

9167

焊接金相实用讲义

王善元 等 编

机械工业部哈尔滨焊接研究所教育科

060467-2

TG

编 者 的 话

随着焊接技术和焊接生产的发展,对焊接质量要求越来越高。作为焊接理论研究、焊接生产检验和提高焊接质量的重要手段之一——焊接金相分析,越来越受到人们的重视并发挥显著作用。因此焊接金相技术也随之得到很大发展和普及。

鉴于焊接金相与普通金相相比,具有自己的特殊性,因此,不少工厂企业迫切要求培养焊接金相人员,以适应生产发展和技术提高的形势,为推动这一形势的发展和满足工厂试验室的要求,我们举办“焊接金相基本知识技术培训班”,并为培训班编写了本讲义。

培训班的对象是具有高中文化水平并有5年以上金相工龄的工厂实验室金相人员。考虑到上述人员已不同程度地学习过金属学,所以本讲义中不再叙述金属与合金的晶体结构、合金相图、塑性变形、热处理原理等方面的内容。

本讲义第四章由吕德林同志编写。第八章和第六章第四节由韩淑文同志编写。第九章由李砚珠同志编写,其余各章节由王善元同志编写。全书由王善元同志主编。

参加审稿工作的有:田万钰、张国光、任大成、张让二、付广义同志。

金相室的李砚珠、孙秀芳、阎家树、张让二同志提供了若干金相图片,其它有关科室给予热情帮助和大力支持,在此一并致谢。

全部讲义由《国外焊接》编辑部进行编辑加工。

由于我们水平有限,经验不多,加之时间仓促,缺点和错误一定不少,敬请读者批评指正。

1982.5

内 容 提 要

本讲义是为“焊接金相基本知识、技术培训班”编写的。针对焊接金相检验的特点，从实际要求出发，有选择地介绍了焊接用钢的一般知识及可焊性，焊接熔池结晶过程，焊接接头的固态相变及组织分析，焊接热循环、热模拟和连续冷却组织转变图，焊接接头的特征区域与焊接裂纹，不锈钢、镍基合金及异种金属焊接接头金相分析，焊接金相综合分析，焊接断口分析，金相显微镜，焊接金相制样及图片加工技术，与焊接金相有关的名词术语等。讲义中为给读者直观和形象的描述共有各种金相照片300余幅。本讲义可供工厂试验室金相人员、焊接人员、技校、中等专业学校、工科大专院校热加工专业师生参考。

目 录

第一章 焊接用钢一般知识及可焊性

第一节 铁与钢	(1)
第二节 钢的力学性能	(4)
一、钢的强度和塑性	(4)
二、钢的硬度	(7)
三、钢的冲击韧性	(9)
四、钢的疲劳强度	(10)
第三节 低碳钢和低合金钢的显微组织	(11)
一、工业纯铁的显微组织	(11)
二、低碳钢的显微组织	(12)
三、低合金钢的显微组织	(14)
第四节 铁和钢的晶体结构	(15)
一、纯铁的晶体结构	(15)
二、钢中各组成相的晶体结构	(16)
三、实际晶体结构	(17)
第五节 钢中的常存元素	(19)
第六节 钢中的非金属夹杂物	(22)
第七节 钢的可焊性	(23)
一、工艺可焊性	(23)
二、使用可焊性	(23)
三、可焊性试验方法	(24)
四、断裂韧性	(27)
附 录	(31)
参考文献	(39)

第二章 焊接熔池的结晶过程

第一节 焊接熔池的结晶特点 (41)

一、焊接接头的形成 (42)

1、结晶成核 (43)

2、联生结晶及长大 (44)

第二节 焊接熔池结晶前沿的组分过冷 (46)

一、快速结晶时液相和固相的浓度变化 (46)

二、组分过冷现象 (46)

三、组分过冷对结晶组织形态的影响 (47)

四、焊接条件对结晶组织形态的影响 (49)

第三节 焊缝中的结晶偏析

一、宏观偏析 (50)

二、显微偏析 (53)

三、熔合线偏析 (55)

第四节 改善焊缝的一次组织

1、变质处理 (57)

2、振动结晶 (57)

第五节 焊缝中的气孔

一、气孔的种类及分布特征 (58)

二、焊缝中气孔形成机理 (60)

三、影响气孔形成的因素及防止方法 (62)

参考文献 (67)

第三章 焊接接头的固态相变

第一节 焊接加热时奥氏体的形成

- 一、奥氏体的成核..... (69)
- 二、奥氏体晶核的长大..... (70)
- 三、奥氏体的均匀化..... (71)
- 四、连续加热时奥氏体形成的特点..... (72)

第二节 焊接冷却时奥氏体的分解

- 一、先共析铁素体..... (73)
 - 1、晶界自由铁素体..... (74)
 - 2、魏氏组织铁素体..... (75)
- 二、共析转变产物..... (77)
 - 1、片状珠光体..... (77)
 - 2、屈氏体和亚珠光体..... (78)
- 三、贝氏体..... (79)
 - 1、贝氏体转变机制..... (79)
 - 2、贝氏体的形貌..... (80)
 - ① 上贝氏体的形貌..... (80)
 - ② 下贝氏体的形貌..... (81)
 - ③ 粒状贝氏体的形貌..... (82)
- 四、马氏体..... (83)
 - 1、马氏体的形成条件和特点..... (84)
 - 2、无扩散的切变机制..... (85)
 - 3、关于马氏体点及其影响因素..... (85)
 - 4、马氏体的组织形态..... (86)
 - ① 板条马氏体..... (86)
 - ② 片状马氏体..... (88)
 - ③ 隐晶马氏体..... (88)
 - 5、关于焊缝及热影响区的马氏体组织..... (89)

第三节 焊接接头的组织鉴别

- 一、根据形成温度区别组织..... (91)
- 二、根据形貌特征区别组织..... (92)
- 三、利用显微硬度区别组织..... (92)

第四节 焊接热影响区各区的显微组织

一、部分熔化区.....	(93)
二、过热区(粗晶区).....	(93)
三、细晶区(重结晶区).....	(94)
四、不完全重结晶区(不完全正火区).....	(94)
参考文献.....	(95)

第四章 焊接热循环和模拟焊接热循环

第一节 焊接热循环

一、焊接热循环的基本参数.....	(96)
二、焊接温度场及焊接时的线能量.....	(96)

第二节 焊接热影响区

一、焊接热影响区硬度的分布.....	(97)
二、冷却速度对焊接热影响区硬度的影响.....	(98)
三、焊接热影响区中冲击值的分布.....	(99)

第三节 模拟焊接热循环

一、模拟装置及设备.....	(100)
二、模拟组织与实际焊接热影响区组织的比较.....	(102)
三、模拟试验在研究工作中的应用.....	(103)

第四节 焊接CCT图

一、焊接CCT图建立的方法和步骤.....	(104)
二、焊接CCT图应当具有的数据.....	(105)
三、20MnSi钢焊接CCT图.....	(105)
四、焊接CCT图与热影响的对应点关系.....	(108)
五、焊接CCT图与热处理CCT图的差别.....	(108)
参考资料.....	(109)

第五章 焊接接头的特征区域与焊接裂纹

第一节 焊接接头的形成和特征区域的划分

一、焊接熔池	(110)
二、熔合线	(111)
三、特征区域	(112)
四、液固相区的实质	(114)
1、焊接接头的金相研究	(114)
2、高温显微镜下模拟试验	(116)
3、关于液固相区的假说	(118)
五、部分熔化区	(119)
六、粗晶区	(120)
七、细晶区	(120)
八、不完全重结晶区	(120)

第二节 焊接裂纹

一、焊接裂纹的分类	(120)
二、结晶裂纹	(121)
三、晶间熔化裂纹	(122)
四、高温失塑裂纹	(125)
五、再热裂纹	(127)
六、氢致延迟裂纹	(127)
七、热应力撕裂	(130)
八、层状撕裂	(131)
九、结语	(132)
十、参考文献	(133)

第六章 不锈钢、镍基合金、异种金属 焊接的金相分析

第一节 铬镍奥氏体不锈钢焊缝 δ 铁素体的形成及作用

- 一、不锈钢焊缝中 δ 铁素体的形成..... (134)
- 二、 δ 铁素体的作用与控制..... (135)
 - 1、对抗裂性影响..... (135)
 - 2、对抗腐蚀性能的影响..... (136)
- 三、不锈钢焊缝中 δ 铁素体含量的测定方法..... (139)
 - 1、金相割线法..... (139)
 - 2、磁性法..... (140)
 - 3、存在问题..... (145)
 - 4、结语..... (146)

第二节 不锈钢焊接接头的刀状腐蚀

- 一、刀状腐蚀产生的条件..... (147)
- 二、刀状腐蚀的机理..... (147)

第三节 镍基合金焊接的金相分析

- 一、合金化基础..... (149)
 - 1、固溶强化..... (149)
 - 2、沉淀强化..... (149)
 - 3、晶间强化..... (149)
- 二、枝晶间强化机理..... (152)
- 三、锰、铌在镍基焊缝中的作用..... (152)

第四节 异种金属焊接的金相分析

- 一、异种金属焊接熔合区概念..... (156)
 - 1、熔合区的形成..... (156)
 - 2、熔合区的脆化和裂纹..... (158)
 - 3、异种钢焊接接头熔合线附近的碳迁移..... (159)
 - 4、熔合线剥离..... (160)
 - ① 热膨胀系数差别大造成的熔合线剥离..... (161)
 - ② 熔合线热裂剥离..... (161)
 - ③ 其它熔合线剥离现象..... (161)
- 二、镍基合金与高强钢焊接的金相分析..... (161)
 - 1、熔合区的特点..... (161)
 - 2、热裂纹与稀释率的关系..... (162)
 - 3、低熔点物质沿晶界渗入引起的脆化..... (164)
- 参考文献..... (164)

第七章 焊接金相综合分析及应用实例

第一节 焊接金相分析的程序和内容 (166)

一、明确试验目的、对象和原始条件..... (170)

二、外观和低倍分析..... (171)

三、显微分析..... (171)

四、微区精细分析..... (173)

五、综合分析..... (174)

第二节 焊接金相综合分析应用实例

一、堆焊金属中的W硬质点..... (175)

二、发电机双水内冷不锈钢管焊接接头断裂分析..... (177)

三、焊缝显微组织分析..... (178)

参考文献 (180)

(上接10页)

第四节 焊接裂纹断口分析

一、结晶裂纹..... (246)

二、晶间熔化裂纹(液化裂纹)..... (248)

三、高温失塑裂纹..... (249)

四、再热裂纹..... (249)

五、氢致延迟裂纹..... (250)

参考文献 (251)

第八章 金相显微镜的原理及应用

第一节 显微镜的简单原理

一、几何光学概述	(182)
二、放大镜	(182)
三、显微镜	(183)
1、显微镜的放大倍数	(183)
2、显微镜的鉴别率	(184)
3、数值孔径	(184)
四、金相显微镜的光学系统	(185)
1、物镜	(185)
2、目镜	(185)
3、照明系统	(185)
① 明场照明	(186)
② 暗场照明	(186)

第二节 金相显微镜的实际操作

一、用目镜测微尺及台测微计测量所观察的物体	(187)
二、显微观察	(187)
1、光栏的使用	(187)
2、滤光片的使用	(187)
3、摄影时放大倍数的测定	(188)

第三节 偏振光简介

一、什么叫偏振光	(188)
二、偏振光的获得和检查	(189)
三、偏振光装置的调整及其在金相观察上的应用	(189)
1、起偏振镜的调整	(189)
2、检偏振镜的调整	(189)
3、载物台中心的调整	(190)

第四节 金相显微镜的简单维护

一、显微镜的保管	(191)
二、显微镜的常见疵病与维护方法	(191)

第五节 普通光学金相技术的现状和发展

一、由手工操作向半自动化和自动化方向发展	(193)
----------------------	-------

第九章 焊接金相制样和照相技术

第一节 金相试样的选取和制备

- 一、试样的选取及表面形式..... (196)
- 二、试样大小及镶嵌..... (197)
- 三、试样的磨制..... (198)
- 四、试样的浸蚀..... (199)
- 五、浸蚀剂..... (200)
- 六、试样的电解抛光及电解浸蚀..... (200)
- 七、宏观组织的浸蚀..... (202)

第二节 暗室技术

- 一、金相照相的一般知识..... (207)
- 二、感光材料的性质和种类..... (208)
- 三、照相的简单原理..... (208)
- 四、显影成份的分析及其作用..... (209)
- 五、显影液的配制及注意事项..... (209)
- 六、底片的定影..... (210)
- 七、底片的水冲..... (211)
- 八、印相..... (211)
- 九、金相显微、宏观照相的技术要点..... (212)
- 参考文献..... (213)

-
- 二、试样镶嵌朝向普通化和规格化发展..... (193)
 - 三、组织显示朝向多样化和标准化发展..... (193)
 - 四、新型金相显微镜成像质量的提高和性能完善..... (193)
 - 五、光学金相半定量分析..... (193)
 - 六、失效的光学金相分析..... (195)
 - 参考文献..... (195)

第十章 焊接时固态金属中某些物理现象及与 焊接金相有关名词术语

第一节 焊接热过程的固态金属中发生的某些物理化学现象

- 一、扩散过程..... (214)
- 二、沉淀过程(时效、沉淀硬化)..... (216)
- 三、回复和再结晶..... (217)

第二节 焊接金相有关名词术语

- 一、焊接部分..... (219)
- 二、金属学部分..... (227)
- 三、力学性能及其它..... (232)

参考文献 (234)

第十一章 焊接断口分析

第一节 断口的分类

- 一、按断裂性质分..... (235)
- 二、按断裂位置分..... (235)
- 三、按断口形貌和材料冶金缺陷分..... (236)

第二节 宏观断口分析

- 一、宏观断口分析能解决的问题..... (236)
- 二、宏观断口分析的基本知识..... (236)
- 三、宏观断口分析的应用..... (237)

第三节 典型断口的微观形态简介

- 一、解理断口..... (239)
- 二、准解理断口..... (240)
- 三、韧性断口..... (241)
- 四、疲劳断口..... (242)
- 五、应力腐蚀断口(包括氢脆断口)..... (244)
- 六、晶间断裂断口..... (245)

(下转7页)

第一章 焊接用钢一般常识及其可焊性

第一节 铁与钢

大家知道，化学元素周期表中有103个元素，其中3/4是金属元素。单一金属元素组成的物质称为金属。两种以上金属元素或金属元素与其它元素组成的物质称为合金。例如，铁与碳组成的物质叫做铁碳合金。视元素的种类多少分别称为二元合金、三元合金……多元合金。工业上很难得到纯金属（100%），通常得到的多半是合金。为区分金属与合金只好人为地规定界限和定义。例如，通常把含碳量低于0.02%的铁碳合金称为纯铁，含碳0.02—2.0%者称为钢，含碳大于2%者称为生铁或铸铁。

习惯上把在生产中有实际意义的纯铁称为工业纯铁。工业纯铁中除含有0.02%以下碳外，实际上还含有其它微量元素如S、P、Si等。常用的工业纯铁见表1—1。工业纯铁虽然具有良好的塑性和韧性，但强度太低。因此，在工业上的用途很有限，一般多用做导磁材料如磁铁芯和某些仪表材料等。

工业纯铁的化学成分(1)

表1—1

元素(%) 名 称	C	Si	S	P
电解铁A	0.004	0.007	0.006	0.008
电解铁B	0.013	0.003	0.001	0.02
阿姆柯铁	0.010	0.005	0.015	0.001

含碳量大于2%的铁碳合金统称为铸铁。但是，根据含碳量不同分为：亚共晶铸铁，共晶铸铁和过共晶铸铁（含碳分别为2—4.3%；4.3%；>4.3%）。另外根据碳在铁中存在形式和断口颜色不同，分为白口铁和灰口铁。前者碳以渗碳体形式存在；后者则以石墨存在。灰口铁中石墨以球形存在者称为球墨铸铁或球铁。铸铁强度不高，脆性大，不能锻打和变形，仅适合铸造。因此，常用制造静载下的机床床身和大型机壳。球铁和其它高强度铸铁用途比较广泛。

钢具有良好的可锻性和变形能力，能够进行锻造成形和轧制成材。还能通过改变含碳量和以不同加热与冷却方式（热处理），在相当大的范围内调节钢的组织性能，以

满足各种不同用途的需要。正因为如此，钢被广泛地应用于各种受力的结构件和机械另件。含碳低于0.25%的焊接用钢则用来焊接船舶、桥梁、压力容器等。

钢的分类(2):

1) 按含碳量不同可分为:低碳钢($<0.25\%C$)、中碳钢($0.25-0.60C$)，高碳钢($0.6-1.3C$)。它们统称碳钢。

2) 根据人为加入合金元素多少分为:低合金钢($<5\%$)，中合金钢($5-10\%$)，高合金钢($>10\%$)。它们统称合金钢。

3) 根据钢中含有杂质元素(Mn, Si, S, P, N, O, H等)多少分为三类:(以最有害的杂质元素S、P来衡量)

普通钢 $S \leq 0.055 \sim 0.065\%$, $P \leq 0.045 \sim 0.085\%$,

优质钢 $S \leq 0.03 \sim 0.04\%$, $P \leq 0.035 \sim 0.04\%$,

高级优质钢 $S \leq 0.02 \sim 0.03\%$, $P \leq 0.03 \sim 0.035\%$ 。

炼钢方法不同，得到钢的质量也不同，也就是钢的使用性能和焊接性能不同。普通钢是采用转炉和大型平炉冶炼的，其特点是产量高，成本低。但是转炉钢中含氧、氮、硫、磷和非金属夹杂物较多，质量差，冷脆倾向及时效敏感性大，一般不宜用于重要的或低温工作的焊接结构，而常用作建筑材料和日用品。近几年发展的纯氧顶吹转炉钢，质量可胜过平炉钢，且生产率高，有取代普通转炉甚至平炉的趋势，可以生产低碳钢，低合金钢和部分合金钢。平炉钢杂质少，低温韧性高，时效敏感性低，可焊性好，因此常用于重要的金属结构，如焊接压力容器，锅炉，船舶、桥梁、车辆等。大部分优质碳钢和部分低合金钢主要是用平炉生产的。电炉钢质量最好、成本亦最高，目前主要用来生产合金钢，高合金钢以及优质或高级优质钢。

4) 根据钢的脱氧方法和脱氧程度分为:沸腾钢、镇静钢和半镇静钢。

沸腾钢——炼钢时在出钢前未充分脱氧，钢液中保留相当数量的FeO，浇注及凝固时，由于碳与FeO反应生成CO气体，CO从钢液中上浮产生沸腾。这种钢成材率高、成本低，但钢锭内偏析严重，分布许多小气泡、心部S、P、C等富集，钢中气体含量高，故冲击韧性低，冷脆及时效敏感性均较大，焊接性能差(易出气孔和裂纹)。所以不宜用于动载和低温条件下工作的焊接结构。

镇静钢——钢液在浇注前充分脱氧，凝固时没有沸腾现象。这种钢因有集中缩孔而成材率低，但成材含气量少，偏析程度小、质量较高。常用于制造压力容器、锅炉、船舶等。合金钢一般均为镇静钢。

半镇静钢——脱氧程度介于沸腾钢与镇静钢之间，因而质量也介于两者之间。成材率达90%，很有发展前途，许多国家用半镇静钢代替沸腾钢作为焊接结构用钢。

5) 根据钢的用途可分为:

1、结构钢

1-1、工程用钢:用作钢筋、钢架、钢轨、车辆、船舶、桥梁，容器等。这类钢大部分轧成型材，如角钢、槽钢、工字钢，钢板、钢带等。根据不同强度要求和用途有低碳钢、普通低合金高强度和超高强度钢等等。焊接生产中多数采用这类钢材。

1-2，机器制造用钢:用于制造各种机器另件如齿轮，轴类等。一般都轧成圆

钢、方钢、扁钢、线材等。包括调质钢，渗碳钢，弹簧钢、滚珠轴承钢等。

2、工具钢

用于制造各种工具、量具、刀具。有刀具钢、量具钢、模具钢等。

3、特殊性能钢

具有特殊的物理和化学性能钢、如不锈钢、耐热钢、耐磨钢等。

有关各类钢的牌号表示方法，冶金部有统一规定，请参阅附录1。有关碳素结构钢的牌号，成分、性能可参阅附录2。有关普通低合金钢钢号和一般技术条件参阅附录3。现以碳素结构钢为例简要介绍如下：

普通碳素结构钢简称普碳钢。其含碳量低于0.25%C。常用的钢种按要求不同可分为甲类钢、乙类钢和特类钢三类，也可依次用字母表示(A,B,C)。对沸腾钢则在钢类的顺序号后以汉字“沸”或字母“F”表示，如A₃F。

甲类钢必须保证其力学性能而不保证化学成分，乙类钢只保证化学成分而不保证力学性能，特类钢则两项都保证，以适应各种用途的要求。表1—2列出甲、特类结构钢的力学性能及冷弯试验指标。表1—3列出三类钢的化学成分。

甲、特类结构钢的力学性能及冷弯试验指标

表1—2

钢 号		力 学 性 能			σ_b (kg/mm ²)	延伸率 (%)		180° 冷 弯 试 验 d—弯心直径 a—试样厚度
甲 类 钢	特 类 钢	σ_s (kg/mm ²) 不小于				不 小 于		
		按 尺 寸 分 组						
		1 组	2 组	3 组		δ_s	δ_{10}	
A ₁ A ₁ F		—	—	—	32—40	33	28	d = a
A ₂ A ₂ F	C ₂ C ₂ F	22	20	19	34—42	31	26	d = a
A ₃	C ₃	24	23	22	38—40	27	23	d = 0.5a
					41—43	26	22	
					44—47	25	21	
A ₃ F	C ₃ F	24	22	21	38—40	27	23	d = 0.5a
					41—43	26	22	
					44—47	25	21	

甲、乙、特三类钢的化学成分

表1—3

炉种	钢号			化 学 成 分 %				
	甲类	乙类	特类	C	Si	Mn	P (不大于)	S (不大于)
碱性	A ₁	B ₁	—	0.06~0.12	0.12~0.30	0.25~0.50	0.045	0.055
	A _{1F}	B _{1F}	—	0.06~0.12	≤0.05	0.25~0.50	0.045	0.055
平炉	A ₂	B ₂	C ₂	0.09~0.15	0.12~0.30	0.25~0.50	0.045	0.055
	A _{2F}	B _{2F}	C _{2F}	0.09~0.15	≤0.07	0.25~0.50	0.045	0.055
炉钢	A ₃	B ₃	C ₃	0.14~0.22	0.12~0.30	0.40~0.70	0.045	0.055
	A _{3F}	B _{3F}	C _{3F}	0.14~0.22	≤0.07	0.40~0.70	0.045	0.055

第二节 钢的力学性能

钢的性能包括使用性能和工艺性能两方面。使用性能是指力学性能(或称机械性能,包括强度、硬度塑性和韧性等),物理性能(如熔点、导电性、磁性、导热性、热膨胀等)及化学性能(抗氧化、抗付蚀性等)。工艺性能是指材料对加工制造过程表现出来的适应能力,如焊接性能、铸造性能、锻造性能、热处理和冷加工性能等。在产品设计和制造时要考虑材料的这两方面性能、否则将给生产和应用都造成困难。

这里仅就与焊接有关的力学性能作一简介(1)。

一、钢的强度和塑性

采用静载拉伸试验可以测到钢材及焊接接头的强度和塑性。拉伸试样都已标准化,也可根据具体情况和要求制取非标准试样。把试样装于拉伸试验机上缓慢加载直至拉断,记录下载荷(P)与试样变形量的关系曲线,如图1—1所示。从曲线上可以看到材料在加载过程中变形情况与载荷的关系,由此便可得到静拉伸条件下材料的各项机械性能指标。图中a点的应力称为比例极限。计算公式为:

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0} \text{ (公斤力/毫米}^2\text{)}$$

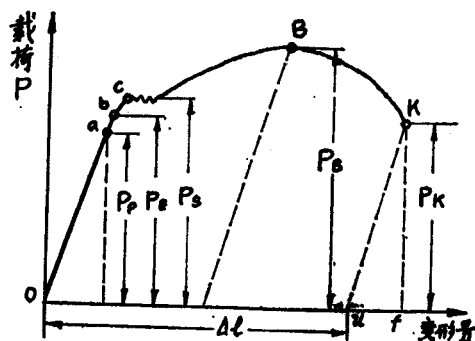


图1—1 低碳钢的拉伸曲线