

炭纤维电热发热布的设计与开发

南通大学 黄晓梅 季 涛 余 进

摘要：利用炭纤维优异的导电性、导热性设计与开发了炭纤维电热发热布，介绍了炭纤维电热发热布的设计原则、开发和织造中出现的问题以及解决方法。

关键词：炭纤维；导电发热；织物；设计；织造

炭纤维，是一种非金属导电材料，具有一般碳素材的特性，如耐高温、耐摩擦、导电、导热、耐腐蚀等，与一般碳素材不同的是其外型柔软，可加工成各种织物。本文介绍了利用炭纤维优异的导电性、导热性及易加工性，设计与开发出的一种面状发热体。作为发热、保温材料无论在工业方面或是在家庭日常生活方面，都具有广阔的发展前景。

1 炭纤维的电热性能

炭纤维是非金属材料中导电性能最好的物质，其导电机理与金属材料不同，主要取决于非定域 π 电子。炭化、石墨化温度愈高，石墨层面愈发达，形成 π 键的非定域区愈大，导电性能愈好。

炭纤维的电阻率可用下式^[1]计算： $S_b = \frac{R_b}{L} \times \frac{t}{\rho} \times 10^{-5}$ ，式中， S_b —炭纤维的体电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)；

R_b —试样长 L 的电阻 (Ω)； L —测试电阻时的试样长度 (cm)； t —试样的纤度 (tex)； ρ —试样的体密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。炭纤维的体电阻率除了与测试长度及其电阻有关以外，还与炭纤维的纤度和体密度有关。

炭纤维的热传导是靠格波传递，也是随着石墨层平面的增大而增加。不同种类的炭纤维的热导率不同。对于 PAN 基炭纤维 T300 热导率约为 $6.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$ ，T800 为 $26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$ 。

炭纤维通电后电热效率的能量平衡如下：

$$W = \pi D L H (T_s - T_A) + \pi D H \sigma (T_s^4 - T_A^4)$$

式中， W —电功率； T_s —束丝表面温度； D —束丝直径； T_A —周围环境温度； L —束丝长度； H —对流传热系数； σ —斯蒂芬—玻尔兹曼常数 ($56.7 \text{nW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)。

热传递分三种方式：热传导、热辐射、热对流。维恩—葛利琴位移定律表明^[1]，辐射波长与温度 T 有以下关系： $\lambda_{\max} \cdot T = 2897$ 。温度愈高，热辐射波长愈短。炭纤维的热辐射的能量载体是电磁波，波长为 $0.8 \sim 40 \mu\text{m}$ 范围内的红外区；其中，90% 的热辐射波长在 $2.5 \sim 13 \mu\text{m}$ 范围内，恰好是人体易吸收的波长范围，具有显著的生物效应，有辅助理疗保健作用，在人体保健方面有广阔的应用前景。

炭纤维的热传导和热辐射性能相当好，电热转换效率在 90% 以上，节能效果十分显著。它可避免积蓄热和过热现象的发生，因此，该材料的使用寿命长。

2 炭纤维电热发热布的设计原则

2.1 发热性能稳定性

炭纤维电热发热布在整个使用过程中都能保持同一阻值，提供恒定的发热功率。

在实际生产过程中，由于选配的原料、生产工艺等众多因素的影响，会使炭纤维电热发热布的阻值发生变化。在使用过程中，不仅要承受拉、折、压等负荷作用下的变形的考验，还要经受温湿度变化的考验，以及经受冷—热循环的热疲劳的考验和汗水、雨水等的浸蚀考验。因此，设计炭纤维电热发热布时，要把影响阻值的各种因素进行充分考虑，确保其发热性能的稳定。

2.2 发热温度均匀性

发热温度的均匀性是指发热面积内发热温度的一致性。如果出现发热温度严重的差异，就可能发生发热局部烧穿，甚至造成烧伤事故，非常危险。炭纤维长丝的粗细均匀性、炭化程度的均匀性对发热温度的均匀性有所影响，金属丝导线与炭纤维长丝之间的连接往往因接触不良而局部发热不匀。因此，设计炭纤维电热发热布时，应选择炭化均匀、细度均匀的炭纤维长丝作为发热体，炭纤维长丝在发热布布面均匀分布、合理配置间距，同时要保证金属丝与炭纤维长丝的搭接稳定。

2.3 安全、舒适性

表1列举部分炭纤维发热体的使用电压和功率，对于使用电压220V的发热元件安全性不言而喻。即使在安全电压36V以下使用，也要考虑到局部高温烧损情况的出现，确保100%安全。因此，在设计炭纤维电热发热布时要考虑发热布的阻燃性和用电安全。

表1 炭纤维发热体的功率^[2]

序号	名称	电压/V	功率/W
1	羊羔取暖电热垫	220	190
2	水族馆电热器	220	100~200
3	保温垫	220	25~100
4	保温腰带	220	25、50、100
5	电褥	220	40
6	电毯	220	40
7	座垫电热器	12	40
8	汽车电热保温垫	12	30、40
9	治疗坐椅电热器	12	57、75

炭纤维电热发热布与其他炭纤维发热体（如炭纸、涂层发热体、电热膜等）相比，具有柔软、轻薄、透气的优点，用作日常的取暖、保健，具有良好的舒适性。

3 炭纤维电热发热布的结构形式^[3]

炭纤维长丝是发热布的心脏，与作为导线的金属丝交织，构成导电发热电路的主体，在一定电压作用下导电发热。炭纤维长丝和金属丝之间由普通纱线构成导电发热体的支架。炭纤维长丝以一定的间隔嵌织在织物的纬向，金属丝沿经向分布在导电发热布的两边，如图1所示。

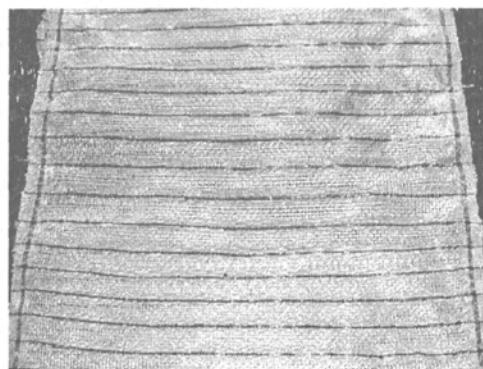


图1 炭纤维电热发热布结构形式

4 设计要点

炭纤维电热发热布的结构表明该织物内有织造缩率不同的两种经纱（金属丝和普通纱线）和两种纬纱（炭纤维长丝和普通纱线），给织物的设计和织造带来了较大的困难。下文结合炭纤维长丝导电发热座垫的设计来说明其设计要点。

参照市场上销售的发热垫的规格，32cm × 32cm，设计功率为45瓦、使用电压12伏。

4.1 纱线原料的选配

4.1.1 发热材料

对于发热材料的选择，应根据设计要求，选择不同类型、不同K数和不同长度的炭纤维，满足不同需求。选用3K的炭纤维长丝做发热座垫的电热发热体，电阻 $1.5 \Omega /cm$ 。

4.1.2 导线材料

选用电阻率小的裸铜丝做导线，考虑到铜丝的可织性，可选择直径0.15mm单丝、0.05mm × 12根的合股裸铜丝等。

计算铜丝根数：利用铜导线的安全载流量的推荐值 $5 \sim 8A/mm^2$ ，计算出所选取铜导线截面积S的上下范围： $S = \frac{I}{5} \sim \frac{I}{8} = 0.2I \sim 0.125I (mm^2)$ ，S—铜导线截面积(mm^2)，I—负载电流(A)。根据取铜导线截面积S的上下范围，可计算出所需铜丝根数n的范围， $n = \frac{S}{\pi (\frac{d}{2})^2}$ ，d—铜丝直径(mm)。考虑到电压的不稳定，电压浮动约为15%，因此，铜丝的实际根数取最大值 $\times (1+15\%)$ 配置。

发热座垫两边配15丝的铜丝各48根，作为导线和电极。

4.1.3 基体织物经、纬纱的选配

(1) 纱线规格设计

炭纤维长丝和铜丝是发热布实现发热功能的主体材料，不可替代。为了保证良好的导电发热效果，保证布面的平整，基体织物纱线选配时应与炭纤维、铜丝的可织性接近，即基体织物经纱的刚度应与铜丝接近，纬纱的刚度与炭纤维长丝接近。防止由于不同纱线的缩率差异造成炭纤维长丝在织物表面起圈，铜丝形成类似“荷叶边”的拱起。

(2) 耐热性

在使用过程中，由于炭纤维电热发热，炭纤维附近的温度较高，在选择构成基体织物的经纬纱线时，应考虑选用热稳定性较好的纤维原料构成的纱线。防止长时间高温作用造成的热收缩及对织物强力等性能的破坏，形成安全隐患，影响炭纤维电热发热布的使用寿命。

(3) 阻燃性

虽然局部高温烧损情况出现的可能性很小，但考虑到使用的绝对安全性，建议选用阻燃纱线，或对炭纤维电热发热布作阻燃整理。

涤纶的初始模量高，特别是高强低伸型涤纶，在负荷作用下不易变形，织物下机缩率小，可有效地防止炭丝起圈、铜丝部位形成“荷叶边”。再者，涤纶的最低的玻璃化温度是67℃，而发热座垫的发热温度一般在40℃左右就能满足人体的舒适感，低于涤纶的玻璃化温度，使用过程中织物变形能力很小。故发热座垫基体织物的经、纬纱选用106.3tex的涤纶低弹丝。

4.2 织物组织的设计

铜丝织物组织的选择要考虑铜丝与炭纤维长丝的紧密接触问题，最好选用纱罗组织，也可选用平纹组织。

为减少上机的复杂程度，炭纤维长丝织物组织与基体织物组织可选用同一组织，采用组织循环较小的平纹、斜纹等。

为了保证发热温度的均匀性，炭纤维长丝间距不宜太大，一般在1~3cm。

发热座垫的织物组织是平纹，炭纤维长丝间距1.5cm，共20根。

4.3 织物规格设计

炭纤维电热发热布的织物规格可根据用途的不同设计，考虑到炭纤维长丝和铜丝的弯曲刚度较大，不宜设计成特紧密结构。发热座垫的密度160×136根/10cm。

5 炭纤维电热发热布在GA747剑杆织机上的织造与性能测试

在GA747剑杆织机上试织了上述发热座垫的炭纤维发热布。幅宽方向4块发热布同时形成，开口时间 $285^{\circ} \pm 2^{\circ}$ ，后梁高度9cm，剑杆进梭口时间 $80^{\circ} \pm 2^{\circ}$ ，剑杆出梭口时间 $280^{\circ} \pm 2^{\circ}$ ，织机转速180rpm，纬密牙23齿。湿度对织造过程的顺利进行有很大影响，湿度低时，纱线断头严重，无法正常织造，故需加湿处理，相对湿度保持在70%以上。铜丝由筒子架单独送经。涤纶低弹丝的上机张力不宜太大，原则上能保证开口清晰即可，以减小下机织缩率引起的布面不平整。炭纤维长丝不经储纬器，以减少炭纤维长丝的磨损，可通过弹性夹片、导纱辊等调节对炭纤维长丝的握持力。剑头应选择夹持力大的剑头，以加强对表面较光滑的炭纤维长丝的控制。

下机后，在室温16.5℃对发热布进行了通电测试，基本能达到预先设计的功率范围，实测功率42W，炭丝发热温度43~44℃，布面平均温度37~38℃，并能保持长时间稳定。

6 结束语

利用炭纤维导电发热的特性，设计开发的炭纤维导电发热布，具有广阔的市场前景。根据不同的使用要求，通过合理配置炭纤维长丝和铜丝的数量，可设计生产出不同电压下不同功率的发热织物，可用于人体的保暖、保健，作为寒冷地区房屋内壁的热源、大型槽、罐与釜的保温恒温材料、发酵或酿造的保温恒温热源、温室、育苗室、大棚室和家禽喂养室的热源、公路、机场跑道的化雪除冰、船舱甲板的防冻保温、寒冷地区雷达等通信设备的防冰防霜等。

参考文献

- 1 贺福.炭纤维的电热性能及其应用 [J].化工新型材料,2005,33(6):7~8
- 2 李平,周成学等.炭纤维材料在发热体方面的应用开发.炭素 [J],1999,2,24~26
- 3 季涛,黄晓梅,高强,余进.炭纤维红外发热织物 [P].中国专利: ZL 2004 2 0062599.3

炭纤维电热发热布的设计与开发

作者： 黄晓梅， 季涛， 余进

作者单位： 南通大学

本文读者也读过(10条)

1. 吴为民. WU Wei-ming 炭纤维导电发热布的织造工艺[期刊论文]-南通大学学报（自然科学版） 2008, 7(4)
2. 黄晓梅. 季涛. 余进 炭纤维电热发热布的设计与开发[会议论文]-2009
3. 梁佳钧 腈黏锦氨多组分发热纤维无缝内衣染色工艺改进[会议论文]-2009
4. 孙振满 [EminBF<, 4>]中银的电沉积及在SCN-检测中的应用[学位论文]2010
5. 朱俊伟. 方虹天. 杜芳. 李翠萍. Zhu Junwei. Fang Hongtian. Du Fang. Li Cuiping 羊毛导电混纺纱导电性能的研究[期刊论文]-棉纺织技术2010, 38(11)
6. 于建军. 单丽娟. 周秀琴. 刘凤荣 纺织面料的吸湿发热性能研究[会议论文]-2009
7. 杨小平. 荣浩鸣. 戴小军. YANG Xiao-ping. RONG Hao-ming. DAI Xiao-jun 橡胶/碳纤维层压复合导电发热板的电学性能研究[期刊论文]-橡胶工业2000, 47(1)
8. 杨建. 田明. 贾清秀. 史俊红. 张立群 橡胶/石墨纳米复合材料的制备、结构与性能研究[会议论文]-2007
9. 赵涛. 黄娟. 张艳霞. 黄海宾 铜保护剂在高压电气产品上的应用[期刊论文]-电镀与环保2011, 31(3)
10. 黄晓梅. 季涛. 余进. Huang Xiaomei. Ji Tao. Yu Jin 碳纤维电热发热布的设计与开发[期刊论文]-产业用纺织品 2009, 27(6)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_6864246.aspx