

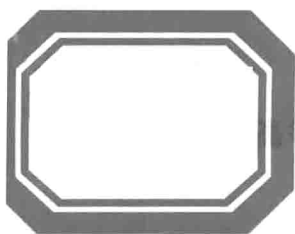
纺织服装高等教育部委级规划教材

纤维 集合体力学

Mechanics of Fiber Assemblies

© 顾伯洪 孙宝忠 编著

东华大学出版社



教育部委级规划教材

纤维 集合体力学

Mechanics of Fiber Assemblies

© 顾伯洪 孙宝忠 编著

东华大学出版社

内 容 提 要

纤维集合体是由柔性纤维以一定的纺织成型制造方法而形成的结构稳定的纺织品总称。纤维集合体力学研究各类纺织品在外力场作用下的结构变形和破坏过程。本书在叙述纤维集合体发展历史的基础上,介绍纤维集合体的多尺度结构、结构表征指标和力学性质,以材料/结构/性质一体化设计为主线,着重阐述纤维集合体的结构力学分析建模方法、力学性质预测和纤维集合体结构设计。书中涉及的纤维集合体种类包括纤维、平行长丝纱、加捻长丝纱和短纤维纱,二维和三维机织物、针织物、编织物及其增强复合材料,以及非织造布等。本书描述纤维集合体及其力学特征优化设计的详细体系,进而应用于纺织工艺技术优化和纤维集合体复合材料微观结构优化。

本书适用于纺织科学与工程、纺织材料,以及对非线性柔性体有兴趣的力学、复合材料等专业的高年级本科生和研究生教学或自学,也可作为纺织行业的工程师进行纤维集合体设计提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

纤维集合体力学/顾伯洪,孙宝忠编著. —上海:东华大学出版社,2014.8

ISBN 978-7-5669-0547-5

I. ①纤… II. ①顾… ②孙… III. ①纺织纤维—力学—研究 IV. ①TS102.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 142990 号

责任编辑 张 静

封面设计 魏依东

纤维集合体力学

顾伯洪 孙宝忠/编著

出 版: 东华大学出版社(上海市延安西路 1882 号,200051)

网 址: <http://www.dhupress.net>

天猫旗舰店: <http://dhdx.tmall.com>

营 销 中 心: 021-62193056 62373056 62379558

印 刷: 苏州望电印刷有限公司

开 本: 710 mm×1 000 mm 1/16 印张: 36

字 数: 809 千字

版 次: 2014 年 8 月第 1 版

印 次: 2014 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5669-0547-5/TS·504

定 价: 88.00 元

作者简介



顾伯洪, 1967 年出生于江苏省武进县, 1996 年获中国纺织大学(现更名: 东华大学)纺织材料专业博士学位, 现为东华大学纺织学院教授; 主要研究纺织结构复合材料冲击动力学、纤维集合体多尺度结构/性能一体化设计, 最近 5 年内教学和研究成果有: 在 *Philosophical Magazine* 等国际著名期刊上以第一或通讯作者发表的论文被科学引文索引(SCI)收录共计 75 篇, 其中在 *Journal of Composite Materials* 上发表 18 篇, 是该刊上发表论文最多的大中华区域作者; 由科学出版社出版专著《纺织结构复合材料冲击动力学》; 指导 7 位博士生和 18 位硕士生毕业, 其中《三维纺织结构复合材料压缩性能的应变率效应及动态特性分析》获 2009 年全国百篇优秀博士学位论文; 主持国家自然科学基金项目 4 项, 其中 1 项结题评价优秀; 担任《复合材料学报》三届编委和中国复合材料学会两届理事; 获宝钢优秀教师奖; 入选上海市曙光学者计划和教育部新世纪优秀人才支持计划。

E-mail: gubh@dhu.edu.cn



孙宝忠, 1978 年出生于山东省曹县, 2006 年获东华大学纺织材料专业博士学位, 现为东华大学纺织学院教授; 现任东华大学纺织学院高技术纺织品系副主任, 轻质结构复合材料研究所副所长; 主要研究纺织品结构和性能、轻质结构复合材料制备及力学、纤维集合体构造及力学、材料系统的频域分析、有限元计算和模拟等, 近 5 年内发表国际 SCI 期刊论文 60 余篇, 主持国家自然科学基金委、教育部、上海市科委、上海市教育发展基金委课题 7 项, 先后获得“上海市晨光学者”“上海市青年科技启明星”“全国优秀博士学位论文奖”等荣誉。

E-mail: sunbz@dhu.edu.cn

序

纤维集合体是纺织纤维通过纺织制造加工技术形成结构稳定的纺织品总称。纤维集合体力学研究各类纺织品在外力场作用下的结构变形和破坏过程。作为纺织力学的重要分支内容,纤维集合体力学对于纺织品结构设计、性能设计和进一步的制造工艺设计具有重要意义。相比于纤维集合体在人类文明史中扮演的重要角色,纤维集合体结构研究和力学性质研究则远远落后。纤维集合体随人类文明史的出现就开始使用了,但真正从科学意义上研究纤维集合体结构、纤维集合体受力与变形关系、纤维集合体受力破坏、纤维集合体刚度和强度理论等,始于20世纪初期。例如:对于加捻长丝纱,1907年法国人 Charles Gégauff 建立共轴螺旋线模型,研究加捻长丝纱结构和拉伸模量之间的关系;对于机织物,1913年德国人 Rudolf Haas 研究织物在双轴向应力下经、纬纱线卷曲变形,发现织物变形机理起源于纱线之间的剪切作用。目前一般认为1937年澳大利亚人 Frederick Thomas Peirce 的 *The Geometry of Cloth Structure* 一文代表纤维集合体力学进入织物结构层面研究。第二次世界大战之后,纤维集合体力学研究进入快速发展期,研究对象扩展至针织物、非织造布、编织物,研究尺度延伸至纤维、纱线、织物组织单元等多尺度结构层面,研究方法从解析方法发展至数值方法和一些非经典方法(如数理统计方法和人工神经网络方法等)。目前,纤维集合体力学研究对于低应力条件下的大变形问题(如织物悬垂变形和折皱变形)、高阶失稳问题(如多重屈曲变形)、高应变率加载问题(如弹道侵彻破坏)和疲劳问题已经有较好的结果。对于一些比较复杂的问题,如织物穿用过程中的渐变损伤、纤维集合体多尺度结构和细观结构统一表征指标等,也出现了解决问题的部分线索。展望未来,随着新型纤维的不断发现和发明,新型纺织制造技术不断发展,将涌现出结构繁多、性能优异的纤维集合体类型,更好地服务于人类生活,纤维集合体力学在新型纤维集合体设计和制造中的重要性将越发显著。

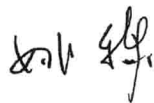
相比于刚性工程材料,柔性纤维集合体具有迥异的受力变形机理。纤维集合体从本质上讲是一种结构体,纤维是结构体最基本的组成单位。纤维间借助摩擦形成结构稳定的纤维集合体,纤维间滑移又赋予纤维集合体能成为纺织品的基本特征:(1)多曲率弯曲变形;(2)低应力大变形现象;(3)多重屈曲变形。纤维间摩擦和滑移是形成柔性纤维集合体、柔性纺织品的基本机理,作者在绪论中给出关于“纸张不能用于做衣服”的例子,很好地说明了纤维间摩擦和滑移是纺织品成型的基本要素。另外,刚性工程结构材料在服役过程中,一般不允许超过其弹性极限或者出现屈曲失稳现象,一旦产生屈服或屈曲失稳现象,该工程结构即已到实用受载

极限。纤维集合体则相反,如果没有高度屈曲失稳现象,纤维集合体将不具备成为纺织品的基本特征,没有使用价值。纤维集合体中数以亿计的纤维间的相互接触与滑移使纺织品具有柔软和飘逸的基本穿用特征。纤维集合体力学将针对上述现象,讨论纤维基本特性、纤维间基本性质,以及各种类型纤维集合体受力变形特征,揭示纤维集合体力学性质与纤维性质、纤维集合体细观结构间的关系。

纤维集合体力学将在纤维性质和纤维集合体细观结构两者基础上,揭示纤维集合体受力变形特征和刚度、强度性质。这些内容将在纺织品设计中发挥重要作用。自 1969 年 John W S Hearle, Percy Grosberg 和 Stanley Backer 合著 *Structural Mechanics of Fibers, Yarns and Fabric* (Wiley-Interscience, New York, 1969)一书起,目前国际上系统综合反映纤维集合体力学内容的典型书籍多达十余种。本书作者采用这些书籍,结合最新期刊论文和自己的研究结果,为纺织科学与工程一级学科研究生讲授“纤维集合体力学”课程有 15 年历史。他们在纤维集合体多尺度细观结构、冲击动力学方面有较多的研究积累。基于多年教学和研究工作经验,作者从独特视角编写而形成《纤维集合体力学》这本教材,用于纺织科学与工程一级学科研究生教学,也可以为纺织工业实际生产提供参考。

本书作者之一顾伯洪教授 1989 年 9 月在我指导下攻读硕士学位,其时就对纤维集合体力学兴趣颇浓,钻研于纤维材料疲劳性质,攻读博士学位期间专攻织物结构力学数值计算,多年以来,苦心孤诣,略有心得。孙宝忠教授受业于顾伯洪教授,曾获全国百篇优秀博士学位论文之称号,年少有成。两位参悟多年,今汇集成书,甚感欣喜。希在后续工作中,追本溯源,开拓创新。特为序。

中国工程院院士



序于甲午年上元节

前 言

柔性纤维集合体,是指纺织纤维在各种纺织加工条件下形成的纱线、织物或非织造布总称,具体形式有纱线/纤维束、缆绳、网、毡、机织物、针织物、编织物、非织造布等。自从有人类文明记录,就有纤维集合体的产生(如原始人类使用的纤维毡),并伴随人类的存在而永远发展。早期使用的纤维有天然纤维素纤维、天然蛋白质纤维和矿物纤维,现在逐渐发展出天然素纤维再生纤维(如黏胶纤维、醋酯纤维、溶剂法再生纤维素纤维)、合成纤维(如聚酰胺纤维、聚酯纤维、聚丙烯腈纤维、烯烃类纤维)和无机纤维(如玻璃纤维、碳纤维、金属纤维)。对于后一类新近出现的纤维,根据分子结构可以对纤维性质进行设计。在各种纤维集合体中,纤维间的摩擦和抱合是纤维集合体保持结构稳定的重要因素。纤维集合体力学研究在外力场下由纤维变形和纤维间位移导致的纤维集合体变形及破坏。新纤维的不断诞生使纤维集合体力学永远具有发展空间。

与柔性纤维集合体对应的是具有同样历史长度的刚性纤维集合体——纤维增强复合材料,纤维包埋于基体材料(有机树脂或其他无机材料)中,形成界面间不相互滑移的固体结构,具有轻质高强特点,在工程中具有很大的应用潜力。本书将仅讨论柔性纤维集合体。

持续系统研究柔性纤维集合体力学大约始于第二次世界大战结束之后的1945年。在1920年至1945年之间,随着纺织研究发展,也出现了一些织物结构和力学性质测试方面的经典工作。更早一些,纤维集合体力学可以追溯到欧洲文艺复兴时期的达芬奇(Leonardo da Vinci)和伽利略(Galileo Galilei),将其上升到理论高度则是欧拉(Leonhard Euler)和伯努利(Bernoulli)家族成员 Daniel Bernoulli 关于柔性细杆力学研究(Euler-Bernoulli Beam Theory)。为这些理论数学美感所吸引,随后的研究者将椭圆积分及各种弹性理论在由柔性纤维或纱线组成的纤维集合体中找到了它们更直接的应用^[1]。

查阅 Todhunter 和 Pearson 合著^[2]的关于材料弹性和强度的早期著作 *A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials from Galilei to the Present Time* 中的文献索引,可以发现许多类似纺织材料,如细线、绳索、杆、金属丝、螺旋弹簧等(strings, cords, bars, rods, wires, threads, helical springs)方面的研究文献,其代表内容成为今天纺织材料力学的研究基础。20世纪早期 Gégauff^[3], Haas^[4]和 Peirce^[5-8]等开始研究上述纺织材料的力学性质,并拓展至研究织物结构及力学性能。这些工作是纤维集合体力学的重要奠基石。1945年二战结束前后的一段时间,许多参战国政府投入大量人力和财力研究新型

纺织纤维和纺织制造技术,以提高军用纺织品质量。在结合新发明的聚酰胺纤维(美国杜邦公司的尼龙纤维)精确设计符合战地使用环境要求的纺织品时,原先积累了几个世纪的经验设计方法逐渐被相对精确的分析设计方法所取代。这些分析设计方法用于描述纤维材料性质、纤维集合体结构和纺织品性质三者之间的联系,使新纤维性质更充分应用于纺织品设计。纤维集合体力学自此开始成为一个分支学科,军用纺织产品高性能要求则促使这门学科得以诞生。纤维增强复合材料的兴起与研究,为纺织材料结构力学带来了新问题,引入了新内容。

纤维集合体力学从纤维集合体结构和纤维材料性质出发,借用数学、力学手段,分析研究纤维集合体多尺度结构与力学表征指标间的关系。由柔性纤维可以组成许多结构不同的纺织材料这种纤维集合体,数学、力学的发展又使研究这些结构的力学特性手段多样化,向更能反映实际结构、更高精度的方向发展。因此,新型纺织材料的出现和数学、力学方法的发展,使纤维集合体力学研究不断更新。

翻阅任一所工科大学的力学专业教学目录,都会发现静力学和动力学、固体力学、动力学系统、材料强度、机械振动、随机振动、振动与波、高等力学、塑性力学、流体力学、流体动力学、黏性流和湍流、稀薄气体流体动力学、电磁动力学、气体燃烧动力学、材料力学、实验力学等课程,同时涵盖热力学和传热传质学等知识。学生培养的主要知识结构所面向的对象是弹性体、塑性体、黏弹性体、弹塑性体、流体,而不是像纤维集合体这样的由柔性纤维借助纤维间摩擦而形成的软物质。

相对于刚性工程结构而言,纤维集合体力学研究异常复杂:一般认为刚性结构屈曲是工程结构的寿命终点,即工程结构在加载过程中一旦产生屈曲失稳现象,该工程结构即已到受载极限;而对于柔性纤维集合体,屈曲失稳是纤维集合体得以成为柔软纺织品的基本条件,也是纺织品设计的基本要求。纤维集合体如果没有高度屈曲失稳现象,则没有使用价值。受力变形过程中开始产生屈曲失稳,是纤维集合体投入使用的起始点。纤维集合体中纤维数量极多,柔性纤维间的相互作用复杂,揭示纤维集合体的受力变形将会涉及复杂的分析假设和巨大的计算量。在纤维集合体多尺度细观结构模型的基础上,采用分析模型或者数值计算模型是较为有效的方法。图像处理方法、数理统计方法和人工神经网络方法,目前也被用于研究纤维集合体细观结构和受力变形。

在纺织科学与工程领域,无论是科学家、工程师还是学生,对纤维集合体力学的系统知识的掌握和需求日益迫切。经过 100 多年的发展,通过几代研究者的不断积累,纤维集合力学的文献散见于各处,如纺织类的综合性期刊:1910 年创刊的 *Journal of the Textile Institute* 和 1931 年创刊的 *Textile Research Journal*;也出现了一些系统性的综合书籍,如 1969 年的 *Structural Mechanics of Fibers, Yarns and Fabrics*, 1980 年的 *Mechanics of Flexible Fibre Assemblies*, 1988 年的 *The Mechanics of Wool Structures*, 2008 年的 *Structure and Mechanics of Textile*

Fiber Assemblies。上述文献和书籍提供了完备的纤维集合体力学知识体系。

目前刊载有关纤维集合体力学的主要期刊有：

Textile Research Journal

Journal of the Textile Institute

Journal of Engineered Fibers and Fabrics

Journal of Industrial Textiles

Journal of Applied Polymer Science

Polymer Science and Engineering

Composites Science and Technology

Composites Part A

Journal of Composite Materials

Journal of Filtration

支持与纤维集合体相关的主要国际学术组织有美国的纤维学会(The Fiber Society)和英国纺织学会(The Textile Institute)。这两个组织定期召开国际学术会议,研讨包括纤维集合体力学在内的纺织学科问题。由于纤维增强复合材料的日益普及使用,纤维集合体力学也被国际复合材料学术组织和学术会议大量讨论,如美国复合材料制造商协会(American Composite Manufacturers Association, ACMA)和国际复合材料会议(International Committee on Composite Materials)。

到目前为止,反映纤维集合体力学研究成就的主要著作有：

Hearle J W S, Grosberg P, Backer S. *Structural Mechanics of Fibers, Yarns, and Fabrics*, Vol. 1. New York: John Wiley & Sons, 1969.

Hearle J W S, Thwaites J J, Amirbayat J (eds.). *Mechanics of Flexible Fiber Assemblies*. Alphen aan den Rijn: Sijthoff & Noordhoff, 1980.

Postle R, Carnaby G A, de Jong S. *The Mechanics of Wool Structures*. Chichester: Ellis Horwood, 1988.

Hu J (ed.). *Structure and Mechanics of Woven Fabrics*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2004.

Morton W E, Hearle J W S. *Physical Properties of Textile Fibres* (fourth edition). Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008.

Schwartz P (ed.). *Structure and Mechanics of Textile Fibre Assemblies*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008.

Gupta B S (ed.). *Friction in Textile Materials*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008.

Hu J. *3-D Fibrous Assemblies: Properties, Applications and Modelling of Three-dimensional Textile Structures*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008.

MirafTAB M (ed.). *Fatigue Failure of Textile Fibres*. Cambridge: Woodhead Publishing

Limited, 2009.

Chen X (ed.). *Modelling and Predicting Textile Behaviour*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010.

本书将根据作者对纤维集合力学的理解,综合纤维集合力学的研究成果,以简洁的方式阐释纤维集合体的多尺度细观结构、细观结构表征指标,在准静态下拉伸、压缩、弯曲、扭转及其耦合作用,以及纤维集合体受力变形破坏过程,同时介绍纤维集合体多尺度结构的优化设计方法。涉及的纤维集合体种类包括:平行长丝纱、加捻长丝纱、环锭和各种新型短纤纱;二维和三维机织物、针织物、编织物;针刺、纺黏、熔喷非织造布;等等。本书描述纤维集合体及其力学特征优化设计的详细体系,进而应用于纺织工艺技术和纤维集合体材料结构优化。期望通过本书的出版,使读者能够掌握纤维集合力学的基本脉络和知识结构,同时根据本书提供的下列文献清单进一步深入理解纤维集合力学的相关专题内容:

- [1] Hearle J W S, Grosberg P, Backer S. *Structural Mechanics of Fibers, Yarns and Fabrics*, Vol. 1. New York: Wiley-Interscience, 1969: 39.
- [2] Todhunter I, Pearson K. *A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials from Galilei to the Present Time*. Cambridge: Cambridge University Press, 1893: 491-546.
- [3] Gégauff C. Strength and Elasticity of Cotton Threads. *Bull. Soc. Ind. Mulhouse*, 1907, 77: 153-176 (originally published in French as: Gégauff C. Force et Elasticite des Files en Cotton. *Bulletin De La Societe Industrielle De Mulhouse*, 1907, 77: 153-176).
- [4] Haas R, Dietzius A. The Stretching of the Fabric and the Shape of the Envelope in Non-rigid Balloons. *Annual Report, Report 16 National Advisory Committee for Aeronautics*, 1918: 149-271 (originally published in German as: Rudolf Haas und Alexander Dietzius, Stoffdehnung und Formaenderung der Huelle bei Prall-Luftschiffen. *Untersuchungen im Luftschiffbau der Siemens-Schuckert-Werke*, 1913, *Luftfahrt und Wissenschaft*, Hft. 4.).
- [5] Peirce F T. The Rigidity of Cotton Hairs. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 1923, 14(1): 1-17.
- [6] Peirce F T. Tensile Tests for Cotton Yarns V. The Weakest Link; Theorems on the Strength of Composite Specimens. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 1926, 17(7): 355-368.
- [7] Pierce F T. The "Handle" of Cloth as a Measurable Quantity. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 1930, 21(9): 377-416.
- [8] Peirce F T. The Geometry of Cloth Structure. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 1937, 28(3): 45-96.
- [9] 顾伯洪,孙宝忠. *纺织结构复合材料冲击动力学*. 北京:科学出版社,2012.

顾伯洪 孙宝忠
于2014年春节

目 录

绪论	1
0.1 纤维集合体概念及范畴	1
0.2 纤维集合体分类	2
0.2.1 纤维	4
0.2.2 长丝纱	5
0.2.3 短纤维纱线	6
0.2.4 变形纱	8
0.2.5 机织物	9
0.2.6 针织物	10
0.2.7 非织造布	11
0.2.8 编织物	12
0.3 纤维集合体力学发展历史沿革	14
0.3.1 机织物几何结构	15
0.3.2 机织物结构力学	17
0.3.3 非织造布	21
1 连续介质与纤维集合体	31
1.1 连续介质物质构成	31
1.1.1 基本概念	32
1.1.2 基本假设和发展历史	32
1.2 连续介质及其变形描述	33
1.2.1 应力应变定义	33
1.2.2 物体变形	38
1.3 纤维集合体构成和结构分级	44
1.4 从分子层级模拟纤维	45
1.4.1 构造、结构和性能	45
1.4.2 聚合物形式	46
1.4.3 天然纤维	47
1.4.4 人造纤维	49
1.4.5 无机纤维	50
1.5 纤维结构性能模拟	50

1.5.1	力学响应	50
1.5.2	其他性质	52
1.6	纱线结构性质模拟	52
1.6.1	纱线类型	52
1.6.2	纱线结构	52
1.6.3	纱线力学	54
1.7	织物结构性能模拟	55
1.7.1	机织与针织物结构	55
1.7.2	几何模型	59
1.7.3	力学模型	67
1.8	总结	69
2	纤维集合体力学基础	73
2.1	引言	73
2.2	纤维分类	74
2.3	纺织品和纺织复合材料功能	74
2.4	纤维结构建模	76
2.4.1	天然纤维结构建模	77
2.4.2	合成纤维结构	78
2.5	纤维几何结构统计模型	81
2.5.1	纤维长度分布	81
2.5.2	纤维直径分布	83
2.5.3	纤维横截面模型	86
2.5.4	纤维空间形状建模	87
2.5.5	外观轮廓建模	90
2.6	单纤维力学性质建模	91
2.7	纤维黏弹性	97
2.7.1	蠕变和松弛模型	98
2.7.2	无限单元模型	100
2.7.3	非线性模型	101
2.7.4	温度依赖性	103
2.8	纤维摩擦性能	104
2.9	纤维集合体模型	106
2.9.1	线性纤维集合体的不均匀性	107
2.9.2	混纺纤维性能	110

2.9.3 纤维集合体结构的力学性能	112
2.10 结论	116
3 纤维摩擦和纤维集合体压缩性质	127
3.1 纤维摩擦性质	127
3.1.1 引言	127
3.1.2 纤维、金属和聚合物的结构和性能差异	128
3.1.3 经典摩擦公式	129
3.1.4 纤维摩擦实验	129
3.1.5 摩擦行为结构模型	130
3.1.6 摩擦常数通用公式和结构	133
3.1.7 摩擦影响因素	134
3.1.8 实验结果研究	135
3.1.9 极端法向力下纺织品摩擦性质	143
3.1.10 羊毛纤维摩擦	144
3.1.11 纤维摩擦性质总结	147
3.2 纤维集合体压缩性质	147
3.2.1 羊毛压缩性概述——van Wyk 压缩理论	147
3.2.2 纤维集合体压缩性质模型与数值模拟	153
4 纱线拉伸性质	181
4.1 平行长丝纱	181
4.2 加捻长丝纱	186
4.2.1 应力分析方法	187
4.2.2 长丝纱线断裂过程特征	200
4.3 加捻短纤纱	205
4.3.1 短纤维纯纺纱	205
4.3.2 短纤维混纺纱	216
5 纱线扭转性质	223
5.1 纤维扭转性质	223
5.1.1 纤维扭转刚度	223
5.1.2 扭转实验方法	227
5.1.3 纤维扭转破坏	228
5.2 长丝纱扭转性质	229

5.2.1 纤维弯曲对纱线扭转的影响	229
5.2.2 纤维扭转对纱线扭矩的影响	234
5.2.3 纤维拉伸对纱线扭矩的影响	238
5.3 短纤纱的扭转性质	240
6 机织物结构力学模型	243
6.1 机织物结构力学模型意义与目标	243
6.2 机织物力学性质	243
6.2.1 多尺度研究	243
6.2.2 纤维性能	245
6.3 机织物多尺度力学建模	246
6.3.1 几何模型	246
6.3.2 连续介质力学模型	246
6.3.3 离散法	247
6.3.4 半离散单元	247
6.4 机织物单胞和几何模型	249
6.5 机织物力学实验	250
6.5.1 双轴向拉伸测试	250
6.5.2 面内剪切测试	251
6.5.3 弯曲测试	252
6.5.4 横向压缩	253
6.6 机织物单胞变形细观尺度三维模型	254
6.6.1 本构模型	254
6.6.2 周期性对称边界条件	256
6.6.3 双轴向拉伸	258
6.6.4 面内剪切	258
6.6.5 横向压缩	259
6.6.6 渗透率计算	260
6.7 图像分析:全域数字图像相关法和 X 射线断层扫描	260
6.7.1 全域数字图像相关法	260
6.7.2 X 射线断层扫描	260
6.8 结论和展望	262
7 针织物建模与可视化	269
7.1 针织物结构建模目的	269

7.2 针织结构种类	269
7.3 结构尺度	271
7.4 中观尺度针织物结构单元	273
7.4.1 线圈	273
7.4.2 添纱组织	273
7.4.3 握持组织	274
7.4.4 浮线组织	274
7.4.5 集圈或压圈	275
7.4.6 移圈组织	275
7.4.7 衬纬组织	276
7.4.8 衬垫组织	276
7.4.9 其他改性结构单元	276
7.5 建模步骤	276
7.6 模型建立	277
7.6.1 输入数据	277
7.6.2 拓扑生成	278
7.6.3 纱线路径表示法	283
7.6.4 力学模型	284
7.6.5 纱线接触	288
7.6.6 纱线截面形态和纱线路径	288
7.6.7 纱线不均匀	288
7.7 后处理	289
7.7.1 纱体绘制	289
7.7.2 可视化	289
7.8 其他类型模型	290
7.9 面料模拟应用领域及发展趋势	290
7.10 结论	290
8 编织与其他纺织复合材料结构与力学性能	295
8.1 纺织结构复合材料	295
8.2 二维织物	295
8.2.1 直接成型织物	296
8.2.2 机织物	296
8.2.3 纬编针织物	297
8.2.4 经编针织物	298

8.2.5 编织物	300
8.2.6 混杂织物	301
8.3 三维织物	301
8.3.1 三维机织物	301
8.3.2 三维编织织物	302
8.3.3 正交铺纱织物	303
8.4 刚度/柔度矩阵均匀化计算	303
8.4.1 基体修正法	304
8.4.2 弯曲纤维模型	305
8.4.3 平均刚度法	306
8.4.4 平均柔度法	308
8.4.5 刚度-柔度混合法	308
8.5 桥联模型	309
8.6 数值模型比较	311
8.6.1 与三维正交类复合材料实验数据对比	311
8.6.2 与二维机织物实验数据对比	312
8.7 数值模型在有限元分析中的应用	315
8.7.1 传统有限元分析	315
8.7.2 混杂有限元分析	316
8.8 非单胞方法	317
9 非织造材料结构力学与过滤性质	326
9.1 引言	326
9.2 非织造布结构模型	328
9.3 非织造布中孔径与孔径分布模拟	330
9.3.1 孔径模型	330
9.3.2 孔径分布模型	331
9.4 拉伸强度	332
9.4.1 拉伸强度各向同性模型	332
9.4.2 小应变下力法模型	334
9.4.3 能量分析方法	334
9.5 非织造布弯曲刚度	335
9.6 非织造布比渗透率模型	336
9.6.1 比渗透率理论模型	336
9.6.2 三维各向异性非织造布的方向渗透率	339

9.6.3 非织造布定向毛细压力和流体芯吸	341
9.7 热阻和导热系数	343
9.8 声阻	345
9.8.1 理论模型	345
9.8.2 经验模型	348
9.9 非织造布颗粒过滤性能	349
9.9.1 过滤性能评价	350
9.9.2 过滤机制	351
9.9.3 干燥空气过滤过滤效率	351
9.9.4 压力降	354
9.10 展望和进一步阅读材料	354
10 织物性能表征与测试	361
10.1 引言	361
10.2 机织物拉伸测试	362
10.3 织物刚度(弯曲)测试	364
10.4 织物剪切测试概念	366
10.5 织物撕裂强力	368
10.6 织物剪切测试方法	370
10.6.1 舌形法(单缝法)	370
10.6.2 梯形法(翼形撕裂法)	372
10.6.3 落摆试验(Elmendorf 装置)	373
10.7 Kawabata 评价系统 KES	375
10.7.1 拉伸性质	375
10.7.2 剪切性能	375
10.7.3 弯曲性能	376
10.7.4 压缩性能	377
10.7.5 表面性能	377
10.8 FAST 测试系统	378
10.9 织物压缩性能	378
10.10 织物的变形机理总结	379
10.11 作为复合材料结构增强体的纤维集合体	379
10.11.1 增强聚合物复合材料的疲劳	380
10.11.2 刚性聚合物基复合材料和弹性基复合材料	381
10.11.3 预测试验的基本知识	381