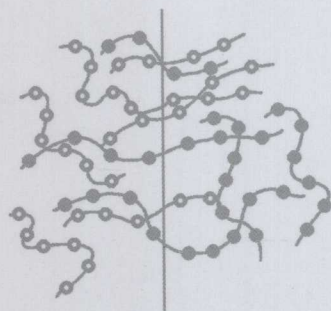
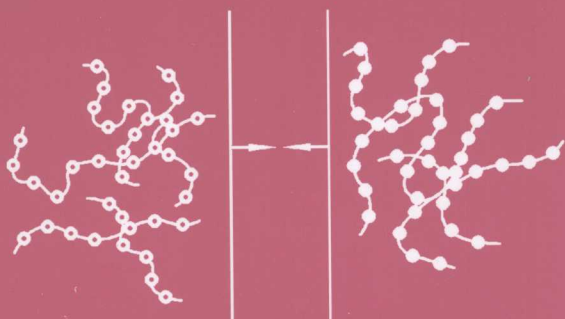


“十一五”国家重点图书出版规划项目

胶接强度分析 及应用

Structural Adhesive Bonding
Strength, Analysis and Application

游敏 郑小玲 © 编著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

“十一五”国家重点图书出版规划项目

胶接强度分析 及应用

游敏 郑小玲 © 编著

华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国 · 武汉

图书在版编目(CIP)数据

胶接强度分析及应用/游 敏 郑小玲 编著. —武汉: 华中科技大学出版社, 2009 年 4 月

ISBN 978-7-5609-5181-2

I. 胶… II. ①游… ②郑… III. 工程材料-胶接-成型
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 028064 号

胶接强度分析及应用

游 敏 郑小玲 编著

责任编辑:徐正达

封面设计:潘 群

责任校对:张 琳

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:880mm×1230mm 1/32

印张:11 插页:1

字数:300 000

版次:2009 年 4 月第 1 版

印次:2009 年 4 月第 1 次印刷

定价:28.00 元

ISBN 978-7-5609-5181-2/TB·111

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书对工程胶接(包括金属、复合材料、木材等胶接)在设计、生产和使用等领域所涉及的结构、接头力学性能和工作应力分布等方面作了较全面的论述,为胶接结构的合理设计、制造和使用提供了理论成果和实践经验。本书主要介绍典型胶接接头上应力分布和分析、有限元的模拟计算、影响胶接强度的主要因素、接头应力分布的调整和优化、胶接技术的应用与发展趋势等。

全书共分 8 章:第 1 章简介了胶接的理论基础;第 2 章论述了胶接结构的强度和应力分析的基础理论和方法,并对其无损检测和有限元分析作了介绍;第 3 章讨论了影响胶接强度的一些主要因素及其作用;第 4 章对胶接接头上的工作应力分布作了数值分析,提供了调整应力分布、提高接头强度的思路与措施;第 5 章介绍了胶接结构的应用环境和服役条件对接头性能的要求;第 6 章阐述了一般胶接结构中的铝合金和钢等金属材料、复合材料、木材等材料的胶接特点;第 7 章和第 8 章分别介绍了胶接在运载工具结构(汽车、飞机和船舶)和电子工业中的应用与发展趋势。

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,可作为高等学校相关专业教师和本科学生的参考书,也可作为研究生的教材。

序 言

胶接是一门交叉学科,它涉及力学、高分子化学、材料学、微电子学、固体物理学、声学、热学、电磁学、信息科学及环境科学等多方面内容。胶接又是一门古老而又年轻的技术,在 20 世纪 40 年代战斗机胶接主翼出现以前,古老的胶接技术已持续使用了数千年。复合材料主要采用胶接技术成形,其应用范围的日趋扩大,推动着胶接科学与技术向纵深发展。然而,胶接接头与焊接等接头相比,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。

三峡大学游敏教授和郑小玲教授所著《胶接强度分析及应用》一书,是目前我国比较系统和全面地论述结构胶接及相关问题的一本学术专著,其中有相当多的内容还涉及微电子连接领域。它介绍了胶接的理论基础、胶接强度及其影响因素、接头性能评定、应力分布和改善及质量控制等内容,所提出的断续胶层连接方法和采取的单搭接接头的几何形状优化措施及分析也有独到之处,为胶接接头力学行为的深入研究和胶接技术的广泛应用提供了理论成果和实践经验。

《胶接强度分析及应用》一书包容面广,信息量大,汇集了该领域的最新研究成果,包括了作者和他们的同事、学生十多年来在该领域中所取得的部分研究成果,有重要的参考价值。五年前曾应游敏同志之约,为《连接结构分析》一书作序,现在很高兴地再为这本书写几句话,希望其出版发行能对我国胶接科学与技术领域的进一步发展添砖加瓦。



2009 年 1 月于清华园

前 言

早在数千年以前,人类就学会从自然界获取天然胶粘剂,完成了一些至今让我们感到不可思议的杰作。中国是人类文明史上使用天然胶粘剂最早的国家之一,《周易参同契》、《天工开物》等文献上均有对胶粘剂制造和使用过程的记载。一些出土文物表明,华夏祖先五千年前就会用粘土、淀粉和松香等天然产物制造胶粘剂,四千多年前就会用生漆作器具的胶粘剂和涂料,三千年前的周朝就会用动物胶作木船的填缝密封胶。壁虎的飞檐走壁令人惊叹,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,人们正在研发由纳米碳管制备的“蜘蛛衣”。

现代胶接是一门发展速度惊人的科学和技术的分支,对我们来说它并不陌生:从日常生活用品(衣物、鞋子、玩具等)到家居环境(家具、装饰),从体育用品(乒乓球拍)到人造卫星,从电子设备(电脑、手机使用的芯片多为导电胶封装)到交通工具(汽车、轮船和飞机等),胶接无处不在;胶粘剂甚至已进入医学领域,用来制作人工关节,代替肠衣线粘合血管和皮肤。

20世纪40年代初期金属胶接结构的出现,使古老的胶接技术进入了一个崭新的时代,胶接科学与技术也作为一个新的边缘学科独立地生长起来,并取得了令人瞩目的成绩,在建筑、机械、电子、航天、轻纺及医学等领域均占有十分重要的地位。

胶接接头的性能评定和影响因素研究一直是本领域中的重要内容,随着研究工作的不断深入和发展,人们对它的认识逐渐完善。笔者从事胶接结构力学行为及其相关领域的研究工作长达十多年,对胶接接头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、接头中应力分布改善与调节技术、金属胶接接头强度测试方法和技术等方面的研究取得了一定的进展,书中的许多内容就是笔者及其课研团队所取得的部分成果的总结。

英国胶接学会前主席、Bristol 大学机械系教授 R. D. Adams 为本书的撰写提供了指导与帮助,本书中还参考和引用了相关领域众多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 3 章、第 5 章以及第 4 章的部分内容由游敏编写(4.2、4.3 和 4.6 节的部分内容由严沾谋编写),第 2 章、第 6 章、第 7 章和第 8 章由郑小玲编写,全书由游敏统稿。郑勇教授,魏晓红高级实验师,张明松副教授,刘文俊、张露露讲师,严沾谋、余海洲、孔凡荣、孙德新、徐喻琼、张晶晶、刘刚、曹平、毛玉平、杨春梅、杨德容、龚正朋、李智、余珊等硕士,晏嘉陵、何爱萍、赵美蓉、朱定峰、罗威等硕士研究生,孔德状、蒲令、胡文进等本科学学生参加了与本书部分内容相关课题的研究或为本书的撰写提供了帮助。

中国科学院院士、清华大学潘际銮教授为本书写了序言,在撰写本书过程中得到了华中科技大学李志远教授、陈立亮教授、熊惟皓教授以及其他老师的帮助与热情鼓励,本书的出版还得到了湖北省教育厅科研计划项目、三峡大学博士点学科(机械设计及理论)建设基金的资助,在此一并表示感谢。

限于作者的知识与水平,书中不足之处在所难免,敬请读者提出批评和建议。

作 者

2009 年 1 月

目 录

第 1 章 胶接理论基础	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 胶接理论及固体表面特征	(3)
1.3 胶接热力学	(9)
1.4 表面处理	(12)
第 2 章 胶接强度与应力分析	(23)
2.1 接头的破坏形式	(23)
2.2 接头的静载强度	(25)
2.3 断裂力学在胶接中的应用	(31)
2.4 胶接的无损检测	(43)
2.5 胶接接头的有限元分析	(52)
第 3 章 影响胶接强度的主要因素	(63)
3.1 工艺条件	(63)
3.2 磁场	(68)
3.3 接头设计	(76)
3.4 测试条件	(80)
3.5 内应力	(82)
第 4 章 接头应力分布的改善	(100)
4.1 概述	(100)
4.2 胶粘剂性能的影响	(103)
4.3 胶瘤对单搭接接头应力和强度的影响	(107)
4.4 断续胶层连接	(113)
4.5 单搭接接头的几何修正	(128)
4.6 混合胶层连接	(157)
第 5 章 老化、冲击与疲劳	(170)
5.1 老化	(171)
5.2 振动	(181)

5.3	冲击试验	(185)
5.4	胶接接头的疲劳	(196)
第 6 章	结构胶接	(211)
6.1	钢和铝合金的胶接	(213)
6.2	复合材料的胶接	(223)
6.3	木材胶接	(232)
第 7 章	载运工具中的胶接	(255)
7.1	汽车结构的胶接	(255)
7.2	航空航天器的胶接结构	(263)
7.3	船舶结构的胶接	(272)
第 8 章	导电胶及其应用	(284)
8.1	导电胶	(284)
8.2	导电胶封装技术	(315)
8.3	高分子材料导电机理	(323)
8.4	导电胶的可靠性及影响因素	(329)
8.5	导电胶的失效和质量控制	(335)

第 1 章

胶接理论基础

1.1 概述

在人类发展史上,工程结构代表着生产力的水平,而所采用的连接技术则处于其核心地位。胶接可能是所有连接技术(焊接、铆接、铆接、螺接等)中最为古老的一种,早在石器时代,人类就使用了骨胶、松香或糊精等最为古老的胶粘剂。

胶粘剂与胶接技术随着人类生产劳动的开始而产生,并随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用粘土、淀粉和松香等天然产物制造胶粘剂;四千多年前就会用生漆做胶粘剂和涂料来制造器具;三千年前就会用动物胶作木船的填缝密封胶;两千年前的秦朝,工匠们用糯米浆与石灰粘合长城的砌石;东汉时期用糯米浆制成的柏木密封胶与防腐剂结合使用,使马王堆古尸出土时肌肉及关节仍有弹性……这些足见中国古代胶接技术之高超。但由

于众所周知的原因,一直到 20 世纪中叶,我国却仍停留在使用天然胶粘剂的阶段。

随着高分子化学工业的飞速发展,在 20 世纪中,新型的合成胶粘剂开始使用,它比天然胶粘剂有更多的品种、更强的胶接强度、更好的耐久性和更广的适用性。20 世纪 40 年代初期,金属胶接结构的出现,使古老的胶接技术进入一个崭新的时代,作为一个新的边缘学科独立地生长起来。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,胶接技术在机械、建筑、电子、航天、轻纺及医学等领域均占有十分重要的地位。没有合成胶粘剂,就无法想象现代航空航天工业和汽车工业的发展。例如,日本某种型号的飞机上胶接部件面积占总面积的 80% 以上,波音 747 等大型客机机体上由胶粘剂连接的结构件一般超过 60%。图 1-1 中标出了称为“梦幻”航班的波音 787 型客机上采用复合材料的部位。波音 787 型客机拥有多项技术创新,其中最引人注目的是以碳纤维合成材料取代铝件制作的机体,机身减少了 1 500 块铝合金片及 4~5 万颗螺钉,成为全球第一款以碳纤维复合材料为主要材料的民用喷气式客机。其机体结构件的一半左右都用又轻又坚固的碳纤维增强复合材料经结构胶粘剂连接而成,整个机身、机翼、尾翼和发动机舱都用复合材料制成,这使得飞机的耐用性提高,维护费用减少。此外,碳纤维复合材料制作的机身使

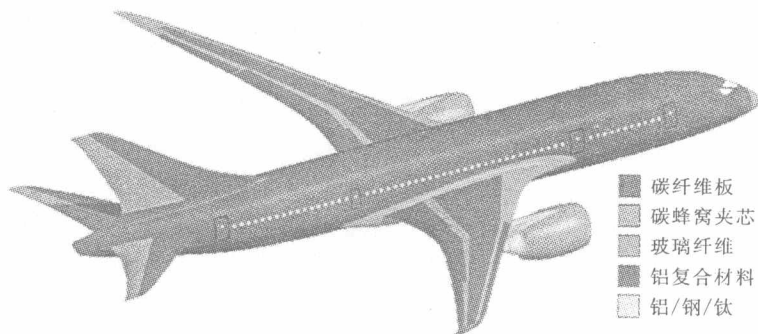


图 1-1 波音 787 型客机上使用复合材料的部位

得飞机重量减轻,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 20%左右。

1.2 胶接理论及固体表面特征

胶接是一种新的化学、物理连接技术,粘合是两个不同的物体接触时所发生的相互作用。了解胶接的基本原理,可以指导胶粘剂的正确选用和胶接工艺的合理实施,为获得最佳的胶接效果提供科学根据。虽然关于胶接机理、界面化学等基础理论研究工作已开展了几十年,但胶粘剂的理论研究仍然是滞后于应用研究的。到目前为止,人们对于胶粘剂复杂的硬化过程还未能全面认识和把握。这一方面是因为影响胶接接头强度的因素众多,另一方面是因为研究条件有限。

1.2.1 胶接理论

一种胶接理论可能在某种场合能较好地解释实际现象,但在另外一些场合却不适用。为人们所接受的胶接理论主要有以下几种。

1. 机械嵌合理论

机械嵌合理论认为胶粘剂必须渗入被粘物表面的孔隙内,并排除其吸附的空气,才能产生良好的粘附作用。例如在胶接多孔材料时,机械嵌合起了重要作用。当胶接致密的材料时,经打磨的粗糙表面要比光滑表面的胶接效果更好,原因即在于此。同时,被粘物表面打磨后变得较为粗糙,还生成了洁净表面或反应性表面,从而导致表面积增加,表面层物理和化学性质发生改变,有利于提高胶接强度。

壁虎(见图 1-2a)攀爬墙面的能力来自其四肢前端掌部刚毛与墙面的凹坑的契合。图 1-2b、c、d 所示的是壁虎掌部的刚毛,而图 1-2e、f 所示的是刚毛在墙面上的附着原理:富有弹性的刚毛易于抓牢粗糙的表面,从而壁虎可以自如地在墙面上行走。根据这个原理,美国研究人员模仿壁虎的掌部,用纳米碳管材料制成毛状物并覆盖到聚合物表面,这种毛状物具有与壁虎掌部的刚毛相类似的功能。

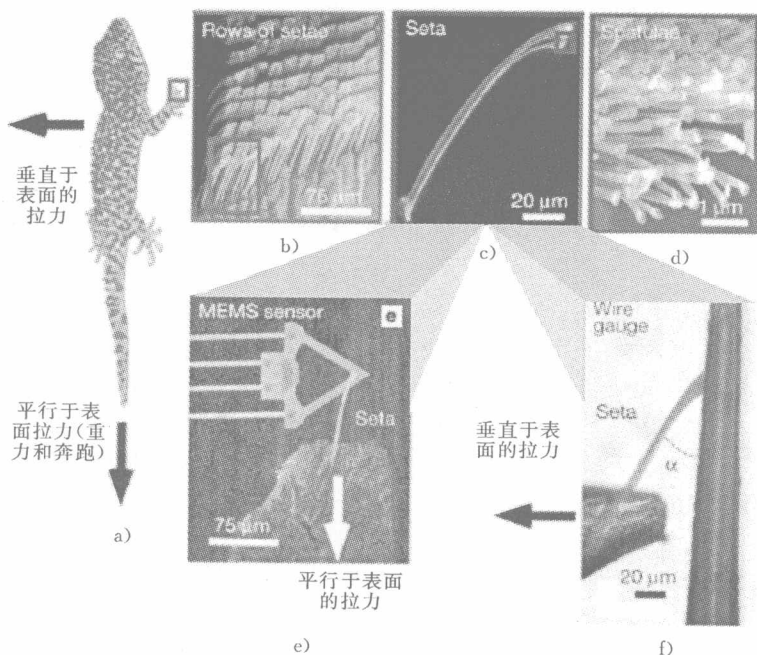


图 1-2 壁虎神奇的攀爬能力源自其掌部的刚毛^[1]

a)壁虎 b)掌部的刚毛 c)单根刚毛 d)刚毛的柄部 e)传感器 f)角度

最终,研究人员研制出一种柔软的贴片,可以反复粘贴、撕开,而且其性能比壁虎掌部的性能更胜一筹。这种纳米碳管材料的粘附力是壁虎掌部的 4 倍。

2. 吸附理论

吸附理论认为粘附是由两材料间分子接触,产生了界面力所引起的。粘附力的主要来源是分子间力,包括氢键力和范德华力。液体胶粘剂与被粘物连续接触的过程叫做润湿,要使胶粘剂润湿被粘物表面,胶粘剂的表面张力必须小于被粘物的临界表面张力,胶粘剂进入被粘物表面的凹坑与孔隙可形成良好润湿(见图 1-3b),否则便减少了它与被粘物的实际接触面积(见图 1-3c),从而降低接头的胶接强度。

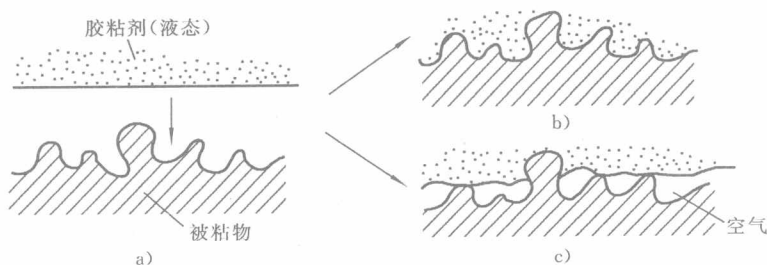


图 1-3 液态胶粘剂对被粘物表面的润湿情况^[2]

a) 胶粘剂和被粘物 b) 润湿良好 c) 润湿较差

获得良好润湿的条件是胶粘剂比被粘物的表面张力小,然而,大多数胶粘剂都易于润湿金属,其他被粘物的表面张力一般都小于胶粘剂的表面张力。这就是环氧树脂胶粘剂对金属胶接性好,而对于未经处理的聚合物(如聚乙烯、聚丙烯和氟塑料等)却很难胶接的原因。胶粘剂通过润湿与被粘物紧密接触,然后靠分子间作用力产生永久连接。

根据润湿理论和物理化学知识可知,胶粘剂中极性基团的极性越强,数量越多,对极性被粘物的胶接强度就越高;而非极性胶粘剂与非极性被粘物(或极性胶粘剂与非极性被粘物,或非极性胶粘剂与极性被粘物)之间,不能产生足够的分子间作用力,胶接强度较小。但是,一些研究发现润湿理论还存在着以下的不足:① 润湿理论把胶接作用主要归于分子间作用力,它不能圆满地解释胶粘剂与被粘物之间的胶接强度大于胶粘剂自身强度的情况;② 按润湿理论,在测定胶接强度时,为克服分子间作用力所做的功应与分子间的分离速度无关,但事实上,胶接强度的大小与剥离速度有关。这些都是润湿理论无法解释的。

3. 化学键理论

化学键理论认为,胶接主要是由化学键力的作用而形成的。胶粘剂与被粘物之间产生化学反应而获得高强度的主价键结合。在粘附力和内聚力中所包含的化学键有三种类型:离子键、共价键和金属

键。在胶接体系中起主要作用的是前两种,其作用比分子间作用力大得多。

4. 扩散理论

扩散理论认为,胶接是通过胶粘剂与被粘物界面上分子的扩散而形成的。当胶粘剂和被粘物都是具有能够运动的长链大分子聚合物时,可以适用扩散理论。热塑性塑料的溶剂胶接和热焊接被认为是分子扩散的结果,如图 1-4 所示。

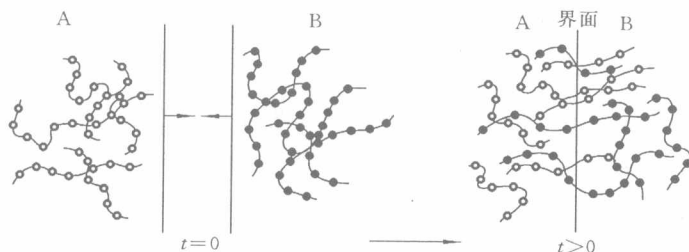


图 1-4 胶粘剂与被粘物界面上分子扩散^[2]

5. 静电理论

静电理论认为,由于在胶粘剂与被粘物界面上形成双电层而产生了静电引力,即相互分离的阻力(见图 1-5),因而形成了胶接。当胶粘剂从被粘物上剥离时有明显的电荷存在,则是对该理论较有说服力的证明。

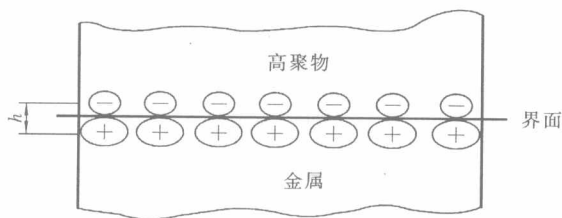


图 1-5 高分子胶粘剂与被粘物界面的异电相吸^[2]

6. 弱界面层理论

弱界面层理论认为,当粘附破坏被认为是界面破坏时,实际上往

往是内聚破坏或弱界面层破坏。弱界面层来自胶粘剂、被粘物、环境,或三者之二。如果杂质集中在胶接界面附近,并与被粘物结合不牢,在胶粘剂和被粘物内部都可出现弱界面层。尽管破坏大多发生在胶粘剂和被粘物界面,但实际上是弱界面层的破坏。聚乙烯与金属氧化物的胶接便是弱界面层效应的实例。聚乙烯含有低强度的含氧杂质或低分子物,其界面存在弱界面层。如果采用表面处理方法除去低分子产物或含氧杂质,则可显著提高胶接强度。图 1-6 所示为常见的七种弱界面层。

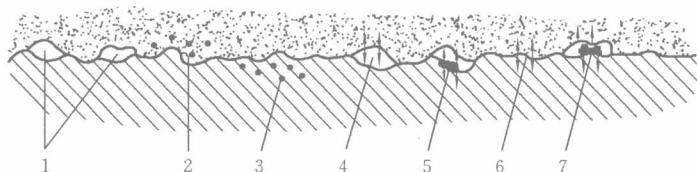


图 1-6 弱界面层的七种情况^[2]

1—气孔 2,3—夹杂 4,5,6,7—界面作用

关于胶接理论更为详尽的论述可参阅文献[3]、[4]、[5]。因被粘物一般为固体,且粘附作用仅发生在表层,因此一般将胶接视为一种界面现象,与固体的表面特征密切相关。

1.2.2 固体的表面特征

所有的金属固体表面在纳米尺度上都是粗糙的。不管固体的性质及加工方法有何不同,在一定程度上表面总是凹凸不平,存在孔隙等粗糙构造的。如机加工后的金属表面粗糙度平均为 $R_a 3 \sim 6 \mu\text{m}$,即使经过抛光也只能达到 $R_a 0.02 \sim 0.25 \mu\text{m}$ 。金属表面上的氧化物在较小的尺度上含有复杂的高表面积构造,金属固体表面具有复杂性、粗糙性、多孔性、高能性、吸附性。任何固体表面层的性质与内部的性质截然不同,经长期暴露后,其差异更为显著。固体的表面能量高,具有很强的吸附性。实际的金属固体表面由吸附气体、吸附水膜、氧化物、油脂、尘埃等组成。

胶粘剂与粗糙的被粘物表面会形成机械连接。机械连接依赖于

被粘物的表面特征,在界面上相互作用并不强的情况下,通过机械连接也能得到较高的接头强度。在胶接木材、织物或纸张时机械连接起着较大的作用,因为它们具有很细的多孔性结构。此外,许多金属和塑料在胶接以前进行了浸蚀处理,于是胶粘剂能渗到被粘物中去,把它们连接起来。在机械连接起重要作用时,界面上形成的复合中间层可以看做一个整体,它将两种材料连接在一起。

1.2.3 金属表面氧化物及形态

在大气中暴露的金属表面都有一层氧化物。氧化物层的厚度取决于金属及环境条件。有些金属(如铝和钛)形成薄而坚韧,对金属粘附得很牢的氧化膜,它们使金属表面钝化而防止其进一步氧化。另一些金属(如铁)表面会形成能持续增长的氧化物,在潮湿环境中增长尤为迅速。在金属发生氧化的过程中,氧首先被化学吸附在表面上,接着发生化学反应生成氧化物。化学吸附与化学反应的区别在于参加反应的物质是否保持其原有化学结构。在化学吸附的情况下通过提供解吸附的能量可以解吸附,而在化学反应的情况下这通常是不可能的。

金属氧化物实际上被从大气中吸附的有机分子和水分所覆盖,另一常见的表面污染源是加工以后残留的油和润滑剂。表面吸附是化学吸附还是物理吸附,区别就在于后者没有发生化学反应,前者是通过化学反应来达到吸附效果。材料的内部也可能成为表面污染源,例如,只含质量分数 10×10^{-6} 碳的铁在加热或变形时,其表面上会形成富碳组织。除了碳以外的其他元素(如硫、氮、硼和氧)也能从金属内部扩散到金属表面。

1.2.4 固体表面的观察技术

胶接科学与技术领域经常会研究固体的表面形貌,一般用扫描电镜(SEM)或扫描探针显微镜(SPM)进行微观分析。SPM 又包括两个大的领域:其一是扫描隧道显微镜(STM),它可以给出高度清晰的微空间图像,甚至可以观察到原子所构成的图像;其二是原子力