

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0304

高过载下聚氨酯黏接界面动力学响应与失效实验及数值模拟

张兴渝, 王永刚*, 蒋招绣

(宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对高过载环境下电子器件聚氨酯灌封防护界面失效问题, 开展聚氨酯黏接界面动力学失效行为研究。首先通过设计铜/聚氨酯/铜三明治结构试样, 采用万能试验机开展了准静态垂直拉伸实验, 揭示了界面延性失效的损伤演化规律, 定量表征了界面强度和变形刚度等关键力学参数。设计了铜片/聚氨酯/铜柱(作为附加质量块)复合结构试样, 利用自由式霍普金森杆冲击加载装置, 通过调控卸载波时序实现聚氨酯黏接界面动态剥离, 并基于激光测速技术捕捉了附加质量块自由面速度演化特征, 建立了聚氨酯黏接界面动态失效行为的实验表征方法。基于内聚力模型, 开展了聚氨酯黏接界面失效的瞬态有限元数值模拟, 阐明了界面刚度、强度及临界失效位移等模型参数对动态失效过程及自由面速度特征的影响规律。数值模拟与实验结果吻合良好, 验证了内聚力模型在表征界面动态失效行为方面的有效性。进一步研究表明, 界面失效模型参数与加载加速度之间呈现线性增长关系, 相比内聚力强度参数, 计算结果对临界失效位移参数的敏感性较弱。

关键词: 聚氨酯黏接界面; 高过载; 霍普金森杆; 失效; 数值模拟

中图分类号: TJ012.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132(2025)04-0067-10

在高过载环境中(如导弹发射、火箭推进、高速碰撞等), 电子器件需要承受的瞬时加速度高达 $10^4g\sim 10^5g$ 量级, 由此引发的力学损伤已经成为制约高精度电子系统可靠性的关键瓶颈^[1-3]。为提高电子器件的抗高过载能力, 封装防护技术被广泛采用^[4-5]。聚氨酯(PU)因其优异的弹性、耐化学性、绝缘性和抗冲击阻尼特性, 成为电子器件抗高过载封装防护的理想材料^[6-8]。然而, 聚氨酯与金属、陶瓷基材之间的异质界面在高应变率($10^2\sim 10^4s^{-1}$)载荷下易发生动态脱黏失效^[9-10]。

在界面强度表征领域, 现有研究主要集中于准静态载荷条件。杨班权等^[11]对界面结合强度测量方法进行了系统综述, 总结了拉伸法、剪切法、四点弯曲法、划痕法、压入法等常用方法。拉伸法和弯曲法是被广泛采用的测量涂层/黏接剂与基体材料界面结合强度的方法。Pereira等^[12]采用拉伸剥离

法探究了复合材料/铝、复合材料/复合材料、铝/铝环氧树脂黏接剂界面的剥离承载能力, 揭示了黏接物对黏接剂黏附性能的影响机制。Badwe等^[13]利用垂直拉伸法研究了铜/环氧树脂界面的断裂强度和韧性。近期, 瞬态冲击载荷下界面动态强度测试也引起了人们关注。Blackman等^[14]采用高速拉伸试验机和双悬臂梁测试样品, 研究了环氧树脂黏接界面临界应变能释放速率与应变速率的变化, 结果表明, 高应变率下临界应变能释放速率与准静态条件下的数据相比降低了40%。Devi等^[15]使用冲击鼓包测试(ILBT)研究了环氧树脂与钢的黏接界面破坏行为, 获得了界面开裂起始强度。Kojima等^[16]采用高应变率剪切试验, 研究了环氧树脂黏接界面剪切断裂韧性。Ponnuswami等^[17]基于分离式霍普金森压杆(SHPB)发展了碳纤维/环氧树脂复合材料界面分层的试验方法, 确定了复合界面的动

收稿日期: 2025-03-10

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11972202)

第一作者: 张兴渝, 硕士研究生, 主要研究方向为冲击动力学。E-mail: 18305676301@163.com

*通信作者: 王永刚, 博士/教授, 主要研究方向为冲击动力学。E-mail: wangyonggang@nbu.edu.cn

态断裂能。

在数值模拟方面,黏接界面动力学响应的有限元分析已取得显著进展。Ponnuswami 等^[17]基于内聚力模型(CZM),结合动态楔形双悬臂梁试验结果,采用数值逆建模策略,确定了纤维增强聚合物材料动态 I 型断裂特性。Katsivalis 等^[18]通过内聚力模型成功预测了玻璃/钢环氧树脂黏接界面损伤和失效行为。Jia 等^[19]建立了黏接界面率相关内聚力本构模型,并基于双悬臂梁等实验数据对模型进行了校准和验证。Dengiz^[20]通过相场 PF 法模拟了 T 型试样黏接界面剥离破坏行为。Karac 等^[21]利用有限体积法(FVM)模拟了锥形双悬臂梁试样黏接界面断裂行为,分析了应变速率对黏结强度和临界应变能释放速率的影响。王永刚等^[22]基于层裂实验测得的自由面速度波剖面,研究了内聚力模型参数对计算结果的影响。Marzi 等^[23]提出了依赖于速率的双线性内聚力模型,计算了胶黏剂黏合对接接头界面锥形双悬臂梁黏合界面失效过程,验证了内聚力模型的可靠性。

尽管已有研究关注黏接界面强度和失效行为的实验与模拟,但对于高过载环境下封装界面强度的动态测试与数值模拟仍有待进一步发展。SHPB 作为一种成熟的高应变率力学性能测试技术,其应变率范围($10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$)能有效覆盖高过载环境工况,为界面动态强度和失效行为研究提供了可靠的实验手段。本文以电子器件封装中广泛存在的铜/聚氨酯黏接界面为研究对象,采用 SHPB 加载装置,结合超高速相机实时捕捉界面失效的瞬态过程,同时利用多普勒激光测速仪(DPS)精确监测界面失效过程中自由面粒子速度响应,系统开展了

准静态与高过载条件下的界面强度和失效行为实验研究,讨论了聚氨酯界面失效的动力学响应特征。基于内聚力模型,利用 Abaqus 有限元软件对实验结果进行数值模拟计算,通过实验-模拟结果对比分析,实现内聚力参数协同优化标定,并揭示了内聚力模型参数(包括刚度、强度及临界位移)对模拟结果的影响规律。研究结果有助于高过载环境下电子器件封装界面的可靠性设计与评估。

1 聚氨酯封装界面力学性能实验

1.1 试样制备

采用深圳市照宇恒科技有限公司提供的双组分聚氨酯材料,由异氰酸酯(A组分)与多元醇(B组分)按 1:1 质量比配制。针对准静态与动态加载工况,分别设计等直径与非对称三明治界面结构试样。具体制备工艺如下:精确称量 A、B 组分后,经机械搅拌(800 r/min , 3 min)实现两组分充分混合,随后进行真空脱泡处理(-0.1 MPa , 30 min),直至树脂体系无可见气泡析出,确保黏接界面完整性。准静态试样采用两个等直径铜棒黏接三明治结构($\Phi 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$),如图 1(a)所示。将脱泡后的聚氨酯胶液涂覆于预处理铜基底,室温固化 24 h 后形成标准拉伸试样,通过显微测量黏接层厚度为(0.10 ± 0.02) mm。冲击试样设计为非对称铜柱-铜片复合结构($\Phi 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 铜柱/ $\Phi 20 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 铜片),如图 1(b)所示。试样放在显微镜下进行观察,其结果如图 1(c)所示,从显微镜观察结果可以看出聚氨酯与铜黏接界面无明显缺陷和气泡,可以认为黏接质量良好,界面厚度精确控制为 0.1 mm。

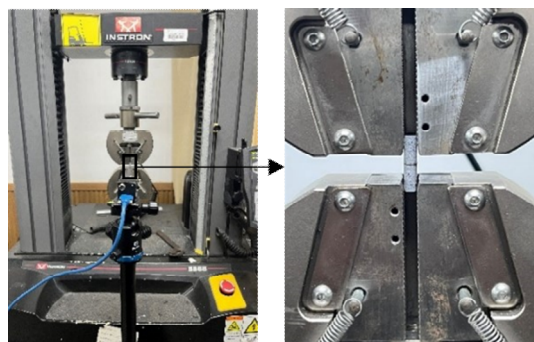


图 1 聚氨酯黏接界面试样实物图

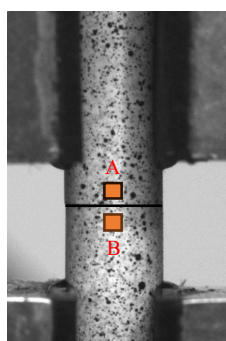
1.2 实验方案

1.2.1 准静态实验

采用 Instron 5966 电子万能试验机开展聚氨酯黏接界面准静态拉伸测试, 实验装置如图 2 (a) 所示。实验通过位移控制模式加载, 设定速率为 0.01 mm/s , 界面层厚度为 0.1 mm , 忽略铜柱变形条件下, 界面拉伸应变率为 0.1 s^{-1} 。拉伸载荷由测力传感器进行测量, 测力传感器的量程为 $10\,000 \text{ N}$, 测试精度为 0.01% 。由于聚氨酯黏接界面厚度仅为 0.1 mm , 拉伸过程中位移非常小, 试验机位移传感器的测试精度难以满足要求。为了准确获取聚氨酯黏接界面在拉伸过程中的位移信息, 实验之前在试样表面喷涂黑白散斑, 然后采用高分辨相机以 30 帧/s 速率采集试样变形图像, 再通过数字图像相关性 (Digital Image Correlation, DIC) 分析方法对试样表面位移场进行分析, 提取靠近聚氨酯黏接界面上下 A 和 B 两点位移之差, 作为黏接界面的拉伸位移, 如图 2 (b) 所示。



(a) 实验装置



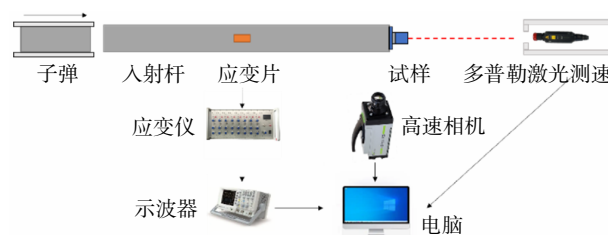
(b) DIC 位移测量示意图

图 2 聚氨酯黏接界面准静态拉伸实验装置及 DIC 示意

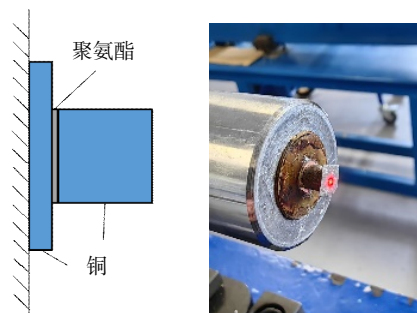
1.2.2 自由式霍普金森压杆实验

基于 SHPB 加载系统, 结合应力波自由面反射卸载原理, 构建了聚氨酯黏接界面动态失效测试平

台, 实验测试系统布置如图 3 (a) 所示。采用单杆配置, 将图 3 (b) 所示的三明治结构试样 (铜片/聚氨酯/铜柱) 直接装配于入射杆末端, 其中铜片与入射杆之间采用高强度 502 胶水黏接, 由于 502 胶水黏接面积是聚氨酯黏接面积的 16 倍, 可以确保铜片与入射杆黏接辅助界面不会发生提前失效问题。实验过程中, 气动发射装置驱动子弹 ($L=2\,000 \text{ mm}$, $\Phi=25 \text{ mm}$) 以设定速度撞击入射杆 ($L=4\,000 \text{ mm}$, $\Phi=25 \text{ mm}$), 产生压缩应力波。应力波经入射杆传递至试样后, 在铜柱自由端产生反射卸载效应, 产生反向加速度, 诱导界面拉伸应力场形成。实验中, 界面失效是在铜柱的惯性力作用下产生的, 因此, 铜柱质量是控制界面失效的重要参数, 后续把铜柱定义为界面附加质量块。一旦界面发生分离, 附加质量块以一定的速度飞出。



(a) 自由式霍普金森杆及测试系统布置



(b) 动态拉伸试样

图 3 聚氨酯黏接界面动态拉伸实验原理示意及试样设计

在实验过程中, 采用德国 POLYTEC 公司的 HSV-E-100 型 DPS 及英国 I-speed 514 高速相机同时监测附加质量块的运动时程和界面分离信息。其中, DPS 同轴安装于霍普金森杆尾部, 通过调整其焦距确保激光束精确聚焦于试样表面预设的反光纸上。高速相机采用正交方位架设于霍普金森杆加载轴线, 配合镜头和补光系统, 其采样频率设定为 $50\,000 \text{ 帧/频}$ 以完整捕捉界面失效的瞬态过程。具体实验安排与实验结果见表 1。

表 1 实验安排与实验结果

序号	气压/ MPa	入射杆速 度/(m·s ⁻¹)	加载加速 度/g	卸载加速 度/g	界面实验 结果
1	0.25	1.0	5 500	3 400	未破坏
2	0.30	1.3	7 800	4 300	破坏
3	0.35	1.5	10 000	5 800	破坏
4	0.40	2.2	15 000	8 500	破坏

注: 铜柱质量为 0.876 g。

2 实验结果分析

2.1 准静态实验结果分析

基于万能试验机的垂直拉伸法作为测量黏接界面结合强度的标准化方法,其核心原理是通过法向拉伸载荷直接表征界面力学性能。界面结合平均强度的计算遵循经典力学公式 $\sigma=F/A$, 其中 F 为界面承受的最大载荷, A 为黏接层与基体的有效接触面积。实验过程中,测力传感器记录试样的载荷时程曲线,结合黏接层面积,换算为应力时程曲线。通过 DIC 技术同步获取聚氨酯黏接界面层的位移时程曲线,消去时间变量后,最终获得聚氨酯/铜黏接界面在应变率 10^{-1} s^{-1} 下的应力—位移响应曲线,如图 4 所示。

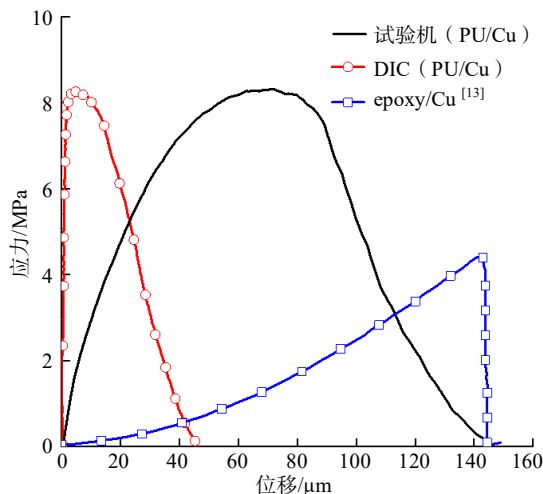


图 4 聚氨酯/铜黏接界面的应力—位移响应曲线

值得注意的是,图 4 也给出了万能试验机内置位移传感器测得的结果,其比 DIC 测量位移高出 2 倍,这主要归因于试验机驱动系统机械间隙引起的非界面真实变形。从图 4 中可以看出,聚氨酯/铜界面的力学响应呈现典型的两阶段特征:(1) 准弹性快速变形阶段,应力位移线性上升至峰值 8.2

MPa, 对应界面变形刚度为 4 TPa/m; (2) 刚度退化与界面失效阶段,应力达到峰值后,界面损伤累积导致刚度持续下降,最终引发延性界面开裂。通过对应力—位移曲线进行积分运算,得到聚氨酯界面的临界应变能释放速率 $G_{IC}=215 \text{ N/m}$, 表现出较强的抵抗裂纹扩展能力。作为对比, Badwe 等^[13]采用相同方法测试环氧树脂/铜界面,其应力—位移曲线也显示在图 4 中,环氧树脂黏接界面强度为 4.4 MPa, 弹性阶段刚度仅为 0.031 TPa/m, 而 G_{IC} 为 247 N/m。

聚氨酯和环氧树脂是电子器件封装防护中常用的两种材料。两者的界面失效模式差异显著,聚氨酯黏接界面表现为渐进式延性变形开裂模式,而环氧树脂界面则表现为脆性突发性变形开裂模式。进一步结合单轴拉伸实验结果,如图 5 所示,揭示两种界面开裂模式差异的内在机制。聚氨酯由软段(多元醇)和硬段(异氰酸酯/扩链剂)交替组成,软段提供弹性,硬段形成微区交联,实现“刚柔并济”的力学响应,屈服强度较低但具有超高断裂伸长率(>100%),分子链的强韧化效应使得界面塑性变形能量耗散强,界面强度(8.2 MPa)接近基体强度(9.5 MPa);而环氧树脂以刚性苯环和高度交联的三维网络结构为主,分子链段运动受限,赋予高刚性和强度,但牺牲了韧性,屈服强度高(43 MPa),但其刚性交联网络导致界面应力集中难以松弛,界面强度(4.4 MPa)仅为基体强度的 10%。这一对比表明,黏接界面力学行为取决于材料本构特性与能量耗散机制调控。

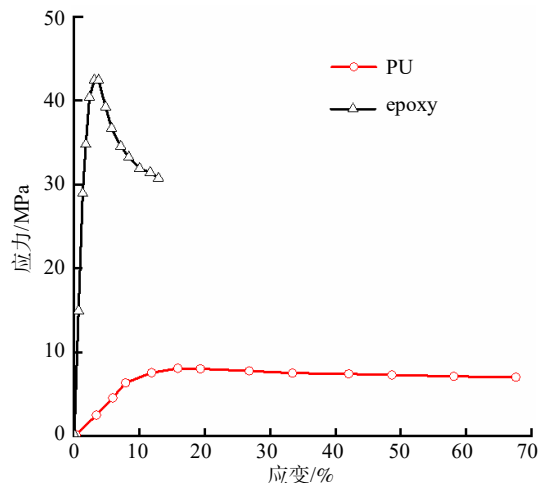


图 5 聚氨酯和环氧树脂准静态拉伸应力—应变曲线

2.2 冲击加载实验结果分析

冲击加载实验中, 首先通过应变片测量入射杆上的应变 (ε) 时程信息, 根据应力波传播理论, 可以把应变转化为粒子速度, 即

$$v = \frac{E\varepsilon}{\rho_0 C} \quad (1)$$

式中: E 、 ρ_0 和 C 分别为入射杆材料的弹性模量、密度和弹性纵波速度。图 6 (a) 给出了不同撞击速度下入射杆上粒子的速度时程信息。对粒子速度曲线进行微分, 获得加载加速度和卸载加速度时程曲线, 如图 6 (b) 所示。结果表明, 应力波传播的弥散效应导致卸载加速度峰值要小于加载加速度的峰值。通过改变子弹速度来精确控制加速度, 具体数值见表 1。

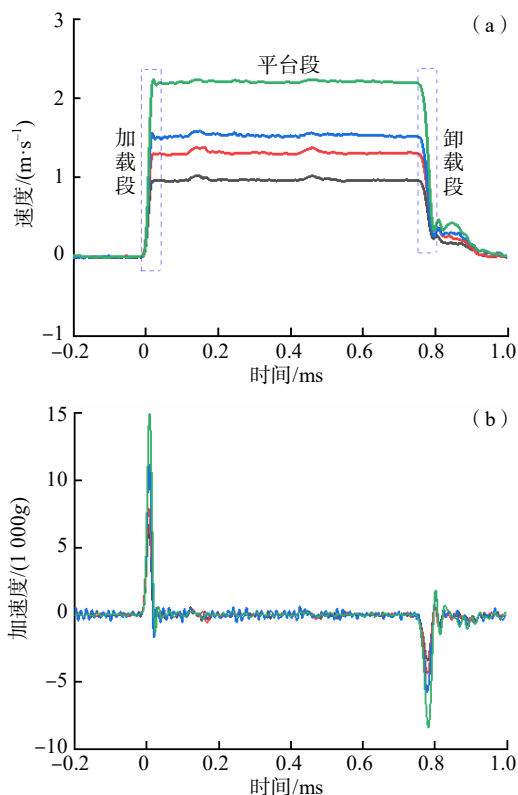


图 6 入射杆上监测的速度和加速度时程曲线

聚氨酯黏接界面动力学过程主要通过附加质量块自由面速度时程曲线来反映。图 7 给出了不同加载加速度幅值条件下附加质量块自由面的速度时程曲线。从图中可以看出: (1) 当加载加速度较小时, 附加质量块自由面速度在卸载段没有出现提前终止, 这表明聚氨酯黏接界面没有出现破坏, 此时自由面速度是入射杆粒子速度的两倍, 满足应

力波传播理论要求^[24]; (2) 随着加载加速度增大, 附加质量块自由面速度在卸载段出现了提前终止, 终止后保持水平, 这表明聚氨酯黏接界面出现破坏, 附加质量块以恒定速度飞出。

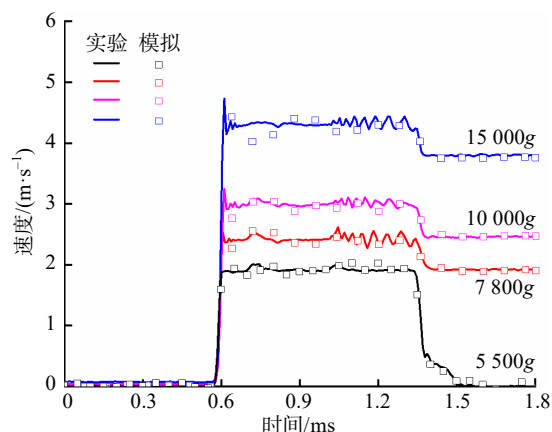


图 7 不同加载加速度下铜柱自由面速度时程曲线

图 8 给出了 10 000g 加载加速度条件下高速相机拍摄的聚氨酯黏接界面破坏时空演化过程。

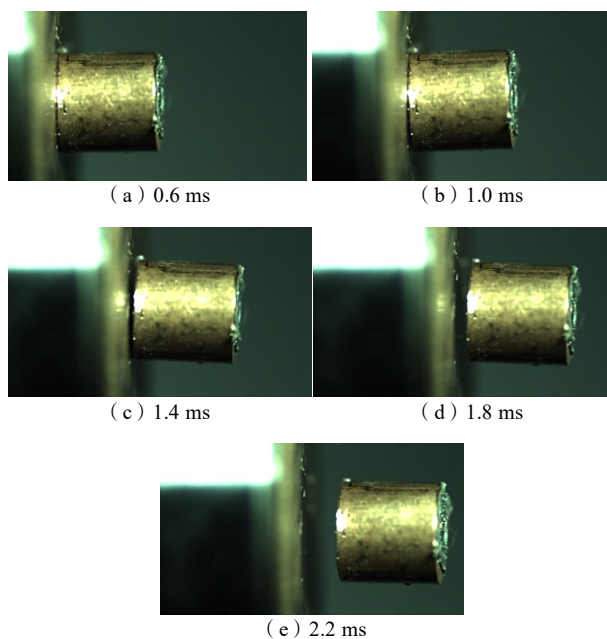


图 8 高速相机拍摄的聚氨酯黏接界面破坏过程

当压缩应力波传播到入射杆杆端时, 入射杆和杆端粘贴试样一起往前运动, 聚氨酯黏接界面处于压缩应力状态, 不发生拉伸失效, 如图 8 (b) 所示; 当压缩波传播到附加质量块自由面后发生反射卸载, 在反射卸载波的作用下, 聚氨酯黏接界面开始发生损伤, 如图 8 (c) 所示; 随着损伤发展, 最终界面完全分离, 附加质量块以恒定的速度飞

出,如图 8(d)所示。高速摄影数据与图 7 的自由面速度测量数据是自洽的,且在不同加载加速度下的高速摄影拍摄数据其破坏形式是相同的。

应力波在三明治结构试样中的传播非常复杂,涉及自由面卸载波和边侧稀疏波相互作用,导致试样中应力状态不能满足一维应力条件。因此,难以利用一维应力波传播理论直接对冲击载荷下聚氨酯黏接界面强度进行理论估算,下面进一步借助数值模拟手段来研究。

3 基于内聚力模型的聚氨酯黏接界面失效数值模拟

3.1 内聚力模型简介

基于损伤力学的内聚力失效模型可以模拟裂纹的萌生和扩展。内聚力失效模型已集成到 Abaqus 有限元软件中。在胶黏剂界面失效模拟中,这种方法应用较多,模拟所需的参数较少。内聚力模型的建立基于以下两个假设:首先,当界面损伤起始时,被黏接基体间的应力传递能力并不会突变性丧失,而是通过胶黏剂刚度的渐进式退化实现能量耗散;其次,界面的断裂行为可以通过牵引-分离方程进行数学描述。内聚力模型可以描述拉伸和剪切两种失效模式,并且假设拉伸型和剪切型裂纹扩展模式是非耦合的,其关系均由牵引-分离方程来描述。

$$\sigma = K\delta \quad (2)$$

$$K' = (1-D)K \quad (3)$$

式中: σ 为牵引应力; K 为黏接界面的内聚力刚度; δ 为牵引位移; K' 为损伤发生至 B 点(图 9)时的损伤弹性; D 为损伤变量。仅考虑界面拉伸型失效模式,拉伸型牵引-分离关系曲线如图 9 所示。假设黏接剂界面内聚力行为在损伤开始前是线弹性的(图 9 中的 OA),在损伤开始之后是损伤从 0 线性增长至 1(图 9 中的 AC)。

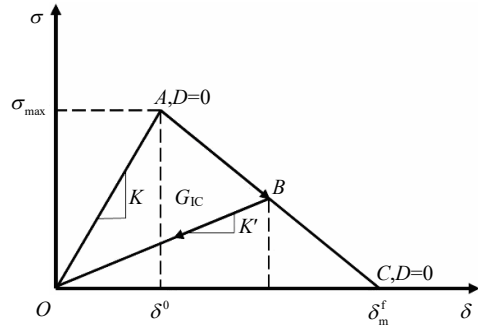


图 9 牵引分离双线性关系图

当黏接界面开始损伤(图 9 中的点 A)时,存在一个内聚力强度 $\sigma_{\max}$ 和损伤开始位移 δ^0 , δ^0 计算公式为

$$\delta^0 = \frac{\sigma_{\max}}{K} \quad (4)$$

损伤发生后,黏接界面刚度开始减小,当刚度变为零时,黏接界面分离。由于牵引分离位移曲线所包含的面积等于黏接界面失效分离的临界应变能释放速率,因此,临界失效位移 δ_m^f 计算公式为

$$\delta_m^f = \frac{2G_{IC}}{\sigma_{\max}} \quad (5)$$

其中 G_{IC} 表示黏接界面的临界应变能释放速率。图 9 中 A 点和 C 点之间, D 的计算公式为

$$D = \frac{\delta_m^f(\delta - \delta^0)}{\delta(\delta_m^f - \delta^0)} \quad (6)$$

3.2 有限元模拟及可靠性验证

基于 SHPB 实验及结果,在 Abaqus 有限元软件中建立全尺寸二维轴对称单元模型,入射杆和聚氨酯与铜柱黏接试样,如图 10 所示。为了提高计算精度,对入射杆杆端和试样进行网格精细划分,网格类型为 CAX3,网格数为 92 340 个。计算中子弹和入射杆为钢材,采用线弹性本构模型,密度(ρ)为 7.8 g/cm^3 ,弹性模量(E)为 210 GPa ,泊松比为 0.3。铜柱也采用线弹性模型,密度为 8.93 g/cm^3 ,弹性模量为 120 GPa ,泊松比为 0.3。

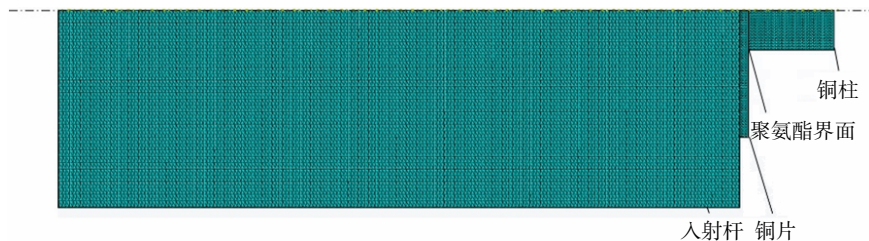


图 10 二维轴对称计算模型

模拟把实验中入射杆的应力时程曲线换算为压强时程曲线,并将压强作为加载条件施加于入射杆加载面以代替子弹进行加载。聚氨酯黏接界面采用内聚力模型来模拟,界面层厚度设定为 0.1 mm,与实验测量值保持一致。内聚力模型中关键参数部分可以通过实验来进行测量,部分需要根据实验结果与计算结果对比来进行标定。为了验证计算模型的可靠性,首先以加载加速度 10 000g 的实验为例,采用上述计算模型进行模拟。图 11 给出了铜柱自由面速度剖面的模拟结果与实验结果对比,实验与模拟结果最大相对误差为 2.54%,两者一致性非常好,这表明所建立的有限元模拟能够有效反映界面失效过程对自由面速度的影响。模拟中采用的计算参数见表 2,其中内聚力刚度取值来自准静态拉伸实验结果,与材料弹性模量不依赖于应变率假定类似,这里也假定内聚力刚度不依赖于外载加速度的变化。计算中内聚力强度为 5.3 MPa,低于准静态实验结果 8.3 MPa,这表明在冲击载荷下聚氨酯黏接界面损伤开始阈值应力明显降低。这与 Blackman 等^[14]的研究结果类似,即高应变率下临界应变能释放速率与准静态条件下的数据相比大幅降低。

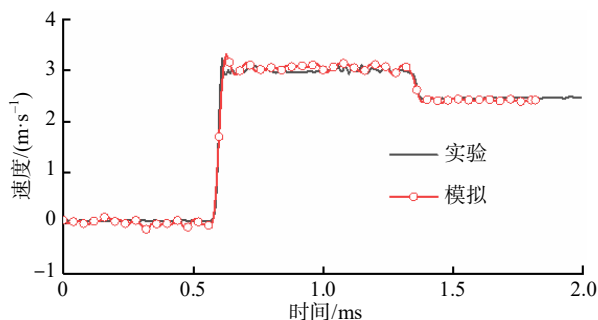


图 11 10 000g 加载加速度条件下实验与模拟结果对比

表 2 计算模型参数

序号	加载加速度/g	卸载加速度/g	$K/(\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	$\delta_m^f/\mu\text{m}$	$G_{\text{IC}}/(\text{N}\cdot\text{m})$
1	5 500	3 400	4 000	3.50	1.4	2.45
2	7 800	4 300	4 000	4.35	2.1	4.57
3	10 000	5 800	4 000	5.30	2.7	7.16
4	15 000	8 500	4 000	7.80	3.2	12.48

为了进一步分析界面分离过程,图 12 给出了聚氨酯黏接界面两侧两点粒子速度和位移的对比曲线,结果显示,入射杆杆端点 1 和铜柱上点 2

粒子速度曲线在加载段和平台段是几乎一致的,但在卸载段两者差异显著。对粒子速度曲线进行积分得到位移曲线,点 1 和点 2 在卸载段位移出现了明显偏差,表明界面开始分离,损伤 D_m 开始增大,当 D_m 达到 1 时界面完全分离,附加质量块以恒定速度飞出。

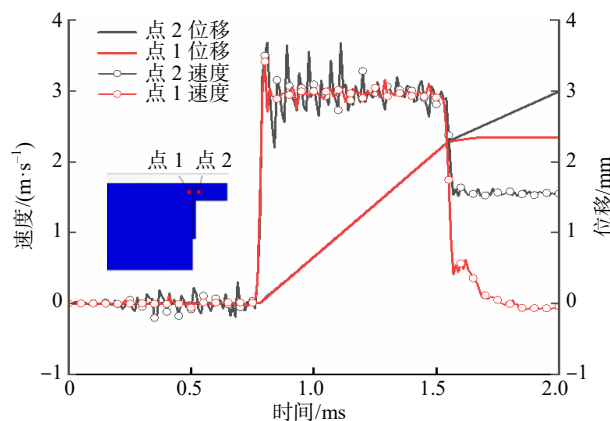


图 12 聚氨酯黏接界面两侧特征点速度和位移对比

3.3 内聚力模型参数的影响

在保持内聚力强度和临界失效位移不变的情况下,图 13 给出了 10 000g 加载条件下改变内聚力刚度 K 值的数值模拟结果,发现随着 K 的增加,聚氨酯黏接界面失效后附加质量块飞出速度减小。根据图 9 给出的牵引应力—位移关系曲线可知,内聚力刚度增大导致内聚力损伤段的断裂能增加,从而引起附加质量块飞出速度降低。

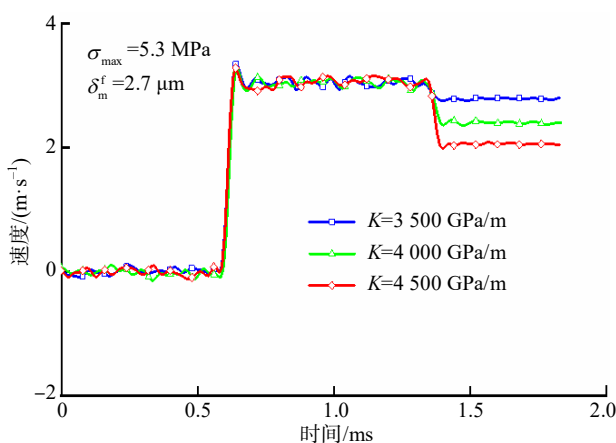


图 13 内聚力刚度 K 的影响

在保持内聚力刚度和临界失效位移不变的情况下,图 14 给出了内聚力强度 $\sigma_{\max}$ 对自由面速度计算结果的影响。随着内聚力强度增大,界面失效平台速度显著降低,并且呈现非线性变化。同时观

测到内聚力强度还影响速度卸载速率。利用这一特征可以借助实验数据来对内聚力强度进行标定。

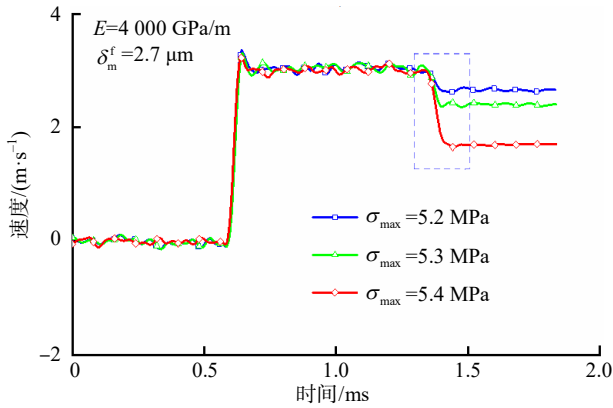


图 14 内聚力强度 $\sigma_{\max}$ 的影响

在保持内聚力刚度和内聚力强度不变的条件下,图 15 给出了临界失效位移 δ_m^f 对自由面速度计算结果的影响。同样发现随着临界失效位移增加,界面失效平台速度相应降低,并且两者基本呈现线性变化关系。对影响计算结果的程度而言,相比内聚力强度参数,临界失效位移参数敏感性弱一些。同时也观测到临界失效位移对速度卸载速率没有影响,这一特性是区别于内聚力强度的。

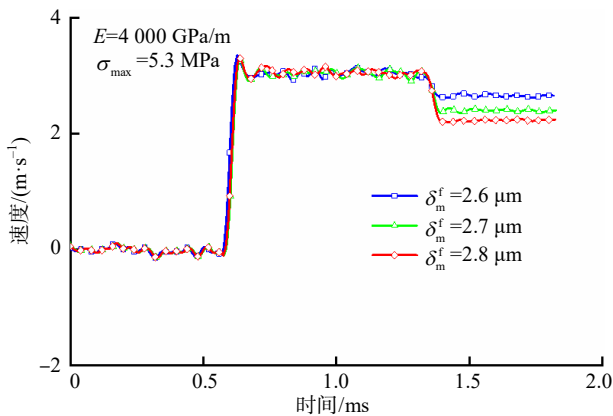


图 15 临界失效位移 δ_m^f 的影响

3.4 加载速率的影响

实验中通过调整子弹速度来改变加载速率,采用上述内聚力计算模型对不同加载速率下的实验结果进行模拟,计算结果与实验结果的对比如图 7 所示,两者一致性很好,但这里需要强调和讨论的是,在对 4 组实验结果进行模拟时所采用的模型参数是变化的,具体模型参数见表 2。为了使计算结果与实验结果达到最佳匹配,内聚力强度和临界失

效位移均需要调整。随着加载加速度增大,内聚力强度和临界失效位移均适当增大,两者基本呈线性增长关系,如图 16 所示。另外,根据内聚力强度和临界失效位移可以计算界面分离过程中临界应变能释放速率 G_{IC} ,见表 2,其与加载加速度变化关系也呈线性增长关系,也显示在图 16 中。内聚力强度和临界应变能释放速率随着加载加速度变化关系分别为

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = A_1 a + C_1 = 4.58a + 0.86 \\ G_{IC} = A_2 a + C_2 = 10.7a - 2.83 \end{cases} \quad (7)$$

式中加速度 a 的单位为 $10^4 g$ 。

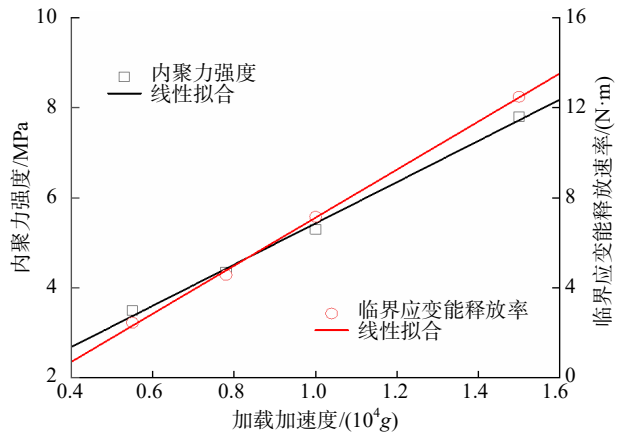


图 16 内聚力强度和临界应变能释放速率随加载加速度变化关系

4 结论

以聚氨酯/铜黏接界面为研究对象,制备了准静态和冲击三明治结构试样,开展了准静态垂直拉伸实验和自由式霍普金森冲击实验,讨论了加载速率对聚氨酯界面失效的影响。基于自由式霍普金森实验结果,采用内聚力模型,开展了相关数值模拟研究,并重点讨论了内聚力模型参数对计算结果的影响。取得以下主要结论:

(1) 准静态加载下聚氨酯黏接界面失效表现为损伤累积延性开裂过程,界面强度接近于基体强度,明显区别于环氧树脂黏接界面的脆性开裂过程,这种差异性本质上归因于两种黏接剂材料力学性能的差异。

(2) 冲击加载下聚氨酯黏接界面失效虽然可以通过附加质量块自由面速度来进行间接反映,但界面失效不是瞬态的,而是损伤累积过程,难以对

界面失效强度进行定量计算,采用内聚力模型则可以对界面失效的损伤累积过程进行数值模拟,模拟结果重现了实验结果,验证了内聚力模型表征聚氨酯黏接界面动态失效的有效性。

(3) 揭示了内聚力模型关键参数对附加质量块自由面速度典型特征的影响规律,发现界面失效特征参数依赖于加载速率,相比内聚力强度参数,计算结果对临界失效位移参数依赖性较弱。

参考文献:

- [1] REN D M, HOU J H, DUAN J R, et al. Failure mode analysis of electronic detonator under high overload condition[J]. *FirePhysChem*, 2022, 2(2):199-205.
- [2] LIAN J K, LI J H, XU L X. The effect of displacement constraints on the failure of MEMS tuning fork gyroscopes under shock iMPact[J]. *Micromachines*, 2019, 10(5):343.
- [3] ZHANG X H, LI J Z, QIN F, et al. Experiments and numerical simulations of microelectronic devices subjected to multipoint iMPact loading[J]. *Microelectronics reliability*, 2021, 127:114408.
- [4] YAU Y H, HUA S N, KOK C K. Structural failure analysis of polycarbonate enclosures of electronic devices subjected to multiple ball iMPacts[J]. *Polymer testing*, 2018, 65:374-386.
- [5] LIU J, SHI Y B, LI P, et al. Experimental study on the package of high-g accelerometer[J]. *Sensors and actuators A: physical*, 2012, 173(1):1-8.
- [6] 王铎, 陈斐洋, 蒋招绣, 等. 应变速率和填料质量分数对空心玻璃微珠/聚氨酯复合材料压缩力学性能的影响[J/OL]. [2025-03-05]. <https://link.cnki.net/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250320.004>.
- [7] 朱经纬, 王汉臣, 辛公锋, 等. 高强聚氨酯复合材料力学性能及拉压本构模型[J/OL]. [2025-03-05]. <https://link.cnki.net/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250324.001>.
- [8] BONOMO M, TAHERI B, BONANDINI L, et al. Thermosetting polyurethane resins as low-cost, easily scalable, and effective oxygen and moisture barriers for perovskite solar cells[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2020, 12(49):54862-54875.
- [9] 唐军, 赵锐, 石云波, 等. 高冲击环境下 MEMS 大量程加速度传感器结构的失效分析[J]. *传感技术学报*, 2012, 25(4):483-486.
- [10] 赵小龙, 马铁华, 范锦彪. 弹载常用芯片在高 g 值冲击下的失效分析[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(10):2358-2364.
- [11] 杨班权, 陈光南, 张坤, 等. 涂层/基体材料界面结合强度测量方法的现状与展望[J]. *力学进展*, 2007, 37(1):67-79.
- [12] PEREIRA J P O, CAMPILHO R G S G, NÓVOA P J R O, et al. Adherend effect on the peel strength of a brittle adhesive[J]. *Procedia structural integrity*, 2022, 37:722-729.
- [13] BADWE N, MAHAJAN R, SIERADZKI K. Interfacial fracture strength and toughness of copper/epoxy-resin interfaces[J]. *Acta materialia*, 2016, 103:512-518.
- [14] BLACKMAN B R K, KINLOCH A J, RODRIGUEZ SANCHEZ F S, et al. The fracture behaviour of structural adhesives under high rates of testing[J]. *Engineering fracture mechanics*, 2009, 76(18):2868-2889.
- [15] DEVI S, PARAMESWARAN V. Investigating de-bonding using an iMPact loaded blister test[J]. *Experimental mechanics*, 2025, 65(2):241-253.
- [16] KOJIMA T, KIMURA Y, ARIKAWA S, et al. Evaluation of dynamic fracture toughness of a bonded bi-material interface subject to high-strain-rate shearing using digital image correlation[J]. *Engineering fracture mechanics*, 2021, 241:107391.
- [17] PONNUSAMI S A, CUI H, ERICE B, et al. An integrated inverse numerical-experimental approach to determine the dynamic Mode-I interlaminar fracture toughness of fibre composites[J]. *Composite structures*, 2022, 293:115734.
- [18] KATSIVALIS I, THOMSEN O T, FEIH S, et al. Development of cohesive zone models for the prediction of damage and failure of glass/steel adhesive joints[J]. *International journal of adhesion and adhesives*, 2020, 97:102479.
- [19] JIA Z M, YUAN G Q, FENG X P, et al. Numerical study on the mechanical behavior of a polyurethane adhesive under high strain rate[J]. *Composites part B: engineering*, 2019, 158:131-140.
- [20] DENGIZ C G. Effect of adhesive material properties on phase-field analysis of T-peel adhesive joints using the Taguchi method[J]. *International journal of adhesion and adhesives*, 2025, 139:103977.
- [21] KARAC A, BLACKMAN B R K, COOPER V, et al. Modelling the fracture behaviour of adhesively-bonded joints as a function of test rate[J]. *Engineering fracture mechanics*, 2011, 78(6):973-989.
- [22] 王永刚, 胡剑东, 王礼立. 金属材料层裂破坏的内聚力模型[J]. *固体力学学报*, 2012, 33(5):465-470.
- [23] MARZI S, HESEBECK O, BREDE M, et al. A rate-dependent cohesive zone model for adhesively bonded

joints loaded in mode I[J]. Journal of adhesion science and technology, 2009, 23(6):881-898.

[24] 王礼立, 胡时胜. 应力波基础[M]. 3 版. 北京: 国防工业出版社, 2023:42-43.

Experiment and numerical simulation of the mechanical behavior and failure of polyurethane bonding interface in electronic devices under high overload

ZHANG Xingyu, WANG Yonggang, JIANG Zhaoxiu

(Key Laboratory of Impact and Safety Engineering of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To address the interface failure issue of polyurethane potting protection for electronic devices under high overload, this study investigates the dynamic mechanical failure behavior of polyurethane bonding interfaces. Firstly, a copper/polyurethane/copper sandwich structure specimen was designed, and quasi-static vertical tensile experiments were conducted using a universal testing machine. The experiments revealed the damage evolution mechanism of interface ductile failure and quantitatively characterized key mechanical parameters such as interface strength and deformation stiffness. Subsequently, a composite structure specimen (copper sheet/polyurethane/copper cylinder as an additional mass block) was developed. Dynamic peeling of the polyurethane bonding interface was achieved by controlling unloading wave timing through a free-style Hopkinson bar impact loading device. The laser velocimetry technique was employed to capture the free surface velocity evolution characteristics of the additional mass block, establishing an experimental characterization method for dynamic failure behavior. Based on the Cohesive Zone Model (CZM), transient finite element numerical simulations were performed to clarify the influence of model parameters (interface stiffness, strength, and critical failure displacement) on dynamic failure processes and free surface velocity characteristics. Numerical results showed good agreement with experimental data, validating the effectiveness of the CZM in characterizing dynamic interface failure. Further analysis revealed a linear growth relationship between interface failure model parameters and loading acceleration. In terms of their impact on the computational results, the critical failure displacement parameters exhibited weaker sensitivity as compared with the cohesive strength parameters.

Keywords: polyurethane bonding interface; high overload; Hopkinson bar; failure; numerical simulation

(责任编辑 韩 超)