

金属手册

第八版 第九卷

断口金相与断口图谱

下 册

[美] 美国金属学会 主编

机 械 工 业 出 版 社

86
TG-62
6
5:9(2)

金属手册

第九卷 (第八版)

断口金相与断口图谱

下册

[美] 美国金属学会主编



机械工业出版社



300156

美国金属学会主编的《金属手册》是一部大型综合性技术巨著。《断口金相与断口图谱》是其中的第九卷。

本书由两部分组成。译文分上、下册出版。上册论述有关断口金相的一些重要原理、设备、仪器和操作方法；下册着眼于应用，汇集了1816张断口照片，注明断裂原因，指出断裂源和特征标记以及注意事项。

本书可供从事断口金相、断裂研究、失效分析和金属材料研究人员使用。

METALS HANDBOOK
8th Edition Vol. 9
Fractography and Atlas of Fractographs
AMERICAN SOCIETY FOR METALS
1974

* * *
金 属 手 册
(第 八 版) 第 九 卷
断口金相与断口图谱
(下 册)
美国金属学会主编

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 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $47^{1/2}$ 插页2 · 字数1480千字
1985年1月北京第一版 · 1985年1月北京第一次印刷
印数 0,001—9,400 · 定价14.00 元

统一书号: 15033 · 5518

译者的话

美国金属学会主编的《金属手册》是一部大型综合性技术巨著，已经再版八次，且第九版也已问世。前七版都以单卷本出版。后来，随着金属材料科学技术的迅速发展，手册的内容和篇幅逐年增加，单卷本已不能容纳各专业的研究成果，因此，从第八版起改为多卷本出版。《断口金相与断口图谱》属第八版金属手册中的第九卷。

《断口金相与断口图谱》由两部分组成。译文分上、下册出版。上册共十四章，分别论述了断口金相的重要原理，设备仪器和操作方法，并汇集了实物图 107 张，断口和显微组织照片 454 张。第一章叙述了断口金相的发展史，然后用五章的篇幅介绍断口试样的制备和保存方法，断裂零件和断口照像技术，光学显微镜断口金相的特殊技术，光学显微镜显示的断口金相特征，光学显微镜断口金相的解释等。论述扫描电镜和透射电镜的共有五章，其中前两章介绍扫描电镜和透射电镜及其在断口金相中的应用，其余三章描述应用各种电镜获得的断口照片的比较和解释。该卷的最后三章，一章专门讨论不连续性缺陷导致的断裂，其余二章论述断口金相在失效分析和其它方面的应用。

下册为《断口图谱》部分，是目前汇集照片比较全面的图册，一共六章，选列图片 1816 幅，其中 1578 幅是光学显微镜、透射电镜拍摄的断口照片，其余为实物照片、宏观照片和显微照片，是用来辅助说明断口照片的资料，有很大的实用价值。

断口金相技术是六十年代后期迅速发展起来的一门新学科，对机械零件的失效分析和材料的改进都具有重要意义。

所有图片的提供单位及个人见原文 127 ~ 128 页，译文从略。

参加本书翻译和校对工作的有：邓日红、朱之桀、吴世泽、王世伦、金鹤龄、袁新泉，傅一、周光垓、郝应其、袁文钊、王世斌、李国荣等同志。

本书译稿经柯俊、颜鸣皋、肖纪美、吴吉英、林实、陈昌麟、钟群鹏、田永江、周志强、杜豪年等同志审阅，在此表示感谢。

缩写字和符号

°	埃	K_{IC}	临界平面应变应力强度因子 (平面应变断裂韧性)
A, A	安培	kc	千周
amp	宇航材料规格	kg	公斤
AMS	美国铁道工程协会	kgm/cm ²	公斤·米/厘米 ²
AREA	美国标准协会 (美国国立标准研究院)	ksi	千磅/英寸 ²
ASA (ANSI)	美国材料和测试学会	kv	千伏
ASTM	近似	lb	磅
~	原子百分数	<	小于
at. %	体心立方晶格	≤	不大于, 等于
b. c. c.	布氏硬度	m ^{1/2}	米的平方根
Bhn	摄氏 (温度)	max	最大
C	铜发展协会	σ_{max}	最大应力
CDA	厘米	micro-in	微英寸
cm	分压缩应力	μm	微米
σ_3	化学纯	min	最小, 分钟
CP	温度或角度度数	ml	毫升
°	直径	mm	毫米
diam	放大倍数	mod	改进的
×	金刚石方锥硬度 (维氏硬度)	Mpa	兆帕
dph	电火花加工	mv	毫伏
EDM	电子伏特	>	大于
ev	华氏 (温度)	OFHC	无氧高导率 (铜)
F	面心立方晶格	p-c replica	塑料碳复型
fcc	英尺	P-F	Shepherd 淬透性试验标准
ft	英尺·磅	P ^{II}	氢-离子浓度 (酸度)
ft-lb	克	ppm	百万分之几
g	加仑	R	应力比
gal	密排六方晶格	rpm	转数/分
hcp	小时	SAE	汽车工程师学会
hr	英寸	sec	秒
in	英寸的平方根	SEM	扫描电子显微镜
in ^{1/2}	应力强度因子	τ	剪切应力
K	在循环加载过程中, 应力强度因子变量范围	SLR	单透镜往复式
ΔK	临界平面应力强度因子 (平面应力断裂韧性)	σ_1	分拉应力
K_c	最大应力强度因子	3-D	三向
K_{max}	理论应力集中因子	TEM	透射电子显微镜
K_t		vol %	容积百分比
		wt %	重量百分比

目 录[⊖]

断 口 图 谱

前言	1	扫描电镜断口照片	65~303
目的	1	纯铁; 含有特殊添加元素的铁; 低碳铁;	
编写说明	1	阿姆考铁	66~81
内容分布	1	0.04~0.08% C 钢	82~84
低倍光学显微镜断口照片	3~20	1015, 1020, 1021, 1022, 1025 和	
碳钢拖轮驱动轴	4~5	ASTMA36 钢	84~93
碳钢底盘架梁; 1075 钢轨	6~7	1042, 1050, 1060, 1080 和 1090 钢	94~108
低碳钢和低合金钢多键轴	8	1095 和 1115 钢	108~109
4340 钢活塞杆和直升机螺栓	9	4070 钢	110
装甲钢板 (0.30% C, 3.65% Ni,		4130 钢	111~115
1.45% Cr)	10	4140 钢	116~117
A4N 和 W1 工具钢	10~11	4340 钢	118~127
W2、L6 和 S1 工具钢	12~13	HY-180 钢	127
T1 和 M3, 1 类工具钢	14~15	高强度钢	128~129
410、431、440 C、303 (Se)、302 B 和		300 M 钢	130~133
309 型不锈钢	16~17	5155 钢	134~135
302 型不锈钢	18	50100 和 52100 钢	136~137
355 铸造铝合金涡轮增压器叶轮	19~20	7140 氮化钢	138~139
2024-T4 铝合金	20	8740 钢	140~145
黄铜铸锭	20	Fe-3.9Ni 和 Fe-0.3Ni 合金	146~147
高倍光学显微镜断口照片	21~63	0.20 C-1.0Mn-3.05Ni-1.65Cr-0.5Mo 和	
阿姆考铁	22~27	3.5Ni-1.5Cr-0.5Mo-0.1 V 钢	148~149
船板钢	28~29	Fe-12Ni-0.5Ti 合金	150~153
碳钢焊缝	30~31	18% Ni, 300 级马氏体时效钢	154~161
不锈钢:	32~39	H11 工具钢	162~169
405 和 430 型	32~35	Fe6.4Cr-3.2Ta 合金	170~171
0.096% C, 22.14% Cr 铁素体	35	Fe6.2Ta 合金	171
446 型	36~39	0.18C-3.85Mo 和 0.41C-4.2Mo 钢	172~173
铁铬合金	39~40	0.3 C-0.6Mn-5.0Mo 钢	174~175
铁硅合金	41~45	0.4 C-0.6 Mn-5.0 Mo 和 0.42 C-2.1 Mo-	
7076-T6 铝合金	46~47	5.2Co 钢	176~177
铈	48~49	0.43 C-3.85Mo-9.0Co 钢	178~179
铋	50~51	13-8PH 不锈钢	180~185
铈铋合金	52~53	17-7PH 不锈钢	186~189
铈铋合金	53	301 型不锈钢	189
真空电弧铸造钼	54~57	304 型不锈钢; 0.20 C-2.0Mn-1.0Si-	
真空电弧铸造钨	58~60	13.5Cr-8.8Ni-3.0Mo 不锈钢	190~191
烧结的钨粉末压坯	61		
锌	62~63		

⊖ 目录所列标题为正文的内容简目, 查找更为方便,
原书如此——译者。

15.8Cr-12.5Ni 和 316 L 型不锈钢	192	阿姆考铁	338~341
A 286 合金和 Hastelloy X	193	熟铁	342~343
Refractaloy 26 合金	194~195	4130 钢	344~345
718 合金	196~201	4140 钢	345
U-700 合金	202~203	AMS6434 钢	346~349
Waspaloy 合金	204	4315 钢	350
MAR-M200 合金	204~207	4340 钢	351~371
IN-100 合金	207~209	8740 钢	372~375
713 C 合金	210~211	D-6ac 钢	376
杜拉镍合金	212~213	300 M	376~377
201 镍	214~215	1080 钢	377
铸造铝合金	216~229	G-渗氮钢	378
333 铸造铝合金	216~217	9310 钢	378~379
356-T6 铸造铝合金	218~229	球墨铸铁	380
变形铝合金	230~265	18% 镍马氏体时效钢	380~383
1100, 2014-T6, 2024-T4 和-T3		501 型不锈钢	384~386
变形铝合金	230~240	H11 工具钢	386~391
7075-T6, -T651 和 7475-T6 变形		410 型不锈钢	392~393
铝合金	240~265	431 型不锈钢	394~395
67Al-33Cu 共晶合金	266~269	633 型 (AM-350) 不锈钢	396~397
碳纤维铝基和钛基 (BORSIC) 复合材		13-8PH 不锈钢	396~401
料	270~271	17-4PH 不锈钢	400~402
石墨纤维镁基复合材料	272~273	301 型不锈钢	403
99.999% 铜	274~277	302 型不锈钢	403~407
OFHC 铜; 高速切削铜 (含 Te)	278~279	713LC 合金	408~409
Cu-2.5Be 合金; 64Cu-27Ni-9Fe 合金	280~281	713 C 合金	409~411
钛丝材和薄板	282	IN-100 镍基合金	412~413
铅-锡钎料	283~286	718 合金	413~419
HM21 A (97Mg-2Th-1Mn) 合金	286	Waspaloy 合金	418~425
TZM 合金 (Mo-0.5Ti-0.08Zr)	286~287	René 41 镍基合金	426
Ti-5Al-2.5Sn 钛合金	288	L-605 钴基合金	426~431
Ti-6Al-4V 钛合金	288~300	U-700 镍基合金	432~435
钨纤维银基复合材料	300~301	铝镍钴合金	436~437
Zircaloy-2; Zircaloy-4	302~303	铸造铝合金	438~443
		319 (砂型铸造)	438~439
		380 (压铸)	440~443
		变形铝合金	444~467
		2018	444
		2024-T3, -T851	444~447
		7075-T6	448~463
		7079-T6, -T651	464~467
		铍铜 (2% Be) 合金	468~471
		AZ81 A-T4 镁合金	472~473
		TZM 钼合金	474
		含 90% Ta-10% W 合金	475
		非合金化钛	476~477
		钛合金	478~489

扫描电镜和透射电镜立体断口照片

的比较

普通碳钢: 冲击断裂

0.65% C, 1.05% Mn 钢: 冲击断裂

612(T2) 高速工具钢: 冲击断裂

4340 钢: 拉伸过载断裂; 高循环疲劳

断裂

7075-T6 铝合金: 拉伸过载断裂; 低循环

疲劳断口: 应力腐蚀断裂

Ti-8Al-1Mo-1V 钛合金: 拉伸过载断裂; 高循

环疲劳断口: 应力腐蚀断裂

透射电镜复型断口照片

Ti-5Al-2.5Sn	478	50 B 20、5046钢	606~607
Ti-5Al-3Sn-2Mo-2 V	478~479	50 B 60、5132钢	608~609
Ti-6Al-4V	480~486	5135H 钢	610~611
Ti-7Al-2Cb-1Ta	486~487	5145 钢	612
Ti-8Mn	488~489	5160 钢	612~615
Ti-13 V-11Cr-4Al	489	6150 钢	616~617
钨	490~493	8617 钢	618
失效分析的断口照片	495~681	8620 钢	618~626
阿姆考铁; 熟铁	496~497	8640 钢	626~628
镀锌钢	498	8645 钢	630~631
低碳钢	498~501	8650 钢	629
1020 钢; 含碳 0.20% 铸钢	502~504	球墨铸铁	632~634
1030 钢	505	灰口铸铁	634~635
ASTM A 515, 70 级钢	506~511	硅-铬-1 钢	636
1033 钢	512~513	410 型不锈钢	636~639
1035 钢	514~515	铸造奥氏体钢	640
1038 钢	516、524~525	13-8PH 不锈钢	640
1039 钢	522	15-5PH 不锈钢	640~641
1040 钢	517~518	302、304、330 型不锈钢	642~643
1041, 1041H, 10 B 41(1541、1541H、15 B 41) 钢	518~523、526~529	218 铸造铝合金	644~646
T-2 镍钢	527	变形铝合金	647~665
中碳钢	529~531	2014-T 6	647~653
11 L 40 钢、1144 钢	532~533	2020-T 651、2024; 2024-T 3、2024- T 851	654~655
1045 钢	534~545	2025-T 6	654~659
1046 钢	543~547	6061-T 6、7075-T 6	660
1050 钢	548~549	7079-T 6	660~664
1053 钢	550~551	7079-T 651、7106-T 63、7178-T 6	664~665
1055 钢	552~553	铌, B-66 铌合金	666
1060 钢	553、555~557	99.999% 铜(涂铅的)、韧铜、低硅青铜	666~667
10 B 62(15 B 62) 钢	554~555	C-磷青铜	667~669
1070 钢	556~560	80Cu-20Zn 黄铜 + 0.5% Sn	669
高碳钢	558	91-7-2 铝硅青铜	670
1095 钢	561	85-5-5-5 铅红铜	671
4118 钢	562、563	60Cu-37.8Zn 锰青铜	672
4130 钢	564、565	48Cu-35Ni-11Sn-6Pb 合金	672~673
4140 钢	566~573	钛合金	672~680
4150 钢	569	Ti-2Al-2Zr-2V-1Mo、Ti-2.5Al- 16 V	672~673
0.26C-0.70Mn-0.8Ni-1.00Cr 钢	574	Ti-3Al	676~677
D 6 B 钢	575	Ti-6Al-4 V	674~678
AMS 6434 (4335 改型) 钢	590	Ti-7Al-2Cb-1Ta、Ti-7Al-1Mo-1V	678~679
4340 钢	576~585、588~599	Ti-7Al-3V、Ti-8Al-1Mo-1V	680
高强度低合金钢	586~587、607	钨	680~681
300 M 钢	600	索引及附录	682~748
4350 钢	601~603		
4817、4820 H 钢	604~605		

前 言

John A. Fellows

编写第八版《金属手册》第七卷的早期计划中包括三个部分，即显微组织照片集、金相处理和合金相图、以及断口图谱。然而，随着工作的进展材料越集越多，以致这一卷的篇幅过于庞大，最后只得将每一部分印刷成单独的一卷。原准备用作第七卷资料的扩充部分由书稿中抽出，以便排入包括各编委会编写的断口图谱中，目的是：(a)描述和图解断口技术；(b)鉴定和说明高倍显现的（特别是使用电镜）断口形貌；(c)列举断口金相对失效分析和断裂力学的基础研究的作用。

目 的

编写本图谱的目的是向读者提供全套断口照片，以便了解工业合金断裂的原因、表面形貌及机理。因此，采用了与显微组织照片集（第七卷）极为相似的编写法，同时在选择此三卷的显微照片和断口照片的编号系统方面，第九卷与第七、八卷编号是连贯的，第七卷编号是1至2821，第八卷编号是2822至3417，第九卷编号是3418至5233。选择这种前后连贯的编排既便于参考，也避免相互混淆；每一张照片号码不重复，仅出现一次。但断口图谱前面文章的插图不采用这种连贯序号，采用每篇文章单独编图号。

编 写 说 明

照片集共分六章。前两章实质上是历史回顾，包括Carl A. Zapffe用光学显微镜进行断口金相研究的原始工作实例。第三章主要介绍扫描电镜断口照片，而第五章提供了用透射电镜复型拍摄的相应断口照片。第四章为采用同一视场的立体照片，是把扫描电镜和透射电镜技术进行对比。当对这些立体照片进行三维观察时，有可能对这两种方法揭示的类似表面轮廓进行逐点对照。最后的第六章收集了三种方法（光学显微镜、扫描电镜和透射电镜）

拍摄大量在使用中失效的断口照片。其中绝大多数是作为分析失效原因用的。

每章内的断口照片，均按合金类别和第七卷采用的类似顺序排列，换句话说，也就是按照第八版第一卷“金属的性能和选择”一章的格式编写的。一般来说，这种排列顺序是：(a)纯铁；(b)碳钢；(c)低合金钢；(d)铸铁；(e)工具钢；(f)不锈钢和耐热合金；(g)高熔点合金；(h)有色合金。这样做的意图是便于将手册第一卷与图谱结合使用，把金属的性能和用途与断裂行为和特征联系起来。

在每章的第一页中列出本章所涉及到的合金以及断口照片出现的页码。在每页的顶部有黑体字的标题，标明此页断口照片阐述的合金及（如版面允许）此页合金的断裂机理。每一幅断口照片或每一组相关的断口照片，均具有标明合金类别或试样化学成分标题，以及有关的制造、热处理经历和性能，示出断口特征简介，断裂机理和可能的原因。一般来说，性能和温度值均引用公制单位，并在括号内列入英制换算单位。

断口照片尽可能显示断口表面的外貌，首先是低倍，然后再用光学显微镜、扫描电镜或透射电镜显示高倍细节。有的断口，还列入部件的实物照片、重要截面的低倍照片和金属组织的光学显微照片，以便更易于了解这种断裂情况。每幅显微照片所用的浸蚀剂注在照片的下面（浸蚀剂选用通用的名称，参见《金属手册》第八版第七卷原文第341~342页ASTM号码及成分；浸蚀剂的制备、处理和使用资料参见第八卷“金相技术”一节）

内 容 分 布

按合金类型划分的每类图片总数列入表1，表2则统计了在本照片集内各种断裂原因的总数，包括破断零件和破断试样两方面的断裂。疲劳断裂最为普遍，约占总数的三分之一。

表1 断口图谱内按合金类别、照片类型统计

合金类别	照片类型						
	实物照片	低倍照片	显微照片	光学断口照片	扫描电镜	透射电镜	照片总计
铁	2	—	6	16	29	12	65
低碳钢	5	5	10	16	25	7	68
中碳钢	16	9	4	60	12	—	101
高碳钢	9	—	2	23	19	1	54
低碳合金钢	3	1	—	3	13	6	26
中碳合金钢	25	2	17	121	92	82	339
高碳合金钢	2	—	3	7	11	2	25
表面硬化钢	9	—	—	12	1	3	25
工具钢	—	—	—	30	20	10	60
沉淀硬化和马氏体不锈钢	3	—	6	49	40	49	147
奥氏体不锈钢	1	—	2	13	14	15	45
镍基合金	1	1	1	28	50	68	149
钴基合金	—	—	—	3	—	15	18
其它铁基合金 ¹	3	—	7	35	6	7	58
铝合金	33	5	21	64	127	93	343
复合材料	—	—	—	—	13	—	13
铜合金	4	—	6	10	24	15	59
钛合金	3	1	3	22	40	61	130
其它有色合金 ²	2	—	5	38	36	10	91
总计	121	24	93	550	572	456	1816

① 其它铁基合金包括：铁素体铁-铬合金，铁素体铁-硅合金，铸铁及磁性合金。
② 其它有色合金包括：锑合金，铋合金，铌合金，铈，铅焊料，镁合金，钼合金，钽合金，锌合金和锆合金。

表2 图谱内按合金类别统计断裂的原因

合金类别	断裂源		图谱内断裂的原因						
	部件	试样	疲劳	冲击	拉伸过载	其它 ^①	弯曲	应力腐蚀开裂	总计
铁	2	41	2	28	5	2	6	—	43
低碳钢	12	26	9	16	12	1	—	—	38
中碳钢	50	7	36	8	8	2	3	—	57
高碳钢	22	11	21	10	—	1	—	1	33
低碳合金钢	2	12	3	5	3	1	2	—	14
中碳合金钢	66	90	47	19	43	22	15	10	156
高碳合金钢	10	10	11	9	—	—	—	—	20
表面硬化钢	23	—	19	2	—	1	1	—	23
工具钢	5	30	16	6	8	3	—	2	35
沉淀硬化和马氏体不锈钢	6	51	12	15	13	7	6	4	57
奥氏体不锈钢	7	15	10	—	4	5	3	—	22
镍基合金	2	47	19	2	11	13	4	—	49
钴基合金	—	3	1	—	2	—	—	—	3
其它铁基合金 ^②	11	25	7	23	4	1	1	—	36
铝合金	39	64	39	9	21	14	5	15	103
复合材料	—	8	—	—	7	1	—	—	8
铜合金	14	19	7	—	8	7	5	6	33
钛合金	1	51	13	4	13	4	11	7	52
其它有色金属 ^③	1	61	4	37	15	2	4	—	62
总计	273	571	276	193	177	87	66	45	844

① 其它断裂原因包括：腐蚀疲劳，剪切过载，持久，持续载荷，热冲击和氢脆。
② 其它铁基合金包括：铁素体铁-铬合金，铁素体铁-硅合金，铸铁和磁性合金。
③ 其它有色金属包括：锑合金，铋合金，铌合金，铈，铅焊料，镁合金，钼合金，钽合金，锌合金和锆合金。

低倍光学显微镜断口照片

摘自 Carl A. Zapffe 的典型实例

本卷第一篇文章概述了1939~1955年Carl A. Zapffe对于发展现代断口金相所起的先导作用。他的最大贡献不仅是证实了高倍断口特征照相的可能性，而且他的许多著作涉及到服役断口和质量控制断口的解释；当时观察和拍照所用放大倍数一般小于10倍直径。因此断口图谱的第一章就适当地选用了他所汇集的照片。在追溯裂纹起因和开始位置、裂纹扩展方向以及能够推论出来的断裂机理方面，他认为这些照片所说明的断口特征是重要的。

本章选用的断口实例基本上分为三类：

- 1. 服役断口和（或）热加工断口；
- 2. “刻痕-击断”断口，主要用来评定工具钢棒材和板坯内部结构的质量；
- 3. 试验断口，部分为拉伸，部分为疲劳，用来说明试验条件或前段过程对于断口表面形状的影响。

加载类型包括拉伸过载、横向冲击、缺口弯曲、扭转、疲劳的重复应力状态，以及铸锭或板坯轧制中所包含的复杂应力。

服役断裂原因包括应力腐蚀开裂、氢致损伤、表面应力集中引起的疲劳，以及冲击。显示的断口特征包括解理，疲劳海滩标记，沿晶分离，拉伸断口中的纤维状、放射状和剪切唇标记，多次应力脉冲下的冲击断口中的裂纹休止标记，灾难性破坏中的人字形标记，以及氢致损伤引起的鱼眼和疏松。

以上列举的一系列断口照片，是按合金材料排列的；因此，贯串本章中的断裂机理类型就显得散乱一些。如果把一定类型的全部断口归为一组，当然有些优点，但某一特定合金的断口的各种实例又

会分散。这里所以采用按合金的排列法是为照顾广大手册使用者的习惯。

这里和图谱第二章的断口照片，是由Zapffe当时未完成的两部纪念手稿中选出的，其一是论断口金相，另一部是有关氢脆的工作。这些著作的某些方面是值得在这里加以简介的。

Zapffe对金属断口的研究证实了过去的直观假设，即是说，断口特征对所讨论金属的性能、加载类型或环境的影响很敏感。例如，Zapffe很早就描述过，像阿姆考铁那样的韧性金属，在液氮温度受到冲击，就会变得非常脆，而呈解理断裂，基本上测不出塑性变形。由此可见，特殊的断口标记并不是某一合金本身所固有的，而是代表温度、加载类型和化学环境类型的综合作用的一种特定断裂机理。换句话说，如果能保证对加载速率和类型、温度和环境进行所需的调整，则对性能差异极大的合金来说，基本上也能使它们的断裂变得非常相似。

这就使Zapffe发现，描述金属特性的断口特征和对断裂机理的解释，同样适用于非金属。在研究金刚砂轮断裂时就发现了一个实例。发现砂轮断裂的情况，也就是脆性金属断裂的典型情况，就裂纹源的位置和裂纹扩展途径来说，可以作出同样的结论。这种情况在玻璃的断裂中也证明是正确的，此时断裂过程能以与金属某些相似情况完全一样的方式进行解释。

谈到非金属断裂和金属断裂间的相似性，不过是为了指出其断裂特征的共性。虽然对非金属断口颇有兴趣，但不宜列在一本金属手册中，故将其略去。

光学宏观和显微断口照片： 碳钢 拖轮驱动轴，
因海水腐蚀疲劳断裂



3418 200 吨 碳钢拖轮驱动轴的断口。这根轴是因为海水进入船尾管和轴之间代替了润滑油产生的腐蚀疲劳而损坏。海滩标记指明断裂源在左边(箭头处)。参见3419 和3422。

光学断口照片

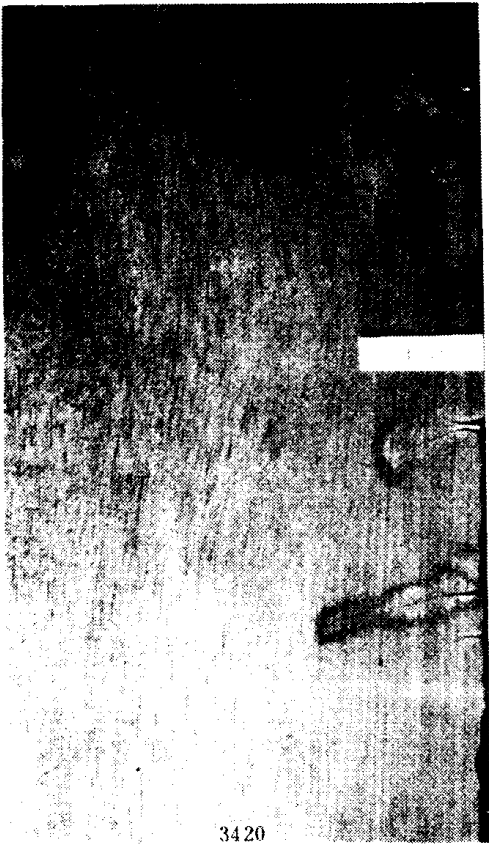
0.8 ×



3419 3418断裂驱动轴的侧视图。注意断口边缘处的锯齿型侧面（为了清晰起见曾进行过描绘）和轴表面上的斜裂纹。裂纹是由于轴经反复扭转（可能还有些弯曲）和海水浸蚀的综合作用的腐蚀疲劳而产生的。

光学断口照片

0.8 ×



宏观照片（硝酸酒精溶液） 0.6 ×



光学断口照片 0.6 ×

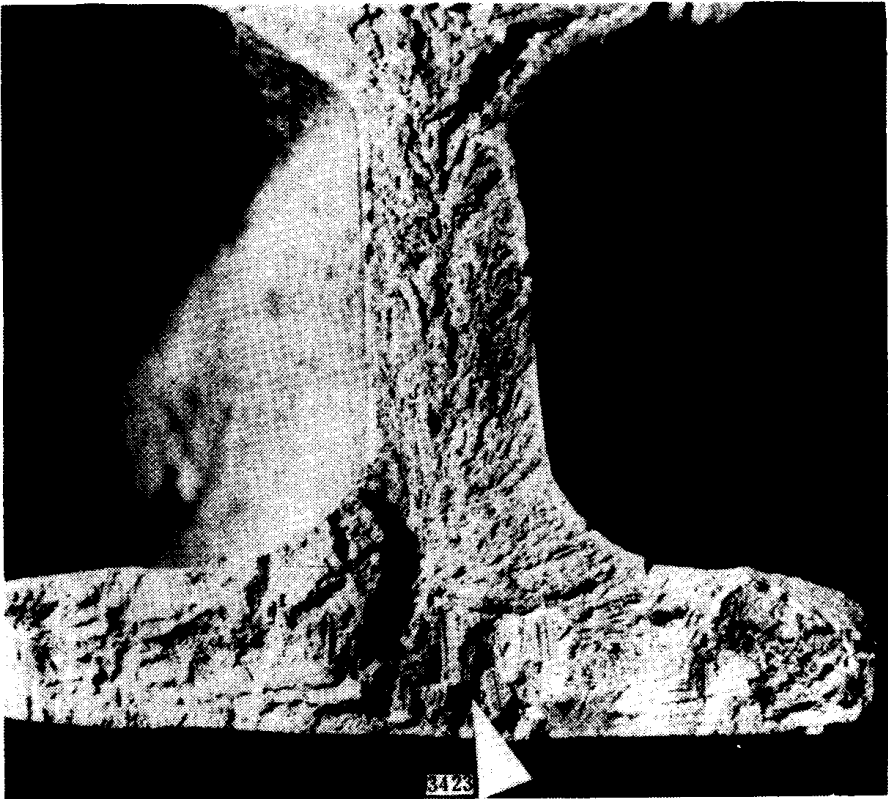


显微照片（苦味酸酒精溶液浸蚀） 67 ×

3420, 3421 宏观照片3420（左）显示出3418断裂轴的一个宏观浸蚀剖面。断口照片3421（右）是3420转90°的照片，显示出含有斜裂纹的轴表面（3420显示出这些裂纹的深度）。注意3421中海水不仅引起了腐蚀疲劳开裂，同时还引起了一般表面腐蚀。

3422 3418所示断裂轴的一个剖面，显示出一条腐蚀疲劳裂纹的底部。注意腐蚀使主裂纹尖端变钝，而没有把后来形成的二次裂纹（左边的尖端变钝）。

光学断口照片：铸造的碳钢底盘架梁的冲击断裂；1075钢轨因氢白点引起疲劳裂纹

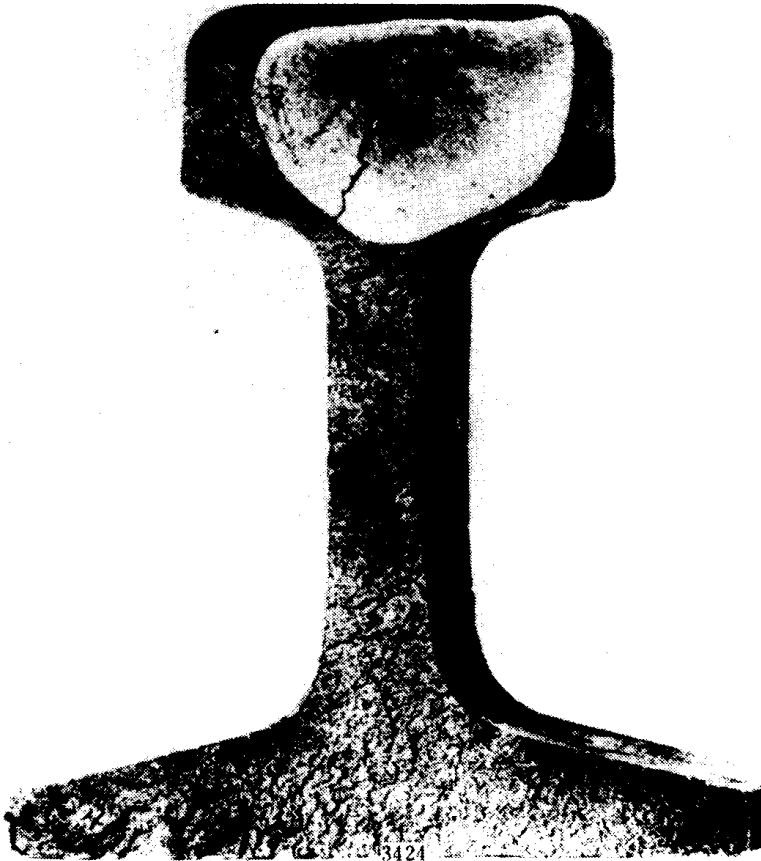


3423 铸造的碳钢拖拉机底盘架梁受冲击时产生的横向断裂表面。底部箭头标出了内部收缩疏松处明显的薄弱区。这种疏松区，可以从箭头上方左右的小尺寸的枝晶识别出来。

光学断口照片

2.2 ×

3424 1075钢制AREA110磅钢轨的横向断裂表面。断裂核（接近于钢轨头部顶面的小暗黑区）为氢致白点（或鱼眼），它引起了一条疲劳裂纹（围绕着核的大光亮区）。

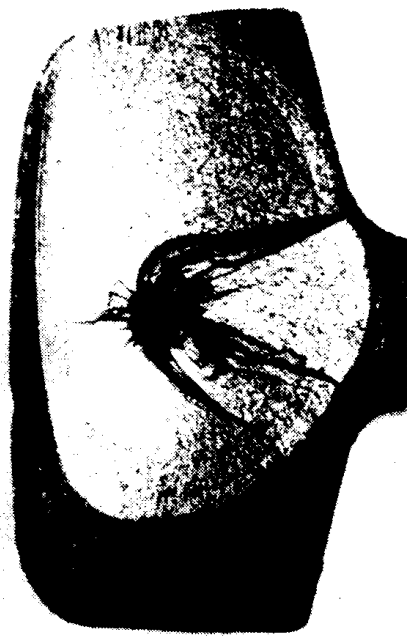


光学断口照片

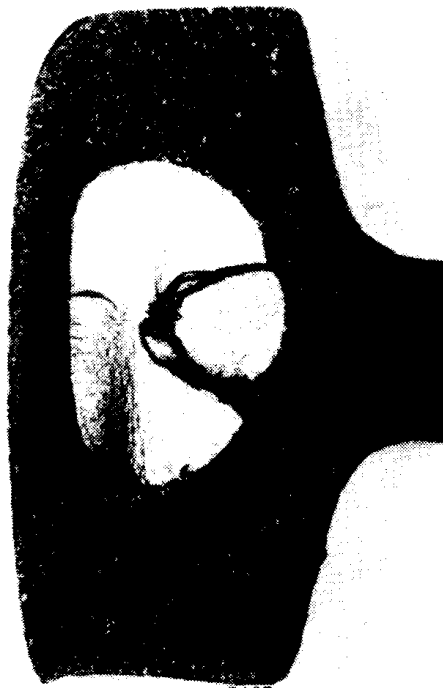
5 8



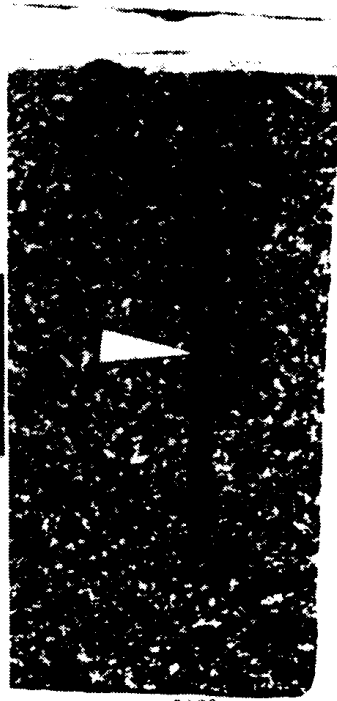
3425



3426



3427



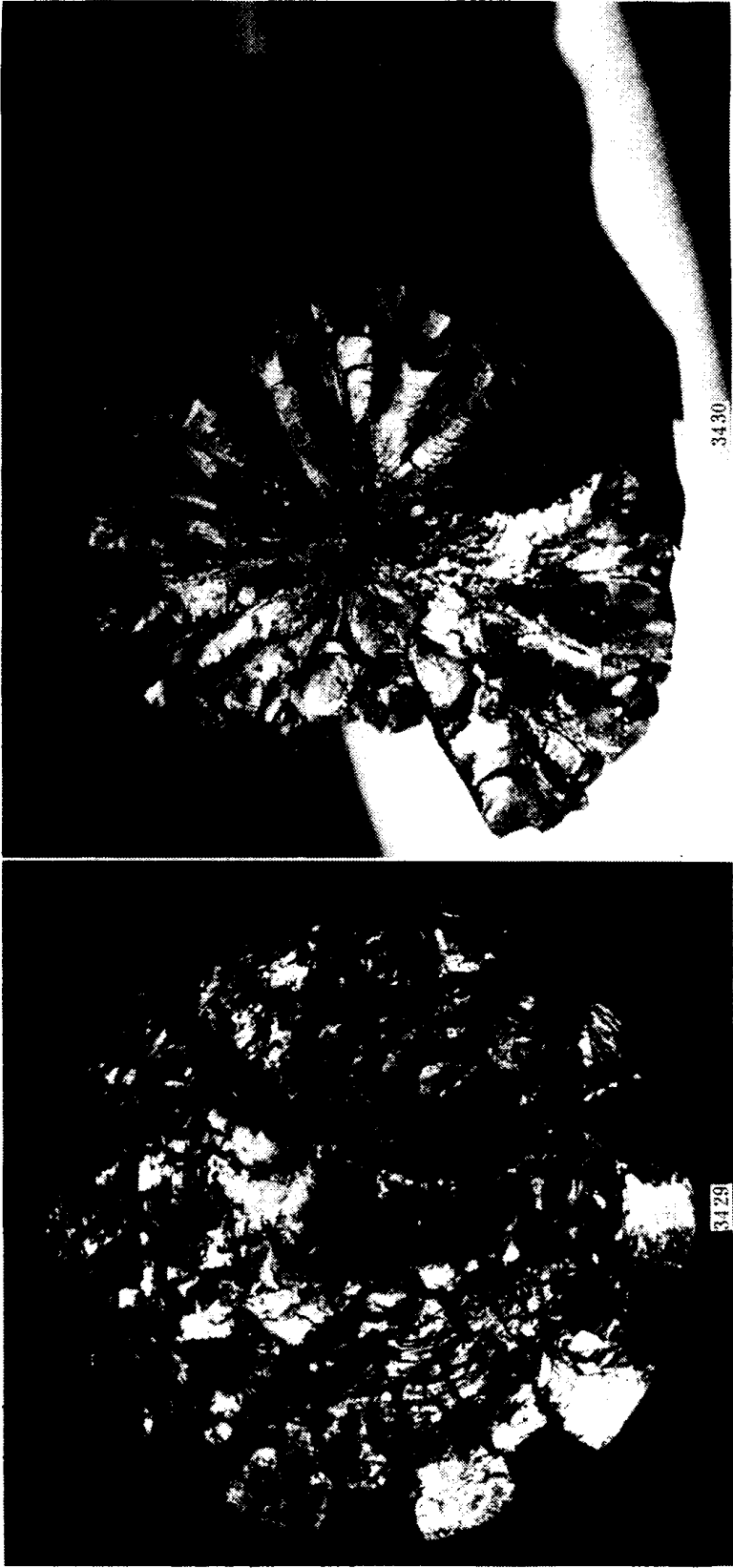
3428

光学断口照片

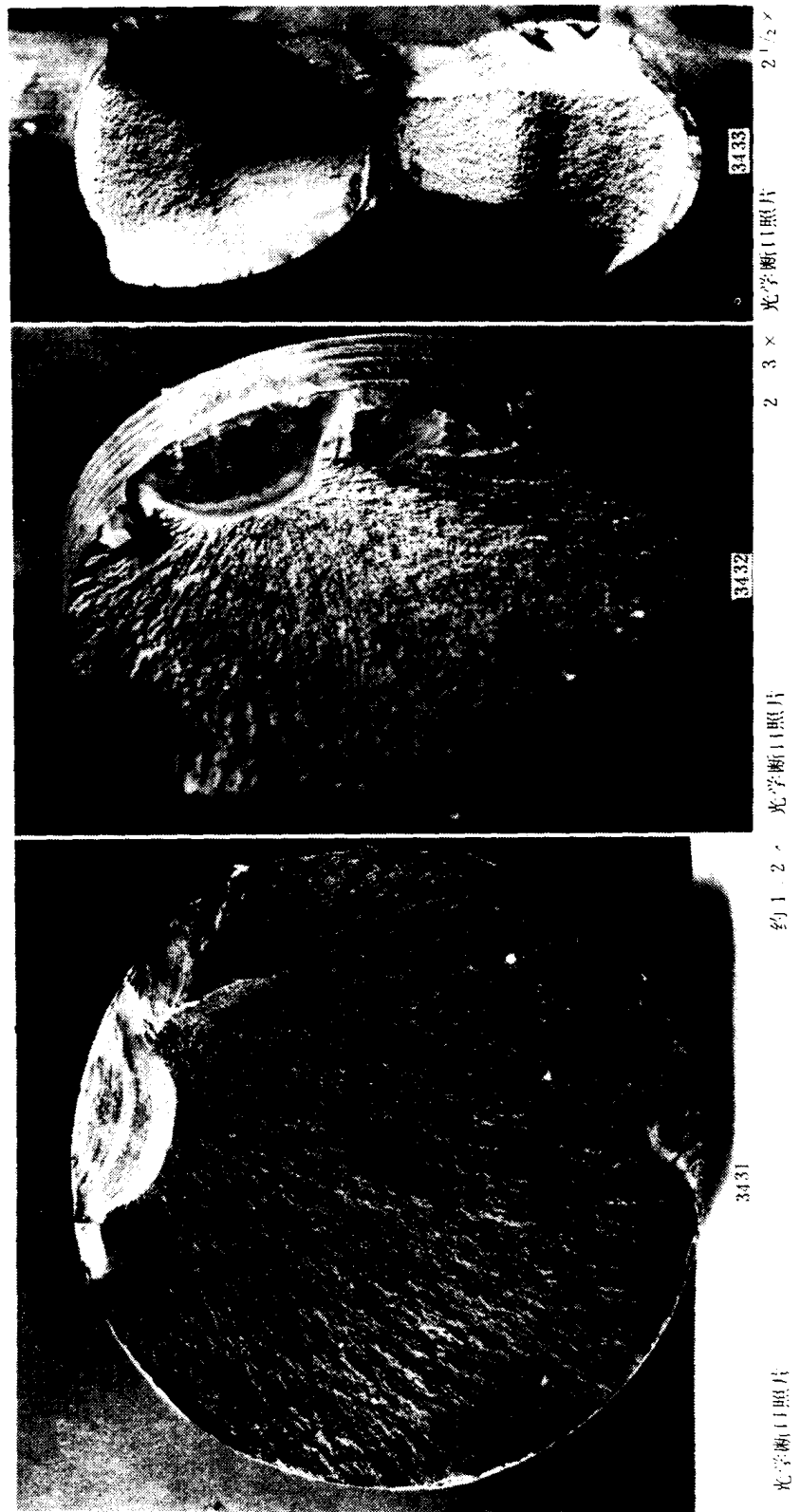
实际尺寸

3425, 3426, 3427, 3428 断口照片3425(上左),3426(上右)和3427(下左)示出1075钢制 ARE A131 磅钢轨头部产生的“横向裂缝”的表面。全部三组裂缝都是由于存在氢致白点(或“鱼眼”)引起的,它们在光亮区域中以暗灰色区出现。这些光亮区就是白点引起的疲劳裂纹。在疲劳区,特别是接近最终快速断裂开始的地方,可以看到海滩标记。断口照片3428(下右)显示出经过氢致脆化的1075钢制 ARE A131 磅钢轨的纵向断裂表面。白色箭头指向一处罕见的大的非金属链状物,作为氢偏析的地方。

光学断口照片：低碳钢和低合金钢多键轴（扭转疲劳断裂）；4340钢活塞杆（疲劳断裂）；4340钢直升机螺栓（缺口-弯曲断裂）



3429、3430 两种钢制多键轴的多源断口。3429（左）是一根2 1/2英寸直径的低碳钢轴，经过扭转疲劳试验的断口。3430（右）是1 1/4英寸直径的低合金钢汽车轴，在使用中因扭转疲劳而损坏的断口。在两种断口中，疲劳裂纹都起源于花键底部槽尖角缺口处，扩展形式既沿周边（在扩展过程中彼此连接）又向中心放射扩展。在两个断口中，断裂部分都被复杂的断裂途径充分地连锁在一起，由于摩擦作用几乎把疲劳裂纹的细节能全部抹掉。



3431. 3432 直径为5/4英寸螺旋洁果杆被疲劳断裂表面的两幅照片。材料为4340钢，热处理硬度HB341。在3431的正视图中(左)，顶部初次疲劳裂纹区清晰地显示出角部标记。在标记两边和底部都有可见的二次疲劳裂纹。在3432斜视图中(右)，显示出疲劳裂纹起源于螺旋根部，同时相邻的螺旋纹右边的两圈螺旋纹是初次裂纹源。虽然这些缩小的视图不能仔细看清，但由于螺旋根部过于尖锐而引起的局部应力集中似乎很明显。在疲劳区的界外，损坏是由于放射红纤维状快速断裂造成的。

3433 缺口弯曲破坏的4340钢白口机螺栓的匹配断裂表面。观察到纤维状撕裂裂纹移边的精细标记。注意那些很大的剪切唇。