

实用焊接技术丛书

复合材料的焊接

陈茂爱 陈俊华 高进强 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

实用焊接技术丛书

复合材料的焊接

陈茂爱 陈俊华 高进强 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料的焊接/陈茂爱, 陈俊华, 高进强编著. 北京:
化学工业出版社, 2004.9
(实用焊接技术丛书)
ISBN 7-5025-6128-5

I. 复… II. ①陈…②陈…③高… III. 复合材料-
焊接工艺 IV. TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 094953 号

实用焊接技术丛书

复合材料的焊接

陈茂爱 陈俊华 高进强 编著

责任编辑: 任文斗

文字编辑: 韩庆利

责任校对: 李 林 靳 荣

封面设计: 潘 峰

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 12 字数 288 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6128-5/TH·237

定 价: 28.00 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

前 言

现代复合材料诞生于 20 世纪 40 年代。它具有比强度高、比刚度大、抗疲劳性好、尺寸稳定、耐磨、抗震等优良性能,目前已大量应用于航天航空、化工、汽车、造船、电子及军工等部门。随着科学技术的发展,这类材料必将越来越多地替代金属、陶瓷、工程塑料等单一均质材料,获得更迅速的发展。与任何其他结构材料一样,其开发应用需要多学科相互渗透和相互支持,焊接技术对其推广应用起着举足轻重的作用。

为了适应复合材料发展及推广利用的需要,本书从理论及实用角度介绍了复合钢、连续纤维增强金属基复合材料、非连续增强金属基复合材料、碳/碳复合材料、陶瓷基复合材料、工程塑料及树脂基复合材料的性能特点、应用范围及焊接技术,突出这些材料的焊接方法及工艺特点,以及制造工艺与焊接性之间的关联性。对于一些最常用的复合材料,给出了具体的焊接工艺参数、相关技术数据及接头典型性能,可以指导有关应用场合的焊接生产。本书内容涉及了与复合材料有关的科研和生产中经常遇到的一些难题,给出了解决这些难题的对策或成功经验,力求突出新颖性、全面性、实用性和先进性等特色,能够反映当前复合材料焊接技术的最新发展现状。

本书可供复合材料、焊接、航天航空、冶金、化工、汽车制造等领域的专业技术人员使用,也可供高等院校及科研单位的有关教学和科研人员参考。

本书编写过程中,李亚江教授提供了许多有益的建议,特此表示感谢。

其他写作人员还有:杨敏、魏星、胡庆贤、姜丽岩、张明贤、王怀刚、胡家琨、吕云飞、王娟、刘鹏、郭国林、梁英、马海军等。

限于作者水平有限,书中难免出现错误或不当之处,恳请广大读者批评指正。

陈茂爱

2004 年 8 月 8 日

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 复合材料的分类及特点	1
1.1.1 复合材料的分类	1
1.1.2 复合材料的性能特点	2
1.1.3 复合材料的应用	3
1.2 复合材料的焊接	4
1.2.1 金属基复合材料的焊接特点	4
1.2.2 无机非金属基复合材料的焊接	4
1.2.3 树脂基复合材料的焊接	4
第 2 章 复合钢的焊接	7
2.1 复合钢的类型、性能及应用	7
2.1.1 复合钢的制造方法及分类	7
2.1.2 复合钢的性能	8
2.1.3 各种复合钢的性能特点及应用	11
2.2 不锈复合钢的焊接	14
2.2.1 中厚板的焊接	14
2.2.2 薄板的焊接	22
2.2.3 不锈钢复合管的焊接	23
2.2.4 双复层不锈复合钢板的焊接	24
2.3 镀锌钢的焊接	24
2.3.1 镀锌钢电弧焊	24
2.3.2 电阻焊	26
2.4 镀铝钢及渗铝钢的焊接	33
2.4.1 镀铝钢的焊接	33
2.4.2 渗铝钢的焊接	35
2.5 其他复合钢板的焊接	37
2.5.1 镍及镍合金复合钢板	37
2.5.2 铜复合钢板的焊接	38
2.5.3 钛复层复合钢板的焊接	39
第 3 章 连续纤维增强金属基复合材料的焊接	42
3.1 连续纤维增强金属基复合材料的分类、性能和应用	42
3.1.1 连续纤维增强金属基复合材料的分类	42
3.1.2 连续纤维增强金属基复合材料的性能和应用	43
3.2 纤维增强金属基复合材料的焊接性	46
3.3 连续纤维增强金属基复合材料的焊接工艺	48

3.3.1	连续纤维增强金属基复合材料焊接接头设计	48
3.3.2	纤维增强金属基复合材料的焊接方法	49
第4章	非连续增强金属基复合材料的焊接	62
4.1	非连续增强金属基复合材料的分类、性能及应用	62
4.1.1	非连续增强金属基复合材料的分类	62
4.1.2	非连续增强金属基复合材料的性能和应用	63
4.2	非连续增强金属基复合材料的熔化焊	67
4.2.1	非连续增强金属基复合材料的焊接性	67
4.2.2	非连续增强金属基复合材料的电弧焊	68
4.2.3	非连续增强金属基复合材料的高能密度焊接	71
4.3	非连续增强金属基复合材料的扩散焊	73
4.3.1	非连续增强金属基复合材料的扩散焊特点	73
4.3.2	采用中间层的固态扩散焊接	74
4.3.3	瞬时液相扩散焊接	74
4.4	非连续增强金属基复合材料的其他焊接方法	76
4.4.1	钎焊	76
4.4.2	转动摩擦焊	77
4.4.3	电阻焊	78
4.4.4	电容放电焊	78
4.4.5	搅拌摩擦焊	78
第5章	碳/碳复合材料的焊接	79
5.1	碳/碳复合材料的分类、性能及应用	79
5.1.1	碳/碳复合材料的分类	79
5.1.2	碳/碳复合材料的性能及应用	79
5.2	碳/碳复合材料的焊接	80
5.2.1	碳/碳复合材料的焊接性	80
5.2.2	碳/碳复合材料的扩散连接	80
5.2.3	碳/碳复合材料的钎焊	85
5.2.4	碳/碳复合材料的胶接	87
第6章	陶瓷基复合材料的焊接	89
6.1	陶瓷基复合材料的分类、性能及应用	89
6.1.1	陶瓷基复合材料的分类	89
6.1.2	陶瓷基复合材料的性能及应用	89
6.2	陶瓷基复合材料焊接的基本特点	92
6.2.1	陶瓷基复合材料的焊接形式	92
6.2.2	晶须或颗粒增强陶瓷基复合材料焊接的基本特点	92
6.2.3	纤维增强陶瓷基复合材料的焊接特点	93
6.2.4	陶瓷基复合材料与金属之间的焊接特点	93
6.3	陶瓷基复合材料的焊接方法	94
6.4	陶瓷基复合材料的钎焊	96

6.4.1	金属钎焊方法	96
6.4.2	玻璃钎焊法	104
6.5	陶瓷基复合材料的扩散焊	105
6.5.1	加中间层的扩散焊	105
6.5.2	瞬态液相扩散焊	107
6.6	陶瓷基复合材料的电子束焊接	109
6.7	陶瓷基复合材料的粘接	110
6.7.1	陶瓷表面处理方法	110
6.7.2	胶黏剂	110
6.7.3	磷酸-氧化铜无机胶黏剂	112
6.8	陶瓷基复合材料的其他连接方法	112
6.8.1	机械连接	112
6.8.2	无压固相反应焊接	112
6.8.3	微波焊接	112
第7章	工程塑料的焊接	113
7.1	概述	113
7.2	塑料的分类、性能及应用	113
7.2.1	热塑性塑料	113
7.2.2	热固性塑料	114
7.3	塑料的连接方法	115
7.4	塑料的加热焊	118
7.4.1	热工具焊	118
7.4.2	热气焊	120
7.4.3	挤塑焊	122
7.4.4	电阻加热焊	122
7.4.5	激光焊	123
7.4.6	红外线加热焊	123
7.4.7	感应加热焊	123
7.4.8	介电加热焊	125
7.5	塑料的摩擦焊	126
7.5.1	旋转摩擦焊	126
7.5.2	超声波焊	127
7.5.3	振动焊	129
7.6	塑料的溶剂焊	130
7.6.1	溶剂焊常用的溶剂	130
7.6.2	焊接缺陷及防止措施	131
7.6.3	溶剂焊的使用范围	131
7.7	常见塑料的推荐连接方法	133
7.7.1	乙缩醛均聚物和乙缩醛共聚物	133
7.7.2	ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物)	134

7.7.3	纤维素塑料	134
7.7.4	氟塑料 (PTFE、CTFE、FEP、PVF 等)	135
7.7.5	尼龙	135
7.7.6	聚碳酸酯	136
7.7.7	聚乙烯和聚丙烯	136
7.7.8	热塑性聚酯 (PBT、PET)	137
7.7.9	PEI、PEEK、PES	137
7.7.10	聚酰亚胺	137
7.7.11	聚甲基丙烯酸甲酯塑料 (PMMA)	137
7.7.12	聚苯醚 (PPO)	138
7.7.13	聚苯硫醚 (PPS)	138
7.7.14	聚苯乙烯 (PS)	138
7.7.15	聚砜	139
7.7.16	聚氯乙烯 (PVC)	139
7.7.17	热塑性聚酯	140
7.7.18	热固性塑料	140
第 8 章	树脂基复合材料的焊接	142
8.1	树脂基复合材料的分类、性能和用途	142
8.1.1	树脂基复合材料的分类	142
8.1.2	树脂基复合材料的性能及应用	143
8.2	树脂基复合材料的焊接	147
8.2.1	树脂基复合材料的焊接性	147
8.2.2	树脂基复合材料的焊接方法	147
8.2.3	树脂基复合材料与金属之间的焊接	149
8.3	树脂基复合材料的胶接	150
8.3.1	接头形式的设计	150
8.3.2	粘接工艺	155
8.3.3	胶接接头的缺陷及质量检验	164
8.4	树脂基复合材料的机械连接	166
8.4.1	机械连接的特点及分类	166
8.4.2	接头形式	166
8.4.3	机械连接接头的破坏形式	167
8.4.4	接头几何参数的确定	169
8.4.5	铺层设计	170
8.4.6	紧固件的选用	170
8.4.7	机械连接工艺	173
8.5	混合连接	176
8.6	复合材料的螺纹连接	178
8.6.1	螺纹连接的特点	178
8.6.2	复合材料与金属材料的螺纹连接	178
参考文献		179

第 1 章 概 述

复合材料是指由两种或两种以上的物理、化学性能不同的材料，按一定方式、比例及分布方式制造出来的多相固体材料。通过良好的增强相/基体组配及适当的制造工艺，可充分发挥各组分的长处，弥补其短处，使得到的复合材料具有单一材料无法达到的优良综合性能。

复合材料一般其中一个是连续相，称为基体；另一个或多个是分散相，称为增强相。复合材料的性能不但取决于各相的性能、比例，而且与两相界面性质和增强剂的几何特征（包括增强剂的形状、尺寸、在基体中的分布方式等）有着密切的关系。金属层合材料是一种较特殊的复合材料，两相或多相均是连续的，通常含量较少的相并不是增强材料的力学性能，而是改善材料的防腐性能。由于金属层合材料的基体相一般为钢材，因此通常又称为层合钢。与单一均匀材料相比，复合材料最大的特点在于其性能具有可设计性，人们可根据自己的需要，选择两种或几种材料，按一定的比例组配起来，得到所需的特殊性能。

1.1 复合材料的分类及特点

1.1.1 复合材料的分类

复合材料的分类方法很多，可按照基体、增强相、用途等进行分类，见表 1.1。

表 1.1 复合材料的分类

分类方法	分类名称	说 明
按照基体分	聚合物基复合材料	主要有树脂基和橡胶基等
	金属基复合材料	主要有铝基、镁基、钛基等
	无机非金属基复合材料	主要有陶瓷基、混凝土基及碳/碳复合材料
按照增强相形状分	连续纤维增强复合材料	纤维按照同一方向排列，复合材料具有各向异性，主要有纤维增强树脂、纤维增强金属等几类
	非连续增强复合材料	主要有短纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料和晶须增强复合材料
	层合复合材料	主要为复合钢
	纤维织物、编织体增强复合材料	主要是碳纤维织物、编织体增强碳基复合材料
按应用情况分	工程复合材料	通常指在工程上已广泛应用的复合材料，例如玻璃纤维增强塑料(又名玻璃钢)
	先进复合材料	有碳、硼、芳纶等纤维增强的塑料，金属基复合材料等，它们是比较强度、比弹性模量较大的复合材料
	混杂复合材料	由两种或两种以上的纤维混合或不同纤维的铺层混合构成的复合材料
按增强相的材质分	无机非金属增强复合材料	主要有 C 纤维、B 纤维、SiC 纤维及颗粒、Al ₂ O ₃ 纤维及颗粒、BC ₄ 颗粒等增强的复合材料
	金属丝增强复合材料	主要有钨丝或不锈钢丝增强的铝基复合材料、钢丝增强的树脂基复合材料等
	有机纤维增强复合材料	主要有芳纶纤维增强树脂基复合材料和尼龙丝纤维增强树脂基复合材料

续表

分类方法	分类名称	说 明
按照用途	结构复合材料	利用力学性能的复合材料,例如各种纤维增强树脂基复合材料、碳纤维增强铝基复合材料。如碳纤维/环氧复合材料,玻璃纤维/酚醛复合材料等
	功能复合材料	利用其力学性能以外的所有其他性能的复合材料,如碳/碳耐热复合材料、雷达用玻璃钢天线罩就是具有良好透过电磁波的功能复合材料,导电塑料、光导纤维等也是功能复合材料

1.1.2 复合材料的性能特点

复合材料种类繁多,不同种类的复合材料具有不同的特性。但复合材料也有一些共同的特性,下面主要介绍结构复合材料的性能特点。

(1) 高的比强度和比刚度

材料的强度和刚度与密度之比分别称为比强度和比刚度。表 1.2 比较了几种复合材料与金属的性能。可看出,几种复合材料的比强度和比刚度均高于金属。高的比强度和比刚度意味着能以较轻结构承载同样的载荷,这对于航空、航天及交通车辆来说是非常重要的。

表 1.2 几种复合材料与金属性能的比较

	材 料	密度 /g · cm ⁻²	弹性模量 /GPa	强度 /MPa	比弹性模量 /GPa · g ⁻¹ · cm ³	比强度 /MPa · g ⁻¹ · cm ³
复合材料	40% C _f /尼龙	1.34	22	246	16	184
	连续 S-玻璃纤维/环氧树脂	1.99	60	1750	30.2	879
	高强度 C _f /环氧树脂	1.45	140	1500	21	224
	高弹性模量 C _f /环氧树脂	1.6	240	1079	150	146
	B _f /环氧树脂	2.1	210	1380	100	143
	25% SiC _w /氧化铝陶瓷	3.7	390	900	105	—
	50% Al ₂ O _{3f} /Al 合金	2.9	130	900	49	310
	20% SiC _w /6061Al	2.8	121	586	43	209
	20% Al ₂ O _{3p} /606Al	2.9	97	372	33	128
	B _f /Al 合金	2.65	200	1000	75	82
	35% SiC _f /TC4 钛合金	4.1	213	1724	52	420
金属	Q235 钢	7.86	210	460	27	59
	30CrMnSi 调质钢	7.75	196	1100	25	142
	纯铝	2.7	69	100	26	37
	6061Al	2.71	69	310	25	114
	钛合金	4.42	123	850	28	195
	1Cr18Ni9Ti	7.75	184	539	23	68
	TC4(Ti-6Al-4V)	4.43	114	1172	26	265

注：材料符号的下角 f、w、p 分别表示纤维、晶须和颗粒。

(2) 线膨胀系数小、尺寸稳定性好

复合材料的增强物,如碳纤维、碳化硅纤维、碳化硅晶须、碳化硅颗粒、硼纤维等,均具有很小的线膨胀系数,特别是石墨纤维具有负线膨胀系数,加入相当含量的增强物后,

不仅复合材料的强度和弹性模量显著提高，而且其线膨胀系数也明显下降。并且，还可通过调整增强物的含量获得不同的线膨胀系数，稳定结构尺寸。

(3) 耐疲劳性、断裂韧性好

接合状态良好的增强物/复合材料基体界面既可有效地传递载荷，又能阻止裂纹的扩展，提高材料的断裂韧性和耐疲劳性能。大多数金属材料的疲劳破坏极限强度只有其抗拉强度的40%~50%，而碳纤维增强铝（C_f/Al）基复合材料的疲劳强度为其抗拉强度的70%，碳纤维增强树脂基复合材料则达到了70%~80%。

(4) 破损安全性好

对于纤维增强复合材料，构件过载并发生少量纤维断裂时，载荷会重新迅速分配在未破坏的纤维上，从而使结构件不致在极期内发生整体破坏。

(5) 高温性能好

由于增强纤维、晶须、颗粒在高温下具有很高的强度和弹性模量，因此一般情况下，树脂基复合材料的耐热性比其相应的塑料基体明显提高。而金属基复合材料、陶瓷基复合材料及碳/碳复合材料的高温性能更好。例如铝合金在300℃下的强度下降到100MPa左右，而石墨纤维增强铝基复合材料的强度在500℃下仍能达到600MPa。

(6) 耐磨性好

金属基复合材料，特别是陶瓷纤维、晶须、颗粒增强金属基复合材料具有很高的耐磨性。例如，碳化硅颗粒增强铝基复合材料的耐磨性比基体铝高出几倍，甚至比铸铁还要好。

(7) 减振性好

受力结构的自振频率与材料的比弹性模量之平方根成正比。由于复合材料的比弹性模量高，故具有高的自振频率，因此可有效地防止因共振而导致的结构破坏。同时，复合材料界面具有吸振能力，因此材料的振动阻尼很高。即使发生了振动，复合材料结构的振动幅度也会迅速衰减到零。

1.1.3 复合材料的应用

复合材料是应航天、航空以及先进武器系统的发展要求而发展起来的，目前其应用范围已不再局限于这些军工领域，在交通工具、建筑、医疗及体育器械、机械、化工等部门也获得了广泛应用。

(1) 航天、航空领域

飞机正在从金属结构逐渐演变为复合材料结构，目前，复合材料构件已占到30%左右，无论是树脂基复合材料、陶瓷基复合材料还是金属基复合材料均得到了大量应用，而航天飞机中复合材料结构所占的比例更大。雷达天线罩、固体火箭发动机及燃烧室、卫星本体、太空站等均大量采用复合材料或全部采用复合材料，而且大量的零部件需要焊接或连接。

(2) 汽车及交通运输领域

金属基复合材料已用来制造汽车刹车片、曲轴、活塞和连杆等，还用来制造自行车车架。树脂基复合材料已用来制造自行车架、船体、车厢等。陶瓷基复合材料用来制造发动机部件。

(3) 化工领域

化工容器、管道、防腐设备、水处理设备等已广泛使用不锈钢复合钢板、钛复合钢板等层合复合材料，玻璃钢也已开始用做化工容器的衬里、输酸管道及水处理设备的部件。

1.2 复合材料的焊接

复合材料是由两种或多种材料混合而成的，因此其焊接要比均质材料困难得多。一般来说，对复合材料焊接性影响最大的仍然是其基体。陶瓷基复合材料和树脂基复合材料的焊接性与其基体基本类似，基本上可以用其基体的焊接方法进行焊接。大部分金属基复合材料的焊接性（特别是对于熔化焊来说）与其基体的焊接性相差很大，需要采取一些特殊的措施。

1.2.1 金属基复合材料的焊接特点

金属基复合材料的基体主要是轻质合金，包括铝、镁、钛等。镁的密度最小，但其力学性能及抗蚀性不如铝，钛具有高的比刚度和比强度，但价格较高。因此，应用最多的为铝基复合材料，其次是钛基，镁基较少用。这类材料的焊接要比对应的基体困难得多，主要问题如下。

① 基体与增强物之间的反应 研究表明，在焊接热循环过程中，大部分金属基复合材料的增强相与基体之间会发生物理或化学反应，使材料性能下降。在熔化焊时，几乎所有复合材料中的增强物都会与基体发生不利的反应。

② 熔池的黏度大 由于增强相的存在，增大了熔池金属的黏度，降低液态金属的流动性，焊缝成形较困难。

③ 连接表面的方位对焊接性的影响很大 纤维增强型金属基复合材料具有明显的各向异性，如果连接表面平行于纤维方向，很容易用扩散焊进行连接，而当连接表面垂直于纤维方向时，由于塑性变形较困难，连接难度就较大，需要采用一些特殊措施。

④ 电弧力易破坏增强物 对于纤维增强金属基复合材料，用电弧焊焊接时，电弧力容易将纤维打乱，甚至打断，破坏了材料的连续性，降低了接头性能。

因此，在选择焊接方法时应根据复合材料的具体特点，选择适当的方法，并采取一些必要的措施，表 1.3 给出了常用焊接方法在金属基复合材料焊接上的适用范围及特点。

金属层合板也属于金属基复合材料中的一种，不过这类复合材料比较特殊，所有各相均是连续的。因此，其焊接相对较简单，一般采用电弧焊接进行焊接。焊接时，各个层应分别焊接，并在两者之间焊接过渡层。

表 1.4 给出了各种常见金属基复合材料适用的焊接方法。

1.2.2 无机非金属基复合材料的焊接

这类复合材料包括碳/碳复合材料和陶瓷基复合材料。其共同的特点是熔点高，陶瓷基复合材料无法利用电弧焊等熔化焊方法进行焊接。碳/碳复合材料不能用任何熔化焊方法来连接，只能利用钎焊法、扩散焊法和胶接进行连接。

一般来说，单质陶瓷的连接方法均可以用来连接陶瓷基复合材料，这是因为许多陶瓷材料本身就是一种广义的复合材料，在大多数情况下，复合材料的表面呈现其基体相的特征，由此可见，陶瓷基复合材料连接的基本原则与陶瓷连接的基本原则是相同的。表 1.5 给出了陶瓷基复合材料的常用焊接方法。

1.2.3 树脂基复合材料的焊接

树脂基复合材料有两大类：热塑性树脂基复合材料和热固性树脂基复合材料。热固性树脂基复合材料的基体为交联结构，加热后不能熔化或软化，因此，不能被焊接，只能利用机械连接或胶接方法进行连接。热塑性聚合物基复合材料的基体是依据次价键结合在一起的，在高温下热塑性聚合物的中大分子可自由移动和扩散。这种聚合物加热熔化，冷却固化，因

表 1.3 常用焊接方法在金属基复合材料焊接上的适用范围及特点

焊接方法	焊接工艺	焊接参数	接头强度系数	局限性	应用范围
电弧焊	TIG、MIG	$T_w > T_M$ $t_w = 0.5 \sim 5s$ $p_w = 0 \sim 1MPa$	0.60~0.75	易损伤纤维,接头强度较低	主要焊接颗粒增强和晶须增强金属基复合材料,可焊接各种结构
电阻焊	点焊、缝焊	$T_w > T_M$ $t_w = 0.33 \sim 0.8s$ $p_w = 200 \sim 800MPa$	0.9~0.95	金属基体易挤出,易损伤纤维,增强颗粒易偏聚	板件的拼缝、杆件及承压壳体的密封焊接
扩散焊	真空扩散焊、惰性气体保护扩散焊	$T_w < T_M$ $t_w = 600 \sim 2400s$ $p_w = 5 \sim 10MPa$	0.9~0.95	工艺复杂,时间长,效率低,尺寸受限	坯件的承载焊缝及包层,各种小尺寸的简单构件焊接
激光焊	CO ₂ 激焊、YAG 脉冲激光焊	$T_w > T_M$ $t_w = 0.2 \sim 2s$ $p_w = 0 \sim 1MPa$	最大可达 0.85	增强物极易溶解,极易引起界面反应	板材、棒材的焊接,承压壳体的焊接
电子束焊	真空	$T_w > T_M$ $t_w = 0.2 \sim 2s$ $p_w = 0 \sim 1MPa$	0.8~0.85	增强物易溶解,易引起界面反应	板材、棒材的焊接,承压壳体的焊接
钎焊	电阻钎焊、电阻钎焊、压力钎焊	$T_w < T_M$ $t_w = 0.5 \sim 5s$ $p_w = 1 \sim 100MPa$	0.5~0.6	接头抗腐蚀性差	板件及加强筋的连接,坯件的包层
旋转摩擦焊接		$T_w \leq T_M$ $t_w = 0.5 \sim 5s$ $p_w = 0.5 \sim 1MPa$	0.9~1	不能焊接纤维增强型复合材料	形截面的构件的焊接
搅拌摩擦焊		$T_w \leq T_M$ $t_w = 0.5 \sim 5s$ $p_w = 0.5 \sim 1MPa$	0.9~1	设备复杂,成本高	各种构件的焊接
胶接		$T_w \ll T_M$ $t_w = 0.1 \sim 50h$ $p_w = 1 \sim 10MPa$	0.4~0.6	接头强度低,使用温度低	各种构件

注: T_w 、 p_w 、 t_w 分别为焊接峰值温度、压力及时间。

表 1.4 各种常见金属基复合材料适用的焊接方法

焊接方法	电弧焊钎焊				激光焊	电子束焊	电容储能焊	电阻焊	旋转摩擦焊	搅拌摩擦焊	钎焊	扩散焊	胶接	超声波焊
	TIG	MIG	CO ₂	SAW										
TiC _p /Fe	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓
SiC _f /Ti	○	○	×	×	×	○	×	✓	○	○	✓	✓	✓	✓
B _f /Al	○	○	×	×	×	○	×	✓	○	○	✓	✓	✓	✓
SiC _f /Al	○	○	×	×	×	○	✓	✓	○	○	✓	✓	✓	✓
SiC _w /Al	○	○	×	×	○	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SiC _p /Al	○	○	×	×	○	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Al ₂ O _{3t} /Al	○	○	×	×	×	○	✓	✓	○	○	✓	✓	✓	✓
Al ₂ O _{3p} /Al	✓	✓	×	×	○	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
层合钢板	✓	✓	✓	✓	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○

注: ✓——推荐方法; ○——可选方法; ×——不能使用。

表 1.5 陶瓷基复合材料的常用焊接方法

材 料		等离子 弧焊	电子 束焊	激光焊	扩散焊	瞬态液相 扩散焊	钎焊	胶接
氮化物陶瓷基	纤维增强型	×	×	×	✓	✓	✓	✓
	颗粒或晶须增强型	×	×	×	✓	✓	✓	✓
碳化物陶瓷基	纤维增强型	×	×	×	✓	✓	✓	✓
	颗粒或晶须增强型	×	×	×	✓	✓	✓	✓
氧化物陶瓷基	纤维增强型	×	×	×	✓	✓	✓	✓
	颗粒或晶须增强型	○	○	○	✓	✓	✓	✓

注：✓——推荐方法；○——可选方法；×——不能使用。

此，热塑性聚合物基复合材料既可利用机械连接和胶接进行连接，也可利用熔化焊方法进行连接。

可用于热塑性塑料焊接的所有焊接方法均适用于热塑性聚合物基复合材料的焊接。主要焊接方法有三大类：第一类为外部加热式，包括热气焊、热板焊（热工具焊）、电阻加热焊、红外加热焊或激光焊；第二类为内部加热式，包括介电加热焊、微波加热焊、转动摩擦焊、振动焊（直线摩擦焊）以及超声波焊；第三类为溶剂焊，即利用溶剂溶解被连接件表面，在一定压力下实现连接的方法，这种方法又称溶剂粘接。

尽管热塑性聚合物基复合材料可以利用熔化焊，但树脂基复合材料用得较多的连接方法仍为胶接和机械连接。对于胶接的构件，载荷通过胶层在两个部件之间传递，胶层承受剪切应力。对于机械连接的构件，载荷通过连接元件和连接孔在两个部件之间传递，连接元件通常承受剪切应力，而孔边缘通常承受挤压应力。表 1.6 比较了树脂基复合材料胶接、机械连接和焊接的优缺点。

表 1.6 树脂基复合材料胶接、机械连接和焊接的优缺点

连接方法	优 点	缺 点
胶接	接头上的应力集中较小；刚性连接；良好的疲劳性能；无磨蚀问题；良好的密封性；抗腐蚀；外表面光滑；质量轻；允许轻微的损伤；可用于复合材料构件的修补	只能用于形状简单的接头；连接厚度有限；胶层的质量难以检测；容易受不良环境的影响，胶层易退化；要求高水平的工艺过程控制；对剥离力和厚度方向上的应力很敏感；与其他材料连接时容易引起较大的残余应力；不可拆卸
机械连接	工件的厚度无限制；连接工艺简单；接头质量容易检测；接头形状简单；对环境不敏感；在与纤维平面垂直方向上，接头对剥离力不敏感；无残余应力；拆卸维修方便	应力集中较大；连接接头的柔性较大；疲劳强度特别低；钻孔时易损伤复合材料；易受腐蚀
焊接	应力较小；工艺较简单；不钻孔、不用胶，接头中没有异质材料；耐腐蚀；结构质量小	接头质量难以检测；要求高水平的工艺过程控制；与其他材料连接时比较困难，且容易引起较大的残余应力

第2章 复合钢的焊接

2.1 复合钢的类型、性能及应用

复合钢是通过一定的方式将一种金属包覆在钢材上而得到的、具有优异综合性能的材料。通过精心选择不同的金属复层,可使复合钢在以下几个方面具有比各组成金属更好的性能:抗腐蚀性、抗磨性、韧性、硬度、强度、导热性、导电性等。目前复合钢已广泛用于建筑、电站、压力容器、石油化工等工业部门中。

2.1.1 复合钢的制造方法及分类

2.1.1.1 复合钢的制造方法

(1) 爆炸焊复合法

爆炸焊复合法是在爆炸压力的作用下,使两个相邻的清洁表面形成完全冶金结合而制成的。该类复合材料的冶金特征是结合界面呈波浪状。目前使用的锈复合钢板一般是通过爆炸焊接制造的复合钢。

爆炸复合法的主要优点是:

- ① 各组分之间结合强度高于其他方法生产的复合钢;
- ② 生产速度快;
- ③ 能实现大面积、大厚度金属板的复合;
- ④ 能实现熔点、线膨胀系数以及硬度等性能差别较大的两种复合材料的复合;
- ⑤ 能适应大小不同批量的生产。

爆炸复合法的缺点是:

- ① 爆炸复合时在界面有明显的碳迁移;
- ② 不能制备大尺寸的不锈复合钢;
- ③ 复合板的表面质量较差。

仅采用爆炸复合法制备的不锈复合钢板并不能完全满足用户对复合钢板的复合率、平面度的要求,因此重要结构用复合钢板采用爆炸-轧制复合法生产。

(2) 轧制复合法

通过轧机的压力使两种金属复合成复合材料,是常见的一种复合板制造方法。轧制复合又分为热轧复合法和冷轧复合法。热轧复合法是将覆盖材料和基体叠加在一起,周边进行焊接,然后热轧使之复合。冷轧复合法近年发展较快,这种方法生产成本低,适合批量生产,且能生产大长度、大宽度的制品。但此方法的轧制工艺尚不成熟,往往需要后续处理,且轧制变形大,对轧机功率要求高。这类复合钢的产品主要是不锈钢-碳钢复合板。

(3) 爆炸-热轧复合法

利用爆炸焊接法与热轧法相结合的方法生产,弥补了单纯采用爆炸焊接生产时产品厚度、长度、宽度方面的限制,可以生产出薄规格、成卷以及异型复合材料。

(4) 包浇轧制法

通过将复层金属包浇在基层金属上,再经过轧制而生产出的复合材料。其生产工艺相对

简单，成本低，可进行批量生产。但如果复层金属与基体金属的熔点不同，在两者的结合部位容易产生熔损，因此，难以得到质量优良的复合钢板，只有在复层金属和基体金属为同类金属的情况下，才能进行工业性生产。

(5) 挤压复合法

管状、棒状、线材及简单断面的型材层压复合材料通常采用挤压复合法生产。该方法是将要复合的异种金属表面清理后组装成挤压坯，然后在适当温度、挤压比下进行挤压，在压力作用下使金属紧密接触并达到复合。

该方法特别适用于生产连续的长方形与矩形断面的复合材料型材。缺点是挤压复合的材料范围有限，要求大功率的挤压机，而且不能连续化生产。

(6) 钎焊法

钎焊法主要用来制造较薄的不锈复合钢，这种方法的生产工艺投资少、成本低、规格全，可有效解决复合层接口处的分离现象，成功率高。这种复合钢的价格接近低碳钢，具有良好的焊接性能、综合的力学性能，还具有不锈钢优良的耐蚀性能。

另外还有电镀、热喷涂等方法。

2.1.1.2 复合钢的分类

根据基层材料可分为复合钢材、复合铝材等。最常见的复合钢是复合钢板和复合钢管，主要有不锈钢、镍基合金、钛合金、铜合金复合钢板和复合钢管等，复层厚度可占总厚度的5%~50%，一般为10%~20%。基层的作用是保证结构强度及刚度，复层的作用是提高耐蚀性、导电性等。根据复层的不同，可分为如下几种：铜复合钢、不锈复合钢、钛复合钢、镀锌钢、镀铝钢、渗铝钢等。

2.1.2 复合钢的性能

2.1.2.1 复合钢的性能指标

复合钢的两个基本的性能参数是界面结合率和界面剪切强度，此外复合钢板还应具有满足使用要求的拉伸、弯曲、冲击、晶间腐蚀等性能，以及与上述性能有关的界面微观特性、粘接强度等。

(1) 界面结合率和界面剪切强度

界面结合率和界面剪切强度是复合钢板最重要的质量技术指标。通常用每张复合板总面积或每单位面积的不贴合面积所占的百分比来表示。另外，影响贴合质量的性能指标还有界面分离强度、单个不贴合区的最大长度、单个不贴合区的最大面积及个数等。各国复合板标准对贴合质量的要求列于表2.1。

(2) 拉伸性能

复合钢板的屈服强度 (σ_s 或 $\sigma_{0.2}$) 和抗拉强度 (σ_b) 应分别不低于组合屈服强度和组合抗拉强度，即

$$\frac{\sigma_{s1}\delta_1 + \sigma_{s2}\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \text{ 或 } \frac{\sigma_{b1}\delta_1 + \sigma_{b2}\delta_2}{\delta_1 + \delta_2}$$

式中 σ_{s1} 、 σ_{b1} ——基材的屈服强度和抗拉强度；

σ_{s2} 、 σ_{b2} ——复材的屈服强度和抗拉强度；

δ_1 、 δ_2 ——基材和复材的厚度。

但抗拉强度也不得过高，应当加以限制。美国标准 ASTM A-264 中规定，复合钢板的抗拉强度不得比基材抗拉强度上限标准值高 35MPa。

表 2.1 各国复合板标准对贴合质量的要求

复合板	国家	级别	最小剪切 强度/MPa	最小分 离强度 /MPa	不贴合面积所 占最大比例/%		最大不贴合 长度/mm	最大单个不 贴合面积 /cm ²
					每 1m ²	每张板		
不锈钢/钢	中国	1	147	—	2	—	—	4×4 ^①
		2	147		3			6×6
		3	147		4			8×8
	美国		140	—	—	—	—	—
	日本	1(F)	200	—	—	1.5	50	20
		2(F)	200			5	75	45
镍和镍合金/钢	美国		140	—	—	—	—	—
	日本	1(F)	196	—	—	1.5	50	20
		2(F)	196			5	75	45
钛和钛合金/钢	中国	0	196	—	—	0	75	45
		1	138			2		
		2	138			5		
	日本	1(F)	137	—	—	2	75	45
		2(F)	137			5		60
钛合金/不锈钢	中国	0	197	274	—	0	75	45
		1	138			2		
		2	138			5		60
铜和铜合金/钢	中国	0	100	—	2		—	4×4 ^①
		1	100		3			6×6
		2	100		4			8×8
	日本	1(F)	98	—		1.5	50	20
		2(F)	98			5	75	45
不锈钢/碳钢有色 金属/碳钢	德国		140($\sigma_b \geq 280$ 时) $\sigma_b/2$ ($\sigma_b < 280$ 时)	—	—	—	—	—
不锈钢/碳钢有色 金属/碳钢镍合金/ 碳钢	俄国	0	147	—	1.0	0.3	30($\delta \leq 60\%$) 50($\delta \leq 60\%$)	20
		1	147	—	2.0	0.5	50	50
		2	147	—	3.0	1.0	100	100
		3	147	—	5.0	2.0	200	250
	0.1		147	双方协商				

① 最多 3 个。

(3) 弯曲性能

通常只要求进行 180°的内弯和外弯试验，不做侧弯试验。进行内弯和外弯试验的目的，一是检验复合钢的弯曲性能，二是检验界面的结合状态。复合钢的弯曲性能应满足压力容器对基材弯曲性能的要求，后者在各标准中要求不一，如美国 ASTM A 264 中规定做三个内弯试验，其中至少有两个试样在弯曲部分两侧界面出现的分离不得超过 50%；我国 GB 150—1989 中规定，在弯曲部分的外侧不得产生裂纹，结合界面不允许分层；日本 JIS G 3601 仅规定弯曲部分的外侧不得产生裂纹。

(4) 冲击性能

压力容器用复合钢（主要是复合钢板）要求进行冲击性能试验，冲击韧性结果应符合压力容器对冲击值的要求。复合钢板的冲击性能与热处理状态和冲击试样的取样部位有关。全基层钢试样的冲击性能较好；而带复层的试样则冲击性能就较差，特别是爆炸焊接状态更是