

基于深度信念网络的玄武岩纤维增强树脂 复合材料耐久性预测

兰春晏¹, 贾彬¹, 杨勇新^{*2}, 黄辉¹

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 绵阳 621000; 2. 中冶建筑研究总院 检测中心, 北京 100089)

摘 要: 采用紫外线老化试验箱模拟大气环境中的紫外线进行加速老化试验, 对玄武岩纤维增强树脂复合材料(BFRP)及环氧树脂在紫外线环境中的耐久性进行了研究。通过 BFRP 及环氧树脂经紫外线老化后的拉伸强度、弹性模量、断裂延伸率的变化, 结合深度信念网络(DBN)的方法, 预测 BFRP 及环氧树脂拉伸强度、弹性模量的变化趋势; 并提出以同批次非破坏性试件的弹性模量作为 BFRP 耐久性的评价指标。结果表明, 随着老化时间的延长, BFRP 及环氧树脂的拉伸强度及断裂延伸率均先提高后下降, 但弹性模量趋于平缓下降; DBN 得到的预测值与试验值相对误差基本在 10% 以内, 表明 DBN 进行 BFRP 及环氧树脂耐久性预测的有效性; 以非破坏性试件的弹性模量来评价 BFRP 的耐久性更具科学性。

关键词: 玄武岩纤维增强树脂复合材料(BFRP); 环氧树脂; 紫外线; 耐久性; 深度信念网络

中图分类号: TU599 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)02-0390-10

Durability prediction of basalt fiber reinforced polymer composite based on deep belief network

LAN Chunyan¹, JIA Bin¹, YANG Yongxin^{*2}, HUANG Hui¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China; 2. Testing Center, Zhongye General Institute of Architectural Research, Beijing 100089, China)

Abstract: The durability of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) and epoxy resin in ultraviolet radiation environment was studied by accelerated aging test using ultraviolet radiation aging chamber to simulate ultraviolet radiation in atmospheric environment. Based on the changes of tensile strength, modulus of elasticity and elongation at break of BFRP and epoxy resin after ultraviolet aging, combined with the method of deep belief network (DBN), the changing trend of tensile strength and modulus of elasticity of BFRP and epoxy resin was predicted, and the modulus of elasticity of non-destructive samples in the same batch was proposed as the evaluation index of durability of BFRP. The results show that the tensile strength and elongation at break of BFRP and epoxy resin increase first and then decrease with aging time, but the modulus of elasticity tends to decrease gently. The relative error between the predicted value and experimental value obtained by DBN is less than 10%. The validity of predicting durability of BFRP and epoxy resin by DBN is non-destructive. It is more scientific to evaluate the durability of BFRP by the elastic modulus of sexual specimens.

Keywords: basalt fiber reinforced polymer (BFRP); epoxy resin; ultraviolet ray; durability; deep belief network

玄武岩纤维增强树脂复合材料(BFRP)由于轻质高强、各向异性、电绝缘性、耐酸碱腐蚀等优点, 广泛应用于土木工程、航空航天及军事等领域。然而 BFRP 在服役过程中必不可少受到光、温度、降

雨等老化作用, 这将导致 BFRP 的耐久性降低; 尤其紫外线作用将引起 BFRP 中的树脂基体退化, 导致 BFRP 服役寿命缩减。如何准确预测纤维增强树脂复合材料的耐久性显得尤为重要。顾习峰等^[1]研

收稿日期: 2019-03-14; 录用日期: 2019-04-22; 网络出版时间: 2019-05-08 14:27

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190506.002>

基金项目: 国家自然科学基金(51678579; 51908476); 四川省科技计划资助项目(2018SZ0355)

通讯作者: 杨勇新, 博士, 教授级高级工程师, 硕士生导师, 研究方向为纤维复合材料 E-mail: 804875935@qq.com

引用格式: 兰春晏, 贾彬, 杨勇新, 等. 基于深度信念网络的玄武岩纤维增强树脂复合材料耐久性预测[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2): 390-399.

LAN C Y, JIA B, YANG Y X, et al. Durability prediction of basalt fiber reinforced polymer composite based on deep belief network [J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2020, 37(2): 390-399 (in Chinese).

究发现随着紫外线老化时间的推移,BFRP 的拉伸强度及断裂延伸率均出现较小幅度的下降;而BFRP 的拉伸弹性模量变化甚至更小。Hulatt 等^[2]和 Nguyen 等^[3]发现紫外线辐照作用没有改变碳纤维增强树脂(CFRP)复合材料的强度,而使其弹性模量提高。许燕杰^[4]发现 CFRP 的拉伸强度、弯曲强度受到紫外线辐照作用的影响较小;张琦等^[5]、谢龙飞^[6]研究表明紫外线条件下玻璃纤维增强树脂(GFRP)复合材料的拉伸性能和弯曲性能的下降低度均随紫外线辐照时间的延长而增大。郭春红等^[7]分析湿热环境下 GFRP 的力学性能变化并建立了双线性衰减模型。张彦红等^[8]分析了湿热环境下 GFRP 的性能变化规律和趋势,并建立了抛物线-直线的性能衰减模型。蒋竞^[9]将试验和理论分析进行结合,建立了盐雾腐蚀环境下 GFRP 力学性能-老化时间的三线型衰减模型。杨旭华等^[10]采用深度信念网络(DBN)模型对医院门诊量进行预测,结果表明该方法具有可行性及有效性。肖同录等^[11]基于 DBN 理念,对短时期内的电力负荷进行了预测,结果表明预测误差的绝对值范围较小。

尽管已有许多学者进行了纤维增强树脂复合材料的耐久性研究,同时也给出了许多耐久性预测模型,但往往许多研究均采用破坏性测试方法,得到的结论存在较大差异性且耐久性预测模型也不尽相同;本文考虑 BFRP 试件自身的差异性及破坏性测试方法的随机性,采用非破坏性试验的测试方法,并结合 DBN 预测模型的准确性,对 BFRP 及环氧树脂的耐久性作出了预测。

1 试验方案

1.1 试验设计及试件制作

1.1.1 试验设计

紫外线耐久性试件分别为 BFRP 试件及环氧树脂试件。BFRP 采用破坏性试件及非破坏性试件形成对照试验,环氧树脂试件只采用破坏性试件进行试验,BFRP 及环氧树脂试件数量依据 GB 1446—2005 标准^[12]来选取,具体试验设计方案参照表 1 及表 2。

1.1.2 试件制作

BFRP 试件制作遵守 GB/T 26744—2011 标准^[13]、GB/T 21490—2008 标准^[14]中的相关规定,具体尺寸如图 1 所示。在端部容易造成应力集中,为防止 BFRP 在夹具的端部发生破坏,在夹具的两

表 1 玄武岩纤维增强树脂(BFRP)复合材料老化试验组试件安排

Table 1 Specimen arrangement of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) composite aging test group			
Name of test group	Specimen group labeling	Aging time/h	Number of specimens
Non-destructive specimens	I	0	20
	II	1 080	
	III	2 160	
	IV	4 320	
	V	6 480	
	VI	8 640	
Destructive specimens	I	0	7
	II	1 080	7
	III	2 160	7
	IV	4 320	7
	V	6 480	7
	VI	8 640	7
Specimen total			62

表 2 环氧树脂老化试验组试件情况

Table 2 Specimens of epoxy resin aging test group			
Name of test group	Specimen group labeling	Aging time/h	Number of specimens
Destructive specimens	I	0	7
	II	2 160	7
	III	4 320	7
	IV	6 480	7
	V	8 640	7
Specimen total			35

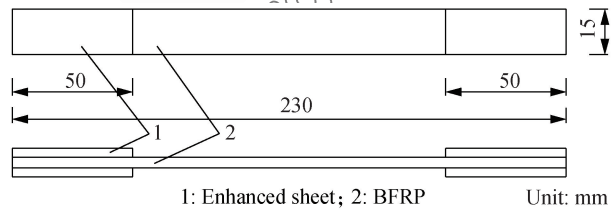


图 1 BFRP 试件
Fig. 1 BFRP specimens

端各粘贴两个硬铝加强片。将制作好的试件放置于标准环境中(温度为(23±2)℃,相对湿度为45%~55%)固化 7 天。树脂试件尺寸根据 GB 2567—2008 标准^[15]中的相关规定,具体尺寸如图 2 所示。

1.2 试验环境及试验方法

1.2.1 试验环境

依据 GB/T 16422—1997 标准^[16],采用东莞市庆声试验设备有限公司生产的紫外线老化试验箱进行老化试验,波长为 315~400 nm,选定紫外线辐照度为 0.68 W/m²,试验箱内温度保持在(60±

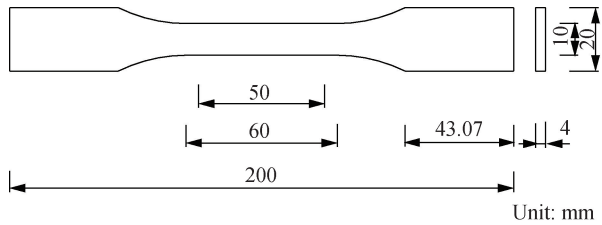


图 2 环氧树脂试件尺寸

Fig. 2 Dimensions of epoxy resin specimens

2)℃，相对湿度为 45%~55%。紫外线老化箱如图 3(a)所示。

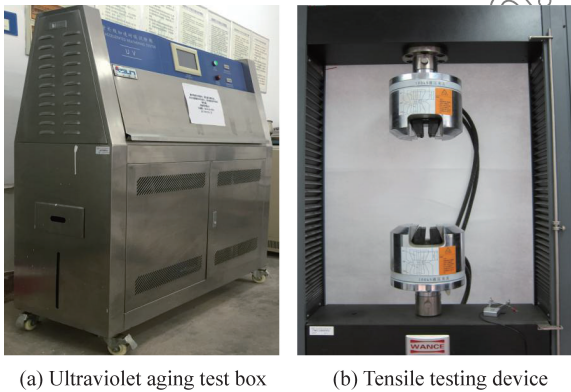


图 3 相关试验装置

Fig. 3 Relevant test equipment

1.2.2 试验方法

环氧树脂试件依据 GB 2567—2008 标准^[15]进行测试，测定 0 h、2 160 h、4 320 h、6 480 h、8 640 h

环氧树脂试件的强度、弹性模量、断裂延伸率；BFRP 试件依据 GB 3354—2014 标准^[17]进行测试，测定 0 h、1 080 h、2 160 h、4 320 h、6 480 h、8 640 h 时 BFRP 破坏性试件的强度、弹性模量、断裂延伸率及非破坏性试件的弹性模量；非破坏性试件参照破坏性试件的弹性阶段进行弹性模量测试作为评价耐久性退化的指标，在电液伺服拉伸试验机上进行测试，加载速率为 2 mm/min。采用连续加载的方式，测试相应的拉伸强度、弹性模量、断裂延伸率。拉伸装置如图 3(b)所示。

2 结果及分析

BFRP 试件及环氧树脂试件在不同紫外线老化时间下的基本力学性能测试平均值见表 3 和表 4。

图 4 为 BFRP 试件经紫外线老化不同时间后，拉伸强度、拉伸模量及断裂延伸率的变化曲线。由图 4(a)~4(c)可见，从初始到 1 080 h 期间试件的拉伸强度及断裂延伸率均逐渐增加，但随着老化时间的延长，后期均逐渐降低；然而，试件的弹性模量始终表现为降低趋势，但变化趋势并不显著。BFRP 破坏性试件的拉伸强度、断裂延伸率、弹性模量下降的最大程度分别为 32.60%、37.31%、6.51%，BFRP 非破坏性的弹性模量最大下降了 6.26%。BFRP 破坏性试件的拉伸强度、断裂延伸率紫外线老化后初期出现提高现象，主要是由于 BFRP 中的树脂基体存在后固化现象，导致初期强

表 3 BFRP 试件不同紫外线老化时间的基本力学性能测试平均值

Table 3 Average mechanical properties of BFRP specimens in different ultraviolet aging time

Aging time/h	Modulus of elasticity/GPa				Tensile strength/MPa		Fracture elongation/%	
	Destructive specimens	Growth rate/%	Non-destructive specimens	Growth rate/%	Destructive specimens	Growth rate/%	Destructive specimens	Growth rate/%
0	23.16	—	23.20	—	496.10	—	2.43	—
1 080	23.67	2.20	23.47	1.16	529.94	6.82	2.60	7.00
2 160	23.20	0.17	23.19	-0.04	510.03	2.81	2.34	-3.70
4 320	22.84	-1.38	22.70	-2.16	443.02	-10.70	2.03	-16.46
6 480	22.46	-3.02	22.30	-3.88	389.91	-21.40	1.78	-26.75
8 640	22.13	-4.45	22.00	-5.17	357.16	-28.01	1.63	-32.92

表 4 环氧树脂试件不同紫外线老化时间的基本力学性能测试平均值

Table 4 Average mechanical properties of epoxy resin specimens in different ultraviolet aging time

Aging time/h	Tensile strength/MPa	Growth rate/%	Modulus of elasticity/GPa	Growth rate/%	Fracture elongation/%	Growth rate/%
0	53.56	—	2.47	—	3.21	—
2 160	59.25	10.62	2.40	-2.83	3.55	10.59
4 320	54.43	1.62	2.36	-4.45	3.29	2.49
6 480	51.45	-3.94	2.34	-5.26	3.15	-1.87
8 640	49.00	-8.51	2.31	-6.48	2.53	-21.18

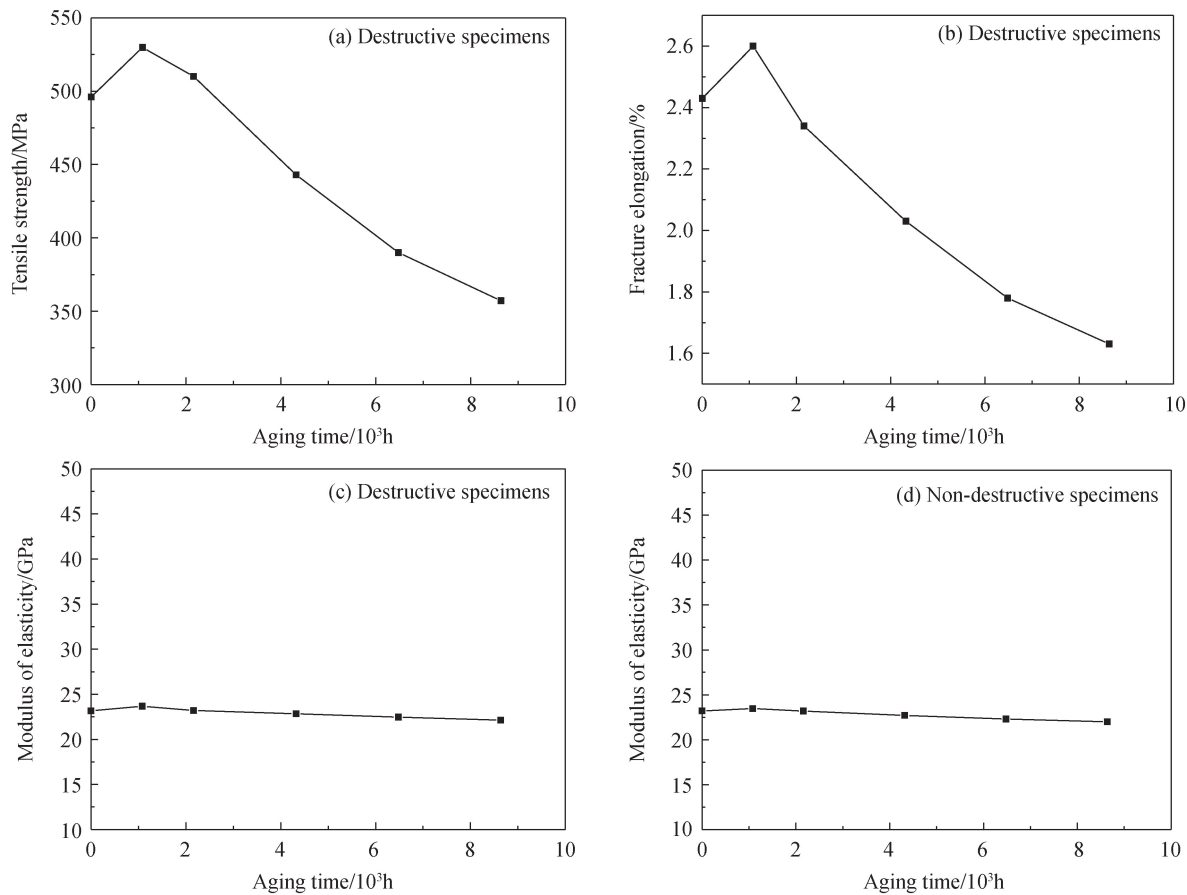


图 4 BFRP 试件基本力学性能随紫外线老化时间变化

Fig. 4 Mechanical properties of BFRP changing with ultraviolet aging time

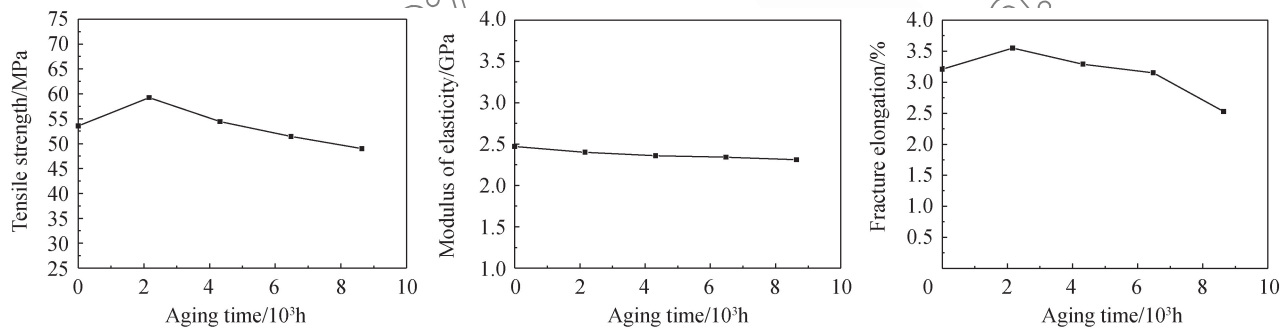


图 5 环氧树脂试件基本力学性能随紫外线老化时间变化

Fig. 5 Mechanical properties of epoxy resin specimens changing with ultraviolet aging time

度及断裂延伸率反而提高；而 BFRP 弹性模量却一直平缓下降，可能是由于弹性模量属于材料线性阶段力学性能的体现，受外界因素影响较小的原因。结合表 3 并分析图 4(c)和图 4(d)可知，BFRP 破坏性试件与非破坏性试件弹性模量变化存在差异，弹性模量下降的最大程度也分别达到 6.51% 和 6.26%，主要由于 BFRP 破坏性试件的试验数据来源非同体，数据存在波动性及离散性，因此本文采

用非破坏性试件的弹性模量来表征 BFRP 的耐久性；并且弹性模量属于 BFRP 力学性能的初期特性，能够降低树脂后固化现象带来的影响，可见，采用此方法进行 BFRP 的老化评价更科学、更合理、可比性和稳定性都更好。

图 5 为环氧树脂试件经紫外线老化不同时间后，拉伸强度、拉伸模量及断裂延伸率的变化曲线。可见，环氧树脂试件的拉伸强度、断裂延伸率

下降各不相同,但总的来说均先提高后下降,最后趋向于稳定下降的形式;但弹性模量一直平缓下降。环氧树脂试件的拉伸强度、断裂延伸率、弹性模量下降的最大程度分别为 17.30%、28.73%、6.48%。环氧树脂试件的拉伸强度、断裂延伸率先提高后下降主要也是由于树脂在紫外老化过后发生的交联反应大于降解反应,而弹性模量受其现象影响较小。

3 DBN 预测模型

3.1 DBN 模型简介

人工神经网络(Artificial neural network, ANN),通常简称为神经网络,是在生物神经网络的启示下建立的一种数据处理模型。主要通过调整神经元之间的权值对输入的数据进行建模,最终达到解决实际问题的目的。DBN 为神经网络中的一种,具有监督学习及非监督学习两种方式,DBN 的本质就是特征学习的过程,即如何得到更好的特征表达。DBN 由输入层、输出层及若干玻尔兹曼机组合而成。

3.2 预测环氧树脂及 BFRP 耐久性的 DBN 模型

3.2.1 DBN 输入输出数据的选择

采用 DBN 进行数据预测过程中,需要确定网络模型的输入数据、输出数据,通过建立外部输入数据与内部输出数据间的有效联系,才能实现对紫外线环境下环氧树脂试件及 BFRP 试件耐久性的优良预测。紫外线环境下影响 BFRP 试件耐久性退化的主要因素有纤维种类、树脂胶层种类、试件长度、试件宽度、试件厚度、纤维体积分数、紫外线辐照强度、温度、紫外线波长及紫外线辐照时间,而影响环氧树脂试件耐久性退化的主要因素有树脂种类、试件长度、试件宽度、试件厚度、紫外线辐照强度、温度、紫外线波长及紫外线辐照时间,分别选取以上变量为环氧树脂试件及 BFRP 试件的输入数据;输出数据选取拉伸强度和弹性模量。

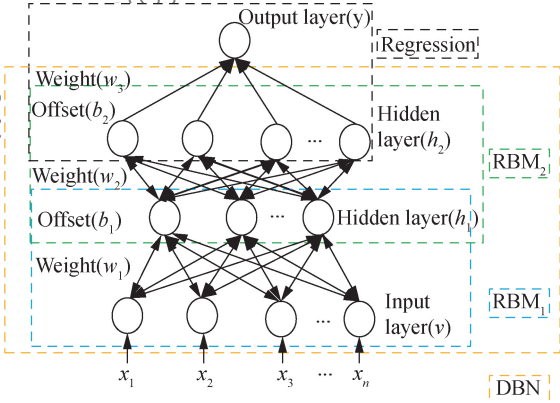
3.2.2 DBN 模型的建立

3.2.2.1 网络结构模型样本的确定

基于国内外学者开展的 BFRP 及树脂试件的紫外线耐久性试验调研分析,获得了环氧树脂及 BFRP 的拉伸强度、弹性模量的试验数据^[18-31]。基于大量试验数据,获得环氧树脂试件及 BFRP 试件 DBN 的训练样本,基于本文所进行的紫外线耐久性试验数据作为检验样本,拟将紫外线环境条件下的任意时刻 BFRP 拉伸强度、弹性模量及环氧树脂拉伸强度、弹性模量的预测做为预测样本。

3.2.2.2 网络结构的确立

网络模型中需要明确的参数:输入层输出层的节点数,隐含层节点数、批尺寸(Batchsize)、迭代次数(Numepochs)、动量(Momentum)及学习率(Alpha),DBN 结构基本参数见表 5,nn 的激活(激励)函数为 Sigmoid 函数,DBN 的结构模型见图 6。



Input vector: x (fiber species, resin species, ultraviolet irradiation intensity, ultraviolet irradiation time et al)

图 6 DBN 的结构模型

Fig. 6 Structural model of DBN

3.2.2.3 网络数据的归一化处理

为了数据处理方便、消除量纲表达式的不同造成的误差及避免数据中存在的奇异样本所带网络训练时间的延长,往往需要将输入数据进行归一化处理到(0, 1)间,再经过反归一化得到原始数据。本

表 5 深度信念网络(DBN)结构主要参数

Table 5 Main parameters of deep belief network (DBN) structure

Network structure parameters	Number of input layer nodes	Number of output layer nodes	DBN					nn	
			Sizes	Numepochs	Batchsize	Momentum	Alpha	Numepochs	Batchsize
Strength of fibre polymer	10	1	40 20 8		3	0	1	111	1
Modulus of elasticity of fibre polymer	10	1	40 40 21		3	0	1	78	1
Strength of epoxy resin	8	1	40 20 9		2	0	1	109	1
Elastic modulus of epoxy resin	8	1	36 14 40		2	0	1	135	1

文采用的归一化函数为 mapminmax 函数:

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

式中: x^* 为归一化后的值; x 为原始数据; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 为数据组中的最大和最小值。

3.3 环氧树脂及 BFRP 耐久性的 DBN 预测

3.3.1 DBN 的样本训练

针对收集到的试验数据作为样本数据进行训练,采用 DBN 模型进行训练前,先对输入数据进行归一化处理,训练完后采用反归一化处理将输出值还原。反归一化公式为

$$x = x^* (x_{\max} - x_{\min}) + x_{\min}$$

将输出样本还原,与原始数据进行对比,图 7、图 8 分别为 BFRP 及环氧树脂的强度、弹性模量输出数据与原始数据对比曲线。

基于上述训练数据预测结果可以得知,DBN 经过训练后,针对训练样本表现出强大的非线性映射能力和良好的跟踪精度。样本的输出数据的波动规律与原始数据几乎一致,原始数据的变化规律被较完好地还原出来,可见,采用 DBN 对样本数据

进行学习训练获得的结果是可以接受的。由图 7(a)和图 7(b)对比可知,基于所收集的国内外学者试验设计的不同,造成试验数据的波动性,进而训练样本数据也存在不同,往往得到的输出数据也存在不同的波动规律,原始数据与输出数据之间也存在不同幅度的差距,图 8(a)和图 8(b)亦是如此;由图 7 与图 8 对比可知,由于训练样本数据量的减少及国内外学者试验设计的差异,造成 DBN 在进行训练样本特征学习的过程中存在波动性;给输出数据带来不同的波动规律及原始数据与输出数据间不同的幅度差距。

3.3.2 DBN 模型预测结果

通过训练样本进行特征学习,得出 DBN 预测模型,最后与本文所进行紫外线环境下耐久性试验数据来绘制对比曲线,获得 BFRP 试件与环氧树脂试件随紫外线老化时间的耐久性对比曲线。

3.3.2.1 BFRP 试件预测结果

图 9 为 BFRP 破坏性试件强度、弹性模量的实际值与预测值对比曲线。图 10 为 BFRP 非破坏性试件弹性模量的实际值与预测值对比曲线。

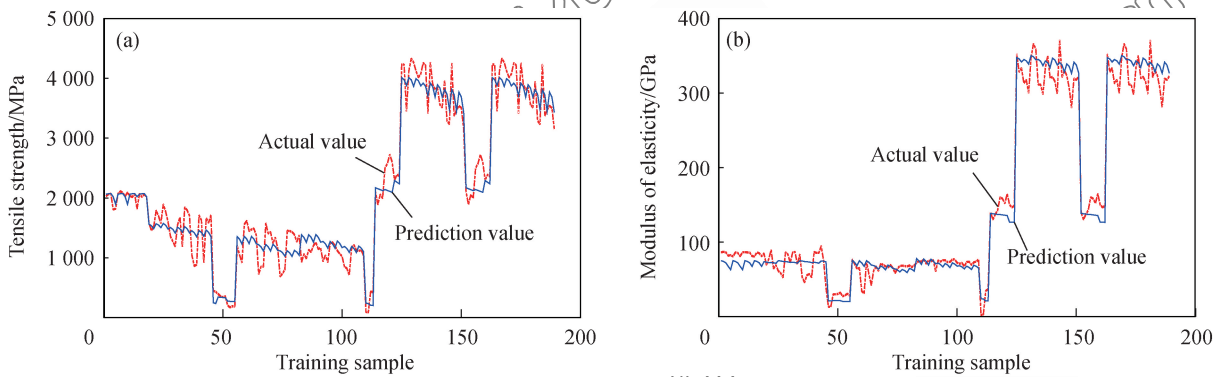


图 7 BFRP 试件预测曲线与原始曲线对比

Fig. 7 Comparison between the predicted and original curves of BFRP specimens

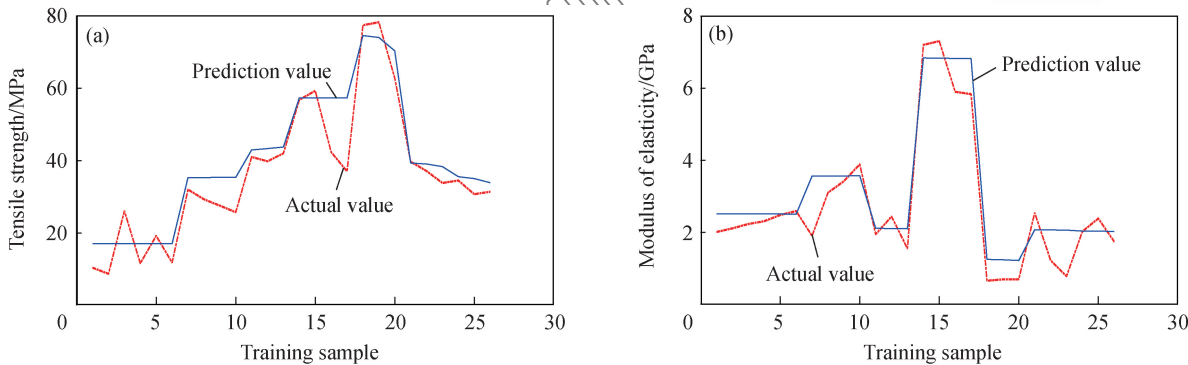


图 8 环氧树脂试件预测曲线与原始曲线对比

Fig. 8 Comparison between the predicted and original curves of epoxy resin specimens

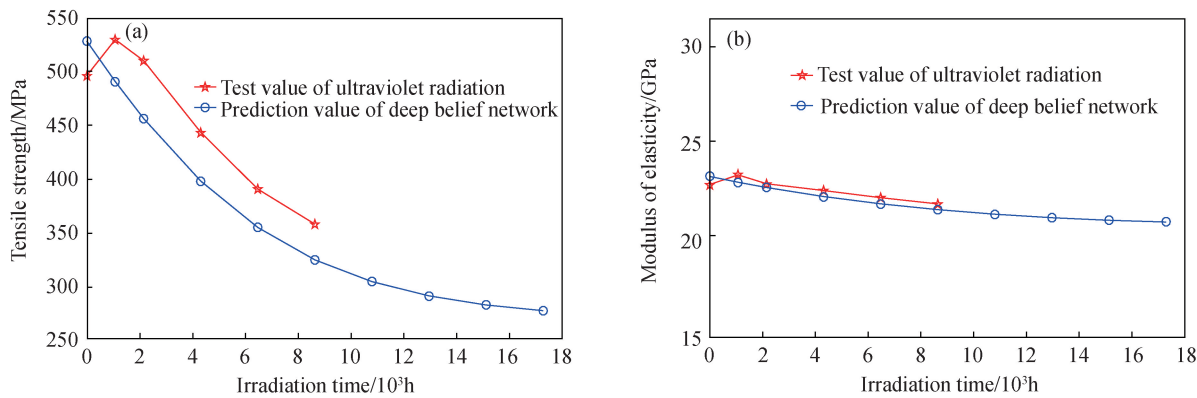


图 9 BFRP 破坏性试件实际曲线与预测曲线对比

Fig. 9 Comparison between actual and predicted curves of destructive test pieces for BFRP

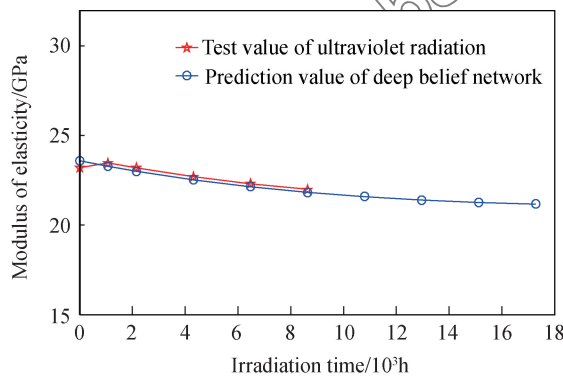


图 10 BFRP 非破坏性试件实际曲线与预测曲线对比

Fig. 10 Comparison between actual and predicted curves of non-destructive specimens of BFRP

3.3.2.2 树脂试件预测结果

图 11 为环氧树脂强度、弹性模量的实际值与预测值对比曲线。可知，采用 DBN 预测环氧树脂试件强度可较合理地实现耐久性趋势的预测，且紫外线老化对环氧树脂的弹性模量影响较小。

3.3.2.3 DBN 预测模型评价

为了检测 DBN 预测模型的性能，常用的评价指标为均方误差 (MSE)、均方根误差 (RMSE)、绝对平均误差 (MAE)、相对平均误差 (MRE)。本文采用 MRE 对模型进行评价。若评价指标的误差值较大，说明该网络模型预测精度较低，反之，精度较高。相关计算公式如下：

$$E_{mr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - \bar{x}_i|}{x_i}$$

式中： E_{mr} 为相对平均误差； x_i 代表试验实测值； $\bar{x}_i$ 代表网络预测值。

MRE 反映了模型的预测值相对于真实值的偏离程度，MRE 能够消除量纲对指标的影响，能够更加准确地对不同模型的预测能力做出评价。DBN 模型预测值与试验值的误差见表 6、表 7。

3.3.3 DBN 模型预测结果分析

由图 9(a) 和图 9(b) 可见，采用 DBN 方式得到的 BFRP 破坏性试件的拉伸强度、弹性模量预测趋势，初始 BFRP 破坏性试件的强度、弹性模量的试

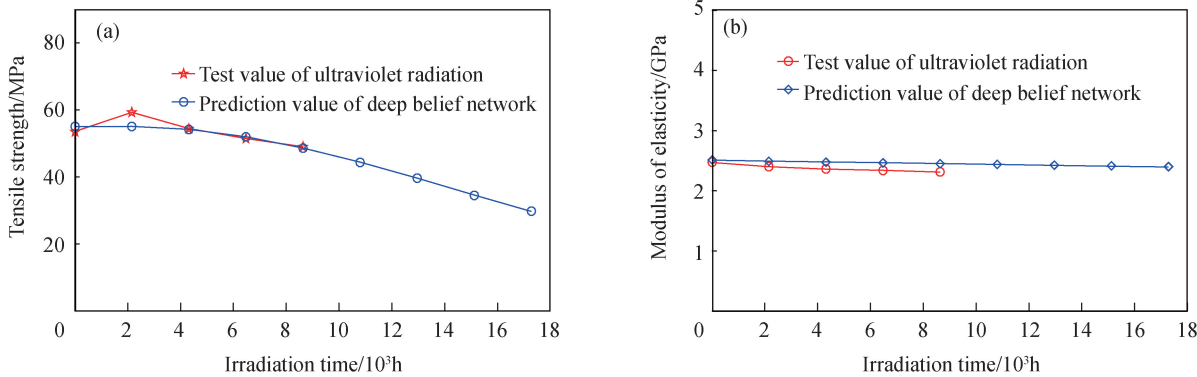


图 11 环氧树脂试件实际曲线与预测曲线对比

Fig. 11 Comparison between actual curve and predicted curve of epoxy resin specimens

表 6 BFRP 预测值与试验值误差
Table 6 Error of prediction value and test value of BFRP

Aging time/h	0	1 080	2 160	4 320	6 480	8 640
Strength test value of destructive/MPa	496.10	529.94	510.03	443.02	389.91	357.16
Strength prediction value of destructive/MPa	528.57	490.64	455.87	397.41	354.01	323.69
Relative error/%	-6.55	7.42	10.62	10.30	9.21	9.37
MRE	0.089					
Test value of elastic modulus of destructive/GPa	23.16	23.67	23.20	22.84	22.46	22.13
Prediction value of elastic modulus of destructive/GPa	23.59	23.28	23.00	22.52	22.13	21.83
Relative error/%	1.86	1.65	0.86	1.40	1.47	1.36
MRE	0.014					
Test value of elastic modulus of non-destructive/GPa	23.20	23.47	23.19	22.70	22.30	22.00
Prediction value of elastic modulus of non-destructive/GPa	23.59	23.28	23.00	22.52	22.13	21.83
Relative error/%	-1.68	0.81	0.82	0.79	0.76	0.77
MRE	0.009					

Note: MRE—Mean relative error.

表 7 环氧树脂预测值与试验值误差
Table 7 Error of predictive value and test value of epoxy resin

Aging tuime/h	0	2 160	4 320	6 480	8 640
Strength test value of destructive/MPa	53.56	59.25	54.43	51.45	49.00
Strength prediction value of destructive/MPa	54.99	55.06	54.18	51.97	48.60
Relative error/%	2.67	7.07	0.46	-1.01	0.82
MRE	0.024				
Test value of elastic modulus of destructive/GPa	2.47	2.40	2.36	2.34	2.33
Prediction value of elastic modulus of destructive/GPa	2.51	2.49	2.48	2.47	2.45
Relative error/%	-1.62	-3.75	-5.04	-5.56	-6.06
MRE	0.044				

验数据存在上升阶段，往往是由于纤维增强树脂复合材料中的浸渍树脂存在后固化阶段，造成强度、弹性模量的提高，但对 BFRP 破坏性的耐久性总体预测趋势比较合理，说明 DBN 能够实现对 BFRP 耐久性的合理预测；同时也说明 DBN 具有非常强大的非线性映射能力；由图 10 可见，采用 DBN 方式得到的 BFRP 非破坏性试件的弹性模量预测趋势，与破坏性试件相比能够更好地符合预测模型，说明基于非破坏性试件弹性模量作为纤维增强树脂复合材料耐久性评价指标，更加稳定、准确，能够降低试验过程中的数据误差，能够较好地消除数据来源非同体的影响。

由图 11(a)可以看出，由于环氧树脂后固化阶段，造成环氧树脂强度的提高，总的来说采用 DBN 预测环氧树脂试件强度能够较合理地实现耐久性趋势的预测，但由于数据地波动性往往也存在相应的误差；由图 11(b)可见，在采用 DBN 进行环氧树脂试件弹性模量预测时，环氧树脂试件弹性模量呈下降趋势，但下降幅度不大，说明紫外线老化对环氧

树脂的弹性模量影响较小。

由表 6 和表 7 可知，绝大数的相对误差分布在 10% 内，存在少数两点误差较大，总的来说，采用 DBN 进行纤维增强树脂复合材料及环氧树脂耐久性预测的方法较合理。

4 结 论

- (1) 随着紫外线老化时间的延长，环氧树脂及玄武岩纤维增强树脂复合材料(BFRP)试件的拉伸强度、断裂延伸率总体先提高后下降。
- (2) 环氧树脂及 BFRP 的弹性模量经历紫外线老化后变化较小，说明紫外线老化作用对其弹性模量产生的影响并不大。
- (3) 采用非破坏性试件进行 BFRP 耐久性能的评估，能够减小试验误差，消除试验数据来源非同体的影响，更科学、合理。
- (4) 总的来说，深度信念网络(DBN)具有非常强大的非线性映射能力，可为紫外线环境条件下纤维增强树脂复合材料及环氧树脂耐久性预测提供一

种有效的方法。

(5) 采用 DBN 进行 BFRP 及环氧树脂耐久性预测的精度,很大程度上取决于收集的训练样本的精确度、特征明显度及样本数量。

参考文献:

- [1] 顾习峰. 玄武岩纤维复合材料加固混凝土构件在紫外线照射下的耐久性试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
GU Xifeng. Durability test of concrete members strengthened with basalt fiber composite under ultraviolet irradiation[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2010 (in Chinese).
- [2] HULATT J, HOLLAWAY L, THORNE A. Preliminary investigations on the environmental effects on new heavy-weight fabrics for use in civil engineering[J]. Composites Part B: Engineering, 2002, 33: 107-114.
- [3] NGUYEN T C, BAI Y, ZHAO X L. Effects of ultraviolet radiation and associated elevated temperature on mechanical performance of steel/CFRP double strap joints[J]. Composite Structure, 2012, 107(3): 266-273.
- [4] 许燕杰. UVA 紫外辐射对室内碳纤维增强环氧树脂基复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 45-65.
XU Yanjie. Effect of UVA ultraviolet radiation on properties of indoor carbon fiber reinforced epoxy resin matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(2): 45-65 (in Chinese).
- [5] 张琦, 黄故. 紫外线对不饱和聚酯树脂玻璃纤维层合板性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2007, 35(4): 58-61.
ZHANG Qi, HUANG Gu. Effect of ultraviolet on properties of unsaturated polyester resin glass fiber laminates[J]. Application of Engineering Plastics, 2007, 35(4): 58-61 (in Chinese).
- [6] 谢龙飞. 玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂基复合材料的紫外老化性能[J]. 南京工业大学学报, 2014, 36(3): 93-98.
XIE Longfei. Ultraviolet aging properties of glass fiber reinforced unsaturated polyvinyl acetate matrix composites[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2014, 36(3): 93-98 (in Chinese).
- [7] 郭春红. FRP 力学性能和 FRP 及其加固混凝土结构耐久性性能的评价研究[D]. 北京: 中冶集团建筑研究总院, 2006.
GUO Chunhong. Evaluation of mechanical properties of FRP and durability of FRP and reinforced concrete structures[D]. Beijing: General Institute of Architectural Research, Zhonghe Group, 2006 (in Chinese).
- [8] 张彦红, 杨勇新, 姚勇, 等. 玻璃纤维增强复合材料在湿热环境下的耐久性试验及性能衰减模型[J]. 工业建筑, 2014, 44(10): 46-50.
ZHANG Yanhong, YANG Yongxin, YAO Yong, et al. Durability test and performance attenuation model of glass fiber reinforced composites under humid and hot environment[J]. Industrial Building, 2014, 44(10): 46-50 (in Chinese).
- [9] 蒋亮. 玻璃钢在盐雾环境中腐蚀机制和性能演变规律的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
JIANG Jing. Experimental research on corrosion mechanism and properties evolution of FRP in salt-fog environment[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007 (in Chinese).
- [10] 杨旭华, 钟楠祎. 基于深度信念网络的医院门诊量预测[J]. 计算机科学, 2016, 43(s2): 26-30.
YANG Xuhua, ZHONG Nanhui. Prediction of outpatient service volume in hospital based on deep belief network[J]. Computer Science, 2016, 43(s2): 26-30 (in Chinese).
- [11] 肖同录, 赵增顺. 基于深度信念网络的短期电力负荷预测[J]. 电子世界, 2014(10): 186-187.
XIAO Tonglu, ZHAO Zengshun. Short-term load forecasting based on deep belief network[J]. Electronic World, 2014(10): 186-187 (in Chinese).
- [12] 中国国家标准管理委员会. 纤维增强塑料性能试验方法总则: GB1446—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
China National Standards Management Committee. General rules of test method for properties of fiber reinforced plastics: GB1446—2005[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2005 (in Chinese).
- [13] 中国国家标准管理委员会. 结构加固修复用玻璃纤维片材: GB/T26744—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
China National Standards Management Committee. Glass fiber sheet for structural reinforcement and repair: GB/T26744—2011[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2011 (in Chinese).
- [14] 中国国家标准管理委员会. 结构加固修复用碳纤维片材: GB/T21490—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
China National Standards Management Committee. Carbon fiber sheet for structural reinforcement and repair: GB/T21490—2008[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2008 (in Chinese).
- [15] 中国国家标准管理委员会. 树脂浇注体性能试验方法: GB2567—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
China National Standards Management Committee. Test method for properties of resin castable: GB2567—2008[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2008 (in Chinese).
- [16] 中国国家标准管理委员会. 实验室光源曝露试验方法: GB/T16422—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
China National Standards Management Committee. Laboratory light source exposure test method: GB/T16422—1997

- [S]. Beijing: China Standards Publishing House, 1997 (in Chinese).
- [17] 中国国家标准管理委员会. 定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法: GB3354—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
China National Standards Management Committee. Test method for tensile properties of directional fiber reinforce plastics: GB3354—2014[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2014 (in Chinese).
- [18] 李春平, 王海鹏. 紫外线和盐雾腐蚀对拉挤成型复合材料(FRP)性能的影响研究[J]. 纤维复合材料, 2010, 6(3): 6-9.
LI Chunping, WANG Haipeng. Effect of ultraviolet and salt spray corrosion on properties of pultrusion formed composites (FRP)[J]. Fiber Composites, 2010, 6(3): 6-9 (in Chinese).
- [19] 王国建, 孙耀宁, 蒋万乐, 等. 紫外线对玻纤环氧乙烯基酯树脂基复合材料性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2017, 25(3): 46-51.
WANG Guojian, SUN Yaoning, JIANG Wanle, et al. Effect of ultraviolet on properties of glass fiber epoxy vinyl ester resin matrix composites[J]. Material Science and Technology, 2017, 25(3): 46-51 (in Chinese).
- [20] 许燕杰, 肇研, 汤冰洁, 等. UVA 紫外辐射对室内碳纤维增强环氧树脂基复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(3): 63-69.
XU Yanjie, ZHAO Yan, TANG Bingjie, et al. Effect of UVA ultraviolet radiation on properties of indoor carbon fiber reinforced epoxy resin matrix composites[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 30(3): 63-69 (in Chinese).
- [21] 顾习峰, 杨勇新. 紫外线照射条件下玄武岩纤维布耐久性能研究[J]. 工业建筑, 2010(4): 13-16.
GU Xifeng, YANG Yongxin. Study on durability of basalt fiber cloth under ultraviolet irradiation[J]. Industrial Building, 2010(4): 13-16 (in Chinese).
- [22] KUMAR B G, SINGH R P, NAKAMURA T. Degradation of carbon fiber reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation[J]. Journal of Composite Materials, 2002, 36(24): 2713-2733.
- [23] QIU H W, HUANG G. Mechanical behaviors of glass/polyester composites after UV radiation[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 45(19): 1939-1943.
- [24] GUILHERME C C, JANINE D V, CAROLINAM C. Tensile properties and color and mass variations of GFPR composites under alkaline and ultraviolet exposures[J]. Material, 2016, 21(1): 1-10.
- [25] NGUYEN T C, BAI Y, ZHAO X L. Effects of ultraviolet radiation and associated elevated temperature on mechanical performance of steel/CFRP double strap joints[J]. Composite Structures, 2012, 94(12): 3421-3806.
- [26] ZHAO J, CAI G C. Deterioration of basic properties of the materials in FRP-strengthening RC structures under ultraviolet exposure[J]. Polymers, 2017, 9(9): 402.
- [27] 郭明映. 紫外老化对芳纶/环氧复合材料性能和结构的影响[J]. 纤维复合材料, 2008, 25(1): 35-38.
GUO Mingying. Effect of ultraviolet aging on properties and structure of aramid/epoxy composites[J]. Fiber Composites, 2008, 25(1): 35-38 (in Chinese).
- [28] MAHMOOD M, SHOKRIEH A B. Effects of ultraviolet radiation on mechanical properties of glass/polyester composites[J]. Journal of Composite Materials, 2007, 41(20): 2443-2455.
- [29] SIGNOR A W, VANLANDINGHAM M R, CHIN J W. Effects of ultraviolet radiation exposure on vinyl ester resins: Characterization of chemical, physical and mechanical damage[J]. Polymer Degradation and Stability, 2003, 79(2): 359-368.
- [30] RODRIGUES L, SILVA R, AQUINO E. Effect of accelerated environmental aging on mechanical behavior of curaua/glass hybrid composite[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(17): 2055-2064.
- [31] CORREIA J R, CABRAL-FONSECA S. Durability of pultruded glass-fiber-reinforced polyester profiles for structural applications[J]. Mechanics of Composite Materials, 2006, 4(42): 325-338.