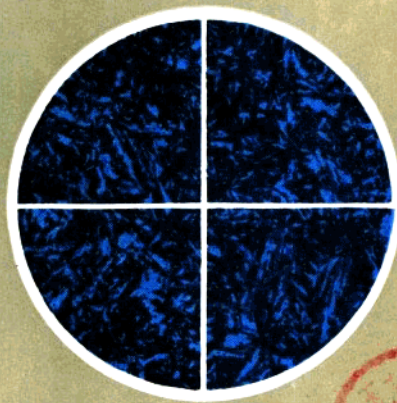


9713

金相检验



机械工业系统理化检验协作网
上海材料研究所理化检验编辑部

金 相 检 验

机械工业系统理化检验协作网
上海材料研究所理化检验编辑部

内 容 提 要

本书系统地介绍了工厂中常用金属材料显微组织的分析技术，简要地阐述了金属材料在各种工艺处理后的显微组织之变化机理。

主要内容有：宏观检验，结构钢、轴承钢、工具钢、不锈钢耐热钢、铸铁、铜铝及其合金、高温合金、粉末冶金制品、表面渗镀保护层及焊接接头组织形态的金相检验方法。此外，在有关章节中还收集了金相检验标准图片，并列举了材料的缺陷和失效分析实例。

本书可供从事金相检验工作的工人、技术人员及大专院校金相热处理或金属材料专业的师生参考，亦可作金相检验人员的培训教材。

金 相 检 验

机械系统理化检验协作网
《理化检验》编辑部

《理化检验》编辑部出版
机械工业部上海材料研究所发行组发行
(上海东长治路 999 号)

江苏省武进县村前印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 32 字数 800,000
1983年11月印制 印数 1—8000

• 内部发行 • 定价：5.00元

序 言

机械工业系统理化检验协作网是在各级机械工业主管部门领导下，发扬社会主义协作精神进行技术攻关和技术交流的协作组织，已有廿余年的历史。一九七九年正式成立了理化检验协作总网，下设分析化学、金相检验、无损检测、机械性能试验、光谱分析、物理方法和高温机械性能七个专业组，並加强了与各地理化检验协作网的联系。近年来，全国相继建立与健全了各行政大区、各省、市(自治区)以及县、州、市、旗等各级理化协作网组织系统，拥有庞大的理化检验队伍，是机械工业系统中一支不可忽视的技术力量。

多年来，整个机械工业系统理化协作网举办了大量各种类型的活动，包括：学术讲座；技术交流座谈会；健全理化试验室、整顿理化检验秩序；组织技术评比、技术考核；开展试验研究、组织技术攻关以及技术培训等等，为机械工业发展品种、提高质量，特别是提高机械产品的内在质量方面作出了一定的贡献。

近五年来总网金相专业组在有关单位的帮助和广大金相工作者的支持下，也举行了多次技术交流活动，如召开全国金相技术交流会及举办全国金相图片评比活动等等。这次金相专业组和《理化检验》杂志编辑部联合组织编写的《金相检验》是本行业金相试验人员的培训参考教材，亦是今后对金相试验人员进行考核的主要参考材料，我深信本书的出版对提高金相试验人员的技术水平；统一对金相检验标准的认识和促进金相检验工作的进一步开展将有所裨益。

我希望广大读者在本书的使用中能够提出宝贵意见，以便能进一步充实内容，使之不断完善。我也希望总网下的各专业组在积累资料的基础上编写出具有自己特色的培训参考教材。

最后，祝愿机械工业系统的全体理化检验人员，在新的历史条件下，在自己的工作岗位上不断取得新的成绩，为进一步提高机械产品内在质量，为四化建设作出更大的贡献。

机械工业系统理化检验协作总网 许鹤坤

一九八三年十一月

编者的话

一、本书共分十一章，编写工作分别由下列同志承担：第一章“宏观检验”由上海材料研究所李炯辉同志编写；第二章“结构钢的组织及其金相检验”由上海材料研究所的陈金宝、强明道两同志编写，其中的第七节由江西拖拉机厂陶达天同志编写；第三章“工具钢金相检验”由上海工具厂方成水同志编写，其中的第五节由上海工具厂袁家栋同志编写；第四章“轴承钢的金相检验”由上海微型轴承厂陈仲连同志编写；第五章“不锈钢和耐热钢的金相检验”由上海重型机器厂张启达同志编写；第七章“铜、铝及其合金的金相检验”由上海材料研究所舒文芬同志编写；第八章“高温合金的金相检验”由重庆仪表材料研究所程贻举同志编写；第九章“粉末冶金金相检验”由上海材料研究所毛照樵、陈善珠两位同志编写；第十章“表面渗镀保护层的金相检验”由武汉材料保护研究所李瑞菊和上海拖拉机汽车工业公司施友方两同志编写，其中的第一节由两人联合编写，第二至第四节由施友方同志编写；第五至第七节由李瑞菊同志编写；第十一章“焊接接头金属的组织形态及其检验”由哈尔滨焊接研究所田方钰同志编写。

全书各章由李炯辉同志协调、汇总，陈永昌同志编辑。白希琴同志承担了全书显微组织的描绘工作。

二、本书在编写过程中得到了机械工业部、上海材料研究所、金相专业成员单位以及作者所在单位的热情关怀和支持。上海柴油机厂邓向明同志、上海汽轮机厂于永川同志、上海交通大学潘健生同志、洛阳铜加工厂李桂芳同志、上海有色金属研究所杨延生同志、株洲硬质合金厂陈盛初同志、哈尔滨量具刃具厂吕名已同志、无锡球铁研究所的惠永道同志以及航空部六二一研究所的于全晔、张德堂、金长庚、余应梅同志参加了本书有关章节的审稿工作。在编写过程中有关同志还提供了资料和宝贵意见。在此，我们对关心本书编辑、出版工作的所有单位和同志一并表示衷心的感谢。

三、本书是由机械工业系统理化检验协作网和《理化检验》编辑部联合组织编写的行业内部培训教材，鉴于编写时间仓促和作者水平所限，错误与缺点在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

第一章 宏观检验

一、断口检验	(1)
(一) 断口试样的制备及保存	(3)
(二) 断口检验试样的热处理状态	(3)
(三) 失效断口的形成和性质	(4)
(四) 断口上各种缺陷的形态及识别	(6)
二、硫印试验	(14)
(一) 硫印试验的基本原理	(14)
(二) 硫印试样的选取与制备	(15)
(三) 硫印试验的设备及操作步骤	(16)
(四) 影响硫印试验结果的一些因素	(17)
三、磷印试验	(18)
(一) 铜离子沉积法	(19)
(二) 硫代硫酸钠显示法	(20)
四、酸蚀试验	(22)
(一) 试样的选取与制备	(22)
(二) 酸蚀试验方法	(23)
(三) 低倍组织缺陷的分类及评定	(27)
五、塔形车削发纹检验法	(38)
(一) 发纹的特征、成因、分布规律及防止办法	(38)
(二) 塔形车削检验法	(40)
附录: GB1979-80 结构钢低倍组织缺陷评级图	(42)

第二章 结构钢的组织及其金相检验

一、金相试样的选取和制备	(80)
(一) 试样的选取	(80)
(二) 试样的截取方法	(80)
(三) 试样的镶嵌	(81)
(四) 试样的磨光	(81)
(五) 试样的抛光	(81)
(六) 显微组织的显示	(82)
(七) 大工件金相检验的制样及组织显示	(83)
二、钢中非金属夹杂物的金相检验	(83)
(一) 非金属夹杂物对结构钢性能的影响	(84)

(二) 非金属夹杂物的金相检验.....	(85)
三、钢中基本显微组织.....	(93)
四、钢热加工后的显微组织.....	(99)
(一) 钢热轧后的显微组织.....	(99)
(二) 钢锻造后的显微组织.....	(100)
五、钢的热处理及其显微组织.....	(101)
(一) 退火及钢退火后的金相组织.....	(101)
(二) 正火及钢正火后的金相组织.....	(103)
(三) 钢的晶粒度检查.....	(103)
(四) 淬火及钢淬火后的金相组织.....	(105)
(五) 回火及钢回火后的金相组织.....	(111)
六、结构钢的组织检验.....	(114)
(一) 合金元素在结构钢中的作用.....	(114)
(二) 普通碳钢和普通低合金钢的组织检验.....	(115)
(三) 合金结构钢的组织检验.....	(116)
(四) 弹簧钢的组织检验.....	(119)
七、结构钢热加工时产生的缺陷分析.....	(126)
(一) 锻造缺陷分析.....	(126)
(二) 淬火裂纹分析.....	(135)

第三章 工具钢的金相检验

一、概述.....	(148)
二、碳素工具钢的金相检验.....	(148)
(一) 牌号及化学成分.....	(148)
(二) 特点.....	(148)
(三) 用途.....	(149)
(四) 退火状态的组织和缺陷.....	(150)
(五) 淬火状态的组织和缺陷.....	(154)
(六) 回火组织.....	(159)
三、合金工具钢的金相检验.....	(159)
(一) 牌号及成分.....	(162)
(二) 性能及用途.....	(162)
(三) 钢退火后的金相检验.....	(165)
(四) 钢淬火 - 回火后的金相检验.....	(168)
四、高速工具钢的金相检验.....	(172)
(一) 性能、成分及用途.....	(172)
(二) 铸造状态的组织.....	(175)
(三) 锻造状态的组织.....	(178)
(四) 退火状态的组织.....	(179)
(五) 淬火状态的组织.....	(182)

(六) 回火时的组织转变及对性能的影响.....	(188)
五、工具钢的缺陷分析及其防止方法.....	(192)
附录: 工具钢金相组织评级图.....	(204)

第四章 轴承钢的金相检验

一、概述.....	(231)
二、影响轴承钢质量的因素及其检验.....	(232)
(一) 非金属夹杂物.....	(232)
(二) 碳化物液析.....	(234)
(三) 碳化物带状.....	(234)
(四) 退火组织.....	(237)
(五) 淬回火组织.....	(239)
(六) 脱碳层组织.....	(240)

第五章 不锈钢和耐热钢的金相检验

一、概述.....	(242)
二、金属腐蚀的基本概念.....	(242)
三、碳及合金元素在不锈钢及耐热钢中的作用.....	(243)
四、不锈钢及耐热钢的分类.....	(245)
(一) 不锈钢的分类.....	(245)
(二) 耐热钢的分类.....	(246)
五、不锈钢和耐热钢的性能及热处理后的显微组织.....	(248)
(一) 不锈钢的性能及热处理后的显微组织.....	(248)
(二) 耐热钢的性能及热处理后的显微组织.....	(259)
六、不锈钢和耐热钢金相检验.....	(266)
(一) 试样的制备.....	(266)
(二) 不锈钢和耐热钢的侵蚀.....	(268)
七、不锈钢和耐热钢主要组成相的分析及其鉴别.....	(270)

第六章 铸铁的金相检验

一、概述.....	(276)
二、白口铸铁.....	(276)
(一) 亚共晶白口铸铁.....	(276)
(二) 共晶白口铸铁.....	(276)
(三) 过共晶白口铸铁.....	(277)
三、灰口铸铁.....	(278)
(一) 灰口铸铁的化学成分和牌号.....	(278)
(二) 灰口铸铁的石墨形态和大小.....	(280)

(三) 灰口铸铁的基体组织.....	(282)
(四) 合金灰口铸铁.....	(288)
四、可锻铸铁.....	(289)
(一) 可锻铸铁的成分和牌号.....	(289)
(二) 可锻铸铁的退火工艺.....	(290)
(三) 可锻铸铁的金相检验.....	(292)
五、球墨铸铁.....	(294)
(一) 球墨铸铁的牌号及其机械性能.....	(294)
(二) 稀土镁球墨铸铁石墨形态及鉴别.....	(295)
(三) 球墨大小.....	(297)
(四) 球墨铸铁的组织分类.....	(298)
(五) 球墨铸铁等温淬火的金相检验.....	(299)
(六) 球墨铸铁的缺陷及其分析.....	(305)
(七) 球墨铸铁金相试样的制备.....	(311)
六、蠕墨铸铁.....	(312)
(一) 蠕墨铸铁概况.....	(312)
(二) 蠕墨铸铁的金相组织和规范.....	(313)
(三) 蠕墨铸铁的生产工艺要点.....	(314)

第七章 铜、铝及其合金的金相检验

一、铜及其合金的金相检验.....	(316)
(一) 宏观检验.....	(316)
(二) 微观检验.....	(317)
二、铝及其合金的金相检验.....	(342)
(一) 宏观检验.....	(346)
(二) 微观检验.....	(346)
三、失效分析实例.....	(352)
附录：1.铜、铝及其合金的常用侵蚀剂.....	(353)
2.铝合金中主要相侵蚀前后的特征.....	(354)

第八章 高温合金的金相检验

一、概述.....	(359)
二、高温合金中常见相的分类.....	(362)
三、常见相组织及金相形态.....	(363)
(一) 金属间化合物相.....	(363)
(二) 碳化物相.....	(367)
(三) 硼化物相.....	(368)
(四) 氮化物相.....	(369)

目 录

四、高温合金的显微组织..... (369)

 (一) 夹杂物及晶粒度..... (369)

 (二) 高温合金的典型组织..... (370)

 (三) 有害的显微组织..... (371)

 (四) 强化相(γ' 相)与性能的关系..... (371)

五、相的鉴定方法..... (373)

六、GH33 和 GH136 合金的金相分析..... (378)

 (一) GH 33 (378)

 (二) GH 136 (378)

第九章 粉末冶金的金相检验

一、概述..... (381)

二、铁基、铜基制品的金相检验..... (382)

 (一) 金相试样的制备..... (382)

 (二) 显微组织与缺陷的鉴别..... (385)

三、硬质合金的金相检验..... (400)

 (一) 金相试样的制备..... (402)

 (二) 显微组织的鉴别..... (404)

四、涂层硬质合金的金相检验..... (410)

 (一) 试样制备..... (410)

 (二) 涂层的检验..... (411)

附录: 1. JB2798-81 铁基粉末冶金烧结制品金相标准 (416)

 2. 硬质合金金相评级图片(国际标准)..... (426)

第十章 表面渗镀保护层金相检验

一、渗镀层金相试样的制备特点..... (431)

 (一) 试样的选取原则和截取方法..... (431)

 (二) 试样的镶嵌与夹持..... (432)

 (三) 试样的磨光与抛光..... (435)

 (四) 试样的侵蚀..... (435)

二、渗碳热处理后的金相检验..... (437)

 (一) 渗碳用钢..... (437)

 (二) 渗碳的基本原理..... (437)

 (三) 渗碳层的显微组织..... (439)

 (四) 渗碳层深度算法..... (444)

 (六) 渗碳层的缺陷组织..... (446)

三、氰化处理后的金相检验..... (450)

 (一) 中温氰化层的显微组织..... (450)

 (二) 中温氰化层深度的测量..... (452)

(三) 氟化层缺陷组织.....	(453)
四、氮化处理后的金相检验.....	(455)
(一) 气体氮化后的金相检验.....	(455)
(二) 软氮化处理后的金相检验.....	(461)
五、渗硼处理后的金相检验.....	(467)
(一) 渗硼处理工艺简介.....	(467)
(二) 渗硼层的显微组织.....	(467)
(三) 硼化铁的鉴别方法.....	(468)
六、渗金属层的金相检验.....	(468)
(一) 渗铬层的金相检验.....	(468)
(二) 渗铝层的金相检验.....	(469)
(三) 渗(镀)锌层的金相检验.....	(470)
(四) 渗钒层的金相检验.....	(472)
(五) 渗硅层的金相检验.....	(472)
七、热喷涂、电镀、化学转化膜、腐蚀层的金相检验.....	(472)
(一) 热喷涂层的金相检验.....	(472)
(二) 电镀层的金相检验.....	(473)
(三) 化学转化膜(氧化与磷化)的金相检验.....	(473)
(四) 腐蚀层的金相检验.....	(474)
附 录：常用侵蚀试剂.....	(476)

第十一章 焊接接头金属的组织形态及其检验

一、焊接接头金属组织分析的特点.....	(478)
二、焊接接头的形成与区域特征.....	(479)
(一) 未混合熔化区.....	(480)
(二) 完全混合熔化区.....	(483)
(三) 部分熔化区.....	(497)
(四) 热影响区.....	(499)
三、异种钢焊接接头金属的组织.....	(503)
四、焊接金相检验技术.....	(506)
(一) 焊接接头金相分析的目的与方法.....	(506)
(二) 金相试样的选取与制备.....	(508)
(三) 试样的侵蚀.....	(510)
五、结语.....	(513)

第一章 宏观检验

金相检验由宏观检验和微观检验两个部份组成。宏观检验又称之谓低倍检验，它是通过肉眼或放大镜(20倍以下)来检视金属材料及其制品的宏观组织和缺陷之分布情况；用显微镜观察材料及其制品的显微组织或缺陷之分布特征的，则称为微观检验，又称为高倍检验。供宏观检验选用的试样，面积较大，检验方法、操作技术以及所需的检验设备比较简单，能较快、较全面地反映出被检材料或产品的质量；而微观检验所取的试样尺寸则较小，试验工作虽较深入细致，但往往要受试样选取的代表性的影响。同时制样繁琐、费时，检验设备精密，且价昂，鉴于宏观检验代表性强，且操作简便，因此，它是目前各工厂采用较广泛的一种检验方法。

金属材料在熔炼或进行热加工过程中，由于某些因素(例如非金属夹杂物、气体以及工艺选择或操作不当等原因)的影响，致使金属材料的内部或表面产生缺陷，从而严重地影响材料或产品的质量，有时还将导致报废。钢材中疏松、气泡、缩孔、缩管残余、非金属夹杂物、偏析、白点、裂纹以及各种不正常的断口缺陷等，是可以通过宏观检验来发现的，因而可及时地防止废品或事故的发生。宏观检验通常有：断口检验、硫印试验、磷印试验以及酸浸试验和塔形车削发纹检验等方法。在日常生产检验或科研工作中，可根据检验或研究的要求来选择之。此外，若将宏观检验与其他检验方法相配合，则可对被检验材料的质量作出更为全面的判断。

一、断口检验

材料受某些物理、化学或机械因素的影响，导致破断，在破断过程中所形成的自然表面称为断口，研究断口的目的则是探索和建立上述各种影响因素的作用和断口形貌之间的对应关系。从而通过断口形貌的观察，找出造成断裂的原因。在古代，人们就已利用肉眼来检视金属断裂的自然表面，来分析和研究金属断裂的性质、断裂源部位以及裂纹的扩展途径等。並由此来判断被检材料的冶金和热加工等质量。由于这种检验方法的简便直观，又不需要什么复杂的检验设备，因而愈来愈多地被控制质量的检验人员所采用。迄今，这种利用肉眼直接检视断口的方法已日臻完善，並积累了丰富的经验。但是，随着科学技术的不断发展，鉴于宏观断口分析的分辨能力毕竟比较低，对于断口的微细部份应用肉眼或低倍放大镜就不一定能观察清楚，后来就发展起来利用扫描电镜或透射电镜观察研究断口的方法。从而可以更深入地研究断裂裂纹的发生和发展。这就是断口的微观分析方法。本节叙述的是宏观断口检验方法。

在许多情况下，断口检验还可与其他宏观或微观检验方法相结合，做到互为补充，使分析的结果更为准确。例如，钢的过热和过烧，在断口上最易被显示；钢中的白点缺陷，虽可在热酸浸试验的试样横截面上显现出来，但它终究不如在纵向断口上显示得更为清晰和真实。图1-1为 $\phi 100\text{mm}$ 的CrWMn钢原材料之横截面经1:1盐酸水溶液热蚀后情况。

在横截面上有颇多锯齿状长条分布的裂纹，呈放射状分布，可初步判断为白点缺陷。图 1-2 为上述原材料纵向断口，从断口上即可清晰真实地显示出白点缺陷的形貌。对前述的初步判断可以得到证实。

GB1814-79 为“钢材断口检验法”的国家标准，它适用于结构钢、滚珠钢、工具钢以及弹簧钢的热轧、锻造、冷拉条钢和钢坯。其他钢类要求作断口检验时，也可以参照该标准。

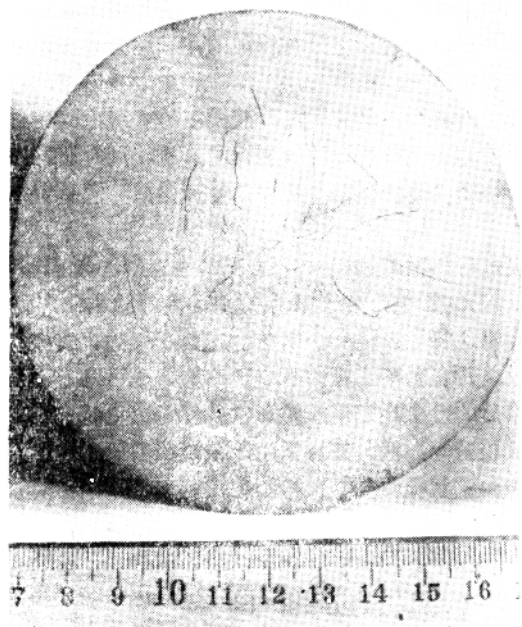


图 1-1 Cr WMn 钢横截面经 1:1 盐酸水溶液热蚀后显示的白点缺陷特征

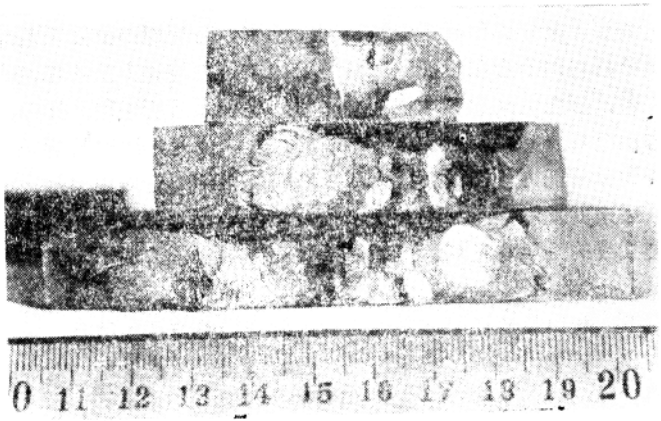


图 1-2 前图试样之纵向断口显示的白点缺陷形貌

(一) 断口试样的制备及保存

断口的试样一般来自两个方面，一为机械构件或零件在使用或运行过程中发生断裂而形成的自然表面，检视这种断口的目的是为了探索和研究其破断的原因，故应保持好断口的原始状态，要绝对避免断口发生碰撞、磨擦、污染、氧化、受潮等情况。否则，在作断裂分析时，将会造成判断上的错误。将断口浸泡在无水酒精中，或在断口上敷以火棉胶或覆盖一薄层醋酸纤维胶膜均是保护断口的有效方法。对于在运用或使用中产生断裂的零部件，其断口试样，可在断裂的部件上截取。另一种断口试样，则是专为检验钢材之质量而特意将其折断而获得的。这种断口试样的选取部位及加工方法，应遵循相应的技术条件及有关标准。

钢材中的偏析、非金属夹杂物以及白点等缺陷，热加工时，均会沿加工变形方向延伸，因而这些缺陷在钢材的纵向断口上易于被显示，故在选取钢材断口检验试样时，应尽可能地选取纵向断口。纵向断口的制备力法是：可先切取横向试样，试样的厚度为15~20毫米，在试样横截面的中心线上刻一“V”形槽，见图1-3所示。刻槽的深度为试样厚度的 $\frac{1}{2}$ ，若折断有困难时，可适当加深刻槽深度。对于直径或边长不大于40毫米的钢材，作纵向断口将有困难，此时可取横向断口，试样的长度为100~140毫米，在试样中部的一边或两边刻槽，刻槽时应保留断口的截面不小于钢材原截面的50%，见图1-4所示。

上述试样的截取，可用冷切或冷锯法。若应用热切、热锯或气割时，刻槽必须离开变形区或热影响区。

在室温下，将有刻槽的试样折断，以获得检验的断口。操作时，应将刻槽向下放置，使刀口与刻槽中心线

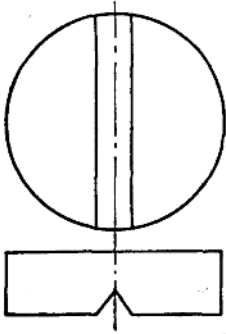


图1-3 $>\phi 40\text{mm}$ 钢材断口检验试样上刻槽示意图

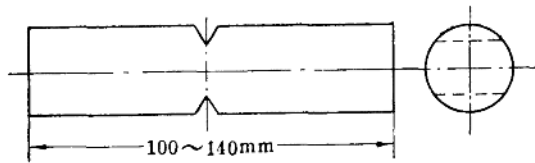


图1-4 $<\phi 40\text{mm}$ 钢材断口检验试样上刻槽示意图

相吻合，然后在冲击载荷下折断，试样最好是一次折断，严禁反复冲压。冲击折断试样，通常采用落锤、摩擦压力机、电锤、小型汽锤或冲床来进行。在折断试样时，应采取妥善的办法来避免断口表面受损伤或沾污。折断的断口一般应用肉眼来检视，在识别不清楚时，可借助10倍以下的放大镜进行观察。

(二) 断口检验试样的热处理状态

断口试样的热处理状态，以能真实地显示缺陷为准。当技术条件或双方协议有特殊要求时，可按规定执行。如规定须在油中淬火后折断试样，试样在折断前应将油擦洗干净或在 300°C 以下将油烧去。

断口检验的试样应根据钢材种类及检验要求的不同，在折断前一般需经过不同工艺的热

处理，为此，按照热处理工艺的不同，可将检验断口分为退火、淬火以及调质等几种类型。

1. 退火断口

轴承钢、工具钢的断口试样通常在经球化退火的钢材上切取並获得的。在退火断口上除能检视钢材中晶粒均匀和细密的程度外，尚可显示出因退火石墨的析出而引起的黑脆缺陷和夹杂物、缩孔等缺陷。

2. 淬火断口

除某些低碳结构钢材外，其他需检验断口的钢材在折断前先经淬火处理，可使组织细化，从而易于显露缺陷。因为钢材经淬火处理后，可以获得细瓷状的脆性断口，从而可避免钢材在折断时由于断口部分变形而将缺陷掩盖。所以在很多情况下，钢材作断口检验时，一般都采用淬火断口，以显示钢中存在的白点、夹杂、气孔、夹层、层状、萘状和石状等缺陷。

3. 调质断口

钢材在断口检验前经调质处理，折断后可获得韧性的纤维状断口，从而在一定程度上能反映出钢的横向机械性能，同时可反映出钢在使用下的情况，这对于某些特殊用途的钢具有一定的参考价值，但这种调质断口检验仅适用于少数专业用途的钢，例如 18Cr2Ni4W 钢。由于调质断口上存在较多的塑性变形，从而使一些微小缺陷常被掩盖，故它显示出的白点、气孔、夹层、层状等缺陷就不如淬火断口来得清晰和真实。

(三) 失效断口的形成和性质

机械零件或构件在运行或使用时的断裂，不外乎由两种情况所引起的：一为由短时间的一次载荷，如拉伸、弯曲、扭曲以及其它形成的变形所引起的断裂，其断口称为静力断口；另一种是在运行过程中，承受周期性交变和反复应力下所发生的断裂，这种断裂的断口称为疲劳断口。

1. 静力断口

按其断裂的性质又可分为韧性断口和脆性断口两种。

(1) 韧性断口是机械零件或材料在使用时，由于承受到短时间的一次载荷而发生的断裂，在断裂时有明显的塑性变形，显示机械零件或材料具有良好的韧性，这种断口的宏观特征是呈纤维状，颜色发暗，无金属的光泽，表面上没有均匀的颗粒状组织，但有明显的滑移现象。这种断口一般是穿晶断裂的，但有时也出现沿晶断裂。为了使低合金高强度钢和合金结构钢能获得纤维状断口，应使钢材按规定的技术规范进行淬火，然后再进行高温回火处理，这样才可使钢能得到规定的强度情况下，具有良好的韧性。

(2) 脆性断口是机械零件或材料在使用时，也是由于承受到短时间的一次载荷作用所发生的断裂，断裂前並沒有发生明显的宏观塑性变形，说明断裂时的载荷并未达到材料的屈服极限，故断口齐平，显现出银灰的色泽，这种断口在低倍放大镜下观察，断口表面是由颇多小颗粒的晶面所组成，具有金属的光泽，故称为结晶状断口，在断口的周围不像纤

维状断口那样有明显的剪切唇。一般说来,结晶状断口的形成主要取决于金属的晶体结构、基体组织、试验温度以及应力状态等。钢材的晶粒度和金相组织中各种相变产物的比例与结晶状断口的形成也有一定的内在联系。为此,冶炼时应严格控制钢水的纯净度和钢材晶粒的长大倾向;在热加工时应控制钢材的加热、停轧(锻)温度;热处理时应避免钢材晶粒的长大以及应避免出现第一类和第二类的回火脆性的产生,这些都是有利于避免结晶状断口形成的有效措施。

2. 疲劳断口

在周期性交变应力作用下工作的机械零件(例如内燃机中曲轴、连杆以及弹簧和钢轨等),虽然其工作应力远低于材料的抗拉强度,但在运行一段时期后,有时会发生突然的断裂。这种断裂通常是在没有明显的宏观变形的情况下形成的,有时零件的材料塑性虽然良好,但其断裂仍呈脆性状态,图1-5为45钢制曲轴在运行过程中产生的疲劳断裂。由图示的断口可以看出:疲劳破坏面上只有一个疲劳核心;疲劳逐渐扩展,可以清楚地看到前沿线的痕迹在断口上所占面积较大,显示出材料具有较好的塑性。由此可以推测出曲轴在运转过程中,实际工作应力是很低的;鉴于曲轴材料的塑性较好,故致使瞬时破坏区域的断口上出现凸出和凹陷的断裂面。



图 1-5 45 钢制曲轴之疲劳断口实物照

疲劳断口一般有三个区域所组成,即疲劳源区;逐渐扩展区;瞬时破坏区。

1) **疲劳源区** 机械零件在运转过程中,承受了周期性的交变载荷,在零件的表面或薄弱区域(表面的刀痕;过渡圆角应力集中处;表面处的脱碳层、夹渣、折叠、斑疤、砂眼等易引起应力集中处),容易产生显微裂纹,成为疲劳源区。若零件在高应力状态下运转,零件上会产生多个疲劳源,这主要取决于应力和运转系数。

2) **疲劳裂纹扩展区** 当机械零件表面产生显微裂纹后,在交变应力的反复作用下,显微裂纹将逐渐扩展。如果反复应力超负荷系数不大时,疲劳裂纹的发展往往会受到部分金属基体的阻碍或形变强化的阻碍,使疲劳裂纹的发展出现了停歇的情况,从而断口上出现了年轮状或贝壳状或海滩波纹状的前沿线,诚然,具有疲劳裂纹的工件在运行过程中,除受交变应力作用外,机件启动与制动也会引起疲劳裂纹扩展出现停歇的情况,从而在断口上呈现出年轮状的前沿线。如果零件已发生裂纹,之后,在恒定的应力或应变范围内进行运转时,往往会使疲劳断口上不出现年轮状的前沿线,此时裂纹前沿的两侧表面会由于应力反复作用而相

互接触並产生多次的压缩和摩擦，随着接触次数的增多，断口表面摩擦得愈光滑，因而断口上的颗粒也愈细小，此时扩展区可得到陶瓷状的甚至是磨光的断面。

3) **瞬时破坏区** 疲劳裂纹发生后並扩展到一定程度时，当零件有效截面承受的应力超过其疲劳极限很多时，将发生瞬时的破坏断裂。这种断口的特征与静力拉伸断口中快速破坏的放射区及剪切唇区相同，有时仅出现剪切唇区而无放射区，按此特征，应属韧性断口。对脆性材料而言，瞬时破坏区断口呈脆性的结晶状。

综上所述，影响疲劳断裂的主要因素有下列几方面：

(1) 零件外形结构的设计以及表面的光洁度对疲劳裂纹有很大的影响，因为机械零件表面的工作应力较高，故疲劳源往往产生于表面。为此，零件结构设计不合理(截面变化突然，过渡圆角太小以及零件表面有凹槽、圆孔、尖角等)或表面光洁度过低，均易导致疲劳源的早期形成。

(2) 机械零件表面及内部的缺陷——折叠、斑疤、砂眼、疏松、脱碳、白点、裂纹等缺陷，都是大幅度地降低金属的疲劳极限的主要因素。为提高零件的耐疲劳寿命，对上述缺陷均应控制到最低的程度。

(3) 材料的内在质量——显微组织及其均匀的程度和非金属夹杂物对疲劳性能有很大影响。例如回火屈氏体的疲劳极限较高，耐腐蚀性也好，魏氏组织和带状组织的疲劳极限就比较低；材料中非金属夹杂物的数量及其分布形状，对疲劳性能有不同的影响，例如夹杂物呈串链状分布，它对金属材料的疲劳性能之影响就较均匀分布的细颗粒状为大。为此应选择优良的材质，以提高疲劳性能。

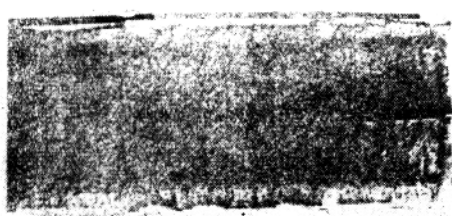
(4) 对要求高的耐疲劳性能的零件，其表面进行强化处理，例如喷丸、滚压、表面化学热处理或表面淬火处理等，均可提高零件的耐疲劳性能。

(四) 断口上各种缺陷的形态及识别

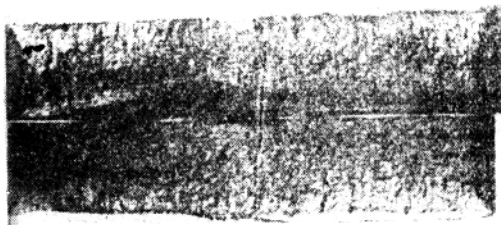
各种缺陷在折断的钢材断口上有不同的形态，现将各种缺陷在断口上显示的不同形态，分述如下：

1. 纤维状断口

纤维状断口又称韧性断口，此类断口呈纤维状，无金属光泽，颜色发暗，看不到结晶颗粒；断口边缘常常有明显的塑性变形特征。其断裂形式为穿晶延性断裂。出现这种纤维状断口，表征钢材具有较好的塑性及韧性。图 1-6 (a)、(b)、(c) 为典型的纤维状断口。



(a)



(b)