

帽型粘接结构的动态力学行为研究¹⁾

廖丽涓^{*,2)}, 杨喆^{*,+}, 魏延鹏^{*}, 吴先前^{*}, 郭雅惊^{*,+}, 黄晨光^{*}, 殷秋运^{*,+}, 孟昶宇^{*,+}

^{*} (中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190) ⁺ (中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 本研究针对帽型粘接结构在冲击载荷作用下的动态响应, 基于改进的霍普金森杆实验平台, 分析了界面应力状态、加载率及粘接层厚度等对结构承载能力及界面破坏模式的影响; 同时发展了相应的数值计算方法, 采用考虑混合破坏模式的率相关内聚力模型, 获得了具有复杂应力状态界面的粘接结构强度极限曲线及其表达式, 并讨论了加载率与强度表达式中控制参量间的关系。实验和数值计算结果有较好的一致性, 结果表明: 粘接结构的承载能力受控于界面应力状态与加载率的共同作用; 随着粘接层厚度的增加, 界面破坏模式的演化过程为内聚破坏→混合破坏→界面脱层破坏。

关键词: 动态响应, 帽型粘接结构, 混合破坏, 率相关, 内聚力模型

引言

在轻质高强的工业需求背景下, 粘接由于其联接界面受力均匀、高比强度及轻质等优势明显, 在工业领域中凸显重要的应用价值。其中, 粘接结构界面强度和损伤/抗断裂性是应关注的重点, 相关深入细致的研究可为实践中的复杂结构提供设计思路^[1-3]。

考虑到工业的实际应用, 一方面粘接结构的界面应力状态多数处于复杂应力状态, 而非纯拉^[4-7]或纯剪^[8, 9]的单一应力状态; 另一方面, 相较于静态载荷, 粘接结构多承受动态载荷^[10, 11]。斜接粘接结构^[3, 12-14]相较于对接结构而言粘接面积更大, 且界面应力分布更为均匀, 能够承受及传递拉伸及剪切等复杂载荷, 因而该类结构应用范围更广。

在粘接结构中, 由于粘接层材料多为高分子聚合物, 其材料属性的特点为率相关的塑性流动及热效应。对此, 研究人员广泛采用霍普金森杆等冲击实验技术用以获取含有高聚物材料体系的动态力学性能^[11, 15, 16]。

基于已有的研究结果可知, 粘接结构的失效在很大程度上取决于粘接层材料的力学性能^[17]和界面的应力状态^[18]。相关的实验及理论分析关注于粘接层材料的粘弹性^[11]、粘弹塑性^[19]及率相关^[20]等性质。

粘接结构的界面失效是一个随着裂纹尖端塑形区扩展而逐渐耗散能量的过程^[17, 21]。采用内聚力模型的数值模拟在描述界面开裂和破坏过程中, 能避免界面边缘的应力奇异性, 且不需要预制初始裂纹^[1, 17], 但并未考虑率效应。Marzi 等人^[22, 23]采用实验方法, 建立了考虑率效应、塑性变形及混合破坏模式的内聚力模型, 并给出了内聚参数的实验获取方法, 这为获取粘接结构的动态响应提供了模拟手段。

基于已有的研究成果, 在本文的研究中, 以不同粘接角的帽型粘接结构为研究对象, 选用 3M 环氧类粘接剂, 采用实验结合数值计算方法, 分析粘接界面应力状态、冲击加载率及粘接层厚度对冲击拉伸载荷作用下粘接结构承载能力及界面失效模式的影响, 旨在获取界面强度的量化描述。

1 实验研究

1.1 试样设计及材料

本文选取帽型粘接结构^[24, 25]为研究对象, 其结构形式如图 1 所示。试件帽顶和帽座 (AA6061-T6) 由环氧粘接剂 (3M Scotch Weld® DP460) 联接, 形成斜接角为 θ 的粘接接头结构, 其几何尺寸如表 1 所示, 斜接角 θ 取 0° 、 45° 、 90° 。粘接层厚度取 $\sim 40\mu\text{m}$ 、 $\sim 100\mu\text{m}$ 、 $\sim 350\mu\text{m}$ 和 $\sim 400\mu\text{m}$ 。

1) 国家自然科学基金项目 (11202222 和 11672314) 资助。

2) 通讯作者. E-mail: ljl@imech.ac.cn

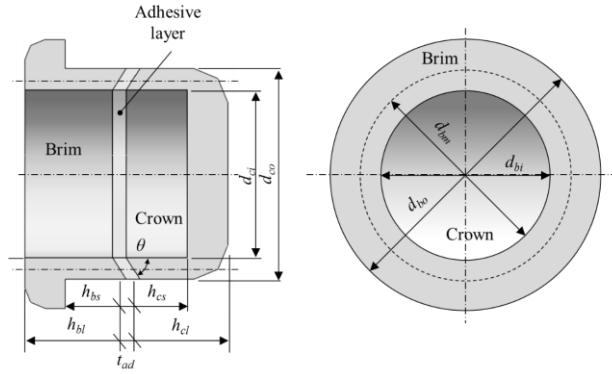


图 1 帽型粘接结构示意图.

Fig.1 Schematic of hat-shaped adhesive joint (HSAJ) specimens.

表 1 试件结构尺寸

Table 1 Dimensions of specimens for experiments and numerical calculations.

Parameters	Cases No.						
	1	2	3	4	5	6	7 ^[24]
θ (deg)	0	15	30	45	60	75	90
d_{bo} (mm)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
d_{bm} (mm)	20.0	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6
d_{bi} (mm)	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
d_{co} (mm)	×	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6
d_{ci} (mm)	0.0	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
h_{bl} (mm)	9.6	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
h_{cl} (mm)	23.6	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
h_{bs} (mm)	0.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
h_{cs} (mm)	0.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
A_{ad} (mm ²)	374.8	271.9	140.7	99.5	81.3	72.9	70.4

1.2 冲击实验

本文采用的改进型霍普金森杆实验装置^[24-26]及帽型粘接结构加持示意如图 2 所示。入射杆端部贴有整形片保证满足一维弹性波传播理论，透射杆为中空铝合金杆（AA6061-T6）。由入射杆传入的压缩波 $\varepsilon_{in}(t)$ 一部分在试件底部（界面 1）反射 $\varepsilon_{re}(t)$ ，剩余部分透过试件并在其中经过多次反射达到平衡后，进入透射杆中继续传播 $\varepsilon_{tr}(t)$ 。则界面 1 和 2 处的力、位移及速度可由式(1)~(3)表示。

力：

$$\begin{cases} P_1(t) = E_{in} A_{in} \{ \varepsilon_{in}(t) - \varepsilon_{re}(t) \} \\ P_2(t) = E_{tr} A_{tr} \varepsilon_{tr}(t) \\ P_1(t) = P_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

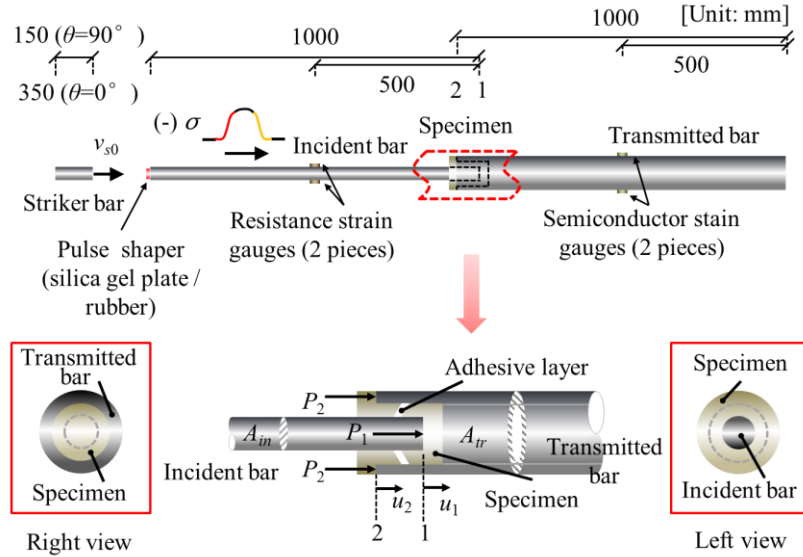


图 2 改进型霍普金森杆装置与帽型粘接结构加持示意图。
Fig.2 Schematic of modified SHPB and clamping of specimens.

位移:

$$\begin{cases} u_1(t) = c_{in} \int_0^t \{\varepsilon_{in}(t') - \varepsilon_{re}(t')\} dt' \\ u_2(t) = c_{tr} \int_0^t \varepsilon_{tr}(t') dt' \end{cases} \quad (2)$$

速度:

$$\begin{cases} v_1(t) = c_{in} \{\varepsilon_{in}(t) - \varepsilon_{re}(t)\} \\ v_2(t) = c_{tr} \varepsilon_{tr}(t) \end{cases} \quad (3)$$

则施加载荷 $P(t)$ 、平均应力 $\sigma(t)$ 、应变 $\varepsilon(t)$ 及应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 可表示为:

$$\begin{cases} P(t) = \{P_1(t) + P_2(t)\} / 2 \\ \sigma(t) = P(t) / A_{ad} \\ \varepsilon(t) = \{u_1(t) - u_2(t)\} / t_{ad} \cong -2c_{in} \int_0^t \varepsilon_{tr}(t') dt' / t_{ad} \\ \dot{\varepsilon}(t) = \{v_1(t) - v_2(t)\} / t_{ad} \cong -2c_{in} \varepsilon_{tr}(t) / t_{ad} \end{cases} \quad (4)$$

2 数值模拟

2.1 分析模型

分析模型如图 3 所示, 输入应力的时变曲线模拟冲击加载, 透射杆末端为透射边界条件, 模型尺寸如表 1 所示。入射杆与透射杆定义为各向同性的弹性体, 粘接层为单层的内聚力单元, 厚度为 $t_{ad}=100\mu\text{m}$ 。

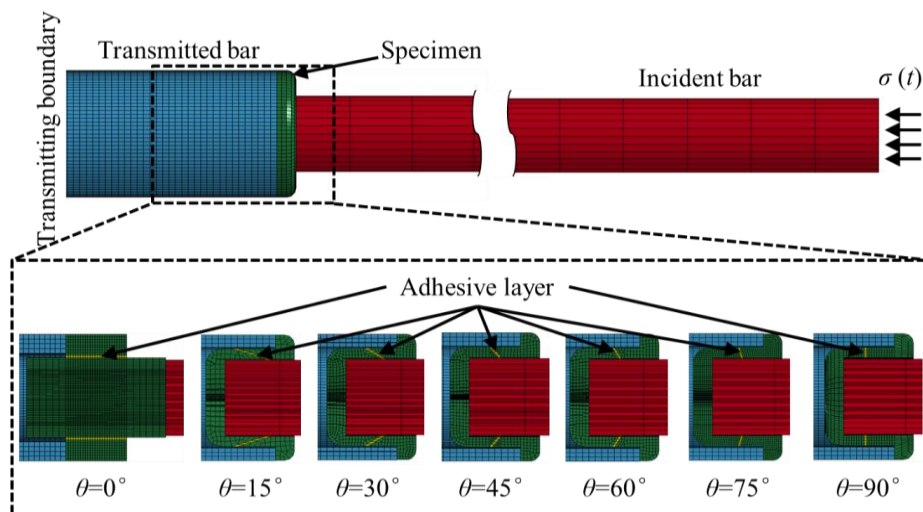


图 3 有限元分析模型

Fig.3 A model of HSAJ with M-SHPB for FEM calculations.

2.2 内聚力模型

为了研究具有混合破坏模式粘接结构的动态响应，本文采用考虑率效应及 I-II 型混合破坏的内聚力模型^[22, 23]。如图 4 所示，内聚应力与开裂相对位移的关系曲线（T-S 曲线）采用双线性模型来定义界面的本构关系，并考虑界面拉-剪混合的复杂应力状态。

内聚力模型上升段的斜率为初始刚度，拉伸 (n) 和剪切 (t) 方向的初始刚度可由模量与粘接层厚度的比值表示：

$$\begin{cases} k_n = k_I = E_{ad} / t_{ad} \\ k_t = k_{II} = G_{ad} / t_{ad} \end{cases} \quad (5)$$

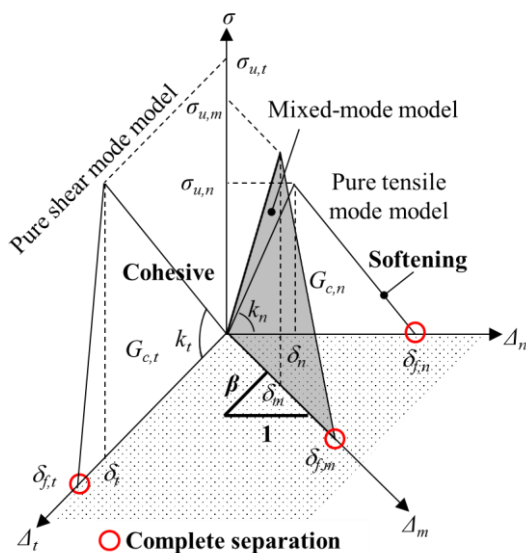


图 4 双线性内聚力模型（内聚应力与开裂相对位移的关系曲线）^[22, 23]

Fig.4 Schematic bilinear traction-separation law of cohesive zone model^[22, 23]

等效应变率表示为速度与粘接层厚度之比:

$$\dot{\epsilon}_{eq} = \frac{\sqrt{\dot{u}_I^2 + \dot{u}_{II}^2 + \dot{u}_{III}^2}}{t_{ad}} \quad (6)$$

率相关的极限内聚应力及断裂能可分别表示为:

$$\sigma_{u,i}(\dot{\epsilon}_{eq}) = \sigma_{0,i} + \sigma_{1,i} \left\langle \ln \frac{\dot{\epsilon}_{eq}}{\dot{\epsilon}_i} \right\rangle^2 \quad (i = n, t) \quad (7)$$

$$G_{c,i}(\dot{\epsilon}_{eq}) = G_{0,i} + (G_{\infty,i} - G_{0,i}) \exp\left(-\frac{\dot{\epsilon}_{Gi}}{\dot{\epsilon}_{eq}}\right) \quad (i = n, t) \quad (8)$$

其中, $\sigma_{0,i}$ 和 $G_{0,i}$ 分别为率无关的屈服应力 (内聚强度) 和断裂能 ($i = n$ (拉应力), t (剪应力)), $\sigma_{1,i}$ 为内聚强度系数 ($i = n, t$), $G_{\infty,i}$ 为率相关断裂能的上限值 ($i = n, t$), $\dot{\epsilon}_i$ 和 $\dot{\epsilon}_{Gi}$ 为屈服起始时刻的等效应变率 ($i = n, t$) 用以描述内聚强度和断裂能的率相关性。

考虑 I 型、II 型混合破坏模式, 则混合损伤起始分离位移 δ_m 表示为:

$$\delta_m = \delta_n \delta_t \sqrt{\frac{1 + \beta^2}{\delta_t^2 + (\beta \delta_n)^2}} \quad (9)$$

其中, $\delta_i = \sigma_{u,i} / k_i (i = n, t)$ 表示单一型损伤起始分离位移, $\beta = \delta_t / \delta_n$ 为拉伸、剪切混合破坏的混合率。

失效分离位移 $\delta_{f,m}$ 表示为:

$$\delta_{f,m} = \frac{2G_{c,n} G_{c,t}}{\delta_m (k_n G_{c,t} \cos^2 \gamma + k_t G_{c,n} \sin^2 \gamma)} \quad (10)$$

其中 $\gamma = \arccos(\langle u_n \rangle / \Delta_m)$ 。

则界面损伤 D 表示为:

$$D = \begin{cases} \max\left(\frac{\Delta_m - \delta_m}{\delta_{f,m} - \delta_m} D_{t_{i-1}}, 0\right) & \Delta_m > \delta_m \\ 1 & (\Delta_m > \delta_{f,m}) \end{cases} \quad (11)$$

界面损伤 D 值从 0 到 1, 且当 $D=1$ 时, 界面完全失效。

本文数值计算的参数如表 2 所示。

表 2 率相关的内聚力参数
Table 2 Rate-dependency CZM

Parameter ($i=I, II$)	Rate-dependency CZM	
	Mode I	Mode II
$\sigma_{0,i}$ (MPa)	43.9 ^[24]	×
$\sigma_{1,i}$ (MPa)	0.015 ^[23]	×
$\dot{\epsilon}_i$ (/s)	1.8×10^{-6} ^[23]	×
$G_{0,i}$ (N/mm)	2.61 ^[23]	15.7 ^[22]
$G_{\infty,i}$ (N/mm)	3.63 ^[23]	×
$\dot{\epsilon}_{Gi}$ (/s)	1.30×10^{-2} ^[23]	×

3 结果及讨论

3.1 粘接结构的承载能力

本文定义入射应力曲线的上升段斜率为加载率 $\dot{\sigma}$ ，以冲击实验中 $\theta=0^\circ$ 为例，则无量纲拉伸载荷 $F/\sigma_{ut}A_{in}$ 随着加载率的变化关系如图 5 所示，粘接层的厚度分别为 $t_{ad} \sim 50\mu\text{m}$ 和 $\sim 100\mu\text{m}$ 。其中， σ_{ut} 为粘接层材料的抗拉强度，与 $\sigma_{0,I}$ 取值相同， A_{in} 为入射杆的横截面积（如图 2 所示）。在本文讨论的粘接层厚度及加载率范围内，当粘接层厚度约为 $100\mu\text{m}$ 条件下，无量纲拉伸载荷随着加载率的增大而增大；但在厚度减小到约为 $50\mu\text{m}$ 时，无量纲拉伸载荷与加载率之间并未观察到单调关系。

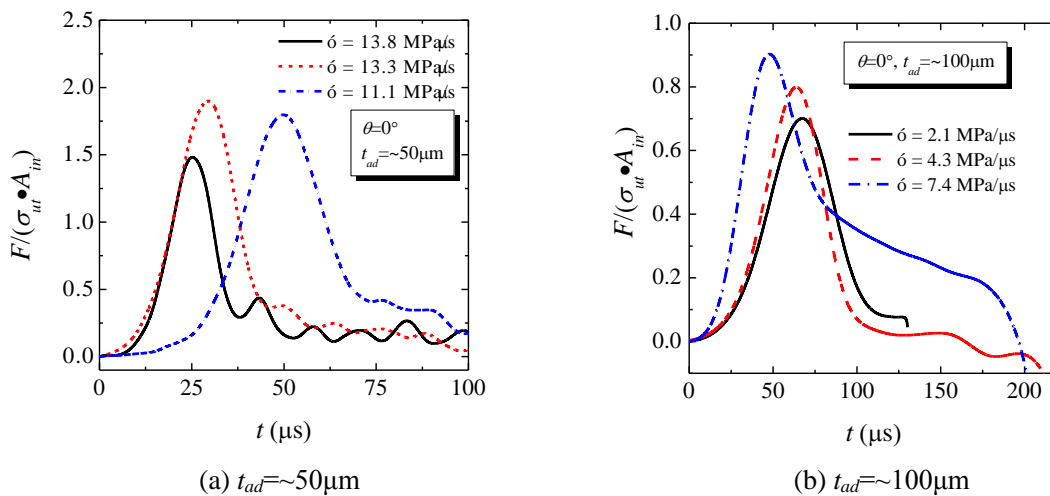


图 5 无量纲拉伸载荷的时程曲线 (实验结果, $\theta=0^\circ$)

Fig. 5 Histories of normalized tensile loading $F/\sigma_{ut}A_{in}$ with respect to loading rate $\dot{\sigma}$ ($\theta=0^\circ$).

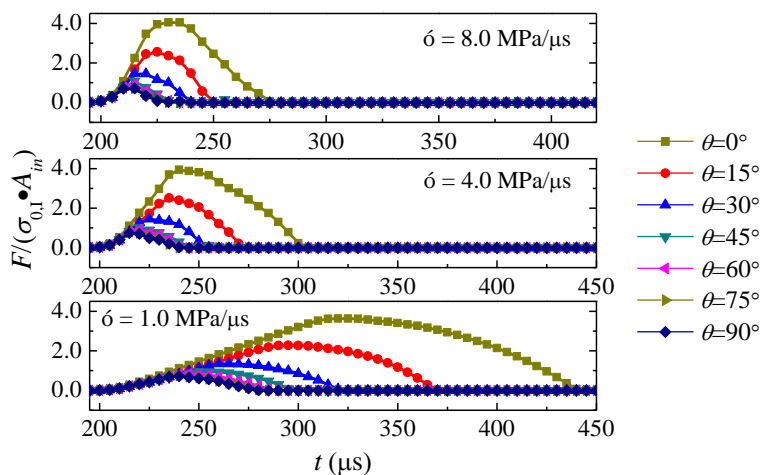


图 6 无量纲拉伸载荷的时程曲线 (数值计算结果)

Fig. 6 Histories of normalized tensile loading $F/\sigma_{0,1}A_{in}$ of HSAJ with different scarf angles θ under different loading rates $\dot{\sigma}$.

数值计算的拉伸载荷时程曲线如图 6 所示。粘接结构在加载过程中，拉伸载荷单调增大到峰值后逐步下降直至为零，则拉伸载荷的峰值定义为极限拉伸载荷 F_u ，用以表征结构的承载能力^[3]。在给定加载率条件下，具有较小粘接角的结构能承受较大的极限载荷。

无量纲极限拉伸载荷与加载率之间的非单调变化关系如图 7 所示，这说明加载率并非影响结构承载能力的单一因素。随着粘接角的增大，结构可承受的极限拉伸载荷逐渐减小。

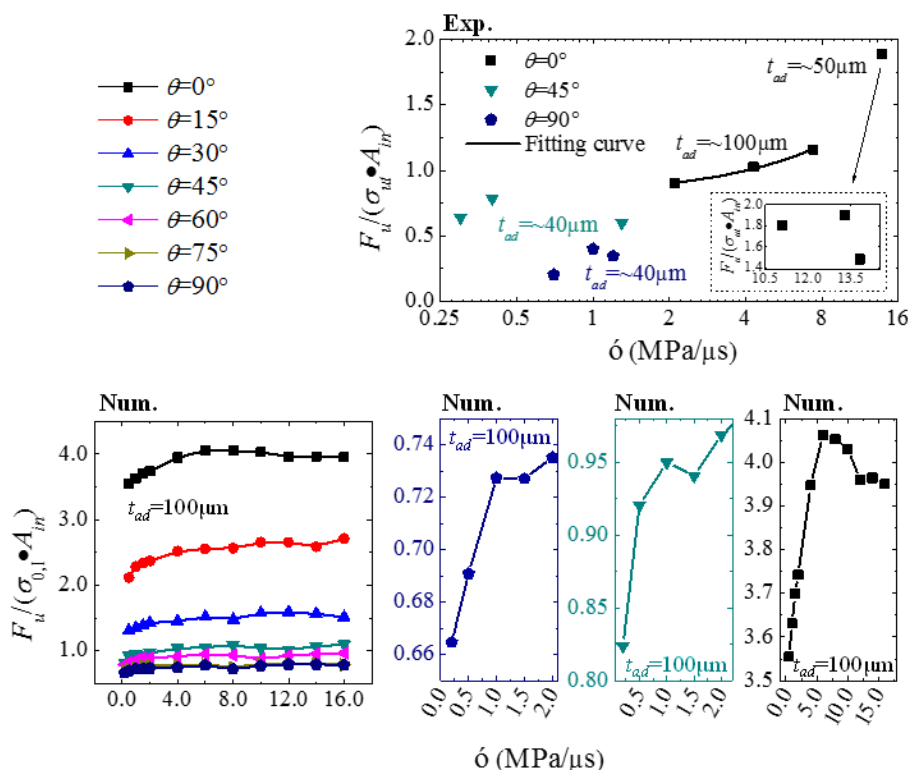


图 7 无量纲拉伸载荷与加载率的关系曲线 (实验与数值计算对比)

Fig. 7 Variation of the normalized ultimate tensile loading with respect to loading rate $\dot{\sigma}$ in HSAJ with different scarf angles θ .

当结构的粘接角 $\theta=90^\circ$ 时, 实验加载率的范围为 $0.7-1.2\text{MPa}/\mu\text{s}$, 实验结果表明随着加载率的增大, 虽然结构的承载能力先增大后减小, 但较大加载率条件下结构承载能力较大, 数值计算获得了相同的结果。当 $\theta=45^\circ$ 时, 加载率落在 $0.3-1.3\text{MPa}/\mu\text{s}$ 范围内, 实验与数值计算结果均表明结构的承载能力随着加载率呈非单调变化。当 $\theta=0^\circ$ 且加载率的范围为 $2.1-7.4\text{MPa}/\mu\text{s}$ 时, 在实验与数值计算结果中均可观察到结构的承载能力随着加载率的增大而单调增大; 但当加载率超过 $10\text{MPa}/\mu\text{s}$, 两者之间不再呈单调关系。由此可见, 粘接结构的承载能力受界面应力状态和加载率的共同影响。此外, 由图 7 可知, 实验与数值模拟结果有很好的 consistency。

3.2 讨论

当粘接结构的粘接角 $\theta=0^\circ$ 时, 粘接界面为纯剪的应力状态; 而当粘接角 $\theta=90^\circ$ 时, 粘接界面为纯拉的应力状态; 当粘接角 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时, 粘接界面为拉-剪混合的复杂应力状态。如图 8 所示, 横坐标为无量纲极限拉应力, 纵坐标为无量纲极限剪应力。随着加载率的变化, 无量纲拉-剪应力间的关系均呈弧线变化, 则采用函数 $(\sigma/a)^2 + (\tau/b)^2 = 1$ 拟合两者之间在给定加载率条件下的关系, 所得到的曲线系如图 8(b) 所示, 则该曲线系给出了界面强度的变化。拟合曲线的半轴值 a 和 b 随着加载率的演化规律如图 9 所示。当加载率 $\dot{\sigma} \leq 6\text{MPa}/\mu\text{s}$ 时, 随着加载率的增大, 半轴长 a 和 b 均呈单调增大趋势; 当加载率 $6\text{MPa}/\mu\text{s} < \dot{\sigma} < 8\text{MPa}/\mu\text{s}$ 时, 半轴长 a 和 b 均随着加载率的增大而减小; 当加载率 $8\text{MPa}/\mu\text{s} < \dot{\sigma} < 12\text{MPa}/\mu\text{s}$ 时, 半轴长 a 和 b 均随着加载率的增大而单调变化的趋势相反; 当加载率 $\dot{\sigma} > 12\text{MPa}/\mu\text{s}$ 时, 半轴长 a 和 b 均随着加载率的增大而减小。当加载率 $\dot{\sigma} = 6.5\text{MPa}/\mu\text{s}$ 和 $\dot{\sigma} = 9.5\text{MPa}/\mu\text{s}$ 时, 半轴长 a 和 b 的变化曲线相交, 在两个交点处半轴长 a 和 b 的值相等, 该界面强度的极限曲线为圆弧线。

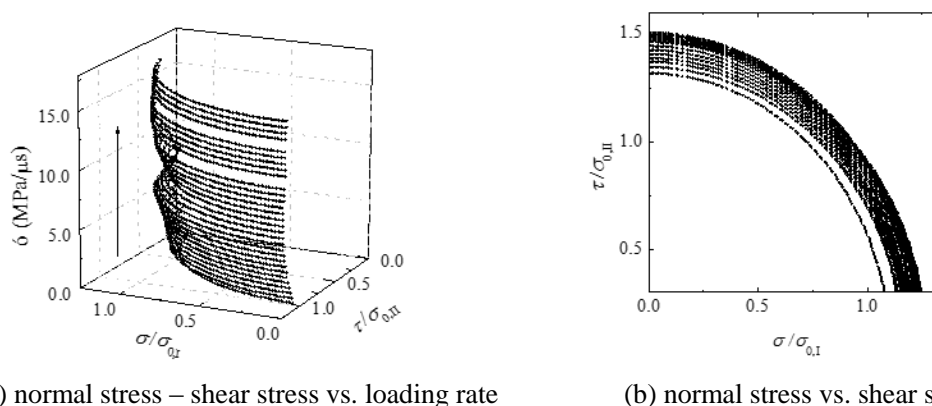


图 8 加载率对界面拉应力与剪应力之间关系的影响曲线系

Fig. 8 Relationships of normal stresses and shear stresses at the adhesive layers versus loading rates.

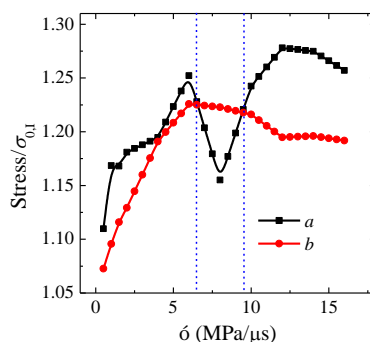


图 9 界面强度极限椭圆表达式中半轴值随着加载率的演化关系

Fig. 9 Relationships of semi-axes values of strength curves and loading rates $\dot{\sigma}$.

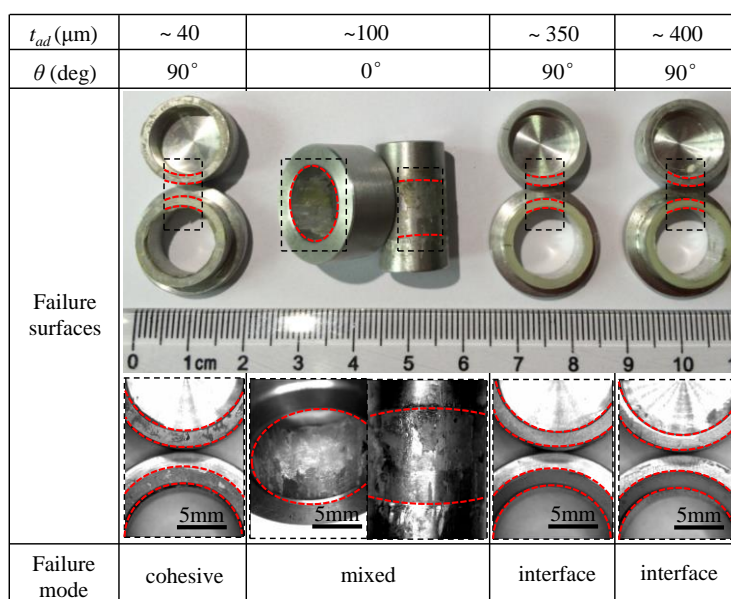


图 10 试件界面失效模式

Fig. 10 Typical failure surfaces and failure modes of HSAJ specimens.

图 10 所示为粘接结构的界面失效模式。可以看出,随着粘接层厚度的增大,界面失效模式从内聚破坏转变为混合破坏,最后演化为界面破坏。当粘接层厚度达到 $400\mu\text{m}$ 时,粘接结构的承载能力急剧下降。

4 结论

本文采用改进的霍普金森杆冲击实验装置,实验研究了界面应力状态、加载率及粘接层厚度对帽型粘接结构承载能力与界面失效模式的影响;同时采用考虑率相关及拉剪混合破坏模式的双线性内聚力模型,数值计算了界面应力状态及加载率对界面强度的影响规律,并获得了界面强度极限曲线及其表达式,并讨论了加载率与强度表达式中控制参量间的关系。结果表明,结构的承载能力受界面应力状态和加载率的共同影响,实验和数值计算结果有很好的一致性。实验可知,随着粘接层厚度的增大,粘接界面的失效模式由内聚破坏向界面破坏过渡,过厚的粘接层不利于粘接结构承载。

参考文献

- Xu, W. and Y. Wei, Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013, **40**(0): 158-167.
- Liao, L., T. Sawa, and C. Huang, Experimental and FEM studies on mechanical properties of single-lap adhesive joint with dissimilar adherends subjected to impact tensile loadings [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013, **44**(0): 91-98.
- Liao, L., C. Huang, and T. Sawa, Effect of adhesive thickness, adhesive type and scarf angle on the mechanical properties of scarf adhesive joints [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2013, **50**(25-26): 4333-4340.
- Yokoyama, T. and K. Nakai, Determination of the impact tensile strength of structural adhesive butt joints with a modified split Hopkinson pressure bar [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014.
- Yokoyama, T. and K. Nakai. *Determination of impact tensile properties of structural epoxy adhesive butt joints using a hat-shaped specimen*. in *Journal de Physique IV (Proceedings)*. 2006. EDP sciences.
- Yokoyama, T., Experimental Determination of Impact Tensile Properties of Adhesive Butt Joints with the Split Hopkinson Bar [J]. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2003, **38**: 233-245.
- Sato, C. and K. Ikegami, Strength of Adhesively-Bonded Butt Joints of Tubes Subjected to Combined High-Rate Loads [J]. *The Journal of*

- Adhesion, 1999, **70**(1-2): 57-73.
- 8 Challita, G. and R. Othman, Finite-element analysis of SHPB tests on double-lap adhesive joints [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2010, **30**(4): 236-244.
 - 9 Sen, O., S.A. Tekalur, and C. Jilek, The determination of dynamic strength of single lap joints using the split Hopkinson pressure bar [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011, **31**(6): 541-549.
 - 10 Asgharifar, M., et al., Dynamic analysis of adhesively bonded joint under solid projectile impact [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014, **50**: 17-31.
 - 11 Sato, C. and K. Ikegami, Dynamic deformation of lap joints and scarf joints under impact loads [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2000, **20**: 17-25.
 - 12 Nakano, H., et al., Three-dimensional FEM stress analysis and strength prediction of scarf adhesive joints with similar adherends subjected to static tensile loadings [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014, **54**: 40-50.
 - 13 Liao, L., T. Sawa, and C. Huang, Numerical analysis on load-bearing capacity and damage of double scarf adhesive joints subjected to combined loadings of tension and bending [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014, **53**(0): 65-71.
 - 14 Kim, M.K., et al., Interaction of laminate damage and adhesive disbonding in composite scarf joints subjected to combined in-plane loading and impact [J]. *Composite Structures*, 2012, **94**(3): 945-953.
 - 15 Goda, Y. and T. Sawa, Study on the Effect of Strain Rate of Adhesive Material on the Stress State in Adhesive Joints [J]. *The Journal of Adhesion*, 2011, **87**(7-8): 766-779.
 - 16 Raykhere, S.L., et al., Dynamic shear strength of adhesive joints made of metallic and composite adherents [J]. *Materials & Design*, 2010, **31**(4): 2102-2109.
 - 17 da Silva, L.F.M., et al., Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength [J]. *The Journal of Adhesion*, 2006, **82**(11): 1091-1115.
 - 18 Pardoen, T., et al., Constraint effects in adhesive joint fracture [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, **53**(9): 1951-1983.
 - 19 Iwamoto, T., T. Nagai, and T. Sawa, Experimental and computational investigations on strain rate sensitivity and deformation behavior of bulk materials made of epoxy resin structural adhesive [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, **47**(2): 175-185.
 - 20 Goglio, L., et al., High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008, **28**: 329-339.
 - 21 Campilho, R.D.S.G., et al., Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, **29**(6): 678-686.
 - 22 Marzi, S., et al., An End-Loaded Shear Joint (ELSJ) Specimen to Measure the Critical Energy Release Rate in Mode II of Tough, Structural Adhesive Joints [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2009, **23**(15): 1883-1891.
 - 23 Marzi, S., 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 Yokoyama, T. and K. Nakai, Determination of the impact tensile strength of structural adhesive butt joints with a modified split Hopkinson pressure bar [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015, **56**: 13-23.
 - 25 Lindholm, U.S. and L.M. Yeakley, High strain-rate testing: tension nad compression [J]. *Experimental Mechanics*, 1968, **8**(1): 1-9.
 - 26 Yokoyama, T. and K. Nakai, Determination of impact tensile properties of structural epoxy adhesive butt joints using a hat-shaped specimen [J]. *Journal de Physique IV*, 2006, **134**: 789-795.

STUDY ON DYNAMIC BEHAVIORS OF HAT-SHAPED ADHESIVE JOINT¹⁾

Liao Lijuan^{*2)}, Yang Zhe^{*,+}, Wei Yanpeng^{*}, Wu Xianqian^{*}, Guo Yacong^{*,+}, Huang Chenguang^{*}, Yin Qiuyun^{*,+},
Meng Changyu^{*,+}

^{*} (*Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China*)

⁺ (*School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China*)

Abstract: In the present study, the dynamic responses of the hat-shaped adhesive joints (HSAJ) subjected to impact loadings with mixed-mode failure were examined experimentally and numerically. Adopting a modified split Hopkinson pressure bar (M-SHPB) apparatus and cohesive zone model (CZM) taking rate-dependency and mixed-mode fracture into account, the effects of interface stress state, loading rate and adhesive thickness on the load-bearing capacity of joint and interface failure mode were identified. In addition, the quantitative relationship of interface stress state and joint strength was obtained with loading rate-dependent parameters. A good agreement between experimental and numerical results was observed. The results show that the load-bearing capacity of joint is governed by combined effects of the loading rate and interface stress state. Moreover, the adhesive thickness decides the interface failure mode to a large extent.

Key words: Dynamic response, Hat-Shaped adhesive joint (HSAJ), Mixed-modes failure, Rate-dependent, Cohesive zone model (CZM)

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (11202222 & 11672314).

2) E-mail: ljl@imech.ac.cn