第12卷 第2期 复合材料学报 Vol.12 No.2
1995年 6月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA June 1995

ARALL层板蠕变特性的研究

仲伟虹 李宏运 胡宏军 强 伟 王玉瑛 郑瑞琪 陈昌麒
(北京航空航天大学,北京 100083) (北京航空材料研究所)

摘 要 本文研究了施加不同预应力及含不同胶粘剂的ARALL层板130℃时的蠕变特性,利用唯像分析的方法,采用陈化理论对实验得到的层板蠕变曲线进行了拟合,并且采用宏观与微观机理相结合的方法对其进行了分析。结果表明,ARALL层板的蠕变主要是由铝合金决定的,施加预应力使ARALL层板残余应力下降,从而降低了层板的蠕变程度。另一方面,采用高模量胶粘剂体系有利于降低层板的蠕应变量。

关键词 层板,ARALL(芳纶-铝合金胶接层板),蠕变

1 引 言

芳纶-铝合金胶接层板(ARALL)作为飞机的蒙皮结构材料,研究其与时间有关的特性是必要的,其中蠕变性能是一个重要的方面。

目前,复合材料的蠕变研究大致有两种途径:微观机理分析和宏观唯像研究。前者是从微观角度出发研究蠕变机理以寻求改善复合材料蠕变性能的途径。但是由于复合材料体系因素的复杂性,微观分析的定量结果还很难达到宏观上的精确。因此更多的研究者采用了唯像分析的方法,它是以宏观实验为基础,由蠕变现象着手在实验的基础上分析研究所得到的实验数据以建立描述蠕变规律的理论。迄今为止,所建立的较成熟的理论包括陈化理论、时间硬化理论、应变硬化理论及塑性滞后理论等。其中陈化理论对较缓慢变化的载荷,理论与实验结果相符较好,而且计算方便,工程设计中得到应用[1]。对于ARALL层板的蠕变研究方面,主要是T. O. Williams 和 M. J. Pindera 等人的贡献[2],他们建立了一种分析模型,用于优化层板的蠕变特性,理论上不免过于复杂。本文避开了复杂的本构关系的推导及蠕变过程中应力、应变的叠代计算,而采用陈化理论对ARALL层板130℃时的蠕变特性进行了拟合及分析,结果表明,层板的蠕变主要是由铝合金决定的,施加预应力使ARALL层板残余应力下降从而降低了层板的蠕变程度。另一方面,胶粘剂的性能对层板的蠕应变也有一定的作用,采用高模量的胶粘剂体系有利于降低层板的蠕变应变量。

2 陈化理论介绍

陈化理论是由Soderberg[3]提出的,他认为:当温度一定时,蠕变变形、应力和时间存在一定的关系:

$$\varepsilon_c = f(\sigma, t) \tag{1}$$

本文于1993年10月18日收到, 国家自然科学基金资助项目(9590015-04)

蠕变曲线往往具有几何相似性，故(1)式又可表示为：

$$\varepsilon_c = f_1(\sigma) f_2(t) \tag{2}$$

其中，

$$f_1(\sigma) = \sigma^n \tag{3}$$

式中应力指数 n 约在 2～10 之间，即蠕变应变存在很强的非线性关系。函数 $f_2(t)$描写了蠕变曲线的形式，用 $\Omega(t)$表示，即 $f_2(t)=\Omega(t)$，它是与蠕变曲线成一定比例的函数：

$$\Omega(t) = At^m \qquad 0 < m < 1 \tag{4}$$

由公式(2)，(3)和(4)得到陈化理论公式：

$$\varepsilon_c = \sigma^n \Omega(t)$$

即：

$$\varepsilon_c = A\sigma^n t^m \tag{5}$$

其中，A，m，n 为材料常数，由蠕变实验确定。

3 实验结果与理论分析

3.1 预应力对层板蠕变特性的影响：

本文研究了三种预应力层板的蠕变行为，其材料参数如下(均为环氧胶粘剂体系)：

表 1 不同预应力层板的材料参数

ARALL 层板	预应力 σ(MPa)	130℃纵向拉伸屈服强度(MPa)
AC	0	242
GPs2	441	355
GPs1	775	350

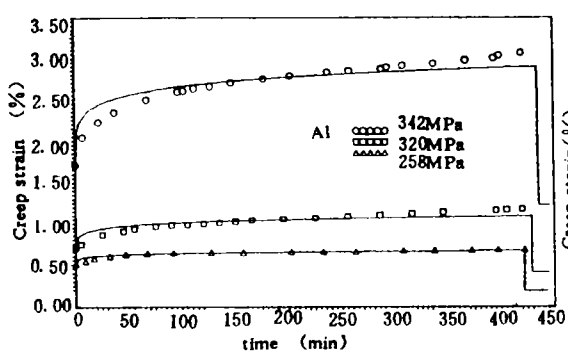


图 1 不同载荷下的 Al 合金的蠕变曲线

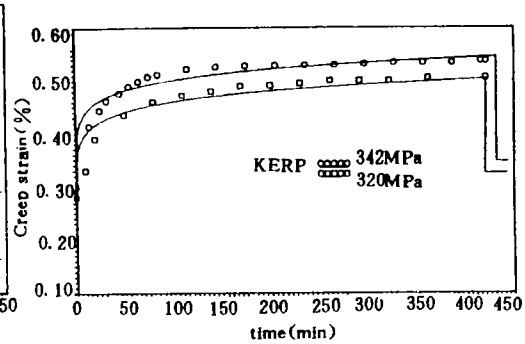


图 2 芳纶 环氧树脂基体复合材料的蠕变曲线

图 1 和图 2 分别是层板所用铝合金及芳纶/环氧复合材料在不同载荷水平下的蠕变特性曲线。由图 1 可知，铝合金在高于其屈服应力(313MPa)时蠕变量是非常大的，比低于屈服强度的外载下的蠕变量有显著的增加。图 2 所示的芳纶/环氧的蠕变是很低的，将它们与相应的 ARALL 层板的蠕变曲线进行对比(图 3)，可以看出层板的蠕变特性主要取于铝层。铝板随应力变化的明显非线性蠕变决定了层板的蠕变特性，而芳纶/环氧的蠕变，经 7 小时后卸载，剩余变形很小，可见它呈明显的线性粘弹性(在该实验条件下)，因此对层板的总蠕变贡献较小，这一点与 T. O. Williams 等人的研究结果相同。

由上述的讨论可知，降低铝层的残余应力可以减弱层板的蠕变程度。本文采用给纤维树脂层施加预应力的方法改变层板中的应力状态。表 1 给出了三种预应力的情况 $\sigma_0=0$，$\sigma_1=441$MPa，$\sigma_2=775$MPa，其残余应力见图 4[4]，从中可明显看出预应力的施加降低了层板中铝层

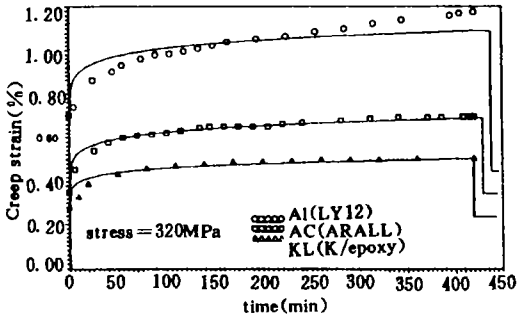


图 3　ARALL 层板及其组份的蠕变曲线对比

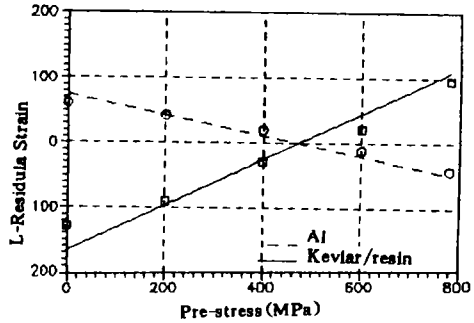


图 4　不同预应力的 ARALL 层板纵向残余应力

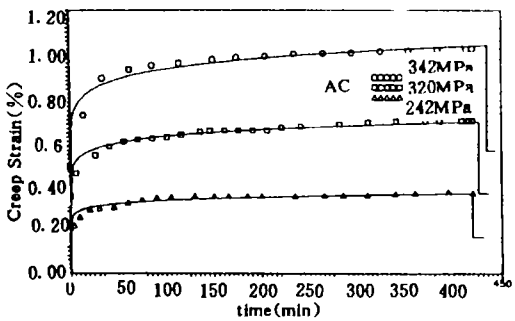


图 5　零预应力层板的蠕变

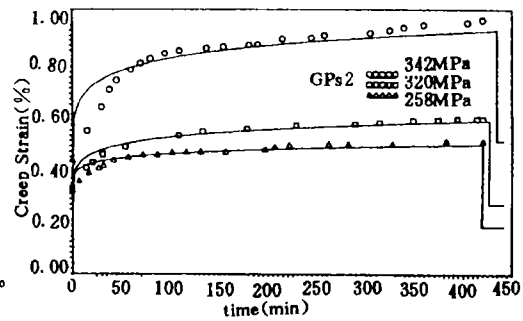


图 6　441MPa 预应力层板的蠕变

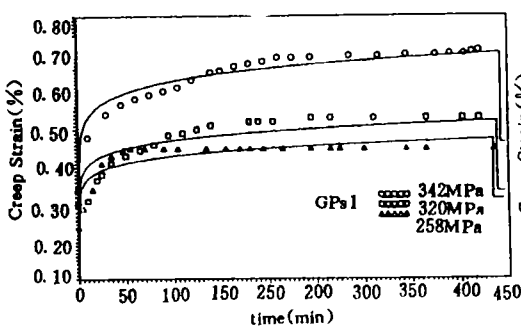


图 7　775MPa 预应力层板的蠕变

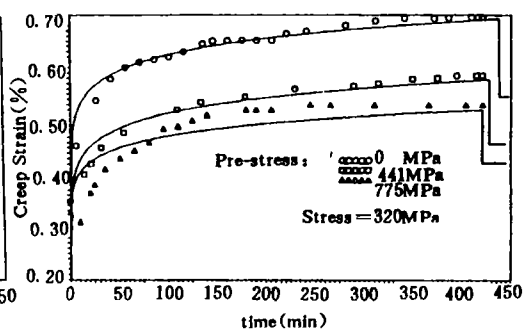


图 8　320MPa 外载荷下的不同预应力层板的蠕变曲线对比

的残余应力，即由受 74.2MPa 拉应力($\sigma_0=0$)，降至 4.8MPa($\sigma_1=441$MPa)，当预应力 $\sigma_2=775$MPa 时铝层变成受 47.8MPa 的压应力。它们在不同外载下的蠕变特性曲线分别见图 5～7。相同载荷水平下，三种预应力层板的蠕变特性对比见图 8 和图 9，结果表明，预应力的施加明显降低了蠕应变量。降低情况见表 2。

表 2　预应力对层板 7 小时后蠕变量的影响

蠕变下降率 / 外载荷	预应力	
	$\sigma_1=441$MPa	$\sigma_2=775$MPa
342MPa	36%	46%
320MPa	28%	36%

采用陈化理论公式(5)对实验结果进行拟合，见图 5～9 中的曲线，公式(5)中 n，m 拟合值

见下表 3。从表 3 可知，对于同种层板，m 值随外载荷值的变化很小，因此可视为材料常数，且三种预应力层板的 m 值相近，而 t^m 代表蠕变曲线的形式，因而三种层板的蠕变曲线的形式应该相似，这一点可从图 8 和图 9 观察到。由此可知，预应力能通过改变层板残余应力状态使其蠕变量发生变化，但不能改变具有同样组分材料的层板的蠕变曲线形状。从表 3 中还可看到，应力指数 n 是随着预应力的增大而降低的，说明随着预应力的增大，层板的蠕变对外加载荷的敏感性下降。但下降幅度并不与施加预应力的大小成正比，即并非无限度的下降，而是在某种预应力值时蠕变下降率最大。因此，究竟施加多大预应力为最佳值，应该结合具体实际情况的需要以及其它方面的性能要求，进行多方面的优化选择来确定。

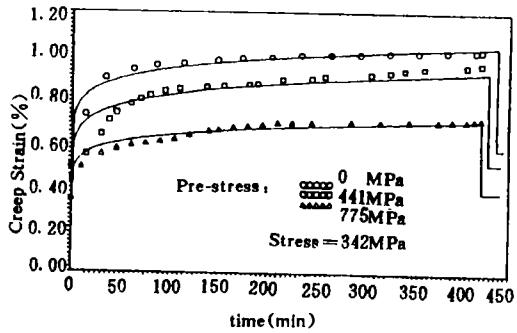


图 9 342MPa 外载荷下的不同预应力层板的蠕变曲线对比

表 3 蠕变参数 n，m 的拟合结果

层板种类	外载荷(MPa)	n	m
AC－1	242	2.8743	0.0631
AC－2	320		0.0702
AC－3	342		0.0736
GPs2－1	258	1.142	0.0665
GPs2－2	320		0.0798
GPs2－3	342		0.0815
GPs1－1	258	1.011	0.0666
GPs1－2	320		0.0671
GPs1－3	342		0.0748

3.2 胶粘剂对层板蠕变特性的影响

本文所用的三种胶粘剂的基本性能参数如下：

表 4 三种胶粘剂的基本参数(室温)

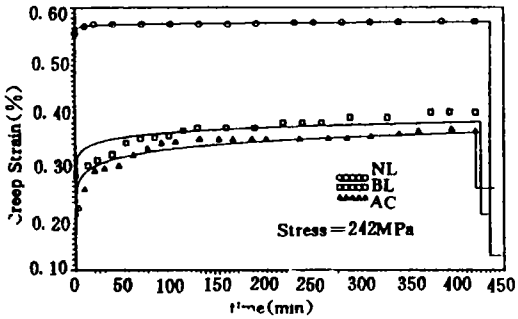
材 料	拉伸强度(MPa)	拉伸模量(GPa)	制造单位
SY－8(环氧尼龙体系)	14.0	1.0(约)	621 所
SY－14(环氧聚砜体系)	56.0	2.5	621 所
YQ8911(双马来酰亚胺)	65.1	3.05	625 所

表 4 中的 SY－14 胶与 QY8911 胶均为耐高温型，其 130℃时的性能较室温下降很小[5,6]，SY－8 是中温胶，故本文采用 SY－8 胶压制的 ARALL 层板，其蠕变曲线的测定是在其最高使用温度 80℃下进行的，三种胶粘剂对应的 ARALL 层板的参数见表 5。

表 5 三种胶粘剂的 ARALL 层板的材料参数(130℃)

层板编号	所含胶粘剂	层板屈服强度(MPa)	层板纵向拉伸模量(MPa)
BL	QY8911	290	57.5
AC	SY－14	242	66
NL*(80℃)	SY－8	258	45

图 10 和 11 是外载荷分别为 242MPa 和 290MPa 时三种胶粘剂层板蠕变曲线的对比图。



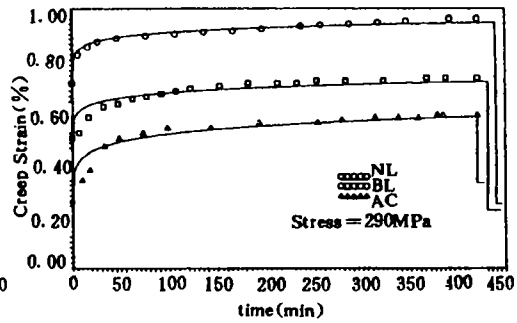


图 10　242MPa 外载荷下的不同胶粘剂层板的蠕变曲线对比　图 11　290MPa 外载荷下的不同胶粘剂层板的蠕变曲线对比

从中可以观察到，三种层板的蠕变曲线形状是不同的，这一点可通过陈化理论公式的参数拟合值的结果加以说明(注：* 为相应的屈服应力值)：

表 6　不同胶粘剂层板的蠕变参数 n，m 的拟合结果

层板编号	外载(MPa)	n	m
BL－1	209	1.758	0.0344
BL－2	242		0.0374
BL－3	290*		0.0789
AC－4	218	2.073	0.0180
AC－1	242*		0.0631
AC－5	290		0.0655
NL－1	242	1.827	0.0035
NL－2	258*		0.0189
NL－3	290		0.0245

从表 6 中可以看出，不同的层板材料，其 m 值的差异是非常大的，而同种组份材料不同预应力的层板的 m 值差别很小(表 3)，说明 m 是材料参数，符合陈化理论。而且，它们有一个共同的特点：外加载荷低于屈服强度时，蠕变曲线的时间指数 m 较低且随载荷值变化很小，当外加载荷达到屈服强度时，m 值有一个较大幅度的增加。当给层板施加高于屈服强度的外载时，蠕变曲线的 m 值又趋于稳定，说明 m 值存在一种与屈服强度有关的阶跃性变化，变化倍数的大小与层板所含胶粘剂性质有关。而时间指数 m 的陡增，意味着在该外加应力作用下蠕变有大幅度的增加，但层板 m 值的这种变化都是在外应力接近屈服强度时发生的，屈服强度与铝合金密切相关，这说明铝合金对层板的总蠕变性能的影响是比较大的，而胶粘剂的影响亦不容忽视，层板中胶粘剂模量越低，时间指数 m 的阶跃性变化倍数越大。从图 10 和 11 可以观察到三种不同胶粘剂层板的蠕变量，其中尼龙胶的模量最低，故 NL 层板的弹性变形量最大，但其蠕变量最低，原因是其测试温度为 80℃(尼龙胶最高使用温度为 80℃)，这说明温度对蠕变量的影响很大。

对于 AC 层板与 BL 层板的蠕变，前者高于后者，本文认为这与它们所含胶粘剂的模量有关，但陈化理论公式未能反映出彼此之间的相互关系，因而须从微观机理的角度进行分析。这方面，可采用 De Silva[7] 模型来解释这一蠕变机理。这里，不同胶粘剂层板蠕变曲线的不同，主

要是芳纶/胶粘剂层的差别所造成的。由于在本实验的范围内只有 7 小时的蠕变，且所加载荷均较低，远未达到蠕变破坏阶段，因此，可以认为芳纶/胶粘剂层内界面还未发生破坏。在此前提下，基体能够通过界面顺利传递应力，按照 De Silva 模型，在蠕变过程中，基体是以持续减小的预置应力松弛着，而纤维则在蠕变过程中应力不断增加。其中基体应力减小的程度与其模量关系密切，模量越低，传递应力的能力越低，则基体自身的应力减少得就越快，则纤维在蠕变过程中应力增加得越快，因而其蠕变量较之高模量基体时的纤维的蠕变量大，表现在层板总蠕变量上就是：层板中胶粘剂模量越低，其总蠕变量越大。

四 结 论

1. 采用宏观唯像分析的方法研究 ARALL 层板的蠕变特性是可行的，陈化理论的分析与实验结果都证明对层板施加预应力降低了层板的蠕应变量。

2. 采用宏观与微观机理相结合的方法能够解释胶粘剂对 ARALL 层板蠕变特性的影响。胶粘剂模量的提高有利于降低层板蠕变程度。

致谢：感谢北京航空材料研究所 7 室薛建高、许凤和二同志对本文实验部分给予的支持与帮助。

参 考 文 献

1 穆霞英. 蠕变力学. 西安：西安交通大学出版社，1990

2 Williams T O, Pindera M J. The effect of mechanical prestrain on the creep response of ARALL－4 laminates. J Comp Mat, 1991;25(3):302－330

3 Soderberg C R. Transaition of the ASME, 1936;58(8):58－75

4 李宏运，胡宏军，郑瑞琪. 芳纶－铝合金胶接层板残余应力测定. 全国复合材料研讨会，1992，广州

5 改性双马来酰亚胺树脂基体研究工作报告. 航空部 625 所，1988，6

6 蔡建芬，郑瑞琪，范棠. 环氧－聚砜－聚苯醚三元共混树脂体系的研究. 航空学报，1989;8(2):58－64

7 De Silva A R T. Theoretical analysis of creep in fiber reinforced composites. J Mech Phy Solids, 1986;16:169－186

STUDY ON CREEP PROPERTY OF ARALL

Zhong Weihong* Chen Changqi*

Li Hongyun Hu Hongjun Wei Qiang Wang Yuying Zheng Ruiqi

(* Beijing University of Aeronautics and Astronautics) (Beijing Institute of Aeronautical Materials)

Abstract The creep property of ARALL laminates at 130℃ with different prestresses and different adhesives is investigated respectively in this paper. It imitated the creep curves of the laminates by using the aging theory which is one of the phenomenological analysis methods, and analysed them through combining macro-phenomenon and micro-mechanism. The results show that the creep of ARALL is mainly due to aluminium alloy, and applying prestress lowers the residual stress of the laminates, so the creep strain is reduced. On the other hand, adopting the adhesive with high modulus is advantageous to lowering the creep strain of the laminates.

Key words laminate, ARALL(Aramid-Aluminium Laminate), creep