

三维编织碳/环氧复合材料的摩擦磨损性能研究

Friction and Wear Behaviors of 3-D Carbon Fiber/Epoxy Composites

董向红, 王玉果, 王玉林, 万怡灶 (天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072)

DONG Xiang-hong, WANG Yu-guo, WANG Yu-lin, WAN Yi-za
(School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

摘要: 采用 RTM 工艺制备了不同纤维体积比的三维编织碳/环氧 (C_{3D}/EP) 复合材料。采用 MM-200 摩擦磨损试验机对其摩擦磨损特性进行了研究, 并对 C_{3D}/EP 复合材料的磨损机理进行了分析。结果表明, 纤维体积比、载荷和滑动速度对复合材料的摩擦系数和磨痕宽度均有明显的影响; C_{3D}/EP 复合材料的磨损机理主要为疲劳磨损和粘着磨损, 当载荷或速度较小时, 以疲劳磨损为主, 反之则以粘着磨损为主。

关键词: 三维编织; 碳纤维; 复合材料; 摩擦磨损

中图分类号: TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2001) 11-0028-03

Abstract: The friction and wear behaviors of three-dimensionally braided carbon fibers (C_{3D}/EP) composites prepared by RTM process were studied using a ring-on-block tester and the wear mechanism was discussed. The results show that fiber volume fraction, contact pressure and sliding velocity have obvious effects on the friction coefficient and the width of wear scar of the C_{3D}/EP composites. From the scanning electron micrographs of the wear scars, it is believed that wear is primarily due to a combination of adhesion and fatigue. The wear mechanism of the C_{3D}/EP composites differs depending on contact pressure and sliding velocity.

Key words: three-dimensionally braided; carbon fiber; composite; friction and wear

碳纤维的特点是强度和模量高, 并且摩擦系数小, 具有润滑性, 作为增强材料可显著改善复合材料的力学性能及摩擦磨损特性。碳纤维增强聚合物复合材料具有高比强度、高比模量和良好的耐烧蚀性、耐疲劳性及耐磨性, 已广泛应用于航空航天、交通运输、石油化工、建筑及医疗卫生领域。三维编织纤维增强聚合物基复合材料是近期发展起来的一种新型高性能复合材料, 它起初主要应用于军用航空、航天领域, 如今已扩展到机械、化工、交通、纺织等许多工业部门, 例如自行车三角架、轮船外壳、压力容器、工字梁等^[1]。尽管对三维编织复合材料的许多力学性能如压缩、拉伸、扭转和疲劳等进行了较深入的研究^[2-4], 然而对其摩擦磨损性能的研究却少有报道。

本文用 RTM 工艺制备了三维编织碳纤维增强环氧树脂 (C_{3D}/EP) 复合材料, 研究了纤维体积比、载荷及滑动速度对复合材料摩擦磨损特性的影响, 并探讨了其磨损机理。

1 试验材料及方法

1.1 原料

基体材料为增韧 618 环氧树脂, 采用酸酐类固化

剂, 其含量为 38wt%。增强体为 PAN 基碳纤维, 由吉林碳素厂提供 ($\sigma = 2800\text{MPa}$, $E = 200\text{GPa}$, $\rho = 1.75\text{g/cm}^3$, $d = 6 \sim 8\mu\text{m}$); 碳纤维三维编织体的编织由天津工业大学协助完成, 编织参数列于表 1。 C_{3D}/EP 复合材料的制备采用 RTM 工艺。

表 1 三维编织碳纤维的编织参数

Table 1 Braiding parameters of 3-D carbon fabrics

纤维体积比 / %	35	43	56	65	66
纱线束根数	48	72	48	48	72
编织角 / °	15	25	13	10	40

1.2 磨损试验

磨损试验在 MM-200 摩擦磨损试验机上进行, 试样尺寸为 $30\text{mm} \times 7\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。对磨环为 45 钢, 热处理后硬度 HRC40~45, 圆环直径为 40mm, 表面经精磨而成。磨损试验前用丙酮擦洗试样和对磨环。本试验分别测定不同纤维体积比、不同载荷和不同滑动速度条件下的摩擦系数及磨痕宽度。 C_{3D}/EP 复合材料的纬线方向与摩擦滑动方向一致。

摩擦系数通过记录摩擦力矩, 由公式 $\mu = T/PR$ 计算而得。其中 T 为摩擦力矩, P 为载荷, R 为环半

径。由读数显微镜测量试样的磨痕宽度 W ，以表征其磨损性能。磨损试样的磨损表面经清洗和喷金处理后用 XL30 ESEM 扫描电子显微镜观察。

2 试验结果及讨论

2.1 摩擦系数、磨痕宽度随纤维体积比的变化

图 1 给出了不同纤维体积比的 C_{3D}/EP 复合材料在载荷为 147N、滑动速度为 200r/min 时的摩擦系数 (μ) 和磨痕宽度 (W)。可以看出，碳纤维加入后，材料的摩擦系数明显降低，在纤维体积比为 39% 左

右，C_{3D}/EP 复合材料的摩擦系数降到最低值，此后随着纤维体积比的增加，C_{3D}/EP 复合材料的摩擦系数又缓慢升高；而磨痕宽度则随纤维体积比的增大持续下降。这是因为碳纤维一方面具有良好的自润滑性，因此，与未增强的环氧树脂相比，复合材料的摩擦系数显著降低，耐磨性也明显提高。但另一方面，碳纤维具有较高的表面能，与钢表面的亲和力较大^[5]，因此，当碳纤维含量较高时，复合材料的摩擦系数反而略有增大，但增加的幅度不大。由于碳纤维的减磨作用，复合材料的磨痕宽度继续呈减小的趋势。

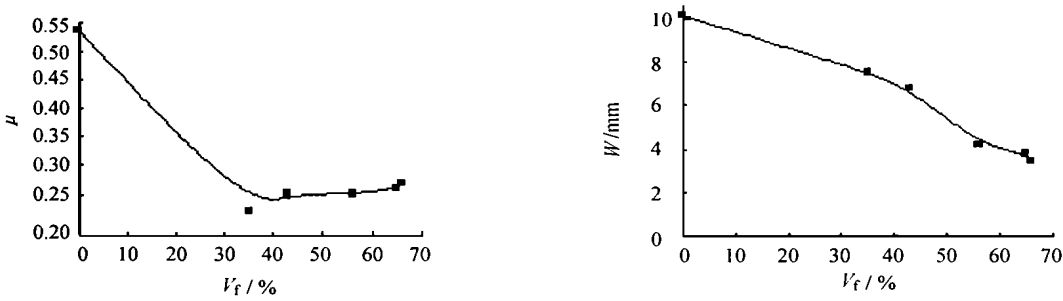


图 1 纤维体积比对 C_{3D}/EP 复合材料摩擦磨损性能的影响 (a) μ - V_f 曲线; (b) W - V_f 曲线
Fig. 1 The effect of fiber content on friction coefficient (a) and width of wear scar (b) of the C_{3D}/EP composites

2.2 载荷及滑动速度对 C_{3D}/EP 复合材料摩擦学性能的影响

图 2 给出了滑动速度为 200r/min 时，不同载荷条件下 C_{3D}/EP 复合材料的摩擦性能。可以看出，随着载荷的增大，复合材料的摩擦系数逐渐下降；而磨痕

宽度随载荷的增加而增大并趋于稳定，这与刘旭军等人的结果一致^[6]。这是因为载荷增大，摩擦副的实际接触面积增大，摩擦表面因纤维束的挤压变形及磨屑的压入而变得光滑，改善了摩擦条件，摩擦系数下降，磨痕宽度增大并趋于稳定^[6]。

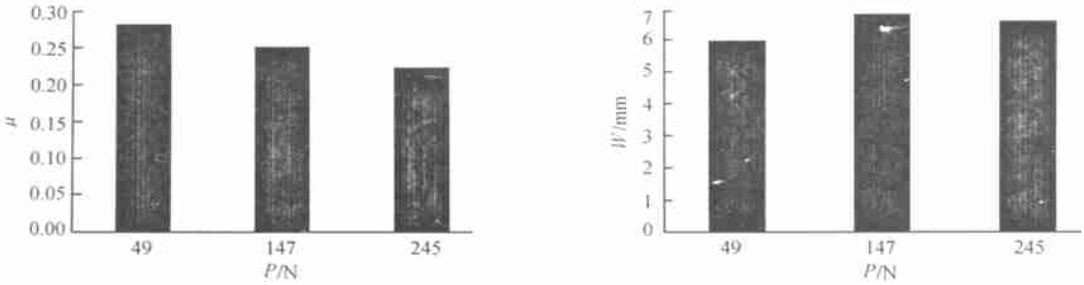


图 2 载荷对 C_{3D}/EP 复合材料摩擦系数 (a) 及磨痕宽度 (b) 的影响 (滑动速度 200r/min)
Fig. 2 The variations of friction coefficient (a) and width of wear scar (b) with contact pressure for the C_{3D}/EP composites

表 2 给出了载荷为 49N 时，滑动速度对 C_{3D}/EP 复合材料摩擦磨损性能的影响。由表中数据可以看出，随着滑动速度的增加，复合材料的摩擦系数及磨痕宽度均增大。这是因为滑动速度增加，复合材料表面的温度升高，摩擦表面软化，并发生大面积粘着，使摩擦系数和磨痕宽度大幅度上升。

2.3 磨损形貌的观察及磨损机理分析

图 3 为不同载荷、不同滑动速度条件下磨损表面的 SEM 照片。可以看出，不同载荷或速度条件下，C_{3D}/EP 复合材料磨损表面的形貌特征不同。在低速低载时，C_{3D}/EP 复合材料磨损表面暴露的纤维较少，明显可见因疲劳而破坏的基体(见图 3a)，而未见明显的粘着痕迹。随着载荷或速度的增加，因粘着而被撕

表 2 滑动速度对 C_{3D}/EP 复合
材料摩擦学性能的影响 (载荷 49N)

Table 2 Influence of sliding speed on the tribological
characteristics of the C_{3D}/EP composites

u' (r/min)	μ	W / mm
200	0.283	5.95
400	0.310	7.07

开的基体增多, 更多的纤维暴露 (图 3b, c), 但基体碎屑较少, 表明载荷或速度增加时, 复合材料的磨损逐渐由疲劳磨损为主转变为以粘着磨损为主, 其磨痕宽度增加。载荷进一步增加, 粘着更加严重, 被粘着的基体也增加, 以至于将纤维下层的基体撕开, 使纤维与基体分离, 出现较多断裂的纤维, 使 C_{3D}/EP 复合材料的耐磨性下降。

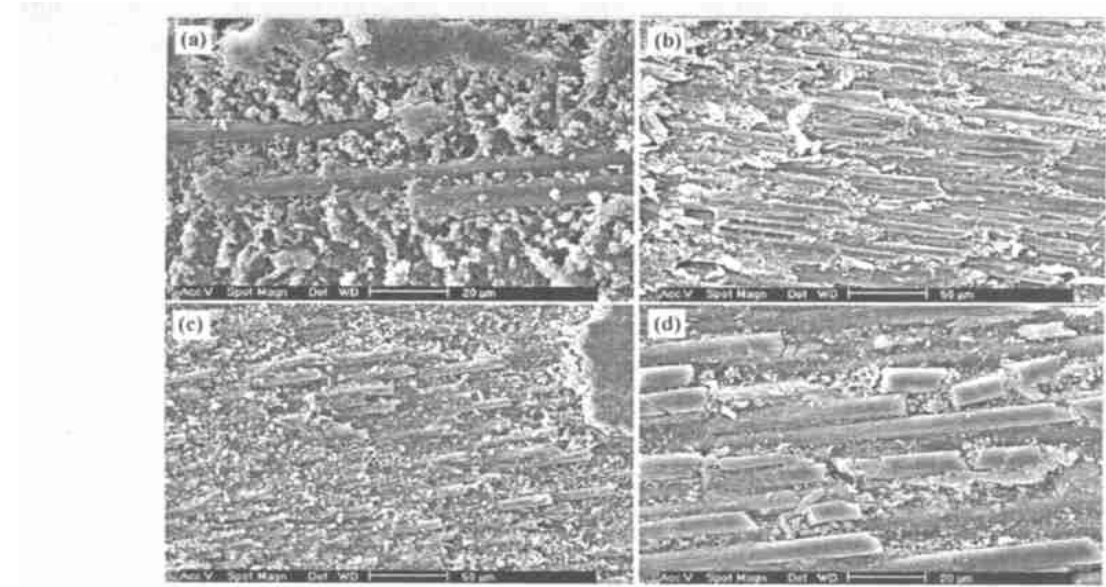


图 3 不同条件下 C_{3D}/EP 复合材料磨损表面的 SEM 照片

Fig. 3 SEM micrographs of the worn surfaces of the C_{3D}/EP composites generated under different conditions

(a) 49N, 200r/min; (b) 147N, 200r/min; (c) 49N, 400r/min; (d) 245N, 200r/min

3 结论

(1) 与环氧树脂基体材料相比, C_{3D}/EP 复合材料的摩擦磨损性能显著提高。随着纤维体积比的变化, 摩擦系数存在最小值, 而磨痕宽度随纤维比的增加而单调减小。

(2) 随着载荷的增加, C_{3D}/EP 复合材料的摩擦系数降低, 磨痕宽度增大; 随着滑动速度的增大, C_{3D}/EP 复合材料的摩擦系数及磨痕宽度均增大。

(3) C_{3D}/EP 复合材料的磨损机理与磨损的条件有关。当载荷或速度较小时, 其磨损机制主要为疲劳磨损, 当载荷或速度较大时, 则以粘着磨损为主。

参考文献

[1] Chou S, Chen H C, Chen H E. Compos Sci Technol, 1992, 45: 23—35.

[2] Wan Y Z, Wang Y L, Wang Z R, Zhou F G Luo. J Mater Sci Lett, 2000, 19: 1207—1210.

[3] Chou S, Chen H C, Wu C C. Compos Sci Technol, 1992, 43: 117—128.

[4] Zimmerman M, Parsons J R, Alexander H. J Biomed Mater Res, 1987, 21: 345—361.

[5] Lee S H, Kang T J. J Compos Mater, 2000, 34(10): 816—825.

[6] 刘旭军, 李同生, 杨生荣等. 摩擦学学报, 1999, 19 (1): 23—27.

基金项目: 教育部博士点专项基金 (99005606) 和天津市自然科学基金 (993602211) 资助项目

收稿日期: 2001-04-18

作者简介: 董向红 (1954-), 女, 工程师, 主要从事材料分析与测试仪器的教学与研究工作, 主要研究方向为碳纤维, 复合材料等, 联系地址: 天津大学材料科学与工程学院 (300072)。

更正: 应作者要求, 《材料工程》2001 年第 4 期第 29 页中表 2 更正如下:

表 2 各试样的石墨化度 P₁

试样	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
d ₀₀₂	3.4473	3.4433	3.4403	3.4433	3.4223	3.4353	3.4273	3.4213	3.4143	3.381
P ₁	0.14	0.1670	0.1780	0.1950	0.3450	0.2030	0.2980	0.3560	0.464	0.92