

三维四向编织复合材料压缩力学性能实验研究

Experimental Investigation Compressive Mechanical

Properties of 3D 4-directional

Braided Composites

严 实, 吴林志, 孙雨果

(哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150001)

YAN Shi, WU Lin-zhi, SUN Yu-guo

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 通过对三维四向编织复合材料薄板试件的宏观压缩实验, 研究了三维四向编织复合材料的抗压力学性能。实验结果表明: 材料的编织角对其压缩力学性能的影响很大, 随编织角的变化, 编织复合材料的压缩破坏机制发生了变化。编织角度较小时, 材料表现为脆性特征; 当编织角度大于某个临界角度时, 材料的应力-应变曲线趋于非线性, 更多地表现为塑性破坏。

关键词: 编织复合材料; 压缩实验; 编织角; 破坏机理

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)07-0059-04

Abstract: The mechanical properties of three dimensional and four-directional braided composites were investigated by the macroscopic compressive experiments. Experimental results show that the mechanical properties and mechanism of compressive failure of the composites change with the increase of the braided angles. When the braided angle is small, the material behaves as the brittle characteristics. But if the braided angle is larger than a critical angle, the stress-strain curve of specimen approaches nonlinear, behaving mostly as the characteristics of plastic failure.

Key words: braided composite; compressive experiment; braided angle; failure mechanism

三维编织复合材料是一种新型结构材料, 由于其具有良好的力学性能和结构可设计性, 因此在航空、航天等领域得到了广泛的应用, 并成为先进材料和力学等交叉学科领域的前沿课题^[1]。目前主要的研究方法有实验研究和理论研究。

复合材料力学性能的实验研究在复合材料的开发与应用中发挥着重要作用。通过实验不仅可以评价验证材料的力学性能, 而且可以为理论模型的建立和研究材料的失效机理提供实验依据, 因此, 受到了国内外诸多学者的广泛关注。Macander 等^[2]首先通过实验发现, 三维编织物能大幅度地提高复合材料强度和刚度。Masters 和 Ifju^[3]利用波纹干涉法研究了二维和三维编织复合材料在承受拉伸载荷时的力学性能。Smith 和 Swanson^[4]用实验验证编织复合材料的强度以及最大纤维方向应变准则的有效性。Quek 等^[5]获得了碳二维三轴编织复合材料的平面双轴压缩/拉伸的实验结果。孙慧玉^[6]研究了三维编织复合材料拉伸性能, 并讨论了影响四步法复合材料拉伸性能的因素和断裂失效的原因。卢子兴等^[7,8]针对三维四向和五

向编织复合材料进行了实验研究, 从宏观力学角度研究了它们的力学行为。庞宝君等^[9]通过实验得到了弹性常数及反映材料非线性行为的力学性能指标随编织角的变化规律, 并分析了编织参数对该类材料破坏模式的影响。王波等^[10]针对三维编织 C/SiC 复合材料进行了实验研究, 得到了材料拉伸、压缩的主要力学性能参数, 损伤发展及破坏规律。陈利等^[11]通过对不同编织结构参数的三维五向编织复合材料试件的纵向拉伸和压缩实验, 分析了该类材料的力学性能随编织工艺参数的变化规律以及材料的失效形式。徐焜等^[12]针对三维六向编织复合材料进行了一系列的实验研究, 探讨了该类材料的在不同载荷作用下的破坏模式和失效机理。

由于三维编织复合材料细观结构的复杂性以及制作加工困难等原因, 对它的实验研究还很不充分, 尤其对三维编织复合材料压缩力学性能的研究相对较少。本研究针对不同编织角度的三维四向编织复合材料的短标距薄板试件进行了压缩实验, 从宏观角度研究了材料的压缩力学性能, 并从细观角度出发对材料的破

坏形式和失效机理做了简单的分析, 得到一些初步的结论。这些实验结果可为进一步研究三维编织复合材料在压缩载荷作用下的损伤发展历程、破坏规律和强度提供实验依据。

1 实验方法

实验材料为三维四向碳/ 环氧编织复合材料, 由天津工业大学复合材料研究所研制。基体材料为 TDE-86 环氧树脂, 增强纤维为 T300 碳纤维, 纤维束规格为 12K, 经 RTM 工艺固化成型。

研究中参考国家标准 GB3856- 83, 采用了短标距薄板试件, 并结合三维四向编织复合材料自身的结构特点, 所采用的试件尺寸如图 1 所示。用铝片对板状试件的两端进行加强, 并专门设计了一套压缩卡具, 完成了三维四向编织复合材料的压缩实验。宏观压缩实验使用了三组不同编织角度的复合材料试件, 每组实验重复次数为三次, 其相关参数见表 1。

所有实验均通过 INSTRON(5569) 电子拉伸机对试件进行加载。采用位移控制加载, 加载速率为 0.5mm/min。采用 BE120-10AA(11)-X30 应变计(汉中原电测仪器厂), 通过 YE6261B 动态数据采集分析系统(江苏联能电子技术有限公司) 测量其变形。

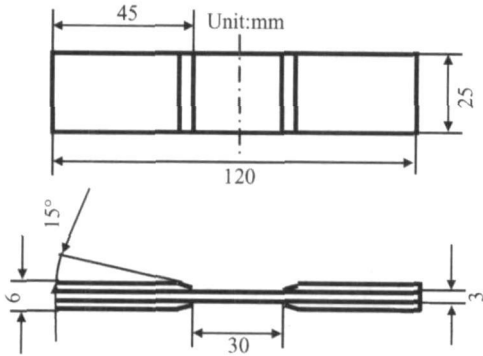


图 1 试件尺寸示意图

Fig. 1 The geometric sketch of specimen

表 1 三种试件的相关参数

Table 1 The parameters of three kinds of specimens

No	Pitch length/mm	Braided angle / (°)	Volume fraction/%
1	8.7	16	38.9
2	5.5	27	33.9
3	4.1	37	35.4

2 实验结果与分析

2.1 宏观实验

图 2 给出了每组实验件的典型轴向压缩应力-应

变曲线, 这里压缩的轴向变形由压缩卡具位移确定。由试件 1 的压缩应力-应变曲线可见, 当编织角较小时, 应力-应变曲线基本呈线性, 试件承载能力较强, 试件的破坏属于纤维束断裂引起的脆性破坏。当试件的编织角大于某个临界角度, 试件的承载能力明显较弱(试件 2 和 3), 从其应力-应变曲线中可以看出存在明显的屈服点和非线性变化阶段。屈服点为曲线上的极限应力点, 加载到该极限编织复合材料基本上丧失了承载能力, 材料的破坏表现为纤维束相互挤压剪切引起的纤维束压曲失稳导致试件的塑性破坏。试件 1 和试件 2 的编织角度相差 11°, 它们的应力-应变曲线的变化趋势明显不同, 分别表现出线性和非线性的特征, 而试件 2 和试件 3 编织角度相差 10°但所表现出的应力-应变曲线变化趋势相类似。这就说明在试件 1 和试件 2 的角度范围内存在一个临界角度。当试件编织角度小于这个临界角度, 试件的压缩应力-应变曲线表现出线性的特征, 相反试件的压缩应力-应变曲线表现出非线性的特征, 而且在大于临界角度的范围内, 编织角度的变化对试件压缩应力-应变曲线的变化影响不大。

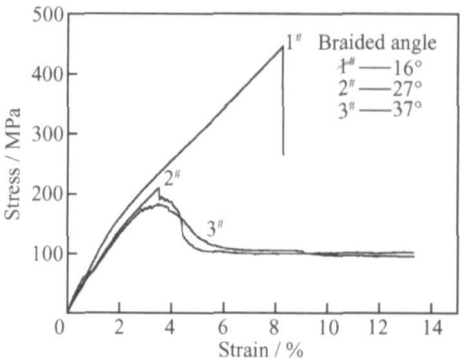


图 2 压缩试件应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of the compressive specimens

上述三种编织复合材料的主要力学性能参数见表 2。随着编织角度的增加, 材料的压缩模量和强度逐渐降低, 泊松比逐渐增加。这些现象表明, 在编织角度较小的情况下, 压缩载荷主要由纤维束承受, 由于纤维束的承载能力明显高于基体, 因此其压缩强度要比编织角度较大的试件高; 但由于纤维束之间的相互约束, 使得其横向变形相对于编织角度较大的试件要小, 因此泊松比较小。当编织角大于某个角度, 试件的力学性能变化十分明显, 表明存在某一临界角度。当编织角大于该临界角度时, 试件的压缩失效机制发生转变, 但编织角度在大于临界角的某一角度范围内变化时, 试件的压缩失效机制相类似。可见试件编织角度是影响材料压缩性能的主要工艺参数。

表 2 压缩实验数据
Table 2 Compressive test results

No	Compressive strength / MPa	Compressive modulus / GPa	Poisson ratio
1	445.532	65.068	0.640
2	198.953	36.118	0.708
3	166.443	24.541	0.775

2.2 试件断口形貌分析

图 3 由 OLYMPUS(SZX12) 体式显微镜拍摄的轴向压缩断口照片。从图 3a 中可以看出试件的破坏

模式主要是纤维束的脆性断裂, 断口基本平齐。纤维束脆性断裂特征可通过分析压缩断口形貌得到, 即试件在一定的压缩载荷作用下, 纤维束间较弱的部分出现横向裂纹(图 3b), 表明试件 1 在压缩破坏时, 纤维束承担主要的载荷并处于一种较为均匀的压缩状态, 基体变形相对较大, 只能通过剪切作用于纤维束, 随着载荷进一步增加, 横向裂纹扩展, 增强纤维的脆性断裂导致了试件最终失效(图 3c)。在承载过程中, 由于基体的塑性破坏, 裂纹也会沿着编织角方向的纤维束界面开裂, 如图 3d 所示。

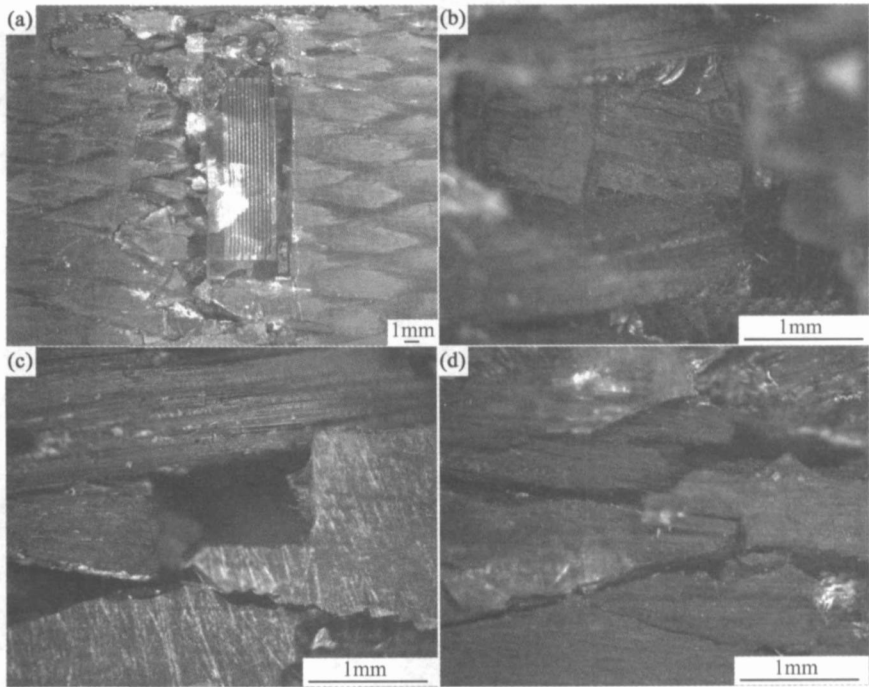


图 3 材料 1 轴向压缩断口照片 (a) 7 倍放大断口照片; (b), (c), (d) 40 倍放大断口照片
Fig. 3 Microscopic pictures of fracture surface for specimen 1 after longitudinal compression test: pictures of fracture surface were magnified to 7 times for (a), 40 times for (b), (c), (d)

图 4 给出了试件 2 的轴向压缩断口照。当编织角度大于某个角度, 试件的破坏模式主要是纤维束的压屈失稳, 其方向沿着试件编织角度, 如图 4a 所示, 这和试件 1 破坏模式相比发生了明显的变化。从图 4b 和图 4c 中可以看出, 纤维束以及纤维束边界有非常明显的剪切破坏痕迹。在压缩过程中, 基体承力较大, 纤维束界面处有较大的应力集中, 因而基体也会开裂, 如图 4d。这说明在编织角度较大的情况下, 试件的主要承载对象不仅仅是纤维束, 基体的贡献也明显增加, 在一定的压缩载荷作用下, 纤维束间挤压作用使得纤维束在剪切应力的作用下发生剪切破坏, 这种剪切应力也促使基体塑性破坏, 随着损伤的累积和纤维束与基体界面的逐步破坏, 纤维束与基体的粘接被破坏, 基体无法再提供对纤维束的支撑, 纤维束会大幅度压屈失稳

而失效。
图 5 给出了试件 3 的轴向压缩断口照片。图 5a 表明随着编织角度的进一步增加, 试件的破坏模式还是以沿着编织角方向的纤维束压屈失稳为主, 同时基体塑性变形以及界面的破坏也更加明显, 压缩试件随基体与纤维束的剥离而呈现网格状突起。在编织角度较大的情况下, 基体承力较大, 纤维束界面会产生较大的应力集中, 导致基体开裂, 如图 5d 所示。而且纤维束也有一定的承载能力, 因此和试件 2 相类似, 在压缩载荷作用下, 纤维束间的挤压作用导致纤维束的剪切破坏, 如图 5c 所示。但由于基体承力的增大, 当载荷达到一定水平, 纤维束与基体的粘接被破坏, 界面发生脱胶分离(图 5d), 从而使得纤维束压屈失稳导致材料的最终失效。

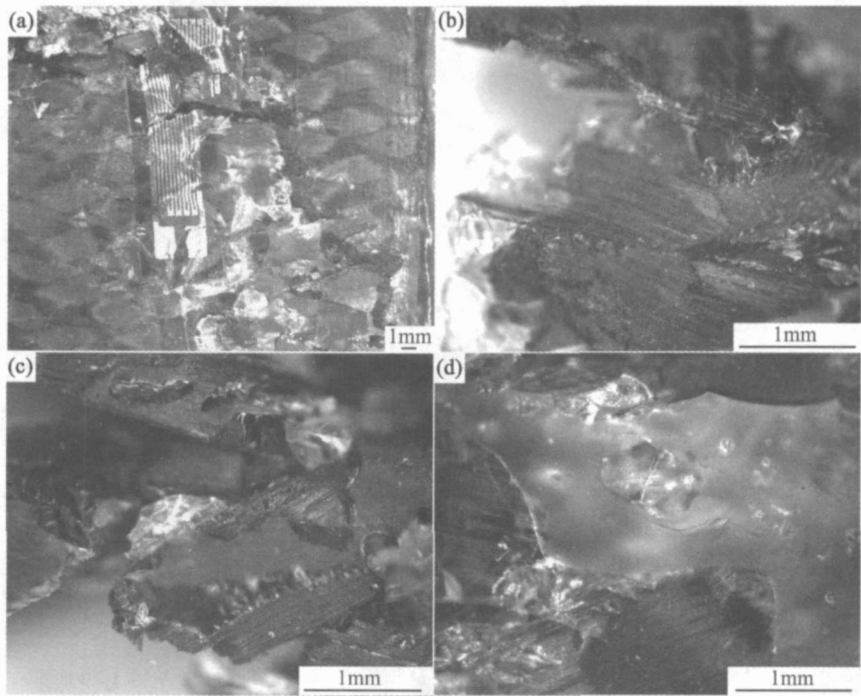


图 4 材料 2 轴向压缩断口照片 (a) 7 倍放大断口照片; (b), (c), (d) 40 倍放大断口照片
Fig. 4 Microscopic pictures of fracture surface for specimen 2 after longitudinal compression test: pictures of fracture surface were magnified to 7 times for (a), 40 times for (b), (c), (d)

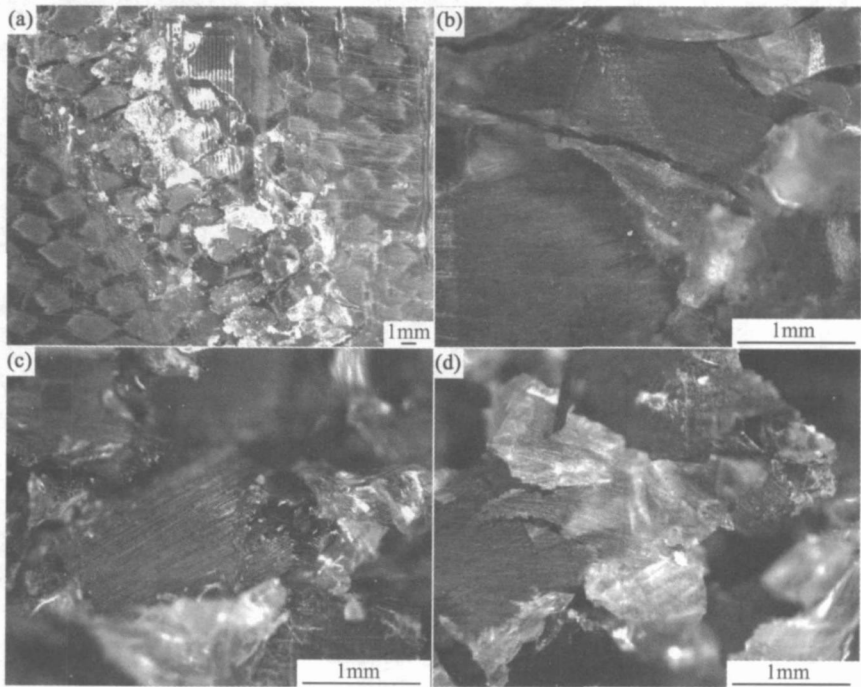


图 5 材料 3 轴向压缩断口照片 (a) 7 倍放大断口照片; (b), (c), (d) 40 倍放大断口照片
Fig. 5 Microscopic pictures of fracture surface for specimen 3 after longitudinal compression test: pictures of fracture surface were magnified to 7 times for (a), 40 times for (b), (c), (d).

3 结论

(1) 在编织角度较小的情况下, 纤维束承受主要的压缩载荷, 材料性能相对稳定, 材料的压缩模量和强度

都较大, 泊松比相对较小, 材料表现为脆性。随着编织角度增加, 基体对材料的力学性能和破坏逐渐起主导作用, 使得试件的模量和强度明显下降, 泊松比相对较
(下转第 66 页)

围内,这与从图 3 中所得到的结论是一致的,所以其孔隙结构能够极大地限制气体分子的运动,使得材料具有较低的热导率和较好的绝热性能。

3 结论

(1) 以硅酸铝纤维为增强组分制备的纳米孔超级绝热材料容重为 $74 \sim 189 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 常温常压热导率在 $25.3 \sim 30.5 \text{ mW} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 之间, $103 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 典型样品 723K 时的热导率为 $93.78 \text{ mW} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, 孔隙直径主要集中在 $10 \sim 20 \text{ nm}$, 因此常温和高温下均具有优良的保温绝热性能,并且有一定的强度,所以具有了实际工程应用的意义。

(2) 如果对这种材料高温下的绝热性能再加以改善,必将在航空航天、能源、化工和冶金等重要工业领域拥有更加广阔的应用前景。

参考文献

- [1] FRICKE J, TILLOTSON T. Aerogels: production, characterization, and applications [J]. Thin Solid Films, 1997, 297(1-2): 212-217.
- [2] KOCON L, DESPETIS F, PHALIPPOU J. Ultralow density silica aerogels by alcohol supercritical drying [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1998, 225(1): 96-100.

(上接第 62 页)

大,材料的失效表现出屈曲特征。

(2) 在编织角度较小时,材料应力-应变曲线基本呈线性,纤维束的脆性断裂导致材料的最终失效;随着编织角度增加,材料的应力-应变曲线趋于非线性,试件的破坏模式主要以纤维束间的剪切破坏为主,纤维束的压屈失稳导致试件的最终失效;编织角度进一步增加,基体承力相应增加,试件的屈曲特性也更加明显,基体与纤维束界面脱胶分离使得试件逐渐变得松散屈曲,从而导致承载能力不断下降。

参考文献

- [1] CHOU T W, KO F K. Textile structural composites [M]. Amsterdam: Composite Materials Series, Elsevier Science, 1989.
- [2] MACANDER A B, CRANE R M. Fabrication and mechanical properties of multi-dimensionally (X-D) braided composite materials [A]. WHITENEY J M. Composite Materials, Testing and Design (7th Conf.) [C]. Philadelphia: ASTM, 1986. 422-443.
- [3] MASTERS J E, IFJU P G. A phenomenological study of triaxially braided textile composites loaded in tension [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56: 347-358.
- [4] SMITH L V, SWANSON S R. Micro-mechanics parameters controlling the strength of braided composites [J]. Composites Science and Technology, 1995, 54: 177-184.

- [3] BUZYKAEV A R, DANILYUK A F, GANZHUR S F, et al. Measurement of optical parameters of aerogel [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999, 433(1-2): 396-401.
- [4] 曹玉璋. 传热学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [5] 王珏, 沈军, 邓忠生, 等. 一种新型保温材料掺杂改性 SiO_2 气凝胶 [J]. 上海化工, 1999, 24(18): 23-26.
- [6] REIM M, REICHENAUER G, KNORNER W, et al. Silica-aerogel granulate-structure, optical and thermal properties [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2004, 350: 358-363.
- [7] SMITH D M, MASKARA A, BOES U. Aerogel-based thermal insulation [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1998, 225(1): 254-259.
- [8] BISSON A, RIGACCI A, LECOMTE D, et al. Effective thermal conductivity of divided silica xerogel beds [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2004, 350: 379-384.
- [9] 许国良, 王晓墨, 邬田华, 等. 工程传热学 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [10] 张娜, 张玉军, 田庭艳, 等. 高温低热导率隔热材料的研究现状及进展 [J]. 中国陶瓷, 2006, 42(1): 16-17.

收稿日期: 2006-08-14; 修订日期: 2006-10-20

作者简介: 杨海龙(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事无机非金属材料的研究, 联系地址: 北京科技大学土木与环境工程学院 395 信箱 (100083)。

- [5] QUEK S C, WASS A M, SHAHWAN K W, et al. Compressive response and failure of braided textile composites: Part I-experiments [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2004, 39: 635-648.
- [6] 孙慧玉. 三维编织复合材料拉伸性能研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(6): 721-725.
- [7] 卢子兴, 冯志海, 寇长河, 等. 编织复合材料拉伸力学性能的研究 [J]. 复合材料学报, 1999, 16(3): 129-134.
- [8] 卢子兴, 胡奇. 三维编织复合材料压缩力学性能的实验研究 [J]. 复合材料学报, 2003, 20(6): 67-72.
- [9] 庞宝君, 杜善义, 韩杰才, 等. 三维四向编织碳/环氧复合材料实验研究 [J]. 复合材料学报, 1999, 16(4): 136-141.
- [10] 王波, 矫桂琼, 潘文革, 等. 三维编织 C/SiC 复合材料的拉压实验研究 [J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 110-114.
- [11] 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.
- [12] 徐焜, 许希武, 汪海. 三维六向编织复合材料力学性能的实验研究 [J]. 复合材料学报, 2005, 22(6): 144-149.

收稿日期: 2006-05-19; 修订日期: 2006-12-31

作者简介: 严实(1977-), 男, 博士研究生, 主要从事三维编织复合材料力学性能与失效机理研究, 联系地址: 哈尔滨工业大学科技园 A 栋 复合材料与结构研究所 315 室 (150080)。