

# 金属手册

第八版 第九卷

断口金相与断口图谱

上册

[美] 美国金属学会 主编

机械工业出版社



# 金属手册

第九卷 (第八版)

## 断口金相与断口图谱

上册

〔美〕美国金属学会主编



机械工业出版社

美国金属学会主编的《金属手册》是一部大型综合性技术专著。《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  
(上册)  
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 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 16<sup>1</sup>/<sub>4</sub>·插页 2·字数 495 千字

1983年12月北京第一版·1983年12月北京第一次印刷

印数 0,001—9,500·定价 4.10 元

\*

统一书号：15033·5407

## 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专著，已经再版八次，且第九版也已问世。前七版都以单卷本出版。近年来，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、朱之琴、吴世泽、王世伦、金鹤龄、袁新泉、傅一、周光核、郝应其、袁文钊、王士斌、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

Å, A	埃	$K_{Ic}$	临界平面应变应力强度因子(平面应变断裂韧性)
amp	安培	kc	千周
AMS	宇航材料规格	kg	公斤
AREA	美国铁道工程协会	$\text{kgm/cm}^2$	公斤·米/厘米 <sup>2</sup>
ASA(ANSI)	美国标准协会(美国国立标准研究院)	ksi	千磅/英寸 <sup>2</sup>
ASTM	美国材料和测试学会	kV	千伏
~	近似	lb	磅
at%	原子百分数	<	小于
b.c.c	体心立方晶格	≤	不大于等于
Bhn	布氏硬度	$\text{m}^{\frac{1}{2}}$	米的平方根
C	摄氏(温度)	max	最大
CDA	铜发展协会	$\sigma_{\max}$	最大应力
cm	厘米	micro-in	微英寸
$\sigma_3$	分压缩应力	$\mu\text{m}$	微米
CP	化学纯	min	最小, 分钟
°	温度或角度度数	ml	毫升
diam	直径	mm	毫米
×	放大倍数	mod	改进的
dph	金刚石方锥硬度(维氏硬度)	MPa	兆帕(压力单位)
EDM	电火花加工	mV	毫伏
ev	电子伏特	>	大于
F	华氏(温度)	OFHC	无氧高导率(铜)
fcc	面心立方晶格	p-c replica	塑料碳复型
ft	英尺	P-F	高碳工具钢淬透性试验标准
ft-lb	英尺·磅	pH	氢-离子浓度(酸度)
g	克	ppm	百万分之一
gal	加仑	R	应力比
hcp	密排六方晶格	rpm	转数/分
hr	小时	SAE	汽车工程师学会
in	英寸	sec	秒
$\text{in}^{\frac{1}{2}}$	英寸的平方根	SEM	扫描电子显微镜
K	应力强度因子	$\tau$	剪切应力
$\Delta K$	在循环加载过程中, 应力强度因子变量范围	SLR	单透镜反射相机
$K_c$	临界平面应力强度因子(平面应力断裂韧性)	$\sigma_1$	分拉应力
$K_{\max}$	最大应力强度因子	3-D	三向
$K_t$	理论应力集中因数	TEM	透射电子显微镜
		vol%	体积百分比
		wt%	重量百分比

# 相 金 口 断

# 目 录

断 口 金 相	
<b>引言和历史背景</b> .....	1
关于断裂的史前经验 .....	1
十六至十八世纪的断口金相 .....	1
十九世纪的断口金相 .....	5
1900~1939年的断口金相 .....	9
微观断口金相的再发现 .....	9
显微断口金相技术 .....	10
显微断口金相的应用 .....	10
断口照片与显微组织的关系 .....	11
<b>断口试样的制备与保存方法</b> .....	14
金属断口的保护 .....	14
机械损伤 .....	14
化学损伤(腐蚀) .....	14
涂层 .....	14
金属断口的清理 .....	14
断口的切取 .....	15
二次裂纹的打开 .....	15
无损检验的影响 .....	16
<b>断裂零件和断口的照相术</b> .....	17
肉眼检查 .....	17
断裂件拍摄的安排 .....	17
相机 .....	18
取景相机 .....	18
折叠式相机 .....	19
35毫米单透镜反射(SLR)相机 .....	19
使用胶卷的单透镜和双透镜反射相机 .....	19
显微镜装置 .....	19
透镜 .....	19
聚焦 .....	20
灯光 .....	21
照明技术 .....	21
腐蚀切面的照明 .....	25
高反射性物件的照明 .....	28
显示深腐蚀试样的晶粒流线的照明 .....	28
紫外线照明的照相术 .....	28
胶片 .....	29
曝光 .....	30
曝光计 .....	30
曝光计算尺和运算 .....	31
试曝 .....	34
胶片显影和印相 .....	35
印相规范 .....	35
快速印相法 .....	36
立体照片 .....	36
辅助设备 .....	38
<b>光学显微镜断口金相的特殊技术</b> .....	40
复型 .....	40
切片和断口剖面的研究 .....	40
投影 .....	43
断口表面分析 .....	43
断口表面的腐蚀坑 .....	43
大景深显微镜 .....	43
<b>光学显微镜显示的断口金相特征</b> .....	44
光滑试样的拉伸断口特征 .....	44
圆柱形试样 .....	44
纤维区 .....	44
放射区 .....	45
剪切唇区 .....	46
矩形截面试样 .....	46
人字形花样 .....	46
木纹状断口 .....	48
疲劳特征 .....	49
海滩标记 .....	49
条带 .....	50
棘轮标记 .....	50
晶粒和解理小面 .....	52
二次裂纹 .....	52
不连续性缺陷 .....	52
折叠、接缝和坑点 .....	52
缩孔和气孔 .....	53
热裂纹 .....	53
焊接缺陷 .....	53
夹杂物 .....	54
偏析 .....	54

韧窝.....	55	图象质量.....	87
应力腐蚀裂纹.....	55	强度与反差.....	87
<b>光学显微镜断口照片的解释</b> .....	58	断口复型.....	88
应力状态.....	58	复型前断口的清洗.....	88
裂纹源.....	61	一级复型.....	88
断口全貌.....	61	一级塑料薄复型.....	89
断口上裂纹源的线索.....	61	一级塑料厚复型.....	89
冲击过载断口中源点的定位.....	65	一级直接碳复型.....	90
疲劳断口中的源点定位.....	66	氧化膜负复型.....	91
环境引起的断裂源点的定位.....	67	二级复型.....	91
绘制出断口形貌图来识别断裂源.....	67	复型的投影.....	92
断裂的发展.....	68	复型的镀层.....	95
裂纹扩展过程中断口的变化.....	71	扫描电镜断口照片与各种复型透射	
由组织的局部差异引起的变化.....	71	电镜断口照片的对比.....	95
由应力强度因子的改变引起的变化.....	71	复型的位置与取向.....	95
由改变环境引起的变化.....	73	用作标定的网格.....	95
由不同的应力状态引起的变化.....	74	标定投影.....	95
不明确的断口.....	77	复型的假象.....	95
试验断口与工作断口之间的关系.....	77	立体观察.....	97
<b>扫描电镜及其在断口金相中的应用</b> .....	78	<b>扫描电镜及透射电镜用于断口金相</b>	
扫描电镜的主要特点.....	78	<b>的对比</b> .....	99
扫描电镜的使用.....	79	放大倍数.....	99
使用方式.....	79	分辨率.....	99
阴极射线管.....	80	逼真感.....	99
真空系统.....	80	能观察到的试样面积.....	99
试样台.....	80	<b>扫描电镜断口照片的解释</b> .....	100
放大倍数.....	80	穿晶解理特征.....	100
试样制备.....	80	“舌头”或显微孪晶.....	100
立体成象.....	81	解理裂纹源.....	102
特点.....	81	准解理特征.....	102
附件及辅助设备.....	81	显微空穴集聚形成的韧窝.....	103
谱仪.....	81	撕裂.....	106
显微探针分析仪.....	82	疲劳条带.....	106
专用台.....	82	疲劳断裂发展的第 I 阶段.....	107
透射附件.....	82	疲劳断裂发展的第 II 阶段.....	108
阴极荧光.....	82	沿晶断裂.....	109
固体对探测器.....	82	混合断裂机理所表现的特征.....	112
扫描电镜断口照片的获得与观察.....	83	解理 + 显微空穴集聚.....	113
<b>透射电镜及其在断口金相中的应用</b> .....	85	解理 + 撕裂.....	113
透射电子显微镜.....	85	解理 + 疲劳条带.....	115
显微镜设计.....	85	解理 + 沿晶断裂.....	115
透镜系统.....	85	显微空穴集聚 + 撕裂.....	115
透射电镜用的试样.....	85	显微空穴集聚 + 疲劳条带组织.....	115



显微空穴集聚 + 沿晶断裂 .....	115	晶界不连续性缺陷 .....	167
撕裂 + 疲劳条带 .....	115	不适当的晶粒流变 .....	165
撕裂 + 沿晶断裂 .....	115	<b>断口金相在失效分析以外的其它方面</b>	
疲劳条带 + 沿晶断裂 .....	118	<b>的应用</b> .....	166
由化学及热环境造成的断裂特征 .....	118	断裂途径的研究 .....	166
高温断裂 .....	119	断裂前和断裂过程中的形变 .....	167
应力腐蚀开裂及氢脆 .....	120	断口表面特征 .....	167
断口受蚀 .....	123	<b>断口金相在失效分析中的应用</b> .....	170
<b>透射电镜断口照片的解释</b> .....	124	失效分析的基本要点 .....	170
穿晶断口 .....	124	加载 .....	170
显微空穴集聚 .....	124	材料 .....	170
撕裂 .....	127	形状 .....	170
解理 .....	128	环境 .....	170
准解理 .....	131	能够用断口金相解决的失效问题 .....	170
疲劳 .....	132	裂纹源与裂纹扩展途径 .....	171
沿晶断口 .....	139	加载类型 .....	172
化学环境造成的断口特征 .....	141	零件的材料 .....	174
应力腐蚀开裂及氢脆 .....	141	零件的形状和表面 .....	176
腐蚀疲劳 .....	143	化学和热学环境 .....	176
由液态和固态金属引起的脆化 .....	144	随零件尺寸形状和截面而变化	
断口上的腐蚀产物 .....	144	的断裂机理 .....	179
<b>用断口金相揭示不连续性缺陷导致</b>		沿晶分离断裂 .....	179
<b>的断裂</b> .....	146	腐蚀造成的断裂 .....	182
折叠、接缝和冷隔 .....	146	使用断裂 .....	188
裂纹 .....	149	疲劳裂纹扩展速率 .....	189
夹杂 .....	151	<b>索引及附录说明</b> .....	200
渣条 .....	155	<b>索引</b> .....	201
疏松 .....	158	<b>附录</b> .....	240
偏析 .....	161		

# 引言和历史背景

美国金属学会光学显微断口金相委员会

若干世纪以来，虽曾对断裂和断口进行过检查，并将其当作冶金技术的组成部分加以研究，但“断口金相”(fractography)这一名词，作为描述研究断口的技术在1944年才确定下来。断口金相的两个主要用途是：(a)作为失效分析的重要手段；(b)给断裂微观机理及其固体内部结构状态提供新的依据。

目前广泛采用光学显微断口金相来研究断口特征，尤其适于在低倍下研究断口表面。这种工作只要受过中等技术训练的人员，使用比较简单的设备就能完成。本书前六篇文章阐述低倍断口金相所用的方法；对高倍断口的研究方法仅作适当介绍。

我们人为的假定：低倍（宏观）范围从小于实物尺寸到不超过50倍；高倍（显微）范围从50倍起到显微镜的上限，这个上限取决于物镜的数值孔径、所用光线的波长，在某种程度上，还取决于被检查金属表面呈现的反差。断口照片的放大倍数超过获得良好分辨率的要求，就没有意义了，因为它只能把形象放大，并不能揭示更多的细节。

## 关于断裂的史前经验

人类最早的成就之一是控制断裂。石器时代石器的制造（利用控制断裂的方法，把石头做成特殊形状的石器）远远早于车轮的发明。这种技艺的一个典型例证参见图1，图中是古代伏桑人(Folsom)用的一个分别两半的石簇（从上方直至中心的精巧刻制的凹槽辨认出来），它被发现时的原状，是在现已绝种的美洲野牛的两根肋骨中间。这是1927年在新墨西哥州出土的<sup>[1]</sup>。

制造这种武器和石器时，古代工匠必须知道如何选用最易开裂的岩石类型；如何经火烧导致热剥落，以便从岩床中将心石剥离下来；如何压开，使石器成形等。这些原始社会的工匠具备岩石劈裂的知识，他们制造出外形最好、刃口锋利的石器。

把石头准确劈裂并凿成精确尺寸的早期其他例子，有埃及的切阿人斯王国的金字塔、方尖塔及阿卡尔奈克的亚门寺庙；英国的巨大石柱群；欧洲无

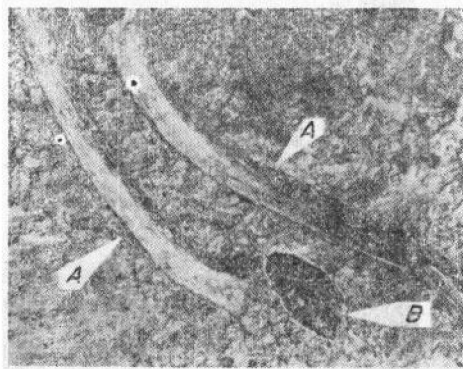


图1 原始伏桑人(Folsom)的发现  
箭头A指绝种美洲野牛的两根肋骨，中间(B处)有一个刻有凹槽的标枪头，即现在熟知的伏桑人的石簇。为清晰起见，武器的轮廓在照片中作过修饰。

数的大石柱或大石碑；秘鲁精砌的石块路、石渠和碉堡等等。虽然所有这些建筑都离不开有关断裂知识的应用，而且只有借助这些知识才能使这类建筑修造起来，但在当时还用不着对断口加以解释。

## 十六至十八世纪的断口金相

能够通过断口外貌衡量金属质量的方法，在整个中世纪是严格保密的。1540年出版的由Vannoccio Biringuccio著的《De La Pirotechnia》是最早公开的一份秘密资料<sup>[2]</sup>；他描述了用断口外貌作为评定黑色和有色金属质量的方法。此后1556年，Georgius Agricola发表了著名的《De Re Metallica》<sup>[3]</sup>；下列引文是从这篇著作中引述的，它描述了评定黑色金属锻件质量的方法：“后来工匠在他的助手协助下，用夹钳夹出一块铁，放在铁砧上，用水轮带动的铁锤反复交替上下锤打，趁这块铁还热时，立即投入水中并进行回火。回火后再置于铁砧上用锤打断，对碎片立即进行检查。这位工匠便能判断这块铁的这一部分或另一部分，甚至整块铁是否已经致密成钢。”

另一位较早的作者是布拉格的Lazarus Ercker，在1574年的著作中讨论了断口试验<sup>[4]</sup>。例如检查铜的质量时，即将制有缺口的铜锭横向打断，仔细检

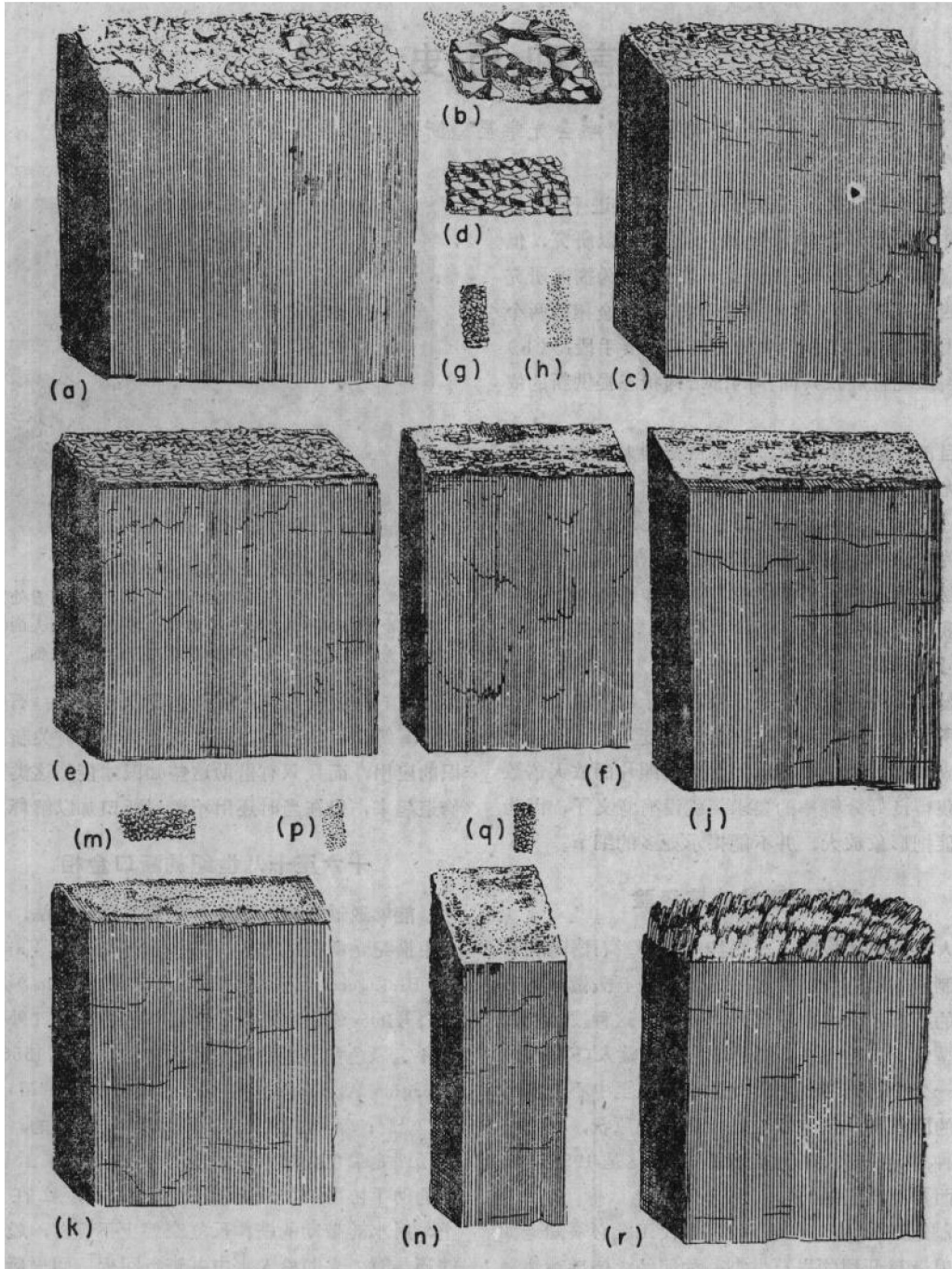


图2 R. A. F. de Réaumur<sup>[7]</sup>的素描，描述了钢铁断口的七种外观

(a) I型断口，大的镜状晶面；(b)与(a)同，用放大镜观看；(c) II型断口，分布较规则的较小晶面；(d)与(c)同，用放大镜观看；(e)为另一种I型断口，与(c)相比较，分布较规则的晶面，其尺寸有所减小；(f) III型断口：晶面间插入纤维状金属区，是有利的倾向；(g)是(f)中晶面的细节；(h)是(f)中纤维状金属的细节；(j) IV型断口：具有极少反光小面的纤维状断口；(k) V型断口，完全是纤维状的心部，周围为框状区；(m)与(k)同，但用放大镜观看，除晶粒较细外，与VI型断口相似；(n) VI型断口：不常见类型，在纤维状组织背景中带有极少的小面；(p)是(n)中纤维区的细节；(q)是(n)中小晶面的细节；(r) VII型断口：木纹状外观。

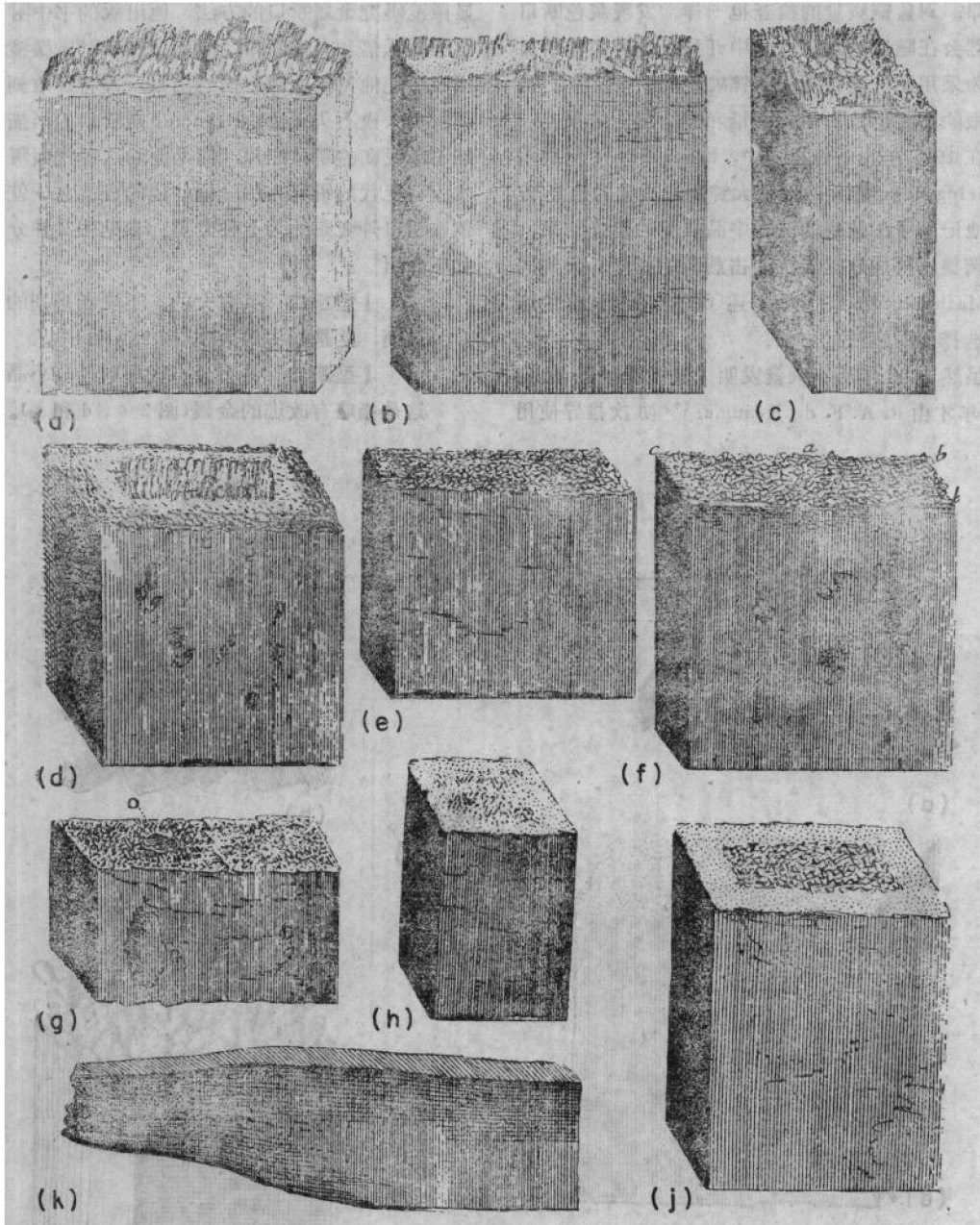


图3 根据 R. A. F. de Réaumur<sup>[7]</sup> 划分的断口外形素描, 显示了渗碳过程中铁转变为钢的程度。在素描 (d)、(f) 和 (g) 中, 字母 g 所指为小的气泡, 字母 G 所示为大的气泡, 字母 O 所示为松孔

(a) 木纹断口, 不象图 2 (r) 中那样清楚成簇的断口外观; (b) 木纹断口混合小颗粒区; (c) 脆性晶面、木纹结构、小颗粒区的混合断口, 这类断口为铁的典型断口; (d) 部分转变为钢的铁棒断口, 外层为小颗粒区, 里面一层是脆性晶面的框形结构, 中心是木纹结构; (e) 渗碳后由铁转变为钢的断口, 整个断口显示出许多微小面, 中心处稍大一些; (f) 图中铁棒的断口,  $a-a$  至  $b-b$  转变为钢, 其余由  $a-a$  至  $c-c$  由于在炉中过热仍然是铁; (g) 钢的断口, 无光泽的粗糙小面是由于试样在炉中保温时间过长引起的; (h) 一种铁的断口, 在转变为钢时, 这种断口总是产生很小的面; (j) 铁的 I 型断口 (见图 2), 显出中心的铁不能转变为钢, 但也生成劣质的框形断口组织; (k) 锻钢的断口, 左端折叠, 在以后的热处理过程中会引起开裂。

查断口；对黄铜质量的检查也一样。发现灰色断口就必然会在随后的加工过程中开裂；这种灰色断口是因为采用了一种特殊的菱锌矿，使铅沾污了铜锭。银的脆断也是由于微量铅和锡沾污的结果。

在1627年的一份报告中，Louis Savot<sup>[6]</sup>继承了Biringuccio推荐的控制大钟制造质量的检查方法，他记录了在敲断的试样中晶粒度的检查结果，作为调整材料成分提高抗冲击载荷的指南。大约同时，Mathurin Jousse<sup>[6]</sup>叙述了根据破断试样的形貌来选择优质钢铁的方法。

虽然1600年后不久就发明了显微镜，但直到1722年才由R. A. F. de Réaumur<sup>[7]</sup>初次报导使用

显微镜研究金属断口的方法，他出版的书中附有描绘钢铁低倍和高倍断口的版画图（当时显微镜的使用者须把他见到的图形描绘出来，并将其雕刻到金属、木头或石头上）。Réaumur对断口的素描，虽然不象现在的断口照片，但是他的这种断面研究基本上与现代的研究方法一样。他的成就之一就是把钢铁断口外观归纳为七种类型。参见图2并分别作如下介绍。

**I型断口** 具有大的、不规则排列的镜状晶面，这是指劣等金属(图2 a和b)。

**II型断口** 具有分布较规则的较小晶面，这是指略有改进的金属(图2 c、d和e)。

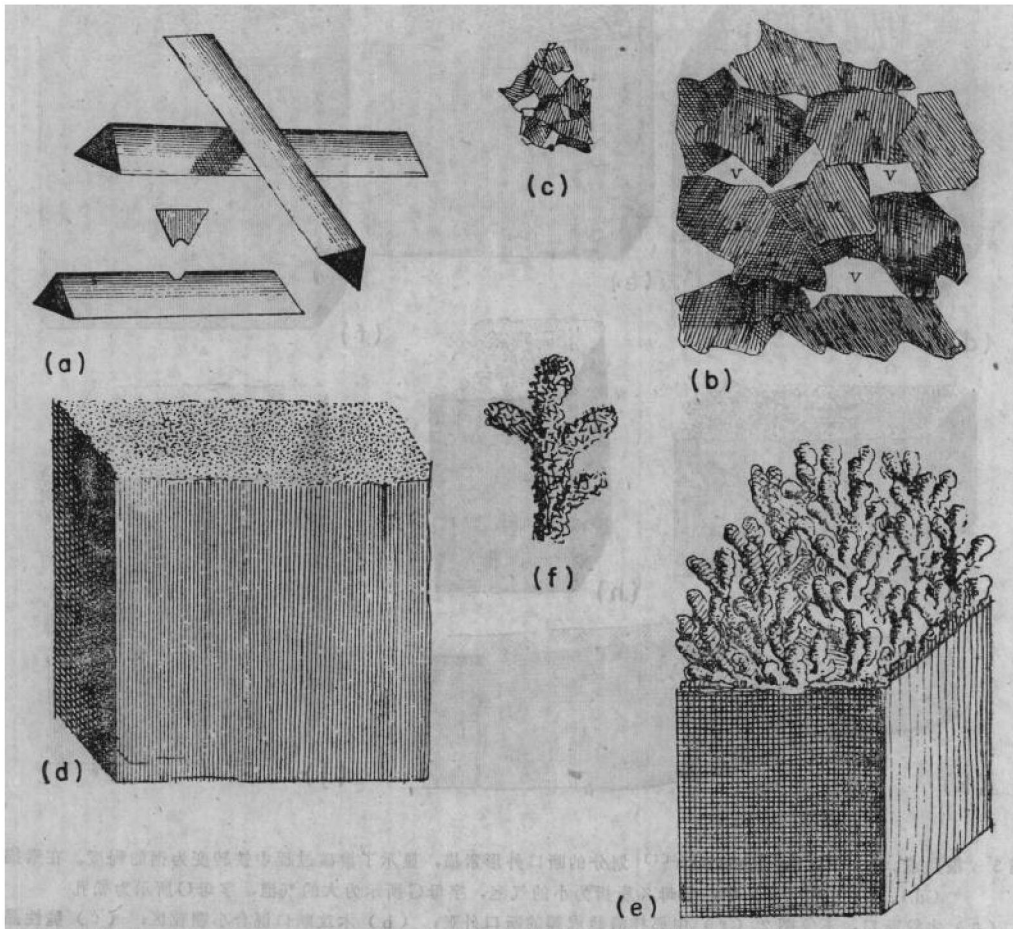


图4 摘自R. A. F. de Réaumur<sup>[7]</sup>的素描图，表明了缺口试棒的断裂试验、晶粒放大图和铸铁断口的细节

(a) 一种缺口试棒的断裂试验，使两根一样的钢试棒一次同时打断；(b) 晶粒“…经过高倍放大[即放大50倍]，显示了空穴V和分子M…”(可能是微晶)，晶粒就是由它们组成的；(c) 是(b)图中一个单独的分子，显示出它所组成的单元；(d) 灰口铸铁的断口，除了表面带褐色和晶粒较粗外，其余与钢极为相似；(e) 为(d)图细节的高倍放大，显示出其断口包括“…无数的树枝状组织…”(这里de Réaumur的放大倍数显然已超过了100×，可能是由于想把他看到的现象绘出来而有所放大)；(f) 单个树枝状组织(枝晶)的细节，显示出一个接着一个小薄片组织(可能是珠光体或渗碳体)。



**Ⅲ型断口** 晶面间插入纤维状金属(图2 f、g和h)。

**Ⅳ型断口** 纤维状金属带有少量反光小面(图2 j)。

**Ⅴ型断口** 心部完全是纤维状,周围有框状组织(图2 k和m)。

**Ⅵ型断口** 是一种不常见的断口类型,在纤维状背景中带有几个小的小面(图2 n、p和q)。

**Ⅶ型断口** 具有木纹状外观特征(图2 r)。

从de Réaumur 书中获得的第二种插图,涉及到随后常用的渗碳工艺,把铁变为钢时,利用断口来评定其转变完成的程度。在其细节的精致复制品中,他所概括的一些现象,如气泡、过烧、脆性断裂、木纹断口以及其它等等,至今仍使冶金工作者感到麻烦。铁转变为钢在不同阶段的断口特征参见图3,简单介绍如下:

木纹断口为铁的特征(图3 a、b和c)。

部分转变了的金属断口特征(图3 d、f和j)。

钢的断口特征(图3 e和g)。

图3(h)显示的断口是一块容易转变为钢的铁。图3(j)显示的断口是一块不能转变为钢的铁。

摘自de Réaumur 书中的第三幅插图(图4),是作者用高倍展示的断口研究和断裂试验。图4(f)中的“小薄片”(minute platelets)可能为珠光体或某种形态的渗碳体,这是金相学建立以前整整一个半世纪的记载。

随后不久(1750年),德国的Gellert描述了金属和半金属的断口特征<sup>[8]</sup>,提到过在区分钢、熟铁和铸铁中断口试验的用途。这种试验也用来评定渗碳和热处理的效果。此外,Gellert还讨论过由检查断口揭露出的金属脆化的原因。

### 十九世纪的断口金相

随着作为冶金工具的金相学的发展,对断口金相就不太感兴趣了。肉眼检查断口,作为质量控制的工具来说,虽然还在使用,但只有少数研究人员仍在显微镜下探索断口特征,而大多数的冶金著作都忽视了对断口的叙述。例如David Mushet在1840年

就否认断口在冶金上的意义<sup>[9]</sup>。

但是,一些特殊领域内,并没有接受这种观点。1856年,R. Mallet<sup>[10]</sup>把加农炮管中的断口细节与凝固方式联系起来,提到的“薄弱面”(Planes of weakness)是由于炮筒外形有锐角存在,这可能就是失效分析的第一个事例,也是设计上对应力集中有害影响的初次认识。与此同时,美国陆军军械局<sup>[11]</sup>为了研究和鉴定已断裂的加农炮管,把断口金相与机械性能结合起来使用。

在断口特征分类的认识方面,继续开展了一些工作。1858年,Tunner<sup>[12]</sup>印发了一张表,列举出热脆、冷脆、过热以及不同类型断裂的情况。1862年,D. Kirkaldy<sup>[13]</sup>谈到断口形状由纤维状变为结晶状与试样外形、热处理和应变速率的关系。他报导过结晶状断口与拉伸轴呈90°,而纤维状断口则是不规则的,其角度也不是90°。1875年,Percy<sup>[14]</sup>(论述冶金专题的一位博学多著作者)描述了六种断口形貌的一般类型。分类如下:

1. 结晶状的 如在锌、镉、铋和镜铁中的晶面;
2. 粒状的 有微小面,如灰口可锻铸铁;
3. 纤维状的 优质的一般证据;

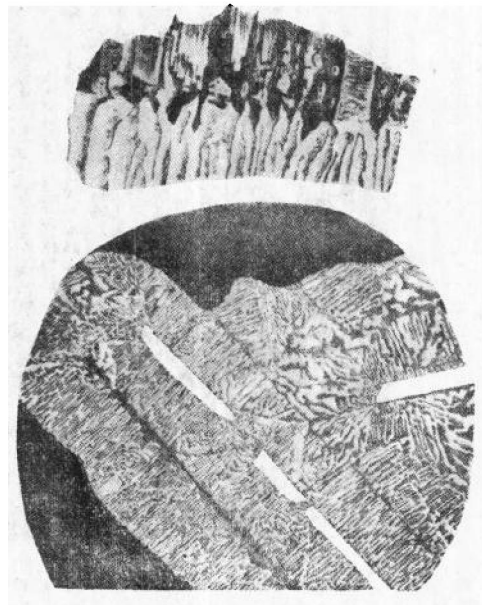


图5 A. Martens对镜铁的观察<sup>[16]</sup>

上图为断口与切面正交的素描图。下图是平行于断口切面的显微照片,100倍(此处缩小为50倍),切面用氧化镁抛光,在硫酸中浸蚀。

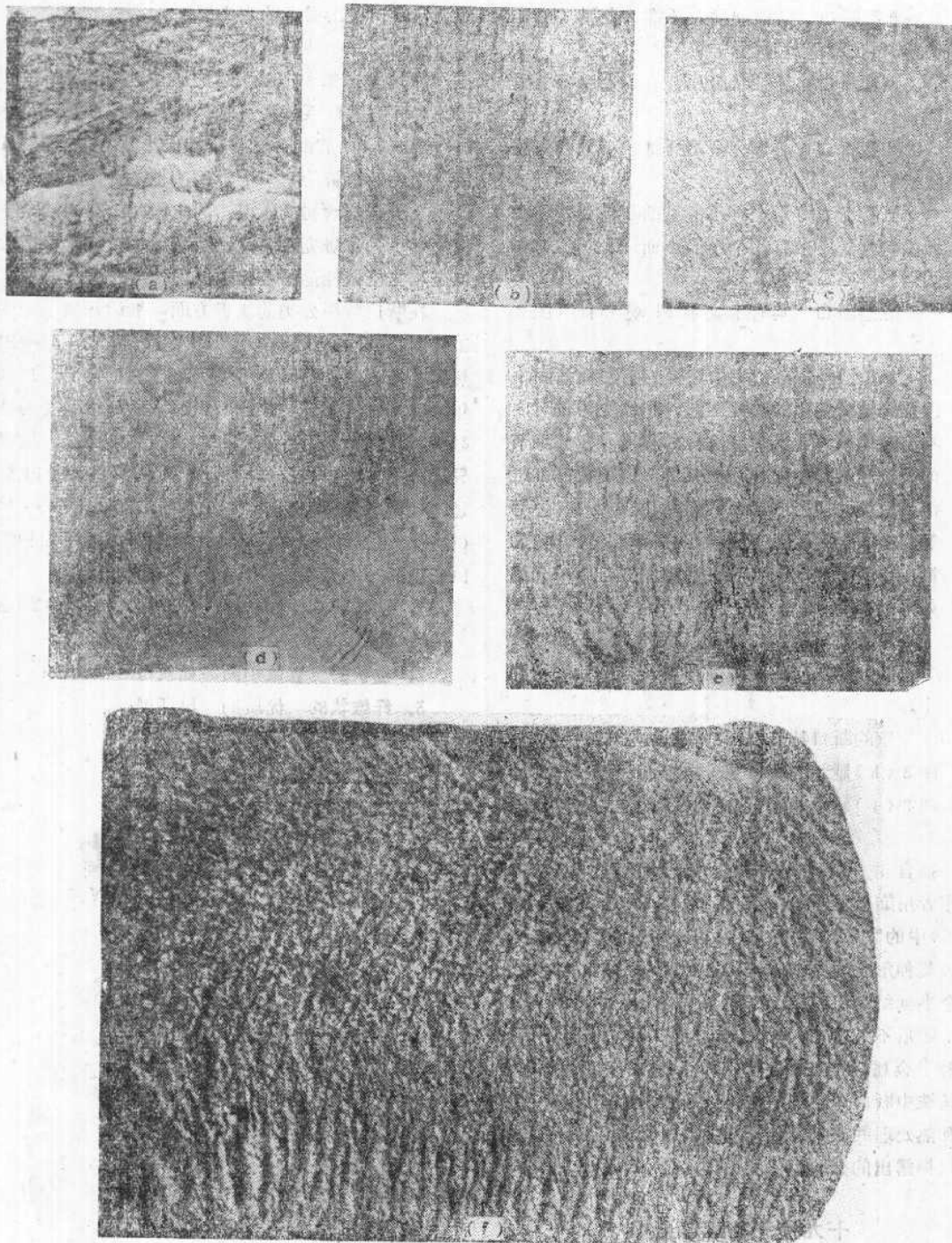


图6 A. Martens对钢断口的记载(参考文献[17], 237页, 插图X)

Martens在这些断口照片中, 引起了人们对放射状断口标记的注意, 他取名为“断裂线”。(a) 钢锭: 拉伸强度 765兆帕 (108千磅/英寸<sup>2</sup>); 从 (b) 至 (e) 维也纳Böhler Bros钢厂和其它钢厂的工具钢; (b) 特硬工具钢; (c) 极硬特种工具钢; (d) 中硬工具钢; (e) 韧性工具钢; (f) 断裂线鲜明的鍔子钢; (a)~(e) 是实际尺寸; 图 (f) 为放大6倍。

4. 丝状的 各种各样较细的纤维状,例如铜的断口;
5. 柱状的 高温断裂的典型断口;
6. 镜面状的 成玻璃状。

Adolf Martens (马氏体即用他的名字命名)通过在显微镜下检查刚破断的断口和经抛光和浸蚀的切片,对其组织进行过研究。1878年他于德国发表了首次发现<sup>[15,16]</sup>。在插图中,有些图是复制工整的铅笔素描手制品,另一些是显微照片,两种图片各列出一张见图5所示。两张图都是镜铁,是一种高碳高锰的白口铸铁。图5的上图, Martens把断口技术与金相结合起来,把断口与成直角的、抛光和浸蚀过的切面的交界显示出来,说明了两组织的关系;图5的下图,是经过抛光和浸蚀后镜铁切面的金相复制品,原放大100倍(图5中缩小为50倍)。

第二幅插图是从 Martens 后来的一篇文章(1887年)<sup>[7]</sup>中摘录的部分,示于图6。这是用照相术摄制的断口照片,然后用照相凹版印相法(光蚀法)印出的。图6的断口显示了 Martens 所谓的“断裂线”的特征——这种特征现在叫作放射状标记(radial marks)。Martens对断口形态的描述比其他自称是最早论述这种断口特征的研究者发表的文章都早。

在宏观断口金相方面, Martens 观察了在拉伸、扭转、弯曲和疲劳试验中得到的断口。他在描述这些断口的形貌时,把粗大的放射状剪切条带与细小的放射状标记区分开来。他在细晶粒材料中辨认出比较清晰的放射状标记,而所有放射状标记都从断裂源发散开来(即这些标记仅指向断裂源)。

根据 W. C. Roberts-Austen<sup>[18]</sup>的意见,热处理对铜断口外观的影响,是 D. K. Chernoff 首先系统研究过的;后来(1885年), Johann Augustus Brinell (布氏硬度的创始人)发表了他对这种影响的研究总结<sup>[19]</sup>(见表1)。H. M. Howe 认为后一工作是“迄今最重要的研究工作”<sup>[20]</sup>。

1889年以前, B. Kirsh<sup>[21]</sup>就描述过典型的杯锥状(Cup-and-cone)拉伸断口。他假设拉伸试样中裂纹扩展的概念一直保留到今天。他推理认为裂纹起源是在缩颈区的拉伸轴上,裂纹起源沿着横向以同心圆形式增长,这就形成了“杯底”;并且锥底是由最后裂开时的最大剪切应力形成的。

可是关于微观断口金相,由于对金相学过分的重视,所以很多知名的冶金学者认为微观断口金相是“既不准确,又无用途”的。由于这种偏见,在进入二十世纪很长的一段时期里,显微断口金相还是被人嫌弃的,以至在大学里关于这方面的早期技术与发现,既不讲授也不予以承认。

表1 Brinell对含碳0.52%钢的断口研究(简述)<sup>①</sup>

断口代号	Brinell 的描述			例子数	观察的或推断的显微组织		热处理工艺	Brinell 标志		
	断口的描述		碳的状态,硬化(H)或渗碳(C)		珠光体	铁素体		试验编号	断口代号	
	组织	颜色								
A	粗锯齿形, 闪光小面	蓝	C	16	索氏体	粗网状	加热至1300°C后缓慢冷,无须再加热至Ac <sub>3</sub> 线	11~14, 17~19, 31, 53-4, 57-8, 62, 75-6, 81	A	
B	中等锯齿形, 闪光小面	蓝	C	5	索氏体	中等尺寸的网状	加热至1080°C后缓慢冷	16, 30, 52, 56, 64	B	
C	细锯齿形, 闪光小面	蓝	C	5	索氏体或细颗粒状	索氏体或细颗粒状	加热至低于Ac <sub>1</sub> 线5°C至500°C之间缓冲形成的索氏体(细珠光体); 加热至低于Ac <sub>1</sub> 线5°C后急冷或缓慢冷形成的马氏体	1, 2, 3	C	
					2	索氏体型		索氏体型		43, 50
					4	索氏体型		索氏体型		29, 51
							加热至Ac <sub>3</sub> 左右并空冷形成的马氏体再加热至Ac <sub>3</sub> 并空冷形成的粗网状组织	15, 55, 63, 80		



(续)

断口代号	Brinell 的描述			例子数	观察的或推断的显微组织		热 处 理 工 艺	Brinell 标 志						
	断口的描述		碳的状态, 硬化(H)或渗碳(C)		珠 光 体	铁 素 体		试 验 编 号	断 口 代 号					
	组 织	颜 色												
D	粗粒状结晶, 银色闪光小面(金属表皮很光亮)	白(金属表皮呈淡黄色)	H②	7 1 4	粗大奥氏体中出现细长针状马氏体	无铁素体, 其铁构成马氏体的一部分	从1300°C淬火, 不再超过 300°C加热 从1300°C空冷后从1080°C淬火 从1300°C或从盐槽中取出空冷后从 760°C或850°C淬火	6, 23, 24, 32, 39, 46, 61 7 8, 72, 73, 78	D					
E	细粒状结晶, 银色闪光小面(金属表皮有火红色)	……	H	6						由中等尺寸奥氏体形成的类似针状的组织	无铁素体, 其铁构成马氏体的一部分	从1080°C淬火, 不需要先加热到更高温度	5, 22, 38, 45, 60, 66	E
F	光陶瓷状, 没有肉眼可见的确定结晶	……	H	5 4 1						由奥氏体形成的细马氏体	无铁素体, 其铁构成马氏体的一部分	加热到 $A_{c3}$ 线淬火, 不再超过 300°C加热 从 $A_{r1}$ 以下加热到 $A_{c3}$ , 淬火 从盐槽中取出淬火	4, 37, 40, 44, 47 21, 59, 65, 82 79	F
H	陶瓷状; 纤维状; 光泽暗淡完全无结晶	黑色或灰色	C③	4	呈颗粒状; 是从马氏体加热至690°C而形成的	带状的	再加热至 690°C急冷或缓冷后形成马氏体	26, 34, 42, 49	H					
G	叶状晶体, 闪光小面	蓝	H或C	2	将马氏体加热至750°C而得到颗粒状、带状	带状的	再加热至750°C( $A_{c3}$ 以下10°C)急冷或缓冷后形成马氏体	27, 35	G					
I	粗晶; 似暗淡银箔闪光小面	……	H	1	马氏体		从 750°C ( $A_{c3}$ 以下10°C)冷却到 $A_{r1}$ (710°C)发生辉光后淬火	67	I					

① 此表概括了 Brinell研究热处理对0.52% C钢断口外观影响后所作的报告<sup>[19]</sup>。本表摘自 McGraw-Hill 图书公司出版书籍<sup>[20]</sup>中 P. 534~535的表29。

② 在24和32两项试验中, 钢从“强白色”淬火硬化, 因此把全部碳硬化之后, 再加热至 255°C。这样很自然地把一小部分碳转变成渗碳体, 就会呈现一种细到人们不易察觉的乳状体。马氏体这种轻微的再加热不会改变肉眼可见的显微组织, 并且现在试验也证明再加热没有改变断口形态。

③ 钢的四种试验中, 是从“强白色”或“淡黄色”淬火硬化再加热至 690°C; 这样的处理后, 应该把全部碳转变成渗碳体。Brinell用硝酸点蚀试验后, 证明部分碳在硬化状态, 而另一部分碳成为渗碳体。然而, 这个试验肯定有误。