中国科学: 技术科学 2012 年 第 42 卷 第 12 期: 1361 ~ 1376
www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
自然科学基金项目进展专栏

粘结界面力学行为及其表征

许巍[①*], 陈力[①], 张钱城[②], 杨金水[③], 魏悦广[①], 卢天健[②*]

① 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;
② 西安交通大学航天航空学院机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049;
③ 中国工程物理研究院, 绵阳 621900
* E-mail: xuwei@lnm.imech.ac.cn; tjlu@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2012-07-09; 接受日期: 2012-09-05
国家自然科学基金(批准号: 11021262, 10932011, 91116003, 11102152)、国家重大科学研究计划(批准号: 2012CB937500)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB610305)资助项目

摘要 胶接技术具有工艺简单、应力集中小、抗疲劳、耐腐蚀、密封性好等优点, 在机械、建筑、电子、航空航天、医疗等诸多领域中广泛应用, 但存在粘结强度相对较弱、界面强度影响因素较多等问题, 故针对粘结界面力学行为及其表征技术开展研究具有重要的学术意义和应用价值. 本文首先介绍粘结界面的破坏机理以及影响因素的相关研究, 侧重于有关粘结界面强度和应力分析的理论和实验工作, 然后针对粘结层存在一定程度的尺度依赖的现象, 总结国内外在粘结层尺度效应方面的研究现状, 最后介绍粘结界面在制备及服役期间可能产生的各类缺陷及其对粘结构件整体力学行为的影响.

关键词
粘结界面
破坏机理
粘结参数
缺陷

1 引言

胶接专指一种用胶黏剂实现连接和固持的方法, 是焊接、铆接、螺栓连接等传统机械连接方法的重要补充, 在机械、建筑、电子、航空航天等领域均占有十分重要的地位[1, 2]. 与其它连接形式相比较, 胶接具有如下优点: 胶接采用的胶黏剂密度较小, 可有效地降低连接件的重量, 满足构件轻质的要求; 采用胶接手段时不需要在构件预留孔洞, 从而避免构件在使用过程中由于应力集中产生的破坏, 延长构件的使用寿命; 胶接在工艺上更加简便, 更易实现. 随着现代高分子化工的飞速发展, 新型合成胶黏剂不断涌现, 使得粘结技术取得了重大进展. 与天然胶黏剂相比较, 合成胶黏剂具有更多的品种、更强的胶接强度、更好的耐久性和更广的适用性.

胶黏剂在实际使用过程中需要满足各种用途, 例如可用来实现密封、绝热、导电、吸能减振等等, 因此也促使了各种用途的专业胶黏剂的产生和发展, 其中应用最为广泛的胶黏剂被称为结构胶(structural adhesive), 这类胶黏剂的特点是具有高模量和高强度, 能够有效的传递应力并承担结构载荷. 通过各种结构胶的使用, 可以有效的实现各种构件的结合. 通过胶黏剂粘结而成的组件统称胶接接头(adhesively bonded joint). 胶接接头不但可以实现不同材质构件的结合, 还可实现不同几何形态构件的结合, 图 1(a)给出了板材搭接、管材套接与斜对接、型材对接等常见几何形态构件的胶接接头形式[3], 其中板材搭接形式在工程中最为常见. 除了实现构件的连接外, 结构胶还可用于各种新型材料和结构的构造. 其中, 轻质夹层板就是一种在航空航天、轨道交通和船舶工业等领域中广泛使用的新型结构材料, 具有轻质、高强韧、耐撞击、隔热和降噪等多种功能特点[4]. 胶接是

中文版发表信息: 许巍, 陈力, 张钱城, 等. 粘结界面力学行为及其表征. 中国科学: 技术科学, 2012, 42: 1361–1376, doi: 10.1360/092012-752

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

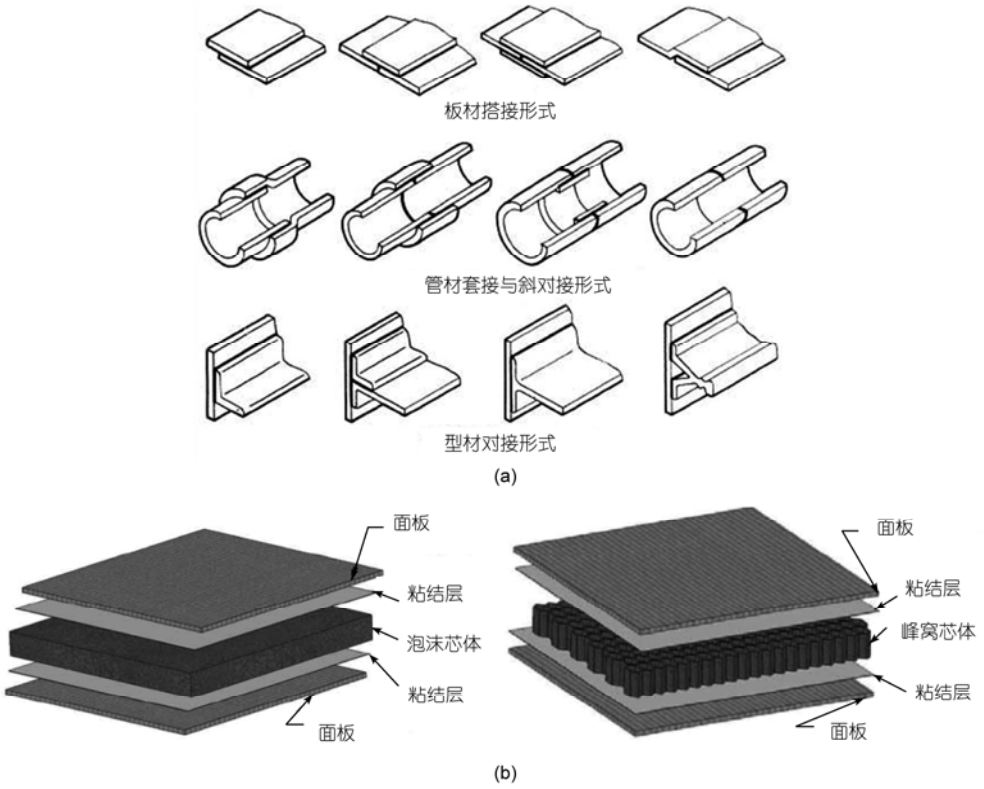

图 1　胶接在工程结构中的常见应用

(a) 胶接接头[3]; (b) 轻质夹层板的构造[5]

该材料在制备过程中的重要环节, 图 1(b)给出了轻质夹层板的结构示意图, 其中粘结层是实现面板和内部芯体结合的重要组成部分, 无论是泡沫芯体还是蜂窝芯体, 都可以通过胶接工艺实现与上下面板的结合, 从而构造成轻质夹层板[5].

上述胶接接头和胶接夹层板材均可被视为粘结构件, 其在实际服役期需承受多种不同形式的载荷, 当载荷超过一定的容许范围时, 构件将发生破坏, 而粘结界面通常是整个构件中最为薄弱的环节, 破坏最易发生. 需要指出的是, 本文所讨论的粘结界面并非狭义的指被粘物与粘结层之间的界面, 而是泛指被粘物之间的所有起连接作用的界面相, 故粘结层本身也可被视为广义的界面. 为了提高粘结构件的整体可靠性, 就需要清晰认识并深刻刻画粘结界面在受载状态下的力学行为, 以便为提高构件承载能力相关的优化设计提供理论依据, 因此目前针对粘结界面力学行为的研究被广泛开展.

目前, 在界面力学领域已有一些经典的综述性文章, 如美国哈佛大学 Hutchinson 和 Suo 针对薄膜、复合材料等层状材料和结构中界面力学的权威综述[6]. 在粘结构件力学性能领域, 虽然也不乏相关的评述文章[7], 但具体针对粘结界面力学的全面系统的介绍尚未见报道. 有鉴于此, 本文将系统评述与粘结界面力学行为密切相关的重要研究方面. 首先介绍有关材料粘结界面破坏机理以及影响因素的重要研究, 然后评述针对粘结界面强度和应力分析而展开的相关实验测试和力学建模工作. 在此基础上, 针对粘结层存在一定程度的尺度依赖的现象, 重点评述国内外在粘结层尺度影响方面的研究现状. 此外, 由于粘结界面在制备及服役期间可能存在缺陷, 从而对构件整体性能产生影响, 本文还介绍了界面缺陷问题的最新研究进展. 有关本文主要内容的结构框架如图 2 所示.

2　粘结界面破坏机理研究进展

在实际服役过程中, 粘结构件的破坏往往发生在粘结界面上, 故针对粘结界面的破坏规律开展研

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

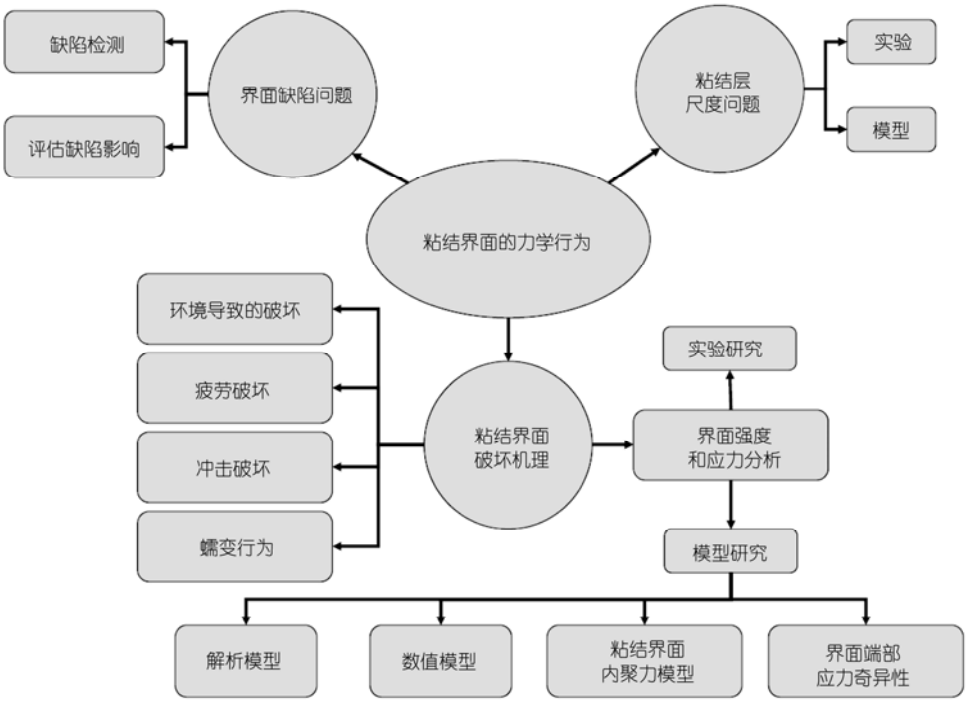

图 2　本文内容的结构框架图

究具有重要意义, 而这方面的相关研究在各个历史时期具有不同的特点. 早期工作主要是基于实际使用过程中各种经验数据的积累, 通过记录粘结构件的实际使用情况来研究粘结体系的具体性能, 但缺乏相应的控制和优化手段. 随着实验技术的改进, 特别是各类专业力学测试设备的发展, 针对粘结构件力学性能的实验研究(experimental study)逐步开展, 其中包括有关疲劳性能和冲击动力学性能这一类难度较大的实验研究. 大量实验结果的出现促进了这一领域的蓬勃发展. 但是, 实验自身需耗费大量的人力物力资源, 改变实验参数意味着大量实验需要重复进行, 而且在目前的实验条件下有些研究甚至难以进行. 因此, 针对胶接体系开展理论建模研究日益受到重视. 早期的研究集中于解析模型(analytical model, 或称分析模型), 主要依靠建立严格的数学关系式来描述胶接体系的受力状态, 并试图寻求数学上的封闭解(解析解), 不少学者就此做出了杰出的贡献. 但是, 由于实际应用中的胶接体系不但具有几何上的复杂性, 在受力状态上也具有相当的复杂性, 故很难通过建立严格的数学关系寻求其封闭解. 现代计算机技术和数值计算方法的发展为粘结构件力学性能的研究提供了崭新的空间, 主要实现手段是通过建立胶接体系的数值模型(numerical model), 依赖计算机实现数值求解. 特别需要指出的是, 有限单元法(finite element method)及其商业化的数值计算软件(例如 ANSYS 和 ABAQUS)的产生和发展, 为解决绝大多数相关问题提供了有效途径. 本节主要评述与粘结界面破坏机理相关的研究, 包括界面强度与应力分析的实验及模型研究、环境导致的界面破坏、疲劳和冲击破坏.

2.1　界面强度与应力分析的实验研究

粘结界面的实际破坏形式与加载模式相关, 不同的加载模式导致粘结界面不同损伤失效机制. 目前, 针对粘结构件的力学性能测试包括拉伸、剪切和劈裂等几种基本受力特征的测试, 而在胶接接头领域的实验研究侧重于剪切和劈裂两种特征的测试, 其中较有典型意义的工作可概括如下. Yang 等人[8]探讨了非对称的 T 字形劈裂试样(T-peel specimen)和单搭接剪切试样(Single lap-shear specimen)在受力状态下的特点, 如图 3(a)和(b)所示, 图 3 中 l_2 对应粘结长度. 由于在实验中采用厚度较薄的铝合金作为胶接体系的组件, 故在加载过程中金属材料塑性变形的影响不可忽视. 这类实验的特点是试样制备较为容

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

易, 加载也较易实现, 测得的加载曲线是粘结构件整体的载荷位移曲线, 可有效地评估构件整体的承载能力. 但是, 这两种试样呈现出明显不同的变形特征, 导致对其的评价准则也有所差异. T 字形试样的载荷随位移的增大而增大, 并逐渐趋于稳态水平值, 该稳态值可作为该类试样整体承载能力的评价参考值; 而单搭接试样的载荷随位移的增大呈现先增大后减小的趋势, 加载曲线表现出明显的峰值, 可采用该峰值评价该类试样整体承载能力. 虽然这些参考值并不能定量地刻画粘结界面自身的性能, 但可以反映界面的相对强弱, 因此很多类似的实验都以获取稳定载荷或峰值载荷为目的, 建立粘结构件各种系统参数与稳态载荷(或峰值载荷)之间的关系.

在已有的胶接体系的研究中, 有相当数量的实验都关注构件系统参数, 特别是粘结界面参数对粘结构件整体性能的影响. 例如, da Silva 等人[9, 10]系统研究了金属单搭接剪切试样中粘结层的韧性对整体强度的影响, 发现韧性较高的粘结层可提高构件的整体剪切强度; 该研究组[11]还考虑了搭接长度、粘结面的表面处理以及环境因素的影响, 发现搭接长度是其中最为主要的影响因素. 针对胶接体系在实际制备过程中各种参数的影响, Pereira 等人[12]设计了相关了实验, 考察了表面预处理、粘结面粗糙度等参数的影响, 同时也较为系统地研究了被粘材料的粘结面积等参数的影响.

这里需要特别指出的是, 如图 3(b)所示的单搭接剪切试样在加载过程中将会不可避免的受到端部力矩的作用, 从而发生一定程度的旋转变形[13]. 因此, 虽然采用单搭接剪切试样所测得的峰值载荷在很大程度上能够反映粘结界面的抗剪能力, 但该评估值还不够准确[14], 需要采用其它试样和加载方式来更为准确地表征粘结界面的抗剪能力. 有鉴于此, Yang 等人[15]采用端部缺口弯曲(end-notched flexure, 简称 ENF)试样进行三点弯曲加载实验(如图 4 所示), 图 4 中 a 表示端部未粘结区域的长度. 该实验研究了界面 II 型裂纹的扩展, 将实验结果与数值模型预测结果进行拟合后确定了粘结层界面的切向最大分离强度.

相对于粘结构件的总体载荷位移关系, 粘结界面的局部分离位移和分离应力之间的关系能够更直接地表征其力学响应, 目前已经被广泛应用于评价粘结界面的分离强度. 例如, 采用 ENF 三点弯曲实验所得的加载曲线, 结合相关力学模型, 即可推导出

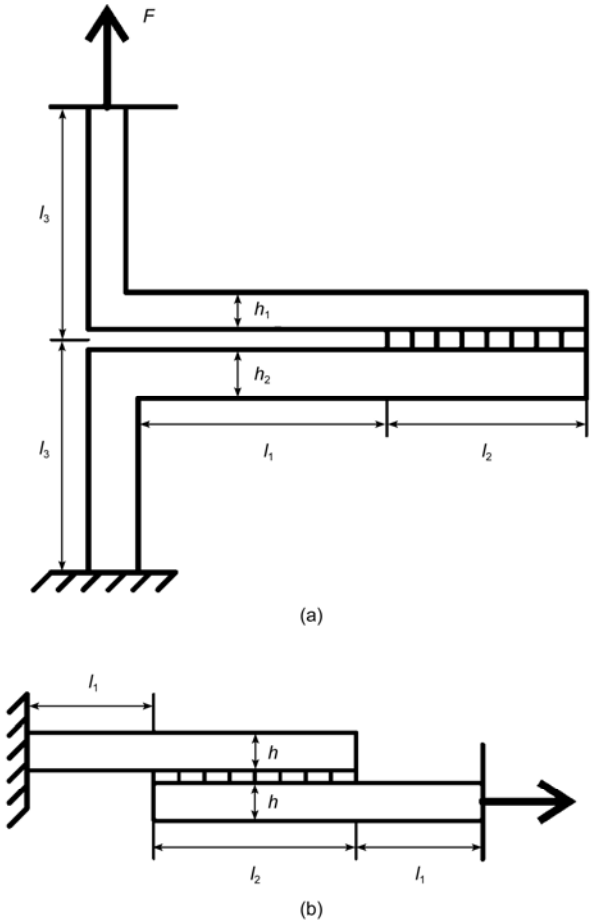

图 3　T 字形劈裂试样和单搭接剪切试样的几何构型[8]

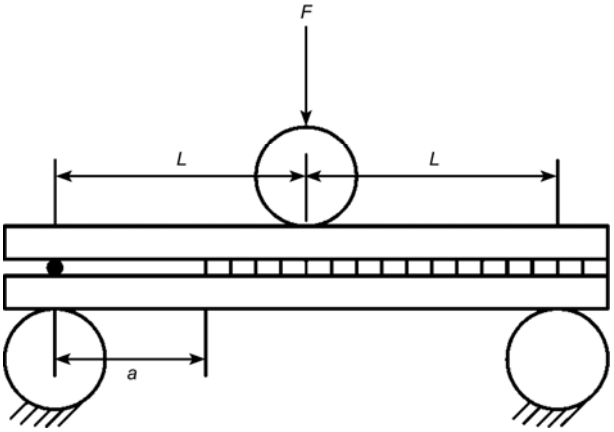

图 4　ENF 三点弯曲实验示意图[15]

分离位移和分离应力的关系曲线, 其峰值所对应的应力值即剪切分离强度[16~18]. 确定法向分离强度时, 由于加载方式相对简单, 易于实现, 目前通常采用双

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

悬臂梁试样[16, 18~22], 图 5 给出了一种典型的双悬臂梁粘结试样的示意图. 通过图 5 中所示的 I 型加载, 得到相应的载荷位移曲线, 结合对粘结层裂纹尖端局部相对位移的测量, 并应用相关力学模型即可得到粘结界面在法向的分离应力和分离位移关系, 其峰值即代表分离强度.

上述针对粘结界面剪切或拉伸性能的实验, 其加载方式相对单一, 不能准确地反映粘结构件在实际应用过程中经历的复杂受力状态. Choupani[23, 24]开发了一种新型加载夹具(图 6), 通过与拉伸试验机配合使用, 可实现从 0°到 90°的任意角度加载, 结果表明粘结界面的断裂韧性强烈依赖于加载角度, 总断裂能随着剪切载荷在总载荷中所占比例的增加而逐渐增大. Madhusudhana 和 Narasimhan[25]通过类似的改变加载角度的实验也得出了相同的结论. 此外, Wei 和 Zhao[26]针对撕裂试样(Peeling specimen)中的粘结界面也开发出了一类加载装置, 可系统地改变加载角度; 结果表明, 随着加载角度的增大, 所测得的稳态撕裂力相应增大. 事实上, 已有的界面理论均证实加载角度对粘结界面的总断裂能和破坏载荷产生重要影响, 上述实验的目的就是定量地获得其内在关系, 刻画其物理机理. 此外, 粘结界面的抗拉能力和抗剪能力的相对强弱还取决于具体采用的胶黏剂种类: 当加载角度改变时, 粘结界面呈现出的变化趋势可能因胶黏剂的种类不同而有明显的区别.

除了金属材料构件, 粘结技术还可应用于绝大多数非金属构件的粘结[27], 这也是其独有特点. Song 等人[28]实验研究了由复合材料板组成的单接接头的剪切性能, 考虑了不同制备工艺、被粘材料厚度以及复合材料特性等因素的影响; 针对由碳纤维增强复合材料组成的粘结构件的强度及其影响因素, Totry 等人[29]发现基体材料、纤维以及界面都是影响整体粘结性能的重要原因. 与金属胶接接头相比, 复合材料

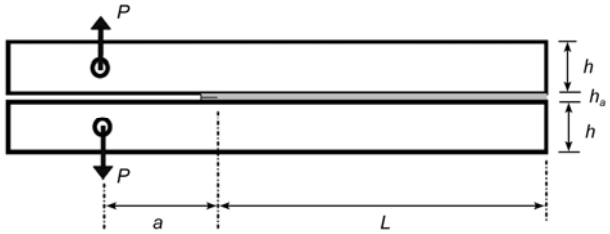

图 5　双悬臂梁拉伸试样示意图[19]

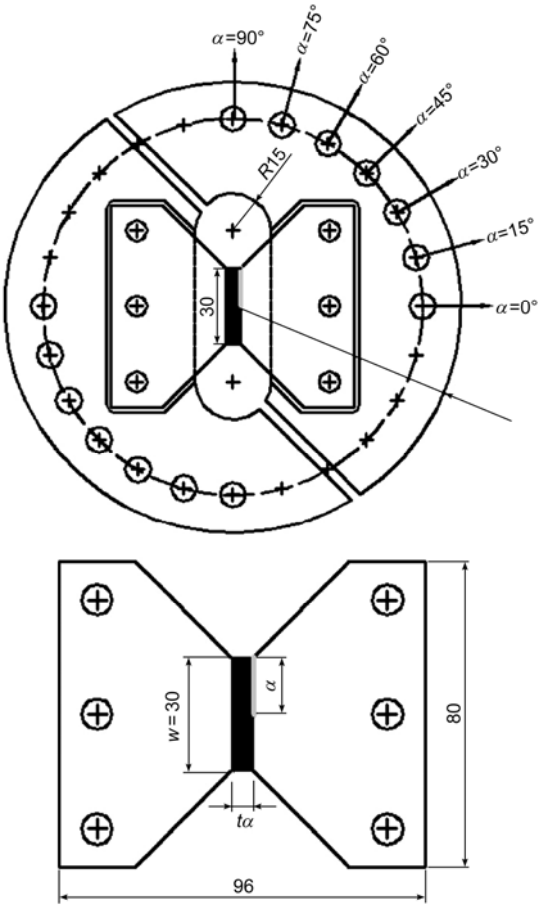

图 6　加载角度可变的夹具及粘结试样示意图[23]

胶接接头的破坏形式除了粘结层的破坏外, 还包括复合材料自身的破坏, 服从一系列完整的破坏规律和破坏准则[30]. Tsai 等人[31]采用全场摩尔干涉光测方法测量了双搭接剪切复合材料试样在加载条件下的变形和应力分布情况, Sorensen 等人[32]则采用四点弯曲实验研究了玻璃纤维增强复合材料的界面分离情况和整体强度的规律. 类似的针对复合材料等非金属材料粘结构件的实验还有很多, 这里就不再赘述了.

此外, 相对于其它形式的结合界面而言, 粘结界面表现出明显的加载率相关性, 这是因为粘结层的主要成分是高聚物, 其力学响应受加载率的影响较为明显[33]. Sun 等人[34]系统研究了加载率对粘结构件中界面的影响, 结果显示将加载模式从准静态改变为动态时, 所测得到的界面韧性有显著降低, 而所测得的界面强度值变化不大, 分析认为界面断裂类型直接影响界面韧性, 准静态下粘结层内部发生内聚

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

破坏, 动态加载下粘结层与被粘物的界面发生破坏, 而后者需要的断裂能明显低于前者, 该结论与文献[35, 36]的工作吻合. Zgoul 等人[37]发现, 随着加载率的提高, 粘结界面的强度有所增加, 但幅度不大.

2.2 界面强度与应力分析的模型研究

2.2.1 解析模型

除了实验方法, 解析模型及方法也是研究粘结构件力学行为时较为常见的手段. 目前, 虽然有关胶接体系力学性能的解析模型类型众多, 但多数局限于求解胶接接头在受载状态下粘结界面的应力分布情况.

较为经典的早期研究是 Volkersen 针对搭接剪切试样建立的分析模型, 该模型考虑了被粘材料的弹性变形, 但假设粘结层仅承受纯剪切应力, 不考虑其中的正应力影响. 相比而言, Goland 和 Reissner[38]对搭接剪切试样的分析及求解则更为精细, 堪称该问题的经典解答, 其突出特色就是考虑了单接接头在拉伸过程中由于弯矩而产生的旋转, 使得解答更贴近实际情况. 随后, 其他学者提出的解析模型均考虑了弯矩的影响, 例如 Zhao 等人[39]的分析模型准确的描述了单接接头在拉伸过程中弯矩的变化规律. Tong[40]建立了解析模型, 较好地刻画了单接接头的粘结强度; 在此基础上, Luo 和 Tong[41]进一步分析了复合材料胶接接头的非线性力学行为, 模型预测与有限元计算结果的吻合较好.

限于篇幅, 这里不再逐一列举有关粘结构件力学行为解析模型方法的工作, da Silva 等人[42, 43]详细回顾了胶接接头解析模型的发展历史, 比较了各个模型的特点及适用性, 有兴趣的读者可以进一步参考.

2.2.2 数值模型

相对于前两种研究手段, 数值模拟发挥着越来越重要的作用, 处理的问题也越来越广泛, 这主要得益于现代计算机的性能日益提高和各种数值计算方法的进步. 其中, 就胶接体系而言, 最重要的数值方法就是有限元方法, 相应的数值模型被统称为有限元模型. He[7]详细回顾了有限元方法在粘结构件领域的应用, 其特点是将连续的材料转化成离散化网格, 通过一定的算法求解系列方程组, 从而确定模型中的位移场、应力场和应变场; 图 7 给出了一个典型的粘结构件的有限元网格划分[44]: 由于粘结区的力学行为往往受到端部和界面的奇异性的影响, 因此在划分网格的时候需要对这个区域进行加密化处理.

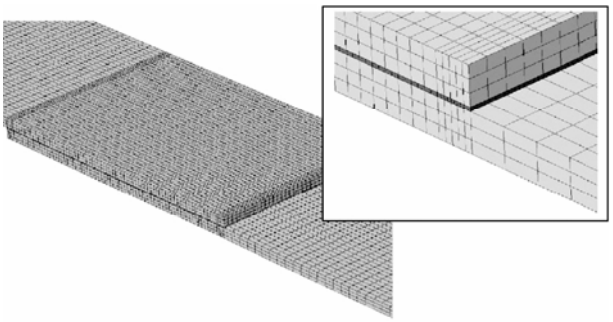

图 7 粘结构件的典型有限元网格划分[44]

目前, 采用有限元方法对胶接结构进行数值模拟占据了该领域的主要地位, 实验研究结合有限元模型分析已经成为主流研究方法. 从目前已经报道的文献来看, 大多数粘结构件有限元模型都是基于商业化软件, 利用其已有的计算模块或者用户自定义的扩展模块来实现各种复杂计算. 这方面的文献浩如烟海, 不可能逐一列举, 但总结起来大致可分为两大类, 第一类主要关注界面的应力分布情况, 将粘结层模拟为弹塑性材料, 通过与实验结果的拟合或者查阅材料手册, 赋予粘结层相关材料参数, 然后输出不同加载条件下的应力分布情况; 例如, You 等人[45~47]采用商用有限元软件, 建立了各种形式的胶接接头有限元模型, 重点关注粘结层在受载状态下的应力分布情况, 通过最大应力值判别胶接接头整体的临界失效. 这一类研究虽然能够较为准确地给出界面的应力分布情况, 数值计算结果与已有的解析模型结果也较为吻合, 但是存在局限性, 其中最大的问题就是无法直观地预测界面的失效退化: 虽然可通过强度准则判断粘结层的失效, 但其判定的仅仅是某个局部位置的失效, 并不能预测整个粘结界面的失效. 为了弥补上述不足, 国内外研究者发展了另一类模型, 该模型在表征界面弹塑性力学行为的同时, 还可表征粘结界面的断裂行为, 内聚力模型(cohesive zone model)就属于这类模型, 以下重点介绍.

2.2.3 粘结界面内聚力模型

内聚力模型建立于界面上下端的内聚应力-分离位移关系(traction-separation, 简称 T-S 关系)之上, 在

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

描述材料断裂方面具有优势, 能够有效的表征粘结层在加载条件下的损伤失效过程[48~50]. 这里介绍 3 种较为常见的 T-S 关系曲线[51~53].

Xu 和 Needleman[54]提出的指数和多项式结合形式的内聚力模型是一种基于势函数的模型, 该模型采用下式描述界面内聚应力与位移关系的势能:

$$\phi(\Delta_n,\Delta_s)=\phi_n+\phi_n\exp\left(-\frac{\Delta_n}{\delta_n}\right)\left[\left(1-r+\frac{\Delta_n}{\delta_n}\right)\frac{1-q}{r-1}-\left(q+\left(\frac{r-q}{r-1}\right)\frac{\Delta_n}{\delta_n}\right)\exp\left(-\frac{\Delta_s^2}{\delta_s^2}\right)\right], \tag{1}$$

根据势函数, 位移分量和应力分量的关系为:

$$T_n=\frac{\partial\phi}{\partial\Delta_n},\quad T_s=\frac{\partial\phi}{\partial\Delta_s}. \tag{2}$$

由此可得法向和切向界面粘结力和分离位移之间的关系如下:

$$\begin{aligned}T_n&=\frac{\phi_n}{\delta_n}\exp\left(-\frac{\Delta_n}{\delta_n}\right)\left[\frac{\Delta_n}{\delta_n}\exp\left(-\frac{\Delta_s^2}{\delta_s^2}\right)+\frac{1-q}{r-1}\left(1-\exp\left(-\frac{\Delta_s^2}{\delta_s^2}\right)\right)\left(r-\frac{\Delta_n}{\delta_n}\right)\right],\\T_s&=2\frac{\phi_s}{\delta_s}\frac{\Delta_s}{\delta_s}\left[q+\left(\frac{r-q}{r-1}\right)\frac{\Delta_n}{\delta_n}\right]\times\exp\left(-\frac{\Delta_n}{\delta_n}\right)\exp\left(-\frac{\Delta_s^2}{\delta_s^2}\right),\end{aligned} \tag{3}$$

其中, Δ表示界面开裂位移, T 表示对应界面开裂位移为 δ 时的界面粘结应力, T_{max} 表示对应界面开裂时的最大内聚应力, 下标 n 和 s 分别代表法向和切向, d 代表与界面开裂最大内聚应力相对应的界面开裂位移; f 为分离功(work of separation), 即 T-S 曲线下的面积; $q=\phi_s/\phi_s$, $r=\Delta'_n/\delta_n$, 而 Δ'_n 是法向应力 T_n 为零时, 界面发生完全剪切分离所对应的法向位移Δ_n 值. Xu-Needleman 内聚力本构关系的曲线形式如图 8 所示, 其优点是在法向压缩的情况下能自动描述界面行为, 更重要的是利用该模型得到的粘结力及其导数均为连续函数, 从计算的角度来看很有吸引力, 故为很多学者采用.

第二种常见的内聚力模型由 Hutchinson 和 Tvergaard[55]提出, 称为 Embedded Process Zone(简称 EPZ) 界面本构模型. 该模型将界面本构关系分成线弹性、理想塑性、线性软化 3 个阶段, 如图 9 所示, 这样便把界面本构模型嵌入到界面开裂的塑性区域内, 从

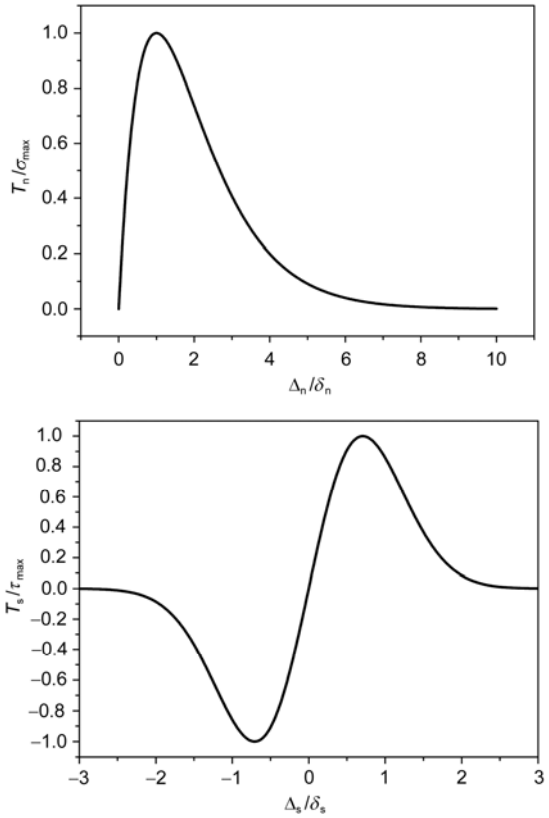

图 8　Xu-Needleman 指数型内聚力模型[54]

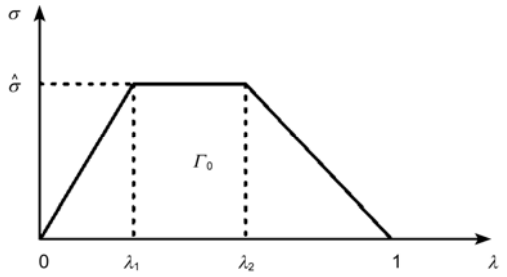

图 9　EPZ 模型的内聚力模型关系[55]

而将经典断裂力学理论与界面 T-S 关系相结合.

EPZ 模型引入一个无量纲的位移参数 λ, 其表达式如下:

$$\lambda=\sqrt{\left(\frac{\delta_n}{\delta_n^c}\right)^2+\left(\frac{\delta_s}{\delta_s^c}\right)^2}, \tag{4}$$

其中, δ_n 和 δ_s 分别为法向和切向的开裂位移, δ_n^c 和 δ_s^c 分别是法向和切向的临界开裂位移. 界面承受拉伸载荷时, 势能的表达式为:

$$\Pi(\delta_n,\delta_s)=\delta_n^c\int_0^\lambda\sigma(\lambda')\mathrm{d}\lambda', \tag{5}$$

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由此可得法向和切向的内聚应力分量为:

$$\begin{cases} T_{\mathrm{n}} = \dfrac{\partial \Pi}{\partial \delta_{\mathrm{n}}} = \dfrac{\sigma(\lambda)}{\lambda}\dfrac{\delta_{\mathrm{n}}}{\delta_{\mathrm{n}}^{\mathrm{c}}}, \\ T_{\mathrm{s}} = \dfrac{\partial \Pi}{\partial \delta_{\mathrm{s}}} = \dfrac{\sigma(\lambda)}{\lambda}\dfrac{\delta_{\mathrm{s}}}{\delta_{\mathrm{s}}^{\mathrm{c}}}\dfrac{\delta_{\mathrm{n}}^{\mathrm{c}}}{\delta_{\mathrm{s}}^{\mathrm{c}}}, \end{cases} \tag{6}$$

单位面积的分离功为:

$$\Gamma_0 = \frac{1}{2}\hat{\sigma}\delta_{\mathrm{n}}^{\mathrm{c}}\left(1-\lambda_1+\lambda_2\right). \tag{7}$$

双线性内聚力模型是另一种常见的内聚力模型, 其剪切和拉伸方向的 T-S 关系如图 10 所示, 曲线的上升段和下降段均为线性. 双线性内聚力模型在形式上较为简单, 易于用有限元方法实现, 目前被广泛采用[14, 49, 56, 57].

无论采用何种形式的内聚力模型表征粘结界面, 必须考虑两个关键参数: 一个是 T-S 曲线的峰值应力值, 即分离强度(separation strength), 另一个是 T-S 曲线与横轴所包围的面积, 即断裂能(fracture energy). 事实上, 这两个内聚参数比 T-S 曲线的具体形式更为重要[58]. 需要指出的是, 由于胶黏剂通常表现出各向异性特性, 故粘结界面也存在对加载方向的依赖性, 尤其是其在拉伸和剪切加载条件下的力学响应呈现出显著的差异性, 相关的内聚参数值在法向和剪切方向也存在差异性[57, 59].

针对粘结界面的力学行为刻画, 国内外学者近年来采用内聚力模型展开了广泛研究, 例如: Yang 等人[8]在有限元计算中采用了一种内聚界面单元来刻画粘结层, 模型预测与实验结果吻合较好. de Moura 等人[60, 61]利用自定义的内聚界面单元同样实现了对粘结层的刻画, 由于该单元能够描述粘结层在受载过程中的损伤变化情况, 故可预测胶接体系的破坏过程; 值得一提的是, 该自定义界面单元能够准确地刻画粘结层在混合加载模式下的力学响应, 所得结果更符合真实情况. 除了直接将整个粘结层等效为内聚力界面单元外, Campilho[62]近期的研究重点关注各种内聚参数的改变对粘结构件整体性能的影响. 此外, 也有学者[63, 64]将内聚力界面单元和弹塑性材料层结合起来, 共同实现对粘结层的模拟, 以便更准确地描述粘结层的变形和粘结层中裂纹尖端塑性区的变化.

最后, 由于复合材料在材料属性上比金属或合金材料更为复杂, 而有限元模型在材料属性的定义和赋值上具有明显优势, 因此采用有限元方法对复合材料粘结界面进行模拟逐渐成为趋势[65]. 需要指出的是, 采用内聚力界面模型不仅可以表征界面的断裂行为, 还可实现对界面应力分布场的表征, 由于该模型考虑了粘结层在加载过程中的损伤演化, 故可真实反映在不同加载历史时刻的应力场分布情况[62].

2.2.4 界面端部应力奇异性

与其它二相材料界面一样, 粘结界面端部同样存在应力奇异性, 具体表现就是在受载条件下, 靠近端部界面的应力值有明显的急剧增大的趋势, 这种现象通常也称为端部效应. 对各向同性双弹性材料的界面端, 其应力奇异场可描述如下[66]:

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{r^{\lambda}} f_{ij}(\theta), \tag{8}$$

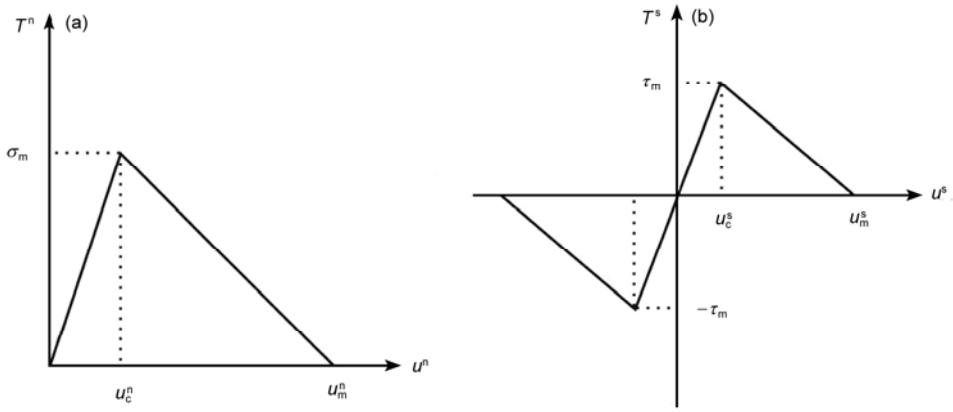

图 10 双线性内聚力模型的典型 T-S 关系曲线[14]

(a) 拉伸; (b) 剪切

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中, σ_{ij} 为沿界面的应力, (r,θ) 为界面尖端的极坐标, K 为应力强度参数, λ 为应力奇异指数, $f_{ij}(\theta)$为无量纲的角分布函数. 尽管粘结界面并非严格意义上的二相材料界面, 但关系式(8)仍然适用[67~69]. 由于端部效应的存在, 粘结界面通常会在端部发生起裂, 因此在粘结构件的设计中需要格外重视端部效应. 通过建立有效的数值模型, 可以评估界面和构件的不同几何形态对界面端部效应的影响[67], 例如 Goglio 等人[68~70]应用(8)式计算了粘结界面端部的应力强度参数值, 以此评估各类粘结层参数对端部效应的影响. 这里需要指出的是, 粘结界面的应力奇异性指数通常不为 0.5, 故常用商业有限元软件中自带的奇异性单元不适用于粘结界面端部的计算[70]. 当粘结构件的几何形态较为复杂时, 数值模型的优势得以凸显, 例如Cognard等人[71~73]采用有限元模型系统研究了单搭接形式、圆柱形粘结接头等胶结试样的界面端部效应, 量化了各种几何参数对端部效应的影响.

除了有限元方法, 也可采用边界元方法对粘结界面的端部效应进行评估, 例如 Ioka 等人[74]采用边界元方法考察了粘结界面应力奇异区的影响范围, 发现其影响区域大小与粘结层尺寸具有相同的数量级.

2.3　环境导致的粘结界面破坏

上述研究均未考虑环境因素对粘结层界面力学性能的影响. 粘结构件在服役过程中通常会长期暴露于空气或其它特定介质中, 经历各种潮湿和环境温度的影响, 在这些环境因素的影响下, 粘结界面会发生各种形式的破坏.

考虑环境因素下粘结界面破坏的关键问题就是建立环境参数与界面性能的关系, 而内聚力界面模型为描述特殊条件下的界面失效提供了有效途径. 例如, Mubashar 等人[75]利用界面模型考虑了环境潮湿因素对内聚参数的影响, 评估了各种潮湿条件下界面裂纹的起始和扩展情况; Crocombe 等人[76]的研究同样关注潮湿对粘结界面退化的影响, 并利用内聚力界面模型预测了粘结界面在各种潮湿环境条件下的残余强度. 相比于潮湿对界面的影响, 环境温度对粘结界面的影响更为显著而迅速: 一方面, 在高低温环境下, 界面两端材料热变性失配导致的热应力对界面的影响非常剧烈; 另一方面, 在高低温环境下, 胶黏剂的材料属性将发生明显改变, 所以在环境温度方面的研究重点关注这两方面的影响. 如 Apalak 等人[77]系统考察了热失配引起的残余应力对粘结构件界面的影响, 尤其是对界面应力奇异区的影响; Benea 等人[78]研究了温度对粘结界面 I 型加载条件下的影响, 他们将内聚力界面模型预测与实验结果进行拟合得到了不同温度条件下的界面内聚参数, 结果表明随着温度的升高, 各类内聚参数都有急剧下降的趋势. 这里需要指出的是, 采用解析或数值模型研究环境因素对界面破坏的影响所依据的基础是环境参数与界面参数的关系, 而这类关系大多根据实验数据拟合而成, 因此可以说模型预测结果是建立在实验结果的基础之上. 如需建立环境参数与界面破坏之间更为一般的联系, 需要对环境影响界面破坏的微细观物理机理入手, 开展更为深入的理论和实验研究.

2.4　粘结界面的疲劳破坏

与工程材料相似, 在循环载荷作用下, 粘结界面会发生界面裂纹扩展和界面失效. 由于粘结构件相对于其它连接技术(如点焊或螺栓紧固)的应力集中程度较低, 故通常情况下粘结构件具有更高的疲劳强度[1]. 导致粘结界面产生疲劳破坏的循环应力源可能来自机械载荷, 也可能来自热应力. 无论是哪种循环应力引起的疲劳破坏, 通过实验寻求循环寿命与界面损伤破坏之间的相关规律需要较长的实验周期, 而采用理论模型预测相关界面损伤参数的演化规律是一种省时高效的方法, 能够为工程实际提供有益的参考, 所以实验和数值模型在粘结界面疲劳破坏的现有研究中均占据重要的地位. 例如, Ashcroft 等人[79]实验研究了测试环境对胶接构件疲劳行为的影响; 针对有界面损坏的蜂窝结构夹层板和无界面损坏的蜂窝结构夹层板, Belingardi 等人[80]开展了四点弯曲疲劳研究, 发现前者的破坏模式主要为结构坍塌破坏, 而后者则为蜂窝芯内壁向胶层倾斜破坏. 针对粘结界面的疲劳破坏, 国内外学者提出了众多模型[81], 其中一部分模型应用相关的疲劳寿命理论(如 Coffin–Manson 方程)可评估粘结界面的疲劳寿命[82], 但这种方法的局限性在于不能直观描述粘结界面的疲劳破坏, 相比而言, 内聚力界面模型应用于疲劳破坏研究可以弥补这方面的不足, 因此日益受到关注, 例如, Khoramishad 等人[83]结合基于应变的疲劳损伤模型和双线性内聚力模型, 共同刻画粘结界面的疲

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

劳破坏过程, 这种方法既适用于常载荷幅值条件下的疲劳问题[84], 也适用于变载荷幅值条件下的疲劳损伤[85].

2.5 粘结界面的冲击破坏

采用粘结构件的产品在实际使用过程中经常会受到冲击载荷的影响, 例如汽车和手机的设计就必须考虑其粘结构件的抗冲击性能. 粘结界面的疲劳破坏是一个漫长的过程, 其冲击破坏则是一个瞬间完成的过程. 目前主要采用摆锤冲击、落锤和 Hopkinson 压杆等实验手段研究粘结界面的冲击破坏[1]. 例如, Goglio 等人[86]采用摆锤冲击实验, 研究了单搭接接头的拉伸冲击性能及其对搭接长度、胶层厚度和粘结结构厚度的依赖性, 发现动态载荷下的胶接强度值高于静态强度, 胶层越薄则结构的抗冲击强度越高. Belingardi 等人[87]采用落锤冲击实验对具有不同结构形状的 FeP04 钢组合梁进行了轴向冲击压缩试验, 发现采用胶接工艺制备的双 U 型组合梁的抗冲击能量吸收比点焊工艺制备的结构更佳. Adamvalli 等人[88]采用 Hopkinson 压杆研究了钛合金单搭接接头在不同加载速率和测试温度下的强度, 发现其随着加载速率的提高而显著提高, 虽然温度的提高会降低接头强度, 但 100°C 下的动载强度高于 25°C 下的静态强度.

在理论建模方面, 尽管利用分析模型对冲击载荷下粘结构件的动态应力进行分析在理论上是可行的, 但所得到的控制方程通常以偏微分方程形成给出, 求解上往往非常困难. 相比而言, 采用数值模型求解粘结构件的冲击问题是一种理想的选择. 例如, Adams 等人[89]采用有限元法模拟了胶层结构的应力分布, 发现当冲击部位偏离胶层位置时, 胶层中的正应力峰值增大, 而剪应力峰值减小; 在拉伸冲击载荷下, Sawa 等人[90]采用有限元法研究了被粘物弹性模量和胶层厚度对中空圆筒对接接头应力的影响, Castanié 等人[91]则采用有限元法研究了低能/低速冲击载荷作用下蜂窝夹芯胶接结构的动态响应.

胶接界面也可用于抗爆炸和抗侵彻结构设计. Tedesco 等人[92]和李刚等人[93]的研究表明由不同阻抗界面材料构成的多层复合结构能够有效地减小爆炸冲击造成的损伤. Zaera 等人[94]研究了不同胶层特性(柔性和刚性)以及胶层厚度对结构抗侵彻性能的影响. Lopez-Puente 等人[95]通过实验和有限元模拟系统研究了胶层厚度对 Al_2O_3/Al 装甲抗侵彻性能的影响, 并得到了该结构的粘结层优化厚度. Gupta 等人[96]研究了层合板受子弹冲击后的失效变形、能量吸收及内应力分布. Yungwirth 等人[97]提出了一种新的轻质复合装甲结构: 聚氨基甲酸乙酯复合陶瓷/金字塔点阵金属结构, 实验结果表明该复合界面导致结构的整体抗侵彻性能大幅提高. 然而, 由于粘结界面的应力奇异性、粘结层材料动态力学性能的不确定性等复杂因素的存在, 目前尚无法准确预测粘结界面的抗冲击强度[81], 这方面的理论和实验研究亟待加强.

2.6 粘结界面的蠕变

蠕变是一种应力不变而应变随时间不断增加的现象. 一般而言, 依赖于温度和外载作用的时间等外界条件, 任何材料均会发生蠕变; 相对而言, 高聚物材料的蠕变行为更为明显. 由于胶黏剂通常情况下都是高聚物材料(例如常用的环氧树脂和丙烯酸酯胶黏剂等), 故不可忽视粘结界面的蠕变行为. 与疲劳破坏相似, 粘结界面的蠕变行为也需要经历较长的周期, 相关的实验可能会持续数日甚至数月, 关注重点一般为蠕变柔量和时间的关系[98~101]. 由于蠕变柔量的改变, 粘结界面的应力相应减小, 界面应变则相应增加[99, 100]. 温度升高将加速粘结界面的蠕变速率, 这可用高聚物的时间温度等效原理来解释, 利用这一原理可以缩短蠕变实验的时间[102]. 由于实验周期较长的局限性, 采用计算模型预测粘结层的蠕变行为[99, 103]成为研究粘结界面蠕变研究的必要手段. 尽管粘结界面的蠕变行为通常需要较长时间才能表现出明显的变化趋势, 但这种变化仍会对粘结构件的服役性能产生负面影响, 因此需要采取有效措施来延缓粘结界面的蠕变行为. 研究发现[98], 在粘结层添加纤维增强层可有效地延缓粘结界面的蠕变行为, 进而减轻由此引致的负面影响. 有必要进一步研究粘结界面蠕变的有关规律, 并寻求减弱其负面影响的针对性措施.

3 粘结层尺度

长期以来, 国内外学者特别关注粘结层厚度对粘结构件整体性能的影响, 希望通过系统的模型和实验研究实现对粘结层厚度的优化, 在节约胶黏剂用量的前提下使粘结结构的整体强韧性达到最优.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.1　实验研究

相关的实验研究重点考虑粘结层厚度对粘结构件整体性能和局部破坏行为的影响. 例如, de Silva 等人[10]实验比较了采用环氧树脂胶黏剂粘结的高强钢单接接头的整体强度, 考虑了 3 种不同厚度(0.2, 0.5 和 1 mm)的粘结层, 发现结构的整体承载能力随粘结层厚度的增大而呈现逐渐下降的趋势; 采用类似实验, Kahraman 等人[104]则发现粘结层厚度(0 ~ 1.2 mm)对铝合金单接接头的整体强度无显著影响. Chai[105]采用环状(Napkin Ring)试样, 发现无论是其最终失效应变还是其断裂强度均随粘结层厚度的减小而增加, 当厚度超过一定门槛值时, 逐渐趋于稳态. Lee 等人[20]采用紧凑拉伸金属试样研究粘结层厚度对整体断裂韧性的影响, 结果表明粘结构件的断裂韧性随粘结层厚度的增加呈现出先增大后趋稳的特点, 而该稳态值最终趋于宏观粘结层材料的断裂韧性; Marzi 等人[18]的实验研究也发现粘结构件的断裂韧性随粘结层厚度的增大而逐渐增大.

粘结层厚度不仅影响胶接体系的整体力学性能, 也影响粘结层的局部力学性能. 近年来, 由于内聚力界面模型日趋成熟, 粘结层厚度对内聚参数的影响也得到重视[106, 107]. 例如, 针对内聚力参数对加载方向的依赖性, Carlberger 和 Stigh[22]研究了法向和切向的内聚参数与粘结层厚度之间的关系, 发现法向的内聚参数对粘结层厚度的依赖性更加明显; Ji 等人[17, 19, 108]系统研究了各种被粘材料条件下粘结层厚度的影响, 分别考虑了纯拉、纯剪以及拉伸剪切混合等不同加载模式.

3.2　模型研究

针对粘结层厚度的影响展开实验研究, 其难点在于如何对粘结层厚度实现精确控制. 目前采用的各种控制粘结层厚度的方法难免会产生误差, 尤其是当粘结层厚度较小时, 细微的误差将导致实验结果的较大差异. 此外, 由于实验数据的有限性, 不可能针对各种粘结层厚度进行测试, 已有的实验研究大多仅考虑 3~5 种粘结层厚度的影响, 结果分散性较大. 因此, 如何在精细刻画粘结层破坏机理的基础上对粘结层厚度的影响进行合理化建模, 是目前该领域面临的挑战性难题, 核心目标是寻求粘结层厚度与界面破坏条件之间的定量关系. 最为简单的处理方法是从粘结层中应力场出发[10, 109~111], 在建模过程中赋予粘结层不同的几何厚度, 考察粘结层中的最大应力值(如最大 von Mises 应力), 然后通过恰当选择的强度准则计算粘结层的等效强度, 从而建立粘结层厚度和界面破坏条件的关系. 另一种研究思路是考虑粘结层厚度对粘结层内裂纹尖端塑性区的约束作用[20, 63, 112~115], 由于不同的粘结层厚度对应不同的塑性耗散, 而该塑性耗散对粘结界面的整体断裂韧性有着重要贡献, 由此可建立粘结界面断裂韧性与粘结层厚度之间的关系, 在此基础上引入内聚力界面单元模拟粘结构件的力学行为, 可得粘结层厚度对粘结构件整体强度的影响. 目前, 有关粘结层厚度的影响, 尤其是微小尺度粘结层及其破坏机理[116], 还需要进一步的研究和探讨.

4　粘结界面缺陷

4.1　界面缺陷检测

在粘结构件服役期间, 其实际承载能力难以评估和预测, 但通常低于甚至远低于其理论承载能力, 其中一个很重要的因素就是各种粘结界面缺陷的普遍存在, 包括微孔洞、微裂纹、夹杂、以及局部脱粘[117]. 缺陷的来源多样化, 包括: 在制备过程中由于工艺问题而产生的初始缺陷; 在服役期间由于环境原因造成的缺陷, 如潮湿或高温造成的微孔洞及脱粘. 此外, 大量的实验数据表明, 在较厚的粘结层中存在微小缺陷的概率和数量要高于较薄的粘结层, 因而具有较厚粘结层的构件的承载能力普遍低于具有较薄粘结层的构件[10]. 在实际工程应用中, 如果能适时检测出粘结层中的缺陷, 可有效预测该粘结构件的残余承载能力, 从而为决定是否保留、加固或更换该构件提供重要参考. 因此, 如何评估粘结界面中各类缺陷对构件承载能力的影响非常重要[118, 119].

目前, 针对粘结层缺陷的检测和评估, 国内外学者已经开发了不同实验手段. 例如, Heslehurst[118]利用全息干涉度量法对粘结层缺陷进行定位, 发现通过干涉图样可有效地检测出粘结界面缺陷的位置; Yang 等人[119, 120]发展了一套基于振动的无损检测方法, 采用该法可评估粘结层中缺陷的含量; Llopart 等人[121]采用超声波和 X 光图像相结合的无损检测方法对粘结界面缺陷进行探测, 均取得了较好的效果.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4.2 界面缺陷的影响

除了利用实验手段检测粘结界面中缺陷的尺寸及位置, 还需采用其它方法建立缺陷参数和粘结构件整体力学性能之间的定量关系, 而其中最为关键的力学性能就是含界面缺陷构件的残余强度. 目前, 通过建立有效的分析模型和数值模型可以实现对残余强度的评估. 例如, 针对粘结层含孔洞缺陷的粘结体系的残余强度, Olia 等人[122]提出了一种基于二维平面应变的分析模型; Chadegani 等人[123]采用一阶剪切变形理论(first-order shear deformation theory, 简称 FSDT), 获得了含界面初始裂纹和孔洞的胶接接头中的应力和位移分布情况. 在建模过程中, 上述研究均将粘结层和被粘物视为线弹性各向同性材料.

相比于分析模型, 数值模型由于不需要太多的假设, 在粘结层界面缺陷影响研究中的应用更为广泛. 例如, Chow 和 Woo[124]采用有限元方法, 考察了粘结层界面缺陷及其分布对金属粘结体系断裂行为的影响; de Moura 等人[117]利用在混合加载模式条件下考虑损伤的界面单元, 探讨了界面缺陷对应力和损伤起始扩展的影响; You 等人[46]建立数值模型, 考察了条状缺陷对胶粘层中应力分布的影响; Ribeiro 等人[125]利用二维和三维有限元模型, 研究了不同种类缺陷对粘结层应力分布的影响; 最近, Xu 等人[56]发展了一套有限元模型, 实现了对局部脱粘和弱粘结区这两种条状界面缺陷的数值模拟, 同时还采用改进的 Gurson 本构模型模拟了含孔洞缺陷的粘结层. 上述结果均显示缺陷的存在显著影响粘结层中的应力分布, 而采用数值模型可有效地获得粘结构件残余强度与缺陷参数的定量关系.

5 展望

尽管国内外已经广泛开展了针对粘结界面力学的理论和实验研究, 但在诸多方面仍然面临挑战. 首先, 对粘结界面的形成及界面破坏的微细观物理机理尚不能全面认识和把握, 这主要是由于胶黏剂材料的种类繁多, 粘结界面的形成过程较为复杂, 已有的粘结理论在解释实验现象时存在局限性, 缺乏统一的理论来解释界面粘结的物理机理. 其次, 对粘结层材料自身的本构描述仍需进一步完善, 尽管目前可采用内聚力界面模型等描述界面的相关属性, 但这些模型尚不能准确描述特殊环境(如极端温度)和特殊载荷条件(如冲击、侵彻)下的界面性能, 只能通过相关内聚参数与实验数据的拟合实现间接描述, 因此需要进一步发展能够直接描述特殊环境、混合模式加载及动态载荷条件下的界面本构模型. 最后, 亟需进一步建立并完善粘结界面的跨尺度力学理论和方法. 除了在航空航天、汽车等工程领域中广泛应用的大型粘结构件, 还有在微机电系统等微纳器件中广泛应用的小尺度构件, 粘结界面在尺度上的差异必然会导致其在力学性能上的差异, 从而需要进一步寻找相关规律. 另一方面, 就研究方法而言, 除了采用宏观理论和连续介质方法对粘结界面的力学行为进行表征, 还应该从微观尺度出发, 利用分子动力学[116]、第一性原理等模拟手段探究粘结界面力学行为的微观机理.

6 结语

胶接技术具有工艺简单、应力集中小、抗疲劳、耐腐蚀、密封性好等优点, 但传统观念制约了人们对粘结构件可靠性的信赖程度, 认为粘结构件的界面相对较弱, 容易产生失效破坏, 粘结构件所能达到的强度低于传统机械连接形式. 为此, 国内外学者针对粘结界面力学行为的表征展开了广泛的理论和实验研究, 其目标就是认识并刻画粘结构件发生界面破坏的成因和过程, 为提高构件的可靠性, 对粘结界面进行优化设计提供重要的理论依据. 本文重点介绍其中 3 个研究方向, 分别是粘结界面破坏机理、粘结层尺度效应、粘结界面缺陷的影响. 尽管相关研究取得了重要进展, 但在诸多方面仍然面临挑战, 进一步针对粘结界面力学开展系统深入的理论和实验研究具有重要的学术意义和应用价值. 随着粘结界面力学行为及其表征技术研究的深入开展, 相信粘结构件在实际应用中将发挥越来越重要的作用.

参考文献

1 游敏, 郑小玲. 胶接强度分析及应用. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 阿·波丘斯, 著. 潘顺龙, 赵飞, 许关利, 译. 粘接与胶黏剂技术导论. 北京: 化学工业出版社, 2005
3 杨玉琨. 合成胶粘剂. 北京: 科学出版社, 1980
4 卢天健, 何德坪, 陈常青, 等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用. 力学进展, 2006, 36 (4): 517–535
5 Banea M D, da Silva L F M. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L-Journal of Materials-Design and Applications, 2009, 223 (L1): 1–18
6 Hutchinson J W, Suo Z. Mixed-mode cracking in layered materials. Adv Appl Mech, 1992, 29: 63–191
7 He X C. A review of finite element analysis of adhesively bonded joints. Int J Adhes Adhes, 2011, 31(4): 248–264
8 Yang Q D, Thouless M D. Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints. Int J Fracture, 2001, 110 (2): 175–187
9 da Silva L F M, Critchlow G W, Figueiredo M A V. Parametric study of adhesively bonded single lap joints by the taguchi method. J Adhes Sci Technol, 2008, 22(13): 1477–1494
10 da Silva L F M, Rodrigues T N S S, Figueiredo M A V, et al. Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength. J Adhes, 2006, 82(11): 1091–1115
11 da Silva L F M, Carbas R J C, Critchlow G W, et al. Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints. Int J Adhes Adhes, 2009, 29(6): 621–632
12 Pereira A M, Ferreira J M, Antunes F V, et al. Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminium adhesive single-lap joints. J Mater Process Tech, 2010, 210(4): 610–617
13 Lucic M, Stoic A, Kopac J. Investigation of aluminum single lap adhesively bonded joints. J Achieve Mat Manuf Eng, 2006, 15(1-2): 79–87
14 Xu W, Wei Y. Strength and interface failure mechanism of adhesive joints. Int J Adhes Adhes, 2012, 34(1): 80–92
15 Yang Q D, Thouless M D, Ward S M. Elastic-plastic mode-II fracture of adhesive joints. Int J Solids Struct, 2001, 38(18): 3251–3262
16 Khoo T T R, Kim H. Effect of bondline thickness on mixed-mode fracture of adhesively bonded joints. J Adhes, 2011, 87(10): 989–1019
17 Ji G F, Ouyang Z Y, Li G Q. Effects of bondline thickness on Mode-II interfacial laws of bonded laminated composite plate. Int J Fracture, 2011, 168(2): 197–207
18 Marzi S, Biel A, Stigh U. On experimental methods to investigate the effect of layer thickness on the fracture behavior of adhesively bonded joints. Int J Adhes Adhes, 2011, 31(8): 840–850
19 Ji G F, Ouyang Z Y, Li G Q, et al. Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints. Int J Solids Struct, 2010, 47(18-19): 2445–2458
20 Lee D B, Ikeda T, Miyazaki N, et al. Effect of bond thickness on fracture toughness of adhesive joints. J Eng Mat Tech-T ASME, 2004, 126(1): 14–18
21 Ikeda T, Yamashita A, Lee D, et al. Failure of a ductile adhesive layer constrained by hard adherends. J Eng Mat Tech-T ASME, 2000, 122(1): 80–85
22 Carlberger T, Stigh U. Influence of layer thickness on cohesive properties of an epoxy-based adhesive—An experimental study. J Adhes, 2010, 86(8): 814–833
23 Choupani N. Interfacial mixed-mode fracture characterization of adhesively bonded joints. Int J Adhes Adhes, 2008, 28(6): 267–282
24 Choupani N. Mixed-mode cohesive fracture of adhesive joints: Experimental and numerical studies. Eng Fracture Mech, 2008, 75(15): 4363–4382
25 Madhusudhana K S, Narasimhan R. Experimental and numerical investigations of mixed mode crack growth resistance of a ductile adhesive joint. Eng Fracture Mech, 2002, 69(7): 865–883
26 Wei Y, Zhao H F. Peeling experiments of ductile thin films along ceramic substrates - Critical assessment of analytical models. Int J Solids Struct, 2008, 45(13): 3779–3792
27 Mattos H S D, Monteiro A H, Palazzetti R. Failure analysis of adhesively bonded joints in composite materials. Mat Design, 2012, 33: 242–247
28 Song M G, Kweon J H, Choi J H, et al. Effect of manufacturing methods on the shear strength of composite single-lap bonded joints. Compos Struct, 2010, 92(9): 2194–2202
29 Totry E, Molina-Aldareguia J M, Gonzalez C, et al. Effect of fiber, matrix and interface properties on the in-plane shear deformation of carbon-fiber reinforced composites. Compos Sci Technol, 2010, 70(6): 970–980
30 Kim K S, Yi Y M, Cho G R, et al. Failure prediction and strength improvement of uni-directional composite single lap bonded joints. Compos Struct, 2008, 82(4): 513–520
31 Tsai M Y, Morton J. An investigation into the stresses in double-lap adhesive joints with laminated composite adherends. Int J Solids Struct, 2010, 47(24): 3317–3325
32 Sorensen B F, Goutianos S, Jacobsen T K. Strength scaling of adhesive joints in polymer-matrix composites. Int J Solids Struct, 2009, 46(3-4): 741–761
33 Yu X X, Crocombe A D, Richardson G. Material modelling for rate-dependent adhesives. Int J Adhes Adhes, 2001, 21(3): 197–210

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

34 Sun C, Thouless M D, Waas A M, et al. Rate effects for mixed-mode fracture of plastically-deforming, adhesively-bonded structures. Int J Adhes Adhes, 2009, 29(4): 434–443
35 Banea M D, Silva L F M. Mechanical characterization of flexible adhesives. J Adhes, 2009, 85(4-5): 261–285
36 Blackman B R K, Kinloch A J, Rodriguez-Sanchez F S, et al. The fracture behaviour of adhesively-bonded composite joints: Effects of rate of test and mode of loading. Int J Solids Struct, 2012, 49(13): 1434–1452
37 Zgoul M, Crocombe A D. Numerical modelling of lap joints bonded with a rate-dependent adhesive. Int J Adhes Adhes, 2004, 24(4): 355–366
38 Goland M, Reissner E. The stresses in cemented joints. J Appl Mech, 1944, 66(11): A17–A27
39 Zhao X, Adams R D, da Silva L F M. A new method for the determination of bending moments in single lap joints. Int J Adhes Adhes, 2010, 30(2): 63–71
40 Tong L. Bond strength for adhesive-bonded single-lap joints. Acta Mechanica, 1996, 117(1-4): 101–113
41 Luo Q T, Tong L Y. Analytical solutions for nonlinear analysis of composite single-lap adhesive joints. Int J Adhes Adhes, 2009, 29(2): 144–154
42 da Silva L F M, das Neves P C, Adams R D, et al. Analytical models of adhesively bonded joints-Part II: Comparative study. Int J Adhes Adhes, 2009, 29(3): 331–341
43 da Silva L F M, das Neves P J C, Adams R D, et al. Analytical models of adhesively bonded joints-Part I: Literature survey. Int J Adhes Adhes, 2009, 29(3): 319–330
44 Rudawska A. Adhesive joint strength of hybrid assemblies: Titanium sheet-composites and aluminium sheet-composites—Experimental and numerical verification. Int J Adhes Adhes, 2010, 30(7): 574–582
45 You M, Li Z, Zheng X L, et al. A numerical and experimental study of preformed angle in the lap zone on adhesively bonded steel single lap joint. Int J Adhes Adhes, 2009, 29(3): 280–285
46 You M, Yan Z M, Zheng X L, et al. A numerical and experimental study of gap length on adhesively bonded aluminum double-lap joint. Int J Adhes Adhes, 2007, 27(8): 696–702
47 You M, Yan Z M, Zheng X L, et al. A numerical and experimental study of adhesively bonded aluminium single lap joints with an inner chamfer on the adherends. Int J Adhes Adhes, 2008, 28(1-2): 71–76
48 Stigh U, Alfredsson K S, Andersson T, et al. Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers. Int J Fracture, 2010, 165(2): 149–162
49 Hogberg J L. Mixed mode cohesive law. Int J Fracture, 2006, 141(3-4): 549–559
50 Hui C Y, Ruina A, Long R, et al. Cohesive zone models and fracture. J Adhes, 2011, 87(1): 1–52
51 Chandra N, Li H, Shet C, et al. Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces. Int J Solids Struct, 2002, 39(10): 2827–2855
52 Anyfantis K N, Tsouvalis N G. A novel traction-separation law for the prediction of the mixed mode response of ductile adhesive joints. Int J Solids Struct, 2012, 49(1): 213–226
53 Park K, Paulino G H, Roesler J R. A unified potential-based cohesive model of mixed-mode fracture. J Mech Phys Solids, 2009, 57(6): 891–908
54 Xu X P, Needleman A. Void Nucleation by inclusion debonding in a crystal matrix. Model Simul Mater Sc, 1993, 1(2): 111–132
55 Tvergaard V, Hutchinson J W. The relation between crack-growth resistance and fracture process parameters in elastic plastic solids. J Mech Phys Solids, 1992, 40(6): 1377–1397
56 Xu W, Wei Y. Strength analysis of metallic bonded joints containing defects. Comp Mater Sci, 2012, 53(1): 444–450
57 Camanho P P, Davila C G, de Moura M F. Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials. J Compos Mater, 2003, 37(16): 1415–1438
58 Freund L B, Suresh S. Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution. Cambridge: Cambridge University Press, 2003
59 Alfredsson K S, Högberg J L. Energy release rate and mode-mixity of adhesive joint specimens. Int J Fracture, 2007, 144(4): 267–283
60 de Moura M F S F, Campilho R D S G, Goncalves J P M. Mixed-mode cohesive damage model applied to the simulation of the mechanical behaviour of laminated composite adhesive joints. J Adhes Sci Technol, 2009, 23(10-11): 1477–1491
61 de Moura M F S F, Goncalves J P M, Chousal J A G, et al. Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints. Int J Adhes Adhes, 2008, 28(8): 419–426
62 Campilho R D S G, Banea M D, Neto J A B P, et al. Modelling of single-lap joints using cohesive zone models: Effect of the cohesive parameters on the output of the simulations. J Adhes, 2012, 88(4-6): 513–533
63 Pardoen T, Ferracin T, Landis C M, et al. Constraint effects in adhesive joint fracture. J Mech Phys Solids, 2005, 53(9): 1951–1983
64 Martiny P, Lani F, Kinloch A J, et al. A multiscale parametric study of mode I fracture in metal-to-metal low-toughness adhesive joints. Int J Fracture, 2012, 173(2): 105–133

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

65 Panigrahi S K. Damage analyses of adhesively bonded single lap joints due to delaminated FRP composite adherends. Appl Compos Mater, 2009, 16(4): 211–223
66 Bogy D B. Two edge-bonded elastic wedges of different materials and wedge angles under surface tractions. J Appl Mech, 1971, 38(2): 377–386
67 Wang C H, Rose L R F. Compact solutions for the corner singularity in bonded lap joints. Int J Adhes Adhes, 2000, 20(2): 145–154
68 Goglio L, Rossetto M. Stress intensity factor in bonded joints: Influence of the geometry. Int J Adhes Adhes, 2010, 30(5): 313–321
69 Goglio L, Rossetto M, Dragoni E. Design of adhesive joints based on peak elastic stresses. Int J Adhes Adhes, 2008, 28(8): 427–435
70 Goglio L, Rossetto M. Evaluation of the singular stresses in adhesive joints. J Adhes Sci Technol, 2009, 23(10-11): 1441–1457
71 Cognard J Y, Devaux H, Sohier L. Numerical analysis and optimisation of cylindrical adhesive joints under tensile loads. Int J Adhes Adhes, 2010, 30(8): 706–719
72 Cognard J Y. Numerical analysis of edge effects in adhesively-bonded assemblies application to the determination of the adhesive behaviour. Comput Struct, 2008, 86(17-18): 1704–1717
73 Cognard J Y, Creac'hcadec R, Maurice J. Numerical analysis of the stress distribution in single-lap shear tests under elastic assumption-Application to the optimisation of the mechanical behaviour. Int J Adhes Adhes, 2011, 31(7): 715–724
74 Ioka S, Masuda K, Kubo S. Singular stress field near the edge of interface of bonded dissimilar materials with an interlayer. Int J Solids Struct, 2007, 44(18-19): 6232–6238
75 Mubashar A, Ashcroft I A, Critchlow G W, et al. Strength prediction of adhesive joints after cyclic moisture conditioning using a cohesive zone model. Eng Fract Mech, 2011, 78(16): 2746–2760
76 Crocombe A D, Hua Y X, Loh W K, et al. Predicting the residual strength for environmentally degraded adhesive lap joints. Int J Adhes Adhes, 2006, 26(5): 325–336
77 Apalak M K, Gunes R, Eroglu S. Thermal residual stresses in an adhesively bonded functionally graded tubular single lap joint. Int J Adhes Adhes, 2007, 27(1): 26–48
78 Banea M D, da Silva L F M, Campilho R D S G. Mode I fracture toughness of adhesively bonded joints as a function of temperature: Experimental and numerical study. Int J Adhes Adhes, 2011, 31(5): 273–279
79 Ashcroft I, Wahab M, Crocombe A, et al. The effect of environment on the fatigue of bonded composite joints. Part 1: Testing and fractography. Compos Part A-Appl S, 2001, 32(1): 45–58
80 Belingardi G, Martella P, Peroni L. Fatigue analysis of honeycomb-composite sandwich beams. Compos Part A-Appl S, 2007, 38(4): 1183–1191
81 da Silva L F M, Ochsner A. Modeling of Adhesively Bonded Joints. Berlin: Springer Verlag, 2008
82 Kumar S, Pandey P C. Fatigue life prediction of adhesively bonded single lap joints. Int J Adhes Adhes, 2011, 31(1): 43–47
83 Khoramishad H, Crocombe A D, Katnam K B, et al. Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model. Int J Fatigue, 2010, 32(7): 1146–1158
84 Khoramishad H, Crocombe A D, Katnam K B, et al. A generalised damage model for constant amplitude fatigue loading of adhesively bonded joints. Int J Adhes Adhes, 2010, 30(6): 513–521
85 Khoramishad H, Crocombe A D, Katnam K B, et al. Fatigue damage modelling of adhesively bonded joints under variable amplitude loading using a cohesive zone model. Eng Fract Mech, 2011, 78(18): 3212–3225
86 Goglio L, Rossetto M. Impact rupture of structural adhesive joints under different stress combinations. Int J Impact Eng, 2008, 35(7): 635–643
87 Belingardi G, Goglio L, Rossetto M. Impact behaviour of bonded built-up beams: experimental results. Int J Adhes Adhes, 2005, 25(2): 173–180
88 Adamvalli M, Parameswaran V. Dynamic strength of adhesive single lap joints at high temperature. Int J Adhes Adhes, 2008, 28(6): 321–327
89 Adams R, Harris J. A critical assessment of the block impact test for measuring the impact strength of adhesive bonds. Int J Adhes Adhes, 1996, 16(2): 61–71
90 Sawa T, Suzuki Y, Kido S. Stress analysis and strength estimation of butt adhesive joints of dissimilar hollow cylinders under impact tensile loadings. J Adhes Sci Technol, 2003, 17(7): 943–965
91 Castanié B, Bouvet C, Aminanda Y, et al. Modelling of low-energy/low-velocity impact on Nomex honeycomb sandwich structures with metallic skins. Int J Impact Eng, 2008, 35(7): 620–634
92 Tedesco J W, Landis D W. Wave propagation through layered systems. Comput Struct, 1989, 32(3): 625–638
93 李刚, 陈正汉, 谢云. 分层材料中的波及防冲击波分层材料的设计. 防护工程, 2004, 26(001): 20–23
94 Zaera R, Sanchez-Saez S, Perez-Castellanos J L, et al. Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. Compos Part A-Appl S, 2000, 31(8): 823–833

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

95 Lopez-Puente J, Arias A, Zaera R, et al. The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. Int J Impact Eng, 2005, 32(1-4): 321–336
96 Gupta N, Iqbal M, Sekhon G. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates. Int J Solids Struct, 2007, 44(10): 3411–3439
97 Yungwirth C J, O'Connor J, Zakraysek A, et al. Explorations of hybrid sandwich panel concepts for projectile impact mitigation. J Am Ceram Soc, 2011, 94(S1): S62–S75
98 Khalili S M R, Jafarkarimi M H, Abdollahi M A. Creep analysis of fibre reinforced adhesives in single lap joints-Experimental study. Int J Adhes Adhes, 2009, 29(6): 656–661
99 Su N, Mackie R I. Two-dimensional creep analysis of structural adhesive Joints. Int J Adhes Adhes, 1993, 13(1): 33–40
100 Allen K W, Shanahan M E R. Creep-behavior of structural adhesive joints 1. J Adhes, 1975, 7(3): 161–174
101 Allen K W, Shanahan M E R. Creep-behavior of structural adhesive joints 2. J Adhes, 1976, 8(1): 43–56
102 Feng C W, Keong C W, Hsueh Y P, et al. Modeling of long-term creep behavior of structural epoxy adhesives. Int J Adhes Adhes, 2005, 25(5): 427–436
103 Dean G. Modelling non-linear creep behaviour of an epoxy adhesive. Int J Adhes Adhes, 2007, 27(8): 636–646
104 Kahraman R, Sunar M, Yilbas B. Influence of adhesive thickness and filler content on the mechanical performance of aluminum single-lap joints bonded with aluminum powder filled epoxy adhesive. J Mater Process Tech, 2008, 205(1-3): 183–189
105 Chai H. The effects of bond thickness, rate and temperature on the deformation and fracture of structural adhesives under shear loading. Int J Fracture, 2004, 130(1): 497–515
106 Azari S, Papini M, Spelt J K. Effect of adhesive thickness on fatigue and fracture of toughened epoxy joints - Part II: Analysis and finite element modeling. Eng Fract Mech, 2011, 78(1): 138–152
107 Azari S, Papini M, Spelt J K. Effect of adhesive thickness on fatigue and fracture of toughened epoxy joints - Part I: Experiments. Eng Fract Mech, 2011, 78(1): 153–162
108 Ji G, Ouyang Z, Li G. On the interfacial constitutive laws of mixed mode fracture with various adhesive thicknesses. Mech Mater, 2012, 47: 24–32
109 Dukes W A, Bryant R W. Effect of adhesive thickness on joint strength. J Adhes, 1969, 1(1): 48–53
110 Park J H, Choi J H, Kweon J H. Evaluating the strengths of thick aluminum-to-aluminum joints with different adhesive lengths and thicknesses. Compos Struct, 2010, 92(9): 2226–2235
111 Naito K, Onta M, Kogo Y. The effect of adhesive thickness on tensile and shear strength of polyimide adhesive. Int J Adhes Adhes, 2012, 36: 77–85
112 Kinloch A J, Shaw S J. The Fracture-Resistance of a Toughened Epoxy Adhesive. J Adhes, 1981, 12(1): 59–77
113 Duan K, Hu X Z, Mai Y W. Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints. J Adhes Sci Technol, 2004, 18(1): 39–53
114 Daghyani H R, Ye L, Mai Y W. Mode-I fracture behaviour of adhesive joints 1. Relationship between fracture energy and bond thickness. J Adhes, 1995, 53(3-4): 149–162
115 Mall S, Ramamurthy G. Effect of bond thickness on fracture and fatigue-strength of adhesively bonded composite joints. Int J Adhes Adhes, 1989, 9(1): 33–37
116 Adnan A, Sun C T. Effect of adhesive thickness on joint strength: A molecular dynamics perspective. J Adhes, 2008, 84(5): 401–420
117 de Moura M F S F, Daniaud R, Magalhaes A G. Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip defects. Int J Adhes Adhes, 2006, 26(6): 464–473
118 Heslehurst R B. Observations in the structural response of adhesive bondline defects. Int J Adhes Adhes, 1999, 19(2-3): 133–154
119 Yang S, Gibson R F, Gu L, et al. Modal parameter evaluation of degraded adhesively bonded composite beams. Compos Struct, 1998, 43(1): 79–91
120 Yang S, Gu L, Gibson R F. Nondestructive detection of weak joints in adhesively bonded composite structures. Compos Struct, 2001, 51(1): 63–71
121 Llopart L, Tserpes K I, Labeas G N. Experimental and numerical investigation of the influence of imperfect bonding on the strength of NCF double-lap shear joints. Compos Struct, 2010, 92(7): 1673–1682
122 Olia M, Rossettos J N. Analysis of adhesively bonded joints with gaps subjected to bending. Int J Solids Struct, 1996, 33(18): 2681–2693
123 Chadegani A, Batra R C. Analysis of adhesive-bonded single-lap joint with an interfacial crack and a void. Int J Adhes Adhes, 2011, 31: 455–465
124 Chow C L, Woo C W. On flaw size and distribution in lap joints. Theor Appl Fract Mec, 1985, 4(1): 75–82
125 Ribeiro F L, Borges L, d'Almeida J R M. Numerical stress analysis of carbon-fibre-reinforced epoxy composite single-lap joints. Int J Adhes Adhes, 2011, 31(5): 331–337

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net