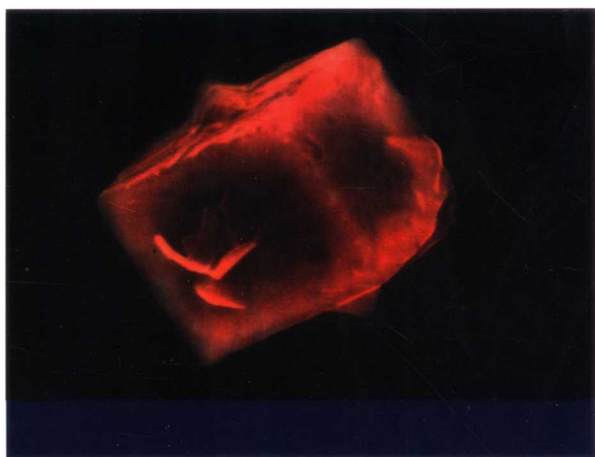


姜锡山 著

特殊钢缺陷 分析与对策



Chemical Industry Press



化学工业出版社

特殊钢缺陷分析与对策

姜锡山 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书旨在通过对特殊钢的缺陷分析来揭示特殊钢断裂事故的真正原因,进而达到避免事故发生的目的。

本书作者从事特殊钢缺陷分析工作三十多年,积累了丰富的经验。本书通过作者在实际工作中拍摄的三百多幅照片,详细介绍了特殊钢的缺陷种类、缺陷分析方法和解决与预防的办法。

本书是从事特殊钢生产、使用的科研技术人员不可多得的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

特殊钢缺陷分析与对策/姜锡山著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 7
ISBN 7-5025-9126-5

I. 特… II. 姜… III. 特殊用途钢-缺陷-分析
IV. T142.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 084685 号

特殊钢缺陷分析与对策

姜锡山 著

责任编辑: 邢涛 宋向雁

责任校对: 战河红

封面设计: 张辉

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 8½ 字数 220 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-9126-5

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

世界上绝对纯的物质是没有的，钢铁也不例外。钢的质量，除化学成分达到技术条件的要求外，减少钢中的缺陷显得尤为重要。尽管钢铁生产技术和设备已经相当发达，但是在冶炼、连铸、热加工、热处理、机械加工，甚至在使用中都可能产生各种各样的缺陷，比如残余有害低熔点元素超标、晶粒粗大、组织缺陷、晶界杂质、晶界元素偏析、晶界析出物、晶界脆化、夹杂物、气泡、疏松、合金元素偏析、氢脆、过热等冶金缺陷总是时有发生，由这些缺陷导致钢的破断事故给企业造成巨大的经济损失。

本书主要讲述特殊钢的缺陷问题。特殊钢包括轴承钢、模具钢、不锈钢、耐热钢、耐蚀钢等，通常用在动力设备、飞机的涡轮盘、坦克发动机的曲轴、汽车的发动机、大炮的炮管、自行车等中，承受旋转载荷、反复冲击载荷、高温低温载荷或者在热和腐蚀环境下工作，因此，对特殊钢的缺陷有着严格的要求，一旦缺陷超标，将可能发生恶性事故，后果十分严重，因此特殊钢缺陷分析与对策在生产 and 事故分析中十分重要。

全书体现“以晶粒为本”这一主线。从宏观的断裂行为进入钢中的细胞——晶粒，又从晶粒进入晶粒中的化学成分、组织、夹杂物、气体、冶金缺陷，分析特殊钢的断裂行为，从宏观到微观层层深入，无不与在晶粒中发生的行为有关，不同缺陷的分析也各有创新，体现了科学发展观的科学分析方法。本书中的信息资源来自作者多年来在生产、科研中亲身经历和参与的特殊钢缺陷分析与研究的科研课题。作者从亲自拍摄的大量金相照片中精选出几百幅，配之特殊钢缺陷分析与对策的解说。这些发生在特殊钢中一个个真实

的断裂故事，在您面前展示一个缺陷分析与对策的全新理念，使从事特殊钢生产、特殊钢使用、科研机构、高等院校相关专业的科技人员对特殊钢质量有一个全新的感性认识 and 了解，并从中学习到特殊钢缺陷的分析方法，供他们在特殊钢质量管理和科研工作中参考。

由于作者的知识和水平有限，书中不妥之处，敬请读者提出宝贵意见。

姜锡山

2006 年 6 月

目 录

1 特殊钢缺陷分析方法	1
1.1 特殊钢的解剖检验	2
1.1.1 钢锭、锻件等大型特殊钢件的解剖检验	2
1.1.2 钢坯、连铸板坯表面缺陷鉴定分析	3
1.1.3 特殊钢缺陷的断口检验	3
1.2 特殊钢的无损检验	6
2 特殊钢晶粒缺陷及分析	9
2.1 二维晶粒和三维晶粒	10
2.2 晶粒尺寸对特殊钢性能的影响	12
2.2.1 晶粒尺寸对特殊钢力学性能的影响	12
2.2.2 晶粒尺寸对晶界腐蚀敏感性的影响	13
2.2.3 影响特殊钢晶粒尺寸的一些主要因素	13
2.2.4 细化晶粒的途径	16
2.3 特殊钢晶粒缺陷研究——晶粒的变迁	17
2.4 特殊钢晶界缺陷的研究	26
2.4.1 晶界缺陷概述	26
2.4.2 晶界渗碳体网自身解理断裂机理研究	27
3 夹杂物缺陷及对钢性能的影响	35
3.1 非金属夹杂物的来源	36
3.2 追踪硫化物在钢中的变迁	38
3.2.1 铸态硫化物	38

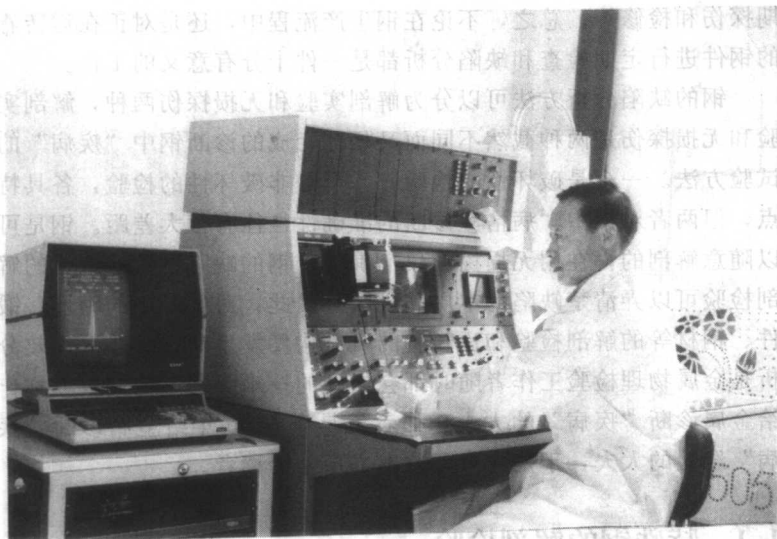
3.2.2	硫化物在热加工的变化	41
3.2.3	硫化物的分解和析出	41
3.2.4	一分为二看硫化物	45
3.3	铸钢气泡缺陷中 (Mn, Fe)S 单晶体的发现与研究	48
3.3.1	(Mn, Fe)S 单晶体的发现	48
3.3.2	(Mn, Fe)S 单晶体的晶体学特征	52
3.3.3	关于 (Mn, Fe)S 单晶体生长物理的探讨	55
3.4	钢中夹杂物显微定性分析	57
3.4.1	夹杂物的定量分析	57
3.4.2	夹杂物的鉴定	57
3.5	氮化物	87
3.6	40Cr 钢辊件夹渣鉴定分析	90
3.7	普碳钢连铸小方坯的非金属夹杂物	94
3.8	夹杂物对轴承钢接触疲劳剥落的影响	96
3.9	稀土元素对 S20A 钢硫化物形状的影响	100
3.10	夹杂物对钢性能的影响	103
3.10.1	夹杂物类别的影响	103
3.10.2	夹杂物颗粒大小及分布的影响	103
3.10.3	夹杂物形状的影响	103
3.11	破解夹杂物对钢拉伸延展性断裂的破坏之谜	104
3.12	PCrNi1Mo 钢管件断口上出现“小裂口”的观察	106
3.13	Cr5Mo 钢轴心晶间裂纹研究	108
3.14	高速钢中的夹杂物与“灰条”断口研究	110
4	特殊钢的组织缺陷及对性能的影响	113
4.1	35# 热轧圆钢的奇特“年轮”组织研究	115
4.1.1	年轮组织的特征	115
4.1.2	年轮组织的形成	116
4.2	09CuPTiRE 热轧钢板沿晶渗碳体网导致焊裂分析	117
4.3	特殊钢的几种显微组织缺陷	118

4.3.1	表面脱碳层	118
4.3.2	网状碳化物	119
4.3.3	带状组织	120
4.3.4	带状碳化物	120
4.3.5	液析碳化物	124
4.4	疏松与树枝晶	125
4.5	魏氏组织	134
4.6	铸态金属低倍组织缺陷	137
4.7	几种异常贝氏体组织	139
4.8	类珠光体	146
5	钢中气体的危害	149
5.1	钢中气体的来源及危害	150
5.1.1	氢的来源	150
5.1.2	氮的来源	151
5.1.3	氧的来源	151
5.1.4	控制氢、氮、氧的主要对策	151
5.2	37CrNiMo 钢铸件皮下气泡的研究	152
5.3	气泡的显微特征及其鉴别	159
5.4	GCr15 钢超级白点导致钢坯异常脆性断裂研究	165
5.5	氢脆缺陷研究	171
5.6	“地条钢”质量的科学解读	175
5.6.1	超高能耗污染环境, 野蛮冶炼错误浇注	175
5.6.2	气体超标杂质严重, 质量恶劣危及生命	177
6	钢中化学元素偏析对钢性能的影响	179
6.1	常存杂质元素对钢性能的影响	180
6.1.1	硫	180
6.1.2	磷	180

6.1.3	碳	181
6.1.4	硅	181
6.1.5	锰	182
6.2	铅、锡、锑、铋等低熔点有害元素对钢的破坏作用及 对策	182
6.2.1	钢中残存有害元素的来源	183
6.2.2	降低残存有害元素的冶金技术	183
6.2.3	降低残存有害元素的废钢管理措施	184
6.2.4	铅、锡、锑、铋等低熔点元素导致特殊钢“热脆” 的研究	185
6.2.5	铅、锡、锑、铋等低熔点元素导致特殊钢“回火脆” 的研究	189
6.3	CrNiMo 电渣钢中的合金元素偏析及对钢机械性能的 影响	191
6.4	Cr-Ni-Mo 钢的“白块”断口及本质研究	200
7	特殊钢缺陷与断裂行为	205
7.1	特殊钢断口的宏观形貌、微观形态及断裂机理	206
7.1.1	穿晶断口	206
7.1.2	沿晶断口	209
7.2	扫描电子显微镜在特殊钢失效分析工作中的应用	211
7.3	冰洲石晶体的破碎与钢的解理断裂	213
7.3.1	解理裂纹的萌生与扩展	214
7.3.2	解理裂纹的微观形貌特征	214
7.3.3	准解理断裂	227
7.4	韧性断裂的显微特征	228
7.5	沿晶断裂的显微特征	234
7.6	疲劳断口的微观特征	247

7.7 空气透平压缩机增速箱小齿轮输出端断裂失效分析	252
7.8 过烧断口的微观特征	254
参考文献	262

1 特殊钢缺陷分析方法



SEM505 扫描电子显微镜

本书中的扫描电子显微镜照片都是用这台仪器拍摄的，图中操作者即为本书作者。

没有“毛病”的钢是不存在的。钢锭、连铸坯、型钢、板钢、棒材、线材、钢管、钢铸件和锻件等，在钢生产的各个工序都可能产生各种特征的缺陷。在使用中的钢件也会因内部存在的“疾病”的扩大导致破坏性的事故或灾难发生。因此，在钢的生产和使用过程中，随时或定期给钢诊断“疾病”十分重要，比如火车每到一个车站，检验工人都用锤子敲击车轮等要害部件，目的就是希望通过声音的变化发现钢件的内部缺陷，重型机器承受动力负荷的部件也要定期探伤和检修等。总之，不论在钢生产流程中，还是对正在运转着的钢件进行定期检查和缺陷分析都是一件十分有意义的工作。

钢的缺陷分析方法可以分为解剖实验和无损探伤两种，解剖实验和无损探伤是两种截然不同而又相辅相成的诊断钢中“疾病”的试验方法。一个是破坏性的检验，一个是非破坏性的检验，各具特点，但两者对钢中“病情”诊断的准确性往往有很大差距。钢是可以随意解剖的，在用无损探伤仪准确确定钢的缺陷位置后进行的解剖检验可以弄清楚缺陷的本质和成因。因此，对生产中的钢坯、锻件、钢材等的解剖检验和运转着的机械构件发生断裂事故的失效分析是金属物理检验工作者随时都会遇到的技术问题，他们被人称作给金属诊断“疾病”的大夫，作者就是有着 35 年给金属诊断“疾病”经验的大夫，于是才有了这本书奉献给读者。

1.1 特殊钢的解剖检验

特殊钢的解剖检验在现代化生产中根据复杂程度和难易程度可以分为三类。

1.1.1 钢锭、锻件等大型特殊钢件的解剖检验

钢锭、锻件等大型特殊钢件的解剖检验是难度最大、工艺最复杂的检验，在新产品研制的半工业性生产中，通常都进行这种解剖检验。几吨重的钢锭、锻件被切割成许多部分，加工成各种检验试

样，进行硫印、低倍组织、金相组织和断口的检验；测试机械性能、密度、夹杂物总量和物理常数；进行淬透性、热加工性能、切削性能和寿命的实验，这样的解剖检验往往要持续一年或几年的时间。通过综合全面的检验和测试，可以比较全面评价冶金质量，调整化学成分，制订合理的热处理工艺，成为新产品试验鉴定的科学依据，然后转产投入大批量工业性生产。在这种解剖检验中，可能所有检验结果和参数都达到预先设计要求，一切都顺理成章。但是，钢生产是一件非常复杂的技术，在解剖检验中发现不可救药的“毛病”的事情也是时有发生，对这种“毛病”的性质进行缺陷鉴定分析，找出病理原因，以便改进生产工艺，这也是一件十分有价值的工作。作者曾多次参加钢锭、钢坯、锻件等大型特殊钢件的解剖检验，积累了特殊钢缺陷分析的经验，为企业带来显著的经济效益。

1.1.2 钢坯、连铸板坯表面缺陷鉴定分析

钢坯、连铸板坯、棒材表面缺陷已经成为世界性钢生产流程中的“疾病”，各冶金企业因冶金设备、生产工艺和流程有所不同，所以，钢坯、连铸板坯、棒材表面缺陷的表现形式和成因也有差异。这种缺陷性质的鉴定与钢锭、锻件等大型特殊钢件的解剖检验相比，因其取样体积小，取样容易，使得解剖检验的周期大大缩短，可以在较短的时间内确定“病情”，为减少表面废品提供了可靠的科学依据，及时反馈给有关生产企业，改进生产工艺，减轻和消除这些缺陷，提高经济效益。

1.1.3 特殊钢缺陷的断口检验

断口检验是冶金企业用来评价质量要求较高的特殊钢产品的常用检验方法。断口检验包括两大部分：宏观断口检验和微观断口检验。

(1) 宏观缺陷与断口检验 宏观断口检验不需要贵重的检验仪

器，这种方法的优点在于断裂优先在金属材料的薄弱环节处发生，有经验的检验人员用眼睛、放大镜或断口显微镜的宏观检验方法就可以确定缺陷的性质，方法简便，结果可靠，是检验钢材质量的一种通用方法。

一般结构钢、弹簧钢、轴承钢、工具钢等都规定在出厂前和用户验收时要做断口检验。断口检验较酸浸检验更能显示钢中白点、钢的过烧和过热等冶金缺陷。

试样的热处理方式决定于受检钢的类型和检验要求，其目的在于能够真实地显露钢中缺陷。断口检验的断口可分为淬火断口、退火断口、调质断口三种。

淬火断口 较易发现的缺陷有：白点、夹杂、气孔、层状、石状、萁状等。在工厂中断口检验多用淬火断口。

退火断口 在退火断口上较易显露的缺陷有黑脆、夹杂、缩孔残余等，除冶金缺陷外，还可判断钢材的晶粒均匀程度。

调质断口 兼具检验钢中缺陷（如白点、层状、气孔等）和显示钢的基本组织。

表面质量检验主要是对材料的外观、形状、表面缺陷的检验，主要有以下几种。

椭圆度 圆形截面的金属材料，在同一截面上各方向直径不等的现象。椭圆度用同一截面上最大与最小的直径差表示，对不同用途材料标准不同。

弯曲、弯曲度 弯曲就是在长度或宽度方向不平直、呈曲线形状轧制材料的总称。如果把它们的不平程度用数字表示出来，就叫弯曲度。

扭转 条形轧制材料沿纵轴扭成螺旋状。

镰刀弯（侧面弯） 指金属板、带及接近矩形截面的型材沿长度（窄面一侧）的弯曲，一面呈凹入曲线，另一面对面呈凸出曲线，称为“镰刀弯”。以凹入高度表示。

瓢曲度 指在板或带的长度及宽度方向同时出现高低起伏的波

浪现象，形成瓢曲形，叫瓢曲度。表示瓢曲程度的数值叫瓢曲度。

表面裂纹 指金属物体表层的裂纹。

耳子 由于轧辊配合不当等原因，出现的沿轧制方向延伸的突起，叫作耳子。

括伤 指钢材表面呈直线或弧形沟痕通常可以看到沟底。

结疤 指不均匀分布在钢材表面呈舌状、指甲状或鱼鳞状的薄片。

黏结 金属板、箔、带在迭轧退火时产生的层与层间点、线、面的相互粘连。经掀开后表面留有黏结痕迹，叫黏结。

氧化铁皮 氧化铁皮是指钢材在加热、轧制和冷却过程中，在表面生成的金属氧化物。

折叠 是钢坯在热轧过程中（或锻造）形成的一种表面缺陷，表面互相折合的双金属层，呈直线或曲线状重合。

麻点 指钢材表面凹凸不平的粗糙面。

皮下气泡 钢材的表面呈现无规律分布、大小不等、形状不同、周围圆滑的小凸起、破裂的凸泡呈鸡爪形裂口或舌状结疤，叫作气泡。

表面缺陷产生主要是由于生产、运输、装卸、保管等操作不当造成的。根据对使用的影响不同，有的缺陷是根本不允许存在。有些缺陷虽然允许存在，但不允许超过限度；各种表面缺陷是否允许存在，或者允许存在的程度，在相关标准中均有明确规定。

(2) 微观断口检验 对有些特殊钢缺陷，用宏观断口检验方法，凭着对断口宏观形貌特征积累的经验，是可以定性的。但是，对于特殊钢的疑难缺陷，比如金属的内部结构、夹杂物、晶界析出物、微观断裂机理等，宏观断口检验方法就无能为力了。1965年出现的扫描电子显微镜承担了微观断口检验分析的重任，经过40多年的发展，仪器不断改进完善，检验方法的积累，使微观断口检验分析发展成一门学科——显微断口术。在这一技术发展中，人们也完全遵循着由实践到认识，由人眼观察到使用仪器，由低倍到高

倍，由宏观到微观这样的认识过程。通过这一不断深化的过程，已经使断口分析成了一项重要的专门技术，并在特殊钢质量管理中发挥着越来越大的作用。

一台理想的扫描电子显微镜应具有如下素质：高的图像分辨率，图像清晰；高的信噪比，没有白斑；操作简单，性能稳定，维修容易；有各种各样的图像显示方法；能与多种分析仪器结合，比如与 X 射线能谱仪、X 射线波谱仪结合，具有一职多能的功能；对图像资料可以用计算机进行处理，储存和输出。

这些素质使扫描电子显微镜能够完成对断口从低倍（5 倍）到 high 倍（50 万倍）的连续彩色电视扫描观察，二次电子分辨率可达 10nm（100Å），甚至可以记录快速变化的断裂动态过程；可以进行断口的立体观察和分析，获得立体照片；实现二次电子图像、背反射电子图像、吸收电子图像和 X 射线成分分布图像的迭合，对缺陷给出一个科学的结论；较大的样品室，除了可以对 100mm×100mm 的试样或实物进行表面观察外，还能组装多种用途的进行动态观察的样品台。可以说扫描电子显微镜是一种能同时进行形貌、成分和结构分析的综合仪器，对钢的微观断裂机理研究、特殊钢缺陷分析、设备事故的失效分析功不可没，是无处不在的计算技术，对钢铁科学作出的重大贡献。

1.2 特殊钢的无损检验

特殊钢的无损检验主要用在钢材生产流水线上的在线探伤检验和设备在运转中的定期无损探伤，以期发现在生产线上的有缺陷钢材和在使用中有缺陷的钢件。

无损探伤仪器发展很快，根据用途和使用环境主要有超声波探伤仪、X 射线探伤仪、磁粉探伤仪、渗透探伤仪、涡流探伤仪等，其中超声波探伤仪是在检验中最常用的无损探伤仪器。

超声波探伤仪的种类繁多，但在实际的探伤过程，脉冲反射式

超声波探伤仪应用的最为广泛。一般在均匀的材料中，缺陷的存在将造成材料的不连续，这种不连续往往又造成声阻抗的不一致，由超声波反射原理我们知道，超声波在两种不同声阻抗的介质界面上将会发生反射，反射回来的能量大小与界面两边介质声阻抗的差异和界面的取向、大小有关。脉冲反射式超声波探伤仪就是根据这个原理设计的。超声波探伤仪能够快速便捷、无损伤、精确地对工件内部及表面多种缺陷（焊缝、裂纹、夹杂、气孔等）进行检测、定位、评估和诊断，从而预防和避免安全事故的发生，具有重大的社会经济意义。其既可以用于实验室，也可以用于工程现场，广泛应用于锅炉、压力容器、航天、航空、电力、石油、化工、海洋石油、管道、军工、船舶制造、汽车、机械制造、冶金、金属加工业、钢结构、铁路交通、核能电力等行业。

随着科学技术的进步和计算机技术的广泛应用，超声波探伤仪的技术性能不断提高，功能不断增加，自动化程度越来越高，技术先进的数字化智能化的仪器不断涌现。这种仪器以高精度的运算、控制和逻辑判断功能来替代大量人的体力和脑力劳动，减少了人为因素造成的误差，提高了检测的可靠性，较好地解决了记录存档问题，具有良好的发展前景。

20 世纪 70 年代微型计算机的问世和大规模集成电路的发展，使计算机技术开始进入超声波探伤领域，但那时只是利用传统探伤仪通过某种接口与微型计算机联机完成某种特定工件的自动探伤或对波形进行一些信号处理。到了 20 世纪 80 年代，人们开始研究超声回波信号的数字化及有关数据处理。后来在传统模拟仪器的基础上，利用数字仪器的特点，增加了对超声波探伤来说极为重要的波形记录、存储和分析等功能，可对动态波形进行全程记录，并通过具有手动 B 扫描功能示意性地显示工作断面图像。关于人机联系方式，主要有菜单式和功能键方式。菜单式不受仪器按键限制，对话功能较强，但操作较繁琐，不易为探伤人员接受。关于波形显示方式有全数字式和数字模拟混合方式。前者显示数字波形，通常可