

稀土大梁钢 BT700L 生产实践

张嘉华^{1,2}, 魏晓东^{1,2}, 王金超^{1,2}

- (1. 内蒙古包钢稀土钢板材有限责任公司, 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:通过对汽车大梁钢 BT700L 冲压过程中的开裂情况分析,发现大颗粒棱状的 Al_2O_3 夹杂物是导致开裂的主要原因。为了改善产品的夹杂物尺寸和形貌,在汽车大梁钢 BT700L 生产中添加稀土 Ce 元素,由于稀土 Ce 元素与氧的亲合力很强,钢水中的稀土 Ce 元素与氧反应生成稀土氧化物 (RE_2O_3) 上浮到炉渣中,导致稀土 Ce 元素在钢中的收得率极低。通过对炼钢连铸钢水 Ce 含量、炉渣的氧化性及铸机保护浇注等的工艺优化控制,有效提高产品中稀土 Ce 元素的收得率。稀土 Ce 元素的原子半径比铁原子大,稀土 Ce 元素能够变性钢中的夹杂物,通过在汽车大梁钢 BT700L 中添加稀土 Ce 元素研究分析,钢水中添加稀土 Ce 元素后,产品的夹杂物尺寸变小,夹杂物形貌球状化,同时有效的改善了产品低温冲击性能。

关键词:汽车大梁钢;稀土 Ce 元素;夹杂物;产品性能

中图分类号: TG142.1; U465.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2022)03-0031-04

Production Practices of Rare Earth Beam Steel BT700L

Zhang Jia-hua^{1,2}, Wei Xiao-dong^{1,2}, Wang Jin-chao^{1,2}

- (1. Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth Steel Plate 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: The large-grained ribbed Al_2O_3 inclusion is the main cause of cracking through analyzing the cracking in process of stamping beam steel BT700L. In order to improve the size and morphology of inclusion in product, the rare earth Ce is added in production of beam steel BT700L. Since the affinity of rare earth Ce and oxygen is very strong, the rare earth Ce in molten steel reacts with oxygen and generates rare earth oxide (RE_2O_3) coming up to slag so that the yield of rare earth Ce in steel is extremely low. It could be improved effectively through optimizing and controlling the content of Ce in molten steel of steelmaking and continuous casting, oxidability of slag as well as such process as protective casting of continuous caster. Moreover, the atomic radius of rare earth Ce is greater than that of iron atom and rare earth Ce could denature inclusions in steel. It is found that the size of inclusion in product becomes small, morphology of inclusion spheroidizes and low temperature impacting property of product is effectively improved after add rare earth Ce into molten steel through studying and analyzing adding rare earth Ce into beam steel BT700L.

Key words: automotive beam steel; rare earth Ce; inclusions; product properties

汽车大梁钢 BT700L 主要用于重卡汽车底盘上的纵梁、衬梁及横梁等结构件,随着汽车工业的发展和人们对安全需求的提高,汽车用高强度产品的比例逐渐增加,汽车大梁钢对产品质量要求非常严格。汽车大梁钢 BT700L 产品在加工冲压过程中开裂,经过对开裂部分的检验发现有大颗粒的 Al_2O_3 夹杂物,为了改善大梁钢 BT700L 产品中夹杂物的尺寸和形貌,在汽车大梁钢 BT700L 中加入稀土 Ce 元素,对产品的夹杂物进行分析。汽车大梁钢 BT700L 产品中添加稀土 Ce 元素后促进了带状或长条状的夹杂物向球状稀土复合夹杂物转变,减缓了稀土夹杂物引起的应力集中,提高产品各项性能指标^[1]。

表 1 BT700L 化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Al ₁	Nb	Ti	Ce	%
0.06 ~ 0.10	≤0.15	1.20 ~ 1.70	≤0.020	≤0.005	0.010 ~ 0.050	0.010 ~ 0.080	0.010 ~ 0.040	0.001 ~ 0.003	

2 稀土大梁钢 BT700L 工艺控制

由于汽车大梁钢 BT700L 各类夹杂物要求控制严格,在大梁钢 BT700L 添加稀土元素,根据 Janke 等研究结果^[3], $\omega[RE] \cdot \omega[O] = 9.4 \times 10^{-18}$, 在 1 600 °C 时的相互作用系数 $e_0^{Ce} = -670$, $e_0^{La} = -552$, 表明稀土元素 Ce 和 La 是比铝还强的脱氧剂。根据形成 CeS 和 Ce_2O_2S 的热力学条件计算得到 $\omega[Ce] \cdot \omega[S] = 1.2 \times 10^{-4}$, $\omega[Ce]^2 \cdot \omega[O]^2 \cdot \omega[S] = 4 \times 10^{-16}$, CeS、 Ce_3S_4 和 Ce_2S_3 的形成自由能分别为 -364 650 J/mol, -420 240 J/mol 和 -442 680 J/mol, 可见稀土元素是很强的脱硫剂。为了提高稀土元素在钢水的收得率,保证稀土加入前钢水较低的氧含量和硫含量,通过对稀土加入时机和炼钢连铸工艺优化,冶炼过程中控制钢水中的氧和硫含量在较低的范围,铸机浇注过程中进行保护浇注,防止钢水二次氧化,提高钢水的洁净度。

2.1 稀土钢生产 S 和 O 的控制

汽车大梁钢中添加适量的稀土 Ce 元素,可以使产品中的非金属夹杂物的性质和形状发生很大的变化,不仅能与钢中的硫、氧结合形成稀土氧化物和稀土硫化物,还能改变已形成的硫化物、氧硫化物夹杂的形态,使它们变成圆形、球形或不规则形状。根据相关文献当钢中的 $\omega[S]/\omega[O]$ 小于 10 时形成稀土氧化物,当钢中的 $\omega[S]/\omega[O]$ 在 10 ~ 100 时,形成稀土氧硫化物,当钢中 $\omega[S]/\omega[O]$ 大于

1 成分设计

随着冶金技术水平的提高,稀土元素为产品夹杂物的控制提供了条件,产品添加稀土元素后夹杂物的形态和尺寸得到了有效的控制。研究稀土控制夹杂物的作用,适应钢铁工业的发展趋势,促进稀土在金属材料中的应用有着重要的意义^[2]。稀土元素在钢中主要具有净化钢液、夹杂变性及微合金化作用。稀土汽车大梁钢 BT700L 中稀土 Ce 含量控制在 0.001% ~ 0.003% 之间,稀土大梁钢 BT700L 成分范围见表 1。

100 时形成稀土硫化物^[4-5]。通过对大梁钢 BT700L 添加稀土元素炼钢工艺优化,添加稀土合金前降低了钢水中的氧含量,减少钢中稀土氧化物和氧化铝数量,提高钢水洁净度。对稀土大梁钢 BT700L 夹杂物进行分析,稀土大梁钢 BT700L 硫含量控制在 0.003 0%, 氧含量控制在 0.000 8%, 产品中的 $\omega[S]/\omega[O]$ 为 3.75, 小于 10, 所以稀土大梁钢 BT700L 中夹杂物为稀土氧化物。扫描电镜检测发现产品中稀土氧化物呈球状,且尺寸减小,稀土氧化物中 Ce 和 O 元素占比较高,形成的夹杂物为 $Al_2O_3 - RE_2O_3$ 的复合夹杂物。大梁钢 BT700L 添加稀土 Ce 元素夹杂物情况见图 1。

2.2 稀土钢生产炉渣 FeO 的控制

稀土大梁钢 BT700L 添加稀土前炉渣 FeO 含量越高,钢水中 Ce 元素与炉渣中的 O 越容易结合,形成稀土氧化物,稀土氧化物上浮到炉渣中,导致钢中的 Ce 含量较低。为了研究炉渣对稀土的影响,在炼钢工序加入稀土前取炉渣渣样,用荧光光谱仪分析了炉渣中 CeO_2 的含量,发现炉渣中的 FeO 含量在 0.5% 以上,稀土的收得率较低,炉渣中 CeO_2 含量为 0.048% 以上,相反炉渣中的 FeO 含量在 0.5% 以内,稀土的收得率较高,炉渣中 CeO_2 含量为 0.032% 以内,稀土 Ce 元素进入炉渣中较少,表明降低炉渣氧化性,可提高稀土 Ce 元素的收得率。为了控制炉渣低的氧化性,稀土大梁钢 BT700L 在转炉出钢过程加入白灰、改质剂以及铝粒,降低炉渣的

氧化性。LF 炉处理过程中加入电石、改质剂和脱氧剂等快速造白渣,添加稀土铈铁合金前炉渣 FeO 含量降低到 0.5% 以内,有利于钢中的 Al_2O_3 夹杂物上浮到炉渣中,降低钢水中的氧含量,添加稀土铈铁合

金后炉渣中 CeO_2 含量降低,有效提高了稀土 Ce 元素的收得率。稀土大梁钢 BT700L 冶炼工艺参数如表 2 所示。

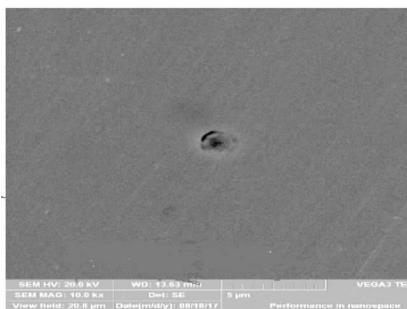


图 1 大梁钢 BT700L 夹杂物情况

成分 \downarrow	重量百分比/% \downarrow	原子百分比/% \downarrow
CK \downarrow	06.20 \downarrow	14.70 \downarrow
NK \downarrow	12.59 \downarrow	25.62 \downarrow
OK \downarrow	14.77 \downarrow	26.32 \downarrow
AlK \downarrow	05.69 \downarrow	06.01 \downarrow
NbL \downarrow	02.38 \downarrow	00.73 \downarrow
CaK \downarrow	01.51 \downarrow	01.07 \downarrow
TiK \downarrow	35.67 \downarrow	21.23 \downarrow
CeL \downarrow	21.19 \downarrow	04.31 \downarrow

表 2 稀土大梁钢 BT700L 冶炼工艺参数

熔炼号	稀土加入量/kg	渣中 $\omega(FeO)/\%$	钢中 $\omega[Ce]/\%$	收得率/%	渣中 $\omega(CeO_2)/\%$
21306382	30	0.38	0.002 0	78	0.022
21205707	20	0.39	0.001 7	61	0.026
21205708	20	0.48	0.001 6	60	0.032
21302364	20	0.99	0.001 1	45	0.048
21105989	20	1.20	0.000 5	25	0.052

2.3 铸机保护浇注情况

铸机保护浇注是生产优质铸坯的重要环节,铸机浇注过程钢水接触空气,造成钢水的二次氧化,钢水中夹杂物增加,产品夹杂物超控制计划要求^[6]。通过全过程保护浇注,同时针对稀土钢浇注过程絮钢的特点,制定了稀土钢铸机浇注过程使用空心塞棒的保护浇注措施,防止加入稀土后二次氧化形成稀土氧化物,导致铸机水口絮钢。为了防止钢水二次氧化,铸机浇注过程中保证密封垫圈完好、无裂纹、无损坏。每炉浇注完毕后,观察大包套管本体耐材使用情况,尤其是渣线位置和套管颈部的使用情况,如有异常及时进行处理。同时采用保护浇注氩气控制技术,通过调节铸机塞棒流量,提高了连铸保护浇注的效果。为了验证稀土钢保护浇注的效果,调节铸机塞棒流量在 1~9 L/min 范围内,取样分析氧铸坯氮含量,发现当调节铸机塞棒流量在 2~6 L/min 范围内,铸机增氮在 0.000 5% 以内,产品的全氧水平控制 0.001 0% 以内,避免了稀土钢在浇注过程的二次氧化,提高了稀土 Ce 元素的收得率。

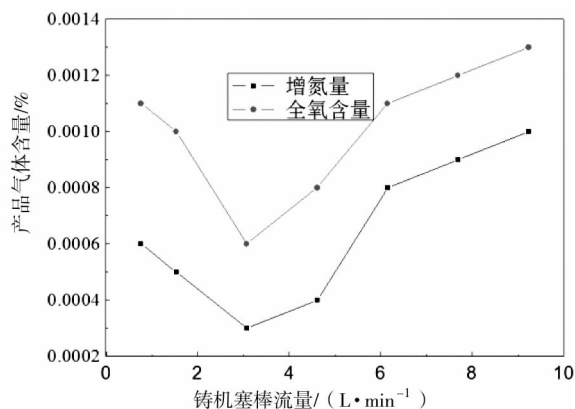


图 2 铸机塞棒流量对产品气体含量的影响

3 稀土大梁钢 BT700L 夹杂物情况

稀土元素在钢水脱氧和脱硫完毕后加入,加入前钢中的氧含量较低,稀土加入后由于稀土元素较活泼,与钢水中的氧化物反应,生成稀土氧化物、稀土硫化物和稀土氧硫化物等。由于稀土元素具有高的表面活性,各个小夹杂物相互吸引、靠拢、合并长

大^[7]。为了检查稀土大梁钢 BT700L 的夹杂物情况,在大梁钢 BT700L 热轧卷板宽度 1/4 处纵向截面上取样检测分析,检测非金属夹杂物情况见表 3。未加稀土 1[#]和 2[#]试样 B 类非金属夹杂物等级分别

为 1.0 和 0.5 级,添加稀土的 7[#]和 8[#]试样 B 类非金属夹杂物等级都为 0.5 级,其他添加稀土 3[#]—6[#]试样 B 类非金属夹杂物级均为 0 级,达到产品夹杂物设计要求。

表 3 BT700L 夹杂物情况

级

编号	硫化物(A)	硫化物(Ae)	氧化物(B)	氧化物(Be)	硅酸盐(C)	硅酸盐(Ce)	球状氧化物(D)	备注
1 [#]	0	0	1.0	0	0	0	1.0	未加稀土
2 [#]	0	0	0.5	0	0	0	1.0	未加稀土
3 [#]	0	0	0	0	0	0	1.0	加稀土
4 [#]	0	0	0	0	0	0	1.0	加稀土
5 [#]	0	0	0	0	0	0	1.0	加稀土
6 [#]	0	0	0	0	0	0	1.0	加稀土
7 [#]	0	0	0.5	0	0.5	0	1.0	加稀土
8 [#]	0	0	0.5	0	0	0	1.0	加稀土

对稀土大梁钢 BT700L 铸坯试样进行扫描电镜检测,未发现大颗粒夹杂物,夹杂物主要为 RE_2O_3S 、 $RE_2O_3S - CaC_2$ 的复合夹杂物(见图 3)。加入微量稀土元素后使条状或棱角状夹杂物变形为球状夹杂

物,夹杂物尺寸的减小,降低了产品中夹杂物的危害性,并且细小球状夹杂不会割裂带钢组织连续性,有利于产品的成形性能。

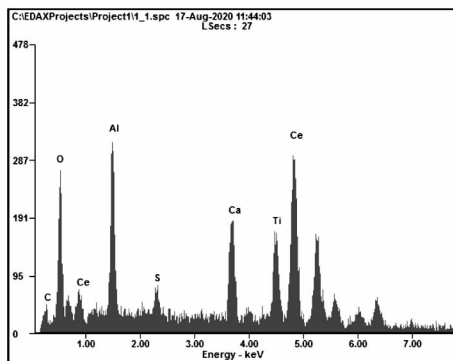
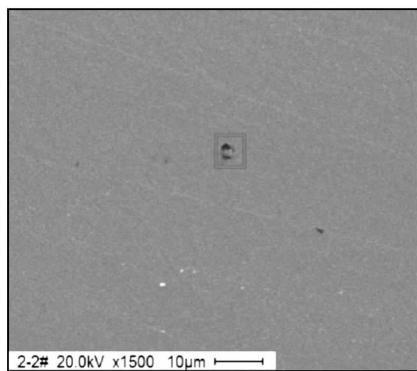


图 3 稀土大梁钢 BT700L 夹杂物情况

4 稀土大梁钢 BT700L 性能情况

委托技术中心对 BT700L 热轧钢卷进行性能检测,添加稀土和不添加稀土大梁钢 BT700L 系列冲击值对比见图 4。添加稀土和不添加稀土大梁钢 BT700L 脆性转变温度均为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,但当温度大于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,加稀土的 BT700L 冲击值明显高于未加稀土,说明添加稀土 Ce 元素对产品的低温冲击韧性提高效果明显。

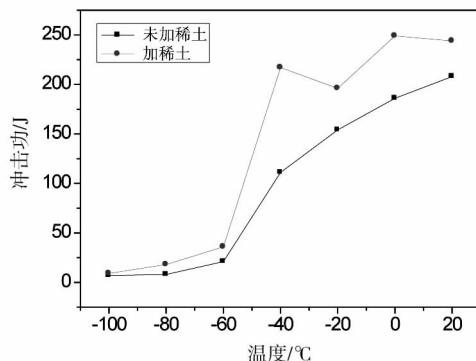


图 4 BT700L 系列冲击试验

(下转第 47 页)

3 结论

(1) 采用低碳、低碳当量、低焊接裂纹敏感性指数的合金体系设计路线,通过合理的热机械轧制及调质处理,试验钢各项性能均能满足 800 MPa 级水电用低焊接裂纹敏感性钢板的技术要求。

(2) 试验钢不同调质工艺下各项力学性能均能满足技术要求,淬火后获得全截面板条马氏体,回火后显微组织为回火索氏体,考虑综合性能最优,调质工艺优选 920 °C 保温 20 min 淬火、640 °C 保温 30 min 回火。

(3) 试验钢 -20 °C 应变时效冲击吸收功平均值为 197 J,满足技术要求,富余量较大;-80 °C 低温冲击吸收功大于 100 J,韧脆转变温度低。

参 考 文 献

[1] 张群. 我国水力发电的现状和前景[J]. 科技

风,2016,(8):104.

[2] 周兴波,杜效鹤. 2018 年全球水电发展现状与开发潜力分析[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):18-23.

[3] 王克鲁,鲁世强,康永林,等. 微合金低碳贝氏体钢形变奥氏体连续冷却转变行为[J]. 金属热处理,2008,33(10):17-19.

[4] 孔君华,郑琳,郭斌,等. 钼对低碳微合金钢组织和性能的影响[J]. 轧钢,2005,22(4):27-29.

[5] 齐俊杰,黄运华,张跃. 微合金化钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.

(上接第 34 页)

5 结论

(1) 大梁钢 BT700L 钢水脱氧脱硫后加入稀土,通过采取降低钢水中的氧含量、降低炉渣的氧化性及加强铸机的保护浇注等措施,钢水中夹杂物的形貌球状化,夹杂物尺寸减小,降低产品中夹杂物的危害性。

(2) 添加稀土的大梁钢经过夹杂物检测,非金属夹杂物都在 1.0 级以内,夹杂物控制满足工艺要求,夹杂物主要为 Ce_2O_3 、 RE_2O_3 - CaC_2 等稀土复合夹杂物。

(3) BT700L 加入微量稀土 Ce 元素后低温冲击值明显高于未加稀土,添加稀土 Ce 元素产品的低温冲击韧性明显提高。

参 考 文 献

[1] 袁志亮,王拓,陈立杰,等. 稀土元素在钢中加入方法的对比分析[J]. 金属加工,2015,

(13):45.

[2] 林勒,郭锋,朱兴元,等. 镧和铈在碳锰洁净钢中的合金作用[J]. 中国稀土学报,2006,24(5):427-430.

[3] 徐曾启. 炉外精炼[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.

[4] 纪绯绯. 添加稀土金属的钢中非金属夹杂物的性质及形态变化[J]. 济南大学学报,2003,17(1):76-78.

[5] 高泽平. 钢中夹杂物变性处理技术研究[J]. 湖南冶金职业技术学院学报,2004,4(2):161-163,166.

[6] 王静. 汽车用钢现状及其在邯钢的发展[J]. 河北冶金,2014,(9):67-71.

[7] 赵成林. 稀土元素在钢水中的作用机理及加入技术研究[J]. 鞍钢技术,2017,(1):20-24.