



荷载-温度耦合作用下复合材料夹层结构 蠕变问题研究

汇报人：吴鹏

所在单位：南京工业大学

所在学院：土木工程学院

2022.12.29

发展复合材料结构的意义

我国建筑材料使用状况

- 传统结构材料在生产过程中**资源消耗大**；
- 传统结构材料的生产和使用造成了严重的**环境污染**；
- 钢筋混凝土结构和钢结构的**劣化腐蚀**日益严重。



新材料结构：复合材料夹层结构

- 复合材料夹层结构，具有**轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳、可设计**等诸多优点；
- 复合材料夹层结构能够满足我国**海洋工程**的大量建设以及具有国家战略意义的南海岛礁基础设施建设对**腐蚀环境**下结构的耐久性提出了更高的要求。

- **复合材料结构与传统结构形成优势互补**



桥梁防撞装置



复合材料桥面板

复合材料夹层结构无法回避的问题：蠕变

- 内部因素：** ■ **组分材料具有粘弹性**，例如：树脂、木材、胶粘剂、聚合物泡沫等
- 外部因素：** ■ **服役环境**，包括：温度、湿度、紫外线等，尤其是**温度影响最为显著**
- 使用工况：** ■ **长期承载**

现阶段措施：复合材料夹层结构的应用才刚起步，设计规范不全。目前主要基于**变形控制**设计原则，采用**放大设计富余量**的方法，使构件处于低应力状态，这种方法可降低蠕变的影响，但造成材料的浪费和**使用成本提高**，限制了其在工程中的推广应用。



案例：建于 1982 年的国内首座玻璃钢公路桥——北京密云桥，就因蠕变变形过大而于 2005 年被迫拆除。

- ◆ **荷载-环境耦合作用下蠕变机理不清**
- ◆ **试验拟合公式缺乏物理意义，适用性较差**
- ◆ **缺乏相应的设计理论**

研究内容一：夹层结构界面粘结性能研究

CFRP层合结构界面粘结试验

CFRP片材尺寸为 $80\text{mm}\times 10\text{mm}\times 0.59\text{mm}$ ，试件设计如图所示，在其端部机械连接钢制金属片以连接高温蠕变试验机，从而测得蠕变试验过程中CFRP层合结构界面的纵向位移。每根试样均由两根CFRP片材采用环氧树脂胶粘剂粘结而成，粘结面尺寸为 $40\text{mm}\times 10\text{mm}$ 。在蠕变试验的准备阶段，需要对粘结面进行外层的清洁和打磨，从而达到更好的粘结质量。通过改变施加到CFRP层合结构上的压力，实现不同的界面厚度，从而研究不同的界面厚度对胶结层合结构界面的蠕变性能的影响。试件界面的厚度分别取 0.56mm 、 0.70mm 、 0.87mm 、 1.55mm 。试验环境：应力水平分别取平均极限剪切应力的19%、37%、46%、55%；温度分别取 30°C 、 50°C 、 65°C 、 80°C 。通过对5个试件的剪切拉断试验，获得CFRP层合结构平均极限剪切应力。



试件编号	应力水平(%)	温度(°C)	界面厚度(mm)	弹性变形(mm)	最大变形(mm)
SJ1	19	50	0.70	0.1768	1.3529
SJ2	19	50	0.56	0.1587	1.1358
SJ3	19	50	0.87	0.189	1.4727
SJ4	19	50	1.55	0.2012	1.5939
SJ5	19	65	0.63	0.2468	1.31475
SJ6	37	30	0.76	0.1385	1.0562
SJ7	37	50	0.76	0.3048	2.6515
SJ8	37	65	0.76	0.4911	3.0307
SJ9	37	65	0.63	0.4617	1.705
SJ10	37	80	0.76	/	/
SJ11	46	65	0.63	0.5832	2.5173
SJ12	55	65	0.63	0.6941	3.5333

3. 项目内容

■ 破坏模式

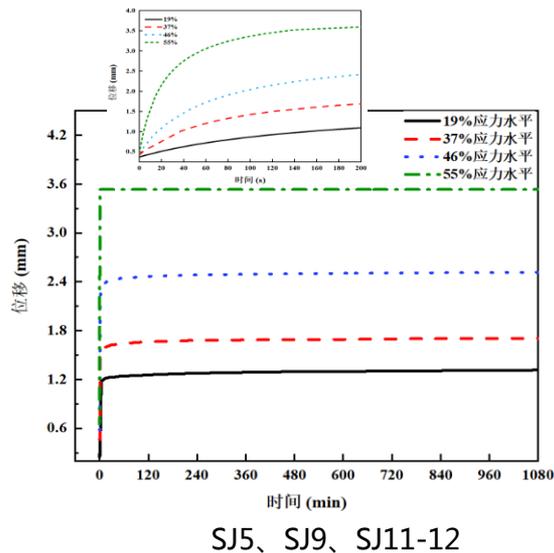
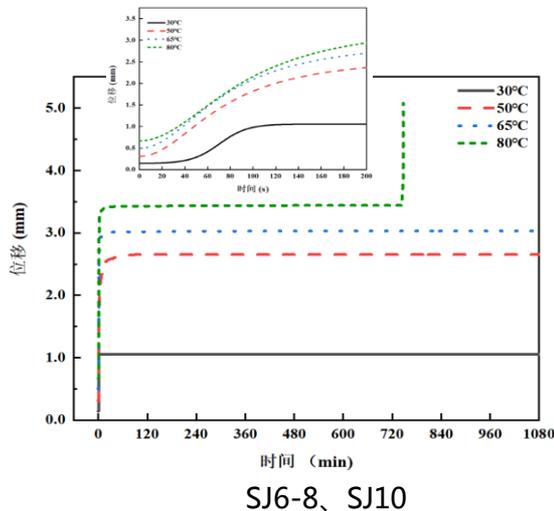
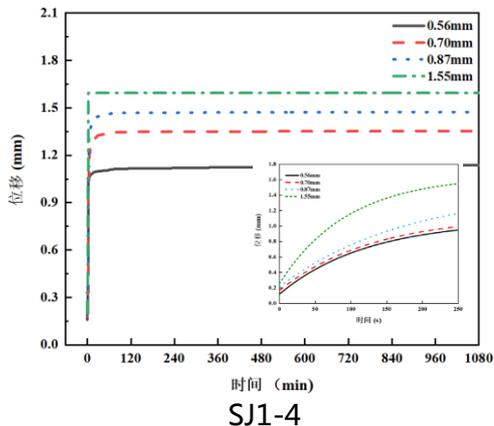


在蠕变试验过程中，构件处于恒力的拉伸状态，数据采集仪显示的界面相对位移呈现出稳定缓慢增长的规律。其中在第三个阶段，不同试件的失效过程有着显著差异：

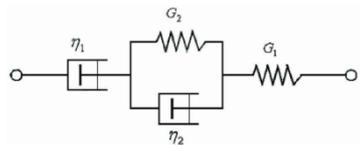
- 随着荷载增加，CFRP面板-胶层界面开始产生裂纹，当达到一定荷载后，裂纹扩展迅速，界面出现大面积脱黏，试件失效，试验停止，这是因为外加载荷较大，试件的局部承载能力不足。
- 胶层发生破坏，试件位移迅速增大，试验停止。
- 面板发出清脆响声，CFRP面板拉断。该种情况下，由于面板存在损伤且应力集中，在蠕变试验过程中面板无法承受拉伸应力而被拉断，试件位移不断增加。
- 蠕变加载，界面荷载和变形成**非线性**关系。
- 蠕变受温度影响显著，**应力和变形都随温度升高**。

研究内容一：界面粘结性能研究

界面剪切蠕变试验结果



基于试验数据分析，提出了温度荷载耦合作用下界面剪切蠕变的理论模型，物理意义明确。



以Burgers模型为基础

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{xy}(t) = \int_{-\infty}^t [\gamma_{xy}(\xi) - \alpha T] \frac{\partial G(t-\xi)}{\partial(t-\xi)} d\xi \\ G(t) = G_1 e^{\frac{\delta_{T-1}}{\theta_{G,1}} t} + G_2 e^{\frac{\delta_{T-1}}{\theta_{G,2}} t} \\ \log_{10} \delta_T = \frac{-C_1 T}{C_2^* + T} \end{array} \right.$$

τ_{xy} — 剪应力; γ_{xy} — 剪应变

$G(t)$ — 剪切模量

G_1, G_2 — 松弛模量

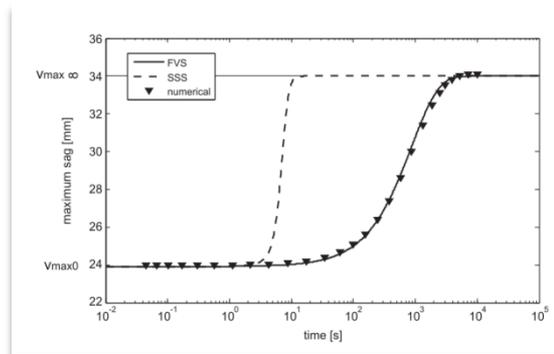
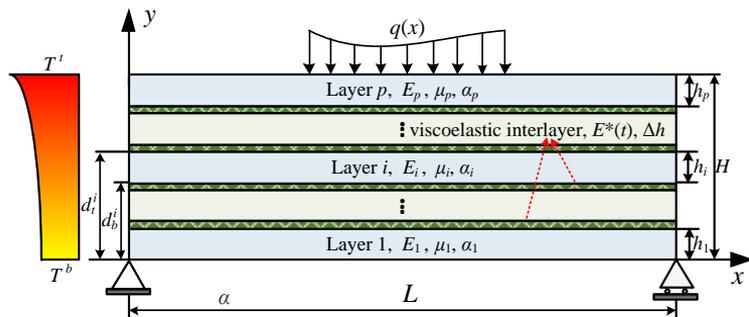
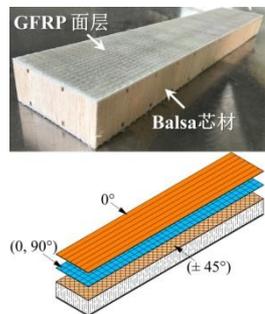
t — 时间; δ_T — 位移系数

$\theta_{G,1}, \theta_{G,2}$ — 松弛时间

C_1, C_2^* — 蠕变加速参数

T — 相对温度; α — 热膨胀系数

研究内容二：夹层结构弯曲蠕变理论模型



变形滞后

■ 难点1: 粘弹性具有记忆效应

- ✓ 对于蠕变过程，结构中的每个微元的应力是变化的，每个负荷对于高聚物的变形的贡献是独立的，总的蠕变是各个负荷引起的蠕变的叠加。其数学表达式为卷积形式：
- ✓ 采用 **Boltzmann本构模型** 来描述粘弹性材料在非恒力状态下的“**记忆效应**”，即材料的应变或应力响应决定于受载与变形的**历史过程**。

$$\sigma_x^i(x, y, t) = \frac{1}{1 - (\mu_i)^2} \int_{-\infty}^t E_i(t - \xi) \left[\frac{\partial \varepsilon_x^i(x, y, \xi)}{\partial \xi} + \mu_i \frac{\partial \varepsilon_y^i(x, y, \xi)}{\partial \xi} \right] d\xi \quad \rightarrow \quad \bar{\sigma}_x^i(x, y, s) = \frac{s \hat{E}_i(s)}{1 - (\mu_i)^2} \left(\frac{\partial \hat{\varepsilon}_x^i(x, y, s)}{\partial \xi} + \mu_i \frac{\partial \hat{\varepsilon}_y^i(x, y, s)}{\partial \xi} \right)$$

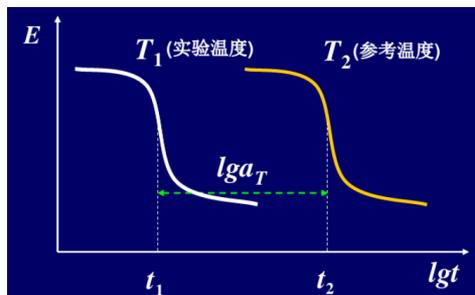
Laplace变换

研究内容二：夹层结构弯曲蠕变理论模型

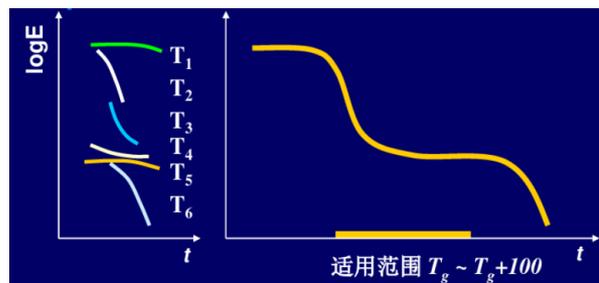
- 难点2: 温度荷载共同作用：（1）温度引起热膨胀变形差异；（2）材料具有温度依赖性（耦合）

粘弹性可作为时间函数表示称为**时间谱**，也可以作为温度的函数表示称为**温度谱**。粘弹性性质的两种谱（时间谱、温度谱）在一定的条件下可以进行互相转换，即同一个力学松弛可以在较高温度较短时间观察，也可在较低温度较长时间观察。**升高温度与延长观察时间对聚合物的粘弹性为是等效的**，这称为**时温等效原理**。

时温等效原理常借助WLF方程中的转化因子 α_T 来实现，即可以借助 α_T 可将某一温度下的粘弹性数据转为为另一温度下的粘弹数据。



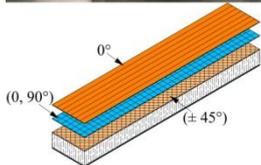
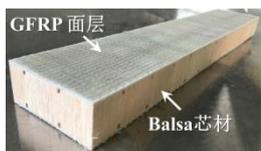
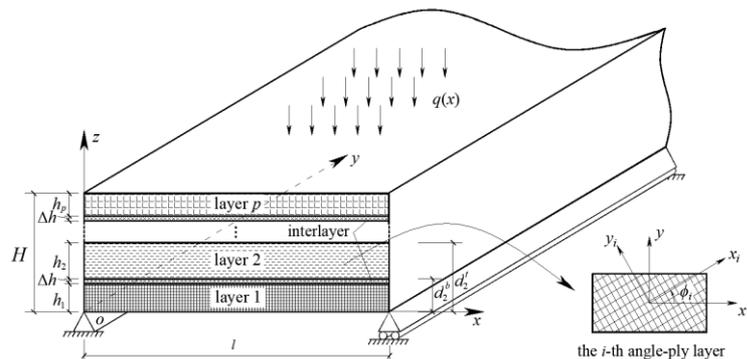
时温等效原理示意图



位移因子的确定

研究内容二：夹层结构弯曲蠕变理论模型

■ 难点3: 各项异性及铺设角度



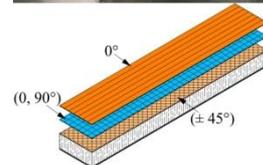
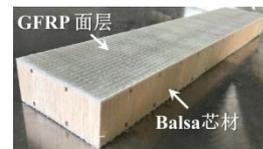
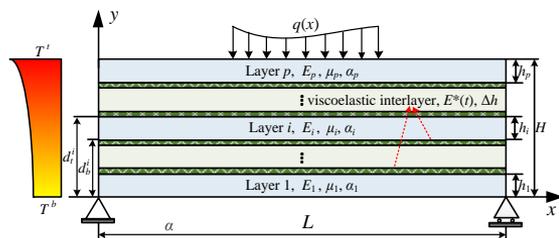
$$C_i = R_i C_i' R_i^T$$

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_i & \sin^2 \phi_i & 0 & 2 \sin \phi_i \cos \phi_i & 0 & 0 \\ \sin^2 \phi_i & \cos^2 \phi_i & 0 & -2 \sin \phi_i \cos \phi_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \phi_i \cos \phi_i & \sin \phi_i \cos \phi_i & 0 & \cos^2 \phi_i - \sin^2 \phi_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \phi_i & \sin \phi_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \phi_i & \cos \phi_i \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} u_m^i(z, t) \\ v_m^i(z, t) \\ w_m^i(z, t) \\ \sigma_{z,m}^i(z, t) \\ \tau_{xz,m}^i(z, t) \\ \tau_{yz,m}^i(z, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\alpha_m & 0 & \frac{c_{55}^i}{f_1^i} & -\frac{c_{56}^i}{f_1^i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{c_{56}^i}{f_1^i} & \frac{c_{66}^i}{f_1^i} \\ \frac{c_{13}^i}{c_{33}^i} \alpha_m & \frac{c_{34}^i}{c_{33}^i} \alpha_m & 0 & \frac{1}{c_{33}^i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_m & 0 \\ \frac{f_2^i}{c_{33}^i} \alpha_m^2 & \frac{f_3^i}{c_{33}^i} \alpha_m^2 & 0 & -\frac{c_{13}^i}{c_{33}^i} \alpha_m & 0 & 0 \\ \frac{f_3^i}{c_{33}^i} \alpha_m^2 & \frac{f_4^i}{c_{33}^i} \alpha_m^2 & 0 & -\frac{c_{34}^i}{c_{33}^i} \alpha_m & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_m^i(z, t) \\ v_m^i(z, t) \\ w_m^i(z, t) \\ \sigma_{z,m}^i(z, t) \\ \tau_{xz,m}^i(z, t) \\ \tau_{yz,m}^i(z, t) \end{bmatrix}$$

研究内容二：夹层结构弯曲蠕变理论模型

■ 难点4: 多层异质材料



将界面衔接条件中的四个应力和位移分量写成矩阵形式 $\mathbf{R}_m^i(y) = \mathbf{M}_m^i(y)\mathbf{C}_m^i$

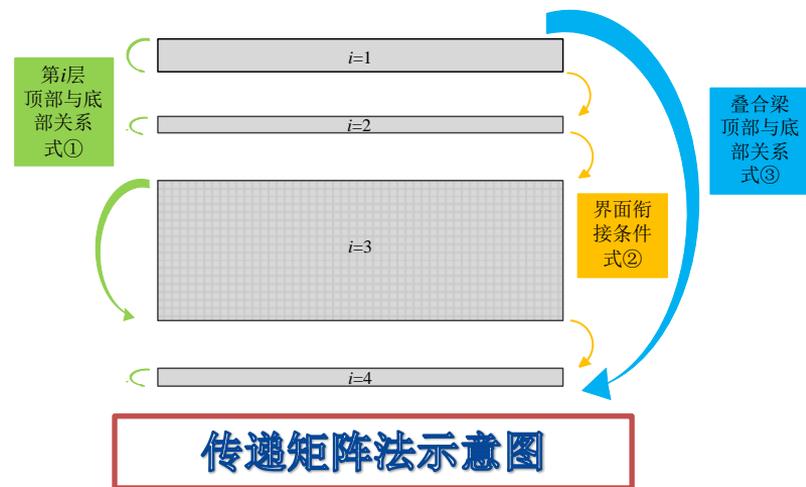
把式中 y 分别取 d_{i-1} 和 d_i , 则可的到以下关系:

$$\textcircled{1} \quad \mathbf{R}_m^i(d_i) = [\mathbf{M}_m^i(d_i)\mathbf{M}_m^i(d_{i-1})^{-1}]\mathbf{R}_m^i(d_{i-1})$$

加入界面衔接条件, 则 $\textcircled{2} \quad \mathbf{R}_m^{i+1}(d_i) = \mathbf{K}_i\mathbf{R}_m^i(d_i)$

重复使用 $\textcircled{1}$ $\textcircled{2}$, 可以得到梁最顶部和最底部关系:

$$\textcircled{3} \quad \mathbf{R}_m^4(d_4) = \left[\prod_{i=4}^2 \mathbf{M}_m^i(d_i)(\mathbf{M}_m^i(d_{i-1}))^{-1}\mathbf{K}_{i-1} \right] \mathbf{M}_m^1(d_1)(\mathbf{M}_m^1(d_0))^{-1}\mathbf{R}_m^1(d_0)$$



研究内容二：夹层结构弯曲蠕变理论模型

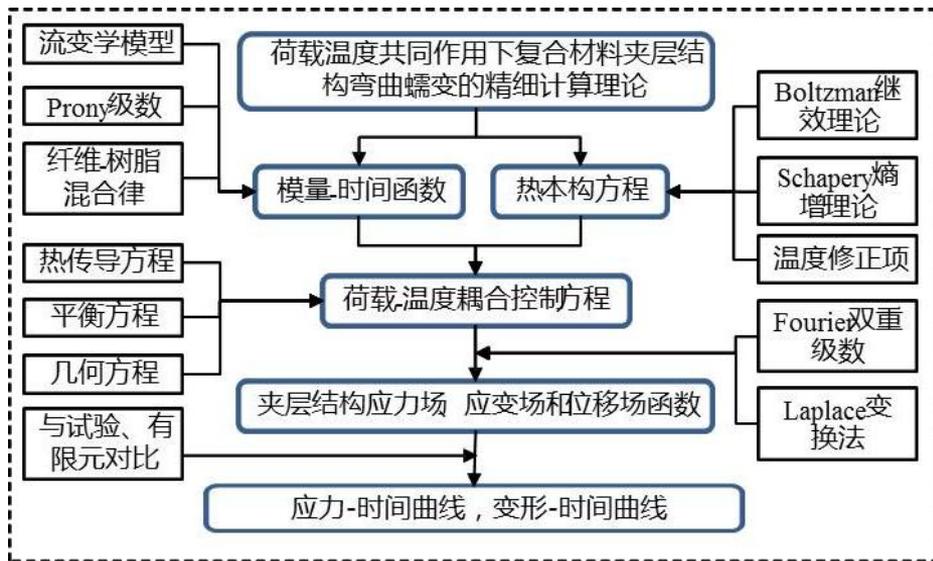
■ 温度荷载耦合作用下夹层结构弯曲蠕变理论模型

本项目提出的荷载-温度耦合粘弹性本构

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(T, M, t) &= \int_0^t Q_{ijkl}(T, M, t - t') \frac{d}{dt'} [\varepsilon_{kl}(t') \\ &\quad - \alpha_{kl} \Delta T(t') - \beta_{kl} \Delta M(t')] dt' \end{aligned}$$

各项异性复合材料理论

$$\begin{cases} \sigma_j^i = c_{jk}^i \gamma_k^i \\ \gamma_{kj}^i = 0.5(u_{k,j}^i + u_{j,k}^i) \\ \sigma_{kj,j}^i = 0 \end{cases}$$

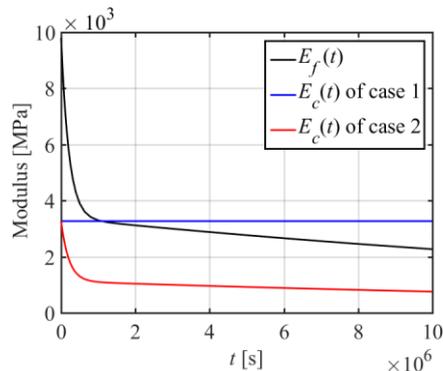


提出了夹层结构弯曲蠕变理论模型

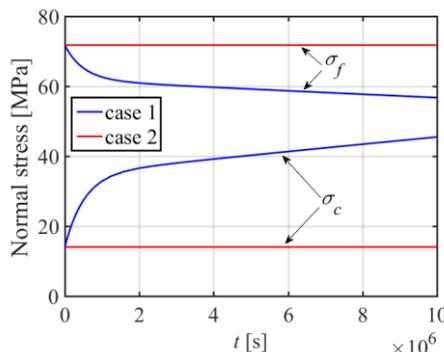
- ◆ 解决了试验拟合经验公式物理意义不明确，适用性较差的问题
- ◆ 解决了有限元蠕变分析耗时长的问题
- ◆ 为复合材料夹层结构的工程应用提供的设计依据

研究内容二：夹层结构弯曲蠕变理论模型

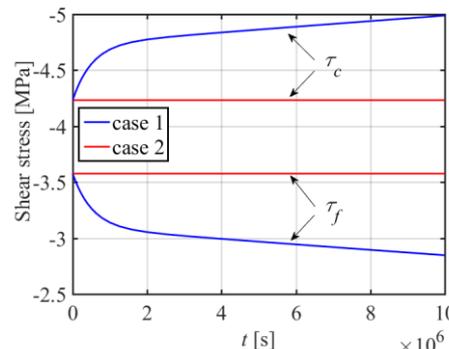
■ 案例分析



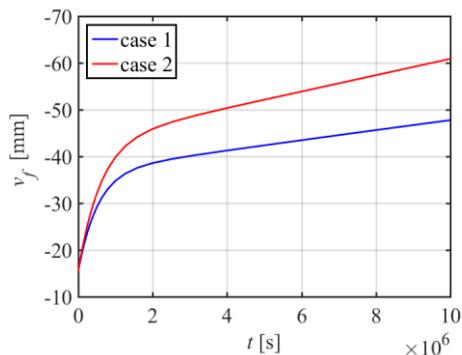
(a) 模量退化模式



(b) 正应力-时间曲线



(c) 剪应力-时间曲线

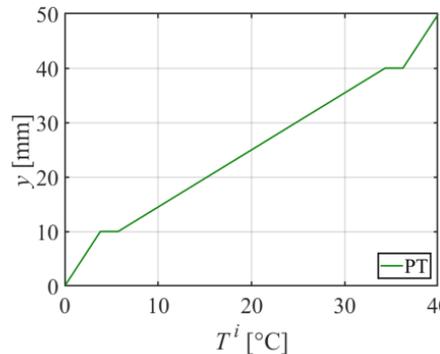


(d) 挠度-时间曲线

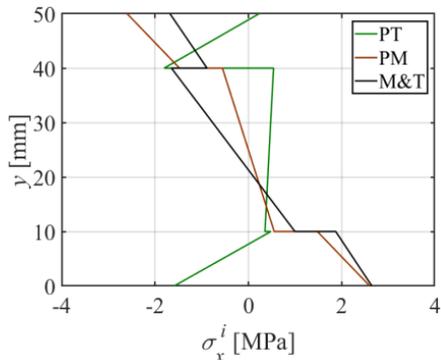
- ◆ 各层模量按比例退化时，应力不会随时间变化，呈现出弹性材料的性质，并且由于材料层刚度的退化导致蠕变的发生，也即挠度的增加；
- ◆ 而不按比例退化时，应力也会随着时间发生变化，向相对模量大的区域转移。

研究内容二：夹层结构弯曲蠕变理论模型

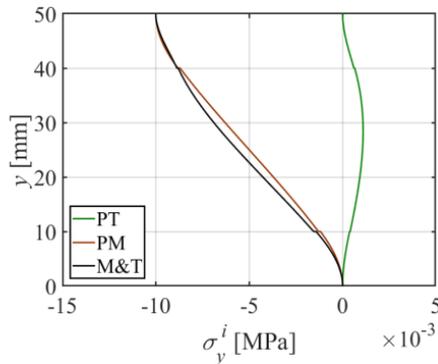
■ 案例分析



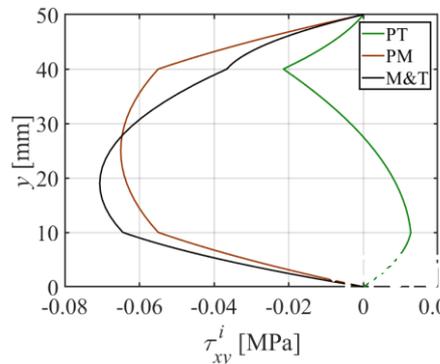
(a) 温度分布



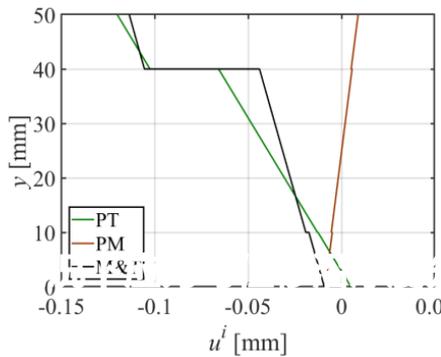
(b) 纵向正应力分布



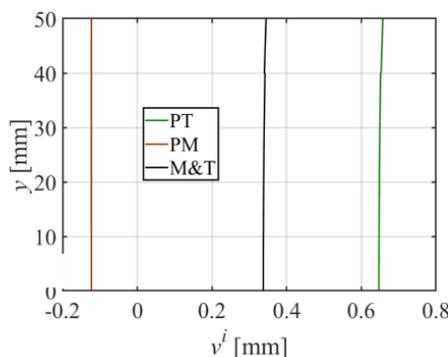
(c) 横向正应力分布



(d) 剪应力分布



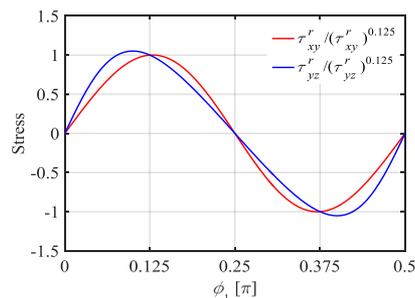
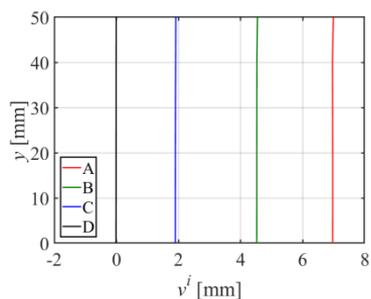
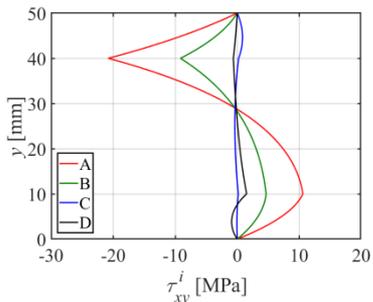
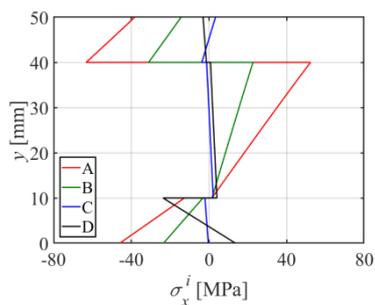
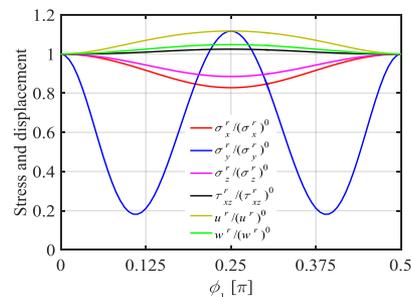
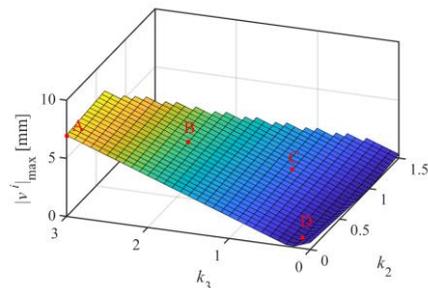
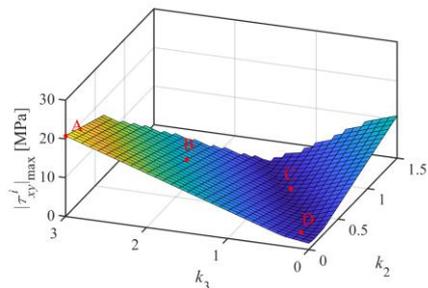
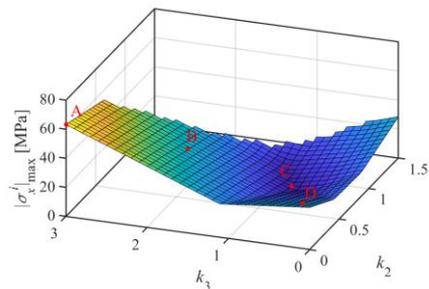
(e) 纵向位移分布



(f) 横向位移分布

温度荷载耦合情况下的结果不是纯荷载和纯温度情况下的叠加，这意味着**经典的叠加原理不适用**。这是因为温度场不仅导致相邻层的热膨胀差异，还导致**粘弹性材料的温度依赖性**。

研究内容三：夹层结构弯曲蠕变理论模型



基于提出的理论模型，通过调整各层厚度比、各层材料配置、纤维铺设角度、热膨胀系数组合，可以对荷载-温度耦合作用下的复合材料夹层结构长期应力和变形进行优化，通过优化设计，夹层结构的力学性能提升显著，同时还解决层间应力突变引起的界面失效问题。

研究成果

序号	作者	期刊	年/卷/期/页码	分区	影响因子
1	F. Yu, B. Guan, P. Wu* , et al.	<i>Thin Wall. Struct.</i>	2022. 171, 108766	SCI-1区	5.881
2	Y. Gao, F. Yu, P. Wu*	<i>Thin Wall. Struct.</i>	2022. 174, 109128	SCI-1区	5.881
3	P. Wu* , F. Yu, K. Yue, et al.	<i>Compos. Struct.</i>	2022. 300, 116159	SCI-1区, TOP	6.603
4	P. Wu* , M. Wang, H. Fang	<i>Compos. Struct.</i>	2021, 259,113240	SCI-1区, TOP	6.603
5	P. Wu* , Z.Y. Yang, X. Huang, et al.	<i>Compos. Struct.</i>	2020, 249,112492	SCI-1区, TOP	6.603
6	Z.Y. Yang, P. Wu* , W.Q. Liu, et al.	<i>Int. J. Appl. Mech.</i>	2020, 12(6), 2050062	SCI 3区	3.224
7	P.F. Liu*, F. Yu, P. Wu* , et al.	<i>Int. J. Appl. Mech.</i>	2021.13(09),215010 8	SCI 3区	3.224
8	M. Wang, Z.Y. Yang, P. Wu* , et al.	<i>Mech. Based Des. Struc.</i>	2021	SCI 4区	2.386

*代表通讯作者

**感谢各位聆听，
恳请批评指正！**