

# 三维编织复合材料圆管力学性能研究进展

谷元慧 刘晓东 钱坤 张典堂\*

(江南大学生态纺织教育部重点实验室, 无锡 214122)

**摘要** 材料的力学性能对其后续应用会产生重要影响, 当前国内外有关三维编织复合材料圆管力学性能的研究还不够深入。针对这一问题, 探讨了三维编织复合材料圆管的细观结构特征, 如单胞模型、内部编织结构以及单胞特性与编织工艺参数之间的联系等, 研究了三维编织复合材料圆管在拉伸、压缩、冲击、扭转、疲劳等不同载荷下的力学行为及破坏模式, 总结了三维编织复合材料圆管模拟仿真的思路方法, 归纳了材料损伤演化模式/失效机理特性, 指出了目前存在的问题及未来三维编织复合材料圆管力学性能的研究方向。

**关键词** 三维编织复合材料圆管, 力学性能, 细观结构, 数值模拟

## Research progress on mechanical property of 3D braided composite circular tube

Gu Yuanhui Liu Xiaodong Qian Kun Zhang Diantang

(Key Laboratory of Eco-Textiles, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122)

**Abstract** The mechanical properties of material have an important influence on its subsequent application. At present, the research on mechanical properties of three-dimensional braided composite circular tubes at home and abroad is not deep enough. Aiming at this problem, the meso-structural features of 3D tubes were discussed, such as the unit cell model, the internal braided structure, and the relationship between the unit cell characteristics and the braiding process parameters. In the tests, the mechanical behaviors and failure modes of 3D tubes subjected to tensile loading, compression loading, impact loading, torsion loading, fatigue loading etc were investigated. Also, for 3D tubes, the numerical simulating methods and the materials progressive damage/evolution were analyzed and summarized. At the same time, some problems in the current research were summarized and some suggestions were put forward. It was expected to provide basic references and new ideas for the structural design and mechanical analysis of 3D braided composite tubes.

**Key words** 3D braided composite circular tube, mechanical property, meso-structure, numerical simulation

三维编织复合材料(Three-dimensional braided composite)作为主要的承力构件和功能构件广泛应用于航空航天、交通运输和深海等领域, 其结构设计和力学分析一直是研究热点<sup>[1-2]</sup>。三维编织预成型体是由多个不同系统的纤维束在空间按一定的路径和规律相互交织形成、在厚度方向增强的整体网状结构<sup>[3]</sup>, 其增强的复合材料所表现出的良好设计性、优异抗损伤容限、高断裂韧性和净尺寸成型等特性是金属及层合、缠绕等二维复合材料所不可替代的<sup>[4-6]</sup>。近年来, 随着三维编织预成型机械自动化程

度的不断提高, 以整体预成型体为增强骨架的三维编织复合材料, 尤其是碳纤维编织复合材料, 受到了高度关注并迅速发展起来。

圆型管状结构是三维编织复合材料实际应用中最为常见的结构形式之一, 例如航天航空用相贯圆管接头、输水输油管道、汽车传动轴、辊轴、自行车多通件等<sup>[7-8]</sup>。这些构件经常承受拉伸、压缩、冲击、疲劳、扭转等载荷的作用, 易在构件内部形成微小损伤。若继续使用, 则会导致裂纹逐渐扩展, 从而使整体结构失稳, 严重威胁使用安全性。相比于编织复

**基金项目:**高性能复合材料构件结构功能一体化设计方法(2017-JCJQ-ZD-035); 国家自然科学基金(11702115); 江苏省自然科学基金(BK20170166); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX18-0626)

**作者简介:**谷元慧(1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为纺织复合材料。

**联系人:**张典堂(1986-), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为纺织结构复合材料。

合材料板型结构,当前的圆管理论研究远滞后于应用,因此,研究三维编织复合材料圆管细观结构特征及不同载荷条件下的力学行为及渐进损伤演变过程,对提升三维编织复合材料圆管的结构效率及可靠性具有重要的意义。笔者对三维编织复合材料圆管预制体细观结构几何模型、力学性能实验研究及数值模拟等进行了归纳、总结,以期对未来的研究提供参考。

## 1 细观结构几何模型研究

三维编织复合材料细观结构决定其宏观力学性能,且对其结构优化及设计具有重要作用。研究表明,三维编织矩形复合材料内部具有周期性的单胞<sup>[9]</sup>,而圆管属于“异型”结构件,其内部编织结构由多个不同性质的细观单元耦合连接形成,呈非周期性状态。因此,三维编织复合材料圆管的细观结构研究仍很不成熟,导致难以评估预测其不同载荷条件下的力学响应<sup>[10]</sup>,因而在很多情况下,圆管的细观结构模型仍采用矩形件的模型。

国内外研究人员对三维编织复合材料的细观结构进行了大量研究并取得了一定研究成果,其细观结构拓扑模型的发展经历了一个从具有代表性的简化“米”字型单胞到改进的纤维倾斜模型再到复杂的完整三胞模型的过程<sup>[11]</sup>。与此同时,逐渐有学者在建立细观几何模型时考虑到纤维束之间会因编织及复合工序产生相互挤压,使得模型截面形状发生变化<sup>[12]</sup>,完成了由规则的圆形或椭圆形截面到更加接近三维编织复合材料真实细观结构的四边形、六边形或八边形截面的过渡,该成果对于精细化有限元建模等工作具有重要意义。

为建立较为准确的圆型编织件的单胞模型,学者以空间纱线交织结构为出发点展开研究,并利用所建模型进行单胞参数和性能的预测。陈利等<sup>[13]</sup>、李典森等<sup>[14]</sup>在充分研究三维圆型编织的空间纱线路径和交织结构的基础上,分别建立了预制件圆管单胞模型。李志敏等<sup>[15]</sup>认为三维编织薄壳圆管的单胞与普通厚度的单胞必然存在差异,课题组依据三维编织圆柱壳复合材料的空间纱线走向建立了改进的 THREE-CELL 结构模型,并结合高阶剪切理论计算出其弹性常数。Ma 等<sup>[10]</sup>考虑到纱线的构成方式以及织物的结构差异会导致纤维体积分数产生较大变化,根据单元纱线的构成方法,分区域建立相对应的织物单胞模型以预测变截面三维五向圆型编

织物的几何尺寸及纤维体积分数分布情况。研究表明,内胞的纤维体积分数明显高于内表面与外表面单胞;该模型相比于之前已有模型更为精准,能够较好地描述编织物的特性,为后续研究奠定了基础。

现代技术的发展加速了材料细观特征研究的进程,研究人员从编织工艺参数出发,将数字化纺织分析技术、计算机辅助设计(CAD)、微型计算机断层扫描技术(Micro-CT)等先进技术手段应用到从规则几何体到变截面结构件的细观结构分析中,出现了一些新的建模方法。Sun 等<sup>[16]</sup>采用数字化纺织分析技术对三维圆形预成型体的细观几何结构,如编织角、纤维体积分数和纱线倾斜角度进行分析讨论,并动态模拟了三维圆形编织过程。结果显示,数字化分析技术对三维圆形编织管预成型体几何结构的描述更加准确。相比于拓扑结构模型,采用数字化分析方法得到的编织角、纤维体积分数偏高,而倾斜角偏低。在早期,人们多采用折线连接来模拟编织纱线的空间运动路径,但模拟纱线路径和走向与真实情况并不相符。为解决这个问题,Kang 等<sup>[17]</sup>利用样条曲线描述三维编织结构的真实路径,并确定单元和代表体积单元的纱线路径,利用开发的三维圆形编织预制件 CAD 系统,对纱线回缩系数、纱线取向角、纱线体积分数等重要几何因素进行了研究,确定了纱线最大理论体积分数。以上模型都存在一个问题,即纱线在编织过程中不可避免地发生相互挤压,但是在模型建立过程中都已人为简化,使得相邻的纱线呈现在异面,其中一根部分缺失或形成弧度弯曲。Wang 等<sup>[18]</sup>利用 Micro-CT 证实建立的全尺寸几何模型和单胞模型可解决纱线重叠问题、准确描述预成型的关键特征。傅景韞<sup>[19]</sup>依据编织变截面异型三维编织物的加减纱工艺和原理,采用拓扑分析方法得出三维编织预成型体中,只有加减纱截面处的表面单胞模型和内部单胞模型比规则截面的预制件有较大的变化。由于变截面三维编织复合材料的内部结构较为复杂,其细观结构研究仍处于初级阶段。

## 2 力学性能试验研究

目前,试验研究仍是评价三维编织复合材料力学性能最基本、最直接的方法。试验研究具有可信度高、研究结果客观可靠、可减少干扰因素影响等优点。近年来,试验研究多集中于对三维编织复合材

料圆管拉伸、压缩、冲击等力学性能及失效机理的评价。

通过对三维编织圆管进行拉伸试验, Leung 等<sup>[20]</sup>采用基于体视显微镜的数字图像相关(DIC)光学测量技术,首次研究了管半径和编织角随着轴向拉伸载荷增加的变化规律。结果表明,整个拉伸过程导致半径减小 0.1 mm,在轴向应变为 1.84% 的条件下,半径变化后的总截面积差为 1.7%,这将导致计算瞬时应力的增加;在圆管中心部位编织角变化范围在 $(-0.80 \pm 0.26)^\circ$ ,这在很大程度上将影响材料的弹性模量。陈思思<sup>[21]</sup>得到了不同轴向纱结构的三维编织复合材料圆型管件的主要力学性能参数。基于对三维编织复合材料圆管的宏观变形和损伤失效模式等力学行为的研究,作者指出复合材料圆管破坏形式与加载的载荷值、编织工艺参数、编织结构等相关。文献[22-24]报道了编织角度较小的三维五向结构编织复合材料圆管的轴向拉伸性能较好。

在三维编织复合材料圆管的压缩试验研究中,科研人员主要通过材料的压缩强度与刚度变化、应力-应变曲线、能量吸收情况、载荷位移曲线以及宏观损伤模式来评价材料的压缩性能并分析其失效机理。影响压缩载荷峰值与能量吸收的主要因素为:增强相种类、圆管结构(包括编织角、长径比)、压缩时是否有触发机制等。失效模式主要分为 3 种类型:在初始外力作用下管产生结构屈曲,裂纹扩展(I 型);纤维束向外扩展、纤维束之间分离断裂、基体与纤维产生剪切和碎裂、界面粘结性能(II 型);包含层束相互之间、碎片楔与层数之间以及压盘和材料之间在内的多种摩擦耗能(III 型),而通常情况下,材料失效为 3 种形式的组合。合理设计三维编织复合材料圆管的端部薄弱环节可引发渐进破坏机制,增强其耐撞性, Huang 等<sup>[25]</sup>改变传统的外倒角薄弱环节,创新性地提出 3 种新型薄弱环节:内倒角、花冠型以及端部开缝。经准静态压溃试验得出:3 种新型薄弱环节均具有引发效能,其中花冠型与端部开缝薄弱环节的引发比应力比外倒角降低了 18%,压溃载荷效率明显增加,更能有效的引发渐进破坏。Gideon 等<sup>[26-27]</sup>研究了编织角对三维编织复合材料圆管静态压缩疲劳压缩性能的影响。结果表明:编织角为  $45^\circ$  的三维编织复合材料圆管试样的压缩性能较好,具有最高的比吸能值且破坏方式表现为渐进破坏。由于不同的使用环境对同种材料的性能也

会产生影响,因此除了材料自身的参数属性,研究过程中也逐渐将温度、应变率等参数加入考量范围。Wu 等<sup>[28]</sup>研究了三维编织碳纤维增强树脂基复合材料圆管在准静态低温、高应变率时的压缩性能。研究表明,三维编织复合材料圆管的力学性能对温度和应变率较为敏感,低温场下压缩刚度、强度及比吸能均与温度呈负相关,与应变率呈正相关。

Tate 等<sup>[29]</sup>对编织角度( $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 和  $45^\circ$ )不同的碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管进行静态疲劳测试,以探究编织角对面内力学性能和疲劳性能的影响。结果表明编织角度对疲劳载荷下的失效机理没有显著影响。Potluri 等<sup>[30]</sup>在研究双轴向和三轴向编织结构复合材料圆管弯曲和扭转性能时发现,在三轴向编织复合材料圆管试样中加入轴纱后,其弯曲刚度和扭转刚度均大于双轴向圆管试样;随着编织层数的增加,试样的弯曲与扭转刚度增加;而在其他条件相同,只增大编织角( $31 \sim 65^\circ$ )时,圆管的弯曲刚度则先下降后上升,扭转刚度增大。沈怀荣等<sup>[31]</sup>对三维四向和三维五向编织碳纤维/环氧树脂复合材料圆管构件及由其组成的火箭模拟级间段进行压缩和扭转力学性能、轴压承载能力实验,发现三维五向编织复合材料圆管轴压承载力比三维四向编织复合材料圆管明显提高,原因是三维五向结构中加入了轴纱,但剪切模量无明显变化。

### 3 力学性能数值模拟研究

有限元分析软件不仅能够解决传统实验存在的部分缺陷(如大型构件的力学性能研究),还可以对三维编织复合材料圆管的力学性能进行评估,成为力学研究过程中不可或缺的辅助工具。当前大多数研究仍集中在利用有限元软件建立细观或微观结构模型,结合实验并利用相关函数、准则计算,从而得到三维编织复合材料圆管在受外力作用时的应力分布、瞬时破坏形态以及能量吸收情况并阐明损伤失效机理,此法克服了传统解析法的部分弊端,对于进一步探究及预估三维编织复合材料圆管的力学性能具有重要意义。

Li 等<sup>[32]</sup>通过剪切实验与有限元仿真模拟研究了三维碳纤维/环氧树脂编织复合材料在 4 个高应变率剪切载荷下的准静态和动态行为。通过有限元模拟的应力云图发现,应力集中在剪切区域;编织角对三维编织复合材料的剪切行为起着重要的作用;材料与冲头的接触面发生压缩损伤,而在背面发生

张力损伤;高应变率剪切载荷下三维编织复合材料的断裂随应变率的增加而增大。屈枫<sup>[33-34]</sup>分别建立具有不同编织参数且有缺陷的三维编织复合材料圆管的微观单胞模型和细观扇形单胞有限元模型,对其进行多尺度耦合数值模拟分析。通过对微观、细观单胞的分析评价,预测出结构中关键部位微观、细观的应力状态,从而评价材料的断裂失效情况。

受限于计算难度,目前有关三维编织复合材料圆管的有限元模型多为简化模型或混合模型(根据实验结果对主要受力部分采用较为真实的模型,其余部分采用简化模型),但是该方法可能忽略了某些特殊情况,模拟结果的有效性并未得到完全认可。为了得到更加真实有效的数据,学者尝试建立与实验材料规格相同的整体细观模型。Zhou等<sup>[35-36]</sup>建立了基于三维编织结构的细观结构全尺寸几何模型,并利用大型商用有限元分析软件 ABAQUS 对三维编织复合圆管在横向冲击条件下的变形和损伤模式及失效机理进行研究,指出增大编织角不利于应力在轴向的传播。申付朋<sup>[37]</sup>利用有限元区域叠合法(DST)建立了三维编织复合材料传动轴构件的全尺寸有限元模型,并进行了静力学分析,其中强度失效判断依据为 Tsai-Wu 准则。研究表明,在模拟设计的编织角度中,编织角为  $45^\circ$  的传动轴的扭转性能最好;应以特定的剪应力值作为传动轴扭转强度校核的标准。

#### 4 结语与展望

目前国内对三维编织复合材料圆管力学性能的研究不是很充分,主要存在以下问题:

(1) 预制件设备自动化程度不高,工艺不是特别完善,与此相关的研究较少。

(2) 影响三维编织复合材料圆管力学性能的主要因素有材料本身的细观结构与性能、使用环境等。目前都是基于简单载荷展开研究,研究静态条件下参数对材料力学性能的影响规律,在实际工程应用中,材料动态力学性能、使用环境条件等外部因素以及影响其使用寿命的扭转疲劳性能等尤为重要,但与其相关的研究太少。

(3) 有关细观单胞模型的建立与编织工艺参数之间的关系等理论研究还不够完善。由于三维编织复合材料圆管材料内部结构较为复杂,难免有纤维束或者纱线的挤压变形,虽然已建立了全尺寸模型,但是在建立有限元模型时仍做了一定的假设简化,

模型精准度还有待提高。

(4) 三维编织复合材料是一种较先进的新型材料,而圆管是异形结构,能够与圆管相适应的有限元强度准则还没有完全建立,因而在对三维复合材料圆管进行强度失效判断时只能以现有强度准则代替。此外,有关三维编织复合材料圆管中基体材料的研究较少,三维编织复合材料圆管的渐进损伤及失效机理研究仍很欠缺。

针对上述问题,应不断完善理论研究并开创新的研究方法。今后应注重编织工艺参数和空间关系等理论研究,利用先进的技术手段如 Micro-CT<sup>[38]</sup>、声发射技术、高速摄影及碳纳米线传感器技术<sup>[39]</sup>,结合统计学、计算机科学及其他边缘学科,建立更接近实际应用中的受力体系以及精准的几何模型、有限元模型<sup>[40]</sup>,深入研究三维编织复合材料圆管的失效机理、优化结构设计以及预测大型结构件的力学效能等是重要的发展方向。除此之外,在重点关注预制体参数时,也不能忽视相应的基体相材料性能和环境因素对三维编织复合材料圆管整体力学性能影响的研究。

#### 参考文献

- [1] Liu Z G. Study on comparison of manufacturing methods of high performance composites pipes and application of 3D braiding technology [J]. Journal of Materials Engineering, 2009, 2: 109-113.
- [2] Tolosana N, Carrer M, De V R, et al. Numerical analysis of three-dimensional braided composite by means of geometrical modeling based on machine emulation [J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2012, 19: 207-215.
- [3] 崔海超, 翟全胜, 安学锋, 等. T700/6421 复合材料层合板“离位”增韧研究 [J]. 化工新型材料, 2017, 45(9): 124-126.
- [4] Zheng Y Y, Sun Y, Li J L, et al. Tensile response of carbon-aramid hybrid 3D braided composites [J]. Materials and Design, 2017, 116: 246-252.
- [5] Xu K. Finite element analysis of mechanical properties of 3D five-directional braided composites [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 487(1/2): 499-509.
- [6] Lu Z X, Xia B, Yang Z Y, et al. Investigation on the tensile properties of three-dimensional full five-directional braided composites [J]. Computational Materials Science, 2013, 77: 445-455.
- [7] Zhang W, Gu B H, Sun B Z. Thermal-mechanical coupling modeling of 3D braided composite under impact compression loading and high temperature field [J]. Composites Science and Technology, 2017, 140: 73-88.
- [8] 李金超, 陈利, 邢静忠. 三维五向编织复合材料强度的有限元

- 分析[J].宇航材料工艺,2010,40(5):37-39;46.
- [9] Wang H L, Cao M, Siddique A, et al. Numerical analysis of thermal expansion behaviors and interfacial thermal stress of 3D braided composite materials[J]. Computational Materials Science, 2017, 138: 77-91.
- [10] Ma W S, Zhu J X, Jiang Y. Studies of fiber volume fraction and geometry of variable cross-section tubular 3D five-direction braided fabric[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 46(14): 1697-1704.
- [11] 徐焜, 许希武. 四步法三维矩形编织复合材料的细观结构模型[J]. 复合材料学报, 2006, 23(5): 154-160.
- [12] 张小萍, 王君泽. 二步法三维编织物仿真模型[J]. 纺织学报, 2011, 32(10): 147-152.
- [13] 陈利, 李嘉禄, 李学明. 三维四步法圆型编织结构分析[J]. 复合材料学报, 2003, 20(2): 76-80.
- [14] 李典森, 卢子兴, 陈利, 等. 三维五向圆型编织复合材料细观分析及弹性性能预测[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 123-129.
- [15] 李志敏, 胡海. 三维编织复合材料圆柱壳的扭转后屈曲分析[J]. 力学季刊, 2008, 29(2): 319-328.
- [16] Sun X. Micro-geometry of 3-D braided tubular preform[J]. Journal of Composite Materials, 2004, 38(9): 791-798.
- [17] Kang T J, Kim S J, Jung K. Analysis of geometrical parameters using a CAD system for a 3-D braided preform[J]. Textile Research Journal, 2008, 78(10): 922-935.
- [18] Wang Y B, Liu Z G, Liu Nan, et al. A new geometric modeling approach for 3D braided tubular composites base on free form deformation[J]. Composite Structures, 2015, 136: 75-85.
- [19] 傅景韞. 减纱工艺对三维整体编织复合材料细观结构和力学性能的影响[D]. 天津: 天津工业大学, 2004.
- [20] Leung C K, Melenka G W, David S, et al. The effect on elastic modulus of rigid-matrix tubular composite braid radius and braid angle change under tensile loading[J]. Composite Structures, 2013, 100: 135-143.
- [21] 陈思思. 三维圆型编织复合材料的力学性能研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
- [22] 陈利, 梁子青, 马振杰, 等. 三维五向编织复合材料纵向性能的实验研究[J]. 材料工程, 2005(8): 3-6.
- [23] 卢子兴, 王成禹, 夏彪. 含界面相三维全五向编织复合材料拉伸行为模拟及失效机制研究[J]. 复合材料学报, 2014, 31(1): 179-186.
- [24] Zhang D T, Chen L, Sun Y, et al. Transverse tensile damage behaviors of three-dimensional five-directional braided composites by meso-scale finite element approach[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2015, 34(15): 1202-1220.
- [25] Huang J C, Wang X W. On a new crush trigger for energy absorption of composite tubes [J]. International Journal of Crashworthiness, 2010, 15(6): 625-634.
- [26] Gideon R K, Sun B Z, Gu B H. Mechanical behaviors of 4-step  $1 \times 1$  braided carbon/epoxy three-dimensional composite tubes under axial compression loading[J]. Polymer Composites, 2015, 37(11): 3210-3218.
- [27] Gideon R K, Zhou H L, Li Y Y, et al. Quasi-static compression and compression-compression fatigue characteristics of 3D braided carbon/epoxy tube[J]. The Journal of The Textile Institute, 2016, 107(7): 938-948.
- [28] Wu X Y, Zhang Q, Gu B H, et al. Influence of temperature and strain rate on the longitudinal compressive crashworthiness of 3D braided composite tubes and finite element analysis[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2017, 26(7): 1003-1027.
- [29] Tate J S, Kelkar A D, Whitcomb John D. Effect of braid angle on fatigue performance of biaxial braided composites[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(10): 1239-1247.
- [30] Potluri P, Manan A, Francke M, et al. Flexural and torsional behavior of biaxial and triaxial braided composite structures [J]. Composite Structures, 2006, 75(1/2/3/4): 377-386.
- [31] 沈怀荣, 郑文龙. 三维编织圆管力学性能及火箭级间段模拟结构承载能力研究[J]. 国防科技大学学报, 1999(1): 8-12.
- [32] Li Y Y, Gan X H, Gu B H, et al. Dynamic responses and damage evolutions of four-step three-dimensional braided composites subjected to high strain rate punch shear loading[J]. Journal of Composite Materials, 2015, 50(12): 1635-1650.
- [33] 屈枫. 三维编织复合材料多尺度数值模拟及界面破坏准则分析[D]. 济南: 山东轻工业学院, 2011.
- [34] 屈枫. 圆管状三维编织复合材料多尺度耦合分析[J]. 现代机械, 2012(4): 50-51; 65.
- [35] Zhou H L, Zhang W, Liu T, et al. Finite element analyses on transverse impact behaviors of 3-D circular braided composite tubes with different braiding angles[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 79: 52-62.
- [36] Zhou H L, Pan Z X, Gideon R K, et al. Experimental and numerical investigation of the transverse impact damage and deformation of 3-D circular braided composite tubes from meso-structure approach[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 86: 243-253.
- [37] 申付朋. 编织复合材料传动轴的数值模拟及分析软件开发[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [38] Zhang F, Wan Y M, Gu B H, et al. Impact compressive behavior and failure modes of four-step three-dimensional braided composites-based meso-structure model [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2015, 24(6): 805-827.
- [39] 郭建民, 万振凯. 嵌入碳纳米线的三维编织复合材料损伤监测[J]. 纺织学报, 2016, 37(4): 65-69.
- [40] 杨德军, 李旭东. 碳/碳复合材料烧蚀热响应的数值分析[J]. 化工新材料, 2013, 41(10): 79-81.

收稿日期: 2018-09-07

修稿日期: 2019-11-06