

2.5 维机织复合材料的纬向力学性能试验

赵 哲^{1,2}, 温卫东^{1,2}, 宋 健^{1,2}, 王柱成^{1,2}

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 通过室温(20℃)及高温(180℃)静态拉伸及拉-拉疲劳试验,获得了 2.5 维树脂基机织复合材料在不同温度下的力学性能及拉-拉疲劳寿命。基于宏观试验,探讨了材料在静载及拉-拉疲劳载荷作用下的破坏模式和失效机理,对比了材料在疲劳载荷作用后的剩余强度与静强度的关系,之后分析了温度对材料静态力学性能及疲劳寿命的影响。结果表明:在 20~180℃温度范围内材料的纬向模量对温度不敏感,但纬向强度及疲劳寿命随温度的升高而显著下降。在高温高应力水平(高于 80%静强度)下材料的纬向疲劳寿命非常短(小于 10^4 次循环),但当应力水平仅下降 2%后,材料的纬向疲劳寿命趋于 10^6 次循环。另外,高温下材料的剩余强度大于高温静强度。

关 键 词: 2.5 维机织复合材料; 高温; 静态拉伸试验; 疲劳试验; 剩余强度试验; 失效机理

中图分类号: V258; TB332

文献标志码: A

Test of the weft mechanical properties of 2.5D woven composites

ZHAO Zhe^{1,2}, WEN Weidong^{1,2}, SONG Jian^{1,2}, WANG Zhucheng^{1,2}

- (1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The mechanical properties and tension-tension fatigue life of 2.5D resin base woven composites at various temperatures, including room temperature (20℃) and high-temperature (180℃), were obtained by static tensile and tension-tension fatigue tests. Based on macroscopic tests, the damage modes and failure mechanism of the materials subjecting to static tensile and tension-tension fatigue loadings were discussed. Meanwhile, the relationship between residual strength and static strength was compared, and the influence of temperature on the static tensile and fatigue life was then analyzed. The results show that the weft modulus is not sensitive to temperature, ranging from 20℃ to 180℃, but the weft strength and fatigue life have a downward trend with the temperature increase. The weft fa-

收稿日期: 2016-04-10

基金项目: 江苏省研究生培养创新工程基金(KYLX_0237); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 赵哲(1990—),男,硕士生,主要从事先进材料与结构设计方面研究。

通讯作者: 宋健(1988—),男,博士生,主要从事先进材料与结构设计方面研究。

引用格式: 赵哲,温卫东,宋健,等. 2.5 维机织复合材料的纬向力学性能试验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11): 2729-2736. ZHAO Zhe, WEN Weidong, SONG Jian, et al. Test of the weft mechanical properties of 2.5D woven composites[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 2729-2736.

tigue life experiences a quite short cycle (less than 10^4 cycles) prior to the ultimate failure at high temperature and high stress level (higher than 80% static strength), however, the corresponding life tends to be 10^6 cycles when the stress level declines by only 2%. Additionally, the elevated residual strength is higher than the static strength tested at the same temperature.

Key words: 2.5D woven composites; elevated temperature; static tensile test; fatigue test; residual strength test; failure mechanism

2.5 维树脂基机织复合材料作为一种轻质新型、高性能材料^[1],其比刚度、强度及疲劳寿命等力学性能研究是材料应用的重要基础。但由于 2.5 维机织复合材料细观结构较为复杂且结构形式出现较晚带来的合成工艺不成熟等问题,给材料的力学性能分析及预测带来了困难。目前,主要的研究集中在室温基本力学性能(强度及刚度)的研究,然而对于材料疲劳问题的研究还处于起步阶段。另外,由于许多树脂基复合材料结构(如航空发动机机匣、压气机叶片等)正逐步应用于较高温度环境下($100\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$),要求树脂基复合材料具有一定程度的抗高温性能,但由于高温工艺不成熟及加工成本十分昂贵,导致了树脂基复合材料在高温下力学性能的研究非常有限,对于 2.5 维树脂基机织复合材料在高温下的力学性能的基本研究处于空白阶段。

对于室温下 2.5 维机织复合材料的试验研究工作,国内外学者都给予了高度的关注。郑君等^[2-3]、燕瑛等^[4]、王新峰等^[5]、董伟锋等^[6]及杨振宇等^[7]分别对 2.5 维树脂基机织复合材料进行了室温静态试验,获得了材料的经向、纬向模量及强度等基本力学性能,之后分别采用取向平均法^[2-4]、有限元法^[5-6]和综合两种方法^[7]对此材料进行了刚度预测。Lu 等^[8]对 2.5 维机织复合材料的拉伸应力-应变进行了室温下的模拟,并预测了材料的偏轴拉伸性能。卢子兴等^[9]对 2.5 维树脂基机织复合材料进行了室温静态压缩试验,获得了材料在拉伸和压缩载荷作用下的力学响应和损伤行为。John 等^[10]通过观察试件断口微观结构,分析研究了室温下 2.5 维碳纤维树脂基编织复合材料损伤机理。邱睿^[11]、单宏伟等^[12]研究了 2.5 维机织复合材料在室温下的拉-拉疲劳性能,并采用有限元法对此材料室温疲劳寿命进行了预测。

对于高温下 2.5 维树脂基机织复合材料的试验研究,目前国内鲜见报道,但国外学者针对二维树脂基编织复合材料进行了有限的试验研究。

Selezneva 等^[13]通过试验方法研究了室温及高温($150\text{ }^{\circ}\text{C}$)下二维树脂基编织复合材料偏轴拉伸行为,试验发现在静载断裂前材料出现明显紧缩现象。Vieille 等^[14]研究了两类二维树脂基(热固性及热塑性树脂)编织复合材料在室温及 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的静载力学性能,并分析了温度对两类树脂基体延展性的影响。Khan 等^[15]对二维树脂基编织复合材料在室温及高温($150\text{ }^{\circ}\text{C}$)环境下的疲劳损伤机理进行了研究,试验发现疲劳载荷与环境温度对复合材料的疲劳寿命产生很大影响。Montesano 等^[16-17]研究了二维树脂基编织复合材料在室温及高温下的疲劳问题,并提出了考虑温度下该材料剩余刚度模型。

以上研究工作主要涉及到 2.5 维树脂基机织复合材料室温力学性能和二维树脂基编织复合材料在高温下的性能研究,而针对 2.5 维树脂基机织复合材料在高温下纬向相关力学性能的研究文献报道鲜见报道。

本文重点研究 2.5 维碳纤维增强树脂基机织复合材料浅交弯联结结构在室温及高温($180\text{ }^{\circ}\text{C}$)下纬向静态拉伸力学行为及拉-拉疲劳相关问题(疲劳寿命、剩余强度)。通过试验及断口显微观察方法,深入研究温度对材料纬向力学性能、疲劳寿命及剩余强度的影响并探究相应的失效机理。所得结论为此材料理论研究奠定基础,并为此材料在工业领域的应用提供基础数据。

1 试验材料及方法

2.5 维机织复合材料作为一种新型的纺织复合材料结构,以机织工艺为基础,通过经纱束将上、下层平直排布的纬纱束相连,其具体结构见图 1 所示。纤维布材料采用 T300-3K 碳纤维,基体材料为 QY8911-IV(玻璃化温度为 $256\text{ }^{\circ}\text{C}$)。本文材料采用 6 层纬纱,通过 RTM(resin transfer molding)工艺(成型过程见图 2 所示)得到,材料的纤维体积分数约为 51.62%。所有试件由天津工业大学编织,航空材料研究所负责制造,试件尺寸见图 1 所示。

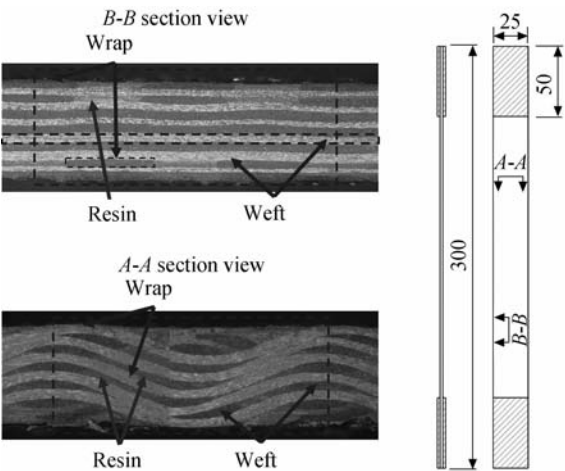


图 1 2.5 维机织复合材料示意图及内部结构显微结构图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram and internal microstructure photograph of 2.5D woven composites (unit:mm)

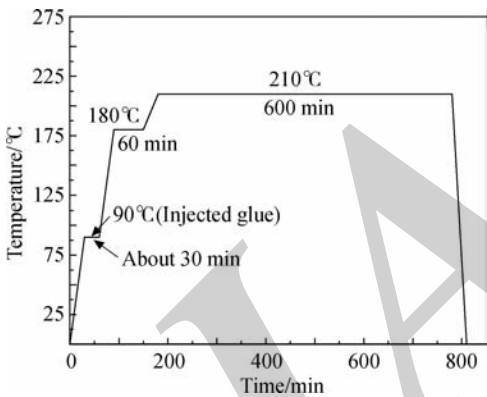


图 2 试件成型工艺过程

Fig.2 Curing process of specimens

所有试验均在 MTS809 高温拉扭试验机上完成。此试验机自带一套高温试验系统,其中高温引伸计型号为 MTS-634-25,高温炉采用 K 型热电偶且炉膛内温度误差在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围内。试验设备见图 3、图 4 所示。

由于目前尚无统一的机织复合材料试验规范及测试标准,因此试验均参照层合复合材料,即对于静态拉伸试验,参考 ASTM D3039 标准,按 1 mm/min 加载速率拉伸至试验件断裂,通过上端夹紧试验件后按 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 温升速率将炉内温度升至目标温度,保温 30 min,随后用力控制方式,在“零”状态下夹紧试验件并装夹高温引伸计。对于拉-拉疲劳试验,参考 ASTM D3479 标准,试验采用正弦波,加载频率为 10 Hz,应力比为 0.1,通

过高温炉内温度升至目标温度,然后采用力控制方式,在“零”力状态下夹紧试验件并装夹高温引伸计,来完成不同温度的拉-拉疲劳试验。

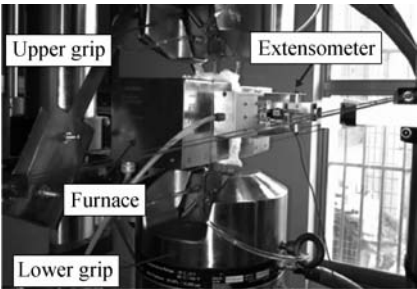


图 3 MTS809 试验机

Fig.3 MTS-809 test machine

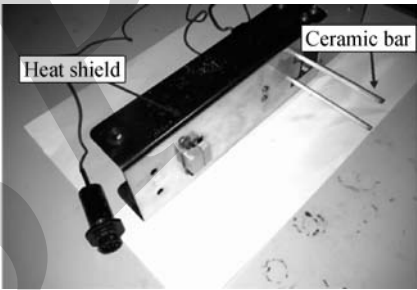


图 4 MTS-634-25 引伸计

Fig.4 MTS-634-25 extensometer

2 结果与讨论

2.1 纬向静态力学性能

图 5 给出了室温及高温(180°C)下典型 2.5 维机织复合材料试件的纬向静拉伸应力-应变曲线。从图 5 可以看出室温纬向应力-应变行为呈双线性行为,而高温应力-应变行为具有线性特征,另外,室温及高温下的应力-应变曲线均表现为瞬间失效。

表 1 给出了室温及高温下纬向静拉伸试验结果。因表 1 所示数据的离散性均小于 10%,可认为测试数据有效。结果表明:高温下材料的纬向平均模量明显低于室温情况,降幅为 22.544%,然而相对室温强度,高温下材料的纬向强度基本不变。

图 6 给出了 2.5 维机织复合材料纬向拉伸断口宏观及细观照片。从宏观角度来看,室温及高温纬向拉伸断口比较相似,断口均比较平整,说明试件具有脆性断口特征。另外,高温下,材料的表面及断口处未见明显树脂失效,说明该热固性树脂在 180°C 下仍可正常使用。从细观角度来看图

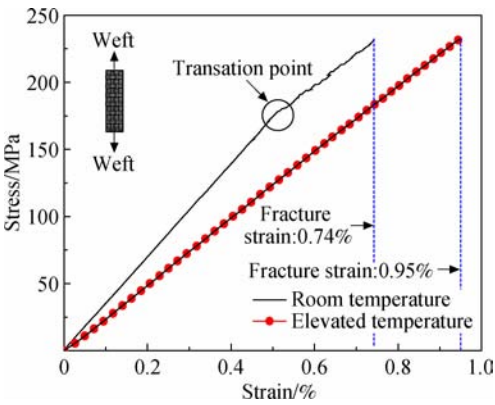


图 5 室温及高温下应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves at room temperature and elevated temperature

6(b)和图 6(e),断裂部位均表现为纬纱束纵向断裂、经纱束横向断裂形貌。在 100 倍放大倍数下观察(图 6(c)和图 6(f)),经纱横向劈断面比较光滑且可以明显看出大量纬纱束断裂,这反映出在纬向载荷作用下,材料表现为脆性断裂失效。

表 1 室温及高温下 2.5 维机织复合材料静拉伸试验结果

Table 1 Test results of 2.5D woven composites subjecting to static tensile loading at room temperature and elevated temperature

试件 序号	温度/℃	模量/GPa	平均 模量/GPa	离散 系数/%	破坏 荷载/kN	强度/MPa	平均 强度/MPa	离散 系数/%
S1	20	29.670	32.296	7.936	12.82	246.860	237.573	3.472
S2		32.428			11.59	234.765		
S3		34.791			11.74	231.094		
S4		24.879			12.08	232.361		
S5	180	26.164	25.015	4.345	12.49	232.471	236.652	3.100
S6		24.003			12.69	245.123		

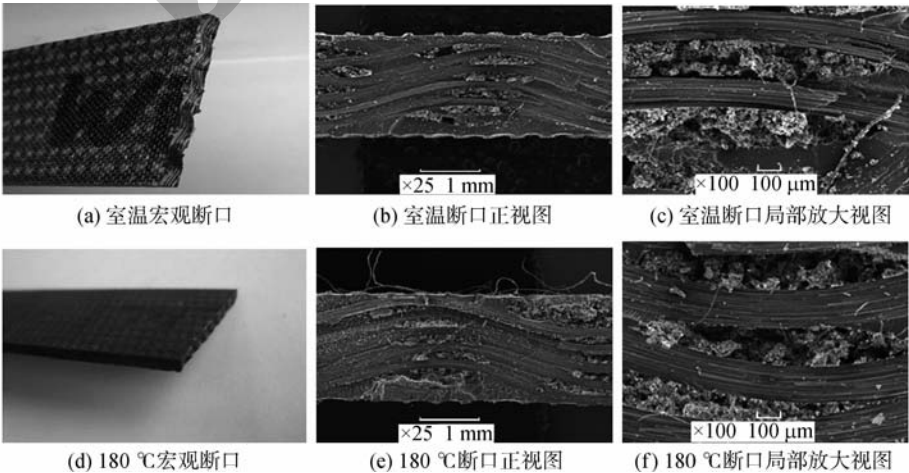


图 6 室温及高温下静载试件断口形貌

Fig. 6 Fracture morphologies of the static tensile specimens tested at room temperature and elevated temperature

2.2 纬向拉-拉疲劳性能

在室温及高温(180 °C)下,本文分别对 20 件 2.5 维树脂基机织复合材料进行纬向拉-拉疲劳试验,相应的结果见表 2、表 3 及图 7 所示。

从图 7 中可看出,室温下材料的 $\sigma_{\max}/\sigma_u \sim \lg N_f$ 曲线呈现弱非线性下降趋势,其中 $\sigma_{\max}$ 为疲劳试验最大应力, σ_b 为静强度, N_f 为疲劳寿命,但高温(180 °C)下该曲线则呈线性下降趋势。室温环境下,材料的经向拉-拉疲劳寿命随应力水平的减小而增加,在 82% σ_u 应力水平下,寿命达 2583 次循环,但当应力水平下降 2% σ_u (80% σ_u)后,材料的寿命则达到 10⁶ 次循环;在高温环境下,拉-拉疲劳应力水平在 79% σ_u 以上时,材料的平均疲劳寿命仅为 632 次循环,但当应力水平低于 78% σ_u 后,材料的纬向拉-拉疲劳寿命达 10⁶ 次循环。另外,从表 2、表 3 及图 7 可知,室温及高温(180 °C)环境下 2.5 维机织复合材料纬向拉-拉疲劳强度相近,分别为 80% $\sigma_{u, t=20^\circ\text{C}}$ 和 78% $\sigma_{u, t=180^\circ\text{C}}$,由此可见材料纬向疲劳强度对温度不敏感。

表 2 室温下 2.5 维机织复合材料纬向拉-拉疲劳

Table 2 Test results of 2.5D woven composites subjected to weft tension-tension fatigue loading at room temperature

No.	应力水平	最大应力/MPa	最小应力/MPa	疲劳寿命/次循环	平均疲劳寿命/次循环
F1	93% σ_u	220.94	22.09	215	198
F2				180	
F3				335	
F4				320	
F5				570	
F6	85% σ_u	201.94	20.19	1321	2583
F7				5858	
F8				10 ⁶ *	
F9	79% σ_u	187.68	18.77	10 ⁶ *	10 ⁶ *

注:带 * 的数据是由于试件已经超过预定的循环数极限而终止试验。

表 3 高温下 2.5 维机织复合材料纬向拉-拉疲劳

Table 3 Test results of 2.5D woven composites subjected to weft tension-tension fatigue loading at elevated temperature

No.	应力水平	最大应力/MPa	最小应力/MPa	疲劳寿命/次循环	平均疲劳寿命/次循环
F10	93% σ_u	220.09	22.01	164	179
F11				193	
F12				490	
F13				330	
F14	84% σ_u	198.79	19.88	764	410
F15				500	
F16				10 ⁶ *	
F17	79% σ_u	186.96	18.70	500	632
F18	78% σ_u	184.56	18.46	10 ⁶ *	10 ⁶ *
F19	77% σ_u	182.22	18.22	10 ⁶ *	10 ⁶ *
F19	75% σ_u	177.49	17.75	10 ⁶ *	10 ⁶ *

注:带 * 的数据是由于试件已经超过预定的循环数极限而终止试验。

图 8 给出了 2.5 维机织复合材料纬向拉-拉疲劳断口宏观及细观断口照片。从图 8 中可以明显看出,在纬向疲劳载荷作用下,断口处存在大量的纬纱束整束断裂损伤,且纬纱束拔出的长度较相应温度下静载断口处纬纱拔出长度长(图 8(b)、图 8(e))。比较图 8(a)和图 8(d)所示断口形貌,可以发现高温下的损伤程度要大于室温情况,即:纬纱束拔出长度更大、树脂破坏程度更严重。进一步观察图 8(b)、图 8(c)和图 8(e)、图 8(f)可知,高温纬向疲劳断口处纬纱束内部损伤较室温情况严重,即高温疲劳载荷下纬纱内部存在大面积的分层及纤维拔出损伤,这些损伤说明温度会对纬向疲劳性能产生一定程度的影响。

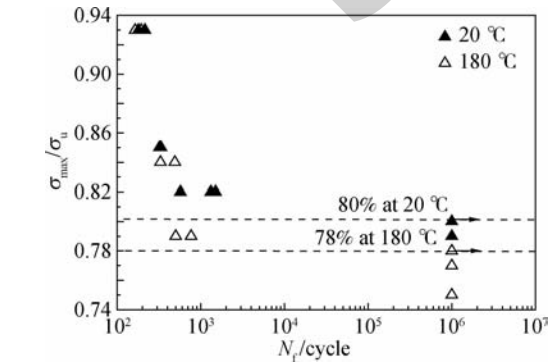


图 7 室温及高温下正则化应力-疲劳寿命

Fig. 7 Normalized stress-fatigue life at room temperature and elevated temperature

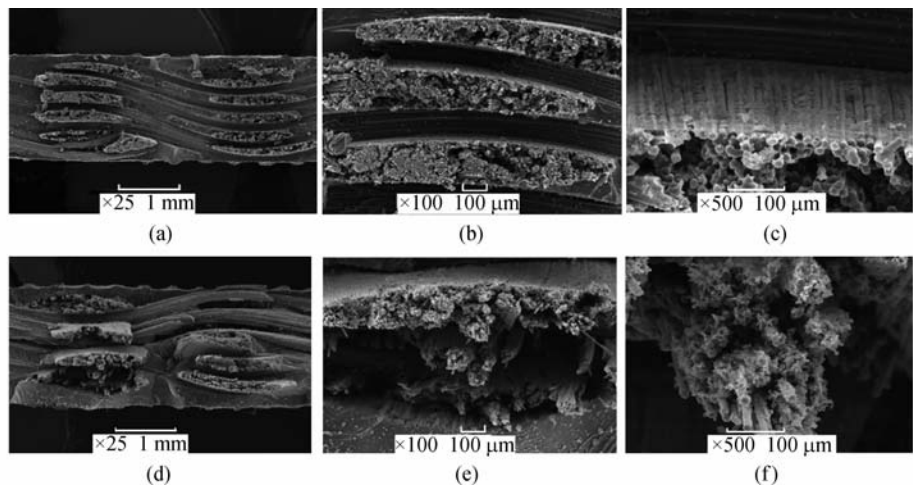


图 8 室温及高温下疲劳试件断口形貌

Fig. 8 Fracture morphologies of the fatigued specimens tested at room temperature and elevated temperature

2.3 纬向拉-拉疲劳后剩余强度

一些学者^[18-20]在对三维编织复合材料剩余强度的研究中发现:室温下材料经疲劳载荷作用后的剩余强度会高于室温静强度,即剩余强度出现反常现象。为探究 2.5 维机织复合材料的疲劳特性,本文又开展了 2.5 维机织复合材料剩余强度研究。所有剩余强度的试验件均为在 $80\% \sigma_u$ 应力水平下经历 10^6 次循环后的试件。

图 9 给出了室温及高温(180 ℃)下剩余强度与静强度对比图。从图中可以看出,材料经过 10^6 次循环后的剩余强度均大于同温度下的原始静强度,这表明 2.5 维机织复合材料在室温及高温下的剩余强度特性同样存在强度升高的反常现象。

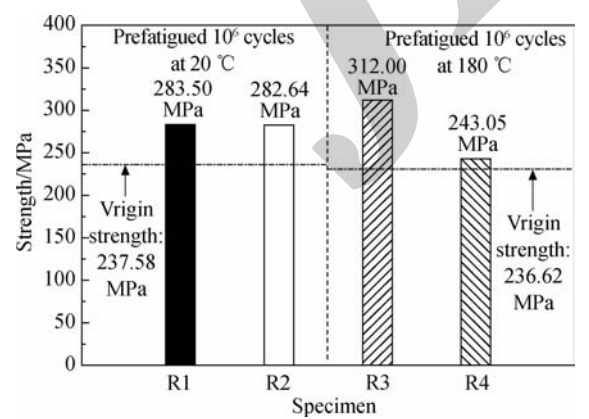


图 9 室温及高温下静强度与剩余强度对比结果

Fig. 9 Comparison of test results between static strength and residual strength at room temperature and elevated temperature

2.4 讨 论

2.5 维机织复合材料在室温下的应力-应变

曲线出现明显的拐点而在高温下则表现出非线性特征(图 5),本文认为造成此现象的直接原因是温度对树脂基体及纤维-基体界面产生的影响,即高温增加了树脂的延展性,且使界面强度降低。在室温情况,由于纬纱束与加载方向平行、经纱束与加载方向垂直,且纤维束横向强度要明显弱于纵向强度,因此,当载荷增大到某一值时,经纱束将首先出现横向基体开裂损失,导致结构承载能力下降,即室温应力-应变曲线出现“拐点”;由于纬向加载过程中,纬纱束为主要承载单元,因此,在后续载荷增大过程中,室温应力-应变曲线仍然保持直线增长直至材料纬向失效。郑君等^[3]在研究室温下 2.5 维树脂基机织复合材料纬向力学行为时同样观察到应力-应变曲线存在“拐点”。但在高温下,树脂基体的延展性增加(图 5 断裂应变可以证明),导致了在纬向载荷逐渐增大的过程中,能量逐渐被释放,因此不会出现“拐点”,应力-应变行为表现为线性。另外,通过高温静载断口(图 6)可知,断口比较平整,且无明显分层、散束损伤,因此证明了高温应力-应变曲线的线性程度不明显。

针对纬向拉-拉疲劳行为(图 7 所示),即:在大载荷水平下(室温应力水平为 $80\% \sigma_u$,高温应力水平为 $78\% \sigma_u$),材料的纬向疲劳寿命仅 10^3 次循环左右,而仅仅下降 $1\% \sim 2\% \sigma_u$ 应力水平后,材料的疲劳寿命达 10^6 次循环,本文中造成此现象的原因是两种机理对抗的结果。一种机理为“疲劳损伤”机理;另一种为“纤维束剪切旋转变形”机理,其中,对于“纤维束剪切旋转变形”机理而言,Montesano 等^[16-17]在研究二维树脂基编织

复合材料高温偏轴拉-拉疲劳时,通过断口观察已经证明了该机理的存在。对于本文研究材料,在较大载荷下以“疲劳损伤”机理为主导,使得在若干个循环数下材料即发生纬向疲劳失效;在较低载荷下,由图 9 可知,材料的剩余强度大于原始的静强度,说明在控制应力的疲劳加载过程中,纬纱束沿纬向性能逐渐被加强,在疲劳过程中不会发生明显纬纱束纵向断裂失效,使得材料纬向疲劳趋于无限寿命(10^6 次循环),因此,出现了图 7 所示的材料纬向疲劳寿命突增的现象。另外,在纬向拉-拉疲劳过程中,纬纱束沿纬向性能增强的可能原因是纬纱束在拉伸和剪切载荷作用下沿纬向发生一定程度的偏轴,即“纤维束剪切旋转变形”,这种“纤维束剪切旋转变形”机理还可以通过疲劳断口证明,即纤维的拔出长度要远大于相同温度下静态断口。

3 结 论

本文通过试验方法对 2.5 维树脂基机织复合材料在室温及高温下的纬向静态力学行为及疲劳特性进行了深入研究,得到了如下结论:

1) 2.5 维机织复合材料在室温下的静拉伸应力-应变曲线呈双线性,而高温应力-应变曲线呈线性,且材料在室温及高温静态拉伸下均表现为脆性破坏特征。

2) 在室温及高温下,材料的纬向拉伸模量显著下降,相对室温情况降幅达 22.544%,但材料在高温下的强度与室温相当。温度对材料纬向强度的影响很小。

3) 就室温及高温下的拉-拉疲劳寿命而言,材料的疲劳强度相近。在“疲劳损伤”机理与“纤维束剪切旋转变形”机理共同作用下,材料的疲劳寿命在较大应力水平下很小,当载荷降低到某一拐点后,疲劳寿命则趋于无限。

4) 在室温及高温下,材料的剩余强度高于相同温度下的静强度。

另外,本文试验研究结果表明:在 20~180℃ 下,当取材料强度安全系数为 78% 以下时,在静态失效前,材料不会发生疲劳失效(室温应力水平为 $80\% \sigma_u$;高温应力水平为 $78\% \sigma_u$)。此结论将有助于该材料在高温环境下的航空发动机等领域进一步应用。

参考文献:

[1] 蒋云,朱建勋,张建钟,等. 2.5 维编织结构纤维体积含量

的数值计算[J]. 纤维复合材料,2003,20(2):7-8.

JIANG Yun,ZHU Jianxun,ZHANG Jianzhong,et al. The numeral calculation of fiber volume percentage in 2.5D structure[J]. Fiber Composites,2003,20(2):7-8. (in Chinese)

[2] 郑君,温卫东,崔海涛,等. 2.5 维机织结构复合材料的几何模型[J]. 复合材料学报,2008,25(2):143-148.

ZHENG Jun,WEN Weidong,CUI Haitao,et al. Geometric model of 2.5 dimensional woven structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2008,25(2):143-148. (in Chinese)

[3] 郑君,温卫东,崔海涛,等. 2.5 维机织结构复合材料的弹性性能预测[J]. 航空动力学报,2008,23(11):2031-2035.

ZHENG Jun,WEN Weidong,CUI Haitao,et al. Elastic property prediction of 2.5 dimensional woven structure [J]. Journal of Aerospace Power. 2008, 23 (11): 2031-2035. (in Chinese)

[4] 燕瑛,成传贤. 基于细观结构的三维机织复合材料弹性性能分析[J]. 航空学报,1999,20(4):289-294.

YAN Ying,CHENG Chuanxian. Analysis of elastic property for 3-D woven composites based on fabric microstructure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,1999,20 (4):289-294. (in Chinese)

[5] WANG X F,WANG X W,ZHOU G M. Multi-scale analyses of 3D woven composite based on periodicity boundary conditions[J]. Journal of Composite Materials, 2006, 41 (14):1773-1788.

[6] 董伟锋,肖军,李勇,等. 2.5 维编织复合材料弹性性能的理论研究[J]. 南京航空航天大学学报,2005,37(5):659-663.

DONG Weifeng,XIAO Jun,LI Yong,et al. Theoretical study on elastic properties of 2.5D braided composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2005,37(5):659-663. (in Chinese)

[7] 杨振宇,俸翔,苏洲,等. 2.5D 编织复合材料细观结构及弹性性能[J]. 宇航材料工艺,2010,40(2):67-71.

YANG Zhenyu,FENG Xiang,SU Zhou,et al. Meso-structure and elastic properties of 2.5D braided composites[J]. Aerospace Materials and Technology,2010,40(2):67-71. (in Chinese)

[8] LU Z X,ZHOU Y,YANG Z,et al. Multi-scale finite element analysis of 2.5D woven fabric composites under on-axis and off-axis tension[J]. Computational Materials Science,2013,79:485-494.

[9] 卢子兴,周原,冯志海,等. 2.5D 机织复合材料压缩性能实验与数值模拟[J]. 复合材料学报,2015,32(1):150-159.

LU Zixing,ZHOU Yuan,FENG Zhihai,et al. Experiment and numerical simulation on compressive properties of 2.5D woven fabric composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2015,32(1):150-159. (in Chinese)

[10] JOHN S,HERSZBERG I,COMAN F. Longitudinal and transverse damage taxonomy in woven composite components[J]. Composites Part B: Engineering, 2001, 32(8): 659-668.

[11] 邱睿. 2.5 维编织复合材料疲劳寿命预测模型与分析方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
QIU Rui. Research on fatigue life prediction and damage analysis of 2.5D woven composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2014. (in Chinese)

[12] 单宏伟,周光明. 2.5 维机织复合材料疲劳寿命预测[J]. 玻璃纤维,2015(5):1-5.
SHAN Hongwei,ZHOU Guangming. Fatigue life prediction for 2.5D woven composites[J]. Fiber Glass,2015(5):1-5. (in Chinese)

[13] SELEZNEVA M, MONTESANO J, FAWAZ Z, et al. Microscale experimental investigation of failure mechanisms in off-axis woven laminates at elevated temperatures[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011,42(11):1756-1763.

[14] VIEILLE B, TALEB L. About the influence of temperature and matrix ductility on the behavior of carbon wovenly PPS or epoxy laminates; notched and unnotched laminates[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(7):998-1007.

[15] KHAN R, KHAN Z, AL-SULAIMAN F, et al. Fatigue life estimates in woven carbon fabric/epoxy composites at non-ambient temperatures[J]. Journal of Composite Materials, 2002,36(22):2517-2535.

[16] MONTESANO J, FAWAZ Z, BEHDINAN K, et al. Fatigue damage characterization and modeling of a triaxially braided polymer matrix composite at elevated temperatures[J]. Composite Structures,2013,101(15):129-137.

[17] MONTESANO J, FAWAZ Z, POON C, et al. A microscopic investigation of failure mechanisms in a triaxially braided polyimide composite at room and elevated temperatures[J]. Materials and Design,2014,53(1):1026-1036.

[18] TANABE Y, YOSHIMURA T, WATANABE T, et al. Fatigue of C/C composites in bending and in shear modes [J]. Carbon,2004,42(8):1665-1670.

[19] MAHFUZ H, MANIRUZZAMAN M, KRISHNAGOPALAN J, et al. Effects of stress ratio on fatigue life of carbon-carbon composites[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,1995,24(1):21-31.

[20] OZTURK A, MOORE R E. Tensile fatigue behaviour of tightly woven carbon/carbon composites[J]. Composites, 1992,23(1):39-46.

(编辑:陈 越)