



钢中非金属夹杂物的鉴定

尹安远, 吴素君

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 根据钢中非金属夹杂物的来源和分类, 综述了鉴定钢中非金属夹杂物的方法和定量评级标准, 并且给出了典型夹杂物的扫描电镜照片, 分析了不同类型夹杂物的形成机理及其在光学显微镜下的基本特征。

关键词: 非金属夹杂物; 金相检测; 定量鉴定

中图分类号: TG142.13

文献标识码: A

文章编号: 1001-4012(2007)08-0395-04

APPRAISAL OF THE NONMETALLIC INCLUSIONS IN STEELS

YIN An-yuan, WU Su-jun

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The nonmetallic inclusions existed in steels are unavoidable during steelmaking, which have significant influence on steel properties. Based on the origin and classification of the nonmetallic inclusions, the inspection methods and quantitative gradation standards were summarized for the nonmetallic inclusions in steels, and the formation mechanism and metallographic characteristics of different type of inclusions were analyzed. SEM pictures of some typical inclusions were also shown.

Keywords: Nonmetallic inclusions; Metallographic inspection; Quantitative measurement

随着现代工程技术的发展, 对钢的综合性能要求也日趋严格, 相应地对钢的材质要求也越来越高。非金属夹杂物作为独立相存在于钢中, 破坏了钢基体的连续性, 加大了钢中组织的不均匀性, 严重影响了钢的各种性能。例如, 非金属夹杂物导致应力集中, 引起疲劳断裂^[1-3]; 数量多且分布不均匀的夹杂物会明显降低钢的塑性、韧性、焊接性以及耐腐蚀性; 钢中呈网状存在的硫化物会造成热脆性。因此, 夹杂物的数量和分布被认定是评定钢材质量的一个重要指标, 并且被列为优质钢和高级优质钢出厂的常规检测项目之一。

非金属夹杂物的性质、形态、分布、尺寸及含量不同, 对钢性能的影响也不同。所以提高金属材料的质量, 生产出洁净钢, 或控制非金属夹杂物性质和要求的形态, 是冶炼和铸锭过程中的一个艰巨任务。

而对于金相分析工作者来说, 如何正确判断和鉴定非金属夹杂物也因此变得十分重要^[4-9]。

1 钢中非金属夹杂物的来源分类

1.1 内生夹杂物

钢在冶炼过程中, 脱氧反应会产生氧化物和硅酸盐等产物, 若在钢液凝固前未浮出, 将留在钢中。溶解在钢液中的氧、硫、氮等杂质元素在降温 and 凝固时, 由于溶解度的降低, 与其他元素结合以化合物形式从液相或固溶体中析出, 最后留在钢锭中, 它是金属在熔炼过程中, 各种物理化学反应形成的夹杂物^[10-15]。内生夹杂物分布比较均匀, 颗粒也较小, 正确的操作和合理的工艺措施可以减少其数量和改变其成分、大小和分布情况, 但一般来说是不可避免的。

1.2 外来夹杂物

钢在冶炼和浇注过程中悬浮在钢液表面的炉渣、或由炼钢炉、出钢槽和钢包等内壁剥落的耐火材

收稿日期: 2006-05-19

作者简介: 尹安远(1983-), 男, 硕士研究生。



料或其他夹杂物在钢液凝固前未及时清除而留于钢中。它是金属在熔炼过程中与外界物质接触发生作用产生的夹杂物^[10-15]。如炉料表面的砂土和炉衬等与金属液作用,形成熔渣而滞留在金属中,其中也包括加入的熔剂。这类夹杂物一般的特征是外形不规则,尺寸比较大,分布也没有规律,又称为粗夹杂。这类夹杂物通过正确的操作是可以避免的。

2 钢中非金属夹杂物按化学成分分类

钢中非金属夹杂物按化学成分详细分类见图1,主要分为三大类。

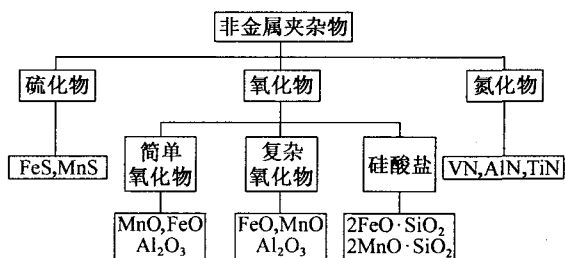


图1 钢中非金属夹杂按照化学成分分类图

Fig. 1 Classification of nonmetallic inclusions in steel according to chemical compositions

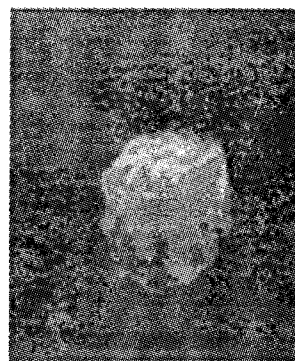
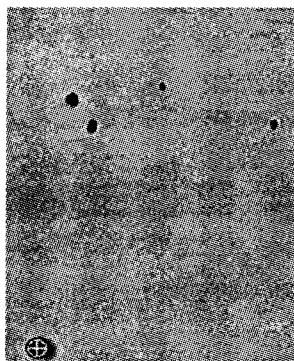
2.1 氧化物系夹杂

简单氧化物有 FeO , Fe_2O_3 , MnO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO 和 Cu_2O 等。在铸钢中,当用硅铁或铝进行脱氧时, SiO_2 和 Al_2O_3 夹杂比较常见。 Al_2O_3 在钢中常常以球形聚集呈颗粒状成串分布(图2a)。复杂氧化物,包括尖晶石类夹杂物和各种钙的铝酸盐等,以及钙的铝酸盐(图2b)^[16]。硅酸盐夹杂也属于复杂氧化物夹杂,这类夹杂物^[2]有 $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ (铁硅酸盐)、 $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ (锰硅酸盐)和 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (钙硅酸盐)等(图3a)^[10]。这类夹杂物在钢的凝固过程中,由于冷却速度较快,某些液态的硅酸盐来不及结晶,其全部或部分以玻璃态的形式保存于钢中。

2.2 硫化物系夹杂

主要是 FeS , MnS 和 CaS 等。由于低熔点的 FeS 易形成热脆,所以一般均要求钢中要含有一定量的锰,使硫与锰形成熔点较高的 MnS 而消除 FeS 的危害。因此钢中硫化物夹杂主要是 MnS (图3b)。

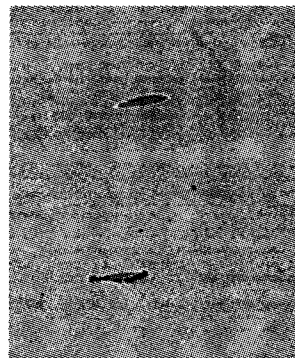
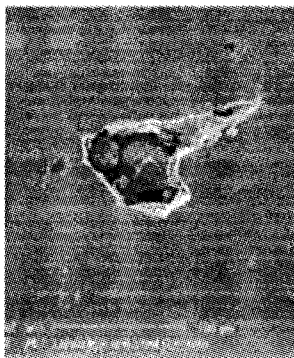
铸态钢中硫化物夹杂的形态通常分为三类^[12,17]:①形态为球形,这种夹杂物通常出现在用硅铁脱氧或脱氧不完全的钢中;②在光学显微镜下观察呈链状的极细的针状夹杂;③呈块状,外形不规则,在过量铝脱氧时出现。



(a) 氧化铝夹杂 (b) 钙的铝酸盐夹杂

图2 扫描电镜下的氧化铝和钙的铝酸盐夹杂

Fig. 2 Metallographic pictures of Al_2O_3 and $\text{Ca}(\text{AlO}_2)_2$ inclusions taken by SEM



(a) 硅酸盐夹杂 (b) 硫化锰夹杂

图3 扫描电镜下的硅酸盐和硫化锰夹杂

Fig. 3 Metallographic pictures of CaSiO_2 inclusions and MnS inclusions taken by SEM

2.3 氮化物夹杂

当钢中加入与氮亲和力较大的元素时形成 AlN , TiN , ZrN 和 VN 等氮化物。在出钢和浇铸过程中钢液与空气接触,氮化物的数量显著增加。

3 按夹杂物的塑性变形能力分类

(1) 脆性夹杂物 热加工时该类夹杂物形状和尺寸都不变化,但可能沿加工方向成串排列或呈点链状,属于这类夹杂物的有 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 ^[18,19]。

(2) 塑性夹杂物 热变形时该类夹杂物具有良好范性,沿变形方向延伸成条带状。属于这类的有硫化物及 SiO_2 含量较低(40%~60%)的铁锰硅酸盐。

(3) 球状不变性夹杂物 铸态呈球状,热加工后保持球状不变,如 SiO_2 及含 SiO_2 较高(>70%)的硅酸盐等。

(4) 半塑性夹杂物 指各种复相的铝硅酸盐夹



杂。基体铝硅酸盐有塑性,热加工时将产生塑性变形,但是其中包含着的析出相如氧化铝等是脆性的,加工时仍保持原状或只是拉开距离。

4 夹杂物的鉴定

早期的工作者主要用光学显微镜配合 X 射线结构分析和化学成分分析,积累了宝贵的经验和丰富的资料。近年来,采用电子探针对夹杂物进行微区成分分析日益增多。目前鉴定夹杂物的大致方法有以下两种。

4.1 金相法与微区域成分分析相结合

在金相观察中选出待定夹杂物后,用电子探针(EPMA)进行微区成分分析或者应用扫描电镜(SEM)自带能谱分析仪(EDS)进行成分分析。通常可以测定尺寸大于 1 μm 的夹杂物的组成元素和大致成分,如果采用个别元素的面扫描还可以得到更为直观的结果。图 4 是使用扫描电镜对 Q460 钢中的一颗夹杂物进行的面分析图谱,依次进行硫、锰、硅和铁四种元素的面扫描,从扫描结果可以推断出,明场观察中夹杂物为 MnS、SiO₂ 和 FeS,通过能谱仪(EDS)对其进行成分分析;还可直接得到各元素的质量分数。

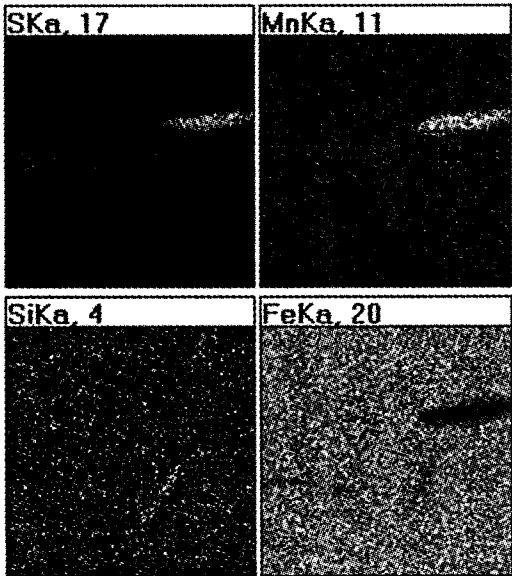


图 4 夹杂物扫描电镜面扫描图
Fig. 4 Plain scanning metallographic of inclusion take by SEM

4.2 光学金相法

在光学显微镜下利用明视场观察夹杂物的颜色、形态、大小和分布;在暗视场下观察夹杂物的固

有色彩和透明度;在正交偏振光下观察夹杂物的各种光学性质,从而判断夹杂物的类型^[13,20]。根据夹杂物的分布情况及数量评定相应的级别,评判其对钢材性能的影响。目前检验和研究钢中非金属夹杂物的方法很多,有化学法、岩相法、金相法、电子探针和电子扫描法等。

用金相法鉴定夹杂物是根据夹杂物的形貌、分布及其在明场、暗场和偏光下的光学特征(表 1),与已知的夹杂物特征对照以确定其类型。必要时可以测定夹杂物的显微硬度或经受化学试剂腐蚀的能力。非金属夹杂物的金相法鉴定步骤见表 2。

表 1 常见非金属夹杂物的光学特征

Tab. 1 Optical characteristics of the nonmetallic inclusions

项目	硫化物	氧化物	硅酸盐	氮化物
明场	铸钢中呈球状或网状分布,轧钢中呈纺锤分布。一般为塑性夹杂,淡灰色	不变形,呈球状孤立存在,灰褐色	铸钢中呈球状或者块状分布,轧钢中呈链状分布,褐色	规则的几何形状,呈方块、三角形等,橘红色
偏光	不透明,各向同性	不透明,各向同性	透明黄色或者红褐色,各向异性	不透明,各向同性
暗场	不透明	周围有亮圈	透明	不透明

表 2 非金属夹杂物的金相法鉴定步骤

Tab. 2 The step of nonmetallic inclusions inspection

步骤	观察视场	观察对象
1	低倍明场(100×)	夹杂物的位置、形状、大小及分布、可塑性夹杂物的色彩夹杂物的抛光性
2	高倍明场(约 500×)	夹杂物组织、反光性能、夹杂物色彩
3	高倍暗场	夹杂物的透明程度、透明夹杂物本身的色彩
		透明及半透明夹杂物的组织
4	偏光	各向异性效应、夹杂物的色彩、黑十字现象

5 非金属夹杂物的定量评级

5.1 国标评级

定量测定是优质钢以及高级优质钢的常规检测项目之一。在夹杂物类型已知的条件下,采用标准等级比较法,以判定钢材质量的优劣或是否合格。



夹杂物的评级可以根据 GB/T 10561—2005 标准进行。试样经过仔细抛光,夹杂物应保存完好,不经侵蚀在放大 100 倍显微镜下观察。把试样上夹杂物最严重的视场与标准级别图片比较来评定其等级。GB/T 10561—2005 标准列出三类夹杂物的级别图。氧化物为一类,硫化物及硅酸盐同列为一类,此外还有碳化物。每一类又按照夹杂物最严重的粗细分为两个系列,每个系列分 5 级,级别越高,表示夹杂物含量越多。评级时若不能评成整数,可以采用半级。作为重要零件用的合金结构钢或工具钢,应根据零件的要求定出非金属夹杂物的合格级别,对于合金结构钢,一般最高级别不得超过氧化物及硫化物各 3 级,两者之和为 5.5 级。

铬滚动轴承钢则按照 GB/T 18524—2002 标准进行分类及评级。标准中非金属夹杂物分脆性夹杂物、塑性夹杂物和点状不变性夹杂物三类,每类分 0.5, 1, 1.5, ..., 4 共八级标准级别。轴承钢中非金属夹杂物含量级别不应大于表 3 中的规定。

表 3 轴承钢中非金属夹杂物允许的级别

Tab. 3 The level of the nonmetallic inclusions allowed in the bearing steel

规格及状态	级		
	脆性夹杂物	塑性夹杂物	点状不变性夹杂物
≤30mm 的冷拔及退火钢材	≤2	≤2.5	≤2.5
30~60mm 退火钢材及 ≤60mm 的不退火钢材	≤3	≤3	≤3
>60mm 退火钢	≤3.5	≤3.5	≤3.5

为了定量研究夹杂物对性能的影响,需要测定夹杂物的大小及间距的统计分布,在夹杂物较细小时,要在电镜下进行。定量测定要求测定较多的视场以求得统计分布。自动图像分析仪的应用可以大大加速测定工作的进程,并获得较为准确的结果。

5.2 JK 标准评级

将夹杂物分为 A, B, C 和 D 四个基本类型,它们分别是硫化物、氧化铝、硅酸盐和球状氧化物。每类夹杂物按照厚度和直径的不同又可分为细系和粗系两个系列,每个夹杂物由表示夹杂物数量递增的五级图片(1~5)组成。评定夹杂物级别时,允许评半级。结果是用每个试样每类夹杂物最恶劣视场的级别数表示。钢中非金属夹杂物的评定方法可以参照 GB/T 10561—2005 标准。

5.3 ASTM 评级标准

ASTM 标准评级图又称修改的 JK 图,评级图

中夹杂物的分类,系列的划分均与 JK 评级标准图相同,但评级图由 0.5~2.5 组成,它适用于评定高纯度钢的夹杂物,常用于承受较大压延量的产品中,如板材、管材和线材等。结果是用每类夹杂物不同级别的视场总数来表示。

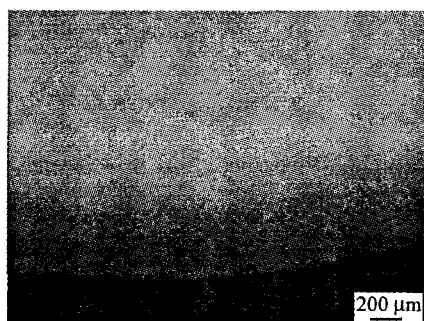
6 结语

钢中非金属夹杂物含量虽然少,但对钢的性能影响极大,所以必须对它进行定性和定量检测。根据夹杂物在显微镜下不同的光学特征,可以定性鉴定钢中非金属夹杂物,在结合有关标准和相关微区成分分析可以定量评定夹杂物的级别,综合来判定钢的质量,进而找出规律,改进工艺,尽可能减少有害夹杂物的含量,提高产品质量。

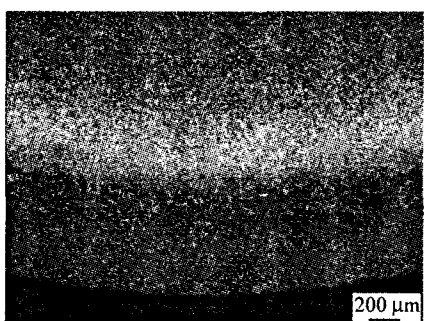
参考文献:

- [1] 刘继雄,汪美蕾,彭涛. 钢中非金属夹杂物显微评级方法的定量化探讨[J]. 钢铁研究, 1994, 11(6): 81.
- [2] GB/T 10561—1989 钢中非金属夹杂物显微评定方法标准的执行与理解[S].
- [3] 菜璐,俞建伟. 使用 K 法测定非金属夹杂物[J]. 检测, 1996, 22(3): 209—212.
- [4] 上海交通大学《金相分析》编写组. 金相分析[J]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 4.
- [5] 杨贵荣,王祖宽. 钢中非金属夹杂的金相鉴定[J]. 河北理工学报, 1999, 21(2): 22—25.
- [6] Macrolino Fernandes. Investigation of nonmetallic inclusions in continuously cast carbon steel by dissolution of the ferrite matrix[J]. Materials Characterization, 2002, 48: 255—261.
- [7] Atkinson H V, Shi G. Characterization of inclusions in clean steels[J]. Progress in Materials Science, 2003, 48(5): 457—520.
- [8] Macrolino Fernandes. Investigation of the chemical composition of nonmetallic inclusions utilizing ternary phase diagrams [J]. Materials Characterization, 2003, 49: 437—44.
- [9] 切尔维亚科夫 AH. 钢中夹杂物的金相鉴定[M]. 北京: 科学出版社, 1966: 1—5.
- [10] 上海市金属学会. 金属材料缺陷金相图谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996: 40—49.
- [11] Merg M, Gbruchard W. Investigation on the morphogenesis of nonmetallic inclusion in steels [J]. Scanning Electronic Microscopy, 1983: 4.

(下转第 406 页)



(a) 硝酸酒精溶液侵蚀



(b) 三氯化铁盐酸水溶液侵蚀

图 3 退火状态下不同侵蚀剂侵蚀的渗碳层组织

Fig. 3 The microstructures of carburized layer corroded by various corrosive agents under annealing condition

渗碳层的过共析层、共析层、过渡层和心部之间的界限最明显、最清晰。退火状态下各层界限清晰主要是由于 1Cr11Ni2W2MoV 钢是马氏体型热强不锈钢,即使在冷却速度最慢的状态下,基体组织仍为板条状马氏体(马氏体转变点 $M_s = 279 \sim 345^\circ\text{C}$)。由

于渗碳处理后,渗层由表层向心部碳浓度呈逐渐减少趋势。碳元素含量高, M_s 点温度降低^[2],奥氏体稳定。碳含量不同,使不同部位的 M_s 点温度不同。在退火过程中, M_s 点温度高的部位(碳含量低的部位)先发生马氏体转变。这也就是说心部先发生马氏体转变,接下来依次是过渡层、共析层和过共析层。当心部发生马氏体转变,过渡层还没开始进行马氏体转变或转变很少;而当过渡层进行马氏体转变时,基体马氏体转变已经完成,由于冷却速度慢,心部发生自回火,碳化物析出,心部的耐蚀性就比过渡层的差,致使心部与过渡层有了明显的界限。共析层和过共析层碳含量高, M_s 点温度更低,致使有残余奥氏体存在。过共析层比共析层碳含量高,所以过共析层碳化物含量也明显高于共析层。

4 结论

(1) 金相法测定 1Cr11Ni2W2MoV 钢渗碳层深度,在退火状态下观测最佳。

(2) 金相法测定 1Cr11Ni2W2MoV 钢渗碳层深度,使用三氯化铁盐酸水溶液侵蚀剂较合适,硝酸酒精溶液不能侵蚀出其渗碳层组织全貌。

参考文献:

(上接第 398 页)

- [12] Robinson C L, Westlake F J. Roll lubrication in hot strip mills[C]. London: Proceedings of the First European Tribology Congress, 1973.
- [13] Yang Z G. The fatigue behaviors of zero inclusion and commercial 42CrMo steels in the super long fatigue life regime[J]. Acta Materialia, 2004, 52(18): 5235—5241.
- [14] 李代钟. 钢中的非金属夹杂物[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [15] 北京钢铁学院. 电炉炼钢学[M]. 北京: 中国工业出版社, 1961: 93—122.
- [16] 钱苗根. 金属学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980: 33—35.
- [17] Wandrer C L. Review of hot rolling lubrication technology for steel[C]. ASIE Special Publication SP-17. American Society of lubrication engineers, 1984.
- [18] 刘天佑. 钢材质量检验[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [19] 张丽萍, 葛建国, 赵爱军. 浅谈钢中夹杂物的控制对钢质量的影响[J]. 包钢技术, 2002, 28(4): 85—87.
- [20] Yang Z G. The effect of inclusions on the fatigue behavior of fine grained high strength 42CrMoVNB steel [J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(9): 959—966.
- [21] 魏成富. 42CrMo 钢中非金属夹杂物的研究[J]. 四川工业学院学报, 1993, 12(1).
- [22] Zhang J M. Estimation of maximum inclusion size and fatigue strength in high strength ADF1 steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 394(1/2): 126—131.