

Jin Shu Jie Gou

金属结构胶接

Jiao Jie

游 敏 郑小玲 郑 勇 编著

武汉水利电力大学出版社

(鄂)新登字 15 号

内 容 提 要

本书论述了金属结构胶接的技术基础、适用范围和优缺点,其中重点介绍了结构胶粘剂的选用、金属的表面处理、胶粘剂和金属胶接头性能的测试方法和技术、金属胶接的质量控制、胶接头上的工作应力分布和胶接结构设计方法。

本书可供从事金属结构和复合材料的研究、制造、使用和维修人员阅读,也可作为高等学校机械、材料类专业教师和学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

金属结构胶接/游敏,郑小玲,郑勇编著. —武汉:武汉水利电力大学出版社,2000.8
ISBN 7-81063-085-7

I. 金… II. ①游… ②郑… ③郑… III. 金属结构—胶接—基本知识 IV. TG49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 31703 号

责任编辑:刘 争 责任校对:徐 虹 封面设计:涂 驰

武汉水利电力大学出版社出版发行

(武汉市武昌东湖南路 8 号,邮编 430072)

武汉大学出版社印刷总厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:10.25 字数:246 千字
2000 年 9 月第 1 版 2000 年 9 月第 1 次印刷 印数:001—700 册
ISBN 7-81063-085-7/TG·1 定价:13.00 元

前 言

结构胶接技术具有使结构重量减轻、接头应力集中程度低、抗疲劳强度高、密封性好、外表美观、无电化学腐蚀的优点,胶接同时具有连接、密封、绝缘、防腐、防潮、减震、隔热、消声等多重功能,可实现异种材料、异型、薄壁、复杂、微小、硬脆或热敏构件的连接,可赋予接头特殊性能(快速固化、导热性、导电性及导磁性等),可获得较高经济效益等其他连接方式无法比拟的特点。结构胶接技术应用日趋广泛,特别是在运载工具方面(如航空航天领域、汽车制造和维修领域)是不可缺少的重要工艺方法。

胶粘剂、金属胶接接头的性能测试和胶接质量控制一直是胶接技术领域中的重要研究内容。随着研究工作的不断深入和发展,性能测试和评价方法逐渐完善,有关该领域的国家标准和国际标准已经完成了一次较为全面的更新,胶接术语更加科学和规范。本书以最新的相关国内外标准为基础,论述了金属结构胶接的技术基础、适用范围和优缺点。其中重点介绍了结构胶粘剂的选用、金属的表面处理、胶粘剂和金属胶接接头性能的测试方法和技术、金属胶接的质量控制、胶接接头上的工作应力分布和胶接结构设计方法。作者从事金属胶接及其相关领域的研究工作多年,在胶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、金属被粘物胶接面上的加工硬化、结构钢的磷化酸蚀处理方法、金属胶接接头强度测试方法和技术及最佳固化工艺参数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科研成果的总结。

本书中还参考了相关领域内不少专家学者的著作和论文,在此表示诚挚的感谢。

本书第一章的1.1、1.2及1.6节,第二章,第五章和附录由游敏编写;第一章1.3、1.4和1.5节,第四章,第六章由郑小玲编写;第三章由郑勇编写。杨兴海、范钟明教授,舒林副教授,夏昌浩讲师,晏红、郭江洪工程师等参加了本书相关课题的研究。

本书在编写过程中得到了中华电力教育基金会、武汉水利电力大学(宜昌)硕士点建设基金的支持,还得到了模具技术国家重点实验室副主任、华中理工大学熊惟皓教授的关心和支持。对于先后参与相关课题研究工作的同志以及在本书的编著过程中给予作者以支持和帮助的同志,在此表示由衷的感谢。

限于作者水平,本书中错误和不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

作 者
2000年5月

目 录

第一章 金属胶接技术基础	1
1.1 概述	1
1.2 金属胶接的基本概念	2
1.3 金属结构胶接生产的一般工艺过程	4
1.4 金属胶接的基本原理	13
1.5 金属结构胶接技术的优缺点	18
1.6 胶接技术的现状与发展趋势	19
第二章 结构胶粘剂及其选用	22
2.1 胶粘剂的分类	22
2.2 胶粘剂的组成	24
2.3 主要的结构胶粘剂	26
2.4 聚氨酯结构胶粘剂	35
2.5 结构胶粘剂的选择	36
2.6 铝合金结构胶及其选用	39
2.7 汽车用结构胶粘剂	41
2.8 专家系统在结构胶粘剂选择中的应用	43
第三章 金属的表面处理	46
3.1 概述	46
3.2 金属的脱脂处理和除锈粗化	47
3.3 化学处理	53
3.4 电化学处理	55
3.5 其他处理方法	57
3.6 常用金属的表面处理	59
第四章 胶粘剂和胶接接头的性能测定	66
4.1 胶粘剂理化性能的测定	66
4.2 胶接接头的失效与破坏	74
4.3 胶接强度的测试方法	79
4.4 胶粘剂耐环境性能测试	93
第五章 金属胶接质量的控制	100
5.1 质量控制的基本原则和内容	100
5.2 影响金属胶接接头强度的主要因素	102

5.3 金属胶接缺陷的控制	117
5.4 胶接接头缺陷的无损检测	118
第六章 金属胶接结构设计	124
6.1 金属胶接结构设计的一般原则	124
6.2 金属胶接接头的形式	128
6.3 金属胶接接头的强化措施	134
6.4 金属胶接接头上的应力分布	142
6.5 铝合金结构的胶接工艺装备	149
6.6 汽车结构自动化涂胶系统	150
附录 与胶接有关的部分国家标准目录	153
主要参考文献	155

第一章 金属胶接技术基础

1.1 概述

在人类发展史中,工程结构表征了生产力的水平,工程结构的实现受制于采用的连接技术,例如木结构的榫接技术使大型宫殿得以修筑。在工程结构中,金属结构的应用占有重要地位,如何实现金属结构的可靠连接一直受到人们的普遍关注。

在金属构件的连接工艺中,较为古老的方式是锻焊、铸焊、钎焊和胶接。经过数千年的漫长岁月,在 100 多年前发展为现代的金属铆接、焊接、螺纹连接技术。到 20 世纪初,铆接技术在金属结构领域中独领风骚,而焊接技术只能在金属结构修理领域(如修船业)中占有一席之地。现代焊接也仅有 100 多年的历史,迄今为止所取得的发展主要集中在金属熔化焊方面及各种现代热源的应用方面。正是二次世界大战中对大型远洋运输船舶的大量需求使得焊接在金属结构连接技术中占有主导地位。而现代航空航天工业的建立和高分子时代的到来却使得古老的胶接技术重新焕发出活力,使用范围越来越广。

胶接技术历史悠久,是最为古老的连接方式之一,远在石器时代人类就接触了骨胶或松香、糊精等一类胶粘剂。后来胶粘剂便用于连接金属制品,如制作金属铠甲,将箭镞和箭杆连接在一起,等等。

人类文明史上,天然胶粘剂一直占有重要的地位。中国是使用天然胶粘剂最早的国家之一,《周易参同契》、《天工开物》等古籍上均有胶粘剂制造和使用的记载,许多出土文物表明 5000 年前我们的祖先就会用粘土、淀粉和松香等天然产物制造胶粘剂,4000 多年前就会用生漆做胶粘剂和涂料制造器具,3000 年前的周朝已用动物胶作木船的填缝密封胶。2000 年前的秦朝用糯米浆与石灰作砂浆粘合长城的基石,使万里长城成为中华民族伟大文明的象征之一。公元前 200 年东汉时期用糯米浆糊制成柏木密封胶,配以防腐剂,使马王堆古尸出土时肌肉及关节仍有弹性,足见中国古代胶接技术之高超。但由于众所周知的原因,我国一直到 20 世纪中叶却仍停留在应用天然胶粘剂的水平上。

在 20 世纪,随着高分子化学工业的飞速发展,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,使胶接技术作为一个新的边缘学科独立生长起来。例如在二次世界大战中将其用于飞机结构件(如战斗机主翼)的连接。随后的几十年中,合成胶粘剂取得了令人瞩目的进展,胶接技术在建筑、机械、电子、航天、轻纺工业及医学等领域均占有十分重要的地位。没有胶粘剂,就无法想象现代航空航天工业和汽车工业,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%。

随着时代的进步,社会对胶粘剂的需求量愈来愈大,对其性能要求愈来愈高,胶粘

剂工业已发展成为一个独立的新兴精细化工产业。在 21 世纪, 胶粘剂和胶接技术在人们的日常生活和国民经济建设中将发挥更大的作用, 在金属构件的连接中所处的地位将日趋重要。

1.2 金属胶接的基本概念

1.2.1 胶接的基本术语

1. 粘合 (Adhesion)

两个表面依靠化学力、物理力或两者兼有的力结合在一起, 并能抵抗分离的现象称为粘合。粘合是由于两种物质之间产生了粘附力, 该力来源于次价键力或主价键力。胶接时胶粘剂首先必须在被粘物表面粘附。所谓内聚 (Cohesion) 即是单一物质内部依靠主价键力 (包括离子键、共价键、配位键、金属键等)、次价键力 (包括范德华力、氢键) 结合在一起的状态。内聚力与分子间力、分子量、交联程度、分子缠绕等因素有关。

2. 胶粘剂 (Adhesive)

能使被粘物 (Adherend) 借助粘附作用结合在一起的物质称为胶粘剂, 也称为“粘合剂”或“粘接剂”, 习惯上简称为“胶”。实际上, 并不是什么物质都能用作胶粘剂, 它必须满足如下要求: 不论胶粘剂是何种状态, 在涂布时一般应呈现为液态或在叠合时呈流变状态; 对被粘物表面能充分润湿; 必须能完成从液体向固体的状态转变, 形成坚韧的胶层; 固化后有一定的强度, 可以传递应力, 抵抗破坏; 能够经受一定的时间考验, 即有一定的耐久性。

3. 被粘物 (Adherend)

准备胶接的物体 (材料或制件) 或胶接后胶层两边的物体, 称为被粘物。

4. 胶层 (Adhesive layer)

胶层是胶粘件中的胶粘剂层, 具有传递应力的能力或能够耐受某些介质的作用。

5. 胶接 (Bonding)

用胶粘剂将被粘物表面连接在一起的过程称为胶接, 或称为“粘接”。胶接是指两个被粘物与胶粘剂共同形成可承受外载的胶接接头的工艺过程。接头的强度 (承载能力) 取决于被粘物和胶粘剂自身的力学特性, 更与其间的界面强度有关, 还包括胶接部位的被粘物和胶层的几何特性。粘合则仅指被粘物表面与胶粘剂或涂料等粘附剂间的吸附、化学键力或物理力使被粘物结合在一起的界面现象。

在参考有关国际标准, 结合我国的实际情况写成的 GB/T 2943—1994 “胶粘剂术语”中, 把胶接定义为: 用胶粘剂将被粘物连接在一起, 具有“胶粘连接”的内涵。若将“胶接”仅视为一个连接过程, 这是不完全的。实际上, 胶接涉及很多方面, 如粘附机理、老化机理与界面化学, 表面分析与表面制备技术, 高分子材料与胶粘剂, 接头力学性能分析与测试, 大中型专用设备设计与制造, 质量控制 (包括无损检测技术) 等多个学科。如同“焊接”不仅涉及焊缝的形成过程, 而且关系到焊接冶金、金属的焊接性、焊接设备及工装夹具、焊接结构、焊接检验以及焊接质量控制等许多分支学科一样。因此, 它是一门综合性或边缘性的技术, 故“胶接”的广义含义乃是“胶接技术” (Bonding technology) 的简称。焊接与胶接的本质区别在于前者导致所连接构件在焊缝处的原子间

结合,而后者实施后在胶缝处有明显的界面,还有弱界面过渡层,几乎不改变被粘物的结构。

其他有关的胶粘剂术语可参阅国家标准 GB/T 2943—1994 “胶粘剂术语”。

1.2.2 金属结构胶接概念

1. 胶接技术 (Bond technology)

利用胶粘剂将各种材质、形状、大小、厚薄、软硬相同或不同的制件(或材料)连接成为一个连续牢固稳定的整体的一种工艺方法,称为胶接技术,也叫胶粘、粘接、粘合技术等。它与铆接、焊接、螺纹连接等起到同样的作用,但在很多方面却优于这些传统的连接方法。换句话说,所谓胶接技术就是以适宜的胶粘剂,采用适当的接头形式和合理的胶接工艺而将被粘物连接在一起的手段与方法。

2. 结构胶接 (structure Bonding)

所谓结构胶接,是指能制造、生产传递较大的静、动态负荷,并在使用环境中长期可靠地工作的结构件的胶接技术。例如航空及航天飞行器、汽车、船舶等运载工具以及某些重要建筑结构的胶接生产。结构胶接是胶接技术的一个重要分支,而结构胶接中现在有着较大的实用价值的正是金属结构胶接。现代胶接技术开始于航空铝合金结构的胶接,航空、航天飞行器、现代运载工具工作条件的苛刻以及对结构效率和可靠性的严格要求,又促进了胶接技术的不断发展和提高。对于结构的胶接而言,要解决的核心问题有两个:一是与连接部位有关的胶接接头的形成与性能;二是与结构的几何特征有关的定位与装配。限于篇幅,本书将着重讨论前者。

3. 金属胶接结构 (Bonded metal structure)

金属胶接结构指主要或者全部由胶粘剂连接而成的金属结构或结构件。金属胶接结构按金属材料的种类可以划分为铝合金胶接结构、钢胶接结构、铜合金胶接结构等等。铝合金胶接结构按其结构形式和胶接工艺特点可划分为:钣金胶接结构,夹层胶接结构和复合连接结构等三大类^[1]。钢胶接结构可根据结构的几何特征划分为:薄壁胶接结构,梁柱胶接结构,箱体胶接结构和轴、盘类胶接构件等四大类。

4. 金属胶接接头 (Metal joint)

用胶粘剂把两个金属被粘物胶接在一起的部位,称之为金属胶接接头。

1.2.3 铝合金胶缝与接头强度分析

胶接接头中,胶层、界面区与基材表面共同组成了胶缝,胶缝不涉及被粘物的几何形式。当涉及力学问题时,研究的对象就只能是整个接头。在胶接接头受力时,破坏可能发生在其中某一个或几个薄弱环节。一般把破坏部位划分为胶层内部的“内聚破坏”和胶粘剂与被粘物间界面处的“粘附破坏”。但这样划分仍嫌笼统,难以说明产生破坏的确切部位。文献 [1] 给出了铝合金的胶缝示意图如图 1-1,并将内聚破坏(co)进一步划分为:胶层内聚破坏(a);底胶内聚破坏(p);

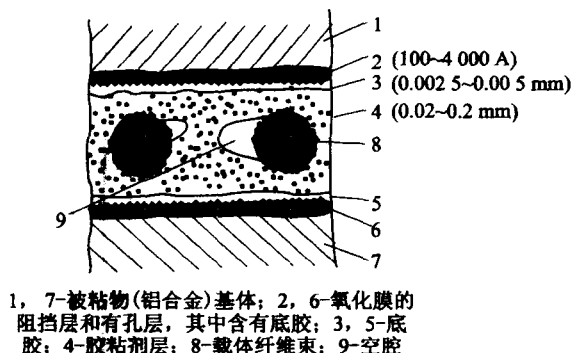


图1-1 铝合金的胶缝示意图

胶层内空腔破坏 (v) 及胶层与底胶间的界面破坏 (pa)。将粘附破坏 (if) 进一步划分为: 金属本体材料与氧化膜间的界面破坏 (mo); 氧化膜内破坏 (ox) 及氧化膜与底胶间的界面破坏 (op)。如以 ϕ 表示胶缝断裂面上各种破坏情况所占面积的百分数, 则有:

$$\phi_{co} = \phi_s + \phi_p + \phi_{pa} + \phi_v \quad (1-1)$$

$$\phi_{if} = \phi_{mo} + \phi_{ox} + \phi_{op} \quad (1-2)$$

而
$$\phi_{if} + \phi_{co} + \phi_v + \phi_g = 1 \quad (1-3)$$

式中, 下标 g 表示载体纤维。

于是, 可把接头强度看成是各组成部分之和, 即

$$\sigma_b = \sigma_{if} \phi_{if} + \sigma_{co} \phi_{co} + \sigma_g \phi_g \quad (1-4)$$

式中, σ_b ——接头的破坏强度。

当然, 破坏也可能发生在被粘物本体, 这时的 σ_b 就直接等于本体材料强度。因 ϕ_{if} 不易判断, 故将式(1-4)改写成

$$\sigma_b = \sigma_{if} (1 - \phi_{co} - \phi_v - \phi_g) + \sigma_{co} \phi_{co} + \sigma_g \phi_g \quad (1-5)$$

有了式(1-5)即可通过低倍显微镜对破坏原因进行更为明确的分析, 由该式还可看出: 胶接质量不仅取决于胶粘剂, 也取决于被粘物表面、底胶等材料与工艺因素及其相互匹配状况。因此, 常把构成胶缝的上述各因素的总体称为“胶接体系”。

在上述分析中, 有两处值得讨论的地方, 其一是在式(1-1)和(1-3)均出现了 ϕ_v (胶层内空腔破坏所占的百分比), 似乎它既属于内聚破坏, 又不属于内聚破坏; 其二是未能考虑胶层中一般存在的内应力, 胶膜与被粘物厚度差别, 在金属胶接结构中被粘物对胶层的强烈拘束强化作用, 以及破坏一般并不位于同一平面内等因素。若考虑到这些因素的作用, 对于一般的金属胶接结构的典型接头, 当不考虑载体纤维的作用时, 我们将(1-5)式改写成:

$$\sigma_b = A [\sigma_{if} (1 - \phi_{co} - \phi_v) + \sigma_{co} \phi_{co} - \sigma_r \phi_r] \quad (1-6)$$

式中, 下脚标 r 表示残余应力, A 为几何因素的贡献及拘束强化作用的综合作用系数, 其值在 0 到 1 之间, 其他符号的意义与前式相同。用式(1-6)分析胶缝的强度时将会更为全面一些。

1.3 金属结构胶接生产的一般工艺过程

金属结构胶接生产的一般工艺过程如图 1-2 所示。

在工厂、车间或施工现场, 通过人们的胶接作业使原材料或半成品的形状和性质按照人们的意图发生改变, 得到所需的金属结构产品的过程, 称为金属结构胶接生产过程。

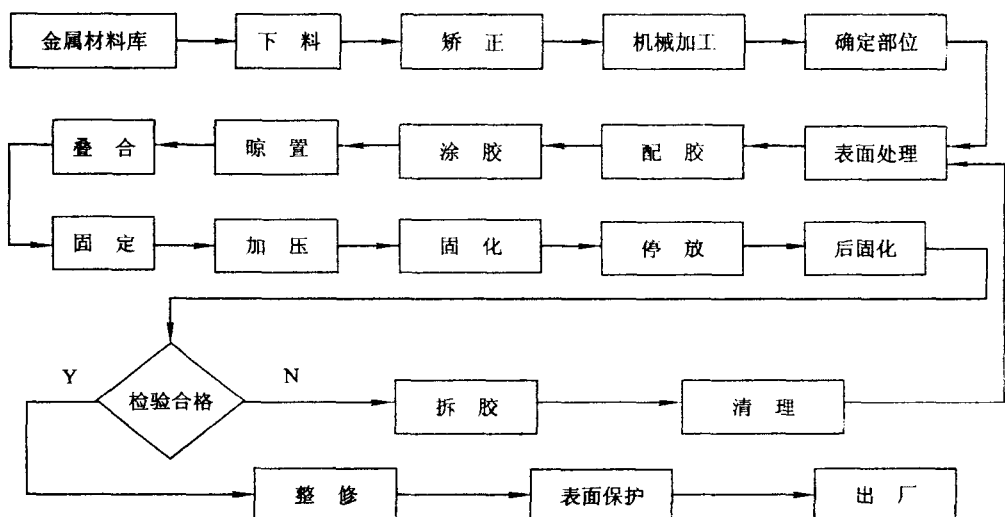


图1-2 金属结构胶接生产的一般工艺过程

1.3.1 备料加工

结构胶接生产过程中的金属材料的准备、零部件的备料加工是胶接生产中必不可少的首道工序。若材料有误，不能保证零部件的加工质量，会带来胶接的困难，使胶接质量下降。备料加工主要包括胶粘剂贮存和运输以及金属的储存、下料、矫正、机械加工等。

对胶粘剂的验收检验，目前主要是进行一些简单的、但却相当费时间的试验，如力学性能，有的还做凝胶时间和流淌试验，目的在于进行各批产品间的比较。胶粘剂的化学性质，最终决定其工艺性及长期性能。因此，为了确保胶接件的质量，必须建立起对化学成分及其反应程度的严格规范与控制。常用于胶粘剂分析的方法有：红外光谱、高性能液相色谱、薄层色谱、热分析、动态介电分析及 C-13 核磁共振谱等。这些方法或单独使用，或互相配合使用，对不同材料采用不同的方法。

材料入库前经严格的检查，验收合格后应分类存放至专门的材料库。必要时应检验材料的力学性能指标、化学成分、金相组织等。对金属材料中常见的弯曲、扭曲等明显变形，特别是薄或截面积较小的型材，在下料前应进行矫正。经历机械加工之后如果存在变形超出要求范围的情况，还应再进行矫正处理。下料时注意保证零部件的尺寸精度，合理利用材料以提高经济效益。

1.3.2 表面处理

在被粘物表面处理之前首先要进行表面清理，可用水、毛刷、棉纱、干布等初步清除泥土、灰尘、杂质、油污等物。对于小型复杂零件可用超声波洗涤。含有旧漆的表面可用机械方法、喷灯火焰法、碱液清理法、溶剂法除掉。碱液脱漆，需要加热和清洗，对于钢铁件可用 10% 的氢氧化钠溶液煮沸清理。

表面处理的目的是使胶粘剂更好地润湿被粘物，固化后形成性能良好的胶接接头。表面处理与电镀、涂漆前的预处理基本相同，均是为了获得最佳的表面状态，形成所期望的粘附。

表面处理是金属结构胶接生产过程中极为重要的工序之一。表面处理的具体方法有：表面清理、脱脂、除锈粗化、清洁干燥、化学处理、电化学处理等。对于一般用途的零部件可不进行化学处理，保护处理也可视具体情况采用。表面处理之前应确定胶接部位，根据被粘物材质和表面状态、胶粘剂的种类、使用环境及对胶接接头的性能要求等因素选择表面处理方法，可以是一种、两种或几种方法相结合，其中表面清理是不可缺少的方法。

胶接大致可分为两大类用途：一是用于产品制造；二是用于各种修理。无论是何种情况，都需要对胶接部位的情况有比较清楚的了解，例如表面状态、清洁程度、破坏情况、胶接部位等。只有经过一番认真的观察与检查，才能为施行具体的胶接工艺做好准备。

各种表面处理方法的原理和具体操作工艺流程请参阅第三章。

1.3.3 选胶与配胶

选择胶粘剂是决定接头性能的关键问题，选胶应在确定表面处理方法之前完成。在选胶时，必须熟悉胶粘剂的性能，尽量兼顾胶接工艺实施的可能性和经济性，特别注意货源问题，减小毒害以保证安全是选胶时应使用的一般性原则，对于金属胶接来说由于其极性大（表面能高）、表面致密、弹性模量大、强度高，一般用于受力结构，应选用强度比较高的结构胶，还需考虑其氧化膜形态，以确定表面处理方式。

在胶种确定，接头制成，表面处理之后，就要进行调胶配胶。对于所选用的单组分胶粘剂，一般可以直接使用，必要时可搅拌混合均匀或用适当的溶剂稀释。对于多组分胶粘剂，在使用前按胶粘剂产品使用说明书规定的比例和步骤调配混合均匀。小量的配制，容器可用玻璃烧杯、聚乙烯塑料杯，也可在金属板、玻璃板、塑料板、牛皮纸上调配。如果用胶量较大，可在专门的搅拌混合器中进行。配胶所用的容器和工具必须干燥洁净。

对于多组分胶粘剂，必须在使用前按规定的比例调配混合均匀，根据胶粘剂的适用期、季节、环境温度和实际用量大小，决定每次配制量多少，应当随用随配，尤其是室温快速固化胶粘剂，一次配制过多，放热量大，容易凝胶，影响涂胶，也会造成浪费。

各组分搅拌均匀非常重要。例如用得较多的双组分环氧树脂胶粘剂，若是固化剂分散不均匀，就会严重损害胶接性能，不是固化不完全，就是局部发粘发泡。每个组分的未用部分不得互相混入，在处理时必须谨慎小心，以防变质失效。

自行配制的胶粘剂，其所用原材料必须符合规格要求，对于填料的粒度和水分要严格控制，粒度要求 180 目以上。除了颗粒尺寸大小、还有粒度分布问题，一些研究结果表明粒度分布稍宽点为好，大小不同的颗粒同时存在，容易堆积紧密，对于提高胶粘性有利。填料在配胶前应烘干除去水分。各组分必须按配方准确称量，各组分的加入必须有一定的顺序，一般是粘料→增韧(塑)剂→稀释剂→偶联剂→填料→固化剂→促进剂。

选胶时应考虑的原则和具体步骤请参阅第二章。

1.3.4 胶接与固化

1. 涂胶

所谓涂胶就是以适当的方法和工具将胶粘剂涂布在被粘物表面。涂胶操作正确与否，对胶接质量有很大影响。被粘物表面容易吸附空气和水分，为了防止包裹空气而形成气泡或气孔，涂刷应朝一个方向移动，涂胶速度不能太快，以利空气的排除。一般两个被粘物表面都要涂胶。涂胶量、涂胶次数根据胶粘剂种类、被粘物的性质和对接头的强度

要求确定，以控制胶层的厚度。不论采用何种涂胶方法，都要认真细致地进行，要求涂胶均匀一致，应避免空气混入，达到无漏涂、不缺胶、无气泡、不堆积，胶粘剂固化后形成有适当厚度的胶层。

涂胶操作正确与否，对胶接质量有很大影响。胶粘剂涂布的难易程度与粘度大小有很大关系。对于无溶剂胶粘剂如果本身粘度太大，或因温度低变得粘稠，而造成涂布困难，可将被粘物表面用加热装置（如电吹风）预热至 40~50℃，使涂布后的胶粘剂粘度降低，易于湿润被粘表面。如果溶剂型胶粘剂粘度过大，可用相应的溶剂进行稀释，再行涂布，有利于胶粘剂的湿润。

涂胶的次数因胶粘剂和被粘物的性质不同而异。像无溶剂环氧胶和致密被粘物，一般涂上一道胶即可，而多数的溶剂型胶粘剂和多孔性被粘物，需要涂胶 2~3 次。对于多次涂胶，一定要在头遍胶溶剂基本挥发后才能涂布下一次胶，不可操之过急。

涂胶量大小也与胶粘剂的品种和被粘物的种类有关，对于多孔被粘物涂胶量就要大些，涂胶量的大小直接决定着胶层的厚薄。一般地，在不缺胶的前提之下，胶层越薄，缺陷少、变形小、收缩小、内应力小，胶接强度越高。胶层过厚，反而导致胶接性能下降，适得其反。一般认为对于承受正拉载荷作用的接头上胶层厚度控制在 0.08~0.15mm 为宜。

涂胶的方法因胶粘剂的形态不同而异，对于液态、糊状或膏状胶粘剂可刷涂、喷涂、浸涂、注入、漏涂、滚涂、刮涂等。对于胶膜可在溶剂还未完全挥发之前贴上按压或滚压，对于热熔胶可将胶粉直接撒在预热的被粘表面上，或用专门的热熔胶枪涂布。

刷涂法，是最古老、最简单的操作方法，就是用毛刷或排笔将胶液涂在被粘物表面上。刷涂法适于涂刷任何形状的表面，对于粘度大和挥发速度快的胶粘剂不能用刷涂法。刷胶时要顺着一个方向，不要往复，速度慢些，以免带入气泡。刷涂法生产效率低，劳动条件较差。

喷涂法，就是用涂胶枪把胶液喷涂在被粘物上，喷涂的特点是：涂胶均一、生产效率高，适宜大面积胶接。由于喷涂用的胶液要求粘度低，含有大量的易挥发溶剂，可能对环境有污染，安全性也较低，采用时要特别注意。

浸涂法，是将被粘物浸入胶粘剂溶液或胶粘剂分散液中进行涂布的一种工艺方法。适用于小型、薄型、复杂的被粘物。其优点是设备简单、胶液消耗少、生产效率高。浸涂法常用的有手工法、回转浸涂法、离心浸涂法、真空浸涂法、传动浸涂法等。

刮涂法，是用金属或非金属刮刀，将糊状或膏状的胶粘剂刮抹于被胶粘和密封的部位。

滚涂法，是利用滚筒先浸到胶液中，再转移到所需胶粘或涂布的表面，适于压敏胶和热熔胶的涂布。该法涂胶均匀，可单面也可双面滚涂，涂胶效率高，适用于连续性大工业生产，其缺点是设备投资大。

注入法，是将胶粘剂装入专用的容器内，再用手工、机械、气动等压力注入接缝外围处，例如用注射针管注胶就是最简单的方法，这种方法利于文明生产，节约用胶，既简单又适用，在密封堵漏、胶接点焊上很有用途。

分开涂胶法，是有的双组分反应型胶粘剂，如第二代丙烯酸酯胶粘剂，两个组分可分别涂于两个被粘物表面上，然后叠合在一起。这种方法使用方便，不需混合，避免浪费。

热熔涂胶法，是用专门的热熔胶枪，将胶棒放入，通电后变热熔化，适当控制它流到待胶接表面上的速度。此法效率很高，速度很快。

2. 晾置

晾置就是涂胶后叠合前在空气中暴露的过程。晾置的目的是令溶剂挥发,粘度增大,促进固化。一种胶粘剂涂胶后晾置与否、晾置条件和时间长短决定于胶粘剂的性质。

α -氰基丙烯酸酯胶粘剂涂胶后在空气中稍许晾置,以吸收微量水分,促进固化,晾置时间越短越好。

对于含挥发性溶剂(丙酮、乙醇、醋酸乙酯、三氯甲烷、苯、甲苯等)的胶粘剂,涂胶后必须晾置,切勿立即叠合,必须使溶剂挥发干净,以免胶层产生气泡。

不同类型的胶粘剂,因溶剂种类和含量的不同,其晾置的温度和时间也下一样。有的只需室温晾置,有的在室温晾置一定时间后还要加热干燥。对于后种情况,应避免涂胶后立即进行高温干燥,以防表层形成硬皮而阻止内部溶剂继续挥发。晾置时间可以短至几分钟,也可长达几十分钟,这取决于所含溶剂的挥发速度,不能过长也不要太短,晾置时间过长,会失去粘性,对于只在室温固化的胶粘剂就会粘不上。

晾置的环境应通风良好、清洁、干净、空气干燥,特别是湿度低些为好,不然因溶剂挥发使表面温度降低,水汽凝聚于表面,影响胶接质量,尤其是对水敏感的聚氨酯胶粘剂,会使胶层出现气泡,降低胶接强度。

3. 叠合与清理

叠合俗称胶合、粘合,是将涂胶后或经过适当晾置的被粘物表面重合在一起的操作方法。对于无溶剂的液体胶粘剂,叠合后最好错动几次,以利排除空气,紧密接触,对准位置。对于溶剂型胶粘剂,过早过晚叠合都不好,一些初粘力大或固化极快的胶粘剂,如氯丁胶、聚氨酯胶等叠合时要一次对准,不可来回错动。胶合后适当按压、锤压或滚压,以去除空气。

在胶接过程中,难免会在非胶粘表面挂上胶液,或者因涂胶量大叠合时挤出过多的胶,称为余胶。当对装配件加压时,从胶层中挤出的胶粘剂称为溢胶(squeeze-out)。在两被粘物交角处固化后的产物(即填充在两被粘物交角处的那部分胶粘剂)俗称毛边,标准术语为胶瘤(fillet)。亚当斯等^[2]经过有限元分析与研究,认为适当尺寸的“毛边”对提高接头的承载能力有好处。但一般认为毛边影响外观,整修极为困难,应当在胶液固化之前清理干净。常用脱脂棉或纱布蘸溶剂擦除余胶。在清理过程中,如果发现裂缝、缺胶、气泡、配合不好等现象,应及时排除。裂缝、缺胶可再补胶填满,气泡可用铁针斜刺穿孔预热排除,尽量于固化之前消除隐患。所用的溶剂见表1-1。

粘连是材料之间出现的一种不希望有的粘合现象。为了使被粘件易与加压工具、固化设施分离,对于可能产生粘连的部位可使用隔离剂(脱模剂),如油脂、硅油、高分子溶液等。它应有一定的化学惰性和热稳定性,对加压工具和被粘材料不产生腐蚀作用,无毒性、不污染环境、不损害健康、配制容易、使用方便、隔离效果好。常用的几种脱模剂列在表1-2中。

4. 固化

固化是指胶粘剂通过化学反应(聚合、交联等)获得并提高胶接强度等性能的过程。在金属胶接结构中,使用有机胶粘剂的情况较多。为获得满足实际需要的胶接结构,选胶之后必须确定适当的固化条件,即固化温度、时间、压力等三个参数的配合。

一些出版物未能区分“硬化”和“固化”。例如在文献[3]中的定义是:“固化又称硬化或变定,对于橡胶型胶粘剂也叫硫化,是使胶粘剂通过溶剂挥发、熔体冷却、乳液

表1-1 胶粘剂固化之前清理常用的溶剂

胶 粘 剂	常 用 的 溶 剂
酚醛树脂	乙醇、丙酮
脲醛树脂	水
环氧树脂	丙酮、无水乙醇、醋酸乙酯、甲苯
聚氨酯	丙酮、醋酸乙酯
不饱和聚酯	乙醇
α -氰基丙烯酸酯	丙酮、甲苯
厌氧胶	丙酮、无水乙醇
第二代丙烯酸酯	丙酮
聚氯乙烯	丁酮
聚苯乙烯	丙酮
有机玻璃	丙酮
氯丁橡胶	甲苯、丁酮、丙酮、醋酸乙酯
丁腈橡胶	醋酸乙酯、丁酮
聚硫橡胶	丙酮
硅橡胶	甲苯
天然橡胶	120 号汽油、甲苯
白乳胶	水、乙醇
压敏胶	丙酮、石油醚、120 号汽油
无机胶	水

凝聚的物理作用或交联、接枝、缩聚、加聚的化学作用，使其变为固体，并且有一定强度的过程。”按照现行国家标准和国际标准，固化和硬化是截然不同的两个概念。固化 (curing, cure) 是指胶粘剂通过化学反应（聚合、交联等）获得并提高胶接强度等性能的过程；而硬化 (setting, set) 指胶粘剂通过化学反应或物理作用（如聚合反应、氧化反应、凝胶化作用、水合作用、冷却、挥发性组分的蒸发等）获得并提高胶接强度、内聚强度等性能的过程。可知，硬化所涉及的范围包括固化，含化学反应和物理作用，而固化仅指依靠化学反应建立强度的过程。对于金属胶接结构来说，多使用有机高分子胶粘剂，通过固化建立所需强度。因而固化是有机胶粘剂获得良好力学性能的关键过程，只有完全固化，强度才会达到最高。

固化可分为初固化、基本固化、后固化。在室温下放置一段时间达到一定的强度，表面已硬化，不发粘，但固化并未结束，此时称为初固化或凝胶。

在一般情况下，胶粘剂的室温固化反应不会完全，无论放置多长时间，也只能是基本固化，因此胶层是不稳定的，不耐热、不抗老化，不能保证长期使用的稳定可靠。只

表1-2 常用的几种脱模剂

类 型	配 比 (重量份)	主要性能	应用范围
薄 膜	1. 玻璃纸 2. 聚氯(乙)烯薄膜 3. 涤纶薄膜	防粘连性好, 使用方便	适用于形状简单的粘件, 需借油附于表面
过氯乙烯溶液	1. 过氯乙烯清漆 65 香蕉水 35 2. 过氯乙烯树脂 5~10 甲苯: 丙酮 (1:1) 90~95	防粘连性好, 使用温度较高	适用于形状复杂的底漆
聚乙烯醇溶液	1. 聚乙烯醇 5 水 52 酒精 (工业) 40 甘油 3 2. 聚乙烯醇 6 酒精 (工业) 66 水 28 3. 聚乙烯醇 10 水 90	成膜性好, 清洗方便, 无毒不燃, 使用方便	适用于形状复杂的结构
有机硅溶液	1.5 号甲基硅 3~5 甲苯 95~97 2. 硅橡胶 5~10 甲苯 90~95	成膜性好, 防粘连性好, 涂刷方便, 使用温度高, 毒性较大, 价格较贵	适宜高温条件下的使用
油 蜡	1. 汽车蜡或棕榈蜡 2. 凡士林 3. 石蜡 5~10 汽油 90~95 4. 石蜡 42 凡士林 8 松节油 15 汽油 35	防粘连性好, 使用方便, 成本低, 毒性小, 使用温度低	适用于一般情况

有升高温度才能使固化反应继续进行, 趋于完全固化。所谓完全固化是指树脂对特殊应用所能提供合适物理和化学性能的交联程度, 应当消耗掉所有的反应基团, 实际上这是很难达到的, 只能说各种胶粘剂在不同的固化条件下达到不同的固化程度, 表征了胶粘剂固化时化学反应的程度。无论哪一种胶粘剂高温固化总比室温固化的交联程度高, 如果对胶接性能要求较高, 应先在室温下初固化, 然后再升温继续固化, 使交联反应进一

步完成,使体系接近完全固化的程度。例如环氧-聚酰胺胶是广泛应用的室温固化胶粘剂,但在室温下固化反应不完全,因而胶接强度和耐热性均较低。提高温度后使环氧树脂固化比较完全,胶接强度大为改善。

后固化,是为了改善胶接件性能,或因工艺过程的需要而对基本固化后的胶接件进行的进一步固化处理。一般是在某温度下,保温一段时间,以进一步提高固化交联程度,并可有效地消除内应力,提高胶接强度。

为了获得较好的固化体系,要选用合适的固化剂,且须配合适当的固化条件,即温度、时间、压力,也称为固化过程三要素。当配合不当时会导致欠固化(undercure,即胶粘剂固化不足,引起胶接性能不良的现象)或过固化(overcure,即装配件中的胶粘剂固化时,因温度过高、时间过长等超过胶接工艺要求的固化所引起的胶接性能变坏的现象)缺陷。

(1) 固化温度

固化温度是指装配件中胶粘剂固化所需的温度。胶粘剂固化都需要一定的温度,有的只能在某一温度区间(例如高温)固化,有的可在几个温度区间(例如室温或中温)固化。温度是固化的主要因素,不仅决定固化完成的程度,而且也决定固化过程进行的快慢。每种胶粘剂都有特定的固化温度,低于此温度是不会固化的,适当地提高温度会加速固化过程,并且提高胶接强度。即便是室温固化的胶粘剂,若能适当加热固化,可缩短固化时间,使固化程度更高,因而大幅度提高强度、耐热性、耐水性和耐腐蚀性等性能。

加热固化时升温速度不能太快,升温要缓慢,加热要均匀,最好是在加热过程中分段保温固化,使温度的变化与固化反应相适应。加热固化最好在初固化完成之后进行,如果固化过早,会因胶的流动而严重溢胶,造成缺胶,导致性能恶化,还会使被胶接件错位。

(2) 固化压力

在固化过程中对胶接接头施加一定的压力是很有好处的,可使胶层厚度更为均匀,提高胶粘剂的流动性,易润湿、渗透和扩散,且可以保证胶层与被粘物紧密接触,防止产生气孔、空洞和出现脱胶等缺陷。固化压力据胶粘剂种类和性质而定,一些分子量低、流动性好、固化时不产生低分子产物的胶粘剂,如环氧树脂胶、 α -氰基丙烯酸酯胶、第二代丙烯酸酯胶、不饱和聚酯胶、聚氨酯胶等,只要有接触压力就足够了。所谓接触压力就是由被粘物自身重量所产生的压力或使接头定位的夹持压力,无需另外加压。一些溶剂型胶粘剂,或固化过程中放出低分子物体的胶粘剂,如酚醛-缩醛胶、酚醛-丁腈胶、环氧-丁腈胶、环氧-尼龙胶、环氧-聚砜胶、聚酰亚胺胶等都需要施加 0.1 ~ 0.5 MPa 的压力。一些膜状、粉状、带状、粒状的热熔胶,为使润湿良好,在固化过程中应施加 0.3 ~ 0.5 MPa 的压力。

固化加压的方法有:靠被粘物自重胶层处产生压力的接触加压;在被粘物上面加上一定重量的配重加压;利用杠杆原理施压;靠弹簧作用的弹力加压;利用螺旋夹子、虎钳、扳手等简单工具的夹具加压;利用液压机械施加压力的压机加压;用木制或金属榔头将胶接部位均匀砸实的锤压;以橡胶辊或外粘橡皮的金属辊将被胶接部位滚实的滚压;向橡皮袋内充气,使之压紧被胶接件的气袋加压;将被胶接件置于一种加热加压的圆筒形装置内固化的热压罐加压;用抽真空的方法,对袋内的胶接件施加压力的真空加压。

(3) 固化时间

固化时间是指在一定的温度、压力等条件下, 装配件中胶粘剂固化所需的时间。由于胶粘剂品种不同, 其固化时间差别很大。有的室温下可瞬间固化, 如 α -氰基丙烯酸酯胶、热熔胶; 有的则需几小时, 如室温快固环氧胶; 有的要长达几天, 如室温固化环氧-聚酰胺胶。固化时间的长短又与固化温度密切相关。升高温度可以缩短固化时间, 降低温度时则应适当地延长固化时间, 也就是说固化时间和固化温度具有时温等效性。不过要是低于胶粘剂固化的最低温度, 无论多长时间也不会完成固化, 故固化的时温等效性是有一定前提的。

加热固化到规定时间, 不能将胶接件立即取出急冷, 避免因收缩不均产生高值内应力。应当缓慢冷却到一定温度, 方可从加热设备中取出, 最好是随炉冷却到室温。

无论是室温固化, 还是加热固化, 都必须保持足够的固化时间, 才能固化完全, 获得最佳的胶接强度。固化是获得良好胶接性能的最后过程, 在胶接工艺中极为重要, 应千方百计地使得固化程度较为完全。

1.3.5 检验与整修

在胶接结构生产过程中一直伴随着胶接质量控制和检验过程, 其中包括金属材料、胶粘剂检验、下料后构件尺寸精度、表面处理质量、叠合尺寸精度和固化夹持情况等。当胶接固化完成后, 应当对胶接质量进行最终检验, 主要检测胶接缺陷和薄弱环节。目前检验方法主要有目测法、敲击法、溶剂法、试压法、测量法、超声波法、射线法、声发射法等, 但尚无较为理想的无损检验方法。生产实践中前三种方法采用较多, 对于容器类封闭式重要胶接结构, 可采用试压法。其他检验方法根据试验仪器设备情况和生产要求选用。

1. 检验

目测法就是用肉眼或放大镜观察胶层周围有无翘曲、突起、气孔、剥离、脱胶、裂缝、孔洞、疏松、缺胶、错位、炭化、接缝不良等。若挤出的胶是均匀的, 说明缺胶的可能性不大, 没有溢胶处很有可能缺胶。

敲击法是用圆木棒或小锤轻轻敲击胶接部位, 发出清脆的声音表明胶接良好, 若声音沉闷沙哑, 说明胶层内很可能有大气孔或夹空、离层和脱胶等缺陷。

胶层是否达到完全固化程度, 可用溶剂法检查。手触胶层发粘表明固化不完全(厌氧胶例外), 但有时不发粘也不一定固化完全。检查固化程度的简便方法是用丙酮浸脱脂棉, 敷在胶层暴露部分的表面, 浸润 1~2 min, 看胶层是否软化或粘手, 以此判断是否完全固化。如果胶层不软化、不粘手、不溶解、不膨胀, 表明已完全固化, 否则为未固化或固化不完全。

对于密封件如机体、水套、油管、缸盖等零件的胶接制造或堵漏, 可用试压法(液压)检测有无漏水、漏油现象。一般是加上一定压力后, 保持 3~5 min 应无渗漏和明显的压降。

对于恢复形状的胶接修补, 可用量具测定其是否已达到所要求的外形尺寸。

2. 整修

经初步检验合格的胶接件, 为了易于装配和美化外观, 需要进行适当的整修加工, 刮掉多余的胶, 将胶粘表面磨削得光滑平整。也可进行锉、车、刨、磨等机械加工, 在加工过程中要尽量避免胶层受到冲击力和剥离力。