

刻画胶接体系变形的跨尺度力学模型

龙浩¹, 魏悦广¹, 马寒松², 梁立红³, 刘雁韦¹

¹北京大学工学院力学与工程科学系, 北京 100871

²中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190

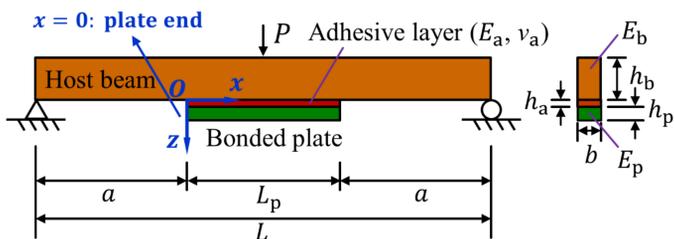
³北京化工大学机电工程学院, 北京 100029

研究背景

由于轻质、方便经济、低应力集中等优点, 胶接技术在航空航天、微机电系统、柔性电子器件等领域都有广泛应用。随着胶接技术的应用从宏观构件延伸到微器件, 胶层厚度从毫米量级减小到微米量级。前人诸多实验表明胶接体系中受约束胶层的力学行为不同于块体胶, 且胶层厚度强烈影响胶接体系的整体力学性能。我们分别采用弹性应变梯度理论和经典欧拉梁模型刻画微尺度胶层和被粘物, 从而建立起刻画胶接体系变形的跨尺度力学模型, 得到了局部界面应力和整体刚度的解析解答。相关研究结果有助于预测胶接体系的变形, 同时为高性能胶接微器件的设计提供指导。

问题描述

三点弯曲载荷下胶接体系的示意图如下。此为微器件常见结构形式的抽象, 如主结构上粘有压电致动器/传感器, 基底上部分粘有硅薄膜等。



控制方程

➤ 胶层: 弹性应变梯度理论 (Wei and Hutchinson, 1997)

$$\int_V (\sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} + \tau_{ijk} \delta \kappa_{ijk}) dV = \int_V f_i \delta u_i dV + \int_S t_i \delta u_i dS + \int_S r_i D(\delta u_i) dS.$$

几何方程: $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \kappa_{ijk} = \kappa_{jik} = u_{k,ij}.$

平衡方程: $\sigma_{ik,i} - \tau_{ijk,ij} + f_k = 0,$

本构方程: $\sigma_{ij} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij},$

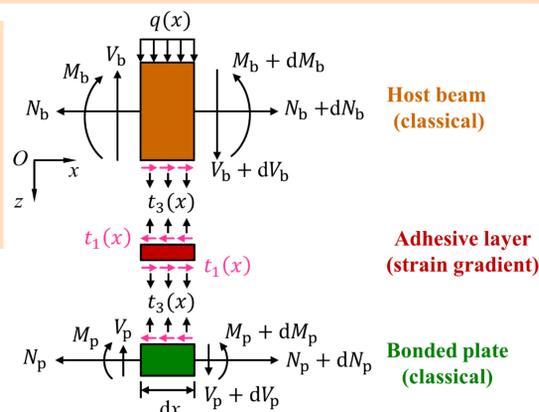
$\tau_{ijk} = 2El^2 \kappa_{ijk}.$ (应变梯度特征尺度 $l = 0.1 - 10 \mu\text{m}$)

边界条件: $t_k = n_i(\sigma_{ik} - \tau_{ijk,j}) + n_i n_j \tau_{ijk}(D_p n_p) - D_j(n_i \tau_{ijk})$ 或 $u_i = \bar{u}_i,$
 $r_k = n_i n_j \tau_{ijk}$ 或 $Du_i = \bar{D}u_i.$

胶层一维变形假设:

拉伸(压缩)与剪切的组合;
只考虑沿胶层厚度方向的梯度。
 $\Rightarrow \sigma_{3k,3} - \tau_{33k,33} = 0, k = 1, 3.$
界面处 u_i 与 Du_i 连续。

➤ 被粘物: 经典欧拉梁模型



参考文献

Long H, Ma H, Wei Y, Liu Y. A size-dependent model for predicting the mechanical behaviors of adhesively bonded layered structures based on strain gradient elasticity. *Int J Mech Sci* 2021;198.

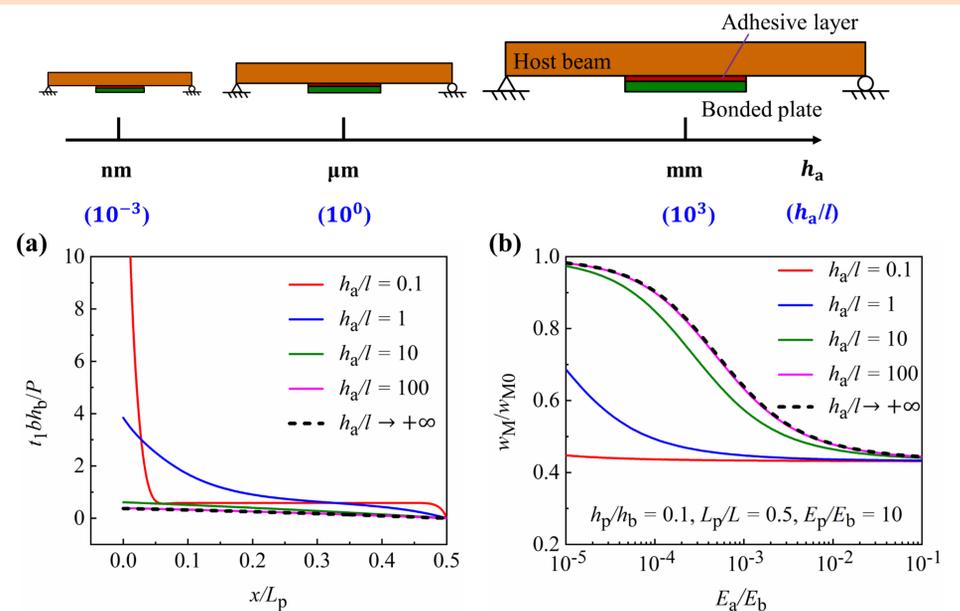
Long H, Wei Y, Liang L. A rigorous analytical solution of interfacial stresses and overall stiffness of beam structures bonded with partially covered plates. *Int J Mech Sci* 2020;167:105284.

Smith ST, Teng JG. Interfacial stresses in plated beams. *Eng Struct* 2001;23(7):857-71.

Wei Y, Hutchinson JW. Steady-state crack growth and work of fracture for solids characterized by strain gradient plasticity. *J Mech Phys Solids* 1997;45(8):1253-73.

结果与讨论

➤ 不同尺度胶接体系(微尺度下胶层中应变梯度效应不可忽略):
随着胶接体系空间尺度(h_a/l)的减小, 界面面力在板端部附近增大而整体位移减小, 均表现出显著的尺度效应。

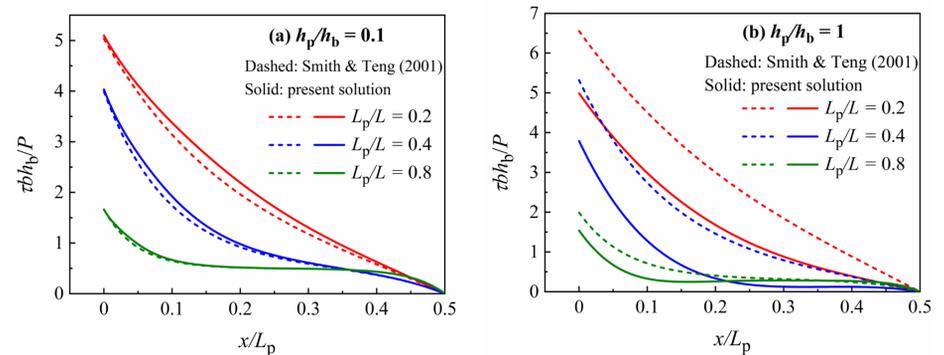


界面剪切面力沿界面的分布

主梁跨中位移随胶层模量的变化

➤ 宏观尺度胶接体系(胶层中应变梯度效应可忽略):

放弃Smith and Teng (2001)两被粘物等曲率变形的假设, 得到界面应力的严格解析解。



界面剪应力沿界面的分布

界面剪应力沿界面的分布

主要结论

基于弹性应变梯度理论与经典欧拉梁模型, 我们建立了刻画胶接体系变形的跨尺度力学模型。主要结论如下:

- 当胶接体系由宏观尺度减小到微观尺度, 界面面力与整体位移均表现出显著的尺度效应。同时, 微尺度胶接体系的整体位移对胶层模量不再敏感。
- 对于宏观尺度胶接体系, 在两被粘物厚度相当等情形下, 我们所得严格解析解较前人近似解析解更为精确。