

镁钙处理对 45MnVS 非调质钢中硫化物形貌的影响

展天寅，田俊，王德永，屈天鹏

苏州大学 沙钢钢铁学院，苏州 215137

Effect of Mg-Ca treatment on the morphology of sulfide inclusion in 45MnVS non-quenched and tempered steel

Zhan Tianyin, Tian Jun, Wang Deyong, Qu Tianpeng

Shagang School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou, 215137, China

1. 前言

45MnVS 钢是一种典型的中碳含硫非调质钢，广泛用于制造汽车的曲轴、曲柄、连杆、转向节轴、驱动轴、前桥等零部件。由于 45MnVS 钢中的硫化锰(MnS)夹杂物比基体更软，在轧制时 MnS 夹杂多呈细长条状，影响材料的切削性能，并加剧钢材的各向异性。因此，控制 45MnVS 钢中的 MnS 的形貌对提升该钢种的综合力学性能尤为重要^[1-2]。钙处理和镁处理是目前常用的夹杂物改性方法^[3-4]。本文对某企业采用钙处理和镁钙复合处理生产的 45MnVS 非调质钢样品进行对比分析，研究两种处理方法对钢中夹杂物成分、形貌的影响，可为非调质钢中夹杂物的控制提供参考。

2. 试验材料与方法

本试验在国内某钢厂进行，其 45MnVS 非调质钢冶炼工艺为：电弧炉(EAF)→钢包炉(LF)→真空脱气(VD)→连铸(CC)→轧制(棒材：φ60mm)。其中 A 炉为 Ca 处理，B 炉为 Mg-Ca 处理。分析铸坯样钢成分如表 1 所示。

表 1 试验钢成分（质量分数%）

Table 1 the chemical composition of steel(mass fraction, %)

处理工艺	C	Si	Mn	P	S	Al	V	O	Ca	Mg
Ca	0.44	0.41	1.41	0.021	0.043	0.028	0.099	0.0021	0.0012	/
Mg-Ca	0.43	0.47	1.46	0.022	0.045	0.025	0.0956	0.0020	0.0011	0.0012

在轧制后的棒材上取样，分析沿着轧制方向上的夹杂物特征。用 SEM-EDS 分析夹杂物形貌和成分，用 Aspex 定量分析夹杂物类型及长宽比，并用热力学软件 FactSage 8.0 计算分析夹杂物的形成原因。

3. 结果与分析

3.1. 试样中夹杂物类型及形貌

用 Aspex 检测分析夹杂物的类型及其长宽比，结果如图 1 所示。由图 1(a)可见，夹杂物主要有三种类型：MnS, MnS-Oxide 和其他类型。Ca 处理后，纯 MnS 所占比例为 62.04%，MnS-Oxide 所占比例为 22.66%。Mg-Ca 处理后，纯 MnS 所占比例为 53.62%，同时 MnS-Oxide 比例增加至 30.66%。即 Mg-Ca 处理可以形成更多的 MnS-Oxide 夹杂物。长宽比是描述夹杂物形貌的重要参数之一，Sims CE 根据 MnS 夹杂在钢中不同形态将其分为 3 类：球状的 I 类硫化物；树枝状的 II 类硫化物；规则状的 III 类硫化物^[5]。由图 1(b)图可知，Ca 处理后长宽比在 1~3 的夹杂物所占百分比为 19.99%，Mg-Ca 处理该百分比约为 35.38%，形成了更多纺锤状（长宽比≤3）的硫化物，表明 Mg-Ca 处理更有利于改善硫化物形貌。

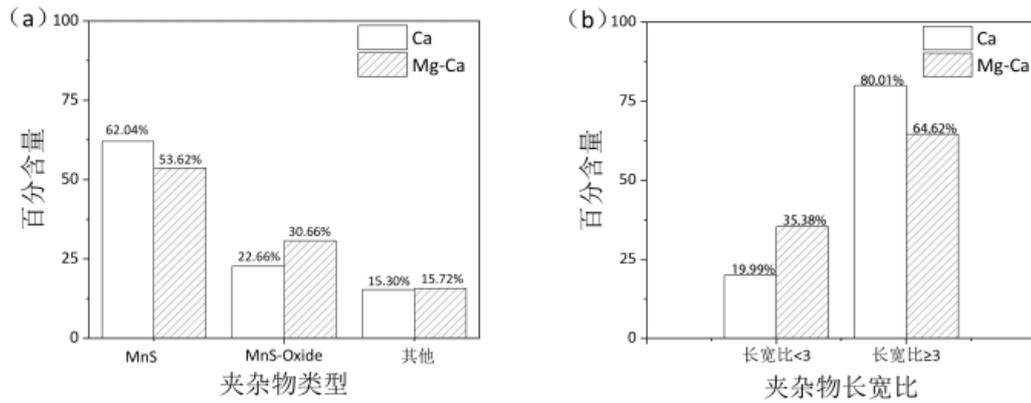


图 1 轧材试样中夹杂物类型及其长宽比 ((a)夹杂物类型, (b)长宽比)

Fig.1 Types of inclusions and their aspect ratios in rolled samples ((a) Types of inclusions, (b) aspect ratios)

试样中典型夹杂物的形貌如图 2 所示。图 2(a)和(b)为 Ca 处理后典型的长条状 MnS, 图 2(c)和(d)为 Mg-Ca 处理后典型的球状、纺锤状夹杂物。纺锤状硫化物大多为含有氧化物 (Al-Ca-Mg-O) 核心的 MnS, 且 MnS 中溶解有一定量的 Ca 或者 Ca+Mg。

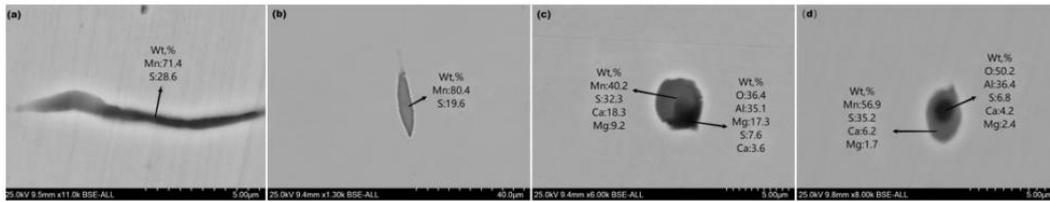


图 2 轧材试样中典型夹杂物形貌 (a、b 为 Ca 处理, c、d 为 Mg-Ca 处理)

Fig.2 Morphology of typical inclusions in rolled samples (a and b are Ca treatment, c and d are Mg-Ca treatment)

相比于 Ca 处理钢, Mg-Ca 处理钢轧材试样中, 长条状硫化物数量较少, 大部分为纺锤状硫化物。

3.2. 夹杂物形成

用 Factsage 软件计算 Ca、Mg-Ca 处理钢液凝固过程中氧化物和硫化物的析出量, 如图 3 所示。用式 (1) 和 (2) 计算钢液的液相线和固相线温度, 其值分别为 1483°C 和 1350°C, 将其标示于图 3 中。由图可见, Mg-Ca 处理后钢中形成了 MgO·Al₂O₃, 该类夹杂物在钢液中不宜聚集长大, 尺寸较小^[6]。可以为 MnS 的形核析出提供更多的核心, 如图 2(c)、(d)所示。

$$T_l = 1536 - 83w[C] - 7.8w[Si] - 5w[Mn] - 32w[P] - 31.5w[S] - 3.6w[Al] - 2w[V] \quad (1)$$

$$T_s = 1536 - 334w[C] - 12.3w[Si] - 6.8w[Mn] - 124.5w[P] - 183.5w[S] - 4.1w[Al] \quad (2)$$

用 Image Pro-Plus 6.0 软件测量每个硫化物夹杂的氧化物核心和整个夹杂物面积之比, 并分析氧化物核心中 Ca 或 Mg+Ca 含量。统计分析面积比及 Ca 或 Mg+Ca 含量与硫化物长宽比的关系, 结果如图 4 所示。由图可见, 硫化物长宽比与面积比成正比, 与 Ca、Mg+Ca 含量成反比。

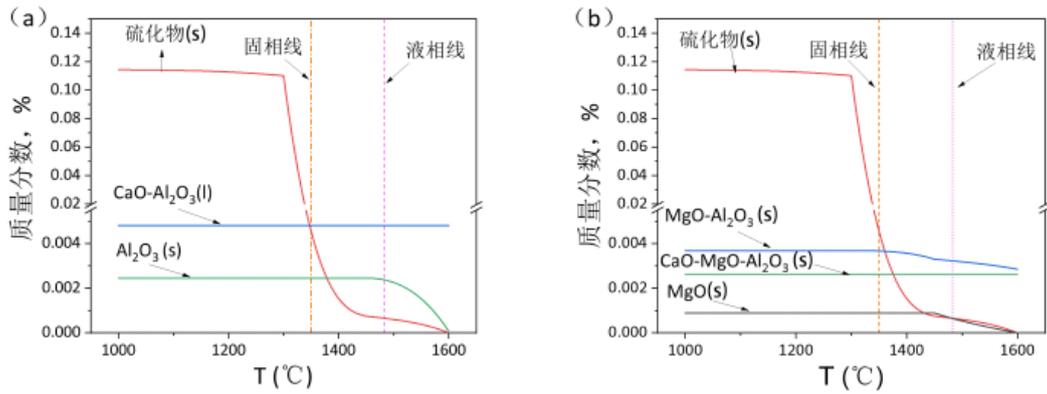


图 3 试样凝固过程中夹杂物的析出量 (a 为 Ca 处理, b 为 Mg-Ca 处理)

Fig.3 Inclusion content of steel during solidification (a is Ca treatment, b are Mg-Ca treatment)

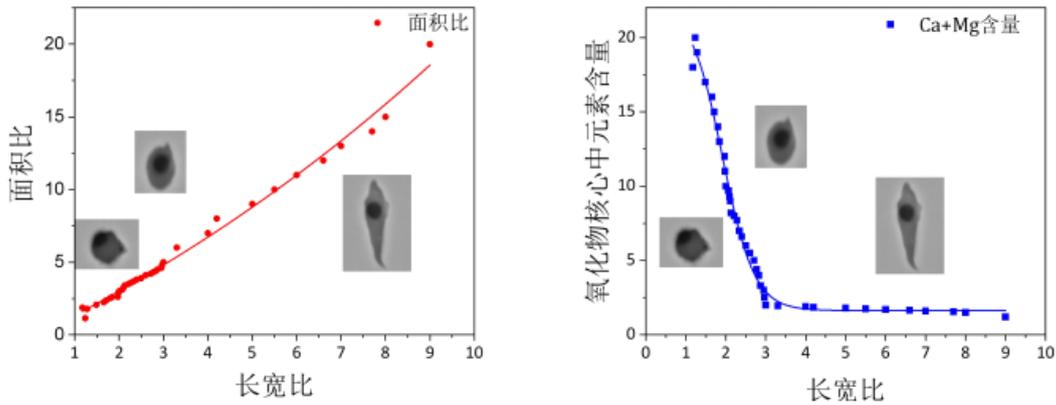


图 4 夹杂物长宽比与面积比和氧化物核心中元素含量的关系

Fig.4 The relationship between the aspect ratio of inclusions and the area ratio and the content of elements in the oxide core

用 Factsage 软件计算 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 三元相图在炼钢温度 (1600°C) 下的半液相区, 并将 Ca 和 Mg-Ca 处理后的试样中硫化物核心中氧化物的成分标注于图中, 结果如图 5 所示。由图可知, Ca 处理后钢中氧化物夹杂中 MgO 含量较少, 大多在半液相区外, 而 Mg-Ca 处理后, 氧化物夹杂大多分布在相图中半液相区域内。半液相区的氧化物更容易与 MnS 结合形成复合硫化物。

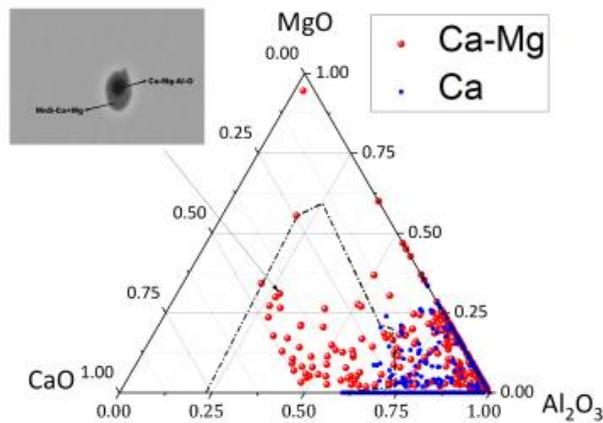


图 5 硫化物核心中氧化物在三元相图中的成分分布

Fig.5 Composition distribution of oxides in the sulfide core in the ternary phase diagram

计算 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 体系中氧化物的活度，如图 6 所示。随着 CaO 和 MgO 含量的升高，其在体系中的活度增加，这有利于其与 S 发生反应形成复合硫化物，并提高硫化物中 Ca 、 Mg 含量（如图 5 所示），从而提高硫化物硬度，降低硫化物在轧制过程中的变形率，使其呈纺锤状。

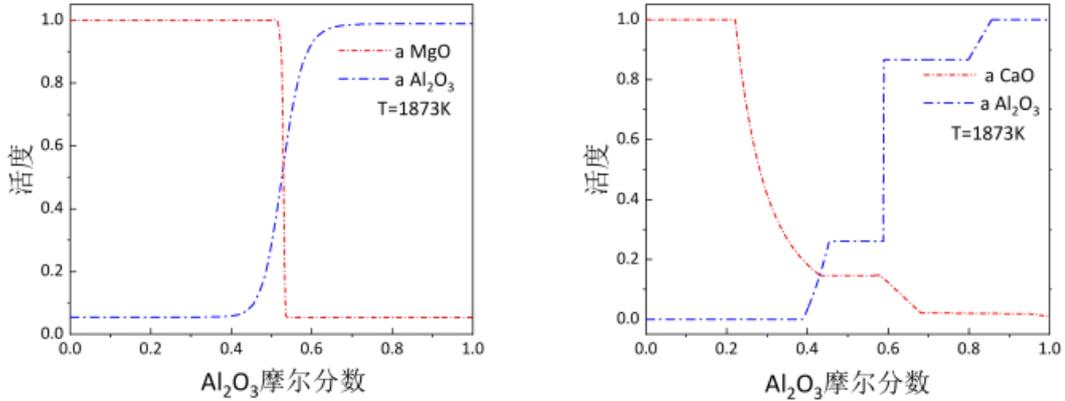


图 6 Al_2O_3 - MgO 和 Al_2O_3 - CaO 体系中的活度

Fig.6 Activity of oxide in the Al_2O_3 - MgO and Al_2O_3 - CaO systems

4. 结论

(1) 45MnVS 非调质钢中夹杂物主要为硫化物。

(2) Ca 处理钢中纺锤状硫化物占比为 19.99%， Mg-Ca 处理钢中该百分比为 35.38%，表明 Mg-Ca 处理更有利于改善硫化物形貌。

(3) 硫化物长宽比与硫化物夹杂的氧化物核心和整个夹杂物面积之比成正比、与 Ca 、 Mg+Ca 含量成反比。

致谢

感谢国家自然科学基金项目（项目号：52074186，51704200）的支持。

参考文献

- [1] 陈蕴博, 马鸣图, 王国栋. 汽车用非调质钢的研究进展[J]. 中国工程科学, 2014(2):4-17, 45.
- [2] 刘赞丰, 张传友, 王冠. 汽车发动机胀断连杆用中碳非调质钢 46MnVS5 的应用现状与发展 [J]. 汽车工艺与材料, 2022, (01): 38-42.
- [3] J H Jung, J H Shin, S J Lee. Improvement of Anisotropic Mechanical Behavior by Sulfide Control in Quenched and Tempered 4340 Steel[J]. J of Materi Eng and Perform, 2015, 24(7):2658-2664.
- [4] T S Zhang, D Y Wang, M F Jiang. Effect of magnesium on evolution of oxide and sulphide in liquid iron at 1873K[J]. Journal of Iron and steel research, international, 2014, 21(12):1073-1080.
- [5] SIMS C E. THE NONMETALLIC CONSTITUENTS OF STEEL [J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1959, 215(3): 367-393.
- [6] J Yang, T Yamasaki, M Kuwabara. Behavior of inclusions in deoxidation process of molten steel with in situ produced Mg vapor[J]. ISIJ Int., 2007, 47(5):699-708