

连接结构 分析

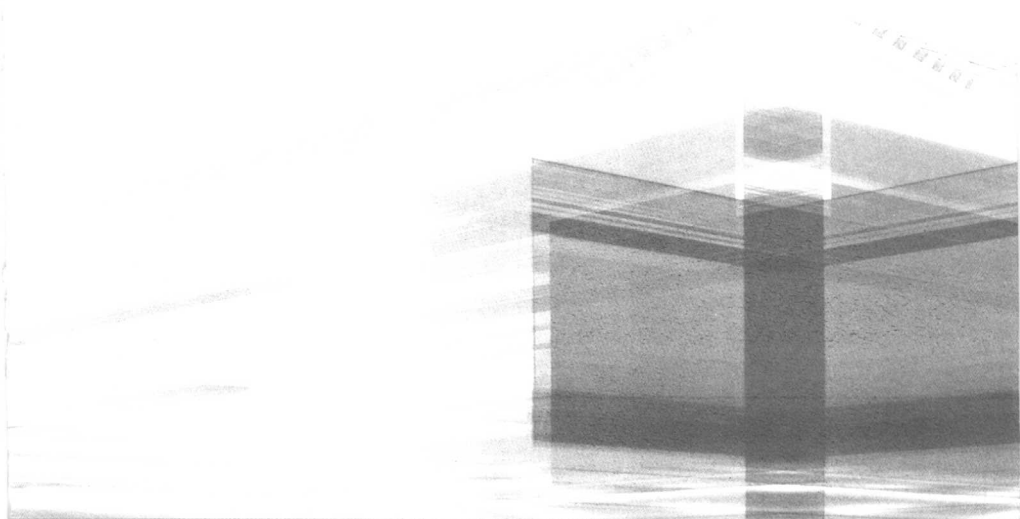
LIANJIE JIEGOU FENXI

■ 游 敏 郑小玲 编著

连接结构分析

LIANJIE JIEGOU FENXI

■ 游 敏 郑小玲 编著



图书在版编目(CIP)数据

连接结构分析/游敏 郑小玲 编著

武汉:华中科技大学出版社,2004年6月

ISBN 7-5609-3180-4

I. 连…

II. ①游… ②郑…

III. 焊接-胶接

IV. TG4

连接结构分析

游敏 郑小玲 编著

责任编辑:徐正达 胡 艳

封面设计:潘 群

责任校对:封春英

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉正佳文化发展有限公司

印 刷:荆州市今印印务有限责任公司

开本:850×1168 1/32 印张:10.625 插页:2 字数:246 000

版次:2004年6月第1版 印次:2004年6月第1次印刷 定价:18.00元

ISBN 7-5609-3180-4/TG·58

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书论述连接结构设计和制造生产的有关问题,重点讨论连接结构残余应力和变形的产生机理及演变过程,焊接和胶接结构特点及其对结构强度和断裂影响的基本理论,工程连接结构(包括焊接结构、复合材料结构等)性能评定及影响因素,微观连接(应用于微电子的连接和封装技术)所涉及的界面应力等几个方面,为连接结构的合理设计、制造和使用提供了理论基础。本书综合了近年来国内外的研究成果,阐明了控制工程连接结构质量的理论、方法与措施。

全书共分8章。第1、第2章论述了焊接应力和变形的基础理论以及胶接界面应力产生的基本过程,第3章讨论了调整和控制焊接、胶接残余应力的工艺措施,第4、第5章介绍了残余应力测试方法和连接接头上的工作应力分布,第6章简介了材料断裂的基本理论和结构的脆性断裂,第7章分析了焊接结构的疲劳,第8章介绍了主要的先进材料连接接头(包括复合材料结构、金属-陶瓷结构、微电子连接与封装)的性能评定和质量控制的措施。

本书可供从事材料连接工作的工程技术人员、科研工作者使用,也可作为高等学校相关专业教师和学生的参考用书。

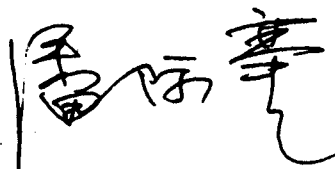
序 言

连接结构是指采用现代连接技术(如焊接、胶接、铆接、螺接等方式)所得到的工程结构。20 世纪初,铆接、螺接结构占主导地位;第二次世界大战之后则形成了以焊接结构为主的格局;20 世纪 40 年代中出现的胶接结构,已从航空航天领域向其他工程领域拓展;近二十年来,连接技术的发展迅猛,尤其是复合材料的连接所占比重非常大。目前使用的连接结构大多采用焊接和胶接技术成形。然而,焊接和胶接接头上普遍存在的成分、组织和力学性能的不均匀所引起的接头性能的不稳定,直接影响和制约了连接结构应用范围的进一步扩大。

游敏等同志所著的《连接结构分析》一书,是目前我国比较系统和深入地论述焊接和胶接结构的一本学术专著。它简明扼要地介绍了焊接和胶接技术的优缺点、残余应力测试方法、连接接头上的工作应力分布和先进材料连接接头的性能评定和质量控制的措施;对连接接头上残余应力的形成机制进行了有益的探讨,在此基础上提出了调控焊接残余应力的减摩法新技术并进行了试验研究;对胶层中内应力和残余应力形成机制的分析也有独到之处,从而为进一步开展连接接头力学行为的理论研究和在生产实践中调控连接接头的内应力、扩大其应用范围提供了理论基础。

该书在综合前人大量的科学实验和工程实践精华的基础上,

着重反映作者及其同事近十年来在该研究领域中所取得的最新成果,具有一定的深度和广度,不仅对该领域的研究工作有重要的参考价值,而且对于从事连接结构应用的同仁来说,也有很强的实际意义。应游敏同志之约,很高兴地为本书作序,希望本书的出版能对促进我国连接结构领域中的研究和发展进一步走向深入有所裨益。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters. The characters appear to be '郭世正' (Guo Shizheng), written in a cursive, flowing style.

2004年2月于清华大学

前 言

随着我国国民经济的持续高速发展,连接结构(这里所指的是借助于结构连接技术方能使材料成形、变为可用的工程结构)的应用日趋广泛。结构连接技术一般包括焊接、胶接、铆接、螺接和榫接,即包括不可拆卸的永久连接接头和可拆卸的连接接头。从工程技术的角度讲,构件的“连接”和“联接”有较大不同,前者包容后者,即连接含不可拆卸接头和可拆卸接头的连接,而后者仅指可拆卸接头。胶接和焊接均为永久连接,一般不用“联接”或“联结”来描述。本书将以借助于焊接和胶接技术制备的金属结构和复合材料结构为主要对象,讨论该领域所涉及的基本理论与工程实践问题。

在人类社会的发展过程中,许多技术领域和工程领域都广泛使用连接结构。如何实现结构的可靠连接?这个问题一直引起人们的普遍关注。随着时代的进步,社会对连接结构的要求愈来愈高。近年来随着科学技术(特别是材料科学与技术)的快速发展,原来主要用于金属材料加工的焊接技术已发展成为面向多种材料进行连接加工的技术,而原来主要用于复合材料连接的胶接技术,其应用范围也在不断扩大。换句话说,“连接”的范围在不断趋于融合。有人认为胶接技术是焊接的一个分支,但迄今为止,规范的定义中认为焊接所实现的是原子结合,而胶接一般处于分子结合水平,故用连接(joining)来包容焊接(welding)和胶接(bonding)较为合理。

连接接头的强度评价和力学行为研究一直是该领域中的重要内容,随着研究工作的不断深入和发展,该领域的理论与技术逐渐完善。本书作者从事连接结构及其相关领域的研究工作多年,在

连接接头承载后的力学模型建立和工作应力分布、接头的失效和破坏过程分析、连接接头中残余应力的形成过程与调控技术、金属胶接接头强度测试方法和技术等方面的研究工作取得了一定的进展,书中的许多内容就是课题组所取得成果的总结。

书中还参考和引用了相关领域不少专家学者的著作和论文,在此表示诚挚的感谢。

本书第1章、第4章、第7章和第8章由游敏教授编写,第2章、第3章、第5章和第6章由郑小玲副教授编写。郑勇教授,陈燕副教授,刘文俊、张露露讲师,魏晓红工程师,硕士研究生余海洲、曹平等参加了与本书部分内容相关课题的研究或为本书的写作提供了帮助。

中国科学院院士、清华大学潘际銮教授为本书写了序言,本书在编写过程中得到了华中科技大学李志远教授、熊惟皓教授及其他同志的帮助与支持,还得到了湖北省教育厅科研计划和三峡大学省级重点建设学科(机械制造及其自动化)建设基金的资助。在此一并表示由衷的感谢。

限于作者水平,书中不足之处在所难免,敬请读者不吝赐教。

作 者

2003年9月

目 录

序言

前言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 焊接结构的特点	(2)
1.1.1 焊接结构的主要优点	(2)
1.1.2 焊接结构的主要缺点	(2)
1.2 胶接结构的特点	(4)
1.2.1 胶接结构的主要优点	(4)
1.2.2 胶接结构的主要缺点	(6)
第 2 章 连接结构残余应力的形成过程	(8)
2.1 内应力	(9)
2.1.1 内应力的定义	(9)
2.1.2 内应力的分类	(9)
2.1.3 内应力的估算	(14)
2.1.4 均匀加热时杆件中的变形与应力	(15)
2.2 焊接残余应力的产生过程分析	(18)
2.2.1 焊接温度场的特点	(18)
2.2.2 分析焊接应力变形的一般假定条件	(19)
2.2.3 焊接纵向应力变形的演变过程	(20)
2.2.4 焊接残余应力的形成机理	(24)
2.2.5 焊接残余应力形成机理的试验探讨	(29)
2.3 胶层中的内应力	(33)
2.3.1 胶接内应力的形成机理	(33)
2.3.2 胶层的粘弹性	(35)

2.4	残余应力对结构性能的影响	(37)
2.4.1	对静载强度的影响	(37)
2.4.2	对疲劳强度的影响	(39)
2.4.3	对结构刚度的影响	(41)
2.4.4	对压杆稳定性的影响	(43)
2.4.5	对机加工精度的影响	(45)
2.4.6	对脆断抗力的影响	(46)
2.4.7	对应力腐蚀的影响	(46)
第3章	焊接应力变形及其调控技术	(47)
3.1	焊接结构的残余变形	(47)
3.1.1	焊接残余变形的基本形式	(47)
3.1.2	焊接残余变形的危害	(50)
3.1.3	对接接头的横向收缩	(50)
3.1.4	T形和搭接接头的横向收缩	(65)
3.1.5	纵向收缩变形	(67)
3.1.6	弯曲变形	(69)
3.1.7	角变形	(71)
3.1.8	扭曲变形和失稳变形	(73)
3.1.9	影响焊接变形的因素	(74)
3.2	焊接残余应力的分布	(78)
3.2.1	纵向应力和横向应力的分布	(78)
3.2.2	厚板中的残余应力	(84)
3.2.3	拘束板中的残余应力	(85)
3.2.4	封闭焊缝所引起的残余应力	(86)
3.2.5	焊接梁的残余应力分布	(87)
3.2.6	相变的影响	(87)
3.3	焊接残余变形的调控与消除	(88)
3.3.1	控制焊接残余变形的措施	(88)
3.3.2	矫正焊接残余变形的办法	(93)

3.4	焊接残余应力调控原理与方法	(96)
3.4.1	调控焊接残余应力的方法	(96)
3.4.2	焊后消除残余应力的方法	(100)
3.4.3	调控和消除残余应力技术的进展	(106)
第4章	焊接变形与残余应力的测定	(114)
4.1	焊接变形的测量	(114)
4.1.1	焊接过程中变形的测量	(114)
4.1.2	焊接残余变形的测量	(116)
4.2	应变释放法测定残余应力	(117)
4.2.1	切条法	(117)
4.2.2	车削法	(120)
4.2.3	小孔释放法	(121)
4.2.4	套孔法	(123)
4.2.5	套取芯棒法	(124)
4.3	无损检测法测定残余应力	(126)
4.3.1	X射线法	(126)
4.3.2	磁性法	(128)
4.3.3	超声波法	(129)
4.3.4	中子衍射法	(130)
4.3.5	云纹法	(131)
4.3.6	脆性涂层法	(131)
4.3.7	压痕法	(132)
4.3.8	硬度法	(133)
4.3.9	反向叠加应力法	(135)
第5章	连接接头	(137)
5.1	焊接接头	(137)
5.1.1	焊缝的基本形式	(137)
5.1.2	弧焊接头的基本形式	(139)
5.1.3	电阻焊接头的基本形式	(142)

5.1.4	铆焊联合接头	(143)
5.1.5	胶焊联合接头	(144)
5.2	焊接接头的力学特性	(144)
5.2.1	焊接接头	(145)
5.2.2	焊接接头力学性能的不均匀性	(145)
5.2.3	应力集中	(154)
5.3	焊接接头的工作应力分布	(155)
5.3.1	电弧焊接头上的工作应力分布	(155)
5.3.2	电阻点焊接头上的工作应力分布	(163)
5.3.3	焊接接头的承载能力	(165)
5.4	胶接接头的工作应力分布	(169)
5.4.1	单搭接头	(170)
5.4.2	对接接头	(171)
5.4.3	受劈裂载荷接头	(172)
5.4.4	受剥离载荷接头	(173)
第6章	焊接结构的脆性断裂	(175)
6.1	结构的脆性断裂	(175)
6.1.1	穿晶断裂与沿晶断裂	(175)
6.1.2	延性断裂与脆性断裂	(176)
6.1.3	延性-脆性断裂转变温度	(187)
6.1.4	平面应力与平面应变状态	(188)
6.1.5	焊接结构的脆断特征	(189)
6.1.6	影响焊接结构断裂模式的主要因素	(191)
6.2	评价材料脆断抗力的方法	(196)
6.2.1	一次冲击试验	(198)
6.2.2	爆炸开裂和落锤试验	(199)
6.3	断裂力学在焊接结构中的应用	(212)
6.3.1	三种裂纹模型	(212)
6.3.2	线弹性断裂力学	(213)

6.3.3	弹塑性断裂力学	(215)
6.4	焊接结构的脆断安全评定	(226)
6.4.1	断裂安全的评定规范	(226)
6.4.2	II W 的缺陷评定标准草案	(228)
6.4.3	CVDA—1984 规范对脆断的评定	(228)
第7章	焊接结构的疲劳	(235)
7.1	疲劳的基本概念	(235)
7.1.1	高周疲劳和低频疲劳	(237)
7.1.2	疲劳极限	(239)
7.1.3	疲劳裂纹的萌生及扩展	(241)
7.2	影响焊接接头疲劳强度的主要因素	(250)
7.2.1	焊接缺陷	(250)
7.2.2	母材和填充金属成分	(256)
7.2.3	残余应力	(257)
7.2.4	焊接结构与接头形式	(260)
7.2.5	应力集中	(261)
7.2.6	平均应力及峰值应力	(263)
7.2.7	金属显微组织	(264)
7.2.8	其他因素	(266)
7.3	提高焊接接头疲劳强度的措施	(269)
7.3.1	合理的焊缝、焊接接头和结构形式	(269)
7.3.2	合理的工艺措施	(270)
7.3.3	预超载	(271)
7.3.4	锤击	(273)
7.3.5	局部加热或压缩	(274)
7.4	焊接结构疲劳裂纹扩展寿命评定	(276)
7.4.1	无限寿命设计和有缺陷结构的安全评定	(276)
7.4.2	疲劳裂纹扩展的估算	(277)

第 8 章 先进材料连接	(281)
8.1 复合材料连接	(281)
8.1.1 复合材料结构件的机械连接	(282)
8.1.2 树脂基复合材料的熔化连接	(285)
8.1.3 金属基复合材料的连接	(289)
8.1.4 碳/碳复合材料的连接	(293)
8.1.5 陶瓷基复合材料的连接	(294)
8.2 陶瓷材料连接	(296)
8.2.1 金属-陶瓷连接	(296)
8.2.2 陶瓷的钎焊	(300)
8.2.3 陶瓷的固相扩散连接	(303)
8.2.4 陶瓷的过渡液相连接	(304)
8.2.5 陶瓷的反应成形连接法	(306)
8.2.6 陶瓷-金属连接接头中的残余应力	(307)
8.3 微电子连接与性能评定	(312)
8.3.1 微电子连接技术	(312)
8.3.2 导电胶的应用	(315)
参考文献	(320)

绪 论

第 1 章

材料是人类物质文明的基础。在人类发展的历史长河中,各主要发展阶段大多与一些用于制备决定生产力水准的生产工具的材料相关联,故一些历史学家将人类社会的发展阶段细分为诸如“石器时代”、“青铜器时代”、“铁器时代”、“钢铁时代”等。即便到了现代,日新月异的科技发展使得人们难以再用单一的材料来标示时代,但也有建立在硅半导体基础上的所谓“计算机时代”、“新材料时代”以及“纳米时代”等说法。进入 21 世纪之后,人们认识到,能源、信息和材料为现代经济发展的三大支柱,没有先进的材料制备技术和连接技术,国民经济不可能实现真正意义上的现代化。

一般将材料划分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料(聚合物)以及由这三种材料中的至少一种所形成的复合材料(如碳/碳复合材料),它们称为材料的“四大家族”。根据其特性和用途,材料可分为以力学性能为主要指标,用来制造受力结构零部件等的结构材料和以特殊物理、化学性能为主要指标,用来制造光、电元器件和绝缘体等的功能材料。所谓“先进材料”,主要是指新型金属结构材料、先进陶瓷材料、先进复合材料和高性能工程塑料,而当构成材料的基本单元的平均尺寸小于 100 nm 时,材料则称为纳米材料。广义上的纳米材料,是指在三维空间内至少有一维的尺度处于纳米范围的材料或由它们作为基本单元构成的材料。

焊接结构和胶接结构同属不可拆卸的永久性连接结构,其应用范围之所以在最近几十年中得到飞速发展,其根本原因是因为它们同其他的连接结构相比具有明显的优点,当然也存在一些缺点或介于优点与缺点之间的特点。

1.1 焊接结构的特点

1.1.1 焊接结构的主要优点

(1) 形式简洁,承载能力高 焊接接头的接头系数被定义为(接头承载力/母材承载力) $\times 100\%$ 。

与多数的机械连接接头相比,焊接接头的接头系数较高。例如一般优质焊接对接接头的接头系数可达 100% ,采用高组配接头(over match joint)时,接头系数可高于 100% ;对机械连接接头而言,其接头系数随螺栓、铆钉直径和间距的变化而变化,但其接头系数始终小于 100% 。

(2) 没有间隙,密封性能好 焊接接头不像机械连接那样会出现间隙,故密封高压容器、潜艇、储罐等结构只有采用焊接结构制造,方能保证其对气密性、水密性等流体密封性方面的要求。

(3) 自重减轻,经济效益高 与机械连接接头相比,焊接接头无需附加连接件,因此,焊接结构的自重减轻,例如,可比铆接结构减轻 $10\%\sim 20\%$ 。对用做运载工具的结构而言,减轻自重所带来的经济效益不言而喻。

(4) 厚度不限,适应能力强 焊接结构中连接件的厚度一般不受限制,可将不同形状、尺寸的构件连接起来,也可实现异种材料的连接,即将不同种类的材料连接起来。在重型、特大结构部件的连接时,目前只能采用焊接技术。

(5) 加工减少,生产效率高 焊接结构中连接件一般不需机械连接中必需的孔、槽加工作业,因此生产周期缩短,成本降低。例如在现代化的造船厂中生产一艘 20万t 级的油轮,采用焊接技术假如可以在3个月内下水的话,采用铆接技术则至少需要1年时间。

1.1.2 焊接结构的主要缺点

尽管焊接结构与机械连接结构相比有上述优点,然而焊接结

构也因其其在加工过程中的特有因素而存在一些缺点。如果不能正确认识这些缺点,就可能导致相当严重的事故发生。焊接结构的主要缺点如下。

(1) **结构止裂能力较弱** 与铆接、螺纹连接等机械连接形成的结构相比,焊接结构所特有的整体性和高刚度使其自身的止裂性能差。也就是说,焊接结构在服役中,裂纹若一旦在接头上形成并开始扩展,就将继续扩展下去并很难被止住,结构的断裂几乎无法避免。因而在一些重要的结构中,常常用机械连接接头作为止裂件。

(2) **焊接残余应力显著** 在形成焊接接头的过程中,由于局部高温加热会引起较复杂的瞬态热应力和热变形,最后导致焊接结构中存在显著的焊接残余应力和变形。有时存在于焊缝、近缝区的残余拉应力值竟高达材料的屈服强度值。焊接残余应力的存在,对焊接结构承受静载的能力、刚度、抗脆断性能、抗疲劳性能、耐腐蚀性能,对压杆稳定性以及结构的尺寸稳定性均有显著的影响。

(3) **焊接导致缺陷增加** 在形成焊接接头的过程中,在熔池内经历了冶金过程。若气体、焊渣进入焊缝中就会出现气孔、夹渣缺陷;焊炬的偏吹可能引起近缝区产生咬边缺陷;而且,近缝区内受到较大温差所引起的热循环作用,会导致接头上出现化学成分、金相组织的不均匀,因而接头上存在力学性能的不均匀。一般金属的热强度大大低于常温强度,故在熔合区内很可能有微裂纹产生。由于存在显著的焊接残余应力和变形,且接头上会出现一定程度的应力集中现象,故焊接结构中还可能存在几何、力学上的不均匀。

(4) **受材料焊接性限制** 各种材料的焊接性之间存在很大的差异,部分材料几乎难以焊接成形。例如一些高强度钢在焊接中极易出现焊接裂纹,且有较高的缺口敏感性。因此,在进行异种材料的连接时,一般要进行工艺试验。