

金相检验基本知识

高 文 民



JINXIANGJIANYAN JIBENZHISHI

金相检验基本知识

高 文 民

中 国 铁 道 出 版 社

1989年·北京

内 容 简 介

本书主要介绍金相检验的基本知识。全书共十一章。书中除介绍了金相检验的仪器设备,试样的制备和金相显微组织的显示方法及摄影技术外,还介绍了金属和金相组织的一般知识,宏观检验方法,以及铁路常用钢材及零部件断裂的检验方法等,内容结合生产实际,文字通俗易懂,可供有关工程技术及检验人员学习参考。

金相检验基本知识

高文民

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 林连照 封面设计 王毓平

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 11.625 字数: 284 千

1989年7月 第1版 第1次印刷

印数: 1—4000册 定价: 5.10 元

前 言

近几年来，随着企业体制改革的深入发展，铁路部门的企业管理和生产工艺已向科学化、标准化方向发展，对机车车辆检修质量的要求不断提高，使理化检验工作显得更加重要了。目前机车车辆部门的基层生产单位，检验内容也日渐丰富，并根据生产需要逐步开展对生产主要用料的金相检验工作。

过去，铁路机车车辆维修部门在配件的修制过程中，往往由于工艺设备不良，或热处理操作不当等原因，引起配件材质的变化，使加修后的配件，达不到规定的质量标准。如果采用金相检验的方法来指导生产，监督产品质量，就可避免这种缺陷。尤其是对机车车辆使用的轴承合金，若只作化学成分的分析，是不能完全鉴别材质好坏的，还必须进行金相检验来保证其浇注质量。因为轴承合金在多次反复熔化浇注过程中，由于合金中各元素的比重不一样，熔化温度有差异，氧化烧损率也不同，容易造成偏析，使白合金的成分不均匀而导致性能变差，缩短其使用寿命，甚至造成燃轴事故的发生。长期以来，对轴承合金的浇注质量，一般都是靠经验以目视鉴别，难于发现内在的质量问题，而且不能积累可靠的技术数据，为改进工艺提供科学的依据。为此铁道部车辆局要求基层生产单位，要积极开展金相检验工作，依靠科学方法，及时发现产品缺陷，正确地鉴别金属材料组织结构的优劣情况，以便采取积极措施，改进工艺，提高修车质量，保证行车安全。

一九八三年初，我参加了铁道部组织的全路车辆部门化验工作调查和编制《铁路车辆化验工作规则》（草案）的工作。在调查中，广大干部和专职化验人员迫切要求车辆部门要编写一本适合于基层单位需要的金相分析的基础理论书籍，供大家参考学

习。同年八月，铁道部在白城召开了全路首次车辆化验工作座谈会。各铁路局的与会代表，要求我编写这个材料，我自觉才疏学浅，难于胜任，但在领导和同志们的鼓励下，勉为其难，乃着手搜集了一些资料，并结合自己多年来从事检验工作的实践经验，写成了这本书，意在抛砖引玉，以期对金相检验的人员会有一些参考价值。本书共分十一章和六个附录。前面八章重点介绍了金相检验方法，仪器的使用，试样的制备、浸蚀和金相摄影技术等。后面三章主要是介绍金属及合金的金相显微组织和宏观组织缺陷，以及铁路钢材和设备零部件的金相检验分析等。使读者通过这本书不但能懂得金相检验的原理和方法，而且还能照着去做，学会掌握分析金相组织的能力。

本书初稿曾经过长沙铁道学院梁克中副教授的审阅，其后编者又按着铁道出版社林连照编审的意见进行了补充修改。在编写过程中曾得到铁道部车辆局陈殿奎、张进德同志，铁道部科学研究院张维同志和编者所在单位的领导巩胜双、王又林、白风来、张丙千等同志的支持和帮助，王坤同志参加了绘图工作，同时还得到沈阳、上海、广州、成都、兰州、柳州、乌鲁木齐铁路局许多同志的热情支持和帮助。在此一并表示谢意。

由于编者水平所限，书中难免有错误之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
第二章 金相检验的仪器设备及操作方法	17
第一节 金相显微镜的构造和使用	17
第二节 金相试样切割机的构造及使用	46
第三节 金相试样抛光机的构造及使用	48
第三章 金相试样的制备方法	50
第一节 金相试样制备的一般规定	50
第二节 金相试样的截取方法	52
第三节 金相试样的镶嵌方法	55
第四节 在显微镜下钻取样品的的方法	61
第五节 在大型配件上制备磨片的方法	63
第六节 钢铁金相试样快速制备方法	64
第七节 特殊合金试样的制备方法	65
第四章 金相试样的磨光及抛光方法	72
第一节 金相试样的磨光	72
第二节 金相试样的抛光	80
第三节 金相磨片的保存	96
第五章 金相显微组织的显示方法	98
第一节 化学浸蚀方法	98
第二节 电解浸蚀方法	103
第三节 金相组织的其它显示方法	104
第四节 浸蚀剂	113
第六章 金相显微硬度的应用方法	115
第一节 显微硬度试验的原理	116
第二节 显微硬度试样的制备方法	117

第三节	试验方法及试验结果的分析	119
第七章	金相黑白摄影方法	138
第一节	金相显微摄影设备	138
第二节	摄影过程的化学原理	143
第三节	底片的冲洗	157
第四节	相纸的选择与印相方法	163
第五节	显影液的成分、作用和配制方法	168
第六节	定影液的成分、作用和配制方法	176
第七节	底片减薄和加厚方法	179
第八章	金相彩色摄影方法	184
第一节	彩色摄影原理	184
第二节	彩色胶片的保存	188
第三节	金相彩色摄影	190
第四节	彩色摄影设备及冲洗过程	193
第九章	金属的概念及金相组织	218
第一节	金属的基本性质	218
第二节	决定金属材料性质的基本因素	219
第三节	Fe-Fe ₃ C合金的平衡组织及钢的热处理组织	220
第四节	轴承合金组织	243
第五节	球墨铸铁组织	260
第十章	宏观检验方法	285
第一节	断口检验法	286
第二节	硫印试验法	296
第三节	磷印试验法	300
第四节	酸蚀试验法	303
第五节	宏观摄影	308
第十一章	铁路常用钢材及零部件断裂检验方法	311
第一节	铁路常用钢材	311
第二节	铁路零部件断裂分析方法	324

附录一	国际铸工协会推荐的铸铁金相标准	344
附录二	钢铁表示方法(按用途、冶炼和浇注方法)	349
附录三	中国和外国部分钢号对照表	350
附录四	常用钢的临界点	355
附录五	常用钢的淬火、回火温度与硬度对照表	358
附录六	铁路用铅基轴承合金含量的调整及计算	360
参考资料		361

第一章 绪 论

一、金相检验的目的和意义

虽然早在几千年前，人们就开始发现并使用金属材料了，但是利用金相显微镜来观察、分析金属材料的微观组织结构，仅有一百多年的历史。由于采用了金相检验的手段，有力地促进了材料科学的发展。近二十多年来，随着科学技术的不断发展，金相研究的内容越来越广泛，尤其是进入七十年代以来，发展进度之快，应用范围之广是很惊人的。由于采用了电子显微镜和应用了电子成像理论，金相检验已成了观察和分析金属微观和极微观组织结构及其缺陷的重要手段。近几十年来研究金属和合金组织结构的方法虽有显著的改进，但是主要方法仍是采用金相检验法。现代金相技术，包括光学和电子显微分析技术两个方面。金相分析技术所获得的结果是联系材料加工工艺科学及材料性能之间的重要桥梁。金相分析是检查产品质量的依据之一，又是发展新材料，新工艺科学理论的重要手段之一。多少年来，我们在长期的生产实践中认识到，产品质量的好坏和材料性能有着密切的联系。因为由于金属和合金的显微组织不同，材料性能也不同，只有通过控制组织，才能达到控制性能的目的。只有首先了解与它本身工作有关的材料，才能改造它，合理的使用它，以达到特定的目的。

金属材料的组织结构及性能，除了与其本身的化学成分及夹杂物等有关外，并且受其铸造及加工工艺所影响。如果我们把某一金属或合金的化学成分固定不变，而只是改变其生产工艺条件，那么它的金相组织和性能也会发生很大的变化。例如，将同一化学成分的生铁铁水，一个浇注在砂模中，让铁水缓慢凝固和冷却；另一个浇注在金属模内，使之快速凝固和冷却。那么前者

的断口呈暗灰色，而后者呈银白色；前者脆性较小，不易摔断，后者脆性很大，容易裂；前者硬度较低，能进行切削加工，后者硬度很高，很难进行切削。又如含碳量同为0.8%的两块钢，一块加热到高温（800℃左右）后，在炉中缓慢冷却，另一块加热到同样的温度后，在水中急冷，结果后者的硬度可以比前者高3~4倍。再如用化学成分分析的方法，虽能确定铸铁中的含碳量，但是它不能确定碳是以什么形式出现的，是以化合碳形式出现呢，还是以石墨碳存在呢？

从上述的实例中可以看出，金相组织和化学成分之间虽然有着一定的关系，但是我们单从化学成分还不足以说明金属性能差异的原因，因为化学成分可能含有某种程度的偏析，更重要的是化学成分只能说明某元素的含量而不能说明它的存在形式。这就要求我们更深入的分析研究，除化学成分之外，还有什么因素影响金属和合金材料的性能。探讨金属和合金的内部构造便成为研究这一问题的主要途径。金属和合金的内部构造，按其研究范畴由微观到宏观，可分为：原子结构，晶体结构，显微组织和宏观组织。所谓原子结构是指组成元素的原子是由那些更为微细的质点组成的，而这些质点又是怎样分布在原子内部的；晶体结构是指原子按什么方式结合在一起，以及原子在金属和合金内部排列成那些样式；显微组织又称高倍组织，是指金属或合金在放大率为30~1600倍显微镜下观察，各种晶体的不同形状、大小、数量，以及它们之间的分布状态；宏观组织又称低倍组织，是指用肉眼或在不大于10倍放大镜下，观察金属和合金磨面或断口上晶体的特征。因此要正确的反映这些显微组织结构及缺陷，就必须采取适当的金相分析方法，研究金属相的变化及形成。金属相是金属组织的组成者，相的变化标志着金属性能的变化。研究金属的相变，也就是研究相的形成、变化以及它和合金成分、组织、性能之间的关系和相互影响的规律。因此，金相学就是研究金属和合金的各种晶体结构和显微组织，影响它们形成的外部条件（温度变化、加工变形、浇注条件等）和内部因素（化学成分），以及

它们与性能之间关系的一门基础科学；是一个实践性很强的独立科学。只有结合生产实践，了解金属和合金的结构组织以及它们变化的基本规律，才能切实控制和改善金属或合金的性能，才能正确对金属和合金进行加工处理，才能针对实际生产需要合理地选择和使用金属材料，以避免机械零件或加修的配件在热处理前后以及在使用中，因质量不良而报废或提前破损，从而危害生产安全，造成不应有的损失和浪费。因此采取金相检验的方法，来分析产生质量不良的原因，并采取相应的措施加以改进，对于提高经济效益和保证生产安全有着重要的意义。

综上所述，在生产实践和科学研究中广泛应用金相检验的方法，利用金相显微镜及其所拍摄的金相照片对金属材料及其制件的宏观组织和微观组织进行检验分析，来观察金相组织的变化，判断各种金属材料组织结构的优劣情况，分析并找出产生废品、造成事故的原因，采取有效的措施，达到控制和不断提高产品质量之目的。

二、金相检验中常用的名词术语

固溶体

组成各类合金的组元在液态时相互溶解，当合金由液态结晶为固态时，组元之间仍能互相溶解而形成的均匀一致的固体合金称为固溶体。这一含义与食盐或糖溶解在水中而形成的盐水或糖水液溶体相似。

固溶体的晶体结构是在一种组元的晶格上分布着两种组元的原子。组成固溶体的组元也和液溶体一样，有溶质和溶剂之分：形成固溶体后，晶格保持不变的组元称为溶剂；晶格消失的组元称为溶质。固溶体晶格类型与溶剂组元相同。

根据溶质原子在溶剂晶格中所处的位置不同，固溶体可分成两大类：

1. 间隙固溶体

若溶质原子在溶剂晶格中并不占据晶格结点的位置，而是处

于各结点间的空隙中，则这种形式的固溶体称为间隙固溶体。例如碳、氮、硼等非金属元素溶入铁中形成的固溶体即属于这种类型。

2. 置换固溶体

若溶质原子代替一部分溶剂原子而占据着溶剂晶格中的某些结点位置，则这种类型的固溶体称为置换固溶体。形成这类固溶体的溶质原子其大小必须与溶剂原子相近。镍、铬等合金元素溶入铁中形成的固溶体属于这种类型。

无论是间隙固溶体还是置换固溶体，虽然仍保持着溶剂金属的晶格类型，但都因溶质原子的溶入而使溶剂晶格发生畸变。晶格畸变阻碍了位错的运动，使晶面之间的滑移变得困难，从而提高了合金抵抗塑性变形的抗力。此外，也表现出固溶体比纯金属具有较高的强度和硬度。通过溶入溶质元素形成固溶体，从而使金属材料的强度、硬度升高的现象，称为固溶强化。它是提高金属材料机械性能的重要途径之一。

奥氏体 $[\text{Fe}\gamma(\text{C})]$

奥氏体在碳钢中是碳溶于 $\gamma\text{-Fe}$ 中的固溶体，而在合金钢中是碳和合金元素溶于 $\gamma\text{-Fe}$ 中的固溶体。

奥氏体塑性很高，硬度和屈服点较低，布氏硬度值一般为 $\text{HB}170\sim220$ 。它是钢中比容量较小的组织。奥氏体在 1147°C 时可溶解碳为2.06%，在 723°C 时溶解碳为0.8%。

奥氏体仍然保持 $\gamma\text{-Fe}$ 的面心立方晶格，在金相组织中呈现规则的多边形。

铁素体 $[\text{Fe}\alpha(\text{C})]$

铁素体是碳与合金元素溶解在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的固溶体。

铁素体性能接近纯铁，硬度低（约为 $\text{HB}80\sim100$ ），塑性好。固溶有合金元素的铁素体能提高钢的强度。在 723°C 时，碳在铁素体中的最大溶解度为0.02%，在常温下含碳量为0.008%。

铁素体仍然保持 $\alpha\text{-Fe}$ 的体心立方晶格，在金相组织中具有典型纯金属的多面体金相特征。

渗碳体 $[\text{Fe}_3\text{C}]$

渗碳体是铁和碳的化合物，又称碳化三铁。在常温下铁碳合金中的碳大部分以渗碳体的形式存在。

根据铁-碳平衡图，渗碳体可分为：

一次渗碳体，是沿 CD 线由液体中结晶析出的。

二次渗碳体，是从 γ -固溶体中沿 ES 线析出的。

三次渗碳体，是从 α -固溶体中沿 PQ 线析出的。

渗碳体在低温下有弱磁性，高于 217°C 时磁性消失。渗碳体的溶化温度为 1600°C ，含碳量为 6.67% 。其硬度很高 ($>700\text{HB}$)，脆性很大，塑性近乎于零。

渗碳体具有复杂的斜方晶格，没有同素异形转变。渗碳体可与其它合金元素形成置换式固溶体，以渗碳体晶格为基体的这种固溶体叫“合金渗碳体”。渗碳体是一种介稳化合物，在一定条件下，可分解成石墨状的自由碳。渗碳体在金相组织中以不同形式呈现。一次渗碳体多呈柱状，二次和三次渗碳体多以白色网状出现。

珠光体

珠光体是铁素体和渗碳体的混合物，是含碳量为 0.8% 的碳钢共析转变的产物。它在显微镜下观察与珍珠相似，所以称为珠光体。若珠光体中的渗碳体呈球状分布，则称为球状珠光体；若珠光体中的渗碳体呈片状分布，则称为片状珠光体。

珠光体的机械性能与珠光体片间距及渗碳体的分布形状有关；而细的比粗的好，越细化其强度越高；球状珠光体比片状珠光体的性能要好。片状珠光体硬度值大，约为 $\text{HB}190\sim 280$ ，材质硬、塑性变形较难；球状珠光体硬度值较小，约为 $\text{HB}160\sim 190$ ，材质软、易塑性变形。因此，珠光体具有较好的机械切削加工性能。

索氏体

索氏体是属于珠光体类型的组织。它也是铁素体与渗碳体的混合物，但组织要比珠光体细得多，有良好的综合机械性能。硬

度约为HB240~320。

屈氏体

屈氏体是由铁素铁与渗碳体组成的极弥散的混合物。是一种最细的珠光体类型组织。它比索氏体更细，硬度约为HB400~500。

屈氏体与索氏体一样，可以通过冷奥氏体的等温转变或通过淬火钢回火等方法，获得屈氏体。

马氏体

马氏体是碳在 α -Fe中的过饱和固溶体。当钢在高温奥氏体之后，若快速冷却至马氏体点以下时，由于 γ -Fe在低温下结构不稳定，便转变为 α -Fe，但冷却速度快，钢中碳原子来不及扩散，保留了高温时母相奥氏体的成分。因此马氏体是钢在奥氏体化后快速冷却到马氏体点之下发生扩散性相变的产物。

马氏体处于亚稳定状态，由于碳在 α -Fe中过饱和，使 α -Fe的体心立方晶格发生了畸变，形成了体心正方晶格。马氏体具有很高的硬度（约为HB640~760），很脆，冲击韧性低，断面收缩率和延伸率几乎等于零。由于过饱和的碳使晶格发生畸变，因此马氏体的比容较奥氏体大。另外在马氏体形成时会在钢中产生很大的相变应力。

马氏体在金相组织中，是互成一定角度的白色针状结构。在正常的淬火工艺下，获得的马氏体大部分为细针或隐针状。

莱氏体

莱氏体在高温下是渗碳体和奥氏体的混合物。它是铁水冷却到1147℃直接凝固形成的。它在常温下是珠光体和渗碳体的混合物。

由于合金元素的作用，使Fe-C平衡图的E和S点左移，因此许多高合金钢（如W18Cr4V和Cr12MoV）都属于莱氏体钢。

莱氏体是由铁水结晶出来的，形态比较自由，钢中多分布在晶界处，加工后破碎成块状。

贝氏体

贝氏体是过冷奥氏体在中温区间（约250~450℃）相变产生的过饱和的铁素体和渗碳体混合物。

贝氏体因形成的温度不同，组织特征也不相同。在接近珠光体形成温度所生成的组织叫“上贝氏体，”其特征为由晶粒边界开始向晶内同一方向平行排列的 α -Fe片，片间夹着渗碳体颗粒，在金相组织中呈羽毛状。由于方位不同，羽毛可对称或不对称。在300℃附近形成的组织叫“下贝氏体，”在金相组织中呈黑针状。上、下贝氏体只是形状和碳化物分布不同，没有质的区别。上贝氏体的强度小于同一温度形成的细片状珠光体，脆性也较大。下贝氏体与相同温度的回火马氏体强度相近。下贝氏体的性能优于上贝氏体，有时甚至优于回火马氏体。

魏氏组织

亚共析钢因为过热而形成的粗晶奥氏体，在一定过冷条件下，除了在原来奥氏体晶粒边界上析出块状 α -Fe外，还有从晶界向晶粒内部生长的片状 α -Fe。这种片状 α -Fe与原来的奥氏体有着一定的结晶位向关系。这些在晶粒中出现的互成一定角度或彼此平行的片状 α -Fe，即为通常所称的亚共析钢的魏氏组织。

过热的亚共析钢在较快的冷却速度下容易产生魏氏组织。魏氏组织严重时会使钢的冲击韧性、断面收缩率下降，使钢变脆。可采用完全退火使之消除。

石墨碳

在一定条件下钢中结晶析出游离的碳——石墨，即通常所说的石墨化。

硅是钢中最强烈的石墨化元素之一，因而含硅的弹簧钢在一定条件下易于石墨化。高碳量的碳素工具钢中偶然也有石墨碳出现，严重时可形成黑色断口。

碳化物不均匀度

钢锭浇注后在凝固过程中，由于实际冷却速度较快，温度继续下降时，剩余的钢液发生共晶反应，形成在钢锭中呈网络状分布的莱氏体，其中初次碳化物就形成了钢中的碳化物不均匀分布。

经过热加工后的钢材的金相组织中所呈现的碳化物不均匀分布，即为通常所说的碳化物不均匀度。金相检验试片经淬火、回火后在纵向磨面上放大100倍评级。碳化物不均匀分布程度严重时会引起工件热处理后产生裂纹。

带状碳化物

它是钢锭中的结晶偏析在热加工变形中被延伸而形成的碳化物富集带。例如：铬轴承钢中的带状碳化物。

带状碳化物严重时会造成轴承零件淬、回火后硬度和组织不均匀等缺陷。

碳化物液析

碳化物液析是合金浓度过分偏聚而形成的。如铬轴承钢中的碳化物液析是钢锭凝固时，钢液中碳及合金元素富集处，由于树枝晶偏析而产生的亚稳共晶莱氏体，在热加工后破碎所成的沿热加工方向分布的小块碳化物。

碳化物液析在金相纵向深腐蚀试片的组织中，一般出现形式为较大的棱角状碳化物颗粒。

碳化物液析会显著降低轴承零件的耐磨性和疲劳强度，并容易产生淬火裂纹。钢锭或钢坯经充分高温扩散退火，可以改善或消除碳化物液析。

网状碳化物

过共析碳素钢，合金工具钢和铬轴承钢等钢材热加工后在冷却过程中，过剩碳化物在晶粒边界上析出所形成的网络，即是通常所称的网状碳化物。

网状碳化物会增加钢的脆性，使冲击韧性降低。为了改善网状碳化物，要注意控制热加工终了温度及冷却的速度。

球化组织

对于供冷加工使用的碳素工具钢、合金工具钢、铬轴承钢等，大都要在交货前进行球化退火，使其组织成为粒状或点状珠光体。其金相特征为铁素体基体上分布着粒状碳化物，通常叫球状珠光体。

具有球状珠光体的钢，硬度较低，便于切削加工。

带状组织

经热加工后低碳结构钢显微组织中，铁素体和珠光体沿加工方向平行成层状分布的条带组织，叫带状组织。

带状组织使钢的机械性能呈各向异性，并降低钢的冲击韧性和断面收缩率。

奥氏体本质晶粒度

奥氏体本质晶粒度是在标准规定的试验条件下所得到的晶粒尺度，用来衡量钢的奥氏体晶粒长大的倾向。

实际晶粒度

实际晶粒度是指钢在交货状态下所具有的实际晶粒大小。

脱 碳

脱碳是指钢材在热加工或热处理时，由于其表面与炉气的作用，失去全部或部分碳量，因而造成钢材表面含碳量降低的现象。

钢材表面脱碳将大大降低表面硬度和耐磨性。

非金属夹杂物

钢中非金属夹杂物可分为两类：在冶炼或浇注过程中炉渣及耐火材料浸蚀剥落后进入钢中所形成的，称为外来非金属夹杂物；另一类是在冶炼浇注过程中物理化学反应的生成物，称为内在非金属夹杂物。

纤维组织

金属和合金材料，在塑性加工前各晶粒是任意取向的。经轧制后晶粒发生变形，沿加工方向伸长，或晶粒取向沿加工方向发生转动。当加工变形达到足够大时，最后得到像一束纤维一样的组织就叫纤维组织。

三、金相检验的步骤和方法

金相检验的工序，包括试样制备，试验浸蚀，显微组织检验，显微照相，试验记录五个基本步骤。