

文章编号: 1001-4888(2010)03-0227-07

T300/AG80 复合材料高温拉伸性能实验研究*

陈众迎¹, 龙连春¹, 路志峰², 阳志光²

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 在 CSS 电子万能实验机上, 采用 QBT 高低温环境箱实现控温, 测试了 T300/AG80 复合材料试件纵向、横向的高温拉伸性能, 其中纵向试件选取的温度范围为室温~375℃, 横向试件的温度范围为室温~325℃。采用非接触方式即远程摄像和图像识别相结合的方法, 测量了试件在不同温度、不同载荷作用下的变形, 并依据变形计算材料纵向、横向的高温弹性模量。获得试件在不同温度下的力学性能保留率, 分析了温度对材料性能的影响, 进而对材料的高温性能进行评价。

关键词: T300/AG80 复合材料; 高温力学性能; 保留率; 非接触应变测量

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

0 引言

碳纤维复合材料因具有轻质、高强、耐高温、抗腐蚀、热力学性能优良等特点而被广泛用作结构材料及耐高温抗烧蚀材料^[1], 在航空航天领域的应用也越来越广泛。由于航空航天特殊的应用环境, 需要对碳纤维复合材料的高温力学性能进行研究。近年来, 国内外学者对碳纤维复合材料以及复合材料的高温力学性能进行了大量的研究。管祥等^[2]对等轴、近片层和双态组织的 Ti-45.6Al-2Nb-2Cr 在室温至 840℃, 不同应变率下的拉伸力学行为进行了研究, 揭示了温度、应变率和微观组织对 TiAl 高温动态力学行为的影响。文献[3-6]介绍了碳纤维增强复合材料的制备过程, 测试了复合材料在不同温度下的力学性能, 分析温度对复合材料力学性能的影响, 对复合材料的高温力学性能进行预测。G. Christos 等^[7]对碳纤维钛金属复合材料层合板试件在不同温度下单轴拉伸和四点弯曲性能进行了实验研究。T. Shimokawa 等^[8]研究了 G40-800/5260 碳纤维复合材料层合板从室温到 150℃ 下的静态疲劳强度, 在不同温度下对开孔和无孔试件的静态拉伸和压缩性能进行测试, 以实验结果为基础对有缺陷的强度准则进行了讨论。B. Fiedler 等^[9]用有限元分析方法研究了碳纤维增强复合材料单向板基体失效过程, 计算了基体失效和纤维基体剥离时复合材料的横向强度, 研究了温度对弹性模量、非线性的应力-应变曲线和基体强度的影响, 有限元模型的预测结果与实验结果进行了对比。S. Lee 等^[10]在不同温度下测试复合材料层合板的拉伸和剪切性能, 用扫描电子显微镜观察试件的破坏特点和断口形态。Y. Ohtake 等^[11]使用十字型槽试件对碳纤维增强复合材料高温情况下在双轴压力下的变形行为进行观察并利用有限元方法进行了检测评估。

本文研究的 T300/AG80 复合材料铺层板是广泛应用于航天航空领域的层合板, 对其高温性能进行较精确的测试是对结构在高温条件的性能进行准确分析预测的前提, 铺层方向取自于工程结构。本

* 收稿日期: 2009-09-09; 修订日期: 2010-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972013)

通讯作者: 龙连春(1963-), 男, 教授, 博士。研究方向: 智能结构最优控制、复杂系统的分析与优化、超常环境下材料和结构的力学行为。E-mail: longlc@bjut.edu.cn

文采用非接触方式进行高温性能测试,采用图像识别法计算试件变形,为研究高温下复合材料的变形提供了一种方法。在不同温度下对 T300/AG80 复合材料层合板纵向试件和横向试件进行拉伸实验,测得试件的拉伸破坏强度。用非接触式图像识别法测得试件在不同温度下的弹性模量,计算高温下拉伸破坏强度和弹性模量的保留率,分析温度对材料力学性能的影响。

1 实验设备及方法

本文所采用 10 层对称铺层,铺层方向为 $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ 的 T300/AG80 复合材料试件由中国航天科技集团公司第一研究院第一设计部根据工程结构的受力情况设计制作的。根据国标 GB/T3856-2005,试件形状、尺寸如图 1 所示。

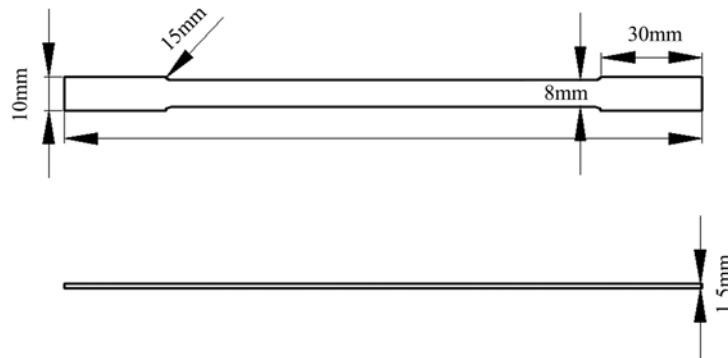


图 1 高温实验试件形状和尺寸

Fig. 1 Test specimen shape and size for high temperature experiment



图 2 实验装置照片

Fig. 2 Photograph of experimental apparatus

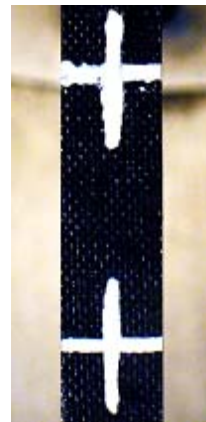


图 3 试件实验状态照片

Fig. 3 Photograph of a specimen in testing state

高温环境的实现是在 CSS 电子万能实验机底座与横梁之间安装一个高温炉,实验装置如图 2 所示。由 QBT-70~400x 高低温环境箱测控系统控制温度,该系统采用离心式风扇强制箱内空气产生对流,从而使箱内温度均匀。工作温度范围: $-70^\circ\text{C}\sim+400^\circ\text{C}$,温度波动度: $\leq\pm 2^\circ\text{C}$ 。载荷信号由计算机控制,实验前人工在试件上涂上白色散斑。实验过程中在高温炉内开启照明光源,透过高温炉的玻璃用远程定焦拍摄拍下不同载荷下的试件形态,拍摄的试件照片如图 3 所示。用图像识别法计算试件的变形。图像识别相关方法通过图像采集、图像数字化、处理物体在不同变形状态或者不同变形时刻的两幅图像从而得到面内位移分量。其变形识别过程是:分别采集物体变形前后的两幅数字散斑图,如果将变形前的图像中一小块图像定义为样本区,变形后的图像中与样本子区相对应的那一小块图像定义为目标子区,则只要找到目标子区与样本子区之间的一一对应关系,就可以实现位移的提取。样本子区与目标子区的位置差别表现为位移分量,这样就把位移测量问题转化为一个数字计算过程。从原则上讲,只

要能得到反映被测对象不同变形状态的表面数字图像,而且这些图像是由具有一定对比度和信息层次的散斑所构成,就能应用数字图像相关技术进行位移信息的提取,实现位移的非接触测量。图像识别相关测量方法是以物体表面的自然随机斑点或人工斑点作为物体变形的信息载体。白光散斑场是由人工制作在被测物体表面上,当物体受载荷作用产生变形时,白光散斑跟随物体一起运动,所以物体的变形向量就是白光散斑运动的位移量。图像识别位移的计算:初始状态如图4(a)所示,在同一水平坐标 x 上,在上下两处标志处找到对比较为明显的两点,两点的坐标记为 $a(x, y)$ 和 $b(x, y_1)$,则所取的标距为 $l = y_2 - y_1$ 。对同一个试件的另外一张照片,如图4(b)所示,相同两点的坐标记为 $a_1(x_1, y_4)$ 和 $b_1(x_1, y_3)$,则这时试件的变形为 $\Delta l = (y_4 - y_3) - (y_2 - y_1)$,试件的应变为 $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ 。

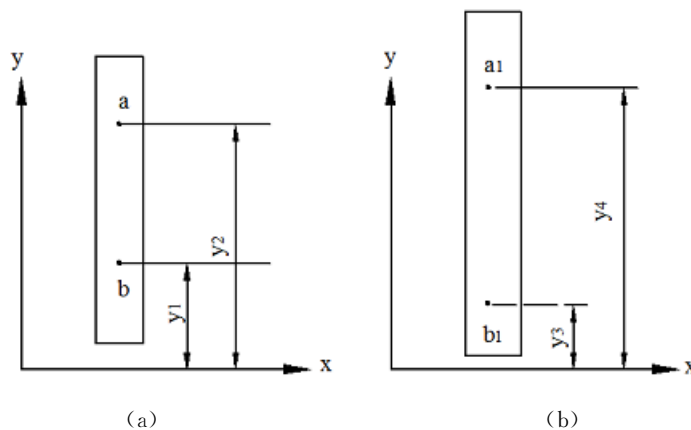


图4 非接触式计算试件变形示意图

Fig.4 Schematic diagram of calculating specimens' deformation by Non-contact method

实验采用恒温加载模式。 0° 方向的试件在室温、 50°C 、 75°C 、 100°C 、 125°C 、 150°C 、 175°C 、 200°C 、 225°C 、 250°C 、 275°C 、 300°C 、 325°C 、 350°C 、 375°C 共计15个温度点测试拉伸破坏强度,每个温度点测3个试件,共计 $3 \times 15 = 45$ 个试件,计算室温到 350°C 试件的弹性模量。 90° 方向的试件在室温、 50°C 、 75°C 、 100°C 、 125°C 、 150°C 、 175°C 、 200°C 、 225°C 、 250°C 、 275°C 、 300°C 、 325°C 共计13个温度点测试拉伸破坏强度,每个温度点测3个试件,共计 $3 \times 13 = 39$ 个试件,计算室温到 225°C 试件的弹性模量。实验时在 QBT-70~400x 高低温环境箱测控系统中设定欲达到的温度,环境箱在自动控制系统作用下达到设定温度,升温的时间与温度成正比,每升高一度大约需要一秒,在达到设定温度并保温3min后,用电子万能实验机对试件进行加载,采用位移控制加载,加载速度为 $3\text{mm}/\text{min}$,直至试件破坏。用远程拍摄拍下实验过程。

由于高温实验不能采用接触式引伸计测量变形,只能采用非接触式测量。为了验证非接触式测量的可行性,定焦拍下室温下电子万能实验机的拉伸实验过程,用图像识别法计算材料的应变及弹性模量,与接触式引伸计在试件上测得的弹性模量比较,如图5所示。

由比较可知非接触式测量和接触式测量的数据相近, 0° 方向试件非接触式测量的弹性模量相对于接触式测量的误差范围为 $0.65\% \sim 2.95\%$,平均误差 1.48% 。 90° 方向试件非接触式测量的弹性模量相对于接触式测量的误差范围为 $0.10\% \sim 1.72\%$,平均误差 0.67% 。单件最大误差 2.95% ,可见图像识别这种非接触式测量方式测试弹性模量是可行的。

2 实验结果

0° 方向和 90° 方向两种试件在不同温度下进行实验,得到在不同温度下的破坏强度和弹性模量的平均值,图6为平均破坏强度随温度的变化关系,图7为平均弹性模量随温度的变化关系。

由图6可以看出: 0° 、 90° 方向两种试件的平均破坏强度随着温度的升高呈下降趋势。室温下, 0° 方向试件的平均拉伸破坏强度为 904.01MPa , 90° 方向试件的为 458.95MPa , 0° 方向的平均破坏强度是

90°方向的1.97倍。从常温到225℃, 0°方向试件的平均破坏强度下降缓慢, 225℃时材料的破坏强度为687.02MPa, 与室温相比仅下降了大约24.00%。从225℃到375℃下降相对急剧, 375℃时材料的破坏强度为172.74MPa, 与室温时相比下降了80.89%。90°方向试件的平均破坏强度从125℃开始几乎沿一条直线下降, 温度为325℃时, 试件的破坏强度下降到室温的45.75%。

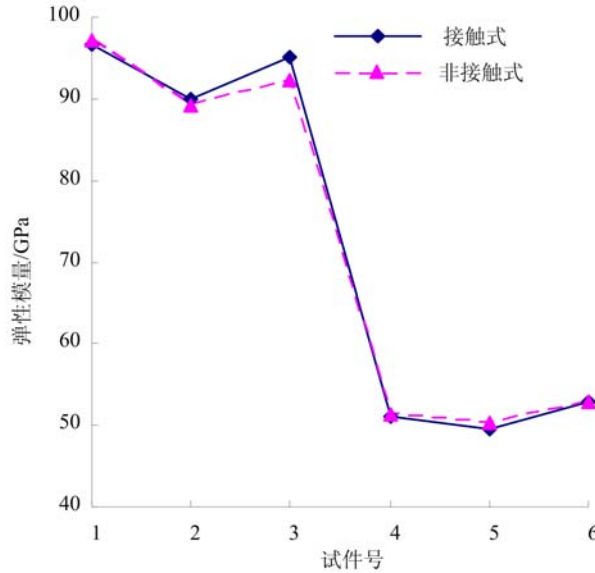


图5 两种测量方法计算的弹性模量值比较

Fig. 5 Comparison of elastic modulus measured by two methods

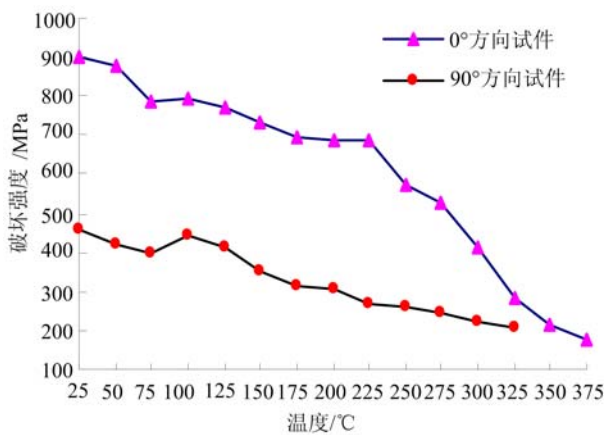


图6 破坏强度—温度关系

Fig. 6 Relations between ultimate stresses and temperature

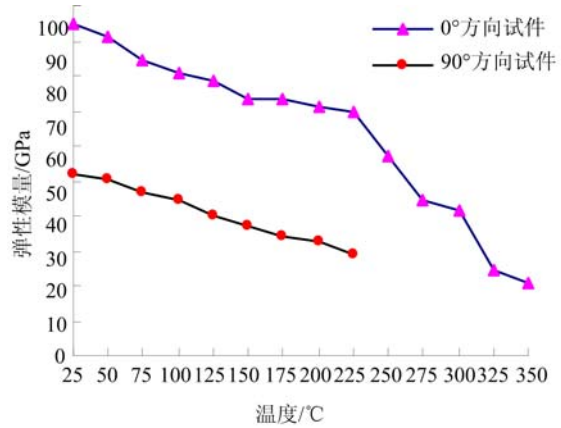


图7 平均弹性模量—温度关系

Fig. 7 Relations between elastic modulus and temperature

由图7平均弹性模量—温度关系曲线可以看出: 0°、90°方向两种试件的平均弹性模量随着温度的升高逐渐减小, 温度越高试件的弹性模量越小。室温下, 0°方向试件的平均弹性模量为94.70GPa, 90°方向试件的为51.96GPa, 0°方向试件的平均弹性模量是90°方向的1.82倍。常温到225℃, 0°方向试件弹性模量下降缓慢, 225℃时试件的弹性模量为69.76GPa, 与室温相比仅下降了26.34%。225℃到375℃下降急剧, 当温度达到350℃时, 试件的弹性模量为20.47GPa, 与室温时相比下降了78.38%。在实验测试的温度范围内, 90°方向试件的弹性模量几乎沿直线下降。当温度为225℃时, 试件的弹性模量为28.95GPa, 与常温时相比下降了44.28%。

拉伸实验时, T300/AG80 复合材料 0°方向试件的力学性能明显优于 90°方向的力学性能。这是因为 0°方向试件纤维铺层方向为 $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$, 90°方向试件纤维铺层方向为 $[\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ 。

0°方向试件每5层有2层纤维沿受力方向,而90°方向试件每5层只有1层纤维沿受力方向,0°方向铺层纤维能承受较大的载荷。从50℃到225℃,温度对0°方向试件的力学性能影响较小,从225℃到375℃,温度对0°方向试件的力学性能影响显著。这是因为当温度高于225℃时,树脂逐渐软化,试件各层基体树脂分解,碳纤维从基体分离出来,界面承载能力和传递载荷的能力下降,试件力学性能急剧下降。随着温度升高,90°方向试件的力学性能呈缓慢下降趋势,但当温度为100℃时,90°方向试件的破坏强度相对于75℃时略有增加。这是因为90°方向试件90°铺层方向的纤维较多,90°铺层方向的纤维承载能力较低,主要靠层与层之间的剪切力来承受拉应力。环氧树脂的黏性随着实验温度的升高呈缓慢下降趋势,所以90°方向试件的力学性能随温度的升高呈缓慢下降趋势。但温度为100℃时,环氧树脂的黏度增高,增大了层与层之间的剪切力,所以此时材料的破坏应力略微有所增加。

3 分析和讨论

用 P_0 表示复合材料在常温下的力学性能, P 表示复合材料在高温时的力学性能, P_f 表示复合材料高温时的力学性能保留率,则 $P_f = \frac{P}{P_0}$ 。计算两种试件在不同温度时的力学性能保留率,得到拉伸破坏强度保留率—温度曲线如图8所示,弹性模量保留率—温度曲线如图9所示。

由图8拉伸强度保留率—温度曲线可以看出:150℃到275℃,0°方向试件的拉伸破坏强度保留率大于90°方向的,温度对90°方向试件破坏强度的影响大于对0°方向试件的影响。从300℃开始,90°方向试件破坏强度的保留率反而大于0°方向的。

由图9弹性模量保留率—温度曲线可以看出:50℃到100℃,0°、90°方向试件的弹性模量高温保留率几乎相同,在此温度范围内温度对两种试件弹性模量的影响相同。在整个实验的温度范围内,0°方向试件的弹性模量保留率都大于90°方向的。

大多数评价准则依据性能保留率50%~70%以上的温度作为使用温度^[12],由实验数据可知,0°方向试件的拉伸破坏强度保留率在275℃时为58.48%,90°方向试件的拉伸破坏强度保留率在275℃时为54.04%,0°方向试件的弹性模量保留率在250℃时为60.00%,90°方向试件的弹性模量保留率在225℃时为56.00%,所以T300/AG80复合材料结构建议使用温度为225℃。

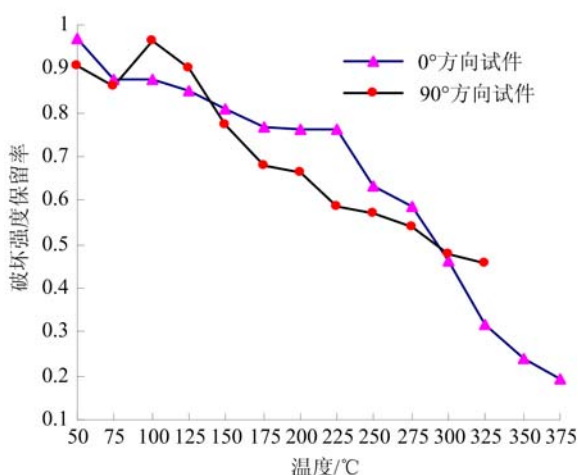


图8 拉伸强度保留率—温度关系

Fig.8 Relations between retention rates of ultimate stresses and temperature

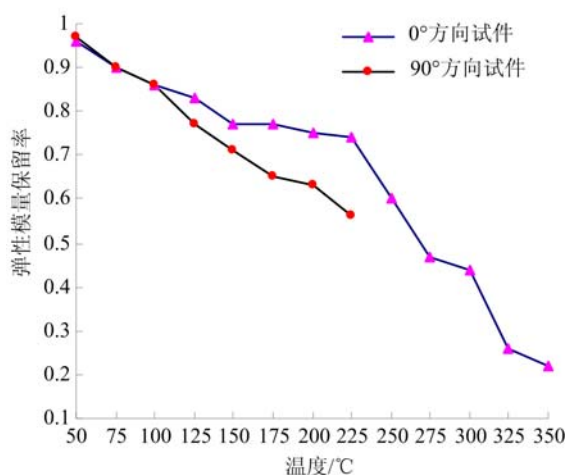


图9 弹性模量保留率—温度关系

Fig.9 Relations between retention rates of elastic modulus and temperature

4 结论

(1) 采用图像识别非接触方式测量弹性模量,平均误差为1.08%,单件最大误差2.95%,说明采用

非接触方式测量弹性模量的方法是可行的。

(2) 在实验温度范围内, T300/AG80 复合材料 0° 方向试件的力学性能始终明显优于 90° 方向的力学性能。

(3) T300/AG80 复合材料的力学性能随着温度的升高呈下降趋势, 建议使用温度不超过 225°C 。

参 考 文 献:

- [1] 上官倩英, 蔡柳华. 碳纤维及其复合材料的发展及应用[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2008, 37(3): 275—278 (Shang Guan Qianqian, Cai Maohuan. Development and applications of carbon fiber and its composites [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2008, 37(3): 275—278 (in Chinese))
- [2] 咎祥, 汪洋, 夏源明, 贺跃辉. 三种微观组织的 Ti-45.6Al-2Nb-2Cr 高温动态力学行为的实验研究[J]. 实验力学, 2008, 23(6): 477—484 (Zan Xiang, Wang Yang, Xia Yuanming, He Yuehui. Experimental Study of Ti-46.5Al-2Nb-2Cr with Three Different Microstructures under Elevated Temperatures and High Strain Rate [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(6): 477—484 (in Chinese))
- [3] 刘文博, 王荣国, 张洪涛, 贾近, 矫维成, 谢怀勤. CF/PPEK、CF/PPES 复合材料高温力学性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2004, 21(2): 183—189 (Liu Wenbo, Wang Rongguo, Zhang Hongtao, Jia Jin, Jiao Weicheng, Xie Huaqin. High temperature mechanical properties of CF/PPEK and CF/PPES composites [J]. Materials Science & Technology, 2004, 21(2): 183—189 (in Chinese))
- [4] 陈家正, 张晓兵, 张琳. 高性能热塑性复合材料的高温力学性能[J]. 纤维复合材料, 2007, 43(2): 43—45 (Chen Jiazheng, Zhang Xiaobing, Zhang Lin. Mechanical Performance of High-performance Thermoplastics under the Elevated Temperature [J]. Fiber Composites, 2007, 43(2): 43—45 (in Chinese))
- [5] 易法军, 韩杰才, 杜善义. 混杂碳/碳复合材料超高温力学性能实验研究[J]. 复合材料学报, 2003, 20(2): 118—122 (Yi Fajun, Han Jiecai, Du Sanyi. Experimental Investigation on Mechanical Properties of Hybrid Carbon-Carbon Composites at Ultra-High Temperature [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 20(2): 118—122 (in Chinese))
- [6] Cao Shenghu, Wu Zhis, Wang Xin. Tensile properties of CFRP and hybrid FRP composites at elevated temperatures [J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43(4): 315—330.
- [7] Christos G. Mechanical Behavior of High Temperature Hybrid Carbon Fiber/Titanium Laminates [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2009, 4(131): 1—10.
- [8] Shimokawa T, Kakuta Y, Hamaguchi Y, Aiyama T. Static and fatigue strengths of a G40-800/5260 carbon fiber/bismaleimide composite material at room temperature and 150°C [J]. Journal of Composite Materials, 2008, 42(7): 655—79.
- [9] Fiedler B, Gagel A, Hobbiebrunken T, Schulte K, Hojo M, Ochiai S. Modeling of the transverse strength of fibre reinforced epoxy composite at low and high temperature [J]. Composite Interfaces, 2005, 3(3): 379—394.
- [10] Lee S, Plamondon M, Gaudert P C. Effect of elevated temperature spikes on the mechanical properties of carbon fibre epoxy composites [J]. International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings), 1993, 38(2): 1582—1593.
- [11] Ohtake, Yasuhiro, Sato, Shunji, Hatanaka, Kenji, Masumoto, Hiroki, Matsumura, Yoshikazu. Biaxial deformation behaviors of C/C composite at high temperatures [J]. JSME International Journal, 2000, 43(4): 384—392.
- [12] Sung K Ha, Geoge S Springer. Nonlinear elastic properties of organic matrix composites at elevated temperatures [J]. Transactions of Thesis, 1988, 10: 46—49.
- [13] 仲伟红, 张佐光, 李芙蓉, 宋焕成. 先进复合材料耐热性评价(I)—复合材料高温力学性能的理论预测[J]. 宇航材料工艺, 1997, (1): 57—61 (Zhong Weihong, Zhang Zuoguang, Li Furong, Song Huancheng. Evaluation on Heat—resistance Properties of Composites (I)—Theoretical Prediction of High Temperature Mechanical Properties for Composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 1997, (1): 57—61 (in Chinese))

Experimental Study of T300/AG80 Composite Tensile Performances at High Temperature

CHEN Zhong-ying¹, LONG Lian-chun¹, LU Zhi-feng², YANG Zhi-guang²

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronic Technique, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Astronavigation Systems Engineering Research Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: Using QBT high-low temperature measurement and control system to control temperature, the longitudinal and latitudinal tensile property of T300/AG80 composite material at high temperature was experimentally investigated on CSS electronic universal testing apparatus, where the longitudinal test specimens were measured from room temperature to 375°C and the latitudinal test specimens were measured from room temperature to 325°C. Specimen deformations under different loads and at various temperatures were ascertained based on non-contact method, namely remote camera and image recognition. Deformation of longitudinal and latitudinal test specimens were calculated, based on the deformation and loads, elastic modulus was obtained. Retention rate of mechanical properties was calculated at various temperatures and the influence of temperature on material properties was analyzed, then the properties of material at high temperature were evaluated.

Keywords: T300/AG80 composite material; tensile performance under high temperature; retention rate