

宋天民 编著

焊接接头 无损检测



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

焊接接头无损检测

宋天民 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书针对工程上实用的可对焊接接头进行无损检测的射线、超声、磁粉、渗透等常规检测技术和声发射、磁记忆、红外线、超声 TOFD、超声相控阵等无损检测新技术,系统地介绍了各种检测技术的原理、设备、工艺、操作及应用。本书内容紧密结合实际,突出应用,具有实用性强、可操作性好的特点。

本书可作为无损检测工程技术人员系统培训教材,也可作为普通高等院校材料成型专业及相关专业教材,还可作为无损检测研究人员、焊接技术人员及广大无损检测工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

焊接接头无损检测/宋天民编著. —北京:中国石化出版社, 2013. 6
ISBN 978 - 7 - 5114 - 2043 - 5

I. ①焊… II. ①宋… III. ①焊接接头 - 无损检验
IV. ①TG441. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 114260 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行
地址:北京市东城区安定门外大街 58 号
邮编:100011 电话:(010)84271850
读者服务部电话:(010)84289974
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail:press@sinopec.com
北京柏力行彩印有限公司印刷
全国各地新华书店经销



*
787 × 1092 毫米 16 开本 16.5 印张 413 千字
2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷
定价:48.00 元

前 言

在各行业的各种设备及装备中，焊接接头是普遍存在的，焊接接头的质量直接影响着设备的安、稳、长、满、优运行，因此加强对焊接接头的检测，特别是在不损坏焊缝的情况下对其质量、运行状态进行检测意义重大，而应用无损检测技术可以很好地解决这个问题。

本书系统介绍了工程上实用的可对焊接接头进行无损检测的射线检测、超声检测、磁粉检测和渗透检测等常规检测技术，同时介绍了可对焊接接头进行无损检测的声发射、磁记忆、红外线、超声 TOFD 及超声相控阵等新技术。

本书是针对焊接接头进行无损检测的专著，有如下特点：

1. 针对性强，本书的检测对象只是焊接接头；
2. 突出一个新字，除介绍了可对焊接接头进行无损检测的常规检测技术外，还介绍了可对焊接接头进行无损检测的新技术；
3. 突出介绍了在压力容器焊接接头中的应用。

本书共分6章：第1章焊接接头无损检测基础；第2章焊接接头射线检测；第3章焊接接头超声检测；第4章焊接接头磁粉检测；第5章焊接接头渗透检测；第6章焊接接头无损检测新技术。本书可作为无损检测工程技术人员系统培训教材，也可作为普通高等院校材料成型专业及相关专业教材，还可作为无损检测研究人员、焊接技术人员及广大无损检测工作者的参考书。

本书的编写参考引用了许多文献资料，在此谨向各文献资料的作者表示衷心的感谢和感谢。我的博士研究生尹成江及硕士研究生姜吉星、孙久冰、刘磊对本书写作资料的收集、书稿打印修改等方面做了大量的工作，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中肯定会有错误和不当之处，敬请读者批评指正。

目 录

第1章 焊接接头无损检测基础	(1)
1.1 焊接与焊接过程	(1)
1.1.1 焊接	(1)
1.1.2 焊接过程	(1)
1.2 焊接接头	(2)
1.2.1 焊接接头的类型	(2)
1.2.2 焊接接头的组成	(2)
1.2.3 焊接接头的特点	(4)
1.3 焊接接头的组织	(4)
1.3.1 焊接接头的宏观组织	(4)
1.3.2 焊接接头的微观组织	(4)
1.3.3 典型材料的焊接接头组织	(6)
1.4 焊接接头坡口形式	(10)
1.4.1 无坡口接头	(10)
1.4.2 坡口接头	(11)
1.4.3 其他形式接头	(12)
1.5 熔焊接头缺陷	(13)
1.5.1 熔合不良	(14)
1.5.2 裂纹	(14)
1.5.3 气孔	(15)
1.5.4 夹杂物	(15)
1.5.5 成形不良	(15)
第2章 焊接接头射线检测	(17)
2.1 射线检测原理	(17)
2.1.1 射线检测原理	(17)
2.1.2 射线检测特点	(18)
2.2 射线检测工艺	(18)
2.2.1 射线检测工艺四要素	(18)
2.2.2 工艺参数的选择	(31)
2.2.3 射线检测通用工艺规程和工艺卡	(36)
2.2.4 焊缝射线检测操作	(44)
2.3 焊接接头缺陷识别	(46)
2.3.1 伪缺陷的识别	(47)
2.3.2 衍射斑纹	(48)
2.4 射线检测应用	(49)
2.4.1 平板焊缝	(49)
2.4.2 环焊缝	(50)
2.4.3 小直径管对接焊缝	(54)

2.4.4	管子与管板角接焊缝	(57)
2.4.5	球罐焊缝	(58)
第3章	焊接接头超声检测	(62)
3.1	超声检测原理	(62)
3.1.1	超声波	(62)
3.1.2	超声检测原理	(63)
3.2	超声检测设备	(66)
3.2.1	超声检测仪	(66)
3.2.2	超声换能器	(67)
3.2.3	耦合剂	(70)
3.2.4	试块	(70)
3.3	超声检测工艺	(71)
3.3.1	超声检测技术等级	(71)
3.3.2	检测方法和检测条件	(72)
3.3.3	标准试块	(74)
3.3.4	超声检测仪扫描速度的调节	(75)
3.3.5	距离-波幅曲线和灵敏度选择	(75)
3.3.6	传输修正	(76)
3.3.7	扫查方式	(77)
3.3.8	扫查速度和扫查间距	(79)
3.3.9	缺陷的评定和质量分级	(79)
3.4	缺陷与非缺陷回波分析	(80)
3.4.1	缺陷波形	(81)
3.4.2	缺陷类型识别	(83)
3.4.3	非缺陷回波	(85)
3.5	超声检测通用工艺规程和工艺卡	(86)
3.5.1	超声检测通用工艺规程	(86)
3.5.2	超声检测工艺卡	(87)
3.5.3	特种设备超声检测工艺卡编制举例	(89)
3.6	超声检测应用	(93)
3.6.1	焊接接头超声检测	(93)
3.6.2	典型焊接接头的超声检测	(101)
3.6.3	特种材料焊接的超声检测	(107)
3.6.4	在用承压设备的超声检测	(117)
第4章	焊接接头磁粉检测	(119)
4.1	磁粉检测原理	(119)
4.1.1	磁粉检测原理	(119)
4.1.2	磁化方法	(120)
4.1.3	各种磁化方法比较	(126)
4.2	磁粉检测操作	(128)
4.2.1	磁粉检测工艺流程	(128)
4.2.2	工件预处理	(129)

4.2.3	磁化方法	(130)
4.2.4	磁化操作	(131)
4.2.5	磁痕观察、评定与记录	(133)
4.2.6	退磁	(134)
4.2.7	后处理	(136)
4.2.8	实际操作	(137)
4.3	缺陷与非缺陷磁痕显示	(139)
4.3.1	伪显示	(140)
4.3.2	非相关显示	(141)
4.3.3	相关显示	(143)
4.3.4	缺陷磁痕评定	(146)
4.4	磁粉检测通用工艺规程和工艺卡	(147)
4.4.1	磁粉检测通用工艺规程	(147)
4.4.2	磁粉检测工艺卡	(148)
4.4.3	磁粉检测工艺卡编制举例	(151)
4.5	磁粉检测应用	(153)
4.5.1	焊接件磁粉检测	(153)
4.5.2	检测方法选择	(154)
4.5.3	焊接件检测实例	(154)
第5章	焊接接头渗透检测	(159)
5.1	渗透检测原理	(159)
5.1.1	渗透检测原理	(159)
5.1.2	渗透检测方法分类	(159)
5.1.3	渗透检测的操作步骤	(160)
5.1.4	渗透检测质量	(161)
5.1.5	渗透检测特点	(161)
5.1.6	表面缺陷无损检测方法比较	(162)
5.2	渗透检测方法	(162)
5.2.1	水洗型渗透检测法	(162)
5.2.2	后乳化型渗透检测法	(164)
5.2.3	溶剂去除型渗透检测法	(166)
5.2.4	其他渗透检测方法	(167)
5.2.5	渗透检测方法的选用	(168)
5.3	渗透检测操作	(168)
5.3.1	预清洗	(168)
5.3.2	渗透	(169)
5.3.3	去除	(170)
5.3.4	干燥	(170)
5.3.5	显像	(171)
5.3.6	检验	(171)
5.3.7	渗透检测操作程序图解	(172)
5.4	渗透检测设备	(175)

5.4.1	便携式设备	(175)
5.4.2	固定式设备	(176)
5.5	渗透检测评定	(181)
5.5.1	显示的解釋和分类	(181)
5.5.2	常见缺陷的显示	(183)
5.5.3	焊缝常见缺陷的显示特征	(184)
5.5.4	缺陷等级评定	(188)
5.5.5	缺陷的记录	(189)
5.5.6	渗透检测报告	(190)
5.6	渗透检测通用工艺规程和工艺卡	(190)
5.6.1	渗透检测通用工艺规程	(190)
5.6.2	渗透检测工艺卡	(191)
5.6.3	渗透检测工艺卡编制举例	(191)
5.7	渗透检测应用	(196)
5.7.1	焊接接头的渗透检测	(198)
5.7.2	坡口的渗透检测	(199)
5.7.3	焊接过程中的渗透检测	(199)
第6章	焊接接头无损检测新技术	(200)
6.1	声发射检测	(200)
6.1.1	声发射检测原理	(200)
6.1.2	声发射检测系统	(204)
6.1.3	声发射检测应用	(206)
6.2	磁记忆检测	(218)
6.2.1	磁记忆检测原理	(218)
6.2.2	磁记忆检测特点	(219)
6.2.3	磁记忆检测设备	(219)
6.2.4	磁记忆检测应用	(223)
6.3	红外检测	(225)
6.3.1	红外检测原理	(225)
6.3.2	红外检测仪器	(226)
6.3.3	红外检测应用	(234)
6.4	超声 TOFD 检测	(238)
6.4.1	TOFD 检测原理	(238)
6.4.2	TOFD 缺陷检测	(239)
6.4.3	TOFD 检测工艺	(242)
6.4.4	TOFD 检测应用	(245)
6.5	超声相控阵检测	(247)
6.5.1	相控阵检测原理	(247)
6.5.2	相控阵检测工艺	(249)
6.5.3	相控阵检测设备	(251)
6.5.4	相控阵检测应用	(255)
参考文献	(256)

第 1 章 焊接接头无损检测基础

1.1 焊接与焊接过程

1.1.1 焊接

焊接是通过加热或加压或两者并用，并且用或不用填充材料，使工件达到结合的一种方法。焊接结构是采用焊接方法加工而成的工程结构，通常由型钢和钢板制成筒体、梁、柱、桁架等结构，广泛应用于锅炉、容器、管道、机械、桥梁、船舶、航空、航天等领域。

焊接结构与螺栓连接、胀接、铸件及锻件相比具有下列优点：①节省金属材料、减轻结构重量，经济效益好。据统计，焊接结构比胀接结构重量可减轻 15% ~ 20%，比铸件轻 30% ~ 40%，比锻件轻 30%。②简化加工与装配工序，生产周期短，生产效率高。③结构强度高，接头密封性好。焊接接头的密封性比胀接和螺栓连接好得多，因此焊接的容器能充分满足高温、高压条件下对强度和密封性的要求。④为结构设计提供较大的灵活性。可按结构的受力情况优化配置材料，按工程需要在不同部位选用不同强度、不同耐磨、耐腐蚀及耐高温等性能的材料。例如，以碳钢为基材，堆焊不锈钢衬里层制作石油化工压力容器，这样既保证了设备的抗腐蚀性，又节省了大量的贵重金属材料和资金。⑤用拼焊的方法可以大大突破铸锻能力的限制，可以生产特大型锻 - 焊结构，提供特大、特重型毛坯和设备。⑥焊接工艺过程容易实现机械化和自动化。

焊接结构的局限性：①用焊接方法加工的结构易产生较大的焊接变形和焊接残余应力，从而影响结构的承载能力、加工精度和尺寸稳定性，同时，在焊缝处还会产生应力集中，对结构的疲劳断裂有较大影响。②焊接接头中存在着一定数量的缺陷，如裂纹、气孔、夹渣、未焊缝、未熔合等，这些缺陷的存在会降低强度，引起应力集中，损坏焊缝致密性，这是造成焊接结构破坏的主要原因之一。③焊接接头具有较大的性能不均匀性。由于焊缝的成分及金相组织与母材不同，焊接接头各部位经历的热循环不同，使焊接接头不同区域的组织和性能不同。

1.1.2 焊接过程

常用的焊接方法有熔焊、压焊、钎焊和特种焊接等。虽然新焊接方法不断出现，但应用最广泛的仍是熔焊，特别是在特种设备制造过程中。熔焊过程实际上是一个冶炼和铸造过程，首先利用电能或其他形式能量产生高温使金属熔化，形成熔池，熔融金属在熔池中经过冶金反应后冷却，将两个工件牢固地结合在一起。

焊条电弧焊(SMAW)是指用手工操纵焊条进行焊接的电弧焊方法。焊条由焊芯和药皮两部分组成，焊接时焊芯可作为电极和填充材料，药皮在高温下分解产生中性或还原性气体作为保护层，防止空气中的氧、氮进入熔融金属，同时药皮可对焊缝金属起脱氧、脱硫、向焊缝渗入合金元素、调节焊缝金属凝固和冷却速度等作用。

埋弧焊(SAW)是利用焊剂作保护层，电弧在焊剂层下加热并熔化金属，利用电气和机械装置控制送丝和移动电弧的焊接方法。主要用于碳素钢、低合金钢、耐热钢及不锈钢焊缝的水平位置焊接，适用于厚度 20mm 以上的纵缝、环缝焊接，也可进行不锈钢和低合金钢的

带极堆焊，在锅炉、压力容器和船舶制造中应用广泛。

气体保护焊(GMAW)是利用氩气或二氧化碳等保护气体作保护层的电弧焊方法。其中，氩弧焊通常适用于0.5~5mm范围的薄板或管子的焊接和堆焊，还经常用于锅炉及压力容器重要受压元件焊缝根部的打底焊，从而确保焊缝根部质量。用二氧化碳气体或其他混合气体作为保护气体的电弧焊，在锅炉、压力容器制造中，已逐步取代焊条电弧焊。

1.2 焊接接头

焊接接头是指用焊接方法把金属材料连接起来的接头，简称接头。它是组成焊接结构的最基本要素，在某些情况下，它又是焊接结构最薄弱的环节。

1.2.1 焊接接头的类型

焊接结构上的接头，按被连接构件之间的相对位置及其组成的几何形状，可以归纳为图1-1中所示的五种类型：对接接头、角接头、T形接头、搭接接头和卷边接头。

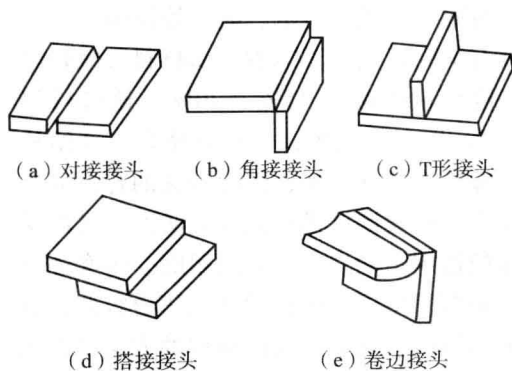


图1-1 焊接接头的类型

1.2.2 焊接接头的组成

经熔焊所形成的各种接头，都是由焊缝、熔合区、热影响区及其邻近的母材组成，见图1-2。



1. 焊缝

焊缝起着连接金属和传递力的作用。它是在焊接过程中由填充金属(当使用时)和部分母材熔合后凝固而成。焊缝金属的性能决定于两者熔合后的成分和组织。

焊接接头中的焊缝，按其焊前准备和工作特性可归纳成表1-1所示的坡口焊缝和角焊缝两大类。

表1-1 焊接接头的类型

坡口焊缝	对接接头	
	T形接头	
	角接头	
角焊缝	搭接接头	
	T形接头	

角焊缝	角接头	
部分坡口的角接头		

(1)坡口焊缝 根据设计或工艺需要,将焊件待焊部位加工成一定几何形状的沟槽称为坡口。在焊接过程中,用填充金属填满坡口形成的焊缝称坡口焊缝。合理设计坡口焊缝可以做到厚板熔透、改善力的传递、节省填充金属和调节焊接变形等。

(2)角焊缝 两焊件接合面构成直角或接近直角,并用填充金属焊成的焊缝称角焊缝,又称贴角焊缝或填角焊缝。角焊缝焊前的准备工作较简单,不必做特殊加工,而且装配也较容易,但是,它不是理想的传力焊缝,工作应力复杂,应力集中因素多。

图 1-3 为坡口焊缝和角焊缝的典型形状及各部分名称。

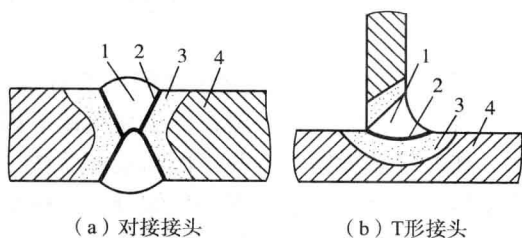


图 1-2 接头的组成

1—焊缝; 2—熔合区; 3—热影响区; 4—母材

2. 熔合区

熔合区是接头中焊缝与热影响区之间过渡的区域,是焊缝边界上固液两相共存而又凝固的部分。此区很窄,低碳钢和低合金钢的熔合区约 0.1~0.5mm。熔合区是接头中最薄弱部分,许多焊接结构破坏的事故,常因该处的某些缺陷引起,如冷裂纹、脆性相、再热裂纹、奥氏体不锈钢的腐蚀等均源于此。这与该区经历热、冶金和结晶等过程,造成化学成分和物理性能极不均匀有关。熔合区的构成如图 1-4 所示。

3. 热影响区

热影响区是母材受焊接热的影响(未熔化)而发生金相组织和力学性能变化的区域。它的宽度与焊接方法及热输入量有关。它的组织与性能的变化与材料的化学成分、焊前预热处理以及焊接热循环等因素有关。热影响区有可能产生脆化、硬化和软化等不利现象。

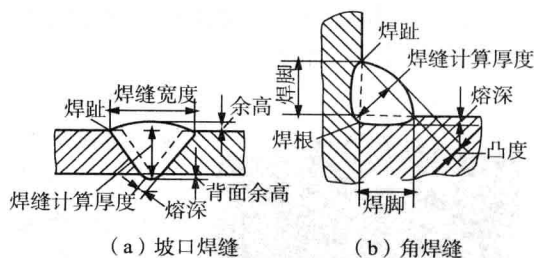


图 1-3 焊缝形状及各部分名称

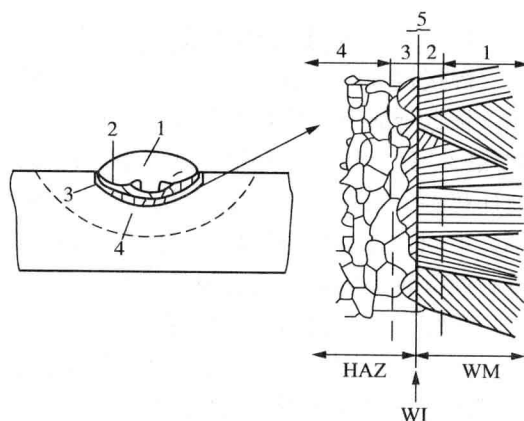


图 1-4 熔合区构成示意图
1—焊缝区; 2—熔合区; 3—热影响区;
4—母材; 5—熔合线

1.2.3 焊接接头的特点

焊接接头具有下列特点：

(1)几何不连续性 当接头位于结构几何形状和尺寸发生变化的部位时，该接头就是一个几何不连续体，工作时传递着复杂的应力。即使是对接接头，只要有余高存在，在焊趾处也会出现不同程度的应力集中。制造过程中发生的错边、焊接缺陷、角变形等，都将加剧应力集中，使接头工作应力分布更加复杂。

(2)性能不均匀性 焊缝金属与母材在化学成分上常存在差异，再经受不同的焊接热循环和热应变循环，必然造成焊接接头各区域的金属组织存在着不同程度的差异，导致了焊接接头在力学性能、物理化学性能及其他性能的不均匀性。

(3)有残余应力和变形 焊接过程热源集中作用于焊接部位，不均匀的温度场产生了较高的焊接残余应力和较大的焊接变形，使接头的区域过早地达到屈服点和强度极限，同时也会影响焊接结构的刚度、尺寸稳定性及结构的其他使用性能。

1.3 焊接接头的组织

1.3.1 焊接接头的宏观组织

切取一个熔化焊的焊接接头，制成宏观试样，经过适当的侵蚀，可以清楚地看到焊接接头分为四个部分，如图 1-5 所示。

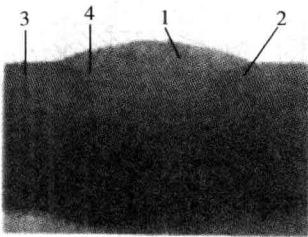


图 1-5 焊接接头的宏观组织

1—焊缝区；2—热影响区；
3—母材金属；4—熔合线

其中，熔合线是液态金属与固态母材金属之间的交界面，从焊接接头的横截面上看是一条曲线，一般在低倍显微镜下都能清晰地显示。然而，在高倍显微镜下有些一次结晶形貌被二次相变产物破坏，所以熔合线模糊不清，必须仔细分辨。焊接接头宏观组织的特征是：焊缝金属的晶粒和熔合线附近的母材热影响区的晶粒是联结长大出来的，即焊缝金属的晶粒是和液态金属相接触的母材热影响区的晶粒联结长大出来的，如图 1-4 所示。焊缝金属大部分成长为柱状晶，生长方向垂直于熔合线。当焊接条件不同时，晶体成长的形态也不同。焊缝中的晶体形态主要是柱状晶和少量等轴晶。

1.3.2 焊接接头的微观组织

焊接接头的微观组织特征是指在金相显微镜下观察到的柱状晶和等轴晶内部的显微形态。根据金属所处的热力学状态与成分差异，焊接接头微观组织大体上可划分为焊缝区和母材热影响区。焊缝区是熔化状态下冷却凝固结晶后形成的，母材热影响区是焊接过程中经快速加热到一系列峰值温度后快速冷却形成的。焊缝金属与母材金属的微观组织有很大的区别，不同合金成分的焊缝金属的显微组织是不一样的，柱状晶内部可以有胞状晶和树枝晶之分，而等轴晶内部则只有树枝晶的结晶形态。

焊缝金属一次结晶组织有如下特征：

(1)由于焊接熔池成分过冷的程度在各处是不一样的，因而即使是同一焊缝在凝固时，不同区域也会存在不同的结晶形态。在焊缝的熔化边界由于温度梯度大，结晶速度小，故成分过冷接近于零，所以平面晶得到发展；随着远离熔化边界向焊缝中心生长，温度梯度逐渐变小，结晶速度逐渐增大，过冷度也越来越大，结晶形态由平面晶开始逐渐转向胞状晶和胞状树枝晶、树枝晶，一直到等轴晶。在实际焊缝中，由于化学成分、接头形式以及板厚和焊

接工艺的不同，上述结晶形态不一定全部具有。当焊接速度增大时，焊接熔池中心的温度梯度下降很多，使熔池中心的成分过冷加大。因此，快速焊接时，在焊缝中心往往出现大量的等轴晶；低速焊接时，在熔合线附近出现胞状树枝晶，在焊缝中心出现较细的胞状树枝晶。当焊接速度一定，焊接电流较小时，焊缝得到胞状组织；增加电流，得到胞状树枝晶；电流继续增大，出现更为粗大的胞状树枝晶。

(2)在焊缝金属凝固时，除了由于实际温度造成的温度过冷之外，还存在由于固液界面处成分起伏而造成的成分过冷。所以，焊缝结晶时不必很大的过冷就可以结晶，而且随过冷度的不同，晶体成长也呈现不同的结晶形态，对焊缝性能及裂纹缺陷有很大的影响。成分过冷的大小决定了凝固组织的形态，使其具有柱状晶及其内部生成的结构：平面晶、胞状晶、胞状树枝晶、树枝状晶和等轴晶等多种形态。

①平面晶 平面晶是指结晶呈平面形态、界面平齐的平面结晶。这类结晶组织常见于高纯度金属焊缝、溶质质量分数低的液态合金和在熔合线附近温度梯度很高而结晶速度很小的边界层中。

②胞状晶 当平面结晶界面处于不稳定状态时，晶粒内部形成一束相互平行的棱柱体元，其横截面为近似六角形，如同细胞或蜂窝状，其主轴方向与成长方向一致，每一棱柱体前沿都有稍微突前的现象，这种组织形态称为胞状晶。

③胞状树枝晶 温度梯度进一步减小时，成分过冷区增大，晶体成长加快，胞状晶前沿向液相中突出，并能深入液相中较深的距离，凸起部分也向周围排除溶质，在横向上也产生成分过冷，并从主干上横向长出二次枝，在晶粒内部形成较多十字棱柱形结构，但由于主干的间距小，所以二次横枝也较短，这样就形成了特殊的胞状枝晶，这种组织形态在钢铁焊缝中常见到。

④树枝状晶 当温度梯度进一步减少时，产生的成分过冷进一步增大，晶体成长速度更快，在一个晶粒内只产生一个很长的主干，其周围会突入过冷的液相中而形成二次枝晶，成为典型的树枝状“枝晶”，称为树枝状晶。枝晶的枝干间的间隙在随后的凝固中被填满，二次枝晶与附近枝晶接触时即停止生长，二次枝晶的接触面就是两个晶体的晶界，凝固的速度越大，枝晶的间距越小。

⑤等轴晶 当液相中的温度梯度很小时，能够在液相中形成很宽的成分过冷区，此时，不仅在结晶前沿形成树枝状结晶，同时也能在液相的内部生核，产生新的晶粒，这些晶粒的四周不受阻碍，可以自由成长，从而形成等轴晶。以上五种不同的结晶形态，都具有内在的因素，其中平面晶、胞状晶、胞状树枝晶和树枝状晶均称为柱状晶。

在实际焊缝中，由于母材及焊接工艺不同，不一定具有上述全部结晶形态，如对于310不锈钢来说，其熔合线附近是胞状晶，而靠近焊缝中心则是树枝晶，如图1-6和图1-7所示。

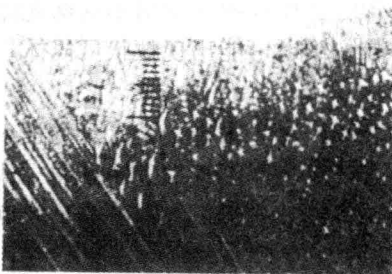


图1-6 熔合线附近胞状晶组织

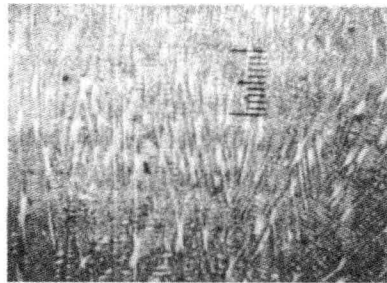


图1-7 焊缝中心树枝晶组织

焊缝金属一次结晶形成的组织和特征，将随着连续冷却过程的进行，进一步发生转变，即二次相变。二次相变后获得的组织与母材和填充金属的成分及焊接规范有关。焊缝金属组织转变的机理与一般钢铁的转变机理是一致的，其组织特征因各种材料不同而各不相同。

1.3.3 典型材料的焊接接头组织

1. 低碳钢焊接接头组织

低碳钢的母材及焊缝金属含碳量均比较低，固态相变后所见均为二次组织。结晶组织主要是铁素体加少量珠光体和魏氏组织铁素体，但其焊接接头、热影响区各区域的显微组织差别较大。

1) 热影响区组织

热影响区内的组织与该处的合金成分、加热速度、加热最高温度、高温(A_{c3})停留时间和随后的冷却速度等因素相关。低碳钢由于含碳量低，其淬硬倾向比较小，因而也称为不易淬硬钢，其热影响区可以分为以下几个区域：

(1) 部分相变区(也叫不完全重结晶区) 其加热范围在 $A_{c1} \sim A_{c3}$ 之间，普通低碳钢一般在 $750 \sim 900^\circ\text{C}$ 之间。

(2) 相变重结晶区(也叫细晶粒区) 其加热温度范围在 $A_{c3} \sim T_{ks}$ 之间，普通低碳钢一般在 $900 \sim 1100^\circ\text{C}$ 之间。

(3) 过热区(也叫粗晶粒区) 该区紧邻焊缝，加热温度范围在 $T_{ks} \sim T_m$ (T_m 为熔点) 之间，普通低碳钢一般在 $1100 \sim 1490^\circ\text{C}$ 之间。由于加热温度很高，一些难溶质点(如碳化物和氮化物等)也都溶入奥氏体，故奥氏体晶粒长得粗大，在较快的冷却条件下会出现粗大的魏氏组织，部分奥氏体转变为珠光体组织。魏氏组织的存在严重降低了焊接热影响区的韧性，是低碳钢变脆的一个主要原因。

2) 熔合区组织

熔合区组织是指熔合线附近焊缝金属到热影响区之间的过渡区域，温度处于固相线和液相线之间。这部分金属处于局部熔化状态，晶粒十分粗大，化学成分和组织都极不均匀，冷却后的组织为过热组织，这段区域很窄，有时金相观察很难明显区分开来。

3) 焊缝组织

由于低碳钢焊缝的含碳量低，其焊缝组织一般为晶界先共析铁素体再加少量的珠光体，其中铁素体一般都是首先沿原奥氏体晶界析出，呈柱状晶粒，十分粗大。有的还具有魏氏组织的形态，魏氏组织的特征是铁素体在奥氏体晶界呈网状析出，也可从奥氏体晶粒内部沿一定方向析出，具有长短不一的针状或片状，可直接插入珠光体晶粒之中，魏氏组织主要出现在晶粒粗大的过热的焊缝之中。多层焊或热处理的焊缝会使焊缝获得细小的珠光体，并使柱状晶遭到破坏，当焊接冷却速度增大时，铁素体晶粒变细还可能出现粒状贝氏体。

2. 低合金钢焊接接头组织

低合金钢一般都是低碳的，如 16Mn、Q345、15CrMo 等，由于合金元素的加入提高了淬透性，因此不仅直接影响焊接的一次组织，也影响其热影响区的组织，铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体都可能出现，若合金元素加入量较多，焊缝二次组织中则可能出现贝氏体和粗大的板条马氏体。

低合金钢焊缝的二次组织，随匹配的焊接材料的化学成分和冷却条件的不同，可有不同的组织。但是，由于含碳量普遍低于母材，所以，在多数情况下仍以铁素体和珠光体为主。

低合金钢中的铁素体不同于低碳钢中的铁素体，是含有合金元素的铁素体，称为合金铁素体。低合金钢焊缝由于处在非平衡条件下进行组织转变，很少能得到珠光体组织，除非在更为缓慢的冷却条件下(预热、缓冷等)，才有少量的珠光体转变。在焊接条件下，由于珠光体转变受到抑制，扩大了铁素体和贝氏体转变的区域。而在高强钢焊缝中，可能会有贝氏体，甚至还会出现马氏体组织。下面以 16Mn 为例说明其焊接接头组织。

1) 热影响区

热影响区组织由针状铁素体 + 索氏体 + 少量粒状贝氏体组成。也可以分为以下几个区：

(1) 部分相变区(也叫不完全重结晶区) 其加热温度范围为 $A_{c1} \sim A_{c3}$ ，普通低合金钢的温度范围一般为 $700 \sim 900^{\circ}\text{C}$ ，由于加热时有部分铁素体未发生相变，而加热时奥氏体中含有较高的碳和合金元素，故冷却后的组织为未发生相变的合金铁素体和部分发生相变的珠光体，冷却速度快时还会出现高碳马氏体。

(2) 相变重结晶区(也叫正火区或细晶粒区) 其加热温度范围在 $A_{c3} \sim T_{ks}$ 之间，普通低合金钢一般为 $900 \sim 1080^{\circ}\text{C}$ 。由于在加热和冷却过程中经受了两次重结晶相变的作用，使晶粒得到显著细化，相当于正火后的细晶组织。冷却后的组织与低碳钢一样，也为均匀细小的铁素体 + 珠光体，不同的是珠光体数量稍多些。如果合金元素种类和含量增加，还会出现贝氏体。

(3) 过热区(也叫粗晶粒区) 其加热温度范围在 $T_{ks} \sim T_m$ 之间，对于普通低合金钢来说，一般为 $1080 \sim 1490^{\circ}\text{C}$ ，由于该区加热温度很高，特别在固相线附近处，一些难熔质点(如碳化物和氮化物等)也溶入奥氏体，因而奥氏体晶粒长得十分粗大。在快速冷却情况下，形成过热组织——魏氏组织。过热区组织一般为索氏体和少量的沿原奥氏体晶界分布的铁素体，甚至全部为铁素体。由于合金元素的加入提高了奥氏体的稳定性，还可能出现少量的粒状贝氏体，随着合金元素含量的增多，甚至会获得全部的粒状贝氏体。

2) 熔合区

熔合区的温度处于固相线和液相线之间，这部分金属处于局部熔化状态，晶粒十分粗大，化学成分和组织都极不均匀，冷却后的组织为过热组织。由于该区温度梯度大、碳化物充分溶解和晶粒粗大等因素，导致奥氏体稳定性提高，淬硬倾向增大，故该区比其他区域更容易形成粗大的马氏体组织。在许多情况下，该区是产生裂纹、局部脆性破坏的发源地。但是，对于低合金钢而言，该区多半是魏氏组织和贝氏体。

3) 焊缝

低合金钢焊缝固态相变后的组织比普通低碳钢焊缝组织要复杂得多，由于含碳量低，而且还含有一定量的合金元素，随着匹配焊材的比例及与母材混合后的化学成分与冷却条件的不同，可出现不同的组织，其焊缝除了铁素体和珠光体外，还可能会出现多种形态的贝氏体和魏氏组织铁素体等混合组织。如果合金元素较多，其淬透性好时，甚至可能出现马氏体。随化学成分和强度级别的不同，一般情况下都是几种组织混合存在。实际上，低碳低合金钢组织主要是晶界铁素体、针状铁素体和片状铁素体，合金元素较多的高强钢焊缝中会出现马氏体和粒状贝氏体。虽然低碳钢和低合金钢中都有铁素体和珠光体，但是两者在形态上有很大差异，因此会反映出两者不同的性能。与低碳钢相比，低合金钢焊缝组织较细小；接头中易出现中温转变组织贝氏体和低温转变组织马氏体，硬化倾向大；在相同的热输入条件下，母材过热区较低碳钢窄，晶粒长大倾向小；焊缝与热影响区往往是各种组织伴生，呈现混合组织状态。

3. 中碳调质钢焊接接头组织

在焊接热循环作用下，中碳调质钢焊后冷却时很容易获得淬火组织，因而也叫易淬火钢，主要为马氏体与贝氏体的混合组织。以 30CrMnSi 为例，该钢的母材组织为铁素体 + 回火索氏体。

1) 热影响区

(1) 部分淬火区 其加热范围在 $A_{c1} \sim A_{c3}$ 之间，一般为 750 ~ 900℃。在快速加热条件下，铁素体很少熔入奥氏体，在随后的冷却过程中，只有奥氏体转变为马氏体，而原铁素体不变，只有不同程度的长大，最终冷却下来的组织为马氏体和铁素体混合组织，也称为不完全淬火区。如果含碳量和合金元素不高或者冷却速度不大，则这部分奥氏体也可能转变为索氏体和珠光体。

(2) 完全淬火区 其加热温度在 A_{c3} 以上，由于加热的峰值温度不同，由此引起的晶粒度长大、合金碳化物和氮化物质点熔入奥氏体程度也不同。过热区加热的峰值温度高，接近熔点，所以该区晶粒长得粗大，同时该区的冷却速度也大，故淬火倾向大于正火区，冷却后的组织容易获得粗大的淬火马氏体组织，峰值处于正火区的则得到细小的马氏体组织，在紧靠近焊缝部分也可能产生贝氏体，从而形成贝氏体与马氏体共存的混合组织。

(3) 回火区 若焊前母材原始组织为铁素体和珠光体，则加热温度低于 A_{c1} 的区域，组织不会改变，若焊前母材处于淬火和回火状态，则该区的范围与焊前的回火温度有关，加热峰值温度超过母材回火温度，一直到 A_{c1} 之间的区域，即为焊接热影响区中的回火区，其组织状态取决于加热峰值温度。随着回火区温度的提高，碳化物的析出越来越充分，其弥散程度越来越小，碳化物粒子逐渐变粗，其回火组织为回火索氏体组织和碳化物。

2) 焊缝

由于含有的碳元素和合金元素较多，淬透性较好，故焊缝区一般为贝氏体与马氏体组织，其中马氏体的形态会出现板条状马氏体，在焊速低的条件下还有可能有少量的珠光体组织。

4. 不锈钢焊接接头组织

不锈钢的焊接接头组织不能用简单的铁碳相图进行分析，其焊接接头组织一般保留了其一次结晶的组织形态，二次组织不发生相变，下面以 0Cr18Ni9 为例说明此类钢的焊接接头组织。

1) 热影响区

(1) 过热区 由于母材与焊缝均为 γ 组织，母材与焊缝的化学成分存在的差异使其组织形态也出现差异。在热影响区，其晶粒改变原有的多面体形态，被拉长，显出熔化后凝固结晶的特征浮凸。同时存在一个粗大晶粒的过热区，在加热过程中长大了的晶粒在冷却过程中没有任何相变，因而不会有相变引起的重结晶细化作用。如果在以后的焊接中，同一部位进行重复焊接加热，将使晶粒越长越大。

(2) 重结晶区 该区晶粒细小，相当于钢材正火后的细晶粒组织。如果母材的原始状态为冷轧状态，则还会出现一个晶粒较细的再结晶区，存在于母材与过热区之间，晶粒比母材组织细小，该区的综合性能优于母材。

2) 焊缝

18-8 型奥氏体不锈钢，焊缝组织为树枝状奥氏体 + 枝晶间少量铁素体，焊缝区以柱状

晶为主，也有等轴晶。焊缝组织是从高温液相转变为固相的单一的奥氏体组织。

5. 异种钢焊接接头组织

异种钢焊接是指化学成分和性能差别很大的两种以上的金属与合金的焊接，主要指不锈钢、低合金结构钢、低碳钢、工具钢的焊接等。例如，母材是铁素体基的钢材，焊缝填充金属是奥氏体基的钢材；或者母材之一是铁素体的钢材，另一是奥氏体基的钢材。在异种钢焊接中，所用的钢种按金相组织分类主要有珠光体钢、马氏体 - 铁素体钢和奥氏体钢三大类。同一种类型组织但不同类别的钢种，由于其化学成分和力学性能有时存在很大差异，故也属于异种钢的焊接。

异种钢焊接接头的组织状态基本取决于两个方面的因素：一是成分差异在焊接接头熔合区产生的化学不均匀性；二是由焊接因素决定。

由于母材熔化稀释焊缝金属的量不多，因而异种钢焊接接头金属的组织基本上决定于焊缝填充金属的化学成分和焊接规范，焊缝与母材毗邻的熔合区金属层，由于存在着成分浓度的过渡，因而其组织状态既有别于焊缝区金属，又不同于近缝区母材的金属。异种钢焊接的熔合区组织较复杂，异种钢熔合区的平均成分往往是母材和焊缝金属成分之和的一半。下面以铁素钢 + 奥氏体钢并添加奥氏体焊缝金属的焊接为例说明异种钢焊接接头的组织。

1) 热影响区

(1) 铁素钢侧的热影响区一般为铁素体 + 珠光体组织，焊缝为液态时，由于碳在液体金属中的溶解度大于固体金属中的溶解度，故促使碳由熔合线附近的母材向焊接熔池扩散，由此导致铁素体母材中的碳将向焊缝中迁移，铁素体母材侧会出现“脱碳层”，而焊缝侧出现“增碳层”。

(2) 奥氏体侧的热影响区一般为奥氏体组织，由于该侧没有碳浓度的差异和组织结构的不同，故不会出现碳的迁移。

2) 焊缝区

焊缝金属的组织 and 母材的热影响区的组织基本上决定于给定的焊缝金属和母材固有的化学成分及焊接工艺，但熔合线附近的熔合区的组织则比较复杂。

(1) 铁素体钢侧的焊缝区一般为贝氏体组织，由于填充金属的稀释作用往往在焊接接头的过渡区会产生脆性的马氏体组织。

(2) 奥氏体侧的熔合区一般为奥氏体和铁素体组织。

6. 铝及铝合金焊接接头组织

铝及铝合金具有优异的物理特性、化学特性、力学性能及工艺性能，是航天、航空、化工和交通运输等工业重要的结构材料之一，具有许多与其他金属不同的物理特性，因此也具有与其他金属不同的焊接特点。焊接结构主要应用变形铝合金，且应用最广的是不能热处理强化的防锈铝，如 Al - Mn, Al - Mg 合金是主要应用于焊接结构的铝合金，虽然已经应用铝及其铝合金焊制了许多重要产品，但还是存在很多困难，主要是因为焊缝中的气孔、焊接热裂纹、接头等强性等问题。

做铝合金的金相分析时，应先参考有关相图，依据合金的主要成分及冷却条件来分析它应有的基本组成相及其相应量，再依据合金中的杂质含量分析可能出现的其他合金相，然后在金相显微镜下，对合金作仔细观察。对具有同样色泽、外形等不易区别的相，可进一步进行各种腐蚀试验，并可配合偏光和显微硬度等测试方法来探测合金中的组成相。例如，铝 - 镁合金中加入镁，可细化晶粒和提高合金的强度，根据 Al - Mg 合金相图可以看出， β 相为