

# 涂层剥离的内聚力-离散化虚内键 模型与数值模拟

李玲玲<sup>a</sup>, 张振南<sup>a\*</sup>, 郭芳威<sup>b</sup>

(上海交通大学 a.船舶海洋与建筑工程学院 b.材料科学与工程学院上海市  
先进高温材料与精密成形重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** **目的** 涂层剥离涉及大位移大变形问题。为了更好地模拟涂层剥离过程, 提出了内聚力界面-离散化虚内键 (DVIB) 方法。通过数值模拟, 研究了涂层和界面特性以及界面裂纹对涂层剥离的影响。**方法** 在模拟中, 涂层和基体之间的界面特性通过双线性黏结法则 (Cohesive Law) 来描述。涂层看作由离散键元胞组成, 每个键元胞由有限条虚内键组成。键元胞的“节点力-位移”关系直接由键势函数 (Bond Potential) 导出, 没有引入任何连续介质假设, 因此 DVIB 可以直接模拟涂层大位移和大变形问题。**结果** 采用该方法对不同条件下的涂层剥离进行数值模拟, 分析不同条件对涂层剥离的影响。涂层厚度和模量影响稳定阶段之前的剥离力, 涂层黏附能影响整个过程剥离力。涂层厚度、模量和界面黏附能都与涂层剥离力呈正相关; 涂层与基体之间的端部裂纹会使涂层峰值剥离力减小; 内部裂纹长度和位置均会对剥离力产生不同的影响。当黏结强度和界面黏附能一定时, 黏结法则的几何形状只会影响剥离力的峰前段, 对剥离力的峰值和峰后阶段几乎没有影响。**结论** 本研究为涂层剥离提供了一种新的模拟方法, 研究结果为涂层剥离分析提供有意义的借鉴。

**关键词:** 涂层剥离; 离散虚内键; 界面; 黏结法则; 数值模拟; 裂纹

中图分类号: TG174.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2025)07-0203-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.07.017

## Modeling of Coating Peeling by Cohesive Discretized Virtual Internal Bonds and Numerical Simulation

LI Lingling<sup>a</sup>, ZHANG Zhennan<sup>a\*</sup>, GUO Fangwei<sup>b</sup>

(a. School of Ocean and Civil Engineering, b. Shanghai Key Laboratory of Advanced High-temperature Materials and Precision Forming, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**ABSTRACT:** As a barrier structure, the coating plays important roles to prevent the material from damage, corrosion, etc. However, the way to effectively model and simulate the coating peeling behaviors is still a tough but important problem since it involves large deformation and large displacement. Moreover, the coating peeling mechanism and its influence factors are still not well understood. To better simulate and get a deeper insight into the coating peeling behaviors, the cohesive interface-discretized virtual internal bond method (DVIB) is developed in this paper. Through the numerical simulation, the

收稿日期: 2024-06-17; 修订日期: 2024-08-15

Received: 2024-06-17; Revised: 2024-08-15

基金项目: 上海交通大学深蓝计划 (SL2022MS013)

Fund: The Oceanic Interdisciplinary Program of Shanghai Jiao Tong University (SL2022MS013)

引文格式: 李玲玲, 张振南, 郭芳威. 涂层剥离的内聚力-离散化虚内键模型与数值模拟[J]. 表面技术, 2025, 54(7): 203-211.

LI Lingling, ZHANG Zhennan, GUO Fangwei. Modeling of Coating Peeling by Cohesive Discretized Virtual Internal Bonds and Numerical Simulation[J]. Surface Technology, 2025, 54(7): 203-211.

\*通信作者 (Corresponding author)

impact of the coating properties, the interface properties, the interface crack and the shape of cohesive law on the coating peeling behaviors are studied in detail.

The coating/substrate system consists of three components: the coating, the interface, and the substrate. In the present method, the adhesion of the coating to the substrate is characterized by a bilinear cohesive law based on the hypothesis of a smooth substrate surface. For the rough substrate surface case, equivalent adhesion energy for the coating is proposed to deal with this problem. The coating is considered to consist of bond cells. Each bond cell has a finite number of bonds. The nodal force-displacement relation of a bond cell is directly derived by a bond potential, without any continuous hypothesis. Thus, DVIB can directly simulate the large deformation and large displacement behaviors of the coating.

Through this method, the coating peeling processes under different conditions are simulated and the influence factors on the peeling behaviors are analyzed. The thickness, modulus, and interfacial adhesion energy of the coating significantly affect the peeling force and the damage zone length. The coating modulus mainly affects the peak peeling force rather than the steady one. The higher the modulus is, the higher the peak peeling force. The thickness of the coating has a similar effect on the peeling force. This is because both the higher modulus and the thickness can lead to a stronger bending resistance of the coating. In contrast to the modulus and the thickness, the interfacial adhesion energy governs more the steady peeling force although it also affects the peak peeling force. Higher adhesion energy leads to a higher peeling force. During the peeling process, the damage zone length is related to the thickness, modulus, and interfacial adhesion energy of the coating. The higher thickness, modulus and interfacial adhesion energy lead to a longer damage zone. The end interface crack affects the peak peeling force. The longer the end interface crack is, the lower the peak peeling force. But the peak peeling force is not lower than its steady value. The position and the length of an inner interface crack mainly affect the peeling behaviors at the pre-steady peeling stage. As the cohesive strength and adhesion energy of the interface are fixed, the specific geometrical shape of the cohesive law has effects on the peeling force at the pre-peak stage. A higher pre-peak 'stiffness' of the cohesive law results in a steeper pre-peak peeling force curve. But the shape of cohesive law has little effects on the peak peeling force and no effect on the post-peak peeling force.

The present study provides a novel numerical simulation method for coating peeling behaviors and reveals the influence factors on the coating peeling behaviors. The study results provide valuable references for coating peeling analysis.

**KEY WORDS:** coating peeling; discretized virtual internal bond; interface; cohesive law; numerical simulation; crack

涂层作为一种阻隔结构,能够防止基体材料损坏,改善设备的散热、防磨损、耐腐蚀等性能,提高其在恶劣环境下的使用寿命<sup>[1]</sup>。涂层与基体的剥离行为在材料领域普遍存在,同时在各种工程和生物系统中也非常普遍。它涉及诸多技术领域,如胶带、微电子工业和生物黏附等。迄今为止,对于稳态剥离,人们在理论分析和数值模拟方面进行了大量的研究。Rivlin<sup>[2]</sup>基于膜不可拉伸假设,提出了第一个薄膜剥离的解析模型。Kendall<sup>[3]</sup>发展了稳态剥离力与剥离角度、界面韧性和弹性之间关系的理论解。后来,人们对不同种类薄膜的稳态剥离力进行了系列研究,如弹塑性薄膜<sup>[3]</sup>、黏弹性薄膜<sup>[5]</sup>和预拉伸薄膜<sup>[5]</sup>等。同时还研究了不同基底性质对剥离的影响,如弹性基底<sup>[7]</sup>、柔性基底<sup>[8]</sup>和基底表面粗糙度<sup>[8]</sup>等。对于峰值剥离力,目前研究认为薄膜的弯曲刚度、界面黏附能对其有重要影响<sup>[10-12]</sup>。

与界面相关的研究也取得了很好的进展。例如:Shui 等<sup>[13]</sup>研究了嵌入纳米结构的界面;Ceglie 等<sup>[14]</sup>研究了黏附区域发生的摩擦滑动;Xia 等<sup>[15]</sup>研究了黏结强度非均匀性对稳态剥离力的影响;Peng 等<sup>[16]</sup>研

究了界面黏附长度对整个过程剥离力的影响。制造缺陷、涂层与基材性能不匹配或是在役加载条件等,会导致涂层与基体界面之间存在裂纹<sup>[17-19]</sup>,这些裂纹对涂层剥离的影响现阶段研究较少。

涂层剥离过程可以看作一种裂纹扩展过程。目前用于裂纹扩展的主要方法有扩展有限元法、虚拟裂纹闭合技术和内聚力模型。扩展有限元法<sup>[20-21]</sup>基于单位分解法,在位移函数中引入不连续富集函数,允许裂纹从单元中穿过,避免了网格重构问题。但是富集函数的引入也增加了额外自由度。虚拟裂纹闭合技术<sup>[22]</sup>基于 Irwin 裂纹闭合积分法,其假设裂纹在扩展一个增量时释放的能量等于闭合裂纹到原始长度所做的功,可对裂纹扩展进行模拟,该方法目前已较为成熟,但需要预先定义裂纹。内聚力模型<sup>[23-24]</sup>采用界面黏结法则(Cohesive Law)来表征断裂过程。该方法在模拟断裂时无需额外断裂准则,避免裂尖场奇异性问题,非常适用于各种分层行为模拟。黏结法则该方法的一个关键,它刻画了界面黏结本构,现在常用的有梯形法则<sup>[25]</sup>、恒定应力法则<sup>[26]</sup>、指数法则和双线性法则<sup>[27]</sup>等。但该方法的不足之处在于界面无厚度

时, 界面受压会互相嵌入, 嵌入程度与“罚刚度”有关; 另外, 在模拟固体断裂时, 界面单元密度增大会导致材料整体刚度降低。内聚力模型能够很好地描述双材料界面的相互作用。通过该方法, Peng 等<sup>[16]</sup>研究了初始附着长度和悬臂长度对剥离行为的影响; Garg 等<sup>[28]</sup>模拟了刚性基底的涂层剥离过程; Long<sup>[29]</sup>研究了双材料系统的断裂行为; Xu<sup>[30]</sup>研究了被钙镁铝硅酸盐腐蚀的热障涂层中界面裂纹的扩展问题; Kyaw<sup>[31]</sup>提出了一种预测热障涂层裂纹失效的方法。

为了更有效地模拟涂层剥离过程, 本文提出一种内聚力界面-离散化虚内键 (DVIB) 方法, 并通过数值模拟分析涂层剥离过程的影响因素。DVIB<sup>[32-33]</sup>最初是为了模拟固体动态断裂而提出的一种方法, 它可直接模拟固体大位移、大变形的动态断裂过程。由于涂层剥离涉及大位移和大变形断裂过程, 因此它在模拟涂层剥离方面具有很大的优势。

## 1 建模方法

涂层在剥离过程中可分为 3 个区域, 即: 黏附区, 损伤区<sup>[34-35]</sup>和裂纹脱黏段 (图 1a)。涂层/基体系统由涂层、界面和基体 3 部分组成。涂层通过 DVIB 进行建模, 界面采用内聚力模型表征其界面特性, 基体为线弹性固体。

依据 DVIB 方法, 涂层由键元胞组成, 如图 1b 所示。每个键元胞都由有限条键组成。颗粒间的相互作用由键势函数 (Bond Potential) 表征, 其中包含了键的微观断裂机制。键元胞的总应变能为:

$$W = \sum \Phi(l) \quad (1)$$

其中:  $W$  为键元胞的总应变能;  $l$  为键长;  $\Phi(l)$  为键势函数。

由式 (1) 可得到键元胞的节点力和刚度矩阵分别为:

$$F_i = \sum \frac{\partial \Phi(l)}{\partial u_i} = \sum \Phi'(l) \frac{\partial l}{\partial u_i} \quad (2)$$

$$K_{ij} = \sum \left[ \Phi''(l) \frac{\partial l}{\partial u_j} \frac{\partial l}{\partial u_i} + \Phi'(l) \frac{\partial^2 l}{\partial u_i \partial u_j} \right] \quad (3)$$

其中:  $F_i$ 、 $u_i$  分别为键元胞节点力和位移分量;  $K_{ij}$  为刚度矩阵分量。

虚内键的初始刚度是一个物理参数, 它与材料杨氏模量及键元胞几何参数的关系<sup>[32]</sup>为:

$$\Phi''(l_0) = \lambda \frac{EV}{\Omega l_0^2} \quad (4)$$

其中:  $\Phi''$  为键势函数对于键长的二阶导数;  $l_0$  为未变形的键长;  $\Omega$  为键元胞中虚内键的条数;  $E$  为杨氏模量;  $V$  为键元胞体积;  $\lambda$  为系数, 对应于平面应力问题  $\lambda=3$ , 而对于平面应变问题  $\lambda=3.2$ , 对于三维问题  $\lambda=6$ 。

本文采用线弹性涂层模型, 其键势函数为:

$$\Phi(l) = \frac{1}{2} \Phi''(l_0)(l - l_0)^2 \quad (5)$$

涂层通过界面与基体结合, 如图 2a 所示。文中采用双线性内聚力模型表征界面力学特征 (图 2b), 其数学表达式为:

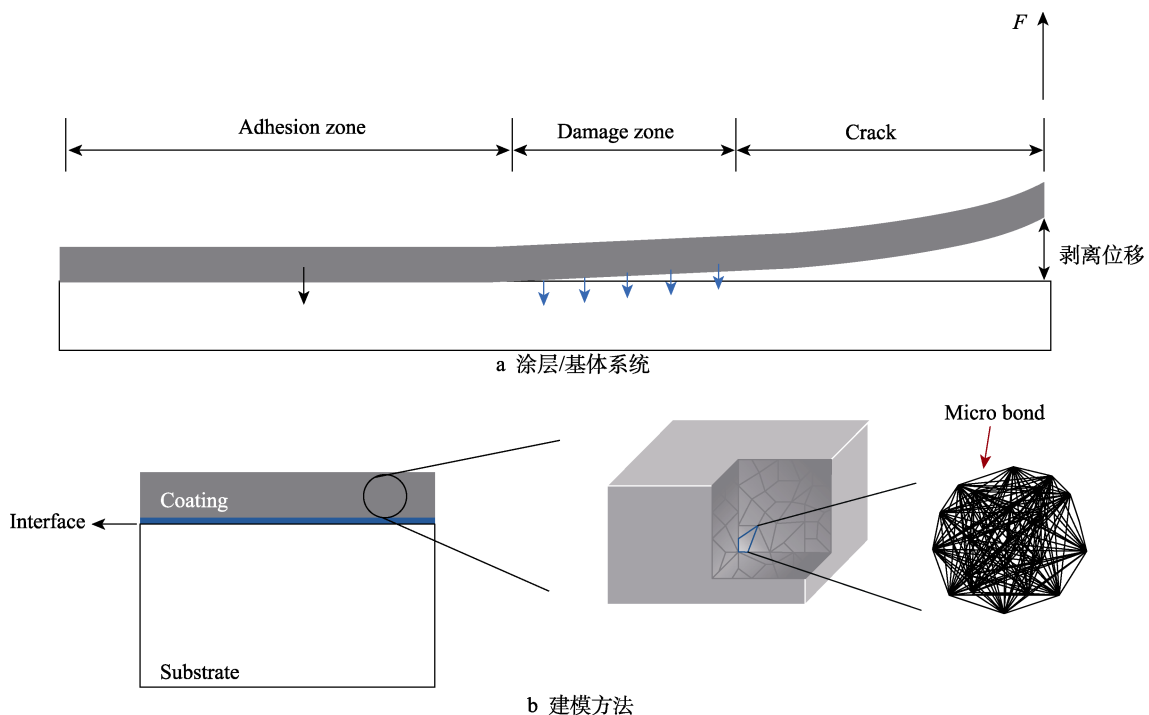
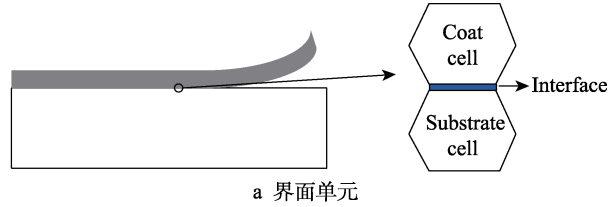


图 1 涂层/基体系统及其建模方法

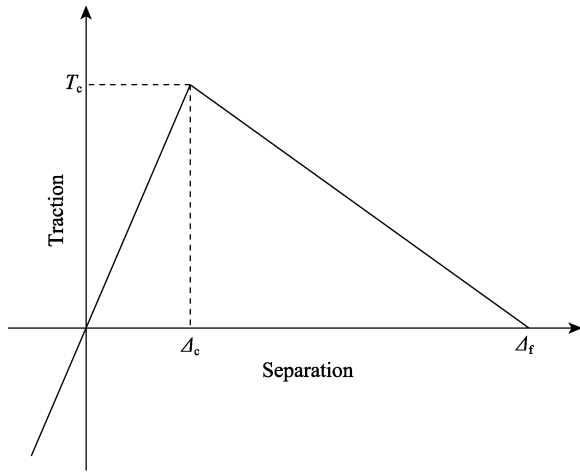
Fig.1 Coating/substrate system and modeling method: a) coating/substrate system; b) modeling method

$$T = \frac{\partial \Psi(\Delta)}{\partial \Delta} = \begin{cases} k\Delta & \text{if } \Delta \leq \Delta_c \\ k\Delta_c(\Delta_f - \Delta) / (\Delta_f - \Delta_c) & \text{if } \Delta_c < \Delta \leq \Delta_f \\ 0 & \text{if } \Delta > \Delta_f \end{cases} \quad (6)$$

式中： $k$ 为界面黏结刚度； $\Delta_c$ 为界面强度所对应的界面位移； $\Delta_f$ 为界面最终分离时的位移。曲线下方（图2b）的面积用 $G_c$ 表示，表示界面黏附能。



a 界面单元



b 双线性内聚力模型

图 2 界面单元和双线性内聚力模型

Fig.2 Interface element and bilinear internal cohesive force model: a) interface element; b) bilinear interface cohesive force model

实际情况中，涂层与基体之间会有一定的微粗糙和起伏，而在本模拟中将界面等效为平直界面，其等效方法如图3所示。假设：界面黏附能为 $G_c$ ，粗糙的表面积为 $S_R$ ，等效平直界面的黏附能为 $G_c^e$ ，面积为 $S$ 。根据涂层剥离能等效原则（即：二者涂层完全剥离时所需要的能量相等），则公式（7）成立。对于粗糙界面，在模拟过程中可采用式（7）的等效黏附能。

$$G_c^e = G_c \cdot S_R / S \quad (7)$$

在数值模拟中，将界面离散为诸多界面单元。其

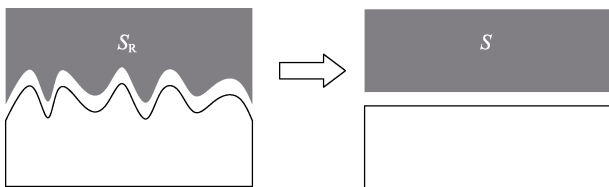


图 3 粗糙界面等效为光滑界面

Fig.3 Equivalence of a rough interface into a smooth one

上表面与涂层单元共用节点，下表面与基体单元共用节点。界面单元的2个面如图4所示，该界面单元的总应变能为：

$$\tilde{W} = \int \Psi(\Delta) dA \quad (8)$$

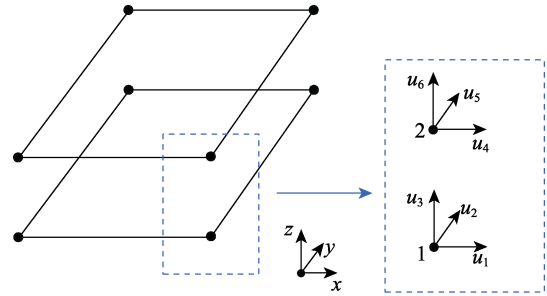


图 4 界面单元

Fig.4 Interface element

通过式（8）可以得到界面单元的节点力和刚度矩阵分别为：

$$\tilde{F}_i = \frac{\partial \tilde{W}}{\partial u_i} = \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \Delta} \frac{\partial \Delta}{\partial u_i} \quad (9)$$

$$\tilde{K}_{ij} = \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial u_i \partial u_j} = \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial \Delta^2} \frac{\partial \Delta}{\partial u_j} \frac{\partial \Delta}{\partial u_i} + \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \Delta} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial u_i \partial u_j}$$

界面位移可计算为：

$$\Delta = \sqrt{(u_4 - u_1)^2 + (u_5 - u_2)^2 + (u_6 - u_3)^2} \quad (10)$$

其中： $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u_4$ 、 $u_5$ 、 $u_6$ 分别为第1节点在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的位移和第2节点在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的位移。

在数值模拟中，涂层离散为三维键元胞，界面离散为内聚力单元，基体离散为线弹性体单元。整个涂层/基体离散系统的最终平衡方程为：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{F}(\mathbf{u}) = \mathbf{R} \quad (11)$$

其中： $\mathbf{u}$ 为离散系统的节点位移向量； $\mathbf{M}$ 为离散系统的质量矩阵； $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵； $\mathbf{F}$ 为节点恢复力向量； $\mathbf{R}$ 为施加在离散系统上的外力向量。采用隐式时间积分算法对该方程进行求解。

## 2 验证算例

为了验证本方法的有效性，模拟文献[36]中的涂层剥离案例。在此案例中涂层和基体均为聚氯乙烯（PVC）材料，其杨氏模量为1.0 GPa，泊松比为0.33。在模拟中采用了双线性黏结法则，界面强度 $T_c = 0.1$  MPa，界面黏附能 $G_c = 0.12$  N/mm。

所模拟的不同厚度涂层的剥离力-位移曲线如图5a所示。从中可看出，剥离力在达到峰值后，开始逐渐降低到一个恒定值，进入稳定的剥离状态。将不同厚度涂层峰值剥离力的模拟值和实测值进行对比（如图5b），发现模拟结果与测试结果吻合良好。同时，稳定剥离力与Kendall<sup>[3]</sup>模型所预测的剥离力

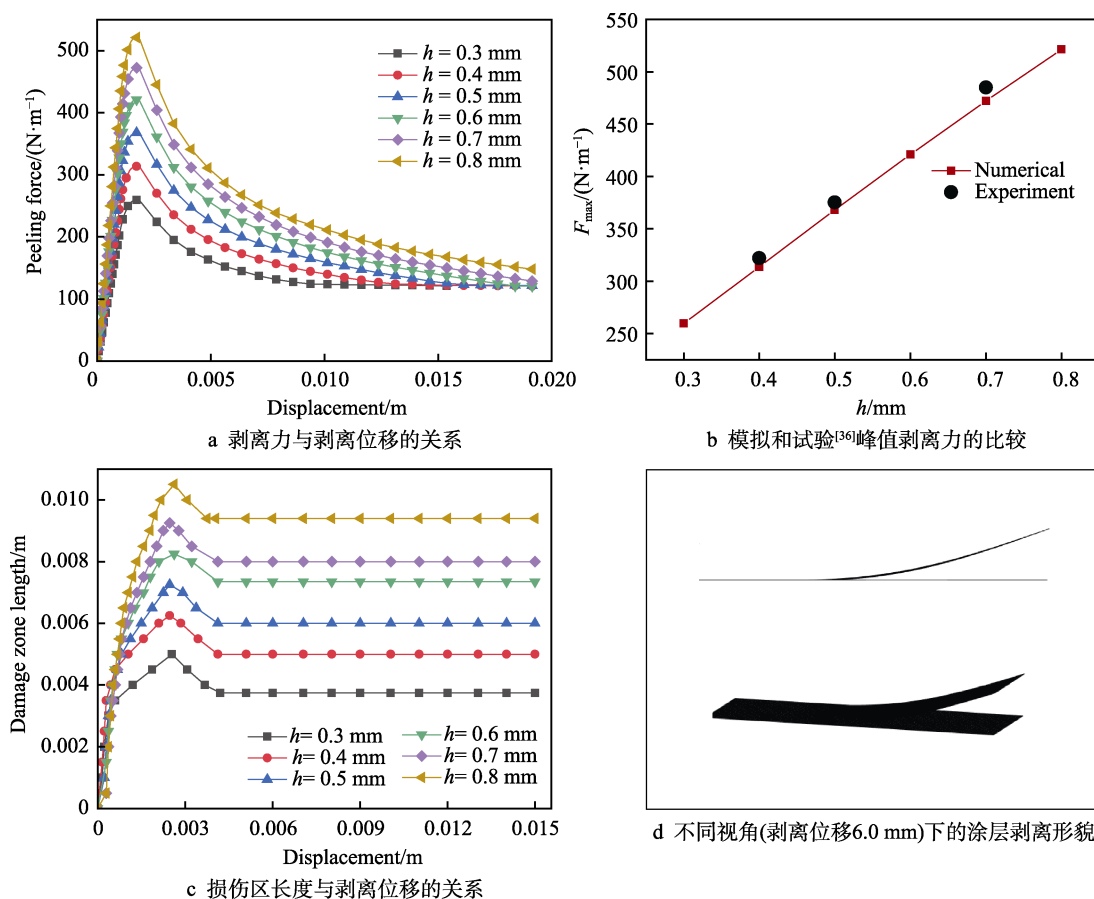


图 5 不同厚度涂层剥离的数值模拟

Fig.5 Simulation of coating peeling with different thickness: a) peeling force versus peeling displacement; b) comparison of simulated and tested<sup>[36]</sup> peak peeling force; c) cohesive zone length versus peeling displacement; d) coating peeling pattern from different views (peeling displacement 6.0 mm)

( $F_{steady}=G_c$ ) 具有一致性。由此, 可以得出本方法是有效的。在剥离过程中, 裂纹尖端涂层发生弯曲, 裂纹扩展。剥离功是涂层弯曲能量和裂纹扩展所需能量的总和。从图 5a 中可以看出涂层厚度对峰值力影响较大, 涂层越厚, 峰值力越高。这是因为在稳定剥离阶段之前, 弯曲刚度对剥离力的影响显著。随着涂层厚度增加, 涂层的弯曲刚度增大, 因此剥离力增大。但在稳定剥离阶段, 不同厚度涂层的剥离力都趋于相同的值。这是因为在稳定阶段, 涂层弯曲的曲率变化可以忽略不计。此时的外部功仅用于界面剥离扩展, 稳定剥离力由界面黏结法则来决定。图 5c 显示了剥离过程中不同厚度涂层的损伤区长度。从中可以看出, 损伤区长度先增加到最大值, 然后逐渐减小到一个稳定值。最大损伤区长度和稳定损伤区长度均与涂层厚度呈正相关。模拟的涂层剥离形貌如图 5d 所示。

### 3 涂层剥离的影响因素分析

在涂层剥离过程中, 涂层厚度、模量和界面黏附能是影响剥离行为的重要物理参数。为了研究其对涂层剥离的影响, 设置了不同涂层模量和界面黏附能参数, 来模拟相应的剥离力和损伤区长度。材料参数:

涂层模量 1.0 GPa, 泊松比 0.33; 界面强度  $T_c=0.1$  MPa, 界面黏附能  $G_c=0.12$  N/mm。

#### 3.1 涂层模量

图 6a 显示了不同涂层模量条件下的剥离力与剥离位移的关系。从中可看出, 剥离力随着剥离位移增大, 达到峰值后逐渐下降到一恒定值。涂层模量越高, 峰值剥离力越大, 这主要是由于涂层弯曲的影响。较高的模量会导致较高的弯曲刚度和弯曲能, 继而导致较高的剥离力。不同模量涂层的剥离力最终都趋于同一水平, 这是因为稳定剥离力受界面黏结法则的控制。图 6c 为不同涂层模量条件下的损伤区长度与剥离位移的关系, 从中可看出最大损伤区长度和稳定阶段损伤区长度均与涂层模量呈正相关。

#### 3.2 界面黏附能

图 7a 显示了界面黏附能对剥离力的影响。从中可看出界面黏附能越高, 峰值剥离力越大。从中还可注意到, 在初始阶段 4 条曲线相互重叠。这是因为在裂纹扩展之前, 剥离能量取决于涂层弯曲, 而这 4 种涂层具有相同的弯曲刚度, 因此具有相同的剥离力。当界面开始剥离后, 曲线依次分离。在稳定剥离阶段,



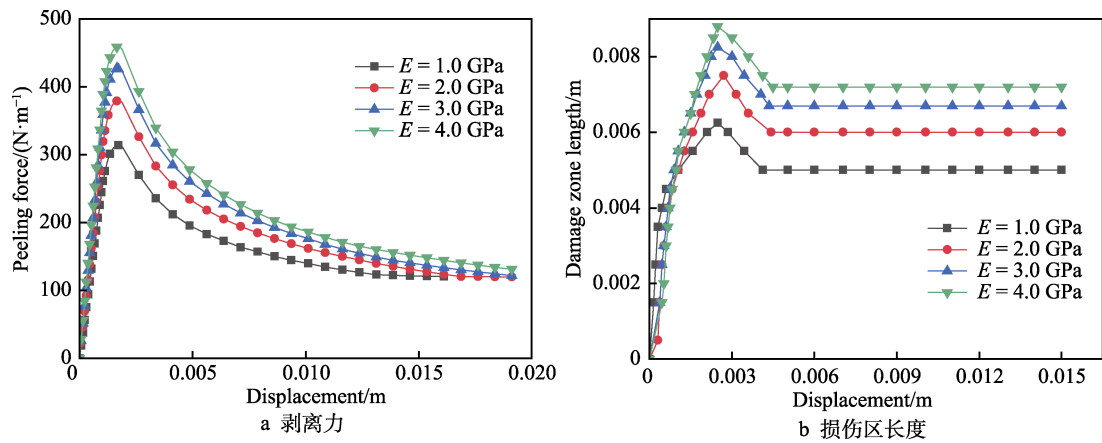


图 6 涂层模量的对界面剥离的影响  
Fig.6 Effect of coating modulus on peeling behavior: a) peeling force; b) damage zone length

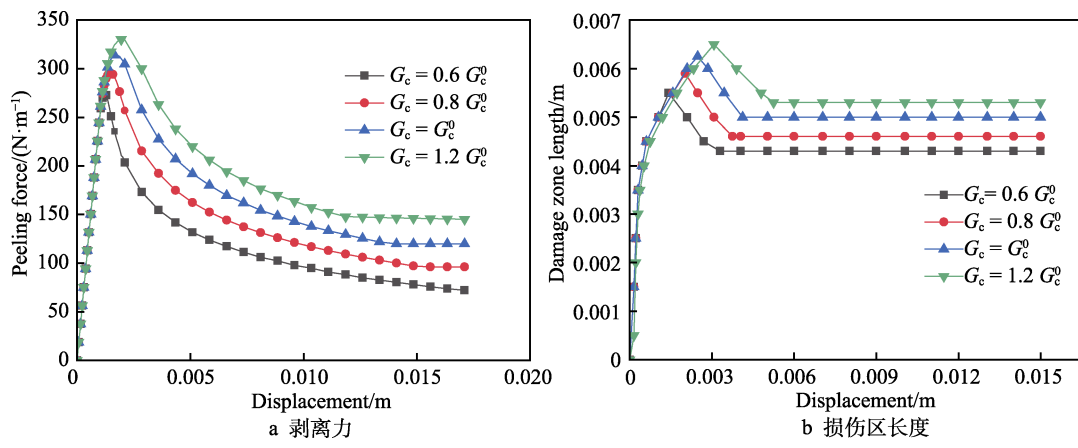


图 7 界面黏附能对剥离过程的影响  
Fig.7 Effect of interfacial adhesion energy on peeling behavior: a) peeling force; b) damage zone length

不同界面黏附能涂层的剥离力曲线并不趋于同一恒定水平,而是符合 Kendall<sup>[3]</sup>模型所预测的稳定剥离力与界面黏附能的关系。图 7b 显示了界面黏附能对损伤区长度的影响。从中可看出,最大损伤区长度和稳定阶段损伤区长度均与界面黏附能呈正相关。

### 3.3 端部裂纹

当涂层与基体界面在端部存在初始裂纹时(图 8a),涂层的剥离会受一定的影响。在剥离实验中预留未黏附段以便进行加载,也可看作端部存在初始裂纹的情况。设置了不同的初始裂纹长度  $L$  来研究其对涂层剥离力的影响,模拟结果如图 8b 所示。从中可看出,初始裂纹的存在会降低峰值剥离力,且随着初始裂纹长度的增加,峰值剥离力逐渐减小。但初始裂纹长度以及初始裂纹存在与否都不影响稳定阶段剥离力的大小。

### 3.4 内部裂纹

另一种情况是初始裂纹在涂层内部,如图 9a 所示。初始裂纹长度  $L_2$  和到端部距离  $L_1$  都会影响界面剥离。为了研究该问题,分别设置 2 种方案进行模拟:  
(i)  $L_1$  恒定,  $L_2$  变化; (ii)  $L_2$  恒定,  $L_1$  变化。

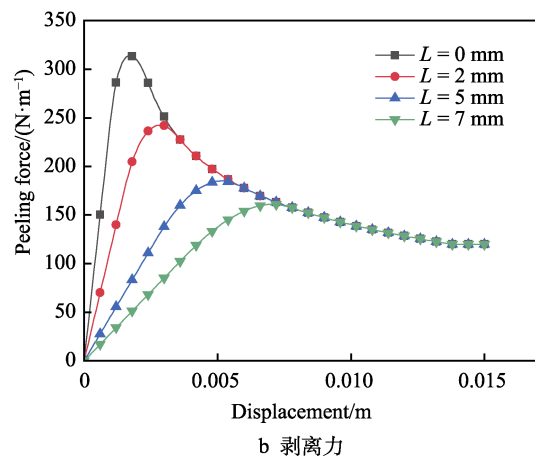
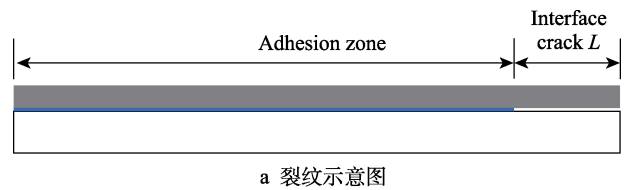


图 8 端部裂纹对涂层剥离的影响  
Fig.8 Effect of end interface crack on peeling behavior: a) diagram of end interface crack; b) peeling force

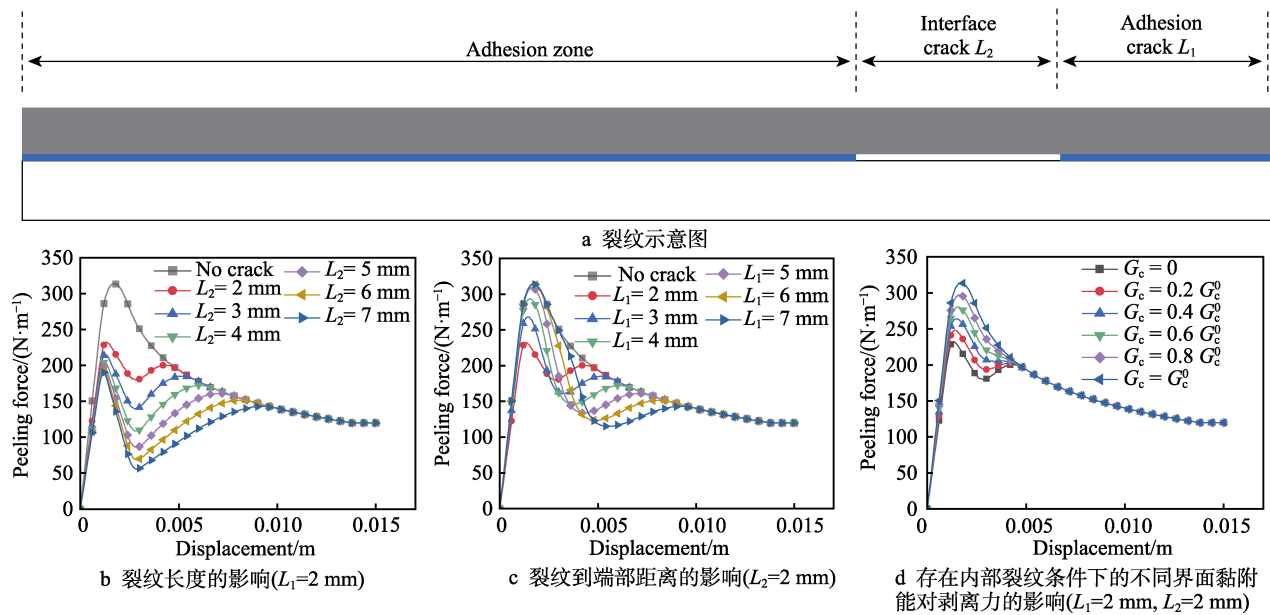


图 9 界面裂纹对剥离力的影响

Fig.9 Effect of interface crack on peeling force: a) diagram of interface crack; b) influence of crack length ( $L_1=2$  mm); c) influence of crack distance to coating end ( $L_2=2$  mm); d) effect of interfacial adhesion energy on peeling force with inner interface crack ( $L_1=2$  mm,  $L_2=2$  mm)

图 9b 显示了  $L_1=2$  mm 的情况下, 不同裂纹长度对剥离力的影响。从中可以看出, 裂纹的存在显著地降低了峰值剥离力, 且裂纹越长降低越明显。但是, 当裂纹长度超过 5 mm 时, 裂纹长度增加对峰值剥离力的影响很小。裂纹的存在使得剥离力在稳定剥离之前出现了最小值, 裂纹长度越长, 该值越小, 但稳定剥离力不受初始裂纹的影响。

图 9c 是  $L_2=2$  mm 时, 不同  $L_1$  条件下的模拟结果。从中可以看出, 在  $L_1$  为 2~4 mm 时, 峰值剥离力减小, 且  $L_1$  越小, 峰值剥离力越小。当  $L_1$  增大到 5 mm 之后, 裂纹不再影响峰值剥离力的大小。裂纹的存在使得剥离力在稳定阶段之前出现了最小值, 且  $L_1$  越大, 该值越小。继续剥离会进入稳定剥离状态, 裂纹并不影响稳定阶段剥离力的值。

在上述模拟案例中, 初始裂纹与基体完全脱黏。为了考虑初始裂纹与基体没有完全脱黏的情况下, 初始裂纹对剥离力的影响, 本文设置了不同初始裂纹的黏附能进行模拟。模拟结果如图 9d 所示, 从中可看出剥离力随着界面黏附能的降低而逐渐减小。

### 3.5 材料本构的影响

界面的黏结特征可由界面强度和界面黏附能来表征。在二者保持不变的情况下, 黏结法则的形状是否对剥离力-剥离位移关系产生影响是一个重要的问题。针对此, 本节给定了界面强度为 0.1 MPa, 黏附能为 0.12 N/mm, 但黏结法则采用 3 种不同形状, 如图 10a 所示。针对 3 种不同形状的黏结法则, 对涂层剥离过程进行模拟, 模拟结果如图 10b 所示。从中

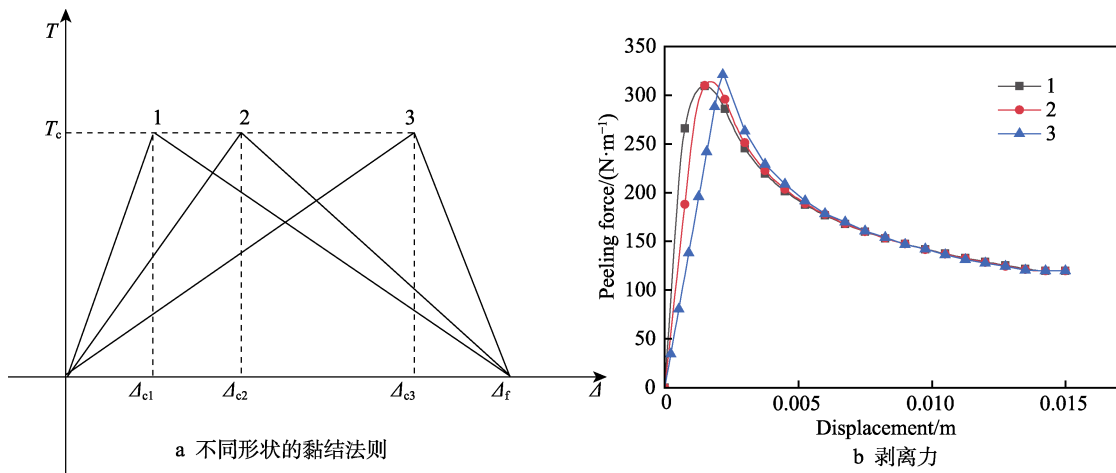


图 10 双线性黏结法则形状对剥离力的影响

Fig.10 Effect of bilinear cohesive law shape on peeling force: a) cohesive law with different shape; b) simulated peeling force

可以看出,黏结法则形状主要对峰前剥离力产生影响,黏结法则的峰前“刚度”越大,剥离力的峰前段越陡,但是峰值剥离力相差无几,而峰后剥离力曲线几乎重合。这说明黏结法则的几何形状只会影响剥离力的峰前段,对于剥离力的峰值和峰后阶段几乎没有影响。

## 4 结论

为了更好地模拟涂层剥离行为,发展了内聚力界面-离散化虚内键(DVIB)模拟方法。涂层采用DVIB来建模,涂层与基体之间的界面采用双线性内聚力模型。模拟算例表明本方法可以有效地模拟涂层剥离过程。

通过模拟分析,发现涂层模量对稳定剥离阶段之前的剥离力有较大的影响,涂层模量越高,剥离力越大。涂层厚度的影响与模量类似,这是因为较厚的涂层或较高的模量可以导致相同的“弯曲”效应。与不同的是,界面黏附能影响着稳态剥离力和峰值剥离力,黏附能越高,剥离力越大。端部裂纹会导致峰值剥离力减小,内部裂纹因其长度和位置的不同会对峰值剥离力产生不同的影响,会导致稳定阶段之前出现最小剥离力,但是裂纹不会影响稳定剥离力的大小。黏结法则的几何形状只会影响剥离力的峰前段,对于剥离力的峰值和峰后阶段几乎没有影响。本工作为涂层剥离行为提供了一种新的模拟方法,同时也揭示了不同因素对涂层剥离的影响。

### 参考文献:

- [1] GU Y, ZHANG C Z. Fracture Analysis of Ultra-Thin Coating/Substrate Structures with Interface Cracks[J]. International Journal of Solids and Structures, 2021, 225: 111074.
- [2] RIVLIN R. The Effective Work of Adhesion[J]. Paint Technology, 2024(106): 944.
- [3] KENDALL K. Thin-Film Peeling - the Elastic Term[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1975, 8(13): 1449-1452.
- [4] GEORGIU, HADAVINIA, IVANKOVIC, et al. Cohesive Zone Models and the Plastically Deforming Peel Test[J]. The Journal of Adhesion, 2003, 79(3): 239-265.
- [5] CEGLIE M, MENGA N, CARBONE G. The Role of Interfacial Friction on the Peeling of Thin Viscoelastic Tapes[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2022, 159: 104706.
- [6] PENG Z L, CHEN S H. Effect of Pre-Tension on the Peeling Behavior of a Bio-Inspired Nano-Film and a Hierarchical Adhesive Structure[J]. 2012, 101(16): 163702.
- [7] WANG T T, LI Y R, HUANG G Y. Effect of Substrate Deformation and Bonding Length on the Peeling Behavior[J]. International Journal of Solids and Structures, 2023, 270: 112241.
- [8] SHEN C S, WANG H F, DU C L. Peeling of a Film from a Flexible Cantilever Substrate[J]. Mechanics Research Communications, 2022, 119: 103833.
- [9] DENG W L, KESARI H. Angle-Independent Optimal Adhesion in Plane Peeling of Thin Elastic Films at Large Surface Roughnesses[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2021, 148: 104270.
- [10] GARG R, DATLA N V. Peeling of Heterogeneous Thin Films: Effect of Bending Stiffness, Adhesion Energy, and Level of Heterogeneity[J]. The Journal of Adhesion, 2019, 95(3): 169-186.
- [11] WAN X D, HE Y F, YANG C H. Simulation of the Peel of Hydrogels with Stiff Backing[J]. Soft Matter, 2022, 18(2): 272-281.
- [12] YIN H B, LIANG L H, WEI Y G, et al. Determination of the Interface Properties in an Elastic Film/Substrate System[J]. International Journal of Solids and Structures, 2020, 191: 473-485.
- [13] SHUI L Q, YAN W D, ZHANG Y J, et al. Peeling Mechanics of Film-Substrate System with Mutually Embedded Nanostructures in the Interface[J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 251: 111737.
- [14] CEGLIE M, MENGA N, CARBONE G. The Role of Interfacial Friction on the Peeling of Thin Viscoelastic Tapes[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2022, 159: 104706.
- [15] XIA S M, PONSON L, RAVICHANDRAN G, et al. Adhesion of Heterogeneous Thin Films II: Adhesive Heterogeneity[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, 83: 88-103.
- [16] PENG Z L, YIN H B, YAO Y, et al. Effect of Thin-Film Length on the Peeling Behavior of Film-Substrate Interfaces[J]. Physical Review E, 2019, 100(0): 032804.
- [17] 吴金波, 孙奇, 江晓禹. 基于分布位错法对涂层裂纹力学行为的研究[J]. 表面技术, 2024, 53(7): 171-179.  
WU J B, SUN Q, JIANG X Y. Mechanical Behavior of Coating Cracks Based on Distributed Dislocation Method [J]. Surface Technology, 2024, 53(7): 171-179.
- [18] 叶东东, 王卫泽, 周海婷, 等. 基于太赫兹技术的热障涂层平行裂纹监测研究[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 91-97.
- [19] YE D D, WANG W Z, ZHOU H T, et al. Parallel Crack Monitoring of Thermal Barrier Coatings Based on Terahertz Technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 91-97.
- [19] 白清顺, 张亚博, 王永旭, 等. 微裂纹缺陷对CVD金刚石涂层微刀具损伤失效的影响研究[J]. 表面技术,



- 2021, 50(2): 355-362.
- BAI Q S, ZHANG Y B, WANG Y X, et al. Effect of Micro-Crack Defects on Damage and Failure of CVD Diamond Coating Micro-Tools[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(2): 355-362.
- [20] BELYTSCHKO T, BLACK T. Elastic Crack Growth in Finite Elements with Minimal Remeshing[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999, 45(5): 601-620.
- [21] MOËS N, DOLBOW J, BELYTSCHKO T. A Finite Element Method for Crack Growth without Remeshing [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999, 46(1): 131-150.
- [22] RYBICKI E F, KANNINEN M F. A Finite Element Calculation of Stress Intensity Factors by a Modified Crack Closure Integral[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1977, 9(4): 931-938.
- [23] DUGDALE D S. Yielding of Steel Sheets Containing Slits[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960, 8(2): 100-104.
- [24] BARENBLATT G I. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture[M]. Amsterdam: Elsevier, 1962: 55-129.
- [25] TVERGAARD V, HUTCHINSON J W. The Relation between Crack Growth Resistance and Fracture Process Parameters in Elastic-Plastic Solids[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1992, 40(6): 1377-1397.
- [26] CHEN B, SHI X H, GAO H J. Apparent Fracture/Adhesion Energy of Interfaces with Periodic Cohesive Interactions[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2008, 464(2091): 657-671.
- [27] DE LORENZIS L, ZAVARISE G. Modeling of Mixed-Mode Debonding in the Peel Test Applied to Superficial Reinforcements[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(20): 5419-5436.
- [28] GARG R, DATLA N V. Peeling of Heterogeneous Thin Films: Effect of Bending Stiffness, Adhesion Energy, and Level of Heterogeneity[J]. *The Journal of Adhesion*, 2019, 95(3): 169-186.
- [29] LONG H, LIANG L H, WEI Y G. Failure Characterization of Solid Structures Based on an Equivalence of Cohesive Zone Model[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, 163: 194-210.
- [30] XU G N, YANG L, ZHOU Y C. Investigating the Interface Cracking Mechanism of CMAS-Corroded Thermal Barrier Coatings Based on the Cohesive Zone Model[J]. *Corrosion Science*, 2022, 204: 110337.
- [31] KYAW S T, JONES I A, HYDE T H. Simulation of Failure of Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating Due to Interfacial and Bulk Cracks Using Surface-Based Cohesive Interaction and Extended Finite Element Method[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2016, 51(2): 132-143.
- [32] ZHANG Z N. Discretized Virtual Internal Bond Model for Nonlinear Elasticity[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2013, 50(22/23): 3618-3625.
- [33] GAO H J, KLEIN P. Numerical Simulation of Crack Growth in an Isotropic Solid with Randomized Internal Cohesive Bonds[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1998, 46(2): 187-218.
- [34] JAIN S, NA S R, LIECHTI K M, et al. Characteristic Scaling Equations for Softening Interactions between Beams[J]. *International Journal of Fracture*, 2016, 201(1): 1-9.
- [35] JAIN S, NA S R, LIECHTI K M, et al. A Cohesive Zone Model and Scaling Analysis for Mixed-Mode Interfacial Fracture[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, 129: 167-176.
- [36] YIN H B, LIANG L H, WEI Y G, et al. Determination of the Interface Properties in an Elastic Film/Substrate System[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 191: 473-485.