

国产 T800 级碳纤维复丝拉伸强度测试数据取舍方法探讨

刘高君 陈秋飞 葛国杰 王芬 陶珍珍 翟雪枚

中复神鹰碳纤维股份有限公司, 江苏 连云港 222000

摘要: 参照 GB/T 4883 标准, 结合实际测试中拉伸强度试样测试数据的取舍, 分析了 4 种不同统计数据取舍方法对国产 T800 级碳纤维复丝拉伸强度试样测试数据影响。结果表明: 奈尔检验法对统计数据离群值的辨识灵敏度高于格拉布斯检验法。基于 GB/T 3362 和 GB/T 4883, 提出一种新型的拉伸强度试样测试数据取舍方法, 采用该方法得到的拉伸强度均值更接近全样本检验法得到的拉伸强度“真值”。

关键词: 碳纤维复丝; 拉伸强度; 数据取舍; 离群值

中图分类号: TQ342.74

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)12-0050-06

Discussion on the data trade-off method of tensile strength test data of domestic T800 carbon fiber multifilament

Liu Gaojun, Chen Qiufei, Ge Guojie, Wang Fen, Tao Zhenzhen, Zhai Xuemei

Zhongfu Shenying Carbon Fiber Co., Ltd., Lianyungang 222000, Jiangsu, China

Abstract: Based on GB/T 4883 standard, and combined with the trade-off of tensile strength specimen test data in actual tests, this paper was analyzed the influence of four different statistical data selection methods on the tensile strength specimen test data of domestic T800 carbon fiber multifilament. The results showed that the sensitivity of Nair test method for identifying outliers of statistical data was higher than that of Grubbs test method. Based on GB/T 3362 and GB/T 4883, a new statistical data selection method for tensile strength specimen test was proposed. The mean value of tensile strength obtained by this method was closer to the ‘true value’ of tensile strength obtained by the full sample test method.

Keywords: carbon fiber multifilament; tensile strength; data trade-off; outlier

碳纤维是一种无机纤维材料, 具有高比模量、高比强度、耐疲劳等优异性能, 被广泛用于航天航空、国防军事、体育用品等领域^[1-2]。碳纤维复丝拉伸

性能是评价纤维性能的重要力学指标, 也是碳纤维复合材料应用的重要依据, 因此准确评价碳纤维复丝的拉伸性能对纤维生产端和应用端都很重要^[3]。

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金 (BA2019043)

收稿日期: 2025-05-16

作者简介: 刘高君, 男, 1986 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事碳纤维碳化工艺开发方面的工作

通信作者: 陈秋飞, 正高级工程师, 主要从事高性能聚丙烯腈基碳纤维的研究工作, qiuwei_chen@126.com

我国现行最新版的聚丙烯腈基碳纤维的国家标准是 GB/T 26752—2020《聚丙烯腈基碳纤维》^[4],其中关于碳纤维复丝力学性能的测试要求是:“1 K~24 K 拉伸强度、拉伸弹性模量及断裂伸长率按 GB/T 3362 的规定检测”,而最新版 GB/T 3362—2017《碳纤维复丝拉伸性能试验方法》^[5]中虽对测试操作方法做了规定且试样数量的要求为“每组试验测 10 个试样,每组测试有效试样应不少于 6 个”,但测试结果处理中仅规定为“同批有效试样不足 6 个时,应重新进行试验”,未对测试数据的取舍方法进行规定。

碳纤维断裂伸长率较低(通常不足 2.5%),且制样过程中存在退绕、缠绕、浸胶、固化、粘贴加固片等多道工序,极易引起制样缺陷,造成测试结果出现歧离值^[6],故而在进行拉伸性能测试时,对复丝拉伸强度测试结果中偏离值的取舍会影响碳纤维复丝强度的评价结果。邹秀娟等^[7]对碳纤维复丝拉伸强度数据的取舍进行了探究,其采用就高原则和格拉布斯准则进行取舍。本文在 GB/T 4883—2008《数据的统计处理和解释 正态样本离群值的判断和处理》^[6]中的 6.2.2(奈尔检验法)和 7.2.2(格拉布斯检验法)的基础上,对比了 4 种不同取值方法对某国产 T800 级聚丙烯腈基碳纤维复丝拉伸强度值的影响。

1 试验部分

按照 GB/T 3362—2017《碳纤维复丝拉伸性能试验方法》标准规定,在温度(23±2)℃、相对湿度(50±10)%的环境条件下,将某国产 T800 级碳纤维复丝试样进行手工浸胶制样,经固化、贴加固片后,采用英斯特朗 34TM-5 拉力机测试复丝试样的拉伸强度,以 20 mm/min 的拉伸速度对试样施加载荷,记录试样有效断裂的拉伸强度值。拉力机的力学载荷范围为 0~5 000 N,测量精度为±0.5%(测量范围 25~5 000 N)。

基于当前碳纤维复丝拉伸强度测试方法,在每组制备并测试 10 个试样的前提下,每组试样中非有效断裂的试样通常可以控制在 2 个以内,故本文为统一拉伸强度测试的有效断裂试样数量,并基于 10 个试样中发生 3 个及以上为非有效断裂的概率

为小概率事件,故将每组有效断裂试样数量统一为 8 个。

2 复丝拉伸强度取值方法

2.1 奈尔(Nair)检验法

基于 GB/T 4883—2008 中 6.2.2 中存在“下侧情形”离群值的处理方法,对每组 8 个有效断裂试样的拉伸强度数据进行处理,简称为“奈尔检验法”,其计算过程如下。

a) 计算出奈尔下统计量 R'_n 的值

$$R'_n = (\bar{x} - x_{(1)}) / \sigma \quad (1)$$

式中: n 为试样量; \bar{x} 为样本均值; $x_{(1)}$ 为观测值自小到大排序后的第 1 个值; σ 为已知的总体标准差。

b) 确定检出水平 α ,在表 1 中查出临界值 $R_{1-\alpha}(n)$ 。

c) 当 $R'_n > R_{1-\alpha}(n)$ 时,判定 $x_{(1)}$ 为离群值,否则未发现 $x_{(1)}$ 是离群值。

d) 对于检出的离群值 $x_{(1)}$,确定剔除水平 α^* ,在表 1 中查出临界值 $R_{1-\alpha^*}(n)$ 。当 $R'_n > R_{1-\alpha^*}(n)$ 时,判定 $x_{(1)}$ 为统计离群值,否则未发现 $x_{(1)}$ 是统计离群值(即 $x_{(1)}$ 为歧离值)。

表 1 奈尔检验的临界值

Tab. 1 The critical value of Nair test

n	α				
	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
3	1.497	1.738	1.955	2.215	2.396
4	1.696	1.941	2.163	2.431	2.618
5	1.835	2.080	2.304	2.574	2.764
6	1.939	2.184	2.408	2.679	2.870
7	2.022	2.267	2.490	2.761	2.952
8	2.091	2.334	2.557	2.828	3.019
9	2.150	2.392	2.613	2.884	3.074
10	2.200	2.441	2.662	2.931	3.122

2.2 格拉布斯(Grubbs)检验法

基于 GB/T 4883—2008 中 7.2.2 中存在“下侧情形”离群值的处理方法,对每组 8 个有效断裂试样的拉伸强度数据进行处理,简称为“格拉布斯检验法”,其计算过程如下。

a) 根据式(2)式(3)计算出格拉布斯统计量 G'_n 的值

$$G'_n = (\bar{x} - x_{(1)}) / s \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

式中: s 为样本标准差; x_k 为第 k 个样本的值。

b) 确定检出水平 α , 在表 2 中查出临界值 $G_{1-\alpha}(n)$ 。

c) 当 $G'_n > G_{1-\alpha}(n)$ 时, 判定 $x_{(1)}$ 为离群值, 否则未发现 $x_{(1)}$ 是离群值。

d) 对于检出的离群值 $x_{(1)}$, 确定剔除水平 α^* , 在表 2 中查出临界值 $G_{1-\alpha^*}(n)$ 。当 $G'_n > G_{1-\alpha^*}(n)$ 时, 判定 $x_{(1)}$ 为统计离群值, 否则未发现 $x_{(1)}$ 是统计离群值(即 $x_{(1)}$ 为歧离值)。

表 2 格拉布斯检验的临界值

Tab. 2 The critical value of the Grubbs test

n	α				
	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
3	1.148	1.153	1.115	1.155	1.155
4	1.425	1.463	1.481	1.492	1.496
5	1.602	1.672	1.715	1.749	1.764
6	1.729	1.922	1.887	1.944	1.973
7	1.828	1.938	2.020	2.097	2.139
8	1.909	2.032	2.126	2.221	2.274
9	1.977	2.110	2.215	2.323	2.387
10	2.036	2.176	2.290	2.410	2.482

2.3 顺序取值法

实际生产过程中, 为快速检验碳纤维批次产品的复丝拉伸强度, 通常会优先选取前 6 个有效断裂试样的结果, 并取其平均值作为该组碳纤维拉伸强度评价结果, 该取值方法简称“顺序法”。

2.4 全样本法

选取每组试样中 8 个有效断裂试样的结果, 并取其平均值作为该组碳纤维拉伸强度评价结果, 该取值方法简称“全样本法”。

3 结果与分析

按照 GB/T 3362—2017 的评价方法, 选取已初检各项性能均达标的同一轴某国产 T800 级聚丙烯碳纤维, 在制样人员、制样方法、检测方法和检测人员均相同的条件下, 先后制备并评价了该轴碳纤

维的 6 组复丝拉伸强度, 每组前 8 个有效断裂试样拉伸强度测试原始数据见表 3。

表 3 试样的拉伸强度原始数据

Tab. 3 The original tensile strength data of specimen

有效断裂 试样序号	试样拉伸强度/MPa					
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组
1 [#]	6 011	5 892	5 837	6 069	6 295	6 489
2 [#]	6 240	6 463	6 288	6 715	6 449	6 656
3 [#]	5 934	5 969	6 342	5 951	6 399	5 060
4 [#]	5 682	6 447	6 445	5 931	5 977	6 160
5 [#]	6 441	5 783	6 597	6 120	5 943	6 358
6 [#]	6 269	6 135	5 348	5 463	6 236	5 676
7 [#]	6 580	6 511	6 127	5 696	6 157	6 111
8 [#]	5 989	6 433	6 098	6 252	6 485	6 407

3.1 奈尔检验法分析

按照 2.1 节中所述的奈尔检验法对表 3 中的数据进行离群值辨别, 分析过程及结果见表 4。其中 σ 取表 3 中 48 个拉伸强度数据的标准差, 为 347.677 MPa。依据现行国内碳纤维行业水平, 检出水平 α 取 0.05^[6-7], 剔除水平 α^* 取 0.01^[6]。

首先, 默认 6 组试样中每组前 6 个有效断裂试样的拉伸强度数据为有效数据, 基于“下侧情形”的数据取舍方法, 优先识别出其每组数据的最小强度值。由式(1)得到 R'_6 , 每组的 R'_6 与检出临界值 $R_{0.95}(6)$ 和剔除临界值 $R_{0.99}(6)$ 对比。如果 $R'_6 < R_{0.95}(6)$, 则表明该组拉伸强度数据中无离群值, 需全部保留; 如果 $R_{0.95}(6) < R'_6 < R_{0.99}(6)$, 则表明该组拉伸强度数据中的最小值为歧离值, 可根据不同产品的检验要求对该组最小值进行剔除或者保留; 如果 $R'_6 > R_{0.99}(6)$, 则表明该组拉伸强度数据中的最小值为统计离群值, 通常会将该最小值剔除并更换。

从表 4 中数据可以看出, 根据奈尔检验法, 第 1、2、4 和 5 组试样的前 6 个有效断裂数据中无歧离值, 其前 6 个有效断裂试样的拉伸强度的均值即默认为各组拉伸强度均值; 第 3 组试样中的 5 348 MPa 为歧离值, 第 6 组试样中的 5 060 MPa 为统计离群值。分别将第 3 组试样的歧离值和第 6 组试样的统计离群值剔除, 并依序替换 1 个有效断裂试样的拉伸强度数据, 重复检验, 未发现歧离值, 进而最终确定出各组试样的拉伸强度均值。

表 4 奈尔检验法拉伸强度数据

Tab. 4 Nair test method tensile strength data

试样	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组
前 6 个有效断裂拉伸强度均值/MPa	6 096	6 115	6 143	6 042	6 217	6 067
前 6 个有效断裂拉伸强度最小值/MPa	5 682	5 783	5 348	5 463	5 943	5 060
R'_6	1. 191	0. 954	2. 286	1. 664	0. 787	2. 895
$R_{0.95}(6)$			2. 184			
$R_{0.99}(6)$			2. 679			
替换歧离值后的 6 个有效断裂拉伸强度均值/MPa	/	/	6 273	/	/	6 242
替换歧离值后的 6 个有效断裂拉伸强度最小值/MPa	/	/	5 837	/	/	5 676
替换歧离值后 R'_6	/	/	1. 254	/	/	1. 628
拉伸强度均值/MPa	6 096	6 115	6 273	6 042	6 217	6 242

3.2 格拉布斯检验法分析

按照 2.2 节中所述格拉布斯检验法对表 3 中的数据进行分析,分析过程及结果见表 5。其中 s 为每组前 6 个有效断裂试样数据的标准差,检出水平 α 取 0.05^[6-7],剔除水平 α^* 取 0.01^[6]。

首先,默认 6 组试样中每组前 6 个有效断裂试样的拉伸强度数据为有效数据,基于“下侧情形”的数据取舍方法,优先识别出其每组数据的最小强度值,由式(2)得到 G'_6 ,每组的 G'_6 与检出临界值 $G_{0.95}(6)$ 和剔除临界值 $G_{0.99}(6)$ 对比,如果 $G'_6 <$

$G_{0.95}(6)$,则表明该组拉伸强度数据中无离群值,需全部保留;如果 $G_{0.95}(6) < G'_6 < G_{0.99}(6)$,则表明该组拉伸强度数据中最低值为歧离值,可根据不同产品的检验要求对该组最小值进行剔除或者保留;如果 $G'_6 > G_{0.99}(6)$,则表明该组拉伸强度数据中最低值为统计离群值,通常会将该最低值剔除并更换。

从表 5 中数据可以看出,根据格拉布斯检验法,第 1 组~6 组试样的前 6 个有效断裂数据中均无歧离值,其前 6 个有效断裂试样的拉伸强度均值即为最终确定的各组试样的拉伸强度均值。

表 5 格拉布斯检验法拉伸强度数据

Tab. 5 Grubbs test method tensile strength data

试样	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组
前 6 个有效断裂拉伸强度均值/MPa	6 096	6 115	6 143	6 042	6 217	6 067
前 6 个有效断裂拉伸强度标准差/MPa	273. 699	287. 401	465. 533	403. 877	212. 635	597. 539
G'_6	1. 513	1. 155	1. 707	1. 432	1. 286	1. 684
$R_{0.95}(6)$			1. 922			
$R_{0.99}(6)$			1. 944			
强度均值/MPa	6 096	6 115	6 143	6 042	6 217	6 067

3.3 顺序取值法分析

按照 2.3 节中所述顺序取值法对表 3 中的数据进行分析,此标准不涉及取值方法,保留前 6 个

有效断裂试样的拉伸强度数据,并将其均值视为各组试样的拉伸强度均值,结果见表 6。

表 6 不同取舍方法下 T800 级碳纤维复丝拉伸强度均值对比

Tab. 6 Comparison of the average tensile strength of T800 carbon fiber multifilament under different trade-off methods

检验方法	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组
奈尔检验法/MPa	6 096	6 115	6 273	6 042	6 217	6 242
格拉布斯检验法/MPa	6 096	6 115	6 143	6 042	6 217	6 067
顺序取值法/MPa	6 096	6 115	6 143	6 042	6 217	6 067
全样本法/MPa	6 143	6 204	6 135	6 025	6 243	6 115

3.4 全样本法分析

按照 2.4 节中所述全样本法对表 3 中的数据进

行分析,保留 8 个有效断裂试样的拉伸强度数据,并将其均值视为各组试样的拉伸强度均值,结果见

表 6。

3.5 不同分析方法结果对比

4 种不同数据取舍方法下某国产 T800 级碳纤维拉伸强度均值的统计结果见表 6。基于表 3 中的 48 个有效断裂试样源自同一碳纤维轴,且在相同制样和测试条件下进行测试,故认为该 48 个有效断裂试样的拉伸强度均值 6 144 MPa 更接近该轴碳纤维拉伸强度的“真值”。

将 4 种不同数据取舍方法下获得的每组强度均值与 6 144 MPa 间的差值,近似为不同取舍方法下获得的每组强度均值与该轴碳纤维复丝拉伸强度“真值”间的偏倚,具体数据见表 7,可以看出与格拉布斯法和顺序取值法相比,奈尔检验法更接近“真值”。分析其原因,首先,奈尔检验法采用的

标准差为固定值,该值可以通过不同产品拉伸强度检验数据下的大数据统计而获得,而格拉布斯法采用的标准差仅为 6 个数据样本的标准差,后者的各试样组间的标准差波动范围更大,发生误判的几率也更大;此外,从表 1 和表 2 的临界值表也可以看出,奈尔检验法对应的检出临界值和剔除临界值均小于格拉布斯法的临界值,前者对歧离值和统计离散值的辨识度更高。例如,同样为表 3 中前 6 个有效断裂试样的拉伸强度数据,奈尔检验法识别出 3[#] 试样含有 1 个歧离值,6[#] 试样中含有 1 个统计离群值,而格拉布斯法均未识别出。故认为针对国产 T800 级碳纤维拉伸强度个值的取舍,奈尔检验法对统计数据离群值的辨识灵敏度高于格拉布斯检验法。

表 7 不同取舍方法下 T800 级碳纤维复丝拉伸强度均值差值对比

Tab. 7 Comparison of the average tensile strength differences of T800 carbon fiber multifilament under different trade-off methods

检验方法	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	合计
奈尔检验法/MPa	-48	-29	129	-102	73	98	121
格拉布斯检验法/MPa	-48	-29	-1	-102	73	-77	-184
顺序取值法/MPa	-48	-29	-1	-102	73	-77	-184
全样本法/MPa	-1	60	-9	-119	99	-29	1

进一步分析表 6 和表 7 中第 1~6 组试样的每组数据,发现尽管奈尔检验法辨识度更高,但同样存在剔除歧离值后拉伸强度数值波动较大的问题。例如第 3 组试样,如将歧离值 5 348 MPa 剔除后更换 1 个有效断裂试样的拉伸强度,该组拉伸强度均值由 6 143 MPa 增加至 6 273 MPa,单从本组拉伸强度均值来看,剔除后的拉伸强度均值与该轴拉伸强度“真值”间产生了更大的正偏倚。当然,如果剔除后更换的有效断裂强度偏低,则将会产生负偏倚。

基于大量实践经验并结合上述取舍方法的分析,作者依据 GB/T 3362—2017 和 GB/T 4883—

2008 提出一种新型的拉伸强度数据取舍方法:每组试验测 10 个试样,每组测试有效断裂试样应不少于 6 个,按照奈尔检验法对前 6 个有效断裂试样的拉伸强度数值进行取舍,如存在歧离值则保留该歧离值并增加相应数量的有效断裂试样的拉伸强度值;如果存在统计离群值,剔除该离群值后再增加相应数量的有效断裂试样的拉伸强度值;如有效试样不足 6 个时,应重新进行试验。从表 8 中数据可以看出,利用该方法对表 3 中的碳纤维拉伸强度数据进行取舍后,拉伸强度均值更接近全样本法得到的该轴碳纤维拉伸强度“真值”。

表 8 T800 级碳纤维复丝拉伸强度测试数据新取舍方法与全样本法数据对比

Tab. 8 Comparison of new method and full sample method for tensile strength test data of T800 carbon fiber multifilament

检验方法	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	合计
全样本法/MPa	-1	60	-9	-119	99	-29	1
新方法/MPa	-48	-29	-3	-102	73	98	-11

一种碳纤维复丝拉伸强度数据取舍新方法的应用举例:某国产 T800 级碳纤维,统计其在 2021 年全年稳定生产期间测试的 3 205 组拉伸强度数据,得

到其批次均值为 6 043 MPa,总体标准差为 188 MPa,取奈尔检验法检出临界值 $R_{0.95}(6)$ 为 2.184 和剔除临界值 $R_{0.99}(6)$ 为 2.679,得到该型号

碳纤维拉伸强度数据基于奈尔检验法的歧离值为 $(\bar{x}-411)$ MPa 和统计离群值为 $(\bar{x}-504)$ MPa。故在质量管理体系或客户认可的情况下,该型号碳纤维在 2022 年某月某日的日常检验过程中,测得某组前 6 个有效断裂试样的拉伸强度数据分别为 5 986、6 347、6 035、6 189、5 612、6 450 MPa,其组内均值为 6 103 MPa,基于奈尔检验法发现其中 5 612 MPa 为歧离值(与均值间的差值在 411~504 MPa),需要保留该歧离值且再增加 1 个有效断裂试样的拉伸强度数据(例如 6 153 MPa,该新增数据为非歧离值或统计离群值),故该组拉伸强度均值取该 7 个有效断裂试样的拉伸强度均值,为 6 110 MPa;另一组前 6 个有效断裂试样的拉伸强度数据分别为 5 885、6 116、5 397、6 258、6 553、6 246 MPa,其组内均值为 6 076 MPa,基于奈尔检验法发现其中 5 397 MPa 为统计离群值(与均值间的差值大于 504 MPa),故需要剔除该统计离群值,并增加 1 个有效断裂试样的拉伸强度数据(例如 6 185 MPa,该新增数据为非歧离值或统计离群值),故该组拉伸强度均值取舍后的 6 个有效断裂试样的拉伸强度均值为 6 207 MPa。

4 结论

(1) 基于同一轴某国产 T800 级碳纤维的拉伸强度数据,分别选用 4 种不同数据检验方法进行取舍。发现奈尔检验法对统计数据离群值的辨识灵敏度高于格拉布斯检验法。

(2) 基于 GB/T 3362—2017 和 GB/T 4883—

2008,提出一种新的拉伸强度数据取舍方法,采用该方法得到的拉伸强度均值更接近全样本检验法得到的拉伸强度“真值”。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 王成国,朱波. 聚丙烯腈基碳纤维[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-10.
- [2] 武娟娟,管全梅,郭金城. 国产大丝束碳纤维在轨道车辆部件中的应用研究[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(4): 30-34.
- [3] 张锦伟,梁燕. 制样过程中影响 PAN 基碳纤维复丝拉伸性能准确性的因素[J]. 高科技纤维与应用, 2017, 42(1): 53-57.
- [4] 中国国家标准管理委员会. 聚丙烯腈碳纤维: GB/T 26752—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 碳纤维复丝拉伸性能试验方法: GB/T 3362—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [6] 国家标准化管理委员会. 数据的统计处理和解释 正态样本离群值的判断和处理: GB/T 4883—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [7] 邹秀娟,张洪池,王娟. 碳纤维复丝拉伸强度数据的取舍探究[J]. 高科技纤维与应用, 2017, 42(3): 60-64.

坚定文化自信

把握时代脉搏

聆听时代声音