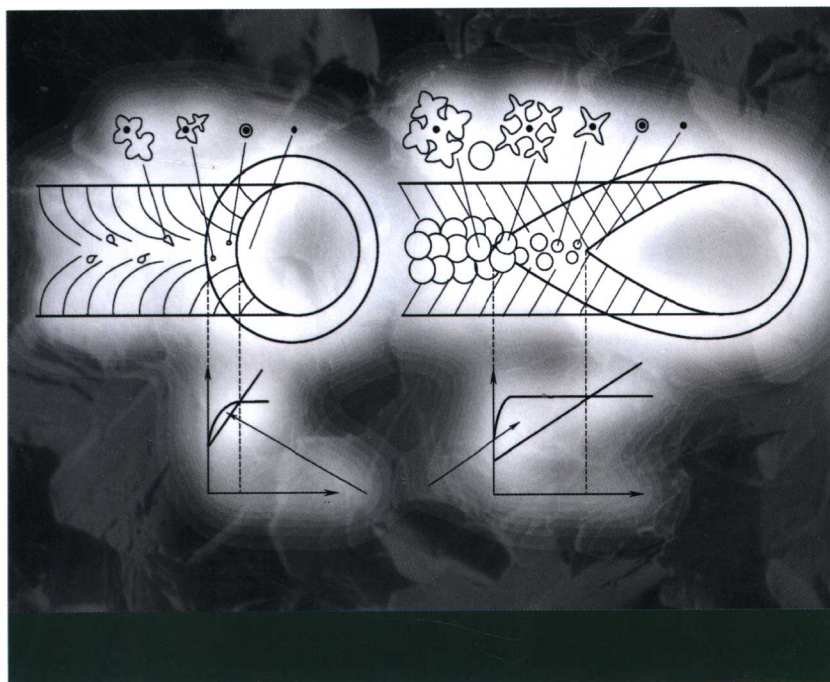


李亚江 著

焊接组织性能与 质量控制



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

焊接组织性能与质量控制

李亚江 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

焊接组织性能与质量控制/李亚江著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 1

ISBN 7-5025-6468-3

I. 焊… II. 李… III. ①焊接接头-性能②焊接接头-质量控制. IV. TG441. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 131481 号

焊接组织性能与质量控制

李亚江 著

责任编辑: 任文斗

文字编辑: 韩庆利

责任校对: 顾淑云 战河红

封面设计: 于 兵

*

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

三河市海波装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 23 字数 570 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6468-3/TH·281

定 价: 48.00 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

焊缝及热影响区的显微组织是评价焊接接头质量的重要指标之一。焊接金相检验的目的,一方面是为了检验焊接接头的质量是否符合有关标准的规定;另一方面是通过对一系列焊接接头的金相分析鉴别焊缝及热影响区各种缺陷的分布、性质和显微组织变化,判定产生缺陷的原因和工艺因素对接头质量的影响。

焊接金相分析是一门综合性的边缘科学,它不同于一般的金相分析,既涉及金属学和金属物理的内容,又涉及光学、电子学的内容,而且与焊接工艺密切相关。随着现代化大型工程结构和电子器件微型结构的涌现,新材料和焊接新工艺的广泛应用,焊接金相分析作为一种独立的试验科学分支,在科研和生产中越来越受到重视,取得了较快发展,积累了许多宝贵的经验和实验技巧。但是,长期以来在焊接金相分析方法上一直缺少完整系统的文献资料。

本书是在作者多年科研和教学实践基础上,从实用性角度对焊接接头区域的显微组织、性能及质量控制进行了简明阐述,总结归纳了有关的焊接金相实验技巧和规律性,力求立意新颖、内容创新、取材独特,突出先进性和实用性等特色,希望对从事焊接组织性能分析的工作人员和研究人员有所帮助。焊接显微组织是一个独具特色的微观领域,当人们的目光从宏观世界进入这个微观领域时,展现在面前的是科学与艺术的完美结合。作者力图呈现给读者的正是这种科学与艺术结合的真实写照。书中的金相组织照片和技术数据大多取自作者科研课题和近年来已发表的科技论文,也选用了其他一些有代表性的研究成果,反映了当前焊接组织与性能的研究及应用现状。

本书是以从事与焊接组织性能试验与研究相关人员为读者对象的科技图书。在此,特向所援引文献的作者表示诚挚的谢意。本书主要供焊接工程技术人员、管理人员、质量检验人员和监察人员使用,也可供高等院校师生、科研单位的有关教学和科研人员参考。

参加本书编写的其他写作人员还有王娟、刘鹏、张永喜、郭国林、马海军、陈茂爱、刘如伟、孙俊生、高进强、郝滨海、赵越、张永兰、王芳、沈孝芹、何卓宁、刘强、孙宾、徐健、刘毅、周冰、黄海啸、石海玉、张燕等。

书中内容难免存在错误和疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

李亚江

2004年11月

内 容 提 要

本书是作者在多年教学和科研实践基础上,从实用性角度对焊接接头的显微组织、性能及质量控制进行了比较系统全面的阐述,力求立意新颖、内容创新、取材独特,突出先进性和实用性等特色。焊接显微组织是一个独具特色的微观领域,当人们的目光从宏观世界进入这个微观领域时,展现在面前的是科学与艺术的完美结合。作者力图呈现给读者的正是这种科学与艺术结合的真实写照。书中的金相组织照片和技术数据大多取自作者科研课题和近年来已发表的科技论文,也选用了其他一些有代表性的研究成果,反映了当前焊接组织与性能的研究及应用现状。

本书主要供焊接工程技术人员、管理人员和质量检验和监察人员使用,也可供高等院校、科研单位的有关教学和科研人员参考。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 焊接方法及接头特点	1
1.1.1 焊接方法的分类及适用性	1
1.1.2 不同焊接方法形成接头的特点	2
1.1.3 焊接接头的组合	6
1.2 钢中的合金元素及杂质	8
1.2.1 合金元素的分类特点	9
1.2.2 合金元素与 Fe、C 的相互作用	10
1.2.3 钢中的杂质及含量控制	13
1.3 钢中的常见组织及影响因素	16
1.3.1 钢中的典型金相组织	16
1.3.2 合金元素对组织转变的影响	19
第 2 章 焊接接头组织研究方法	24
2.1 焊接金相分析的特点	24
2.1.1 焊接金相分析的任务	24
2.1.2 焊接金相分析的手段	24
2.2 金相显微镜和硬度测定	25
2.2.1 金相显微镜	25
2.2.2 硬度和显微硬度	29
2.2.3 定量金相分析	35
2.3 电子显微镜分析 (SEM、TEM)	37
2.3.1 电子显微镜 (SEM、TEM) 的特点	37
2.3.2 扫描电子显微镜分析 (SEM)	38
2.3.3 透射电子显微镜分析 (TEM)	43
2.4 电子探针和 X 射线衍射分析	47
2.4.1 电子探针 (EPMA)	47
2.4.2 X 射线衍射分析 (XRD)	50
第 3 章 焊接金相试样的制备	55
3.1 焊接金相试样的切取	55
3.1.1 取样原则及切取部位的确定	55
3.1.2 用冷加工方法切取试样	57
3.1.3 用线切割方法切取试样	59
3.1.4 用高压水喷射法切取试样	60
3.2 焊接金相试样的磨制	62

3.2.1 砂轮磨平.....	62
3.2.2 试样镶嵌.....	64
3.2.3 砂纸磨制.....	68
3.2.4 试样抛光.....	73
3.3 焊接金相试样的显示.....	79
3.3.1 显示方法.....	79
3.3.2 宏观分析试样的显示.....	80
3.3.3 显微分析试样的显示.....	84
3.3.4 特殊接头试样的显示.....	87
第4章 焊缝金属的组织	89
4.1 焊缝金属的组织特点.....	89
4.1.1 焊接熔池的特征.....	89
4.1.2 焊缝金属的结晶特点.....	90
4.1.3 焊缝组织与强韧性匹配.....	93
4.2 焊缝金属的显微组织类型.....	96
4.2.1 焊缝组织的划分.....	96
4.2.2 焊接熔合区划分和特点	103
4.2.3 焊缝组织图及其应用	108
4.3 焊缝中的非金属夹杂物	113
4.3.1 焊缝中夹杂物的分类及特征	113
4.3.2 夹杂物的分析方法	115
4.3.3 夹杂物的显微硬度及金相特征	116
第5章 热影响区的组织	121
5.1 焊接热影响区划分及常见组织	121
5.1.1 焊接热影响区的划分	121
5.1.2 热影响区的常见组织	123
5.2 焊接热影响区的组织特点	125
5.2.1 热影响区的焊接热循环	125
5.2.2 低合金结构钢热影响区的组织特点	130
5.2.3 热影响区组织分析的特点	133
5.3 焊接热影响区 CCT 图及其应用	134
5.3.1 热影响区 CCT 图的表达形式	135
5.3.2 热影响区 CCT 图的应用	136
5.3.3 焊接热模拟试验及参数	137
第6章 焊接接头的性能	147
6.1 焊接接头性能试验方法	147
6.1.1 焊接接头的力学性能试验	147
6.1.2 焊接接头的使用性能试验	154
6.2 低碳钢焊接接头的力学性能	156
6.2.1 低碳钢的焊接工艺特点	156

6.2.2 低碳钢焊接接头的力学性能实例	157
6.3 低合金钢焊接接头的力学性能	158
6.3.1 热轧及正火钢焊接接头的力学性能	158
6.3.2 低碳调质钢焊接接头的力学性能	163
6.3.3 珠光体耐热钢焊接接头的力学性能	172
6.4 不锈钢焊接接头的性能	176
6.4.1 不锈钢的焊接工艺特点	176
6.4.2 不锈钢焊接接头的力学性能实例	177
6.4.3 不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能试验	179
第7章 焊接裂纹分析	183
7.1 焊接裂纹的分析方法	183
7.1.1 焊接裂纹的分类和特点	183
7.1.2 焊接裂纹试样的选取	187
7.1.3 焊接裂纹的宏观分析	189
7.1.4 焊接裂纹的微观分析	197
7.2 焊接冷裂纹	200
7.2.1 焊接冷裂纹的形态及影响因素	200
7.2.2 熔合区裂纹的起源与扩展	202
7.2.3 焊接冷裂纹的防止	210
7.3 焊接热裂纹	213
7.3.1 焊接热裂纹的形态	213
7.3.2 焊接热裂纹的影响因素	214
7.3.3 焊接热裂纹的防止	216
第8章 焊接接头的断口分析	218
8.1 焊接断口的分类及特点	218
8.1.1 焊接断口的分类	218
8.1.2 焊接断口的特点	219
8.2 焊接断口分析方法	224
8.2.1 焊接断口的测试方法	224
8.2.2 断口试样的选取和制备	226
8.3 焊接断口的形貌	228
8.3.1 焊接断口的宏观分析	228
8.3.2 焊接断口的微观分析	232
第9章 低合金钢焊接区的组织性能	237
9.1 热轧及正火钢焊接特点及组织性能	237
9.1.1 热轧及正火钢的成分和性能	237
9.1.2 热轧及正火钢焊接特点	238
9.1.3 热轧及正火钢焊接区的组织	241
9.2 低碳调质钢特点及焊接区组织	246
9.2.1 低碳调质钢成分和性能	247

9.2.2 低碳调质钢的焊接性特点	249
9.2.3 低碳调质钢焊接区的组织	250
9.3 珠光体耐热钢焊接区的组织性能	270
9.3.1 珠光体耐热钢的成分与性能	270
9.3.2 珠光体耐热钢的焊接特点	271
9.3.3 珠光体耐热钢焊接区的组织	273
第 10 章 异种焊接接头的组织性能	276
10.1 异种钢焊接接头的组织性能	276
10.1.1 珠光体钢与奥氏体钢接头的组织	276
10.1.2 珠光体钢与铁素体钢接头的组织	278
10.2 异种有色金属焊接接头的组织性能	280
10.2.1 Cu/Al 扩散焊接头的组织性能	280
10.2.2 Ti/Al 扩散焊接头的组织性能	282
10.2.3 Mg/Al 扩散焊接头的组织性能	284
10.3 Fe ₃ Al 金属间化合物扩散焊接头的组织性能	286
10.3.1 Fe ₃ Al 金属间化合物的焊接特点	287
10.3.2 Fe ₃ Al/Q235 扩散焊接头的组织性能	288
10.3.3 Fe ₃ Al/18-8 扩散焊接头的组织性能	291
第 11 章 焊接接头的质量控制	295
11.1 焊接缺陷及分级	295
11.1.1 焊接缺陷分类及特点	295
11.1.2 焊接缺陷评定及分级	303
11.2 焊接质量管理及工艺规程	307
11.2.1 焊接质量管理	307
11.2.2 焊接工艺规程	309
11.3 焊接质量控制的内容	316
11.3.1 结构设计	316
11.3.2 母材和焊接材料	318
11.3.3 焊接方法和工艺	320
第 12 章 焊接质量的检验	326
12.1 焊接质量检验的内容	326
12.1.1 焊前检验	326
12.1.2 焊接过程中检验	327
12.1.3 焊后检验	327
12.2 常用非破坏性检验方法	328
12.2.1 外观检验	328
12.2.2 致密性检验	331
12.2.3 耐压试验	332
12.3 焊接质量的无损检测	332

12.3.1	射线探伤.....	332
12.3.2	超声波探伤.....	339
12.3.3	磁粉及渗透检验.....	346
参考文献		355

第 1 章 概 述

焊接过程是一个独特的焊接冶金过程，在熔化焊的条件下，焊接接头由两个互相联系而组织性能又有很大区别的两个部分组成，即焊缝和热影响区。焊缝和热影响区经历了复杂但有规律的焊接热循环。在焊接接头这个很小的区域中，几乎所有的物理冶金现象都可能出现，最终形成具有不同显微组织和性能的接头区域，对焊接接头质量有直接影响。

1.1 焊接方法及接头特点

1.1.1 焊接方法的分类及适用性

根据母材是否熔化，人们将焊接方法分成熔化焊、压力焊和钎焊三大类。然后再根据加热方式、工艺特点或其他特征进行下一层次的分类，这种分类方法得到人们的普遍认可。

① 熔化焊 利用一定的热源，使构件的被连接部位局部熔化成液体，然后再冷却结晶成一体的方法称为熔焊。常用的熔焊方法主要有手工电弧焊、埋弧焊、电渣焊、 CO_2 气体保护焊、惰性气体保护焊、等离子弧焊、电子束焊等。

② 压力焊 利用摩擦、扩散和加压等物理作用，克服两个连接表面的不平度，除去氧化膜及其他污染物，使两个连接表面上的原子相互接近到晶格距离，从而在固态条件下实现连接的方法。常用的压力焊方法主要有电阻焊、扩散焊、超声波焊、冷压焊、摩擦焊等。

③ 钎焊 采用熔点比母材低的材料作钎料，将焊件和钎料加热至高于钎料熔点、但低于母材熔点的温度，利用毛细作用使液态钎料充满接头间隙，熔化钎料润湿母材表面，冷却后结晶形成冶金结合。常用的钎焊方法主要有软钎焊和硬钎焊，根据加热方式的不同，可分别采用火焰、电炉、电阻、盐浴、超声波等加热。

焊接工艺对能源的要求是：能量密度大、加热速度快，以减小热影响区，避免接头过热。焊接用的能源主要有电弧、火焰、电阻热、电子束、激光束、超声波、化学能等。常用焊接热源的主要特性见表 1.1。

表 1.1 常用焊接热源的主要特性

焊 接 热 源	最小加热面积/ cm^2	最大功率密度/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	正常温度/K
氧-乙炔火焰	10^{-2}	2×10^3	3470
手工电弧焊电弧	10^{-3}	10^4	6000
钨极氩弧(TIG)	10^{-3}	1.5×10^4	8000
埋弧自动焊电弧	10^{-3}	2×10^4	6400
电渣焊热源	10^{-3}	10^4	2273
熔化极氩弧(MIG)	10^{-4}	$10^4 \sim 10^5$	—
CO_2 焊电弧	10^{-4}	$10^4 \sim 10^5$	—
等离子弧	10^{-5}	1.5×10^5	18000~24000
电子束	10^{-7}	—	—
激光束	10^{-8}	$10^7 \sim 10^9$	—

电弧是应用最广泛的一种焊接热源，主要用于熔化焊。电渣焊或电阻焊利用电阻热进行焊接。摩擦焊、冷压焊及扩散焊等利用机械能进行焊接，通过顶压、锤击、摩擦等手段，使工件的结合部位发生塑性流变，破坏结合面上的金属氧化膜，在外力作用下将氧化物挤出，实现金属与金属的连接。气焊依靠可燃气体（如乙炔、天然气、丙烷、丁烷等）与氧的混合燃烧产生焊接所需的热量。

选择的焊接方法首先应能满足技术要求及质量要求，在此前提下，尽可能地选择经济效益好、劳动强度低的焊接方法。不同焊接方法对接头类型、焊接位置的适应能力是不同的。电弧焊可焊接各种类型的接头，钎焊、电阻点焊仅适用于搭接接头。大部分电弧焊接方法均适用于平焊位置，而有些方法，如埋弧自动焊、射流过渡的气体保护焊不能进行空间位置的焊接。

表 1.2 列出了常用焊接方法所适用的接头形式及焊接位置。

表 1.2 常用焊接方法所适用的接头形式及焊接位置

适用条件		手工 电弧焊	埋 弧焊	电 渣焊	气体保护焊			氩 弧焊	等 离子焊	气 电立焊	电 阻焊	闪 光对焊	气 焊	扩 散焊	摩 擦焊	电 子束焊	激 光焊	钎 焊
					喷 射过 渡	脉 冲喷 射	短 路过 渡											
接头类型	对接	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	C
	搭接	A	A	B	A	A	A	A	A	C	A	C	A	A	C	B	A	A
	角接	A	A	B	A	A	A	A	A	B	C	C	A	C	C	A	A	C
焊接位置	平焊	A	A	C	A	A	A	A	A	C	—	—	A	—	—	A	A	—
	立焊	A	C	A	B	A	A	A	A	—	—	A	—	—	—	C	A	—
	仰焊	A	C	C	C	A	A	A	A	C	—	—	A	—	—	C	A	—
	全位置	A	C	C	C	A	A	A	A	C	—	—	A	—	—	C	A	—
设备成本		低	中	高	中	中	中	低	高	高	高	高	低	高	高	高	高	低
焊接成本		低	低	低	中	中	低	中	中	低	中	中	中	高	低	高	中	中

注：A——好；B——可用；C——一般不用。

尽管大多数焊接方法的焊接质量均可满足实用要求，但不同方法的焊接质量，特别是焊缝的外观质量仍有较大的差别。产品质量要求较高时，可选用氩弧焊、电子束焊、激光焊等。质量要求较低时，可选用手工电弧焊、CO₂ 焊、气焊等。

自动化焊接方法对工人的操作技术要求较低，但设备成本高、设备管理及维护要求高。手工电弧焊及半自动 CO₂ 焊的设备成本低，维护简单，但对工人的操作技术要求较高。电子束焊、激光焊、扩散焊设备复杂，辅助装置多，不但要求操作人员有较高的操作水平，还应具有较高的文化层次及知识水平。选用焊接方法时应综合考虑这些因素，以取得最佳的焊接质量及经济效益。

1.1.2 不同焊接方法形成接头的特点

生产中常用的焊接方法主要有手工电弧焊、CO₂ 气体保护焊、埋弧自动焊、惰性气体保护焊（TIG、MIG）、电渣焊、电子束焊、电阻焊、钎焊等。各种焊接方法形成焊接接头的过程及组织区域有其各自不同的特点，见表 1.3。

原书缺页

(1) 手工电弧焊

手工电弧焊是利用焊条与工件之间产生的电弧将焊条和工件局部加热到熔化状态，焊条端部熔化后的熔滴和熔化的母材熔合在一起，形成熔池；随着焊接电弧向前移动，熔池逐步冷却结晶形成焊缝金属。

手工电弧焊是目前应用最广泛的一种焊接方法。其优点是应用灵活、方便、适用性广泛，而且设备简单，特别适合于焊接全位置短焊缝和自动焊难以焊接的焊缝。手工电弧焊有单层焊、双面焊和多层多道焊接头，焊件厚度不受限制，但焊件厚度较大时经济效益降低，而且随着厚度的增大，焊接缺陷增多。手工电弧焊焊缝是铸态组织，接头两侧的热影响区有连续的梯度变化的组织特点。由于焊接线能量小，热影响区宽度相对较小。这种方法的主要缺点是生产率低、劳动强度大、对操作者技术水平的依赖性强，且对操作者健康有一定影响。

(2) 埋弧自动焊

埋弧自动焊是利用电弧作为热源的焊接方法，但电弧是在一层颗粒状的可熔化焊剂的覆盖下燃烧，电弧光不外露，所用的金属电极是不间断送进的焊丝。电弧热将焊丝端部及电弧附近的母材和焊剂熔化，熔化金属形成熔池，冷却后成为焊缝；熔融的焊剂成为熔渣，凝固后的熔渣覆盖在焊缝表面。

埋弧焊的电弧控制和形成焊缝的相对运动，都是由机器自动完成的，焊接材料由焊丝和焊剂两部分组成。这种焊接方法适合于厚度在 4mm 以上的低碳钢、低合金钢、不锈钢等的焊接。一般情况下，只能进行平焊及船形焊。埋弧焊允许使用较大的焊接线能量，熔敷速度及熔透能力大，中等厚度的板可不用开坡口，焊接生产率比手工电弧焊高得多。焊缝及热影响区随着焊接线能量增加而加宽。

埋弧焊的特点是热效率高、熔深大、焊缝质量稳定、劳动条件好且对操作者的技术水平依赖性小。这种方法的缺点是设备价格较高，对装配要求较高，且适用性较差（不能进行空间位置的焊接、薄板的焊接、短焊缝等的焊接）。

(3) 电渣焊

电渣焊是利用电流通过液态熔渣所产生的电阻热熔化金属的焊接方法，是一种适用于大厚度钢板的高效焊接方法。一般是在垂直立焊位置焊接，工件两侧装有冷却铜滑块。渣池温度保持在 1700~2000℃，焊丝（或板极）和工件被渣池熔化形成熔池。整个焊接过程中无电弧和飞溅，生产率高，热效率高达 80%（埋弧焊为 60%），且电能与焊接材料消耗比埋弧焊少（仅为 1/20）。

板件厚度超过 30mm 时就可考虑采用电渣焊。厚度大于 50mm 时，电渣焊的经济效益就超过埋弧焊。电渣焊有丝极、板极及熔嘴电渣焊三种。变断面或断面复杂的焊件必须采用熔嘴电渣焊。电渣焊的缺点是焊缝及热影响区的组织粗大，降低了焊接接头的塑性与冲击韧性，焊后必须对工件进行正火处理。

(4) 气体保护焊

常用的熔化极气体保护焊有 CO₂ 气体保护焊、熔化极惰性气体保护焊（MIG、MAG）和钨极氩弧焊（TIG）等。

① CO₂ 气体保护焊 以 CO₂ 气体作为保护气体，用焊丝作熔化电极，焊丝和焊件之间产生电弧熔化金属，是一种生产率高、成本低的焊接方法。CO₂ 气体保护焊电弧在气流压缩下燃烧，热量集中，焊接热影响区小，变形和裂缝倾向小，特别适于薄板焊接，生产效率高，由于焊丝送进自动化，焊接速度较快，焊后不清渣，节省时间，比手工电弧焊生产效率

高 1~3 倍。这种方法主要用于低碳钢及低合金钢的焊接，优点是可进行各种位置的焊接，既可焊薄板，也可焊中厚板，熔敷效率较高，便于实现自动化。

② 熔化极惰性气体保护焊 (MIG) 利用氩气或富氩气体作为保护介质，采用连续送进可熔化的焊丝与燃烧于焊丝与工件间的电弧作为热源的电弧焊。这种方法焊接质量稳定可靠，最适于焊接铝、铜、钛及其合金等有色金属中厚板，也适于焊接不锈钢、耐热钢和低合金钢等。由于焊丝的载流能力大，与非熔化极惰性气体保护焊相比，该方法的熔深能力大，焊接生产率高。熔化极氩弧焊的电弧是明弧，焊接过程参数稳定，易于检测及控制，因此容易实现自动化。目前，世界上绝大多数的弧焊机器人及机器人都采用这种焊接方法。

③ 钨极氩弧焊 (TIG) 在惰性气体保护下，利用钨电极与工件之间产生的电弧热熔化母材和填充焊丝的一种焊接方法。焊接时保护气体从焊枪喷嘴中连续喷出，在电弧周围形成气体保护层隔绝空气，防止对钨极、熔池及热影响区的有害影响，从而可获得优质接头。保护气体主要有氩气、氦气或氩-氦混合气体等。用氩气作保护气体的钨极氩弧焊 (TIG) 应用最为广泛。

钨极氩弧焊主要分为手工焊、半自动焊和自动焊三类。这种方法的优点是焊接质量好，可焊接所有金属，特别适合于焊接铝、钛、镁等活性有色金属以及不锈钢。也用于重要钢结构的打底焊。由于受钨极载流能力的限制，所焊的焊件厚度有限，焊接速度及生产率也较低。

(5) 电阻焊

电阻焊是利用电阻热和压力使工件连接在一起，属于机械化程度及生产率较高的焊接方法。这种焊接方法主要用于焊接厚度小于 3mm 的薄件，棒材、轴、管子等均可进行电阻对焊。电阻焊接头质量对焊接部位的污染物非常敏感，焊前准备工作要求较严格，必须清除接头处的油污、锈、氧化皮等，生产中应有相应的辅助设备。电阻焊主要适用于大批量生产，电阻焊机的功率一般较大，结构复杂，价格贵。

(6) 等离子弧焊

等离子弧是一种压缩的钨极氩弧，具有较高的能量密度及挺直度，弧柱温度高，穿透力强。利用穿孔工艺进行焊接时，对于一定厚度范围内的大多数金属，可以采用单面焊双面成形方法进行焊接。厚度 10~12mm 的工件可不开坡口，能一次焊透双面成形，焊接速度快，生产效率高，应力变形小。

微束等离子弧工艺进行焊接的电流小到 0.1A 时，等离子弧仍能稳定燃烧，保持良好挺直度与方向性，可焊接超薄板（可焊接的最薄厚度为 0.01mm）。这种方法的缺点是设备较复杂，对焊接工艺参数的控制要求较严格。

(7) 高能束焊接

高能束焊接主要有激光束及电子束两种。激光焊是以高能量密度的激光束作为热源，对金属进行熔化形成焊接接头的熔焊方法。激光焊的热量输入小，焊缝凝固过程很快，晶粒细小。电子束焊是利用定向高速运动的电子束，撞击工件表面后将部分动能转化成热能，使被焊金属熔化、冷却结晶后形成焊缝，可实现高深宽比（即焊缝深而窄）的焊接，深宽比达 60:1，可一次焊透 0.1~300mm 厚度的不锈钢板。

由于激光束及电子束的能量密度大，因此，这两种焊接方法均具有熔深大、熔宽小、焊接热影响区小、焊接变形小、接头性能好的特点，既可对很薄的材料进行精密焊接，又可焊

接很厚的材料。由于设备价格较贵，运行成本也较高，目前主要用于质量要求高的产品以及难焊材料的焊接。

(8) 钎焊

钎焊加热温度较低，母材不熔化，因此焊接热循环对母材性能的影响较小，焊件变形及残余应力也较小。这种方法不但可焊接几乎所有的金属，而且还可焊接异种金属、金属与非金属以及非金属与非金属接头。尤其适合于焊接形状复杂的制品。但钎焊接头强度不高、工作温度较低。因此一般用于受载荷不大、工作温度较低的接头的焊接。

(9) 摩擦焊

摩擦焊是利用焊件接触端面相对旋转运动互相摩擦产生的热量，使端部达到热塑性状态，然后迅速顶锻实现连接的一种固态焊接方法。摩擦接触将接触表面加热到很高温度，在较大的轴向压力作用下，使凹凸不平相互压入的表面产生塑性变形和机械挖掘、咬接现象。塑性变形破坏了结合面的氧化膜和金属晶粒，形成了一个高速摩擦塑性变形层和可靠的高强度接头。焊接是在接触的几秒时间内完成的，热影响区很窄。

摩擦焊所产生的金属组织，是由相互焊接同成分材料的时间-温度循环决定的。由于摩擦焊的受热时间短暂，达到的温度一般低于熔点。对于低碳钢来说，整个焊接区域硬度、组织变化不明显。对淬火钢来说，热影响区发生明显的组织变化，较硬材料的摩擦焊也需要较长的焊接时间，产生较宽的热影响区。

(10) 扩散焊

扩散焊是在真空或保护气氛中使平整光洁的两焊件紧密贴合，在一定温度和压力下保持一段时间，使接触面发生微观塑性流变，原子相互扩散从而达到冶金连接的一种固相焊接方法。扩散焊分为不加中间层的固相扩散焊和填加中间层的瞬间液相扩散焊。扩散焊接头的形成取决于三个主要工艺参数：温度、压力和给定温度及压力下的焊接时间。为了获得满意的接头性能，对这三个参数要严格控制。

扩散焊时由于母材不过热或熔化，可以在不损坏被焊母材性能情况下，焊接几乎所有的金属和非金属材料，接头质量好且稳定。特别适于焊接那些因局部加热熔化使母材性能恶化和易形成热裂纹的合金材料，如各类高温合金、钛及钛合金等。当两种材料的冶金性能相差很大时，熔焊方法很难进行焊接，这时扩散焊就特别适用，它可以获得满意的接头，包括焊接异种金属、金属与陶瓷、非金属等冶金上完全互不相溶的材料。在航空航天、电子和核工业等需要质量更为重要的场合下，得到成功应用。

1.1.3 焊接接头的组合

焊接的任务是把两块金属连接起来。材料种类繁多，性能各异，按工程实际需要，材料的分类和焊接组合在工程中是多种多样的。可以组成焊接构件的材料也有很多种，实际上几乎包括绝大部分可焊的金属和合金。工程结构中应用较多的是同种钢铁材料的焊接以及不同金相组织的异种材料的焊接组合。在石油化工、交通运输、动力装置及机械制造业中，经常遇到把同种材料或不同强度级别和性能的钢材焊接在一起的情况，对焊接区域组织性能有一定的要求。

焊接方法不同，形成的焊接接头是不同的。但是对熔化焊焊接接头来说，从焊接金相分析看到的熔焊接头都由焊缝、熔合区和热影响区三部分构成，如图 1.1 所示。从焊接接头的横断面观察，中间是填充金属和母材混合熔化共同形成的焊缝，焊缝是熔化结晶的铸态

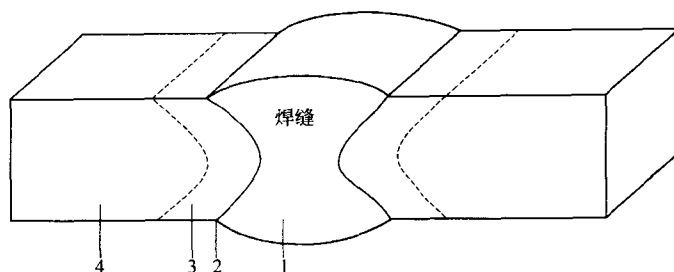


图 1.1 由焊缝、熔合区和热影响区三部分构成的焊接接头

1—焊缝；2—熔合区；3—热影响区；4—母材

组织。

焊缝外侧是母材受焊接热循环作用的热影响区，这部分金属被加热到各种不同峰值温度，使金属母材组织和性能发生了不同于原始母材的变化。在焊缝与热影响区之间存在着一个组织性能和成分完全不同的过渡区，称为熔合区。应用一定的化学试剂浸蚀焊接接头的横断面组织，会进一步显示出接头不同区域的组织。

焊接构件的分类和组合方式归纳起来有如下几种。

(1) 同种金属材料之间的焊接组合

各种类型的钢铁材料是现代工业中应用最广泛的金属材料，同种材料之间焊接构件组合的特点是：母材相同，但焊缝金属的显微组织及合金成分与母材不同。这一类构件属于同种钢焊接结构件，母材一般为低合金钢、珠光体耐热钢、奥氏体不锈钢、马氏体或铁素体钢。当采用的焊接材料与母材基体的化学成分有较大差异时，也会产生类似于异种金属焊接中存在的问题。

(2) 不同金属材料之间的焊接组合

按照材料组合进行分类的异种材料焊接构件组合方式可以分为以下几种。

① 异种钢铁材料的焊接组合结构 又称为异种黑色金属的焊接组合，如珠光体钢与奥氏体钢的焊接组合等。

② 钢铁材料与有色金属的焊接组合结构 如钢与铝的焊接组合等。

③ 异种有色金属的焊接组合结构 如铜与铝的焊接组合等。

④ 金属材料与非金属材料的焊接组合结构 如钢与石墨、金属与陶瓷的焊接组合等。

表 1.4 列出按金相组织、化学成分对异种钢焊接钢种的分类和组合。

金相组织不同的异种钢焊接时，焊缝金属的化学成分和金相组织至少与一种基体金属有所不同，焊缝金属的这种差异会影响焊接接头的工作性能。金相组织不同的异种钢进行焊接时，焊接工艺参数应使熔合比尽量小。焊接材料的选择必须考虑在焊接过程中所产生的过渡层小、韧性好、高温条件下工作时接头不发生变脆等要求。

(3) 不同用途的异种材料焊接构件的组合

工程结构中可以见到许多种不同用途的异种材料焊接结构件，可大致分为如下几类。

① 用于耐磨的异种金属焊接构件 如高碳钢、各种合金钢、超合金、碳化钨等硬质合金，这些材料主要用于制造建筑机械、发动机、炼钢机械、刀具等。

② 用于耐热的异种金属焊接构件 如铬钼钢、不锈钢、耐热钢、镍基合金、钴基合金等各种耐热超合金、复合材料、金属间化合物以及钽、铌、钼合金等各种超高温材料等。这