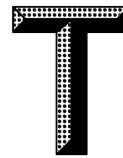


ICS 59.100.20
CCS Q 53



团 体 标 准

T/CI 476—2024

风电叶片用碳纤维

Carbon fiber for wind turbine blade

2024-09-02 发布

2024-09-02 实施

中国国际科技促进会 发布
中国标准出版社 出版

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由厦门双瑞风电科技有限公司提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：厦门双瑞风电科技有限公司、东华大学、东方电气(天津)风电叶片工程有限公司、一重龙申(齐齐哈尔)复合材料有限公司、康达新材料(集团)股份有限公司、绍兴宝旌复合材料有限公司、新疆隆炬新材料有限公司、中国石化上海石油化工股份有限公司、吉林国兴复合材料有限公司、惠柏新材料科技(上海)股份有限公司、中国科学院山西煤炭化学研究所、道生天合材料科技(上海)股份有限公司、重庆风渡新材料有限公司、四川东树新材料有限公司、保定维赛新材料科技股份有限公司、中石油(上海)新材料研究院有限公司、苏州天顺复合材料科技有限公司、洛阳双瑞防腐工程技术有限公司。

本文件主要起草人：关洪涛、安俊虎、杨孝庆、张辉、江一杭、徐戈、吴杰、王栋、马祥林、王臣辉、牛经敏、林燕建、张寿春、陈翠萍、张乾仁、肖毅、苑初明、辛伟、朱峰、张耿涛、杨忠、李云华、周游、钟连兵、王冬冬、刘鲜红。

风电叶片用碳纤维

1 范围

本文件规定了风电叶片用碳纤维的产品分类与标记、技术要求、检验方法、检验规则、标识、包装、运输和贮存。

本文件适用于风电叶片用碳纤维及相似使用场景。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 1447 纤维增强塑料拉伸性能试验方法
- GB/T 1448 纤维增强塑料压缩性能试验方法
- GB/T 1463 纤维增强塑料密度和相对密度试验方法
- GB/T 3362 碳纤维复丝拉伸性能试验方法
- GB/T 3364 碳纤维直径和根数试验方法
- GB/T 3365 碳纤维增强塑料孔隙含量和纤维体积含量试验方法
- GB/T 3855 碳纤维增强塑料树脂含量试验方法
- GB/T 9914.3 增强制品试验方法 第3部分:单位面积质量的测定
- GB/T 18374 增强材料术语
- GB/T 19466.2 塑料 差示扫描量热法(DSC) 第2部分:玻璃化转变温度的测定
- GB/T 26752 聚丙烯腈基碳纤维
- GB/T 29761 碳纤维 上浆剂含量的测定
- GB/T 30019 碳纤维 密度的测定
- GB/T 31292 碳纤维 碳含量的测定 燃烧吸收法
- GB/T 35465.3 聚合物基复合材料疲劳性能测试方法 第3部分:拉-拉疲劳
- GB/T 40724 碳纤维及其复合材料术语
- GB/T 41956 碳纤维丝束起毛量的测定
- FZ/T 50031 碳纤维含水率和饱和吸水率试验方法
- FZ/T 50044 碳纤维 灰分含量试验方法
- HB 7736.2 复合材料预浸料物理性能试验方法 第2部分:面密度的测定
- HB 7736.4 复合材料预浸料物理性能试验方法 第4部分:挥发份含量的测定
- HB 7736.5 复合材料预浸料物理性能试验方法 第5部分:树脂含量的测定
- ASTM D3917 热固性玻璃纤维增强塑料拉挤制型材尺寸公差的标准规范(Standard Specification for Dimensional Tolerance of Thermosetting Glass-Reinforced Plastic Pultruded Shapes)

3 术语和定义

GB/T 18374 和 GB/T 40724 界定的术语和定义适用于本文件。

4 产品分类

风电叶片用碳纤维产品可分为碳纤维纱线、碳纤维织物、碳纤维预浸料、碳纤维拉挤板。

5 技术要求

5.1 碳纤维纱线技术要求

5.1.1 碳纤维纱线外观质量

黑色,有光泽、色泽均匀、纱线均匀整齐,无明显毛丝、毛团、异物,纤维束间无粘连。

5.1.2 碳纤维纱线物理性能

碳纤维纱线物理性能应符合表 1 的规定。

表 1 碳纤维纱线物理性能要求

序号	项目	指标要求	单位
1	上浆剂类型	根据客户要求确定(常规为环氧型)	
2	上浆剂含量	0.8~2	%
3	密度	1.80±0.03	g/cm ³
4	纤维根数	≥24 K	—
5	单丝直径	6.5~7.5	μm
6	含碳量	≥93	%
7	灰分	≤0.5	%
8	含水率	≤0.1	%
9	毛纱量	≤30	mg/50 m

5.1.3 碳纤维纱线力学性能

碳纤维纱线力学性能应符合表 2 的规定。

表 2 碳纤维纱线力学性能要求

序号	项目	指标要求	单位	数据类型
1	拉伸强度	≥3 500	MPa	平均值
2	拉伸模量	≥230	GPa	平均值
3	断裂延伸率	≥1.4	%	平均值
4	批间及批内离散系数 C _v	≤5	%	—

注：平均值与特征值规定见附录 A。

5.2 碳纤维单向织物技术要求

5.2.1 碳纤维单向织物外观质量

碳纤维单向织物外观质量应符合表 3 的规定。

表 3 碳纤维单向织物外观质量要求

序号	项目	技术要求
1	纱线接头	1 m 范围内纱线接头 \leq 2 处 100 m 范围内纱线接头 \leq 3 处 接头长度范围为 3 cm~8 cm 接头处不准许出现硬结
2	捆绑纱断头	单个捆绑纱断头长度 \leq 10 cm 30 m ² 范围内捆绑纱断头数量 \leq 2 个
3	断经	不准许
4	断纬	30 m ² 范围内单根断纬长度 \leq 1 m 30 m ² 范围内两根断纬长度 \leq 0.3 m 30 m ² 范围内不准许同时出现三根及以上断纬
5	纱线扭曲	不准许两根及以上纱线错经错纬 单根纱线错经错纬长度 \leq 5 cm 50m 范围内错经错纬数量 \leq 2 个
6	毛边	单侧毛边长度 \leq 7 mm
7	油污	不准许
8	异物	不准许
9	平整性	织物表面鼓包高度 \leq 1.8 mm,且可抹平,翘边高度 \leq 5 mm
10	折痕、褶皱	不准许出现织物因翻转叠合或起皱受压产生的印记及表面不平整
11	直线度	织物平直摊开,15 m 内织物侧边织物所在平面内直线度偏差 \leq 10 mm
12	端面整齐度	织物整卷端面整齐度 \leq 15 mm
13	纤维束间隙	1 mm 以下纤维束间隙每米 \leq 10 个 2 mm 以下纤维束间隙每米 \leq 2 个 3 mm 以下纤维束间隙不准许出现

5.2.2 碳纤维单向织物物理性能

碳纤维单向织物物理性能应符合表 4 的规定。

表 4 碳纤维单向织物物理性能要求

序号	项目	指标要求	单位
1	宽幅偏差	\pm 5	mm
2	卷长偏差	0~500	mm

表 4 碳纤维单向织物物理性能要求 (续)

序号	项目	指标要求	单位
3	面密度	200~800	g/m ²
4	面密度偏差	±3	%
5	经纬密度偏差	±10	%
6	含水率	≤0.1	%

5.2.3 碳纤维单向织物层合板力学性能

碳纤维单向织物层合板力学性能应符合表 5 的规定。

表 5 碳纤维单向织物层合板力学性能要求

序号	项目	指标要求	单位	数据类型
1	0°拉伸强度	≥1 300	MPa	特征值
2	0°拉伸模量	≥120	GPa	平均值
3	0°压缩强度	≥800	MPa	特征值
4	0°压缩模量	≥100	GPa	平均值

5.3 碳纤维预浸料技术要求

5.3.1 碳纤维预浸料外观质量

碳纤维预浸料外观质量应符合表 6 的规定。

表 6 碳纤维预浸料外观质量要求

序号	项目	技术要求
1	表面质量	外观平整、厚度均匀,不准许有对使用、铺贴不利的明显缺陷
2	纤维	纤维应连续,不准许有明显的屈曲、交叉、起皱、松散加捻等
3	树脂	树脂应充分浸透纤维,分布均匀,不准许有明显可见的干纱、半干纱及明显的贫、富树脂区
4	杂质	不准许
5	平整性	不准许有褶皱和压痕
6	纤维间隙	1 m ² 范围内纤维间隙≤1 mm,长度为 100 mm 范围内的缝隙≤3 处
7	毛纱	1 m ² 范围内毛纱团面积≤0.02 m ² ,毛纱不应影响平整性

5.3.2 碳纤维预浸料物理性能

碳纤维预浸料物理性能应符合表 7 的规定。

表 7 碳纤维预浸料物理性能及要求

序号	项目	指标要求	单位
1	宽度偏差	±10	mm
2	卷长偏差	0~500	mm
3	面密度	300~1 000	g/m ²
4	面密度偏差	±3	%
5	挥发分含量	≤1.5	%
6	树脂体积含量	40±5	%
7	固化后玻璃化转变温度	≥80	°C

5.3.3 碳纤维预浸料层合板力学性能

碳纤维预浸料层合板力学性能应符合表 8 的规定。

表 8 碳纤维预浸料层合板力学性能及要求

序号	项目	指标要求	单位	数据类型
1	0°拉伸强度	≥1 700	MPa	特征值
2	0°拉伸模量	≥125	GPa	平均值
3	0°压缩强度	≥850	MPa	特征值
4	0°压缩模量	≥105	GPa	平均值

5.4 碳纤维拉挤板技术要求

5.4.1 碳纤维拉挤板外观质量

碳纤维拉挤板外观质量应符合表 9 的规定。

表 9 碳纤维拉挤板外观质量及要求

序号	项目	技术要求
1	干纱、半干纱	不准许
2	分层、裂纹	不准许
3	褶皱	在长度方向:高度≤0.25 mm 在宽度方向:不准许
4	孔洞	不准许
5	凹坑、凹痕	在长度方向:深度≤0.25 mm 在宽度方向:不准许
6	杂质	不准许
7	脱模布搭接	不准许
8	脱模布撕伤	不准许

表 9 碳纤维拉挤板外观质量及要求（续）

序号	项目	技术要求
9	脱模布夹杂	不允许
10	纱线搭接	搭接长度 ≥ 60 mm 10 m 范围内搭接数量 ≤ 3 个 任意两个接头间距 ≥ 1 m

5.4.2 碳纤维拉挤板物理性能及要求

碳纤维拉挤板物理性能及要求应符合表 10 的规定。

表 10 碳纤维拉挤板物理性能及要求

序号	项目	技术要求	单位
1	推荐尺寸(宽度 \times 厚度)	120 \times 5	mm
2	宽度偏差	-0.5~+1	mm
3	厚度偏差 (去除脱模布后测量中间区域)	-0.05~+0.15	mm
4	直线度偏差	≤ 0.08	%
5	平面度	≤ 0.3	mm
6	0°纤维角度偏差	≤ 2	°
7	树脂体积含量	30~40	%
8	密度	≤ 1.63	g/cm ³
9	孔隙率	≤ 2	%
10	玻璃化转变温度	≥ 100	°C

5.4.3 碳纤维拉挤板力学性能

碳纤维拉挤板力学性能应符合表 11 的规定。

表 11 碳纤维拉挤板力学性能及要求

序号	项目	技术要求	单位	数据类型
1	0°拉伸强度	$\geq 1\ 500$	MPa	特征值
2	0°拉伸模量	≥ 135	GPa	平均值
3	0°压缩强度	$\geq 1\ 000$	MPa	特征值
4	0°压缩模量	≥ 125	GPa	平均值
5	拉-拉疲劳($R=0.1$)	M 值 ≥ 14	—	—

6 检验方法

6.1 碳纤维纱线

6.1.1 外观质量

采用目视检测产品表面质量。

6.1.2 碳纤维上浆剂含量

碳纤维上浆剂含量测试按 GB/T 29761 的规定执行。

6.1.3 碳纤维密度

碳纤维密度测试按 GB/T 30019 的规定执行。

6.1.4 纤维根数

纤维根数测试按 GB/T 3364 的规定执行。

6.1.5 碳纤维单丝直径

碳纤维单丝直径测试按 GB/T 3364 的规定执行。

6.1.6 碳纤维含碳量

碳纤维含碳量测试按 GB/T 31292 的规定执行。

6.1.7 碳纤维灰分含量

碳纤维灰分含量测试按 FZ/T 50044 的规定执行。

6.1.8 碳纤维含水率

碳纤维含水率测试按 FZ/T 50031 的规定执行。

6.1.9 碳纤维毛纱量

碳纤维毛纱量测试按 GB/T 41956 的规定执行。

6.1.10 碳纤维纱线力学性能

碳纤维纱线力学性能测试按 GB/T 3362 的规定执行。

6.2 碳纤维单向织物

6.2.1 外观质量

采用目视检测产品表面质量。

6.2.2 幅宽及卷长偏差

单向织物平铺,采用直尺测量。

6.2.3 面密度

碳纤维织物面密度测试按 GB/T 9914.3 的规定执行。

6.2.4 含水率

碳纤维织物含水率测试按 FZ/T 50031 的规定执行。

6.2.5 碳纤维单向织物层合板 0°拉伸性能

碳纤维单向织物层合板 0°拉伸性能测试按 GB/T 1447 的规定执行。

6.2.6 碳纤维单向织物层合板 0°压缩性能

碳纤维单向织物层合板 0°压缩性能测试按 GB/T 1448 的规定执行。

6.3 碳纤维预浸料

6.3.1 外观质量

采用目视检测产品表面质量。

6.3.2 幅宽及卷长偏差

预浸料自然平铺,采用直尺测量。

6.3.3 碳纤维预浸料面密度

碳纤维预浸料面密度测试按 HB 7736.2 的规定执行。

6.3.4 碳纤维预浸料挥发分含量

碳纤维预浸料挥发分含量测试按 HB 7736.4 的规定执行。

6.3.5 碳纤维预浸料树脂体积含量

碳纤维预浸料树脂体积含量测试按 HB 7736.5 的规定执行。

6.3.6 碳纤维预浸料固化后玻璃化转变温度

碳纤维预浸料固化后玻璃化转变温度测试按 GB/T 19466.2 的规定执行。

6.3.7 碳纤维预浸料层合板 0°拉伸性能

碳纤维预浸料层合板 0°拉伸性能测试按 GB/T 1447 的规定执行。

6.3.8 碳纤维预浸料层合板 0°压缩性能

碳纤维预浸料层合板 0°压缩性能测试按 GB/T 1448 的规定执行。

6.4 碳纤维拉挤板

6.4.1 碳纤维拉挤板宽度和厚度

采用游标卡尺测量,每卷随机检测 5 处位置。

6.4.2 碳纤维拉挤板直线度

碳纤维拉挤板直线度测试按 ASTM D3917 的规定执行。

6.4.3 碳纤维拉挤板平面度

采用高度规对设定平面进行测量,最大值与最小值之差即为平面度。

6.4.4 碳纤维拉挤板纤维角度偏差

以拉挤板边线为基准,采用角度仪测量拉挤板经纱角度偏差。

6.4.5 碳纤维拉挤板树脂体积含量

碳纤维拉挤板树脂体积含量测试按 GB/T 3855 的规定执行。

6.4.6 碳纤维拉挤板密度

碳纤维拉挤板密度测试按 GB/T 1463 的规定执行。

6.4.7 碳纤维拉挤板孔隙率

碳纤维拉挤板孔隙率测试按 GB/T 3365 的规定执行。

6.4.8 碳纤维拉挤板玻璃化转变温度

碳纤维拉挤板玻璃化转变温度测试按 GB/T 19466.2 的规定执行。

6.4.9 碳纤维拉挤板 0°拉伸性能

碳纤维拉挤板 0°拉伸性能测试按 GB/T 1447 的规定执行。

6.4.10 碳纤维拉挤板 0°压缩性能

碳纤维拉挤板 0°压缩性能测试按 GB/T 1448 的规定执行。

6.4.11 碳纤维拉挤板拉-拉疲劳性能

碳纤维拉挤板拉-拉疲劳性能测试按 GB/T 35465.3 的规定执行。

7 检验规则

7.1 组批规则

同一生产线、同一批原材料、同一工艺,连续 1 d~10 d 稳定生产的同一标记的产品为一批。

7.2 抽样方案

产品在出厂检验或型式检验中,应从每批产品中随机抽取进行检验。产品外观、产品尺寸、物理性能检验及力学性能抽检方案按表 12 进行。

表 12 抽样方案

每批织物/预浸料/拉挤板卷数	取样数量/卷
1~3	1
4~10	2
11~30	3
31~75	4
76~200	10
201 以上	15
碳纤维纱线取样数量按 GB/T 26752	

7.3 碳纤维纱线检验项目

按 5.1 执行。

7.4 碳纤维织物检验项目

按 5.2 执行。

7.5 碳纤维预浸料检验项目

按 5.3 执行。

7.6 碳纤维拉挤板检验项目

按 5.4 执行。

7.7 判定

生产企业应逐批进行出厂检验,符合本文件的为出厂检验合格。在检验结果中,若有一项或一项以上不符合本文件要求,应加倍抽样复检,经复检后仍有一项不符合本文件要求,则判定该批产品不合格。

8 标识、包装、运输和贮存

8.1 碳纤维织物标识、包装、运输和贮存

8.1.1 碳纤维织物标识

碳纤维织物标识分为内标签、卷(箱)标签、托标签等。

产品标识的内容:

- 产品名称、规格型号;
- 生产厂商名称和地址;
- 生产日期、产品批次号及产品质保期;
- 产品宽度、产品长度、产品编号;
- 产品使用注意事项,产品贮存条件;
- 根据技术协议供需双方商定的特殊内容。

8.1.2 碳纤维织物包装

碳纤维织物应缠绕在硬纸管上,纸管两侧需使用硬质塑料套筒及硬质木板进行保护;每卷使用纸箱独立密封包装。堆放需用内塑料薄膜、外纸围完全包围,用塑料带进行捆绑且堆放在托盘上,保证在正常运输和贮存的条件下,不损坏产品包装导致产品受潮,影响产品使用。包装过程按要求粘贴标识,方便客户识别和追溯。

8.1.3 碳纤维织物运输和贮存

运输和贮存要求如下。

- 碳纤维织物运输应采用干燥、有篷的交通工具,在运输过程中应做好防护,避免雨、雪、沙尘等杂物污染及碳纤维织物受潮,并避免碰撞。
- 碳纤维织物应室温贮存,避免与雨雪、化学品直接接触,保持环境干燥,不应低于露点温度贮存。保质期不应少于 18 个月。

8.2 碳纤维预浸料标识、包装、运输和贮存

8.2.1 碳纤维预浸料标识

碳纤维预浸料标识分为内标签、卷(箱)标签、托标签等。

产品标识的内容:

- 产品名称、规格型号;
- 生产厂商名称和地址;
- 生产日期、产品批次号及质保期;
- 产品宽度、产品长度,卷(箱)编号;
- 树脂含量;
- 注意小心轻放、防潮、冷冻贮存、方向等字样或图标,
- 产品使用注意事项,产品贮存条件;
- 根据技术协议供需双方商定的特殊内容。

8.2.2 碳纤维预浸料包装

预浸料两面使用聚乙烯压花薄膜(或平膜),亦可以一面用薄膜,另一面用离型纸,收卷在直径为250 mm~300 mm的硬纸芯筒上,然后将预浸料封装于清洁、气密性好的塑料袋中。所选择聚乙烯薄膜的颜色与产品应有明显差异。预浸料外包装应使用硬纸箱。预浸料与箱体应隔开,防止碰撞。

8.2.3 碳纤维预浸料运输和贮存

碳纤维预浸料应冷藏运输,避免受潮、日光曝晒,装卸时要小心轻放,不可翻滚或竖放,不可损伤包装。

碳纤维预浸料应低温密闭空间贮存。在室温(25℃)下,产品贮存期不应少于1个月;在-5℃~0℃条件下,产品贮存期不应少于3个月;在-18℃以下条件下,产品贮存期不应少于6个月。

8.3 碳纤维拉挤板标识、包装、运输和贮存

8.3.1 碳纤维拉挤板标识

碳纤维拉挤板标识分为卷(箱)标签、托标签等。

产品标识的内容:

- 产品名称、规格型号;
- 生产厂商名称和地址;
- 生产日期、产品批次号及质保期;
- 产品宽度、产品长度,产品质量及卷号;
- 产品使用注意事项,产品贮存条件;
- 根据技术协议供需双方商定的特殊内容。

8.3.2 碳纤维拉挤板包装

碳纤维拉挤板包装需满足:

- a) 收卷内径 $\geq 1\ 600$ mm;外径 $\leq 2\ 300$ mm;
- b) 产品外圈端头伸出长度 ≥ 100 mm;
- c) 整个托盘高度 ≤ 2 m;
- d) 整托产品固定牢靠,不应在运输过程中发生位移;

- e) 产品需捆扎牢靠,不应在火灾时炸开;
- f) 产品成托后使用塑料薄膜封装顶部及四周。

8.3.3 碳纤维拉挤板运输和贮存

碳纤维拉挤板运输和贮存要求如下。

- 碳纤维拉挤板在正常运输和贮存的条件下,不会发生倾倒,且不会发生破损。
- 避免阳光直射和热源,堆码层数不应超过安全高度要求,并实施有效加固措施。
- 碳纤维拉挤板室温贮存,避免与雨雪、化学品直接接触,保持环境干燥,不应低于露点温度贮存,保质期不应少于12个月。

附 录 A
(资料性)
数据类型

A.1 平均值

本文件规定的数据类型为“平均值”，采用的数学平均值，计算公式如下：

$$\delta_{\text{平均值}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n}$$

式中：

$\delta_{\text{平均值}}$ —— 测试项目最终输出结果；

δ_i —— 单次测试项目结果；

n —— 测试次数。

A.2 特征值

本文件规定的数据类型为“特征值”，参考 DNVGL-ST-0376，采用的计算公式如下：

对于包含 n 个单独结果的每组试验结果，应确定以下统计参数：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

式中：

x_i —— 第 i 个单独测试结果；

n —— 样本测试结果数量；

\bar{x} —— 样本平均值；

S^2 —— 样本方差。

如果考虑材料特性呈正态分布(高斯分布)，材料特性的特征值计算如下：

$$R_k = \bar{x} - ks$$

式中：

R_k —— 材料特性特征值；

k —— 当总体标准偏差 σ 未知时，从表 A.1 选取 k 因子作为单边公差区间下限；

s —— 样本标准偏差。

表 A.1 95%置信区域间下不同样本数量 k 值

序号	n 值	k 值	序号	n 值	k 值
1	5	4.202 7	6	10	2.911 0
2	6	3.707 7	7	11	2.815 0
3	7	3.399 5	8	12	2.736 4
4	8	3.187 3	9	13	2.670 6
5	9	3.031 3	10	14	2.614 5

表 A.1 95%置信区域间下不同样本数量 k 值 (续)

序号	n 值	k 值	序号	n 值	k 值
11	15	2.566 1	14	100	1.926 6
12	20	2.396 1	15
13	50	2.065 0	16	∞	1.644 9

参 考 文 献

- [1] DNVGL-ST-0376 风力发电机转子叶片(Rotor blades for wind turbines)
-

全国团体标准信息平台