稀土对低碳低硅钢中夹杂物的影响研究*

韩春鹏[1,2],张怀军[1,2],刁望才[1,2],张 娜[1,2],钱静秋[1,2],陈建新[1,2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古自治区稀土钢产品研发企业重点实验室,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 针对低碳低硅钢的生产工艺情况,在RH处理过程中添加稀土合金,研究稀土对夹杂物的影响。研究表明,当钢中稀土含量为0.003 2% ~0.004 1%时,与加入稀土前相比钢中大颗粒夹杂物数量减少,小颗粒夹杂物比例增加,钢中的夹杂物的形貌由球形、团簇形、条形等变为球形,夹杂物类型由氧化物变化稀土硫氧复合夹杂物和稀土氧化物。

关键词: 低碳低硅钢;精炼渣;夹杂物
中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009 -5438(2020)02 -0017 -04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.02.007

Study on Effects of Rare Earth on Inclusions in Low - carbon and Low - silicon Steel

Han Chun - peng[1,2], *Zhang Huai - jun*[1,2], *Diao Wang - cai*[1,2], *Zhang Na*[1,2], *Qian Jing - qiu*[1,2], *Chen Jian - xin*[1,2]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Inner Mongolia Key laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The rare earth alloys are added in RH treatment to study the effects of rare earth on inclusions based on the production process of low - carbon and low - silicon steel. The results showed that the number of large - grained inclusions decreased and the proportion of short grained inclusions increased compared with those before adding the rare earth when the content of rare earth in steel was 0.003 2% ~0.004 1%. Moreover, the morphology of inclusions in steel was changed from spherical, cluster and strip to spherical as well as the type of inclusions was changed from oxide to rare earth sulfur - oxygen complex and rare earth oxide.

Key words: low - carbon and low - silicon steel; refining slag; inclusions

随着冶金技术水平的不断提高,钢中夹杂元素的含量得到有效控制,使得洁净钢的生产变为可能。钢中夹杂物的组成类型、形态、分布以及尺寸等因素都不同程度地对钢材性能产生影响,夹杂物已成为衡量钢材性能的一个重要指标[1-2]。目前稀土在钢中的作用机理的深入研究,已相继取得进展,尤其对稀土微合金化作用机理和稀土加入钢中能改变夹杂物的性质、形态和分布的研究[3-4]。

* 收稿日期:2020 -02 -13
作者简介:韩春鹏(1982 -),男,内蒙古和林格尔县人,硕士,高级工程师,现从事炼钢工艺研究工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

因此，针对低碳低硅钢在RH工序添加稀土铈合金，采用金相显微镜、扫描电镜、能谱仪等方法，分析稀土铈对钢中夹杂物的大小、形貌、成分等的情况，为稀土在洁净钢中的进一步应用提供理论依据。

1 稀土在钢中的作用

稀土在钢中的作用主要表现在三个方面：对钢质的净化作用，细化钢的凝固组织，对钢中夹杂物的形态控制[2-5]。稀土对钢中夹杂物的影响主要有以下二个作用。

(1)用稀土控制夹杂物的类型和形态。钢中加入稀土元素能够改变夹杂物(特别是硫化物)的类型和形态。在稀土应用的初期就认识到它具有这种功能。但是在碳钢及低合金钢中加入稀土金属，得到了球状夹杂物，它属于复合的高熔点夹杂物。以后发表的研究结果也提到钢中加铈后使沿晶界分布的硫化物改变为分布于晶内的球状硫化物或者使块状硫化物改变为球状硫化物。但是，要使硫化物改变为球状或适当的形态与分布，不是在任何条件下加入稀土金属都能达到目的。早期的报道指出，在钢中加入稀土金属后对硫化物或其他夹杂物的类型没有显著影响，或者得到聚集的稀土氧硫化物或其他类型夹杂物以及加工后成碎块的链状夹杂物等。总之，钢中加稀土金属并不是常能得到球状的或分布适宜的夹杂物。

(2)对夹杂物的变质作用。未加稀土变质处理前，钢中的夹杂物主要是长条状的MnS和少量的串状Al_2O_3和铝酸盐，加入稀土后形成高熔点的在晶内任意分布的球形夹杂，取代了沿晶界分布的硫化物和串状Al_2O_3。当稀土加入量适宜时，稀土元素不仅能减少夹杂物数量，还能使之细化。由于夹杂的变质能增加夹杂物与晶界之间及晶界抵抗裂纹形成与扩展的能力，从而提高了钢的横向塑性和冲击韧性。

2 研究方案与方法

2.1 研究方案

本试验低碳低硅钢碳含量为0.05%～0.08%，硅含量小于0.03%。低碳低硅钢生产工艺流程为：高炉→KR脱硫→转炉→LF炉→RH炉→板坯连铸→切割。稀土的加入方法，在RH处理过程中添加稀土合金，并在RH就位和RH离位取钢样，进行化学成分分析和金相分析。

2.2 研究方法

2.2.1 化学成分分析

针对加稀土前、后的钢样采用化学法分析钢中的稀土成分。

2.2.2 金相分析

采用金相显微镜和扫描电镜观察加稀土前、后钢中的夹杂物形貌、大小、数量等情况，并采用能谱仪分析典型夹杂物的成分。

3 结果分析

3.1 钢中稀土成分情况

表1为钢中加稀土前、后钢中稀土含量情况。由表1可知，加稀土前钢中稀土含量为小于0.000 1%，加稀土后钢中稀土含量为0.003 2%～0.004 1%，平均为0.003 6%。

表1 钢中加稀土前、后钢中稀土含量(质量分数) %

编号	1	2	3
加稀土前	≤0.000 1	≤0.000 1	≤0.000 1
加稀土后	0.003 2	0.003 4	0.003 4

3.2 钢中夹杂物尺寸分析

采用金相显微镜观察夹杂物的形貌并统计不同尺寸夹杂物的数量，表2为钢中夹杂物尺寸情况。

表2 钢中夹杂物尺寸情况

编号	工序	≤10 μm		10～20 μm		20～50 μm		≥50 μm		合计/个
		数量/个	比例/%	数量/个	比例/%	数量/个	比例/%	数量/个	比例/%	
1	加稀土前	36	40.00	19	21.11	23	25.56	12	13.33	90
	加稀土后	14	46.67	10	33.33	3	10.00	3	10.00	30
2	加稀土前	17	43.59	15	38.46	2	5.13	5	12.82	39
	加稀土后	18	56.25	11	34.38	3	9.38			32
3	加稀土前	19	42.22	17	37.78	5	11.11	4	8.89	45
	加稀土后	27	75.00	8	22.22			1	2.78	36

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通过观察发现加稀土前钢中的夹杂物的形貌为球形、团簇形、条形等，以 B 类夹杂物和单颗粒 Ds 球状夹杂物为主，加稀土后钢中的夹杂物的形貌绝大多数为球形，绝大多数为单颗粒 Ds 球状夹杂物。加稀土前≤10 μm 的夹杂物比例为 40.00% ~ 43.59%，≥50 μm 的夹杂物比例为 8.89% ~ 13.33%，加稀土后≤10 μm 的夹杂物比例为 46.67% ~ 75.00%，≥50 μm 的夹杂物比例为 0 ~ 10.00%；加稀土前夹杂物的总数为 39 ~ 90 个，加稀土后夹杂物的总数为 30 ~ 36 个。

因此，通过 RH 工位，并加入稀土后钢中夹杂物的总数降低，同时大颗粒夹杂物总数减少明显。加稀土后≤10 μm 的夹杂物比例由 41.94% 提高到 59.31%，≥50 μm 的夹杂物比例由 11.68% 降低到 4.26%。

3.3　钢中夹杂物成分分析

图 1 和图 2 为加稀土前、后钢中夹杂物情况。由图 1、图 2 可知加稀土前钢中的夹杂物的形貌为球形、团簇形、条形等，夹杂物以氧化物为主，加稀土后钢中的夹杂物的形貌绝大多数为球形，同时大部分夹杂物都含有稀土元素。

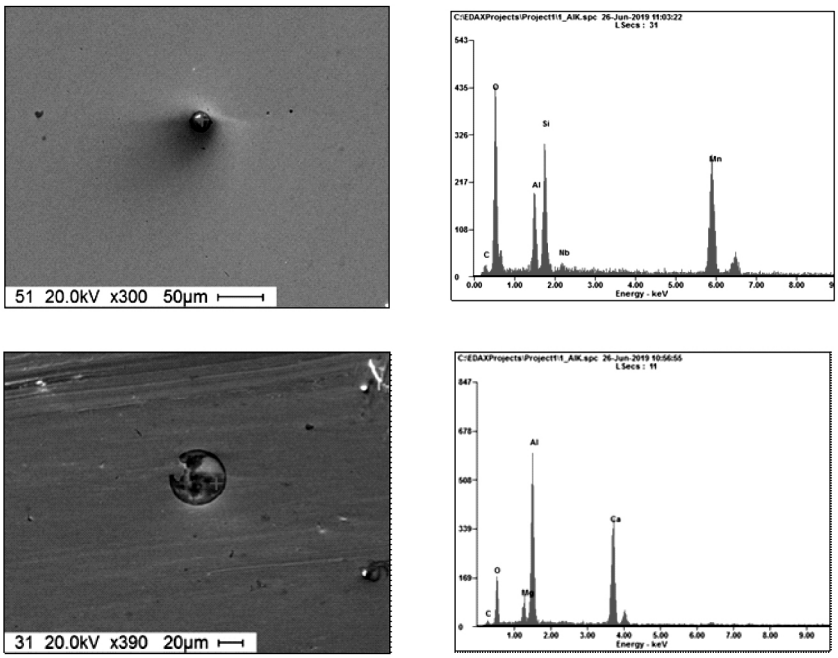


图 1　加稀土前钢中夹杂物情况

表 3 为加稀土前、后钢中不同尺寸夹杂物的化学成分情况。由表 3 可知，加稀土前，≤10 μm 的夹杂物成份为 Mn、Si、Al 的氧化物，≥50 μm 的夹杂物成份为 Al、Ca、Mg 的氧化物，加稀土后，≤10 μm 的夹杂物成份为 Ce、La、Ca、Al、Mg 的硫氧复合夹杂物，La 和 Ce 的含量为 19.51% 和 20.49%，≥50 μm 的夹杂物成份为 Ce、Ca、Al、La、Mg 的氧化物，La 和 Ce 的含量为 5.26% 和 20.07%。

表 3　夹杂物的化学成分

工序	夹杂物尺寸/μm	夹杂物成分(质量分数)/%									
		O	Ca	Si	Al	Mg	Mn	S	Fe	La	Ce
加稀土前	≤10	32.31		12.38	8.54		35.79				
	≥50	32.76	26.44		29.67	4.50					
加稀土后	≤10	12.04	5.62					4.27	19.63	19.51	20.49
	≥50	22.00	19.09		17.47	3.45			2.55	5.26	20.07

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

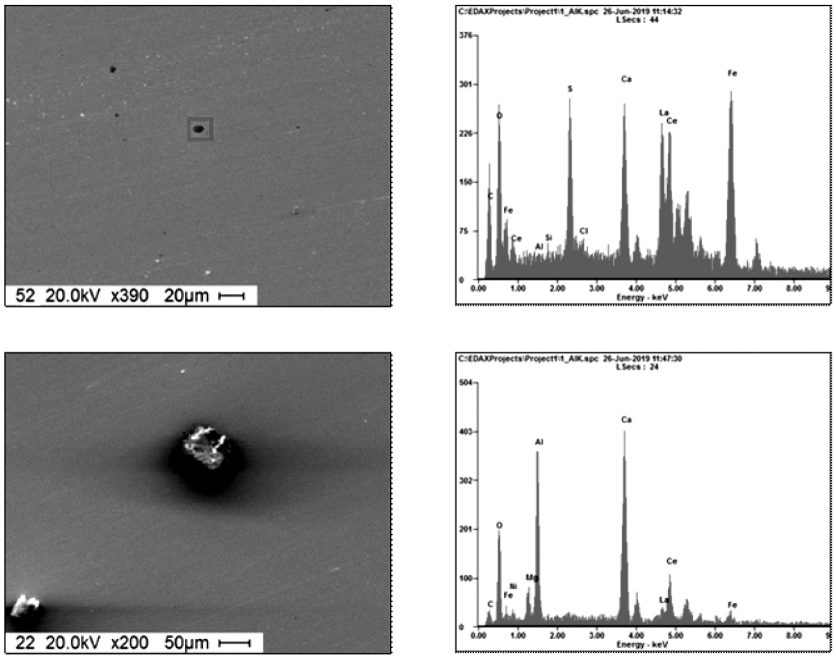


图2 加稀土后钢中夹杂物情况

因此，加稀土前钢中的夹杂物有2类，第一类为Al、Ca、Mg的氧化物，第二类为Mn、Si、Al的氧化物，加稀土后钢中的夹杂物有2类，第一类为Ce、La、Ca、Al、Mg的硫氧复合夹杂物，第二类为Ce、Ca、Al、La、Mg的氧化物。

通过分析可知，加稀土前夹杂物的总数平均为58个，加稀土后夹杂物的总数为33个，加稀土后≤10 μm的夹杂物比例由41.94%提高到59.31%，与文献资料中的结论相同，当稀土加入量适宜时，稀土元素不仅能减少夹杂物数量，还能使之细化。加稀土前，钢中的夹杂物主要为氧化物，包括内生夹杂物和外来夹杂物，加稀土后钢中的夹杂物一类为稀土与钢中氧化物形成的复合氧化物，另一类为稀土与钢中的氧化物、硫化物复合形成的硫氧复合夹杂物，因此，稀土在钢中易与不同类型的夹杂物聚合，从而改变夹杂物的类型和形态，加稀土后钢中的夹杂物的形貌由球形、团簇形、条形等变为球形，与文献资料中的结论相同，钢中加入稀土元素能够改变夹杂物(特别是硫化物)的类型和形态。

4 结论

(1)当钢中稀土铈含量为0.003 2%～0.004 1%时，与加入稀土前相比钢中大颗粒夹杂物数量减少，小颗粒夹杂物比例增加。

(2)加稀土后，钢中的夹杂物的形貌由球形、团簇形、条形等变为球形，夹杂物类型由氧化物变化稀土硫氧复合夹杂物和稀土氧化物。

参 考 文 献

[1] 林勤，宋波，郭兴敏，等. 钢中稀土微合金化作用与应用前景[J]. 稀土，2001，22(4)：31－36.

[2] 李中元，李长荣. 稀土Ce元素对钢中夹杂物变质的影响[J]. 材料热处理学报，2018，39(10)：75－79.

[3] 刘香军，杨吉春，丁海峰，等. 洁净钢中稀土铈变质夹杂物行为研究[J]. 热加工工艺，2016，45(9)：92－94.

[4] 黄宇，谢有，成国光，等. 稀土对H13钢中夹杂物的影响[J]. 稀土，2018，39(5)：16－23.

[5] 李春龙. 稀土在钢中应用与研究新进展[J]. 稀土，2013，34(3)：78－85.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net