



稀土 Ce 与 Y 改性对 34CrNi3Mo 钢夹杂物特征的影响

贾广如¹, 周欣然², 唐志峰³, 雷 鸣⁴, 周东杰⁴, 赵 博⁴

(1 河北河钢大河装备集团有限公司, 石家庄 050023; 2 唐山开放大学教学科, 唐山 063000; 3 浙江大学湖州研究院, 湖州 313001; 4 钢铁研究总院有限公司冶金工艺研究所, 北京 100081)

摘 要: 34CrNi3Mo 钢广泛应用于航空航天和高端装备领域, 其服役可靠性与非金属夹杂物的类型、尺寸及分布有明显相关性。为明确不同稀土元素对该钢夹杂物演化行为的影响, 采用 30 kg 真空感应炉冶炼制备了不同添加量的试验钢($w[\text{Ce}]$ 0.000 5%~0.002 0%、 $w[\text{Y}]$ 0.000 3%~0.003 4%), 并通过 SEM-EDS 和 Aspex 系统对夹杂物的形貌、成分、数量密度及尺寸分布进行了系统表征。结果表明: 原始钢中夹杂物以复合氧化物和 MnS 为主, 伴有一定量 Al_2O_3 和 TiN。加入 Ce 后, 夹杂物以 CeAlO_3 类稀土铝酸盐为主体, 并逐渐生成少量稀土氧硫化物和硫化物; 加入 Y 后, 随含量升高稀土铝酸盐比例有所降低, Y_2O_3 、 Y_2S_3 等硫化物复合夹杂物逐渐增多。少量 Ce、Y 均能显著细化夹杂物, 使其尺寸主要集中在 0.5~2 μm ; 与空白钢(平均尺寸 1.36 μm 、数量密度约 108 个/ mm^2)相比, 钢中夹杂物的平均尺寸和数量密度均明显降低。低含量稀土对 Al_2O_3 和 TiN 夹杂物具有显著抑制作用, 但 MnS 夹杂物比例随稀土含量呈先升后降的波动变化, 对 MnS 生成的抑制作用有限。Ce 和 Y 在细化夹杂物和降低数量密度方面具有相似作用, 但在改性产物类型上存在明显差异, 研究结果为 34CrNi3Mo 钢稀土元素的选择与加料优化提供了理论依据。

关键词: 稀土 Ce; 稀土 Y; 夹杂物; 稀土处理; 34CrNi3Mo 钢; 改性产物

DOI:10.20057/j.1003-8620.N260033 中图分类号: TG142.33

Effect of Ce and Y Modification on the Inclusion Characteristics in 34CrNi3Mo Steel

Jia Guangru¹, Zhou Xinran², Tang Zhifeng³, Lei Ming⁴, Zhou Dongjie⁴, Zhao Bo⁴

(1 Hebei Hesteel Dahe Equipment Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050023, China; 2 Teaching Department, Tangshan Open University, Tangshan 063000, China; 3 Huzhou Institute, Zhejiang University, Huzhou 313001, China; 4 Metallurgical Technology Institute, Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: 34CrNi3Mo steel is widely used in aerospace and high-end equipment, and its service reliability is closely related to the type, size, and distribution of non-metallic inclusions. To clarify the influence of different rare-earth elements on the evolution behavior of inclusions in this steel, experimental heats with various additions ($w[\text{Ce}]$ 0.000 5%~0.002 0% and $w[\text{Y}]$ 0.000 3%~0.003 4%) were produced in a 30 kg vacuum induction furnace, and the morphology, composition, number density, and size distribution of inclusions were systematically characterized using SEM-EDS and an Aspex system. The results show that inclusions in the base steel are mainly complex oxides and MnS, accompanied by a certain amount of Al_2O_3 and TiN. After the addition of Ce, inclusions are dominated by CeAlO_3 -type rare-earth aluminates, and a small amount of rare-earth oxysulfides and sulfides gradually forms; after the addition of Y, with increasing Y content, the fraction of rare-earth aluminates decreases, while oxy-sulfide complex inclusions such as $\text{Y}_2\text{O}_3\text{S}$ and Y_2S_3 gradually increase. Small additions of Ce and Y can significantly refine inclusions, so that their sizes are mainly concentrated in the range of 0.5 μm ~2 μm ; compared with the base steel (average size is 1.36 μm , number density is about 108 mm^{-2}), both the average size and number density of inclusions are markedly reduced. Low-level rare-earth additions strongly suppress the formation of Al_2O_3 and TiN inclusions; however, the fraction of MnS inclusions exhibits a fluctuating trend of first increasing and then decreasing with increasing rare-earth content, indicating that the suppression of MnS formation is limited. Ce and Y play similar roles in refining inclusions and reducing their number density, but show pronounced differences in the types of modified inclusion products, and the results provide a theoretical basis for the selection and optimization of rare-earth additions in 34CrNi3Mo steel.

Key Words: Rare-Earth Ce; Rare-Earth Y; Inclusions; Rare-Earth Treatment; 34CrNi3Mo Steel; Modified Products

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金青年科学基金项目(2025QN05129), 钢铁研究总院有限公司自主投入项目(事 24160770Z、事 23160360ZD), 新材料重大专项项目(2024ZD0606600)、稀土新材料技术创新中心项目(CXZX-B-202308-0008), 稀土新材料创新中心开放课题(G2025-K-10(17)-32(54))

作者简介: 贾广如(1969—), 男, 本科, 正高级工程师; **E-mail:** jiaguangru@163.com; **收稿日期:** 2026-02-28

通信作者: 赵 博(1999—), 男, 博士, 高级工程师; **E-mail:** zhaobo_working@163.com

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

34CrNi3Mo钢因其优异的强韧性、高疲劳强度和良好的淬透性,广泛应用于航空航天、能源装备及高端机械制造等领域^[1-3]。钢中A类和B类夹杂物的形成对力学性能、加工性能及服役寿命产生显著影响。目前,关键承载件对纯净度和组织均匀性的高要求,通常采用电弧炉+LF+VD+电渣重熔的工艺路线^[4-5]。电渣重熔过程是保证纯净度、减少有害元素的有效环节^[6-7],但能耗、渣料及工艺周期成本较高,增加电渣重熔工艺,吨钢成本增加200元~300元^[8-10]。

近年来,稀土元素因其独特的物理化学性质,在钢铁冶金中逐渐受到重视。Chen H J等^[11]研究发现,稀土Ce能够改性钢中有害的 Al_2O_3 、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,并将MnS夹杂物转化为精细分散、稳定的含铈夹杂物,减小夹杂物尺寸。Liu X J等^[12]发现向IF钢中适量加入Ce后,夹杂物由 Al_2O_3 及 $\text{TiN} - \text{Al}_2\text{TiO}_5 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 型,转变为 Ce_2O_3 、 $\text{Ce}_2\text{O}_3\text{S}$ 、 CeAlO_3 及含Ce的 $\text{TiN} - \text{Al}_2\text{TiO}_5$ 系复合夹杂物。Wang Y等^[13]研究了稀土Y对高碳钢夹杂物的改性效果,发现添加Y后夹杂物平均尺寸减少了6.9~8.6 μm 。Meng Q等^[14]发现稀土Y改性后,高锰钢中的 $\text{MnS} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物转变为尺寸较小、近似球形的 $\text{Y}_2\text{S}_3 - \text{Y}_2\text{O}_3\text{S}$ 复合夹杂物,改善了轧制性能。稀土元素Ce、Y对钢中夹杂物改性作用已被广泛证实,提升钢材宏观性能和服役可靠性方面的效果也得到研究者的认可。但是,不同稀土元素的改性机制并不相同,Y与Ce在夹杂物改性行为和效果方面存在明显差异^[15-17]。如何针对特定钢种与服役需求合理选择稀土元素,已成为当前研究的关键问题之一^[18-21]。

基于此,本研究以34CrNi3Mo钢为对象,采用添加 $w[\text{Ce}]$ 0.000 5%~0.002 0%、 $w[\text{Y}]$ 0.000 3%~0.003 4%开展对比试验,通过SEM-EDS与Aspex自动扫描统计夹杂物特征,分析其对夹杂物类型、尺寸及分布的影响,阐明二者的差异化改性机制。研究结论可用于指导稀土添加策略的优化,为高性能合金钢生产过程的工艺简化与成本降低提供理论依据。

1 试验材料与方法

本试验采用30 kg实验室真空感应炉进行冶炼,基体合金钢为34CrNi3Mo,成分见表1。实验原料包括纯度为99.99%的碳粉和铝粒,以及稀土含量为20%的铈铁合金和钇铁合金。根据稀土添加情况,将试验分为三类:未添加稀土元素的对照组(T01),

添加稀土Ce的试验组(TC1~TC4),以及添加稀土Y的试验组(TY1~TY4)。所有试样均在真空环境下熔炼,按图1所示工艺顺序投料,并通过调节碳粉和铝粒的加入量控制钢液成分。各试验组的具体添加量详见表2。

表1 34CrNi3Mo钢的成分(质量分数)

Table 1 Composition of 34CrNi3Mo steel										%
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al
0.340	0.246	0.632	0.002	0.003	0.981	3.012	0.298	0.041	0.026	0.011

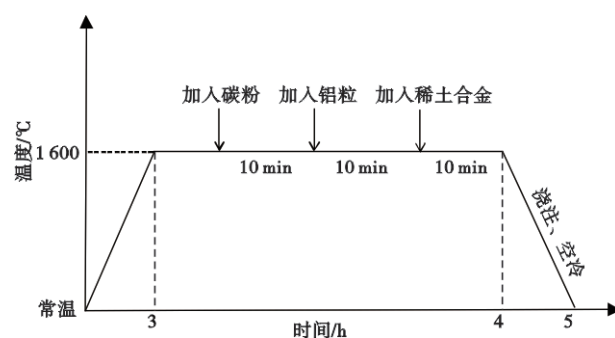


图1 试验加料顺序

Fig. 1 Experimental feeding sequence

表2 试验组加料方案以及化验成分

Table 2 Feeding scheme and analysis results for the experimental group

编号	加料量/g			稀土含量/%	$w[\text{T.O}]/\%$
	碳粉	铝粒	稀土合金		
T01			—	—	0.001 4
TC1			0.5	0.000 5	0.001 0
TC2			1	0.001 3	0.000 9
TC3			1.5	0.001 2	0.001 3
TC4	10	3	2	0.002 0	0.001 2
TY1			0.5	0.000 3	0.000 7
TY2			1	0.001 7	0.001 6
TY3			1.5	0.003 0	0.001 5
TY4			2	0.003 4	0.000 8

冶炼结束后,对钢体取样进行化学成分分析与夹杂物表征。C、S元素含量采用红外碳硫分析仪(CS844)测定;O含量用氧氮分析仪(OXH2000)测定;稀土及其他元素含量采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析。为夹杂物显微分析,从原料中截取10 cm×10 cm×3 cm的金相样品,并在浇注坯体高度1/2处、截面径向1/4位置处采集相同尺寸的样品。样品经常规金相与超声/化学清洗制备后,采用扫描电子显微镜(SEM)观察典型夹杂物的形貌,并结合能谱分析(EDS)确定其元素组成;利用Aspex

自动扫描系统对粒径大于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的夹杂物进行统计分析,以获得夹杂物的尺寸分布、数量密度及成分特征,扫描面积为 $5\ \text{cm} \times 5\ \text{cm}$ 。

2 试验结果与讨论

2.1 原料钢中夹杂物分析

采用 Aspex 自动扫描系统统计原料样品中的非金属夹杂物,共识别出 1 560 个有效夹杂物点,如图 2 所示,夹杂物主要可分为四类: Al_2O_3 夹杂物、硅酸盐/钙铝酸盐类复合夹杂物、TiN 夹杂物及 MnS 夹杂物。通过对各类夹杂物的比例进行统计分析发现,数量最多的为复合夹杂物,占比 40.7%,其次是 Al_2O_3 夹杂物,占比 24.2%,TiN 与 MnS 夹杂物分别占 17.4%、17.7%。

夹杂物在 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 四元相图中的分布如图 3 所示,每个散点代表一个夹杂物,其位置表示相组成。可以看出,与分类结果相同,夹杂物主

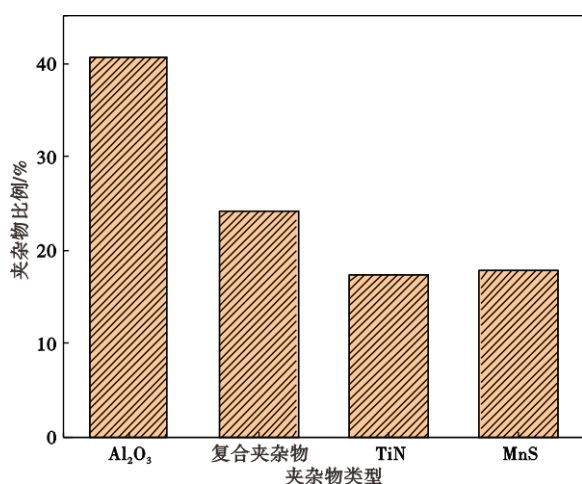


图 2 原料钢中不同类型夹杂物数量占比

Fig. 2 The number proportion of different types of inclusions in raw steel

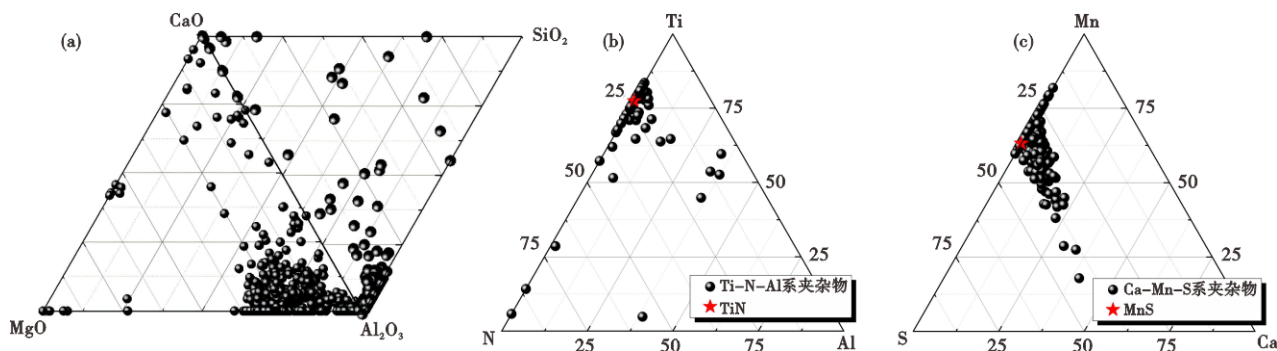


图 3 原料试样中各类夹杂物的成分分布: (a) Al_2O_3 和复合夹杂物 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{SiO}_2$, (b) TiN 夹杂物, (c) MnS 夹杂物

Fig. 3 Composition distribution of various inclusions in raw material samples: (a) Al_2O_3 and complex inclusions $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{SiO}_2$, (b) TiN inclusions, (c) MnS inclusions

要分为 Al_2O_3 夹杂物、复合夹杂物、MnS 和 TiN 夹杂物。对每类夹杂物的平均尺寸进行统计, Al_2O_3 夹杂物的平均当量直径为 $3.10\ \mu\text{m}$, 复合夹杂物为 $3.52\ \mu\text{m}$, TiN 夹杂物为 $2.66\ \mu\text{m}$, MnS 夹杂物为 $2.44\ \mu\text{m}$ 。

2.2 试验钢中夹杂物分析

2.2.1 钢中典型夹杂物的形貌和面扫描分析

采用扫描电子显微镜 (SEM) 对钢中典型夹杂物的形貌和成分进行分析, 结果如图 4 所示。

T01 空白组中的夹杂物主要为 MnS、 Al_2O_3 以及 TiN, 尺寸集中在 $1\sim3\ \mu\text{m}$ 。TC1 实验组由于钕含量较低, 夹杂物多数呈黑色, 主要为 MnS 类夹杂和未充分改性的 Al_2O_3 夹杂物。TC2 实验组中, 夹杂物以表面附着 Al_2O_3 和 MnS 的 CeAlO_3 夹杂物为主, 同时存在一定量的 MnS 夹杂以及少量纯净的 CeAlO_3 夹杂物。TC3 组的夹杂物成分与 TC2 类似, 主要为表面附着 Al_2O_3 和 MnS 的 CeAlO_3 夹杂物以及 MnS 类夹杂。TC4 组中, 夹杂物主要由 MnS 和 CeAlO_3 组成, 稀土 CeAlO_3 夹杂物表面常附着有 MnS、TiN 及 Al_2O_3 等复合夹杂。

TY1 实验组中的夹杂物主要为表面附着 Al_2O_3 和 MnS 的 $\text{YAlO}_3+\text{Y}_2\text{O}_3$ 夹杂物, 以及 MnS 类夹杂物。TY2 实验组的夹杂物以表面附着 Al_2O_3 和 MnS 的 YAlO_3 为主, YAlO_3 夹杂物呈球状或类球状, 尺寸集中在 $2\sim5\ \mu\text{m}$ 。TY3 实验组中主要观察到表面附着 Al_2O_3 和 MnS 的 Y_2O_3 夹杂物。TY4 组中的夹杂物类型较为复杂, 主要包括 Y_2O_3 、 Y_2S_3 、MnS 及 TiN 等, 其中 MnS 和 TiN 多附着于稀土夹杂物表面。

2.2.2 钢中夹杂物的化学成分及类型

对夹杂物的种类进行划分, 结果见表 3。通过对夹杂物计数进行统计发现, 夹杂物主要分为 7 类, 分别是 MnS、TiN、 Al_2O_3 、CMA、硅酸盐、复合夹杂物

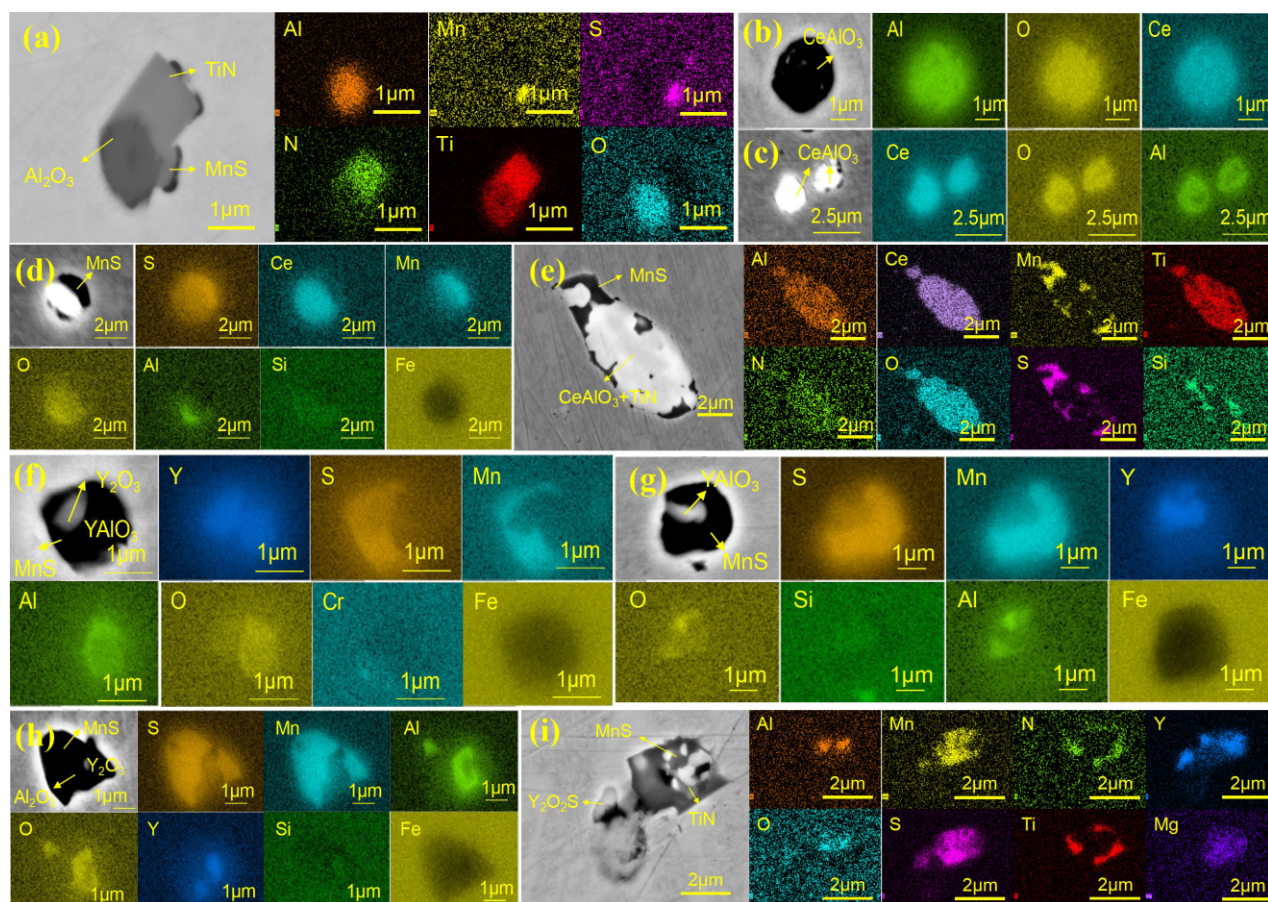


图4 不同试验组的典型夹杂物形貌对比:(a)0%RE,(b)0.000 5%Ce,(c)0.001 3%Ce,(d)0.001 2%Ce,(e)0.002 0%Ce,(f)0.000 3%Y,(g)0.001 7%Y,(h)0.003 0%Y,(i)0.003 4%Y

Fig. 4 Comparison of typical inclusion morphologies in different experimental groups : (a) 0% RE, (b) 0.000 5% Ce, (c) 0.001 3% Ce, (d) 0.001 2% Ce, (e) 0.002 0% Ce, (f) 0.000 3% Y, (g) 0.001 7% Y, (h) 0.003 0% Y, (i) 0.003 4% Y

(无法明显区分,如50%MnS+50%Al₂O₃等类型)以及稀土夹杂物。通过对各类夹杂物的比例进行统计分析发现,占比最多的为MnS夹杂物。其次是稀土夹杂物和复合夹杂物。最后是硅酸盐、铝酸镁钙、TiN以及Al₂O₃夹杂物。

随着稀土含量的增加,Al₂O₃夹杂物显著减少,MnS夹杂物显著减少,TiN夹杂物明显减少,说明稀土对三类夹杂物的生成有抑制作用。同时,复合夹杂物的数量和比例也有些许的减少,说明稀土的加入能起到夹杂物纯化的作用,减少了复合夹杂物的生成。

2.2.3 钢中夹杂物的尺寸及数量密度

采用Aspex软件对34CrNi3Mo钢中的夹杂物的尺寸进行统计,并且进行求平均数处理,得出图5所示的结果。通过统计发现,空白组夹杂物的平均尺寸为1.36 μm,随着钢中稀土含量的增加,夹杂物的平均尺寸是呈现下降的趋势。含Ce钢中夹杂物尺

表3 不同炉次夹杂物类型个数统计

Table 3 Statistics of the number of inclusion types in different heats

类型	T01	TC3	TC2	TC4	TY1	TY2	TY3	TY4
MnS	684	488	444	347	440	669	348	88
TiN	129	0	0	0	53	0	0	56
Al ₂ O ₃	515	1	16	0	14	6	3	0
硅酸盐	10	19	88	11	11	167	63	30
CMA	14	55	26	3	62	35	28	2
复合夹杂物	468	117	376	45	189	29	321	33
稀土铝酸盐	0	30	284	583	239	258	131	1
稀土硫氧化物	0	2	3	58	2	533	73	619
稀土硫化物	0	1	8	28	2	31	14	74
稀土氧化物	0	0	0	9	0	0	0	0

寸均比空白组的夹杂物尺寸小;含Y钢中部分炉次(TY4)夹杂物尺寸大于空白组。

对夹杂物密度的统计结果表明,在未加入稀土元素时,钢中夹杂物数量最高,夹杂物密度约为108.06个/mm²。随着稀土Ce的加入,夹杂物密度整

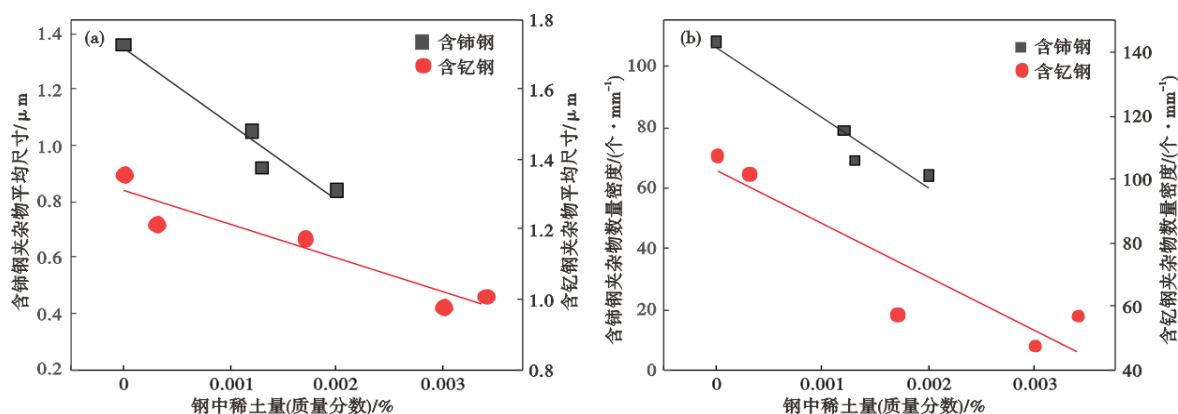


图5 钢中夹杂物尺寸及分布:(a)钢中的夹杂物的尺寸变化,(b)钢中的夹杂物的密度变化

Fig. 5 Size and distribution of inclusions in steel : (a) Changes in inclusion size in steel, (b) Changes in inclusion number density in steel

体呈下降趋势,其中,0.001 2%、0.001 3%的 $w[\text{Ce}]$ 时,夹杂物密度降至79.10、68.97个/ mm^2 ;当 $w[\text{Ce}]$ 进一步增加至0.002 0%时,夹杂物密度分别降低至64.26个/ mm^2 。含钇钢与含铈钢变化趋势相同,加入0.000 3%的 $w[\text{Y}]$ 后夹杂物密度降至101.89个/ mm^2 ,抑制效果不明显;当 $w[\text{Y}]$ 增加至0.001 7%时,夹杂物密度大幅下降至57.84个/ mm^2 ,并在 $w[\text{Y}]$ 为0.003 0%、0.003 4%时进一步趋于稳定,夹杂物密度分别为47.99、57.37个/ mm^2 。随着稀土Ce和Y含量的增加,夹杂物的密度也是处于明显降低的趋势。

对不同尺寸夹杂物比例进行统计,得出图6所示的结果,可以看出,在含铈钢中,随着 $w[\text{Ce}]$ 由0增加至0.002 0%,0.5~2 μm 的夹杂物比例由64%增加至81%,>2~5 μm 的夹杂物由30%降低至16%,>5~10 μm 夹杂物由5%降低至2%,说明稀土Ce有

细化夹杂物的作用,使大部分夹杂物尺寸集中于0.5~2 μm 。随着钢中 $w[\text{Y}]$ 由0增加至0.003 4%,0.5~2 μm 的夹杂物比例由64%增加至86%,>2~5 μm 的夹杂物由30%降低至11%,但是变化趋势有些波动,受钢中O、S成分影响。

3 Ce和Y在钢中夹杂物形成与演化行为研究

3.1 Ce、Y夹杂物赋存形式及演化差异

为比较稀土Ce与Y在钢中夹杂物的具体赋存形式,以试验组TC2与TY2为例,将典型夹杂物的组成分布映射至三元相图,如图7所示。可以看出,含Ce钢中稀土硫化物数量相对较少,多与MnS复合出现;稀土铝酸盐占主体,存在少量的硫氧化物。在含Y钢中,硫化物与MnS复合存在,稀土铝酸盐数量

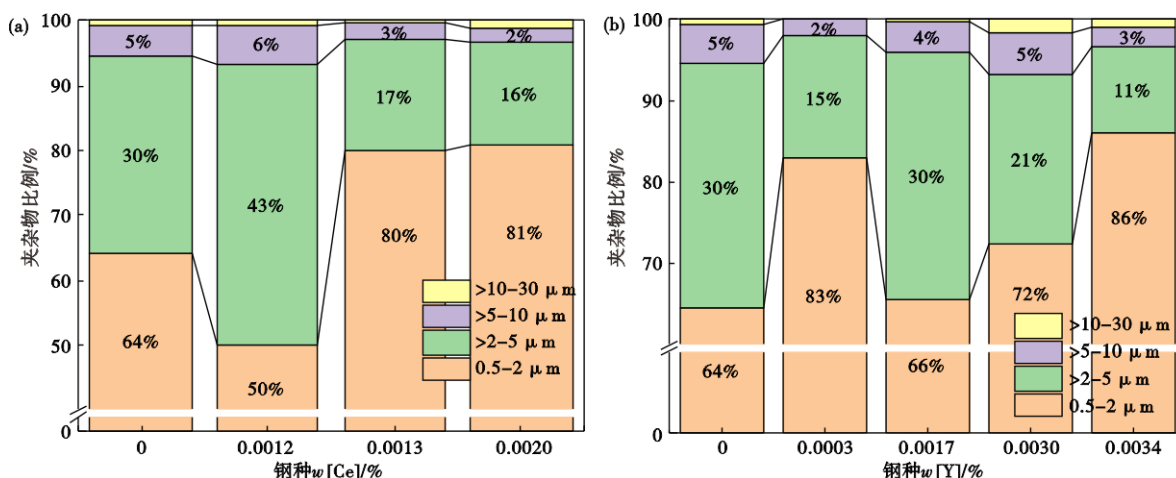


图6 不同尺寸夹杂物比例统计:(a)含Ce钢夹杂物比例变化,(b)含Y钢夹杂物比例变化

Fig. 6 Proportion statistics of inclusions with different sizes : (a) Variation in the proportion of inclusions in Ce-containing steel, (b) Variation in the proportion of inclusions in Y-containing steel

较少,而硫化物数量比例较大。

进一步统计不同稀土含量下各类夹杂物的占比,结果如图8所示。由图8可见,当稀土 $w[\text{Ce}]$ 从0.001 2%提升至0.002 0%时,夹杂物类型基本保持稳定,仅各类夹杂物占比出现小幅变化:稀土铝酸盐占比由96.2%降至86.0%,硫化物、氧化物及硫化物占比略有上升。而当 $w[\text{Y}]$ 由0.000 3%升至0.003 4%时,夹杂物组成发生显著转变。稀土铝酸盐占比由98.4%骤降至0.1%,硫化物占比由0.8%

升至89.2%,硫化物占比由0.8%升至10.6%,氧化物占比始终为0%。这说明在高浓度下,Y与硫的结合能力显著增强,促进夹杂物向硫氧复合类型演变。

3.2 Ce、Y对夹杂物改性作用的差异性

为进一步比较Ce与Y对夹杂物改性的效果,对钢中 MnS 、 Al_2O_3 及 TiN 夹杂物的含量比例进行了统计,结果如图9所示。由夹杂物比例变化曲线可以看出,在本试验所涉及的低含量范围内,稀土Ce与Y对各类夹杂物的改性趋势基本一致,没有体现出

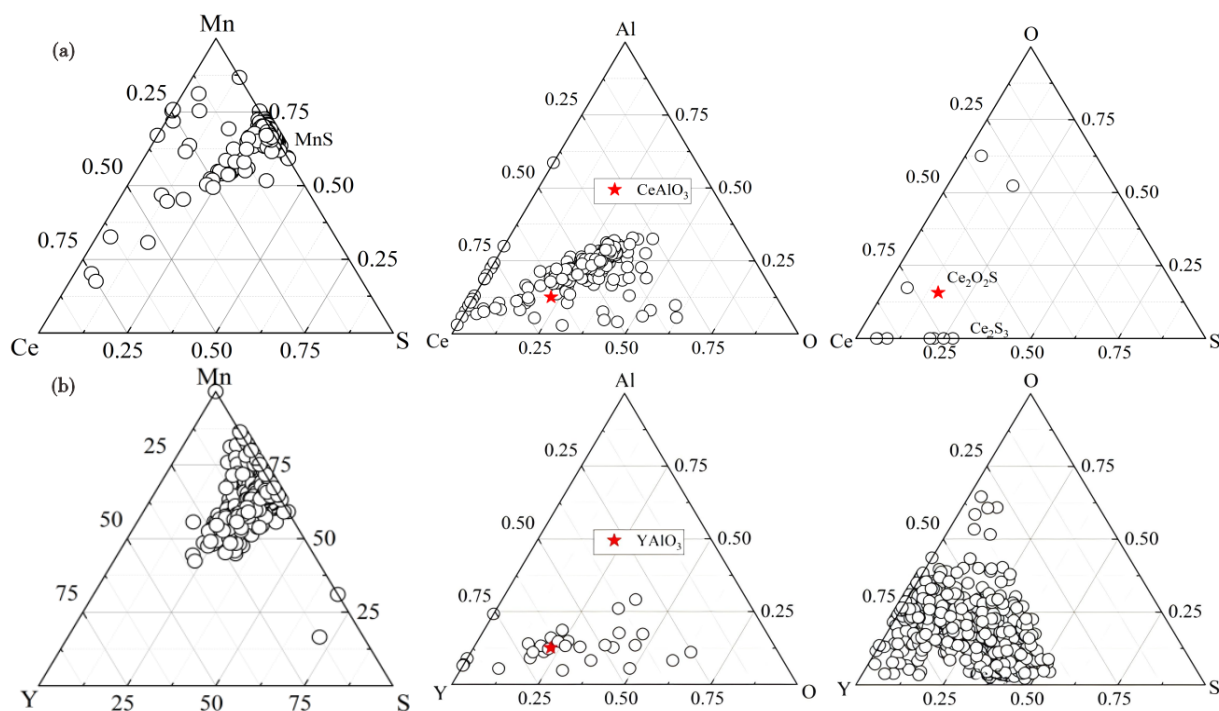


图7 试验钢中稀土夹杂物成分:(a)0.001 3% $w[\text{Ce}]$ 稀土夹杂物成分分布,(b)0.001 7% $w[\text{Y}]$ 稀土夹杂物成分分布

Fig. 7 Analysis of the composition of rare-earth inclusions : (a) Composition distribution of rare-earth inclusions at 0.001 3% $w[\text{Ce}]$, (b) Composition distribution of rare-earth inclusions at 0.001 7% $w[\text{Y}]$

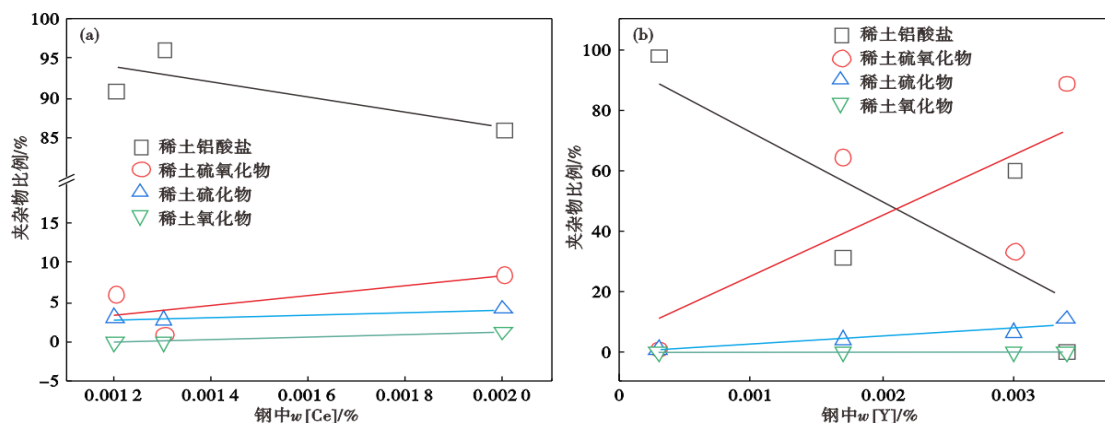


图8 不同试验组稀土夹杂物比例变化:(a)含Ce钢,(b)含Y钢

Fig. 8 Variation in the proportions of rare-earth inclusions across different experimental groups : (a) Ce-containing steel, (b) Y-containing steel

对特定夹杂物具有差异化的改性效果。

对于 Al_2O_3 和 TiN 夹杂物而言,少量稀土 Ce 和 Y 均表现出较强的抑制效果,当 $w[\text{Ce}]$ 为 0.001 2%、 $w[\text{Y}]$ 为 0.001 7% 时, TiN 夹杂物的比例已降至 0%, Al_2O_3 夹杂物的比例也接近于 0%。

随着稀土加入量的增加, MnS 夹杂物所占比例整体呈波动变化,表现为先升高后降低,并在 0.000 3% ~ 0.003 2% 并未完全消失。造成这一数量波动的原因主要有两点:一方面,少量稀土优先与 MnS 夹杂物复合,生成 RE-Mn-S 夹杂物。此类夹杂物虽含有少量稀土,但依然以 MnS 为主体,如图 4(a) 所示,从而提高了 MnS 类夹杂物的质量分数;随着稀土含量进一步增加,部分 MnS 夹杂物被稀土完全改性,转化为以稀土为主的夹杂物,导致 MnS 夹杂物比例随之下降。另一方面,在加入少量稀土后, TiN 和 Al_2O_3 夹杂物的比例明显下降,而稀土夹杂物数量变化不大,从而在相对比例上抬升了 MnS 夹杂物的占比。由此可见,低含量稀土对 MnS 的抑制作用较为有限。尽管稀土金属具有一定脱硫能力,

能够在一定程度上改变夹杂物的形貌和成分,但仍不足以完全阻止硫化物的形成。

3.3 Ce、Y 变性机制的热力学分析

本研究以钢液中稀土元素质量分数为 0.005 0% 为例,分析 Ce 和 Y 在钢液中夹杂物生成的热力学特性,所采用的钢种成分见表 1。Ce 的生成吉布斯自由能通过热力学计算获得,由于 Y 的热力学数据尚不完全,参考 Yang et al^[22] 的研究结果,通过比较各类 Y 夹杂的反应焓判断其生成顺序,计算和统计结果如图 10 所示。

热力学计算结果显示,含铈夹杂物中 CeAlO_3 的生成吉布斯自由能较低,表明其在平衡条件下具有较高的热力学稳定性;含钇夹杂物中 Y_2O_3 、 YAlO_3 和 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}$ 的反应焓相近。实验观察表明,含铈夹杂物以铝酸盐为主,这是由于 CeAlO_3 与其他夹杂物的吉布斯自由能差异明显,钢液中稀土铈加入后硫、氧变化不足以改变其优先生成;而含钇夹杂物则呈现由铝酸盐向硫化物转变的趋势,这与铝酸盐、氧化物及硫化物生成焓相近有关,同时可能受钢液

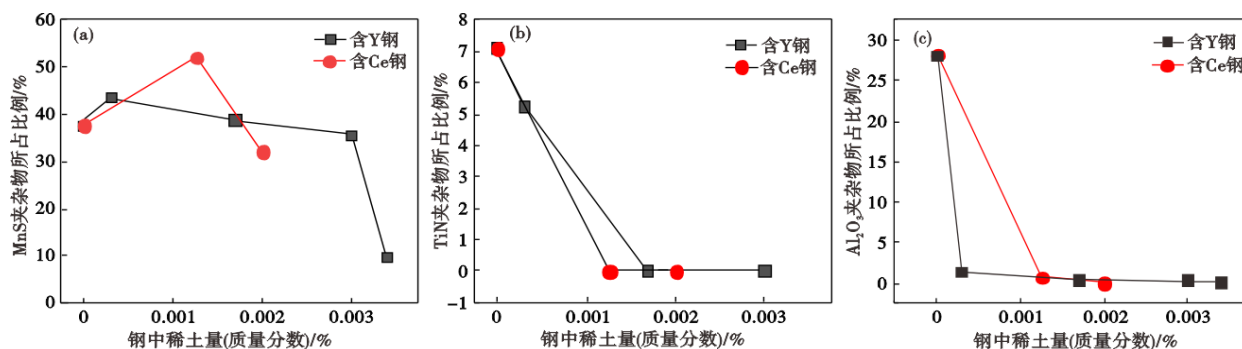


图 9 不同试验组稀土夹杂物比例变化: (a) MnS 夹杂物, (b) TiN 夹杂物, (c) Al_2O_3 夹杂物

Fig. 9 Variation in the proportions of rare-earth inclusions across different experimental groups : (a) MnS inclusions, (b) TiN inclusions, (c) Al_2O_3 inclusions

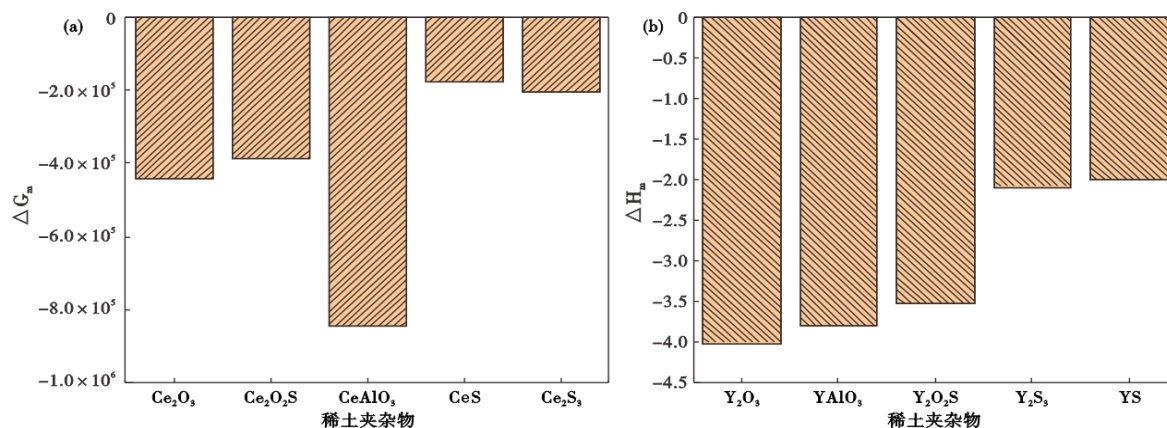


图 10 夹杂物生成吉布斯自由能和热焓: (a) 稀土铈夹杂物, (b) 稀土钇夹杂物

Fig. 10 Gibbs free energy and enthalpy of inclusion formation : (a) Rare-earth cerium inclusions, (b) Rare-earth yttrium inclusions

中稀土添加引起的硫、氧含量变化影响,导致改性产物发生变化。

4 结论

通过感应炉冶炼不同含Ce、Y含量的钢,分析了夹杂物的形貌、成分、数量和尺寸,得出了以下结论。

1)原始34CrNi3Mo钢中夹杂物以复合氧化物和MnS为主,并含少量 Al_2O_3 和TiN。 Al_2O_3 夹杂物的平均直径为 $3.10\ \mu\text{m}$,复合夹杂物的平均直径为 $3.52\ \mu\text{m}$,TiN夹杂物的平均直径为 $2.66\ \mu\text{m}$,MnS夹杂物的平均直径为 $2.44\ \mu\text{m}$ 。

2)随着 $w[\text{Ce}]$ 由0增至0.002 0%,夹杂物平均

尺寸由 $1.36\ \mu\text{m}$ 降至 $0.84\ \mu\text{m}$,数量密度降至 $64.26\ \text{个}/\text{mm}^2$;随着 $w[\text{Y}]$ 增至0.003 0%~0.003 4%,夹杂物平均尺寸降至 $0.98\sim 1.01\ \mu\text{m}$,数量密度稳定在 $47.99\sim 57.37\ \text{个}/\text{mm}^2$ 。

3)随稀土含量增加,Ce和Y均能显著抑制 Al_2O_3 和TiN夹杂物生成,MnS夹杂物比例呈先升后降,低稀土含量范围内难以实现对MnS的完全抑制。

4)Ce和Y对夹杂物类型的改性作用存在差异,Ce加入后夹杂物主要为稀土铝酸盐,仅生成少量稀土硫化物和硫化物,随含量增加类型没有变化;随Y含量升高,稀土铝酸盐明显减少,夹杂物由铝酸盐向 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{S}$ 、 Y_2S_3 等硫化物复合物演化。

参考文献

- [1] Hu Y, Zhang D, Xu L Z, et al. Effect of notch on fatigue performance of marine shaft made of 34CrNi3Mo alloy steel under torsional loading[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 175: 107790.
- [2] Guan X Y, Zhang Z Y, Wu H H, et al. Study on dynamic mechanical behavior of 34CrNi3MoA alloy steel considering the coupling effect of temperature and strain rate[J]. Materials, 2025, 18(20): 4658.
- [3] 李子岩,许鸿翔,何 潇,等. 34CrNi3MoV钢传动主轴调质开裂分析[J]. 金属热处理,2024,49(8):295-300.
- [4] Gao Y F, Sui G Y, Li H L, et al. In-situ investigation of fatigue crack growth behavior of 34CrNi3Mo high-strength steel[J]. Materials Letters, 2024, 358: 135793.
- [5] Cao H, Yang W B, Li Y, et al. Review on macrosegregation in electroslag remelting ingot[J]. steel research international, 2026, 97(2): 631-645.
- [6] 李宝宽,黄雪驰,刘中秋,等. 现代电渣重熔先进技术特征与演进[J]. 钢铁,2022(6):1-11.
- [7] Medovar L, Stovpchenko G, Lisova L, et al. Features and Restrictions of Electroslag Remelting with Silica-Bearing Slags for Lightweight High Manganese Steel [J]. Steel research international, 2023, 94(11): 2300161.
- [8] 霍振全. 高品质锻钢冷轧辊电渣工艺技术创新研究和实践[J]. 特殊钢,2025,46(2):48-54.
- [9] Wu L S, Liu K L, Mei H Q, et al. Thermodynamics Analysis and Pilot Study of Reusing Medium and High Alloy Steel Scrap Using Induction Melting and Electroslag Remelting Process [J]. Metals, 2022, 12(6): 944.
- [10] 马 群,孙常亮,冯桂萍,等. 改善34CrNiMo6含硫电渣钢B类夹杂物的工艺实践[J]. 特殊钢,2017,38(1):39-41.
- [11] Chen H J, Li Y, Yang H, et al. Research status of occurrence behavior and application of Ce in steel[J]. Steel Research International, 2026, 97(1): 49-71.
- [12] Liu X J, Yang J C, Zhang F, et al. Experimental and DFT study on cerium inclusions in clean steels[J]. Journal of Rare Earths, 2021, 39(4): 477-486.
- [13] Wang Y, Li C R, Wang L Z, et al. Effect of yttrium treatment on alumina inclusions in high carbon steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(4): 655-664.
- [14] Meng Q, Tan M, Guo X P, et al. Investigation on the formation mechanism of composite inclusions by multi-scale characterization in high manganese steel with yttrium addition[J]. Materials Characterization, 2024, 207: 113579.
- [15] Wang X Q, Wu Z W, 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.
- [16] Wang S, Wang Y, Zhang Y X, et al. The effect of rare earth Y on the inhibitor precipitation behavior of strip-cast grain-oriented silicon steel [J]. Steel Research International, 2024, 95(7): 2400022.
- [17] Wang J F, Li J Q, Wang L Z, et al. Effect of cooling rate on inclusions, primary carbides, and microstructure in rare-earth H13 steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2024, 55(5): 3639-3652.
- [18] ang L Z, Chen C Y, et al. Effect of rare earth on primary carbides in H13 die steel and their addition method: A review[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(3): 531-551.
- [19] 马彦硕,李 阳,姜周华,等. Ce对曲轴钢49MnVS3中硫化物形态的影响[J]. 中国冶金,2024,34(10):47-57+126.
- [20] Zheng J, Liu S, Yang F, et al. Study on the effect of rare earth Ce on the modification of sulfide inclusions in U71Mn heavy rail steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33:4548-4556.
- [21] 钱家乐,陆恒昌,马正洪,等. 微量镧铈稀土对HRB500E低温冲击韧性的影响[J]. 中国冶金,2025,35(11): 126-135+167.
- [22] Yang C Q, Liu X J, Yang J C, et al. First-principles study on yttrium inclusions in micro alloyed steels [J]. Metallurgical Research & Technology, 2022, 119(5): 503.