包钢稀土钢的进展及技术方向分析*

智建国[1,2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司总工室,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: 采用铁水脱硫 - 复吹转炉 - LF 精炼 - VD 脱气/RH 处理 - CC 连铸工艺,加入稀土后收得率与钢种、硫氧含量波动不密切,与工艺类型相关性强。不同钢种,稀土对钢中夹杂物的变性作用不同,但加稀土后,钢中夹杂物尺寸减小,更加弥散化分布,并由此提升疲劳性能与冲击性能。加入稀土通过推迟上贝氏体的形成和抑制焊接过程中奥氏体晶粒的长大,改善钢板的焊接性能。

关键词: 稀土钢; 连铸工艺; 微合金化; 氧化物冶金
中图分类号: TG142 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009 - 5438(2019)06 - 0001 - 05
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.06.001

Analysis on Progress and Technical Direction for Rare Earth Steel of Baotou Steel

Zhi Jian - guo[1,2]

(1. *Office of Chief Engineer of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: With the process of desulphurization of hot metal - basic oxygen furnace - LF refing - vacuum degassing (VD) / RH treatment - continuous casting (CC), the yield is not closely related to the grade of steel, fluctuation of sulfur and oxygen content after add the rare earth, but it is strongly related to the type of processes. The effects of rare earth on denaturation of inclusions in steel are different for different steel grades. However, after add rare earth, the size of inclusions in steel decreases and their distribution becomes more dispersive so that the fatigue and impact performances are improved. The welding performance of steel plate after add rare earth is improved by delaying the formation of upper bainite and inhibiting the growth of austenite grains during welding.

Key words: rare earth steel; continuous casting process; microalloying; oxide metallurgy

近年来有关稀土钢的论文与专利增长很快[1],稀土微合金化作用仍然是研究热点[2-3],稀土电工钢和稀土 TWIP 钢研究最热门,钢中加入稀土后,表现出优良的性能基本覆盖了所有钢种以及钢的性

收稿日期: 2019 - 09 - 16

作者简介: 智建国(1964 -),男,内蒙古丰镇市人,博士,正高级工程师,现从事炼钢工艺技术及稀土钢生产技术研究工作。

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

能[4]，稀土是唯一在钢中同时具有净化、夹杂物变性、细化组织作用的元素[5]。包钢结合自身具有的稀土资源，开展了连铸工艺条件下镧(La)、铈(Ce)在钢中应用的多方面研究，取得了新的技术突破。

1 稀土在钢中应用的技术发展分析

稀土在钢中应用机理主要依据，一是稀土元素本身的独特的电子壳结构，以La、Ce为例，是[Xe]5d16S2、[Xe]4f26S2，内层电子结构[Xe]十分稳定，外层或次外层电子存在轨道贯穿，最外层总有3个电子最易失去，该结构使稀土易与氧硫结合是极强的净化剂[6]。二是稀土在钢中的存在形式，以稀土氧硫化合物为典型的，单独化合物与复合化合物形式[7]，稀土固溶[8]以及金属间化合物。三是稀土与铁基溶液中其他元素相互作用[9]。

包头白云鄂博矿是铁及稀土等元素的共生矿，占世界储量的23%。包钢开展稀土在钢中应用，经历过稀土合金种类、稀土加入工艺、模铸连铸生产工艺技术的研发，开发出一些稀土钢钢种，例如纳入国标的U76CrRE钢轨。在采用连铸工艺生产稀土钢时，稀土的稳定加入、稀土在钢中稳定留存、稀土在钢中作用效果的重现控制，就是重点。

经过一系列研究，基本得出连铸工艺生产稀土钢的三个技术方向，稀土硫氧化物冶金技术方向，重点稀土与钢中硫氧的精准控制技术；稀土在钢中的微合金化技术方向，重点稀土固溶控制、稀土与钢中碳、氮、微合金元素、低熔点元素的耦合控制技术；具有白云鄂博矿资源特色的稀土在钢中应用技术方向，重点稀土从矿到材的传承变化利用技术、含稀土高炉渣稀土直接合金化技术。

2 连铸工艺生产研发稀土钢的实例

近三年来，包钢自己或与内蒙古科技大学、中国科学院金属研究所、北京科技大学、太原理工大学等合作开展了稀土钢生产技术研发工作[10]。

2.1 结果及分析

2.1.1 稀土钢生产工艺技术

目前包钢稀土钢生产采用铁水脱硫－复吹转炉－LF精炼－VD脱气/RH处理－CC连铸工艺。稀土加入采用镧铈混合稀土丝在上回转台前喂入钢包。采用纯稀土合金、稀土铁合金、稀土铝铁合金，在LF后期、VD结束或者RH过程或者快结束时投入钢包。表1是不同稀土合金类型，不同钢种的稀土加入中间包量及收得率情况。

表1 不同稀土加入工艺稀土收得率

合金类型	组分	中间包稀土/%	收得率/%	钢种
纯稀土合金	镧、铈或镧铈复合	0.000 8～0.008 0	10～37	U75V、U76CrRE、Q345、BT700
稀土合金	镧铁、铈铁	0.000 4～0.002 0	26～60	HRB400、NM360、YQ450NQR1、Q690、L485、BTFL－1、BT590CL、BTQ001RE、U76CrRE、BG111
	稀土铝铁	0.004 0～0.006 0	26～50	Gr.65
稀土丝	镧铈混合	0～0.000 5	≤10	25CrMoBVRE、22CrMoRE、BEL210NS、30CrMoARE、15Cr3MoVRE

采用块状料加入稀土收得率普遍比喂丝高，但收得率有一定波动，表中钢种氧含量范围在0.000 6%～0.002 5%，硫含量在0.002 0%～0.013 0%之间。试验结果说明，收得率与钢种、硫含量、氧含量波动不密切，与工艺类型相关性强。

2.1.2 稀土对钢中夹杂物变性提高冲击性能、疲劳性能的作用

U75V－RE采用LD－LF－VD－CC流程，Q345E－RE用LD－LF－RH－CC工艺流程。两种工艺钢中稀土含量不同，含稀土的特征夹杂物，见图1和图2，U75VRE是CaSiAlMgCeLa的复合夹杂物，Q345ERE是LaCeCaS。说明稀土对U75V中夹杂物主要是氧化物变性，对Q345E中夹杂物是硫化物变性，这和钢中稀土、硫、氧含量有一定的对应关系。

两种工艺加稀土后，钢中夹杂物长度、宽度都有减少，或者更加弥散化分布，见表2、表3。

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

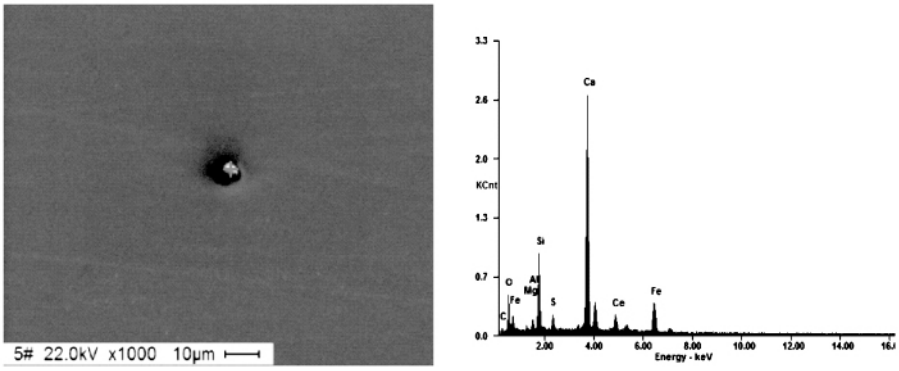


图 1　稀土 U75V 成品含稀土夹杂物类型

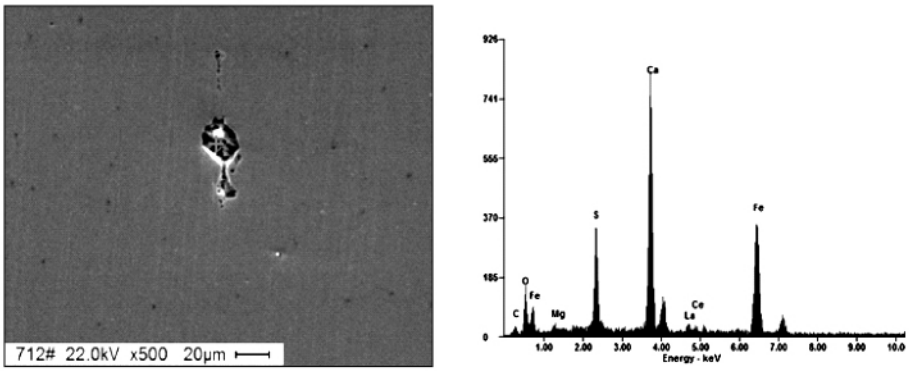


图 2　稀土 Q345E 成品含稀土夹杂物类型

表 2　稀土与常规重轨钢的过程夹杂物数量变化对比

编号	总数量/个	视场/个	平均个数/视场	取样位置
RE－1	281	13	21.6	VD 就位后
RE－2	321	17	18.9	VD 出站前
RE－3	247	16	15.4	中间包样
常规－1	707	20	35.4	VD 就位后
常规－2	397	16	24.8	VD 出站前
常规－3	372	20	18.0	中间包样

表 3　不同厚度规格风电用钢稀土加入前后的夹杂物总数及尺寸分布比例

编号	总数量/个	视场数/个	1～2 μm		2～5 μm		5～10 μm		>10 μm	
			数量	分布/%	数量	分布/%	数量	分布/%	数量	分布/%
992－37 mm－RE	450	22	48	10.67	326	72.44	61	13.56	15	3.33
992－65 mm－RE	333	21	40	12.01	217	65.17	72	21.62	4	1.20
992－80 mm－RE	325	20	49	15.08	204	62.77	57	17.54	15	4.62
996－37 mm	554	20	53	9.57	437	78.88	59	10.65	5	0.90
996－65 mm	563	20	50	8.88	383	68.03	114	20.25	6	2.84
996－80 mm	781	20	71	9.09	543	69.53	157	20.10	10	1.28

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

钢轨轴向疲劳极限检验中，当应力幅大于370 MPa后，加稀土炉次的钢轨循环次数大于不加稀土的对比炉次钢轨，表现在高应力幅条件下，优良的疲劳性能，见图3。不同试验温度下，Q345E加稀土的冲击功要高于不加稀土的，提高25%～100%，见图4。钢轨疲劳性能与风电板冲击性能的提升，原因在于加稀土对钢中夹杂物起到变性作用，降低夹杂物对性能的负面影响，提高性能。

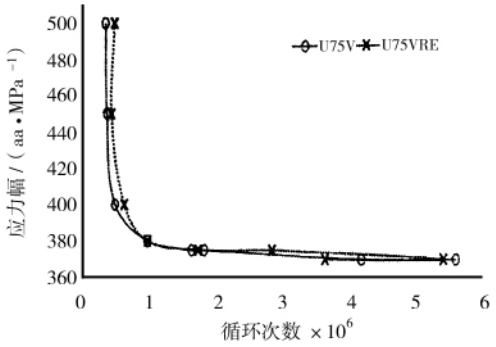


图3 U75V加稀土对疲劳性能影响

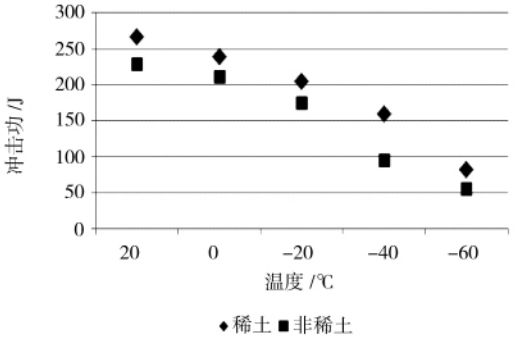


图4 Q345E加稀土对冲击功影响

2.1.3 稀土氧化物冶金技术

氧化物冶金技术是日本首先提出，主要是在厚板大线能量焊接中利用钢中弥散分布的细小夹杂物控制奥氏体晶粒长大及诱导针状铁素体析出从而改善焊接热影响区的性能，实现了钢中夹杂物从有害到无害再到有益化的跨越。本研究就是利用稀土在钢中生成的高温质点，进行稀土氧化物冶金技术的开发。

试样取自实际工业生产的不同稀土含量高强钢轧材，成分如表4所示。模拟焊接热输入为25 kJ/cm、50 kJ/cm、75 kJ/cm和100 kJ/cm，峰值温度为1 350 ℃。

表4 不同稀土含量轧材Ce、O和S含量(质量分数) %

炉号	Ce	O	S
875	0	0.001 2	0.001 9
965	0.000 5	0.001 8	0.003 0
971	0.001 8	0.001 6	0.003 0
876	0.002 3	0.000 9	0.001 8

对不同稀土含量试样不同焊接热输入下焊接热影响区显微组织分析，见图5。

当焊接热输入为25 kJ/cm时，四个不同稀土含量试样热影响区显微组织均为马氏体组织。热输入为50 kJ/cm时，Ce含量为0和0.000 5%的试样热影响区组织为上贝氏体和粒状贝氏体，Ce含量为0.001 8%和0.002 3%的试样热影响区组织为马氏体和下贝氏体组织。热输入增加至75 kJ/cm，Ce含量为0.001 8%和0.002 3%的试样热影响区开始出现上贝氏体组织，说明稀土推迟了上贝氏体的生成。

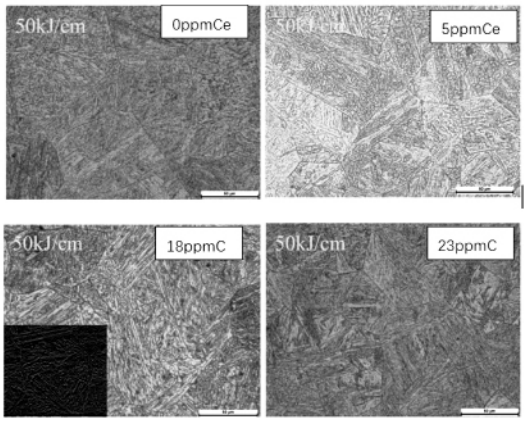


图5 不同焊接热输入热影响区显微组织照片(光镜，500倍)

随着焊接热输入从25 kJ/cm增加到100 kJ/cm，未添加稀土试样原奥氏体晶粒平均尺寸由45.2 μm增加到84.8 μm，见图6。说明相同热输入下含稀土钢的原奥氏体晶粒尺寸明显小于不加稀土钢，钢中加入稀土能够细化晶粒，抑制焊接过程中奥氏体晶粒长大。

不同稀土含量试样焊接前后热影响区典型夹杂物照片及面扫描分析结果，含量为0为CaS + MgO – Al_2O_3，含量为0.000 5%为MgO – Al_2O_3 + $CeAlO_3$，含量为0.001 8%为(CeCa) S + MgO – Al_2O_3 + CaS，含量为0.002 3%为(CeCa) S + CaS夹

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

杂。随着稀土含量的提高，钢中逐渐生成了稀土硫化物夹杂。

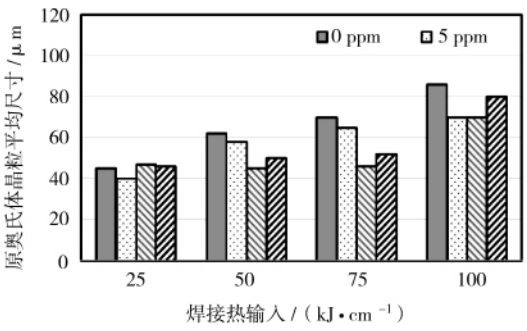


图 6　不同稀土含量试样焊接热影响区原奥氏体晶粒平均尺寸

高温共聚焦显微镜在线观察的实验结果，见图 7，当试样在 1 480 ℃保温，随着保温时间的延长，原奥氏体晶界（图中虚线标记）逐渐沿箭头方向推移，时间为 1 030.1 s 时，两条晶界合并为一条，并且可以看到夹杂物钉轧于晶界。继续保温 37.7 s 后，夹杂物钉轧的原奥氏体晶界脱钉，对比焊接热输入为 100 kJ/cm 时，1 300 ℃以上的停留时间为 14.08 s，因此，Ce 含量为 0.001 8% 的试样中的夹杂物可以钉轧原奥氏体晶界，有效抑制焊接过程中晶粒的长大。

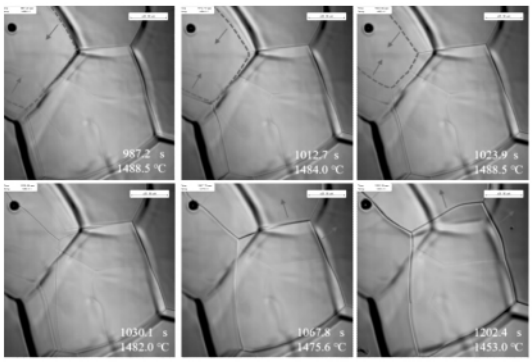


图 7　Ce 含量 0.001 8% 高温共聚焦实验结果

加入稀土通过推迟上贝氏体的形成和尺寸合理的稀土氧硫化物抑制焊接过程中奥氏体晶粒的长大，改善钢板的焊接性能。

3　结论

（1）采用连铸工艺生产稀土钢，稀土硫氧化物冶金技术、稀土微合金化技术以及具有白云鄂博矿资源特色的稀土在钢中应用技术（稀土从矿到材的传承变化利用、含稀土高炉渣稀土直接合金化）是技术发展方向。

（2）采用连铸规模化生产稀土钢，在低硫低氧条件下，低含量稀土具有夹杂物变性、细化组织、提高冲击性能、疲劳性能、焊接性能等作用。

参　考　文　献

[1]　于佳欣，闫宏伟，刘小芳，等. 稀土钢专利信息分析 [J]. 稀土，2017，38（2）：152 – 158.

[2]　王龙妹，杜挺，卢先利，等. 微量稀土元素在钢中的作用机理及应用研究 [J]. 稀土，2001，22（4）：37 – 40.

[3]　李春龙. 稀土在钢中应用与研究新进展 [J]. 稀土，2013，34（3）：78 – 83.

[4]　朱键，黄海友，谢建新. 近年稀土钢研究进展与加速研发新思路 [J]. 钢铁研究学报，2017，28（7）：513 – 529.

[5]　智建国，董方，史成斌，等. 连铸工艺生产稀土钢技术研发的最新进展及展望 [A]. 第九届国际稀土开发与应用研讨会暨 2019 年中国稀土学会学术年会摘要集 [C]. 北京：中国稀土学会，2019.

[6]　富晓阳，杨吉春，赵莉萍，等. 稀土元素在钢中作用机理与研究现状 [J]. 河南有色金属，2015，1：55 – 57，63.

[7]　王龙妹. 稀土元素在新一代高强韧钢中的作用和应用前景 [J]. 稀土，2004，22（1）：48 – 54.

[8]　王龙妹，杜挺，卢先利，等. 稀土元素在钢中的热力学参数及应用 [J]. 中国稀土学报，2003，21（3）：251 – 254.

[9]　林勤，叶文，等. 钢中稀土固溶规律及作用研究 [J]. 中国稀土学报，1989，7（2）：54 – 58.

[10]　林勤，叶文，李栓禄. 稀土在钢中的作用规律与最佳控制 [J]. 北京科技大学学报，1992，14（2）：225 – 231.

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