arXiv:2304.07291v1 [cs.CE] 6 Apr 2023

复合材料吸湿相场断裂建模

Kit Au-Yeung[1], Adria Quintanas-Corominas[2,3], Emilio Mart´ınez-Pa˜neda[2] 和Wei Tan[1*]

[1]伦敦玛丽女王大学工程与材料科学学院，Mile End Road，伦敦，E1 4NS，英国。[2]伦敦帝国学院土木与环境工程系，Exhibition Road，伦敦，SW7 2AZ，英国。[3]AMADE，赫罗纳大学，Av. Universitat de Girona 4，赫罗纳，17003，西班牙。

*通讯作者。电子邮箱：wei.tan@qmul.ac.uk；

摘要

本文研究含水量对复合材料退化行为的影响。本文建立了一个耦合相场框架，考虑水分扩散、吸湿膨胀和断裂行为。该多物理场框架用于探究复合材料在微观、介观和宏观尺度上的损伤演化。微观尺度单胞模型表明，纤维与基体吸湿膨胀不匹配会导致界面脱粘。介观尺度铺层级模型显示，纤维分布对材料性能的影响较小，而含水量增加会促进界面脱粘。宏观尺度层合板级模型表明，与横向铺层相比，水分会使纵向铺层产生更严重的损伤。本研究为理解和预测复合材料的环境辅助退化开辟了新途径。

关键词：复合材料、相场模型、吸湿膨胀、水分扩散

1 引言

轻质复合材料凭借其高比强度/比刚度和耐腐蚀性，已广泛应用于航空航天、风能和海洋结构领域。然而，复合材料对水分和温度等环境条件非常敏感 [1]。研究发现，水分会通过纤维-基体界面脱粘 [2], 吸湿膨胀 [3] 以及基体塑化 [4–6]；水分诱导的复合材料退化示例见图1。据报道，玻璃纤维环氧树脂复合材料吸收水分后，拉伸强度最多可降低 60% [7]。众所周知，复合材料的吸湿膨胀会导致纤维-基体界面脱粘。对于亚麻纤维等天然纤维，这一问题尤为明显，因为它们本身具有亲水性，且对环境湿度非常敏感 [8]。水分还会降低复合材料的玻璃化转变温度，影响其长期耐久性 [9]。因此，深入理解水分相关的退化机制对于开发耐水复合材料至关重要。

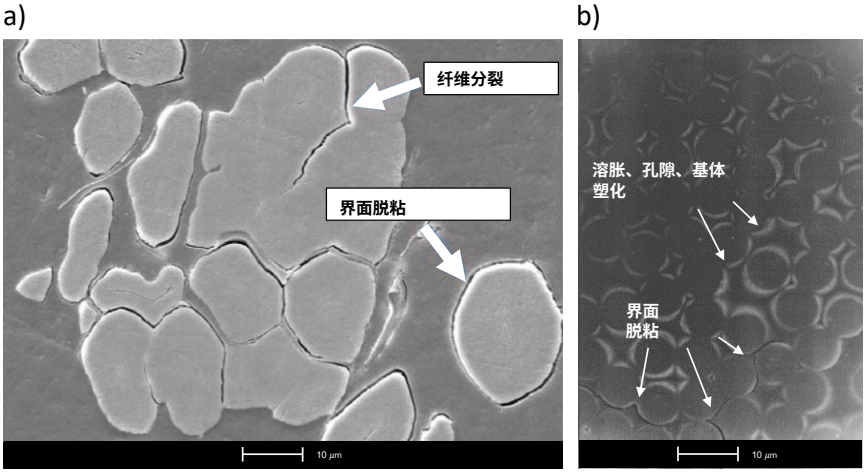


图 1：湿气诱导的复合材料退化示例：(a) 亚麻纤维/环氧树脂复合材料中的湿气诱导脱粘和纤维分裂 [10], 以及 (b)石墨/环氧树脂复合材料中的湿气诱导界面微裂纹 [7]。

大量实验研究致力于测量吸湿量及其后续材料退化 [4, 5, 10–14]。Buehler 和 Seferis [4]发现，吸水会导致玻璃

纤维增强塑料（玻璃纤维增强塑料）。Sateesh 等人 [5] 报告称，玻璃纤维增强塑料在湿热环境中暴露六个月后，弯曲模量下降了 20%–25%。LeBlanc 和 LaPlante [14] 研究了混合模式分层扩展，结果显示，不同加载模式下的分层韧性下降了 25%–62%。Lu 等人 [10]报告称，相对湿度升至 97% 时，亚麻纤维-环氧树脂复合材料的弯曲性能最多下降了 20%。然而，要通过实验对长时间尺度上的微观损伤演化进行定量分析，存在固有挑战；而且，仅凭实验室测试往往难以深入理解力学与吸湿环境条件耦合作用下的材料退化机制。这促使研究人员开发计算模型，以理解复合材料中的水分辅助退化。一些研究着重于模拟含有固定预裂纹或空穴的复合材料中的水分扩散。Sinchuk 等人 [15]基于菲克扩散理论建立了介观尺度模型，用以表征水分扩散路径和局部水分浓度。Gagani 和 Echtermeyer [16] 将代表性体积单元（RVE）模型与菲克扩散相结合，以研究含有预存裂纹和分层区域的复合材料层合板中的传输过程。Bourennane 等人 [17] 采用相同方法，并在 RVE 模型中考虑了空穴的作用。Chilali 等人 [2] 模拟了亚麻织物增强环氧树脂复合材料的水弹性行为，并获得了纤维-基体界面的应力分布，但未对界面脱粘进行显式建模。一些研究者还考虑了扩展裂纹的作用。例如，Wong 等人 [18] 采用移动节点单元模拟了水分存在时的分层扩展。然而，这会带来一定的网格敏感性，且需要复杂的实现，因为必须重新划分网格，并显式处理移动裂纹面处的边界条件。Cheng 等人 [19] 建立了一种考虑损伤演化的湿热连续介质介观尺度模型。该模型以解耦方式求解扩散-应力-损伤问题，因此本质上依赖于网格。采用变分相场断裂模型可以克服这些局限。

相场断裂模型以Griffith热力学原理 [20] 为基础，已广泛用于预测多种材料中裂纹的演化，包括类岩材料 [21, 22], 陶瓷[23, 24], 延性金属 [25, 26], 功能梯度材料 [27, 28],多孔介质 [29, 30], 形状记忆材料 [31, 32], 冰 [33, 34] 和复合材料[35, 36]。此外，该模型已成功用于研究微观尺度 [37, 38]纤维增强复合材料中的断裂和桥接行为。此外，相场断裂建模可轻易与描述其他物理现象的方程耦合，因此在处理多物理场问题时尤为常用。例如，氢脆 [39, 40], 锂离子电池退化 [41, 42],

热力学断裂 [43, 44]，和应力腐蚀开裂 [45, 46]。然而，利用多物理场相场公式研究复合材料的环境辅助退化，仍是一个相对鲜少探索的领域。直到最近，才有两项相关研究发表。Arash 等人 [47] 提出了一种唯 phenomenological 相场模型，用于研究水热效应对纳米复合材料失效行为的影响。在该研究中，传输问题并未得到明确求解，而是假设水分均匀分布。Ye 和 Zhang [48] 提出了一种耦合相场模型，用于描述应力、水分与复合材料裂纹扩展之间的相互作用。他们的框架纳入了水分扩散引起的吸湿膨胀现象，以及聚合物基体的黏弹性行为。他们还提出了一种所谓的“裂纹过滤理论”，以对相场断裂和水分扩散中的尖锐纤维-基体界面进行正则化。裂纹过滤函数控制可通过裂纹扩散的水分通量。不过，确定裂纹过滤函数的系数仍是一项挑战。

本文提出一种基于相场的新型多物理场框架，用于描述复合材料中的水分辅助断裂。该框架结合了：（i）水分扩散；（ii）吸湿膨胀；（iii）相场断裂；以及（iv）纤维-基体界面脱粘的弥散界面描述。通过研究涵盖纤维、铺层和层合板尺度的三个代表性基准案例，展示了所提模型的潜力。所得结果表明，该框架不仅能够为复合材料环境辅助退化的基本机制提供新的见解，还可作为一种工具，实现技术相关尺度上的耐久性预测。

2 数值模型

本节将建立一种新型多物理场相场模型，以描述水分扩散、损伤演化和应力再分布之间的耦合，如图 2 所示。首先，介绍断裂的相场描述（第 2.1 节）。随后，在第 2.2 节中，建立水分传输的控制方程，包括吸湿应变的定义。接着提出弥散界面理论，用于模拟纤维-基体脱粘（第 2.3 节）。这三个主要方面的耦合构成了一个热力学一致框架，能够捕捉质量传输、吸湿膨胀、裂纹演化与应力再分布之间的相互作用。

2.1 相场断裂

我们使用相场模型来预测纤维、基体和纤维-基体界面的开裂（脱粘）。相场断裂模型建立在

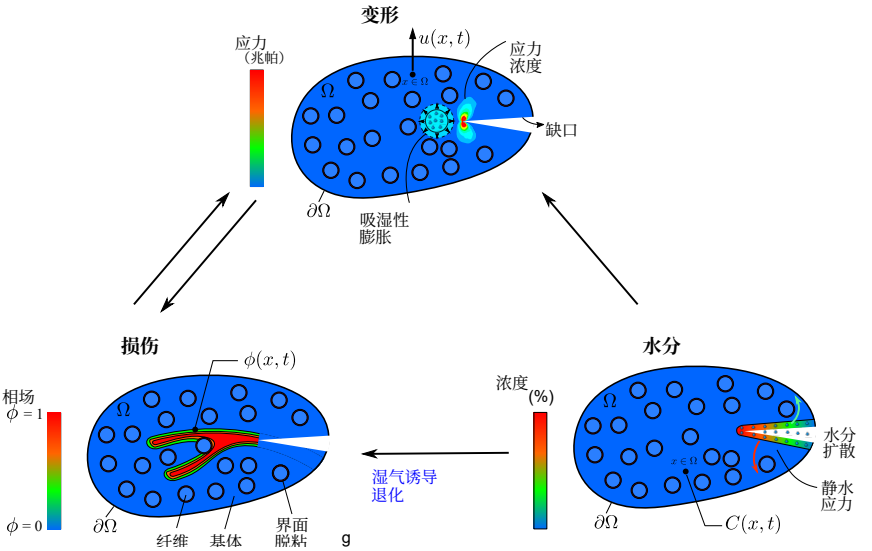


图 2：一种耦合多物理场相场模型，用于捕捉纤维、基体和纤维-基体界面中应力、水分与开裂之间的相互作用。

Griffith 的热力学框架 [20] ——裂纹扩展时，势能的减少必须与新自由表面形成所导致的表面能增加相平衡。对于发生规定的位移的弹性固体，这可以用数学方式表示如下：

$$\frac{\mathrm{d}\mathscr{E}}{\mathrm{d}A}=\frac{\mathrm{d}\Psi(\boldsymbol{\varepsilon}^e)}{\mathrm{d}A}+\frac{\mathrm{d}W_c}{\mathrm{d}A} \tag{1}$$

其中 $\mathscr{E}$ 为总能量，$\mathrm{d}A$ 为裂纹面积的增量，$\Psi=\int\psi\mathrm{d}V$ 为弹性应变能，其中 ψ 为弹性应变能密度， $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ 为弹性应变张量，而 W_c 为形成两个新表面所需的功。方程（1）中的最后一项通常称为临界能量释放率 $G_c=\mathrm{d}W_c/\mathrm{d}A$，这是表征固体断裂抗力的材料属性。对于区域 Ω 中含有表面为 Γ的裂纹的固体，格里菲斯能量平衡可用变分形式表示为[49]:

$$\mathscr{E}=\int_{\Omega}\psi(\boldsymbol{\varepsilon}^e)\,\mathrm{d}V+\int_{\Gamma}G_c\,\mathrm{d}\Gamma \tag{2}$$

因此，可以将裂纹的演化预测为储存能与断裂能之间的交换。然而，由于 2 式中的未知量 Γ 性质未知，求解该式的最小值在计算上颇具挑战。为克服这一问题，可以利用相场范式对 Griffith 泛函进行正则化。裂纹-固体材料界面不再是尖锐且不连续的，而是被弥散化

到有限区域内，并使用相场序参量 ϕ 进行追踪。相场类似于损伤变量，在完整材料点处取值为 $\phi = 0$ ，在裂纹内部取值为 $\phi = 1$。此外，根据损伤力学的论证，固体的刚度通过退化函数 $g(\phi) = (1-\phi)^2$ 进行退化。因此，正则化泛函可写为

$$\mathscr{E}_\ell(\boldsymbol{\varepsilon}^e, \phi) = \int_\Omega (1-\phi)^2 \psi(\boldsymbol{\varepsilon}^e)\, \mathrm{d}V + \int_\Gamma G_c \left(\frac{\phi^2}{2\ell} + \frac{\ell}{2} \mid \nabla\phi \mid^2 \right) \mathrm{d}V \tag{3}$$

其中，我们采用了所谓AT2 相场断裂模型 [50]固有的退化函数和裂纹密度函数的本构选择。正如通过 Γ-收敛严格证明的那样，正则化泛函 $\mathscr{E}_\ell$ (3)在选取相场长度尺度 $\mathscr{E}$ (2时收敛。相场长度尺度$\ell \to 0^+$的存在使模型具有非局部性，从而确保网格客观性 [51]。通过对 $\mathscr{E}_\ell$ 分别关于 $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ 和 ϕ求变分，并注意到弹性应变张量是位移向量 $\boldsymbol{\varepsilon}^e(\mathbf{u})$的函数，且应力张量为 $\boldsymbol{\sigma} = \partial\psi/\partial\boldsymbol{\varepsilon}^e$，再应用高斯散度定理，即可直接得到断裂-变形耦合问题的强形式。因此，强形式方程为

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left((1-\phi)^2 \boldsymbol{\sigma}_0 \right) &= \mathbf{0} \quad \text{in} \quad \Omega \\ G_c \left(\frac{\phi}{\ell} - \ell \nabla^2 \phi \right) - 2(1-\phi)\, \psi(\boldsymbol{\varepsilon}^e) &= 0 \quad \text{in} \quad \Omega \end{aligned} \tag{4}$$

其中， $\boldsymbol{\sigma}_0$ 表示未损伤应力张量； $\boldsymbol{\sigma} = g(\phi)\boldsymbol{\sigma}_0$。

我们采用应变能分解，以防止压应力状态下的裂纹扩展。根据体积-偏差分解法 [52]，体积应变能和偏差应变能可以受到损伤作用，而压缩体积应变能则不会。因此，弹性应变能分解为 $\psi = \psi^+ + \psi^-$，其中

$$\psi^+ = \frac{1}{2}\lambda \langle \mathrm{tr}\,(\boldsymbol{\varepsilon}^e) \rangle_+^2 + \mu \left(\boldsymbol{\varepsilon}^{e\prime} : \boldsymbol{\varepsilon}^{e\prime} \right) \quad \text{and} \quad \psi^- = \frac{1}{2}\lambda \langle \mathrm{tr}\,(\boldsymbol{\varepsilon}^e) \rangle_-^2 \tag{5}$$

其中， $\boldsymbol{\varepsilon}^{e\prime}$ 是弹性应变张量的偏差部分， $\langle x \rangle_\pm = 1/2\,(x \pm |x|)$是麦考利括号。此外，损伤必须具有不可逆性，即$\phi(\mathbf{x}\ t) \geq 0$。为此，我们引入历史场 $\mathcal{H}$ ，以存储损伤驱动力中的弹性贡献。也就是说，对于当前时刻 t，在总时长 t_t内，历史场可定义为:

$$\mathcal{H} = \max_{t \in [0, t_t]} \left(\psi^+(t) \right) . \tag{6}$$

相场演化方程可重新表述为:

$$G_c\left(\frac{\phi}{\ell}-\ell\nabla^2\phi\right)-2(1-\phi)\,\mathcal{H}=0\quad\text{in}\quad\Omega \tag{7}$$

2.2 水分扩散

水分扩散遵循菲克第一定律。因此，对于水分扩散系数 D，水分浓度 C 随时间 t 的变化为:

$$\frac{\partial C}{\partial t}=D\nabla^2 C \tag{8}$$

水分扩散的驱动力由化学势 μ 的梯度决定。水分的化学势为:

$$\mu=\mu^0+RT\ln C \tag{9}$$

其中， R 为气体常数， T 为绝对温度， μ^0 表示标准态下的化学势。随后，根据线性昂萨格关系定义质量通量:

$$\mathbf{J}=-\frac{DC}{RT}\nabla\mu=-D\nabla\mathrm{C} \tag{10}$$

质量守恒将水分浓度的变化率与通过外表面的水分通量联系起来。利用散度定理，可得平衡方程的强形式:

$$\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t}+\nabla\cdot\mathbf{J}=0 \tag{11}$$

对于任意标量场， δC，方程（11）的变分形式为:

$$\int_\Omega\delta C\left(\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t}+\nabla\cdot\mathbf{J}\right)\mathrm{d}V=0 \tag{12}$$

利用散度定理并重新整理方程，可得弱式:

$$\int_\Omega\left[\delta C\left(\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t}\right)-\mathbf{J}\cdot\nabla\delta\mathrm{C}\right]\mathrm{d}V+\int_{\partial\Omega_q}\delta Cq\,\mathrm{d}S=0 \tag{13}$$

其中 $q=\mathbf{J}\cdot\mathbf{n}$ 是通过表面 $\partial\Omega_q$离开固体的浓度通量。将质量通量代入水分化学势公式（10），即公式（13），可得水分扩散的弱式:

$$\int_\Omega\left[\delta C\left(\frac{1}{D}\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t}\right)+\nabla\mathrm{C}\nabla\delta\mathrm{C}\right]\mathrm{d}V=-\frac{1}{D}\int_{\partial\Omega_q}\delta Cq\,\mathrm{d}S \tag{14}$$

水分浓度随时间的变化会导致吸湿应变 $\boldsymbol{\varepsilon}^m$。吸湿应变与水分浓度的变化呈线性关系

$$\boldsymbol{\varepsilon}^m = \alpha \left(C - C_0 \right) \tag{15}$$

其中， α 为湿胀系数， C_0 为块体聚合物中的初始含湿量。因此，材料的本构行为包含了此类应变，从而得到以下柯西应力定义，

$$\boldsymbol{\sigma}_0 = \mathcal{C}\boldsymbol{\varepsilon}^e = \mathcal{C}\left(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^m \right) \tag{16}$$

其中， $\mathcal{C}$ 为线弹性刚度矩阵， $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为总应变张量。在这方面，值得注意的是，假设纤维为横观各向同性材料。

2.3 弥散界面

尖锐界面的定义使耦合多物理场水分驱动断裂问题的建模变得复杂。相反，我们选择采用弥散界面范式，在纤维-基体界面上对相关材料属性进行插值，从而捕捉纤维-基体脱粘以及水分沿纤维-基体界面的扩散。为此，我们再次利用相场范式，首先定义界面与体相材料之间的过渡区域。因此，定义相场指示参数如下：

$$\begin{cases} \mathfrak{d} - \ell_{\mathfrak{d}}^2 \, \nabla^2 \mathfrak{d} = 0 & \text{in} \quad \Omega \\ \mathfrak{d}\left(0\right) = 1 & \text{on} \quad \Gamma \\ \nabla \mathfrak{d} \cdot \mathbf{n} = 0 & \text{on} \quad \partial\Omega \end{cases} \tag{17}$$

与上文给出的相场断裂描述类似（见第 2.1 节），一个长度尺度参数 $\ell_{\mathfrak{d}}$ 将发挥作用，以控制界面区域的宽度。为简单起见，在本文中，我们假设相场断裂长度尺度 ℓ 与界面指示参数的长度尺度 $\ell_{\mathfrak{d}}$大小相同。此外，采用相场序参量$\mathfrak{d}$ 在两个极限状态之间进行插值： $\mathfrak{d} = 0$，对应体相；以及 $\mathfrak{d} = 1$，表示界面；见图3a。利用插值函数$h(\mathfrak{d}) = (1 - \mathfrak{d})^n$ 在界面（上标 I）与体相（上标（i）之间实现平滑过渡。选择后者是为了强调体相可以对应两个区域：聚合物基体（i） $= m$或纤维（i） $= f$。基于此，我们利用这一弥散界面理论对材料韧度、扩散系数和湿胀系数进行插值，

$$G_c = h(\mathfrak{d}) \left(G_c^{(i)} - G_c^I \right) + G_c^I \tag{18}$$

$$D = h(\mathfrak{d}) \left(D^{(i)} - D_I \right) + D_I \tag{19}$$

$$\alpha = h(\mathfrak{d}) \left(\alpha^{(i)} - \alpha_I \right) + \alpha_I \tag{20}$$

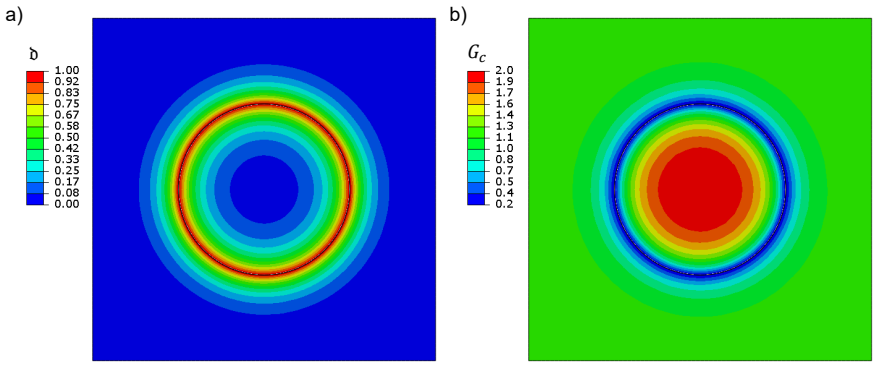


图 3：单纤维模型中弥散界面方法的示意图：(a) 相场界面指示函数 ð，以及 (b) 材料韧度在基体-界面-纤维区域中的插值。子图 (a) 展示了相场指示函数 ð 如何在界面（ð = 1）和体相（ð = 0）区域之间变化；子图 (b) 则说明了材料参数如何在纤维（高韧度）、界面（低韧度）和基体区域（中等韧度）中变化。

在分析前对材料属性进行插值，实际上使得我们能够模拟纤维-基体界面脱粘（其特征由该过程的断裂能 G_c^I表征），并捕捉纤维-基体界面的不同性质对水分传输和吸湿膨胀的影响。在这方面，为界面和体相区域指定不同的扩散系数，可体现水分子穿过双材料界面时固有的不同能垒。这一新范式为纳入水分扩散特性提供了一种简便途径。在附录A 中，我们将详细介绍如何通过用户子程序ABAQUS将这一弥散界面方法实现于商业有限元软件[1]。

3 有限元实现

下面我们介绍变形和断裂问题的有限元（FE）离散化（第 3.1 节），接着介绍水分传输方程的离散化（第 3.2 节），以及耦合问题及其实现（第3.3 节）。这些小节均采用以下方式对主要场的节点值进行插值：

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{N}_i \mathbf{u}_i \,, \quad \phi = \sum_{i=1}^{n} N_i \phi_i \,, \quad C = \sum_{i=1}^{n} N_i C_i \tag{21}$$

[1]开发的代码可从以下网址免费下载：www.imperial.ac.uk/ mechanics-materials/codes和 www.empaneda.com/codes

此处采用维度记号， n 表示节点数，$\boldsymbol{N}_i$ 为插值矩阵，即以节点形函数 N_i 为分量的对角矩阵。类似地，相应的梯度量离散如下：

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{B}_i^u \mathbf{u}_i \,, \quad \nabla\phi = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{B}_i \phi_i \,, \quad \nabla C = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{B}_i C_i \tag{22}$$

其中， $\boldsymbol{B}_i^u$ 表示标准应变-位移矩阵，$\mathbf{B}_i$ 为形函数空间导数构成的向量。

3.1 变形相场问题的有限元离散

回顾虚功原理，并考虑第 2 节中概述的本构关系。耦合变形相场断裂问题的弱式可表示为

$$\int_\Omega \left[(1-\phi)^2 \, \boldsymbol{\sigma}_0 : \delta\boldsymbol{\varepsilon} - 2(1-\phi)\delta\phi \, \mathcal{H} + G_c \left(\frac{\phi}{\ell}\delta\phi + \ell \nabla\phi \cdot \nabla\delta\phi \right) \right] \mathrm{d}V = 0 \tag{23}$$

利用式（21）和（22）中给出的有限元离散，并考虑到式（23）必须对原始场变量的任意取值成立，可推导出如下残差：

$$\mathbf{r}_i^u = \int_\Omega \left\{ \left[(1-\phi)^2 + \kappa \right] (\boldsymbol{B}_i^u)^T \boldsymbol{\sigma}_0 \right\} \mathrm{d}V \tag{24}$$

$$r_i^\phi = \int_\Omega \left[-2(1-\phi) N_i \, \mathcal{H} + G_c \left(\frac{\phi}{\ell} N_i + \ell \mathbf{B}_i^T \nabla\phi \right) \right] \mathrm{d}V \tag{25}$$

其中， κ 是一个足够小的数值参数，用于在 $\phi = 1$ 时确保方程组具有良好的条件数。我们选择采用 $\kappa = 1\times10^{-7}$。随后，对残差关于增量节点变量求导，即可得到刚度矩阵的各分量，如下所示：

$$\boldsymbol{K}_{ij}^{\mathbf{u}} = \frac{\partial \mathbf{r}_i^{\mathbf{u}}}{\partial \mathbf{u}_j} = \int_\Omega \left\{ \left[(1-\phi)^2 + \kappa \right] (\boldsymbol{B}_i^{\mathbf{u}})^T \mathcal{C} \boldsymbol{B}_j^{\mathbf{u}} \right\} \mathrm{d}V \,, \tag{26}$$

$$K_{ij}^{\phi} = \frac{\partial r_i^\phi}{\partial \phi_j} = \int_\Omega \left\{ \left[2\mathcal{H} + \frac{G_c}{\ell} \right] N_i N_j + G_c \ell \mathbf{B}_i^T \mathbf{B}_j \right\} \mathrm{d}V \,. \tag{27}$$

3.2 质量传输问题的有限元离散

将式（14）离散化后，即可轻松得到水分传输问题的残差向量，其中 δC 是水分

浓度的任意变分；

$$r_i^C = \int_\Omega \left[N_i^T \left(\frac{1}{D} \frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t} \right) + \mathbf{B}_i^T \nabla C \right] \mathrm{d}V + \frac{1}{D} \int_{\partial\Omega_q} N_i^T q \, \mathrm{d}S \tag{28}$$

于是可定义扩散率矩阵，

$$K_{ij}^C = \int_\Omega \mathbf{B}_i^T \mathbf{B}_j \, \mathrm{d}V \, . \tag{29}$$

连同浓度容量矩阵，

$$M_{ij} = \int_\Omega N_i^T \frac{1}{D} N_j \mathrm{d}V \tag{30}$$

以及扩散通量向量，

$$f_i = -\frac{1}{D} \int_{\partial\Omega_q} N_i^T q \, \mathrm{d}S \tag{31}$$

随后，离散化后的水分传输方程为，

$$\boldsymbol{K}^C \mathbf{C} + \boldsymbol{M} \dot{\mathbf{C}} = \mathbf{f} \tag{32}$$

3.3 耦合方案

变形、扩散和相场断裂问题之间存在弱耦合。首先，质量传输通过吸湿膨胀影响断裂过程区的应力场。其次，由此产生的力学场驱动相场演化，并使固体的承载能力下降。线性化有限元系统，

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{K}^{\mathbf{u}} & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{K}^{\phi} & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{K}^{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \boldsymbol{\phi} \\ \boldsymbol{C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\boldsymbol{\phi}} \\ \dot{\boldsymbol{C}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{r}^{\mathbf{u}} \\ \boldsymbol{r}^{\phi} \\ \boldsymbol{r}^{C} \end{bmatrix} \tag{33}$$

采用增量方式求解，并使用牛顿-拉夫森方法。该求解方案遵循所谓的交错方法 [53], ，即依次求解位移、水分浓度和相场问题。该方法在有限元软件包 ABAQUS 中通过用户单元（UEL）子程序实现。如附录A所述，整体框架分两步实现。第一步，使用HETVAL 用户子程序引入弥散界面，方法是生成一个作为界面指示函数的标量场。第二步，进行物理模拟，使用UEL 用户子程序定义上述残差和刚度矩阵，并根据第一阶段定义的相场指示函数分配属性，具体见式（18）。

4 结果

下面展示所开发计算框架在跨尺度预测湿气诱导的复合材料退化方面的能力。首先，在第4.1节中，通过研究经历润湿和干燥过程的单纤维模型，探讨水分在产生机械变形和损伤中的作用。其次，采用旨在研究纤维分布对水分扩散及后续材料退化影响的微尺度模型，考察多根纤维（第4.2节）。第三，在第4.3节中，我们通过微尺度单边裂纹模型，关注机械载荷与水分传输之间的耦合。第四，采用介观尺度模型了解铺层级损伤分布，并将模型预测与实验进行比较（第4.4节）。最后，研究包含8层铺层的宏观尺度模型，以探究吸湿膨胀对层合板级结构完整性的影响。所有这些案例研究采用的材料均相同。我们重点研究由环氧基体和亚麻纤维构成的复合材料，其性能列于表1，其中也包括纤维-基体界面的性能。与合成材料相比，天然纤维是很有前景的可持续材料，但其具有亲水性，对潮湿环境极为敏感。

表1：亚麻纤维、环氧基体和环氧-亚麻界面的材料属性。

属性	环氧树脂	亚麻纤维	界面
E_{11} (兆帕)	3,600 [2]	31,500 [2]	
E_{22} (兆帕)	3,600 [2]	5,100 [2]	
ν_{12}	0.4 [2]	0.28 [2]	
ν_{23}	0.4 [2]	0.41 [2]	
G_c (N/mm)	1.2 [48]	2.1	0.213 [48]
D (mm^2/s)	1.45×10^{-6} [54, 55]	1.19×10^{-6} [56]	0.8×10^{-6}
α_{11}	0.6 [3]	1.06 [3]	0.1
α_{22}	0.6 [3]	0.85 [3]	0.1

4.1 微观尺度：单纤维模型

首先研究图 4a 所示的单纤维模型，以深入理解吸湿膨胀导致的界面损伤。复合材料的尺寸为 $H = W = 0.02$ mm，纤维直径为 $d = 0.01$ mm。顶部和底部边界的垂直位移固定，右边界的水平位移分量固定。换言之，未施加机械载荷，变形完全由湿度梯度引起的吸湿膨胀所致。在左边缘，对水分浓度施加边界条件。具体而言，采用两阶段过程：首先进行水分吸收阶段

，随后进入干燥阶段。第一阶段将含水量设定为 7.45% [2]，持续 2,000 秒。随后进入第二阶段，将水分降至 0%，并继续计算 5,000 秒。初始时，假设整个区域内的水分浓度为$C(t=0)=0$。如第 2.3 节所述，采用界面指示器模型来描述纤维-基体脱粘，并分别设定使环氧基体、亚麻纤维和界面断裂所需的断裂功（见表 1）。整个区域采用 1,862 个 8节点二次单元进行离散，特征单元尺寸为 0.0005 mm，是相场长度尺度 [53]的两倍小。图 4b 展示了区域中心（纤维中心）含水量随时间的变化。可以看出，初始时水分浓度迅速升高，最终达到饱和或平衡状态；2,000 秒后，含水量随之下降。

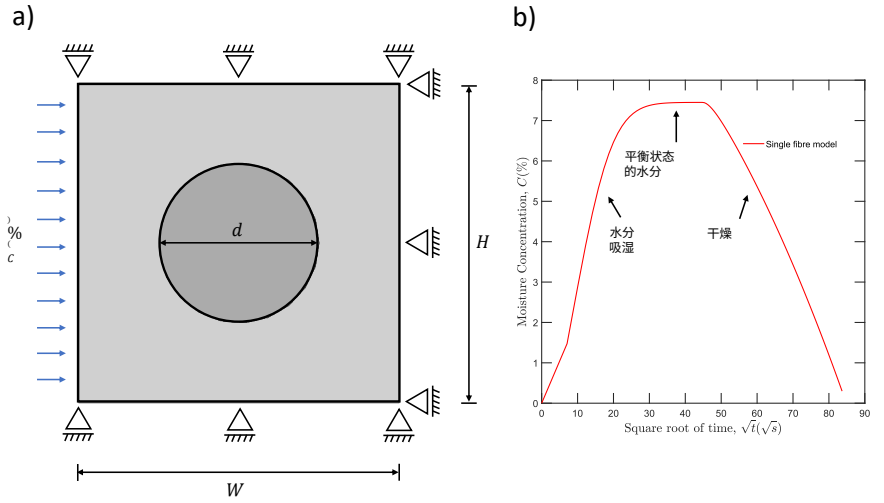


图 4：吸湿膨胀导致的单纤维模型界面损伤：(a) 几何形状和边界条件；(b) 区域中心水分含量随时间的变化，显示了吸湿阶段，随后是平衡平台，最后是干燥阶段。

所得结果如图5所示。图 $t=100$ 中的水分浓度等值线见图5a。 C 分布显示出明显的梯度，从而产生吸湿应变。由于纤维和基体-纤维界面的扩散率较低，水分前沿并不均匀。最终，这些浓度梯度会消失

随着平台阶段的到来。水分扩散对变形和损伤的影响见图5b-f，时间为 $t = 2,000$ s。具体而言，图5b显示了位移幅值等值线，揭示了吸湿膨胀的影响。产生的应力见图5d和e，分别给出了 σ_{xx} 和σ_{yy}的等值线。由于材料属性失配，可以看出最大拉伸应力出现在界面处。损伤分布如图5d所示；损伤在界面处累积，表明发生了纤维-基体界面脱粘。这种失效机制已在亚麻纤维复合材料中通过实验观察到 [10]——见图1b。最后，图5f显示了竖向反力随时间的变化。可观察到三个阶段，与图4b所示的三个水分含量阶段相似。随着水分扩散，吸湿膨胀效应增强，载荷随之增大，直至达到较为均匀的 C 分布；在干燥过程中，载荷最终下降。干燥过程中，应变和应力显著降低，但由于损伤不可逆性，界面处的相场损伤保持不变。

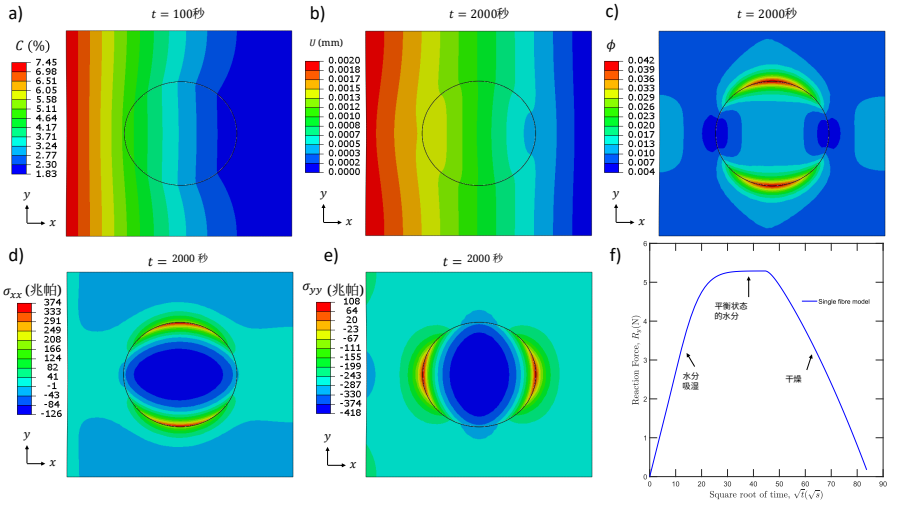


图5：吸湿膨胀导致的单纤维模型界面损伤：等值线分别表示 (a) 水分浓度、(b) 位移幅值、(c) 相场损伤、(d) σ_{xx} 应力分量和 (e) σ_{yy} 应力分量。结果展示了 $t = 100$ 秒时的情况 (a)，以及 $t = 2,000$ 秒时的情况 (b)-(e)。最后，子图 (f) 展示了竖向反力随时间的变化。

4.2 微观尺度：多纤维模型

随后采用该建模框架，深入探讨纤维分布对水分传输及后续材料退化的作用，

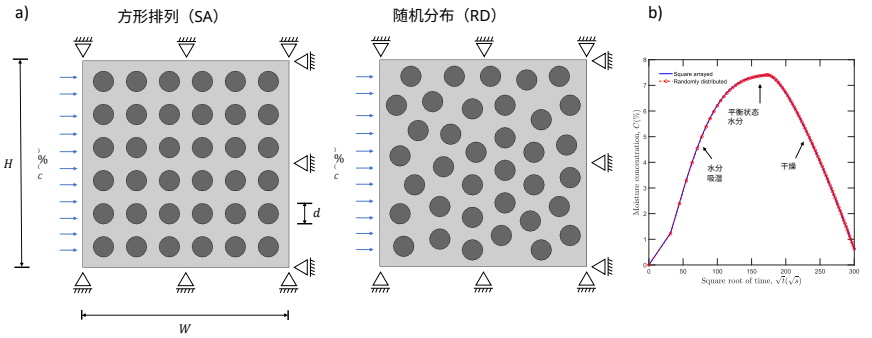


图 6：吸湿膨胀导致的多纤维模型中的界面损伤：(a) 方形排列（SA）和随机分布（RD）两种情况下的几何形状和边界条件；(b) 区域中心的含水量随时间的变化，显示了吸湿阶段、随后是平衡平台，最后是干燥阶段。

这一领域在现有文献中仍未得到探讨。为此，采用含有多根增强纤维的复合材料微尺度模型。考虑两种情形：（i）方形排列（SA）多纤维模型，其中36根纤维均匀分布在6列6行中（图6a）；（ii）随机分布（RD）多纤维模型，纤维数量与SA模型相同，但呈随机分布（图6b）。采用弥散界面方法，为所有纤维-基体界面赋予所需属性，并捕捉多处纤维-基体脱粘。在SA和RD两种情形下，复合材料域的尺寸为 $H = W = 0.1$ mm，纤维直径为 $d = 0.01$ mm。边界条件如图6所示：约束顶部和底部边界的垂直位移，并在右侧边缘施加水平位移。水分边界条件采用两步湿干分析。具体而言，对于初始干燥样品，首先采用狄利克雷边界条件 $C = 7.45\%$，持续30,000 s，以确保达到平衡状态。随后进入干燥阶段，将边界条件切换为 $C = 0$，并继续计算60,000秒。图6b展示了区域中心含水量的演变过程，可见三个不同阶段，与单纤维分析（第4.1节）中观察到的阶段相似。采用约60,000个带减缩积分的二次单元对复合材料域进行离散，特征单元长度为0.00045 mm，比 ℓ 和 ℓ_0 小两倍。

所得结果如图7 所示，分别为在 $t = 2,\ 000$ s 时的含水量等值线（图7a）、在 $t = 30,\ 000$ s 时的相场损伤（图7b），以及在 σ_{xx} 时的应力分量 $t = 30,\ 000$ s（图7c）；结果涵盖 SA 和 RD 两种纤维模型。两种情形呈现出相似的定性趋势。

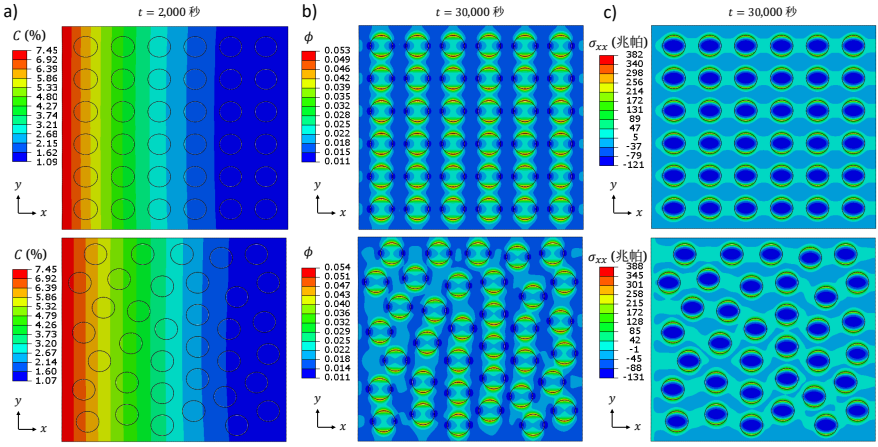


图 7：多纤维模型因吸湿溶胀导致的界面损伤：(a) 2,000 秒后的含水量等值线，(b) 30,000 秒后的相场损伤等值线，以及 (c) 30,000 秒后的 σ_{xx} 应力分量。上方的图对应方形排列（SA）多纤维模型，下方的图则是使用随机分布（RD）多纤维模型得到的。

这些趋势在定性上也与单纤维模型（第4.1节）报告的结果相似，尽管从应力场和相场损伤来看，纤维之间存在一定程度的相互作用。力-时间结果印证了从定性等值线中得出的判断；如图8 所示，SA 和 RD 纤维模型的力学响应几乎无法区分。然而，需要指出的是，这一结论仅适用于此处假设的材料参数和条件。也就是说，如果纤维、基体和界面的扩散率差异更大，或者对纤维分布的作用进行更深入的探究（例如采用不同的体积分数和纤维半径），则可能得出不同结论。

水分吸收后，施加了一个干燥阶段，直至 t =60,000 秒。干燥阶段结束时，SA模型的含水量从 7.45% 降至 0.829%，RD模型则降至 0.835%；SA模型低了 0.006%。图 8a) 展示了从底部固定边界测得的垂直反力。水分平衡状态下，SA模型和RD模型的反力分别为 26.04 N 和 25.78 N。反力与吸湿膨胀呈线性关系，因此，SA模型由于含水量较高而产生了更大的反力。图 8b) 显示，在水分吸收、平衡状态和干燥过程中，两种模型的行为非常相似。这主要归因于纤维分布相对均匀

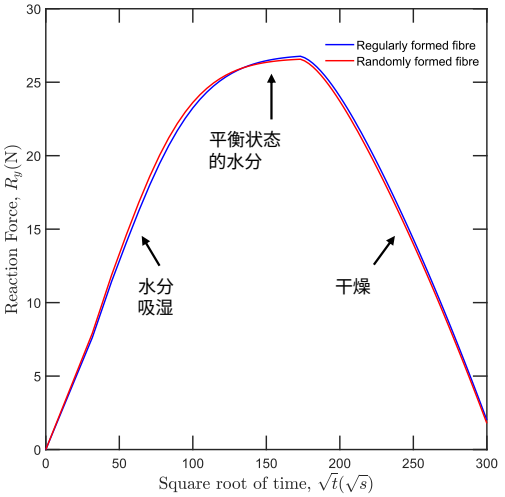


图 8：吸湿溶胀导致多纤维模型中的界面损伤：方形排列（SA）和随机分布（RD）多纤维模型的竖向反力随时间的演化。

在两种模型中，且纤维和基体的扩散系数接近。纤维分布不均匀（例如形成纤维簇）可能会显著影响结果。根据上述分析，我们可以得出结论：基体中均匀分布的纤维结构不会显著影响复合材料在吸湿膨胀作用下的行为。

4.3 微观尺度：吸湿-力学耦合模式 l

采用微观力学单边裂纹板模型，研究机械载荷作用所产生的机械应变和吸湿膨胀共同作用下，水分扩散对损伤容限的影响。几何形状和边界条件如图 9a)所示。复合材料板的宽度为 $W = 0.1$ mm，高度为 $H = 0.2$mm，纤维呈随机分布，直径为 $d = 0.01$ mm。通过几何方式引入长度为 $a_0 = W/2 = 0.05$ mm的初始裂纹。对复合材料板进行机械加载：在上边缘施加垂直位移，在底部边界同时施加垂直位移和水平位移。对于水分，考虑三种情形。第一种情形（称为“无水分”）中，$C = 0$ 在整个区域内始终保持不变，损伤仅由机械加载驱动。第二种情形称为“吸收水分”，指试样最初处于干燥状态，随后在左边缘暴露于 $C = 7.45\%$环境中30,000 s。第三种也是最后一种情形称为“干燥水分”，假设试样初始含水量均匀，为 $C = 7.45\%$，然后将其暴露于

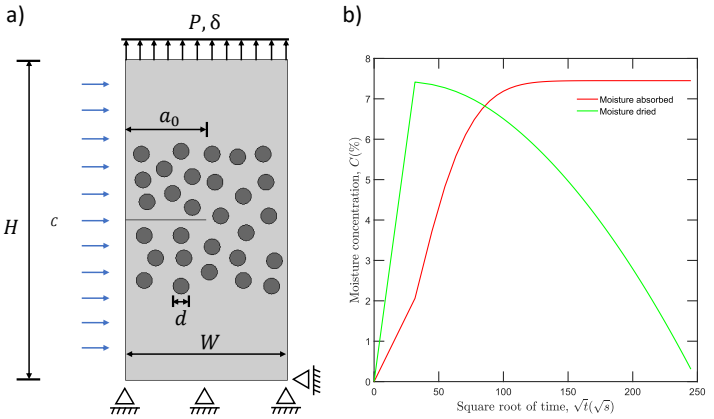


图 9：单边裂纹板的微尺度化学-力学分析：(a) 几何形状和边界条件；(b) 区域中心的水分含量随时间的变化，分别对应吸收水分 (MA) 和干燥水分 (MD) 的情况。

左侧的 $C = 0$%环境中60,000 s（狄利克雷边界条件）。图9b显示了“吸收水分”和“干燥水分”两种情形下区域中心的含水量。机械-水分分析按顺序进行：首先进行环境分析，然后施加机械载荷，远端位移以0.04 mm/s的速率逐渐增加。整个区域采用71,390个8节点二次单元离散，特征单元尺寸为0.00045 mm，是相场长度尺度的一半。

所获得的有限元结果如图 10 所示。首先来看图 10a，其中显示了区域内水分的分布。与预期相符，吸收水分的情形下，靠近暴露于环境中的表面处水分含量较高；而在干燥水分的情形下，板材左侧自由表面附近的 C 有所降低。由于裂纹是通过几何方式引入的，因此对湿度等值线有显著影响。图 10b 显示了吸收水分和干燥水分情形下反力随时间的变化。后者因水分流失而表现出承载能力下降，而吸收水分情形下则呈单调递增趋势，如图 10b 所示；该图展示了施加机械载荷之前的力-时间响应。施加机械载荷后得到的力学和断裂响应见图 10下排。从损伤等值线（图 10c）和力-位移曲线（图10d）均可观察到，材料行为主要受力学效应而非水分影响。这可能与损伤程度较小有关

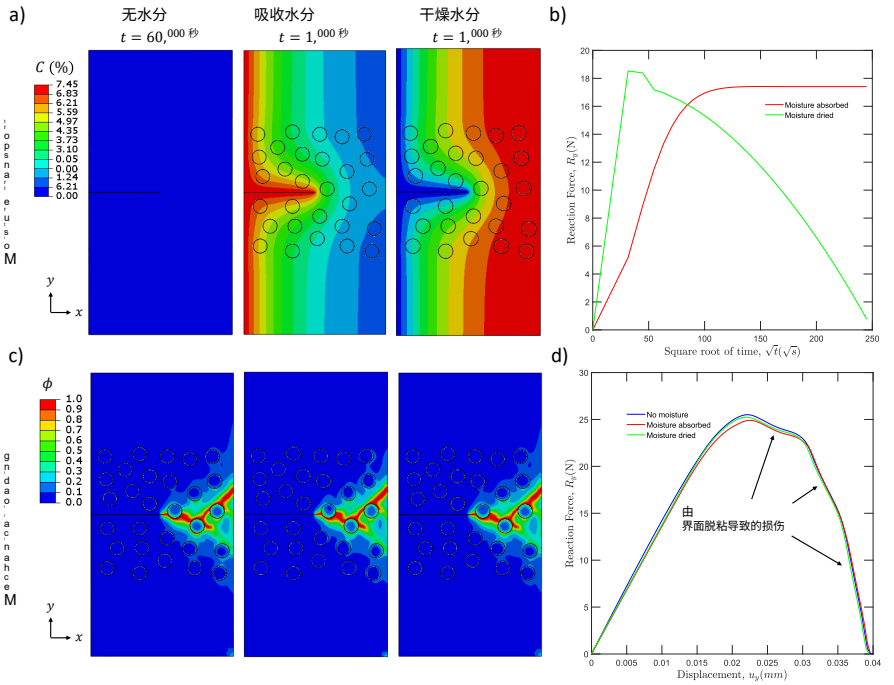


图 10：单边裂纹板的微观尺度化学-力学分析：(a) 相关时刻的水分浓度等值线，(b) 施加机械载荷前竖向反力随时间的变化，(c) 显示基体开裂和界面脱粘的相场损伤等值线，以及 (d) 力-位移响应。结果对应三个案例研究：无水分 (NM)、吸收水分 (MA) 和干燥水分 (MD)。

；对于所采用的材料参数和所考虑的环境条件，水分引发的损伤程度较小——见图 5c 和7b，在类似环境条件下，分析过程中 ϕ 始终保持较小。在所有三种情形（无水分、吸收水分、干燥水分）下，均观察到基体开裂和多次基体-纤维界面脱粘，这些现象导致承载能力下降。图7d 显示了多次载荷下降事件，这些事件与界面脱粘和基体裂纹的聚合有关。吸收水分模型的峰值载荷略低于无水分和干燥水分模型，但差异仍然很小。若考虑依赖于水分浓度的韧性，差异可能会更大；但从实验角度来看，这种依赖关系尚不明确 [57]。

4.4 介观尺度：单层模型

采用与 Chilali 等人相同的几何形状和边界条件研究单层模型。 [2] （见图 11a）。单层尺寸为 $L = 10$ 毫米和 $H = 1.5$ 毫米，纤维直径为 $d = H \times V_f = 0.24$ 毫米，体积分数为 $V_f = 32\%$。对称条件位于底部和右边界。对于初始为干燥状态的样品，在顶部和左边界施加 7.45% 的含水量，持续 $25{\times}10^6$秒，足以达到平衡状态——见图 11b。之后，第二步在相同边界处将含水量降至 0%，持续 $50{\times}10^6$ 秒，如图 11c 所示。采用 0.013 毫米的特征单元尺寸，是相场长度尺度的一半，因此有限元模型包含 107,333 个 8节点二次单元。

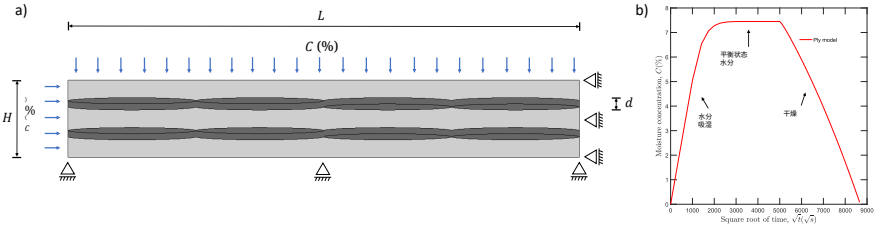


图 11：受水分吸收作用的单层模型：(a) 复合材料的几何形状和边界条件；(b) 区域中心含水量随时间的变化，显示出水分吸收阶段，随后进入平衡平台，最后进入干燥阶段。

所得结果如图12所示。在时间 $t = 1 \times 10^6$ 秒时（图12a），水分浓度分布沿垂直方向的梯度比水平方向更陡。更重要的是，如图12b所示，吸湿膨胀导致的损伤主要集中在纤维上，同时也略微延伸至界面。吸湿膨胀产生的内部水平应力在界面处达到最大值，而纤维内部则出现显著的水平压应力（见图12c）。就σ_{yy}应力分量而言，其最大值出现在纤维的扭转处，见图12d。此外，本案例研究使我们能够将数值预测结果与实验结果进行比较。具体而言，如图12e所示，水分吸收预测结果可与 Chilali 等人 [2]的实验结果进行比较。同一图还展示了水分传输对亚麻纤维扩散系数的敏感性。结果表明，虽然采用 $D = 1.19 \times 10^{-6}$ 毫米^2/秒的数值（见表1）所得结果与实验结果接近，但若要完全吻合，则需采用 $D = 3.47 \times 10^{-4}$ 毫米^2/秒的扩散系数，该数值接近

由 2×10^{-4} 毫米^2/秒的扩散系数，该数值由 C´elino 等人 [58] 在相对湿度为 80% 时通过实验测得。最后，图12f 展示了层合板因吸湿膨胀产生的水平膨胀。吸湿过程中，层合板发生线性水平膨胀，表现为自由垂直边缘的移动；当水分达到平衡状态时，膨胀随之停止，此时层合板长度最大增加 0.63 毫米。复合材料在干燥过程中开始收缩，并在 5。0×10^{7} 秒后基本恢复原状。

4.5 宏观尺度：层合板级模型

最后一个案例研究涉及一个宏观尺度的层合板级模型，该模型的构思源自 Chilali 等人的工作。 [2]因此，采用由 8 个铺层组成、铺层方式为 $[0°/90°]2s$ 且尺寸为 $L = 10$ mm 和 $H = 6$ mm 的层合板模型——见图 13a。假设纤维直径为 $d = 0.24$ mm。由于底部和右侧边界处的对称条件，仅对模型的四分之一进行模拟。在顶部和左侧边界施加 7.45% 的水分浓度，持续 1×10^{8} s；如图 13b 所示，这足以达到平衡状态。随后进入干燥阶段，在相同边界（顶部和左侧）将水分浓度固定为 $C = 0$，持续 3×10^{8}s。整个区域采用 113,565 个 8节点二次单元离散，特征单元尺寸为 0.013 mm，是相场长度尺度的一半。

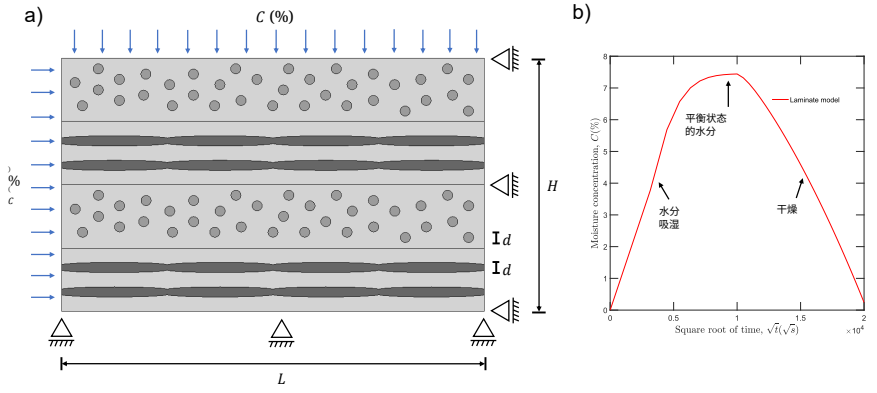


图 13：受水分吸收作用的层合板宏观模型：(a) 复合材料的几何形状和边界条件；(b) 区域中心含水量随时间的变化，显示了吸湿阶段，随后是平衡平台，最后进入干燥阶段。

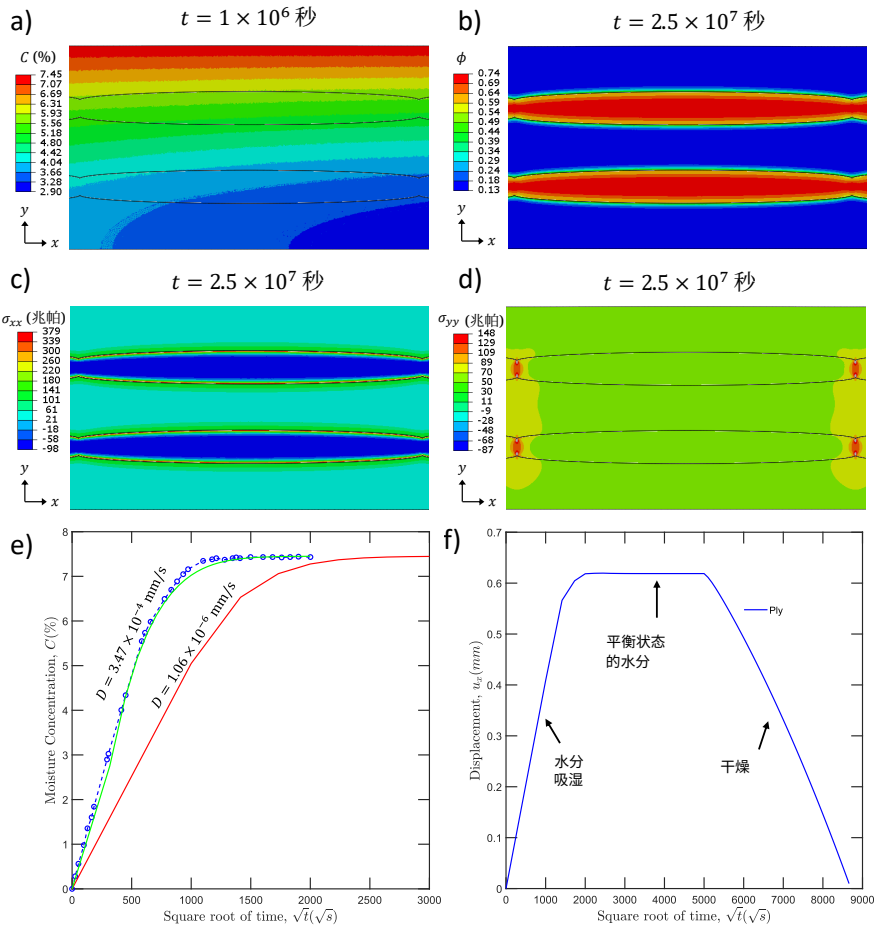


图 12：在区域左中部受到水分吸收作用的单层模型：(a) $t = 1 \times 10^6$s 后的水分浓度等值线；(b) 达到平衡后（t =2.5 $\times$ 10^7）的相场损伤等值线；(c) σ_{xx} 处的应力分量等值线；(d) σ_{yy} 处的应力分量等值线；(e) 水分吸湿浓度随时间的变化，与实验结果进行比较 [2]，；(f) 复合材料水平膨胀随时间平方根的变化。

计算结果如图 14 所示，包括水分含量等值线（图 14a）、随时间变化的伸长量（图 14b）、相场损伤等值线（图 14c），以及 σ_{xx} （图 14d）σ_{yy} （图 14e）应力等值线。湿度等值线显示出水平方向和垂直方向的梯度，这与所采用的边界条件预期一致。

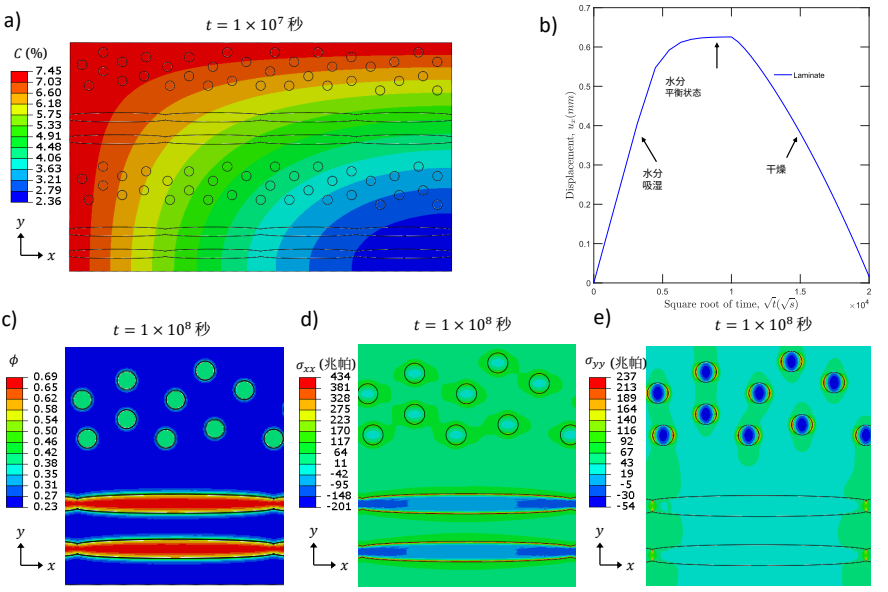


图 14：受水分吸收影响的层合板宏观模型：(a) $t = 1 \times 10^7$ s 后的水分浓度等值线，(b) 复合材料水平方向膨胀量随时间平方根的变化，(c) $t = 1 \times 10^8$ s 时的相场损伤等值线，(d) $t = 1 \times 10^8$ 时的 σ_{xx} 应力分量等值线，以及 (e) $t = 1 \times 10^8$ 时的 σ_{yy} 应力分量等值线。

图 14b显示，复合材料在干燥过程的作用下，伸长最多可达 0.61 mm，随后恢复原状。损伤主要集中在纵向纤维中，但横向纤维中也观察到一定程度的损伤（见图 14c）。最大 σ_{xx} 拉伸应力位于纵向纤维与基体的界面处（图 14d），而竖直方向的拉伸应力则集中在基体与横向纤维的界面处（见图 14e）。纵向铺层和横向铺层所呈现的不同表现，是杨氏模量、泊松比和吸湿膨胀系数各向异性假设的结果。总体而言，结果表明，水分会使复合材料层合板纵向铺层产生更严重的损伤。

5 结论

我们提出了一种新的基于相场的多物理场框架，用于模拟复合材料中的湿气诱导退化。该框架耦合了水分扩散、相应的吸湿膨胀，以及基体、纤维和基体-纤维界面的力学与断裂行为。此外，我们还提出了一种新颖的弥散界面方法，用于插值

沿纤维-基体界面的相关属性。我们采用有限元法对该理论框架进行了数值实现，并开展数值实验，以深入了解微观、中观和宏观尺度下的水分-材料相互作用。主要发现如下：

• 单纤维模型的微观尺度分析表明，浓度梯度会导致吸湿应变，进而在纤维-基体界面产生损伤累积（脱粘）。

•均匀分布和随机分布的多纤维模型表明，在所假定的材料参数和条件下（体积分数和纤维半径相同），纤维分布的影响较小。

•涉及多根纤维以及机械应变与吸湿应变耦合作用的微观力学模型显示，基体-纤维界面会发生多次脱粘，但在所考虑的材料属性和环境条件下，水分对失效过程的影响较小。

• 细观尺度铺层级模型与吸湿实验测量结果吻合良好，并预测损伤局部化主要沿亚麻纤维发生。

• 宏观尺度层合板级模型表明，由于亚麻纤维的各向异性，与横向铺层相比，水分会导致纵向铺层产生更大程度的损伤。

所开发的框架构成了一种全面的多尺度虚拟工具，有助于理解复合材料的环境辅助退化。未来有多种研究方向。其中之一是通过引入自适应网格细化技术进一步提高计算效率；事实证明，该技术在处理大规模问题时颇具优势 [59–62]。从物理角度来看，其他可能的研究方向包括考虑静水应力对质量传输的作用，以及力学性能对含水量的敏感性。

致谢。 W. Tan 感谢 EPSRC 新研究员奖 [grant EP/V049259/1] and 英国皇家学会[RGS/R1/231417]提供的经费支持。Emilio Mart´ınez-Pa˜neda 感谢英国研究与创新署未来领袖奖学金计划 [grant MR/V024124/1]提供的经费支持。A. Quintanas-Corominas 感谢欧盟下一代欧盟和大学部通过赫罗纳大学的征集项目（grant REQ2021-A-30），为其提供的经费支持；该项目经费来自西班牙政府的复苏、转型与韧性计划。</output>

附录 A：弥散界面的 Abaqus 实现

弥散界面的生成在 ABAQUS 中通过两步过程实现：首先定义初始相场指示函数 $\mathfrak{d}$ 分布，随后将其纳入物理

模型中，方法是使用初始条件和预定义场变量。

第一步是引入相场分布，以此对体相和界面的材料属性进行插值。这是一个初始化步骤，在没有任何机械载荷或化学载荷的情况下执行。为便于在 ABAQUS 中实现这一过程，可利用描述相场演化的偏微分方程与热传递方程之间的类比，并借助 HETVAL 子程序 [63, 64]。因此，指示参数 $\mathfrak{d}$ 的演化方程，即式（17），可改写为

$$\nabla^2\mathfrak{d} = \frac{\mathfrak{d}}{\ell_\mathfrak{d}^2} \tag{A1}$$

其中，$\ell_\mathfrak{d}$ 为长度尺度参数。当存在由内部热量产生的源项r 时，该方程与稳态条件下的热传递方程具有相同的结构；

$$k\nabla^2 T = r \tag{A2}$$

此处，T 为温度场，k 为热导率。因此，通过定义 $k = 1$ 并将源项表示为下式，即可轻松建立$T \equiv \mathfrak{d}$ 类比，

$$r = \frac{\mathfrak{d}}{\ell_\mathfrak{d}^2} \tag{A3}$$

此外，HETVAL子程序还要求定义 r 相对于主场的变化率，其表达式为

$$\frac{\partial r}{\partial T} \equiv \frac{\partial r}{\partial \mathfrak{d}} = -\frac{1}{\ell_\mathfrak{d}^2} \tag{A4}$$

该 HETVAL 子程序用于执行预处理稳态热传递分析，在分析中，狄利克雷边界条件 $T \equiv \mathfrak{d} = 1$施加于描述（尖锐）界面的节点集上。随后进行物理模拟，通过使用所谓的预定义场变量重建扩散界面。为此，定义一个包含初始条件的初始步骤，并从预处理分析中读取温度分布（输出变量 NT）。该场变量用于在用户子程序中插值材料属性。这种方法具有通用性，可在第二步中与任意用户子程序（UMAT、UELMAT、UEL）结合使用。此实现的一个简单示例及其文档可从以下网址下载：
www.imperial.ac.uk/mechanics-materials/codes和
www.empaneda.com/codes。

声明

• **利益冲突**：作者声明，他们不存在可能影响本文所报告研究工作的已知竞争性利益或个人关系。

- **数据可用性**：所有数据和代码均可根据合理请求向作者获取。

参考文献

[1] Barbi`ere, R., Touchard, F., Chocinski-Arnault, L., Mellier, D.：水分和干燥对机织大麻/环氧树脂复合材料疲劳损伤机制的影响：声发射和微米CT分析。《国际疲劳杂志》**36**，105593（2020年）[2]Chilali, A., Assarar, M., Zouari, W., Kebir, H., Ayad, R.：亚麻纤维增强复合材料水力-力学行为分析：吸湿膨胀及其对内应力的影响评估。《复合材料结构》**206**，177–184（2018年）[3] Abida, M., Gehring, F., Mars, J., Vivet, A., Dammak, F., Haddar, M.：亚麻纱线和亚麻/环氧树脂复合材料的湿热-力学耦合及多尺度溶胀系数评估。《复合材料A辑：应用科学与制造》**136**，105914（2020年）[4] Buehler, F.U., Seferis, J.C.：增强材料和溶剂含量对环氧树脂复合材料水分吸收的影响。《复合材料A辑：应用科学与制造》**31(7)**，741–748（2000年）[5] Sateesh, N., Sampath Rao, P., Ravishanker, D.V., Satyanarayana, K.：水分对玻璃纤维增强塑料复合材料的影响。《今日材料：会议录》**2(4–5)**，2902–2908（2015年）[6] Li, M.：温度和水分对风力涡轮机叶片用复合材料的影响（2020年）[7] Weitsman, Y.J., Elahi, M.：流体对聚合物复合材料变形、强度和耐久性的影响——综述。《时变材料力学》**4**，107–126（2000年）[8]Mohanty, A.K., Misra, M., Drzal, T.：天然纤维的表面改性及所得生物复合材料的性能：综述。《复合材料界面》**8**，313–343（2012年）[9] Yang, B., Huang, W.M., Li, C., Chor, J.H.：水分对填充纳米碳粉的聚氨酯形状记忆聚合物玻璃化转变温度的影响。《欧洲聚合物杂志》**41**，1123–1128（2004年）

[10] Lu, M.M., Fuentes, C.A., Willem, A., Vuure, V.：亚麻纤维及亚麻纤维复合材料的水分吸附与溶胀。《复合材料B辑：工程》**231**,109538 (2022)

[11] Sathiyamoorthy, M., Senthilkumar, S.：黄麻/碳纤维增强混杂复合材料的力学、热学及吸水行为。S¯adhan¯a **45**(1), 1–12 (2020)[12] Chavez Morales, R., Eliasson, V.：吸湿对碳纤维/环氧树脂复合材料II型动态断裂行为的影响。《材料动态行为杂志》**7**(1), 21–33 (2021).[13] Oguz, Z.A., Erklig, A., Bozkurt, O.Y.：蒸馏水中湿热老化的混杂芳纶/玻璃纤维/环氧树脂复合材料的降解。《复合材料杂志》**55**(15), 2043–2060 (2021)[14] LeBlanc, L.R., LaPlante, G.：受潮碳纤维/环氧树脂复合材料混合模式分层的实验研究与有限元建模。《复合材料A辑：应用科学与制造》**81**, 202–213 (2016)[15]Sinchuk, Y., Pannier, Y., Gueguen, M., Tandiang, D., Gigliotti, M.：纺织复合材料水分扩散与诱导膨胀的基于计算机断层扫描的建模与模拟。《国际固体与结构杂志》**154**, 88–96 (2018)[16] Gagani, A.I., Echtermeyer, A.T.：分层对多向复合材料层压板中流体扩散的影响——理论与实验。《国际固体与结构杂志》**158**, 232–242 (2019)[17] Bourennane, H., Gueribiz, D., Fr´eour, S., Jacquemin, F.：损伤对聚合物基复合材料扩散行为影响的建模。《增强塑料与复合材料杂志》**38**(15), 711–733 (2019)[18] Wong, E.H., Koh, S.W., Lee, K.H., Rajoo, R.：湿气诱发失效的全面论述——最新进展。《IEEE电子封装制造汇刊》**25**(3), 223–230 (2002)[19] Cheng, X., Liu, S., Zhang, J., Guo, X., Bao, J.：湿热效应对承受轴向压缩载荷的斜接修补碳纤维-环氧树脂层压板力学行为的影响：实验与数值模拟。《聚合物复合材料》**39**(3), 904–914 (2016)[20] Griffith, A.：VI. 固体断裂与流动现象。《英国皇家学会伦敦皇家学会哲学汇刊A辑：数学或物理性质论文集》**221**, 163–198 (1921)[21] Fei, F., Choo, J.：岩石混合模式断裂的双相场公式。《计算力学与工程中的计算方法》**376**, 113655 (2021)

[22] Navidtehrani, Y., Beteg´on, C., Mart´ınez-Pa˜neda, E.：用于分解相场断裂驱动力的一般框架，特别针对Drucker–Prager失效面。《理论与应用断裂力学》**121**，103555（2022）[23] Carollo, V., Reinoso, J., Paggi, M.：陶瓷层合材料中复杂裂纹路径的建模：一种结合断裂相场法与内聚区模型的新型变分框架。《欧洲陶瓷学会杂志》**38(8)**，2994–3003（2018）。Cermodel 2017：建模与仿真助力陶瓷技术创新[24]Li, W., Shirvan, K.：二氧化铀陶瓷核燃料准静态开裂的多物理场相场建模。《国际陶瓷》**47(1)**，793–810（2021）[25]Ambati, M., Gerasimov, T., De Lorenzis, L.：延性断裂的相场建模。《计算力学》**55(5)**，1017–1040（2015）[26] Dittmann, M., Aldakheel, F., Schulte, J., Wriggers, P., Hesch, C.：非线性延性断裂的变分相场公式。《计算力学与工程中的计算方法》**342**，71–94（2018）[27] Hirshikesh, Natarajan, S., Annabattula, R.K., Mart´ınez-Pa˜neda, E.：功能梯度材料中裂纹扩展的相场建模。《复合材料B辑：工程》**169**，239–248（2019）[28]Nguyen, K.D., Thanh, C.-L., Nguyen-Xuan, H., Abdel-Wahab, M.：用于多孔功能梯度结构裂纹扩展的混合相场等几何分析。《计算机辅助工程》（2021）[29] He, B., Vo, T., Newell, P.：多孔材料断裂研究：基于ReaxFF的相场断裂研究。《计算机辅助工程》（2022）[30] Zhou, S., Zhuang, X., Rabczuk, T.：多孔介质中流体驱动动态开裂的相场建模。《计算力学与工程中的计算方法》**350**，169–198（2019）[31] Simoes, M., Mart´ınez-Pa˜neda, E.：形状记忆合金断裂与疲劳的相场建模。《计算力学与工程中的计算方法》**373**，113504（2021）[32] Lotfolahpour, A., Huber, W., Asle Zaeem, M.：一种用于模拟超弹性形状记忆陶瓷中相变与开裂相互作用演化的相场模型。《计算材料科学》**216**，111844（2023）

[33] Clayton, T., Duddu, R., Siegert, M., Martínez-Pañeda, E.：一种基于应力的孔隙损伤相场模型，用于蠕变冰川和冰架的水力压裂。《工程断裂力学》**272**，108693（2022）[34] Sun, X., Duddu, R., Hirshikesh：一种用于冰川裂隙水力压裂的孔隙损伤相场模型。《极端力学快报》**45**，101277（2021）[35] Quinteros, L., Garcıa-Macıas, E., Martínez-Pañeda, E.：碳纳米管复合材料的微观力学相场断裂建模。《复合材料B辑：工程》**236**，109788（2022）[36] Quintanas-Corominas, A., Reinoso, J., Casoni, E., Turon, A., Mayugo, J.A.：一种用于模拟长纤维复合材料层内和层间断裂的相场方法。《复合材料结构》**220**，899–911（2019）[37] Tan, W., Martínez-Pañeda, E.：相场对纤维增强复合材料微观断裂及R曲线行为的预测。《复合材料科学与技术》**202**，108539（2021）[38] Tan, W., Martınez-Pañeda, E.：相场对复合材料微观桥接行为的断裂预测。《复合材料结构》**286**，115242（2022）[39] Martınez-Pañeda, E., Golahmar, A., Niordson, C.F.：氢致开裂的相场公式。《计算力学与工程中的计算方法》**342**，742–761（2018）[40] Valverde-Gonzalez, A., Martınez-Pañeda, E., Quintanas-Corominas, A., Reinoso, J., Paggi, M.：多晶材料中氢致断裂的计算建模。《国际氢能杂志》**47(75)**，32235–32251（2022）[41] Boyce, A.M., Martınez-Pañeda, E., Wade, A., Zhang, Y.S., Bailey, J.J., Heenan, T.M.M., Brett, D.J.L., Shearing, P.R.：通过X射线计算机断层扫描和建模预测锂离子电池电极的开裂。《电源杂志》**526**，231119（2022）[42] Zhao, Y., Xu, B.-X., Stein, P., Gross, D.：锂离子电池电极颗粒外部和内部界面电化学反应的相场研究。《计算力学与工程中的计算方法》**312**，428–446（2016）。断裂相场方法[43] Mandal, T.K., Nguyen, V.P., Wu, J.-Y., Nguyen-Thanh, C., de Vaucor- beil, A.：热弹性固体的断裂：相场建模及基于高效整体求解器的新结果。《计算力学与工程中的计算方法》

力学与工程 **376**, 113648 (2021年)[44]Asur Vijaya Kumar, P.K., Dean, A., Reinoso, J., Paggi, M.: 基于实体壳概念的薄壁结构非线性热弹性相场断裂。《计算力学与工程中的计算方法》**396**, 115096 (2022)[45] Cui, C., Ma, R., Mart´ınez-Pa˜neda, E.: 用于溶解驱动应力腐蚀开裂和氢脆的广义多相场理论。《力学与固体物理学杂志》**166**, 104951 (2022)[46] Ansari, T.Q., Huang, H., Shi, S.-Q.: 环境侵蚀下金属材料形态和微观结构演化的相场建模。npj《计算材料》**7**(1), 143 (2021年)[47] Arash, B., Exner, W., Rolfes, R.: 水分对聚合物纳米复合材料非线性黏弹性断裂行为的影响：一种有限变形相场模型。《计算机辅助工程》(2022)[48] Ye, J.-Y., Zhang, L.-W.: 水分耦合作用下聚合物基多相复合材料的损伤演化。《计算力学与工程中的计算方法》**388**, 114213 (2022)[49] Francfort, G.A., Marigo, J.-J.: 重新审视作为能量最小化问题的脆性断裂。《力学与固体物理学杂志》**46**(8), 1319–1342 (1998)[50] Bourdin, B., Francfort, G.A., Marigo, J.-J.: 对重新审视的脆性断裂进行数值实验。《力学与固体物理学杂志》**48**(4), 797–826 (2000)[51] Kristensen, P.K., Niordson, C.F., Mart´ınez-Pa˜neda, E.: 相场断裂评估：裂纹萌生与扩展。英国皇家学会哲学汇刊A辑**379**(2203), 20210021 (2021年)[52] Amor, H., Marigo, J.J., Maurini, C.: 带单边接触的变分脆性断裂正则化公式：数值实验。《力学与固体物理学杂志》**57**, 1209–1229 (2009)[53] Miehe, C., Hofacker, M., Welschinger, F.: 一种用于率无关裂纹扩展的相场模型：基于算子分裂的稳健算法实现。《计算力学与工程中的计算方法》**199**(45-48), 2765–2778 (2010)[54]

《复合材料结构》**97**，296–303（2013年）[55] Peret, T., Clement, A., Freour, S., Jacquemin, F.：增强型菲克型和非菲克型聚合物的数值瞬态湿弹性分析。《复合材料结构》**116**，395–403（2014年）[56] C´elino, A., Fr´eour, S., Jacquemin, F., , Casari, P.：天然纤维水分扩散行为的表征与建模。《应用高分子科学杂志》**130**，297–306（2013年）[57] Sugiman, S., Putra, I.K.P., Setyawan, P.D.：介质和老化条件对环氧树脂拉伸性能与断裂韧性的影响。《聚合物降解与稳定性》**134**，311–321（2016年）[58] C´elino, A., Fr´eour, S., Jacquemin, F., Casari, P.：天然纤维水分扩散行为的表征与建模。《应用高分子科学杂志》**130(1)**，297–306（2013年）[59] Phansalkar, D., Weinberg, K., Ortiz, M., Leyendecker, S.：空间自适应相场断裂模型。《计算力学与工程中的计算方法》**395**，114880（2022年）[60] Mart´ınez-Pa˜neda, E., Natarajan, S., 等：正交各向异性功能梯度材料中裂纹扩展的自适应相场建模。《国防技术》**17(1)**，185–195（2021年）[61] Hirshikesh, H., Pramod, A., Waisman, H., Natarajan, S.：采用新型基于物理的细化准则的自适应相场法。《计算力学与工程中的计算方法》**383**，113874（2021年）[62] Pramod, A., Annabattula, R., Ooi, E., Song, C., Natarajan, S., 等：采用缩放边界有限元法的脆性断裂自适应相场建模。《计算力学与工程中的计算方法》**355**，284–307（2019年）[63] Navidtehrani, Y., Beteg´on, C., Mart´ınez-Pa˜neda, E.：相场断裂法的一种简单且稳健的 ABAQUS 实现。《工程科学应用》**6**，100050（2021年）[64] Navidtehrani, Y., Beteg´on, C., Mart´ınez-Pa˜neda, E.：仅使用用户材料子程序实现相场断裂法的统一 ABAQUS 实现 **14(8)**（2021年）