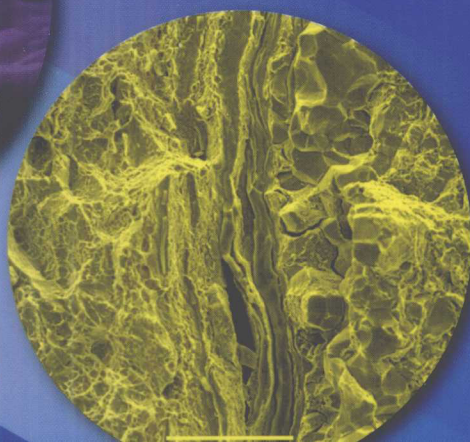
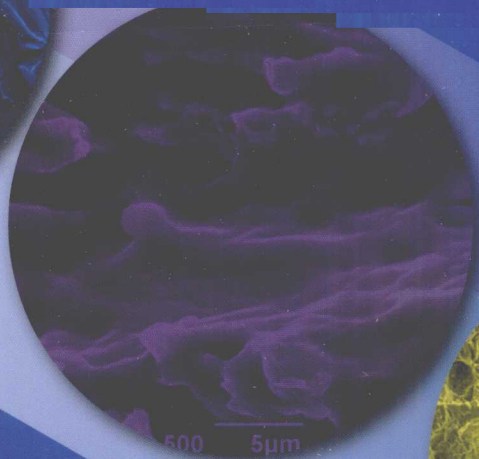


钢铁显微断口 速查手册

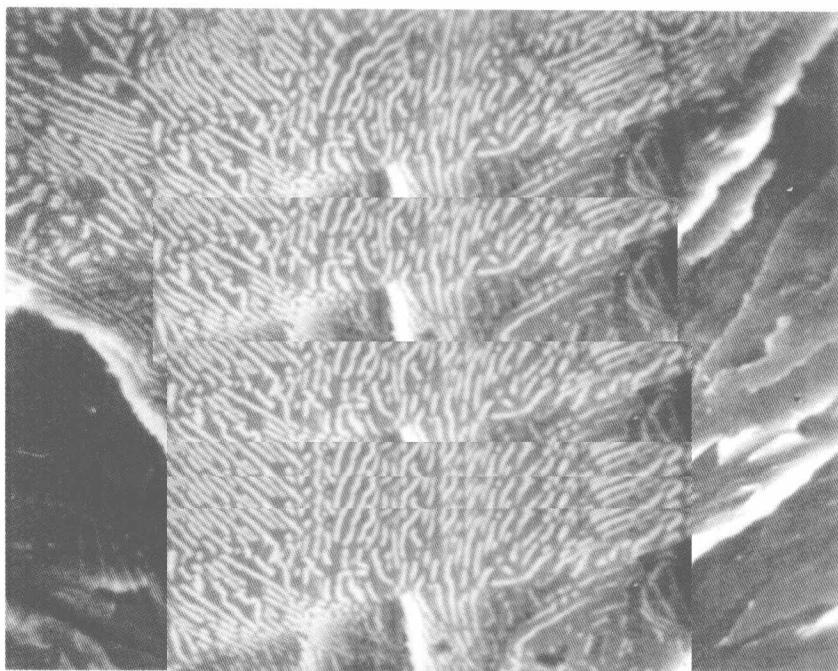
姜锡山 赵 晗 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

钢铁显微断口速查手册

姜锡山 赵 晗 编著



机械工业出版社

本手册共分为理论篇和应用篇,第1篇为理论篇——微观断裂机制,以图文并茂的形式汇集了韧性断裂、解理和准解理断裂、沿晶断裂、疲劳断裂、应力腐蚀断裂等典型断裂行为的扫描电镜图片,通过对材料断裂的微观或亚微观内在因素、断裂过程与滑移带、显微组织、裂纹萌生、位错机制之间关系等的分析,进行了微观断裂机制解释。第2篇为应用篇——典型断口组织与缺陷,是微观断裂机制的应用,较全面地汇集了我国一些钢铁和机械企业生产和使用的钢材与钢构件公认的典型断口组织与缺陷;并结合相应钢种物理和力学冶金行为对图片中的宏观和微观特征进行了描述和说明。

本手册可供从事冶金、机械的科研、工程技术人员以及有关高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢铁显微断口速查手册/姜锡山,赵晗编著. —北京:机械工业出版社, 2010.5

ISBN 978 - 7 - 111 - 29860 - 1

I. 钢… II. ①姜…②赵… III. ①钢—断口金相—技术手册②铁—断口金相—技术手册 IV. TG14 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 030916 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:吕德齐 责任编辑:高依楠

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2010 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·31.5 印张·3 插页·877 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 29860 - 1

定价:86.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者服务部:(010)68993821

前 言

断口是金属材料断裂后所形成的相匹配的表面外观形貌的通称。在冶金和机械工业,研究断口有两个主要目的:第一,分析材料内部结构特征,合理制定钢材断口标准;第二,研究钢材与金属构件断裂机理,正确分析钢材或金属构件质量事故。如果说钢材断口检验是“防患于未然”,避免将有缺陷的钢材制成金属构件,那么对钢材质量和设备事故的失效分析就是“汲取教训”。在冶金系统制定的碳素结构钢、合金结构钢、弹簧钢、不锈钢耐酸钢、耐热不起皮钢、高速工具钢、合金工具钢、轴承钢八大钢类的技术标准中,有六类钢把断口检验作为基本保证的技术标准或附加标准。其主要原因在于断口检验节省原材料、容易发现断口缺陷的类型及严重程度,更早地发现钢材的热处理缺陷等。同时,金属构件断裂后的断口忠实记录了在载荷和环境作用下断裂前的不可逆变形的显微特征,以及裂纹萌生直至断裂的全过程,为准确分析断裂事故提供了丰富的信息。

自1965年扫描电镜正式投入市场以来,技术发展很快。新一代的扫描电镜呈现出体积越来越小,重量越来越轻,计算机化程度越来越高,分析功能越来越先进,操作越来越简便的发展趋势。断口观察和分析成为冶金和机械企业、科研单位、高等院校最主要的应用。钢产品和结构件在生产、使用过程中,在载荷、温度、介质等力学因素及环境因素作用下经常以断裂、腐蚀、磨损、变形四种方式发生失效,其中断裂失效是最主要的失效方式。当断裂发生后,轻者造成设备破坏和损失,停工停产,重则机毁人亡。这些事故和质量问题的发生常常与钢的冶金缺陷、晶粒内部和晶界缺陷、夹杂物、金相组织缺陷、气体、化学元素偏析、结构件加工缺陷、焊接缺陷、热处理缺陷、冷加工缺陷、脆性显微组织缺陷、氢含量偏高、酸溶铝过低、氢致应力腐蚀、氢致延迟裂纹等因素密切相关。各种材料的表面形貌,钢铁材料的断裂机理研究、金相组织特征与断裂之间的关系,钢中气体与气泡行为,机械加工和其他工程损伤的观察分析与扫描电镜密切相关。扫描电镜的二次电子像、背散射电子像和X射线成分分析成为其最广泛的应用。

本手册共分为两篇,第1篇理论篇——微观断裂机制,以图文并茂的形式汇集了韧性断裂、解理和准解理断裂、沿晶断裂、疲劳断裂、应力腐蚀断裂等典型断裂行为的扫描电镜图片,通过对材料断裂的微观或亚微观内在因素、断裂过程与滑移带、显微组织、裂纹萌生、位错机制之间关系等的分析,进行微观断裂机制研究。对一些典型断口特征形貌,已经总结出广为接受的微观断裂机制,如韧窝形貌的微孔聚集断裂机制、解理台阶的螺位错与解理面交截机制、解理裂纹萌生的Stroth位错塞积理论、Cottrell位错反应理论和Smith理论、沿晶断口的晶界弱化或晶间脆化机制、疲劳条带的裂尖塑性钝化模型和裂尖滑移模型等。作者借鉴了关于微观断裂机制研究的成果。本手册的主要贡献是将微观断裂机制配以作者亲自拍摄的大量扫描电镜照片,使读者在阅读理论术语的

同时,通过欣赏清晰、具有艺术感的图片产生无限的乐趣,增加对微观断裂机制的深刻理解。

第2篇应用篇——典型断口组织与缺陷,是微观断裂机制的应用。由于金属凝固有它固有的规律,有些合金钢材的断口不可避免地出现一些不同的组织和缺陷,这些组织或缺陷在一定数量范围内对钢材的使用性能很小或者没有影响,但超过某一数量后,钢材的某些性能就会发生变化,因此划分这个量变到质变的界限对合理使用钢材有很大意义。本篇较全面地汇集了我国主要特殊钢企业公认的典型断口组织与缺陷,展示了连铸坯、轧材、钢构件的偏析线断口、层状断口、白点断口、气泡断口、木纹状断口、鱼目断口、鸟巢断口等缺陷断口的宏观和微观图片;并结合相应钢种物理和力学冶金行为对图片中的宏观和微观特征进行了描述和说明。但是,随着冶炼与加工设备的技术进步、工艺的改进,在钢材生产中今后还会有新的断口缺陷特征出现,有关断口上的组织或缺陷的定性和定量分析仍然是今后还会遇到的问题。

本手册仅供相关领域科技工作者参考。鉴于材料断裂失效行为和过程的复杂性,以及断口形貌的多样性,作者在对断口特征的描述和说明中定会存在一些不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

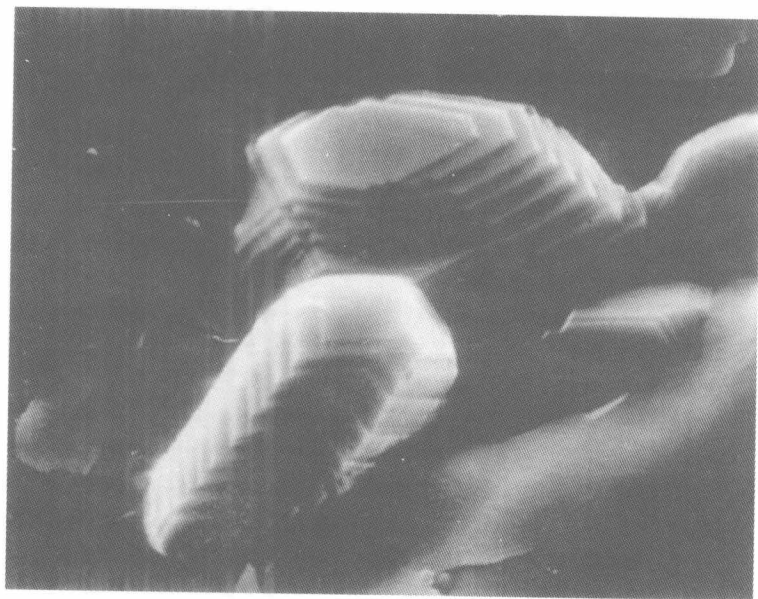
目 录

前言	
概述	1
第1篇 理论篇——微观断裂机制	
第1章 韧性断裂模式、韧窝形貌与微孔聚集断裂机制	
1.1 微孔聚集断裂	8
1.1.1 韧窝底部有第二相质点的韧窝	9
1.1.2 韧窝底部无第二相质点的韧窝	15
1.2 剪切韧窝	17
1.3 撕裂韧窝	19
1.4 显微气孔韧窝	21
第2章 解理断裂模式、河流形貌与解理分离机制	
2.1 解理台阶	27
2.2 河流花样	33
2.3 舌状花样	36
2.4 扇形花样	38
2.5 青鱼骨花样	41
2.6 人字条纹	42
2.7 解理羽毛	42
2.8 瓦纳 (Wallner) 线花样	43
第3章 准解理断裂机制	
第4章 沿晶断裂模式、石状 (冰糖状) 形貌与沿晶分离机制	
4.1 脆性沿晶断口	52
4.1.1 冰糖状沿晶断口	52
4.1.2 特殊沿晶断口	56
4.1.3 绸缎状沿晶断口	57
4.1.4 沿晶析出第二相薄片断口	57
4.1.5 柱状晶断口	62
4.1.6 晶界低熔点有害元素断口	64
4.1.7 沿晶渗碳体自身解理断裂断口	66
4.1.8 焊锡沿晶粒边界浸入断口	69
4.2 沿晶韧性断口	70
第5章 疲劳断裂模式、条带形貌与疲劳断裂机制	
5.1 疲劳源区断口	86
5.2 疲劳扩展区断口	101
5.3 疲劳瞬断区断口	104
5.4 轮胎状疲劳断口	105
5.5 人字形疲劳断口	107
5.6 脊柱状疲劳断口	108
5.7 海滩状疲劳断口	108
5.8 峭壁状疲劳断口	109
5.9 高温合金高周疲劳断口	109
第6章 应力腐蚀断裂机制	
6.1 应力腐蚀断裂	112
6.2 双相不锈钢应力腐蚀断裂	114
第2篇 应用篇——典型断口组织与缺陷	
第7章 显微组织与断口显微特征	
7.1 显微断口分析方法	120
7.2 珠光体断口特征	121
7.3 片层珠光体组织的变形与断裂	125
7.4 上贝氏体、下贝氏体断口特征	126
7.5 魏氏组织 (W) 断口	128
7.6 马氏体断口	131
7.7 扫描电镜断口金相技术	132
7.8 珠光体团与过热	137
第8章 与气体有关的断口	
8.1 钢中气体元素的来源与控制	142
8.2 白点断口	143
8.3 钢坯白点——超级白点脆性断裂	145
8.4 白点的微观特征	150
8.5 棒材白点——60Si2Mn 钢拉伸断口上的圆形白点	154
8.6 S235JO 钢板冲击断口上的白点	157
8.7 DNVA 钢板拉伸断口鸭嘴形白点	161
8.8 X70 板材拉伸断口上的鸭嘴形白点群特征	163
8.9 大锻件氢致延迟裂纹断口	171
8.10 几种典型的氢脆显微断口	174
8.11 16MnR 等压力容器用低合金钢板表面裂纹分析	176
8.12 气泡的断口特征及鉴别	181

8.13	S235JO 钢板冲击断口上的凝固液滴——钢气球特征	188	9.14	82MnA 钢连铸坯磷化物 Fe_3P 分析 ...	319
8.14	低碳高硫高铅易切削钢连铸坯气泡中的凝固液滴——泡中泡	191	9.15	连铸坯中心附近的铸态硫化物	324
8.15	Q235B 卷板冷弯试验裂纹分析	192	9.16	浸入钢中的 Fe_2O_3 结晶球	329
8.16	S355J2W50mm 厚板表面鸡爪形裂纹分析	195	第10章 非金属夹杂物与裂纹萌生断口		333
8.17	8622H ϕ 75mm 棒材表面裂纹分析	199	10.1	非金属夹杂物与裂纹萌生	334
8.18	37Mn5 ϕ 75mm 棒材表面裂纹分析	200	10.2	硫化物易切削性能	336
8.19	S235JO 冲击断口锈蚀特征	202	10.3	夹杂物对轴承钢接触疲劳剥落的影响	336
8.20	Q690 钢板冲击断口上的显微孔洞 ...	207	10.4	夹杂物对钢拉伸韧性断裂裂纹萌生动态观察	340
8.21	薄钢板——Q690D 钢板拉伸断口的气泡	209	10.5	硅酸盐与裂纹萌生	341
8.22	GCr15 钢 220mm $\times$ 480mm 连铸坯气泡观察	212	10.6	12PCrNi1Mo 钢管件断口上“小裂口”的观察	343
8.23	15CrMoR 容器板材 Z 方向拉伸断口气泡观察	221	10.7	耐火材料卷入钢液产生的夹渣断口	344
8.24	12MnNiVR 储罐用钢板拉伸断口上的气泡和气孔	229	10.8	保护渣卷入钢液产生的夹渣	355
8.25	低碳高硫高铅易切削钢连铸坯内的气泡	237	10.9	连铸坯非金属夹杂物断口	363
8.26	耐候钢 SPA—H 集装箱底侧架纵向裂纹分析	249	第11章 易切削钢断口		365
8.27	37CrNiMo 钢铸件皮下气泡的研究 ...	254	11.1	低碳高硫易切削钢断口	366
8.28	低碳钢鱼目断口及其本质	257	11.2	低碳高硫高铅切削钢断口	368
8.29	气泡中的硫化锰铁单晶体	259	11.3	低碳高硫高锰易切削钢断口	378
8.30	50 钢带材把手裂纹分析	265	11.4	含锡易切削钢断口	379
第9章 非金属夹杂物断口		273	11.5	石墨易切削钢	380
9.1	硫化物类 (A) 夹杂断口	274	第12章 层状断口 (条状硫化锰、氧化物、铝酸盐)		381
9.1.1	轧态变形硫化物	274	12.1	木纹层状断口	382
9.1.2	铸态硫化物	279	12.2	偏析线断口	385
9.2	氧化物类 (B) 夹杂断口	281	12.3	35CrMoA 钢带状组织与板条成分偏析断口	386
9.3	硅酸盐类 (C) 夹杂断口	283	12.4	轴心晶间裂纹断口	395
9.4	铝酸盐类夹杂断口	286	12.5	灰条断口研究	398
9.5	尖晶石类夹杂断口	289	12.6	层状或台状断口	399
9.6	氮化物夹杂断口	293	12.7	层状撕裂断口	401
9.7	单颗粒球状氧化物类 (D_s)	296	12.8	亮线断口 (质点偏析断口) —— 3CrNiMo 电渣钢中的合金元素偏析及对钢力学性能的影响	406
9.8	低碳高硫高铅易切削钢铝粒断口	305	12.9	CrNiMo 钢的白块断口及本质研究 ...	411
9.9	稀土元素对 S20A 钢硫化物形状的影响	306	12.10	X65 管线钢 DWTT 分离断口的显微分析	413
9.10	稀土镁球墨铸铁中的牛眼石墨	307	第13章 异常断口		417
9.11	几种特殊形态的晶体	309	13.1	黑脆断口	418
9.12	钢包结瘤	311	13.2	白块断口及台阶花样	419
9.13	钢帘线钢铸态夹杂物分析	311	13.3	鸟巢缺陷 (内部裂纹)	421

13.4 贝壳状断口	425	15.2.2 T91 轧材缩孔纵向断裂特征	462
第 14 章 树枝晶断口	429	15.2.3 T23 钢轧材缩孔纵向断裂特征 ...	464
14.1 铸铁树枝晶断口	430	15.2.4 SCM440 钢轧材中心裂纹断口 ...	466
14.2 易切削钢中的结晶台阶	433	15.2.5 R55Cr3 轧材回火脆性断裂特征	468
14.3 无电磁搅拌钢连铸坯树枝晶断口 (疏松与树枝晶)	435	15.2.6 GCr15 钢棒材白点宏观特征	469
14.4 38Si7 钢电磁搅拌后的连铸坯疏松 断口	441	15.2.7 42CrMo 钢 $\phi 95\text{mm}$ 棒材内裂 分析	470
14.5 无电磁搅拌钢和电磁搅拌钢的树 枝晶的特征	444	15.2.8 12Cr1MoV 钢 $\phi 80\text{mm}$ 轧材表面 纵裂缺陷	473
第 15 章 典型缺陷范例分析	447	15.3 钢结构件缺陷分析	475
15.1 连铸坯缺陷分析	448	15.3.1 齿轮裂纹分析	475
15.1.1 T23 钢高压锅炉管坯低倍星状 裂纹成因分析	448	15.3.2 100t 铁液车 40Cr 钢车轴断裂 分析	479
15.1.2 GCr15 钢 $\phi 500\text{mm}$ 连铸圆坯 中心裂纹	453	15.3.3 23MnNiMoCr54 钢 $\phi 26\text{mm}$ 热轧 棒材链条脆断	482
15.1.3 15CrMoG ($300\text{mm} \times 320\text{mm}$) 连 铸坯表面横向裂纹	455	15.3.4 22CrMoH 钢 $\phi 75\text{mm}$ 后桥主动齿 轮淬火裂纹	483
15.2 轧材缺陷分析	458	15.3.5 35SiMnVB 弹条延迟断裂分析 ...	487
15.2.1 12Mn2VB 钢轧材裂纹分析	459	参考文献	494

概述



ZG25 铸钢断口上的 (Mn, Fe) S 单晶体

钢铁显微断口学是研究钢铁断口的形貌、性质,进而分析断裂类型、断裂模式、断裂路径、断裂过程、断裂性质、断裂原因和断裂机理的科学。从16世纪开始,人们就开始对断口形貌进行研究,随着力学特别是断裂力学、损伤力学、微观力学、材料学、断裂物理和断裂化学等理论基础的发展,透射电子显微镜和扫描电子显微镜等先进仪器的应用,数学、统计学和计算机模拟等方法的引入,断口研究进入了全新的发展阶段。期间,人们积累了大量的理论知识和实践经验,适应学科发展规律的要求,把断口知识系统化、完善化,断口学的研究进入了新的发展阶段,形成了一门交叉分支学科——显微断口学,使得显微断口分析成为失效分析必不可少的手段。钢铁显微断口学不但给出脆性断裂解理花样的确切解释,也发展了新的疲劳断裂模型,并提出了微孔聚集的韧性断裂微观机理。

在机械装备的断裂、腐蚀、磨损、变形等四大失效方式中,断裂失效的危害最大。断口是断裂失效的主要残骸和物证,是断裂失效诊断的主要依据,是破译断裂失效原因的“密钥”。显微断口学是机械装备失效分析的重要基础和主要组成部分。探讨显微断口学研究的科学问题对学科发展具有十分重要的意义。

1. 断口分析在金属构件失效分析中的作用

(1) “断口”的重要性 “断口”是断裂失效(事故)最主要的残骸,是断裂失效(事故)分析的主要物证,是钢材生产中判定钢材质量的一项检验标准和手段。在有些断裂故障分析中,如曲轴的断裂,裂纹痕迹已经不存在或找不到,但在断口上却存在着丰富的信息;对还没有断裂的失效分析更为重要,如高压锅炉管扩口检验在管的横断面出现的小裂纹,沿裂纹处打开就成了断口,此时对裂纹的分析实际上就变成了断口分析,把潜在的失效问题消灭在萌芽之中。因此,“断口”分析在钢材质量和断裂失效(事故)分析中十分重要。

(2) “断口”的全息性 全息是指任何生命个体的局部单位,都包含着整体生命的全部信息和密码。宇宙中的万事万物都可看成一体,所有物质都是相互紧密联系着的,每一个局部都会反映全体,每一个微小的单元都会有全息的特征。“断口”作为金属构件或钢材的一部分或微小单元,却记录了构件或钢材从裂纹萌生、扩展、直到断裂的全过程,虽然是局部,但却包含了整个构件或钢材的全部信息和密码,因此它具有全息性。“断口”可以说是断裂故障的“第一裂纹”,而其他裂纹可能是二次裂纹或三次裂纹,第一裂纹与这二裂纹的断裂模式、原因和机理有时是相同的,有时是不同的,也就是说二次裂纹或三次裂纹有可能只记录了断裂后期的信息,因此被称为“第一裂纹”的断口分析在断裂事故分析中具有“核心”的地位和作用。

(3) “断口”唯一性 “断口”有时是断裂失效(事故)唯一的“物证”,飞机的“黑匣子”能够记录声音和飞行参数,是判定飞机事故或空难的“人证”,但是,“人证”有时只能作为辅助信息或证据,而对飞机残骸断口的观察和分析,才是解决问题的关键。

(4) “断口”信息可分析性 利用扫描电子显微镜等现代分析仪器和分析技术,使得断口中所包含的信息是可以“破译”的,断口是可以分析的,信息是可以获取的。

(5) “断口”分析适用性 冶金企业,特别是钢铁和机械企业,由于钢铁和机械生产的复杂性和不可预见性,钢铁产品生产中出现的产品质量问题,设备制造加工、机械构件出现的质量和失效问题总是不可避免的,而“断口”分析是正确鉴定这些质量问题的主要方法之一,所以很多冶金和机械企业都装备了扫描电镜,用扫描电镜观察断口,分析产品质量问题,找出失效原因。“断口”分析在冶金和机械企业、冶金科研院所具有广泛的适用性。

2. 断口分析的内容及其依据

(1) 首断件的判定及其依据 首断件的判定,即从众多的断口中寻找首先破坏的部件对断裂失效分析是至关重要的,它是断裂失效诊断成功与否的关键。断口残骸分为首断件(绝大多数情况下为肇事件)、随后断裂件(可能是裂纹残骸,也可能是断口残骸)以及被动断裂件(瞬

断件)。其中,首断件和随后断裂件为主动断裂件。主动断裂件有可能是脆性断裂、疲劳断裂,因此要从众多(有时也有可能是成千上万件断口,例如空难事故残骸断口)的断口中寻找出脆性断口、疲劳断口,再从中进行分析,才能找出整个事故的肇事原因。

(2) 断裂性质(或断裂模式)的分析及其依据 断裂性质(或断裂模式)是指对首断件性质的分析。断裂模式分为一级断裂模式、二级断裂模式和三级断裂模式,其中一级断裂模式是首要的。一级断裂模式主要有脆性断裂、延性断裂、疲劳断裂三大类。区别脆性断裂和延性断裂的主要依据是宏观塑性变形的大小;区别脆性断裂和疲劳断裂的主要依据是断裂特征,如沿晶和疲劳辉纹特征。

二级、三级断裂模式的诊断依据主要是断口的形貌、断口的颜色、断口上的腐蚀产物、断口上的晶面取向和显微组织,断口的宏观走向与主应力方向,与零件形状、与轧制锻造流线方向的关系,断口的成分和元素的分布以及断口边缘情况和变形情况等。每一种断裂失效信息都是断裂失效的一个特征,或反映影响断裂失效的一个因素或条件,综合几种断裂失效信息可以诊断出断裂失效的模式。

以脆性(解理)断裂失效模式为例,介绍断裂失效模式与断裂失效信息的关系。与脆性(解理)断裂失效模式相关的断裂失效信息包括:从裂纹的起源位置和扩展方向的宏观看,裂纹一般起源于应力集中处,并且与接触介质无关,裂纹扩展方向与主正应力垂直,或与切应力平行;从微观观察,裂纹起源于晶内或相内,或起源于夹杂物,或起源于加工刀痕,沿特定的晶面或晶向扩展。从断口的形貌和特征看,宏观断口附近残留宏观塑性变形小,断口比较平直;断口为本体材料颜色;断口宏观形貌呈结晶状(颗粒状)或放射状(人字纹);典型的脆性微观断口形貌为解理(河流、扇形、台阶等),其典型的应力性质和特征可能是静载,也可能为冲击载荷。断口上的夹杂物也反映了钢的冶金质量情况。

3. 断裂原因的分析及其依据

断裂原因是指酿成断裂的主要原因。从责任上来看,断裂原因可以分为材质原因、工艺原因、冶金缺陷、焊接缺陷、铸造缺陷、设计原因、环境(使用或老化)原因、不可抗拒的自然力等。断裂原因的诊断是在断裂模式诊断基础上进行的。

从力学观点来看,断裂原因是判断材料抗力过小还是载荷动力过大。不同的断裂模式其断裂原因中材料的抗力指标不同,延性断裂的抗力指标一般指抗拉强度;脆性断裂的抗力指标是材料的冲击韧度或断裂韧度;疲劳断裂的抗力指标则是疲劳强度或条件疲劳应力。断裂原因的诊断就是要分清在哪个过程中造成的断裂应力过大或材料抗力过低。在断裂原因的诊断中,除了要对断口进行认真、仔细、微观的分析之外,还要对材料本身的性能、受力情况和大小、环境因素及其后果等方面进行全面、系统和深入的分析、比较、综合和判断。有的学者提出的“断裂失效模式和原因的特征判据的对比综合分析诊断法”是一种很有意义的探讨。断裂失效的原因是繁杂多样的,为了正确诊断断裂失效的原因,对单一断裂模式和原因的分析诊断是非常重要的,这是断裂失效(事故)原因分析的基础,必须着眼于它们各自特征判据的分析和识别,而特征判据只有进行相互比较才能加以鉴别。实际的断裂模式和原因往往不是单一的而是复合的,对这些疑难断裂模式和原因的诊断,应特别强调其原始情况的调查与收集、失效样品及对比分析样品的检查与分析、科学试验和对结果的综合分析。

4. 断裂机理的分析及其依据

断裂机理是指材料断裂的微观或亚微观内在因素的分析,有时甚至是达到纳米或原子级别因素的定性和定量分析。断裂机理分析的难度很大,但又极有理论价值,因为它是对断裂的内在本质、必然性和规律性的研究。断裂过程的微观、亚微观的动态观察有助于分析各种显微组织在断裂过程中的作用和影响。目前很多学者在扫描电镜下安装了动态拉伸装置,观察组织与断裂

之间的关系；安装加热台，观察样品的相变情况；安装切削装置，研究易切削元素的易切削原理。但纳米级或原子级别的原位动态观察目前研究的还不是很多，甚至于很少，主要是观察和实验技术方面的问题。

断裂机理分析及其依据主要包括：

- 1) 分析断裂过程与滑移带之间的关系，以判断相关因素的影响。
- 2) 分析断裂过程与显微组织之间的关系，以判断金相组织的影响。
- 3) 分析断裂过程与位错密度、裂纹萌生过程之间的关系，以判断位错运动、相界、晶界的影响，如解理的晶界位错集聚和裂纹萌生的 Smith 模型。
- 4) 断裂的位错理论，包括延性断裂生核、脆性断裂生核、解理台阶、解理舌等模型。虽然从断口上很难直接得出断裂失效的机理，但是，断口是断裂失效机理诊断的物质基础，是判断断裂失效机理是否正确的重要依据。综上所述，断口分析贯穿断裂失效分析的各个层次，涉及断裂失效分析的诸多方面，是断裂失效分析的核心。

钢铁显微断口学是一门新兴的交叉综合学科，当前正处于发展阶段，本手册针对显微断口学研究领域发展过程中存在的断裂微观机理、典型断口特征，以图文并茂的形式进行简要的总结和探讨，对显微断口学的发展和完善的意义。伴随科学技术的飞速发展，新材料不断出现，它们的原子排列结构、显微组织形态与传统材料相比有很大不同，因此力学响应、形变机制、损伤机制、裂纹萌生与扩展机制也有显著的差异，导致忠实记录断裂过程的断口表现出新颖独特的形貌特征，因此，本手册介绍的案例并不全面，仅起到抛砖引玉的作用。虽然人们对定向凝固柱晶材料和单晶材料的断裂（静载拉伸、高温疲劳等）机理及断口特征进行了一定的研究，但还远远没有成熟；而对块状纳米晶和非晶材料的服役性能和断裂研究刚刚处于起步的初级阶段，试验数据不全且有矛盾之处，没有系统的理论形成。在今后的显微断口诊断研究中，新材料的断口研究仍然是相当长时期内的热门课题。随着新材料的应用、微观断裂力学、材料显微学、计算机模拟技术等相关学科的不断发展，断口微观机理研究定会随之不断发展，显微断口学的内容将会更加丰富多彩，在工程实践和理论研究中将会发挥更大作用。

第1篇

理论篇——微观断裂机制

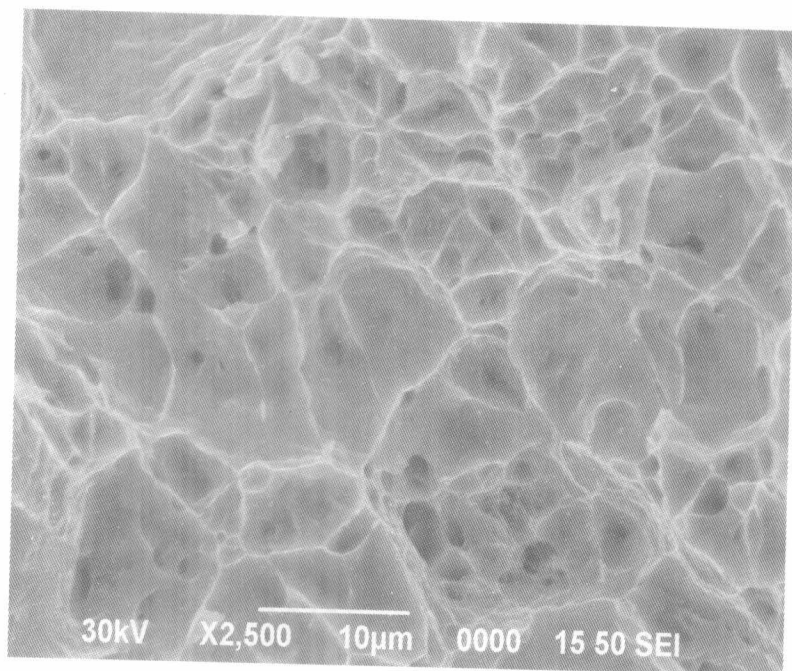


GCr15 钢过热沿晶脆性断裂断口

一颗摇摇欲坠的晶粒，二次裂纹，光滑的晶界表面栩栩如生。

第 1 章

韧性断裂模式、韧窝形貌与微孔聚集断裂机制



15CrMoR 钢板拉伸断口上的韧性断裂特征
显示大小不等的韧窝，韧窝壁光滑。

1.1 微孔聚集断裂

韧性断裂是指断裂前有明显宏观塑性变形的断裂。在没有使用电子显微镜观察之前,对韧性断裂断口显微形貌特征的研究是不够全面的。通过透射电子显微镜的观察,特别是1965年以后扫描电子显微镜的广泛应用,发现韧性断口是由于显微空穴或显微孔隙的萌生及聚集而形成的。

韧窝的形成机理为微孔聚集。首先在材料内部分离形成微孔,在滑移的作用下显微空穴在塑性变形过程中不断长大或聚集,使显微空穴与显微空穴之间自由表面的厚度逐渐减薄,当塑性变形达到一定程度时,和其他显微孔洞连接在一起形成韧窝断口,最后导致破裂分离。扫描电子显微镜中所观察到的韧窝,实际上就是显微空穴的一半。

绝大多数工程合金的微孔在第二相颗粒处形成,第二相颗粒可以是夹杂物、析出相或质点。韧窝的尺寸和形状与材料特性,材料强度、第二相颗粒尺寸、形状和分布及应力状态(类型、大小)有关。在有些情况下,能够在韧窝底部发现第二相颗粒一分为二,如球形颗粒分成两半,一半留在一块断口上,另一半留在与其匹配的断口上,或脱落掉;有的颗粒界面与基体分离,在断口上有的韧窝底部有颗粒,有的没有颗粒。另外,在较大韧窝的内壁上可以经常看到“蛇行滑移”、“涟波”等滑移痕迹。

韧窝花样的形状主要由所受应力状态决定,一般可出现三种不同形状的韧窝花样:等轴韧窝、剪切韧窝和撕裂韧窝。正拉应力造成的断裂形成等轴韧窝;切应力造成拉长韧窝,匹配断口上韧窝被拉长的方向相反;撕裂应力也造成拉长韧窝,但匹配断口上韧窝被拉长的方向相同。在通常情况下,各种形状的韧窝是混合在一起的,在实际的金属材料中,等轴韧窝与抛物线韧窝是规则而交替分布的,且常常观察到小韧窝包围着大的等轴韧窝。

韧窝的尺寸,通常用韧窝的宽度和深度来度量。韧窝的宽度,指等轴球体或抛物线旋转体大圆直径的大小;韧窝的深度,常以断面到韧窝底部之间的距离为标准。韧窝的大小取决于:①成核出现的显微空穴大小;②在显微空穴聚集之前发生的塑性变形量。当夹杂物成核出现空隙时,起始的显微空穴尺寸主要取决于夹杂物尺寸、间隔及材料的塑性变形能力等。显微空穴聚集所需要的塑性变形量,在某种程度上与成核位置密度有关;在给定的材料中,当成核位置密度增大时,塑性变形程度和韧窝尺寸均减小。在金属材料韧窝断口中,通常最常见的是尺寸各不相同的韧窝花样,但是也可看到仅由尺寸较大而又均匀的韧窝,或者是比较大的韧窝的周围密集着尺寸较小的韧窝的情况。当断口中只有尺寸较均匀的韧窝时,则形成韧窝的夹杂物或第二相粒子只有一种类型;而且显微空穴之间的联结是靠材料内部的塑性变形来实现的。当断口中存在着大小不同的韧窝,尤其是均匀大韧窝周围有小韧窝时,首先是由较大尺寸的夹杂物或第二相粒子作为韧窝的核形成显微空穴,当显微空穴长大到一定尺寸后,较小的夹杂物或第二相粒子将形成显微空穴并随后长大,与先前形成的显微空穴在长大过程中发生联结,产生了大小不一的韧窝形貌。通常,对于同一种材料来说,当断裂条件相同或相近时,韧窝尺寸越大则材料的塑性越好,见图1-1、图1-2。

如果钢中含有较多气体,使得在连铸坯中含有较多的气泡,在热加工时,这些气泡若是没有被轧合而滞留在钢材里,在拉伸或冲击断裂时,这些显微气泡也会发生塑性变形,形成气泡韧窝。

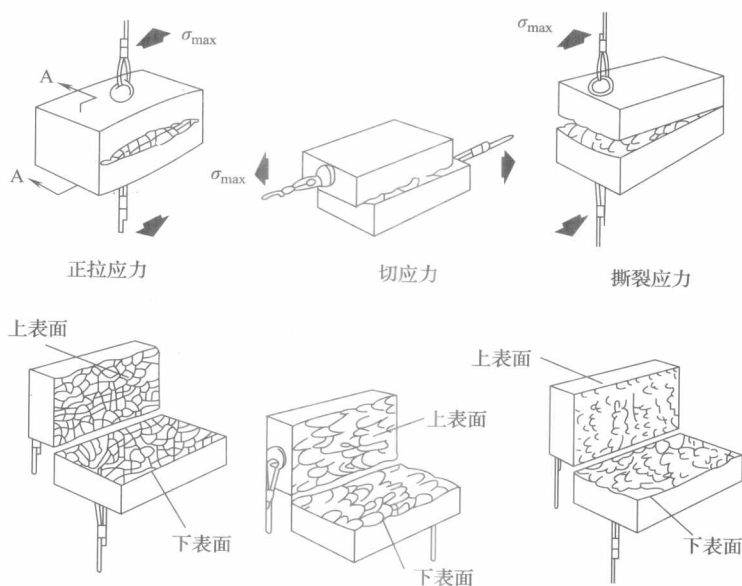


图 1-1 应力状态对韧窝形状影响示意图

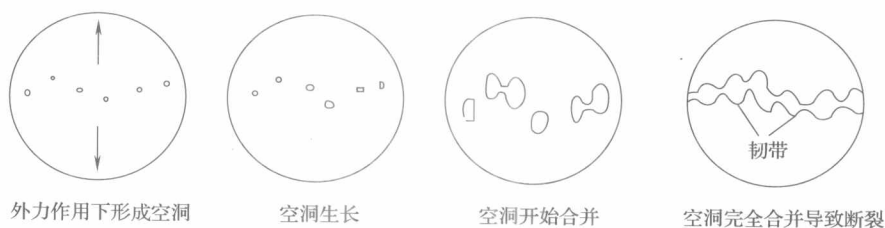


图 1-2 空洞聚集过程示意图

1.1.1 韧窝底部有第二相质点的韧窝

大多数塑性工程结构材料可以看作是由基体、各种不同的夹杂物、第二相粒子和空穴组成的物体。韧窝底部有第二相质点，如碳化物、夹杂物、易切削元素粒子等，或者由于材料本身固有的缺陷，也可能在塑性变形过程中产生缺陷。由于第二相质点与基体的弹塑性的差异（另外，还有第二相质点与基体的结合能力、热胀系数、第二相质点本身的大小、形状等的影响），所以在塑性变形过程中沿第二相质点边界（或穿过第二相质点）容易形成微孔裂纹的核心。在应力作用下，这些微孔裂纹的核心逐渐长大，并随着塑性变形的增加，显微孔坑之间的联接部分逐渐变薄，直至最后断裂。

正交韧窝是在正交应力条件下断裂所产生的韧窝，又称为等轴韧窝。形成等轴韧窝的原因是由于应力垂直于断裂表面，并且应力在整个断口表面上的分布是均匀的，而裂纹扩展速度较缓慢，因此在垂直于应力平面上，显微空穴在各个方向上的长大速率是相等的，故形成圆形等轴韧窝。根据弹塑性断裂理论进行分析，由于塑性较好的中低强度钢裂纹扩展前，出现大范围屈服，裂纹前端区域的应力状态发生变化，裂纹尖端区域的塑性应变集中和较高的应力三维度，为空穴的形核、长大创造了有利条件，从而加速了基体的断裂，韧窝底部有第二相质点的韧窝见图 1-3 ~ 图 1-18。