

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.03.009

# 玻璃纤维纸增强聚四氟乙烯基复合材料的制备

彭龙, 翁孝宇, 崔梦婷, 龙金

(华南理工大学轻工科学与工程学院, 广州 510640)

**摘要:** 玻璃纤维增强聚四氟乙烯(PTFE)复合材料是应用于高频/高速电子领域的一类关键基础材料。针对玻璃纤维布浸渍路线制备的复合材料上胶量不高的问题,以无碱玻璃棉纤维、短切石英玻璃纤维作为原料,采用湿法成型技术通过改变玻璃棉的打浆度制备了一系列结构均一、孔隙率高的玻璃纤维纸,并通过进一步浸渍 PTFE 乳液,采用冷压烧结的方式制备了一系列具有高树脂含量的 PTFE 基复合材料。系统研究了纸张孔隙结构对上胶量的影响,同时对不同上胶量的 PTFE 基复合材料的性能进行了进一步探究。结果表明,通过降低玻璃棉的打浆度可以有效提高纸张的孔径、透气度、孔隙率从而获得更高的上胶量以制备出介电性能更加优异的介质基板材料。随玻璃棉打浆度由 21°SR 增加至 46°SR,玻璃纤维纸的透气度由 382 mm/s 降低至 55 mm/s,平均孔径由 8.21  $\mu\text{m}$  降低至 2.20  $\mu\text{m}$ 。当所用玻璃棉打浆度为 21°SR 时,抄造的玻璃纤维纸孔隙率为 89.7%,上胶量高达 89.17%。此时 PTFE 基复合材料具有最优异的介电特性,相对介电常数为 2.246,介电损耗为 1.26%。

**关键词:** 玻璃纤维纸;孔隙结构;冷压烧结;介电性能

**中图分类号:** TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)03-0050-07

## Preparation of glass fiber paper reinforced polytetrafluoroethylene-based composites

PENG Long, WENG Xiaoyu, CUI Mengting, LONG Jin

(School of Light Industry and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract :** Glass fiber reinforced polytetrafluoroethylene (PTFE) composites are key basic materials used in the field of high-frequency/high-speed electronics. Aiming at the problem that the amount of glue applied to composites prepared by the glass fiber cloth impregnation route is not high. A series of glass fiber paper with uniform structure and high porosity by changing the beating degree of glass wool were prepared using alkali-free glass wool fiber and quartz glass chopped fiber as raw materials, and through further impregnates PTFE emulsion, A series of PTFE-based composite dielectric materials with high resin content were prepared by cold pressing sintering. The effect of paper pore structure on the amount of glue applied was systematically studied, and the performance of PTFE-based composites under different glue amounts was further explored. The results show that by reducing the beating degree of glass wool, the pore size, air permeability, and porosity of the paper can be effectively improve to obtain a higher glue amount to prepare dielectric substrate materials with better dielectric properties. As the beating degree of glass wool increases from 21°SR to 46°SR, the air permeability of glass fiber paper decreases from 382 mm/s to 55 mm/s, and the average pore size decreases from 8.21  $\mu\text{m}$  to 2.20  $\mu\text{m}$ . When the beating degree of the glass wool used is 21°SR, the porosity of the fabricated glass fiber paper is 89.7%, and the glue content can get as high as 89.17%. Meanwhile, the PTFE-based composite exhibits the best dielectric properties, with a relative dielectric constant of 2.246 and a loss tangent of 1.26%.

**Keywords :** glass fiber paper ; pore structure ; cold pressing sintering ; dielectric property

随着社会信息化的不断发展,低频电磁波已无法满足人们对信号高速度、高容量的传输需要,导致移动通信/雷达等系统工作的频段不断提高至微

波乃至毫米波段,但传统的介质基板材料(如酚醛树脂/纸基、环氧树脂/玻璃纤维等)由于介电性能较差,无法满足高频领域的使用要求。因此,设计开发介

**通信作者:** 龙金,副研究员,博士,主要从事电子及新能源纸基材料研究

**收稿日期:** 2023-12-25

**引用格式:** 彭龙,翁孝宇,崔梦婷,等.玻璃纤维纸增强聚四氟乙烯基复合材料的制备[J].工程塑料应用,2024,52(3):50-56.

PENG Long, WENG Xiaoyu, CUI Mengting, et al. Preparation of glass fiber paper reinforced polytetrafluoroethylene-based composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 50-56.

电性能更加优异的基板材料是保障高频信号高质量传输的决定性因素之一<sup>[1-4]</sup>。

目前高频基板材料常用的树脂基体有聚四氟乙烯(PTFE)、碳氢树脂(CH)、聚苯醚(PPE)、聚酰亚胺(PI)等<sup>[5]</sup>。其中,PTFE因具有极低的吸水率、优异的化学稳定性,以及高分子树脂中最低的介电常数(2.10)和介电损耗(0.000 1~0.000 3),在高频基板材料中使用最为广泛<sup>[6]</sup>。但同时PTFE也存在一些缺点:热膨胀系数高( $109 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )、热导率低[0.20~0.25 W/(m·K)]、力学强度较差等<sup>[7]</sup>。目前常使用陶瓷增强/纤维填充PTFE等物理改性方式以提高PTFE的实际使用性能。掺入陶瓷可以提高基板的热导率、降低热膨胀系数,但同时也会降低基板的加工性,为基板带来吸湿率增大等负面影响<sup>[8-10]</sup>。相比于陶瓷填充,采用高长径比纤维增强可以在更少的填充量下有效提高基板材料的力学强度,从而制备出介电性能更加优异的基板材料,是未来发展的主流<sup>[11-12]</sup>。目前常用纤维增强的形式有两种,连续长纤维编制而成的玻璃纤维布和随机短纤维经湿法成型制备的玻璃纤维纸<sup>[13]</sup>。玻璃纤维布孔隙结构单一,孔以直通形式存在,孔隙率较低因而上胶能力较弱。谭炳良等<sup>[14]</sup>将23 g/m<sup>2</sup>定量玻璃纤维布在60%固含量乳液中需浸渍7次以上才能达到86%的上胶量,工艺繁琐且均匀性较差。在多次浸渍PTFE乳液的过程中,部分树脂残留在玻璃纤维布的表面形成纯PTFE层,造成纤维/树脂分布不均匀。玻璃纤维纸因具有蓬松的结构,较玻璃纤维布孔隙率更高,因而在浸渍树脂的过程中能够获得更高的上胶量,此外玻璃纤维纸由于采用短纤维随机分散的形式因而具有更加均一的结构,这使得玻璃纤维纸增强的基板材料能被应用于更高的频段(>30 GHz)<sup>[15]</sup>。

提高PTFE/玻璃纤维复合基板中树脂的占比是提高基板介电性能最有效的方式之一。玻璃纤维纸是由短纤维搭接而成的纸张骨架,其上胶量不仅受乳液固含量、浸渍方式等影响,与纸张结构也存在紧密联系。通过改变玻璃纤维纸抄造过程中的所用玻璃纤维的尺寸,可以对纸张的孔隙结构进行设计,从而获得更高的上胶量。但纤维尺寸变化也会带来分散性降低,强度下降等问题。笔者通过变化纤维平均直径调控玻璃纤维纸的孔隙结构,系统研究了玻璃纤维纸孔隙结构对上胶量的影响。同

时将不同孔隙结构玻璃纤维纸上胶制备的半固化片叠层冷压烧结制备了PTFE基复合介质材料,并对复合材料各项性能指标进行了综合评价,旨在为基板性能的优化与选择提供一定的参考。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

无碱玻璃棉:密度约2.6 g/cm<sup>3</sup>,24° SR,38° SR,44° SR,宣汉正原微玻璃纤维有限公司;

短切石英玻璃纤维:密度约2.2 g/cm<sup>3</sup>,平均直径5.5 μm、长度6 mm,湖北菲利华石英玻璃股份有限公司;

PTFE乳液(水分散介质):固含量为60%,中昊晨光化工研究院有限公司。

### 1.2 仪器及设备

高速剪切机:PB-10X2-100A,中国美的集团有限公司;

打浆度测定仪:IMT-DJD02,东莞市英特耐森精密仪器有限公司;

纸页成型器:2542-A,日本KRK公司;

高温烘箱:CLS-252,吴江华东标准烘箱有限公司;

超级压光机:30FS-200E,日本KRK公司;

扫描电子显微镜(SEM):SU5000,日本Hitachi公司;

矢量网络分析仪:N5230C,美国Agilent公司;

体积密度仪:AND-300,东莞市宏拓仪器有限公司;

透气度仪:FX 3300,瑞士Textest公司;

孔径分析仪:CFP-1500-AEX,美国PMI公司;

闪射法导热仪:LFA 467 HT HyperFlash<sup>®</sup>,德国NETZSCH公司;

材料实验机:Instron 5565,美国INSTRON公司。

### 1.3 试样制备

#### 1.3.1 玻璃纤维纸的制备

预先在疏解设备中加入适量水,随后按照玻璃棉与短切石英玻璃纤维质量比为9:1(玻璃棉长度较小,成纸强度很差,浸胶时极易发生破损,加入少量短切纤维能够有效提高玻璃纤维纸的强度并减少揭纸过程纸页发生褶皱的概率),合计称取2.12 g绝干纤维(设计定量30 g/m<sup>2</sup>)置入,其中玻璃棉配方列于表1,随后加入适量稀硫酸调节pH值至2~3(改

善浆料分散性),经高速剪切机 20 000 r/min 处理 3 min 后得到对应纤维浆料。将分散均匀的纤维浆料转移至纸页成型器内脱水成型,待滤干水分并压榨处理后转移到(105±5)°C 的平板干燥器上干燥,得到具备不同孔隙结构的玻璃纤维纸。

表1 玻璃棉配方设计

Tab. 1 Formula design of glass wool

samples	GF-1	GF-2	GF-3	GF-4	GF-5
glass wool	24°SR	24°SR70% 38°SR30%	24°SR30% 38°SR70%	38°SR	44°SR

### 1.3.2 半固化片的制备

玻璃纤维纸强度较低,在施胶转移的过程中极易破损。笔者利用大孔径无纺布作为衬底承托玻璃纤维纸进行施胶,所用 PTFE 乳液的固含量为 60%。因施胶后的整体存在过量胶液,使用滤纸从无纺布近空气侧吸取过量胶液后转移到(105±5)°C 平板干燥器上干燥,得到 5 种类型的 PTFE/玻璃纤维基片。

### 1.3.3 PTFE 复合介质材料的制备

将上述各类基片于 290 °C 热鼓风烘箱中预烧 3 h,充分去除乳液中小分子有机物。待基片质量不再发生变化后,将基片叠层,于 0.3 MPa 线压力下压光得到粗制毛胚件。最后将压制完成的毛胚件置于 380 °C 空气氛围下保温 2 h,缓慢降温得到相应的 PTFE 复合介质材料。

## 1.4 测试与表征

### 1.4.1 纤维及成纸性能测试

按照 GB/T 3332-2004 (肖伯尔-瑞格勒法)测试纤维浆料的打浆度。

按照 GB/T 458-2008 测试纸张的透气度。

按照 ASTM F316-03-2017 的气泡点法采用孔径分析仪测定玻璃纤维纸的孔径分布,空压机提供压力吹开浸入型号为 Galwick 润湿液的玻璃纤维纸,得到对应的孔径参数。

### 1.4.2 PTFE 基复合材料的性能表征

(1)复合材料的微观形貌。将样品用去离子水洗净烘干后置于液氮中浸泡 1~2 min,用镊子取出脆断,喷金后使用 SEM 观察断面形貌。

(2)相对介电常数和介电损耗。按照 GB/T 12636-1990 利用矢量网络分析仪配合带状线测试夹具对样品在 X 波段(8~12 GHz)进行测试。

(3)热导率。按照 GB/T 22588-2008 采用闪光法测量。计算公式列于公式(1):

$$\lambda = \alpha(T) \rho(T) C_p(T) \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为样品热扩散系数; $\rho$ 为样品密度; $C_p$ 为样品的比热容, $T$ 为温度。

(4)热扩散系数。依据激光闪射法进行测试,将需要测试的复合基板材料制成半径为 12.5 mm 圆片状样品;

(5)密度。依据阿基米德排水法采用精密密度仪测定;

(6)比热容。依据混合比热容法计算,比热容计算列于公式(2):

$$C_p = \omega(m) C_p(m) + \omega(f) C_p(f) \quad (2)$$

式中: $\omega(m)$ ,  $\omega(f)$ 为不同组分的质量分数; $C_p(m)$ ,  $C_p(f)$ 为对应的理论比热容。

(7)拉伸性能。按照 ASTM D638-2014 采用材料试验机对样品进行测试。将样品裁成哑铃状,拉伸速率设置为 5 mm/min,每组至少 5 个平行样。

## 2 结果与讨论

### 2.1 玻璃棉的打浆度

玻璃棉直径细、分布范围广,目前仍缺乏准确可靠的测量手段。行业内常使用打浆度间接反应玻璃棉的粗细程度<sup>[6]</sup>。对使用的玻璃棉采用肖式打浆度测定仪进行打浆度测试,测试结果如图 1 所示,几种玻璃棉的打浆度测试结果与厂家给定的结果基本一致,5 种玻璃棉的打浆度依次为 21°SR, 24°SR, 30°SR, 38°SR, 46°SR。

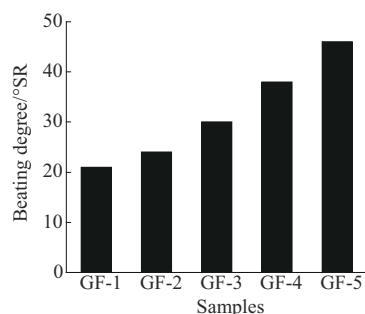


图1 5种玻璃棉的打浆度

Fig. 1 Beating degree of five types of glass wool

### 2.2 不同玻璃纤维纸的上胶量及孔隙结构

将上述 5 种玻璃棉分别与短切石英玻璃纤维按质量比为 9:1 复配抄纸后施胶。施胶前对各组玻璃纤维纸作烘干处理,记录总质量  $w_1$ ,施胶后对各组基片作预烧处理,记录总质量  $w_2$ 。利用公式(3)计算玻璃纤维纸的上胶量( $Q$ ),其变化曲线如图 2 所示,玻璃棉打浆度越低,玻璃纤维纸的上胶量越高,低打浆度时上胶量受打浆度变化更敏感。随玻璃棉

的打浆度由 21°SR 变化至 46°SR,玻璃纤维纸的上胶量逐渐降低,5 种玻璃纤维纸的  $Q$  分别为 89.17%, 88.33%, 86.59%, 85.72%, 84.95%,  $Q$  的计算如式(3)。

$$Q = \frac{w_2 - w_1}{w_2} \quad (3)$$

式中:  $w_1$  为浸胶前原纸的总质量;  $w_2$  为浸胶预烧后基片的总质量。

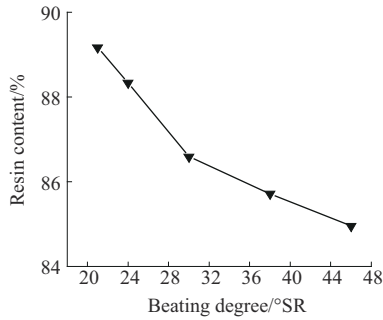


图2 玻璃纤维纸的上胶量随玻璃棉打浆度的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of the gluing amount of glass fiber paper with the beating degree of glass wool

图3为玻璃纤维纸的孔隙结构随玻璃棉打浆度的变化曲线。由图3a可知,玻璃纤维纸的透气度和孔隙率随玻璃棉打浆度升高而降低。其中孔隙率受打浆度变化的影响较小,而透气度受打浆度变化

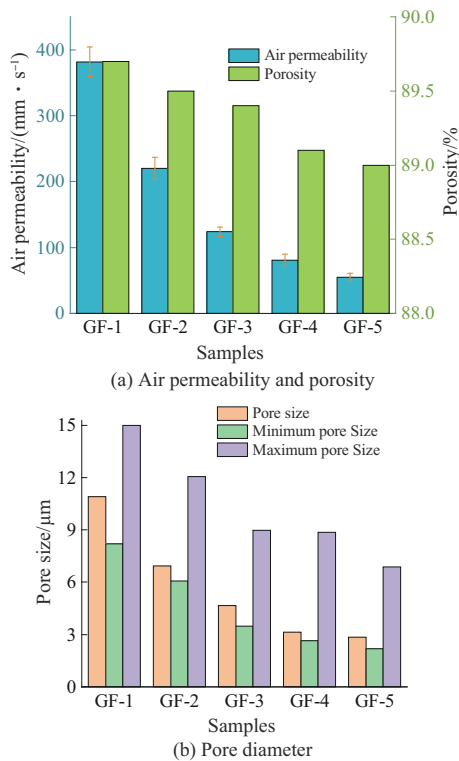


图3 玻璃纤维纸的孔隙结构随玻璃棉打浆度的变化曲线

Fig. 3 Change curve of pore structure of glass fiber paper with the beating degree of glass wool

的影响较大。随玻璃棉打浆度由 21°SR 增加至 47°SR,玻纤纸的孔隙率由 89.7% 降低至 89.0%,平均透气度由 382 mm/s 降低至 55 mm/s。使用 21°SR 玻璃棉与石英纤维复配抄造的原纸孔隙率和上胶量十分接近,此时乳液粒子能够充分填充纸张内部孔隙,树脂含量高达 89.17%,随玻璃棉打浆度进一步提高,玻璃纤维纸的孔隙率与实际上胶量的差值逐渐增大,复合材料内部孔隙增加。结合图3b孔径的测试结果可知,玻璃纤维纸的孔径也随玻璃棉打浆度升高相应降低,从玻璃棉的打浆度为 21°SR 时的 8.21 μm 降低至打浆度为 47°SR 时的 2.20 μm。当纸张最小孔径大于 8 μm 时,玻璃纤维纸能够被乳液粒子充分浸润,获得极高的上胶量。进一步降低玻璃棉的打浆度不但提高上胶量较小,而且会导致复合材料力学性能和匀度等指标发生下降。

### 2.3 PTFE 基复合材料的微观形貌及结构

烧结后的样品截面形貌的 SEM 照片如图4所示。从 SEM 中可以观察到纤维大多数沿面内取向分布,垂直方向存在少量纤维搭接,符合湿法成型工艺的特点。由于笔者使用的玻璃纤维未经改性,与 PTFE 树脂界面黏接较差,因而复合材料内部存在较多的孔隙,复合材料的断面形貌显示了这一结果。由图4可见,5 组 PTFE 基复合材料经脆断后的断面都存在着较多的圆形孔洞,这些孔洞主要是由于纤维树脂界面黏接不足在脆断时部分纤维被整根拔出所导致的结果。

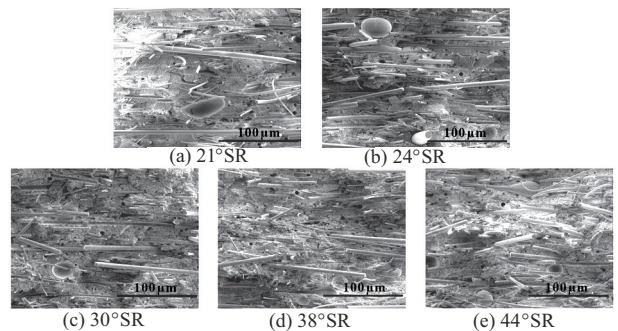


图4 不同玻璃棉打浆度下玻璃纤维增强 PTFE 复合材料的脆断面形貌 SEM 照片

Fig. 4 SEM photo brittle fracture morphology of glass fiber reinforced PTFE composites under different glass wool beating degrees

### 2.4 PTFE 基复合材料的致密度

复合材料的实际密度依据阿基米德排水法的原理采用精密密度仪测定,已知 PTFE 的密度约为 2.2 g/cm<sup>3</sup>,理论密度依据混合法则根据公式(4)计算。结果如图5a所示,复合材料的密度随 PTFE 含量增

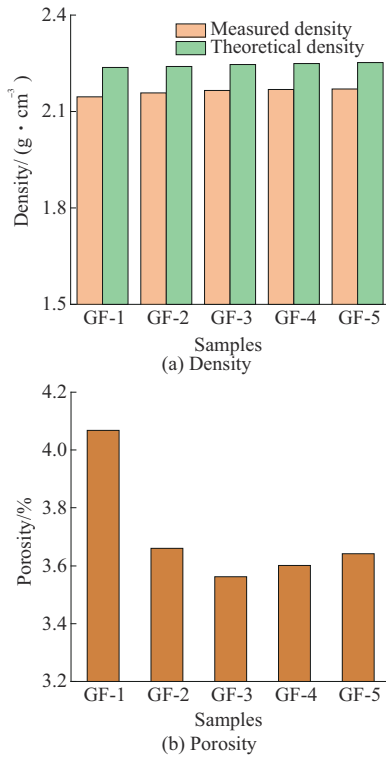


图5 5种玻璃纤维增强PTFE基复合材料的密度及孔隙率

Fig.5 Density and porosity of five glass fiber reinforced PTFE matrix composites

加而降低,从PTFE/GF-1至PTFE/GF-5,PTFE的含量由89.17%降低至84.95%,实际密度由 $2.15 \text{ g/cm}^3$ 增加到 $2.17 \text{ g/cm}^3$ ,这是由于PTFE密度小于玻璃棉的缘故。因采用冷压烧结工艺,烧结过程中未施加外力,所有介质层的密度均明显小于理论密度。各样品孔隙率如图5b所示,所有样品的孔隙率都维持在3.2%~4.2%之间,整体处在一个较好的水平。受纤维比表面积和分散性的影响,孔隙率呈现出先下降后上升的趋势。一方面,低打浆度的玻璃棉粗纤维较多,经剪切力作用后纤维较少断裂,在水中容易与其他纤维发生碰撞缠绕形成团聚,从而对纸张及基片匀度产生影响,最终造成孔隙增加,材料致密度下降;另一方面,所使用的玻璃棉与短切石英玻璃纤维均未经过改性,与PTFE界面相容性较差,玻璃棉打浆度升高意味着纤维直径变细,比表面积增加,纤维树脂间界面数增加,孔隙率也随之升高。

$$\rho_0 = \frac{1}{\frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \frac{w_3}{\rho_3}} \quad (4)$$

式中: $\rho_0, \rho_1, \rho_2, \rho_3$ 分别代表复合材料、组分1,2,3的理论密度; $w_1, w_2, w_3$ 分别代表组分1,2,3的质量分数。

## 2.5 PTFE基复合材料的微波介电性能

对样品在X波段(8.0~12.4 GHz)的相对介电常数和介电损耗进行测试,结果如图6所示,可以观察到所有样品的相对介电常数分布于2.24~2.31之间,介电损耗位于1%~2%之间,整体处于较好的水平。从左到右,复合材料的相对介电常数和介电损耗呈上升趋势,当所用玻璃棉的打浆度为21°SR时,复合材料具有最优的介电性能,相对介电常数为2.246,介电损耗为1.26%。这主要是由于从PTFE/GF-1到PTFE/GF-5,复合材料中PTFE的含量逐渐降低,而玻璃棉的相对介电常数和介电损耗远高于PTFE。根据混合法则,复合材料的介电常数与介质层中各组分的介电常数和体积分数有关,具有较高介电常数的玻璃棉含量增加,复合材料的介电常数也相应增加,图6显示了这一变化。相较于介电常数,介电损耗的影响因素更加复杂,与样品PTFE/GF-3相比,样品PTFE/GF-2的介电损耗更高,结合致密度曲线分析这可能是由于样品GF-2的孔隙率较高导致的。

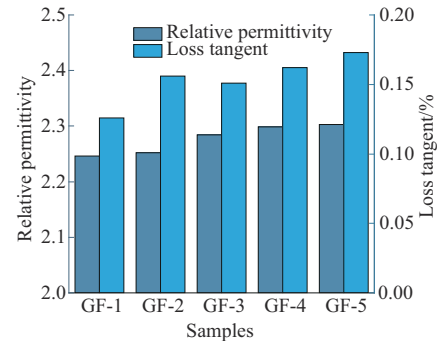


图6 5种玻璃纤维增强PTFE基复合材料的微波介电性能

Fig.6 Microwave dielectric properties of five glass fiber reinforced PTFE-based composites

## 2.6 PTFE基复合材料的热性能

利用激光闪射法对复合材料的热扩散系数进行测定,热导率则通过公式(1)进一步计算。结果如图7所示。结果显示,5种复合材料的热导率都处在较低的水平,复合材料的热扩散系数和热导率变化不明显,整体呈现下降趋势。复合材料的热导率从 $0.185 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 降低到 $0.171 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。经分析导致该结果的原因可能是两方面:一方面是因为玻璃棉自身的热导率极低[ $0.04\sim 0.05 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ],作为一种良好的绝热材料,玻璃棉的热导率远小于PTFE基体的热导率[ $0.2\sim 0.25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ],因此玻璃棉纤维在整个复合材料中作为热阻较高的部分,其含量上升

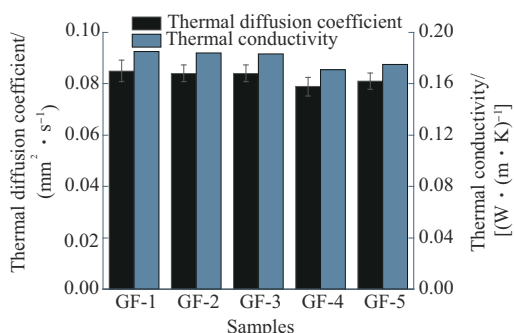


图7 5种玻璃纤维增强PTFE基复合材料的热扩散系数及热导率  
Fig. 7 Thermal diffusion coefficient and thermal conductivity of five glass fiber reinforced PTFE-based composites

会导致复合材料整体热阻增大从而致使复合材料的热导率下降;另一方面是由于冷压烧结的复合材料内部存在一定的孔隙率,空气作为自然界中热导率最低的物质之一,复合材料内部存在的空气会大大降低复合材料的热导率。

### 2.7 PTFE基复合材料的力学性能

对PTFE基复合材料的力学性能进行测定,结果如图8所示。

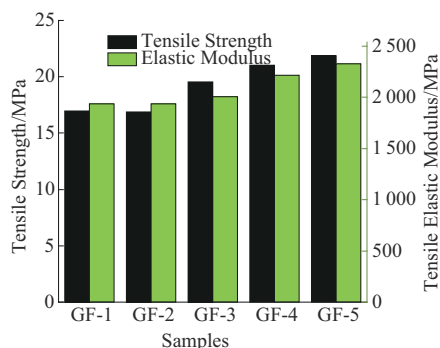


图8 5种玻璃纤维增强PTFE基复合材料的拉伸强度及拉伸弹性模量

Fig. 8 Tensile strength and tensile elastic modulus of five glass fiber reinforced PTFE-based composites

随玻璃棉打浆度增加,复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量都呈现上升趋势,玻璃棉的打浆度从21°SR增加至46°SR时,复合材料的拉伸强度从16.95 MPa增加至21.88 MPa,拉伸弹性模量从1938 MPa增加至2325 MPa。这主要是由纤维直径变化和树脂含量变化导致的。高打浆度的玻璃棉直径较细,较低打浆度较粗的纤维具有更高的强度和模量,此外,高打浆度玻璃棉抄造的玻璃纤维纸因紧度更高,在浸渍PTFE乳液时的上胶量也有所降低,具有更高强度的纤维在一定范围内增加用量,复合材料的强度也会相应增加。PTFE/GF-1复合材料以及PTFE/GF-2复合材料的拉伸强度和拉

伸弹性模量基本不变,结合实验现象分析这是由于纤维长度、直径、含量都处在比较低的一个水平,此时纤维对基体的增强效果并不显著,在纤维发生断裂或纤维树脂发生脱黏的一瞬间,基体能够承受所有的载荷,此后基体发生明显的塑性形变。实际测试过程中PTFE/GF-1和PTFE/GF-2复合材料也都表现出了明显的塑性,断裂伸长率大于200%,而PTFE/GF-3,PTFE/GF-4,PTFE/GF-5复合材料的断裂伸长率仅为5%左右,表现出较强的脆性。

### 3 结论

通过变化玻璃棉打浆度制备了一系列高树脂含量的PTFE基复合材料。测试结果表明,通过改变纤维直径(打浆度)能够显著改变纸张的孔隙结构从而对纸张的上胶能力产生影响。增加纤维直径会通过提高纸张的孔隙率、透气度和孔径从而提高上胶能力。纸张的孔隙率决定了上胶量极限,而透气度的大小和孔径分布决定了实际上胶量与上胶量极限之间的差值。当所用玻璃棉的打浆度为21°SR时,复合材料具有最优的介电特性(相对介电常数为2.246,介电损耗为1.26%)。进一步改用更高打浆度的玻璃棉,玻璃纤维纸上胶量降低,复合材料的介电常数和介电损耗则随之增加,复合材料的热导率也从0.185 W/(m·K)降低到0.171 W/(m·K)。但随着纤维平均直径的减小,复合材料的力学性能有所提高,拉伸强度、拉伸弹性模量分别从玻璃棉的打浆度为21°SR时的16.95,1938 MPa增加至打浆度为46°SR时的21.88,2325 MPa。

### 参考文献

- [1] 廖凌元,彭忠泉,章明秋,等.高频印制电路板用低介电高分子材料的研究进展[J].功能高分子学报,2021,34(4):320-335.  
LIAO Lingyuan, PENG Zhongquan, ZHANG Mingqiu, et al. Research progress of low dielectric polymers for high-frequency printed circuit boards[J]. Journal of Functional Polymers, 2021, 34(4):320-335.
- [2] 张勇.基于5G通信的PTFE基高频覆铜板研究[D].南京:南京大学,2021.  
ZHANG Yong. Study on PTFE based high frequency copper clad laminate applied in 5G communication[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021.
- [3] 黄方凯. PTFE/SiO<sub>2</sub>/玻璃纤维复合基板的制备与性能研究[D].成都:电子科技大学,2020.  
HUANG Fangkai. Studies on preparation and properties of PTFE/SiO<sub>2</sub>/glass fiber composite substrates[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

- [4] 魏新启,王玉,王峰,等. 5G通讯对PCB及高速覆铜板技术要求[C]/第二十二届中国覆铜板技术研讨会论文集. 咸阳:中国电子电路行业协会覆铜板分会,2021:331-344.  
WEI Xinqi, WANG Yu, WANG Feng, et al. Technical requirements for PCB and high-speed copper clad laminates for 5G communications[C]/Twenty-two proceedings of the China CCL technology symposium. Xianyang: Copper Clad Laminate Branch of China Electronic Circuit Industry Association, 2021:331-344.
- [5] 林金堵. 5G通信对PCB基材的要求[J]. 印制电路信息, 2021, 29(1):7-12.  
LIN Jindu. Requirements of base material of PCB for 5G communication[J]. Printed Circuit Information, 2021, 29(1):7-12.
- [6] 姚晓刚,彭海益,林慧兴. 微波复合基板研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(4):957-965.  
YAO Xiaogang, PENG Haiyi, LIN Huixing. Research progress on microwave composite substrates[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(4):957-965.
- [7] 金霞,贾倩倩,张立欣,等. 低温度系数PTFE/SiO<sub>2</sub>复合材料的制备及介电性能优化[J]. 塑料科技, 2021, 49(4):15-19.  
JIN Xia, JIA Qianqian, ZHANG Lixin, et al. Preparation and dielectric performance optimization of low temperature coefficient PTFE/SiO<sub>2</sub> composites[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(4):15-19.
- [8] YUAN Y, CUI Y R, WU K T, et al. TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> filled PTFE composites for microwave substrate applications[J]. Journal of Polymer Research, 2014, 21(2). DOI:10.1007/s10965-014-0366-y.
- [9] JOSEPH T, UMA S, PHILIP J, et al. Electrical and thermal properties of PTFE-Sr<sub>2</sub>ZnSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub> composites[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2010, 22(8):1 000-1 009.
- [10] JAMES N K, JACOB K S, MURALI K P, et al. Ba(Mg<sub>1/3</sub>Ta<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub> filled PTFE composites for microwave substrate applications[J]. Materials Chemistry & Physics, 2010, 122(2):507-511.
- [11] LI Q, LIU P, MAHMOOD K, et al. Improved properties of PTFE composites filled with glass fiber modified by sol-gel method[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2021, 32(18):23 090-23 102.
- [12] LI Z, LIU J, YUAN Y, et al. Effects of surface fluoride-functionalizing of glass fiber on the properties of PTFE/glass fiber microwave composites[J]. RSC Advances, 2017, 7(37): 22 810-22 817.
- [13] 梁梦微,翁孝宇,彭龙,等. 短玻璃纤维增强PTFE基板的制备[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(12):32-37.  
LIANG Mengwei, WENG Xiaoyu, PENG Long, et al. Preparation of short glass fiber reinforced polytetrafluoroethylene substrate composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(12):32-37.
- [14] 谭炳良. PTFE/玻璃纤维复合介质基板的制备工艺与性能研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018.  
TAN Bingliang. Studies on preparation technology and properties PTFE/glass fiber composites substrate[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [15] 刘锐,张记明,殷卫峰,等. 具有优异介电性能的无纺布增强高频覆铜板[C]/第二十三届中国覆铜板技术研讨会论文集. 咸阳:中国电子材料行业协会覆铜板材料分会, 2023:322-326.  
LIU Rui, ZHANG Jiming, YIN Weifeng, et al. Non-woven fabric reinforced high-frequency copper clad laminate with excellent dielectric properties[C]/Twenty-third Proceedings of the China CCL Technology Symposium. Xianyang: Copper Clad Laminate Association, 2023:322-326.
- [16] 蔡晓玺. 亚微米级玻璃棉对高效空气过滤材料过滤性能影响的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2023.  
CAI Xiaoqian. Research on the influence of sub-micron glass wool on the filtering performance of high-efficiency air filter materials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.