

国外名校名著

塑料及其共混物焊接

Plastics and Composites Welding Handbook

格雷瓦尔 (Grewell)

[美] 贝纳特 (Benatar) 编

帕克 (Park)

李晓林 王益庆 等译



国外名校名著

塑料及其共混物焊接

[美] 格雷瓦尔 贝纳特 帕克 编
李晓林 王益庆 等译



化学工业出版社
教材出版中心

·北京·

本书收集并对比了所有有价值的焊接方法,以帮助读者选择最适合自己的产品的焊接方法,加深理解每种焊接方法的局限性和优点。主要体现在应用方面,如材料的可焊接性,焊接的优化设计,发现并解决焊接过程中的故障以及焊接质量的检测等,这就使本书成为从事焊接工作的每一个人不可缺少的工具。与此同时,手册还阐述了挤压流动、分子扩散和热传导原理等塑料焊接的基本理论原理。作者还提供了大量实例,帮助读者如何选择某一焊接方法的合适材料和焊件形状。

本书可供焊接工、焊接设备操作工、材料科学家以及研究工作者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

塑料及其共混物焊接/[美]格雷瓦尔(Grewell D. A.),
贝纳特(Benatar A.),帕克(Park J. B.)编;李晓林,
王益庆等译. —北京:化学工业出版社,2006.7

(国外名校名著)

书名原文:Plastics and Composites Welding Handbook
ISBN 7-5025-8770-5

I. 塑… II. ①格…②贝…③帕…④李…⑤王… III. 塑料
制品-焊接工艺 IV. TQ320.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第075923号

Plastics and Composites Welding Handbook/by Grewell, Benatar, Park
ISBN 3-466-19534-3

Copyright©2003 by Carl Hanser Verlag. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Carl Hanser Verlag

本书中文简体字版由 Carl Hanser Verlag 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。
未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2004-3023

国外名校名著

塑料及其共混物焊接

[美]格雷瓦尔 贝纳特 帕克 编

李晓林 王益庆 等译

责任编辑:杨菁

文字编辑:徐雪华

责任校对:陶燕华

封面设计:郑小红

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13 1/4 字数 339 千字

2006年8月第1版 2006年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8770-5

定价:35.00元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

译者前言

随着材料工业生产的迅速发展，塑料及其与金属的复合材料的应用，以其重量轻、比强度高、耐腐蚀、摩擦力小、易加工等优点备受人们的重视，塑料的各种制品已经广泛渗透到人们日常生活的各个领域，同时也被广泛地应用到航空、船舶、汽车、电器、包装、玩具、电子、纺织等行业。但是，由于注塑、挤出加工工艺等方面的原因，相当一部分形状和结构复杂的塑料产品不能一次加工成型，这就需要一种工艺把多个零部件无缝连接到一起。通常塑料及其复合材料的连结方法有三种，即机械连接、黏合剂黏结和焊接。机械连接包括使用如金属或塑料螺钉的单独紧固件，进行铆合或压合接头连接。黏合剂黏结是将黏合剂涂于将要连接的部件之间，起到连接各部件的作用。焊接是通过加热将界面处的聚合物熔融或软化，在一定的压力和时间作用下，从而使聚合物分子链通过界面进行扩散并形成链缠结，最终获得焊接点强度。

本书主要涉及塑料焊接工艺，包括：塑料及其共混物焊接的基本步骤、热板焊接、热气焊接、挤出焊接、内植感应（电磁感应）焊接、内植阻抗焊接、超声波焊接、线性和轨道式振动焊接、旋转焊接、射频焊接、红外与激光焊接、微波焊接、焊接方法选择指南和焊接质量检测等内容。此外，还阐述了高聚物材料挤压流动、分子扩散和热传导原理等塑料焊接的基本理论。以此希望读者能够对材料的可焊接性和焊接过程的优化设计有更加深入的了解，加深理解每种焊接方法的优点与局限性，帮助选择最适合自己产品的焊接方法。

本书分别由北京市化工学校陈艳（序言，1~5章）、北京化工大学材料科学与工程学院张亚杰（6~9章）、刘涛（10~13章）、高翔（14、15章，索引）翻译，全书由北京市“新型高分子材料制备与成型加工重点实验室”李晓林和王益庆统稿。在本书的翻译整理过程中，还得到了张惠峰博士，辛晓、宋阳、郭爽等硕士研究生的大力帮助，在此深表谢意。

译者
2006. 4

序 言

焊接是在生产塑料和聚合物复合材料产品中进行连接的一种重要方法。随着塑料及聚合物制品应用领域的不断扩大，快速、可靠和高质量的焊接方法越来越受到人们的重视。另外，随着聚合物和聚合复合材料制品的广泛应用，对焊接结构的需求也不断增加。由于焊接一般是生产过程中的最后一个步骤，可以显著增加产品的附加值，所以认真考虑和选择合适的焊接方法非常重要。这就要求对每种焊接方法和所有焊接步骤的物理特性和现象有一个基本了解。此外，还需要考虑如何选择焊接方法以及采用何种方法评价焊接质量。只有了解了这些信息才能在产品设计和生产过程中考虑和选择合适的焊接方法。

本书可供焊接工、焊接设备操作工、设计工程师、制造工程师、化学工程师、材料科学家以及研究工作者阅读和参考。本书的每章都由焊接领域的资深专家撰写，他们在材料、工艺现象、焊接设备和焊点设计等方面有丰富的经验。另外，作者还提供了许多应用实例，帮助读者如何选择某一焊接方法的合适材料和焊件形状。本书还提供了尽可能多的基础知识和相关参考文献，便于读者获得更多更详细的相关信息。

在此，作者感谢所有为本书编写和出版付出心血的同仁。首先感谢参与本书各章编写工作的各位专家。其次要感谢为本书提供焊接应用实例、零部件和焊接设备图片的所有公司。特别要感谢 Branson Ultrasonics 公司的 Ed Samuels 和 Bonnie Stephens，北美 Wegener 公司的 Dagmar Ziegler，以及 Ashland Specialty Chemical company Emabond Systems 的 Steve Chookazian 对本书撰写的大力帮助。我们还要特别感谢 Hanser 出版社的编辑 Christine Strohm 博士在出版本书过程中对我们的大力支持。另外 Christin Strohm 博士还为本书的编辑和文字润色花费了大量时间和精力，在此表示感谢。

哥伦布，OH，戴维·格雷瓦尔
哥伦布，OH，亚伯拉罕·贝纳特
底特律，MI，约·帕克

目 录

1 简介	1
1.1 塑料和复合材料的连结	1
1.2 塑料和复合材料	2
1.3 焊接方法分类	4
1.4 本手册编写目的	4
1.5 手册的使用	5
1.6 有关聚合物的推荐阅读书目	5
1.7 有关复合材料的推荐阅读书目	5
2 塑料及复合材料焊接基本步骤	6
2.1 焊接简介	6
2.2 焊接的表面处理	6
2.3 焊接加热	6
2.4 焊接加压	10
2.5 焊接过程中分子间扩散	12
2.6 焊接冷却	14
2.7 参考文献	15
3 热板焊接	16
3.1 热板焊接简介	16
3.2 热板焊接工艺	16
3.2.1 常规热板焊接	16
3.2.2 改进热板焊接	17
3.2.3 焊接工艺参数	19
3.2.4 熔融层厚度确定	20
3.3 热板焊接质量控制	21
3.3.1 工艺参数控制	21
3.3.2 统计工艺控制 (SPC)	21
3.3.3 连续工艺控制	21
3.4 热板焊接设备	21
3.4.1 半自动焊接设备的操作步骤	21
3.4.2 全自动焊接设备的操作步骤	22
3.5 焊点和焊件设计	24
3.6 热板焊接的应用	27
3.6.1 生产应用	27
3.6.2 塑料管材的热板焊接	29
3.7 材料的可焊性	33
3.7.1 材料的影响	33
3.7.2 不同热塑性材料的焊接	34
3.7.3 添加剂	34
3.7.4 回收材料	34
3.7.5 湿度	34
3.7.6 不同熔体黏度塑料的焊接	34
3.8 热板常见问题	35
3.9 致谢	36
3.10 参考文献	36
4 热气焊接	37
4.1 热气焊接简介	37
4.2 热气焊接工艺特性	37
4.3 热气焊接工艺	38
4.3.1 手工焊接	40
4.3.2 速焊	40
4.3.3 焊接稳定性	41
4.4 热气焊接设备	42
4.4.1 热气枪	42
4.4.2 气源	42
4.4.3 温度控制	42
4.4.4 焊嘴	43
4.5 热气焊接焊点设计	43
4.6 热气焊接应用	44
4.7 参考文献	45
5 挤出焊接	46
5.1 挤出焊接简介	46
5.2 挤出焊接工艺特性	46
5.3 挤出焊接工艺	47
5.4 挤出焊接设备	48
5.4.1 可移动焊头固定挤出机	49
5.4.2 手动或手持挤出焊接机	49
5.4.3 膜焊接系统	50
5.4.4 手工装填焊条焊接机	50
5.4.5 熔体腔可移动焊接机	50
5.4.6 焊脚	51
5.5 挤出焊接焊点设计	52
5.6 挤出焊接应用	53
5.7 参考文献	55
6 内植感应 (电磁感应) 焊接	56
6.1 内植感应焊接简介	56
6.2 内植感应焊接工艺特性	56
6.3 内植感应焊接工艺	57
6.4 内植感应焊接设备	58
6.5 内植感应焊接焊点设计	59
6.6 内植感应焊接材料的可焊性	60

6.7	内植感应焊接应用	61	9.2.2	轨道式振动焊接	99
6.8	参考文献	62	9.2.3	工艺控制	100
7	内植阻抗焊接	63	9.3	线性和轨道式振动焊接工艺特性	100
7.1	内植阻抗焊接简介	63	9.4	线性和轨道式振动焊接设备	103
7.2	内植阻抗焊接工艺	64	9.4.1	线性或轨道式振动焊接设备	103
7.3	内植阻抗焊接工艺特性	66	9.4.2	焊件夹具	105
7.4	内植阻抗焊接电源和电力供给	66	9.5	线性和轨道式振动焊接焊点和焊件 设计	106
7.5	内植阻抗焊接应用	67	9.5.1	焊点设计——无溢料设计	106
7.5.1	热塑性塑料管材电熔焊接	67	9.5.2	焊点设计 溢料设计	107
7.5.2	使用编织带的内植阻抗焊接	70	9.5.3	最佳焊点设计方案选择	109
7.5.3	先进复合材料的内植阻抗焊接	70	9.5.4	焊件设计	109
7.6	参考文献	71	9.6	线性和轨道式振动焊接应用	110
8	超声波焊接	72	9.7	线性和轨道式振动焊接材料的可 焊性	110
8.1	超声波焊接简介	72	9.8	线性和轨道式振动焊接设备设置	112
8.2	超声波焊接工艺	73	9.8.1	焊接参数的设置	112
8.2.1	切入式超声波焊接	73	9.8.2	振幅和频率	112
8.2.2	连续超声波焊接	74	9.8.3	焊接力/压力	113
8.2.3	工艺控制	74	9.8.4	冷却时间	113
8.3	超声波焊接工艺特性	75	9.8.5	焊接模式	113
8.3.1	近场焊接	75	9.9	参考文献	115
8.3.2	远场焊接	77	10	旋转焊接	117
8.4	超声波焊接设备	77	10.1	旋转焊接简介	117
8.5	超声波焊接焊点及焊件设计	82	10.2	旋转焊接工艺	117
8.5.1	焊件设计的重要性	82	10.2.1	旋转焊接工艺	117
8.5.2	设计要素	82	10.2.2	旋转焊接模式	118
8.5.3	能量控制器设计	82	10.3	旋转焊接工艺特性	118
8.5.4	剪切焊点	83	10.3.1	工艺步骤	118
8.5.5	焊件设计	83	10.3.2	固-固摩擦生热（阶段Ⅰ）	119
8.5.6	超声波导入	85	10.3.3	黏弹生热（阶段Ⅲ）	120
8.5.7	超声波铆接	86	10.4	旋转焊接设备	121
8.5.8	点焊	86	10.4.1	设备组成	121
8.6	超声波焊接应用	87	10.5	旋转焊接应用	123
8.6.1	切入焊接应用	87	10.5.1	焊点设计	124
8.6.2	连续式焊接应用	89	10.6	旋转焊接材料的可焊性	125
8.7	超声波焊接材料的可焊性	89	10.7	旋转焊接设置和常见问题	125
8.7.1	材料性能	89	10.8	参考文献	126
8.7.2	填料	90	11	射频焊接	127
8.7.3	材料	91	11.1	射频焊接简介	127
8.8	超声波焊接设置及常见问题	92	11.2	射频焊接工艺	127
8.8.1	超声波焊接设置的基本步骤	92	11.2.1	射频焊接	127
8.8.2	常见问题	94	11.2.2	射频封接和裁切	128
8.9	参考文献	96	11.3	射频焊接工艺特性	128
9	线性和轨道式振动焊接	98	11.3.1	电场	128
9.1	线性和轨道式振动焊接简介	98	11.3.2	分子生热	130
9.2	线性和轨道式振动焊接工艺	99			
9.2.1	线性振动焊接	99			

11.4	射频焊接设备	131	13.5.2	HDPE 单波模式微波焊接	169
11.4.1	设备组件	131	13.5.3	尼龙的单波模式焊接	170
11.4.2	夹具设计	132	13.5.4	其他材料	171
11.4.3	设备的选择与功率要求	133	13.6	参考文献	171
11.5	射频焊接应用	134	14	焊接方法选择指南	172
11.6	射频焊接材料可焊性	135	14.1	焊接方法选择简介	172
11.7	射频焊接设置和常见问题	136	14.2	焊接方法特点综述	172
11.8	参考文献	138	14.2.1	热板焊接	172
12	红外与激光焊接	139	14.2.2	热气与挤出焊接	173
12.1	红外与激光焊接简介	139	14.2.3	内植感应焊接	173
12.2	红外与激光焊接工艺	140	14.2.4	内植阻抗焊接	174
12.2.1	表面加热	140	14.2.5	超声波焊接	174
12.2.2	通过透射红外焊接 (TTIr)	141	14.2.6	振动和轨道焊接	174
12.2.3	红外/激光钎接	142	14.2.7	旋转焊接	175
12.2.4	加热模式	144	14.2.8	介电焊接	175
12.2.5	红外焊接和裁切	146	14.2.9	激光和红外焊接	176
12.3	红外与激光焊接工艺特性	146	14.2.10	微波焊接	176
12.3.1	电磁光谱	146	14.3	焊接方法的选择	177
12.3.2	分子吸收及复合材料之间的作用	147	14.3.1	材料特性	177
12.3.3	热方程	150	14.3.2	焊件尺寸和焊点形状	177
12.4	红外与激光焊接设备	151	14.3.3	生产要求和成本分析	178
12.4.1	设备组件	151	14.3.4	如何选择最佳焊接方法	179
12.4.2	红外源	152	14.4	工业应用实例	179
12.5	红外与激光焊接应用	154	14.4.1	热板/热工具焊接	179
12.6	红外与激光焊接材料的可焊性	156	14.4.2	热气和挤出焊接	181
12.6.1	添加剂和填料的影响	157	14.4.3	内植感应焊接	181
12.6.2	小粒子和着色剂的影响	158	14.4.4	超声波焊接	181
12.7	红外与激光焊接设置和常见问题	158	14.4.5	振动和轨道焊接	182
12.8	参考文献	159	14.4.6	旋转焊接	182
13	微波焊接	161	14.4.7	射频焊接	183
13.1	微波焊接简介	161	14.4.8	激光和红外焊接	184
13.2	微波焊接工艺	161	15	焊接质量检测	185
13.3	微波焊接工艺特性	162	15.1	非破坏性试验	186
13.3.1	微波加热	162	15.1.1	直观检测	186
13.3.2	吸收微波的导电聚合物	163	15.1.2	X 射线及超声波检测	188
13.3.3	微波应用模式	163	15.1.3	密封性检测	189
13.3.4	生热速率	165	15.1.4	高压检测	190
13.4	微波焊接设备	167	15.2	破坏性试验	191
13.4.1	设备组件	167	15.2.1	拉伸试验	191
13.4.2	应用	168	15.2.2	拉力冲击试验	193
13.5	微波焊接材料的可焊性	168	15.2.3	弯曲试验	194
13.5.1	HDPE 多波模式微波焊接	168	15.2.4	拉伸蠕变试验	196
			15.3	参考文献	200

1 简介

Avraham Benatar

1.1 塑料和复合材料的连结

塑料和复合材料在汽车、航空、基础设施、包装、电器、玩具等方面的应用日益广泛。塑料和复合材料具有如下优势。

- 比强度（强度/密度）高
- 比模量（模量/密度）高
- 可设计性强
- 制造成本低
- 耐腐蚀性好
- 使用寿命长

聚合物及聚合物基复合材料的多样性使其具有使用选择性，有时甚至可根据客户的要求来决定。因此，这一类材料在苛刻条件下的应用越来越多。人们在对现有聚合物材料进行改性从而得到新材料方面的不断探索，进一步增加了这些材料的潜在用途。

连结工艺是制造塑料和聚合物复合材料部件的关键步骤。随着对复合材料部件需求的增加，尤其是结构部件，连结工艺应用也越来越广。以下情况需要进行连接。

- 由于形状复杂或成本的原因，无法进行部件的组合
- 同一个结构上使用材料不同
- 需要拆分
- 需要对损伤进行修补

需要慎重考虑接头材料，或者说是考虑接头采用材料可能发生的腐蚀。如，选择材料时，如果轻质和耐腐蚀性是主要条件，就不能使用金属扣件连接。在塑料及其复合材料的接头设计中要考虑以下重要的因素。

- 通过接头所传递载荷的面积和大小
- 接头处所承载的载荷类型
- 部件的几何形状
- 使用环境
- 可重复性及可靠性
- 期望寿命

塑料及其复合材料的连结方法主要可分为三类：机械连接、黏合剂黏结和焊接（见图 1.1）。机械连接包括使用如金属或塑料螺钉的单独紧面件，以及采用可嵌入部件中的整体设计，如铆合或压合接头。黏合剂黏结是指将黏

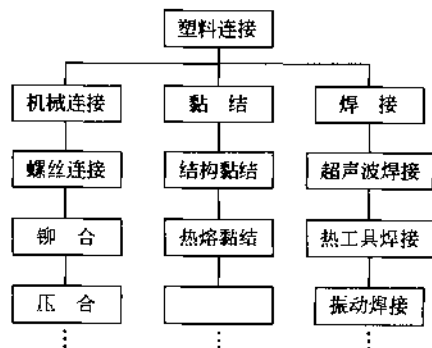


图 1.1 塑料和复合材料的连接方法分类图

合剂涂于将要连接的部件之间，起到连接各部件以及传递接点处应力的作用。焊接或熔接工艺中，通过加热将界面处的聚合物熔融或软化，从而使聚合物分子链通过界面进行扩散并形成链缠结，获得熔接点强度。以上每一类方法中都包括多种具有广泛用途的连接方法。本手册仅主要涉及焊接工艺，关于机械连接和黏合剂连接工艺在其他类似的工具书中有介绍。

1.2 塑料和复合材料

塑料是一种合成聚合物材料。“聚合物”一词来源于希腊语中的“poly”，和“méros”

两个词，即“多”和“部分”的意思。因此，聚合物是由许多重复单元构成的长链大分子，重复单元通常称为“mers”。类似的，低聚物是指由少量重复单元（一般为10个左右）组成的分子。以聚乙烯大分子为例，如图1.2所示，乙烯气体分子是聚合成乙烯低聚物和聚乙烯大分子的单体。

通过改变重复单元（链节），可以得到多种的聚合物。表1.1和表1.2为乙烯基及亚乙烯基聚合物的一些例子。也可以通过改变主链上碳原子间的化学键（如碳碳双键或三键）合成出大分子，或用其他原子或化学基团代替部分碳原子得到不同的聚合物。共

聚物分子链中包含一种以上的重复单元，如ABS分子由丙烯腈、丁二烯、苯乙烯三种结构单元通过化学键链接在一起构成长链大分子。因此，聚合物的数量和种类似乎无穷无尽。

表 1.1 乙烯聚合物示例

$$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ | & | \\ \text{C} & = & \text{C} \\ | & | \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$$

(a)

$$\begin{array}{ccccccccccc} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \\ & | & | & | & | & | & | & | & | & | & \\ \text{H} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{H} \\ & | & | & | & | & | & | & | & | & | & \\ & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \end{array}$$

(b)

$$\begin{array}{ccccccc} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & | & | & | & | & & | & | & | & | \\ \text{H} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & \cdots & \text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{H} \\ & | & | & | & | & & | & | & | & | \\ & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} \quad \cdots \quad \left[\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ | & | \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ | & | \\ \text{H} & \text{R} \end{array} \right]_n$$

(c)

重复单元	R	重复单元	R
乙烯	H	丙烯腈	CN
氯乙烯	Cl	苯乙烯	
丙烯	CH ₃		

表 1.2 亚乙烯聚合物示例

$$\begin{array}{c} \text{H} & \text{R}'' \\ | & | \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ | & | \\ \text{H} & \text{R}' \end{array}$$

重复单元	R'	R''	重复单元	R'	R''
异丁烯	CH ₃	CH ₃	异丁烯酸甲酯	CH ₃	COOCH ₃
偏二氯乙烯	Cl	Cl			

聚合物主要分为两类，即热塑性和热固性（如图1.3）。顾名思义，热固性指通过热固化为最终形状，而热塑性指可加热熔融并可再成型。长的聚合物分子，也被称为链，由通过

如聚乙烯中碳—碳键（如图 1.2）的主化学键相连的重复单元构成。

热塑性塑料是由通过较弱的次级化学键结合在一起的聚合物分子链组成，因此当热塑性塑料受热时，分子间的弱次级化学键断裂，相邻分子链产生相互滑移，使聚合物可再成型。

对于热固性塑料，聚合物长链通过称为交联键的主化学键相结合（如图 1.4）。因此，当形成交联的化学反应完成后，再加热如果链上的碳碳键没有断裂的话，交联键也不会断裂。继续加热到一定程度后，分子链断裂成小的片段，发生降解。热固性也可通过支化形成（如图 1.4）。而对于焊接和熔接，比较理想的是使分子链在焊接界面扩散而不发生降解。所以，热固性塑料进行焊接或熔接加工不太可能，除非在极少数情况下可以破坏交联而不发生分子链降解。

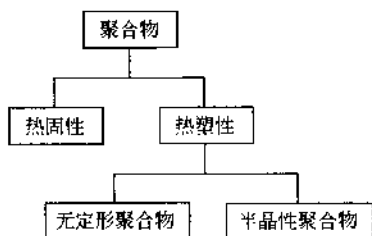


图 1.3 聚合物类型

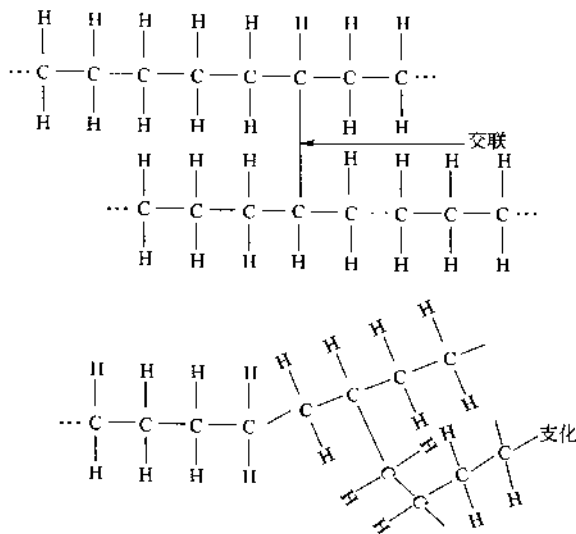


图 1.4 通过交联和接枝形成的热固性塑料

热塑性聚合物分子由受热可断裂的次级化学键结合而成，这样热塑性聚合物分子链可以相互滑移，从而在焊接界面扩散，所以热塑性聚合物可以进行焊接加工。如图 1.3 所示，热塑性聚合物又分为两类：无定形和半结晶性。无定形热塑性聚合物的长分子链相互缠结、盘绕，或者带有较长的侧链，因此分子链处于无序的自由缠结状态。半结晶性热塑性聚合物由可形成高度有序和微晶致密结构的长链线性分子链构成。然而，这些长链分子不能形成完全高度有序结构，因此材料中还存在一些非晶区，由此被称为半晶聚合物。

无定形聚合物在玻璃化转变温度（ T_g ）以下的行为类似于玻璃态固体。在玻璃化温度以上，无定形聚合物发生软化，从而可以再成型。虽然半结晶性聚合物也存在玻璃化转变温度，但它们还存在一个熔融温度（ T_m ），即晶区熔融的温度。因此，半结晶性聚合物在玻璃化转变温度以上，熔融温度以下的温度范围内可用作结构性材料。例如，高密度聚乙烯（HDPE）的玻璃化温度约 -120°C ，但在不超过 75°C 的范围内它都具有可用的固体性能。图 1.5 表明，无定形聚合物的黏弹模量在超过玻璃化转变温度后迅速下降，而半结晶性聚合物的黏弹模量在玻璃化温度以上只有轻微下降，但高于 T_m 后大幅下降。

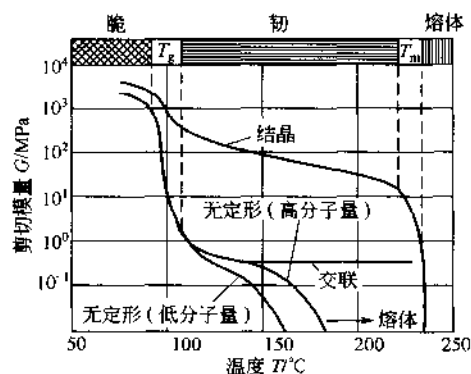


图 1.5 无定形、半晶和交联聚合物的剪切模量力学性能的变化对聚合物接头有很大影响。

1.3 焊接方法分类

焊接方法通常根据所采用的加热方式分类。所有焊接方法都可以分成两大类：内加热和外加热（见图 1.6）。内加热法又分成两类：机械加热和电磁加热。外加热法通过对流或传导来加热焊接表面，包括热工具、热气、挤出、内植感应和内植阻抗焊接。

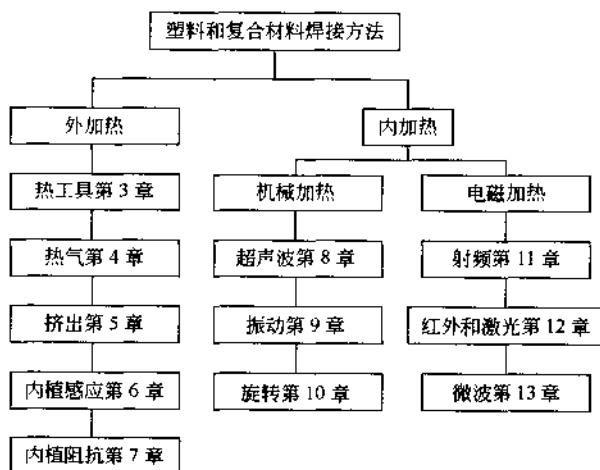


图 1.6 塑料和复合材料焊接方法分类

机械内加热法是通过表面摩擦或分子间摩擦将机械能转化为热，包括超声波、振动和旋转焊接。

电磁内加热法依赖于吸收电磁辐射从而转化为热，包括红外线、激光、射频和微波焊接。

1.4 本手册编写目的

本手册为读者提供了关于焊接方法的信息。每一章都由焊接领域的资深专家编写，他们在焊接所涉及的材料、工艺现象、设备以及接头设计等方面有丰富的经验。书中还提供了很

多实例,以帮助工程师在具体实践中正确选择材料和设计部件几何形状。虽然本手册不可能包括所有知识,但手册中提供了大量基础知识和一系列有关参考书,使本书中未尽的细节及信息得以补充。

1.5 手册的使用

手册主要包括 6 个部分:

(1) 塑料焊接基础——第 2 章

(2) 外加热焊接法(见图 1.6)

① 热板(热工具)焊接——第 3 章

② 热气焊接——第 4 章

③ 挤出焊接——第 5 章

④ 内植感应(电磁)焊接——第 6 章

⑤ 内植阻抗焊接——第 7 章

(3) 机械内加热焊接法

① 超声波焊接——第 8 章

② 直线或轨道振动焊接——第 9 章

③ 旋转焊接——第 10 章

(4) 电磁内加热焊接法

① 射频焊接——第 11 章

② 红外或激光焊接——第 12 章

③ 微波焊接——第 13 章

(5) 工艺选择——第 14 章

(6) 焊接质量检测——第 15 章

本手册可全书通读,同时各章节相对独立,也可根据需要阅读部分章节。其中第 1, 2, 14, 15 章对所有读者都是有幫助的。对于具体的某个方面如果需要了解更深入的内容,读者可进一步查阅每章后所附参考文献。有的章节后附有推荐阅读书目。

1.6 有关聚合物的推荐阅读书目

《材料科学与工程要素》, Van Vlack, L. H., 1975, Addison-Wesley, 第 7 章

《聚合物科学与工程》, Fried, J. R., 1995, New Jersey

《聚合物科学教材》, Billmeyer, F. W., 1984, John Wiley & Sons, New York

1.7 有关复合材料的推荐阅读书目

《纤维复合材料的分析与性能》, Agarwal, B. D. and Broutman, L. J., 1990, John Wiley & Sons, New York

《碳材料及石墨复合材料技术》, Delmonte, J., Van Nostrand Reinhold, 1981, New York

《复合材料手册》, Schwartz, M. M., 1984, McGraw-Hill, New York

《复合材料手册》, Luhr, G., 1982, Van Nostrand Reinhold, New York

2 塑料及复合材料焊接基本步骤

Avraham Benatar

2.1 焊接简介

热塑性塑料及热塑性复合材料的焊接是指通过加热使聚合物界面熔融（或软化）并熔接，从而将部件连接在一起的加工方法。由于界面强度是由界面处聚合物长链分子间扩散形成的，所以有时也称为熔接。这种简单的定义表明了热塑性塑料焊接的实质。如果具体分析焊接过程，可以将其分成5个步骤。有的焊接过程中这5个步骤是依次进行的，而有的则同时进行。下面以热板焊接为例来说明这5个步骤（热板焊接在第3章有详细介绍）：第一步，表面必须经过清理和切削，以保证其表面清洁，并且热板与所要焊接的部件相匹配。这一步骤称为表面处理。第二步是加热，将部件与热板接触，使两个部件界面处的聚合物熔融。第三步加压，此时加热板缩回，焊接部件熔融的界面被压在一起。第四步分子间扩散，一旦熔融的聚合物层与层之间达到充分接触，就会发生分子间的扩散。第五步冷却，即焊接界面处熔融聚合物开始冷却。以上简要介绍了焊接步骤，下面将具体描述每一步骤。

2.2 焊接的表面处理

表面处理是热塑性塑料或热塑性复合材料准备进行焊接的第一步。采用手工或半自动焊接法时，表面处理尤为重要，因为手工处理过程中造成表面污染的可能性较大。典型的表面处理包括机械加工或清洁。表面机加工主要是为了使表面平整，或能与另一部件焊接表面相匹配，在某些情况下，还需要像热气焊法一样，在焊件表面加工出一个凹槽或斜面。在一些极端情况下，可能需要采取更复杂的机械加工及化学清洗。如表面打磨后还需进行溶剂清洗。在某些情况下，可能在用化学浸蚀除去表面污物层后，还需用溶剂清洗。但是，如果必须保证表面结构及性能不改变的话，就不能进行机械及化学表面处理。

自动焊接法中很少进行表面处理，在这种情况下部件表面的主要污染源是模压时模具上的脱模剂。所以一般情况下最好的办法是在模具表面有一层隔离膜，以防脱模剂污染部件。通常是在模具表面引入一个热固性隔离膜，让其在模具表面固化并紧贴在模具表面上。Benatar 及 Gutowski^[1]评价了脱模剂对热塑性复合材料超声波焊接的影响。研究发现，即使使用非迁移性脱模剂，仍然有脱模剂迁移到部件表面。但如果脱模剂经过面化后，则迁移量很小，对部件的超声波焊接没有明显影响。若将脱模剂直接在热塑性复合材料表面固化，则不能进行超声波焊接。不同类型污染物对焊接的影响，还需进行更多研究。

2.3 焊接加热

热塑性和热塑性复合材料焊接可以采用多种加热方法。对于所有焊接方法，为了熔融和

软化聚合物，都只加热邻近焊接面的表面，这是因为：

- 加热和熔融一个薄层比加热大块材料能效更高。
- 由于聚合物的热导率较低，只熔融接头附近的聚合物比等待通过对流和传导将整个聚合物熔融时间短。

■ 将聚合物整体进行熔融或软化后，会使部件在加热的过程中不能支撑而发生扭曲和变形。对于含大量纤维的高级复合材料，不施加压力下直接加热会使复合材料中产生空洞（见图 2.1），该过程称为逆硬化（空化）^[1]。因此，对这些材料表面进行加热要求更加苛刻，特别是对于允许施压加热的焊接，以及可以避免或最小化逆硬化（空化）的焊接。

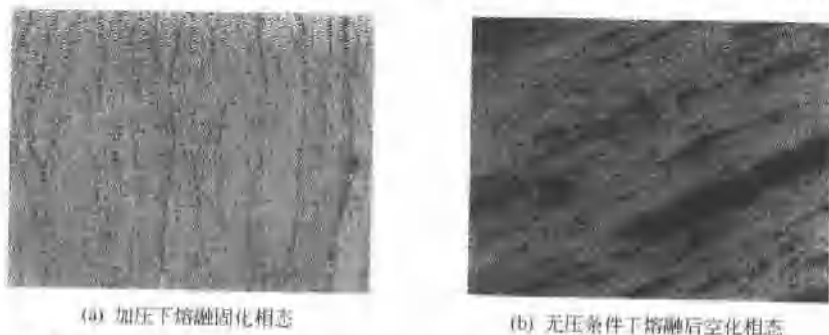


图 2.1 聚合物/石墨复合材料加压 (a) 和不加压 (b) 熔融后固化相态

根据所采用的加热方法焊接一般分为以下三类。

(1) 通过对流和传导外加热焊接表面的外加热法，包括：

- ① 热板（热工具）焊接——第 3 章
- ② 热气焊接——第 4 章
- ③ 挤出焊接——第 5 章
- ④ 内植感应（电磁）焊接——第 6 章
- ⑤ 内植阻抗焊接——第 7 章

(2) 通过表面摩擦及分子间摩擦将机械能转化为热能的机械内加热法，包括：

- ① 超声波焊接——第 8 章
- ② 线性或轨道振动焊接——第 9 章
- ③ 旋转焊接——第 10 章

(3) 通过吸收电磁辐射并转化为热能的电磁内加热法，包括：

- ① 射（高）频焊接——第 11 章
- ② 红外或激光焊接——第 12 章
- ③ 微波焊接——第 13 章

通常认为加热是焊接过程中最重要的步骤，因为部件表面必须形成一薄层熔融层或软化层才能进行焊接。这层熔融层或软化层是为了保证界面层间能够发生流动和紧密接触，从而发生分子间扩散和链缠结。可以预料，对于无定形聚合物和半结晶性聚合物，对加热输入的热量以及熔融或软化所要求的温度不同。无定形聚合物必须加热到材料的玻璃化温度以上才能发生流动和扩散。但是，若软化聚合物的温度与玻璃化温度非常接近，那么分子间扩散会需要很长时间。为了缩短焊接时间，对大多数无定形聚合物来说，推荐焊接加热温度为约高于玻璃化温度 100℃ 以上。半结晶性聚合物的熔融层必须高于熔融温度才能形成，这就要求输入更高的热量克服熔融吸热。在高于玻璃化温度而低于熔融温度时，多数分子链仍然被束

缚在晶区，不能发生流动和扩散。因此，对于半结晶性聚合物为了保证聚合物在整个焊接界面的熔融，一般推荐的焊接加热温度要达到高于熔点 50℃ 以上。

加热速率及热传递影响焊接速率及熔融层或软化层厚度，因此控制加热非常重要。一般情况下，机械内加热法的加热速率最快，周期最短，产生的熔融或软化层最薄。电磁内加热具有中等的加热速率、周期及熔融软化层厚度。外加热法一般加热速率最慢、周期最长、熔融软化层最厚。

热传递在焊接中也很重要，因为它影响熔融速率和熔融或软化层厚度。一般情况下，热传递有传导、对流、辐射三种形式。图 2.2 对几种热传递方式进行了简单比较，通过热传导传至部件的热量远大于通过对流和辐射传递到周围空气中的热量。因此，在大部分热流分析中可以忽略对流和辐射的影响，除非采用对流和辐射加热。当在复合材料中加入纤维、颗粒等提高了热导率后，部件加热过程中熔融层到内部的热量损失也会增加。但若在复合材料表面加一层热塑性薄膜或树脂膜来隔绝热的话，会大幅降低这种热损失。图 2.3 对 PEEK/石墨复合材料的热传递进行了分析，可以看出加了绝热层后复合材料的内部热流量明显减少。

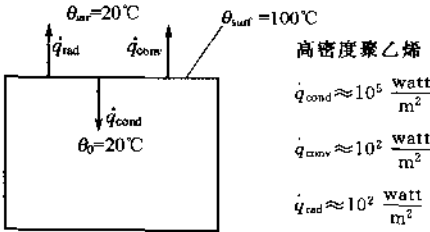


图 2.2 塑料焊接过程中传导、对流、辐射传热损失比较

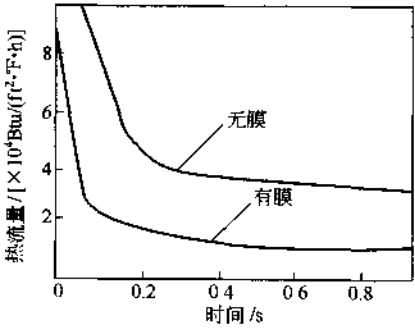


图 2.3 表面树脂层（25μm 厚热塑性塑料表层）对复合材料内部热流量的影响

热塑性复合材料的热导率具有各向异性，使其局部加热过程更为复杂。图 2.4 比较了聚合物、纤维横向排列及纤维纵向排列的聚合物/石墨复合材料中的相对热扩散。由于纤维的热导率较高，所以传入纤维横向排列复合材料中的热量是纯聚合物的 10 倍。图 2.5 为对 PEEK/单向排列石墨复合材料点加热时的等温线。对于各向同性材料，其等温线呈封闭圆

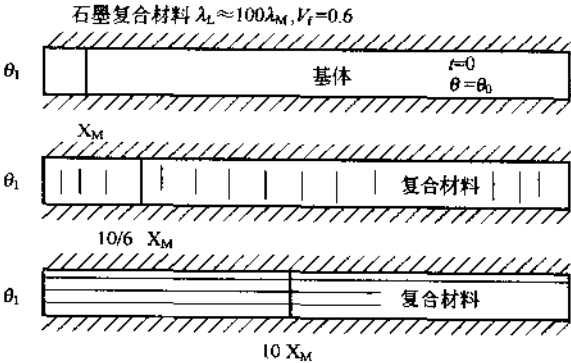


图 2.4 聚合物（上）、聚合物/横向石墨纤维复合材料（中）、聚合物/纵向石墨纤维复合材料（下）相对热扩散距离比较

形。然而对于各向异性材料,由于纵向(纤维排列方向)的热导率比横向高,其等温线呈椭圆形。因此,在对高级复合材料进行焊接时,一些离焊接区较远的区域可能被加热到熔融温度,从而引起这些区域的材料发生逆硬化(空化)。

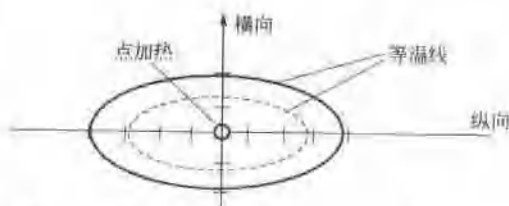


图 2.5 点加热源加热单向复合材料等温线图

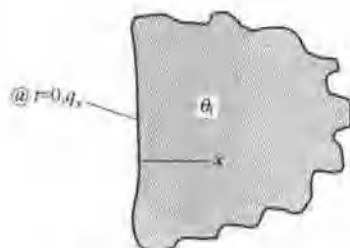


图 2.6 半无限固体表面热流模型图

与金属和高热导率复合材料(石墨纤维复合材料)相比,聚合物和大多数聚合物基复合材料的热导率和热扩散系数较低。因此热量从熔融表面到部件内部的热传导比较慢,所以可将许多部件模型化为半无限固体。如图 2.6,半无限固体从表面沿各个方向无限延伸。此外,大多数焊接工艺中都可以估计表面温度或者表面热流量。第 3 章~13 章中提供了更多关于热塑性塑料焊接工艺中加热及其现象的信息。在某些简化条件下,当确定了某一焊接表面热流量或温度,就可以利用半无限固体模型估算部件的温度分布。图 2.6 表示了一个表面热流量恒定的半无限固体模型。在这种情况下固体中温度的分布是位置和时间的函数,如方程(2.1)所示^[2]:

$$\theta(x,t) = \theta_i + \frac{2 \cdot q_0}{\lambda} \left[\sqrt{\frac{K \cdot t}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot K \cdot t}\right) - \frac{x}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \sqrt{K \cdot t}}\right) \right] \quad (2.1)$$

其中, θ 表示温度; x 表示位置; t 表示时间; θ_i 表示固体最初温度; q_0 是表面热流量; λ 是热导率; K 是热扩散系数; $\operatorname{erfc}(z)$ 是补偿误差函数。补偿误差函数可通过各种电子数据表软件(如微软 Excel®)或数学软件(Mathcad®或 Matlab®)来计算,这一点很重要。方程(2.1)可以用来估算很多焊接工艺中的温度分布,包括超声波、振动、内植感应、内植阻抗、红外、激光、射频及微波焊接等。

热气焊接和挤出焊接均采用热气加热并熔融焊接件表面。因此,在这些情况下对流传热就显得很重要了。图 2.7 为采用高温流体通过对流加热表面的半无限固体模型,其温度分布可用以下方程描述^[3]:

$$\theta(x,t) = \theta_i + (\theta_f - \theta_i) \cdot \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \sqrt{K \cdot t}}\right) - \exp\left(\frac{x \cdot t}{\lambda} + \frac{K \cdot t}{\left(\frac{x}{h}\right)^2}\right) K \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \sqrt{K \cdot t}} + \frac{\sqrt{K \cdot t}}{\left(\frac{x}{h}\right)} K\right) \right] \quad (2.2)$$

其中, θ_f 是流体温度; h 是表面传导系数。

对于热板焊接,加热过程中表面温度保持恒定。在这种条件下,半无限固体表面也保持恒定温度,如图 2.8 所示。该固体中温度分布可由下列方程描述^[3]:

$$\theta(x,t) = \theta_i + (\theta_s - \theta_i) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \sqrt{K \cdot t}}\right) \quad (2.3)$$

其中, θ_s 是表面温度。当方程(2.2)中传导系数为无穷大时,可简化为方程(2.3)的形式。

研究焊接过程中部件的温度分布非常有用。对大多数工艺,测定熔融层厚度很重要。当焊接区附近的微观结构很重要时,可以利用温度分布函数来估算受热区的尺寸以及可能产生