

# 废弃碳纤维制备工程应用的复合材料井盖

刘丹<sup>1</sup>, 拓亚亚<sup>1</sup>, 赵关芳<sup>1</sup>, 田银俊<sup>1</sup>, 赵学平<sup>2</sup>

1. 内蒙古航天红岗机械有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010076

2. 内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特 010051

DOI:10.61369/ERA.2025070010

**摘要 :** 针对废弃碳纤维直接填埋或焚烧造成的环境污染及处理成本高昂等问题, 本研究采用模压成型工艺将废弃纤维制备成复合材料井盖, 系统分析了井盖静态力学性能、微观形貌及抗冲击性能。静态力学性能测试结果表明: 原材料规格对复合材料井盖的力学性能影响较为明显, 短切碳纤维预浸料制备复合材料井盖的力学性能明显优于碳纤维预浸布带, 其拉伸强度为51MPa, 压缩强度为152MPa, 弯曲强度为180MPa。SEM测试结果显示: 短切碳纤维预浸料制备的复合材料井盖, 纤维与树脂的界面粘接性良好, 无明显的分层、空隙等缺陷。

**关键词 :** 回收利用; 废弃碳纤维; 复合材料井盖; 力学性能

## Recycling Waste Carbon Fiber for Manufacturing Composite Manhole Covers

Liu Dan<sup>1</sup>, Tuo Yaya<sup>1</sup>, Zhao Guanfang<sup>1</sup>, Tian Yinjun<sup>1</sup>, Zhao Xueping<sup>2</sup>

1.Inner Mongolia Aerospace Honggang Machinery Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010076

2.Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051

**Abstract :** To address the environmental pollution and high disposal costs caused by the direct landfill or incineration of waste carbon fiber, this study utilized a compression molding process to fabricate composite manhole covers from waste fibers, and systematically analyzed the static mechanical properties, microstructural morphology, and impact resistance performance of the covers. The results of static mechanical property tests indicated that raw material specifications significantly influenced the mechanical performance of the composite manhole covers. The composite covers fabricated from chopped carbon fiber prepreg demonstrated markedly superior mechanical properties compared to those made from carbon fiber prepreg tape, with a tensile strength of 51 MPa, compressive strength of 152 MPa, and flexural strength of 180 MPa. SEM analysis results revealed that the composite manhole covers fabricated from chopped carbon fiber prepreg exhibited excellent interfacial bonding between fibers and resin, with no apparent structural defects such as delamination or voids.

**Keywords :** recycling; waste carbon fiber; composite manhole covers; mechanical properties

碳纤维因其质量轻、强度高、耐腐蚀等优异特性被广泛应用于航空航天、交通运输、海洋船舶、新能源等领域<sup>[1,2,3]</sup>。据华经产业研究院《2021-2026年中国碳纤维行业发展检测及投资战略规划研究报告》统计, 2018-2020年全球碳纤维需求量年复合增长率为10.12%, 预计2020-2025年碳纤维市场的复合年增长率将超过12%, 2025年将达到20万吨, 全球航空航天复合材料市场规模预计将达到410亿美元<sup>[4]</sup>。随着碳纤维的普遍应用, 大量废弃碳纤维也随之产生。据统计, 2020年全球碳纤维增强树脂基复合材料废弃物量达到3.32万吨, 碳纤维增强树脂基复合材料废弃物量呈现逐年增长的趋势, 预计2050年全球碳纤维增强树脂基复合材料废弃物量将达到20万吨<sup>[5]</sup>。如将废弃碳纤维直接丢弃, 废弃碳纤维中残留的树脂(如环氧树脂)会渗入土壤, 破坏微生物群落; 释放有害物质, 污染环境<sup>[6,7]</sup>。如将废弃碳纤维作为固体废弃物进行后处理, 高昂的废弃纤维处理费用会导致产品的制造成本提高。

对废弃碳纤维回收再利用是解决上述问题的最佳方案之一, 是改善环境承载能力、实现社会经济可持续发展的必然选择。废弃纤维再利用不仅可节省废弃纤维的后处理费用, 还能节省新制造产品的原材料费用, 从而降低新制造产品的成本。

基于碳纤维的特性, 将废弃碳纤维制备成复合材料井盖是其回收再利用的一种有效途径。目前常见的井盖主要是由铸铁或钢筋混凝土制作而成<sup>[8,9]</sup>。由于铸铁、钢筋等材料可回收直接利用, 致使井盖被盗频繁发生<sup>[10]</sup>。井盖的缺失会极大地引发交通事故及人员伤亡, 严重危害公共安全和人民群众的生命财产安全。复合材料井盖不仅解决了铸铁井盖偷盗问题, 还规避了铸铁井盖被车辆碾压时金属碰撞的产生噪声。

作者简介: 刘丹(1980.12-), 女, 汉族, 辽宁省盘锦市人, 博士, 高级工程师, 主要从事复合材料应用研究工作, 项目: 内蒙古科技计划(呼和浩特市应用技术与开发)。

本研究以废弃碳纤维为原材料,采用模压成型工艺制备复合材料井盖。并对井盖的拉伸强度、压缩强度、弯曲强度及冲击强度进行了测试,采用扫描电子显微镜(SEM)观察了井盖的微观形貌。

## 一、实验部分

### (一) 实验原材料

两种原材料,分别是废弃碳纤维预浸带及废弃短切碳纤维预浸料。两种废弃预浸料中的树脂类型均为环氧树脂。

### (二) 复合材料井盖制备

#### 1. 井盖模具前处理

模具表面进行初步清理,用乙酸乙酯将模具内腔擦拭干净后,均匀涂抹高温脱模剂至模具内腔的每个角落,涂抹三次,涂抹时间间隔为30 min。

#### 2. 废弃碳纤维铺放量计算

采用UG(Unigraphics)软件计算模具内腔体积,井盖模具内腔体积为1791074.0571 mm<sup>3</sup>,井座模具内腔体积为1888170.3126 mm<sup>3</sup>。

废弃短切碳纤维预浸料体密度为1.47g/cm<sup>3</sup>,如采用废弃短切碳纤维预浸料制备复合材料井盖及井座,所需的废弃短切碳纤维质量分别为2632.9 g与2775.6 g。废弃碳纤维预浸带制备复合材料井盖所用的质量参考废弃短切碳纤维的质量。

#### 3. 复合材料井盖制备工艺

制备井盖所用的原材料为废弃碳纤维预浸料,碳纤维预浸料中已含有树脂,本研究在制备井盖的过程中未再添加树脂,模具前处理完成后,称取一定质量的废弃碳纤维预浸料铺放至模腔内(质量数值参照表1)。

废弃碳纤维预浸带与短切纤维预浸料两种规格的原材料均采用手工铺放工艺制备复合材料井盖。

废弃碳纤维预浸带的铺层角度按0°、+45°、-45°、90°周期性重复,实现近似各向同性。在搭接空隙处填补小块碳纤维预浸带,使得每层铺放尽可能平整、紧密。

与碳纤维预浸带的铺放工艺相比较,短切碳纤维预浸料更容易铺放,效率更高。从冷库中取出的短切碳纤维预浸料用橡胶锤迅速敲打后变得松散不粘连,直接倒入模具中即可。

#### 4. 复合材料井盖性能测试

##### (1) 拉伸强度性能测试

试验标准: GB/T1447-2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》。

##### (2) 压缩强度性能测试

试验标准: GB/T1448-2005《纤维增强塑料压缩性能试验方法》。

##### (3) 弯曲强度性能测试

试验标准: GB/T1449-2005《纤维增强塑料弯曲性能试验方法》。

##### (4) 扫描电子显微镜(SEM)测试

##### (5) 冲击强度性能测试

试验标准: GB/T1483-2008《塑料悬臂梁冲击强度的测定》。

## 二、结果与讨论

### (一) 复合材料井盖的表观质量

碳纤维预浸带制备的复合材料井盖如图1所示。从表观形貌看,井盖的防滑纹区域存在显著的材料分布不均问题。防滑纹凸起部分完全由树脂构成,缺乏纤维增强相。树脂区域的机械强度较低,轻微摩擦就可导致树脂剥落(图1(a),(b))。防滑纹凸起的纹路能够分散车辆碾压时的集中载荷,提高井盖的抗压能力,减少变形或破裂的风险。碳纤维预浸带制备的井盖防滑纹在机械摩擦或环境应力作用下极易脱落的缺陷会直接降低井盖表面的有效摩擦系数,在雨雪天气或潮湿环境下,界面水膜无法被残余的平滑表面充分破坏,行人步态稳定性将显著降低,滑倒风险显著提升。车辆(特别是两轮车辆)通过时极易引发侧滑失控事故。

碳纤维预浸带模压成型的井座结构在加强筋区域也存在显著的缺陷,具体表现为几何形貌偏离设计预期。由于预浸带幅宽过大,在模压成型的过程中发生了非理想的材料流动行为,树脂基体在压力梯度作用下产生径向迁移,导致加强筋截面呈现非设计态的凹陷形貌,具体如图1(c),(d)所示。

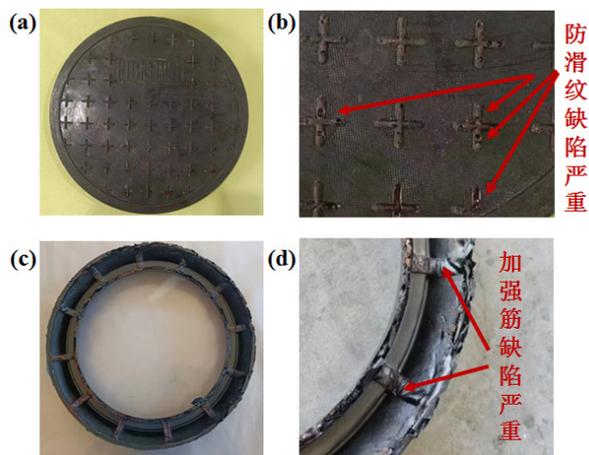


图1 碳纤维预浸带制备的井盖表观形貌。(a) 井盖;(b) 井盖防滑纹放大图;

(c) 井座;(d) 井座放大图。

短切碳纤维预浸料模压成型制备的复合材料井盖展现出优异的表观形貌和结构完整性。如图2所示,井盖表面的防滑纹区域实现了纤维-树脂的均匀分布,防滑纹结构完整且机械强度较佳(随意踩踏后,防滑纹表观形貌无变化)。

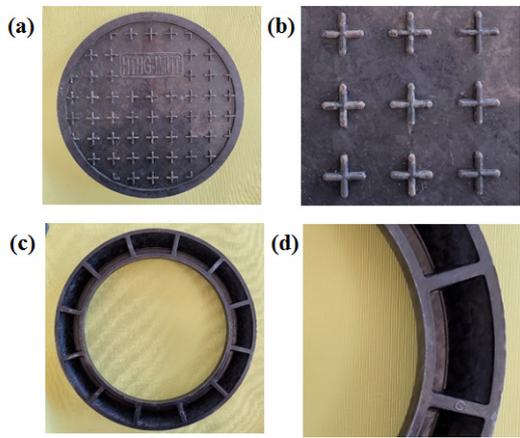


图2 短切碳纤维预浸料制备的井盖表现形貌。(a) 井盖；(b) 井盖防滑纹放大图；  
(c) 井座；(d) 井座放大图。

## (二) 复合材料井盖的力学性能

由碳纤维预浸带及短切纤维预浸料制备的复合材料井盖均采用本体取样进行力学性能表征。两种原材料制备的复合材料井盖的静态力学性能对比如图3所示。碳纤维预浸带制备的复合材料井盖的强度明显不足，除压缩强度外，拉伸强度及弯曲强度的测试值均低于国家标准的要求值。拉伸强度最低值为9.1MPa，最高值为24.9MPa，弯曲强度的最高测试值也仅为29.0MPa。与碳纤维预浸带相比，短切碳纤维制备的井盖力学性能有了显著的改善，其拉伸强度、压缩强度及弯曲强度测试的最低值分别为51.0MPa、152.0MPa及180.8MPa，均符合国家标准的指标要求，满足工程应用的力学性能需求。

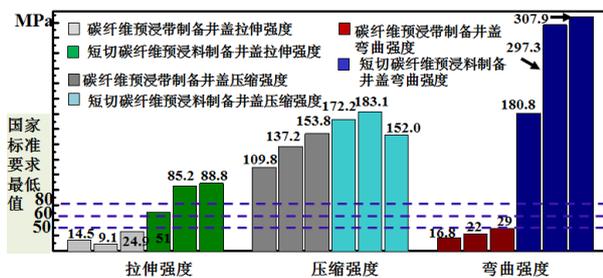


图3 两种原材料制备的复合材料井盖的静态力学性能



图4 测试后的拉伸试样（碳纤维预浸带制备的井盖）

拉伸强度试验测试完成后，碳纤维预浸带制备井盖的拉伸试样如图4所示，拉伸失效断口出现了严重的分层，断口主要位于布层之间，布层间脱粘情况较为严重。结合井盖制备的具体工艺过程，部分碳纤维预浸带过宽、过长，导致粘连严重，需用力撕拉才能将其剥离，剥离力不仅导致预浸带边缘撕裂，也导致纤维受损或断裂，抗拉强度降低。这也是碳纤维预浸带制备的复合材料井盖静态力学性能不理想的主要原因。

## (三) 复合材料井盖的 SEM 测试

为探究复合材料井盖的微观结构，本研究对短切碳纤维制备的复合材料井盖进行了 SEM 测试（力学性能测试后的试样）。如图5所示，短切碳纤维表面被环氧树脂完全包裹，纤维纵向沟槽内可见树脂的填充，界面过渡区连续，无微裂纹或脱粘位置。这种界面呈现的连续、致密的树脂-纤维结合状态，表明井盖无可见的结构缺陷。

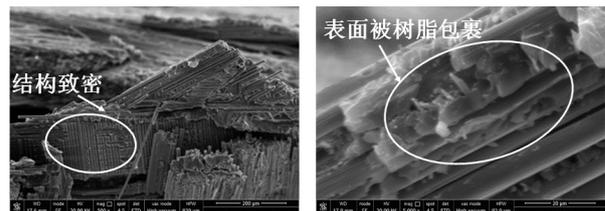


图5 SEM 测试分析

## (四) 复合材料井盖的抗冲击性能

井盖在道路环境中可能遭遇车辆碾压冲击等状况，为确保井盖在实际服役中的可靠性，对短切碳纤维预浸料制备井盖进行了冲击强度测试，如图6所示。



图6 抗冲击试验

冲击强度的测试结果如表1所示，最小值为  $1.094 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ ，最大值为  $1.743 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ ，离散值高达46.2%（离散值计算方法为测试最大值与最小值的差值与测试平均值的比值。说明未被 SEM 观测到的井盖结构内部的微小孔隙或者细微裂纹影响复合材料井盖的动态力学性能，应优化井盖的制备工艺，避免微小孔隙及细微裂纹的形成。

表1 冲击强度测试结果

编号	冲击强度 ( $10^4 \text{J/m}^2$ )	偏差值 (冲击强度测试值 - 冲击强度平均值)
1	1.392	-0.013
2	1.555	0.150
3	1.094	-0.311
4	1.743	0.338
5	1.239	-0.166
平均值	1.405	/
测试结果离散值	46.2%	/

### 三、结论

本研究将废弃碳纤维回收再利用制备成复合材料井盖，通过资源的循环利用，实现经济效益的提升，完全契合绿色制造理念。通过该研究，得到如下结论：

(1) 与废弃碳纤维预浸带相比，废弃短切碳纤维制备的复合材料井盖，展现出显著的力学性能优势。其拉伸强度  $\geq 51.0 \text{MPa}$ ，压缩强度  $\geq 152.0 \text{MPa}$ ，弯曲强度  $\geq 180.8 \text{MPa}$ 。

(2) SEM 测试分析表明，短切碳纤维预浸料制备的复合材料井盖微观结构致密，无明显缺陷，更适宜工程应用。

### 参考文献

- [1] Tang SF, Hu CL. Design, preparation and properties of carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic composites for aerospace applications: A review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33: 117-130.
- [2] Cody Johnson, Selvam Pillay, Haibin Ning. Fiber content measurement of hybrid carbon and glass fiber reinforced thermoset composites [J]. Journal of Composite Materials, 2022, Vol. 56(18): 2825-2834.
- [3] Jinlong Shang. Durability testing of composite aerospace materials based on a new polymer carbon fiber-reinforced epoxy resin [J]. Fluid Dynamics & Materials Processing, 2023(9): 2315-2327.
- [4] 胡侨乐, 端玉芳, 刘志, 等. 碳纤维增强聚合物基复合材料回收再利用现状 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(1): 64-76.
- [5] Liu W, Huang H, Zhu L et al. Integrating carbon fiber reclamation and additive manufacturing for recycling CFRP waste [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 215: 108808.
- [6] Pickering S, Turner T, Meng F. Developments in the fluidised bed process for fibre recovery from thermoset composites [C]. 2nd Annual Composites and Advanced Materials Expo, CA MX, 2015: 2384-2394.
- [7] Hartline NL, Bruce NJ, Karba SN, et al. Microfiber Masses Recovered from Conventional Machine Washing of New or Aged Garments [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(21): 11532-11538.
- [8] 张学磊. 城市窨井盖治理及智能化改造 [J]. 工程建设与设计, 2023, (3): 89-91.
- [9] 马兴遒, 黄丹丹, 焦晓磊. 废旧复合材料井盖研究与应用 [J]. 天津建设科技, 2023, 33(5): 14-17.
- [10] 张亮儒, 杨燕宁, 卢晨. 碳纤维复合材料回收再利用的研究进展 [J]. 合成纤维 Synthetic Fiber in China, 2023(52): 38-41, 93.