

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.07.018

复合材料压缩应变的等效替代试验方法

杨刚¹, 李韶亮², 林晓凤¹, 王峰¹, 王雪明¹

(1. 中航复合材料有限责任公司复合材料检测技术中心, 北京 101300; 2. 空装驻北京地区第六军事代表室, 北京 101300)

摘要: 树脂基复合材料压缩性能试验方法中, ASTM D6641/D6641M-16 是使用较为广泛的标准试验方法之一。因传统应变片法存在不同使用环境需选择各种不同类型胶黏剂以及应变片粘贴效果受粘贴工艺影响较大的问题, 致使高温湿态环境下的应变测试一直是力学性能测试的难点, 阻碍了严苛环境下航空用复合材料压缩性能的评价。在 ASTM D6641/D6641M-16 推荐采用的压缩试验装置和电阻应变片法进行应变测量的基础上, 对压缩试验装置和压缩卡具进行了优化改进, 设计了四立柱式压缩卡具, 解决了原卡具进行应变测试时样品工作段不易观测的缺点, 进行了应变片法、接触式引伸计法(采用液压夹持方式)和非接触视频引伸计法3种不同应变测试方法间的对比测试, 完成了等效替代试验验证。结果表明, 经优化后的压缩卡具表现出更好的稳定性, 在7种不同牌号层合板的测试中, 压缩强度和压缩模量的平均离散系数分别为4.85%和1.42%; 同时该卡具可兼容非接触式视频引伸计的方式进行应变测试, 减少了应变片粘贴的环节, 降低贴片成本的同时有效减少测试流程。采用液压夹持方式在试样工作段长度为21 mm以下时, 可代替使用压缩卡具方式的模量测试, 使接触式引伸计法成为压缩模量测试的又一可行方式。

关键词: 压缩试验; 复合材料; 应变测试; 等效替代; 试验装置

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)07-0124-07

Equivalent alternative test method for compressive strain of composite

YANG Gang¹, LI Shaoliang², LIN Xiaofeng¹, WANG Feng¹, WANG Xueming¹(1. Composite Test Technology Center, AVIC Composite Corporation LTD, Beijing 101300, China;
2. The 6th Military Representative Office of Air Installation in Beijing, Beijing 101300, China)

Abstract : ASTM D6641/D6641M-16 is one of the more widely used standard test methods for the compression properties of resin matrix composites. Due to the traditional strain gauge method has the problem that different types of adhesives need to be selected in different use environments and the strain gauge paste is greatly affected by the paste process, the strain test in the high-temperature and wet environment is always a difficulty in the mechanical properties test, which hinders the evaluation of the compression properties of aviation composite in harsh environments. Based on the compression test device and resistance strain gauge method recommended by ASTM D6641/D6641M-16 standard for strain measurement, the compression test device and compression fixture were optimized and improved, and the four-column compression fixture was designed to solve the defect that the sample working section was not easy to observe when the original fixture was used for strain testing. Three different strain measurement methods, including strain gauge method (using hydraulic clamping mode), contact extensometer method and non-contact video extensometer method were compared and tested, and the equivalent substitution test was completed. The results show that the optimized compression fixture has better stability, the average dispersion coefficients of compressive strength and modulus are 4.85% and 1.42% in the test of 7 different grades of laminates, respectively. At the same time, the fixture can be compatible with the non-contact video extensometer for strain testing, reducing the link of strain gauge pasting, reducing the cost of mounting and effectively reducing the test process. When the length of the working section of the sample is less than 21 mm, the hydraulic clamping mode can replace the compression clamp method of the modulus test, so that the contact extensometer method becomes another feasible way of the compression modulus test.

Keywords : compression test ; composite ; strain test ; equivalent substitution ; test apparatus

通信作者: 杨刚, 工程师, 硕士, 主要从事的研究方向为复合材料检测技术

收稿日期: 2024-04-19

引用格式: 杨刚, 李韶亮, 林晓凤, 等. 复合材料压缩应变的等效替代试验方法[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(7): 124-130.

YANG Gang, LI Shaoliang, LIN Xiaofeng, et al. Equivalent alternative test method for compressive strain of composite[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(7): 124-130.

高性能纤维增强聚合物基复合材料通常被称为纤维增强树脂基复合材料(FRP),具有轻质高强、耐腐蚀、抗冲击等优异性能,现已被航空航天、风电、建筑等行业广泛应用^[1-4]。复合材料的使用比例逐渐成为了衡量高端装备是否具有科技前沿性的重要标志之一^[5-6],因此,耐高温树脂基复合材料的开发受到国内外重视的程度不断增加,新型航天器、商用飞机以及第五代军用飞机的设计目标已经将复合材料的工作温度推向了316~538℃,甚至更高。传统的碳纤维/环氧复合材料可满足121℃以下长期使用的要求,可以短期应用于204℃高温环境中,聚酰亚胺树脂基复合材料的耐温性可达到300℃以上^[7]。同时,飞行器在服役过程中,难免会暴露于高温潮湿环境下,由于复合材料的结构特点,在高温湿热环境下容易产生湿热效应,树脂基体出现水解、断链、交联结构失效等一系列反应^[8-11],使复合材料各层之间、纤维与树脂之间甚至产生宏观的开裂、脱黏和分层现象,使材料性能退化,直接影响材料的强度、模量等各项力学性能^[12-13]。针对不同应用场景下的需求,人们不断探索新的树脂基复合材料体系,以期实现更高水平的综合性能^[14],传统的压缩测试方式已不能完全满足新材料体系的需求,需要根据测试环境提供差异化的测试方法。

FRP的压缩性能测试是力学性能中较难准确测定的项目。针对复合材料压缩性能表征,国内外形成了较多的试验方法,根据加载形式的不同,可分为3类:端部加载(ASTM D695-15, SACMA SRM 1R-1994)、剪切加载(GB/T 3856-2005, ASTM D3410/D3410M-16)、端部和剪切混合加载(ASTM D6641/D6641M-16),其中ASTM D6641/D6641M-16试验方法因具有卡具灵活、试样安装简单和结果重复性好等优点被广泛使用^[15-18]。为降低压缩过程中试样工作段的弯曲度,各试验方法均设计了相对较复杂的卡具形式,高温下操作较为困难,传统应变片法在高温下数据稳定性较差^[19],湿态试样高温应变测试对胶黏剂的性能提出较大挑战。

本研究工作的目的在于寻找一种能够与现有ASTM D6641/D6641M-16试验方法中使用应变片进行应变测试的结果等效的方式,以完成压缩模量的测试,这种方式尤其适用于高温湿态环境下的应变测试,可避免传统应变片法在不同环境需选用不同胶黏剂而现有胶黏剂种类无法满足全温度使用

要求和应变片粘贴效果过度依靠操作人员熟练度问题^[20],并且模量测试结果稳定、有效,具有方便快捷、降低成本等优点。笔者选取了几种典型复合材料层合板,进行了不同卡具、不同应变测试方式间的比对试验,为高温湿态试样压缩模量的测试提供了新途径和有益参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

试验件尺寸为140 mm×12 mm×2 mm,只进行模量测试的试样未粘贴加强片,由中航复合材料有限责任公司提供。应变片及胶黏剂(B-711)由中航电测仪器股份有限公司提供。

1.2 主要仪器及设备

电子万能试验机: INSTRON 5982, 美国INSTRON公司;

视频引伸计:LVE801C, 力试(上海)科学仪器有限公司;

应变仪:YD-28A, 上海自动化仪表有限公司。

1.3 电阻应变片的粘贴及标记点制作

用砂纸在试样工作段正反两面的粘贴区域进行打磨,去除表面杂质及不平整部位;使用纱布蘸取丙酮溶液对打磨区域进行清洁,以保证应变片粘贴牢固不易脱落,在试样粘贴位置画十字线以准确定位应变片,涂覆胶黏剂后将应变片定位,按压时间不少于30 s。

利用一种非接触式实时应变测量仪器LVE视频引伸计,使用改进后的压缩卡具进行试样表面应变的测试,以完成模量计算。试验前使用白色油漆记号笔在试样工作段正反两面适当位置画标记点,使视频引伸计识别并计算标距。

2 测试方法

目前常用的复合材料层合板压缩性能测试方法有ASTM D695-15, SACMA SRM 1R-1994, ASTM D6641/D6641M-16,由于ASTM D6641/D6641M-16试验方法在高强度复合材料层合板压缩试验中仍表现出较好的破坏模式,被广泛使用,其主要试验参数列于表1。

表1 压缩性能测试主要参数

Tab. 1 Main parameters of compression performance test

Standard test method	Size/mm	Rate/(mm·min ⁻¹)	Start and end point of strain for modulus calculation/%
ASTM D6641/D6641M-16	140×12×2	1.3	0.1~0.3

ASTM D6641/D6641M-16标准双立柱卡具(以下称卡具A)如图1所示,因两根导柱遮挡了试样工作段表面的视野,使得视频引伸计无法捕捉试样表面的标记点。为了能够将视频引伸计应用于小标距压缩试验中,将原试验标准推荐的卡具由双立柱结构改为四立柱,在增加卡具稳定性的同时充分将试样工作段表面暴露,使视频引伸计能够在应变测试过程中发挥作用,改进后四立柱压缩卡具(以下称卡具B)如图2所示。

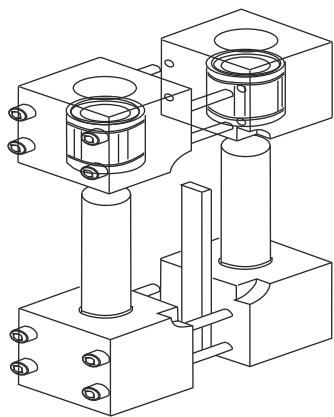


图1 双立柱压缩卡具示意图

Fig. 1 Double column compression fixture

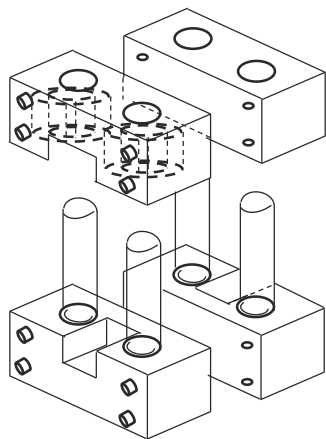


图2 四立柱压缩卡具示意图

Fig. 2 Four column compression fixture

同时,为了将接触式引伸计法测试模量的方式引入 ASTM D6641/D6641M-16 压缩测试中,通过液压夹头夹持(卡具C)的方式,如图3所示,开展了不同工作段长度对压缩模量测试结果的影响。

在0.1%~0.3%应变范围计算压缩模量,表达式如式(1)所示:

$$E_c = (P_2 - P_1) / [(e_{x_2} - e_{x_1}) \cdot (w \cdot h)] \quad (1)$$

式中: E_c 为压缩模量,单位MPa; P_1 为 e_{x_1} 处的载荷,单位N; P_2 为 e_{x_2} 处的载荷,单位N; e_{x_1} 为应变计



图3 液压夹持方式模量测试

Fig. 3 Modulus test with hydraulic clamping mode

算起点(0.1%); e_{x_2} 为应变计算终点(0.3%); w 为试样工作段宽度,单位mm; h 为试样工作段厚度,单位mm。

对于每一组测试数据,分别用式(2)~式(4)计算其平均值、标准差和离散系数。

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n \quad (2)$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) / (n-1)} \quad (3)$$

$$C_v = S_{n-1} / \bar{x} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\bar{x}$ 为样本的平均值(AVG); S_{n-1} 为样本的标准差; C_v 为样本的离散系数(CV); n 为试样数量; x_i 为测量或导出的性能值。

3 结果与分析

3.1 压缩卡具对比试验

为验证两种卡具的等效性,选择了7种牌号层合板进行压缩测试。首先,在室温条件下以标准试验操作要求分别在两种卡具中安装已粘贴应变片的试样,以1.3 mm/min的速率加载直至试样破坏,获取整个压缩过程中的应力-应变曲线,在0.1%~0.3%应变区间进行压缩模量计算。

表2是使用两种压缩卡具进行压缩强度和压缩模量测试的结果,所列压缩强度、模量数据均为6个有效试样的平均值。从表2可以看出,两种卡具的压缩强度和模量十分接近,在7种牌号层合板的测试结果中,卡具A的整体平均离散系数为5.53%(压缩强度)和1.83%(压缩模量),卡具B的平均离散系数为4.85%(压缩强度)和1.42%(压缩模量),卡具B比卡具A表现出更好的数据稳定性,从压缩强度和模量的数值看,两种卡具测试结果基本一致,卡具B比卡具A测试结果略高,将每个牌号层合板的测试

表2 不同牌号层合板压缩强度、模量数据对比
Tab. 2 Comparison of compressive strength and modulus data of different grades of laminates

Laminate	Fixture	Compressive strength			Compression modulus		
		AVG/MPa	CV/%	Overall CV/%	AVG/GPa	CV/%	Overall CV/%
EW100A/BMP316	A	384	4.51	6.69	25.1	1.16	1.13
	B	422	4.80		25.3	1.11	
ZT7H/5429	A	1 567	5.64	5.85	137	0.65	0.89
	B	1 578	6.56		137	1.15	
AC531/SW110C	A	514	3.88	3.38	27.6	2.43	1.92
	B	512	3.14		27.7	1.48	
S6W100A/AC319R	A	391	9.99	7.74	28.8	1.19	1.63
	B	390	5.63		29.1	1.88	
EW301/AC321	A	454	8.32	6.53	30.1	2.60	2.38
	B	462	4.87		30.4	2.27	
ZT7H/QY9611	A	1 579	3.74	4.34	135	2.98	2.37
	B	1 617	4.87		137	1.51	
ZT7G/LT-03A	A	1 125	2.65	3.52	136	1.81	1.28
	B	1 152	4.08		136	0.53	

结果组合,对两种卡具的测试结果不做区分,计算7种牌号层合板的平均离散系数为5.44%(压缩强度)和1.66%(压缩模量),离散系数小表明两种卡具测试结果差异性小,在进行ASTM D6641/D6641M-16压缩测试时能达到相同的效果,可进行替代使用。

3.2 不同工作段长度的压缩模量对比试验

首先进行双立柱压缩卡具与试验机液压夹头夹持方式的压缩模量测试结果差异性对比,结果列于表3。表3分别给出了两种装卡方式下测得的压缩模量平均值、离散系数以及两组数据组合后的总

离散系数,同时按标准要求对应变0.2%时的弯曲度进行了监测,每组数据使用6根试样进行压缩模量测试后取平均值,工作段长度为13 mm,材料选择基本涵盖了由低模量到高模量的材料分布。两种装卡方式的压缩模量值偏差在1%以内,应变0.2%处的弯曲度均低于8.5%,满足ASTM D6641/D6641M-16标准对弯曲度不超过10%的要求。从数据的离散性可以看出,两种方式测试结果均比较稳定,数据的离散系数不超过3.52%。表明两种装卡方式在模量测试结果上等效性。

表3 不同卡具模量测试数据对比
Tab. 3 Comparison of modulus test data of different fixtures

Laminate	Lay-up direction	Fixture	Compression modulus			
			AVG/GPa	Percent bending(0.2%)/%	CV/%	Overall CV/%
3233/CF3011/52	Warp direction	A	57.5	5.80	3.00	2.96
		C	57.4	5.00	3.20	
	Weft direction	A	54.4	8.46	3.12	2.69
		C	54.2	1.39	2.46	
1302/S6C10	0°	A	53.4	3.44	1.95	1.97
		C	53.4	6.59	2.23	
	90°	A	15.7	5.13	1.96	1.86
		C	15.6	7.14	1.82	
QW280/AC525	Warp direction	A	27.9	6.10	0.85	0.66
		C	27.9	2.77	0.52	
ACTECH1203/CCF700G	0°	A	128	1.83	3.14	3.18
		C	129	2.27	3.52	

考虑到接触式引伸计安装需要的空间,工作段长度13 mm仍然较小。为了验证增加工作段长度对压缩模量的影响规律,选择3个工作段长度点位(13, 17, 21 mm),使用液压夹持方式进行模量对比试验,每个牌号使用同1根试样重新夹持后多次进行测试,每个长度变量测试6次,结果列于表4。

不同工作段长度的选取,对试样压缩模量的影响较小,3组不同工作段长度得到的压缩模量数据组合,总体离散系数不超过0.73%,展现出了很好的稳定性,表明工作段长度在13~21 mm范围内的增加对压缩模量测试影响较小,可以忽略差异,20 mm的工作段长度已足以安装接触式引伸计。同时,从

表 4 不同工作段长度压缩模量测试结果

Tab. 4 Compression modulus test results of different working segment lengths

Laminate	Working segment length/mm	Compression modulus			Percent bending(0.2%)/%	Percent bending(0.3%)/%
		AVG/GPa	CV/%	Overall CV/%		
3234/CF3052/39	13	62.89	0.15	0.26	1.17	1.33
	17	62.86	0.32		1.93	2.23
	21	62.82	0.32		1.88	2.16
BA9916-II/EW100A	13	25.12	0.29	0.25	0.36	0.49
	17	25.17	0.04		1.12	1.41
	21	25.23	0.03		1.08	1.49
CF3031/QY8911	13	69.22	0.16	0.19	0.12	0.20
	17	69.02	0.07		0.61	1.12
	21	68.97	0.02		0.19	0.75
5224/CF3052/42	13	61.40	0.18	0.14	1.16	1.54
	17	61.30	0.07		1.99	2.48
	21	61.29	0.09		2.08	2.57
AC531/EW110C	13	21.92	0.17	0.13	1.64	1.79
	17	21.89	0.03		2.05	2.42
	21	21.90	0.14		2.57	2.96
5224/U-3160/42	13	117.65	0.47	0.32	0.24	0.29
	17	117.18	0.11		1.16	1.93
	21	117.60	0.08		1.98	3.53
5228A/CCF300	13	128.24	0.28	0.73	3.13	5.71
	17	128.42	0.13		4.47	11.54
	21	130.20	0.09		6.10	32.30

弯曲度监测可以发现,虽然按照标准要求,应变在 0.2% 时的弯曲度低于 10%,但随着试样模量的增加,弯曲度呈现逐渐变大的趋势。在压缩模量的取值终点 0.3% 应变处,压缩模量在 130 GPa 左右时的试样随着工作段尺寸增加,弯曲度快速上升,表明测试长工作段试样时,液压夹持的方式并不适合压缩强度的测试,仅适用于模量测试,压缩模量超过 130 GPa 的试验需进一步验证。

3.3 不同应变测试方法的压缩模量对比试验

3.1 和 3.2 节分别论证了卡具 B 与卡具 A 的测试结果等效性、卡具 C 与卡具 A 的测试结果等效性及 13~21 mm 工作段长度的变化几乎不影响压缩模量的测试,为此节开展不同应变测试方法的压缩模量对比试验奠定了基础。

在 3.1 和 3.2 节的基础上,分别使用应变片、接触式引伸计和视频引伸计,如图 4 所示,进行了压缩

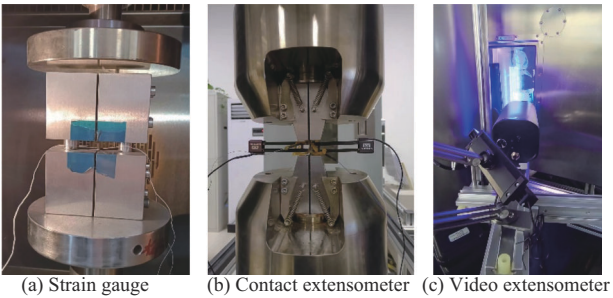


图 4 不同压缩模量测试方法

Fig. 4 Different compression modulus test methods

模量的对比测试,结果列于表 5。从测试结果的整体看,3 种测试方法所测压缩模量平均值为 126 GPa,离散系数 2.94%,数据较稳定。每种方法单独比较,视频引伸计法所测压缩模量偏低,接触式引伸计法和应变片法所测压缩模量差异较小。虽 3 种方法的弯曲度均满足标准要求,但接触式引伸计法的弯曲度相对更大一些。综合看 3 种测试方法的压缩模量测试均比较准确,数据稳定性较好。

表 5 不同应变测试方法的压缩模量对比

Tab. 5 Comparison of compression modulus between different strain testing methods

Laminate	Test method	Working segment length/mm	Compression modulus				Percent bending(0.2%)/%
			AVG/GPa	CV/%	Overall AVG/GPa	Overall CV/%	
ACTECH1203/CCF700G	Strain gauge	3.0	128	3.14	126	2.94	1.69
	Contact extensometer	12.5	127	1.26			3.67
	Video extensometer	8.2	122	0.50			0.11

4 结论

对多种复合材料层合板进行压缩模量测试,主要考虑试样的卡具类型和应变测试方法两种影响因素,结论如下。

(1)四立柱卡具与双立柱卡具在压缩强度、压缩模量测试中表现出同样的效果,验证了四立柱卡具进行 ASTM D6641/D6641M-16 压缩试验的可行性。四立柱卡具的优点是立柱对试样工作段无遮挡,可使用非接触的视频引伸计进行应变测试,而视频引伸计可在高温箱外进行应变测试,可较大程度上提高开展压缩模量测试的温度上限,虽采购成本较高,但可多次重复使用,后续使用成本低。

(2)液压夹持方式在试样工作段长度 21 mm 以下时,可代替压缩卡具的模量测试,但高模量试样会随着应变的增加,弯曲度迅速上升,因此无法准确测试压缩强度。与传统压缩卡具法相比,液压夹持方式在试样工作段长度增加的情况下仍不会影响压缩模量测试,使接触式引伸计法成为压缩模量测试的又一可行方式。同时也发现压缩模量高于 130 GPa 的试样在压缩过程中弯曲度增加较明显,不适宜采取液压夹持方式进行压缩模量测试。

(3)应变片法、接触式引伸计法和视频引伸计法均可以实现压缩模量测试,测试结果较稳定。两种改进的新测试方式有望在更加严苛的试验环境下代替原有应变片法,可减少测试周期、降低测试成本,在压缩模量测试中展现出其优异性。

参考文献

- [1] KARBHARI V M, XIAN H S. Effect of thermal exposure on carbon fiber reinforced composites used in civil infrastructure rehabilitation[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 149: DOI:10.3390/polym14142957.
- [2] 刘雪蓉,徐元铭,张卫方,等.碳纤维增强树脂基复合材料湿热老化研究进展[J]. *纤维复合材料*, 2020, 37(4):20-25.
LIU Xuerong, XU Yuanming, ZHANG Weifang, et al. Research progress of hydrothermal aging of carbon fiber reinforced resin matrix composites[J]. *Fiber Composites*, 2020, 37(4):20-25.
- [3] 李登华,林浩,崔东霞,等.碳纤维复合材料单向板耐候性及湿热老化性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2018, 36(4):535-540.
LI Denghua, LIN Hao, CUI Dongxia, et al. Weatherability and hygrothermal ageing properties of CFRP plates[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2018, 36(4):535-540.
- [4] 黄通,郭保全,栾成龙,等.薄壁内衬复合材料发射筒结构与缠绕工艺研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2019(5):12-17.
HUANG Tong, GUO Baoquan, LUAN Chenglong, et al. Research on structure design and processing technology of thin-walled liner composite material barrel[J]. *Journal of FRP/Composites*, 2019(5): 12-17.
- [5] PRASHANTH S, SUBBAYA K M, NITHIN K, et al. Fiber reinforced composites-a review[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 6(3):2-6.
- [6] 周翔,马占东,国凯,等.复合材料高温力学性能自动化测试关键技术研究及系统设计[J]. *纤维复合材料*, 2023, 40(3):49-58.
ZHOU Xiang, MA Zhandong, GUO Kai, et al. Research on key technologies and system design of automatic testing of high temperature mechanical properties of composite materials[J]. *Fiber Composites*, 2023, 40(3):49-58.
- [7] 刘金刚,沈登雄,杨士勇.国外耐高温聚合物基复合材料基体树脂研究与应用进展[J]. *宇航材料工艺*, 2013, 43(4):8-13.
LIU Jingang, SHEN Dengxiong, YANG Shiyong. Recent research and development of matrix resins for high temperature polymer composites[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2013, 43(4): 8-13.
- [8] 牛一凡,李璋琪,朱晓峰.全湿热场下碳纤维/环氧树脂复合材料层间剪切强度[J]. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(4):113-120.
NIU Yifan, LI Zhangqi, ZHU Xiaofeng. Interlaminar shear strength of carbon fiber/epoxy composites under hygrothermal conditions [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2021, 37(4): 113-120.
- [9] 南田田,赵亮,孟玲宇,等.湿-热-载荷共同作用下碳纤维增强环氧树脂基复合材料老化性能研究[J]. *纤维复合材料*, 2020, 37(1): 21-27, 61.
NAN Tiantian, ZHAO Liang, MENG Lingyu, et al. Study on the aging performances of carbon fiber reinforced plastic composite under hygrothermal environment and loading[J]. *Fiber Composites*, 2020, 37(1):21-27, 61.
- [10] 邹在平,孟兵,何文佩,等.不同水环境下碳纤维增强 EP 复合材料的吸湿老化[J]. *工程塑料应用*, 2019, 47(9):116-120, 143.
ZOU Zaiping, MENG Bing, HE Wenpei, et al. Hygroscopic aging of carbon fiber reinforced ep resin composites in different water environment[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(9): 116-120, 143.
- [11] FAN C, SHAN Z, ZOU G, et al. Interfacial bonding mechanism and mechanical performance of continuous fiber reinforced composites in additive manufacturing[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34(1):1-11.
- [12] 樊俊铃,马国庆,焦婷,等.温度和湿度对碳纤维增强复合材料老化影响研究综述[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(9):1-13.
FAN Junling, MA Guoqing, JIAO Ting, et al. Review on the effects of temperature and moisture on the aging of carbon fiber reinforced polymers[J]. *Aeronautical Science & Technology*,

- 2023, 34(9):1-13.
- [13] 邓建华, 陈晨, 李鸣杰, 等. 湿热环境对复合材料螺栓连接结构拉伸性能的影响[J]. 合成纤维, 2023, 52(9):79-82.
- DENG Jianhua, CHEN Chen, LI Mingjie, et al. Effects of hygro-thermal environments on the tensile properties of composites bolted structures[J]. Synthetic Fiber in China, 2023, 52(9):79-82.
- [14] 谷雨. 碳纤维增强聚合物复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. 冶金与材料, 2023, 43(7):118-120.
- GU Yu. Research progress of carbon fiber reinforced polymer composites in aerospace field[J]. Metallurgy and materials, 2023, 43(7):118-120.
- [15] 薛继佳, 马少华. 聚合物基复合材料压缩试验方法研究[J]. 价值工程, 2018, 37(24):122-124.
- XUE Jijia, MA Shaohua. Research on compression test method of polymer matrix composites[J]. Value Engineering, 2018, 37(24):122-124.
- [16] 魏宏艳, 杨胜春, 沈真, 等. 复合材料压缩试验方法的对比分析与研究[C]//中国力学学会. 第十五届全国复合材料学术会议论文集(下册). 中国飞机强度研究所, 2008:5.
- WEI Hongyan, YANG Shengchun, SHEN Zhen, et al. Research on methods for determining the compressive properties of composite materials[C]//Chinese Society of Mechanics. Proceedings of the 15th National Conference on Composite Materials (Part II). Aircraft Strength Research Institute of China, 2008:5.
- [17] 杨国腾, 侯丽华, 于艳华. 复合材料压缩性能试验方法分析[C]//航空工业测控技术发展中心, 中国航空学会测试技术专业委员会, 《测控技术》杂志社. 2014航空试验测试技术学术交流会议文集. 中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司理化测试中心, 2014:3.
- YANG Guoteng, HOU Lihua, YU Yanhua. Research on the test method of compressing properties of composite materials[C]//Measurement & Control Technology. Proceedings of the 2014 Aeronautical Test and Testing Technology Academic Exchange Conference. AVIC Shenyang Aircraft Corporation, 2014:3.
- [18] 黄光启, 杨胜春. 先进复合材料力学性能表征与测试技术研究[J]. 工程与试验, 2018, 58(4):12-18.
- HUANG Guangqi, YANG Shengchun. Research on mechanical property characterization and test technology of advanced composite materials[J]. Engineering & Test, 2018, 58(4):12-18.
- [19] 魏雅斐, 孙颖, 丁许, 等. 高性能纤维编织绳应变测试方法研究进展[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(1):8-15.
- WEI Yafei, SUN Ying, DING Xu, et al. Research progress on the strain measurement methods of high performance fiber braided ropes[J]. Technical Textiles, 2021, 39(1):8-15.
- [20] 阎君, 王智勇, 谭志勇. 复合材料热结构高温应变测量技术发展现状与途径[J]. 导弹与航天运载技术, 2022(6):8-15.
- YAN Jun, WANG Zhiyong, TAN Zhiyong. Development status and approaches of high-temperature strain measurement technology for thermal structure of composite materials[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(6):8-15.
- ~~~~~
- (上接第100页)
- [14] 相宁, 葛勇, 张晓雯, 等. 熔体温度对注射成型热塑性聚氨酯之间残余应力及外形精度的影响[J]. 材料工程, 2022, 50(3):148-156.
- XIANG Ning, GE Yong, ZHANG Xiaowen, et al. Influence of melt temperature on residual stress and shape accuracy of injection molded thermoplastic polyurethane part[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(3):148-156.
- [15] 董金虎. 基于CAE技术大型注塑件浇注系统的设计[J]. 塑料科技, 2011, 39(8):77-80.
- DONG Jinhua. Design of gating system for large injection plastic parts based on CAE technology[J]. Plastics Science and Technology, 2011, 39(8):77-80.
- [16] 卞宁. 工艺参数对微注塑制品形态结构的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.
- BIAN Ning. Influence of processing parameters on morphology and micro structure of micro injection molded parts[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.