



国防科技图书出版基金

赵波◎著

Analytical Stress Solutions And Strength Predictions Of Structural Adhesive Joints

胶接接头强度解析分析



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

胶接接头强度解析分析

**Analytical Stress Solutions and Strength Predictions
of Structural Adhesive Joints**

赵 波 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

胶接接头强度解析分析 / 赵波著. —北京:国防工业出版社, 2012. 8

ISBN 978 - 7 - 118 - 08527 - 3

I. ①胶... II. ①赵... III. ①胶接 - 接头 - 应力强度 - 研究 IV. ①TG494

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 284628 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17½ 字数 313 千字

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 72.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥

出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金
第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

人类社会的发展过程中,工程结构一般代表着生产力的水平,而所采用的结构连接技术则处于关键地位。据统计,连接接头失效占结构失效总数的 70%,因为结构所承载荷主要通过连接部位传递,连接处易形成应力集中。飞机机体疲劳裂纹的 80% 发生在连接孔处,充分说明连接技术对飞机寿命的重要影响。现代飞机和汽车车身等结构越来越多地采用塑料和复合材料等轻质材料,机械联接和点焊等方式不能很好地满足这些新型材料的连接要求。研究表明,对不需拆卸的复合材料——金属结构,胶接是最优的连接选择。与点焊、机械联接的点连接不同,胶接是连续性连接,具有承载面积大、应力分布均匀、比强度和比刚度、可实现异种材料连接、抗腐蚀和疲劳性能好、吸能性能优良、防振降噪性能好、制造和维修成本低等优点,不仅能显著提高连接效率,还可增加接头刚度,降低机械联接和点焊连接导致的应力集中,刚度性能提高后,原来厚度大的被粘物可以变薄,从而实现结构轻量化。

随着结构轻量化的迫切需求和复合材料的广泛应用,胶接已成为一种重要的部件连接方式,胶接接头广泛出现在航空、航天、舰船、汽车及机车车辆,尤其在军用飞机、宇宙飞船、导弹火箭和军用车辆等武器系统结构中。2008 年,经国务院批准成立的中国商业飞机有限责任公司,标志着中国建造自己的“大飞机计划”正式进入启动阶段。其中,轻量化设计和制造是大飞机必须解决的关键技术,金属胶接、蜂窝夹层胶接及金属复合层板胶接结构在大飞机上的应用前途宽广。目前,胶接技术已成为国外航空、航天和车辆等领域的研究热点。

胶接技术随着人类生产劳动的开始而产生,并随着科学技术的进步而发展。中国是人类文明史上使用天然胶粘剂最早的国家之一,大量证据表明:中华民族的祖先在五千多年前就会用粘土、淀粉和松香等天然产物制造胶粘剂。胶接开始仅用于密封防锈等功能,对强度等性能并无特殊要求,人们对胶接的承载性能认识也不够深入。随着结构对连接要求的日益苛刻和新型胶粘剂性能的日益强大,将许多原本是机械接合部位或点焊改为胶接,以改善力学性能。胶粘剂的使用范围也随之扩大,胶粘剂在第二次世界大战中已用于战斗机主翼等结构件的连接。随后,合成胶粘剂的研究和应用取得了令人瞩目的进展,胶接科学与技术作为一个新独立的边缘学科成长起来。复合材料主要采用胶接技术成型,其应用范围的日趋扩大,推动着胶接科学与技术向纵深方向发展。然而,胶接接头与

焊接接头等相比,仍存在着强度较低、连接质量和力学性能不稳定等诸多问题,这些问题限制了胶接的应用,反过来又推动了相应的研究工作取得进展。近年来在医学领域,胶粘剂用来制作人工关节,代替肠衣线粘合皮肤和血管,甚至能缝合心脏和肺等重要器官。壁虎能在光滑墙壁上自如攀爬令人惊叹,近年来对它掌部的刚毛与墙壁之间附着力方面的研究成果仍建立在胶接理论的最基本原理之上,依据该原理,人们正在研发由碳纳米管制备的“蜘蛛衣”,最近 MIT 的科学家甚至据此开发出能在潮湿表面上包扎内脏伤口的速溶绷带。

当代任何一种先进飞机的设计和制造几乎都离不开胶接技术。20 世纪 50 年代前后,随着环氧胶的问世,胶接相继在 F-102、F-106、B-58 和 F-4 等战斗机上得到较大面积的应用。70 年代,美国空军进行了主承力结构胶接技术计划(PABST)试验,证明飞机机体主承力结构上采用胶接技术完全可行;依据该计划,美国空军对 F-111、F-15 战机均采用这种先进胶接体系;PABST 计划彻底解决了胶接结构的耐腐蚀问题,飞机耐久性由原来的 2 年~7 年提高到 20 年以上。美国研制的 B-58 轰炸机,蜂窝夹层胶接结构占机体表面积的 85%,比铆接结构减重 30%。空中客车公司最新研制的 A380 大型客机大量采用层板胶接结构,比采用铝合金板的结构减重 800kg。80 年代,波音 767 等客机也都采用大量钣金胶接结构,波音飞机机体上由胶粘剂连接的结构件一般超过 60%;被称为“梦幻”航班的波音 787 型客机,一半左右的机体结构件都用又轻又坚固的碳纤维增复合材料胶接而成,机身共减少 1500 块铝合金片及 4 万~5 万颗铆钉,飞机重量大为减轻,与相同大小的客机相比,波音 787 型客机执行相同飞行任务的耗油量能减少约 20%。据统计,航天飞行器每减轻 1kg 质量,可增加射程 60km,可节约成本 3 万美元。

胶接在航天飞机、宇宙飞船、人造卫星和导弹火箭等结构上也有很广泛的应用。某航天飞机的机翼前缘、副翼、襟翼、方向舵等部位一般都采用复合材料胶接结构,比使用铝合金材料减轻了 26%。美国土星 S-II 二级运载火箭选用了 52 种航空胶粘剂。导弹天线罩和金属舱体、整流罩和导弹天线等,这些非金属材料与金属材料的连接一般也常选择胶接连接。此外,胶接还是飞机和导弹结构常采用的裂纹修补技术。

加拿大铝业集团研究发现,同点焊相比,胶接能使汽车零部件扭转刚度最高增加 40%;用铝代替钢,用胶焊代替点焊,可使汽车减重 50%~55%。统计表明,每使用 1kg 胶粘剂可使车辆减重 20kg~25kg,而汽车重量每降低 10%,燃油经济性可提高 6%~8%。目前,美国、日本、英国等国已出现全胶焊连接的节能型轿车。

胶接接头基本力学性能分析、评定及其影响因素研究一直是胶接科学与技术领域的重要内容,目前的研究主要集中在胶接接头基本力学性能方面,包括强度、刚度、疲劳和失效等性能。胶接接头的设计要考虑接头各部件的几何尺寸、

材料选择、承载条件、应力应变分布、强度分析和失效模式,甚至包括温度、湿度和时间等复杂效应。虽然有限元分析已得到广泛应用,但解析分析方法一直得到人们的关注,而且更便于指导实际工程设计。因此,分析胶接接头必须具备可靠而有效的理论工具,以快速获得接头应力(应变)和刚度(位移)的分布规律,为胶接接头在初始设计阶段和最终强度评价提供理论依据和设计准则,为进一步应用于更复杂的部件奠定基础。

和国外七十多年胶接接头力学解析研究的历史相比,我国相关研究工作起步相对较晚,目前,国内尚未发现关于胶接结构工程力学方面的系统理论专著。本书目的是加强国内胶接接头力学理论分析基础和有益尝试,促进胶接技术在航空、航天、舰船、汽车和高速列车等结构主承力件中的工程应用,这里并不准备详细阐述以往的力学解析模型(具体可参见 Adams 教授和 Wake 爵士著作 *Structural adhesive joints in engineering*),而是在总结借鉴前人工作基础上,重点介绍著者近年来发展的力学解析模型和一些理论成果,期望读者从中有所启发和收益。

本书的特色在于采用解析方法分析较复杂的工程问题,所发展的所有线性和非线性解析模型均获得了显式解析解,不但预测精度较高,而且适用范围较广,便于指导胶接接头等构件的强度分析和工程设计。取得的主要研究进展有:①建立了单搭接接头应力的一维非线性分析模型,该模型考虑了搭接区转动引起的几何非线性特征和胶层材料的弹塑性因素,获得了胶层应力的显式解析解。②提出了单搭接接头应力分析的较完善的二维线性分析模型,获得了整个搭接区应力的显式解析解,为脆性胶接接头的强度预测和初始设计提供了有效的分析方法。③发展了多模量胶接接头应力和刚度的一维线性解析模型,获得了不同模量胶层的应力和接头拉伸刚度的显式解析解。④以位移解析解为基础,得到了三种胶接接头简化有限元单元刚度矩阵,提高了有限元软件的计算效率和求解精度。

全书内容以著者清华大学工学博士论文《胶接单搭接接头应力的二维线性和一维非线性解析分析》为主体,在此基础上增加了“第4章 平衡接头应力的二维线性分析:变分方法”、“第10章 位移解析解在三种胶接接头单元中的运用”、“3.3节 搭接区端头载荷和考虑总体平衡关系的弯矩因子”、“8.3节 基于A-P解的多模量剪切模型——第一解析法”等章节。无论博士论文内容,还是新增章节,其主要成果在国、内外学术期刊都发表过,并得到相关领域专家、学者的指导和指正。

本书具有“新”、“信”、“多”三个特点:“新”指主要内容均为作者近年来最新发展的研究成果,参考文献和述评涵盖目前最新的研究进展;“信”指每章结论力求用多种方法加以验证,全书的主要内容大部分都有相应学术论文发表;“多”则指理论推导公式多、图表多。本书适用于从事胶接设计的工程师、从事

构件连接工作的工程技术人员,也可供高校与科研院所从事航空、航天、汽车、高速列车、建筑、机械、材料和林业等相关专业领域的教师、研究生与科研人员参考。

本书的问世首先感谢清华大学吕振华教授的悉心指导和热情帮助。感谢中国航天科工集团于本水院士、中国科学院崔俊芝院士对全书进行评阅和提出的宝贵意见。感谢中国航天科技集团崔尔杰院士对全书的主审和肯定。哈尔滨工业大学杜善义院士,清华大学姚振汉教授、候之超教授,北京工业大学史耀武教授,北京理工大学项昌乐教授、李晓雷教授,中国航天科工集团二院朱瑾研究员、张金海研究员,三峡大学游敏教授等审阅了全部或大部分书稿,在此一并致谢。在本书撰写过程中,还得到前英国胶接学会主席、牛津大学 Adams 教授,清华大学赵海燕副教授、中国船级社吕毅宁博士的建议、指导和帮助。感谢北京市天山新材料技术公司翟海潮教授和北京粘接学会王建军秘书长对本书实验部分的支持。最后,承蒙国防科技图书出版基金的资助、国防工业出版社的帮助和评审委员会专家的评议,谨致谢忱。特殊鸣谢王鑫编辑在本书出版过程中的努力和付出。

本书涉及领域较宽,著者研究方向则相对较窄,限于学术水平,难免有不当之处,衷心期望能得到读者的批评指正。

著 者
2012 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 胶接技术概述	1
1.2 胶接在航空航天承载结构中的应用	2
1.3 胶接在汽车承载结构中的应用	4
1.4 胶接接头简介	10
部分专业术语	13
第 2 章 国内外研究进展述评	16
2.1 应力解析模型	17
2.1.1 一维杆模型	20
2.1.2 一维梁模型	21
2.1.3 准二维模型	25
2.1.4 二维模型	26
2.1.5 非线性模型	27
2.2 胶瘤和几种降低应力集中的途径	29
2.3 多模量胶接技术和刚度模型	30
2.4 胶接有限单元	31
第 3 章 平衡接头应力的二维线性分析:微分方法	34
3.1 引论	34
3.2 二维线性分析模型	35
3.2.1 平衡方程	37
3.2.2 本构方程	38
3.2.3 几何方程和位移函数	38
3.2.4 控制微分方程组	40
3.2.5 边界条件方程	42
3.2.6 截面载荷和二维应力、应变的确定	42
3.3 搭接区端头载荷和考虑总体平衡关系的弯矩因子	44
3.3.1 以往弯矩因子的求解特点	44
3.3.2 考虑总体平衡关系的弯矩因子	45
3.3.3 弯矩因子 k_{GE} 的精度评价	47

3.3.4	弯矩因子 k_{GE} 对经典 G-R 解的改进	50
3.4	解析模型验证和结果分析	52
3.4.1	与 G-R 解、TOM 解对比及数值验证	53
3.4.2	被粘物、胶层截面载荷和二维应力分布	58
3.4.3	被粘物和胶层的应变分布	61
3.5	本章小结	63
第 4 章	平衡接头应力的二维线性分析:变分方法	65
4.1	引论	65
4.2	二维线性分析模型	66
4.2.1	平衡方程、边界条件和搭接区应力表达式	67
4.2.2	基于最小余能原理的变分方法	70
4.2.3	截面载荷函数和二维应力的确定	74
4.3	解析模型验证和结果分析	75
4.3.1	与微分方法获得的二维理论解对比及数值验证	76
4.3.2	被粘物和胶层所受的载荷和应力	77
4.4	本章小结	78
第 5 章	非平衡接头应力的准二维线性分析	80
5.1	引论	80
5.2	应力分析模型和简化设计公式	80
5.2.1	平衡方程	81
5.2.2	本构方程、几何方程和位移函数	82
5.2.3	控制微分方程组	84
5.2.4	边界条件方程	86
5.2.5	待定系数的确定	87
5.2.6	胶层应力的简化设计公式	88
5.2.7	截面载荷和应力、应变的确定	89
5.3	搭接区端头载荷的确定	90
5.4	解析模型验证和结果分析	93
5.4.1	与 B-C 解对比及数值验证	93
5.4.2	被粘物、胶层截面载荷和应力分布	95
5.4.3	被粘物应变分布	98
5.4.4	主要参数的影响分析	98
5.5	本章小结	100
第 6 章	非平衡接头应力的几何非线性分析	102
6.1	引论	102
6.2	全耦合的非线性控制微分方程组	103

6.3	搭接区端头载荷的确定	108
6.3.1	非平衡接头的弯矩因子公式	109
6.3.2	弯矩因子的精度评价	110
6.4	解析模型验证和结果分析	112
6.4.1	模型验证和结果分析	112
6.4.2	几何非线性效应	113
6.5	本章小结	114
第7章	平衡接头应力的几何非线性和材料非线性分析	116
7.1	引论	116
7.2	考虑几何非线性效应的线性硬化弹塑性胶层应力分析	117
7.2.1	平衡方程和边界条件	118
7.2.2	胶层变形协调方程	118
7.2.3	考虑弹塑性胶层情况下的本构方程	120
7.2.4	全耦合的非线性控制微分方程组	121
7.2.5	弹塑性胶层应力的解析表达式	124
7.3	考虑非线性胶层材料本构关系的应力分析	128
7.3.1	用被粘物载荷表示的接头应力表达式	129
7.3.2	非线性胶层材料本构关系的数学描述	132
7.3.3	基于最小余能原理的耦合控制微分方程组	133
7.4	非线性解析模型验证和结果分析	136
7.4.1	考虑几何非线性效应的弹塑性胶层应力结果	137
7.4.2	考虑非线性胶层材料本构关系的应力结果	137
7.5	本章小结	141
第8章	多模量胶接接头应力的一维线性分析	142
8.1	引论	142
8.2	基于 TOM 解的多模量剪切模型——第二解析法	144
8.2.1	基本假设	144
8.2.2	多模量胶层的一维线性分析模型	144
8.2.3	边界条件方程	148
8.3	基于 A-P 解的多模量剪切模型——第一解析法	149
8.4	多模量胶接接头应力的弯曲模型	153
8.4.1	基本假设	153
8.4.2	多模量胶层的一维线性分析模型	153
8.5	解析模型验证和结果分析	160
8.5.1	数值验证	160
8.5.2	第一解析法和第二解析法的精度比较	163

8.5.3	多模量胶层峰值应力的关键参数分析	164
8.6	本章小结	166
第 9 章	多模量胶接头刚度的解析和实验分析	168
9.1	引论	168
9.2	一维线性分析模型	169
9.2.1	基本假设	169
9.2.2	刚度解析模型的建立	169
9.2.3	接头变形和拉伸刚度公式	171
9.3	与 Owens 解析解及其实验结果比较	175
9.4	解析模型数值验证和结果分析	176
9.4.1	数值验证	176
9.4.2	主要参数的影响分析	177
9.5	单搭接胶接接头的拉剪实验	178
9.5.1	试件准备	179
9.5.2	拉剪实验	181
9.5.3	实验结果分析	182
9.6	本章小结	187
第 10 章	位移解析解在三种胶接接头单元中的结合与使用	189
10.1	引论	189
10.2	适于对称 T 形胶接接头的位移理论	191
10.2.1	平衡方程	192
10.2.2	胶层位移函数和几何方程	193
10.2.3	本构方程	193
10.2.4	关于被粘物位移函数的控制微分方程组	194
10.2.5	待定系数的确定	196
10.3	适于三种非对称胶接接头的位移理论	197
10.3.1	平衡方程和边界条件	198
10.3.2	胶层变形协调方程和本构方程	200
10.3.3	关于被粘物位移函数的控制微分方程组	200
10.3.4	求解胶层应力的边界条件	202
10.4	三种胶接接头简化有限元单元及其刚度矩阵	204
10.4.1	简化 T 形接头单元	204
10.4.2	简化 L 形接头单元	205
10.4.3	简化单搭接接头单元	206
10.4.4	单元刚度矩阵元素定义法	207
10.5	特定的位移边界条件	208

10.5.1	简化对称 T 形接头单元	208
10.5.2	简化非对称 T 形接头单元	209
10.5.3	简化非对称 L 形接头单元	210
10.5.4	简化非对称单搭接接头单元	211
10.6	胶接接头单元验证和结果分析	212
10.6.1	三种非对称胶接接头单元	212
10.6.2	与基于两种位移解析解的对称 T 形接头单元的比较	216
10.7	与基于标准单元库的简化有限元模型的比较	219
10.8	本章小结	222
附录 A1	考虑胶层厚度的 G-R 解弯矩因子	224
附录 A2	二维线性分析模型中的系数和符号	226
附录 A3	一维非线性分析模型中的系数	231
附录 A4	多模量胶接接头应力的拉伸模型	236
附录 A5	多模量胶接接头应力解析解系数及特例	238
A5.1	具有七段胶接区的双模量胶接接头应力分析	238
A5.2	多模量弯曲模型解析解特例:单模量胶接接头	240
A5.3	多模量弯曲模型解析解中的系数	240
参考文献		242