

稀土镧铈对钢液洁净度提高和钢材性能 强化作用研究进展

刘宇航¹, 包燕平¹, 吕子宇¹, 顾超¹, 王皓^{2,3}

- 北京科技大学绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室, 北京 100083;
- 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
- 内蒙古自治区稀土钢产品研发重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘要:我国稀土产业中元素应用失衡,高丰度镧、铈过剩,稀土在钢中的应用逐渐得到重视。文章综述了近年来国内外采用稀土镧铈处理钢的研究进展,包括稀土在净化钢液、变质夹杂物和微合金化方面的效果,设计稀土脱氧试验证明了稀土可作为钢液脱氧剂的可行性。介绍了稀土在强化钢材性能方面的表现,并介绍了稀土与碱金属协同净化钢液及低氧条件下稀土合金化的优越性。在总结现有成果的基础上,对稀土在钢中的高效利用进行了展望。

关键词:稀土钢;净化钢液;稀土夹杂物;微合金化

中图分类号: TG142

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)04-0037-10

Research Progress on Effects of Rare Earth Lanthanum and Cerium on Improving Cleanliness of Liquid Steel and Strengthening Properties of Steel

Liu Yu-hang¹, Bao Yan-ping¹, Lv Zi-yu¹, Gu Chao¹, Wang Hao^{2,3}

- State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
- Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
- Inner Mongolia Key Laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The applications of elements are out of balance in the rare earth industry in our country as well as abundant lanthanum and cerium are surplus so that the applications of rare earth in steel are gradually heeded. In the paper, the research progress on treating steel with rare earth lanthanum and cerium at home and abroad in recent years are overviewed, which includes the effects of rare earth on purifying liquid steel, modifying inclusions and microalloying as well as design of deoxidation test for rare earth proves the feasibility of rare earth as deoxidizer of liquid steel. Moreover, the performances of rare earth in strengthening properties of steel as well as superiorities of purifying liquid steel with rare earth and alkali metal

and microalloying of rare earth under low oxygen condition are introduced. The efficient utilizations of rare earth in steel are expected based on summarizing the on-going results.

Key words: rare earth steel; purify liquid steel; rare earth inclusions; microalloying

稀土是 17 种金属元素的合称,被誉为“现代工业维生素”^[1]。稀土元素及其化合物通常表现出一些独特的性质,从而对材料的韧性^[2]、力学性能^[3]、耐腐蚀性^[4]等产生有利影响。而稀土元素 Ce 和 La 是目前开发最好、较易控制的元素。本文综述了近年来稀土元素 Ce 和 La 对钢影响的研究进展,主要包括净化钢液、改性夹杂物以及稀土的加入对钢性能的影响,并对稀土应用目前存在的问题进行总结,为高丰度镧铈稀土资源在钢中高效利用提供技术支持。

1 稀土净化钢液的作用

因为稀土元素对氧和硫具有很强的亲和力,所以稀土具有一定净化钢液的作用,它能够降低钢中氧、硫含量,并且稀土元素还可以抑制钢中 As、Sb、Pb、Sn 等有害元素对钢的不利影响。

1.1 稀土脱氧、脱硫的作用

稀土与氧元素及硫元素的结合能数值远高于其他元素^[4],当稀土添加到钢液中首先会与钢液中的氧、硫元素反应。本节总结了国内外学者在稀土脱氧、脱硫方面的研究进展。

1.1.1 稀土的脱氧作用

稀土具有很强的脱氧能力,研究证明^[5-6],在钢液经过预脱氧后,极少的稀土元素就可以实现深脱氧的效果。而稀土同样具备很高的单独脱氧能力,早在 18 世纪 Waudby P^[7]的试验及理论研究就证明了稀土能将钢中的氧含量降低到低于用其他脱氧剂或真空碳脱氧的水平。近年来,孙萌^[8]对比了 1 873 K 下 C104Cr 钢中稀土元素与炼钢常用脱氧剂 (Al、Si、C) 的脱氧能力,并指出 Ce 的脱氧能力明显强于 Al、Si、C。当采用 C 脱氧时,对真空气氛的控制有很高的要求,抽真空将炉内压强降至 1 Pa 以下可以达到 Ce 的脱氧水平。Yang^[9]和 Wang 等人^[10]进行稀土脱氧试验时发现,稀土 Ce 加入到 IF 钢和模具钢后分别将 45×10^{-6} 和 55×10^{-6} 的氧降低至 20×10^{-6} 和 16×10^{-6} 。为定量描述稀土元素的脱氧能力,根据之前学者的研究^[11]计算了 1 600 °C 下稀土与常用脱氧剂脱氧的标准吉布斯自由能,见图 1。

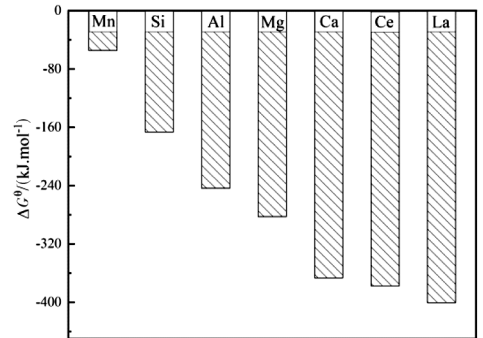


图 1 1 600 °C 下稀土与其他元素脱氧标准吉布斯自由能的比较

由图 1 可得标准状态下稀土元素与氧反应拥有最低的吉布斯自由能,各元素脱氧能力的大小排序为 La、Ce、Ca、Mg、Al、Si、Mn。在进行稀土合金化时同样具有降低钢液中氧含量的效果,总结了近年来典型钢种稀土 (Ce、La 或 Ce + La) 微合金化时氧含量的变化情况,见图 2^[12-18]。

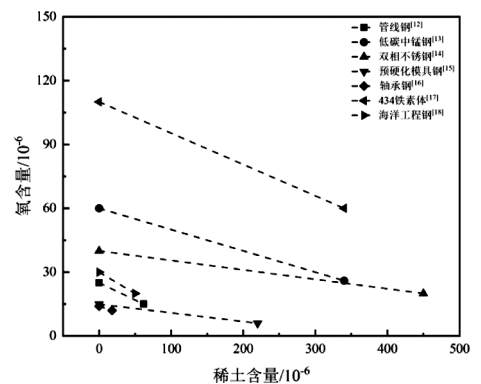


图 2 不同钢种稀土微合金化前后氧含量的变化图

可以看出,稀土加入到钢中后会与钢液中的氧元素进行反应,从而达到降低钢中氧含量的效果,通过控制反应条件,稀土可以将钢中的氧含量脱除至 20×10^{-6} 以下。

为对稀土合金高氧条件下脱氧效果进行评估,分别配置了初始氧含量为 300×10^{-6} 和 500×10^{-6} 的钢液,采用全稀土脱氧工艺,加入碱度为 6 的预熔

精炼渣使夹杂物有效上浮。反应采用真空感应炉,在纯氩保护氛围下加热熔化,稀土合金采用 Ce 含量 30% 的铈铁合金。为对全流程的氧氮含量进行评估,对初始熔化后钢样、合金加入后 5 min、精炼渣吸附 30 min 进行取样分析。试验前后氧含量变化见图 3。

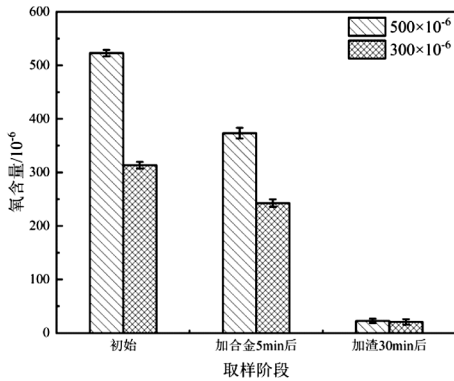


图3 不同阶段不同初始氧含量下氧含量的变化

可以看出,对初始氧含量为 500×10^{-6} 及 300×10^{-6} 而言,合金加入后钢中的氧含量分别下降了 28.7% 和 22.4%,而加入精炼渣保温 30 min 后钢中氧含量分别下降至 23×10^{-6} 和 20×10^{-6} 。实验室试验证明了稀土用于脱氧的可行性。

1.1.2 稀土的脱硫作用

稀土元素加入到钢中后表现出先脱氧后脱硫的特性,只有当氧含量较低且稀土和硫含量较高时,才会生成稀土硫化物。Wang 等人^[19]在管线钢中添加 Ce 时,发现在钢中氧含量下降 50% 后,硫含量才开始下降。刘亚一、臧若愚等人^[20-21]的研究同样对此进行了证明。总结不同钢种稀土添加前后硫含量的变化情况见图 4^[14,15,17,22-26]。

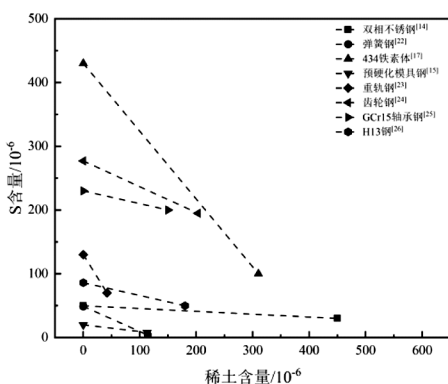


图4 不同钢种稀土微合金化前后硫含量的变化

可以发现,由于添加了稀土,不同钢中的硫含量分别有了不同程度的降低。但是 Wang 等人^[10]在稀土净化钢液的实验室研究中发现,过量的稀土会使钢的洁净度变差,这是因为稀土 Ce 也会使渣中的非金属活性元素在渣-钢界面发生反应,在一定程度上进入钢液,影响渣的脱硫能力。

基于以上研究,稀土元素加入到钢中之后会表现出先脱氧后脱硫的作用,当氧含量较低且硫和稀土的含量较高时,才能有效地发挥脱硫作用。不同钢种对最佳稀土添加量的要求不同,过量的稀土会导致钢液洁净度变差。

1.1.3 稀土与碱金属元素协同净化钢液

虽然稀土具有很好的脱氧、脱硫能力,但是之前的研究^[27]指出,稀土夹杂物的密度与钢液密度相近,其上浮能力受到限制,从而对铸造工艺产生危害。最近有学者提出在添加稀土的同时,加入一定量的活性金属元素如 Mg 或 Ca,可以形成低密度的复合稀土夹杂物,相较于普通稀土夹杂物更易上浮去除,从而实现净化钢液的效果。Wang 等人^[28-29]发现在稀土钢中加入适量的碱金属(Ca 或 Mg)可以提高稀土夹杂物的变形能力,降低夹杂物液相线温度的同时进一步细化夹杂物。Li 等人^[30-31]采用 Ce-Mg 合金处理 H13 钢及模具钢时发现,由于形成了低密度的稀土络合物,夹杂物更容易上浮,从而有效净化了钢液。在稀土同碱金属协同处理的基础上,Lu 等人^[32]研究了 Ce 和 Mg 的加入顺序对不锈钢洁净度的影响,并表明先 Mg 预处理后加 Ce 时对钢液洁净度及夹杂物的影响是最有利的。

结果表明,形成低密度复合稀土夹杂物是净化钢液的关键。因此,采用稀土和碱金属协同处理并通过合理调控其加入顺序较单一稀土的添加更容易使夹杂物上浮去除,有效净化钢液的同时可以减少浇注时水口堵塞等问题。

1.2 稀土脱除其他有害元素的作用

As、Sb、Pb、Sn 等元素对钢有害,稀土完成脱氧、脱硫后剩余的稀土元素会与这些元素形成高熔点化合物或夹杂物,在钢凝固前从钢中析出并进入炉渣,从而达到降低有害元素含量并净化钢液的目的^[4]。Song 等人^[33]发现由于 La-As/Sn 化合物的形成,含 As/Sn 钢的热延性得到了改善。Yu 等人^[34]系统研究了稀土添加对海洋用钢及高碳钢晶界处 As 含量的影响,结果发现加入稀土可以通过生成含 RE-O-As、RE-S-As 或 RE-As 夹杂物来稳定 As,从

而减少了其在晶界处的偏析。Gong 等人^[35]的研究表明,La-O-S/La-O 或 La-S 可作为形核中心,形成 La-O-S-P-As 或 La-S-P-As,从而降低了 As 元素对钢的有害作用。

上述研究表明,稀土元素可以与钢中的有害元素反应,从而减小其在晶界处的偏析,达到净化钢液的目的。

2 稀土改性夹杂物

适量的稀土可以将钢中不规则的大尺寸夹杂物改性为小尺寸的稀土氧化物、稀土硫化物及稀土硫化物。本节综述了稀土元素 Ce 和 La 单独添加及复合添加对钢中夹杂物的改性作用及演变路线。

2.1 Ce 添加对夹杂物的改性

因为 Ce 元素的丰度高、成本低,所以使用 Ce 元素进行夹杂物改性是目前研究较多的钢夹杂物改性方法,许多学者在轴承钢^[36]、高强度钢^[37]、管线钢^[12,19]等钢种上开展了研究。

Geng 等人^[38]在低合金高强度钢中加入 Ce 后发现,原始的大尺寸 MnS 和 Al_2O_3 夹杂物转变为更稳定且细小的 Ce_2O_2S 和 $CeAlO_3$ 夹杂物,并且增加了夹杂物的数密度。Zhou 等人^[39]在重轨钢中加入 Ce 后发现,随着 Ce 含量的增加,原来细长的 MnS 和不规则 Al-Si-Ca-O 夹杂物会被逐渐变质为稀土夹杂物,具体的演变路线为 $MnS + Al-Si-Ca-O \rightarrow Ce_2O_2S + MnS \rightarrow Ce_2O_2S + MnS + Ce_2S_3 \rightarrow Ce_2O_2S + Ce_3S_4 + Ce_2S_3 \rightarrow Ce_2O_2S + Ce_3S_4 + CeS$,演变路线见图 5(a)。Wang 等人^[19]将 Ce 加入到管线钢中后发现,随着 Ce 含量的增加,夹杂物演变路线为: $xCaO \cdot yAl_2O_3 \rightarrow Al_2O_3 - CeAlO_3 \rightarrow Ce_2O_3 - CeAlO_3 \rightarrow Ce_2O_3 - Ce_2O_2S \rightarrow Ce_2O_2S$,见图 5(b),并通过 Factsage 软件计算了夹杂物的生成,计算结果较好地吻合了试验结果。也有研究证明^[24],无论钢中初始氧化物是什么类型,最终都会被转化成 Ce-S 和 Ce-O-S 夹杂物。以上结果表明,不同的钢种或不同钢中元素的含量及稀土添加量都会使夹杂物的演变过程有所不同。

Wang 等人^[40]利用氧硫比 $\omega(O)/\omega(S)$ 来预测夹杂物的生成顺序,当 $\omega(O)/\omega(S) \geq 1$ 时,最终的夹杂物为 $Ce_2O_2S + Ce_2O_3$,如果 $\omega(O)/\omega(S) < 1$,

最终的夹杂物为 $Ce_2O_2S + CeS$ 。而 Ren 等人^[41]采用 T.Ce/T.O 来预测夹杂物的生成,当其范围为 0 至 2.92 时,夹杂物为 $Al_2O_3 + CeAlO_3$,而当 T.Ce/T.O ≥ 8.75 时,夹杂物为 $Ce_2O_2S + CeS$ 。但是,当钢中出现 Ce-O 夹杂物时此模型不适用。针对 Ce-O 夹杂物的出现顺序,Wang 等人^[19]的研究表明,当 Al 含量低于 0.07% 时, Ce_2O_3 才会出现,并进一步表明当 $\omega(Ce)/\omega(Al)$ 值大于 7.5×10^{-4} 时, Al_2O_3 会转化为 $CeAlO_3$,当 $\omega(Ce)/\omega(Al)$ 值增加到大于 0.25 时 Ce_2O_3 将会出现。

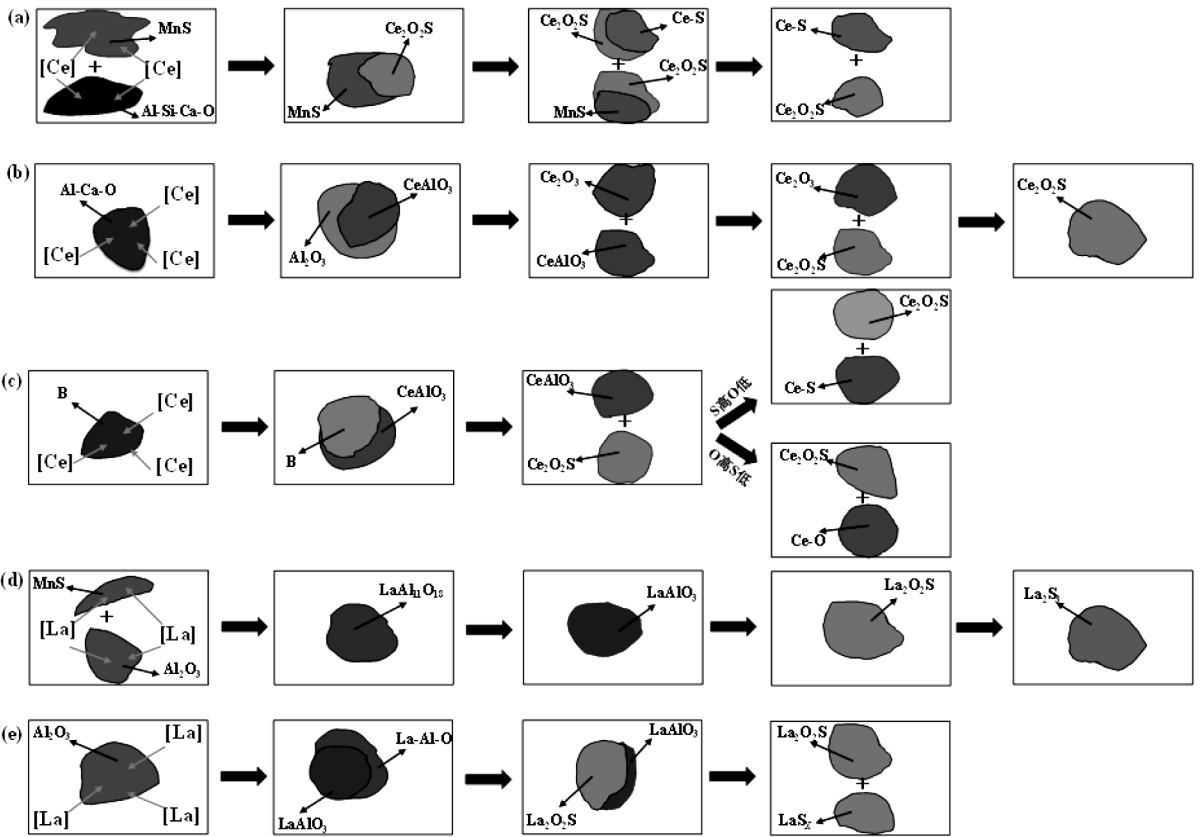
基于上述研究,得到了 Ce 变性钢中夹杂物的基本规律。随着 Ce 含量的增加,夹杂物的演变顺序为: $B \rightarrow B + CeAlO_3 \rightarrow CeAlO_3 + Ce_2O_2S \rightarrow Ce_2O_2S + Ce-S/Ce_2O_2S + Ce-O$,见图 5(c),其中 B 为原始夹杂物。当 Al 含量较高且 Ce 含量较低时会出现 $CeAlO_3$ 夹杂物,S 和 O 的相对含量决定了最终夹杂物的存在形式,具有较高 S 含量的钢最终夹杂物为 $Ce_2O_2S + Ce-S$,而具有较高 O 含量的钢最终夹杂物为 $Ce_2O_2S + Ce-O$ 。这些规律为添加 Ce 后夹杂物类型的变化提供了参考意义和预测方向。

2.2 La 的加入对夹杂物的改性

La 元素同样可改性钢中的夹杂物^[42]。Li 等人^[43]发现,La 加入钢中之后,随着 La 含量的增加,夹杂物的演变路径总结为: $MnS + Al_2O_3 \rightarrow LaAl_{11}O_{18} \rightarrow LaAlO_3 \rightarrow La_2O_2S \rightarrow La_2S_3$,见图 5(d)。Ren 等人^[44]的研究得出当 La 处理 30 min 后,夹杂物的演变路线为: $Al_2O_3 \rightarrow (La-Al-O) - LaAlO_3 \rightarrow LaAlO_3 - La_2O_2S \rightarrow La_2O_2S + LaS_x$,见图 5(e),这也被 Wang 等人^[45]证明。

2.3 Ce 和 La 的复合添加对夹杂物的改性

根据 Geng 等人^[46]的研究,Ce、La 的加入导致高强度钢中 $MgO \cdot Al_2O_3$ 转变为 RE_2O_3 、 RE_2O_2S 和 $RE_2O_2S + MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物。Huang 等人^[47]的研究也发现在复合稀土加入后,夹杂物由 MnS、 $MnO-SiO_2$ 和 $Mn-Si-O-S$ 转变为 RE_2O_2S 、 $RE_2O_3 + MnS$ 和 $RE_2O_2S + MnS$ 复合夹杂物。此外,还有研究证明^[48-49]复合稀土添加后夹杂物演变规律与单一稀土添加的结果一致。



(a) MnS 和 Al - Si - Ca - O 随 Ce 含量增加的演变路线; (b) Al - Ca - O 随 Ce 含量增加的演变路线; (c) 钢中初始夹杂物随 Ce 含量增加的演变路线; (d) MnS 和 Al₂O₃ 随 La 含量增加的演变路线; (e) Al₂O₃ 随 La 含量增加的演变路线

图 5 不同类型夹杂物随 La 或 Ce 含量变化的演变路线

2.4 Ce 和 La 的添加对夹杂物尺寸的影响

稀土元素加入到钢中后会将大尺寸的 Al₂O₃、MnS 等夹杂物变质为小尺寸的稀土夹杂物,但是过量稀土的加入反而会使夹杂物的尺寸增大^[50]。因此本节总结了各试验条件下添加最佳稀土含量后夹杂物平均尺寸的变化,见表 1。

表 1 加入稀土后夹杂物平均尺寸的变化

钢种名称	添加元素	$d_1/\mu\text{m}$	$d_2/\mu\text{m}$	$w/10^{-6}$	$n/\%$
重轨钢 ^[39]	Ce	6.74	2.01	139	70
耐候钢 ^[51]	Ce	3.00	0.75	410	75
齿轮钢 ^[24]	Ce	3.52	1.63	33	54
高强度低合金钢 ^[38]	Ce	4.51	2.32	65	49
模具钢 ^[31]	Ce	2.18	1.88	70	14
H13 钢 ^[52]	La	2.70	2.0	16	26
Q355 ^[53]	Ce + La	3.48	2.62	210	25

注: d_1 、 d_2 分别为稀土加入前后夹杂物平均尺寸及最佳稀土添加量下的夹杂物平均尺寸; w 表示稀土最佳添加量; $n = (d_1 - d_2)/d_1$ 表示夹杂物尺寸变化率。

3 稀土对钢材性能的影响

稀土变质处理后钢中夹杂物变得细小、均匀、规则,其硬度、线膨胀系数和弹性模量与基体相近,从而在一定程度上可以提高钢的性能。本节总结了稀土的加入对钢的耐腐蚀性、抗疲劳性及其他性能的影响。

3.1 耐腐蚀性

MnS、SiO₂、CaS、TiN、Al₂O₃ 和 Ca - Al - Mg - O 等夹杂物在钢的耐腐蚀性方面会产生负面影响,研究表明^[54-55],稀土变质夹杂物后会导致钢的耐腐蚀性发生变化。张继^[56]的研究发现腐蚀过程中 MnS 溶解产生的 S²⁻ 和 Cl⁻ 的综合作用会使腐蚀速率进一步加快,而稀土元素可以将 MnS 改性为更稳定的稀土夹杂物,从而导致腐蚀速率整体降低。李安鑫等人^[57]的研究表明稀土显著减小了钢中夹杂物的尺寸,使得管线钢拥有了较低的腐蚀敏感性。Wang

等人^[50]的研究解释了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MnS}$ 及稀土夹杂物引起点蚀的过程及稀土钢耐腐蚀性提高的原因为:虽然夹杂物都会与钢基体产生微裂纹并成为薄弱环节,但不同的是当微裂纹中充满电解质时,相较于不添加稀土钢中的 MnS 首先作为阳极溶解,稀土钢中的阳极溶解优先发生在基体一侧。同时,阳极溶解产生的阳离子在微间隙中水解,导致局部酸化,并发生 La 、 Ce 、 Cr 和 $\text{Fe}-\text{O}$ 的化学溶解。溶解的产物 (La^{3+} 和 Ce^{3+}) 集中在点蚀坑中,抑制了点蚀坑的继续扩展,因此加入稀土后钢的耐点蚀性能增强。

上述研究表明,在适当的稀土加入量范围内,细小、球状的稀土夹杂物的溶解产物 (La^{3+} 和 Ce^{3+}) 会富集在点蚀坑中,抑制了点蚀坑的继续扩展,提高了稀土钢的耐蚀性。

3.2 抗疲劳性

众所周知,夹杂物的存在是钢材产生疲劳断裂的主要原因之一,而适量稀土的加入能净化钢液,将不规则夹杂物改性为相对规则的稀土夹杂物,从而

影响钢的疲劳寿命^[58]。Wang 等人^[59]发现由于齿轮钢中的 Al_2O_3 和 TiN 夹杂物被改性为 $\text{Ce}-\text{Al}-\text{O}-\text{Ti}-\text{N}$,使得稀土钢的疲劳寿命明显优于未加稀土钢。Hao 等人^[22]发现相同条件下稀土加入后弹簧钢的疲劳寿命从 107 增加到 108 以上。Li 等人^[60]的研究证明了低氧条件下可以进一步提高稀土元素的固溶度,从而将轴承钢的疲劳寿命提高了 40 倍。

基于以上研究可以得出,适量稀土的加入可将夹杂物变性为小尺寸的稀土夹杂物,从而提高钢材的抗疲劳性,而低氧条件则可以进一步加强这种效果。

3.3 其他性能

一些学者还研究了稀土加入到钢中之后强度^[61]、冲击性能^[62]等的变化。总结了稀土添加到钢中之后对其性能的积极影响,见表 2,不同性能及钢种要求的最佳添加量不同。

表 2 稀土添加到钢中之后对其性能的积极影响

钢种名称	添加元素	性能	P_1	P_2	$w/10^{-6}$	$n/\%$
管线钢 ^[19]	Ce	拉伸强度	453 MPa	784 MPa	294	73.1
不锈钢 ^[63]	Ce	拉伸强度	1 090 MPa	1 300 MPa	160	19.3
高强钢 ^[35]	La	断裂韧性	$63.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	$80 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	180	26.8
弹簧钢 ^[64]	Ce + La	冲击性能	21 J	41 J	140	95.2
重轨钢 ^[65]	Ce	冲击性能	3.45 J	4.5 J	46	30.4

注: P_1 、 P_2 分别为稀土加入前后钢材性能的变化; w 表示稀土最佳添加量; $n = (P_2 - P_1)/P_1$ 表示性能提高率。

4 结论

(1) 通过对比 1 600 °C 的标准吉布斯自由能,得到稀土与常用脱氧剂与氧反应能力大小顺序为 La 、 Ce 、 Ca 、 Mg 、 Al 、 Si 、 Mn , 实验室试验证明了稀土可以用作钢液脱氧剂。

(2) 稀土加入钢中表现为先脱氧后脱硫的作用,还可以与钢液中其他有害元素 As 、 Sn 等反应,降低有害元素含量。

(3) 适量稀土的加入可将不规则、大尺寸的夹杂物变质为小尺寸的稀土夹杂物,夹杂物的演变顺序受钢液中元素 Ce 、 Al 、 O 、 S 含量的影响,夹杂物的基本演变路径为: $\text{B} \rightarrow \text{B} + \text{RE} - \text{Al} - \text{O} \rightarrow \text{RE} - \text{Al} - \text{O} + \text{RE}_2\text{O}_2\text{S} \rightarrow \text{RE}_2\text{O}_2\text{S} + \text{RE} - \text{S}/\text{RE}_2\text{O}_2\text{S} + \text{RE} - \text{O}$ 。此外稀土与碱金属元素的协同处理会形成低密度的稀土

络合物,改变了常规稀土夹杂物不易上浮的缺点。

(4) 添加稀土可以提高钢材在力学性能、冲击韧性、抗腐蚀性等方面的性能,不同钢种在最佳稀土添加量方面要求不同,在钢液低氧条件下加入稀土可以提高其在钢中固溶量,可通过优化钢液条件实现稀土的高收得率。

(5) 由于稀土元素在钢中的独特优势,通过优化不同钢种采用合适的添加时机、加入方式等,可实现稀土用于钢中脱氧、在钢中定向变质夹杂物以及提高稀土在钢中收得率,为稀土在钢中高效利用提供新思路。

参 考 文 献

[1] 左更. 我国稀土行业现状分析与建议[J]. 冶金经济与管理, 2023(6): 4-8.

- [2] 魏书豪,陆恒昌,刘腾轼,等. 稀土对 HRB400E 螺纹钢低温冲击韧性的影响[J]. 中国冶金, 2022,32(9):16-25.
- [3] 朱桂杰,王思清,查敏,等. 稀土元素 Ce 对挤压态 Mg-0.3Al-0.2Ca-0.5Mn 合金板材体织构及力学各向异性的影响[J]. 金属学报,2024,60(8):1079-1090.
- [4] Bai Y, Zheng S, Liu N, et al. The Role of Rare Earths on Steel and Rare Earth Steel Corrosion Mechanism of Research Progress[J]. Coatings,2024,14(4):465.
- [5] Mikhailov G, Makrovets L, Samoilova O. Thermodynamic Analysis of Liquid Steel Refining by Complex La-Ce-Al-Based Alloy[J]. Steel in Translation,2020,50:234-242.
- [6] 苏新,郭曙强,乔梦然,等. GCr18Mo 轴承钢采用铝及稀土金属脱氧的研究[J]. 上海金属, 2019,41(1):88-93.
- [7] Waudby P. Rare Earth Additions to Steel[J]. International Metals Reviews, 1978, 23(1): 74-98.
- [8] 孙萌. 稀土元素 Ce 对切割钢丝用钢 C104Cr 夹杂物、组织与机械性能的影响研究[D]. 沈阳:东北大学,2018.
- [9] Yang J C, Li H W, Zhang J, et al. Thermodynamic Analysis and Observation of Cerium Inclusions in Cerium-containing IF Steel[J]. Chin. Rare Earths,2018,39:1-8.
- [10] Wang H, Long Q, Zeng J, et al. Purifying 7CrSiMnMoV Steel from Scrap Modified with Rare Earth Cerium Alloying[J]. Journal of Sustainable Metallurgy,2024,10:1-16.
- [11] Wang X, Wu Z, Li B, et al. Inclusions Modification by Rare Earth in Steel and the Resulting Properties: A review[J]. Journal of Rare Earths,2024,42(3):431-445.
- [12] 王红莉,奉亮,樊轩宇,等. 稀土对 L360 管线钢低温冲击性能的影响[J]. 金属热处理, 2023,48(5):116-121.
- [13] Li H, Yu Y, Ren X, et al. Evolution of Al_2O_3 Inclusions by Cerium Treatment in Low Carbon High Manganese Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2017, 24(9): 925-934.
- [14] Liu X, Ju D, Chen L. Effect of Rare Earth Metals on Passivation Behavior of UNS S31803 Duplex Stainless Steel in Sulfuric Acid Solution[J]. Construction and Building Materials, 2024,421:1-13.
- [15] Liu H, Fu P, Liu H, et al. Effects of Rare Earth Elements on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of 718H Pre-hardened Mold Steel[J]. Journal of Materials Science & Technology,2020,50:245-256.
- [16] 张惠荣,郑万,刘鹏,等. 稀土及热处理对 GCr15 轴承钢中夹杂物特征的影响[J]. 炼钢,2023,39(6):74-83.
- [17] Zhang S, Yanchong Y U, Shebin W, et al. Effects of Cerium Addition on Solidification Structure and Mechanical Properties of 434 Ferritic Stainless Steel[J]. Journal of Rare Earths,2017,35(5):518-524.
- [18] Luo D, Liu M, Jiang X, et al. Effect of Yttrium-based Rare Earth on Inclusions and Cryogenic Temperature Impact Properties of Offshore Engineering Steel[J]. Crystals, 2022,12(3):305.
- [19] Wang J, Wang L, Yang S, et al. Investigation on the Control of Inclusions and Tensile Strength in Ce-treated P110-Grade Oil Casing Steel[J]. Scientific Reports,2024,14(1):1-11.
- [20] 刘亚一,刘香军,杨昌桥,等. Ce 对 DH36 船板钢显微组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金,2024,52(3):34-39.
- [21] 臧若愚,李晶,黄飞. 稀土 Ce 对高强工程机械用钢夹杂物 and 高温塑性的影响[J]. 有色金属科学与工程,2024,15(3):449-456.
- [22] Hao C, Wen J, Liu Z, et al. Effect of Rare Earth Elements on Fatigue Properties of Spring Steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2024,33:1-10.
- [23] Feng G, Ren L, Yang J. Study on Influence of Rare Earth Ce on Micro and Macro Properties of U75V Steel[J]. Materials, 2024,17(3): 579.

- [24] Luo S, Shen Z, Yu Z, et al. Effect of Ce Addition on Inclusions and Grain Structure in Gear Steel 20CrNiMo[J]. Steel Research International, 2021, 92(3): 1–9.
- [25] Dong Z, Qian D, Yin F, et al. Enhanced Impact Toughness of Previously Cold Rolled High-carbon Chromium Bearing Steel with Rare Earth Addition[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(11): 8178–8187.
- [26] Zhou W, Zhu J, Zhang Z. Austenite Grain Growth Behaviors of La-microalloyed H13 Steel and Its Effect on Mechanical Properties[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51: 4662–4673.
- [27] Katsumata A, Todoroki H. Effect of Rare Earth Metal on Inclusion Composition in Molten Stainless Steel[J]. Iron & Steelmaker, 2002, 29(7): 51–57.
- [28] Wang Y, Liu C. Evolution and Deformability of Inclusions in Al-killed Steel with Rare Earth-alkali Metals (Ca or Mg) Combined Treatment[J]. Journal of Rare Earths, 2023, 41(9): 1459–1466.
- [29] Wang Y, Liu C. Effect of Cerium and Magnesium Addition on Evolution and Particle Size of Inclusions in Al-killed Molten Steel[J]. ISIJ International, 2022, 62(9): 1852–1861.
- [30] Li X, Jiang Z, Geng X, et al. Evolution Mechanism of Inclusions in H13 Steel with Rare Earth Magnesium Alloy Addition[J]. ISIJ International, 2019, 59(9): 1552–1561.
- [31] Li X, Jiang Z, Geng X, et al. Effect of Rare Earth-Magnesium Alloy on Inclusion Evolution in Industrial Production of Die Steel[J]. Steel Research International, 2019, 90(8): 1–10.
- [32] Lu P, Li H, Feng H, et al. Improving Cleanliness and Controlling Inclusion Characteristics in High-Nitrogen Stainless Bearing Steels by Optimizing Addition Order and Contents of Mg and Ce[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(3): 1920–1935.
- [33] Song S, Xu W, Chen X, et al. Effect of Rare Earth Cerium and Impurity Tin on the Hot Ductility of a Cr-Mo Low Alloy Steel[J]. Journal of Rare Earths, 2016, 34(10): 1062–1068.
- [34] Yu Y, Feng X, Luo D, et al. Effect of Rare Earth Ce Addition on Inclusions in Offshore Engineering Steel Containing Arsenic[J]. Materials Research Express, 2023, 10(11): 1–12.
- [35] Gong W, Wang C, Wang P, et al. Effect of La on Inclusions and Fracture Toughness of Low-Alloy Ultra-High-Strength 40CrNi2Si2MoVA Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(11): 1408–1416.
- [36] 李晓凯, 信瑞山, 俞占扬, 等. 稀土 Ce 含量对 GCr15SiMn 轴承钢冲击性能的影响[J]. 轴承, 2024(3): 58–62.
- [37] 于彦冲, 孟晓亮, 康健, 等. 稀土对 Gr65 钢夹杂物和性能的影响[J]. 包钢科技, 2019, 45(6): 50–54.
- [38] Geng R, Li J, Shi C. Influence of Cerium Treatment on Inclusion Modification and As-cast Microstructure of High-Strength Low-Alloy Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(10): 1659–1668.
- [39] Zhou C, Liu R, Zhao Z, et al. Effect of Rare Earth Cerium Content on Manganese Sulfide in U75V Heavy Rail Steel[J]. Metals, 2022, 12(6): 1012.
- [40] Wang X, Wu Z, Chen W, et al. Study on the Evolution of Inclusions in Ce-Modified M50NiL Steel through the CALPHAD Approach and a Novel Inclusion Prediction Condition[J]. JOM, 2024, 76: 1–11.
- [41] Ren Q, Zhang L. Effect of Cerium Content on Inclusions in an Ultra-Low-Carbon Aluminum-killed Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, 51: 589–600.
- [42] 文佳航, 亓捷, 刘承军. La 对 FeCrAl 合金中非金属夹杂物的影响[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(1): 131–138, 144.

- [43] Li B, Zhu H, Zhao J, et al. Effect of Rare Earth La on Inclusion Evolution in High - Al Steel[J]. *Steel Research International*, 2022, 93(2):1 - 9.
- [44] Ren Q, Hu Z, Cheng L, et al. Modification Mechanism of Lanthanum on Alumina Inclusions in a Nonoriented Electrical Steel [J]. *Steel Research International*, 2022, 93(10): 1 - 11.
- [45] Wang L, Song B, Liu Z, et al. Effect of La Content on Inclusions and Microstructure of C - Mn Steel Treated By Ti - Mg - Ca [C]// 11th International Symposium on High - Temperature Metallurgical Processing: Springer, 2020:455 - 464.
- [46] Geng R, Li J, Shi C, et al. Effect of Ce - La on Inclusion Evolution in Al - killed High Strength Steel [J]. *Metallurgical Research & Technology*, 2020, 117(6):616.
- [47] Huang F, Li J, Geng R, et al. Effect of Rare Earth on Inclusion Evolution and Corrosion Resistance of HRB400E Steel [J]. *Materials and Corrosion*, 2023, 74(1):53 - 67.
- [48] 石帅, 赵燕青, 高云哲, 等. 混合稀土 La、Ce 对铸造高锰钢组织及夹杂物变性的影响 [J]. *铸造*, 2024, 73(5):653 - 659.
- [49] 罗钢, 隋亚飞, 刘彭, 等. La - Ce 稀土对 Q345D 钢夹杂物和冲击性能的影响 [J]. *特殊钢*, 2024, 45(3):33 - 39.
- [50] Wang C, Ma R, Zhou Y, et al. Effects of Rare Earth Modifying Inclusions on the Pitting Corrosion of 13Cr4Ni Martensitic Stainless Steel [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 93:232 - 243.
- [51] Liu Z, Lian X, Liu T, et al. Effects of Rare Earth Elements on Corrosion Behaviors of Low - Carbon Steels and Weathering Steels [J]. *Materials and Corrosion*, 2020, 71: 258 - 266.
- [52] 任吉, 燕云, 田家龙, 等. La 处理对 H13 热作模具钢中夹杂物的影响 [J]. *特殊钢*, 2024 (4):1 - 7.
- [53] Lian X, Chen L, Fan Z, et al. Effects of Modified Inclusions and Precipitates Alloyed by Rare Earth Element on Corrosion and Impact Properties in Low Alloy Steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2022, 35(10):1719 - 1730.
- [54] Wang H, Wang A, Li C, et al. Effects of Rare Earth Metals on Microstructure, Mechanical Properties, and Pitting Corrosion of 27% Cr Hyper Duplex Stainless Steel [J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2022, 61(1): 873 - 887.
- [55] 张凤明, 付学义, 谢丽. 稀土对 Q420qNH 焊缝低温韧性及耐腐蚀性能研究 [J]. *包钢科技*, 2021, 47(4):72 - 76.
- [56] 张继. 铈对低镍不锈钢中非金属夹杂物和钢组织及性能的影响研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [57] 李安鑫, 杨吉春, 刘香军, 等. 稀土 Ce 对 X100 管线钢组织及耐腐蚀性能的影响 [J]. *稀有金属与硬质合金*, 2023, 51(1): 52 - 58.
- [58] 张凤明, 魏森. 稀土对低合金高强度结构钢 Q345E 疲劳性能的影响 [J]. *包钢科技*, 2019, 45(6):55 - 58.
- [59] Wang J, Peng J, Zhang F, et al. Effects of Ce - Modified TiN Inclusions on the Fatigue Properties of Gear Steel 20CrMnTi [J]. *Crystals*, 2023, 13(7):1071.
- [60] Li D, Wang P, Chen X, et al. Low - Oxygen Rare Earth Steels [J]. *Nature Materials*, 2022, 21(10):1137 - 1143.
- [61] Liu X, Wang L M. Effects of Rare Earth Addition on the Inclusions and Mechanical Properties of 2205 Duplex Stainless Steel [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 503: 463 - 468.
- [62] Liu Y, Lu M, Zhang X, et al. Shift of the Microbial Communities from Exposed Sandstone Rocks to Forest Soils During Pedogenesis [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, 140:21 - 28.
- [63] Cai G, Li C. Effects of Ce on Inclusions, Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion

Behavior of AISI 202 Stainless Steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24:3989 – 4009.

[64] Hao C, Yang C, Liu P, et al. Effects of Rare Earth Elements on Inclusions, Microstructure and Impact Toughness of Spring Steel[J]. Jour-

nal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(4):933 – 944.

[65] 樊志明. 稀土 Ce 及热处理工艺对 U75V 重轨钢组织和性能的影响[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.

信息

北京包钢钢铁技术有限公司成立

在包钢成立 70 周年的重要历史时间节点,北京包钢钢铁技术有限公司于 2024 年 5 月正式在北京中关村注册成立,经营范围涵盖技术研究和试验、新材料技术研发、新材料技术推广服务、冶金专用设备制造等,该公司由内蒙古包钢钢联股份有限公司全资持股。公司经营围绕助力包钢科技创新能力提升,做产研对接的桥梁和引育科创人才的服务平台,主动融入京津冀经济圈,致力于打造创新需求的发现者、创新服务的组织者、研发能力提升的驱动者、科技成果转化的引领者。树立经营思维、有解思维、创新思维,服务好包钢股份科技发展战略,是包钢科技创新面向国家重大需求、面向经济主战场、面向世界科技前沿的具体举措。

北京包钢钢铁技术有限公司自成立以来,按照公司设立初衷,融入京津冀蒙科技人才创新合作,已正式签署了六项技术开发合同,聚焦低碳绿色冶金、未来钢铁智能制造、风光氢储、轨道交通、新能源汽车等重点领域涉及的材料,布局深度科技合作,承接包钢融入科创高地的战略规划蓝图,以科技产教融合互补与共赢实现科技突围,为未来市场带来更具竞争力的包钢高科技产品。

包钢与京津冀等创新高地的科研院所多年来保持着良好的战略合作关系,今后在人才培养、科技创新等方面持续开展广泛而深入的合作。在工艺优化升级、低碳冶金、稀土钢新材料、未来复合材料等多个研究领域提前布局,推动传统制造业高端化、智能化、绿色化发展,积极培育新质生产力。加大在绿色低碳发展、资源综合利用等方面的科技创新力度,建设创新平台。加大绿色低碳技术开发、稀土在能源材料中的应用,加强高层次人才交流培养,走出一条绿色转型发展新路径。