

优质钢缺陷

赵坚 赵琳 主编



冶金工业出版社

优质钢缺陷

赵 坚 赵 琳 主编

冶金工业出版社

一九八二年十月六日

(京)新登字 036号

内 容 提 要

本书以大冶钢厂历年来所发现的各种优质钢中的冶金缺陷为主,较详细地介绍了各种优质钢缺陷的形貌特征、检验方法及其对钢性能的影响,以及预防和改进措施等,内容丰富、数据详实,是一本以工厂生产实践为基础,并加以提高从理论上进行分析和阐述的专著。书中很多资料是第一次发表,除钢材中各种冶金缺陷以外,还介绍了铸钢中的缺陷。

本书可供在生产第一线从事优质钢生产和研究工作的工程技术人员阅读,对于从事金属材料研究的科技人员和大专院校金属材料、金相热处理和金属物理等专业的师生也有参考价值。

优 质 钢 缺 陷

赵 坚 赵 琳 主 编

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 11 $\frac{1}{4}$ 字数 310 千字

1991年12月第一版 1991年12月第一次印刷

印数00,001~2,000册

ISBN 7-5024-0851-7

TG·123 定价9.00元

前 言

新中国成立四十年来，我国钢铁工业得到了飞速的发展，钢产量已由解放时的几十万吨发展到6000万吨，居世界第四位。随着四化建设事业的发展，国民经济和国防建设各部门对钢材，特别是优质钢材的数量、品种和质量要求愈来愈高。尽管我们已经取得很大成绩，但当前的情况仍是数量不够用，品种不全，质量较差，不能满足日益增长的需求。因此，国家每年还不得不花费大量外汇进口钢材。

钢的质量好坏直接影响到其在服役过程中的使用寿命及安全性。因此，改善和提高钢的质量一直是冶金工作者的光荣任务之一。

钢材质量与其中含有冶金缺陷相关。为提高钢材质量就要了解它所含缺陷的性质及其形成原因，进而确定消除缺陷的办法，改进和提高钢的质量。

大冶钢厂是我国历史最悠久，规模最大的特殊钢厂之一，也是我国最重要的优质钢生产基地之一。

本书以大冶钢厂历年来所发现的各种冶金缺陷及其分析为基础，参考国内外有关研究成果，综合加以评述。在编写过程中，尽可能地选用原始数据和资料，力求全面，遇有争议的地方，也如实地介绍各方观点，以便读者自己加以鉴别。

除钢材中各种冶金缺陷以外，还以一章的篇幅介绍了铸钢缺陷。尽管铸钢件主要是在机械厂生产的，但冶金厂所生产的电渣熔铸件正日益受到重视。因此，增加这部分内容对全面了解钢中缺陷是有益处的。

全书分为九章。第一章绪论，概括地介绍了钢的分类方法，优质钢生产状况及存在问题。第二章钢中缺陷检验及研究方法，除传统的常规检验方法以外，还较详细地介绍了近代物理检验和研究方法。其余各章较全面地介绍了各种常见的优质钢缺陷。

本书第一、二、九章为赵坚编写，罗光国参加了第二章2.1节的编写。第三章为赵琳编写，其中3.2、3.5、3.8节为王河清编写，3.3节为李启龙编写，3.6节为常曙光编写，3.7节为邓德庸编写。第四、七章为王河清编写，4.6节为赵坚编写。第五章为汪慈榕和赵琳编写。第六章为李民编写。第八章为王河清和赵琳编写。

全书经吴宝榕高级工程师审阅并提出宝贵修改意见，在搜集、整理资料及编写过程中得到大冶钢厂钢研所张家福所长的大力支持，冶金部钢铁研究总院蔡淑卿高级工程师在清稿和定稿过程中做了大量工作，在此一并表示衷心地感谢。

由于编者水平所限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评、指正。

编 者

1989年11月

目 录

前 言

第一章 绪 论	1
---------------	---

参考文献	12
------------	----

第二章 钢中缺陷的检验和研究方法	13
------------------------	----

2.1 钢中缺陷的传统检验方法	13
-----------------------	----

2.1.1 低倍酸浸检验	13
--------------------	----

2.1.2 断口检验	19
------------------	----

2.1.3 硫印检验	25
------------------	----

2.1.4 塔形试验	26
------------------	----

2.1.5 金相检验	29
------------------	----

2.2 现代分析技术及其在缺陷分析中的应用	33
-----------------------------	----

2.2.1 现代金相技术	33
--------------------	----

2.2.2 X射线衍射技术	35
---------------------	----

2.2.3 透射电子显微术	38
---------------------	----

2.2.4 扫描电子显微术	48
---------------------	----

2.2.5 微区域成分分析	73
---------------------	----

2.2.6 表面和界面分析	81
---------------------	----

2.2.7 超声检测技术	91
--------------------	----

参考文献	92
------------	----

第三章 钢中的宏观偏析	94
-------------------	----

3.1 钢液的凝固	94
-----------------	----

3.1.1 钢的结晶	94
3.1.2 镇静钢液的凝固	101
3.1.3 体积收缩	108
3.1.4 结晶偏析	115
3.2 方框形偏析	124
3.3 点状偏析	127
3.4 奥氏体不锈钢的易腐蚀区	140
3.5 下注镇静钢的锭尾偏析	143
3.6 亮点、亮线	147
3.7 高速工具钢的偏析——碳化物剥落	151
3.8 轴心碳偏析	166
3.9 电渣钢的波纹状偏析	168
参考文献	172

第四章 气体在钢中形成的缺陷..... 173

4.1 钢中气体的来源.....	173
4.1.1 钢中的氢	174
4.1.2 钢中的氮	176
4.1.3 钢中的氧	178
4.2 气体对钢质量的影响	179
4.2.1 氢的影响	179
4.2.2 氮的影响	180
4.2.3 氧的影响	181
4.3 钢中由气体所造成的缺陷	182
4.3.1 皮下气泡	182
4.3.2 内部气泡和点状偏析	184
4.3.3 白点	190
4.4 钢的脱氧去气	216
4.5 降低钢中气体的具体措施	218
参考文献	219

第五章 钢中的非金属夹杂物	222
5.1 非金属夹杂物的来源	222
5.2 非金属夹杂物在热加工过程中的变化	224
5.3 夹杂物引起的缺陷	237
5.4 钛的夹杂物	250
5.5 稀土夹杂	255
参考文献	261
第六章 热加工造成的缺陷	263
6.1 表皮裂纹	263
6.2 高速工具钢的锻、轧裂纹	274
6.3 轴心晶间裂纹	278
6.4 显微空隙	280
6.5 晶粒粗大	282
6.6 折叠	284
参考文献	285
第七章 由化学成分引起的缺陷	286
7.1 撕裂状断口	286
7.2 黑脆断口	291
参考文献	292
第八章 钢的过热和过烧	293
8.1 钢的过热	293
8.1.1 过热对奥氏体晶粒度的影响	293
8.1.2 钢过热后的金相组织	297
8.1.3 过热对钢机械性能的影响	301
8.1.4 过热钢的蔡状断口	309
8.1.5 过热钢的石状断口	318

8.2 钢的过烧	337
8.3 过热的改善与过热过烧的防止措施	339
参考文献	342

第九章 铸钢缺陷 344

9.1 气孔与疏松	345
9.2 偏析	349
9.3 夹杂	351
9.4 裂纹	353
9.5 贝壳状断口	355
参考文献	367

第一章

绪 论

钢在我们日常生活中到处可见，可以说，在今日的人类活动中，不能没有钢，人人都与钢的存在有关。钢的重要性是人所共知的，它是国民经济和国防建设中头等重要的材料。

钢的种类很多，无论是国内还是国外，均还没有一个统一分类方法。日本、联邦德国、法国、瑞典、意大利、欧洲共同体等将钢分为普通钢和特殊钢，而苏联、美国、英国和英联邦国家则分为碳素钢和合金钢。既使同称为特殊钢或合金钢的，其具体内容也不完全一致，如美国把高碳钢划在合金钢范畴之内。我国在1979年以前，把钢划分为普通钢和优质钢，而且，一般将优质钢称为特殊钢，这一点与国外的特殊钢在范围上很不一致。为了便于同国外比较和交流，从1979年起，从优质钢中划分出了特殊钢。现在我国的特殊钢范围，大体上与日本、联邦德国等相一致。在特殊钢中，主要为合金钢，约占特殊钢的80%，其中包括合金结构钢、合金工具钢、轴承钢、高速工具钢、不锈钢、耐热钢、合金弹簧钢、特种合金等，余为特殊碳素钢。

我国1988年钢总产量为5943万吨，其中普通钢为4007.1万吨，占67%，优质钢1935.9万吨，占33%。而在优质钢中，合金钢产量为390.7万吨，占优质钢的20%。

在我国钢的分类方法很多，根据钢的化学成分、品质、冶炼方法、金相组织和用途的不同，一般对钢进行不同的分类。例如，在钢厂为管理方便，一般按化学成分和冶炼方法分类；而用户则多习惯于按用途和冶炼方法分类；检验人员习惯按金相组织分类；科研人员多习惯于按化学成分分类等等^[1]。

下面分别介绍各种分类方法。

1. 按钢的化学成分分类

(1) 碳素钢

其中包括:

- i 工业纯铁 (碳含量 $\leq 0.04\%$);
- ii 低碳钢 (碳含量 $\leq 0.25\%$);
- iii 中碳钢 (碳含量在 $0.25\sim 0.60\%$ 之间);
- iv 高碳钢 (碳含量 $> 0.60\%$)。

(2) 合金钢

其中包括:

- i 低合金钢 (合金元素总含量 $\leq 5\%$);
- ii 中合金钢 (合金元素总含量 $> 5\sim 10\%$);
- iii 高合金钢 (合金元素总含量 $> 10\%$)。

2. 按钢的品质分类

(1) 普通钢 (磷含量 $\leq 0.045\%$, 硫含量 $\leq 0.055\%$, 或磷、硫含量均 $\leq 0.050\%$)

(2) 优质钢 (磷、硫含量均 $\leq 0.040\%$)

(3) 高级优质钢 (磷含量 $\leq 0.035\%$, 硫含量 $\leq 0.030\%$)

3. 按钢的冶炼方法分类

(1) 按炉别分类:

- i 平炉钢 (酸性平炉钢, 碱性平炉钢);
- ii 转炉钢 (酸性转炉钢, 碱性转炉钢);
- iii 电炉钢 (电弧炉钢, 电渣炉钢, 感应炉或真空感应炉钢, 真空自耗炉钢, 电子束炉钢)。

(2) 按脱氧程度和浇注制度分类:

- i 沸腾钢;
- ii 镇静钢;
- iii 半镇静钢。

4. 按钢的金相组织分类

(1) 亚共析钢 (珠光体 + 铁素体)

- (2) 共析钢 (珠光体)
- (3) 过共析钢 (珠光体 + 碳化物)
- (4) 莱氏体钢 (铸态组织为碳化物 + 奥氏体的共晶体)
- (5) 正火状态的珠光体钢
- (6) 正火状态的贝氏体钢
- (7) 正火状态的马氏体钢
- (8) 正火状态的奥氏体钢
- (9) 无相变或部分发生相变的铁素体钢
- (10) 无相变或部分发生相变的奥氏体钢
- (11) 无相变或部分发生相变的复相钢 (如半铁素体钢或半奥氏体钢)

5. 按钢的用途分类

- (1) 建筑用钢 (普通钢, 低合金高强度钢, 钢筋钢)
- (2) 工程用钢
 - i 机械制造用钢 (其中包括调质结构钢, 表面硬化结构钢, 易切结构钢和冷塑性成形钢——冷冲压、冷镦、冷挤压钢);
 - ii 弹簧钢;
 - iii 轴承钢。
- (3) 工具钢 (碳素工具钢, 合金工具钢, 高速工具钢)
- (4) 特殊性能钢
 - i 不锈钢耐酸钢;
 - ii 耐热钢——抗氧化钢, 热强钢;
 - iii 电热合金;
 - iv 耐磨钢;
 - v 低温用钢;
 - vi 电工钢。
- (5) 专业用钢——如船舶钢、桥梁钢、压力容器钢、钢轨钢、锅炉钢等

根据不同需要, 上述分类常混合使用。

显然，优质钢的范围相当广泛，实际上囊括了除普通钢以外的所有钢。优质钢的概念源于钢的质量，表示对钢有更严格的技术要求，其主要标志是对钢的化学成分，首先是对有害杂质元素，如磷和硫的含量，有更严格的要求。具体界限，各国不尽相同，例如，在苏联，对不同质量钢中的临界磷和硫含量（%）规定为：

		P	S
普通钢	不大于	0.040	0.050
优质钢	不大于	0.035	0.035
高级优质钢	不大于	0.025	0.025
特高优质钢	不大于	0.025	0.015

普通钢仅与碳素钢有关，而其余三种优质钢可与任何合金钢相关。

根据我国国家标准GB221—79《钢铁产品牌号表示方法》规定，优质碳素结构钢，采用阿拉伯数字或阿拉伯数字和英文字母符号表示。阿拉伯数字表示平均含碳量（以万分之几计）。

沸腾钢和半镇静钢在牌号尾部分别加符号“F”和“b”，镇静钢不标符号。例如，平均含碳量为0.10%的半镇静钢，牌号表示为“10b”。

含锰量较高的优质碳素结构钢，在阿拉伯数字后标出锰元素符号。例如，平均含碳量为0.50%、含锰量为0.70~1.00%的镇静钢，其牌号表示为“50Mn”。

高级优质碳素结构钢，在牌号尾部加符号“A”。例如，平均含碳量为0.20%的高级优质碳素结构钢，其牌号表示为“20A”。

专门用途的优质碳素结构钢，采用阿拉伯数字和代表产品用途的符号表示。例如，平均含碳量为0.20%的锅炉钢，其牌号表示为“20g”。

对碳素工具钢，阿拉伯数字表示平均含碳量（以千分之几计）。普通含锰量碳素工具钢，在“T”后为阿拉伯数字。例如，平均含碳量为0.90%的碳素工具钢，其牌号表示为“T9”。较高

含锰量碳素工具钢，在符号“T”和阿拉伯数字后标出锰元素符号。例如，平均含碳量为0.80%，含锰量为0.40~0.60%的碳素工具钢，其牌号表示为“T8Mn”。

高级优质碳素工具钢，在牌号尾部加符号“A”。例如，平均含碳量为1.2%的高级优质碳素工具钢，其牌号为“T12A”。

对易切削钢，阿拉伯数字表示平均碳含量（以万分之几计）。硫易切削钢或硫磷易切削钢，牌号中不标出易切削元素符号，而含钙、铅、硒等易切削元素的易切钢，在牌号尾部标出易切削元素符号。

对含锰量较高的易切削碳素结构钢，在符号Y和阿拉伯数字后标出锰元素符号。例如，平均含碳量为0.40%，含锰量为1.20~1.55%的易切削碳素结构钢，其牌号表示为“Y40Mn”。

对电工用硅钢，阿拉伯数字表示典型产品的最大单位铁损值的十倍。

热轧硅钢，冷轧无取向硅钢和冷轧取向硅钢，在牌号头部分别加符号“DR”、“DW”和“DQ”，之后为阿拉伯数字。在牌号尾部加符号“G”者，表示是在高频下检测的；未加符号“G”者，则表示是在频率为50周波下检测的。例如，冷轧无取向硅钢典型产品在P10/50时的最大单位铁损为1.5瓦特/公斤时，其牌号表示为DW15。

对于合金钢，一般在牌号头部用阿拉伯数字表示含碳量。对低合金钢，合金结构钢，合金弹簧钢等，用二位数字表示平均含碳量（以万分之几计）。对不锈钢、耐酸钢、耐热钢等，一般用一位数字表示平均含碳量（以千分之几计）。平均含碳量小于千分之一的用“0”表示；含碳量不大于0.03%的用“00”表示。

对合金工具钢，高速工具钢、高碳轴承钢等，一般不标出含碳量数字；若平均含碳量小于1.00%时，可用一位数字表示（以千分之几计）。

合金钢中平均合金含量小于1.50%时，在牌号中仅标明元素，一般不标明含量；而平均含量为1.50~2.49%、2.50~

3.49%...22.50~23.49%.....时, 分别写为2、3...23.....。

高碳铬轴承钢, 其铬含量用千分之几计, 并在牌号头部加符号“G”。例如, 平均含铬量为1.50%的轴承钢, 其牌号表示为“GCr15”。

低铬(平均含铬量小于1%)合金工具钢, 其铬含量亦用千分之几计, 但在含量数值之前加一数字“0”。例如, 平均含铬量为0.60%的合金工具钢, 其牌号表示为“Cr06”。

高级优质合金结构钢, 弹簧钢等, 在牌号尾部加符号“A”。

专门用途的低合金钢, 合金结构钢, 在牌号头部(或尾部)加代表该钢用途的符号。例如, 铆螺用30CrMnSi钢, 其牌号表示为ML30CrMnSi。

焊接用钢及合金, 在钢和合金牌号头部加符号H。例如, 焊接用合金结构钢30CrMnSiA, 其牌号表示为“H30CrMnSiA”。

铸钢、碳素铸钢、合金结构铸钢、不锈钢耐酸铸钢、耐热铸钢等, 在牌号头部加符号“ZG”, 符号后为阿拉伯数字或阿拉伯数字和合金元素符号, 表示钢的主要成分及含量, 合金元素表示方法与同类变形钢相同。例如, 平均含碳量为0.45%的碳素铸钢, 其牌号表示为“ZG45”。与变形的不锈钢耐酸钢“1Cr18Ni9Ti”成分相近的铸钢, 其牌号表示为“ZG1Cr18Ni9Ti”。轧辊用铸钢, 在牌号头部加符号“Zu”。

我国生产的优质钢材品种, 常用产品及其规格有^[2],

1. 优质钢板

品 种	钢板名称	厚度, mm
热轧优质钢厚钢板(厚度>4mm), 热轧优质钢薄钢板(厚度≤4mm), 冷 轧优质钢薄钢板(厚度≤4mm)	碳素结构钢钢板	0.5~120
	合金结构钢钢板	1.0~50
	碳素和合金工具 钢钢板	0.8~8

续表

品 种	钢板名称	厚度, mm
热轧优质钢厚钢板(厚度 $>4\text{mm}$), 热轧优质钢薄钢板(厚度 $\leq 4\text{mm}$), 冷 轧优质钢薄钢板(厚度 $\leq 4\text{mm}$)	高速工具钢钢板	1.0~8
	弹簧钢钢板	1.0~20
	滚动轴承钢钢板	1.0~8
	不锈钢钢板	0.5~20
	耐热钢钢板	4.5~8

2. 优质钢带

品 种	钢带名称	厚度(mm)	宽度, mm
热轧优质钢钢带 冷轧优质钢钢带	碳素结构钢钢带	2.5~7 (热轧)	41~520
		0.05~3 (冷轧)	5~300
	合金结构钢钢带	0.25~3 (冷轧)	10~120
		2.75~7 (热轧)	15~300
	碳素和合金工具 钢钢带	0.05~3 (冷轧)	5~300
	高速工具钢钢带	1~1.5(冷轧)	50~100
		2.5~6 (热轧)	60~160
	弹簧钢钢带	0.05~3 (冷轧)	10~200
	热处理弹簧钢钢带	0.1~1.5(冷轧)	5~105
	不锈钢钢带	2.5~9 (热轧)	15~300
		0.05~2.5(冷轧)	10~400

3. 优质型钢

品 种	型钢名称	规格, mm
碳素和合金结构钢, 易切结构钢, 碳素和合金工具钢, 高速工具钢, 弹簧钢, 滚动轴承钢, 不锈钢, 耐热钢, 中空钢, 冷敏钢	碳素结构钢热轧材:	
	圆 钢	$\phi 8 \sim 220$
	方 钢	10~120
	六 角 钢	9~50
	扁 钢	$3 \times 25 \sim 36 \times 100$
	碳素结构钢锻材:	
	圆 钢	$\phi 55 \sim 250$
	方 钢	55~250
	扁 钢	$90 \times 100 \sim 140 \times 150$
	碳素结构钢冷拉材:	
	圆 钢	$\phi 5 \sim 80$
	方 钢	6~25
	六 角 钢	6~65
	扁 钢	$5.5 \times 20 \sim 18 \times 29$

4. 优质钢管

品 种	钢管名称	外径, mm
冷拔(轧)无缝钢管和异形无缝钢管 (包括方形、各种三角形、六角形、矩形、菱形、梯形、半圆形、椭圆形、梅花形、双凹形、双凸形等)	锅炉用无缝钢管	57~377(热轧) 14~159(冷拔)
	锅炉用高压无缝钢管	57~245(热轧) 10~89(冷拔)
	高压油管无缝钢管	6~7(冷拔)
	不锈钢耐酸钢无缝钢管	57~133(热轧) 6~76(冷拔)
	滚珠轴承钢无缝钢管	70~114(热轧) 32~75(冷拔)
	汽车半轴套管无缝钢管	77(热轧)
	碳素结构钢毛细管	1.5~5(冷拔)