复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 38 卷 第 1 期 1 月 2021 年
Vol. 38 No. 1 Jan 2021

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20200825.004

导电玻璃纤维及其功能复合材料研究进展

高晓东，杨卫民，程礼盛，丁玉梅，谭晶*

（北京化工大学 机电工程学院，北京 100029）

摘 要：玻璃纤维增强聚合物基复合材料因其成本低、力学性能好等优点被广泛应用，而导电玻璃纤维增强复合材料将进一步拓展玻璃纤维复合材料的应用领域，也是其未来发展的重要方向。本文综述了国内外导电玻璃纤维的种类、构建结构及特征性能等，同时介绍了不同导电玻璃纤维对玻璃纤维功能复合材料的性能影响；最后，结合目前导电玻璃纤维及其复合材料的应用和限制，阐述了聚合物基导电玻璃纤维功能复合材料的发展趋势。

关键词：玻璃纤维；功能复合材料；聚合物基体；导电性能；电磁屏蔽

中图分类号：TB332 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-3851(2021)01-0036-09

Recent research progress in conductive glass fiber and polymer-based functional composites

GAO Xiaodong , YANG Weimin , CHENG Lisheng , DING Yumei , TAN Jing*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Glass fiber reinforced composites are widely used due to their low cost and good mechanical properties. Conductive glass fiber reinforced composites will further expand the application field of them, and be important direction of future development. This paper reviews the types, structures and properties of conductive glass fibers at home and abroad, and analyzes the effects of different conductive glass fibers on the properties of functional glass fiber composites. Finally, the development trend of polymer-based conductive glass fiber functional composites is discussed based on the current applications and limitations of conductive glass fiber and its composites.

Keywords: glass fiber; functional composites; polymer matrix; electrical conductivity; electromagnetic shielding

随着现代科学技术的发展，纤维增强复合材料的应用范围不断扩大，对纤维性能的要求也越来越高。目前，纤维主要分为两大类：有机纤维和无机纤维。有机纤维主要包括芳纶纤维、聚对苯撑苯并二噁唑 (PBO) 纤维、超高分子量聚乙烯纤维等；无机纤维主要包括碳纤维、陶瓷纤维、玄武岩纤维及玻璃纤维等。其中，玻璃纤维具有不燃性、耐高温、耐腐蚀、化学稳定性好、成本低等优势，在航空航天、汽车工业、电器行业等领域有着重要应用[1]。

关于玻璃纤维的研究目前主要集中在力学性能的增强方面[2-7]，但随着能源电子、空间技术等尖端科学领域的快速发展，材料的电磁性能愈发重要[8-10]。但电磁屏蔽、静电防护等电磁性能是玻璃纤维材料所不具备的[11]，成为了限制玻璃纤维发展的“卡脖子”技术。因此，实现玻璃纤维的导电性能是其面向高端应用的重要途径，也是必经之路。

目前，导电玻璃纤维的实现主要采用金属镀层的方法，即在玻璃纤维表面镀上一层金属实现玻璃纤维的导电特性。近年来，碳纳米材料的研究相当活跃，在航空航天、纳米传感器、半导体芯片等领域应用前景巨大，二十一世纪也被称为“超碳时代”。纳米碳材料具有优异的导电性能，

收稿日期：2020-06-28；**录用日期**：2020-08-13；**网络首发时间**：2020-08-26 09:42:48
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200825.004
基金项目：中央高校基本科研业务费项目 (XK1802-3)
通信作者：谭晶，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为聚合物基复合材料加工原理及方法 E-mail: tanj@mail.buct.edu.cn

引用格式：高晓东，杨卫民，程礼盛，等. 导电玻璃纤维及其功能复合材料研究进展 [J]. 复合材料学报，2021，38(1)：36-44.
GAO Xiaodong, YANG Weimin, CHENG Lisheng, et al. Recent research progress in conductive glass fiber and polymer-based functional composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(1): 36-44(in Chinese).

将纳米碳材料与玻璃纤维有机结合，制备碳纳米涂层玻璃纤维，也将赋予玻璃纤维导电性能。同时，利用导电玻璃纤维制备复合材料也将突破传统玻璃纤维复合材料的性能限制，可具备力学性能、电热性能、电磁屏蔽等综合功能特性，为功能化复合材料的制备拓展了道路。

1 金属镀层导电玻璃纤维及功能复合材料

玻璃纤维金属镀层主要包括 Ni、Cu、Ag 等金属及一些合金。玻璃纤维表面常用的金属镀膜方法有化学镀、真空溅射、电镀、化学气相沉积 (CVD) 法、高温分解热喷涂法等。其中，化学镀因镀层较为均匀、基体适应范围广、设备简单等优点，在金属镀层领域应用最为广泛。其基本原理为依据氧化还原反应，利用还原剂将镀液中金属离子还原成金属沉积在基体材料表面而形成镀层。

1.1 镀 Cu 导电玻璃纤维及功能复合材料

目前，对于玻璃纤维表面镀 Cu 的研究已取得一定进展。张海涛等[12] 利用化学镀 Cu 的方法制备了导电玻璃纤维，玻璃纤维经过除油、敏化、活化，再放入化学镀 Cu 液中施镀；同时，利用正交实验优化了玻璃纤维化学镀 Cu 的工艺条件，对导电玻璃纤维的电阻率、镀层成分等进行分析，经过优化后的化学镀 Cu 玻璃纤维电阻率可达 3.38×10^{-6} Ω·cm，可用于制备电磁屏蔽材料，但镀 Cu 层的抗氧化性较差。Xu 等[13] 将玻璃纤维蚀刻、敏化和活化，采用乙二胺四乙酸二钠 (EDTA-2Na) 络合剂和 $N_2H_4{\cdot}H_2O$ 还原剂，通过化学镀层的方法制备了镀 Cu 玻璃纤维，如图 1 所示。玻璃纤维表面 Cu 镀层较为完美，其最小电阻率为 0.001 Ω·cm，该方法的优势在于制备简单、成本低、产量大。

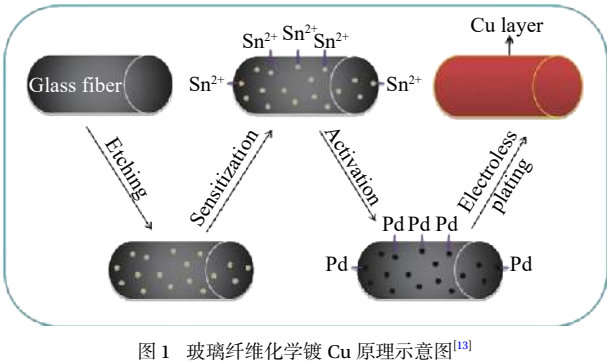


图 1 玻璃纤维化学镀 Cu 原理示意图[13]

Fig. 1 Schematic illustration of electroless plating of Cu on glass fibers[13]

左建东等[14-15] 采用化学镀的方法制备了镀 Cu 导电玻璃纤维。通过对玻璃纤维预处理工艺和化学镀液配方的优化，镀 Cu 玻璃纤维电阻率可达 10^{-5} Ω·cm。同时，利用手工铺塑方法，制备了镀 Cu 玻璃纤维增强树脂复合材料，如图 2 所示。镀 Cu 玻璃纤维增强树脂复合材料具有良好的分散性和界面黏结性，并具有压阻特性。与碳纤维增强树脂 (CFRP) 复合材料的压阻特性相比，镀 Cu 玻璃纤维增强树脂复合材料对断裂有更好的压阻敏感性。

镀 Cu 玻璃纤维可极大地提高玻璃纤维的导电性，相比其他镀层金属，成本也较低。但 Cu 镀层在玻璃纤维表面存在不同程度的微小孔洞，会直接影响镀层的致密程度及导电性能。同时，Cu 镀层的抗氧化性能较差，也会影响镀 Cu 导电玻璃纤维的长期使用。

1.2 镀 Ni 导电玻璃纤维及功能复合材料

镀 Ni 导电玻璃纤维也主要采用化学镀的方法。李丽波等[16] 将玻璃纤维除油、粗化、活化，再经过化学镀 Ni 制备了导电玻璃纤维。镀 Ni 玻璃纤维表面均匀、平整、无针孔、有金属光泽，具有较好的导电性和耐腐蚀性能。段宏基等[17] 以 $NiCl_2$ 为原料，采用化学镀方法制备了镀 Ni 导电玻璃纤维，随后采用热压成型与聚丙烯 (PP) 复合制备了具有导电性能的功能复合材料。其中，镀 Ni 导电玻璃纤维的电导率为 6.2×10^3 S/m，复合材料的电导率为 8.7 S/m。同时，其进一步研究了镀 Ni 玻璃纤维复合材料的电磁屏蔽特性，制备了 PP/三元乙丙橡胶/镀 Ni 玻璃纤维柔性屏蔽复合材料[18]。仅添加 1vol% Ni (16.36vol% 镀 Ni 玻璃纤维)，复合材料的电磁干扰屏蔽效能为 22.2 dB。

Xu 等[19] 利用化学镀制备导电率为 8.1×10^3 S/m 的镀 Ni 玻璃纤维，再通过磁辅助压缩成型法制备各向异性导电镀 Ni 玻璃纤维/PP 复合材料，如图 3 所示。镀 Ni 玻璃纤维/PP 复合材料在电磁干扰屏蔽性能上表现出明显的各向异性，平行于磁场方向的电导率 (1.46 S/m) 比垂直方向的电导率 (8.06×10^{-2} S/m) 高出 18 倍，电磁干扰屏蔽效果相差 8 dB (平行方向为 15 dB，垂直方向为 23 dB)。

Duan 等[20] 采用熔融共混法制备了一种以 Ni 包覆玻璃纤维和 TiO_2 填充的 PP 为基体的高效电磁屏蔽复合材料，如图 4 所示。玻璃纤维表面的导电 Ni 层在玻璃纤维和 PP 之间的界面分布，形成一个高效的导电网络，复合材料的导电性能及电磁屏蔽性能随 Ni 含量的增加而增强，当 Ni 含量为 1.12vol% 时，复合材料的电导率为 790 S/m；

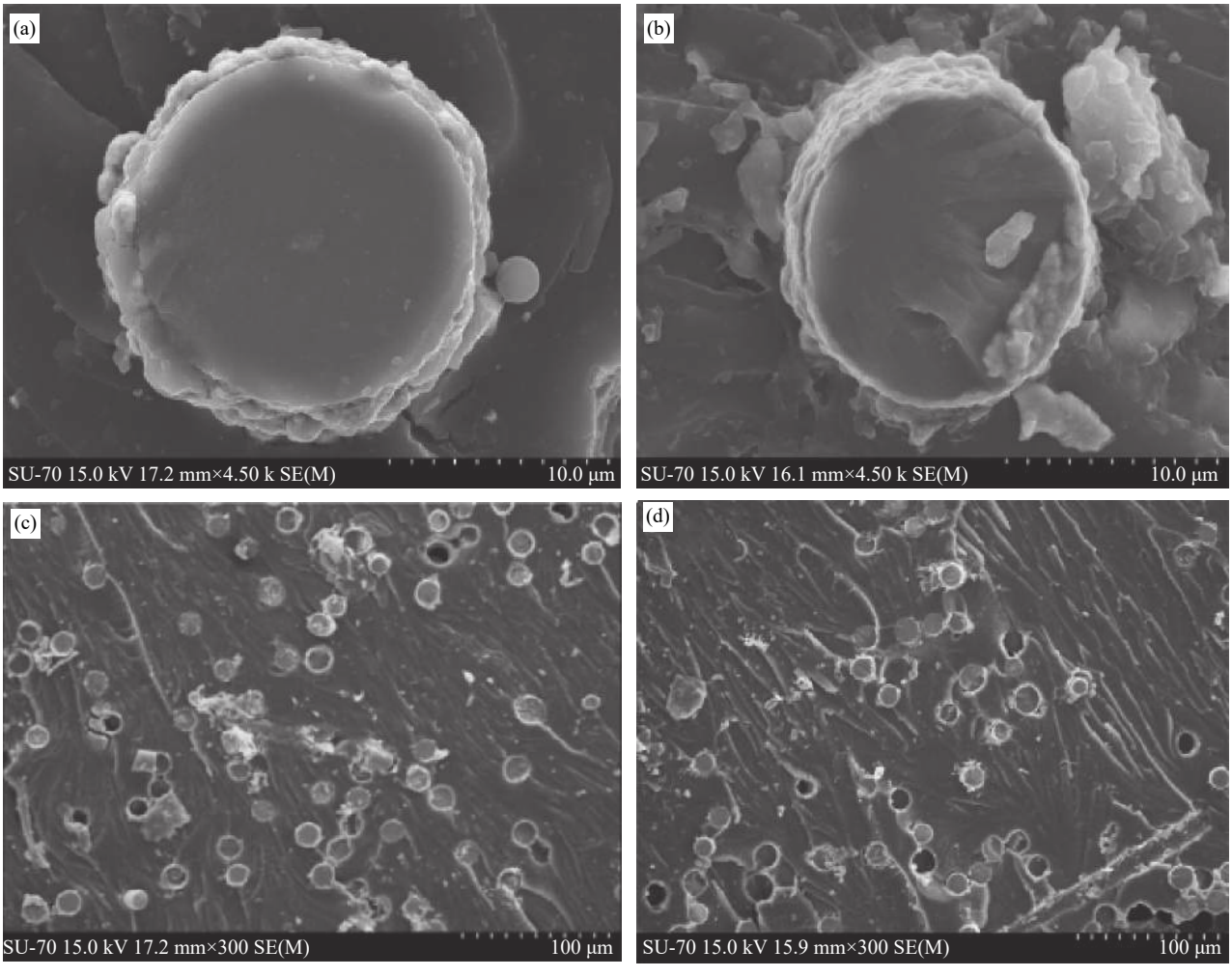


图 2　镀 Cu 玻璃纤维增强树脂复合材料的 SEM 图像[14]

Fig. 2　SEM images on the fracture surface of Cu coated glass fiber reinforced polymer composite (((a), (b)) Fracture surface of Cu coated glass fibers; ((c), (d)) Fracture surface of composite)[14]

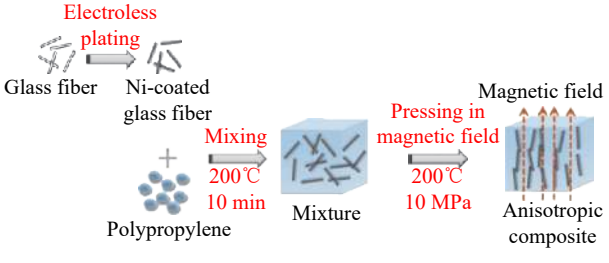
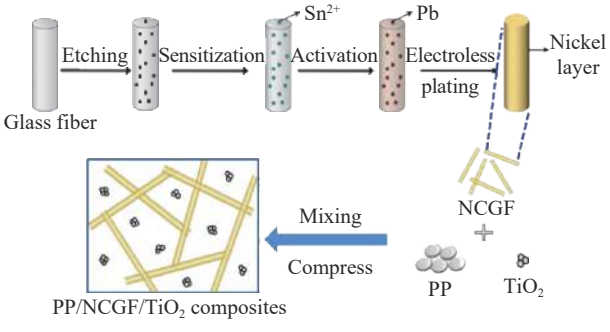


图 3　镀 Ni 玻璃纤维/聚丙烯复合材料的制备原理示意图[19]

Fig. 3　Schematic illustration of preparation of Ni coated glass fiber/polypropylene composites[19]



NCGF—Ni coated glass fiber; PP—Polypropylene

图 4　聚丙烯/镀 Ni 玻璃纤维/TiO_2 复合材料的制备原理示意图[20]

Fig. 4　Schematic of fabrication of polypropylene/Ni coated glass fiber/TiO_2 composite[20]

同时，添加 1.12vol% Ni 和 0.8vol% TiO_2 的复合材料具有优异的屏蔽效果 (44.5 dB)。

镀 Ni 玻璃纤维的耐腐蚀性和抗氧化性较好，其增强复合材料的导电性及电磁屏蔽性能也较为稳定。因此，以 Ni 元素为主合金镀层在玻璃纤维中也应用较多，但镀 Ni 的导电性能相比其他金属稍差，价格成本也比 Cu 高。

1.3　镀 Ag 导电玻璃纤维及功能复合材料

镀 Ag 玻璃纤维作为功能复合材料的填料也具有广泛的应用前景。曹鼎等[21] 以葡萄糖、甲醛和

酒石酸钾钠为还原剂，通过超声处理-化学镀法制备镀 Ag 玻璃纤维，如图 5 所示。其中，采用葡萄糖作为还原剂制备的镀 Ag 玻璃纤维电阻率为 1.23×10^{-4} Ω·cm，以该纤维制备的导电胶，其添加量 (质量分数) 为 70wt% 时，导电胶电阻率最低，可达 2.62×10^{-3} Ω·cm。司倩倩等[22] 以 $AgNO_3$ 为活化剂，葡萄糖为还原剂，制备了镀 Ag 玻纤，同时对工艺进行了优化，所得镀 Ag 玻璃纤维的电阻率最小为 3.42×10^{-5} Ω·cm。李金龙等[23] 运用硅烷偶联剂 KH580 对玻璃纤维表面进行改性，采用化学镀制得镀 Ag 玻璃纤维导电材料，当化学镀温度为 50℃、化学镀时间为 70 min 时，其电导率为 9.26×10^{5} S/m。

李祝等[24] 采用硅烷偶联剂 KH550 对玻璃纤维进行改性，采用葡萄糖-银氨溶液实施化学镀 Ag，同时将该镀 Ag 玻璃纤维作为导电填料添加到环氧树脂中，当镀 Ag 玻璃纤维和环氧树脂的质量比为 2.2∶1 时，复合材料体积电阻率最低，为 0.033 Ω·cm，导电效果最好。

镀 Ag 玻璃纤维的抗氧化性、耐蚀性、热稳定性较好，同时，镀 Ag 较镀 Cu、Ni 等金属具有更高的导电性。但镀 Ag 玻璃纤维的镀层表面粗糙，会造成电阻率较大，这是制约其应用的重要因素。另外，镀 Ag 的成本高于镀 Cu 和镀 Ni。

1.4 其他金属镀层导电玻璃纤维及功能复合材料

雷刚等[25] 采用化学镀工艺制备了 Ni-P 合金镀层玻璃纤维，涂层与玻璃纤维之间有较好的结合力，电导率为 1.25×10^{-3} Ω·cm。李鹏等[26] 在玻璃纤维表面沉积 Ni-Cu-P 合金，镀层表面连续光滑，导电玻璃纤维的电阻率为 4.00×10^{-4} Ω·cm。吴道伟等[27] 在玻璃纤维表面镀覆了一层均匀、致密的 Ni-Fe-Pr-P 合金层，电阻率最低可降至 2.05×10^{-6} Ω·cm。同时，秦秀兰等[28] 和黄英等[29] 也进行了 Ni-Co-Fe-La-P 镀层和 Ni-Fe-W-P 合金镀层等的研究，取得了一定研究成果。刘扬等[30] 采用镀 Ni-Cu-La-B 玻璃纤维、片状 Ni 粉和丙烯酸树脂制备了一种电磁波屏蔽复合涂料，当该复合涂料膜的厚度为 300 μm 时，添加 6wt% 镀 Ni-Cu-La-B 玻璃纤维后，其电阻率为 0.68 Ω·cm，屏蔽效能为 47.78~64.28 dB。

Hussain[31] 分别制备了 W-Al_2O_3 镀层玻璃纤维及 TiB_2 镀层玻璃纤维，并分析了纳米导电涂层玻璃芯组成粒子的介电性能、涂层的覆盖质量和涂层厚度对纤维介电性能具有重要影响。Lee 等[32] 采用连续化玻璃纤维化学镀层方法制备了 FeCoNi 镀层玻璃纤维，如图 6 所示，制备的镀层玻璃纤维复合材料的电磁屏蔽效能约为 37 dB。杨晓娟等[33] 分析了不同玻璃纤维化学镀的性能及影响化学镀的因素，表明金属化学镀层表面的起泡、起皮、化学稳定性等缺陷仍待解决。

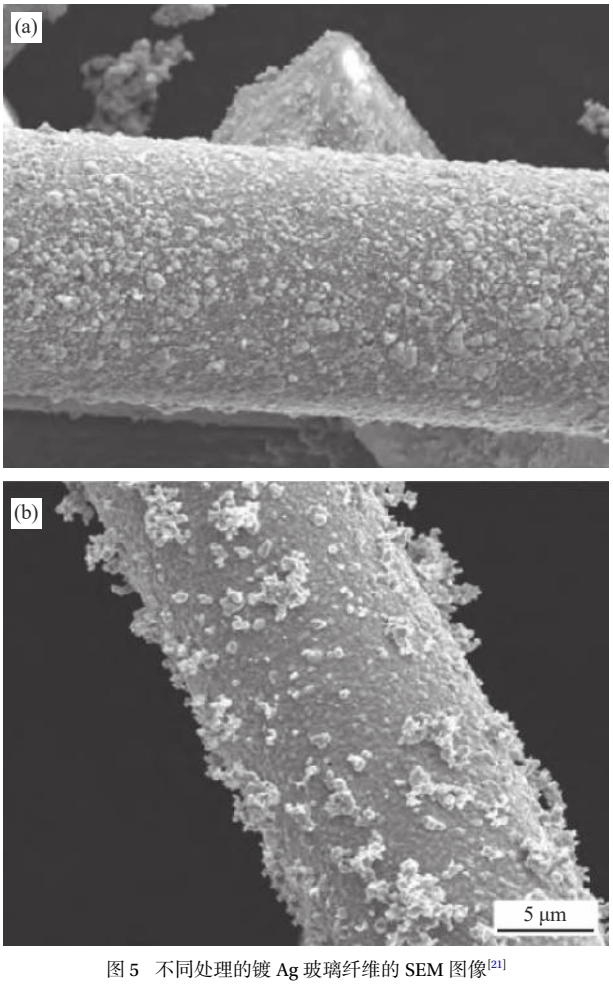


图 5 不同处理的镀 Ag 玻璃纤维的 SEM 图像[21]

Fig. 5 SEM images of Ag-coated glass fiber with different treatment methods ((a) Ultrasonic treatment; (b) Stirring treatment)[21]

2 碳材料涂层导电玻璃纤维及功能复合材料

目前，先进碳材料的研究和利用已成为衡量国防建设、科学技术发展的重要标志。纳米碳材料具有优异的导电性能，主要可分为石墨烯、碳纳米管、富勒烯、氧化石墨烯 (GO) 等。

2.1 石墨烯涂层导电玻璃纤维及功能复合材料

近年来，碳材料涂层玻璃纤维的研究日益增多。Fang 等[34] 利用溶胶-凝胶法和浸渍涂层技术制备导电性石墨烯涂层玻璃纤维，如图 7 所示。首先，将 GO 部分还原为石墨烯水溶胶，然后用

还原氧化石墨烯 (rGO) 对玻璃纤维进行浸涂。最后，经过反复溶胶-凝胶和浸渍-涂层处理，玻璃纤维完全被 rGO 涂层覆盖，纤维的导电率为 24.9 S/cm。Mohan 等[35] 采用不同浸渍涂层工艺制备了石墨烯涂层及 GO 涂层玻璃纤维，玻璃纤维纱 (含环氧树脂粘合剂和 rGO/石墨烯微片) 的电导率为 0.1 S/cm。Moriche 等[36] 利用石墨烯微片，采用浸涂方法制备导电玻璃纤维，最终纤维的电导率为 10^{-2} S/cm，主要应用于制作应变传感器。

刘国强等[37-38] 采用牛血清白蛋白 (BSA) 改性玻璃纤维，利用静电吸附原理，将 GO 包覆到 BSA 改性的玻璃纤维表面，制备 GO 包覆玻璃纤维复合材料，如图 8 所示；然后采用氢碘酸还原 GO，最后得到石墨烯包覆的玻璃纤维导电材料，其电导率达到 4.5 S/m。

陆豪[39] 采用改进的 Hummers 法制备 GO 分散液，再用还原剂对玻璃纤维表面的 GO 进行还原，得到石墨烯包覆玻璃纤维。同时制备了石墨烯包覆玻璃纤维树脂复合材料，屏蔽效能达到 20.4 dB。方明赫[40] 采用石墨烯的溶胶-凝胶自组装技术和浸渍提拉工艺，在玻璃纤维表面制备出连续的石墨烯导电涂层，玻璃纤维的导电性得到较大提高，体积电导率可达 24.9 S/cm。

石墨烯本身具有极高的导电率，制备石墨烯涂层玻璃纤维时，如何保证石墨烯片的相互连接是提高玻璃纤维导电性的关键；另外，石墨烯涂层的形态也会影响导电性，如涂层的致密程度、石墨烯褶皱及缺陷等。采用石墨烯涂层玻璃纤维制备导电复合材料时，由于石墨烯涂层与玻璃纤维没有键合作用，如何防止石墨烯涂层的脱落也是未来研究的重点。同时，目前高质量的石墨烯成本很高，限制了玻璃纤维涂层的大规模应用。

2.2 碳纳米管涂层导电玻璃纤维及功能复合材料

在玻璃纤维表面构筑碳纳米管主要有三种方法，分别为静电复合法、化学气相沉积、电泳沉积法[41]。Jin 等[42] 利用电化学吸附法将多壁碳纳米管吸附在玻璃纤维表面，制备了具有高导电性的增强树脂复合材料，复合材料的导电率可达 10^{-5} S/cm。He 等[43] 采用化学气相沉积 (CVD) 法在玻璃纤维上原位接枝均匀排列的碳纳米管壳层，

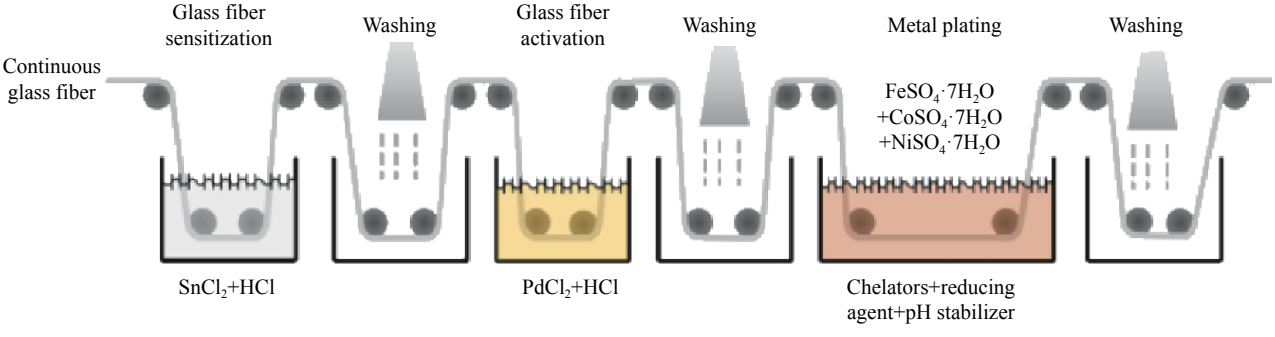
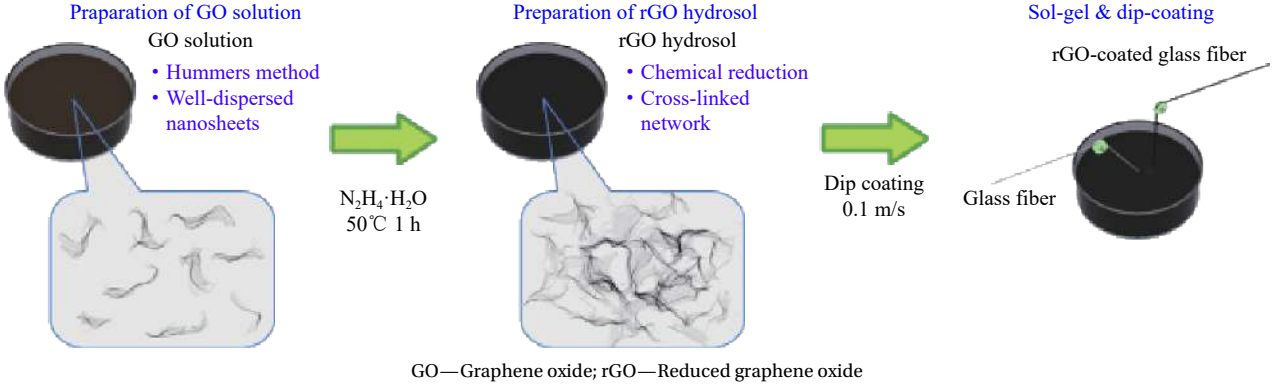


图 6 纤维催化化学镀和金属沉积的连续过程示意图[32]

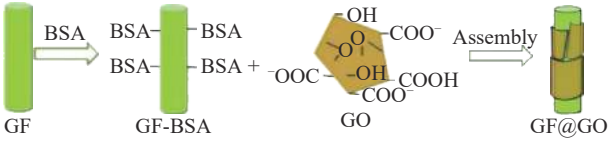
Fig. 6 Schematic of continuous process of fiber catalysis and metal deposition by electroless plating[32]



GO—Graphene oxide; rGO—Reduced graphene oxide

图 7 溶胶-凝胶法和浸渍-涂覆法制备石墨烯涂覆玻璃纤维的示意图[34]

Fig. 7 Preparation schematic of graphene-coated glass fiber by sol-gel and dip-coating technique[34]



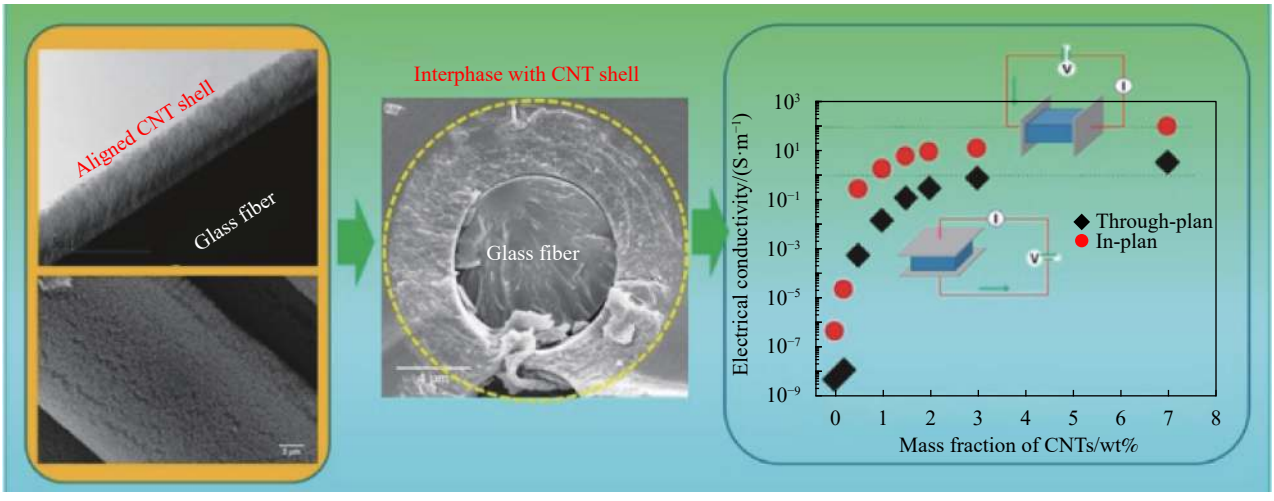
BSA—Bovine serum albumin; GF—Glass fiber

图 8 氧化石墨烯包覆玻璃纤维制备过程示意图[37]

Fig. 8 Schematic diagram of preparation process of glass fibers coated by graphene oxide[37]

通过控制 CVD 条件，可以调节碳纳米管壳层厚度和质量分数，如图 9 所示。同时，制备的树脂基复合材料面内电导率可达 100 S/m。

Park 等[44] 采用 CVD 法在玻璃纤维表面生长出多壁碳纳米管来实现纤维的导电性，并以此制备玻璃纤维增强环氧树脂复合材料用于防屏蔽作用。Lazaros 等[45] 利用浸涂的方法，如图 10 所示，通过化学接枝多壁碳纳米管到玻璃纤维表面，对多壁碳纳米管和玻璃纤维进行修饰，形成了酰胺化学键，碳纳米管在玻璃纤维表面的覆盖率更高，导电率可达 20 S/m。



CNT—Carbon nanotube

图 9 导电率可调的结构复合材料[43]

Fig. 9 Structural composites with adjustable electrical conductivity[43]

苏丹华[46] 利用正负电荷之间的静电吸引作用，在玻璃纤维表面构筑了多壁碳纳米管得到复合增强结构，并进一步将其与高分子聚合物混合制备复合材料。多壁碳纳米管涂层玻璃纤维增强聚合物复合材料体积电阻率较纯玻璃纤维增强聚合物复合材料低了 4 个数量级，达 4.9×10^{9} Ω·cm。

由于碳纳米管为一维材料，很难制备连续、致密、沿纤维轴向方向的碳纳米管涂层，也直接影响了碳纳米管涂层玻璃纤维的导电性能，因此，碳纳米管涂层玻璃纤维制备的涂层很厚，从而保证纤维的导电性能。另外，碳纳米管制备效率低、成本高，也限制了碳纳米管涂层玻璃纤维的应用。

2.3 其他碳涂层导电玻璃纤维及功能复合材料

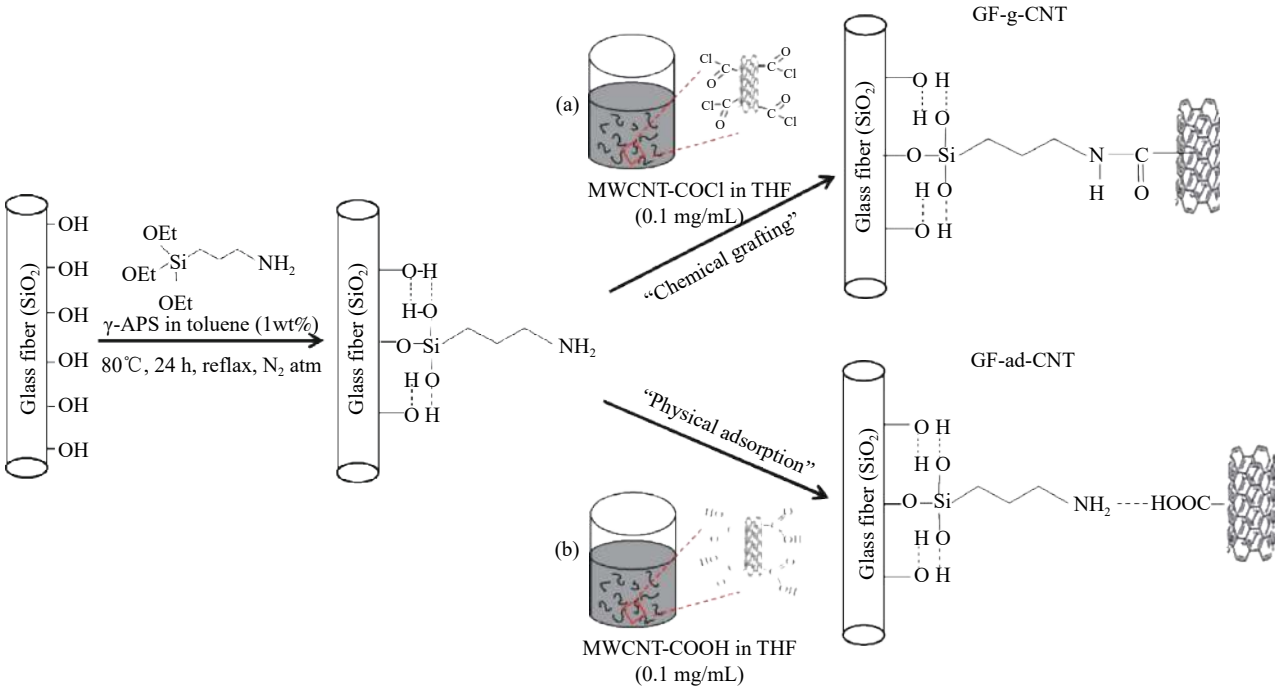
Alcaniz 等[47] 利用沥青，采用 CVD 法制备了一种具有电磁屏蔽性能的导电碳纳米涂层玻璃纤维，其导电率范围为 1~4 S/cm，可作为聚合物基体上的填充物制备防屏蔽功能复合材料。

Jayatissa 等[48] 利用真空中热蒸发在玻璃纤维及光学纤维表面制备的富勒烯 (C_{60}) 涂层，并研究了涂层的致密包覆程度和表面粗糙度。Dowling 等[49] 使用 $CH_4/H_2/He$、C_2H_2/He 和 $C_2H_2/H_2/He$ 气体混合物制备了类金刚石石英纤维涂层，主要作为光纤密封涂层应用，折射率在 1.7~2.0 (λ=675 nm) 范围内。

Gao 等[50] 采用聚乙烯等固体聚合物为碳源，在玻璃纤维材料上制备碳纳米涂层，涂层为类石墨烯结构，涂层导电率可达 10^{5} S/m。制备采用的材料无易燃易爆气体，可实现导电玻璃纤维低成本连续化绿色制备[51]，有望为导电玻璃纤维功能复合材料开辟新的途径。

3 总结与展望

以金属镀层为基体的化学镀层是目前导电玻璃纤维制备的主要途径。但金属镀层有质量重、不耐蚀、抗氧化差、与玻璃纤维界面结合性较弱等先天缺陷；同时，化学镀层需对玻璃纤维基体进



MWCNT—Multiwall carbon nanotube; THF—Tetrahydrofuran; γ-APS—γ-Aminopropyltriethoxysilane

图 10　电导率可调的碳纳米管涂层玻璃纤维结构复合材料[45]

Fig. 10　Carbon nanotubes coating glass fiber structural composites with adjustable electrical conductivity[45]

行粗化、活化处理，不仅工艺复杂，且活化需要的重金属价格昂贵，同时产生的重金属离子还对环境造成污染。纳米碳材料具有优异的导电性能，也能赋予玻璃纤维导电性能，相比于金属镀层，其具有质量轻、耐腐蚀、涂层更加致密、环境污染小等优势。但目前碳纳米涂层的制备成本高，效率低，难以完成低成本、高质量、连续化制备。

因此，对于导电玻璃纤维及复合材料未来发展的研究重点为：(1) 采用碳材料代替金属材料，以低成本碳源制备碳涂层玻璃纤维；(2) 玻璃纤维与涂层之间界面的键合作用研究，保证玻璃纤维在使用时镀层不发生脱落；(3) 长玻璃纤维连续化涂层制备技术研究，从而满足导电纤维的大批量制备应用；(4) 构建导电玻璃纤维功能复合材料，研究导电玻璃纤维与聚合物基体的界面结合性，探明导电玻璃纤维在复合材料中分布和分散性及对复合材料导电性的影响。

导电玻璃纤维功能复合材料可实现防静电、吸波电磁屏蔽等新功能，随着不断研究进步发展，将在电子器件、家用电器、军事探测、航空航天及通讯等领域有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 马明明, 张彦. 玻璃纤维及其复合材料的应用进展[J]. 化工新型材料, 2016, 44(2): 38-40.
MA M M, ZHANG Y. Progress in the application of glass fiber and its composites material[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(2): 38-40(in Chinese).

[2] COUSINS D S, SUZUKI Y, MURRAY R E, et al. Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 1252-1263.

[3] LI H, RICHARDS C, WATSON J. High-performance glass fiber development for composite applications[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2014, 5(1): 65-81.

[4] RYU J B, LYU M Y. A study on the mechanical property and 3D fiber distribution in injection molded glass fiber reinforced PA66[J]. International Polymer Processing, 2014, 29(3): 389-401.

[5] SINGH J, KUMAR M, KUMAR S, et al. Properties of glass-fiber hybrid composites: A review[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2017, 56(5): 455-469.

[6] PAZMINLO J, CARVELLI V, LOMOV S V. Formability of a non-crimp 3D orthogonal weave E-glass composite reinforcement[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 61: 76-83.

[7] 曹玉忠, 李建华. 连续玻璃纤维增强聚甲醛复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料工业, 2014, 42(3): 54-57.
CAO Y Z, LI J H. Research on preparation and properties of continuous glass fiber reinforced POM composites[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(3): 54-57(in Chinese).

[8] CAO M S, SONG W L, HOU Z L, et al. The effects of temperature and frequency on the dielectric properties, electro-

magnetic interference shielding and microwave-absorption of short carbon fiber/silica composites[J]. Carbon, 2010, 48(3): 788-796.

[9] KANG Y Q, CAO M S, YUAN J, et al. Preparation and microwave absorption properties of basalt fiber/nickel core-shell heterostructures[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 495(1): 254-259.

[10] 王希晰, 曹茂盛. 特色研究报告: 低维电磁功能材料研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 18-28, 40.
WANG X X, CAO M S. Low-dimensional electromagnetic functional materials[J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 18-28, 40(in Chinese).

[11] 毛海亮. 玻璃纤维织物及其树脂复合材料的电性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
MAO H L. Electrical performance of glass fabric and its composite[D]. Shanghai: Donghua University, 2015(in Chinese).

[12] 张海涛, 陈莉云, 王亚龙, 等. 玻璃纤维化学镀铜工艺条件的优化研究[J]. 材料保护, 2002, 35(10): 50-52.
ZHANG H T, CHEN L Y, WANG Y L, et al. Condition optimizing of electroless copper plating for glass fiber[J]. Materials Protection, 2002, 35(10): 50-52(in Chinese).

[13] XU C J, LIU G L, CHEN H Y, et al. Fabrication of conductive copper-coated glass fibers through electroless plating process[J]. Journal of Materials Science, 2014, 25(6): 2611-2617.

[14] ZUO J D, CHEN S J, LUO C Y, et al. Preparation of electroless copper coated glass fiber and piezoresistive properties of copper coated glass fiber reinforced plastics[J]. Applied Surface Science, 2015, 349(15): 319-326.

[15] 左建东, 罗超云, 杨清曼, 等. 玻璃纤维化学镀铜工艺新探[J]. 塑料, 2012, 41(6): 54-56.
ZUO J D, LUO C Y, YANG Q M, et al. New exploration of electroless copper plating technology for glass fibers[J]. Plastics, 2012, 41(6): 54-56(in Chinese).

[16] 李丽波, 刘波, 吴宝华. 玻璃纤维表面化学镀镍的工艺研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(2): 360-364.
LI L B, LIU B, WU B H. Research on technology of electroless Ni plating on glass fiber surface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(2): 360-364(in Chinese).

[17] 段宏基, 郭超, 杨雅琦, 等. 聚丙烯/镀镍玻璃纤维导电复合材料的制备及性能研究[C]//中国化学会会议论文集. 成都: 中国化学会, 2014: 730-732.
DUAN H J, GUO C, YANG Y Q, et al. Preparation and characterization of polypropylene/nickel coated glass fiber conducive composition[C]//Proceedings of the Meeting of the Chinese Chemical Society. Chengdu: Chinese Chemical Society, 2014: 730-732(in Chinese).

[18] DUAN H J, ZHAO M J, YANG Y Q, et al. Flexible and conductive PP/EPDM/Ni coated glass fiber composite for efficient electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Science, 2018, 29(12): 10329-10336.

[19] XU Y D, YANG Y Q, YAN D X, et al. Anisotropically conductive polypropylene/nickel coated glass fiber composite via magnetic field inducement[J]. Journal of Materials Science, 2017, 28(12): 9126-9131.

[20] DUAN H J, YANG J M, YANG Y Q, et al. TiO_2 hybrid polypropylene/nickel coated glass fiber conductive composites for highly efficient electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2016, 28(8): 1-8.

[21] 曹鼎, 李芝华. 超声处理化学镀法制备镀银玻璃纤维[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2009, 14(6): 422-426.
CAO D, LI Z H. Preparation of silver-coated glass fiber by electroless plating with ultrasonic treatment[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2009, 14(6): 422-426(in Chinese).

[22] 司倩倩, 陈厚和, 张幺玄, 等. 玻璃纤维化学镀银工艺的优化[J]. 电镀与涂饰, 2012, 31(12): 25-27.
SI Q Q, CHEN H H, ZHANG Y X, et al. Optimization of electroless silver plating on glass fiber[J]. Electroplating & Finishing, 2012, 31(12): 25-27(in Chinese).

[23] 李金龙, 陈健, 汪庆卫, 等. 化学镀银工艺对玻璃纤维性能影响研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(3): 193-195.
LI J L, CHEN J, WANG Q W, et al. Influence of electroless plating process on the property of glass fiber[J]. New Chemical Materials, 2017, 45(3): 193-195(in Chinese).

[24] 李祝, 李红, 张志伟. 镀银玻璃纤维的制备及其在环氧树脂中的应用[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(15): 788-792.
LI Z, LI H, ZHANG Z W. Preparation of silver-coated glass fiber and its application in epoxy resin[J]. Electroplating & Finishing, 2016, 35(15): 788-792(in Chinese).

[25] 雷刚, 杨文彬, 魏明, 等. 玻璃纤维表面化学镀Ni-P合金涂层的研究[J]. 功能材料, 2008, 39(7): 1128-1130.
LEI G, YANG W B, WEI M, et al. Study on electroless Ni-P plating of glass fiber[J]. Journal of Functional Materials, 2008, 39(7): 1128-1130(in Chinese).

[26] 李鹏, 黄英, 熊佳, 等. 玻璃纤维化学镀Ni-Cu-P合金的研究[J]. 材料科学与工艺, 2006, 14(6): 630-632, 636.
LI P, HUANG Y, XIONG J, et al. Study of electroless Ni-Cu-P alloy plating on the glass fiber[J]. Materials Science and Technology, 2006, 14(6): 630-632, 636(in Chinese).

[27] 吴道伟, 黄英, 苏武, 等. 玻璃纤维化学镀Ni-Fe-Pr-P合金及性能研究[J]. 航空材料学报, 2010, 30(2): 64-67.
WU D W, HUANG Y, SU W, et al. Study on properties of Ni-Fe-Pr-P alloy fabricated by electroless method on surface of glass fiber[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(2): 64-67(in Chinese).

[28] 秦秀兰, 黄英, 杜朝锋, 等. 玻璃纤维化学镀Ni-Co-Fe-La-P合金工艺的研究[J]. 稀有金属, 2007, 31(5): 631-636.
QIN X L, HUANG Y, DU Z F, et al. Process study on electroless plating of Ni-Co-Fe-La-P alloy on surface of glass fiber[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2007, 31(5): 631-636(in Chinese).

[29] 黄英, 赵利, 时刻, 等. 玻璃纤维化学镀Ni-Fe-W-P合金的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(11): 1725-1729.

HUANG Y, ZHAO L, SHI K, et al. The study of electroless Ni-Fe-W-P alloy plating on surface of glass fiber[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(11): 1725-1729(in Chinese).

[30] 刘扬, 管登高, 胡德豪, 等. 镀Ni-Cu-La-B玻璃纤维对电磁屏蔽复合涂料性能的影响[J]. 安全与电磁兼容, 2019(1): 23-25, 56.
LIU Y, GUAN D G, HU D H, et al. Influence of Ni-Cu-La-B-coated glass fiber on the properties of electromagnetic shielding composite[J]. Safety & EMC, 2019(1): 23-25, 56 (in Chinese).

[31] HUSSAIN S. Dielectric relaxation of glass particles with conductive nano-coatings[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42 (6): 064002.

[32] LEE J, JUNG B M, LEE S B, et al. FeCoNi coated glass fibers in composite sheets for electromagnetic absorption and shielding behaviors[J]. Applied Surface Science, 2017, 415(1): 99-103.

[33] 杨晓娟, 王绍斌. 玻璃纤维化学镀的进展[J]. 纺织科技进展, 2008(4): 7-8, 14.
YANG X J, WANG S B. Development of electroless Ni-P plating on glass fibers[J]. Progress in Textile Science & Technology, 2008(4): 7-8, 14(in Chinese).

[34] FANG M H, XIONG X H, HAO Y B, et al. Preparation of highly conductive graphene-coated glass fibers by sol-gel and dip-coating method[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(9): 1989-1995.

[35] MOHAN V B, JAYARAMAN K, BHATTACHARYYA D. Fabrication of highly conductive graphene particle-coated fiber yarns using polymeric binders through efficient coating techniques[J]. Advances in Polymer Technology, 2018, 37(8): 3438-3447.

[36] MORICHE R, JIMENEZ S A, SANCHRZ M, et al. Graphene nanoplatelets coated glass fibre fabrics as strain sensors[J]. Composites Science & Technology, 2017, 146(7): 59-64.

[37] 刘国强, 石福志, 李耀刚, 等. 石墨烯包覆玻璃纤维复合材料的制备及其电学性能研究[J]. 无机材料学报, 2015, 30(7): 763-768.
LIU G Q, SHI F Z, LI Y G, et al. Preparation and electrical properties of graphene coated glass fiber composites[J]. Journal of Inorganic Materials, 2015, 30(7): 763-768(in Chinese).

[38] 刘国强. 导电玻璃纤维的制备与性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
LIU G Q. The preparation and electrical properties of conductive glass fiber[D]. Shanghai: Donghua University, 2015(in Chinese).

[39] 陆豪. 石墨烯包覆玻璃纤维复合材料的制备[D]. 济南: 济南大学, 2017.
LU H. Preparation of graphene oxide coated glass fiber reinforced composites[D]. Jinan: University of Jinan, 2017(in Chinese).

[40] 方明赫. 石墨烯导电复合结构的制备及性能调控[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
FANG M H. Preparation and property regulation of graphene conductive composite structure[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019(in Chinese).

[41] 郭宏伟, 莫祖学, 沈一丁, 等. 玻璃纤维表面纳米改性的研究进展[J]. 陶瓷学报, 2015, 36(6): 569-577.
GUO H W, MO Z X, SHEN Y D, et al. The research progress on the treatment of glass fiber surface by nanomaterial[J]. Journal of Ceramics, 2015, 36(6): 569-577(in Chinese).

[42] JIN J, ZHANG L, CHEN W, et al. Synthesis of glass fiber-multiwall carbon nanotube hybrid structures for high-performance conductive composites[J]. Polymer Composites, 2013, 34(8): 1313-1320.

[43] HE D L, FAN B H, ZHAO H, et al. Design of electrically conductive structural composites by modulating aligned CVD-grown carbon nanotube length on glass fibers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(3): 2948-2958.

[44] PARK K, LEE S, KIM C, et al. Application of MWNT-added glass fabric/epoxy composites to electromagnetic wave shielding enclosures[J]. Composite Structures, 2007, 81(3): 401-406.

[45] LAZAROS T, MARTIN K, FRANK S, et al. The interphase microstructure and electrical properties of glass fibers covalently and non-covalently bonded with multiwall carbon nanotubes[J]. Carbon, 2014, 73(7): 310-324.

[46] 苏丹华. 静电吸附玻璃纤维/碳纳米管复合增强体改性聚合物复合材料[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
SU D H. Electrostatic assembled glass fiber/multiwall carbon nanotubes hybrids reinforced polymer composites[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012(in Chinese).

[47] ALCANIZ M J, LOZANO C D, HAHN K, et al. Characterisation of conductive CVD carbon-glass fibres[J]. Carbon, 2004, 42(11): 2349-2351.

[48] JAYATISSA A H, DUTTA A K. C_{60} thin films for optical fiber coating applications[C]//Proceeding SPIE 5593, Nanosensing: Materials and Devices. Pennsylvania: SPIE, 2004.

[49] DOWLING D P, DONNELLY K, O"BRIEN T P, et al. Application of diamond-like carbon films as hermetic coatings on optical fibres[J]. Diamond & Related Materials, 1996, 5(3-5): 492-495.

[50] GAO X D, WANG Y J, ZHANG Z H, et al. Conductive nanocarbon coating on silica by pyrolysis of polyethylene[J]. Materials Letters, 2019, 255: 126567.

[51] 杨卫民, 高晓东, 张政和, 等. 一种导电碳纳米涂层玻璃纤维制备方法及装置: 中国专利, CN110526591A[P]. 2019-12-03.
YANG W M, GAO X D, ZHANG Z H, et al. The invention relates to a method and a device for preparing conductive carbon nanometer coated glass fiber: Chinese patent, CN110526591A[P]. 2019-12-03(in Chinese).