plasma sprayed $\text{LaMg}_{11}\text{O}_{19}$ ($\text{M}=\text{Mg, Fe}$) coatings for metallic thermal protection systems. *Appl Surf Sci*, 2013, 271: 52–59
- 4 Lu L, Fan X, Zhang J, et al. Evolution of structure and infrared radiation properties for ferrite-based amorphous coating. *Appl Surf Sci*, 2014, 316: 82–87
- 5 Freitag M, Chiu H Y, Steiner M, et al. Thermal infrared emission from biased graphene. *Nat Nanotech*, 2010, 5: 497–501
- 6 Song G, He S, He F, et al. Effect of doping graphene oxide on the structure and properties of SiO_2 based high emissivity coatings. *J Appl Polym Sci*, 2019, 137: 48794
- 7 Li H, Charpentier T, Du J, et al. Composite reinforcement: Recent development of continuous glass fibers. *Int J Appl Glass Sci*, 2017, 8: 23–36
- 8 Cui G, Cheng Y, Liu C, et al. Massive growth of graphene quartz fiber as a multifunctional electrode. *ACS Nano*, 2020, 14: 5938–5945
- 9 Qi Y, Sun L, Liu Z. Super graphene-skinned materials: An innovative strategy toward graphene applications. *ACS Nano*, 2024, 18: 4617–4623
- 10 Liu R, Yuan H, Li J, et al. Complementary chemical vapor deposition fabrication for large-area uniform graphene glass fiber fabric. *Small Methods*, 2022, 6: 2200499
- 11 Guo Q, Pan Y, Lin J, et al. Programmable 3D self-folding structures with strain engineering. *Adv Intelligent Syst*, 2020, 2: 2000101
- 12 van Manen T, Janbaz S, Zadpoor A A. Programming the shape-shifting of flat soft matter. *Mater Today*, 2018, 21: 144–163
- 13 Yu F, Chen S, Viisainen J V, et al. A macroscale finite element approach for simulating the bending behaviour of biaxial fabrics. *Compos Sci Tech*, 2020, 191: 108078
- 14 Nair R R, Blake P, Grigorenko A N, et al. Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*, 2008, 320: 1308

Summary for “蒙烯玻璃纤维织物及其红外辐射加热应用”

Graphene-skinned glass fiber fabric and its application in infrared radiant heating

Qingxu Su^{1,2}, Yue Qi^{1,2*} & Zhongfan Liu^{1,2*}¹ College of Chemistry and Molecular Engineering, Peking University, Beijing 100871, China² Beijing Graphene Institute (BGI), Beijing 100095, China* Corresponding authors, E-mail: qiyue-cnc@pku.edu.cn; zfliu@pku.edu.cn

Infrared radiant heating is an important thermal management technology due to its independence from a medium, robust transmission capabilities, and broad applications. With ongoing advancements in the field, the demand for advanced infrared radiant materials is growing. Graphene, known for its high broadband emissivity and controllable radiation, stands out as an excellent infrared emission material. Glass fiber, with an emissivity of ~ 0.7 , serves as a reliable gray radiation material. Consequently, a composite of graphene and glass fiber holds promise as an effective infrared radiation heating material. In this work, graphene-skinned glass fiber fabric (GGFF) is developed using the chemical vapor deposition method. To create a flexible infrared thermal radiant material with dual emitters, a continuous graphene film is grown on the surface of the glass fiber. In the CVD growth system, the quality and thickness of graphene were significantly affected by the methane/hydrogen (C/H) ratio. The increase of I_G/I_{2D} with the C/H ratio indicates that the as-grown graphene becomes thicker due to adequate active carbon species supply, which results in tunable sheet resistance from 1 to 3000 $\Omega \text{ sq}^{-1}$. The emission curves of GGFF match well with those of a gray body, which proves that the radiation from GGFF can be regarded as gray-body radiation. The infrared radiation characteristics of GGFF can not only be influenced by the temperature but also be effectively modulated by the sheet resistance of graphene. As sheet resistance decreases from 2500 to 100 $\Omega \text{ sq}^{-1}$, the peak emission intensity increases from 0.116 to 0.121 $\text{W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$, along with corresponding emissivity changes from 0.85 to 0.90, which shows negligible changes as temperature increases. Graphene works as the heating element through Joule heating, and increasing the number of graphene layers can enhance its radiation capability. Then the underlying glass fiber will be heated by graphene through thermal radiation and conduction. With matching absorption, graphene can effectively heat the glass fiber by thermal radiation. After being heated by graphene, the glass fiber will in return act as the infrared emitter together with graphene to radiate energy to the surroundings. In this way, the GGFF possesses dual emitting elements, graphene and glass fiber, which greatly enhances the infrared radiation capability. The dual-emitter GGFF demonstrates a lightweight and flexible structure, with tunable gray body radiant characteristics, high infrared emissivity (~ 0.90), and thermal radiation efficiency ($\sim 80.2\%$). For comparison, the emission spectra of the commercial metal resistance wires, such as nichrome, were also tested. The emission spectra of nichrome do not have a perfect match with those of the gray-body radiation, which means that the heating ability in the mid-infrared region is limited. As a kind of novel radiant heater, GGFF exhibits ultra-fast electrothermal response ($255.5^\circ\text{C s}^{-1}$ at 4.5 W cm^{-2}) and uniform heating temperature ($\sim 580^\circ\text{C}$). The superior radiant heating capability of GGFF can promote the development of efficient and energy-saving heat management technology.

graphene, glass fiber fabric, dual-emitter, novel infrared radiant heatersdoi: [10.1360/TB-2024-0932](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0932)