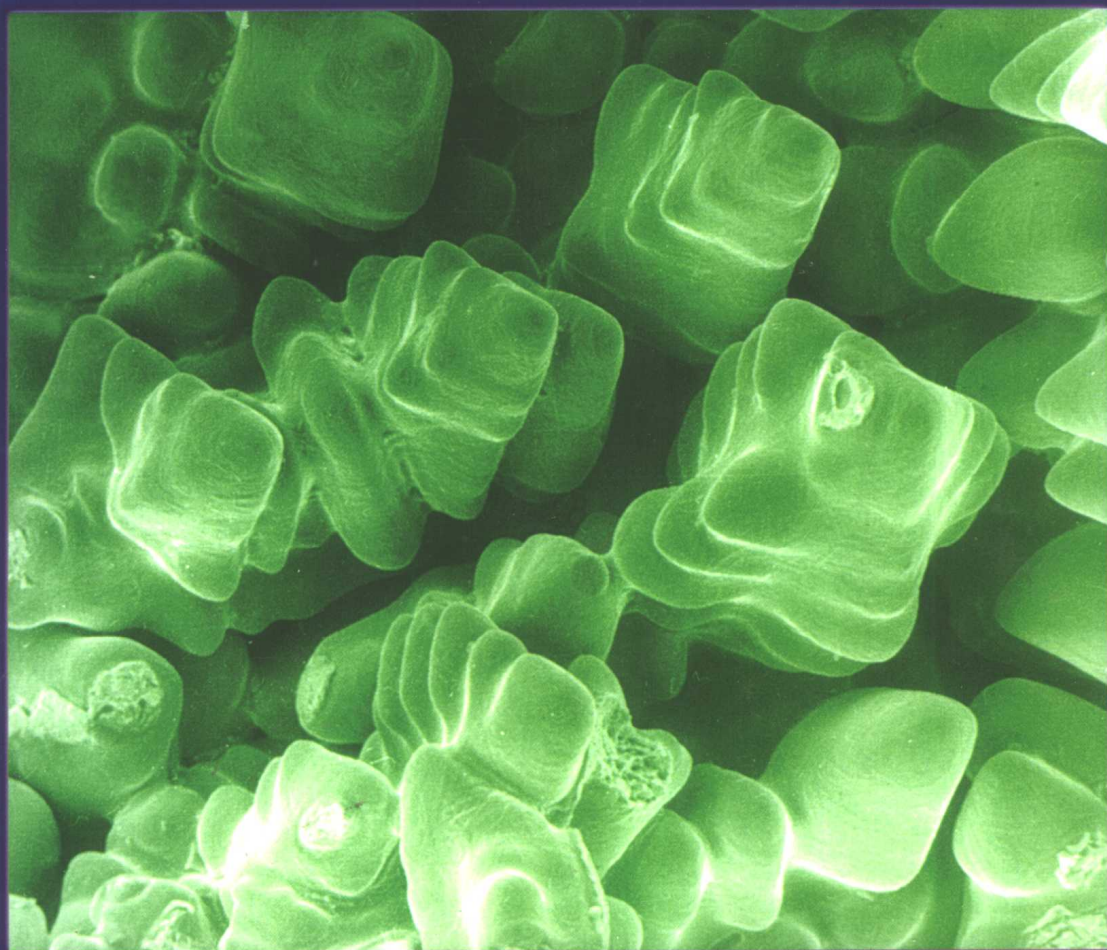


# 特殊钢金相图谱

姜锡山 著



● ISBN 7-111-11125-7/TG.1227

封面设计·电脑制作·姚毅

ISBN 7-111-11125-7



9 787111 111252 >

定价: 98.00 元

地址: 北京市百万庄大街22号  
联系电话: (010) 68326294

邮政编码: 100037

网址: <http://www.cmpbook.com>

E-mail: [online@cmpbook.com](mailto:online@cmpbook.com)

# 特殊钢金相图谱

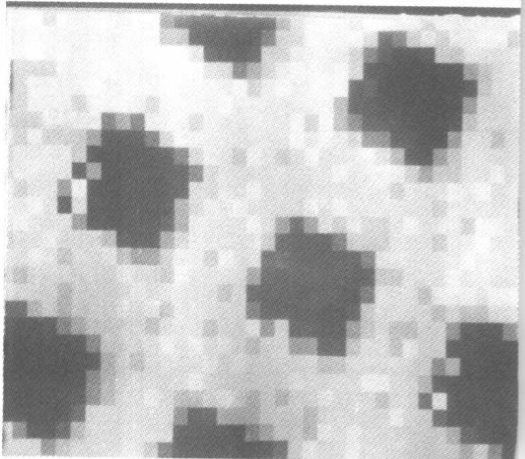
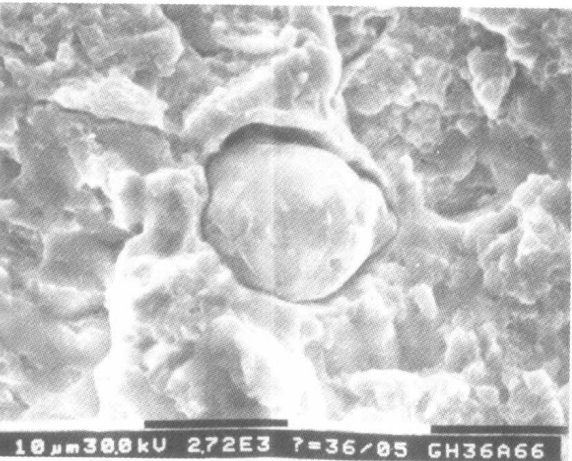
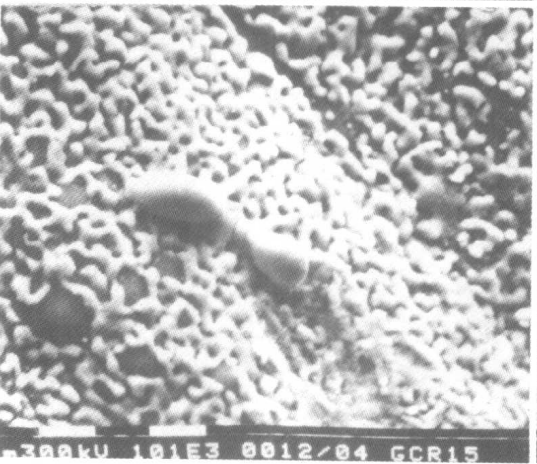
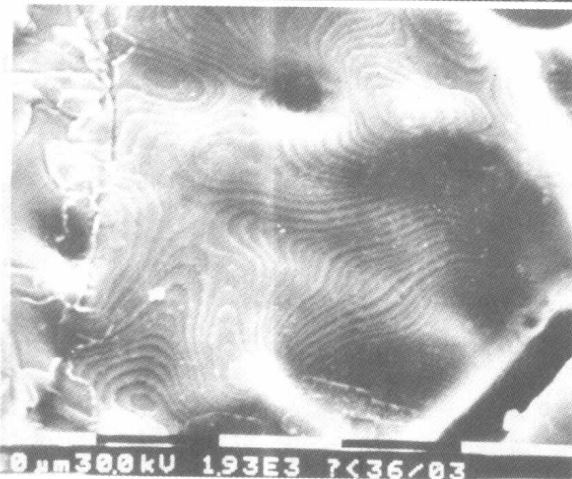
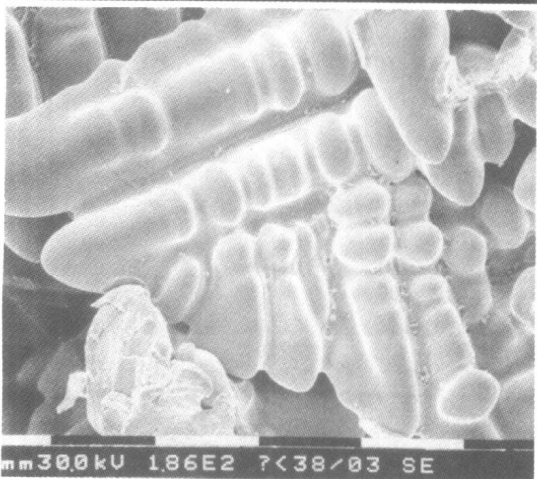
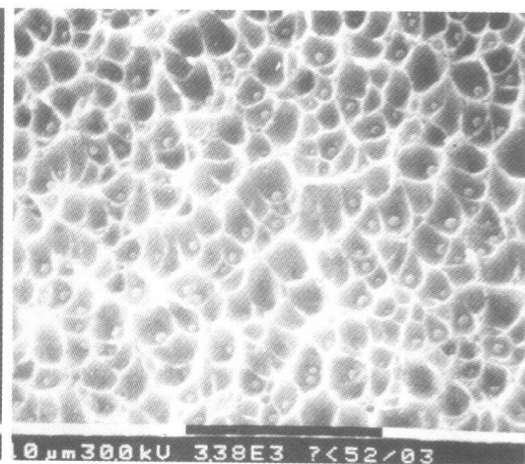
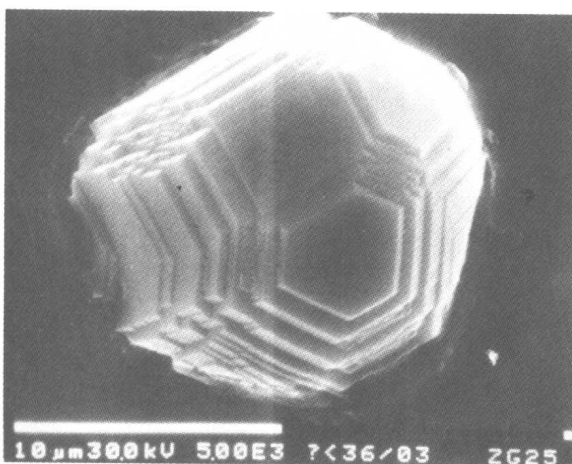
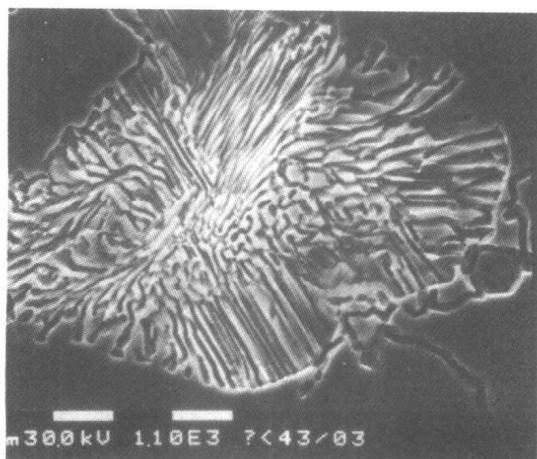
姜锡山 著

# 特殊钢金相图谱

姜锡山 著



机械工业出版社



7A14/04

该图谱是一部较全面介绍特殊钢金相组织的应用技术著作。全书共分5章,第1章是特殊钢钢坯表面缺陷图谱,介绍了12种钢坯表面缺陷形态和显微特征,探讨了钢锭质量、送热、加热速度、轧制方法四个关键环节与钢坯表面缺陷的关系,提出了改善表面质量的措施。第2章是特殊钢的金相图谱,系统介绍了八大特殊钢的金相组织、宏观缺陷和显微缺陷。第3章介绍了钢中的非金属夹杂物图谱,包括氧化物、硅酸盐、铝酸盐、硫化物、氮化物。第4章为特殊钢断口图谱,介绍了韧性断裂、脆性断裂和疲劳断裂特征及断裂机理。第5章是钢中硫化锰铁单晶体图谱。硫化锰铁单晶体的发现在第四届亚太地区电子显微镜学术会议上被专家公认为国际上首次重大发现。

该图谱中的图片视角新,从宏观到微观,细节越来越清晰。图片拍摄角度取景实现了科学性与艺术性的完美结合,美观新颖。很多照片鲜为人知,向读者展示了金属世界的微观奇景。

该图谱可供冶金工作者、材料工作者、质量检测人员及高等院校师生阅读,各级图书馆收藏。

### 图书在版编目(CIP)数据

特殊钢金相图谱/姜锡山著. —北京:机械工业出版社,2002.10

ISBN 7-111-11125-7

I. 特… II. 姜… III. ①特殊用途钢—钢坯—表面缺陷—图谱②特殊用途钢—金相组织—图谱 IV. TG142.1-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第084427号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:吕德齐 曾红 版式设计:冉晓华 责任校对:申春香

封面设计:姚毅 责任印制:付方敏

北京市铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003年1月第1版第1次印刷

890mm×1240mm A4·16.25印张·3插页·533千字

0001-3000册

定价:98.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821,88379646

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

质量是企业的生命,在市场经济的激烈竞争中,质量问题已经上升到“质量兴国”的战略高度。金相组织是评价特殊钢质量的重要指标之一。金相检验的目的,一方面是为了检查成品钢材的质量是否符合有关标准的规定;另一方面是通过观察鉴定各种缺陷的分布状况和性质,分析研究产生缺陷的原因和各种工艺因素对钢质量的影响,为改进工艺质量和各种试验研究提供数据。

本图谱是作者在30年特殊钢质量检测 and 科研实践中积累的上千幅金相照片中的精选。科研课题和检测试样来自北满特殊钢股份有限公司生产一线,使用目前国际上先进的 Neophot32 金相显微镜、SEM505 扫描电子显微镜、X 射线能谱仪、X 射线波谱仪、BS613 透射电子显微镜及其他辅助制样设备,通过观察、分析、拍摄完成的。照片说明取自于作者在质量检验和科研实践中撰写的技术分析报告和已发表过的科技论文。全书分5章编排。每章力求立意新颖、内容创新、取景独特。科学与艺术看似两个完全不同的领域,但是当我们的目光从宏观世界进入到钢的微观世界时,发现这里别有一番天地,科学与艺术完美地结合在一起了。作者力图呈现给读者的正是这种完美结合的真实写照。

第1章特殊钢钢坯表面缺陷图谱,介绍了12种钢坯表面缺陷形态和显微特征,探讨了钢锭质量、送热、加热速度、轧制方法四个关键环节与钢坯表面缺陷的关系,提出了改善钢坯表面质量的措施。在12种钢坯表面缺陷中,“五害元素引起的龟裂”被冶金行业列为全系统重点攻关课题,引起人们的高度重视。对这一被人们称为“钢中癌症”的缺陷,作者抓拍到五害元素 Sn、As、Sb、Pb、Bi 在晶界上呈现熔融网状分布的显微特征,揭示了它们对钢质量影响的冶金本质,为生产控制和使用选择提供了科学依据。

第2章特殊钢金相组织,全章有图片500多幅,内容丰富、实用性强,是本图谱的重要一章。一种组织既有500倍的金相显微照片,也有对该组织一个局部细节放大到几千倍的透射电子显微照片。精细结构层层深入,细节越来越清晰,实现了金相组织低倍到高倍互补,便于组织的准确识别、鉴定和研究。另外,本章重点介绍了特殊钢的贝氏体组织,很多贝氏体组织形态鲜为人知,特别是我们在检验实践中发现的海星状贝氏体、雪花状贝氏体、棒状贝氏体等组织特征,仅是某些特殊钢种出现的特有组织现象,在目前的金属学与热处理的有关书籍中,还没有这方面的论述。这是特殊钢贝氏体组织研究的新发展,具有极其重要的学术价值。

第3章特殊钢的非金属夹杂物。非金属夹杂物是钢特有的一种组织现象,与钢的性能密切相关。在以往的有关书籍和图谱中,关于非金属夹杂物,多采用文字描述其特征和识别方法,这些经验之谈阅后还是很抽象。在本图谱中,作者以真实照片的形式、全新的概念向读者系统介绍钢中的氧化物、硅酸盐、铝酸盐、尖晶石、硫化物、氮化物和稀土夹杂物,这是本图谱的技术创新、内容创新和钢中非金属夹杂物研究的新尝试。每一颗夹杂物实现了真实的显微形貌,其中所含各元素的 X 射线面分布图、X 射线能谱图和 X 射线定量分析结果的全方位、多视角定性与定量的最佳组合,由计算机控制的先进的检测仪器对夹杂物给以全新的科学的鉴定与分析。参阅这些图谱使读者对特殊钢的非金属夹杂物有一个直观的、深刻的理解。在检验中,甚至可以和本图谱中的照片“对号入座”,大大缩短检验时间,提高检验准确性。钢中的硫化物是人们最关注、最熟悉、对钢的质量有较大影响的夹杂物。作者以“追踪硫化物在钢中的变迁”为题,向读者展示了一系列硫化物的照片,形形色色的铸态形貌,轧制和锻造后变成条

形或纺锤形形貌,热处理时硫化物的分解和析出。在这一系列硫化物的精美照片中,您能感受到硫化物在钢中变化的栩栩如生的动态过程。

第4章特殊钢典型断口。关于钢的断口学有很多图谱在流行,因此,本章不想重复前人的工作,在介绍特殊钢典型断口图谱的基础上,着重向读者介绍那些鲜为人知的金属微观世界景观。10种断裂机理不同的沿晶断裂显微照片,向人们展示了形态各异的晶粒微观形貌;“树枝晶的风采”使读者欣赏到钢凝固和结晶后的精美特征,仿佛看到了大自然雕琢的喀斯特岩洞旖旎风光;“气泡的韵律”将读者带入钢的微观世界,虽然人们不希望钢中有气泡,但是,只有正确认识它,才能有效控制和消灭它,既体现出科学的内涵,又折射出艺术的魅力。

第5章钢中硫化锰铁单晶体图谱。众所周知水晶、钻石、红宝石、蓝宝石、翡翠、玛瑙等是天然晶体。但在本图谱之前,您听说过、看到过钢中的硫化锰铁单晶体吗?因此,系统介绍钢中硫化锰铁单晶体的晶体学特征和晶体生长规律是本图谱的闪光点。在一次失效分析检验中,作者使用扫描电子显微镜,在ZG25铸钢件断口的皮下气泡壁上偶然发现了钢中硫化锰铁(Mn,Fe)S单晶14面体自然形貌,并拍摄100多幅形态各异、揭示其晶体学特征和生长规律的系列照片。硫化锰铁单晶体的问世在第四届亚太地区电子显微镜学术会议上被专家公认为不寻常的重大发现。它那晶莹剔透的晶体自然形貌似水晶,显示出巧夺天工的自然美,是自然界单晶体家族中新发现的一名成员。这一科研成果的论文被中国金属学会评为优秀论文,获黑龙江省冶金系统科技进步一等奖。读者在欣赏精选的50幅硫化锰铁单晶体图片时,可以领略到它那婀娜多姿、晶莹剔透的风采。

本书可供从事特殊钢生产和使用的冶金工作者、材料工作者、质量检验人员使用,也可供相关专业的高等院校师生、科研院所的科研人员参考。

作者感谢在本书编写过程中给予关照的北满特殊钢股份有限公司高崇董事长,感谢邢维刚、谷成荫、邵奎祥等同志给予的支持和帮助。

宋鞠姝高级工程师生前是作者在吉林大学物理学院学习期间的同窗好友,志同道合的伴侣,在北满特殊钢股份有限公司钢铁研究所共同工作和生活了35个年头,她为本书提供了很多宝贵的试样。本书引用的很多篇学术论文是她与作者共同撰写的,她为本图谱的成书做出了很大的贡献。作者谨以此书献给宋鞠姝同志,并作为共同留给后人的永久纪念。

由于作者水平有限,错误在所难免,衷心感谢读者提出宝贵的批评意见。



**姜锡山** 男，研究员级高级工程师，黑龙江省第七、八届政协委员。1942年1月15日生于吉林省长春市。1966年毕业于吉林大学物理学院金属物理专业。

35年来，一直在北满特殊钢股份有限公司从事特殊钢质量检验与科研工作，并对特殊钢的金相组织、热处理复制和断裂行为的规律进行研究，主要业绩有：（一）在国际学术会议发表学术论文7篇；（二）在国内学术刊物发表学术论文48篇；（三）编著内部技术文件《特殊钢贝氏体图谱》；（四）在国际上首次发现钢中的硫化锰铁单晶体，在第四届亚太地区电子显微镜学术会议上专家称其为“国际上不寻常的重大发现”，有关论文被中国金属学会评为优秀论文，该成果被黑龙江省评为科技进步一等奖。总共有38项科研成果获各级奖励证书。

在任省政协委员中，有4份参政议政提案获黑龙江省政协优秀提案奖，两次被黑龙江省政协授予优秀政协委员称号。

现就职于中国信息协会。

LAB 41/01



# 目 录

## 前 言

### 第 1 章 特殊钢钢坯表面缺陷图谱 ..... 1

- 1.1 概述 ..... 2
- 1.2 钢坯表面缺陷性质与分类 ..... 2
- 1.3 钢坯表面缺陷宏观形态与显微特征 ..... 2
- 1.4 产生钢坯表面缺陷因素综合分析 ..... 30

### 第 2 章 特殊钢金相组织 ..... 33

- 2.1 特殊钢金相组织简介 ..... 34
- 2.2 超声波预检与低倍组织缺陷对照图 ..... 36
- 2.3 钢的低倍组织缺陷 ..... 40
- 2.4 晶粒长大倾向 ..... 41
- 2.5 透射电子显微镜下的光栅像及放大倍数计算 ..... 42
- 2.6 电渣钢钢锭低倍组织 ..... 42
- 2.7 GCr15 钢热轧材碳化物变化规律 ..... 45
- 2.8 钢的显微组织缺陷 ..... 46
- 2.9 45 钢钢锭帽口碳偏析检验结果示意图 ..... 48
- 2.10 40Cr 钢水平连铸坯组织 ..... 49
- 2.11 40Cr 钢钢坯表面发纹及脱碳层 ..... 50
- 2.12 以铁素体为基体的组织 ..... 51
- 2.13 珠光体 ..... 51
- 2.14 类珠光体 ..... 54
- 2.15 魏氏组织 ..... 55
- 2.16 莱氏体 ..... 55
- 2.17 牛眼石墨 ..... 57
- 2.18 马氏体 ..... 57
- 2.19 板条马氏体 ..... 60
- 2.20 马氏体 + 托氏体 ..... 60
- 2.21 索氏体 ..... 62

- 2.22 马氏体低温回火组织 ..... 63
- 2.23 球状碳化物 ..... 63
- 2.24 贝氏体立体对照片 ..... 64
- 2.25 上贝氏体 ..... 65
- 2.26 下贝氏体 ..... 101
- 2.27 上贝氏体 + 下贝氏体 + 马氏体混合组织 ..... 106
- 2.28 粒状贝氏体 ..... 114
- 2.29 雪花状贝氏体 ..... 120
- 2.30 海星状贝氏体 ..... 121
- 2.31 棒状贝氏体 ..... 122
- 2.32 无碳贝氏体 ..... 124

### 第 3 章 特殊钢的非金属夹杂物 ..... 127

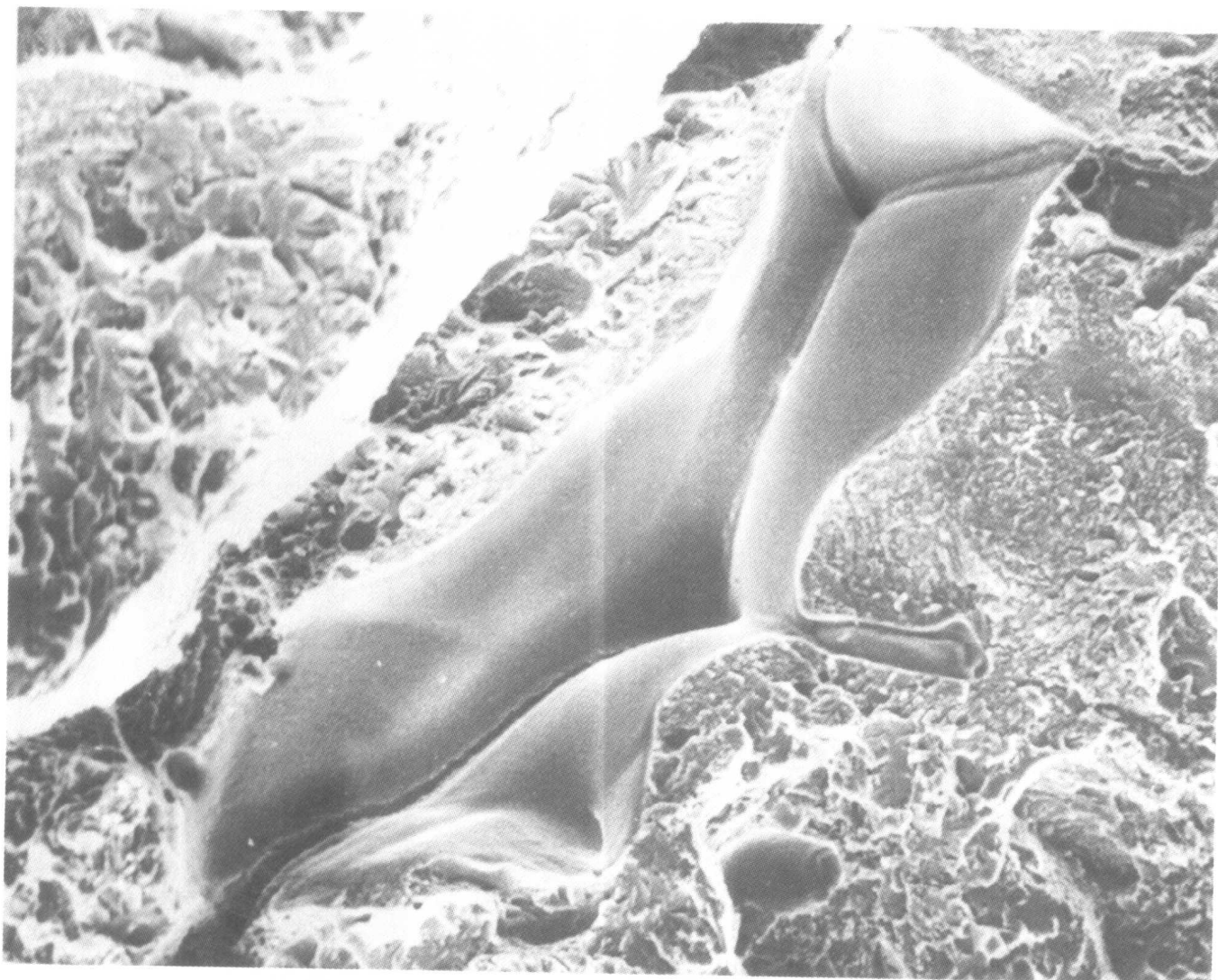
- 3.1 非金属夹杂物简介 ..... 128
- 3.2 金相显微镜下的点状夹杂物 ..... 157
- 3.3 追踪硫化物在钢中的变迁 ..... 158
- 3.4 ZG25 铸钢中气泡壁上 (Mn, Fe)S 单晶体形貌 ..... 163
- 3.5 25 钢柱状晶断口上的  $\alpha$ -MnS 形貌 ..... 164
- 3.6 5CrNiMo 钢中的 (Mn, Fe)S 夹杂物 ..... 165
- 3.7 扫描电镜下的钢铁工艺矿物 ..... 167

### 第 4 章 特殊钢典型断口特征 ..... 169

- 4.1 形形色色的沿晶断口 ..... 170
- 4.2 疲劳断口 ..... 179
- 4.3 氢脆断口 ..... 182
- 4.4 有夹杂物的等轴韧窝 ..... 185
- 4.5 无夹杂物的等轴韧窝 ..... 186
- 4.6 CrNiMo 电渣钢中的质点偏析 ..... 187
- 4.7 接触疲劳剥落机理 ..... 190
- 4.8 气泡的韵律 ..... 192
- 4.9 树枝晶的风采 ..... 200
- 4.10 显微孔洞 ..... 207

4.11	化学腐蚀断口 .....	209	5.3	(Mn,Fe)S 单晶体的晶体学特征 .....	229
4.12	晶界熔化特征 .....	210	5.4	(Mn,Fe)S 单晶体的生长形态 .....	235
4.13	20SiMn 钢铸件裂纹分析 .....	211	5.5	晶体的层状生长特征 .....	239
4.14	GC-4 钢断口显微分析 .....	212	5.6	关于(Mn,Fe)S 单晶体形核机制的探讨 .....	245
4.15	钢的晶粒形貌 .....	214	5.7	关于(Mn,Fe)S 单晶体生长物理的探讨 .....	246
4.16	解理断口 .....	215			
<b>第 5 章</b>	<b>钢中硫化锰铁单晶体图谱 .....</b>	<b>217</b>			
5.1	(Mn,Fe)S 单晶体的发现与巧合 .....	218			
5.2	(Mn,Fe)S 单晶体的发现过程 .....	220			
				<b>参考文献 .....</b>	<b>251</b>

# 第 1 章 特殊钢钢坯表面缺陷图谱



晶界熔化

## 1.1 概述

钢坯表面缺陷是轧钢生产中普遍存在的质量问题,它对成材率的影响直接威胁着企业的经济效益和企业的信誉。

本文应用现代物理检测仪器,对在轧钢生产中出现的各种形态钢坯表面缺陷的几百个试样进行了

大量的观察和分析,从宏观形态到微观本质、从低倍显微组织到高倍精细结构,对特殊钢钢坯表面缺陷进行了较为系统的分类和概括,对产生钢坯表面缺陷的诸因素进行了综合分析,提出了改善钢坯表面质量的措施。

## 1.2 钢坯表面缺陷性质与分类

钢坯表面外观形态并不是判定废品归属的惟一依据,这是因为不同工艺、不同工序阶段、不同原因出现的钢坯表面缺陷的宏观形貌可能完全相同,例如表面龟裂,既可能产生于过烧,也可能产生于热脆,还可能与低温轧制有关。而发裂,既可能产生于皮下气泡,也可能产生于表面气孔,还可能与钢锭表面夹杂(渣)及表面麻坑有关。因此,本书介绍的是带有共性的钢坯表面缺陷,具有高度的概括性和实用性。对疑难表面缺陷还是要取样,应用本文提出的实验方法和程序在实验室进一步分析定性。

根据北满特殊钢股份有限公司历年来轧钢生产中出现的表面缺陷,在鉴定分析的基础上,按缺陷的表面特征、形态和冶金学本质,将钢坯表面缺陷分为

12种,它们是:

- 1) 纵向应力裂纹(顺裂);
- 2) 发裂;
- 3) 内部过烧裂纹;
- 4) 表面过烧裂纹;
- 5) 柱状晶发达烧损严重引起的龟裂;
- 6) 热脆性裂纹;
- 7) 低温轧制裂纹;
- 8) 结疤裂纹;
- 9) 五害元素引起的龟裂;
- 10) “研磨裂纹”;
- 11) 超级“白点”脆断;
- 12) 应力裂纹。

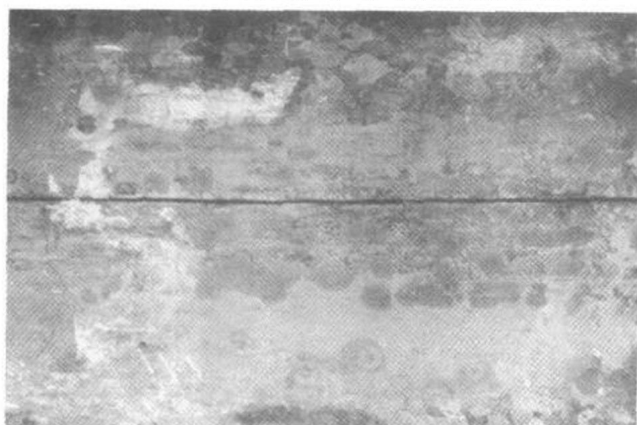
## 1.3 钢坯表面缺陷宏观形态与显微特征

### 1.3.1 纵向应力裂纹

也称顺裂,是指在钢坯表面中心部位通长大裂纹,见图1-1;有的成为裂口,宽度可达几毫米,见图1-2;深度为几毫米到几十毫米,见图1-3,属于报废性表面缺陷,产生于45钢、40Cr、35CrMo等亚共析钢或马氏体、半马氏体钢。金相观察发现在裂纹两侧有明显的脱碳现象,见图1-4;还观察到在纵向应力裂纹的支裂纹中有高温扩散氧化生成物,见图1-

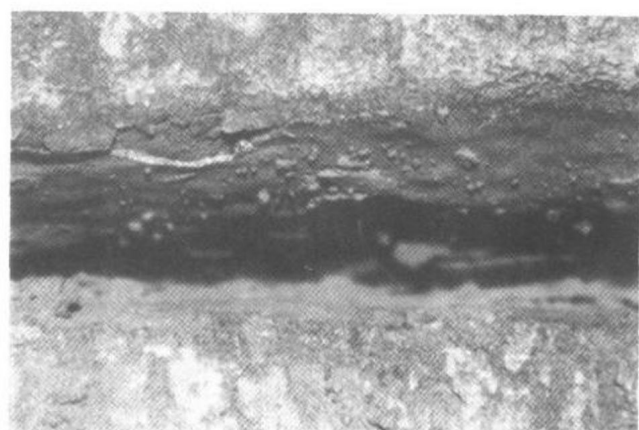
5。扫描电镜断口观察到在钢坯顺裂开口附近分布着大量高温氧化生成物和由高温氧化铁素体形成的韧窝,见图1-6。

此类钢有完整的铁素体网,如果钢锭浇注温度高、冷却速度快,在钢锭开坯时,在热应力和组织应力的共同作用下产生纵向应力裂纹。



1×

图1-1 45钢纵向应力裂纹宏观形态



10×

图1-2 35CrMo钢纵向应力裂纹局部放大像

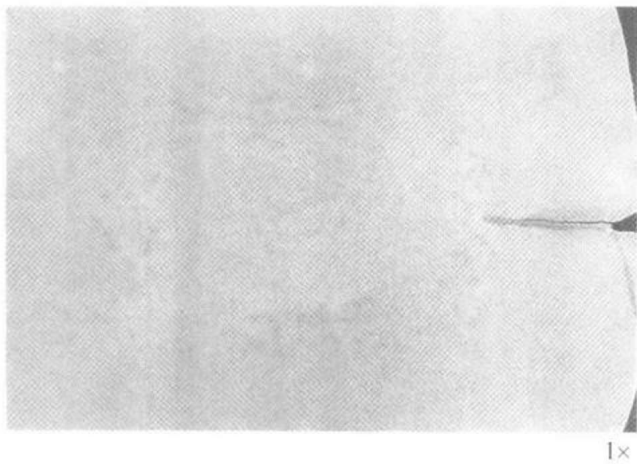


图 1-3 45 钢纵向应力裂纹横剖面酸浸低倍形貌

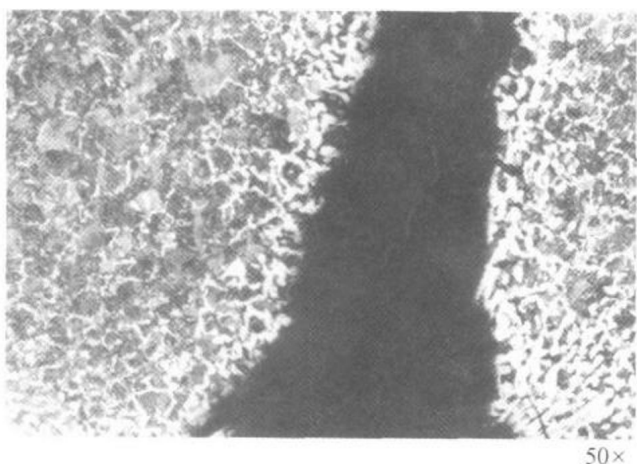


图 1-4 40Cr 钢坯纵向应力裂纹开口处金相组织,基本可见封闭的铁素体网,裂纹附近(白色区)有明显脱碳现象

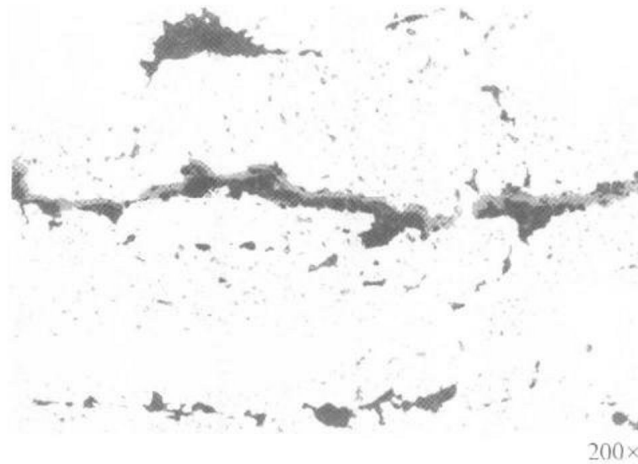


图 1-5 35CrMo 钢坯纵向应力裂纹支裂纹中的高温扩散氧化生成物、暗黑色为硅酸盐、灰色为氧化铁、细颗粒为  $\text{SiO}_2$

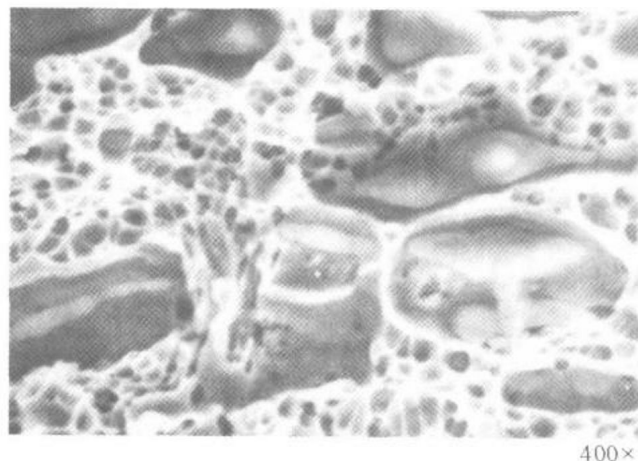


图 1-6 纵向应力裂纹断口扫描电镜观察图像,白色韧窝区为高温氧化铁素体,在大韧窝中有高温氧化生成物

### 1.3.2 发裂

发裂,也称发纹,是沿钢坯或钢材的加工方向呈现的类似头发丝粗细的裂纹,见图 1-7。在钢坯表面缺陷中,发裂是最容易出现、数量最大的一种缺陷。发裂有深有浅,在酸浸低倍试样上可以测量发裂的深度,浅的不到 1mm,深的可达 10mm,见图 1-8、图 1-9、图 1-10、图 1-11。钢锭的表面气孔、皮下气泡、表面夹杂(渣)、表面网状裂纹、表面麻坑、皮下夹杂(渣)等都可能产生发裂。金相与扫描电镜观察与研究发现,钢坯皮下气泡(见图 1-12)轧制后,皮下气泡已经变成发裂,但在裂纹附近有一弧形白色的高温氧化铁素体气泡发裂已与钢坯表面相通。有的气泡在钢坯的浅表面,并不与钢坯表面相通,见图 1-13、图 1-14。在皮下气泡发裂的前端有大量夹杂物 and 高温扩散氧化生

成物,见图 1-15,这些特征是鉴定气泡发裂的依据。扫描电镜观察发现,在钢坯的浅表面有呈链状或条状分布的硅酸盐和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  条带,见图 1-16,也是形成发裂的主要原因。由于脱氧不好,或脱氧产物不能很好上浮,这些夹杂物留在钢中,加工后沿加工方向呈现出细小裂纹。组织应力对产生发裂有一定影响,组织应力较大的马氏体钢的发纹比较严重。

发纹的防止措施:

减少钢中气体和夹杂物含量的措施都有利于减少发裂。如偏心炉底出钢,采用带有搅拌作用的真空脱气及真空熔炼,控制好出钢温度,钢液在盛钢桶内有充分镇静时间,以利于气体和夹杂上浮,整个浇注系统要很好的干燥和洁净等。

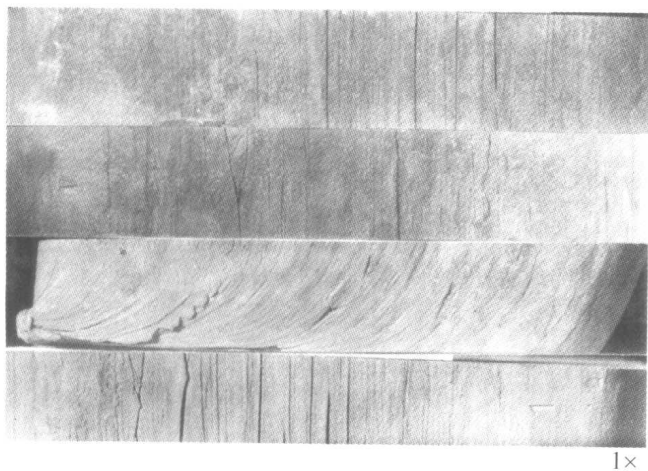


图 1-7 钢坯表面发裂的宏观形态

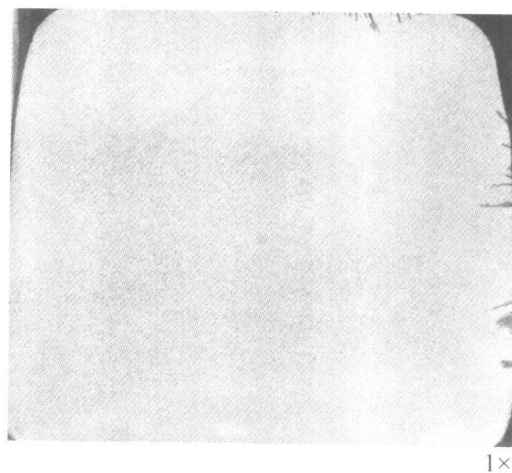


图 1-9 钢坯表面发裂横向剖面低倍酸浸形态

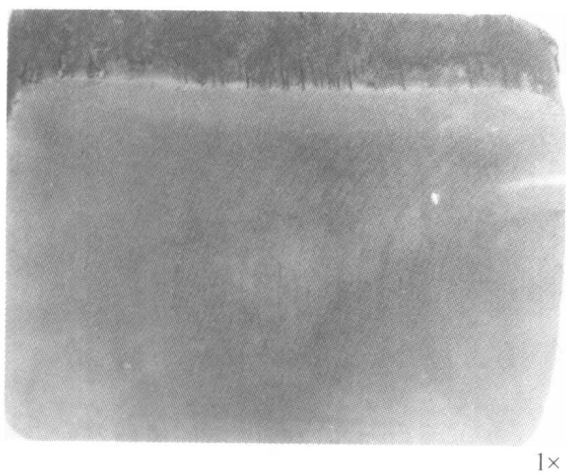


图 1-8 钢坯表面发裂横向剖面低倍酸浸形态

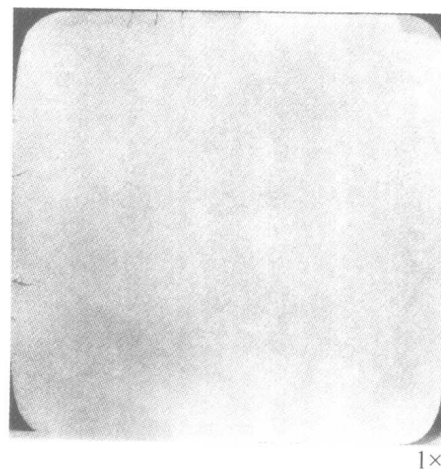


图 1-10 60Si2Mn 钢坯皮下气泡产生的细密短浅型发裂

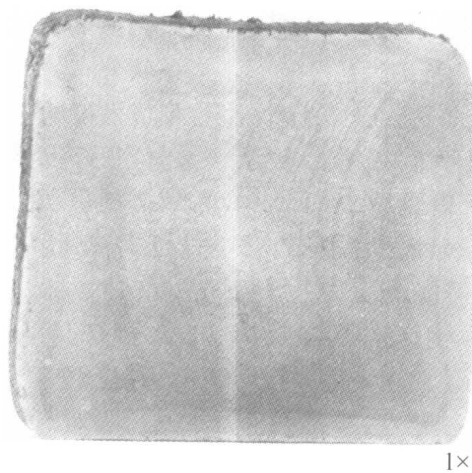
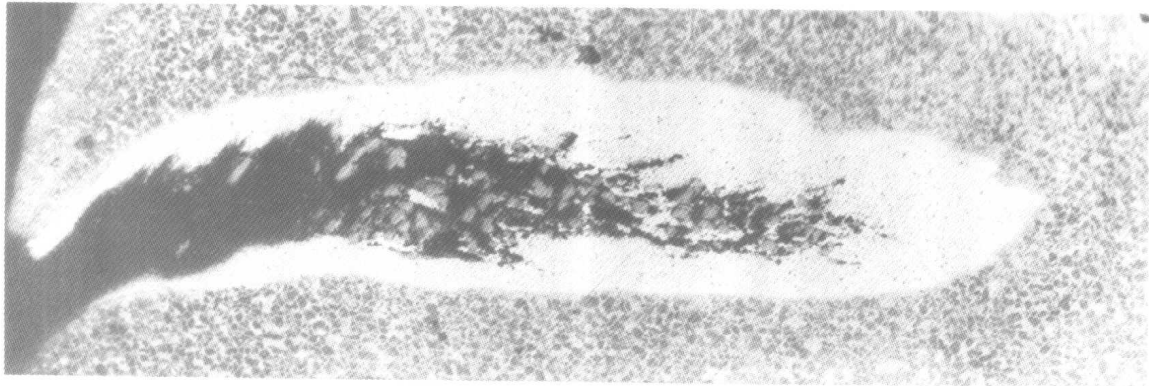
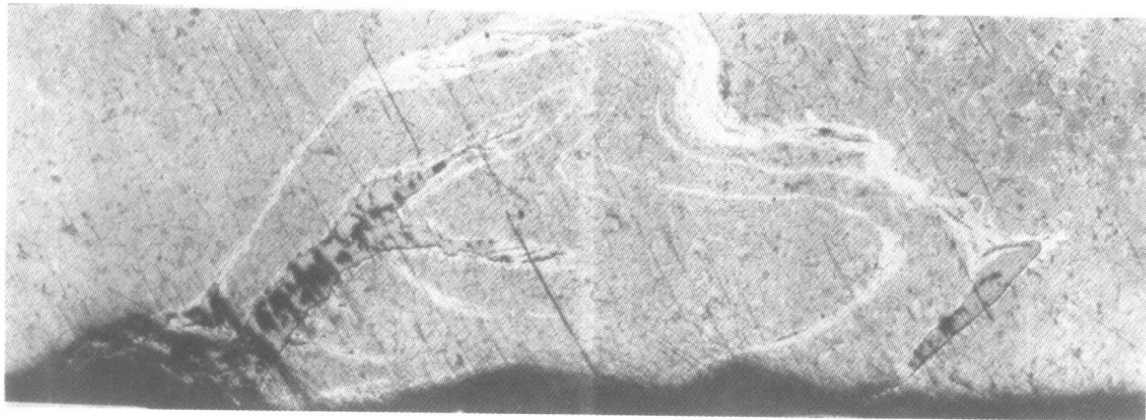


图 1-11 60Si2Mn 钢坯皮下气泡发裂形态

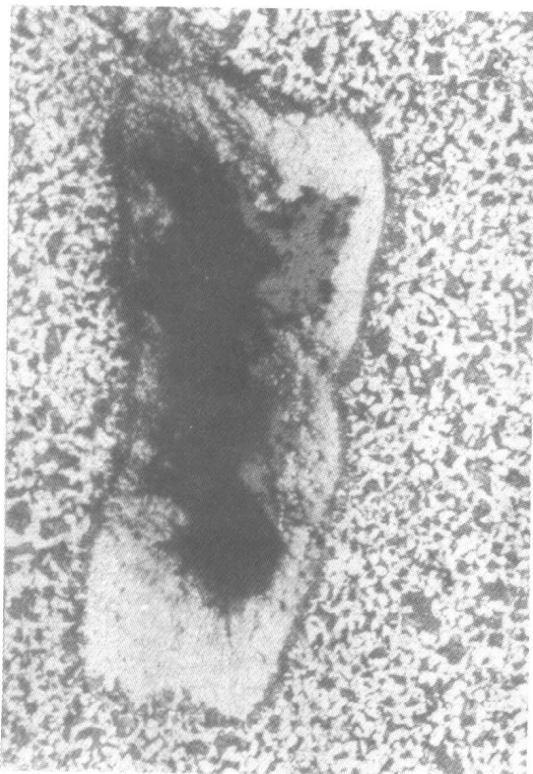


50×



80×

图 1-12 20CrMnTi 圆钢与表面相通的两个皮下气泡金相形态,弧形白色区为高温氧化铁素体



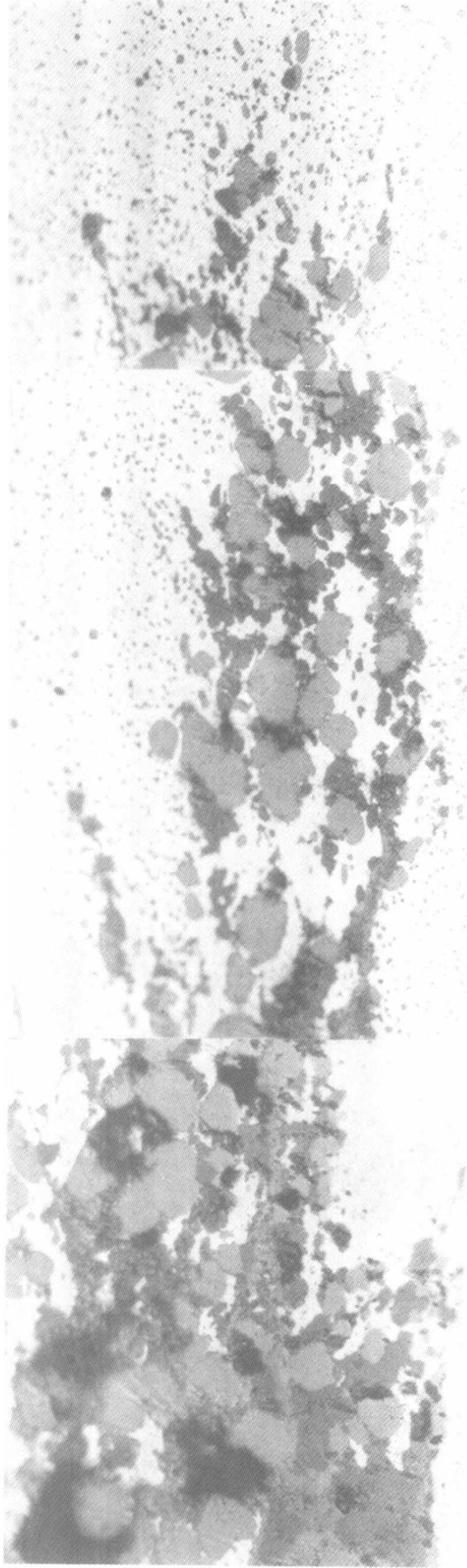
500×

图 1-13 35Mn2 钢坯皮下气泡高倍形态



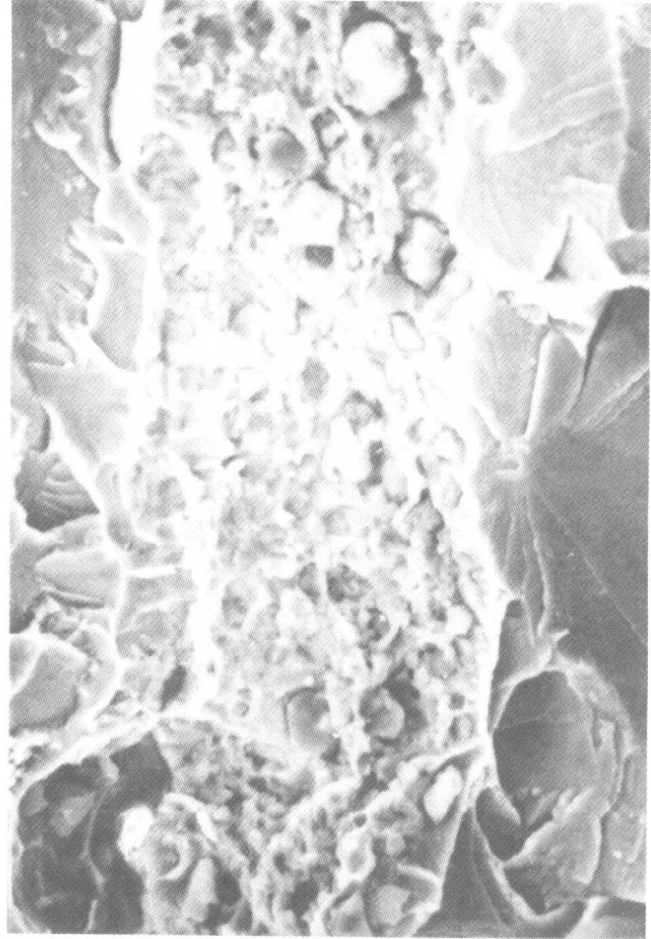
80×

图 1-14 20CrMnTi 圆钢与表面相通的皮下气泡



400×

图 1-15 20CrMnTi 圆钢一个裸露的、完整的皮下气泡中的大量高温扩散氧化生成物



810×

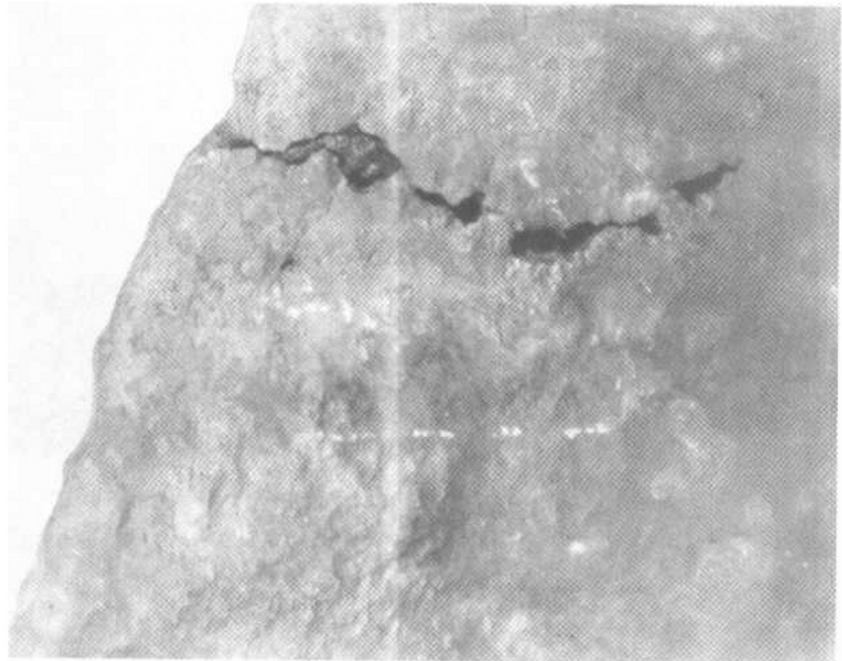
图 1-16 钢坯浅表面的呈链状分布的夹杂物条带



### 1.3.3 钢锭内部过烧裂纹

钢锭内部过烧主要是因在氧化性气氛的加热炉中加热的温度过高,或在高温下保温时间过长造成的。钢锭内部过烧后,除了晶粒长大之外,炉气中的氧气或其他氧化性气体向晶粒间扩散,使铁、碳及硫等氧化,结果在锭身表面产生粗大相互平行的横向裂纹,见图 1-17、图 1-18,严重时在裂纹处有大量熔

化粒状“渣块”,见图 1-19。金相检查发现,过烧的晶粒极其粗大,有 0.3mm 大小。过烧后产生沿晶开裂,见图 1-20,在晶粒之间形成易熔的氧化物薄膜,有明显的脱碳现象,见图 1-21。晶界有熔化特征,见图 1-22。过烧的钢锭、钢坯、锻件只能报废,是一种无法挽救的报废缺陷。



1×

图 1-17 GCr15 钢锭内部严重过烧,表面出现粗大裂纹



1×

图 1-18 钢锭内部过烧在表面产生的粗大横向裂纹