

用小角 X 射线散射研究亚麻纤维分形维数与断裂强度的关系

赵玲¹, 王春红¹, 李昱芑², 刘家兴¹, 郑振荣¹

(1. 天津工业大学 纺织学部, 天津 300387; 2. 天津市纺织纤维检验所, 天津 300192)

摘要:用小角 X 射线散射法(SAXS)研究亚麻纤维的孔隙结构分形特征, 并且分析亚麻纤维断裂强度与分形维数之间的关系. 结果表明: SAXS 是测试分形维数的一种有力工具; 亚麻纤维的分形维数是 2~3 之间的分数, 属于表面分形; 亚麻纤维的分形维数与断裂强度之间的关系可以用二次曲线来拟合, 拟合相关度 R^2 能够达到 0.908 6, 具有很好的相关性, 且亚麻纤维的断裂强度随着其分形维数的增大而减小.

关键词: 小角 X 射线散射法; 亚麻纤维; 分形维数; 断裂强度

中图分类号: TS101.1; TS102.221

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2014)01-0025-04

Relationship between fractal dimension and breaking strength of flax studied by small angle X-ray scattering

ZHAO Ling¹, WANG Chun-hong¹, LI Yu-peng², LIU Jia-xing¹, ZHENG Zhen-rong¹

(1. Division of Textiles, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Textile Fibre Inspection Institute, Tianjin 300192, China)

Abstract: The small angle X-ray scattering (SAXS) is used to study the fractal of flax fiber pore structure, and the relationship between the breaking strength and fractal dimension of flax fiber is analyzed. The results show that SAXS is a powerful tool to test the fractal dimension; the fractal dimension of flax fiber is 2~3 which is surface fractal; the relationship between the breaking strength and fractal dimension of flax fiber can be fitted by a quadratic curve, the fitting correlation coefficient R^2 is 0.908 6 and has a good correlation, and the breaking strength is anti-related with fractal dimension.

Key words: SAXS; flax fiber; fractal dimension; breaking strength

1977年,法国数学家 Mandelbrot 首次提出分形理论(fractal theory). 分形几何学是一门以非规则几何形态为研究对象的新兴学科^[1-2],分形的原意是不规则的、分散的、支离破碎的,具有自相似性、无标度性和自仿射性^[1]. 1984年, Mandelbrot 首次将分形理论用于材料研究; 1993年, 龙期威在分析了大量实验的基础上,提出了材料中的多度域分形^[1]. 此后,分形理论在材料科学中的应用越来越多,主要用来研究材料的韧性、断裂韧性、磨损、强度、界面等方面^[1-2]. 成志芳等^[3]研究了 Al/Ni-YPSZ 复合涂层力学性能与分形维数的关系,用二次曲线拟合所得结果,结果表明材料的断

裂强度随分形维数的增大先减小后增大. 章冠人^[4]研究了韧性和脆性断裂的分形维数,指出在韧性断裂中,材料的断裂韧性随分形维数的增大而减小;在脆性断裂中,材料的断裂韧性随分形维数的增大而增大. 天然植物纤维中有孔隙存在,纤维的多孔结构对纤维的物理性能有着很大的影响,如吸湿、隔音、强度等^[5-6]. 孔隙结构的分形维数可以定量描述孔隙结构的复杂程度,孔隙结构的分形维数是介于 2~3 之间的分数,分形维数越接近 2,表明孔隙结构越均匀;分形维数越接近 3,表明孔隙结构越复杂^[1,7]. 分形维数的计算方法有很多,其中经典的有自相似维数和盒计数维数

收稿日期: 2013-06-06

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(11JCZDJC22300); 中国纺织工业协会科技指导性项目(2008026, 2012002)

第一作者: 赵玲(1988—),女,硕士研究生.

通信作者: 王春红(1980—),女,副教授,硕士生导师. E-mail: cn_wangch@163.com

等. 小角 X 射线散射(SAXS)是测定维数的一种新的方法^[1-2,9],本文用 SAXS 技术测试了亚麻纤维的分形维数,该方法对材料无损伤,对测试环境条件无要求,测试时间短,得到的试样信息是统计的结果^[9];在此基础上分析了亚麻纤维的断裂强度与其分形维数之间的关系,并建立关系模型,为有效预测纤维的断裂强度提供一定的理论指导.

1 实验部分

1.1 实验样品

实验选用 6 种不同产地、不同脱胶方式的亚麻纤维,其详细信息如表 1 所示.

表 1 实验样品介绍

Tab.1 Introduction of experimental sample

序号	产地	特点		
		沤麻程度	纤维细度/ μm	纤维长度/mm
1	黑龙江元宝纺织公司	沤麻处理,效果较好	105.61	700
2	黑龙江元宝纺织公司	沤麻处理,略次于 1 号	108.86	700
3	黑龙江元宝纺织公司	沤麻处理,略次于 2 号	112.29	700
4	黑龙江元宝纺织公司江	未沤麻处理(机械脱胶)	98.17	200
5	加拿大复合材料创新中心	未沤麻处理(机械脱胶)	104.29	200
6	加拿大复合材料创新中心	经过沤麻处理	115.89	200

由表 1 可知,亚麻纤维经沤麻处理后,在纤维长度相同的情况下,纤维细度越细,其沤麻效果越好.

1.2 亚麻纤维分形维数测试

本实验在上海同步辐射光源 X 射线小角散射站(SAXS)完成,其设备能量可达 20 keV,能量分辨率为 $6 \times 10^{-4} @ 10 \text{ keV}$,光子通量为 $10^{11} \text{ S}^{-1} @ 10 \text{ keV}$,最小可测量角度为 0.023° ,测试时样品到探测器距离为 5 m,入射 X 射线波长为 0.124 nm. 以束纤维进行实验,曝光时间为 50 s.

测试所得原始数据经 FIT2D 软件转换为 $I(q) - q$ 原始数据, 散射强度 $I_{\text{实际}} = I_{\text{样品}} - K * I_{\text{背底}}$, $K = \frac{\text{样品后电离值/样品前电离值}}{\text{背底后电离值/背底前电离值}}$. 作出 $I(q) - q$ 的双对数 $\ln I(q) - \ln q$ 曲线图($I(q)$ 为实际散射强度 intensity; q 为散射矢量 $q = \frac{4\pi \sin \theta}{\lambda}$; θ 为散射半角; λ 为入射 X 射线波长). 在 $\ln I(q) - \ln q$ 图中,求最接近直线的线段的斜率 $-a$,由 Porod 公式 $I(q) = I_e(\rho_A - \rho_B)^2$ 给出 $I(q) \propto q^{-a}$. 式中: a 为与分形维数有关的参数,也称 Porod 斜率,若 $3 < a < 4$,表示致密的物体,但表面粗糙,

呈表面分形,分形维数 $D = 6 - a$;若 $a < 3$,表示疏松体,为质量分形,分形维数 $D = a$.

1.3 亚麻纤维强度测试

采用美国英斯特朗公司制造的万能强力机,根据标准 ASTM D3822-07^[9],在标准大气压下测试亚麻纤维的断裂强度,测试时隔距为 25.0 mm,速度为 5 mm/min,每种纤维测试 30 组.

2 结果与讨论

2.1 亚麻纤维分形维数分析

图 1—图 6 所示为 1~6 组亚麻纤维的 $\ln I(q) - \ln q$ 图中最接近直线部分的直线拟合图,其拟合相关度分别为 0.999 2、0.999 4、0.999 7、0.999 5、0.999 9、0.999 8, 都有极好的线性相关性.

分别求出图 1—图 6 中拟合的直线的斜率, 如表

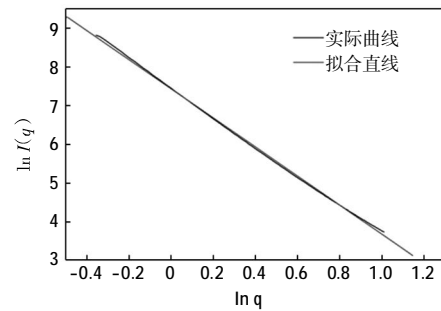


图 1 1 号样品 $\ln I(q) - \ln q$ 图

Fig.1 $\ln I(q) - \ln q$ figure of sample 1

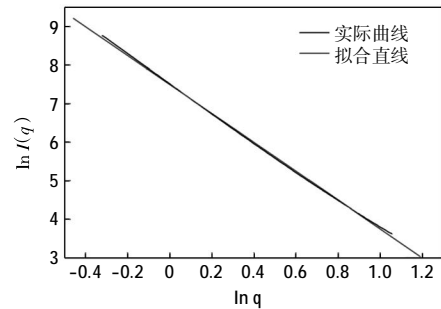


图 2 2 号样品 $\ln I(q) - \ln q$ 图

Fig.2 $\ln I(q) - \ln q$ figure of sample 2

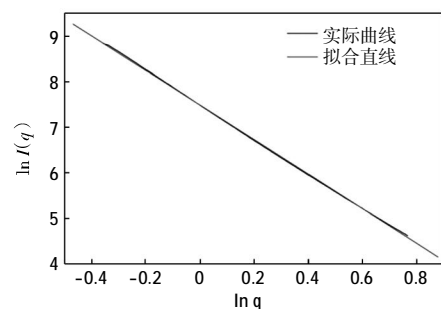


图 3 3 号样品 $\ln I(q) - \ln q$ 图

Fig.3 $\ln I(q) - \ln q$ figure of sample 3

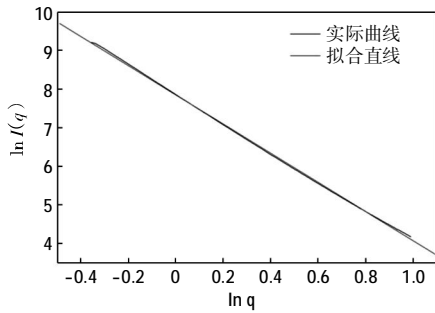


图 4 4号样品 $\ln I(q) - \ln q$ 图

Fig.4 $\ln I(q) - \ln q$ figure of sample 4

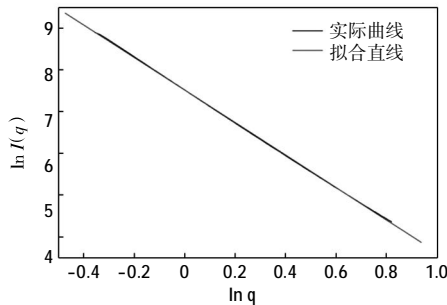


图 5 5号样品 $\ln I(q) - \ln q$ 图

Fig.5 $\ln I(q) - \ln q$ figure of sample 5

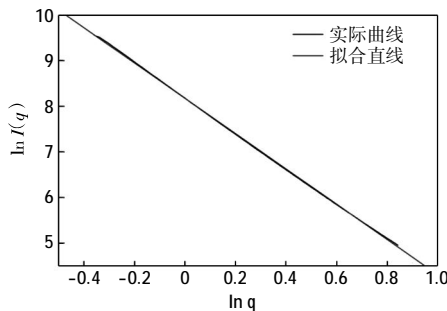


图 6 6号样品 $\ln I(q) - \ln q$ 图

Fig.6 $\ln I(q) - \ln q$ figure of sample 6

2 所示.可以看出,1~6号纤维中, $3 < a < 4$,分形维数 $D = 6 - a$,计算可得,其分形维数在 2.1~2.3 之间.

表 2 1~6号亚麻的分形维数

Tab.2 Fractal dimension of No.1-6 samples

样品编号	$\ln I(q) - \ln q$ 图斜率-a 值	分形维数
1	-3.750 4	2.249 6
2	-3.751 6	2.248 4
3	-3.791 1	2.208 9
4	-3.778 9	2.221 1
5	-3.896 5	2.103 5
6	-3.870 6	2.129 4

综上所述,6组试样的线性拟合效果均较好,验证了亚麻纤维的孔隙结构符合分形理论;亚麻纤维的分形维数是 2~3 之间的分数,且亚麻纤维的沤麻效果越

好,其分形维数越大,说明沤麻效果越好,亚麻纤维的孔隙结构越复杂.

2.2 纤维断裂强度与分形维数的关系

材料的力学性能与其分形维数有一定的关系,不同的断裂方式(如韧性断裂和脆性断裂),其断裂强度与分形维数的关系也不尽相同^[3-4,10-18].表 3 所示为 6 组亚麻纤维强度的测试结果.

表 3 亚麻纤维断裂强度测试结果

Tab.3 Results of breaking strength of flax fiber

样品编号	1	2	3	4	5	6
断裂强度/MPa	456.69	458.66	481.47	588.41	690.2	833.738

对亚麻纤维的分形维数和对应的断裂强度用二次曲线进行拟合,如图 7 所示,得出拟合二次函数为 $Y = 53\ 965.58 - 46\ 718.82X + 10\ 197.38X^2$,拟合相关度 R^2 为 0.908 6,相关度很好.

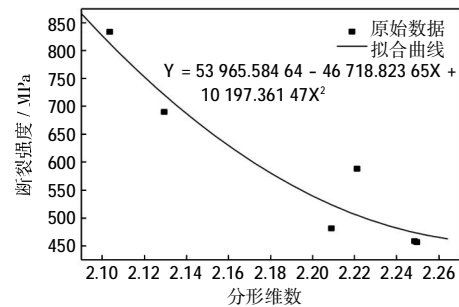


图 7 亚麻分形维数与断裂强度的关系拟合图

Fig.7 Fitting relationship between fractal and breaking strength of flax fiber

由图 7 可以看出,随着亚麻纤维孔隙结构分形维数的增大,亚麻纤维的断裂强度减小.这是因为随着亚麻纤维孔隙结构分形维数的增大,纤维的孔隙结构比较复杂,孔的形状、大小、分布不均匀严重,这样就使得纤维在拉伸过程中受到的拉力不能均匀地分散,导致断裂强度降低^[9].

3 结 论

(1) SAXS 是研究亚麻纤维分形特征的有力工具,用 SAXS 测试分形维数,对材料无损伤,对测试环境条件无要求,测试时间短,得到的试样信息是统计的结果,而传统的方法只能得到局部试样的信息.

(2) 亚麻纤维孔隙结构的分形维数是 2~3 之间的分数,沤麻效果越好,亚麻纤维分形维数越大,其孔隙结构越复杂.

(3) 亚麻纤维孔隙结构的分形维数与其断裂强度

(下转第 31 页)

大,其储存和损耗能力较强.织物的介电常数随着织物密度的增大呈现先增大后减小的趋势,从而在一定范围内增大织物密度可以提高织物的介电极化和损耗的能力.在所用3种规格纱线中,59 tex 纱线织造的织物介电常数最大.随着外电场频率的升高,纺织材料的介质极化现象减弱,介电常数值减小,各种织物的介电常数差值减小,能量损耗亦减小.因此,可以通过改进材料的性能,控制其组织结构和密度等来适当提高其介电常数,从而改善纺织材料的吸波效果.

参考文献:

- [1] 于名讯,赵均英,朱洪立,等.厘米波/毫米波兼容隐身湿纺织物研究[J].功能材料,2006,37(6):874-876.
- [2] 王建忠,朱纪磊,支浩,等.电磁辐射及其防护材料[J].材料导报,2013,27(4):51-54,62.
- [3] 王进美,朱长纯,李燕华.纳米复合金属涂层纺织品及制备工艺:中国,200510042890[P].2005-12-21.
- [4] 周祥.织物电磁特性及纺织天线的研究[D].苏州:苏州大学,2010.
- [5] 蒋洪晖,顾赵梅,于富强,等.功能纤维织物的制备及其吸波性能[J].表面技术,2010,39(5):72-76.
- [6] 张晓宁,王庆.安捷伦 4396B 阻抗分析仪在测试吸波材料复相对介电常数上的应用[J].安全与电磁兼容,2006(5):71-72.
- [7] 武岳山,于利亚.介电常数的概念研究[J].现代电子技术,2007(2):177-179.
- [8] 赵思.非织造布吸波材料的开发[D].天津:天津工业大学,2008.
- [9] 沈瑞庆,赵坚.纱线在微波频段的介电常数[J].华东纺织工学院学报,1984,10(4):125-131.
- [10] HEARLE J W S. The dielectric properties of fiber assemblies[J]. Textile Research Journal, 1956, 26(2):108-111.
- [11] 黄铭,彭金辉,张世敏,等.材料介电常数的测量方法及应用[C]//第十二届全国微波能应用学术会议.成都:四川省电子学会,2005:82-86.
- [12] HEARLE J W S. Capacity, dielectric constant, and power factor of fiber assemblies [J]. Textile Research Journal, 1954, 24(4):307-321.
- [13] 钱文虎.宽频介电谱仪测量误差分析[J].实验室研究与探索,2013,32(2):8-13.
- [14] 龚俊.《纺织品介电常数测定》实验中样品的选择[J].大学物理实验,2002,15(3):15-16.
- [15] University of British Columbia Library. ASTM D3822 -07 Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers[S]. Vancouver: University of British Columbia Library, 2007.
- [16] 苏燕.断裂韧性与断裂表面分形维数的相关研究[J].钢铁研究学报,1997,9(2):53-56.
- [17] 杨常青.分形与材料断裂[J].山西科技,2007(2):117-119.
- [18] 卢春生,白以龙.材料损伤断裂中的分形行为[J].力学进展,1990,20(4):468-476.
- [19] 徐志斌,谢和平.断裂构造的分形分布与其损伤演化的关系[J].武汉理工大学学报,2004,26(10):28-33.
- [20] 黄丹,廖太平,邓吉州,等.分形理论在断裂构造研究中的应用前景[J].重庆科技学院学报,2010,12(6):83-85.
- [21] 李静,尹衍升,马来鹏,等.分形理论在陶瓷材料断裂行为中的应用[J].稀有金属材料与工程,2007,36(1):707-709.
- [22] 叶瑞英,李亚琴,李静媛.分形维数与含 MnS 超高强度钢断裂韧性的关系研究[J].兵器材料科学与工程,2002,25(4):14-17.
- [23] 张萌.关于分形与材料断裂研究中的一些思考[J].南昌大学学报,2002,26(1):53-56.
- [24] 刘小渝,丁小明.分形理论与材料的断裂性能[J].黑龙江科技信息,2011(3):25-26.

(上接第28页)

之间的关系可用二次曲线来拟合,拟合曲线模型为 $Y = R_1X^2 - R_2X + R_3$,拟合相关度很好.

(4) 亚麻纤维的断裂属于韧性断裂,断裂强度随着纤维分形维数的增大而减小,分形维数越大,表明纤维的孔隙结构越复杂,其断裂强度越低.

参考文献:

- [1] 朱华,姬翠翠.分形理论及其应用[M].北京:科学出版社,2011.
- [2] 张济忠.分形[M].北京:清华大学出版社,2011.
- [3] 成志芳,吕广庶,王富耻,等. Al/Ni-YPSZ 复合涂层力学性能与分形维数的关系[J].新技术新工艺·热加工技术,2002(5):29-30.
- [4] 章冠人.韧性和脆性断裂的分形维数[J].爆炸与冲击,1996,16(2):117-121.
- [5] DANIEL T. Changes of cellulose fiberwall structure during drying investigated using NMR self-diffusion and relaxation experiments[J]. Cellulose, 2002(9):139-147.
- [6] MALONEY T C. The formation of pores in the cellwall [J]. Journal of Pulp and Paper Science, 1999, 25(12):430-436.
- [7] 曹海建,钱坤,李鸿顺.纱线截面孔隙结构的定量表述[J].天津工业大学学报,2009,28(3):38-40.
- [8] 朱育平.小角 X 射线散射-理论、测试、计算及应用[M].北