

分类号

密级

太原理工大学  
硕士学位论文

题目 玻璃纤维/环氧树脂复合材料力学性能研究

英文并列题目 A Study on the Mechanical Properties of Glass Fiber/Epoxy Resin Composites

研究生姓名: 南洪尧

学号: 2015510983

专业: 力学

研究方向: 复合材料力学

导师姓名: 李志刚

职称: 副教授

论文提交日期 2018/06

学位授予单位: 太原理工大学

地址: 山西·太原

太原理工大学

## 声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 南洪尧 日期： 2018.6.13

## 关于学位论文使用权的说明

本人完全了解太原理工大学有关保管、使用学位论文的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内 容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

签 名： 南洪尧 日期： 2018.6.13

导师签名： 李志刚 日期： 2018.6.13

# 玻璃纤维/环氧树脂复合材料力学性能研究

## 摘要

玻璃纤维/环氧树脂（GF/EP）复合材料因其优异性能而被广泛应用于各个领域，例如：机械制造、电子封装、航空航天等。但随着社会的不断进步，人们对 GF/EP 复合材料的要求也在不断的更高。为了进一步提高 GF/EP 复合材料的机械性能，充分了解 GF/EP 复合材料的各种条件下力学性能十分必要。

为研究在静动态加载条件下以及微纳米尺度下的力学性能并对其在准静态以及动态的加载条件下的力学本构行为进行探究，实验材料选择了玻璃纤维（GF）含量分别为 55wt.%、75wt.%、95 wt.% 的 GF/EP 试件进行以下的实验。

对 GF/EP 材料在不同温度（50℃~110℃范围内）下进行了准静态下的单轴拉压试验，并且以在常温下的准静态下的单轴拉压试验作为对照，研究了 GF/EP 材料常温下的准静态力学性能以及温度对 GF/EP 材料准静态力学性能的影响。实验的结果表明：随着温度的升高，试件的弹性模量以及屈服强度均减小；使用 ZWT 粘弹性本构模型拟合 GF/EP 试样常温下的准静态压缩应力应变曲线，拟合结果较为理想，ZWT 模型可以描述 GF/EP 试件的本构行为。

对 GF/EP 材料进行动态压缩实验，得到试件在不同应变率下的应力-应



变关系，表现出 GF/EP 材料动态力学行为的高度非线性，并且发现 GF/EP 在应变率大于某一临界值时，会体现应变率敏感性；GF 含量 75wt.% 试件在试验中均发生脆性变形，而 GF 含量 95wt.% 试件在发生脆性变形的同时也产生了塑性形变，说明 GF 的增加会在一定程度上增加材料的韧性。使用 ZWT 粘弹性本构模型拟合玻 GF/EP 试样在不同应变率下的应力应变曲线，拟合结果较为理想，ZWT 模型可以描述 GF/EP 试件的本构行为。

采用纳米压痕仪，对 GF 含量不同的三种环氧树脂（EP）进行了微纳米力学测试，分析了不同 GF 添加量对于环氧树脂材料力学性能的影响。随着 GF 的添加量增多，EP 的承载能力得到提高，最大压入深度所对应的载荷更大，此外随着 GF 的添加量增多，达到相同压入深度所需加载时间延长；基于连续刚度法计算得到的 GF 增强 EP 材料的弹性模量及硬度随着 GF 含量的增加而增长，体现出高纤维含量 EP 的弹性抵抗性能以及局部压入抵抗能力的优异性；基于保载阶段得到材料的室温蠕变性能，复合材料压痕蠕变表现出类似单轴拉伸的两阶段蠕变特性。

**关键词：**玻璃纤维/环氧树脂，准静态拉压，动态压缩，纳米压痕

# A STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS FIBER/EPOXY RESIN COMPOSITE

## ABSTRACT

Glass fiber/epoxy resin (GF/EP) composite materials are widely used in various fields due to their excellent properties, such as mechanical manufacturing, electronic packaging, aerospace et al. However, with the continuous progress of the society, the requirements for GF/EP composite materials are also continuously higher. In order to further improve the mechanical properties of GF/EP composite materials, it is necessary to fully understand the mechanical properties of GF/EP composites.

The present work studied the static and dynamic loading conditions and the mechanical properties of micro/nano scales, and investigate the constitutive relationship under the condition of quasi static and dynamic load. The experiment material are 55 wt. %, 75 wt. % and 95 wt. % of GF/EP specimens.

Quasi-static uniaxial tension-compression tests were performed on GF/EP materials at different temperatures (in the range of 50 °C to 110 °C), and uniaxial tension-compression tests under quasi-static conditions at room temperature were used as controls. The quasi-static mechanical properties of GF/EP materials at room temperature and the influence of temperature on the quasi-static mechanical properties of GF/EP materials were studied. The

experimental results show that the elastic modulus and yield strength of the specimen decrease with increasing temperature. The quasi-static compressive stress-strain curve of GF/EP specimen at room temperature is fitted using the ZWT viscoelastic constitutive model. The combined results are ideal. The ZWT model can describe the constitutive behavior of GF/EP specimens.

Dynamic compression experiments of GF/EP under different strain rate of stress-strain relationship were obtained, showing the behavior of highly nonlinear material. The GF/EP showed strain rate sensitivity when strain rate is higher than a certain critical value. GF content of 75 wt. % of specimen are brittle deformation in the test, specimens with GF content of 95 wt. % show a brittle deformation and the plastic deformation, indicating that the increase of GF will increase the toughness of the material. Using ZWT viscoelastic constitutive model to fit the stress-strain curve of the glass GF/EP specimen under different strain rates, the fitting results are ideal, and the ZWT model can describe the constitutive behavior of GF/EP specimen.

Nanoindentation experiments of GF in different kinds of epoxy resin (EP) on the micro/nano mechanics were conducted. The different GF content for the influence of epoxy resin on mechanics performance was investigated. As GF content increased, the EP's carrying capacity, maximum pressure into the depth of the load is bigger. In addition, with the increasing of GF content, loading time required to achieve the same pressure depth extension. Based on continuous stiffness method, GF strengthen EP materials elastic modulus and the hardness

increases with the increase of GF content. The elastic resistance of high fiber content EP and local pressure resistance are better. The creep behavior of the composite material is similar to that of uniaxial tensile.

KEY WORDS: glass fiber/epoxy resin, quasi-static tension and compression, dynamic compression, nanoindentation





## 目录

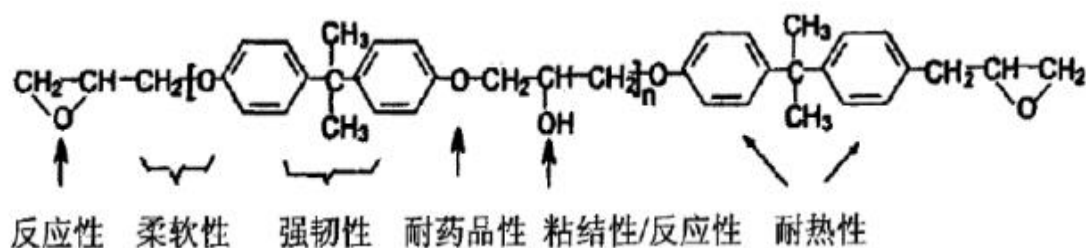
第一章 绪论.....	1
1.1 环氧树脂概述.....	1
1.1.1 环氧树脂的种类.....	1
1.1.2 环氧树脂的用途.....	3
1.2 玻璃纤维的概述.....	4
1.2.1 玻璃纤维的分类.....	4
1.2.2 玻璃纤维性能.....	5
1.2.3 玻璃纤维的应用.....	5
1.3 GF/EP 复合材料.....	6
1.3.1 GF/EP 复合材料成型工艺.....	7
1.3.2 GF/EP 复合材料性能及应用.....	7
1.4 本文研究内容和意义.....	9
第二章 不同温度下准静态压缩试验.....	11
2.1 常温下准静态压缩试验.....	11
2.1.1 材料和试验过程.....	11
2.1.2 试验结果与分析.....	12
2.2 不同温度下的准静态压缩试验.....	14
2.2.1 材料和试验过程.....	14
2.2.2 试验结果与分析.....	15
2.3 ZWT 粘弹性本构模型.....	16
2.4 本章小结.....	18
第三章 不同温度下准静态拉伸试验.....	19
3.1 常温下准静态拉伸试验.....	19
3.1.1 材料和试验过程.....	19
3.1.2 试验结果与分析.....	20
3.2 不同温度下的准静态拉伸试验.....	21
3.2.1 材料和试验过程.....	21
3.2.2 试验结果与分析.....	21
3.3 本章小结.....	23

第四章 SHPB 动态压缩实验.....	25
4.1 SHPB 技术的实验原理.....	25
4.2 试验过程及结果.....	28
4.3 ZWT 粘弹性本构模型.....	31
4.4 试件变形特征.....	33
4.5 应变率敏感性.....	34
4.6 本章小结.....	35
第五章 GF/EP 复合材料纳米力学性能.....	37
5.1 纳米压痕技术.....	37
5.1.1 纳米压痕测试理论.....	37
5.1.2 纳米压痕实验方法.....	40
5.2 纳米压痕试验.....	41
5.2.1 弹性性能和硬度.....	41
5.2.2 蠕变.....	46
5.3 本章小结.....	48
第六章 全文总结.....	51
参考文献.....	53
致谢.....	57
攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	59

# 第一章 绪论

## 1.1 环氧树脂概述

环氧树脂为结构中含有环氧基团的高分子聚合物的总称，其结构为三维网状结构，是由一定条件下固化而成的聚合物材料，其相对分子质量较低。环氧树脂包括缩水甘油酯型、醚型、脂环族、及缩水甘油胺等几类。目前使用较多的为双酚 A 类环氧树脂，其为缩水甘油醚型，含量为 85%。由环氧氯丙烷与双酚 A 制得，其通式<sup>[1]</sup>为：



环氧树脂在固化前为液体状态，环氧树脂固化剂能够与其发生反应，使其固化成三维的网状结构，才能投入到实际的应用中。固化剂的固化温度差异很大，固化后的耐高温性能存在较大区别。固化剂按照其种类不同，分为脂肪胺、芳香胺及酸酐类等。芳香胺类固化剂的固化温度一般较高。而部分脂肪胺类固化剂在室温便能与环氧树脂发生固化反应，使之固化。所以，通过该类固化剂固化环氧树脂简便、快捷。在实际应用中具有更广泛的适用性。

### 1.1.1 环氧树脂的种类

在复合材料工业中使用最多的环氧树脂为缩水甘油醚类，其中最广泛使用的是二酚基丙烷型环氧树脂(双酚 A 环氧树脂)。接下来为缩水甘油胺类环氧树脂。图 1-1 为普通液态环氧树脂。



图 1-1 普通液态环氧树脂

Fig. 1-1 Ordinary liquid epoxy resin

1、(1) 缩水甘油醚类环氧树脂是环氧氯丙烷与含活泼氢的醇类或酚类聚合而成的高聚物。而二酚基丙烷类环氧树脂是二酚基丙烷以及环氧氯丙烷缩聚合而成。

环氧树脂常见控制指标：

1) 环氧值。环氧值是控制环氧树脂性质的最重要指标，其值定义为 100g 环氧树脂中所含的环氧基物质量数。工业中常用环氧树脂的型号区分就是靠环氧值得大小。环氧当量定义为每含有 1mol 环氧基环氧树脂所需克数。其值为环氧值倒数的 100 倍。

2) 氯离子含量是环氧树脂另一项重要指标。氯离子可以通过与胺类固化剂反应影响固化时间以及固化质量，进而影响固化环氧树脂的性能。

3) 有机氯的含量。环氧树脂中有机氯是指未能进行闭环反应的氯醇基团的含量，其存在会影响环氧树脂的固化性能，破坏高聚物的完整性，在生产中应当避免有机氯的含量过高。

其它包括粘度、软化点以及挥发分等指标也会影响到环氧树脂的性能。

(2) 酚醛多环氧树脂分子中含有两个以上环氧基，其固化成的高聚物相比二酚基丙烷型环氧树脂密度更大，其热稳定性，绝缘性能，耐腐蚀性能以及防水性能较强。分权多环氧树脂包括邻甲酚甲醛型以及多环氧树脂苯酚甲醛型。

(3) 缩水甘油醚型环氧树脂，包括多羟基酚类：间苯二酚、四酚基乙烷以及间苯二酚-甲醛型等。其在固化以后具有较高的温度抗性，且固化后环氧树脂具有较大的弹性模量，抵抗变形能力较强。可以用作微电子封装系统中的电路板基材。

(4) 脂族多元醇缩水甘油醚分子中包含多个环氧基，因此该类环氧树脂粘性较低，可以形成长链的高分子聚合物，因此具有很强的韧性。

## 2、其它类的环氧树脂

(1) 缩水甘油醚类环氧树脂具有低粘性以及较高的活性，较易成型，绝缘性能优异。

固化后耐低温性能好，具有较低温度下的耐久性，且力学性能优异。此外，该种环氧树脂表面光泽度高，美观耐用。

(2)缩水甘油胺类环氧树脂环氧当量较高，密度较大，材料中分子交联现象明显。该类环氧树脂多用于包覆碳布，制造碳纤维复合材料，其能够承受高应力，用于飞机、汽车等结构材料。

(3)脂环族环氧树脂分子结构与二酚基丙烷型环氧树脂差异较大，其原理是由脂环族烯烃环氧化后制备而成。该类环氧树脂具有高温力学性能好，压缩拉伸强度高，耐紫外线性能优异等特点。

### 1.1.2 环氧树脂的用途

环氧树脂具有优良的电绝缘和物理机械性能、使用工艺的灵活性、以及与各种材料的粘接性能。以环氧树脂为基体的复合材料在涂料、胶黏剂、电子器件具有良好的综合性能，因此在工业生活中各个领域得到了广泛的应用。

(1) 环氧树脂涂料在日常应用中十分广泛。其具有良好的耐酸碱性能，化学性质稳定，由环氧树脂制备成的漆具有良好的附着力以及良好的耐热性能。此外该类漆膜具有良好的绝缘性能以及耐久性能，可用作金属绝缘漆、金属防锈漆等底漆材料。

(2) 环氧树脂胶粘用途。环氧树脂对于非金属材料如木材、玻璃、混凝土等；各种金属材料如铁、铜、铝、钢；及热固性塑料不饱和聚酯以及酚醛等都有着优异的粘接特性，环氧胶粘剂为工业胶粘剂中应用最为广泛的一种。

(3) 电子电器。由于环氧树脂的强度大、密封性能好以及绝缘性高等优点，在微电子封装、电子元器件、微机系统以及高低压电器的封装领域中得到大量的应用。主要用于：1. 电子级的环氧模塑料主要用在半导体的元器件塑封。因为它的性能优越，所以发展速度非常快，有取代玻璃、陶瓷和金属封装的趋势。2. 电机以及电器电路板绝缘封装。例如感应器、非接触式线圈、干式变压器等高低压电器绝缘封装件制造。此外环氧树脂在电器及自动化工业中的应用扩展迅速。

但是，双酚 A 型环氧树脂优点固然好，也有缺点：1.剥离强度较低。2.固化物的伸长率小、性能脆。3.操作粘度较大，在施工中显的不方便。4.耐热冲击和机械冲击差。

## 1.2 玻璃纤维的概述

作为一种性能十分突出的纤维材料，玻璃纤维的比强度极高、还具有优异的耐腐蚀性及尺寸稳定性、不易被水渗透等特性，是非常具有应用前景的非金属材料，使得玻璃纤维在无机非金属材料中占据重要地位。因为玻璃纤维优良的性能，在许多传统与新兴的领域玻璃纤维相关的产品被大量应用，比如航空、航天、电子、电气、能源、化工等领域<sup>[2]</sup>。

在二十世纪三十年代末期，随着 E 玻璃纤维的出现以及各种不饱和聚酯与环氧树脂开始在生产生活中得到应用，玻璃纤维与环氧树脂的结合将复合材料带进了一个新的时代，同时相关的产业得以快速发展。因为工业生产的大量需求，诞生许多生产玻璃纤维的相关企业有日东纺绩株式会社、美国 PPG 公司以及国内的泰山玻璃纤维有限公司、巨石集团等<sup>[3,4]</sup>。虽然我们国家的玻璃纤维产量很高，但我们的生产技术却远远落后于其他国家。因此，距我国成为玻璃纤维大国甚至强国，我们仍需要不断的努力。图 1-2 为玻璃纤维切纱。



图 1-2 玻璃纤维切纱

Fig. 1-2 Glass fiber cutting yarn

### 1.2.1 玻璃纤维的分类

通常按组成、用途和性质对玻璃纤维进行分类。玻璃纤维的类型见表 1-1。



表 1-1 玻璃纤维类型及其性能  
Table 1-1 Glass fiber types and their properties

类型	简述
E	具有良好的力学性能和绝缘性
ECR	具有优异的耐腐蚀、防水性
R	具有优良的耐腐蚀性能的高强度玻璃维
S	高强度，具有很好的耐腐蚀和耐热性能
A	钠硅酸盐玻璃纤维，防水性差
C	具有优良的耐腐蚀性的玻璃纤维
D	具有较低介电性的玻璃纤维
AR	广泛应用于高性能增强混凝土中的环保型增强材料

### 1.2.2 玻璃纤维性能

物理性能的特点：防水性好，表面光滑，力学稳定性好，质量轻<sup>[5]</sup>，抗拉伸强度高，耐热性能优良，密度在大多数金属和有机纤维密度之间。

化学性能的特点：具有良好的抗腐蚀性，除浓磷酸、氢氟酸、浓碱以外，玻璃纤维对大部分的有机溶剂与化学药品都具有良好的化学稳定性。同时玻璃纤维还有抗紫外线辐射和防腐等其他性能。

### 1.2.3 玻璃纤维的应用

表 1-2 玻璃纤维复合材料使用范围及特性  
Table 1-2 Glass fiber composites use and characteristics

领域	应用	优势
设施	水上设施、码头、排水管道、公路路面等	密度小、防水性好、化学性质稳定
国防	飞行器机身、精密构件、雷达罩、头盔、救援担架等	密度小、抗冲击性能好、强度大等
化工	化工容器、玻璃钢叶片、格栅机组罩等	密度小、化学性质稳定性，易成型
运动器材	网球拍、冰球曲棍球球杆，篮球架等	密度小、摩擦系数小、易加工成型力学性能好、抗疲劳性好

因为玻璃纤维具有优良的性质和诸多的优点，所以在许多领域有着广泛的应用<sup>[6]</sup>。其应用的领域及利用特性见表 1-2。

玻璃纤维在无论是近些年发展起来的新兴领域，还是存在已久的传统的领域都有着极为广泛的应用。同时随着科学技术的发展以及人们对材料更高性能化要求不断的提高，具有诸多优良性能的玻璃纤维必将受到大家的追捧。

### 1.3 GF/EP 复合材料

在 19 世纪中叶，因为航空航天等高精尖端技术领域需求的刺激，玻璃纤维增强聚合物复合材料（GFRP）得到了迅猛的发展。迄今为止，GFRP 仍然活跃在材料领域的舞台，具有重要的战略性研究价值，同时带动了工业的技术的发展。相较于其他的复合材料，GFRP 在对社会生产生活方面做出了贡献遥遥领先，因此全球各个国家对于 GFRP 的研究一直十分重视。图 1-3 为常见的玻璃纤维棒。

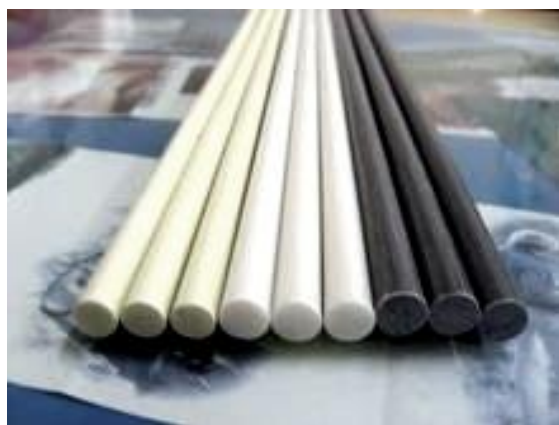


图 1-3 玻璃纤维棒

Fig. 1-3 Glass fiber rods

GFRP 是以树脂为基体和玻璃纤维为增强体组成的一类新材料。同传统金属材料进行比较，GFRP 具有密度小，不容易被腐蚀，十分优秀的电绝缘性、很大的比强度、导热很慢的特点<sup>[7-10]</sup>，另外，玻璃纤维的介电性能十分稳定，不会因为频率和温度而发生较大的变化。所以，在雷达天线罩、航空航天等许多领域中 GFRP 会被广泛的使用。GFRP 的基体主要有两种：一种属于热塑性树脂，比如聚酰胺<sup>[11]</sup>、聚丙烯、聚碳酸酯<sup>[12]</sup>；另一种属于热固性树脂，比如酚醛树脂<sup>[13]</sup>、环氧树脂。在这些树脂之中，以环氧树脂在热固性树脂的复合材料的应用最为广泛。由于 GF/EP 复合材料在成型收缩很小、能承受较大的载荷、不易被腐蚀、尺寸稳定性优良等特点<sup>[14]</sup>，GF/EP 复合材料是最典型纤维增强

树脂的复合材料，在印刷电路板和加工工业零部件时有大量的应用。

### 1.3.1 GF/EP 复合材料成型工艺

制备 GF 复合材料时，成型工艺和复合方式极为重要。相同配比的材料如果用不同的成型工艺和复合方式，成型的复合材料性能可能会有较大差别。所以要根据实际生产生活应用中的不同需求，来选择相应的复合材料成型方式。现在，GF/EP 材料成型方式包括预浸成型、手工成型、拉挤成型和树脂传递成型等<sup>[15]</sup>。

预浸成型的原理：先通过一定的方法将环氧树脂抹到玻璃纤维（或玻璃纤维的维织物）之上，然后将其处理并做成半成品储存备用，成型时在模具表层铺满预浸料，并且使之处于真空之中，最后使其在流动中加热固化成型。这种成型工艺的优势在于可以灵活调整固化剂与树脂的配比，从而可以制备获得树脂含量不同的预浸片材<sup>[16]</sup>。

手工成型工艺，也可以称之为接触成型工艺。此方法在复合工艺材料之中使用的最早<sup>[17]</sup>。具体做法：按顺序将脱模剂、涂抹布胶衣、裁切好玻璃纤维添加到模具里，待凝胶后将 GF 浸入 EP 中，将其加紧，最后成型。这种成型工艺的优势是成本低，仪器设备简单容易操作，成型的材料不易腐蚀，EP 含量较高，且可以制成任意形状大小的制品。但其生产效率很低，人为因素对制品会有很大影响，生产的条件不好。

拉挤成型：先将玻璃纤维浸在到液态环氧树脂里面；等玻璃纤维预成型之后，把它放到加热模具里面，再进行持续热处理，直至完全成型，得到复合材料。此工艺具有生成效率高，成型可以连续，且制品的质量稳定、外观平滑，长度不受限制的特点<sup>[18]</sup>。

树脂传递成型（RTM）基本原理：先使玻璃纤维散放在闭模型腔中，施加压力将环氧树脂注入，此时环氧树脂会完全浸透玻璃纤维，最后再固化脱模即可。这种成型工艺优势在于制品的纤维含量可以比较高；此外，还可以根据实际的需求来设计制品的强度；此成形工艺还具有成型周期短、产品可大型化的优点。这种成型工艺制备的典型产品包括小型飞机、仪表壳、汽车零部件与客车座椅<sup>[19,20]</sup>。

### 1.3.2 GF/EP 复合材料性能及应用

复合材料因其优异性能而被广泛应用于国民生活的许多方面，但随着社会的不断进步，人们对复合材料的要求也更高。为了进一步提高复合材料的机械性能，充分了解复合材料的各种条件下力学性能显得十分必要。

GF/EP 复合材料有着极其优异的性能而使它多年活跃在材料领域之中。同时,GF/EP 复合材料在国民生活的各个方面基本都有应用。但随着时代的不断发展前进,人们对 GF/EP 复合材料的性能也必然会提出进一步的要求。因此,更全面的了解 GF/EP 复合材料力学性能对 GF/EP 复合材料的进一步发展十分重要。

许多学者对 GF/EP 复合材料在静态条件下的做了大量的研究。国内,在上世纪 90 年代初,董立明、夏源明等人<sup>[21,22]</sup>最早开展玻璃纤维束和单向玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料的力学性能研究。张磊和张硕等人<sup>[23,24]</sup>研究了玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料顺纤维方向和垂直纤维方向的准静态拉伸力学性能。王启强等人<sup>[25]</sup>研究玻璃纤维与环氧树脂的配比、固化条件对玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料的力学性能的影响。薛晓敏等<sup>[26]</sup>测试了玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料准静态拉伸力学性能,并对该复合材料受压管件进行了稳定性试验及理论研究。

在动态条件下,沈玲燕等人<sup>[27]</sup>通过实验系统研究了三维正交机织玻璃纤维 / 环氧树脂基复合材料厚度方向和面内方向的动、静态压缩力学性能,结果表明,动、静态压缩载荷作用下该材料响应表现出明显的各向异性、非线性和应变率敏感性。赵培仲等人<sup>[28]</sup>研究了玻璃纤维布/EP-PBMA 复合材料在不同加载速率下的拉伸力学性能,结果表明:玻璃纤维布 / EP-PBM 复合材料具有明显的应变率效应;随着加载速率增大,复合材料的拉伸强度和弹性模量呈增大趋势。国外,Shokrieh 等人<sup>[29]</sup>开展了玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料动态压缩实验,揭示应变率对其压缩力学性能影响,结果表明:随应变率增大,压缩强度、杨氏模量增大,而破坏应变。Naresh 等人<sup>[30]</sup>采用 Instron 试验机和小落锤加载系统对玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料层合板在 0.0016/s 到 542/s 应变率下拉伸力学性能进行了实验研究,结果显示其力学性能具有很强的应变率敏感性。Gurusideswar 等人<sup>[31,32]</sup>也采用小落锤加载系统研究了环氧树脂和玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料层合板在中低应变率下拉伸力学响应。

在微观结构中, Lee 等<sup>[33]</sup>用纳米压痕技术表征了纤维素纤维增强聚丙烯复合材料的界面相厚度。但是纳米压痕技术在界面相表征方面也存在一些固有难题有待解决,由于纤维和树脂的性能差异,造成磨抛后在垂直于纤维方向的复合材料横截面上,纤维和树脂的高度差较大无法准确表征面相,如 HODZIC 等<sup>[34]</sup>的报道中玻璃纤维和树脂高度差可达 400 nm。Gao 等<sup>[35]</sup>结合原子力显微镜技术表征了玻璃纤维增强聚合物基复合材料的界面纳米尺度的模量性能变化。图 1-4 为 GF/EP 复合材料部分应用领域实例。



图 1-4 GF/EP 复合材料的应用实例

Fig. 1-4 Applications of GF/EP composites

## 1.4 本文研究内容和意义

为了研究 GF/EP 材料在静动态加载条件下，以及微纳米尺度下的力学性能，以及不同配比对材料力学性能的影响，主要进行以下工作：

(1) 利用万能试验机对配比不同的 GF/EP 试件进行了准静态单轴拉压试验，并且又利用 Zwick/RoellZ005 型万能材料试验机对配比不同的材料，在一定温度梯度下，进行准静态单轴拉压试验，分析温度对 GF/EP 材料准静态条件下力学性能的影响以及不同配比的 GF/EP 材料对其准静态下力学性能的影响；采用 ZWT 粘弹性本构模型对常温下 GF/EP 材料的准静态压缩应力-应变曲线进行拟合，ZWT 本构模型可以很好地描述 GF/EP 材料的准静态下的力学行为。

(2) 利用 SHPB 试验装置对试件进行了不同应变率下动态压缩试验，研究材料在的动态力学性能以及材料的应变率敏感性；并比较应变率相近配比不同的试件，探究配比对材料的应变率敏感性及其他力学性能的影响；采用 ZWT 粘性本构模型对 GF/EP 材料的动态压缩应力-应变进行拟合，ZWT 本构模型可以很好地描述 GF/EP 材料的较高应变率下的力学行为。

(3) 采用纳米压痕法，基于连续刚度测量原理，对玻璃纤维含量不同的三种环氧树脂进行了微纳米力学测试，研究不同玻璃纤维添加量对于环氧树脂材料微纳米级的力学性能的影响。基于保载阶段得到材料的室温蠕变性能，复合材料压痕蠕变表现出类似

单轴拉伸的两阶段蠕变特性，且玻璃纤维含量低的试样越容易发生蠕变。

材料一般都会经历制品的开发阶段、设计阶段和应用阶段，每个阶段都可能会对材料造成破坏，而且材料本身也必然会存在着一些缺陷，因此，研究玻璃纤维/环氧树脂材料的静动态加载条件及微纳米尺度下的力学性能具有十分重要的现实意义，并且为玻璃纤维/环氧树脂复合材料的设计、材料自身的发展可提供重要的实验与理论依据，为避免意外发生提供保障，还能拓展材料的应用前景。



## 第二章 不同温度下准静态压缩试验

随着 GF/EP 复合材料应用越来越广泛，在实际服役中，有时候就会有可能需要这种材料处于温度较高的环境中。因此测试这种材料在不同的温度下的力学性能十分有必要。另外，当前对这种材料的力学行为的研究相对较少，故对材料进行不同温度下准静态的拉压试验。

### 2.1 常温下准静态压缩试验

#### 2.1.1 材料和试验过程

本试验所用的试样为 GF 含量分别为 55wt.%、75wt.%、95wt.% 的 GF/EP 试件，分别是由生产商——上海伟奋实业有限公司、扬州兆欧电工绝缘材料有限公司以及深圳市英德源绝缘塑胶制品有限公司提供。而后通过机加工方式分别将其加工成直径 8mm、厚度 10mm，直径 8mm、厚度 7.5mm，直径 10mm、厚度 9mm 的试样如图 2-1 所示。



图 2-1. 三种配比不同的 GF/EP 试样

Fig. 2-1 Three different ratios of GF/EP specimens

本实验采用的是深圳万测实验设备有限公司生产的 ETM105D 型微机控制电子万能试验机，如图 2-2 所示。在试验开始前需要做的工作有：（1）检查实验机的软件与硬件的连接；（2）实验机的硬件是否处于准备好的状态（3）设定实验参数；（4）然后对实验机进行初始化清零。



图 2-2 ETM105D 型电子万能试验机

Fig. 2-2 ETM105D electronic universal testing machine

对试样进行准静态压缩试验，为与下文不同温度下准静态压缩实验进行对比，记录室内温度  $20.3^{\circ}\text{C}$ ，加载速度为  $2\text{mm}/\text{min}$ ，每种试件重复 5 次试验，以保证试验结果的可靠性。

### 2.1.2 试验结果与分析

试验得到试件在常温下准静态单轴压缩的载荷-位移曲线如图 2-3 所示。

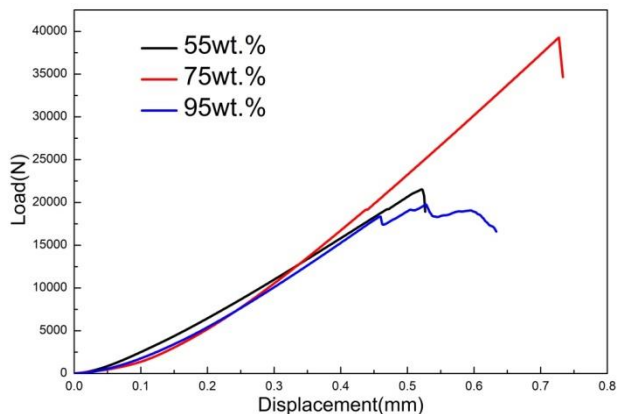


图 2-3 载荷-位移曲线

Fig. 2-3 The load-displacement curve

在准静态单轴压缩试验中，试件的应力、应变分别为  $\sigma$  和  $\varepsilon$ ，根据公式：

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2-1)$$

式中， $F$  为作用于试件上的轴向力， $A_0$  为试件原始横截面积， $\Delta h$  为试件在压缩过程中的位移（即试件的轴向压缩变形量）， $h_0$  为试件原始高度。得到试件在常温下准静态单轴压缩的应力-应变曲线如图 2-4。

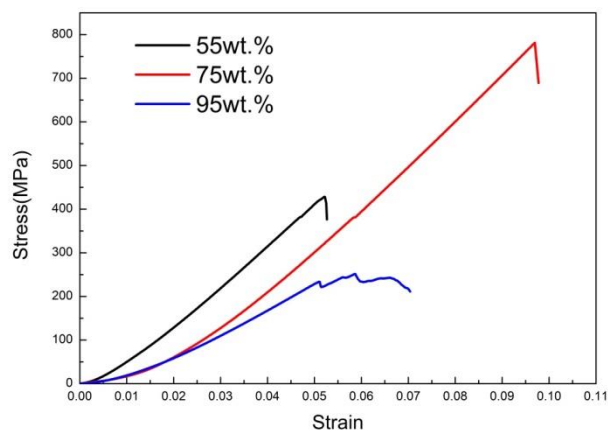


图 2-4 应力-应变曲线

Fig. 2-4 The stress-strain curve

从图中可以看出，准静态加载条件下，GF含量为55wt.%与75wt.%试样在加载过程中达到屈服强度后直接发生了脆性断裂，而GF含量为95wt.%的试样在达到屈服强度后，开始产生了塑性变形。表2-1为不同GF含量的试件在准静态压缩实验中测得的屈服强度。

表2-1 不同GF含量的试件的屈服强度

Table 2-1 The yield strength of specimens with different GF content

GF含量	55wt.%	75wt.%	95wt.%
屈服强度 (MPa)	430.8	781.2	233.5

## 2.2 不同温度下的准静态压缩试验

### 2.2.1 材料和试验过程

本实验采用的仪器为德国 Zwick/Roell 公司生产的 Zwick/RoellZ005 型万能材料试验机, 如图 2-5 所示。实验材料为 GF 含量为 55wt.%、75wt.% 的上述试样, 尺寸大小与在常温下的进行静态压缩实验的试样相同。



图 2-5 Zwick/RoellZ005 型万能试验机

Fig. 2-5 Zwick/RoellZ005 universal testing machine

设置加载速度为 2mm/min。在加载 GF 含量为 55wt.% 的试样时, 加载时的温度分别设为 50℃、80℃ 和 110℃; 在加载 GF 含量为 75wt.% 的试样时, 加载时的温度分别设为 50℃、70℃ 和 90℃。对试样进行准静态压缩试验, 每种试件重复 5 次试验, 以保证试验的可靠性。

### 2.2.2 试验结果与分析

同常温下的处理数据方法, 得到两种 GF 含量试件在不同温度下的应力-应变曲线如图 2-6。

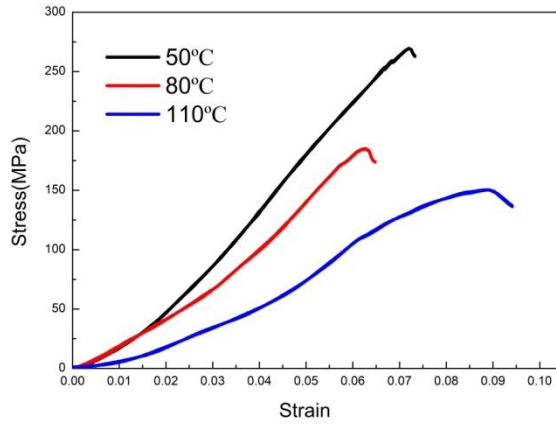


图 2-6(a) 55wt.% 试件在不同温度下应力-应变曲线

Fig. 2-6(a) The stress-strain curve at different temperatures of the 55wt.% specimen

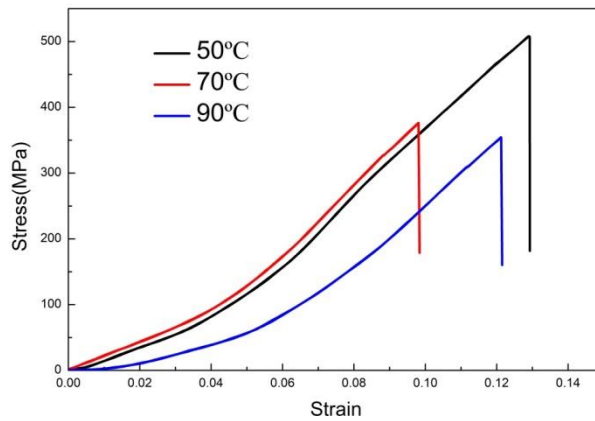


图 2-6(b) 75wt.% 试件在不同温度下应力-应变曲线

Fig. 2-6(b) The stress-strain curve at different temperatures of the 75wt.% specimen

由如图 2-6 可知, 55wt.% 试件与 75wt.% 试件的屈服强度均与温度呈现出负相关, 即温度越高, 试件的屈服强度越低。且 55wt.% 试件随着温度的升高, 应力-应变曲线的斜率呈现减小的趋势, 即温度越高, 试件的屈服强度越低, 试件的弹性模量也受温度的影响。

结合在常温下准静态的测量结果, 得到表 2-2。符合材料随温度的升高, 屈服强度降低的规律。

表2-2(a) 不同温度下55wt.%试件的屈服强度

Table 2-2(a) The yield strength of 55wt.% specimens at different temperatures

温度 (°C)	20.3	50	80	110
屈服强度 (MPa)	430.8	269.5	185.0	150.3

表2-2(b) 不同温度下75wt.%试件的屈服强度

Table 2-2(b) The yield strength of 75wt.% specimens at different temperatures

温度 (°C)	20.3	50	70	90
屈服强度 (MPa)	781.2	508.1	376.3	354.4

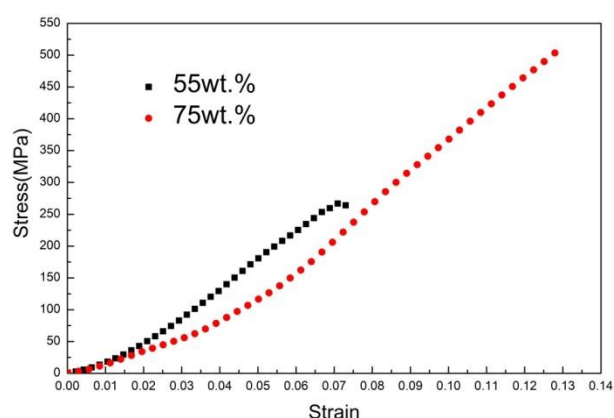


图 2-7 50°C下应力-应变曲线

Fig. 2-7 The stress-strain curve at 50°C

如图图 2-7，比较在 50°C 下，55wt.% 与 75wt.% 的试件准静态压缩应力-应变曲线。75wt.% 的试件屈服强度更大。

### 2.3 ZWT 粘弹性本构模型

在工程上，常常会选择合适的本构模型描述材料的力学性能。ZWT 粘弹性模型由朱兆祥，王礼立和唐志平<sup>[36]</sup>在 1981 年提出。ZWT 本构模型由一个非线性弹簧及两个不同特征时间的 Maxwell 体并联组成，如图 3.4。经研究<sup>[37]</sup>表明，在准静态荷载到冲击荷载的应变率范围内（ $10^{-4}/s$  到  $10^3/s$ ），典型高聚物可由式（2-2）比较完美的描述其非线性粘弹性的本构行为。

$$\sigma = E_0 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (2-2)$$



其中： $\sigma$ 表示应力； $\varepsilon$ 表示应变； $t$ 表示时间。 $E_0$ 、 $\alpha$ 和 $\beta$ 表示与应变率无关的非线性弹性响应弹性常数。

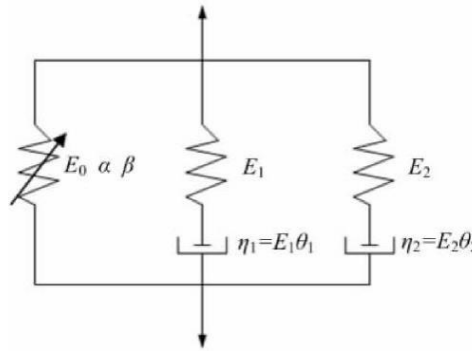


图 2-8 ZWT 粘弹性本构模型

Fig. 2-8 ZWT viscoelastic constitutive model

由图 2.4 分析可知，试件的应力应变曲线有一定的粘弹性特征，因此可以用 ZWT 粘弹性模型对试件进行本构描述。

由于加载应变率为固定值，可将式 (2-2) 记为

$$\sigma = A_1 \varepsilon + A_2 \varepsilon^2 + A_3 \varepsilon^3 + B \left(1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{C}\right)\right) + D \left(1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{E}\right)\right) \quad (2-3)$$

静态试验且常温下完成，忽略试件的损伤以及温度对试件力学性能产生的影响，对 GF 含量分别为 75wt.%、95wt.% 的试件的应力-应变曲线进行参数拟合，参数拟合结果见表 2.3。（ $\dot{\varepsilon}_{75\text{wt.}\%} = 4.44 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ， $\dot{\varepsilon}_{95\text{wt.}\%} = 3.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）

表 2.3 ZWT 粘弹性本构模型参数拟合结果

Table 2.3 Fitted results of modified ZWT

试件	$A_1$	$A_2$	$A_3$	B	C	D	E
75wt.%	472.11	$1.39 \times 10^5$	$-6.46 \times 10^5$	$7.41 \times 10^{-4}$	$5.37 \times 10^{-8}$	4.68	0.00559
95wt.%	-411.71	$2.03 \times 10^5$	$-2.16 \times 10^6$	$2.41 \times 10^{-4}$	$6.05 \times 10^{-7}$	3.93	0.047

实验得到的结果与 ZWT 本构模型拟合的结果对比如图 2.9 所示。两者基本吻合，说明 ZWT 本构模型能够 75wt.% 描述 GF/EP 材料的准静态力学行为。

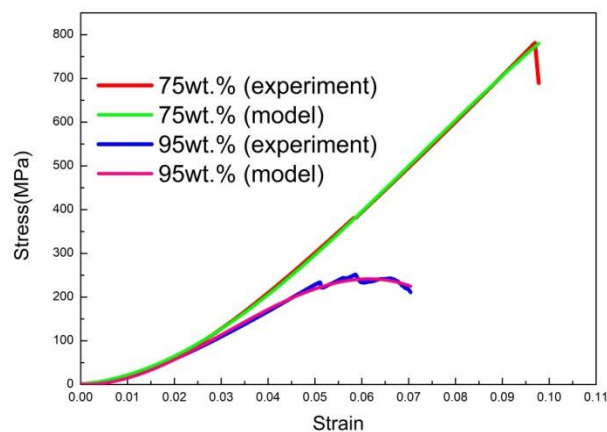


图 2-9 ZWT 模型参数拟合结果与实验数据

Fig. 2-9 Fitting result of ZWT model and experiment data

## 2.4 本章小结

本章通过对 GF/EP 试件进行了不同温度下的准静态压缩试验，获得了 GF 含量不同的 GF/EP 试样在不同温度下的屈服强度，发现 GF 含量越低，温度越高，试件的弹性模量和屈服强度越小。使用 ZWT 粘弹性本构模型拟合 GF/EP 试样常温下准静态的实验数据，拟合结果较为理想，表明 ZWT 模型可以描述 GF/EP 试件的本构行为。

## 第三章 不同温度下准静态拉伸试验

### 3.1 常温下准静态拉伸试验

#### 3.1.1 材料和试验过程

本试验所用的试样为 GF 含量分别为 55wt.%、75wt.%、95wt.% 的 GF/EP 试件，与第二章压缩试验相同。而后通过机加工方式分别将其加工成直径 12mm、长度 210mm，直径 10mm、厚度 100mm，直径 10mm、厚度 240mm 的试样如图 3-1 所示。



图 3-1 三种配比不同的 GF/EP 试样

Fig. 3-1 Three different ratios of GF/EP specimens

如图 2-2 所示。在试验开始前需要做的工作有：（1）检查实验机的软件与硬件的链接；（2）实验机的硬件是否处于准备好的状态（3）设定实验参数；（4）然后对实验机进行初始化清零。

对试样进行准静态拉伸试验，为与下文不同温度下准静态拉伸实验进行对比，记录室内温度 20.3℃，加载速度为 2mm/min，每种试件重复 5 次试验，以保证试验结果的可

靠性。

### 3.1.2 试验结果与分析

试验得到试件在常温下准静态单轴拉伸的载荷-位移曲线如图 3-2 所示。

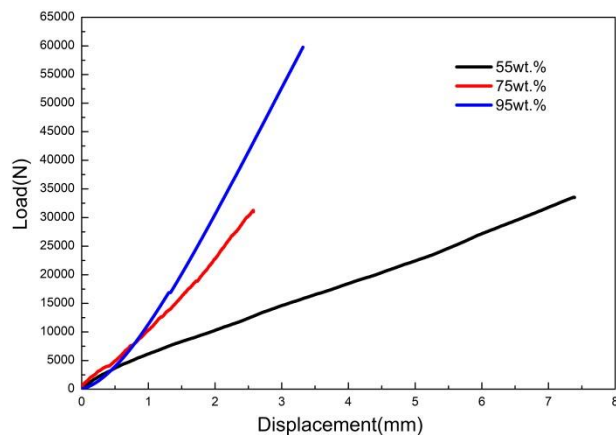


图 3-2 载荷-位移曲线

Fig. 3-2 The load-displacement curve

在准静态单轴拉伸试验中，根据式 (2-1) 得到试件在常温下准静态单轴拉伸的应力-应变曲线如图 3-3。

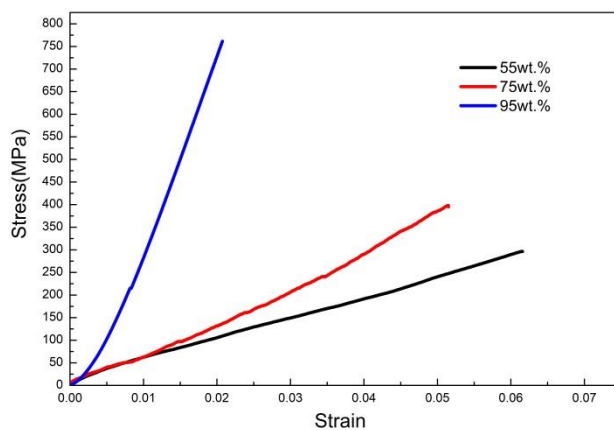


图 3-3 应力-应变曲线

Fig. 3-3 The stress-strain curve

从图中可以看出，准静态加载条件下，不同GF含量的试样在加载过程中达到屈服强度后均直接发生了脆性断裂。表3-1为不同GF含量的试件在准静态压缩实验中测得的屈服强度。此外，GF含量越高，试样的弹性模量也就越大。

表3-1 不同GF含量的试件的屈服强度

Table 3-1 The yield strength of specimens with different GF content

GF含量	55wt.%	75wt.%	95wt.%
屈服强度 (MPa)	296.7	398.3	761.4

## 3.2 不同温度下的准静态拉伸试验

### 3.2.1 材料和试验过程

本实验采用的仪器为德国 Zwick/Roell 公司生产的 Zwick/RoellZ005 型万能材料试验机, 如图 2-5 所示。实验材料为 GF 含量为 55wt.%、75wt.% 的上述试样, 尺寸大小与在常温下的进行静态拉伸实验的试样相同。

设置加载速度为 2mm/min。加载 GF 含量为 55wt.% 的试样时, 加载时的温度分别设为 50℃、80℃和 110℃; 在加载 GF 含量为 75wt.% 的试样时, 加载时的温度分别设为 50℃、70℃和 90℃。对试样进行准静态拉伸试验, 每种试件重复 5 次试验, 以保证试验的可靠性。

### 3.2.2 试验结果与分析

同常温下的处理数据方法, 得到两种 GF 含量试件在不同温度下的应力-应变曲线如图 3-4。

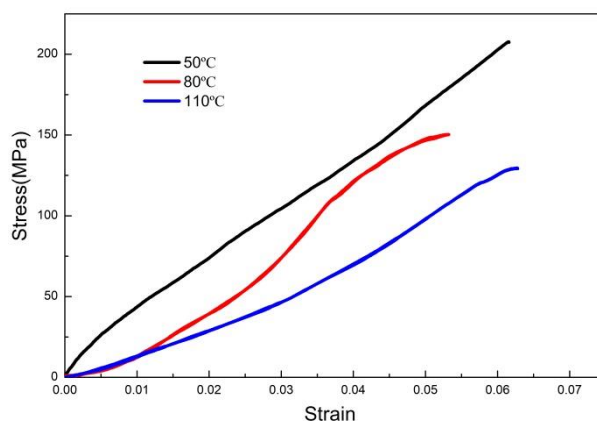


图 3-4(a) 55wt.% 试件在不同温度下应力-应变曲线

Fig. 3-4(a) The stress-strain curve at different temperatures of the 55wt.% specimen

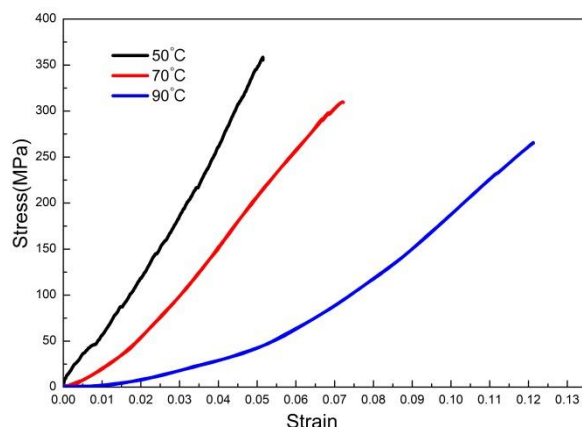


图 3-4(b) 75wt.% 试件在不同温度下应力-应变曲线

Fig. 3-4(b) The stress-strain curve at different temperatures of the 75wt.% specimen

由如图 3-4 可知, 55wt.% 试件与 75wt.% 试件的拉伸屈服强度均与温度呈现出负相关, 即温度越高, 试件的屈服强度越低。且随着温度的升高, 应力-应变曲线的斜率呈现减小的趋势, 即温度越高, 拉伸弹性模量减小。

结合在常温下准静态的测量结果, 得到表 3-2。符合材料随温度的升高, 屈服强度降低的规律。

表3-2(a) 不同温度下55wt.%试件的屈服强度

Table 3-2(a) The yield strength of 55wt.%specimens at different temperatures

温度 (°C)	20.3	50	80	110
屈服强度 (MPa)	296.7	207.7	150.3	129.5

表3-2(b) 不同温度下75wt.%试件的屈服强度

Table 3-2(b) The yield strength of 75wt.%specimens at different temperatures

温度 (°C)	20.3	50	70	90
屈服强度 (MPa)	398.3	358.5	309.9	265.8



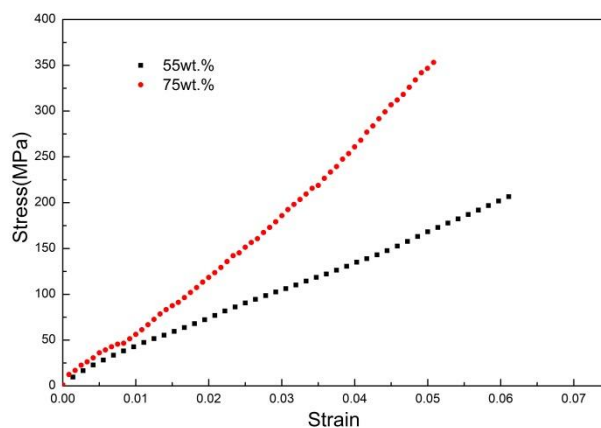


图 3-5 50°C下应力-应变曲线

Fig. 3-5 The stress-strain curve at 50°C

如图图 3-5，比较在 50°C 下，55wt.% 与 75wt.% 的试件准静态拉伸应力-应变曲线。75wt.% 的试件屈服强度以及弹性模量均更大。

### 3.3 本章小结

对 GF/EP 试件进行了不同温度下的准静态拉伸试验，获得了 GF 含量不同的 GF/EP 试样在不同温度下的屈服强度，发现温度越高，GF 含量越低，试件的弹性模量和屈服强度越小。



## 第四章 SHPB 动态压缩实验

GF/EP 复合材料多用于对性能要求较高的产品，比如需要具有高强度、高硬度、高模量等性能等。而且一些使用了 GF/EP 复合材料的产品总会不可避免的发生碰撞，因此测试材料的动态力学性能十分必要，所以对 GF/EP 材料进行动态压缩实验，分析其动态力学性能。

### 4.1 SHPB 技术的实验原理

分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar)实验技术简称 SHPB 技术。霍普金森压杆实验装置由 Hopkinson 最先于 1914 年提出，并由 Kolsky<sup>[38]</sup>于 1949 年改进了这套装置，使这套装置可以测试材料在高应变率下的力学性能。由于采用了分离式结构，因此这套装置被称为分离式 Hopkinson 压杆。目前，SHPB 实验技术已经成为测量材料在高应变率力学性能最重要的技术手段。而且，此技术是在  $10 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$  高应变率下测量固体材料动态特性的最有效方法之一。

这套系统主要通过压杆系统、测量系统、数据系统组成，其中最重要的部分是压杆系统，压杆系统主要包括撞击杆(子弹)、输入杆、输出杆和吸收杆(阻尼器)等。测量系统主要包括激光对子弹速度的测量和电阻应变片对杆上的入射波、反射波、透射波的记录。装置示意图如图 4-1。

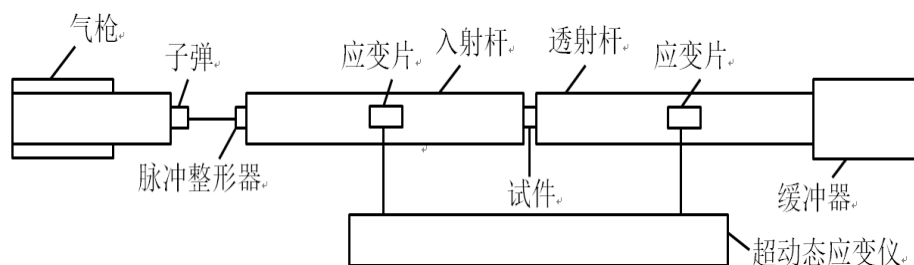


图 4-1 改进的 SHPB 实验系统示意图

Fig. 4-1 Schematic diagram of the modified SHPB experiment system

研究材料的力学性能，从本质上来说就是要找出材料的应力与应变的关系。SHPB 装置可通过动态压缩实验获得试件的超出应力-应变关系并进行下面的分析。首先，将

试件夹在入射杆和透射杆之间，通过气枪中压缩空气使子弹撞向入射杆，此时入射杆内产生一个向试件方向传播的弹性波（入射波）；当入射波传到试件时，试件受到一个动态载荷的冲击，而发生形变，因为试件和压杆波阻抗不同，所以部分入射波被反射回入射杆成为反射波，同时另一部分入射波透过试件进入到透射杆成为透射波。入射波、反射波和透射波会通过测量系统和数据系统记录下来。最后，处理为我们需要的应力-应变。

一维弹性应力波理论是分离式 Hopkinson 压杆技术的基础理论，SHPB 实验技术是建立在两个基本假定之上<sup>[39]</sup>：(1)认为压杆始终只有弹性形变，不考虑压杆应变率效应；其次，压杆径长比足够小，忽略杆的横向惯性作用；这样，在压杆中的传播应力脉冲是理想的一维平面弹性波。(2)认为应力波的传播历时比加载总历时小的多，这样可以认为试样的应力（应变）是均匀的；并且试样会在均匀应力的作用下发生形变。试样的平均应力和由压杆端面变形得到的试样平均应变可以反映出材料的真实力学性能。

在上述两个假定下，记试样的平均应力  $\sigma_s(t)$ 、平均应变率  $\dot{\varepsilon}_s(t)$ 、平均应变  $\varepsilon_s(t)$  分别为：

$$\begin{aligned}\sigma_s(t) &= \frac{F_1(t) + F_2(t)}{2A_s} \\ \dot{\varepsilon}_s(t) &= \frac{v_1(t) - v_2(t)}{l_s} \\ \varepsilon_s(t) &= \int_0^t \dot{\varepsilon}_s(t) dt\end{aligned}\quad (4-1)$$

其中， $F_1(t)$  和  $F_2(t)$  分别是在入射杆和透射杆与试样端面的压力， $v_1(t)$  和  $v_2(t)$  分别是试样在入射杆和透射杆端面的速度， $A_s$ 、 $l_s$  分别指实验前试样没有发生形变前的横截面面积以及长度。按照一维弹性应力波的理论，端面的压力、速度和应变脉冲有以下的关系：

在入射杆一侧：

$$\begin{aligned}F_1(t) &= EA_0[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \\ v_1(t) &= C_0[\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)]\end{aligned}\quad (4-2a)$$

在透射杆一侧：

$$F_2(t) = EA_0 \varepsilon_t(t)$$

$$v_2(t) = C_0 \varepsilon_t(t) \quad (4-2b)$$

其中，E 是压杆材料的弹性模量， $A_0$  是压杆的横截面面积， $C_0$  是压杆中的弹性波速。将式(4-2)代入式(4-1)可以得到：

$$\sigma_s(t) = \frac{EA_0[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)]}{2A_s}$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)]$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C_0}{l_s} [\dot{\varepsilon}_i(t) - \dot{\varepsilon}_r(t) - \dot{\varepsilon}_t(t)] \quad (4-3)$$

由于认为试件产生的是均匀应力，有  $F_1(t) = F_2(t)$ ，于是

$$\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t) \quad (4-4)$$

然后，由入射波  $\varepsilon_i(t)$  和透射波  $\varepsilon_t(t)$  可得：

$$\sigma_s(t) = \frac{EA_0}{A_s} \varepsilon_t(t)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{2C_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_t(t)] dt$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{2C_0}{l_s} [\dot{\varepsilon}_i(t) - \dot{\varepsilon}_t(t)] \quad (4-5)$$

由入射波  $\varepsilon_i(t)$  和反射波  $\varepsilon_r(t)$  可得：

$$\sigma_s(t) = \frac{EA_0}{A_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)]$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{2C_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{2C_0}{l_s} \dot{\varepsilon}_r(t) \quad (4-6)$$

式（4-3）、（4-5）以及（4-6）正是传统意义上高应变率下的利用SHPB技术获得试

样应力-应变关系中所使用的“三波法”和“两波法”。

## 4.2 试验过程及结果

在动态压缩实验中，子弹在气压不同空气动力枪下以不同的速度射出，进而得到试样在多个应变率下的应力-应变曲线。

首先，在正式实验之前，必须要进行空打调试，即在不加试样的情况下进行试验，观察空打试验的波形是否正确，如空打波形准确则可以说明确认周围无电磁波的干扰，得到的波形是正确性，否则继续调试，直至空打波形正确实验才能正式开始；在试件的两个端面均涂上黄油，并保证每次试验试件正对压杆的正中心，消除弥散效应对实验的影响；此外，每次试验前均将试件部位要用透明塑料袋包住，以获得完整的试件碎片残块，进而对其失效模态进行分析。

本次实验霍普金森压杆装置尺寸与材料参数见表4-1,实物装置图如图4-2。本次试验一共有两组GF/EP试件，GF含量分别为95wt.%和75wt.%。由于试样尺寸小，试样的两个面的平行情况以及摩擦都对实验结果产生一定的影响，因此，取几个实验波形较好的试样作为有效试件，试样尺寸与子弹速度如表4-2所示。

表4-1 霍普金森压杆装置尺寸与材料参数

Table 4-1 Hopkinson pressure bar device size and material parameters

名称	长度/mm	直径/mm	密度(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa
子弹	1000	36	8000	200
入射杆	2000	36	8000	200
透射杆	2000	36	8000	200

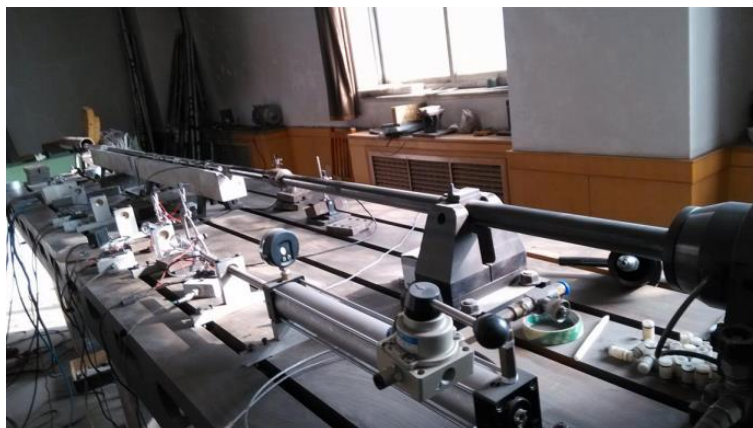


图4-2 SHPB实验装置

Fig. 4-2 The SHPB experimental device

表4-2(a) 95wt.%试件尺寸与不同打击速度

Table 4-2(a) 95wt.% specimen size and different strike speed

编号	长度L/mm	直径D/mm	速度v(m/s)
1	7.80	10.2	3.43
2	9.32	10.2	4.15
3	11.00	10.2	6.53
4	11.40	10.2	7.44

表4-2(b) 75wt.%试件尺寸与不同打击速度

Table 4-2(b) 75wt.% specimen size and different strike speed

编号	长度L/mm	直径D/mm	速度v(m/s)
1	10.10	8.04	5.07
2	9.80	8.04	6.27
3	10.00	8.04	7.81
4	10.10	8.04	8.66

处理并整理数据，得到应变率和工程应力-应变曲线如图 4-3。

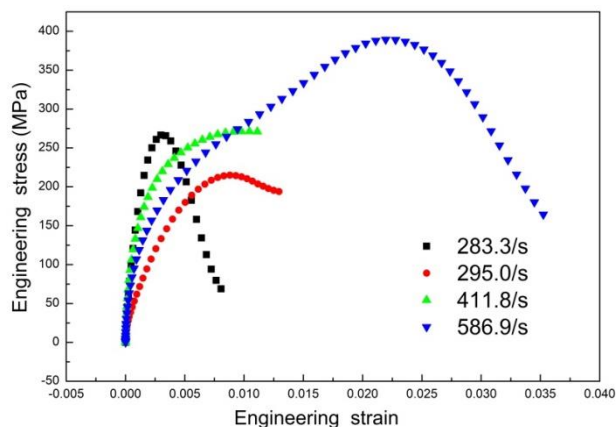


图 4-3(a) 95wt.% 试件在不同应变率下的工程应力-应变曲线

Fig. 4-3(a) Engineering stress-strain curves of 95wt.% specimens at different strain rates

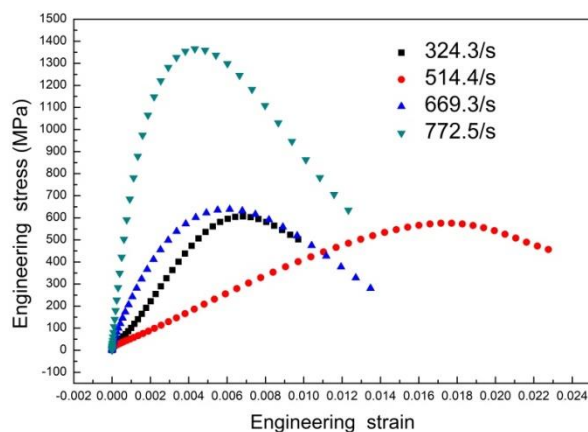


图 4-3(b) 75wt.% 试件在不同应变率下的工程应力-应变曲线

Fig. 4-3(b) Engineering stress-strain curves of 75wt.% specimens at different strain rates

GF / EP 试件的工程应力-应变曲线在试件失效前（工程应力达到峰值之前）的工程应力-应变曲线的斜率有明显的应变率效应，而且没有明显屈服转折点。

在目前的研究中，对于没有明显屈服转折点的材料，目前还没有统一的定值方法，很多文献对此提出了各自的定值方法，主要包括等能量法、残余塑性变形法以及三种作图法<sup>[40~42]</sup>，各定值方法示意图如图 4-4 所示。能量法不可以用作图得到屈服点，须进行数值积分试算，而且这种方法对于具有二次刚度的双线性构件将会得到不合理的结果；作图法一的作图过程中初始刚度的确定将对最终屈服点的确定产生较大的影响；作图法二中使用峰值荷载系数 0.75 来确定材料的初始屈服点；作图法三与作图法一具有类似的问题；残余塑性变形法直接套用金属材料规定，会在一些构建结构中出现不合理的情况。



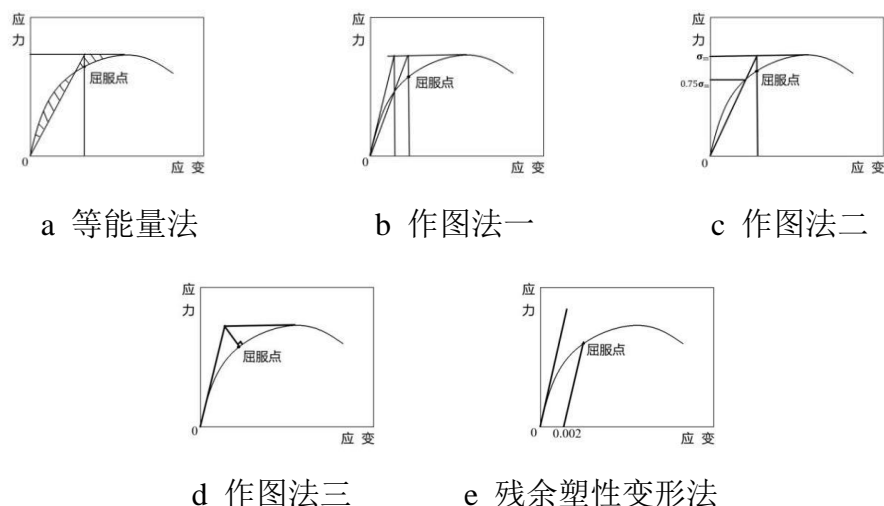


图4-4 确定屈服点的几种方法

Fig. 4-4 Several ways to determine the yield point

在本文中采用了作图法二，得到试件的屈服应力值如表4-3。

表 4-3(a) 不同速度打击下 95wt.% 试件的应变速率值与屈服应力值

Table 4-3(a) The strain rate and yield stress of 95wt.% sample under different speeds

编号	子弹速度m/s	应变率/s <sup>-1</sup>	屈服应力/MPa
1	3.43	283.3	234.1
2	4.15	295.0	187.4
3	6.53	411.8	223.8
4	7.44	586.9	334.0

表4-3(b) 不同速度打击下75wt.%试件的应变速率值与屈服应力值

Table 4-3(b) The strain rate value and yield stress value of 75wt.% specimen under different speeds

编号	子弹速度m/s	应变率/s <sup>-1</sup>	屈服应力/MPa
1	5.07	324.3	563.4
2	6.27	514.4	534.1
3	7.81	669.3	563.4
4	8.66	772.5	1181.1

### 4.3 ZWT 粘弹性本构模型

ZWT 粘弹性本构模型同样适用拟合描述动态压缩试验的应力-应变曲线，即用式(2-3)对动态压缩试验的应力-应变曲线进行拟合。

由于实验采用了波形整形技术，加载应变率会在较长的时间内可以近似的看做一个

常数，可将式（2-2）记为式（2-3）

本实验在常温下完成，并且忽略试件的损伤以及热软化对试件力学性能产生的影响，对两种 GF 含量不同的试件的应力应变曲线进行参数拟合，参数拟合结果见表 4-4。

表 4-4(a) 95wt.% 试件 ZWT 粘弹性本构模型参数拟合结果

Table 4-4(a) Fitted results of modified ZWT of specimen 95wt.%

$\dot{\epsilon}(/s)$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	B	C	D	E
283.3	$1.90 \times 10^5$	$-4.41 \times 10^7$	$2.60 \times 10^9$	47.24	$3.43 \times 10^{-3}$	$3.01 \times 10^5$	356.61
295.0	$4.79 \times 10^4$	$-4.46 \times 10^6$	$1.21 \times 10^8$	49.19	$3.57 \times 10^{-3}$	$3.13 \times 10^5$	374.00
411.8	$5.83 \times 10^4$	$-6.77 \times 10^6$	$2.62 \times 10^8$	92.44	$2.22 \times 10^{-4}$	$4.37 \times 10^5$	522.08
586.9	$1.14 \times 10^4$	$4.26 \times 10^5$	$-2.18 \times 10^7$	138.68	$6.56 \times 10^{-4}$	$6.24 \times 10^5$	744.07

表 4-4(b) 75wt.% 试件 ZWT 粘弹性本构模型参数拟合结果

Table 4-4(b) Fitted results of modified ZWT of specimen 75wt.%

$\dot{\epsilon}(/s)$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	B	C	D	E
324.3	$9.65 \times 10^4$	$6.13 \times 10^6$	$-1.20 \times 10^9$	54.07	$3.92 \times 10^{-3}$	$3.42 \times 10^5$	356.61
514.4	$2.71 \times 10^4$	$1.66 \times 10^6$	$-9.52 \times 10^7$	85.77	$6.22 \times 10^{-3}$	$5.70 \times 10^5$	680.54
669.3	$2.34 \times 10^5$	$-2.81 \times 10^7$	$8.74 \times 10^8$	111.60	$8.10 \times 10^{-3}$	$7.05 \times 10^5$	841.31
772.5	$2.50 \times 10^5$	$-4.11 \times 10^7$	$1.51 \times 10^9$	956.67	$1.29 \times 10^{-3}$	$8.14 \times 10^5$	971.03

实验得到的结果与 ZWT 本构模型拟合的结果对比如图 4-5 所示。两者基本吻合，说明 ZWT 本构模型能够用来描述 GF/EP 材料的力学行为。

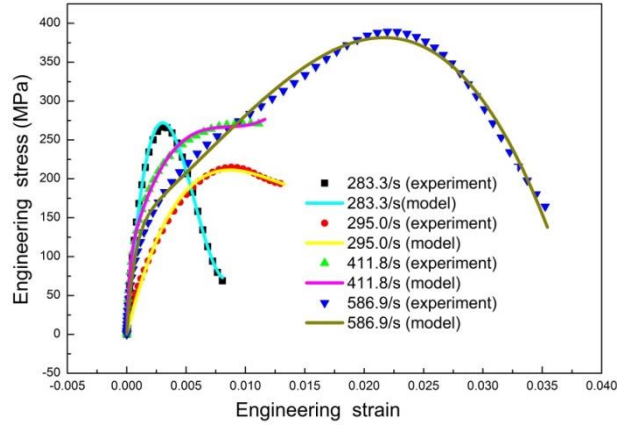


图 4-5(a) 95wt.% 试件 ZWT 粘弹性模型参数拟合结果与实验数据

Fig. 4-5(a) 95wt.% ZWT viscoelastic model parameter fitting results and experimental data

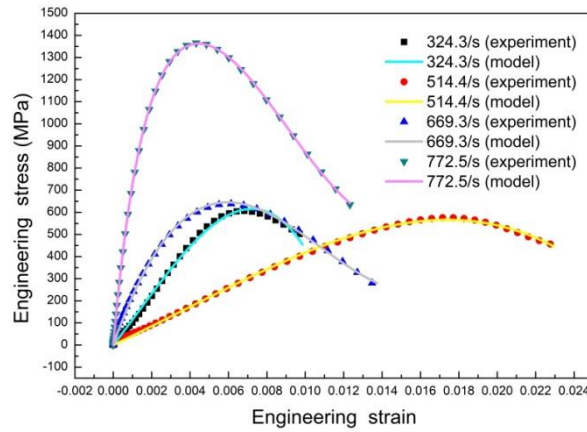


图 4-5(b) 75wt.% 试件 ZWT 粘弹性模型参数拟合结果与实验数据

Fig. 4-5(b) 75wt.% ZWT viscoelastic model parameter fitting results and experimental data

#### 4.4 试件变形特征

图 4-6 所示是实验前后试件对照图，相同 GF 含量的变形后试样按照应变率由低到高从左向右依次排列。从图可知，在 SPHB 动态压缩实验中，95wt.% 试样在不同应变率下发生了一定程度的鼓包并有剪切破坏的特征，说明试件既产生了塑性变形，又发生了脆性变形，而且应变率越大，脆性变形越大；75wt.% 试样在不同应变率下都发生了完全的破坏，出现很多粉末状玻璃纤维，表明试件发生了脆性失效。随着 GF 含量的增加，在一定程度上增大了试件的韧性。



图 4-6 试样变形前后对照图

Fig. 4-6 Before and after deformation of the sample

#### 4.5 应变率敏感性

试件在不同应变率下表现出的力学性能，往往不同，有时甚至差别很大。而在实际工程应用中的试件又常处于不同的应变率下，因此探究试件的应变率效应十分必要。不同 GF 含量试件屈服强度-应变率关系图如图 4-7 所示。

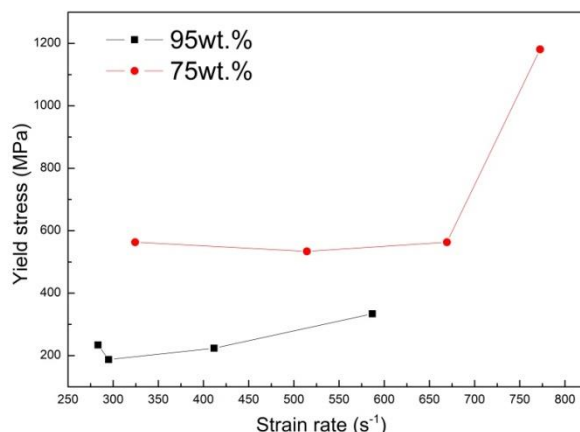


图 4-7 不同 GF 含量试件屈服强度-应变率关系图

Fig. 4-7 Graph of Yield Strength-Strain Rate for Different GF Content Specimen

GF 含量为 75wt.% 的试件的屈服强度远远高于 95wt.% 试件，这是由于在高应变率下，EP 的粘性来不及释放，试件的失效来源于 EP 的脆性断裂，因此，GF 含量较低（EP 含

量较高)的试件的屈服强度更高。

在一定应变率下,GF/EP 试件并不具有应变率效应,但当应变率超过某个临界值时,又体现出极强的应变率效应的敏感性。

#### 4.6 本章小结

对 GF/EP 试件进行了动态压缩实验,得到了 GF 含量不同的 GF/EP 试样在多个不同的应变率下的动态力学性能;实验得到了试样的动态工程应力-应变关系,并且使用作图法,得到了试样在各个应变率下的屈服强度;通过 ZWT 粘弹性本构模型拟合,发现 ZWT 模型可以描述 GF/EP 试件的本构行为。另外,通过对比试样在实验前后的照片,发现 95wt.%试样的韧性优于 75wt%,说明 GF 含量的增加,在一定程度上增大了试件的韧性。



## 第五章 GF/EP 复合材料纳米力学性能

### 5.1 纳米压痕技术

力学性能是指材料在载荷作用下表现出的宏观性能，主要包括材料的硬度、刚度、韧性以及塑性等<sup>[44,45]</sup>。硬度是指材料抵抗局部硬物压入的能力，反映出材料的软硬程度。传统上按照压入载荷大小分为布氏、洛氏、维氏、努氏以及纳米压痕硬度。刚度是指材料抵抗弹性变形的能力，反映出材料在外力作用下的变形容易与否程度，材料的弹性模量可作为衡量标准。韧性是指材料在变形过程中对能量的吸收能力，反映出材料抵抗断裂的能力，通常用断裂韧性作为材料抵抗脆性破坏的定量参数。塑性是指材料发生破坏但不至于被破坏的能力，对于聚合物材料而言，良好的塑性能力能够保证其在载荷作用下的大变形，对于其使用寿命具有非常重要的意义。

蠕变是指在保持温度和应力不变的情况下，固体材料应变随时间增长而发生增长，其发生是应力长时间作用的结果<sup>[46]</sup>。蠕变性能研究对于材料失效及可靠性分析至关重要。对于聚合物材料而言，蠕变性能是影响材料失效的关键因素，因此掌握材料的蠕变性能对于推广其应用非常必要。

随着微机电系统、生物材料、航空航天及电力等领域对于结构复杂化及材料设计轻量化等的要求，传统测试手段无法满足小尺寸样品力学性能的测试，无法准确得到材料的性能评估。此外，研究表明，当试样尺寸较小时，经典的塑性力学理论具有一定的局限性<sup>[47]</sup>，对于研究测试手段的提出了更高的要求。

#### 5.1.1 纳米压痕测试理论

纳米压痕技术也被称深度敏感压痕技术，能够实现对于待测试试样的无损测试，对于小尺寸试样力学性能的测试优势明显<sup>[48-50]</sup>。利用压头压入待测试材料产生压痕，基于

压入过程中记录的载荷-位移曲线，基于接触理论计算材料的硬度以及弹性模量等参数。其典型的载荷-位移曲线如图 5-1 所示，加载段，随着压入载荷的增加，压头压入测试材料，形成与压头材料形状相同的压痕形貌；达到预定最大压入深度或载荷后，进入卸载阶段，材料弹性变形得到恢复，塑性变形保留，材料产生残余压痕深度。基于 Oliver-Pharr<sup>[51]</sup>方法，可以分析得到材料以弹性模量为参量的弹性变形及以硬度为参量的塑性变形。

对于聚合物类材料，压入过程中存在粘弹性和蠕变，通常在加载达到最大载荷后进行保载，释放蠕变，通过保载段研究其蠕变行为。图 5-2 和图 5-3 为加入保载设置的载荷-时间曲线及载荷-位移曲线。

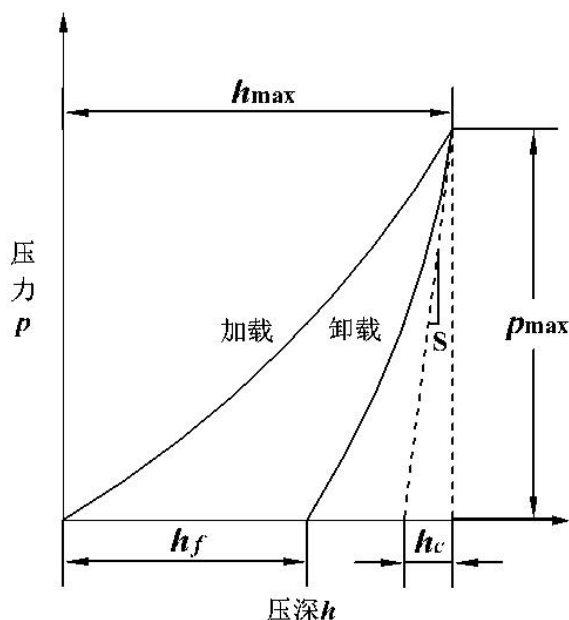


图 5-1 典型的载荷-压深曲线示意图

Fig. 5-1 The typical load-depth curve



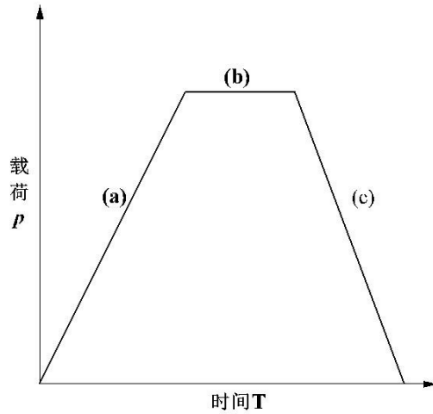


图 5-2 典型的载荷-时间曲线

Fig. 5-2 Typical load-time curve

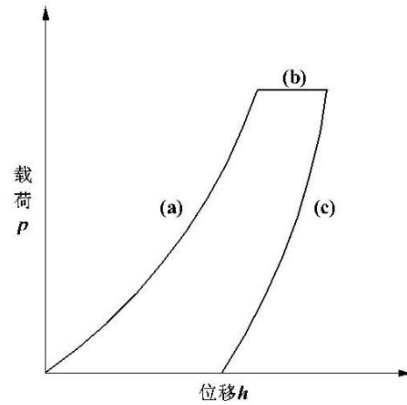


图 5-3 典型的载荷-位移曲线

Fig. 5-3 Typical load-depth curve

压头压入和卸载前后过程剖面示意图如图 5-4 所示，本实验测试中测量材料硬度和弹性模量时，选用的是三棱锥玻氏压头（Berkovich），计算过程中将玻氏压头等效成圆锥压头。加载过程中，压入深度为  $h$ ，接触半径为  $a$ ，压入过程中压头与试样接触的厚度为  $h_c$ ，卸载后材料残余压入深度为  $h_f$ 。材料的硬度  $H$  以及弹性模量  $E$  可以通过最大载荷  $P_{max}$ ，最大压入深度  $h_{max}$ ，卸载残余深度  $h_f$ ，以及卸载曲线顶端斜率计算求得。

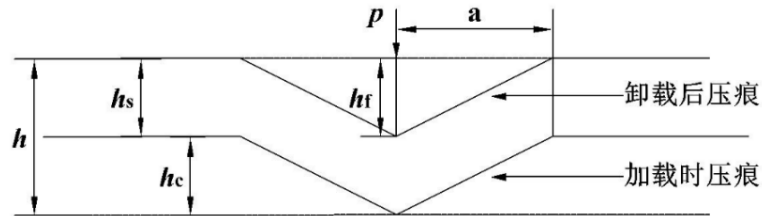


图 5-4 压头压入和卸载过程及参数

Fig. 5-4 The process and parameters of loading and unloading

对于自相似的三棱锥玻氏压头，其等效半锥角为  $70.32^\circ$ ；最大压入深度处投影面积函数  $A_c$  与接触深度  $h_c$  关系可表示为：

$$A_c = 24.56h_c^2 \quad (5-1)$$

其中接触深度  $h_c$  为：

$$h_c = h - 0.75 \frac{P}{S} \quad (5-2)$$

其中  $P$  为接触载荷， $S$  为接触刚度， $h$  为压入深度，（折合模量）减缩模量  $E_r$  可表

示为:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \quad (5-3)$$

$$E_r = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (5-4)$$

该式中,  $E$  和  $\nu$  是受压物体的弹性模量和泊松比,  $E_i$  和  $\nu_i$  为压头的弹性模量和泊松比。  $\beta$  为压头形状相关参数, 对于玻氏压头通常取  $\beta=1.034$ 。式 (3) 适用于弹塑性接触, 其中接触刚度  $S$  可从卸载曲线得到, 表示为:

$$S = \left( \frac{dP}{dh} \right)_{h=h_{\max}} \quad (5-5)$$

硬度定义为材料对局部载荷的抗性:

$$H = \frac{P}{A_c} \quad (5-6)$$

### 5.1.2 纳米压痕实验方法

通过上节理论计算得到硬度以及弹性模量值的计算方式只能通过一次压入-卸载曲线顶端的卸载刚度, 因此计算结果仅为最大压入深度下的值。此外对于聚合物等具有粘性的材料, 卸载刚度可能会出现负数, 将导致无法得到测量结果。Oliver 和 Pharr 等人提出连续刚度测量方法 (Continuous Stiffness Measurements, CSM) [52], 连续测量接触刚度获取硬度及弹性模量随压入深度连续变化的曲线。

在加载载荷上叠加高频率简谐振动信号, 控制压头产生振幅为 1~2mm 的简谐振动。其应用依靠系统动力学响应的精确描述, 动态模型如图 5-5 所示,  $K_f$  为机架刚度,  $K_s$  为支撑弹簧刚度,  $D_s$  为待测样品阻尼系数,  $D_i$  系统的阻尼系数。

该系统的运动方程可描述为:

$$m\ddot{Z} + D\dot{Z} + KZ = P(t) \quad (5-7)$$

图 5-5 模型可简化, 等效阻尼  $D = D_s + D_i$ , 等效刚度  $K = (S^{-1} + K_f^{-1})^{-1} + K_s$ , 假设叠加的简谐振动力及该力作用下的位移表示为:

$$P(t) = P_0 e^{i\omega t} \quad (5-8)$$

$$Z(t) = Z_0 e^{i(\omega t - \phi)} \quad (5-9)$$

其中， $\omega = 2\pi f$  为角频率， $\phi$  为位移滞后于载荷的相位角，联立(5-7)(5-8)(5-9)求解：

$$\frac{P_0}{Z_0} = \sqrt{(K - m\omega^2)^2 + (\omega D)^2} \quad (5-10)$$

$$\tan \phi = \frac{\omega D}{K - m\omega^2} \quad (5-11)$$

联立得到试样的接触刚度：

$$S = \left( \frac{1}{\frac{P_0}{Z_0} \cos \phi - (K_s - m\omega^2)} - \frac{1}{K_f} \right)^{-1} \quad (5-12)$$

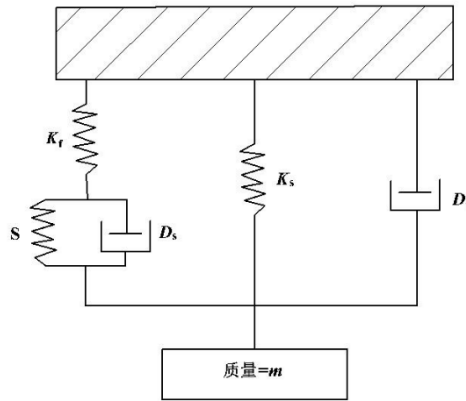


图 5-5 CSM 的动态模型

Fig. 5-5 The dynamic model of CSM

## 5.2 纳米压痕试验

### 5.2.1 弹性性能和硬度

本实验选用不同含量玻璃纤维的环氧树脂材料（质量分数 55%，75%，95%）。试样尺寸：直径 10mm，厚度 10mm。经 400#，800#，1200#，1500#氧化铝砂纸依次打磨，并采用金刚石研磨膏在绒布抛光，以满足纳米压痕测试要求。

采用 Agilent G200 型纳米压入测试系统对 GF/EP 复合材料进行纳米压入测试。测试仪器如图 5-6。其位移分辨率为 0.01 nm，载荷分辨率为 50 nN，采用三棱锥玻氏压头 (Berkovich)，其棱边与中心线夹角 77.05°，棱面与中心线夹角为 65.3°，示意图如图 5-7。计算面积函数时，可以将玻氏压头等效为锥角为 70.32° 的圆锥压头。



图 5-6 Agilent G200 型纳米压入测试系统

Fig. 5-6 Agilent G200 nanoindentation test system

具体实验设置如下：(i) 通过加载应变率，即加载载荷变化率/加载载荷 ( $\dot{P}/P$ ) 控制方式实现指数加载，应变率设置为  $0.05s^{-1}$ 。(ii) 最大压入深度设置为 2000nm，最大压入深度下保载 10s 释放蠕变。(iii) 以恒定卸载速率，即载荷/时间进行卸载。卸载到最大载荷的 5% 保载 75s 进行热漂移修正，之后完全卸载。保持室温恒定进行实验，对于每一种材料，进行 10 次实验取平均值，相邻压痕间距设置为  $50\mu m$ 。

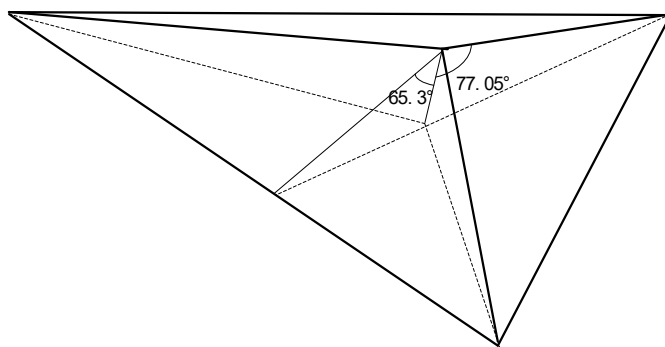


图 5-7 Berkovich 压头立体示意图

Fig. 5-7 Diagram of Berkovich indenter

添加不同含量的玻璃纤维的环氧树脂材料纳米压痕载荷位移-曲线如图 5-8 所示。由图可知对于相同压入深度，GF 含量越高，对应的压入载荷越大，表明玻璃纤维的添加量增多，提高了环氧树脂的的承载能力。压入最大压入深度所需要施加的载荷更大。加载段位移-时间曲线如图 5-9 所示，压入相同深度，随着玻璃纤维的添加量增多，加载时

间延长。表明了随着玻璃纤维含量的增加，材料的粘性减弱，粘性变形较缓慢，压入相同深度所需时间增加，即所需加载载荷更大。

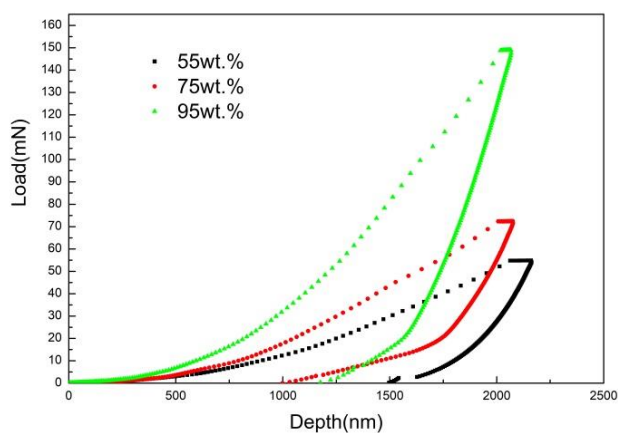


图 5-8 不同 GF 含量试件载荷-深度曲线

Fig. 5-8 The load-depth curves of specimens of different CF content

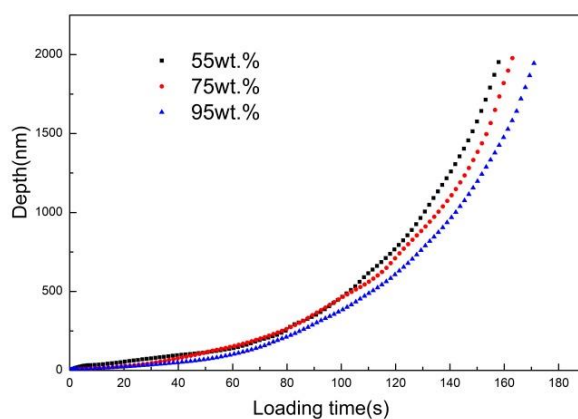


图 5-9 不同 GF 含量试件加载阶段深度-时间曲线

Fig. 5-9 Depth-time curves of specimens of different CF content

本实验所使用连续刚度测试方法计算材料硬度及弹性模量时，需要知道刚度-压入深度曲线的变化，添加不同含量玻璃纤维的环氧树脂材料刚度随位移变化如图 5-10 所示。由图可知，对于相同压入深度，随着玻璃纤维含量增加，刚度值增大。且三种材料接触刚度随时间呈线性增加，线性拟合结果列于表 5-1。随着玻璃纤维添加量得增加，曲线斜率明显增大，这表明玻璃纤维的存在显著提高了环氧树脂材料的刚度。

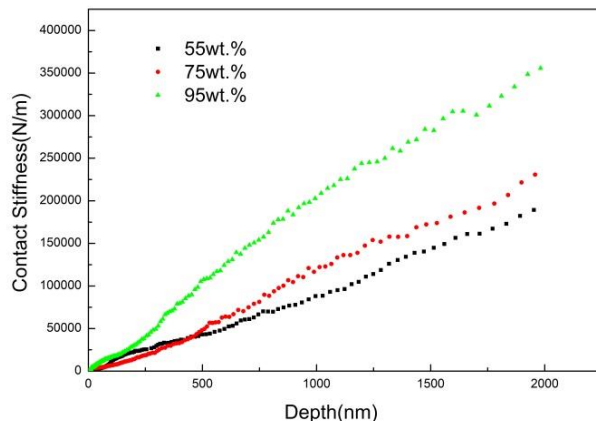


图 5-10 不同 GF 含量试件接触刚度-深度曲线  
 Fig. 5-10 Contact stiffness-time curves of specimens of different CF content

表 5-1 不同 GF 含量接触刚度-深度曲线的斜率

Table 5-1 Slope of contact stiffness-time curves of specimens of different CF content

GF 含量	55wt.%	75wt.%	95wt.%
$S(N/m/nm)$	93.440	117.827	191.459

图 5-11 为添加不同含量玻璃纤维环氧树脂材料的弹性模量随压入深度变化曲线，可以看出，当压入深度较小时，弹性模量随压入深度增加而下降，且曲线波动较大。当压入深度超过 200nm 后，弹性模量值缓慢上升并逐渐趋于平稳。压入深度达到 1000nm 后，曲线平稳，反应出材料的弹性模量值。

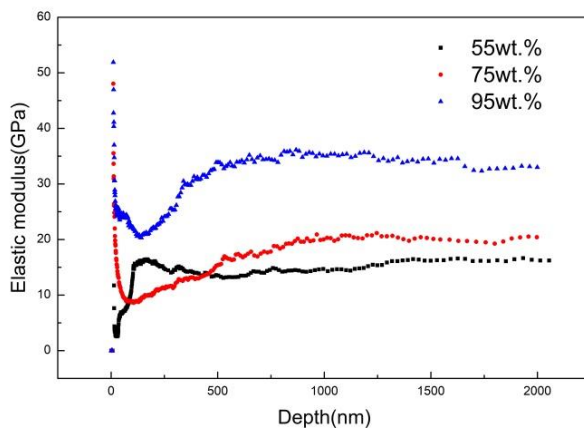


图 5-11 不同 GF 含量试件弹性模量-深度曲线

Fig. 5-11 Elastic modulus-depth curves of specimens of different CF content

取 1000-2000nm 压入深度段弹性模量值求平均作为一次实验测量结果。每种试样不同压入点求平均值及标准偏差，其结果列于图 5-12。随着玻璃纤维添加量的增加，复合材料表现出更高的弹性模量，表明高玻璃纤维含量导致材料的弹性变形抗性更大，在相

同载荷下，其变形量更小。

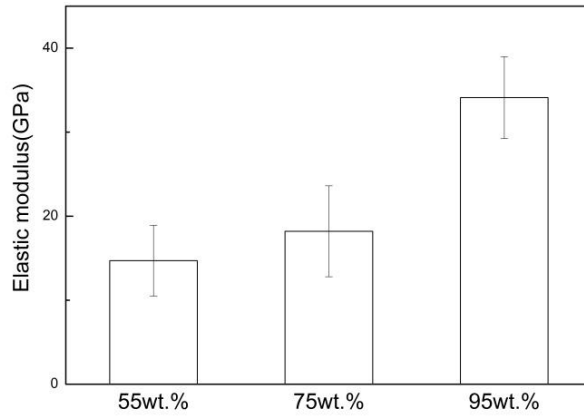


图 5-12 不同 GF 含量的弹性模量

Fig. 5-12 Elastic modulus values of specimens of different CF content

图 5-13 为添加不同含量玻璃纤维环氧树脂材料的硬度随压入深度变化曲线变化规律。由于尺寸效应的影响，压入深度较小时，硬度值较大。随着压入过程的进行，硬度值逐渐降低，压入深度为 300nm 时，趋于稳定。此阶段复合材料在压头作用下发生塑性变形，表现出的主要是环氧树脂材料硬度。此后，随着压入深度进一步增大，硬度值稳步上升，且上升速率随着玻璃纤维添加量的增大而增大。此阶段随着压头下方塑性变形区的增大，增强玻璃纤维对于硬度贡献逐渐增大，造成测量值的增长，并且高玻璃纤维含量的试样表现出更明显的增长趋势。最后硬度值再次趋于平稳，此后保持稳定。此稳定值可作为复合材料的硬度值。

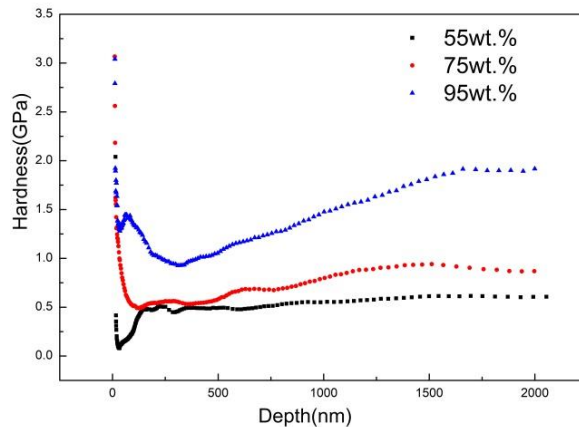


图 5-13 不同 GF 含量试件硬度-深度曲线

Fig. 5-13 Hardness-depth curves of specimens of different CF content

取 1700-2000nm 压入深度段硬度值求平均作为一次实验测量结果。每种试样不同压入点求平均值及标准偏差，其结果列于图 5-14。随着玻璃纤维添加量的增加，复合材料

硬度值逐渐升高，体现出玻璃纤维对于环氧树脂的强化作用。

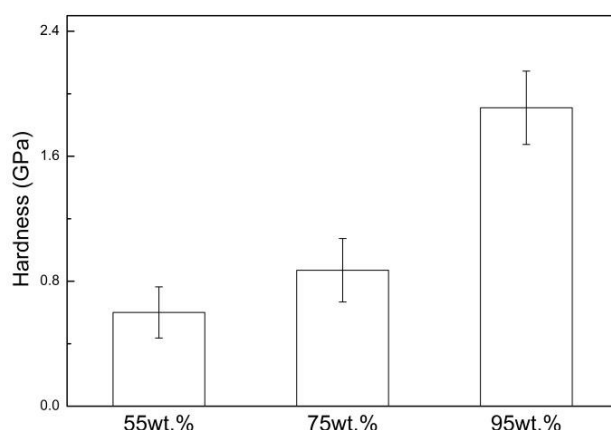


图 5-14 不同 GF 含量的硬度

Fig. 5-14 Hardness values of specimens of different CF content

### 5.2.2 蠕变

采用直径为波式压头，设置最大压入载荷为 50mN。加载过程如下：(i) 加载时间 2s，达到最大设置载荷。(ii) 保载 500s，释放材料蠕变。(iii) 卸载时间 2s。整个实验过程保持室温，每种材料进行 10 次实验，取平均值。

不同试样载荷-位移曲线如图 5-15 所示，从图中可以看出，2s 加载段结束后，不同玻璃纤维含量的环氧树脂试样在相同载荷作用下产生不同了压入深度，玻璃纤维含量越高，试样的压入深度越小。表明随着玻璃纤维含量的增大，试样的弹性模量和硬度也随着增大。对于相同的蠕变时间，玻璃纤维含量越高，试样的蠕变位移越小。

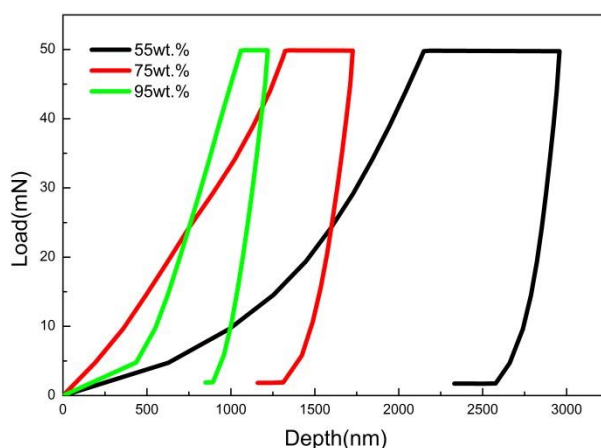


图 5-15 不同 GF 含量试件载荷-深度曲线

Fig. 5-15 The load-depth curves of specimens of different CF content

取三种式样蠕变阶段位移-时间曲线作图，得到蠕变位移随时间变化规律，如图 5-16。



可以发现，玻璃纤维含量越高的试样产生蠕变越慢。

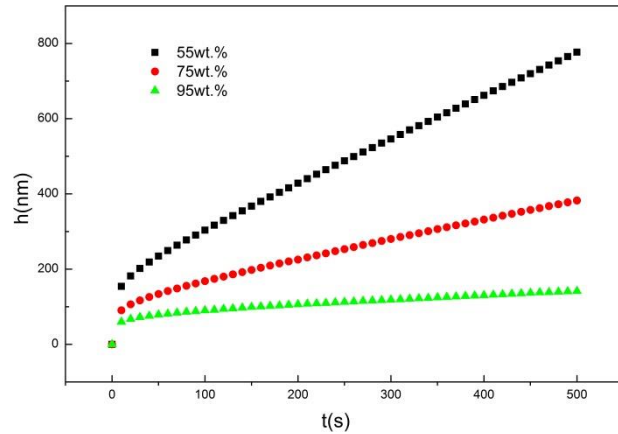


图 5-16 不同 GF 含量试件保载阶段蠕变-时间曲线

Fig. 5-16 Creep displacement-time curve of specimen of different CF content

图 5-17、图 5-18 及图 5-19 分别为玻璃纤维含量为 55wt.%、75wt.%、95wt.% 环氧树脂试样保载阶段的蠕变-时间曲线。可以看出对于所有材料，位移在蠕变开始阶段迅速增加，之后逐渐趋于平缓，最终呈现一个线性或近似线性的增长规律。其原因是加载阶段时间较短，材料粘性不能充分释放，进入蠕变阶段，材料中积累的粘性迅速释放，导致蠕变位移的快速增长。随着蠕变时间的延长，蠕变位移逐步趋于平缓，进入稳态蠕变阶段。这与材料在单轴拉伸测试状态下的蠕变位移变化规律相似。

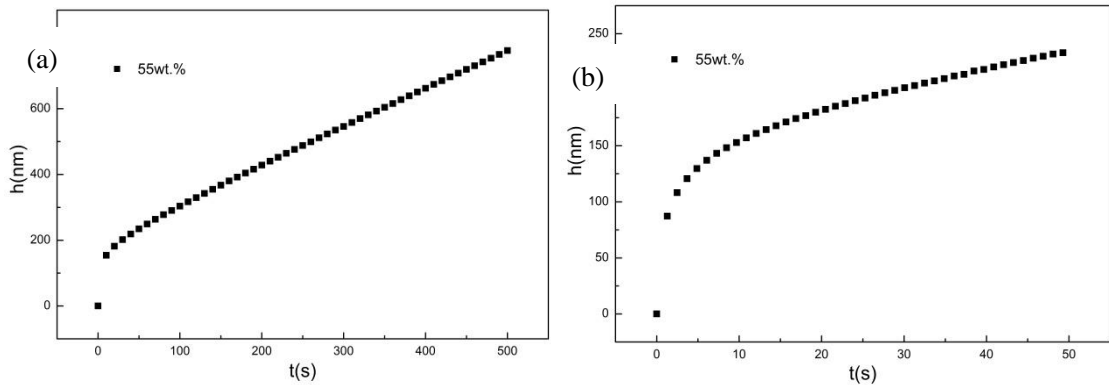


图 5-17 55wt.% 试件保载阶段蠕变-时间曲线；(b) 为 (a) 局部放大图

Fig. 5-17 Creep displacement-time curve of specimen of 55wt.%; (b): magnified view of (a)

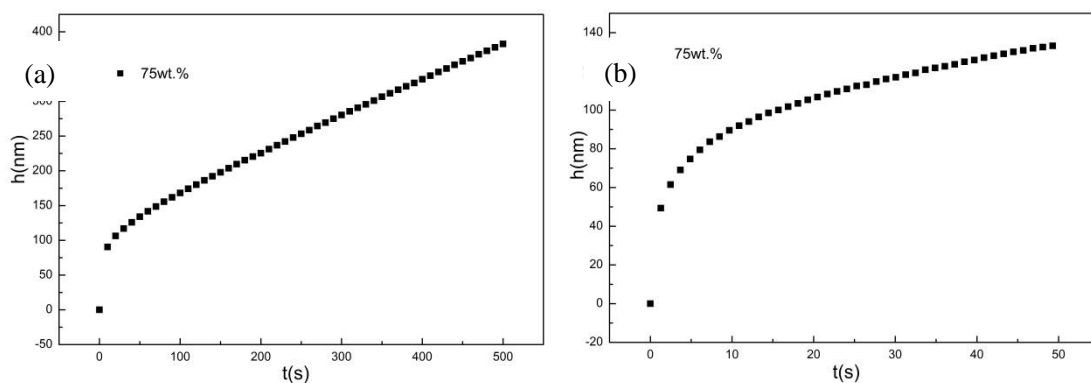


图 5-18 75wt.% 试件保载阶段蠕变-时间曲线；(b) 为 (a) 局部放大图

Fig. 5-18 Creep displacement-time curve of specimen of 55wt.%；(b): magnified view of (a)

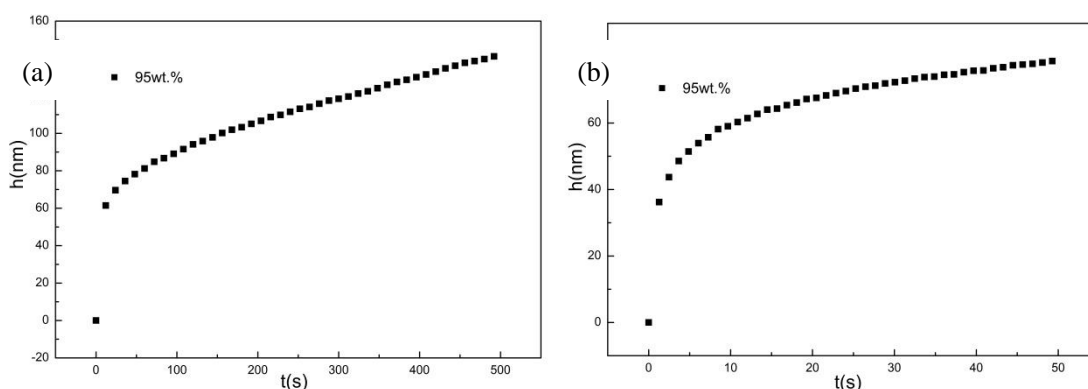


图 5-19 95wt.% 试件保载阶段蠕变-时间曲线；(b) 为 (a) 局部放大图

Fig. 5-19 Creep displacement-time curve of specimen of 55wt.%；(b): magnified view of (a)

### 5.3 本章小结

采用纳米压痕法，基于连续刚度测量原理，对玻璃纤维含量不同的三种环氧树脂进行了微纳米力学测试，分析了不同玻璃纤维添加量对于环氧树脂材料力学性能的影响。相关结论如下：

(1) 随着玻璃纤维的添加量增多，环氧树脂的承载能力得到提高。最大压入深度所对应的载荷更大。此外随着玻璃纤维的添加量增多，达到相同压入深度所需加载时间延长。

(2) 基于连续刚度法计算得到的玻璃纤维增强环氧树脂材料的弹性模量及硬度随着玻璃纤维含量的增加而增长。体现出高纤维含量环氧树脂的弹性抵抗性能以及局部压

入抵抗能力的优异性。

(3) 随着玻璃纤维含量的增大, 试样的弹性模量和硬度也随着增大。基于保载阶段得到材料的室温蠕变性能, 对于相同的蠕变时间, 玻璃纤维含量越高, 试样的蠕变位移越小, 复合材料压痕蠕变表现出类似单轴拉伸的两阶段蠕变特性。



## 第六章 全文总结

玻璃纤维/环氧树脂是复合材料中非常重要的一种,GF/EP 复合材料因其具有非常优良的性能而在出现在各个领域之中,不论是用于高压密封、减震器或者车用保险杠材料,在实际使用过程中将面临各种复杂的服役工况,还是作为机器及其零部件密封材料、建筑密封件而嵌入到构件之中,在各类产品应用中材料难免受到静动态的破坏,而且材料性质容易受到外部环境的影响发生改变,需要全面了解其力学性能,因此本文主要目的是研究其在准静态、动态加载条件以及微纳米尺度下的力学性能,为此类产品的设计安装提供理论与技术支持,并得出以下结论:

(1)对 GF/EP 材料在不同温度(50℃~110℃)下进行了准静态下的单轴拉压试验,并且以在常温下的准静态下的单轴拉压试验作为对照,研究了 GF/EP 材料常温下的准静态力学性能以及温度和配比对 GF/EP 材料准静态力学性能的影响。实验的结果表明:随着温度的升高,GF 含量的减小,试件的弹性模量以及屈服强度均减小。ZWT 粘弹性本构模型拟合 GF/EP 试样常温下的准静态压缩应力应变曲线结果理想。

(2)对 GF/EP 材料进行动态压缩实验,得到试件在不同应变率下的应力-应变关系,表现出 GF/EP 材料动态力学行为的高度非线性,GF/EP 在应变率大于某一临界值时表现出应变率敏感性;GF 含量 75wt% 试件在试验中均发生脆性变形,而 GF 含量 95wt% 试件在发生脆性变形的同时也产生了塑性形变,说明 GF 的增加会在一定程度上增加材料的韧性。使用 ZWT 粘弹性本构模型拟合 GF/EP 试样在不同应变率下的应力应变曲线结果较为理想。

(3)采用纳米压痕对 GF 含量不同的三种环氧树脂(EP)进行了微纳米力学测试,分析了不同 GF 添加量对于环氧树脂材料力学性能的影响。随着 GF 的添加量增多,EP 的的承载能力得到提高。随着 GF 的添加量增多,达到相同压入深度所需加载时间延长;基于连续刚度法计算得到的 GF 增强 EP 材料的弹性模量及硬度随着 GF 含量的增加而增长,体现出高纤维含量 EP 的弹性抵抗性能以及局部压入抵抗能力的优异性;基于保载阶段得到材料的室温蠕变性能,复合材料压痕蠕变表现出类似单轴拉伸的两阶段蠕变特性,且玻璃纤维含量低的试样更容易发生蠕变。



## 参考文献

- [1]郭晓琴, 余小霞, 王永凯,等. 石墨烯纳米片/环氧树脂复合材料的制备与介电性能研究[J]. 功能材料, 2013, 44(18):2672-2675.
- [2]Sathishkumar T P, Satheeshkumar S, Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites - A review[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2014, 33(13):1258-1275.
- [3]赵家琪, 赵晓明, 李锦芳,等. 玻璃纤维的应用与发展[J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2015, 32(3):41-46.
- [4]危良才. 国内外玻璃纤维制品生产现状及发展动向[J]. 纤维复合材料, 2005, 22(2):61-66.
- [5]徐凤, 聂琼, 徐红. 玻璃纤维的性能及其产品的开发[J]. 轻纺工业与技术, 2011, 40(5):40-41.
- [6]姜肇中. 努力开发玻璃纤维应用新局面[J]. 玻璃纤维, 2008(4):55-59.
- [7]Garg M, Sharma S, Mehta R. Pristine and amino functionalized carbon nanotubes reinforced glass fiber epoxy composites[J]. Composites Part A, 2015, 76:92-101.
- [8]Wang F, Drzal L T, Qin Y, et al. Size effect of graphene nanoplatelets on the morphology and mechanical behavior of glass fiber/epoxy composites[J]. Journal of materials science, 2016, 51(7): 3337-3348.
- [9]Andrew J J, Arumugam V, Saravanakumar K, et al. Compression after impact strength of repaired GFRP composite laminates under repeated impact loading[J]. Composite Structures, 2015, 133:911-920.
- [10]Zhong Y, Joshi S C. Environmental durability of glass fiber epoxy composites filled with core-shell polymer particles[J]. Materials & Design, 2016, 92: 866-879.
- [11]Botelho E C, Rezende M C, Lauke B. Mechanical behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63(13): 1843-1855.
- [12]Caldeira G, Maia J M, Carneiro O S, et al. Production and characterization of innovative carbon fiber-polycarbonate composites[J]. Polymer Composites, 1998, 19(2):147-151.
- [13]李劲, 李伟, 范群,等. 碳纤维单丝带对酚醛树脂基复合材料力学性能的增强作用[J]. 复合材料学报, 2006, 23(1):51-55.

- [14]Liu Z, Zhang L, Yu E, et al. Modification of glass fiber surface and glass fiber reinforced polymer composites challenges and opportunities: from organic chemistry perspective[J]. *Current Organic Chemistry*, 2015, 19(11): 991-1010.
- [15]王荣国, 刘文博, 张东兴,等. 连续玻璃纤维增强热塑性复合材料工艺及力学性能的研究[J]. *航空材料学报*, 2001, 21(2):44-47.
- [16]吕宏展. 机器玻璃钢覆盖件工艺的研究[D]. 重庆大学, 2008.
- [17]包建文, 陈祥宝. 复合材料辐射固化技术与传统工艺的结合[J]. *宇航材料工艺*, 2000, 30(5):19-23.
- [18]乔东, 胡红. 树脂基复合材料成型工艺研究进展[J]. *塑料工业*, 2008, 36(b06):11-13.
- [19]邓杰. 高性能复合材料树脂传递膜技术(RTM)研究[J]. *纤维复合材料*, 2005, 22(1):50-52.
- [20]赵永振. 水性杂化涂层对玻璃纤维/环氧树脂复合材料界面性能的影响[D]. 浙江理工大学, 2017.
- [21]董立民, 夏源明, 杨报昌. 纤维束的冲击拉伸实验研究[J]. *复合材料学报*, 1990, 7(4):9-15.
- [22]夏源明, 王兴, 杨报昌. 单向玻璃纤维增强环氧树脂在冲击拉伸时的一维本构方程[J]. *复合材料学报*, 1994, 11(4):110-116.
- [23]张磊, 孙清, 王虎长,等. E 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料力学性能试验研究[J]. *电力建设*, 2010, 31(9):118-121.
- [24]张硕,姚宁,吴继. E 玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的力学性能 [J]. *电力建设*, 2016, 1(1): 11-14
- [25]王启强, 彭龙贵. 玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的力学性能研究[J]. *化工时刊*, 2016, 30(7):4-7.
- [26]薛晓敏, 孙清, 王虎长,等. 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料受压管件稳定性试验及理论研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(9):251-258.
- [27]沈玲燕, 李永池, 王志海, 等. 三维正交机织玻璃纤维/环氧树脂复合材料动态力学性能的实验和理论研究[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(4): 157-162.
- [28]赵培仲, 戴京涛, 吉伯林,等. UV 光固化玻璃纤维布/EP-PBMA 树脂复合材料的力学性能[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(5):1186-1191.
- [29]Shokrieh M M, Omid M J. Compressive response of glass-fiber reinforced polymeric



- composites to increasing compressive strain rates[J]. *Composite Structures*, 2009, 89(4):517-523.
- [30]Naresh K, Shankar K, Rao B S, et al. Effect of high strain rate on glass/carbon/hybrid fiber reinforced epoxy laminated composites[J]. *Composites Part B Engineering*, 2016, 100:125-135.
- [31]Gurusideswar S, Srinivasan N, Velmurugan R, et al. Tensile Response of Epoxy and Glass/Epoxy Composites at Low and Medium Strain rate Regimes[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 173: 686-693.
- [32]Gurusideswar S, Velmurugan R, Gupta N K. Study of rate dependent behavior of glass/epoxy composites with nanofillers using non-contact strain measurement[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 110: 324-337.
- [33]Lee S H, Wang S, Pharr G M, et al. Evaluation of interphase properties in a cellulose fiber-reinforced polypropylene composite by nanoindentation and finite element analysis[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(6): 1517-1524.
- [34]HODZIC A,STACHURSKI Z H,KIM J K. Nano-in-dentation of polymer-glass interfaces part i. experimental and me-chanical analysis[J]. *Polymer*,2000,41 ( 18) :
- [35]Gao S L, Mäder E. Characterisation of interphase nanoscale property variations in glass fibre reinforced polypropylene and epoxy resin composites[J]. *Composites Part A Applied Science & Manufacturing*, 2002, 33(4):559-576.
- [36]唐志平. 高应变率下环氧树脂的动态力学性能[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1981.
- [37]王礼立, 余同希, 李永池. 冲击动力学进展[J]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1992.
- [38]Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. *Proceeding Journal of American Physical Society*, 1949, B62:676-700.
- [39]王礼立.应力波基础（第二版）.北京:国防工业出版社, 2005.39~40
- [40]过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2003: 163—337.
- [41]Park R. State of the art report ductility evaluation from laboratory and analytical testing . *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Kyoto, Japan, 1988: 605—616.

- [42]Huang M, Liu Y, Sheng D. Simulation of yielding and stress - stain behavior of shanghai soft clay[J]. Computers & Geotechnics, 2011, 38(3):341-353.
- [43]张泰华. 微/纳米力学测试技术及其应用[M]. 机械工业出版社, 2005.
- [44]李国英. 表面工程手册[M]. 机械工业出版社, 1998.
- [45]孟龙晖, 杨吟飞, 何宁. 纳米压痕法测量 Ti6Al4V 钛合金室温蠕变应力指数[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(3):617-622.
- [46]Elmustafa A A, Stone D S. Nanoindentation and the indentation size effect: Kinetics of deformation and strain gradient plasticity[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2003, 51(2):357-381.
- [47]Hay J L. Instrumented Indentation Testing[J]. Asm Handbook, 2000, 30(2):106 - 114.
- [48]Ma X, Li F, Zhao C, et al. Indenter load effects on creep deformation behavior for Ti-10V-2Fe-3Al alloy at room temperature[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 709.
- [49]Msolli S, Alexis J, Kim H S, et al. Assessment of candidate metallization systems deposited on diamond using nano-indentation and nano-scratching tests[J]. Thin Solid Films, 2016, 619(2):53-60.
- [50]Pharr G M, Oliver W C, Brotzen F R. On the generality of the relationship between contact stiffness, contact area, and elastic modulus during indentation[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(3):613-617.
- [51]Oliver W C, Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564-1583.

## 致谢

时光荏苒，岁月如梭。转眼间三年研究生生活已经进入尾声。在这三年的学习期间，我得到了很多老师、同学和朋友的关怀和帮忙。在学位论文即将完成之际，我要向所有期间给予我支持、帮助和鼓励的人表示我最诚挚的谢意。

本论文是在导师李志刚副教授的悉心指导下完成的。论文从定题到论文写作定稿，倾注了李老师大量的心血。在研究生学习的三年时间里，深深的受益于李老师的关心、爱护和谆谆教导。李老师在对待科研上专业的态度、一丝不苟的科研风格、严谨务实的治学态度以及开阔的视野深深的影响了我，让我终生受益。在生活中，李老师和蔼可亲，平易近人，对待我们就像朋友一样，让我们如沐春风。能师从李老师，我为自己感到庆幸。在毕业论文完成之际，向李老师表示我最诚挚的感谢和敬意！

感谢力学学院的各位领导和老师的悉心教导与培养，在此表示诚挚的感谢！

感谢陪伴我研究生三年学习生活的室友，有欢笑，有陪伴，与你们相识相处教会我许多东西，让我受益终生，同时也谢谢室友们在三年来的生活中对我的包容和理解。感谢 2015 级力学专业全体研究生，与你们相识是我莫大的荣幸。

南洪尧

2018 年 5 月 27 日星期日



## 攻读硕士学位期间发表的学术论文

[1]南洪尧, 李岳, 李志刚. 玻璃纤维增强环氧树脂力学性能研究. 湘潭大学自然科学学报. 2018. (核心, 已录用)