

锰硫比对超低碳钢夹杂物和导电率的影响

殷昊辉, 刘曼*, 甘晓龙, 徐光

(钢铁冶金及资源利用教育部重点实验室, 武汉科技大学, 湖北 武汉 430081)

摘要:超低碳钢被广泛应用于电气工程、汽车工业等领域,因而需要良好的力学性能和导电性能。钢中 FeS 会造成“热脆”现象,而锰硫比则会直接影响超低碳钢中 FeS 的含量,从而影响其加工性能;同时,锰硫比的调控也会影响钢中元素含量与夹杂物特性,进而影响超低碳钢的导电率。为优化超低碳钢锰硫比调控,提高其综合性能,采用真空感应炉冶炼不同锰硫比的超低碳钢,利用光学显微镜、EBSD 技术、EDS 技术和导电率测试等手段研究了不同锰硫比超低碳钢的夹杂物特征和导电率演变规律。结果表明,钢中形成的夹杂物主要为类球状和长条状夹杂物,其中,类球状形貌占绝大部分,长条状形貌占比较小。部分夹杂物以 MnO-SiO₂ 系二氧化硅夹杂物为核心,在其周围形成 FeS 和 MnS 或 (Mn, Fe)S 夹杂;部分夹杂物则直接形成氧化物和硫化物的复合夹杂物。随着锰硫比的升高,夹杂物数量呈先增加后降低的变化趋势,而夹杂物尺寸则呈先减小后增大的趋势。当锰硫比为 6.4 及以上时,钢中基本上无 FeS 夹杂物。此外,随着锰硫比的升高,超低碳钢的导电率呈单调增加的变化趋势;在锰硫比为 9.0 时,由于最大的夹杂物尺寸和较多的夹杂物数量,固溶在钢基体中的 Mn 和 S 元素含量显著降低,从而降低了电阻率,获得了最大的导电率。

关键词:超低碳钢; 锰硫比; MnS; FeS; 导电率

中图分类号: TF76, TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)02-0189-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.02.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Influence of Mn/S ratio on inclusions and electrical conductivity of ultra-low carbon steel

YIN Haohui, LIU Man*, GAN Xiaolong, XU Guang

(The Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: Ultra-low carbon steel is widely used in electrical engineering, automotive industry and other related fields, requiring excellent mechanical properties and electrical conductivity. In steel, FeS can induce the phenomenon of "hot brittleness," and the manganese-to-sulfur (Mn/S) ratio directly affects the FeS content in ultra-low carbon steel, thereby influencing its processability. Meanwhile, the regulation of the manganese-sulfur ratio also impacts the element content and inclusion characteristics in steel, which in turn affects the electrical conductivity of ultra-low carbon steel. To optimize the Mn/S ratio regulation of ultra-low carbon steel and enhance its comprehensive performances, ultra-low carbon steel samples with different Mn/S ratios were smelted using a vacuum induction furnace. The inclusion characteristics and conductivity evolution of ultra-low carbon steel with varying Mn/S ratios were investigated by means of optical microscopy, EBSD, EDS and conductivity testing. The results indicate that the

收稿日期: 2025-09-08; 修回日期: 2025-10-23; 接受日期: 2025-11-17

作者简介: 殷昊辉, 2000 年出生, 湖北安陆人, 硕士研究生, 研究方向: 电缆钢的组织性能控制, E-mail: 15607292608@163.com; *通信作者: 刘曼, 1994 年出生, 湖北武汉人, 博士, 讲师, 研究方向: 高强钢的组织性能控制, E-mail: liuman@wust.edu.cn。

inclusions formed in the steel are primarily near-spherical and long strip-shaped, with the near-spherical inclusions accounting for the vast majority and the long strip-shaped ones for a small proportion. For some inclusions, MnO-SiO₂ binary oxide inclusions serve as the core, around which FeS and MnS or (Mn, Fe)S inclusions are formed. Additionally, some inclusions directly form oxide-sulfide composite inclusions. With the increase of Mn/S ratio, the number of inclusions first increases and then decreases, while the size of inclusions first decreases and then increases. When the Mn/S ratio is 6.4 or higher, there are essentially no FeS inclusions present in the steel. Furthermore, as the Mn/S ratio increases, the electrical conductivity of the ultra-low carbon steel exhibits a monotonic increasing trend. At Mn/S = 9.0, owing to the largest inclusion sizes and relatively high number of inclusions, the contents of Mn and S elements dissolved in the steel matrix are significantly reduced. Consequently, the electrical resistivity of the steel decreases, allowing it to achieve the highest electrical conductivity.

Key words: ultra-low carbon steel; Mn/S ratio; MnS; FeS; electrical conductivity

0 引言

超低碳钢因其成本低廉、塑性好、可焊性好等优良性能,被广泛应用于对材料韧性、加工性和耐腐蚀性有严格要求的领域,如汽车行业的车身结构件、焊接容器和通信电缆等^[1-3]。目前,输电电缆建设规模的不断扩大、通信电缆及电气化铁路等领域的不断发展,要求超低碳钢在满足加工性能的前提下继续提高导电性能^[4-5]。

提高超低碳钢导电性能的主要措施包含:降低钢中合金元素含量、获得粗大均匀晶粒、降低组织中位错密度等^[6-11]。彭冲等^[12]研究认为,在钢坯质量正常的情况下,对 XGM2 钢导电率影响最大的是化学成分;在不考虑其它元素的影响下,导电率随着 C、Mn 和 Si 含量的增加而减小。同时,通过调节钢中元素的存在状态和析出相类型、大小和分布,也是提高钢导电性能的可行方法^[13-17]。硫化物为钢中常见析出相,如 MnS 和 FeS。刘伟东等^[18]报道,平衡凝固时,FeS 先于 MnS 析出,而非平衡凝固时,MnS 先于 FeS 析出。S 在钢中易与 Fe 形成低熔点的共晶体 FeS,而熔融状态的 FeS 会显著降低晶界强度,从而造成钢的热脆现象,严重损害其加工性能。因此,为保证超低碳钢的优良性能,不仅要控制 Mn 和 S 单个元素的成分范围,还要对锰硫比进行严格控制,以满足超低碳钢加工性能和导电率的双重要求。

目前关于钢中锰硫比的研究主要集中在 MnS 夹杂物的形貌、尺寸和对钢力学性能的影响方面。例如,蒋光辉^[19]的研究表明,随着锰硫比的增大,夹杂物的纺锤率增大,夹杂物总数降低。ITO 等^[20]报道,随着锰、硫含量和冷却速率的增加,聚集型硫化物增多,非聚集型硫化物数量减少;聚集型硫化物分

布于树枝晶间,非聚集型硫化物分布于枝晶周围。李成良等^[21]研究认为,锰硫比较低的试样中 MnS 夹杂物数量更大、尺寸更大,尤其是细系 MnS,会降低钢的强度;而长条状 MnS 夹杂物会导致钢材力学性能的各向异性。大量文献报道均显示^[22-24],在 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}] > 10$ 时,可避免钢中 FeS 的形成,防止热脆现象的出现。然而,锰硫比对超低碳钢导电率的影响研究鲜有报道。

为此,笔者设计了锰硫比为 4.0 ~ 10.0 的超低碳钢试验,通过光学显微镜、EBSD 结合能谱仪、导电率测试等方法 and 手段,系统地研究了不同锰硫比下超低碳钢中 MnS 和 FeS 夹杂物的演变规律及其对导电率的影响,以期为工业生产高性能超低碳钢的锰硫比调控提供参考。

1 试验材料和方法

在 Mn 含量一定时添加不同硫含量,设计制备了四种不同锰硫比含量梯度钢种,列于表 1 中。实验室冶炼不同成分钢,在真空感应炉(博蕴通 VIF-1)中冶炼,原材料为 99.99% 高纯电解铁、石墨粉末、99.99% 高纯 Mn 片、99.99% 高纯 Si 和 99.9% FeS 粉末。冶炼前,将称量好的原材料置于氧化铝坩埚内,外套石墨坩埚与石英坩埚,将坩埚置于感应炉线圈中,将耐高温模具置于特定位置并关闭炉门。抽取真空感应炉内空气至气压为 10^{-3} Pa 数量级,随后通入 99.99% 高纯 Ar 气,直至气压为 -5×10^4 Pa 后开始加热,逐渐升高电流并随时观察测温仪温度及坩埚内样品状态,待坩埚内样品呈液态后继续保温 3 min 使之均匀化,随后用手柄控制坩埚在炉内进行浇注并停炉冷却。待模具冷却至室温后取出铸坯,之后将铸坯加热至 600 °C 进行多道次中温轧制去除材料内部孔隙,钢板最终厚度为 5 mm,之后进行

低温回火处理消除轧制内应力。

采用高频红外碳硫分析仪 (CS744, 美国) 检测 S 和 C 的含量, 电感耦合等离子体质谱仪 (NexION 1000 G, 美国) 检测 Mn 和 Si 含量。4 组钢中各元素实际含量如表 1 所示。可以看出, 冶炼成分基本达到目标要求, 将对应试样分别命名为 A1、A2、A3 和 A4。

表 1 试样的化学成分

Table 1 Chemical compositions of the samples

Sample		C/%	Si/%	Mn/%	S/%	w[Mn]/w[S]
A1	Target	0.05	0.05	0.10	0.025	4.0
	Actual	0.05	0.05	0.11	0.026	4.2
A2	Target	0.05	0.05	0.10	0.020	5.0
	Actual	0.04	0.05	0.10	0.020	5.0
A3	Target	0.05	0.05	0.10	0.015	6.7
	Actual	0.04	0.06	0.09	0.014	6.4
A4	Target	0.05	0.05	0.10	0.010	10.0
	Actual	0.05	0.05	0.09	0.010	9.0

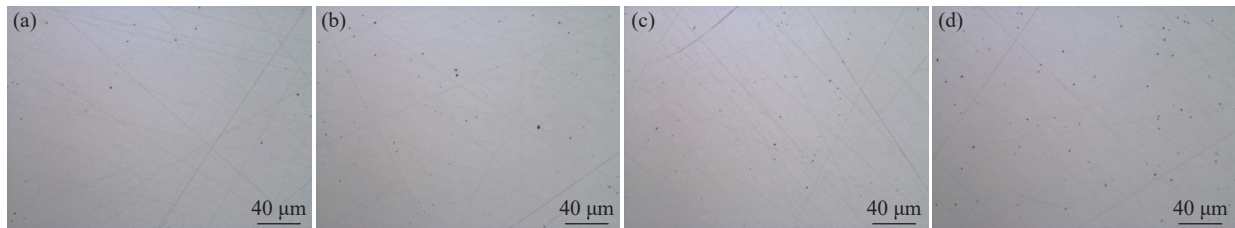
根据 GB/T 10561—2005《钢中非金属夹杂物含量的测定》要求对试样进行取样。确定取样后试样的轧制方向并标示清楚, 沿轧制方向对试样进行预磨—手工磨光—粗抛光—精抛光, 最后将试样清洗干净, 烘干后在 BX300 Zeiss 光学显微镜 (OM) 上观察, 对试验结果进行记录并用 ImageJ 软件对夹杂物的数量与尺寸进行统计。由于机械抛光与电解抛光制样达不到理想效果, 采用氦离子抛光制备高质量、

无损伤的 EBSD 样品。首先, 利用 SEM-EDS 分析夹杂物形貌和包含的元素种类; 之后再结合 EBSD 技术分析夹杂物类型和含量。利用 Keithley 2450 型交互式源表仪器设备测量试样的体积电阻, 试样尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm, 设置电压扫描范围为 -70 ~ 70 μV , 取电压与电流曲线的斜率作为测试试样的体积电阻。随后参照 GB/T 351-2019《金属材料 电阻率测量方法》计算体积电阻率, 并换算成国际退火铜标准的导电率 (%IACS)^[25]。

2 结果与讨论

2.1 夹杂物形貌和数量

图 1 所示为不同 w[Mn]/w[S] 试样的 500 倍抛光态金相照片。在金相显微镜明场下观察, 发现深灰色夹杂物, 且边部呈圆角, 与 A 类夹杂物 (硫化物) 形态相似; 通过以上信息可以推断此类夹杂为 A 类 MnS·FeS 夹杂。此外, 还观察到长条状和不规则夹杂物, 但长条状夹杂物数量较少, 而不规则多边形夹杂物极少, 可忽略不计。仅用金相显微镜难以确定图中观察到的类球状、长条状和不规则多边形等形貌的夹杂物是硫化物还是氧化物, 李延伟和王雪^[26]提出, 当金相法无法对夹杂物进行判定时, 可以利用电镜能谱法进行最终判定。因此, 笔者将结合电镜能谱仪对明确夹杂物成分进行讨论。



(a) A1 样 w[Mn]/w[S]=4.2; (b) A2 样 w[Mn]/w[S]=5.0; (c) A3 样 w[Mn]/w[S]=6.4; (d) A4 样 w[Mn]/w[S]=9.0

图 1 试样抛光态 500 倍金相图

Fig. 1 Optical micrographs of the polished specimens at 500× magnification

2.2 夹杂物成分分析

从 A1、A2、A3 和 A4 钢中选取普遍存在的典型类球状夹杂物 a、b 进行能谱分析, 结果如图 2~4 所示。由图 2 可以看出, 类球状夹杂物 a 边缘有明显 S 元素富集, 且同时含有 Fe 和 Mn 元素。基于吕建刚等^[27]报道的关于硫化物夹杂的分类, 可以推测此类夹杂物边缘应为 FeS 与 MnS 的固溶体 ((Mn, Fe)S), 其形成机制与钢中硫与锰的优先结合有关。由于 Mn 对 S 的亲合力高于 Fe, 钢中通常通过增加锰硫比来避免低熔点 FeS 的形成。图 3 中的类球状夹杂物 b 出现明显 O 富集, 且同时富含

Si 和 Mn 元素, 因此, 这类夹杂物应为 MnO-SiO₂ 系二元夹杂物。类球状夹杂物四周明显有 S 元素富集, 且同时含有 Fe 和 Mn 元素, 因此, 可判断硫化物以 MnO-SiO₂ 系二元氧化夹杂物为核心形核, 在四周形成 FeS 和 MnS 或 (Mn, Fe)S 夹杂。由图 4 可以看出, 类球状夹杂物 c 同时富含 O、S、Mn、Si 元素, 表明这类夹杂物为氧化物与硫化物的复合夹杂。

采用 EBSD 结合能谱仪进一步分析 A1、A2、A3、A4 钢中夹杂物物相和元素分布, 检测结果分别如图 5~8 所示。

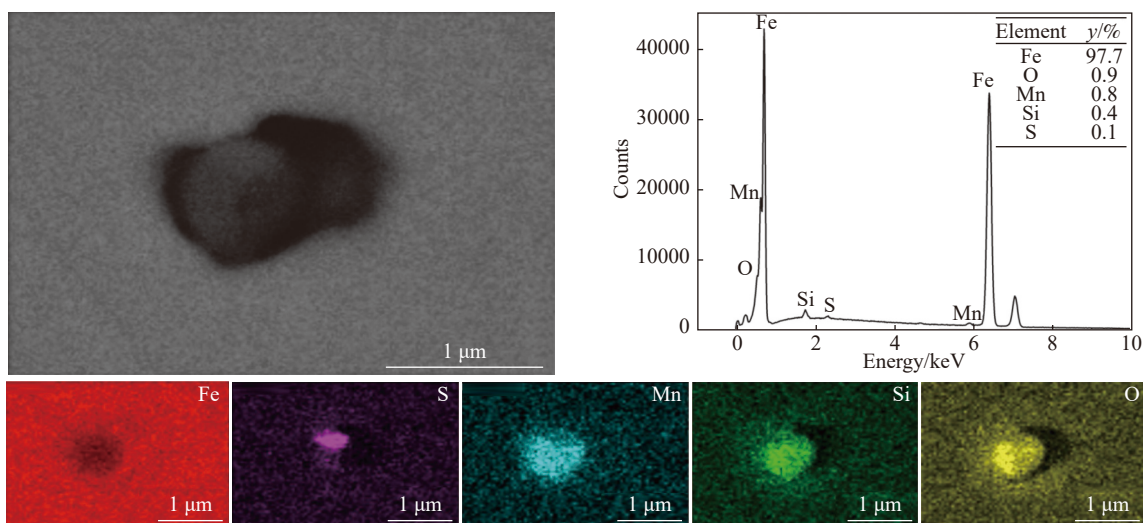


图 2 类球状夹杂物 a 形貌和元素分布
Fig. 2 Morphology and elemental maps of near-spherical inclusion a

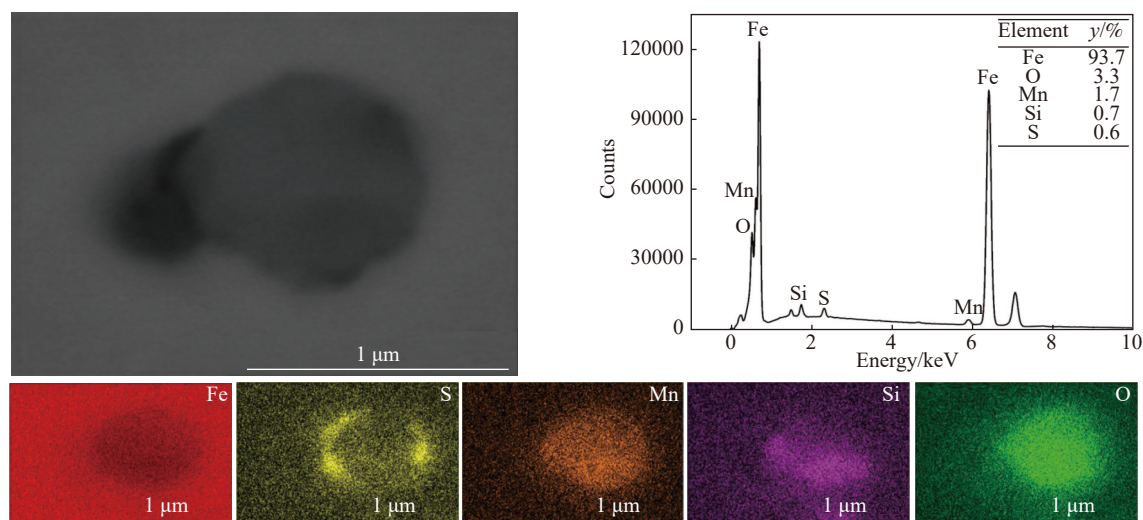


图 3 类球状夹杂物 b 形貌和元素分布
Fig. 3 Morphology and elemental maps of near-spherical inclusion b

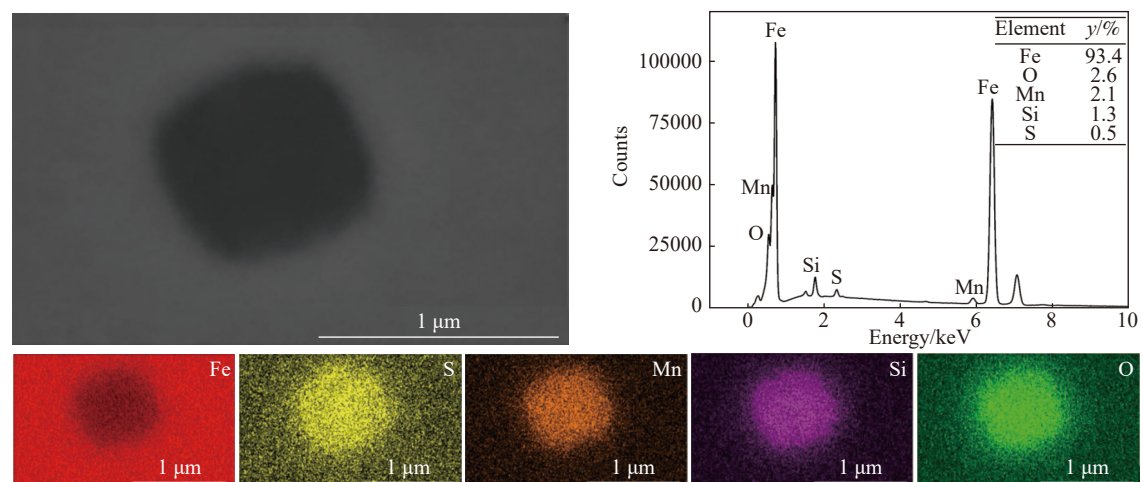


图 4 类球状夹杂物 c 形貌和元素分布
Fig. 4 Morphology and elemental maps of near-spherical inclusion c

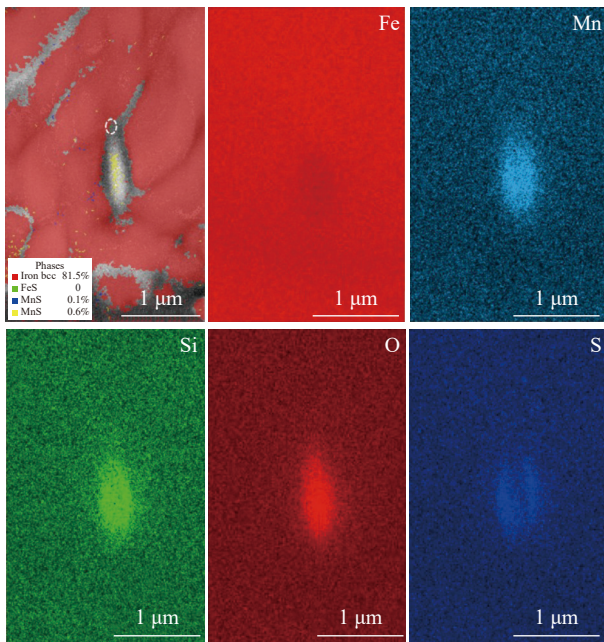


图 5 A1 钢($w[\text{Mn}]/w[\text{S}]=4.2$)典型夹杂物的 EBSD 和能谱结果

Fig. 5 EBSD and EDS results of typical inclusions in A1 steel($w[\text{Mn}]/w[\text{S}]=4.2$)

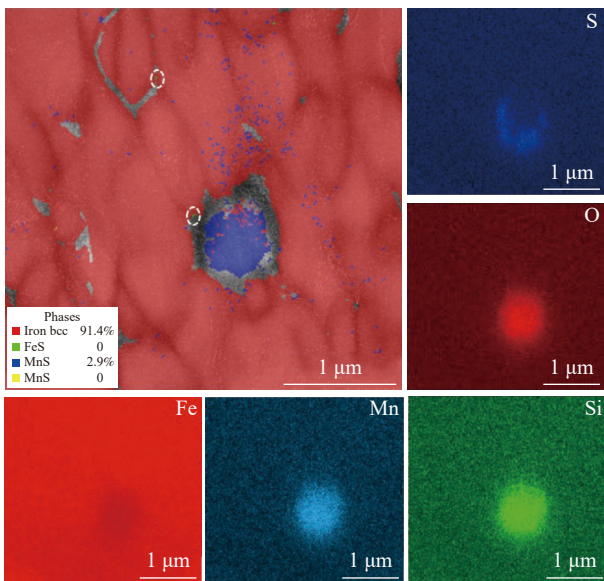


图 6 A2 钢($w[\text{Mn}]/w[\text{S}]=5.0$)典型夹杂物的 EBSD 和能谱结果

Fig. 6 EBSD and EDS results of typical inclusions in A2 steel($w[\text{Mn}]/w[\text{S}]=5.0$)

图 5 给出了 A1 钢($w[\text{Mn}]/w[\text{S}]=4.2$)夹杂物的 EBSD 和能谱结果。由 EBSD 相图可以看出, 长条形夹杂物中含有硫化物 MnS。需要指出的是, EBSD 技术识别的 MnS 有 MnS_2 和 $\alpha\text{-MnS}$ 两种结构^[28], 因而相图中出现不同颜色的 MnS 相。由于采集精度所限, 系统计算含量时仅保留一位小数, 因此统计结果中 FeS 含量为 0, 但是在相图中可以看到绿色相 FeS 夹杂, 如图中圆圈所示。同时, 由元素

分布结果可知, 夹杂物富集 Mn、Si、O、S 元素, 而稍贫 Fe 元素, 且 S 元素主要在夹杂物四周聚集。据此可说明, 夹杂物主要为氧化物 MnO 、 SiO_2 和硫化物 MnS, 还有少量 FeS 存在。

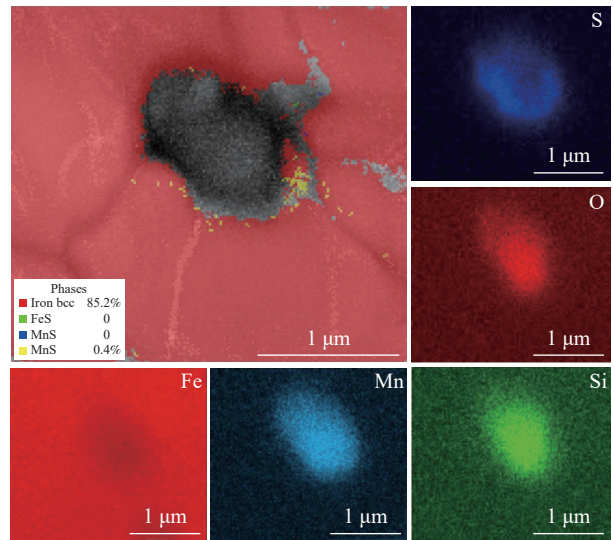


图 7 A3 钢($w[\text{Mn}]/w[\text{S}]=6.4$)典型夹杂物的 EBSD 和能谱结果

Fig. 7 EBSD and EDS results of typical inclusions in A3 steel($w[\text{Mn}]/w[\text{S}]=6.4$)

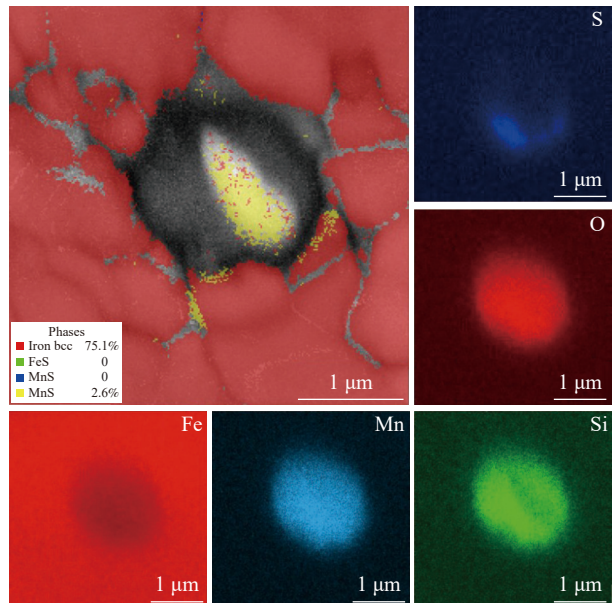


图 8 A4 钢($w[\text{Mn}]/w[\text{S}]=9.0$)典型夹杂物的 EBSD 和能谱结果

Fig. 8 EBSD and EDS results of typical inclusions in A4 steel($w[\text{Mn}]/w[\text{S}]=9.0$)

图 6 给出了 A2 钢($w[\text{Mn}]/w[\text{S}]=5.0$)夹杂物的 EBSD 和能谱结果。由 EBSD 相图可以看出, 类球状夹杂物中含有硫化物 MnS, 由于采集精度有限, 统计结果未出现 FeS, 但是在相图中仍可看到绿色相 FeS 夹杂, 如图中圆圈所示。此外, A2 钢夹杂物

的元素分布及构成与 A1 钢相似,且 FeS 含量进一步减少。

图 7 给出了 A3 钢($w[\text{Mn}]/w[\text{S}]=6.4$)夹杂物的 EBSD 和能谱结果。由 EBSD 相图可以看出,类球状夹杂物中含有硫化物 MnS,由于采集精度有限,统计结果同样未出现 FeS,但是在相图中仍可观察到极少量的绿色相 FeS 夹杂。此外,A3 钢夹杂物的元素分布及构成同样与 A1 钢相似。

图 8 给出了 A4 钢($w[\text{Mn}]/w[\text{S}]=9.0$)夹杂物的 EBSD 和能谱结果。由 EBSD 相图可以看出,类球状夹杂物中含有硫化物 MnS,而无 FeS 形成。此外,A4 钢的夹杂物元素分布与 A1 钢相似,但是夹杂物主要为氧化物 MnO、SiO₂ 和硫化物 MnS。

根据 EBSD 结果可知,随着 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 的增加,形成的硫化物逐渐以 MnS 为主,FeS 含量越来越少。当 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 增加至 6.4 时,有极少量 FeS 形成,可忽略不计;当 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 增加至 9.0 时,无 FeS 形成。因此,对于笔者研究的超低碳钢,当 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 为 6.4 时,可视为 FeS 未形成,满足了超低碳钢的加工要求。此外,根据能谱结果可推测,夹杂物在凝固过程中析出顺序为: SiO₂>MnO>MnS>FeS。

2.3 导电率分析

金属导电归因于自由电子在电场下的定向移动,当电子的定向移动受到干扰时,会导致电阻率升高,导电率下降。根据 Matthiessen 定则,超低碳钢总的电阻率包括金属的基本电阻率和杂质、点缺陷、位错等引起的电阻率^[29],如式(1)所示。由于试验钢仅通过调节 S 含量改变 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$,而其它元素含量

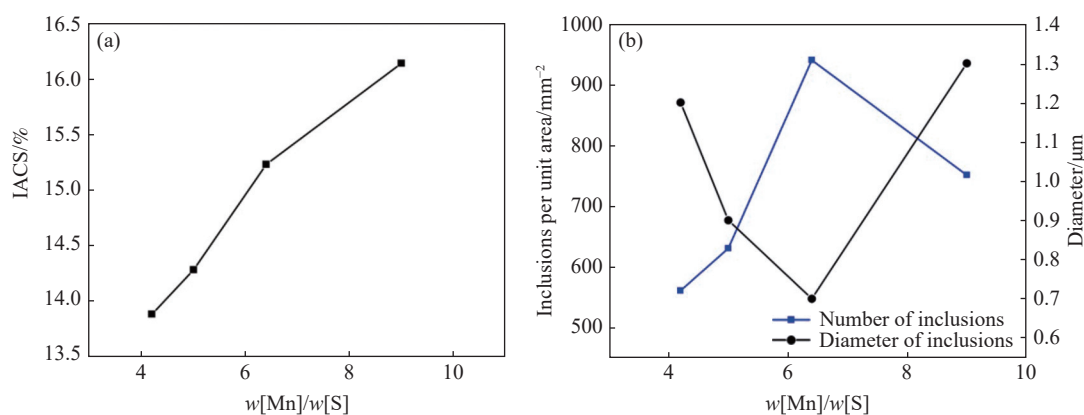
基本一致。同时,试验钢经相同轧制及回火工艺处理后进行电阻率测试。因此,对于 A1~A4 钢,仅考虑了固溶原子和析出相引起的电阻率变化,如公式(2)所示。

$$\rho = \rho_{\text{Fe}} + \rho_{\text{gb}} + \rho_{\text{d}} + \rho_{\text{v}} + \rho_{\text{ss}} + \rho_{\text{p}} \quad (1)$$

$$\Delta\rho = \Delta\rho_{\text{ss}} + \Delta\rho_{\text{p}} \quad (2)$$

式中, ρ_{Fe} 为无缺陷纯铁电阻率,室温时为 $9.78 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$; ρ_{gb} 为晶界导致的电阻率; ρ_{d} 为位错导致的电阻率; ρ_{v} 为空位导致的电阻率; ρ_{ss} 和 ρ_{p} 分别为固溶原子和析出相导致的电阻率。

一般而言,元素以析出态存在时增加的电阻率要远小于以固溶态存在时^[30]。因此,夹杂物数量越少、尺寸越小,原子固溶就越多,自由电子定向移动受到的阻碍就越大,导致电阻率升高、导电率下降。图 9(a)所示为试验钢 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 与导电率的关系。可以看出,随着 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 的升高,超低碳钢导电率呈单调增加的变化趋势。由以上分析可知,导电率的增加源于固溶态 Mn、S 含量的降低,而夹杂物尺寸与数量变化可作为 Mn、S 元素固溶量的间接表征。因此,为进一步解释导电率变化规律,对不同 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 钢中夹杂物的数量与尺寸进行统计。由图 1 可知,绝大多数夹杂物形貌为类球状,且长条状夹杂物的长宽比较小,因此统计长条状夹杂物尺寸时将其面积计算得出的等效圆直径作为其尺寸,统计结果如图 9(b)所示。可以看出,在 0.10% Mn 含量下,随着 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 的升高,单位面积内夹杂物数量呈先增加后降低的趋势,而夹杂物直径呈先降低后增加的趋势。



(a)导电率;(b)单位面积夹杂物数量与尺寸

图 9 不同 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 下试样钢的特性参数

Fig. 9 Characteristic parameters of the sample steels under different $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$

夹杂物的形成机制可归因于形核数量与溶质供应的协同作用,当形核数量较少时,溶质元素集中,导致夹杂物尺寸增大;反之,形核数量增多则促进溶质分

散,抑制夹杂物长大^[31]。当 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 较低(<6.4)时,此时 S 含量充足,形成的硫化物中含有少量 FeS;随着 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 的增加,FeS 含量降低,夹杂物数量

有所增加,但尺寸有所下降。当 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 增加至 6.4 时,形成的硫化物主要为 MnS 夹杂,且夹杂物数量明显增加,尺寸进一步下降,这与房孟婷等^[31] 研究结果一致。当 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 增加至 9.0 时,钢中夹杂物的数量及尺寸均达到较高水平,钢的导电率也最高,达到 16.14%。这是因为此时钢中形成的硫化物基本为 MnS,且夹杂物数量较多、尺寸较大;同时,Mn 和 S 元素的高效脱溶使固溶元素含量显著降低,从而减弱了自由电子的散射效应,提高了导电率。当 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 为 6.4 时,虽然夹杂物数量最多,但其尺寸最小,综合评估下,消耗的 Mn 和 S 元素低于 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 为 9.0 的试样,使得固溶元素含量增加,从而降低了导电率。当 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 为 5.0 或 4.2 时,夹杂物数量显著降低,且形成了含量较高的 FeS,使得固溶的 Mn 元素含量提高,导电率进一步降低。

3 结论

1) 当 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 在 4.2 ~ 9.0 时,超低碳钢中夹杂物形态为类球状和长条状,且类球状占绝大部分;

随着 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 的增加,夹杂物的数量先增加后减少,而夹杂物的尺寸先减小后增大。

2) 超低碳钢中夹杂物按成分可分为两类:一类是以 MnO-SiO₂ 系二元氧化夹杂物为核心,在四周形成 (Mn, Fe)S 复合夹杂物;另一类是氧化物与硫化物混合的复合夹杂物。当 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 为 6.4 时,钢中基本无 FeS 形成,满足超低碳钢的加工要求。因此,超低碳钢的锰硫比应控制不低于 6.4。

3) 随着 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 的增大,超低碳钢的导电率逐渐增大;当 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 为 9.0 时,最大的夹杂物尺寸和较多的夹杂物数量使固溶在钢基体中的 Mn 和 S 元素最少,降低了电阻率,使超低碳钢导电率最大。

4) 当 Mn、S 元素含量较低时,钢中形成的硫化物尺寸较小,使用全自动夹杂物分析技术难以识别,此时结合使用 EBSD 和 EDS 技术可有效分析夹杂物构成,为细小夹杂物的识别与成分判定提供了一种有效方法。

参考文献

- [1] PAN X Q, YANG J, ZHI J J, *et al.* Evolution of inclusions in steelmaking process for ultra low carbon BH auto exposed panel[J]. *Iron and Steel*, 2019, 54(8): 48-57.
(潘晓倩, 杨健, 职建军, 等. 超低碳汽车外板 BH 钢炼钢过程中夹杂物的演变[J]. *钢铁*, 2019, 54(8): 48-57.)
- [2] HUANG S Y, LUO G, YANG J, *et al.* Effect of oxygen content on evolution of inclusions in ultra low carbon steel during steelmaking and continuous casting[J]. *Steelmaking*, 2021, 37(4): 38-48.
(黄淑媛, 罗钢, 杨健, 等. 氧含量对超低碳钢炼钢连铸过程夹杂物演变的影响[J]. *炼钢*, 2021, 37(4): 38-48.)
- [3] YUAN P, ZHANG J, LIU D Z, *et al.* Formation mechanism and control technology of Al-Ti inclusions in ultra low carbon steel[J]. *Iron and Steel*, 2018, 53(7): 24-30.
(苑鹏, 章军, 刘道正, 等. 超低碳钢中 Al-Ti 夹杂物的形成机理和控制技术[J]. *钢铁*, 2018, 53(7): 24-30.)
- [4] TANG X C, CHENG G H, LIU Y J, *et al.* Microstructure and properties evolution during annealing in low-carbon Nb containing steel with high strength and electrical conductivity: an experimental and theoretical study[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 3054-3066.
- [5] TANG X C, KUANG C, ZHOU W L, *et al.* Effect of annealing process on microstructure and electrical conductivity of cold-rolled Ti microalloyed conductive steel[J]. *Materials Characterization*, 2023, 201: 112930.
- [6] LIANG T T, CHEN T, WANG J, *et al.* The correlation between electrical conductivity and thermal conductivity of binary Mg alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1035: 181553.
- [7] PAN S H, YUAN J, ZHANG P, *et al.* Effect of electron concentration on electrical conductivity in in situ Al-TiB₂ nanocomposites[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(1).
- [8] SEGERCRANTZ N, BAUMGARTNER Y, TING M, *et al.* Undoped p-type GaN_{1-x}Sb_x alloys: Effects of annealing[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(25).
- [9] WANG D, WANG Q J, XU B F, *et al.* The effect of Fe content on the microstructure and properties of Cu-3Ti alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 37: 444-454.
- [10] TRINH T T, THANGADURAI V. Effect of Ti substitution for Nb in double perovskite-type Ba₃CaNb₂O₉ on chemical stability and electrical conductivity[J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 56(1): 227-237.
- [11] TAKENAKA S, TAKAHASHI R, ISHIKAWA K, *et al.* Quantification of changes in lattice defect density in BCC iron during plastic deformation using electrical resistivity measurements[J]. *ISIJ International*, 2024, 64(5): 868-873.
- [12] PENG C, LIU H J, HUANG X S. Analysis on factors influencing electrical conductivity of GRD XGM2[J]. *Jiangxi*

- Metallurgy, 2015, 35(2): 30-32.
(彭冲, 刘辉杰, 黄小山. 影响 XGM2 导电率的原因分析[J]. 江西冶金, 2015, 35(2): 30-32.)
- [13] CAO H L, ZHAO P H, XIAO X, *et al.* The effect of solution and aging heat treatment on the strength and conductivity of 6063 aluminum alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2024, 52(12): 1-5.
(曹海龙, 赵沛浩, 肖翔, 等. 固溶和时效热处理对 6063 铝合金强度和导电率的影响[J]. 轻合金加工技术, 2024, 52(12): 1-5.)
- [14] LIAO Q Y, WANG Z, HU W X, *et al.* Effect of solid solution and precipitation on thermal conductivity and mechanical properties of Mg-Zn-Cu-Ce magnesium alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 5923-5932.
- [15] AHN J H, HAN S Z, CHOI E A, *et al.* Simple optimization for strength and conductivity of Cu-Ni-Si alloy with discontinuous precipitation[J]. Materials Characterization, 2022, 184: 111605.
- [16] CAO Y C, HAN S Z, CHOI E A, *et al.* Effect of inclusion on strength and conductivity of Cu-Ni-Si alloys with discontinuous precipitation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 843: 156006.
- [17] KLEIN S, MUJICA R L, WALTER M, *et al.* Diffusion processes during cementite precipitation and their impact on electrical and thermal conductivity of a heat-treatable steel[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(1): 375-390.
- [18] LIU W D, QU H, ZHOU Y. Relationship between the covalent bond energy of sulfides and their precipitation behavior in steel[J]. Journal of Material and Heat Treatment, 2007, 2(28): 136-140.
(刘伟东, 屈华, 周宇. 钢中部分硫化物共价键能与其析出行为的关系[J]. 材料热处理学报, 2007, 2(28): 136-140.)
- [19] JIANG G H. Laboratory study on smelting technology of sulfur-containing free-cutting steel[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007.
(蒋光辉. 含硫易切削钢冶炼技术实验室研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.)
- [20] ITO Y, MASUMITSU N, MATSUBARA K. Formation of manganese sulfide in steel[J]. Transactions of the iron and steel institute of Japan, 1981, 21(7): 477-484.
- [21] LI C L, HU T, ZHOU N, *et al.* Effect of mass ratio of manganese to sulfur on mechanical properties and cutability of 1215MS free-cutting steel[J]. Shanghai Metals, 2023, 45(2): 69-74.
(李成良, 胡涛, 周楠, 等. 锰硫比对 1215MS 易切削钢力学和切削性能的影响[J]. 上海金属, 2023, 45(2): 69-74.)
- [22] JIA W J, LI J Z, SHUAI X Y. Development of cable steel DL05[J]. Steelmaking, 2013, 29(6): 19-22.
(贾万军, 李具中, 帅元元. 电缆钢 DL05 的试制开发[J]. 炼钢, 2013, 29(6): 19-22.)
- [23] YUAN M L. The development and research of XGM2 high wire rod product[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
(袁模亮. XGM2 高线盘条产品开发与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.)
- [24] HOU Z W. Study on refinement control of MnS inclusions in heavy rail steel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
(侯泽旺. 重轨钢 MnS 夹杂物细化控制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.)
- [25] KANG J H, YU K M, LEE S H, *et al.* Electrical conductivity evaluation techniques for superalloy single-crystal steel[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023, 18(2): 1419-1427.
- [26] LI Y W, WANG X. Comparison of metallographic method and electron microscope energy spectrum method for determination of inclusion types[J]. Automobile Technology & Material, 2016, 1: 50-53.
(李延伟, 王雪. 金相法与电镜能谱法对夹杂物种类判定的对比[J]. 汽车工艺与材料, 2016, 1: 50-53.)
- [27] LÜ J G, XIAO L P. Non-metallic inclusions in steel and their metallographic examination[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2015, 51(4): 229-233.
(吕建刚, 肖李鹏. 钢中非金属夹杂物及其金相检验[J]. 理化检验 (A:物理分册), 2015, 51(4): 229-233.)
- [28] FURUSETH S, KJEKSHUS A, NIKLASSON R J V, *et al.* On the properties of alpha-MnS and MnS₂[J]. Acta Chemica Scandinavica, 1965, 19: 1405-1410.
- [29] ROSSITER P L. The electrical resistivity of metals and alloys[M]. Cambridge university press, 1991.
- [30] SU C, LI D J, LUO A A, *et al.* Effect of solute atoms and second phases on the thermal conductivity of Mg-RE alloys: A quantitative study[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 747: 431-437.
- [31] FANG M T, YUAN H Z, XIE X, *et al.* Precipitation and growth of MnS inclusions in heavy rail steel slab[J]. Iron and Steel, 2023, 58(5): 59-69.
(房孟婷, 袁华志, 谢鑫, 等. 重轨钢铸坯中 MnS 夹杂物的析出与长大[J]. 钢铁, 2023, 58(5): 59-69.)