

# 硼纤维拉伸强度分布特征与其内含缺陷的关系

Distribution Character of Tensile Strength  
and Intrinsic Defects in Boron Fibre

蔡杉, 孙长义 (北京航空材料研究院, 北京 100095)

CAI Shan, SUN Chang-yi

(Institute of Aeronautical Materials Beijing, 100095, China)

[摘要] 采用单一 Weibull 统计分布函数及缺陷引发断裂的不同机制来描述拉伸强度的分散性及其与纤维特性的内在联系。结果发现具有不同断裂机制的缺陷所引发的拉伸断裂其强度分布分别符合 Weibull 分布, 并具有各自独特的形态和参数, 从而可从统计学角度对纤维所含缺陷及纤维性能进行分类和描述。

[关键词] 硼纤维; weibull 分布; 断裂机制

[中图分类号] TB 301; TQ 346. 3 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4381 (1999) 05-0043-04

**Abstract:** The relation of distribution character of tensile strength and intrinsic defects in boron fibre are described by single weibull distribution function and the different mechanism of fracture. The results show that the distribution of tensile strength of intrinsic defects having different mechanism of fracture fit single weibull distribution, and have each particular shape and parameter. Then the intrinsic defects in boron fibre are classified and described by statistical means.

**Key words:** boron fibre; weibull distribution; fracture-mechanism

硼纤维是脆性材料, 其拉伸断裂是由内部各种缺陷引发的。前人曾对几种常见缺陷引发断裂的情况进行了研究, 认识到其拉伸强度具有一定的分布特征, 可用 Weibull 函数来描述。但在这种研究中未能发现不同的缺陷引发的断裂强度分布具有不同的特征, 对不同缺陷引发的断裂强度数值应分别用 Weibull 函数进行处理。

根据以往实验认为, 相同系统 (相同的生产设备及生产工艺) 的纤维总体, 其内含各种类型缺陷对应的拉伸强度分布具有各自不同的特征。这种分布特征具有一定的稳定性, 因此可以此对各类缺陷进行分类描述。本工作将建立这种分布特征与各类缺陷的对应关系并从断裂力学角度探讨产生这种分布差异的机理。

## 1 研究方法

采用二参数单一 Weibull 函数 (以下未作说明均指

单一 Weibull 函数) 描述强度的分布特征。硼纤维中含有多种具有不同断裂机制的缺陷类型, 每种类型的缺陷对应的拉伸强度都可用 Weibull 函数进行处理。若一次纤维生产中含有的缺陷不止一种, 则不能简单地用 Weibull 函数来处理, 而应将不同缺陷对应的强度值分别用 Weibull 函数处理。

Weibull 函数的分布函数和概率密度函数为:

$$F(\sigma) = P(\delta \leq \sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m} \quad \sigma > 0$$

$$f(\sigma) = \frac{m}{\sigma_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m} \quad \sigma > 0$$

其中参数  $m$  和  $\sigma_0$  分别为形状参数和特征强度。采用精度较高的极大似然法来估计其值。

对一组强度试验值, 可通过统计计算得出其数学值即此组强度值所代表纤维总体的平均强度  $E(\sigma)$ :

$$E(\sigma) = \int_0^{\infty} \sigma \cdot f(\sigma) d\sigma = \dots = \sigma_0 \int_0^{\infty} e^{-y} y^{\left(\frac{1}{m} + 1\right) - 1} dy = \sigma_0 \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right)$$

其中  $\Gamma(1/m + 1)$  可由高斯-拉盖尔求积公式近似计算而得出。

由于用 Weibull 函数对各缺陷进行分类描述, 所以对一组强度值是否符合 Weibull 分布的判断就很重要。为此采用皮尔逊检验法, 又称  $\chi^2$ -检验法, 判断一组数据是否符合 Weibull 分布。

以上的统计计算和处理均用 VB 5.0 编程进行。  
为达到研究所有缺陷的目的, 共进行了约 1400 根次的拉伸和断口观察实验。特地选用含缺陷较多、性能较差的  $\phi 140\mu\text{m}$  有涂层的硼纤维为实验材料。将其测量直径后制成标距为 50mm 的试样进行拉伸破坏, 在光学显微镜上放大 500 ~ 800 倍观察断口形貌, 并将一些不太清晰的断口在扫描电子显微镜下观察。

2 各类缺陷对应的拉伸强度分布特征

实验发现缺陷类型有: 界面弱点、钨芯弱点、近似孔洞、径裂、夹质、外边界、环横裂和复合缺陷。  
从国产带涂层纤维总体的拉伸强度数据中分别随机抽取 200 个数据和 50 个数据进行 Weibull 统计处理, 结果表明: 200 个数据的强度直方图呈复杂多峰状态, 断口观察表明此组纤维断裂由多种缺陷引发, 经  $\chi^2$ -检验法检验不符合 Weibull 分布; 50 个数据的强度直方图呈单峰形式, 但经  $\chi^2$ -检验法检验也不符合 Weibull 分布, 经断口观察发现此组纤维的断裂主要由界面弱点引发, 但也有些数据是由其他缺陷引发的, 如近似孔洞。这说明当纤维中含有不止一种缺陷时, 其强度分布不符合 Weibull 分布。

对以上纤维总体中由界面弱点、钨芯弱点、近似孔洞、环横裂、夹质五种缺陷引发的断裂强度数据分别进行 Weibull 统计处理。结果发现它们的强度分布直方图都呈如图 1 近似孔洞对应强度的单峰分布形态, 且经  $\chi^2$ -检验法检验均符合 Weibull 分布。这说明对一纤维总体中各类缺陷引发断裂的强度数值分别用 Weibull 函数处理是适宜的。各缺陷对应的强度分布有自己独特的形态及参数, 其结果见表 1 及图 2。将由近似孔洞缺陷引发的断裂强度数据量进行扩充及减低后再进行统计处理, 其结果如表 1 所示, 经  $\chi^2$ -检验法检验均符合 Weibull 分布。从中可看出随着数据的增多其参数渐趋稳定并更接近真实值。另外再从由界面弱点引发的断裂强度数据中随机抽取 50 个进行处理的结果见表 1, 经  $\chi^2$ -检验法检验符合 Weibull 分布。从中可知, 当数据较少时, 统计处理的结果中平均强度较稳定, 比其它参数更接近真实值, 这是由统计学原理决定的。另外, 从表 1 及图 2 中可知, 由钨芯缺陷、界面弱点引发的断裂强

度分布特征几乎相同, 在排除因统计数量不足造成的正常偏差后, 二者似应视为同一类型的缺陷。

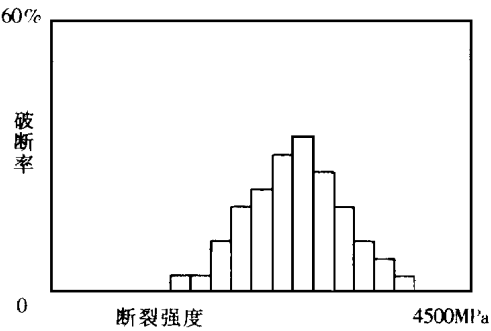


图 1 近似孔洞引发的断裂强度分布

Fig. 1 Intensity distributing of proximate hole

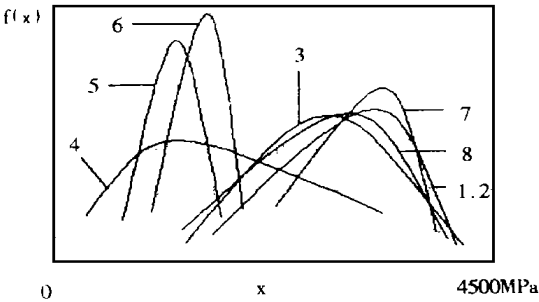


图 2 各缺陷对应的 Weibull 概率密度曲线

Fig. 2 Intensity distributing of all intrinsic defects

外边界对应的断裂强度分布较复杂。它分为有涂层和无涂层纤维两种情况。有涂层纤维总体中由外边界引发的断裂强度分布直方图如图 3 所示。从中可知其呈双峰状态, 经  $\chi^2$ -检验法检验不符合 Weibull 分布, 说明它们不是一种类型的缺陷。对其断裂面用扫描电镜观察发现: 断裂强度值落在前一个峰数值范围内的断裂面较平整, 引发原因大多为结晶瘤等异常大胞的外边界沟槽, 有时也为涂层与  $\text{B}_4\text{C}$  涂层结合处的大开裂所致 (对无涂层纤维来说为纤维本身胞状结构的沟槽); 断裂强度值落在后一个峰数值范围内的断裂面大多为不平整的斜面, 镜面区只呈一个点状, 引发原因大致为涂层表面的一些点状缺陷如小孔、小裂等, 也有一些是由涂层本身胞状结构与  $\text{B}_4\text{C}$  涂层在沉积结合时留下的点状空隙引发的。因此, 分析认为外边界缺陷应再分为外边界沟槽缺陷、外边界点状缺陷两类, 它们对应各自不同的 Weibull 分布, 二者经  $\chi^2$ -检验法检验均符合 Weibull 分布, 其统计结果见表 1 及图 2。

以上数据是为研究而选择的。在立式设备生产中, 纤维缺陷主要为界面及钨芯缺陷, 并随着工艺的改进,

缺陷已得到进一步的控制。

另外，对  $\phi 136\mu\text{m}$  的国产无涂层硼纤维、前苏联无涂层纤维以及俄罗斯无涂层纤维进行比较实验。三者的数据经观察都为主要由纤维本身胞状结构（也有结晶瘤）引发的外边界沟槽缺陷引发的断裂强度，经  $X^2$ -检验法检验均符合 Weibull 分布。从三者中的同一类型的缺陷引发的断裂强度 Weibull 分布各不相同可知，不同系统总体，其同一类缺陷引发的断裂强度分布具有不同的 Weibull 分布，具有对应各自系统的分布参数标准值。

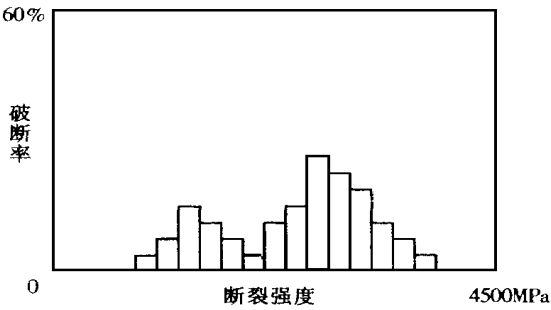


图 3 外边界引发的断裂强度分布直方图

Fig. 3 Intensity distributing of out-boundary

表 1 有涂层纤维总体各缺陷对应断裂强度值的 Weibull 统计处理结果

Table 1 The weibull statistical result of fracture intensity of coated fibre

	形状参数 m	特征强度 $\alpha_0$ / MPa	平均强度 $E(\sigma)$ / MPa	数据个数	$X^2$ -检验
界面①	5.63	3205	2988	114	符合 weibull 分布
①中随机 50 根次	6.355	3163	2968	50	符合 weibull 分布
钨芯缺陷②	5.57	3132	2919	41	符合 weibull 分布
近似孔洞③	4.86	3006	2780	134	符合 weibull 分布
③的数据放大	4.969	2987	2765	225	符合 weibull 分布
③的数据缩小	5.267	2953	2743	80	符合 weibull 分布
径裂（各类型）	2.88	2718	2443	30	不符合 weibull 分布
径裂外端④	2.01	1748	1554	162	符合 weibull 分布
夹杂⑤	4.18	1521	1395	42	符合 weibull 分布
外边界总体	4.01	2919	2670	196	不符合 weibull 分布
外边界沟槽⑥	5.867	1744	1629	57	符合 weibull 分布
外边界点缺陷⑦	7.292	3253	3073	139	符合 weibull 分布
环横裂⑧	5.22	3112	2890	33	符合 weibull 分布
复合缺陷⑨	2.93	2593	2333	25	不符合 weibull 分布
①至⑨总体	3.69	2895	2636	747	不符合 weibull 分布

纤维中引发断裂的另一种严重缺陷为径向裂纹。其对应的断裂强度分布直方图呈复杂分布状，且经  $X^2$ -检验法检验不符合 Weibull 分布，说明径裂不应视为单一缺陷类型。对其进行断面观察得知径裂引发断裂的形态有很多，如：径裂在外端引发的断裂、径裂在界面附近引发的断裂、近芯小径裂、贯穿径裂、径裂剪切等。由于实验中各小分类缺陷对应数据量的不足，无法一一进行研究。但发现经热压后由径裂外端引发的断裂情况特别多，于是对此作了统计处理发现其强度分布直方图呈单峰状，经  $X^2$ -检验符合 Weibull 分布，其统计处理结果如图 2 及表 1 所示。从中可知，径裂中径裂外端应视为

具有自己独特分布特征的一类缺陷。

纤维中最复杂的一类缺陷为复合缺陷。从断裂面上观察，这种复合缺陷为由以上几类缺陷同时引发断裂的情况，且大部分都是由径裂与其它类型缺陷的复合，这在其他文献中尚未见报道。由于情况复杂且数量小，尚未作研究。

综上所述，从 Weibull 统计分布的角度看，可将引发纤维断裂的缺陷分为以下几种具有各自独特分布的类型（按平均强度从小到大的排列）：夹杂、径裂外端、外边界沟槽、（复合断裂）、近似孔洞、环横裂、钨芯缺陷（界面弱点）、外边界点状缺陷。

4 各类缺陷对应不同强度分布特征的力学机理

纤维中各类缺陷对应的拉伸强度具有不同的 Weibull 分布形态, 其原因是它们具有不同的断裂机制。本文引入包括应力强度因子及断裂韧性概念在内的 Irwin 断裂模型来分析。一般, 在平面应变情况下, 并经塑性区修正及换算后得 (1) 式:

$$\sigma_c = \frac{\phi_0 K_{IC}}{M_1 M_2 \left\{ \pi \left[ \alpha + \frac{1}{4} \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

其中,  $\phi_0$  是第二类椭圆积分, 为  $a/c$  的函数 ( $a$ 、 $c$  分别为椭圆缺陷的短、长轴半径), 当  $a/c$  在 0 至 1 时  $\phi_0$  范围为 1 至 1.5708;  $M_1$ 、 $M_2$  为试样的前后自由截面修正系数, 是  $a/h$  和  $a/c$  的函数 ( $h$  为试样厚度);  $K_{IC}$  为材料的断裂韧性;  $\sigma_s$  为材料的屈服极限。从中可知, 材料的断裂强度值最终为  $a$ 、 $a/h$  或  $a/c$  的函数, 也即与缺陷的大小、位置、形态有关。

纤维中各类缺陷具有不同的大小、位置和形态, 分别属于不同的断裂情况。如径裂外端可视为有限宽平板的平面应变状态受拉伸有中心裂纹或边裂纹的情况; 横环裂、夹杂可视为有限体有浅埋藏裂纹的情况; 外边界沟槽可视为有限体有表面深裂纹的情况; 外边界点缺陷可视为有限体有表面浅裂纹的情况; 近似孔洞可视为无限体中有椭圆裂纹情况; 钨芯缺陷和界面弱点一样为有限体有深埋藏裂纹的情况。不同的断裂情况有不同自由截面修正系数的计算方法及大小。因此, 缺陷总体尺寸大, 界面修正系数大而第二类椭圆积分值小的缺陷类型引发的断裂强度平均值必定小, 如夹杂和径裂; 相反缺陷总体尺寸小, 界面修正系数小而第二类椭圆积分值大的缺陷类型引发的断裂强度平均值必定大, 如外边界点缺陷。当然这三个因素是同时起作用的, 应综合考虑, 而不应单个地分析某一个因素。如夹杂和环横裂的断裂强度计算公式相似, 且夹杂的  $\phi_0$  值较环横裂的  $\phi_0$  值大, 但环横裂的  $a$  及  $M_2$  比较小, 所以环横裂从总体上看其强度平均值较夹杂大; 而钨芯、界面弱点的力学模型及计算公式里的参数都相同, 所以二者的强度统计结果均十分相近, 从断裂力学及统计处理结果的分布特征上看二者应视为同一种缺陷。另一方面, 缺陷尺寸大小、形状、位置稳定性大的如外边界缺陷和界面弱点, 其对应的断裂强度分散性就小, 表征强度分散性大小的参数  $m$  就大; 而缺陷尺寸大小、形态、位置稳定性差的如径裂外端, 其对应的断裂强度分散性就大, 表征强度分散性大小的参数  $m$  就小。

5 结论

(1) 同一系统的纤维总体, 其内含各类缺陷对应的强度可分别用单一 Weibull 分布函数来处理, 并且由于引发断裂的力学机制不同而具有不同的 Weibull 分布特征。

(2) 不同系统的纤维其由同一类缺陷引发的断裂强度分布具有不同的分布特征。

(3) 缺陷对应强度分布的参数估计由于少量 ( $n=50$ ) 随机取样的不同, 使参数  $m$  具有波动性, 而由此计算出的纤维总体强度期望值——平均强度  $E(\sigma)$  却较稳定。

(4) 将应力强度因子及断裂韧性的力学模型引入到纤维断裂机理分析中, 归纳出不同缺陷产生不同强度分布特征的原因是由于不同类型的缺陷具有不同的尺寸、形态和所处位置的不同, 从结果看这种分析是适宜的。

参考文献

[1] 韩虞羹. 应用数理统计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989, 132.  
[2] 齐治昌. 数值分析 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1987, 72.  
[3] J. Vega-Boggio, O. Vingsbo. Boron Fibres Tensile Strength Fracture Nucleation and Material Parameters [C], ICCM-2, 1978.  
[4] W. J. Weibull, A Statistical Distribution Function of Wide Applicability [J], Joural Applird Meechics, S. 1951, 9.

[作者简介] 蔡杉 (1971-), 男, 工程师, 现从事金属基复合材料的研究。联系地址: 北京 81 信箱 3 分箱 (100095)

\*\*\*\*\*

飞机复合材料专用刀具镍铁基合金

美国 Special Metal Corp. 发展了一种专用加工飞机复合材料的刀具合金, 称为 NiLo365 合金。这种时效硬化合金含 43. 5% Ni, 3. 3% Nb, 1. 4% Ti, 余为 Fe。该合金室温硬度达 HRC39, 屈服强度 1000MP, 为普通刀具用镍铁基合金的三倍。较高的硬度, 强度和摸量可以在加工时降低刀具表面损伤, 减少维修, 减少刀具材料用量。在复合材料固化温度 200~370 范围, 该和金能保持较低的线膨胀系数。 (全宏声)