

金属材料 金相图谱

上册

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

:1

金属材料金相图谱

上 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

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。这主要表现在下列方面：

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)	

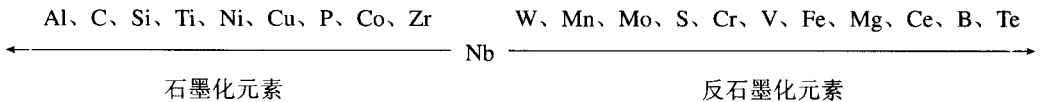
第 1 章 铸 铁

铸铁是初始状态为铸造状态，在任何固态温度下都不能承受工业性形变加工的铁基合金。此定义能更好地界定“钢”和“铸铁”。

工业上的铸铁是以 Fe-C-Si 为基础的复杂的铁基合金， $w(\text{C})$ 在 2%~4.0% 的范围内，此外还有锰、磷、硫等元素。为了改善和强化铸铁的某些性能，常加入铜、镍、钼、铬、钒等元素，成为合金铸铁。

一般而言，铸铁与钢相比，虽然力学性能较低，但生产工艺和熔化设备简单，生产成本低廉，且具有许多优良的性能，如减振性、耐磨性、铸造性和切削加工性，因此在工业生产中获得广泛的应用。

铸铁的金相组织是由化学成分、冷却速度等因素决定的。化学成分的影响，主要是元素对铸铁石墨化过程的影响。按照各元素石墨化作用的强弱，可排列如下：



铌(Nb)对石墨化过程的作用呈中性，铌的左边为石墨化元素，铌的右边为反石墨化(白口化)元素，离铌越远，作用越强。但铸铁是多元合金，当几种元素共同发生作用时，情况就较为复杂。例如，碳、硅都是强烈石墨化元素，但高碳低硅铸铁却易于出现初晶渗碳体。再如，锰和硫都是反石墨化元素，但锰和硫能形成 MnS；可锻铸铁中的 $w(\text{S})$ 有时高达 0.2%~0.3%，故常用锰中和硫的有害作用，由此缩短石墨化时间。又如，在高铬铸铁中，提高石墨化元素碳的含量，碳化物数量会随之增加。

各元素对铁碳相图共晶点碳量的影响，可用碳当量 (CE) 和共晶度 (S_c) 来表示。为计算方便，一般只考虑硅、磷的影响。计算式如下：

$$CE = w(\text{C})\% + 1/3 w(\text{Si} + \text{P})\%$$

$$S_c = \frac{w(C) \%}{4.26 - 1/3 w(Si+P) \%}$$

式中 碳、硅、磷的质量分数分别为铸铁的实际含量(%)；

4.26%为铸铁(稳定态)共晶点的最近测定值，在实际生产中此值可取4.3%。

按碳当量和共晶度，可将铸铁分成三类： $S_c=1$ ， $w(CE)=4.26\%$ 为共晶铸铁； $S_c<1$ ， $w(CE)<4.26\%$ 为亚共晶铸铁； $S_c>1$ ， $w(CE)>4.26\%$ 为过共晶铸铁。 S_c 和 $w(CE)$ 不仅能判断某一具体成分的铸铁偏离共晶点的程度，还能判断其石墨化能力的大小和铸造性能的好坏。

铸铁的金相组织是由石墨和基体组成的。

石墨是典型的非金属相，具有反射的多色性和各向异性。在光学显微镜中，用明场非偏振光观察，石墨为均匀一致的浅灰色；用暗场非偏振光观察，边缘有一亮圈。用明场偏振光观察，有些方向发暗，有些方向发亮；用暗场偏振光观察，呈各向异性，可看到明暗相交的十字形。就晶体结构而言，石墨属六方晶系。六角形排列的层面(0001)，亦即结晶学的[1010]方向，原子以强有力的共价键结合着，基面边缘的碳原子键并不饱和，吸收附近碳原子的能力很强。基面与基面之间的棱面(1010)，亦即结晶学的[0001]方向，原子以微弱的范德瓦耳力维持着，后者的结合力仅为前者的1/10。基于上述特点，按晶体生长理论看，石墨主要是沿着基面方向生长的，从而成长为片状；这样碳原子才会被“拉”得牢固。但是，当条件变化时(例如加入不同的变质剂)，石墨就会呈现多种多样的形态。我国的学者按照石墨的二维、三维形态以及石墨晶体学特征，亦即其内部的晶面排列位相，把石墨分为片状、蠕虫状、球状和絮状4大类。前3类石墨是由铁液直接凝固形成的，第4类是由石墨化退火或氧化脱碳退火来获得的。国际标准的石墨形态分为6类，即片状，水草状，蠕虫状，团絮状，团状和球状等。

铸铁中金属基体的形态特征见表1-1。铸态常见的组织为珠光体、珠光体-铁素体和铁素体，还有渗碳体和磷共晶。采用不同的热处理或加入合金元素后的铸态，可获得贝氏体、马氏体和莱氏体等组织。可见，在不同的条件下，铸铁的基体组织能在很大范围内变动。

铸铁的分类方法很多，按碳在铸铁中的存在状态和石墨的形态，可分为白口铸铁、灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁和可锻铸铁等5类。

表 1-1 铸铁中组织的形态特征

名 称	形 态 特 征
铁素体	碳(还有少量硅)溶于 α -Fe中的固溶体，常分布于石墨周围。在球墨铸铁中，以牛眼状、网状和破碎状等形态存在。在硝酸酒精溶液浸蚀后，呈黄白色，可显示晶界
渗碳体	铁和碳的化合物，其化学式为 Fe_3C 。按形成原因和形态分类有：初晶、共晶、二次、共析和三次渗碳体等形态。加入合金元素后，可形成合金渗碳体和碳化物。硝酸酒精溶液浸蚀后呈白亮色，碱性苦味酸钠溶液浸蚀后呈棕色
珠光体	铁素体与渗碳体组成的机械混合物，可分成片状和粒状两种。前者铁素体和渗碳体呈交替的层片状排列，后者渗碳体以颗粒状分布于铁素体内，弥散度较高时，需在较高倍显微镜下才能分辨层片状或粒状结构
莱氏体	共晶渗碳体和共晶奥氏体组成的机械混合物，呈蜂窝状。室温时，由渗碳体和奥氏体分解产物组成
磷共晶	二元磷共晶由 Fe_3P 和奥氏体组成，三元磷共晶由 Fe_3P 、 Fe_3C 和奥氏体组成。为边界向内凹陷的多边形，大多分布于共晶团的交界处。硝酸酒精浸蚀后，二元磷共晶是白色的 Fe_3P 上分布着奥氏体的分解产物；三元磷共晶是白色的 Fe_3P 基体上分布白色针状 Fe_3C 和奥氏体的分解产物

(续)

名 称	形 态 特 征
上贝氏体	呈羽毛状。此组织由条片状铁素体和条片状奥氏体交替组成，条片状较弯曲且呈分枝，无碳化物。在球墨铸铁中，上贝氏体伴有大量残留奥氏体（体积分数为 20%~40%），故称之为奥氏体-贝氏体球墨铸铁。在硝酸酒精溶液中浸蚀速度较缓慢
下贝氏体	呈交叉分布的细针状。是碳在 α -Fe 中的过饱和固溶体，在 α -Fe 针叶内部，碳化物沿特定的位向析出。在硝酸酒精溶液中浸蚀速度较快
马氏体	分低碳和高碳马氏体两种。前者呈短而粗的针状，针叶较钝，亚结构为密度很高的位错，故又称位错马氏体；后者呈针状或竹叶状，具有中脊线，亚结构主要为细小的孪晶，故又称孪晶马氏体

第1节 白口铸铁

白口铸铁是由亚稳定凝固得到的、断口为白亮色、组织中无游离石墨存在的铸铁。

白口铸铁按组织和成分，可分为亚共晶、共晶和过共晶三类。 $CE < 4.3\%$ 、 $S_c < 1$ 的为亚共晶白口铸铁，高温时组织为枝晶状奥氏体和莱氏体（连续的渗碳体上分布着岛状奥氏体），室温时组织为珠光体和莱氏体； $CE = 4.3\%$ 、 $S_c = 1$ 的为共晶白口铸铁，室温组织为莱氏体； $CE > 4.3\%$ 、 $S_c > 1$ 的为过共晶白口铸铁，室温组织为初晶渗碳体（大板条状）和莱氏体。由于普通白口铸铁中存在大量渗碳体和莱氏体，硬度高，脆性大，难以切削加工，在工业生产中很少直接应用，它主要被用于制作炼钢生铁和可锻铸铁的坯件。

在工业生产中，应用得最多的是冷硬白口铸铁和高铬白口铸铁。

1. 冷硬白口铸铁

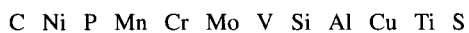
冷硬白口铸铁用于铸造冶金轧辊、粮食轧辊、车轮轮箍，还有发动机的挺柱、凸轮轴的凸轮部分等等。其中，冶金轧辊的消耗量约为轧制品的 0.5%。

冷硬白口铸铁是利用金属型或冷铁对铁液的激冷作用，使铸件表面一定深度内形成白口层；向内冷速稍慢，形成麻口层（过渡层）；心部冷速进一步下降，形成灰口层。金相观察表明，表面白口层为细密的莱氏体，且往往沿散热方向排列；麻口层为渗碳体、珠光体和片状石墨；心部灰口层为珠光体和片状石墨。

除上述典型组织外，冷硬白口铸铁还有两个特例：无限冷硬和半冷硬铸铁。冷硬白口铸铁，其断口上的白口层、麻口层和灰口层之间都有明显的界限。无限冷硬铸铁，其白口层与麻口层之间无明显界限。半冷硬铸铁，整个断面为麻口，其白口层与麻口层之间、麻口层与灰口层之间，均无明显界限。

合金元素对白口层深度的影响，取决于其石墨化作用的强弱：反石墨化作用越强，对白口层深度的增加作用就越强；反之，就越弱。其中，碲的作用最强烈，其含量只要十万分之几，就能收到显著增加白口层深度的作用。

合金元素对白口层硬度的影响，按影响由大到小，排列如下：



合金元素对白口层硬度的影响依次递减

合金元素对麻口层的影响：碲、碳、硫、磷减少麻口层的深度；铬、铝、锰、钼、钒增加麻口层的深度。

工艺因素对白口层深度的影响：提高铁液过热度，会减少石墨核心，故在相同浇注温度下，能增加白口层深度；提高浇注温度，则可减少白口层深度。

2. 高铬白口铸铁

高铬白口铸铁已被广泛应用于冶金、矿山和水泥破碎、研磨等各个方面。国标 GB/T 8263—1999《抗磨白口铸铁技术条件》中，选列出 4 个高铬白口铸铁的牌号，见表 1-1-1。

表 1-1-1 高铬白口铸铁牌号及其化学成分（质量分数，%）（GB/T 8263—1999）

牌 号	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	S	P
KmTBCr12	2.0~3.3	≤1.5	≤2.0	11.0~14.0	≤3.0	≤2.5	≤1.2	≤0.06	≤0.10
KmTBCr15Mo ^①	2.0~3.3	≤1.2	≤2.0	14.0~18.0	≤3.0	≤2.5	≤1.2	≤0.06	≤0.10
KmTBCr20Mo ^①	2.0~3.3	≤1.2	≤2.0	18.0~23.0	≤3.0	≤2.5	≤1.2	≤0.06	≤0.10
KmTBCr26	2.0~3.3	≤1.2	≤2.0	23.0~30.0	≤3.0	≤2.5	≤2.0	≤0.06	≤0.10

① 在一般情况下，该牌号含钼。

高铬白口铸铁， $w(\text{Cr})$ 一般为 10%~30%，再辅以适量的镍、钼、铜、硅、锰等元素，它的独特优势主要是含铬量高造成的。当 $w(\text{Cr})$ 为 6% 时，碳化物为 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ ，显微硬度为 840~1100HV。当 $w(\text{Cr})$ 为 10% 时，碳化物由 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 和 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 共存。当 $w(\text{Cr})$ 为 10%~30% 时，碳化物即以 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 为主，呈条棒状或断续状分布，显微硬度为 1500~1800HV，力学性能显著提高。当 $w(\text{Cr})$ 继续增加时，形成碳化物 $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$ ，显微硬度为 1500HV，这种碳化物在磨损过程中容易开裂。概括地说，高铬白口铸铁中碳化物的类型主要取决于碳、铬含量，特别是含铬量：高碳低铬，容易得到 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ ；低碳高铬，容易得到 $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$ ；碳铬量适当，容易得到 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 。

高铬白口铸铁的铸态组织一般是共晶碳化物（体积分数约为 20%）、马氏体和奥氏体，还有托氏体等。

淬火型高铬铸铁的基体组织为马氏体和碳化物（二次和共晶碳化物），适用于抗磨要求高的工况。淬火时奥氏体化升温、保温和随后的连续冷却，都能析出二次碳化物。奥氏体化温度较低（900~920℃），碳在奥氏体内的溶解量较少，平衡浓度较低，故会析出较多的二次碳化物。此时，冷却速度快，奥氏体便能基本上或全部转变成马氏体。淬火温度较高（约 1030℃），碳在奥氏体内的溶解量较多，平衡浓度较高，故只有少量二次碳化物析出。此时，冷却速度小，能促进二次碳化物析出，使奥氏体转变为马氏体，从而减少了残留奥氏体。适中的淬火温度，宜采用适中的冷却速度，淬火后才会获得高硬度的组织。一般来说，淬火时的奥氏体化温度可由含铬量来确定，见表 1-1-2。

表 1-1-2 含铬量与淬火奥氏体化温度

$w(\text{Cr})$ (%)	奥氏体化温度 /℃
12	930~950
15	940~970
20	960~1030

淬火后，于 400~500℃ 一次或多次回火，旨在降低内应力，减少残留奥氏体量，达到预期的硬度值。淬火型高铬白口铸铁的马氏体基体，能承受磨料的切削作用，还能发挥支撑碳化物的作用。

铸态高铬铸铁中,较受人们关注的是奥氏体高铬白口铸铁。它适用于既要求抗磨性,又要求高应力、小能量多冲的工况,如球磨机的隔窗板。奥氏体的抗磨机制是:使用过程中表层会产生加工硬化。通常的解释是,加工硬化是由金属的晶格畸变所致。研究表明:锰奥氏体表面加工硬化后,硬度为 300HV;铬奥氏体硬度可达 1000HV。还有,铬奥氏体有极强的镶嵌能力和较好的支撑能力,并可阻缓和钝化脆性裂纹从一个碳化物颗粒向另一个碳化物颗粒的发展。

高铬白口铸铁常见铸造缺陷有缩松、缩孔、热裂、冷裂和二次渣等。

白口铸铁金相图片见图 1-1-1~图 1-1-96。

第2节 灰 铸 铁

灰铸铁是一种断口呈灰色、碳主要以片状石墨出现的铸铁。

灰铸铁在结晶过程中,约有 $w(C)$ 为 80% 的碳以石墨的形式析出,这就给灰铸铁带来两方面的特点:一方面,由于石墨强度较低 ($R_m < 20\text{N/mm}^2$),且以片状的形态存在,割裂了基体的连续性,因此灰铸铁的强度不高,脆性较大。另一方面,由于石墨的存在,灰铸铁具有良好的减振性、耐磨性、切削加工性和缺口敏感性。由于共晶结晶过程中石墨化膨胀,还有减少缩松、缩孔的倾向。同时,灰铸铁还有较高的抗压强度。

灰铸铁的牌号是按照强度划分的,国标 GB/T 9439—1988《灰铸铁件》有 7 个牌号,见表 1-2-1。

表 1-2-1 单铸试棒的牌号

牌 号	抗拉强度 $R_m / (\text{N/mm}^2)$	硬度 HBW	牌 号	抗拉强度 $R_m / (\text{N/mm}^2)$	硬度 HBW
HT100	100	143~229	HT300	300	187~255
HT150	150	163~229	HT350	350	197~269
HT200	200	170~241	HT400	—	—
HT250	250	170~241	—	—	—

灰铸铁传统的化学成分中 Si/C 比较低(0.40~0.55)。研究表明,适当提高 Si/C 比(0.65~0.85),是提高铸铁内在质量的重要途径之一。提高 Si/C 比的作用是:可使连续的初析奥氏体枝晶增加,这就像混凝土中的钢筋一样,对灰铸铁起到加固的作用,可扩大稳定系和介稳定系的温度差,增加过冷度 ΔT ,从而细化石墨,有效地扩大基体组织的利用率;还可降低灰铸铁的白口倾向,减小断面敏感性,提高弹性模量和形变抗力。当然, Si/C 比过高,会使铁素体增加,强度和硬度有所降低,这一点也应注意。

片状石墨是灰铸铁特有的石墨形态。国标 GB/T 7216—1987《灰铸铁金相》将片状石墨的二维形态分成 A、B、C、D、E、F 等六种类型,见表 1-2-2。从表 1-2-2 中可以看出石墨的排列,并未遵循一定的规则,似承袭了沿用已久的习惯,如按化学成分和凝固过冷度来排列,片状石墨形态的顺序应该是 C、F、A、B、E、D 六种类型。

表 1-2-2 片状石墨的分布形状及形成原因

名称	符号	分布形状	形成原因
片状	A	片状石墨呈均匀分布	共晶或近共晶成分铁液在较小的过冷度下形成
菊花状	B	片状与点状石墨聚集成菊花状分布	共晶或近共晶成分铁液在较大的过冷度下形成
块片状	C	部分带尖角块状、粗大片状初生石墨及小片状石墨	过共晶成分铁液在较小过冷度下形成
枝晶点状	D	点、片状枝晶间石墨呈无向分布	亚共晶成分铁液在很强的过冷度下形成
枝晶片状	E	短小片状枝晶间石墨呈有向分布	亚共晶成分铁液在很大的过冷度下形成
星状	F	星状（或蜘蛛网状）与短片状石墨混合均匀分布	过共晶成分铁液在较大的过冷度下形成

热氧腐蚀或离子轰击后的试样在 SEM 中观察，可看到沿石墨长度方向具有平行的纹理，这反映了石墨沿（0001）面，亦即基面的排列位向，片状石墨就是沿基面择优生长的。

虽然片状石墨的二维形态各异，但深腐蚀后在 SEM 中观察其二维形态，却具有共同的特点：片状细而长，端部尖锐，表明较为光滑，在同一共晶团内，石墨片的各个分枝晶是连接在一起的。

铸铁的共晶团是石墨奥氏体组成的共晶体。灰铸铁中的共晶团是由石墨-奥氏体交叉生长、石墨端部始终伸向铁液并领先向铁液生长而形成的。在 SEM 中观察，灰铸铁共晶团大致呈球形，石墨核心向各个方向弯曲分枝，而又连接成一个整体。

灰铸铁的铸造缺陷较多，常见的铸造缺陷有：气孔、硬点或硬区、孕育过度、白口组织、变形、开裂等。

灰铸铁金相图片见图 1-2-1~图 1-2-175。

第3节 球墨铸铁

球墨铸铁是指铁液经球化处理，使石墨大部或全部呈球状形态的铸铁。

与灰铸铁比较，球墨铸铁的力学性能有显著提高。因为它的石墨呈球状，对基体的切割作用最小，可有效地利用基体强度的 70%~80%（灰铸铁一般只能利用基体强度的 30%）。球墨铸铁还可以通过合金化和热处理，进一步提高强韧性、耐磨性、耐热性和耐蚀性等各项性能。球墨铸铁自 1947 年问世以来，就获得铸造工作者的青睐，很快地投入了工业性生产。而且，各个时期都有代表性的产品或技术。20 世纪 50 年代的代表产品是发动机的球墨铸铁曲轴，20 世纪 60 年代是球墨铸铁铸管和铸态球墨铸铁，20 世纪 70 年代是奥氏体-贝氏体球墨铸铁，20 世纪 80 年代以来是厚大断面球墨铸铁和薄小断面（轻量化、近终型）球墨铸铁。如今，球墨铸铁已在汽车、铸管、机床、矿山和核工业等领域获得广泛的应用。据统计，2000 年世界的球墨铸铁产量已超过 1500 万 t。

球墨铸铁的牌号是按力学性能指标划分的，国标 GB/T 1348—1988《球墨铸件》中单铸试块球墨铸铁牌号，见表 1-3-1。

表 1-3-1 单铸试块的球墨铸铁牌号

牌 号	抗拉强度 R_m / (N/mm ²)	伸长率 A (%)	布氏硬度 HBW	主要金相组织
QT400-18	400	18	130~180	铁素体
QT400-15	400	15	130~180	铁素体
QT450-10	450	10	160~210	铁素体
QT500-7	500	7	170~230	铁素体+珠光体
QT600-3	600	3	190~270	珠光体+铁素体
QT700-2	700	2	225~305	珠光体
QT800-2	800	2	245~335	珠光体或回火组织
QT900-2	900	2	280~360	贝氏体或回火组织

注：硬度和金相组织供参考。

球墨铸铁中常见的石墨形态有球状、团状、开花、蠕虫、枝晶等几类。其中，最具代表性的形态是球状。在光学显微镜下观察球状石墨，低倍时，外形近似圆形；高倍时，为多边形，呈辐射状，结构清晰。经深腐蚀的试样在 SEM 中观察，球墨表面不光滑，起伏不平，形成一个个泡状物。经热氧腐蚀或离子轰击后的试样在 SEM 中观察，球墨呈年轮状纹理，且被辐射状条纹划分成多个扇形区域；经应力腐蚀（即向试样加载应力）后观察，呈现年轮状撕裂和辐射状开裂。球墨是垂直（0001）面向各个方向生长的，从而形成很多个从核心向外辐射的角锥体（二维为扇形区域），（0001）面即呈年轮状排列。在 SEM 中看到的年轮状及辐射状条纹（或裂纹），就是球墨晶体学特征的反映。

球墨铸铁一般为过共晶成分，因此球状石墨的长大，应包括两个阶段：①先共晶结晶阶段，球墨核心形成后，在铁液及贫碳富铁的奥氏体晕圈中长大。②共晶结晶阶段，球墨周围形成奥氏体外壳，即球墨-奥氏体共晶团。此时，球墨是在奥氏体壳包围下长大的。虽然球墨在共晶阶段的长大速度比在液态阶段迟缓，但球墨的大部分是在共晶阶段长大的。球墨铸铁的共晶团比灰铸铁的共晶团细小，其数量约为灰铸铁的 50~200 倍。还应说明，球墨铸铁的共晶结晶是一种变态共晶，即球墨和奥氏体均可在单独、互不依存的情况下长大。

为了评价石墨球化的好坏，国标 GB/T 9441—1988《球墨铸铁金相检验》将球化等级分为 6 级，见表 1-3-2。这是根据观察视场内各种石墨的相对数量及球化率的高低划分的。

表 1-3-2 球化分级

球化级别	球化率 (%)	说 明
1 级	≥95	石墨呈球状，少量团状，允许极少量团絮状
2 级	90~<95	石墨大部分呈球状，余为团状和极少量团絮状
3 级	80~<90	石墨大部分呈团状和球状，余为团絮状，允许有极少量蠕虫状
4 级	70~<80	石墨大部分呈团絮状和团状，余为球状和少量蠕虫状
5 级	60~<70	石墨呈分散分布的蠕虫状和球状、团状、团絮状
6 级	不规定	石墨呈聚集分布的蠕虫状和片状及球状、团状、团絮状

石墨球的数量是衡量球墨铸铁质量的一项重要指标。某些工厂在检验中，只注意球化率，忽视石墨球数，是不全面的。理由是：①石墨球数增加，球径减小，球墨圆整度提高，分布也趋于均匀。②用石墨球数来评价球墨铸铁的孕育效果，是一种有效、直观的方法。③球墨铸铁中的球数基本上反应了共晶团数。④在薄壁铸件中，铸态是否出现渗碳体，主要取决于石墨球数。美国铸造师协会（AFS）把石墨球数分成 7 级，见表 1-3-3。由表可见，石墨球径

和石墨球数之间的对应关系较好，而石墨大小和石墨球数之间的对应关系则较差。

表 1-3-3 球墨铸铁石墨球数与石墨大小（球径）的对应关系

项 目	标 准	对应数值或级别						
		25	50	100	150	200	250	300
石墨球数/(个/mm ²)	AFS 图谱	25	50	100	150	200	250	300
石墨大小/级	GB/T 9441—1988	5	6	6~7	7	7~8	7~8	8
石墨球径/mm (100×)	AFS 图谱	8~12	3~6	2~4	2~3	1.5~3	1~2	<1.5

球化处理是球墨铸铁的关键工序。大致来说，球化处理的历史经历了两个阶段：①20世纪50年代，以纯镁和压入法为主；②20世纪60年代中期开始，以稀土镁合金球化剂和冲入法为主，还相继采用了盖包法、型内法和密流法，20世纪80年代又采用了喂丝法工艺。将纯镁与稀土镁球化剂比较：纯镁的球化能力强，球墨圆整，白口化倾向小，缺点是反应激烈，铁液沸腾，安全性差，还难以避免缩松、夹渣和皮下气孔等铸造缺陷；合金球化剂的稀土，有脱硫去气的作用，能减少缩松、夹渣等铸造缺陷，生产也较安全，但石墨的圆整度往往稍逊于纯镁处理的球墨铸铁，且白口化倾向较大。

孕育处理是球化处理后不可或缺的工序。它能促进石墨化，增加石墨球数，提高石墨圆整度。但加强孕育并不是一味提高孕育量和增加孕育次数。孕育过量，反而会造成孕育缺陷，如缩松、缩孔和石墨漂浮等；孕育剂颗粒大，未曾熔化，残留于铸件内，会成为“硬点”。孕育处理是受多种因素制约的，诸如孕育剂种类、孕育剂粒度、孕育剂数量、孕育方式、铁液温度和孕育位置等等，总之应使处于饱和孕育状态的铁液尽可能接近铁液凝固的瞬间，这样才能以最小的孕育量达到最大的孕育效果。

表 1-3-1 中 8 个牌号的球墨铸铁，QT900-2 一般用热处理制取（例如等温淬火），其余 7 个牌号分别为珠光体、珠光体+铁素体和铁素体球墨铸铁。在球墨铸铁生产初期，这些牌号都是用正火或退火获得基体组织的，如今都可以由铸态制取了。

生产铸态铁素体球墨铸铁必须注意：①采用低锰 $w(\text{Mn}) < 0.03\%$ 、低磷 $w(\text{P}) < 0.07\%$ 、低硫 $w(\text{S}) < 0.025\%$ 生铁。还应考虑促进碳化物形成元素的影响：碳化物系数 $\text{CS} = \text{Mn} + 15\text{Cr} + 20\text{V} + 30\text{B} + 10\text{S} + 7\text{Mo} + 5\text{Sn} + 1.5\text{P}$ ，其值应取 $\text{CS} < 0.8$ 。②控制终硅量，在铁素体达到要求的前提下，尽量降低终硅量。例如，美国某些工厂的终硅量为 $w(\text{Si}) 2.2\% \sim 2.4\%$ 。③降低终硅量又要不出现白口，就应该加强孕育，采用浇口杯孕育、型内孕育等后期孕育工艺，增加石墨球数，这对薄壁铸件尤为重要。④控制残留稀土的 $w(\text{RE})$ ，薄壁铸件为 $0.015\% \sim 0.03\%$ ，厚壁铸件为 $0.02\% \sim 0.04\%$ 。

生产铸态珠光体球墨铸铁必须注意：①采用低磷低硫生铁，严格控制有害微量元素的含量。② $w(\text{Mn})$ 以 $0.25\% \sim 0.50\%$ 为宜。③为了增加珠光体含量，常用的合金化元素有铜、锡、铈等；若以铜对珠光体的作用为 1，则锡、铈的作用分别为 10 倍和 100 倍。厚壁铸件宜加入适量的铜。锡易形成晶间碳化物，加入量要控制。④加强孕育，防止出现碳化物。

各种牌号铸态球墨铸铁中珠光体与铁素体的相对数量，与球墨铸铁生产的初期比较，珠光体球墨铸铁中的铁素体量已上升。例如，QT700-2 允许铁素体为 35%（体积分数），这已趋向于混合基体了。

球墨铸铁的铸造缺陷如缩孔、缩松、夹渣、反白口等，是其他铸铁都有的，有些缺陷如球化不良、球化衰退等，则是球墨铸铁特有的。

球墨铸铁金相图片见图 1-3-1~图 1-3-336。