

金属材料 金相图谱

下册

主 编 李炯辉
副主编 林德成

- ◆ 金相工作者的良师益友
- ◆ 缺陷分析和失效分析人士的得力助手
- ◆ 30多位作者数十年金相检验经验与成果的集粹

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TG113.14

4

:2

金属材料金相图谱

下 册

主 编 李炯辉

副主编 林德成



机械工业出版社

《金属材料金相图谱》分上、下两册(共12章),上册内容包括:铸铁、结构钢、钢中夹杂物、工模具钢、特种钢;下册内容包括:焊接件、粉末冶金、表面渗镀涂层、铜及铜合金、铝及铝合金、轴承合金、其他非铁金属(内有钛及钛合金、锌及锌合金、铅及铅合金、镁及镁合金、镍及镍合金和其他合金)。每章的前面部分是文字说明,简要介绍本章的材料分类、处理工艺、组织特征和检验方法等与本章图片密切相关的共性内容,每章的后面部分为金相图片,包括图号、材料名称、浸蚀剂、处理情况和组织说明。图片均选自科研、生产中常见的正常组织图片、缺陷组织图片和失效分析组织图片,共计4634幅。

本书适于金相工作者、热加工工艺人员、材料生产、使用等单位的工程技术人员以及科研人员使用,也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料金相图谱/李炯辉主编.—北京:机械工业出版社,2006.6

ISBN 7-111-19312-1

I. 金... II. 李... III. 金属材料—相图 IV. TG113.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第061474号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:崔世荣 版式设计:冉晓华 责任校对:刘志文

封面设计:鞠杨 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2006年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·123印张·5插页·3062千字

0001—3000册

定价:300.00元(上册、下册)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线电话(010)88379080

封面无防伪标均为盗版

《金属材料金相图谱》编审委员会

主 任 李炯辉

副主任 林德成

委 员 (按姓氏笔画排列)

丁惠麟 王桂生 毛照樵 朱铭德 许麟康

李寿康 李静媛 周正民 周慈成 胡永川

胡明初 施友方 谢轶伦 强明道 董鸿琳

韩德伟 蔡美良

* * * * *

主 编 李炯辉

副 主 编 林德成

编校人员 李廷蔚 林晔生 张明良 李晓蔚

《金属材料金相图谱》编写者名单

- | | | | | | |
|------|--------|-----|-----|-----|--------|
| 第1章 | 铸铁 | 胡明初 | 周慈成 | 杨佳荣 | 梅红 |
| 第2章 | 结构钢 | 朱铭德 | 李廷蔚 | 陈飞舟 | 张明良 |
| 第3章 | 钢中夹杂物 | 李静媛 | 陈善珠 | | |
| 第4章 | 工模具钢 | 蔡美良 | 顾克成 | 赵传国 | 方成水 |
| 第5章 | 特种钢 | 陈金宝 | 强明道 | | |
| 第6章 | 焊接件 | 强明道 | 陆慧 | 顾兰香 | |
| 第7章 | 粉末冶金 | 毛照樵 | 陈善珠 | | |
| 第8章 | 表面渗镀涂层 | 丁尧华 | 张晓峰 | 吴建中 | |
| 第9章 | 铜及铜合金 | 李寿康 | | | |
| 第10章 | 铝及铝合金 | 丁惠麟 | | | |
| 第11章 | 轴承合金 | 孙旭茂 | | | |
| 第12章 | 其他非铁金属 | 韩德伟 | 王桂生 | 谢先娇 | 余琨 李寿康 |

序

经典金相学肇始于 19 世纪中叶，英国冶金学家索比 (H.C.Sorby) 在光学显微镜下，用斜射光观察了钢铁中的珠贝体组织 (形如贝壳表面的纹理)，亦即珠光体组织。1885 年，索比应用直射光、放大至较高的倍数，清晰地看到了珠光体的片层状结构，并预测厚的片层为纯铁，薄的片层为渗碳体。之后，人们又相继研究了钢的退火、正火、淬火和回火组织。于是，一门名为“金相学”的学科诞生了。其含义是：在光学显微镜下，研究金属材料组织形态规律的科学，谓之金相学。经典金相亦即光学金相。

随着科学技术特别是相关科学技术的发展，新的金相测试仪器不断涌现，使金相学的面貌日新月异。这主要表现为下列方面：

光学显微镜的使用性能逐渐扩大，如暗场、偏光、相衬、微分干涉、显微硬度、红外光和紫外光的应用等等，提高了相的清晰度和分辨率。

高温和低温显微镜的应用，可观察金属材料在高温和低温时相变的整个过程。

电子探针、离子探针、俄歇能谱仪和 X 射线扫描等用于测定微区的化学成分。

扫描电镜用于观察相的三维形貌，透射电镜用于观察亚结构、位错分布密度等等。与光学显微镜比较，电镜的应用深化了金相的研究层次。

图像分析仪的应用，可根据光学显微镜下相的二维形貌推断其三维形貌并加以量化，这便是定量金相学。

金相显微镜选配自动化电子装置，用计算机对显微镜进行自动化操作，可使金相照片上网，随时与国内外同仁交流。

上述种种，仅为概况，并非全貌。而且每过几年，就会有一种新的测试仪器出现。可见，由于新的测试手段的不断涌现，现代金相学的内涵已逐渐扩大和深化，它已发展成为综合研究金属材料成分、组织和性能之间内在关系的一门科学。

虽然现代金相学的优点很突出，但经典金相学仍然是科学研究特别是检验金属材料质量的重要手段。

本书的作者，大多是从从事金相工作达数十年的资深人员，他们孜孜以求，不断耕耘，做了大量分析研究，并拍摄了大量照片 (有些照片颇具原创性)。于是，厚积薄发，积淀成本书。我慎重地向从事金属材料研究和检测的人员推荐，这不仅是一本对质量检验有益的图谱，还介绍了大量由材料内在质量缺陷引起的失效实例，因而它是一本能启发人们做进一步探索和研究的图谱。

本书内容丰富，图文并茂，并附有理论说明，对从事金属材料研究和应用的科技人员来说是一本实用的工具书。我相信：本书的出版，必将有助于促进我国金相界的交流和提高。

国际材料检测和评价协会主席

吴永康

前 言

作为现代金相的重要组成部分及研究方法之一，光学显微镜在金属材料的宏观和微观检验中发挥着重要的作用，尤其以其直观、便捷的特点在金相组织鉴别和缺陷分析中得到广泛应用。

随着光学显微技术的发展，从显微镜光学系统的设计到观察方式都有了很大的进步，进一步提高了观察的效果和效率。近年来，特别是数码影像系统的发展，更是为定量金相分析提供了有利条件，同时针对材料研究的多样化要求，显微镜模块化设计为扩展显微镜的功能提供了一个好的平台、电动台、热台等，从而可以非常方便地搭载，为多视场金属夹杂物评定、高温或低温条件下的相变研究提供了便利，而且作为常规检验手段之一，对工作效率的提高要求也促使显微镜的自动化程度大幅度地提高，例如自动聚焦、电动物镜转化、电动观察方式转换，甚至显微镜完全由计算机操控都可实现，为材料科学研究和产品质量控制提供了有利的工具。

目前，现代的金相显微镜都采用了无限远光学系统，奥林巴斯显微镜采取的第二代万能无限远光学系统的像差校正更完善，使得成像更清晰，反差更明显。最新的高 NA 值（数值孔径）长工作距离的高倍物镜，更是为金相和失效分析研究提供了完美的解决方案。

对新材料的研究，使用有针对性的观察方法，往往对结果的判定起到帮助，新一代的金相显微镜都具有明场、暗场、偏光、微分干涉等观察方式并易于转换。奥林巴斯针对不同组织观察需要，还开发了分别针对高分辨率和高反差的微分干涉模块，能够观察到材料垂直方向纳米尺度的变化。

新一代高分辨率数码相机的问世，使取代繁琐暗室工作成为可能。在方便图像记录处理及量测的同时，能得到和光学相机可比拟的金相图像，配合多种金相应用模块可得到准确的分析结果，大大减轻了广大金相工作者的劳动强度，成为新一代金相图像分析的标准工具。

如今专门用于工业领域的激光共焦显微镜的问世（LEXT3000），为现代金相研究又提供了一个新的手段，通过点激光断层扫描探测并获得图像的方式，除了更高分辨率成像、3D 影像获取、表面粗糙度的量测，更是为金相检验、失效分析提供了常规光学显微镜所无法实现的功能，扩展了光学金相的范畴；同时在使用时也对金相制样的依赖降至最小，因此该设备在分辨率、三维成像、多功能的非接触精密量测（表面粗糙度及高度的自动化测定）以及设备使用的便捷性上都带来了革命性的技术突破。

本书是很多金相专家毕生心血所得，是目前相关领域内较完善全面的学习资料和工具书。在此期间能和很多专家一起探讨金相图片有关技术并参与部分图片拍摄，获益匪浅，我们坚信这本工具书的问世，一定会对广大金相工作者提供很有力的帮助。在此，我们也希望通过不断的努力，为广大金相用户提供更多的技术支持，为推动金相技术的发展和进步贡献我们的一份力量。

元中光学仪器国际贸易（上海）有限公司

编者的话

金属材料行业是国家的支柱产业之一。金相技术则是检测材料的重要手段。

从历史轨迹看，金相技术经历了从经典金相（光学金相）到现代金相的发展过程。

光学金相具有设备简单、操作方便的优点，至今仍是研究新材料、新工艺，特别是检测材料质量以及进行失效分析的重要工具。

本书上、下两册，上册包括：铸铁、结构钢、钢中夹杂物、工模具钢、特种钢共 5 章；下册包括：焊接件、粉末冶金、表面渗镀涂层、铜及铜合金、铝及铝合金、轴承合金、其他非铁金属共 7 章。全书共有 4634 幅图片，其中有少量扫描电镜、透射电镜、俄歇电镜、电子探针和 X 射线扫描、原子力显微镜等照片。按图片的内容分类，包括正常组织、缺陷组织、废品分析和失效分析，还有一些专题研究。例如第 1 章铸铁中反白口的分布特征、形态分类和元素的微区分布，球墨铸铁测定洛氏硬度形成的压痕诱发裂纹；第 2 章结构钢汽车零部件生产应用冷挤压工艺；第 4 章工模具钢中利用原子力显微镜来显示碳素工具钢珠光体片间距的立体形貌；采用双细化新工艺来提高工模具的强韧性等等，皆是专题研究的例子。

本书对金相图片的组织说明有简有繁，对于读者熟知的组织，使用精练的笔墨加以勾勒；对于受人关注的组织（或问题），则往往从历史渊源、研究近况、组织结构和形成机理等各个角度予以论述，以期引起读者的感应和互动（例如，在第 1 章中对球墨铸铁上贝氏体的分析及第 8 章中对铁镀层组织结构的分析），从中可以看出编者的刻意和匠心，希冀把本书写成一本有所创新的图谱，当然这是不容易的。但正如古语所说，“高山仰止，景行行止，虽不能至，心向往之”，这就是我们写作时的心态。

本书的作者，大多是 20 世纪五六十年代即从事金相热处理工作的资深人员，悠悠岁月，耿耿晨昏，如今不少人已两鬓染霜，成为退休一族，为了回报社会，为了繁荣我国的金相工作，大家不量绵薄，编写了这本图谱。

本书的图片，多为编者在科研和日常检测中的长期积累，亦有些系国内同仁友情的支持和取自编者的旧作（《钢铁材料金相图谱》，作者李炯辉，施友方，高汉文；《铜及铜合金金相图谱》，洛阳铜加工厂中心试验室金相组李寿康执笔；《钛及钛合金典型显微组织图册》，有色金属研究总院王桂生执笔）。因此，从某种意义上来说，这是集体耕耘的成果。走笔至此，编者谨向支持和帮助过我们的同仁致以诚挚的谢意。

本书在编写过程中得到了香港德华材料检测有限公司、无锡港下精密砂纸厂（0510—88765588）、元中光学仪器国际贸易（上海）有限公司、恒一精密仪器有限公司等单位的大力支持，在此谨向上述各单位致以深深的谢意。

由于编写篇幅颇多，难免有疏漏之处，恳请读者批评指正。

编者

目 录

序
前言
编者的话

上 册

| | | |
|----------------------------|-------|------------|
| 第 1 章 铸铁 | (1) | |
| 第 1 节 白口铸铁 | (3) | 金相图片 (15) |
| 第 2 节 灰铸铁 | (5) | 金相图片 (56) |
| 第 3 节 球墨铸铁 | (6) | 金相图片 (125) |
| 第 4 节 蠕墨铸铁 | (9) | 金相图片 (253) |
| 第 5 节 可锻铸铁 | (10) | 金相图片 (265) |
| 附 表 铸铁常用的浸蚀剂组成、用途 和使用说明 | (14) | |
| 第 2 章 结构钢 | (293) | |
| 第 1 节 碳素结构钢 | (293) | 金相图片 (303) |
| 第 2 节 低合金结构钢 | (294) | 金相图片 (373) |
| 第 3 节 碳素铸钢及低合金铸钢 | (298) | 金相图片 (521) |
| 第 4 节 弹簧钢 | (300) | 金相图片 (555) |
| 附 表 结构钢常用的浸蚀剂名称、组 成和用途 | (302) | |
| 第 3 章 钢中夹杂物 | (597) | |
| 第 1 节 氧化物 | (598) | 金相图片 (603) |
| 第 2 节 硫化物 | (599) | 金相图片 (619) |
| 第 3 节 硅酸盐 | (600) | 金相图片 (632) |
| 第 4 节 氮化物、稀土夹杂物 | (601) | 金相图片 (645) |
| 附 表 钢中夹杂物浸蚀剂的名称、组 成和用途 | (602) | |
| 第 4 章 工模具钢 | (660) | |
| 第 1 节 碳素工具钢 | (660) | 金相图片 (672) |
| 第 2 节 轴承钢 | (661) | 金相图片 (706) |
| 第 3 节 冷作模具钢 | (662) | 金相图片 (751) |

| | | | |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------------|
| 第4节 | 热作模具钢 | (665) | 金相图片 (827) |
| 第5节 | 塑料模具钢 | (667) | 金相图片 (882) |
| 第6节 | 高速钢 | (669) | 金相图片 (889) |
| 附表 | 工模具钢常用的浸蚀剂名称、 组成和用途 | (671) | |
| 第5章 特种钢 | | (927) | |
| 第1节 | 不锈钢 | (930) | 金相图片 (936) |
| 第2节 | 耐热钢 | (932) | 金相图片 (1012) |
| 第3节 | 耐磨钢 | (934) | 金相图片 (1085) |
| 附表 | 特种钢常用的浸蚀剂名称、 组成和用途 | (935) | |
| 附录 《金属材料金相图谱》材料名称及状态与图片页码索引 | | (1094) | |

下 册

| | | | |
|-------------------|-------------------------------|--------|-------------|
| 第6章 焊接件 | | (1103) | |
| 第1节 | 同种材料焊接 | (1105) | 金相图片 (1110) |
| 第2节 | 异种材料焊接 | (1106) | 金相图片 (1152) |
| 第3节 | 特殊焊接件 | (1107) | 金相图片 (1185) |
| 附表 | 焊接件常用的浸蚀剂名称、 组成和用途 | (1109) | |
| 第7章 粉末冶金 | | (1264) | |
| 第1节 | 硬质合金 | (1264) | 金相图片 (1270) |
| 第2节 | 铁基粉末冶金制品 | (1267) | 金相图片 (1295) |
| 附表 | 铁基粉末冶金和硬质合金常用 的浸蚀剂名称、组成和用途 | (1269) | |
| 第8章 表面渗镀涂层 | | (1319) | |
| 第1节 | 渗碳处理 | (1319) | 金相图片 (1340) |
| 第2节 | 碳氮共渗处理 | (1324) | 金相图片 (1380) |
| 第3节 | 渗氮和氮碳共渗处理 | (1330) | 金相图片 (1406) |
| 第4节 | 感应加热热处理 | (1333) | 金相图片 (1426) |
| 第5节 | 其他表面处理 | (1333) | 金相图片 (1441) |
| 附表 | 表面渗镀涂层浸蚀剂的名称、 组成和用途 | (1338) | |

| | | | |
|--------|--------------------------------|--------|-------------|
| 第 9 章 | 铜及铜合金 | (1480) | |
| 第 1 节 | 纯铜 | (1480) | 金相图片 (1504) |
| 第 2 节 | 黄铜 | (1482) | 金相图片 (1520) |
| 第 3 节 | 青铜 | (1489) | 金相图片 (1568) |
| 第 4 节 | 白铜 | (1499) | 金相图片 (1621) |
| 附 表 | 铜及铜合金宏观浸蚀剂的名称、 组成及适用范围 | (1501) | |
| 附 表 | 铜及铜合金浸蚀抛光试剂的 名称、组成及适用范围 | (1501) | |
| 附 表 | 铜及铜合金电解抛光液的名称、 组成、抛光条件及适用范围 | (1501) | |
| 附 表 | 铜及铜合金电解浸蚀液的名称、 组成、使用条件及适用范围 | (1502) | |
| 附 表 | 铜及铜合金化学浸蚀试剂的 名称、组成及适用范围 | (1502) | |
| 第 10 章 | 铝及铝合金 | (1631) | |
| 第 1 节 | 铸造铝合金 | (1631) | 金相图片 (1648) |
| 第 2 节 | 变形铝合金 | (1638) | 金相图片 (1727) |
| 附 表 | 常用的铝及铝合金抛光液成分 及工艺参数 | (1647) | |
| 附 表 | 常用的铝及铝合金组织浸蚀剂 名称、组成和用途 | (1647) | |
| 第 11 章 | 轴承合金 | (1786) | |
| 第 1 节 | 锡基轴承合金 | (1786) | 金相图片 (1792) |
| 第 2 节 | 铅基轴承合金 | (1788) | 金相图片 (1798) |
| 第 3 节 | 铜基轴承合金 | (1788) | 金相图片 (1802) |
| 第 4 节 | 铝基轴承合金 | (1790) | 金相图片 (1839) |
| 附 表 | 轴承合金浸蚀剂名称、组成和用途 | (1791) | |
| 第 12 章 | 其他非铁金属 | (1848) | |
| 第 1 节 | 钛及钛合金 | (1848) | 金相图片 (1865) |
| 第 2 节 | 锌及锌合金 | (1855) | 金相图片 (1901) |
| 第 3 节 | 铅及铅合金 | (1858) | 金相图片 (1909) |
| 第 4 节 | 镁及镁合金 | (1861) | 金相图片 (1918) |
| 第 5 节 | 镍及镍合金和其他合金 | (1863) | 金相图片 (1929) |
| 附录 | 《金属材料金相图谱》材料名称及状态与图片页码索引 | (1936) | |

第6章

焊 接 件

由于焊接具有简便、经济、安全以及可以简化形状复杂零件的制造工艺等特点，在机械制造业中，焊接工艺得到广泛的应用，以往许多铆接的结构也被焊接件所替代，因此焊接工艺的应用，将越来越广，焊接件的金相检验也越来越多。焊接金相主要检验焊接接头的组织。焊接接头由焊缝金属（简称焊缝）、母材受热影响区及母材未受热影响区三部分构成。由于焊接接头上三个区的组织不同，故应分别进行金相检验。

鉴于在施焊过程中，熔池的容积相当小，而其周围又是大块的冷态金属，因此熔池金属的冷却速度将比一般铸造或浇注的金属冷却速度大得多，同时熔池中金属的温度又比一般钢锭温度高得多，处于过热状态，熔池中心与固液相界面的温度梯度很大，这就决定了焊缝结晶的宏观特征。

焊接接头的组织：

1. 接头的低倍组织

(1) 焊缝 由熔化金属（它是由熔化的填料金属和母材的熔化部分混合组成熔池的液态金属）凝固结晶而成。接头的低倍组织为铸态的柱状晶，从焊缝与母材界面沿与熔池壁相垂直的方向伸向焊缝中心。同时由于焊缝的凝固是在热源不断向前移动的情况下进行，随着熔池的向前推进，最大温度梯度方向也在不断改变，因此柱状晶长大最有利的方向也在改变，一般情况下熔池呈椭圆形，于是柱状晶垂直于熔池弯曲长大。在焊缝中心常呈八字形分布。

(2) 母材热影响区 也称焊接热影响区。位于焊接接头上与焊缝区紧邻的母材部分，这一区域虽不算太宽，但温度范围极广，从固相线温度开始，直至母材的原始状态的温度，这就包括了过热区、重结晶区和回火温度区等。此区内有的组织已发生相变，所以受腐蚀后的低倍组织通常呈深灰色。

(3) 母材未受热影响区 位于距焊缝较远处，但与母材热影响区相邻。该区大多仍保持着母材原始的加工状态，有时呈带状组织分布。

(4) 熔合线 采用通常的浸蚀方法在焊缝和热影响区的交接处常见一条较深的黑线，即熔合线。所有的金属和合金焊接接头低倍组织中基本上都存在熔合线，但由于熔合线的实际宽度过于狭小，一般在低倍下较难清晰地显示其特征。

2. 焊接接头的显微组织

(1) 焊缝区 焊缝是填料和母材受热熔化后，先凝固结晶然后连续快速冷却到室温形成的组织。因此焊缝具有由结晶产生的一次组织和由固态相变生成的二次组织两种形态。

1) 焊缝的一次组织：为铸态奥氏体。受焊缝组分过冷度大小影响，一次组织可归纳有五种形态：

① 平面晶。当熔池与固相界面的温度梯度很大时，即液-固界面液体凝固时，释放的相变潜热，通过界面后方向固相散发出去，使界面平缓地向前方推进，所以界面呈平面状态，称为平面结晶组织。多见于高纯度焊缝中，一般钢及合金的焊缝较少见。

② 胞状晶。当熔池与固相界面的温度梯度稍小时，即液-固相界面前液体，出现很小的成分过冷区，会从凝固界面上长出许多小芽苞突入过冷的液体区，利于凝固潜热散发，这些苞芽的截面呈六角形，故将柱状晶中这种亚晶称为胞状晶。

③ 胞状树枝晶。随着熔池温度梯度的降低，液-固相界面前液体的实际温度随之降低，出现了较宽的过冷区和过冷程度增大，界面上凸起的小芽苞能够深入到液体较远处，并不时向四周排出溶质使四周也产生了成分过冷现象。从而在若干胞状晶上生长出由发展不完全而形成的较短的二次横枝所构成的树枝状奥氏体。

④ 柱状树枝晶。当熔池与固相界面的温度梯度进一步减小时，液-固相界面前的低于液相线平衡温度的液体区宽，即出现很宽的过冷区，成分过冷度很大。在一颗晶粒内除了主干（一次轴）很长外，主轴的四周上生长有二次、三次横向分枝也可以长到一定的程度而形成了树枝状结晶。

⑤ 等轴晶。又称等轴树枝晶，是在几个结晶方向上都得到有利生长而形成等轴状结晶。常见的焊缝一次组织，以柱状树枝晶最普遍。

焊接工艺参数会影响焊缝一次结晶的形态。当焊接速度一定时，随焊接电流的增大，结晶组织由胞状晶→胞状树枝晶→粗大树枝晶→等轴树枝晶。焊接速度也影响一次组织形态。随着焊接速度的提高，焊缝组织由树枝状晶→胞状树枝晶→胞状晶。焊接速度降低，电弧停留时间长，容易形成粗大的树枝状组织。但焊接速度的影响较为复杂，需根据实际情况具体分析。

2) 焊缝的二次组织：一次组织奥氏体继续快速冷却到 A_{r3} 以下时，发生转变或分解，形成各种组织，即二次组织。焊缝的组分及冷却条件不同，生成各种二次组织，如铁素体、珠光体、托氏体、贝氏体和马氏体等。焊接所用的大多数是含低碳的钢种，冷却后易生成先共析铁素体，由于一次组织奥氏体往往晶粒粗大，快速冷却后易生成魏氏组织（铁素体-先共析铁素体的特殊形式）。随冷却速度增大，二次组织中先共析铁素体的形貌由块状变为针状；珠光体的片间距越来越小；超过一定冷却速度后会得到非平衡组织贝氏体和马氏体。不同材料的焊缝，其二次组织也会不同。

(2) 熔合区 熔焊焊缝由混合熔化区、未混合熔化区和半熔化区构成。熔合区是母材到焊缝的过渡区，它包括未混合熔化区和半熔化区。真实熔合线在未混合熔化区和半熔化区之间，是实际的母材热影响区与焊缝的边界线。熔合区组织十分粗大，化学成分和组织都极不

均匀，特别是异种钢或合金的焊缝这种情况更为明显。该区很狭窄，是接头的最薄弱部分，也是最容易发生焊接裂纹和脆断的部位。

(3) 母材热影响区 从焊缝到真正的母材（未受热影响区）之间是母材热影响区，它是因受不同程度焊接热作用而产生组织和性能明显变化的区域。母材热影响区中与焊缝相距不同的各点有对应的不同组织。这主要决定于母材的成分、状态及该处所经历的焊接热循环、应力、应变。材料是否有重结晶对母材热影响区组织有密切影响。

1) 具有重结晶材料的母材热影响区：对纯金属或单相合金，母材热影响区含有粗晶区、细晶区和再结晶区。粗晶区或称过热区位于焊缝邻近；细晶区位于离焊缝较远的粗晶过热区邻旁；再结晶区则位于与真正母材相紧邻的部位。

具有重结晶的多相合金母材热影响区组织较复杂，如合金结构钢的母材热影响区可包括五个区域：半熔化区、粗晶区、完全重结晶区、不完全重结晶区和回火区。

2) 不发生重结晶材料的母材热影响区：对于退火状态的纯金属或单相合金焊接，只有晶粒粗化区；冷加工态的纯金属或单相合金焊接有再结晶软化区。

对多相合金焊接，基本可分为固溶区与相析出区（如 18-8 型奥氏体铬镍不锈钢中的敏化区）。

第1节 同种材料焊接

本节涉及的是材料为低碳结构钢和低合金结构钢焊接件的组织。

1. 低碳结构钢焊接件组织

(1) 低碳结构钢的焊缝 金相所见均为焊缝二次组织，常见为铁素体+少量珠光体+魏氏组织。其中沿原奥氏体晶界析出且呈网状的铁素体为先共析铁素体。它勾画出了一次结晶柱状晶的轮廓，从尺寸和方向上都表现了一次结晶组织的形貌特征。低碳结构钢焊缝中的从晶界出发向晶内生长的针状铁素体，以及在晶内形核长成的针状铁素体均为魏氏组织铁素体。它作为低碳结构钢焊缝组织的特征形态，总是与晶界的先共析铁素体共生，它们之间没有明确的界面。在晶内，铁素体片间距较宽、数量也少。

当焊接热输入较小、冷却速度较大时，焊缝中的柱状晶细长，先共析铁素体多以片状析出，魏氏组织铁素体片薄，片间距较窄；若热输入大、冷却速度减小时，沿晶分布的先共析铁素体多以块状出现，魏氏组织铁素体片厚、片间距较宽。若冷却速度加快，先共析铁素体数量减少。在这种情况下，随着化学成分与冷却速度的加快，有可能出现无碳贝氏体、粒状贝氏体，甚至出现马氏体。

低碳结构钢的熔合区组织，大多是珠光体+铁素体，也都有魏氏组织铁素体。但仅据以上组织较难判定熔合区。金相检验时，可以从多面体晶粒（母材）向柱状晶粒（焊缝）组织形态过渡性及组织不具备上述典型性来判定熔合区的存在。

低碳结构钢母材热影响区组织可分为四个区：

1) 熔合区：熔合线附近焊缝到母材的过渡部分是金属经过局部熔化，晶粒十分粗大，化学成分和组织极不均匀的过热组织。该区很狭窄，金相观察较难明显区分出。

2) 过热区（粗晶粒区）：晶粒十分粗大，晶粒度均在 3 级以上。常见为粗大的先共析铁素体+针状铁素体（魏氏组织）+索氏体，不呈带状分布特征。

3) 相变重结晶区(细晶粒区): 常见为均匀细小的铁素体+珠光体。相似于正火组织, 又称正火区。铁素体网状分布及魏氏组织消失。

4) 部分相变区(不完全重结晶区): 组织为未发生转变的铁素体+经过部分相变后生成的细小珠光体和铁素体。组织通常部分地保留了原始的带状分布特征。

2. 低合金结构钢焊接件组织

焊接用低合金结构钢一般都属于低碳级的, 如 Q390(15MnV)、Q345(16Mn)、16Mo、20Cr、12Cr2MoWVB、35CrMo、3Cr2W8 钢等。低合金结构钢中由于合金元素的加入, 提高了钢的淬透性能, 因此不仅直接影响着焊接的一次组织, 也影响到热影响区的组织。各种组织如铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体等都可能出现。以 Q345(16Mn) 钢焊接为例, 其焊缝组织可能由先共析铁素体+粒状贝氏体+魏氏组织铁素体+无碳贝氏体等构成的混合组织。若钢中合金元素种类多, 总含量也较多时, 焊缝二次组织会出现贝氏体和粗大的板条状马氏体。热影响过热区组织为针状铁素体+索氏体+少量粒状贝氏体等。其他部位的热影响区组织与低碳结构钢基本相似, 但与低碳结构钢相比, 其组织有以下特点: ①焊缝组织较细小。②接头中易出现中温转变(贝氏体)和低温转变(马氏体)产物, 硬化倾向较大。③在相同热输入条件下母材过热区较低碳结构钢窄些, 晶粒长大倾向小。④焊缝与过热区往往是多种组织伴生呈混合状态。

低碳结构钢及低合金结构钢焊缝及热影响区、母材组织一般采用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀, 可获得清晰组织。

同种材料焊接接头的金相图片见图 6-1-1~图 6-1-117。

第 2 节 异种材料焊接

异种金属材料焊接是指化学成分和性能差别很大的两种钢或合金的焊接。本节涉及的主要是不锈钢、低合金结构钢(16Mn)、低碳结构钢(Q235)、工具钢(W18Cr4V)以及钢与纯铜焊接件的组织。

异种材料焊接时, 焊缝金属(完全混合熔化区)的组织 and 母材的大部分热影响区的组织, 基本上决定于给定的焊缝金属和母材的固有化学成分及焊接工艺。但在熔合线附近(熔合区)的组织则比较复杂。

异种材料焊接的熔合区组织: 异种材料焊接由于化学成分和组织差别很大, 在熔合区存在着化学成分的过渡, 在焊接过程、热处理及运行中熔合线两侧化学成分会发生变化——碳迁移和合金元素扩散再分配, 使得熔合线两侧组织发生了复杂的变化。例如当 16Mn(铁素体基体)钢与 18-8 型奥氏体不锈钢对焊焊缝中, 由于碳元素从 16Mn 向 18-8 型奥氏体不锈钢焊缝侧迁移, 造成 16Mn 过热区出现铁素体聚集带—脱碳带; 而在熔合线的 18-8 型奥氏体不锈钢焊缝侧则会出现灰色的增碳带。脱碳带和增碳带的宽度受热处理的影响, 当焊后退火温度高、保温时间长, 脱碳带和增碳带将加宽。当高速工具钢 W18Cr4V 与 45 碳钢对焊时, 在熔合线的母材高速钢侧出现脱碳带, 组织中出现了中碳马氏体, 若焊后空冷, 高速钢过热区组织中出现沿晶分布的黑色托氏体。若对焊后进行退火, 则高速钢熔合区脱碳带中的碳化物会显著减少。对于低碳结构钢 Q235 与纯铜 T3 对焊后, 在铜与钢交界处会出现灰色狭长带的金属间层, 而熔合线的 T3 铜侧组织中会出现铁相组织。这些是不同材料间化学成分扩散的结果。

低合金结构钢与不锈钢焊接，以后热处理及运行过程中的碳迁移和合金元素扩散再分配作用，使熔合区不锈钢侧形成增碳层，生成复杂碳化物而硬化和开裂，而低合金结构钢一侧形成脱碳层—铁素体聚集及含量显著增多，则会降低该处的热强度和力学性能，影响正常使用寿命。

异种材料焊接接头的金相图片见图 6-2-1~图 6-2-84。

第3节 特殊焊接件

本节涉及到表面渗碳件焊接；同种或异种不锈钢焊接；同类或异类炉用耐热钢的焊接；纯铜、黄铜、工业纯铁、钛合金的焊接；合金钢和碳钢表面堆焊、喷焊硬质合金层等组织。

1. 表面渗碳件焊接组织

工件表面渗碳层由表及里的含碳量存在着从高到低的梯度变化，焊缝又或多或少与表面渗碳层相重合，因此焊缝及热影响区由表及里的化学成分（含碳量）及组织也存在着由过共析层→共析层→亚共析过渡层→母材原有的亚共析层的变化，各相应含碳量和组织也不相同。合金渗碳钢比普通碳钢渗碳件的焊接组织更复杂，需根据材料具体化学成分、渗碳工艺及随后的热处理状态，以及焊接工艺等综合情况来由表及里按不同化学成分（含碳量）区域分别确定焊接组织。

2. 不锈钢焊接件组织

常用的奥氏体钢母材组织为奥氏体或奥氏体+少量铁素体。其中双相不锈钢应用较广，如 18-8 型奥氏体不锈钢，其正常的焊缝组织为树枝状奥氏体+枝晶间少量铁素体。熔合线和热影响区交界较明显。母材热影响区较狭窄，组织为奥氏体+带状铁素体。母材未受热影响区组织为奥氏体+少量带状分布的铁素体+颗粒状碳化物。对于双相不锈钢，应注意控制和检查铁素体的含量，为了防止产生焊缝热裂纹和有利于提高抗晶间腐蚀能力，一般奥氏体不锈钢焊缝金属中希望含有铁素体的体积分数为 5%~10%。

3. 耐热钢焊接件组织

耐热钢焊接件应用量很多的是炉用耐热钢，其中国产炉用耐热钢有属于无镍或低镍含氮类，如 CrMnN、Ni7N、Ni11N、R45 钢和 H18 钢等；也有属于高镍铬类的耐热钢，如 HK、HT、Я3C 钢等。本图谱收集了两类钢中的 CrMnN、Ni7N、R45 和 HK-40 钢的焊接接头焊态组织和经过不同温度及不同时间进行时效试验后接头的各种组织。炉用耐热钢焊接时，焊条的选择应与母材的化学成分尽量相匹配（即同类钢），否则易产生弊病：如在熔合线附近出现复杂化学成分或异样组织；在焊后或使用中容易出现裂纹等等。可见选择与母材化学成分相近的焊条对炉用耐热钢十分重要。焊接接头质量的关键是熔合线及热影响区附近的化学成分和组织状况，若采用高镍铬类的 Cr25-Ni20（A402 或 HK-40）焊条施焊低镍含氮炉用耐热钢接头后，经 900℃ 高温时效试验（或长期高温运行），断口均位于熔合线，伸长率很低，金相组织表现为 HK-40 焊条熔成的熔合线靠母材一侧碳化物大为减少，铁素体增多并且晶粒长大，形成一个明显的铁素体带，即脱碳带，它是在 900℃ 加热后产生了碳迁移，即碳从熔合线母材一侧向熔合线靠近焊缝（原含碳较低区）一侧进行迁移而造成的。随着加热温度升高，高温所处时间增长，铁素体带加宽。