

焊接区断口金相分析

高等学校试用教材

焊接区断口金相分析

清华大学 田 燕 主编

机械工业出版社

机械工业出版社

350595

高等学校试用教材

焊接区断口金相分析

清华大学 田 燕 主编



机械工业出版社

本书是为焊接专业本科学生或研究生开设的选修课程教材或教学参考书。全书共分五章：第一、二章是断口金相学的基础知识及典型断口的宏、微观形貌分析；第三章是各类焊接裂纹断口的形貌特征及其形成机制分析；第四、五章是焊接区脆性断裂及腐蚀开裂断口的形貌及分析。

本书特点是除用大量图片来表现各类断口的典型形貌及形成机制外，还从物理冶金角度对于焊接区发生的裂纹及脆化的原因进行了分析。

本书还可供从事材料科学、焊接、失效分析等方面的研究人员或工程技术人员参考。

焊接区断口金相分析

清华大学 田 燕 主编

*

责任编辑：董连仁 版式设计：霍永明
责任印制：王国光 责任校对：陈 松

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 9¹/₂·字数 231 千字
1991 年 10 月北京第一版·1991 年 10 月北京第一次印刷
印数 0,001—2,900·定价：2.95 元

*

ISBN 7-111-02849-X/TG·623(课)



编者的话

本书是根据 1986~1990 年高等学校工科机、电类教材编审出版规划，为配合该选修课的开设或便于学生自学而编写的教学参考书。内容包括：断口金相学的一般知识及典型断口的分析；各种类型的焊接裂纹断口形貌特征及其形成机制分析；钢材焊接的材质脆化及脆性断裂断口形貌分析以及焊接接头腐蚀破坏的断口形貌分析等。由于实际生产中发生于焊接接头处的断裂事故分析一般较为复杂，涉及多方因素，故对其断口形貌亦难于简单地作出分析及判断，因篇幅的限制，书中亦未能收入此方面实例。因而本书仅就断口金相学的基础知识、较典型的金属断口形貌、较常见的焊接区裂纹及脆性断裂断口作了一定分析，只能起到引导入门的作用。在书的内容上作者力求反映国内外的研究现状，以期对读者的研究及生产工作起一定作用。

全书共分五章，由清华大学机械工程系焊接教研室田燕副教授主编，原清华大学焊接教研室候纯孝博士参加了第二章部分内容的编写；鹿安理副教授编写了第三章第一节；任家烈教授参加了第三章第二节中部分内容的编写。特邀甘肃工业大学陈剑虹教授、刘天佐讲师参加了第四章第一节的编写。余者均为田燕编写。本书由装甲兵技术学院彭日辉教授主审，并经甘肃工大陈剑虹教授及哈尔滨焊接研究所周昭伟高级工程师审查、修改。此外，西安交通大学、冶金部建筑研究院等单位为本书提供了有关的图片，清华大学焊接实验室的魏淑香同志负责了全部照片的翻拍、冲印工作，在此一并致谢。

限于编者的水平及经验，本书必然存在着许多不足与错误，热忱地希望读者给予指正或建议。



编者
一九九〇年十二月

目 录

第一章 绪论	1	形成机制	68
§ 1-1 断口金相学的发展及任务	1	二、淬火裂纹断口特征及其形成机制	87
一、断口金相学的由来及发展	1	三、层状撕裂断口特征及其形成机制	93
二、断口金相学的任务	1	§ 3-3 焊接再热裂纹断口特征及形成	
三、断口金相学在焊接中的应用	1	机制	100
§ 1-2 断口金相的一般技术	2	一、裂纹性质、宏观特征及形成条件	100
一、断口的保存与清洗	2	二、裂纹形成机制及断口微观形貌	102
二、断口的宏观分析技术	2	第四章 焊接区脆化及脆性断裂	
三、断口的微观分析技术	3	断口形貌分析	108
第二章 典型金属断口的宏观		§ 4-1 焊缝金属的低温脆性及其断口	
与微观分析	7	分析	109
§ 2-1 断裂形式的分类	7	一、焊缝金属的低温脆断及其	
一、按材料断裂前吸收能量或宏观		最薄弱环节	109
塑性变形量	7	二、焊缝金属低温冲击断口分析	111
二、按断裂途径或裂纹走向	7	§ 4-2 热影响区脆化及低温脆断断口	
§ 2-2 典型断口的宏观形貌分析	8	形貌分析	114
一、静载拉伸断口的宏观形貌	8	一、熔合线脆化	114
二、V形缺口试样冲击断口		二、多层焊热影响区中的局部脆化	128
的宏观形貌	13	三、热应变脆化	131
三、疲劳断口的宏观形貌	17	第五章 焊接接头的腐蚀开裂断口形貌	
§ 2-3 典型断口的微观形貌分析	20	分析	132
一、延性断裂断口的微观特征及其		§ 5-1 焊接接头的晶间腐蚀	132
形成机制	20	一、奥氏体不锈钢焊接热影响区中	
二、脆性断裂断口的微观特征及其		的敏化区腐蚀	132
形成机制	28	二、稳定型奥氏体不锈钢热影响区中	
第三章 焊接区裂纹断口金相分析	59	的刀状腐蚀	132
§ 3-1 焊接热裂纹断口形貌分析	59	三、铁素体不锈钢热影响区中的局部	
一、焊接热裂纹的形式与分类	59	腐蚀	134
二、凝固裂纹的形成条件与断口特征	60	§ 5-2 母材及焊接接头的应力腐蚀	
三、液化裂纹的形成条件与断口特征	65	开裂	134
四、高温失塑裂纹的形成条件		一、应力腐蚀裂纹的类型	136
与断口特征	67	二、应力腐蚀裂纹的断口形貌分析	137
§ 3-2 焊接冷裂纹断口形貌分析	68	§ 5-3 氢侵蚀开裂	142
一、氢致延迟裂纹断口特征及其		参考文献	144

第一章 绪 论

§ 1-1 断口金相学的发展及任务

一、断口金相学的由来及发展

金属断口分析是一门研究金属断裂表面的科学。由于断裂过程往往是瞬间完成的，所以靠实验方法直接掌握整个断裂过程的物理现象或断裂机理比较困难，然而，在断裂造成的断口表面上却往往留下某些反映断裂的物理过程的痕迹或信息。正如考古学家靠分析化石、法医靠解剖尸体来取得结论那样，断口金相工作者靠对断口表面保留的痕迹的分析来获得断裂起因或断裂机制方面的可靠情报。

从中世纪开始，人们已经会运用肉眼或放大镜对金属断口进行宏观分析。16世纪，人们已懂得用断口的宏观形貌来评定金属材料的质量。如将开缺口的铜锭横向打断，观察断口以检查铜锭的质量。19世纪，人们已经把断口的宏观形貌进行分类；研究了断口形貌由纤维状转变为结晶状的影响因素；认识了典型的标准形状拉伸断口的形成与分区等等⁽²⁾。进入20世纪以后，进一步用光学显微镜发展了断口金相技术。如Zapffe就曾用光学显微镜在较高的放大倍数下对氢脆断口形貌进行了较细微的观察⁽²⁾。但是，由于受到光学显微镜本身放大倍数及焦点深度的限制，不可能对断口的微观形貌进行深入的研究分析，因而断口金相技术难以发展。直到20世纪50年代以后，电子显微镜得到广泛的使用，借助电子显微镜较大的焦点深度，人们得以在高倍下对凹凸不平的断口表面的细节进行仔细的观察研究，达到判断断裂的发生原因及揭示断裂的微观机制的目的，从而使断口分析技术逐步发展为研究材料断裂过程的机制以及进行失效分析的一门专门技术学科，命名为断口金相学。20世纪70年代以来，随着扫描电子显微镜的普及应用，使断口分析更加方便易行，像用光学显微镜对材料的金相组织进行观察那样，扫描电镜对于断裂过程而言，已逐渐作为一种常规的、程序性的观察分析手段被广泛应用了。由于断口金相学是电镜应用之后才命名的，所以它实际上是电子断口金相学的简称，其所用的名词术语，也大都来自电镜观察的术语。

二、断口金相学的任务

(1) 确定断裂源，并判定断裂的性质，为分析破坏发生的原因提供依据，从而可作为事故分析的重要手段。

(2) 作为研究金属材料断裂的微观过程机制的重要手段。

由上述可知，断口金相学可以说是近代发展起来的一门学科，它是研究断裂产生的力学条件与判据的断裂力学，与研究断裂过程微观机理的断裂物理这两门学科之间的桥梁，是把断裂宏观判据与微观组织参量联系起来的必要手段。因而，近年来它与这两门学科一道，相互关联地得到了迅速发展。

三、断口金相学在焊接中的应用

近30年以来，随着焊接结构向大型化、高参数化以及高强度材料的发展及其在焊接构

件中的广泛应用,焊接结构的破坏事故屡有发生。例如,国内外都曾多次发生灾难性的压力容器爆炸事故、桥梁脆断事故、海洋平台沉没事故等,事后找寻断裂起源时,往往与焊接接头中存在的裂纹、夹渣、未熔透等缺陷,焊缝或热影响区脆化或与接头中高的残余应力、应变,而导致的应力腐蚀开裂等有关。而无论是进行事故原因分析还是试验研究中的断裂起源的分析,都离不开对断口表面的宏、微观形貌分析。诸如,对断裂性质的准确判定、对焊接裂纹类型的准确识别、脆化原因的分析等,都要依靠断口金相学的技术。因而,断口金相分析不仅是进行焊接接头失效分析的重要手段,而且也是研究断裂微观机制、控制接头质量、保证结构安全可靠的有力武器。对于从事焊接冶金、金属材料焊接性、焊接结构的强度与断裂等方面的科技工作者来说,掌握断口金相学的基本知识与分析技术是十分必要。

焊接接头断口金相分析是一门实践性很强的学科,它主要依靠电子显微镜,特别是扫描电子显微镜作为主要研究手段,运用金属物理、冶金学、断裂力学及断裂物理的基础知识,对焊缝金属或热影响区的断口表面的细节进行宏、微观分析。在与金相学研究方法的密切配合下,可以更深入、更明确地揭示裂纹或断裂过程的机制,从而能把焊接物理冶金学、焊接区断裂物理学等学科的有关内容推向深化。在高等学校中,本课程可作为焊接物理冶金学及金属材料焊接性分析课程的后续课程。

§ 1-2 断口金相的一般技术

一、断口的保存与清洗

在断裂事故后的断口或试件断口表面上保存了断裂过程的珍贵资料,要妥为保护,应避免碰伤或锈蚀污染,尽力保持其原始状态。如果已有污染,应在电镜观察前清洗断口,方法如下:

(1) 对于有灰尘等附着物的断口,可先用干燥空气吹,然后用无水乙醇或丙酮等溶液清洗,也可用空白复型法清除表面的机械附着物,即涂上醋酸纤维膜后再揭去,反复几次则清除效果最好。

(2) 对有油污的断口,可先用汽油洗去油污,再用丙酮或苯等有机溶剂浸泡,也可放在超声波振荡器中加速清洗过程或使用软毛刷清洗。

(3) 对于在潮湿空气中暴露时间较长,锈蚀较严重或已氧化的断口,则要求必须去除氧化膜。可采用化学清洗去锈:对碳钢及合金钢断口可采用 1% 的 NaOH (质量分数) 溶液煮沸,或采用酪酐 15%、磷酸 8.5%、水 76.5% 的混合溶液在 85~95℃ 下煮 2min 左右去锈。

二、断口的宏观分析技术

用肉眼、放大镜或立体光学显微镜 (40~50 倍以下) 对断口全貌进行的分析,被称为宏观分析。它不须特殊的仪器设备,因而简便、快速,且试件尺寸不受限制。宏观分析作为一种初步的、基本的分析方法是不可缺少的。通过它可以粗略地判断裂源位置及断裂的性质;对于大型断口还可缩小需深入进行微观分析的范围。在大型构件断裂事故的现场,宏观分析则是唯一的手段。首先可根据断口各区形貌及放射线方向找到裂纹源。还可根据断口表面的颜色、反光与否、表面粗糙度,花样 (人字纹、疲劳纹带等) 以及断口边缘情况 (剪切唇及塑性变形大小),来初步判断破坏的性质。

由于宏观分析只能在低倍下观察断口,不能得到十分准确的信息,还必须进行电镜下的

微观分析，但不能由此而忽视宏观分析的重要性。

三、断口的微观分析技术

由于断口表面的凹凸差较大，必须借助于焦点深度大、分辨率高的电子显微镜，在高倍下才对断口进行微观分析。一般常用于观察断口形貌的电镜可有下列两种。

(一) 透射式电子显微镜

透射式电镜 (TEM) 是利用高电压 (一般 50~100kV) 使聚焦后的细电子束具有很高的速度，可以穿透厚约 2000\AA 的金属薄膜样品，最后在屏幕或底片上成像。由于 TEM 分辨率很高，可达 $3\sim 5\text{\AA}$ ，因而可在数十万倍下观察到未经腐蚀的金属内部的微观组织亚结构，如位错、孪晶以及极细小析出相等；超高分辨率的电镜甚至可看到金属的晶格。用 TEM 电镜研究金属样品有两种方法：

1. 薄膜法 金属样品必须极薄才能使电子透过，一般在 100kV 电压下，金属样品的厚度为 $1000\sim 2000\text{\AA}$ 为合适。将金属切成 0.5mm 左右薄片，机械研磨到 $100\mu\text{m}$ 左右再用化学抛光减薄，用电解抛光最终减薄，再经穿孔后才能在孔边缘区域得到厚度合适的薄膜样品供观察。薄膜法主要用于研究金属内部微观结构，并可以进行区域衍射研究微区点阵。

2. 复型法 不像薄膜法那样可直接以金属样品为观察对象，能直接反映金属中各相的微观结构。复型法是用塑料及碳膜将抛光腐蚀后的金属样品表面微小的凹凸复制下来，在 TEM 下借助观察碳的复型薄膜而间接地显示金属表面各相的形貌。

用 TEM 研究金属断口的表面细微形貌时无法使用

薄膜试样，必须采用复型技术。即：将断口表面的凹凸形貌复制成碳的薄膜，借助碳膜复型

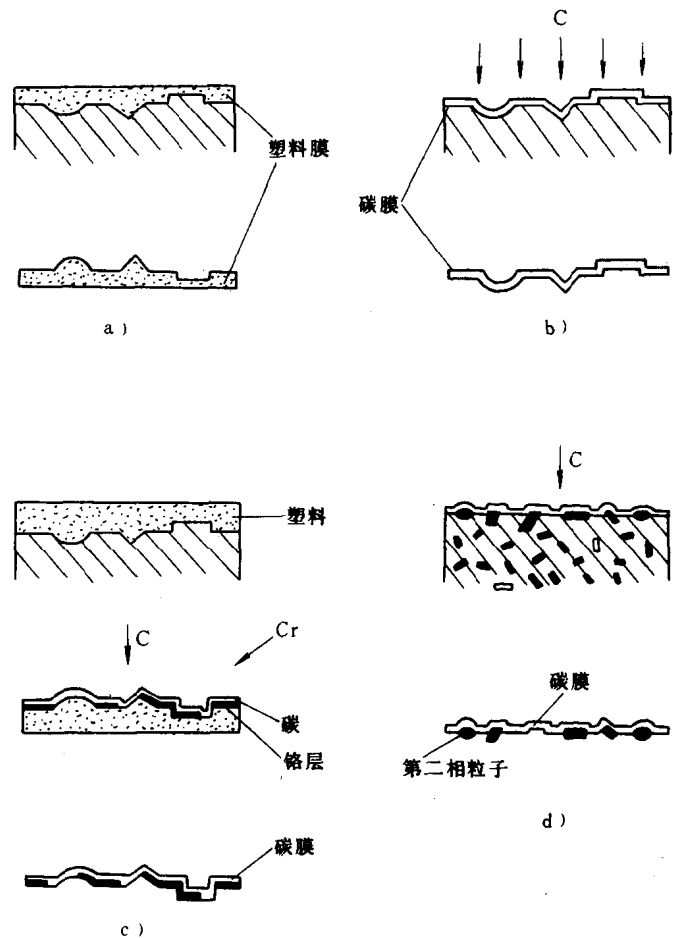


图 1-1 常用的复型方法⁽¹¹⁾

a) 塑料一次复型法 b) 碳一次复型法 c) 塑料
—碳二次复型法 d) 萃取复型法

⊖ $1\text{\AA} = 0.1\text{nm}$.

进行观察与研究。复型法通常有两种制作方法:

(1) 一次复型法 (或称直接复型法) 是将塑料或碳直接喷在断口上, 再把塑料或碳膜剥离下来作观察 (图 1-1a、b)。其优点是不经过中间的复型, 能较真实地反映断口上的细节形貌, 碳复型的分辨率最高可达 $20\sim 30\text{\AA}$, 而塑料因分子较大 (约 $100\sim 200\text{\AA}$), 所以分辨率较低, 一般不常用。由于剥离碳膜过程中需用酸腐蚀试件表面, 所以要损坏断口本身, 这是很大的缺点。

(2) 二次复型法 是先用塑料如醋酸纤维纸密贴在断口表面, 干后揭下, 制成一次复型。再在塑料复型上喷碳作成碳膜复型 (图 1-1c)。此法分辨率约为 100\AA 左右。优点是不破坏断口, 可多次取复型, 特别是在大型构件破坏的现场, 取制供分析的断口复型较方便。但二次复型如不精心制作易有假象。

用复型法观察断口形貌的最大缺点是: 由于剥离下来的小块碳膜面积小, 只能每次观察断口上一个很小的区域的微观形貌, 而且找寻复型位置与实际宏观断口的位置的对应关系比较麻烦, 不如扫描电镜直观; 其优点是比扫描电镜的分辨率高得多, 如果复型技术熟练, 可以在高倍放大下分辨出极细微的花样。较早期出版的断口金相图谱均是在 TEM 下用二次复型拍摄的, 其中典型的图象至今仍广泛应用。

另外, 还有萃板复型法 (图 1-1d), 一般是用碳膜作的一次复型。试件经过特制溶液的深腐蚀后, 用碳膜将其表面凸起的第二期粒子粘附下来, 配合能谱分析及电子衍射技术, 用于研究及分析金属组织中第二相粒子的形状、成分、结构、大小及分布。

(二) 扫描式电子显微镜

扫描式电子显微镜又称 SEM, 是近 20 多年来迅速发展并完善的一种电镜, 其成像原理与 TEM 不同, 是以类似电视摄影显示图象的方式, 用聚焦后的细电子束在断口样品表面扫描, 靠收集入射的高速电子的轰击所激发出来的各种电、物理信号 (常用的有二次电子、背散射电子、特征 X 射线等) 成像 (图 1-2)。断口观察主要使用分辨率高的二次电子像, 其分辨率可达 70\AA , 若使用背散射电子像, 其分辨率要低得多。用扫描电镜观察断口虽分辨率较 TEM 低, 但其他的优点很多: 首先是直接使用金属断口本身的样品, 立体感强, 观察方便, 不易失真; 而且倍数可以大范围变化, 对断口同一部位可进行几十倍直到几万倍的连续观察, 因而可随意选择所需的视野, 找寻宏观与微观形貌的对应关系非常方便。

用 SEM 作断口分析时, 除一般观察形貌外, 还有一些配合的辅助技术, 例如:

1. 用二次电子像与特征 X 射线相配合 这种配合可以在断口上进行微区分析, 以确定析出相或夹杂物的化学成分。如析出相粒子太少, 成分分析困难时, 还可采用萃取复型法, 使复型既可反映断口表面大致形貌, 又可将析出相 (或夹杂物) 粒子粘附于其上之后, 再进行的成分分析较易准确。

2. 找寻断口形貌与金属组织的直接对应关系 先在断口表面镀镍或敷上其他种断口保护层, 然后垂直断口切出金相剖面, 进行研磨及腐蚀显示金属组织, 或用腐蚀坑法显示其结晶方位, 然后剥去断口表面的镍层, 便可在扫描电镜下同时观察断口形貌与其垂直剖面上相对应的组织 (图 1-3)。镀镍层的作用不仅是为了保护断口免受腐蚀, 而且也为了保持断口与剖面间相交的棱线更尖锐。如图 1-4 所示为 15MnVN 钢母材的低温冲击断口与垂直方向剖面的组织的对应观察的例子。左上为硝酸酒精腐蚀的母材组织 (铁素体加珠光体), 右下为其冲击断口形貌, 照片对角线方向是区分断口与剖面的棱线。从图中可看出, 断口中一个

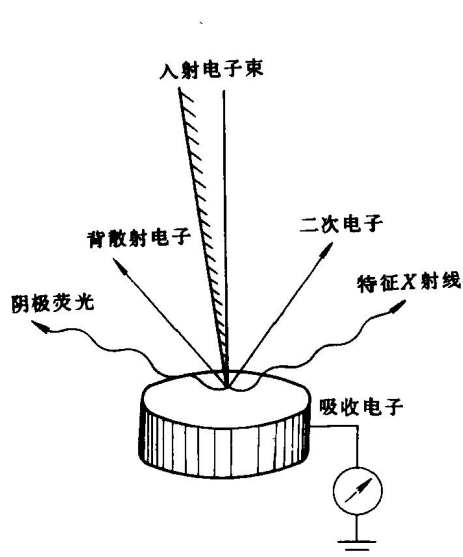


图 1-2 SEM 的电子束与固体样品作用后产生的各种物理信号⁽¹⁾

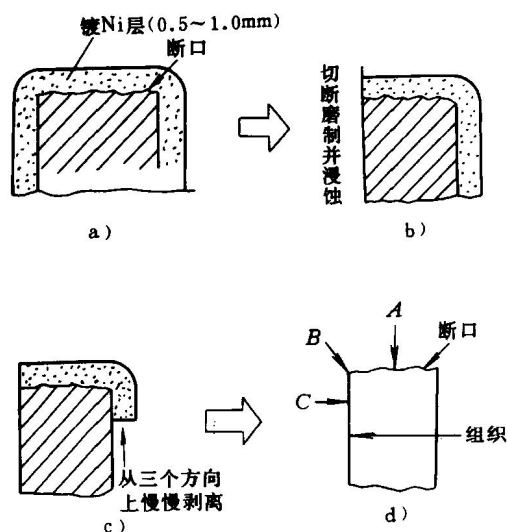


图 1-3 断口与组织对应观察法⁽³⁾

- a) 在断口表面镀上 Ni 保护层 b) 垂直断口作金相剖面
c) 剥去镀 Ni 层 d) 在电镜下可从三个角度进行观察

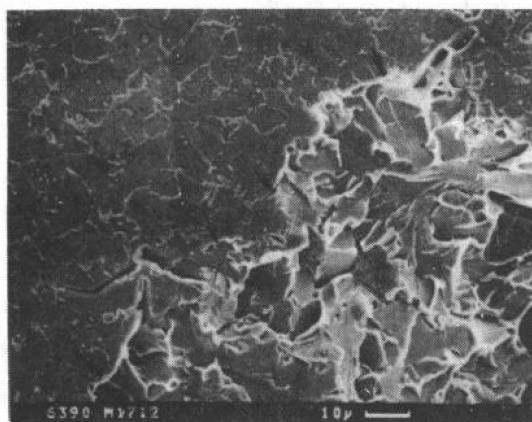


图 1-4 15MnVN 钢母材组织与断口形貌的对照⁽²⁾
(箭头处为断口面与金相剖面的棱边)

个小的解理断口单元尺寸恰与组织中细小的铁素体晶粒大小相对应。

直接对断口进行腐蚀亦可找到与组织的对应关系或测定结晶方位，但要损伤断口。无论是为观察结晶方位，即腐蚀坑的形状而作的特殊腐蚀，还是为观察断口所对应的组织而作的

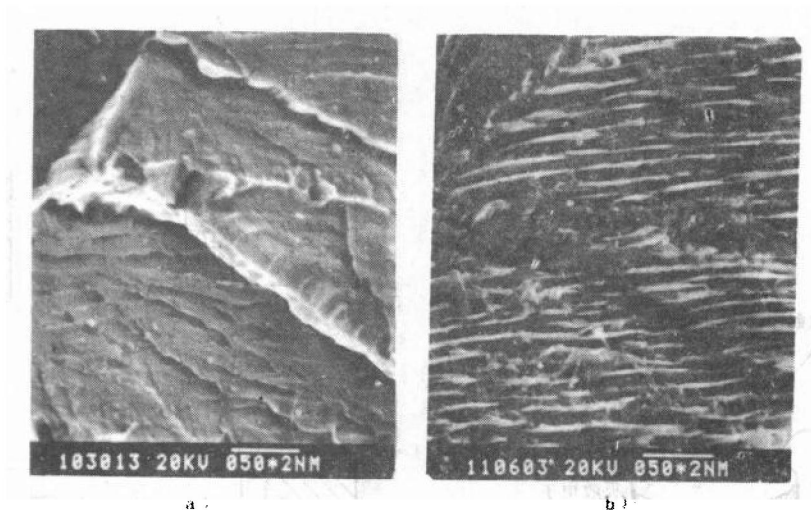


图 1-5 用断口腐蚀法作断口形貌与组织对照⁽²²⁾ (两步电解腐蚀法)

a) 腐蚀前解理断口形貌 (箭头处为原奥氏体晶界)

b) 腐蚀后同一断口表面对应的上贝氏体组织(白色相为 M-A 组元)

腐蚀，都必须在腐蚀前确定位置，作出记号并拍下所需的断口形貌，才能在腐蚀后找到对应关系。图 1-5 为 15MnVN 钢模拟粗晶区冲击断口放射区中的一个解理小面对应的一个上贝氏体板条束。

第二章 典型金属断口的宏观与微观分析

§ 2-1 断裂形式的分类

一、按材料断裂前吸收能量或宏观塑性变形量

(一) 延性断裂

是高能量吸收的断裂过程，特征是材料在断裂前发生大量的、明显的宏观塑性变形。

韧性材料在室温下受载，一般是先产生弹性变形。随载荷加大到屈服点后开始滑移，产生大量塑性变形。在塑性变形达到一定程度后，在某些部位发生位错的塞积，导致微裂纹形核。继续增加载荷时，微裂纹扩展并相互连接，直到最终断裂。延性断裂是应力水平高于整体屈服应力下的由塑性变形控制的断裂过程。裂纹扩展呈较缓慢的稳定扩展特征；减少载荷或卸载，则会随时止裂。延性断裂过程由于伴随大量的塑性变形及能量吸收，工件的外形呈现明显的缩颈、弯曲及断面收缩等宏观整体变形，其宏观断口形貌呈凹凸不平的暗灰色纤维状。由于断前发生显著的塑性变形（图 2-1），可引起人们的重视，不易造成事故。

(二) 脆性断裂

属低能量吸收的断裂过程，特点是断前无显著塑性变形。

脆性断裂过程中裂纹扩展速度很快，断裂往往是突然爆发，事先无征兆，因而是一种危险的断裂形式，往往会造成严重事故。典型的脆断事故如：美国俄亥俄州的“银桥”在冬季突然断为两截的事故；1949~1953 年期间在美国海军中服役的一批“自由轮”脆断沉没事故等。这此脆性断裂事故往往发生在低应力下。当内部存在裂纹源，外部环境又恶劣（如低温下）时易发生。

脆性断裂的断口往往垂直于正应力方向，较平坦、整齐，断口有金属光泽，强光下可看到断口中颗粒状的小面闪闪反光。用肉眼可看到断口中往往有放射条纹或人字纹。工程上规定光滑拉伸试样的断面收缩率小于 5% 的材料称为脆性材料。

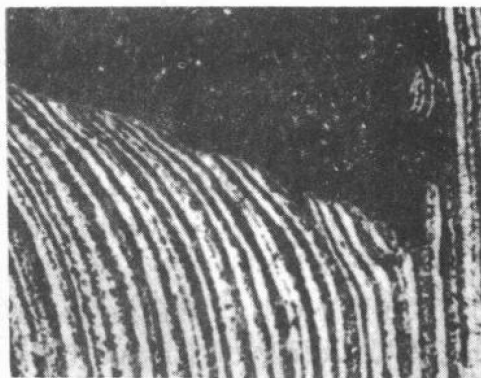


图 2-1 钢板延性断裂时晶粒呈显著的塑性变形⁽¹⁾

二、按断裂途径或裂纹走向

(一) 晶内（穿晶）断裂

是裂纹扩展穿过晶粒内部的断裂形式（图 2-2a）。根据晶粒变形的大小，晶内断裂可以是延性断裂（如韧窝断裂），也可以是脆性断裂（如解理断裂）。

(二) 晶界（沿晶）断裂

裂纹沿晶粒边界扩展的断裂形式(图 2-2b)。晶界断裂基本上均属脆性断裂的范畴,由于晶粒之间的分离破坏往往是晶界弱化所致,而晶界体积效应很小,所以很难产生大的宏观塑性变形。例如,钢在回火时因晶界析出脆性相导致的晶界开裂,高温下蠕变断裂,晶界腐蚀开裂,以及焊接区高温下杂质在晶界形成低熔点的偏析膜所导致的热裂纹等。

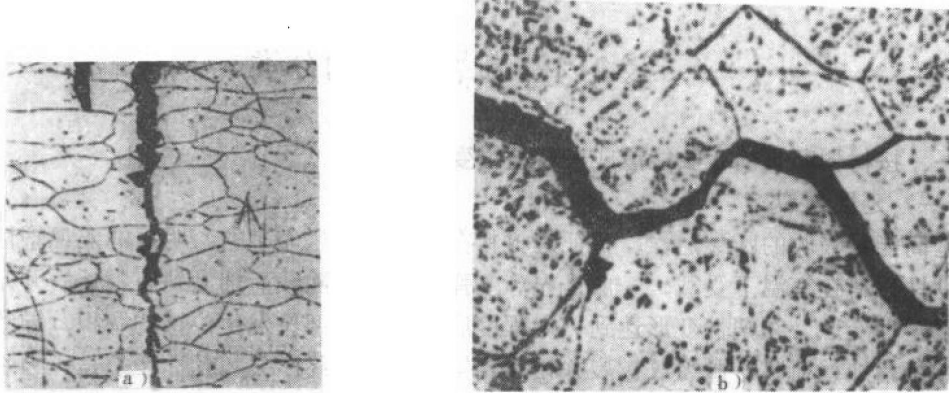


图 2-2 穿晶及沿晶断裂形式⁽¹⁾

a) 穿晶的应力腐蚀开裂 b) 钢中回火脆性造成的沿晶开裂

另外,按所受载荷、环境的不同及断裂时的微观机制不同,可分为:韧窝断裂、沿滑移面分离断裂、解理断裂、疲劳断裂、氢脆断裂、蠕变断裂及应力腐蚀断裂等。

§ 2-2 典型断口的宏观形貌分析

根据金属材料试件所受载荷性质及环境条件,可有不同的断裂形式,其断口可有几种典型的宏、微观形貌。

一、静载拉伸断口的宏观形貌

(一) 光滑试棒拉伸断口

光滑试棒受拉,裂纹在内部形核后再向表面扩展。对脆性很大的材料或材料在很低温度下受拉时,因极少有塑性变形,断口平直(图 2-3a),往往是脆性断裂。一般金属材料在室温下经受拉伸载荷时,通常在发生明显的塑性变形后以延性断裂方式破坏,其断口形貌随材料的塑性大小及所吸收的变形能的不同而各异。在纯度较高、塑性优良的金属中,由于基体易于滑移变形且作为微裂纹核心的非金属夹杂物或第二相粒子较少,其断裂形式属于原子键的剪切断裂。如图 2-3b 所示的凿尖状断口与纯剪切断口一般是发生在高纯度的单相金属中,特别是在单晶体中。塑性很好的金属或单晶在拉伸载荷下沿最大剪应力方向不断滑移流变,最终以滑移面分离形式断裂。分离的滑移表面的两半断口像刀刃(单向滑移情况),或像削尖的铅笔(多向滑移情况),见图 2-4。

在图 2-3 所示的几种断裂形式中,杯锥状断口是碳钢、低合金钢一类金属拉伸时最常见的一种断口形式,如图 2-3c 所示,杯锥状断口的形成过程大致为:含有较多第二相或杂质粒子的合金在承受拉伸载荷时,先是以滑移方式均匀塑性变形,随载荷增大,开始出现缩颈(图 2-3c-1),塑性应变逐渐在此处局部集中。随缩颈进一步加剧,处于三向应力状态下

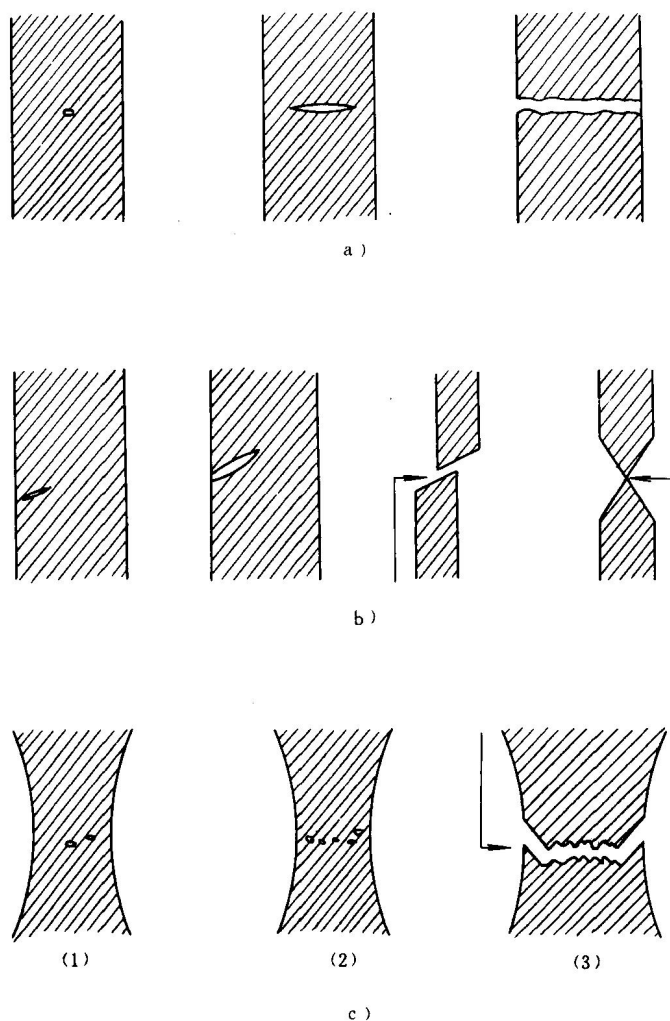


图 2-3 光滑圆棒拉伸时三种宏观断口形式⁽⁷⁾

a) 脆性断口 b) 剪切断口 c) 杯锥状断口

的缩颈中心部位开始萌生多个独立的微裂纹（微孔），这里微裂纹多半是在夹杂物或第二相粒子处形核，微裂纹以微孔长大并逐渐以微孔汇合连接的方式径向扩展（图 2-3c-2）。到表面附近时，由于应力状态的变化：变形集中于与拉伸轴成 $30^\circ \sim 40^\circ$ 角的高剪切应变区的边缘，导致最终以剪切方式断裂，因而形成杯锥状断口，断口的一半为杯状，一半为锥状（图 2-3c-3）。图 2-5 是杯锥状断口形成过程的实例。

由于工业上常用的钢或其他合金大多是以杯锥状形式断裂，因而将其作为典型代表分析其宏观形貌。断口通常分三个区（图 2-6）：纤维区 F、放射区 R、剪切唇区 S——即所谓断口特征三要素。

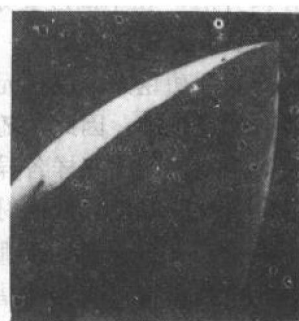


图 2-4 纯铝拉伸试件的剪切断口形貌⁽⁸⁾ ($\times 20$)

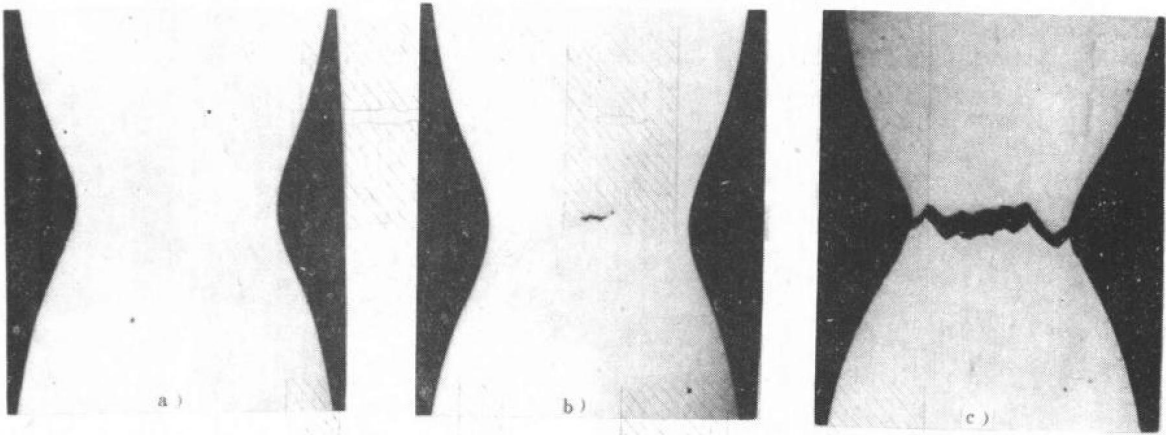


图 2-5 铝合金圆棒拉伸时杯锥状断口的形成⁽¹⁶⁾ ($\times 15$)

a) 缩颈区纵断面(缩颈应变 $\epsilon_n = 1.39\%$) b) 中心部位裂纹萌生、连接($\epsilon_n = 1.40\%$)
c) 边缘处沿 45° 方向剪断($\epsilon_n = 1.53\%$)

(1) 纤维区 一般位于杯锥状断口的中央，宏观形貌呈灰色纤维状，是裂纹处于稳定扩展阶段所形成的典型的韧性断口形貌。拉伸时，试件缩颈后其中心最小截面处于三向应力状态下，微裂纹在此处启裂形成多个微孔，微孔不断聚合长大形成了宏观裂纹。在板材或棒材拉伸断口中的纤维区往往呈现一定方向性，这是因为锻造、冷拔或轧制时非金属夹杂物（例如硫化物）一般沿轧向分布所致。板材拉伸试棒中心可出现平行轧向的纤维状断口；圆钢拉伸试棒中心可出现同心圆形纤维状断口（图 2-7）。

(2) 放射区 纤维区向外第二区为放射区，此两区的交界标志着裂纹由缓慢的稳定扩展向快速的不稳定扩展转化。此区宏观特征是有放射状花样，即用肉眼即可看到放射条纹。每一根放射条纹称为放射元，放射元方向与裂纹扩展方向一致，与裂纹前沿轮廓线垂直，其反方向指向裂纹源。在某些情况下放射花样呈现为“放射纤维”状，其放射元是一种典型的剪切形变造成的剪切脊（图 2-8a）。但在一般情况下放射元表现为条纹状（图 2-8b），是裂纹长大到临界尺寸后，在平面应变条件下作快速不稳定扩展，以低能量撕裂方式形成放射元。显然，撕裂时塑性变形越大，消耗的撕裂功越大，放射元就越粗大。反之，撕裂功越小，放射元也越细。因此，随着材料性质、试验温度的不同，断口中放射区的花样各异。塑性较好的材料断口中可无放射区。试验温度降低或材料的塑性较差时，放射区扩大，放射元变细。当材料处于极脆状态下断裂（如完全沿晶界脆裂或解理断裂）时，因几乎无任何塑性变形，故放射线消失，放射区呈颗粒状（或称结晶状）脆性断口形貌（图 2-8c）。

(3) 剪切唇区 断口的最外侧，亦即断裂过程的最后阶段形成的是剪切唇区。剪切唇表面较光滑，颜色灰暗，与拉伸轴大致成 45° 交角。剪切唇区是裂纹扩展到表面附近时，由

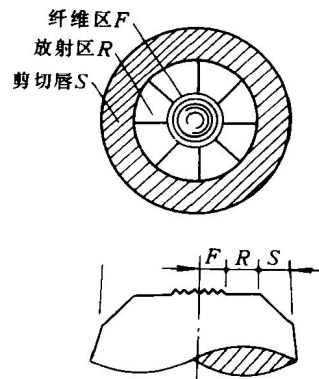


图 2-6 光滑圆棒拉伸试件杯锥状断口的分区示意图

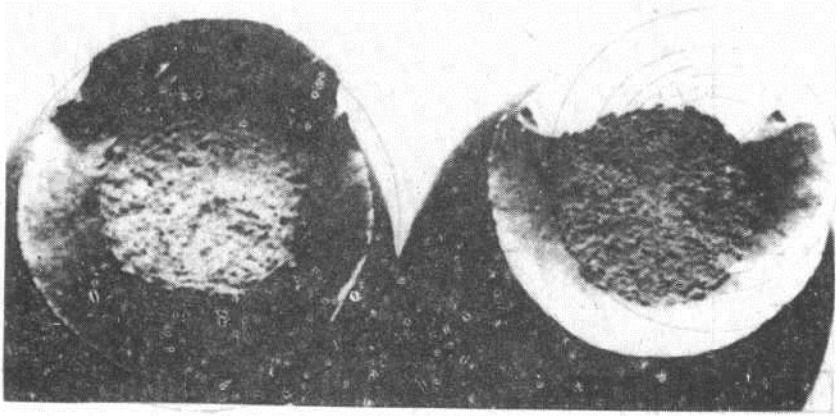


图 2-7 中碳钢拉伸时的杯锥状断口宏观形貌(只有纤维区及剪切唇两个区)⁽⁸⁾

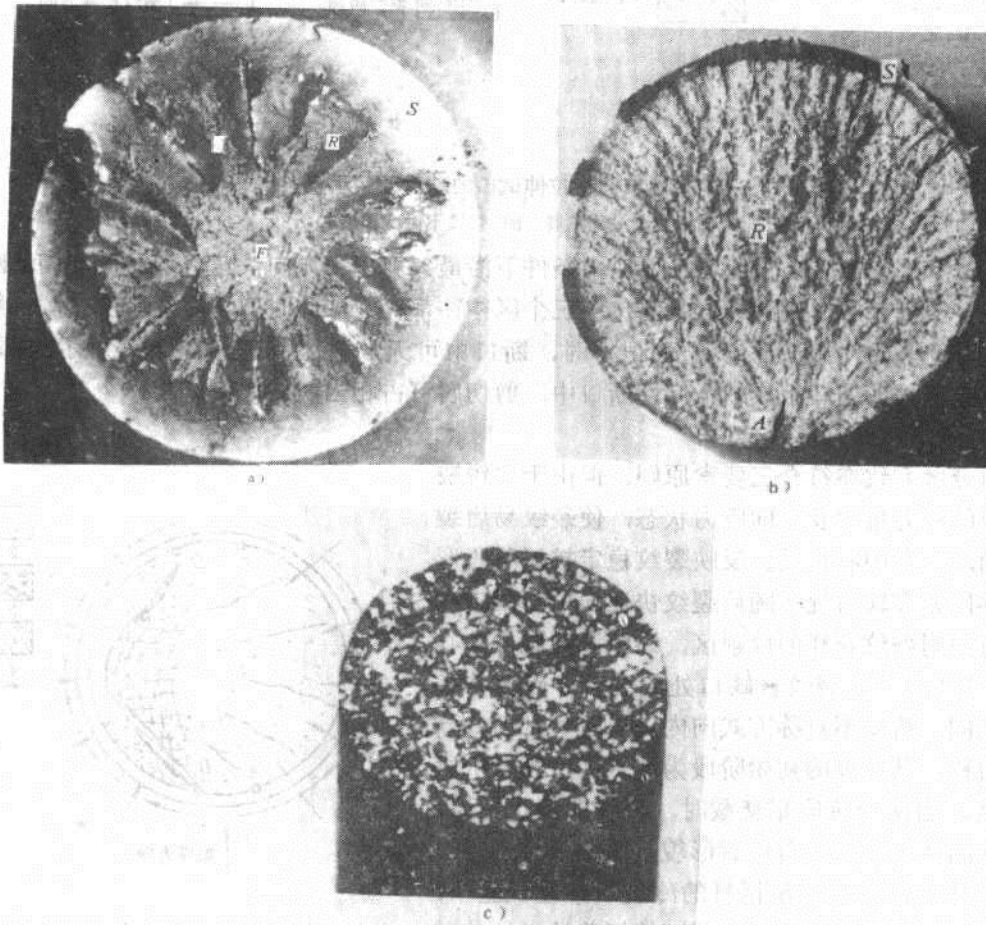


图 2-8 圆棒试件拉伸时不同类型的放射区宏观形貌⁽⁸⁾

- a) 中碳钢杯锥状断口放射区中的放射纤维花样 b) 中碳钢拉伸断口中放射区中放射条纹花样(无纤维区, 箭头 *A* 处为启裂点) c) 粗晶粒的低合金钢-196℃ 拉伸时的结晶状断口形貌 (无纤维区及剪切唇)

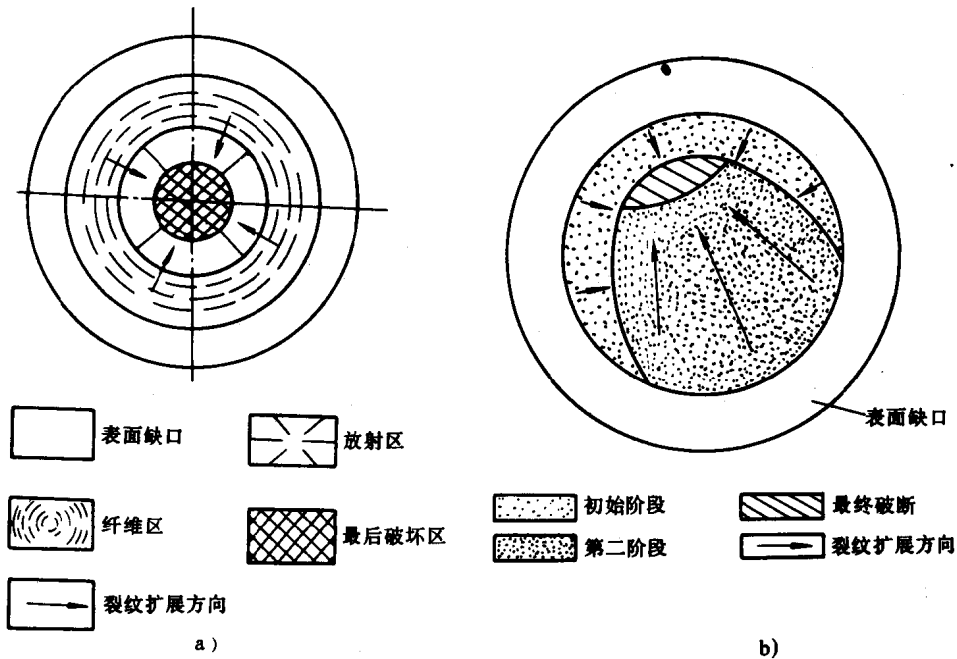


图 2-9 带缺口圆棒拉伸试棒的断口分区示意⁽¹²⁾

a) 裂纹对称扩展 b) 裂纹不对称扩展

于前端应力状态的改变，最终在平面应力条件下沿最大剪应力方向快速剪切而形成韧性断裂断口。在一般情况下，钢的杯锥状断口中三个区往往都存在，此时剪切唇区所占比例一般较小。而当试验温度较高或材料塑性很好时，断口中可无放射区，正如图 2-7 所示的那样，在仅由纤维区与剪切唇组成的全韧性断口中，剪切唇可占相当大的比例。

(二) 带缺口的圆棒拉伸断口

断口分区大致亦符合三要素原则，但由于尖锐缺口所造成的应力集中及三向应力状态，使裂纹易启裂于缺口前端，向中心扩展。反映裂纹稳定扩展阶段形貌的纤维区紧靠缺口处，随后裂纹快速向中心推进时将出现有放射条纹花样的放射区，终断区在试件中心处，(图 2-9a)。若裂纹自缺口处启裂后，因各方扩展速度不同，造成不对称方式向内进展时，则断口分区亦不对称，其扩展的初始阶段为纤维区，第二阶段为放射区，当两个阶段相交截时，裂纹即停止扩展，形成的终断区也可能是剪切唇形貌 (图 2-9b)。

在用插销试验法测定钢材的冷裂敏感性试验中，插销试棒即相当于有扩散氢作用下的恒载缺口拉伸试棒，其断口分区必然受氢致脆化的影响，放射区较大，而且往往看不到纤维区。图 2-10 是裂纹不对称扩展的插销试棒断口示意。氢致裂纹往往在低应力下启裂于离熔合线最近的缺口处 (图

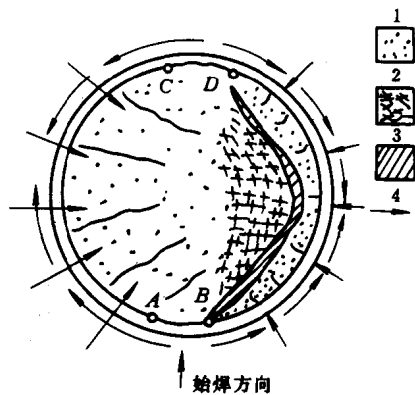


图 2-10 插销试棒断口分区示意⁽²³⁾

1—延迟扩展区 2—快速扩展区 3—终断区(剪切唇) 4—裂纹扩展方向