

# 钢中非金属 夹杂物

NONFERROUS INCLUSION IN STEEL

姜锡山 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 钢中非金属夹杂物

姜锡山 编著

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2011

## 内 容 提 要

本书是钢中非金属夹杂物研究的一本现代版综合性著作, 以一个全新的视角, 应用扫描电镜等先进仪器, 对钢中非金属夹杂物给予一个全新的描述和诠释。第1章钢中非金属夹杂物图谱, 以最新的国家钢中非金属夹杂物评级标准为依据, 按照A、B、C、D、DS五类夹杂物, 以图谱的形式展示各种夹杂物的形貌特征、尺寸、分布、定性定量数据, 便于同行快速查阅; 第2章钢中非金属夹杂物与裂纹萌生, 将与夹杂物有关的失效问题用生动的显微照片展示出来, 使裂纹萌生理论更直观形象地表现出来, 提高失效分析的准确度; 第3章钢中非金属夹杂物变化规律, 以图片的形式显示塑性、脆性、半脆性和不变形夹杂物在热加工和冷加工的形态变化特征, 同时也介绍了夹杂物变质剂的变性规律; 第4章典型钢中非金属夹杂物分析, 列出具有代表性的某些钢种非金属夹杂物的特殊规律, 揭示出合金元素对钢中非金属夹杂物成分的影响。

本书可供从事冶金、机械、检验的科研、工程技术人员以及有关高等院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

钢中非金属夹杂物/姜锡山编著. —北京: 冶金工业出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-5024-5573-6

I. ①钢… II. ①姜… III. ①钢—非金属夹杂(金属缺陷)—研究 IV. ①TG142.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第133808号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 张熙莹 常国平 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5573-6

北京盛通印刷股份有限公司印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011年8月第1版, 2011年8月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 29.5印张; 712千字; 457页

150.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

# 前 言

钢中非金属夹杂物是钢中夹带的各种非金属物质颗粒的统称，或指其存在状态不受一般热处理显著影响的非金属化合物。

非金属夹杂物对钢材质量的重要作用，国际钢铁协会给出了一个最新的诠释：当钢中的非金属夹杂物直接或间接地影响产品的生产性能或使用性能时，该钢就不是洁净钢；而如果非金属夹杂物的数量、尺寸或分布对产品的性能都没有影响，那么这种钢就可以被认为是洁净钢。一般根据最终产品的应用来对洁净钢进行定义，最终产品越薄对钢的洁净度要求越高。可以说，非金属夹杂物与洁净度是评价钢质量两种不同的表述方式，相辅相成，密不可分。

炼钢有两个基本术语，即氧化和二次氧化，它们与钢中非金属夹杂物的产生密切相关。

钢中含有氧、氮、硫等元素，它们的溶解度在高温下较高，而在室温下却很低。氧化就是指当钢中加入脱氧元素（脱氧剂）时，钢中的溶解氧、氮、硫与脱氧元素发生反应生成夹杂物沉淀出来，它们在钢冷却和凝固时析出并同铁和其他金属元素等结合成各种单相夹杂物、复相夹杂物、固溶体、化合物、共生物等，成为氧化或脱氧产物。其典型特征是尺寸较小，一般为 $1\sim 5\mu\text{m}$ ，数目多，分布均匀，碰撞长大后尺寸可达 $5\sim 30\mu\text{m}$ ，如铝镇静钢中的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ，硅镇静钢中的 $2\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ ，钙处理钢中的 $m\text{CaO}\cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{X}$ ，钛处理钢中的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiN}$ 、 $\text{TiO}_2$ 。氧化或脱氧生成的夹杂物经历了复杂的物理化学过程：脱氧剂加入钢液中以后，脱氧元素和氧发生化学反应生成不溶于钢的氧化物；有的脱氧元素也能和硫、氮化合生成硫化物、氮化物。这类化合物称为内生夹杂物（原生夹杂物或初生夹杂物）。经钢包精炼搅拌，除极少数颗粒细小的夹杂物外，大多数（85%）内生夹杂物都能从钢液中上浮出来进入渣相。而当钢液冷却和凝固时，由于溶解度下降和氧、硫等的偏析，在凝固过程中又会产生新的氧化物和硫化物等，称为次生夹杂物。次生夹杂物难以从钢中去除而残留在树枝晶间或最后析出于晶界上。

二次氧化是指钢水中的合金元素与空气中的氧或者与炉渣、耐火材料中的氧化物发生化学反应，生成新的氧化物。浇铸过程中二次氧化源包括：注流与空气接触吸氧、注流卷入空气吸氧、钢水裸露吸氧。钢水与炉渣、钢包顶渣、中间包覆盖剂、连铸保护渣等也会发生二次氧化。钢水与耐火材料的二次氧化还包括钢水与中间包衬和浸入式水口的反应。二次氧化生成的外来物质也可能混入钢中形成夹杂物，成为外来夹杂物，也属于非金属夹杂物。外来夹杂物粒径较大，大于 $50\mu\text{m}$ ，甚至几百微米，组成复杂，多为复合夹杂物或复相夹杂物，对产品性能的危害大。一次脱氧产生的内生夹杂物、二次氧化生成的外来夹杂物、卷渣生成的夹杂物一起是造成连铸坯和钢材缺陷的主要原因。

钢中有非金属夹杂物存在，破坏了钢基体的连续性，使钢的品质变坏。在特殊情况下，有的夹杂物有利于钢的某种性能（如切削性），但这只是在特殊的条件下。一般来说，非金属夹杂物对钢的力学性能、物理性能和化学性能都有相当大的危害。用通俗的话来说，含夹杂物多的钢是“脏”的，洁净钢所含有的夹杂物很少。然而洁净钢是一个相对的概念，钢的洁净与否和它的用途有关，也和夹杂物的形状、颗粒大小和可塑性等有关。数量虽少但颗粒较大的夹杂物往往比数量较多但尺寸细小的夹杂物危害更大；形状不规则的比球形的危害大。而对于精密的细小零件，表面上的微小夹杂物也有很大的害处。所以对非金属夹杂物不仅要研究怎样减少它的含量，也要研究它的形态和分布。非金属夹杂物类型，可从不同的观察角度进行分类。例如，按照化学成分可分为氧化物、硫化物和氮化物等；按照夹杂物的塑性可分为塑性夹杂物、脆性夹杂物和不变形夹杂物；按照夹杂物尺寸可分为大型夹杂物和微型夹杂物等。夹杂物的性质和形态均和它的成分有关。

钢中非金属夹杂物的分类可依据众多标准，如 ASTM、DIN、ISO、ENV、SIS 及我国《钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》等。这些标准中阐述的方法均采用光学显微镜的观测数据结果进行夹杂物的分类。由于钢中非金属夹杂物对钢的性能有多方面的影响，而夹杂物的来源又是各式各样的，难以准确鉴定，因此，钢中非金属夹杂物的研究一直是炼钢中的重要课题。对钢中非金属夹杂物的分析鉴定技术随着显微分析仪器的进步也在不断地发展。采用扫描电子显微镜（SEM）与 X 射线能谱仪（EDS），不但可以得到比光学显微镜观察所得到的更清晰的夹杂物形貌图像及其化学成分的信息，包

括非金属夹杂物的 X 射线能谱图、X 射线元素定量分析、X 射线元素彩色形貌图、X 射线元素彩色面分布图，而且还可以全自动收集一个视场中的数个非金属夹杂物的上述数据信息，操作者可以离开设备，无需人工一个一个地繁琐操作。

在分析鉴定钢中非金属夹杂物中，一个值得关注的有趣现象是钢中非金属夹杂物的名称很多来自自然界矿物的名称，如  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  矿物学称刚玉， $\text{SiO}_2$  称石英， $\text{MnO}$  称方锰矿， $\text{Fe}_3\text{O}_4$  称为磁铁矿， $\text{Fe}_2\text{O}_3$  称赤铁矿；硅酸盐类夹杂物通常称某某橄榄石（因其自然界中硅酸盐类矿物和橄榄绿颜色相似而得名），如  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$  称铁橄榄石， $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$  称顽辉石， $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$  称锰橄榄石， $3\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$  称锰铝橄榄石， $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$  称镁橄榄石， $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$  称堇青石， $3\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$  称镁铝硅橄榄石等；而尖晶石类夹杂物一般称谓是某某榴石（自然界中的矿物尖晶石与石榴籽的形状、颜色十分相似，故名“石榴石”），如镁尖晶石  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  称镁铝榴石， $4\text{MgO} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  称假蓝宝石等，自然界中的这些矿物人们早已获取了它们的晶体结构、物理化学性质等信息，并将这些数据编汇成册。钢生产是将自然界中铁矿石、萤石、石灰石、锰矿石、镍矿石等矿石通过一系列的物理化学变化和热轧等加工过程变成有用的钢材，钢中非金属夹杂物就是这种变化的产物，或者说是自然界中矿石所含元素在冶炼中的重新组合与分配，在对这些非金属夹杂物的鉴定与分析中，特别是近 50 年来 X 射线能谱仪、电子探针的应用，人们发现钢中非金属夹杂物与某些自然矿石在晶体结构、物理化学性质有着惊人的相似和天然的联系，在鉴定与分析中，它们与自然矿物共用一本《ASTM 数据手册》，于是在称谓这些夹杂物时也习惯用矿物学的名称，可以说钢中非金属夹杂物来自自然，变化神奇，一脉相承。

近 20 年来，对钢中非金属夹杂物的研究已逐渐成为一个分支学科，国内外科研工作者在这方面进行了广泛的研究，研究内容主要包括工艺方面的改进技术及某些特定钢种中夹杂物的检测、去除方法等。但我们都知道，无论人们如何改进精炼技术，如何提高工艺水平，所得到的钢产品依然是由合金基体和非金属夹杂物组成的复合材料，即生产出零夹杂钢是不可能的。因此，在满足了工程质量所需的洁净度后，如何快速、准确地鉴定出夹杂物的组成、形态、结构及粒径分布等各种参数，从而达到对冶炼工艺及生产质量的控制，已成为冶

金分析工作者当前急需解决的重大课题。

鉴于此，作者总结 30 多年从事钢中非金属夹杂物检测和分析实践经验，分析近年来国内外发表的有关钢中非金属夹杂物的文献，对大量钢中非金属夹杂物照片进行了分类整理。在编写过程中，试图选择一个全新的视角，借助扫描电子显微镜和 X 射线能谱仪、电子探针等先进科学仪器的分析照片，向读者展示钢中各类非金属夹杂物的形貌及 X 射线元素彩色面分布图等；用动态观察跟踪夹杂物变化规律，将夹杂物与裂纹萌生的微观世界用宏观的视觉效果展示出来；按照钢材生产流程的各个阶段，从炼钢→精炼→连铸→轧材→成品材→使用等各个环节，系统介绍非金属夹杂物的变化和变性规律；根据夹杂物的属性，代表性地分析各类夹杂物对钢材性能的影响；提出了生产洁净钢的工艺路线和改进措施，为钢铁生产工程技术人员和管理人员提供参考意见。本书力求科学性与艺术性的统一，艺术为科学服务、科学中隐含艺术，让读者在阅读中感受现代科学的魅力，从中享受到微观世界的无限乐趣。

非金属夹杂物从它的形成而言，与炼钢学、冶金过程物理化学、结晶学、热处理、金属学等关系密切；就其对性能的影响而言，则与压力加工、金属学、弹性力学和断裂力学等有关；就其检验而言，需要应用金相、电子光学、电化学、物理及化学等分析方法。所以，有关非金属夹杂物的研究是与上述学科密切相关的一门交叉学科。由于钢中非金属夹杂物涉及范围甚广，微观物理化学过程极其复杂，因此本书涉及的内容也只能包括其中的某些主要方面。希望书中包含的内容能够为从事冶金、机械、检验的科研、工程技术人员以及有关高等院校师生进一步研究和学习钢中非金属夹杂物提供参考作用。

在完成本书编著工作的同时，作者向本书所引用文献的作者表示衷心的感谢，是他们付出的辛勤劳动和宝贵研究成果，使钢中非金属夹杂物控制变得有理有据。

由于作者知识水平所限，不足之处恳请读者予以指正。

姜锡山

2011 年 5 月于北京

# 目 录

1 钢中非金属夹杂物图谱 .....	1
1.1 A类——硫化物类 .....	2
1.1.1 铸态硫化锰与硫化锰铁夹杂物 .....	3
1.1.2 锻态与轧态硫化物 .....	10
1.1.3 轧材朽木状断裂与条状硫化物 .....	18
1.1.4 沿晶界分布的共晶 MnS .....	21
1.1.5 易切削钢中的硫化物 .....	22
1.1.6 钢绞线中的硫化物 .....	24
1.2 B类——氧化铝类 .....	29
1.2.1 铸态树枝状 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 簇状物 .....	30
1.2.2 单颗粒 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物 .....	36
1.2.3 不规则 $\text{SiO}_2$ 夹杂物 .....	39
1.2.4 球形 $\text{SiO}_2$ 夹杂物 .....	42
1.2.5 氧化锰夹杂物 .....	43
1.2.6 $\text{FeO} \cdot \text{MnO}$ 或 $(\text{Mn}, \text{Fe})\text{O}$ 夹杂物 .....	44
1.2.7 浸入钢中的 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 结晶球 .....	46
1.2.8 维氏体——氧化亚铁 ( $\text{FeO}$ ) 结晶球 .....	48
1.2.9 $\text{FeO} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	52
1.2.10 氧化钠 ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) .....	52
1.2.11 氧化亚铜 ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) .....	53
1.2.12 链状氧化物夹杂物 .....	54
1.3 C类——硅酸盐类 .....	65
1.3.1 锰橄榄石 ( $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ) .....	67
1.3.2 硅钙石 ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ ) .....	69
1.3.3 铁堇青石 ( $m\text{FeO} \cdot n\text{MnO} \cdot p\text{SiO}_2$ ) .....	71
1.3.4 铁橄榄石 ( $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ) .....	73
1.3.5 铬橄榄石 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) .....	74
1.3.6 钙长石 ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) .....	74
1.3.7 锰铝橄榄石 ( $3\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ ) .....	77
1.3.8 锰钙橄榄石 ( $m\text{MnO} \cdot n\text{CaO} \cdot p\text{SiO}_2$ ) .....	82
1.3.9 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaO}$ 硅酸盐 (堇青石) .....	84
1.3.10 铁铝橄榄石 ( $3\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ ) .....	86



1.3.11 硅酸盐变形后的形貌 .....	86
1.4 D类——球状氧化物类 .....	88
1.4.1 硫化钙包裹的球状复相夹杂物 .....	89
1.4.2 没有 CaS 外壳的球状复相夹杂物 .....	93
1.4.3 铝酸盐夹杂物 .....	112
1.5 DS类——单颗粒球状类 .....	130
1.5.1 球状硫化物夹杂物 .....	131
1.5.2 球状铝酸盐夹杂物 .....	134
1.5.3 球状复相夹杂物 .....	136
1.6 尖晶石类 .....	176
1.6.1 纯尖晶石 (镁铝榴石) .....	177
1.6.2 铁铬尖晶石 (铁铬榴石, 又称铬铁矿) .....	190
1.6.3 锰尖晶石 (锰铝榴石) .....	191
1.6.4 锰铁铬尖晶石 (锰铁铬榴石) .....	192
1.6.5 锰铬尖晶石 (锰铬榴石) .....	194
1.6.6 铁钒尖晶石 (铁钒榴石) .....	194
1.7 氮化物类 .....	195
1.7.1 氮化铝 .....	195
1.7.2 Fe-Ti-N 系氮化物 .....	202
1.7.3 Mn-Ti-Fe-Cr-N 系复合夹杂物 .....	203
1.7.4 不锈钢断口中的氮化物 .....	204
1.7.5 TiN 的金相特征 .....	206
1.7.6 NbN 的金相特征 .....	207
1.7.7 TiN + Ti(C, N) 和 TiN + MnS .....	207
1.7.8 ZrN .....	208
1.7.9 TiN 与 Ti(C, N) .....	208
1.8 夹渣类 .....	214
1.8.1 保护渣卷渣造成的夹渣 .....	215
1.8.2 保护渣在结晶器中的行为 .....	230
1.8.3 38MnVS 钢耐火材料被浸蚀带入钢液产生的夹渣 .....	231
1.9 单晶体夹杂物 .....	233
1.9.1 气泡中的 (Mn, Fe)S 单晶体形貌 .....	233
1.9.2 中间包结瘤单晶体夹杂物形貌 .....	239
1.9.3 38CrMoAl 钢疲劳断口上的氮化铝单晶体 .....	240
1.9.4 高温合金 TiN 单晶体 .....	241
1.9.5 纯尖晶石 MgO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	241
1.9.6 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 结晶球形貌 .....	241
1.9.7 42CrMo 钢疲劳断口疲劳源上的立方形 MgO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 尖晶石单晶体 .....	243
1.9.8 SWRH82B 钢热轧盘条拉伸断口八面锥体 MgO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 尖晶石单晶体 .....	243

1. 10	SWRH82B 钢连铸坯磷化物 $\text{Fe}_3\text{P}$ 分析	244
1. 11	液析碳化物和异金属夹杂物	251
1. 11. 1	液析碳化物	251
1. 11. 2	异金属夹杂物	252
1. 12	稀土夹杂物及其对钢性能的影响	254
1. 12. 1	稀土夹杂物	254
1. 12. 2	稀土元素对 S20A 钢硫化物形状的影响	257
1. 13	中间包浸入式水口 (SEN) 结瘤物	258
<b>2</b>	<b>钢中非金属夹杂物与裂纹萌生</b>	<b>262</b>
2. 1	非金属夹杂物对钢材性能的影响	263
2. 2	脆性球状夹杂物沿“赤道”裂纹萌生	265
2. 3	硫化物对钢易切削性能的影响	272
2. 4	夹杂物对轴承钢接触疲劳剥落的影响	272
2. 5	夹杂物对钢拉伸韧性断裂裂纹萌生的动态观察	275
2. 6	硅酸盐与裂纹萌生	276
2. 7	12PCrNi1Mo 钢管件断口上出现“小裂口”观察	278
2. 8	耐火材料卷入钢液产生的夹渣裂纹	279
2. 8. 1	试样及试验方法	279
2. 8. 2	试验结果	279
2. 8. 3	结果分析	284
2. 8. 4	夹渣产生的理论分析	286
2. 8. 5	结论	287
2. 9	保护渣卷入钢液产生的夹渣断口	288
2. 10	夹渣产生的轴颈表面裂纹	290
2. 11	夹杂物产生的疲劳断裂	291
2. 11. 1	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 复相夹杂物疲劳源	292
2. 11. 2	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 尖晶石夹杂物疲劳源	292
2. 11. 3	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 复相夹杂物疲劳源	292
2. 11. 4	(Ti, V)N 氮化物夹杂物疲劳源	295
2. 11. 5	保护渣产生的疲劳源	295
2. 11. 6	$\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物产生的疲劳源	296
2. 11. 7	60Si2CrVA 钢中 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO}$ 夹杂物产生的疲劳源	297
2. 11. 8	Aermet100 钢夹渣产生的疲劳源	298
2. 11. 9	4340 钢内部夹杂物起裂	298
2. 11. 10	US 钢夹渣疲劳源	298
2. 11. 11	US 钢 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 铝酸钙夹杂物疲劳源	298
2. 11. 12	Aermet100 表面起裂	298
2. 11. 13	4340 钢表面起裂	298

2.11.14	38MnVS5 钢的疲劳裂纹扩展路径	303
<b>3</b>	<b>钢中非金属夹杂物变化规律</b>	<b>304</b>
3.1	钢中非金属夹杂物的分类	305
3.1.1	按夹杂物的形态和分布分类	305
3.1.2	按非金属夹杂物的化学组成分类	306
3.1.3	按非金属夹杂物尺寸分类	307
3.1.4	根据铸态钢夹杂物在热加工相对变形程度不同分类	307
3.1.5	按照夹杂物生成的阶段顺序分类	308
3.1.6	按夹杂物的相结构特征分类	310
3.2	固态与液态非金属夹杂物	312
3.2.1	固态非金属夹杂物	312
3.2.2	液态非金属夹杂物	313
3.3	弧形连铸坯内弧上部夹杂物聚集带的形成	314
3.4	常见主要元素及其非金属夹杂物	315
3.5	轧制前后钢中夹杂物的形态变化	317
3.6	各类非金属夹杂物与钢基体之间的断裂行为	321
3.6.1	硅酸盐在加工后的变化规律	321
3.6.2	硫化物 (MnS 或 (Mn, Fe)S) 的变形规律	326
3.6.3	铝酸盐类夹杂物加工变化规律	326
3.6.4	脆性夹杂物的脆裂	330
3.7	钢中夹杂物的控制	331
3.7.1	外部夹杂物的控制	331
3.7.2	内部夹杂物的控制	331
3.7.3	钢中夹杂物的变性处理	332
3.8	轴承钢大颗粒点状夹杂物的属性与来源分析	333
3.8.1	精炼工艺过程夹杂物变化规律	334
3.8.2	点状夹杂物能谱分析	335
3.8.3	点状夹杂物的组成及分布位置	335
3.8.4	精炼渣系与点状视场合格率和出现率的关系	338
3.8.5	吹氩搅拌强度的影响	339
3.8.6	真空上升速度的影响	339
3.8.7	夹杂物的来源	340
3.8.8	夹杂物与工艺的关系	341
3.9	SWRH82B 钢中氧化物系夹杂物的控制	342
3.9.1	夹杂物的种类	342
3.9.2	夹杂物的来源	342
3.9.3	工艺控制措施	342
3.9.4	工业实验效果	343

3.10	钙处理对钢中非金属夹杂物变性效果分析 .....	344
3.11	非金属夹杂物的来源 .....	347
3.11.1	内生非金属夹杂物 .....	347
3.11.2	外来非金属夹杂物 .....	347
3.12	几种典型非金属夹杂物的生成规律 .....	349
3.12.1	硫化物的生成规律 .....	349
3.12.2	B类氧化物的生成规律 .....	350
3.12.3	$MgO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot MnO$ 复相夹杂物的生成规律 .....	351
3.12.4	$mCaO \cdot nAl_2O_3$ 夹杂物的生成规律 .....	351
3.12.5	氮化钛及碳氮化钛的生成规律 .....	354
3.12.6	$MgO \cdot Al_2O_3$ 镁铝尖晶石夹杂物的生成规律 .....	355
3.12.7	点状夹杂物外包裹 CaS 的生成规律 .....	355
3.12.8	DS类夹杂物的生成规律 .....	356
3.12.9	硅酸盐类夹杂物的生成规律 .....	357
3.13	钢包耐火材料对钢中夹杂物的影响 .....	358
3.13.1	铝镁(碳)质耐火材料对应的夹杂物特征 .....	358
3.13.2	MgO 质耐火材料对应的夹杂物特征 .....	359
3.13.3	镁钙(碳)质耐火材料的夹杂物特征 .....	359
3.14	非金属夹杂物对钢性能的影响 .....	359
3.14.1	非金属夹杂物对钢强度的影响 .....	359
3.14.2	非金属夹杂物对疲劳性能的影响 .....	360
3.14.3	非金属夹杂物对钢韧性和塑性的影响 .....	360
3.14.4	非金属夹杂物对钢断裂韧性的影响 .....	361
3.14.5	非金属夹杂物对钢工艺性能的影响 .....	361
3.14.6	$Al_2O_3$ 夹杂物对钢性能的影响 .....	362
3.15	钢中夹杂物去除技术的进展 .....	362
3.15.1	钢中夹杂物的长大、上浮与分离 .....	362
3.15.2	钢中夹杂物去除技术 .....	362
3.15.3	钢中夹杂物去除技术的冶金功能比较 .....	364
3.16	洁净钢生产技术 .....	365
3.16.1	洁净钢的概念 .....	365
3.16.2	洁净钢生产技术 .....	366
4	典型钢种非金属夹杂物分析 .....	371
4.1	42CrMo 钢疲劳试样夹杂物分析 .....	372
4.1.1	A类(硫化物类) .....	372
4.1.2	B类(氧化铝类) .....	372
4.1.3	D类(球状氧化物类) .....	372
4.1.4	DS类(单颗粒球状类) .....	381

4.2	LX72 帘线钢铸态夹杂物分析 .....	383
4.3	高碳硅锰耐磨铸钢夹杂物分析 .....	387
4.4	X70 管线钢夹杂物分析 .....	389
4.4.1	X70 管线钢冶炼工艺 .....	390
4.4.2	脱氧剂对夹杂物的影响 .....	390
4.4.3	影响管线钢性能的夹杂物 .....	390
4.4.4	典型管线钢夹杂物 .....	391
4.5	硅钙钡镁合金脱氧钢中夹杂物组成与形态 .....	392
4.6	φ5.5mmSWRH82B 预应力钢绞线纵向夹杂物分析 .....	393
4.7	φ5.5mmC72DA 热轧盘条纵向夹杂物分析 .....	406
4.8	轴承钢夹杂物分析 .....	414
4.9	20SiMn 钢铸态球状镶嵌型复相夹杂物 .....	426
4.9.1	硫化锰铁 (Fe, Mn)S .....	427
4.9.2	球状硅酸盐镶嵌晶体颗粒的复相夹杂物 .....	428
4.10	40Mn 中间轴锻件密集分布的夹杂物条带 .....	440
4.11	高品质钢洁净度的基本要求 .....	444
	参考文献 .....	447
	附录 蔡司电子显微镜先进技术 .....	448

## 钢中非金属夹杂物图谱

2 $\mu$ m  
HEHT=20.00kV  
WD=15.5mmSignalA=SE1  
Mag=2.00KXDate:11 Jan 2010  
Time:8.36:56

SWRH82B 钢连铸坯断口上的橄榄球状 (Mn, Fe)S 夹杂物

### 1.1 A类——硫化物类

《钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》(GB/T 10561—2005/ISO 4967: 1998 (E)) 规定: A类(硫化物类): 具有高的延展性, 有较宽范围形态比(长度/宽度)的单个灰色夹杂物, 一般端部呈圆角。

硫在  $\gamma$ -Fe 中最大的固溶度从  $w(S)$  为 0.0012% (650℃) 到  $w(S)$  0.0324% (900℃), 但在室温时, 硫在铁中几乎没有固溶度, 在高温时溶于铁液中的硫随温度降低将以 FeS 的形式析出。所以 Fe-S 系中的主要夹杂物为 FeS (硫化铁, 六方晶系, 熔点 1180℃)。当加入 Mn 后, 夹杂物类型将由 FeS  $\rightarrow$  (Fe, Mn)S  $\rightarrow$  MnS (硫化锰, 立方晶系, 熔点 1610℃) 变化, 这个变化的最终产物, 视锰含量的多少而定。

有关资料介绍 MnS 或 (Fe, Mn)S 的形态随钢的成分、冶炼工艺的不同而有所区别, 其形态可分三类(见图 1-1):

- (1) I类 MnS。用硅脱氧的沸腾钢中出现, 常与氧化物复合, 如 MnO、SiO<sub>2</sub> 基体上析出的 MnS 虽为树枝状, 仍属 I类 MnS。
- (2) II类 MnS。用铝脱氧的钢中出现, 所用铝量过剩时, 在晶界上以共晶形式凝固。
- (3) III类 MnS。用过量铝脱氧的钢中出现, 呈不规则的角状, 任意分布。

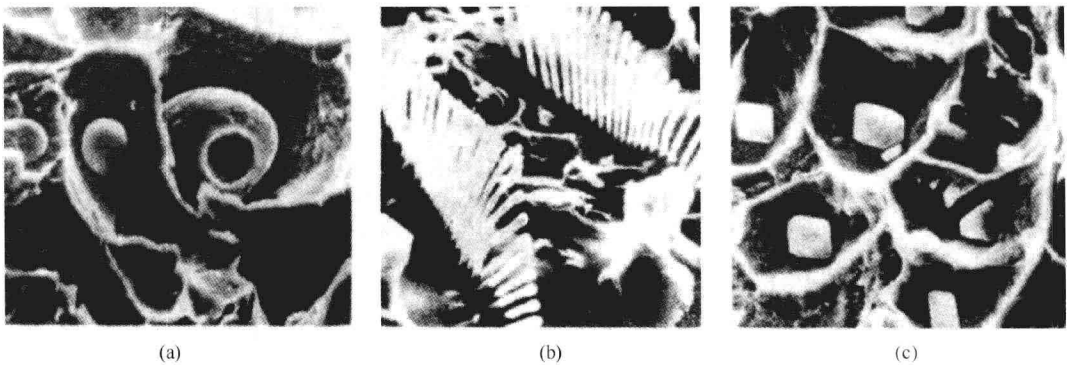


图 1-1 钢中硫化物的三种形态  
(a) I类硫化物; (b) II类硫化物; (c) III类硫化物

钢中硫含量与冷却速度对 MnS 或 (Fe, Mn)S 的形态有影响, 生成 II类 MnS 的量, 随硫含量和冷却速度增加而增多, 而 I类 MnS 和 III类 MnS 几乎不受钢中硫含量的影响, 只随钢的冷却速度增大而减少。

硫以硫化铁 (FeS) 的形式存在于钢内。结晶过程中 FeS 沿晶界呈网状分布或分布在晶粒内部, 通常呈球状或共晶状, 六方晶系, 易变形, 沿变形方向伸长。当钢材在 800 ~ 1200℃ 的温度下进行轧压和锻造时, 由于 FeS 的塑性不足或熔化, 常导致晶界的开裂, 这种现象称为钢的热脆性。如果 FeS 不分布在晶界, 而是呈单独的夹杂物分布在晶粒之内, 其危害性将大大减弱。

若钢中有锰存在时, 由于锰易与硫形成熔点很高 (1610℃) 的硫化锰 (MnS), 而在结晶后呈粒状分布于晶粒内。在热加工温度下, 硫化锰有足够的塑性, 能沿轧压或锻压方向伸长, 可见锰有消除硫害的作用, 因此钢中必须保持一定的锰量。由于硫化物的良好塑性, 在冷加工中硫化物将进一步伸长变细。在一般钢中, 夹杂物很少以单相 MnS 存在, 而是形成 (Fe,

Mn)S 复合硫化物。铸态、热加工和冷加工状态下的硫化物形态如图 1-2 ~ 图 1-38 所示。

### 1.1.1 铸态硫化锰与硫化锰铁夹杂物

连铸坯中铸态硫化物形貌如图 1-2 ~ 图 1-11 所示。

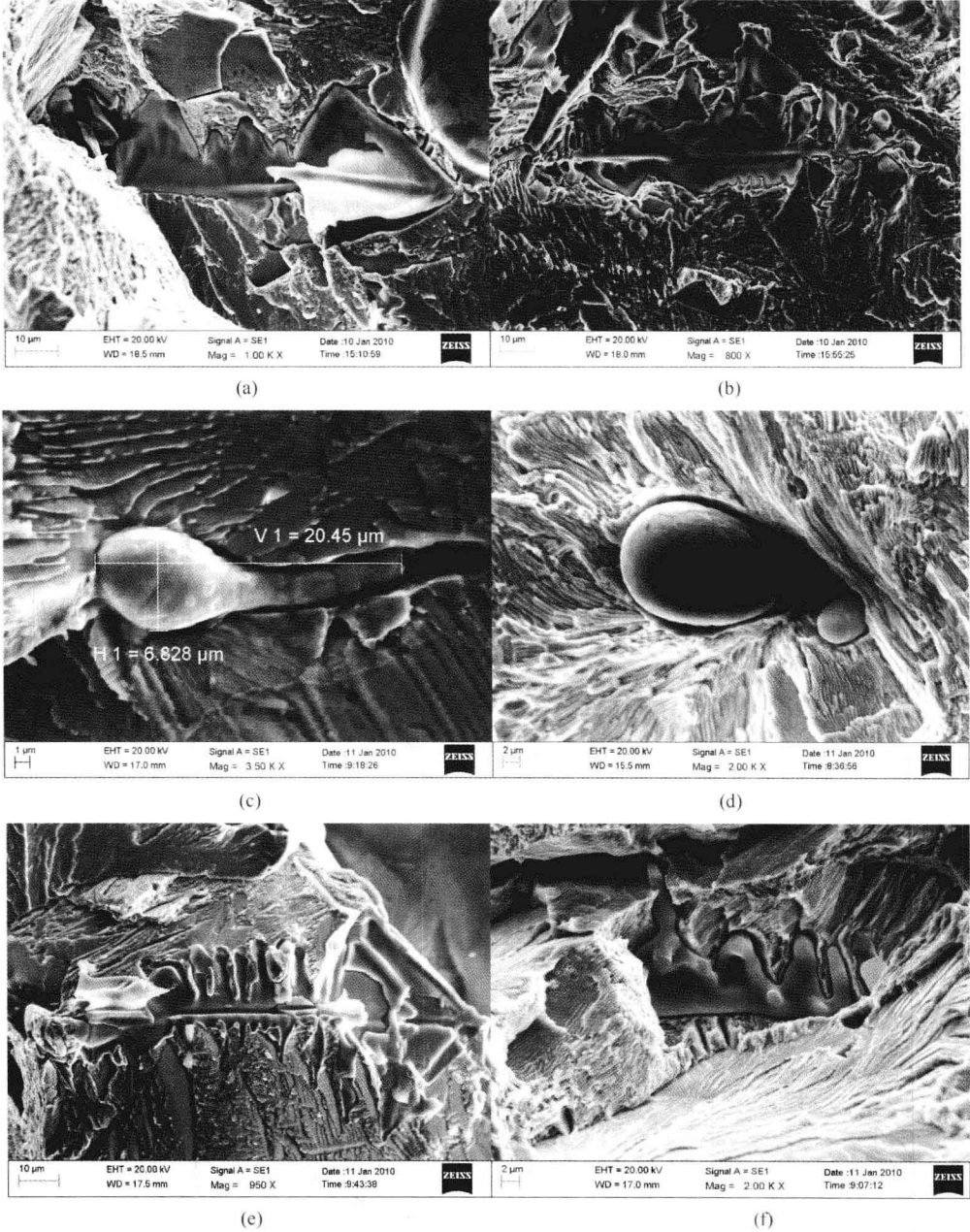


图 1-2 连铸坯断口中各种形态的硫化物

钢种: SWRH82B 钢

状态: 连铸圆坯纵向断口

组织说明: 在 SWRH82B 钢连铸圆坯中心 30mm 区域内发现很多呈熔融状态的硫化物 (Mn, Fe) S, 其形状有液滴状、球状、片状、树枝状、骨骼状等, 硫化锰铁 (Mn, Fe) S 熔点为 1610℃。



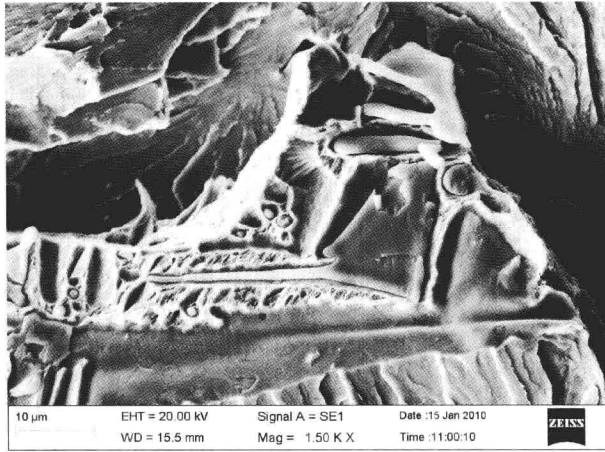
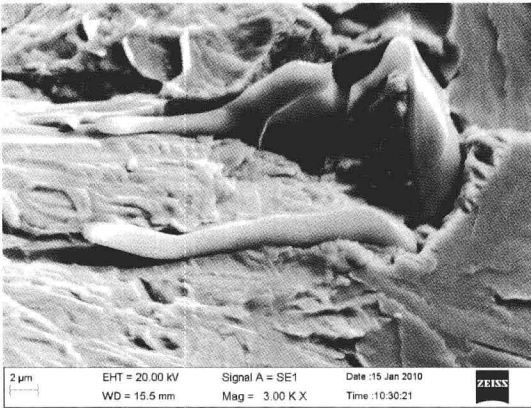


图 1-3 连铸坯断口上的片状硫化物 (Mn, Fe) S

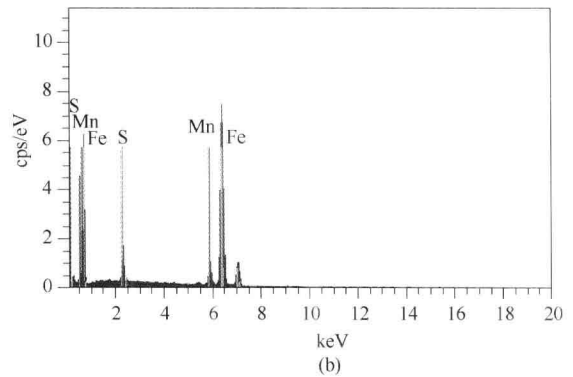
钢种: SWRH82B 钢;

状态: 连铸坯断口;

组织说明: 在 SWRH 82B 连铸坯中心 30mm 区域内呈熔融状态的片状硫化物 (Mn, Fe) S, 表面光滑, 有的片状硫化物 (Mn, Fe) S 留在匹配断口的另一断面。



(a)



(b)

