

铜纤维含量对碳纤维/铜纤维混编增强酚醛树脂基复合材料制备及摩擦性能的影响

吕凯明 卢雪峰* 龙 祥 樊 凯 钱 坤 俞科静

(江南大学生态纺织教育部重点实验室, 无锡 214122)

摘 要 以碳纤维和铜纤维为原料制备了三维四层深交联机织物, 将酚醛树脂和其他填料组成树脂体系, 并与深交联机织物复合成型, 制成碳纤维/铜纤维混编增强酚醛树脂基复合材料。通过测定预制件孔径和复合材料的密度、孔隙率, 研究了不同铜纤维含量对树脂基复合材料制备的影响, 并对样品进行了测试。研究表明: 在一定范围内, 随着铜纤维含量的增加, 预制体与基体复合较好, 摩擦表面较为平整。随着铜纤维含量增加, 复合材料的摩擦系数及磨损量随之增加。磨损形式主要以磨粒磨损为主。在纬纱中铜纤维单丝根数为 5 根条件下, 制得的复合材料的孔隙率为 2.4%, 平均孔径为 80.8676 μm , 摩擦系数为 0.2355。

关键词 混编, 深交联, 铜纤维, 摩擦磨损

Influence of copper fiber content on friction and wear properties of carbon/copper hybrid fiber reinforced phenolic resin composite

Lv Kaiming Lu Xuefeng Long Xiang Fan Kai Qian Kun Yu Kejing

(Key Laboratory of Eco-Textile of Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122)

Abstract The 3D deep crossing linking composites were successfully prepared by dip-coating and hot press-molding technique with the carbon fiber and copper fiber, the resin system were composed of phenolic resin and filler material. Three deep crossing linking composites with different copper fiber content of fabrics were made to research the friction and wear properties of composites. The influence of different copper fiber content on the synthesis of resin matrix composite was studied by measuring the pore diameter of preform and the density and porosity of composite. The effect of different copper fiber content on friction and wear properties were measured through UMT-3 type multifunctional micro friction tester. Worn surface morphology was observed by S-4800 type scanning electron microscope and wear mechanism was discussed. The results showed that with the increase of copper content, the preform was better than the matrix, and the friction surface was relatively smooth. The wear form was mainly adhesive wear and fatigue wear. The friction coefficient and wear amount of composite increased because of the increase of copper fiber content, the main form of wear was abrasive wear.

Key words hybrid, deep crossing linking, copper fiber, friction and wear

碳纤维具有耐高温、耐疲劳、抗蠕变和柔软可编织等特性, 作为制动摩擦材料增强体可赋予其优异的性能。但碳纤维在较大压力或者高转速、高载荷等苛刻条件下容易脆性断裂导致复合材料制动效果明显衰退^[1]。铜纤维是半金属摩擦材料常用的增强纤维, 在摩擦过程中容易发生转移, 在对偶面上形成富铜层, 可以降低制动产生的噪音并提供稳定的摩

擦系数^[2]。此外, 铜纤维还具有十分优良的散热性能, 在高转速、高载荷等苛刻条件下, 能将摩擦产生的热量快速传递到外界, 起到减少高温热衰退的作用。由于碳纤维可编织性较差, 质硬, 在摩擦过程中易损伤对偶盘^[3]。王雪明等^[4]将短切铜纤维与芳纶浆粕纤维进行混杂, 制得酚醛树脂基复合材料, 研究发现芳纶浆粕中加入铜纤维可显著提高复合材料的

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(JUSRP41702, JUSRP51505); 江苏省研究生培养创新工程(KYLX15-1182); 江苏省产学研联合创新资金-前瞻性联合研究项目(BY2015019-33)】

作者简介: 吕凯明(1992-), 男, 硕士, 主要从事纺织复合材料的制备及性能研究。

联系人: 卢雪峰(1984-), 女, 副教授, 研究方向为纺织复合材料。

冲击强度,当质量配合比为 1:1 时,冲击强度最大。由于短切混杂的方法无法使纤维充分混合均匀,导致复合材料的力学性能不稳定,整体性较差,无法满足复合材料在大压力、高转速等苛刻工况下摩擦系数稳定的要求。

三维机织混编作为一种特殊的纤维混杂方式,由两种或两种以上的长纤维通过三维机织技术进行加工形成织物,在纤维束与束之间形成整体结构,使材料显示出较强的整体性,具有更好的承载能力和高耐冲击性能,不易破裂与剥离等特点,克服了短切纤维和二维基布增强预制体结构强度低的缺点,具有十分广阔的应用前景^[5-7]。Wan 等^[8]研究了不同预制体纤维含量对复合材料弯曲性能的影响。张建民等^[9]制备了深交联和浅交弯联两种典型三维机制碳纤维预制体增强酚醛树脂基摩擦材料,研究了摩擦材料的基础力学性能和摩擦磨损性能。本研究采用低成本的三维机织技术,将碳纤维和铜纤维进行混编织成三维织物作为酚醛树脂基摩擦材料的增强体,通过改变铜纤维含量,制得 3 种不同铜含量的摩擦材料,测试其摩擦磨损性能,对比分析了不同铜纤维含量对材料摩擦磨损性能的影响,探讨其摩擦磨损机理。以期对碳纤维/铜纤维混编增强酚醛树脂基摩擦材料的实际应用提供理论依据。

1 实验部分

1.1 样品的制备

采用碳纤维(UTS50-12K800tex,东邦公司)和铜纤维长丝(单丝直径为 0.15mm,山东莱芜龙志金属纱线有限公司)为原料,设计 8 根经纱与 32 根纬纱构成的四层深交联机织物^[10]。预制件的经纱采用碳纤维单种并捻合股,纬纱为碳纤维和铜纤维 2 种纤维并捻合股的混合纱。在保证预制体经密和纬密不变的情况下(经密 40 根/10cm,纬密 144 根/10cm),通过改变纬纱中铜纤维单丝根数(分别为 5、10、15 根)制备出 3 种不同铜纤维含量的预制体。深交联预制体设计工艺参数见表 1。

表 1 深交联预制体设计工艺参数

样品编号	经纱	纬纱
W1	碳纤维(12K)	碳纤维(12K)与 0.15mm×5 根铜纤维合股
W2	碳纤维(12K)	碳纤维(12K)与 0.15mm×10 根铜纤维合股
W3	碳纤维(12K)	碳纤维(12K)与 0.15mm×15 根铜纤维合股

碳纤维/铜纤维混编增强酚醛树脂基复合材料制备:采用改性酚醛树脂、增摩剂、减摩剂及其他摩

擦性能调节剂(如填料、耐高温性能调节剂等)^[11-12]为原料,搅拌均匀后缓慢添加 40%(体积百分数,下同)的无水乙醇,制备出均匀分散的基体胶液,然后进行真空复合热压成型,即制得碳纤维/铜纤维混编增强酚醛树脂基复合材料(以下简称复合材料)。

1.2 样品测试

1.2.1 预制件的孔径测试

采用孔径测试仪(CFP-1100A 型,美国 PMI 公司)对预制件进行孔径测试,润湿液采用乙醇,气体为氮气^[13],将预制件剪成 60mm×60mm×1.2mm,然后放在乙醇中润湿,使预制件中的纤维完全润湿,最后将预制件放入实验槽中,盖好密封盖进行测试。预制件的孔径(D)计算见式(1)。

$$D = 4\gamma\cos\theta/P \quad (1)$$

式中, D 为孔径, μm ; γ 为乙醇的表面张力, mN/cm ; θ 为接触角, $^\circ$; P 为压差, MPa 。

1.2.2 样品的密度和孔隙率测试

采用 Archimedes 定律-排水法测试样品的密度和开孔孔隙率。采用电子精密天平(ME204E 型,上海菁海仪器有限公司)对样品进行测试。

1.2.3 摩擦性能测试

采用多功能微摩擦磨损测试仪(UMT-3 型,济南益华摩擦测试技术有限公司)对样品进行摩擦磨损性能测试。考察 3 种不同铜含量复合材料的摩擦磨损性能,试样尺寸为 25mm×25mm×5mm,销对偶往复速度为 10mm/s,载荷为 0.98MPa,测试时间 60min。采用扫描电子显微镜(SEM,S-4800 型,日本 HITACHI 公司)观察样品摩擦后的表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 预制件孔径分析

不同铜含量深交联预制体的孔径分布测试结果见表 2。从表 2 可知,随着铜纤维含量的增加,预制体的平均孔径、最大孔径和最小孔径均随之减小,在纬纱中铜纤维单丝根数为 5 根条件下,制得的预制体的平均孔径为 80.8676 μm 。

表 2 不同铜含量深交联预制体的孔径分布测试结果

样品编号	预制体类别	最小孔径/ μm	最大孔径/ μm	平均孔径/ μm	分布最多 孔径/ μm
W1	维 1	38.0703	197.2008	80.8676	38.0703
W2	维 2	15.9872	124.3376	40.6228	15.9872
W3	维 3	6.8170	119.6594	27.0291	10.7376

预制体孔径分布图见图 1。从图可以看出,随

着纬纱铜含量增加,孔径在 $10\sim 20\mu\text{m}$ 分布所占的比例逐渐增加。由此可知纬纱铜含量的增加使预制件的平均孔径减小并集中分布在小孔径区域。

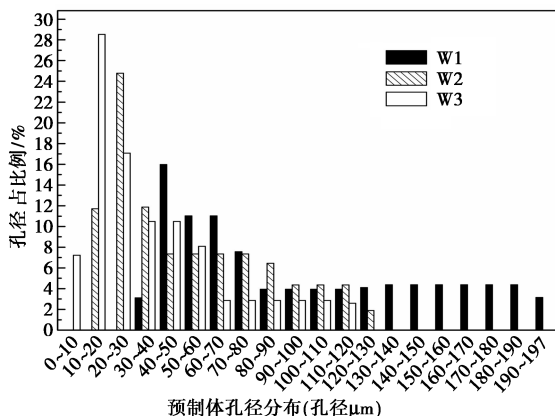


图 1 预制体孔径分布图

2.2 复合材料的密度和孔隙率分析

铜纤维含量对复合材料的密度和孔隙率的影响见表 3。从表 3 可知,随着铜纤维含量的增加,复合材料的密度随之增加,孔隙率虽然也增加,但是变化不大,可以忽略;在纬纱中铜纤维单丝根数为 5 根条件下,制得的复合材料的密度为 $1.716\text{g}/\text{cm}^3$,孔隙率为 2.4%。

表 3 铜纤维含量对复合材料的密度和孔隙率的影响

材料编号	W1	W2	W3
密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.716	2.060	2.124
孔隙率/%	2.4	2.5	2.7

2.3 摩擦磨损分析

铜纤维含量的复合材料的摩擦磨损数据见表 4。从表 4 可知,随着铜纤维含量的增加,复合材料的摩擦系数随之增加,磨损量略有上升,但是基本维持在一个很小的范围,磨痕宽度及磨痕深度均略有增加,在纬纱中铜纤维单丝根数为 5 根条件下,制得的复合材料的摩擦系数为 0.2355。研究结果表明,铜纤维含量的增加会提高复合材料的摩擦系数。

表 4 铜纤维含量的复合材料的摩擦磨损数据

样品编号	摩擦系数	磨损质量/g	磨痕宽度/mm
W1	0.2355	0.0013	2.23
W2	0.2696	0.0016	2.26
W3	0.2712	0.0020	2.31

铜纤维含量对复合材料的摩擦系数的影响见图 2。从图可以看出,三条曲线的走势均是从一个较小值的起点开始,然后缓慢上升,最后保持平稳趋

势,但存在小范围波动,铜纤维含量越高,复合材料的摩擦系数越高。这是由于深交联预制体的三维网络结构赋予材料优异的结构整体性和机械强度,可以在很大程度上减少纤维的剥离和拔出,而铜纤维的单丝直径高出碳纤维单丝直径 20 余倍,在复合过程中并不能与树脂复合十分良好,易产生铜纤维单丝的断裂,导致摩擦系数在小范围内波动。

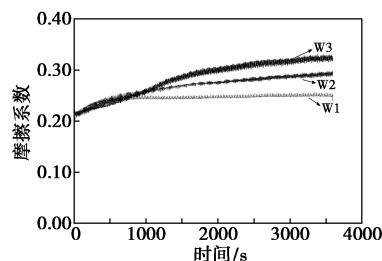


图 2 铜纤维含量对复合材料摩擦系数的影响

2.4 SEM 分析

在纬纱中铜纤维单丝根数为 5 根条件下,制得的复合材料摩擦后表面的形貌见图 3。从图可以看出,复合材料的表面出现了碳纤维断裂、拔出以及树脂脱粘等磨损形式,当铜纤维含量较少时,复合材料磨损后表面光滑平整,没有犁沟、脱落等严重磨损行为,同时材料表面细小磨屑被润滑油及时带走,脱离摩擦表面,因此磨损表面较为光滑。



图 3 复合材料摩擦后表面的 SEM 图

3 结论

(1)随着铜纤维含量的增大,复合材料的密度随之增加。孔隙率虽然也在增加,但是变化不大。这是由于预制体与基体复合较好,一定范围内铜纤维含量增加对孔隙率影响不大。

(2)随着预制体铜纤维含量的增加,复合材料的摩擦系数均先增大后平稳,磨损量则略有上升。且 3 种不同铜纤维含量的摩擦材料均具有较平稳的摩擦过程和较小的磨损率。

(3)当铜纤维含量较少时,磨损表面较为光滑,磨损形式主要为粘着磨损;随着铜纤维含量增加,

(下转第 125 页)