

吸附杆对不同脱氧方式钢液水口内夹杂物去除的影响

赵定国¹, 张福君¹, 王育飞², 王书桓¹

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 唐山市特种冶金及材料制备重点实验室, 河北 唐山 063210; 2. 河钢集团钢研总院, 河北 石家庄 052165)

摘要: 通过热态试验, 对比研究了铝、钛脱氧条件下吸附杆对钢液中杂质的吸附效果。试验结果表明, 从单位面积夹杂物个数、面积比率、吸附速度三方面, 镁钙质吸附杆对不同脱氧方式钢液中夹杂物均有较强吸附能力。钛脱氧钢液中夹杂物面积比率减小最大, 吸附杆进行夹杂物吸附试验效果最好, 试样中部、边部单位面积夹杂物个数与原脱氧钢锭相比降低了 27.10%、32.55%, 面积比率降低了 51.58%、54.97%。

关键词: 钢液; 脱氧方式; 夹杂物; 吸附杆; 材质; 吸附率

中图分类号: TF777 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2019)02-0112-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.02.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental Study on Effect of Absorbing Rods on Removal of Inclusions in Molten Steel Port with Different Deoxidation Methods

Zhao Dingguo¹, Zhang Fujun¹, Wang Yufei², Wang Shuhuan¹

(1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan Key Laboratory of Special Metallurgy and Material Preparation, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. Hegang Group Steel Research Institute, Shijiazhuang 052165, Hebei, China)

Abstract: The adsorption of impurities in molten steel under deoxidation conditions of aluminum and titanium was studied by thermal experiments. The experimental results show that the magnesia-calcium adsorption rod has strong adsorption capacity for inclusions in different deoxidation steels from the three aspects of the number of inclusions per unit area, area ratio and adsorption rate. The area ratio of inclusions in titanium deoxidized steel liquid decreased significantly. The number of inclusions per unit area in the middle and side of the sample was reduced by 27.10% and 32.55%, respectively, compared with the original deoxidized steel ingot and area ratio decreased by 51.58% and 54.97%, respectively.

Key word: molten steel, deoxidation conditions, inclusions, adsorber rod, material, adsorption rate

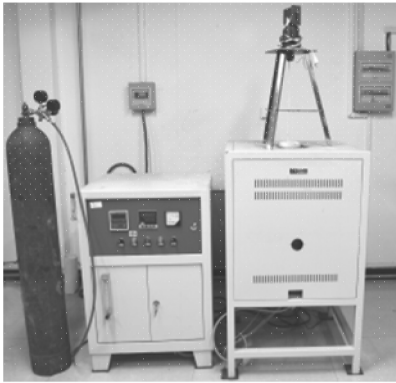
0 引言

在冶金过程当中, 钢液中的夹杂物大部分是通过浮力作用自然上浮去除, 同时也有研究表明夹杂物与耐火材料的化学反应而引发的粘附也可以去除钢液中的夹杂物。

插杆式塞棒为钢液中夹杂物的去除提供了新思

路。钢液中 Al_2O_3 等夹杂物粒子由于受到钢液的作用, 在流经水口时会与耐材壁面发生物理碰撞和化学反应, 进而出现夹杂物粘附现象。夹杂物耐材壁面附着时, 夹杂物在垂直壁面方向上受力随底层粗糙度的增大缓慢减小, 随夹杂物半径的增大而增大。夹杂物与耐材壁面碰撞时, 回弹系数、夹杂物初速度一定, 夹杂物半径越小, 夹杂物越易碰撞吸附在壁面。

壁面夹杂物的稳定性随夹杂物半径的增大而减小,当夹杂物半径大于 $4\text{ }\mu\text{m}$ 时,不同夹杂物附着稳定性发生变化,夹杂物稳定性从高到低依次为 $\text{Al}_2\text{O}_3>\text{TiN}>\text{MgO}>\text{SiO}_2$ 。不同脱氧方式下钢液中夹杂物成分、形态均有较大差别^[1-4]。研究不同脱氧方式钢液对夹杂物吸附能力的影响,最终确定最佳脱氧方式,提高吸附杆的吸附效率。



1 试验原料及装置

1.1 试验装置

试验整体装置和夹杂物吸附装置分别如图 1 所示。其中耐材质吸附杆固定在旋转杆下部,试验时浸渍在钢液中,旋转装置连接旋转杆以一定的速度转动,模拟水口内吸附杆表面钢液的流动状态。

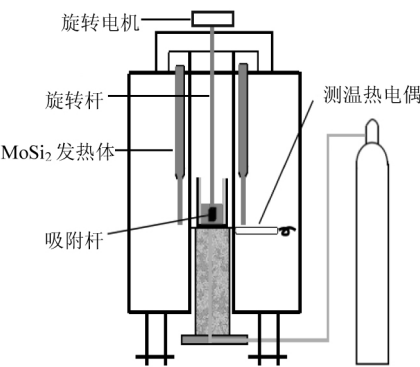


图 1 试验装置

Fig.1 The schematic diagram of the experimental apparatus

1.2 原料处理

1) 吸附杆准备

以 MgO 为基底的碱性耐火材料^[5],在与钢液接触并发生反应之后,钢液中夹杂物数量及尺寸没有增加,即 MgO 质耐火材料对钢液本身无污染。故试验中吸附杆材质的选择为镁钙质。通过工业用耐火砖切制而成,然后通过细砂纸打磨,使得吸附杆表面粗糙度保持一致。

2) 原始钢样准备

试验通过向已知化学成分钢液中分别添加铝箔、钛箔脱氧剂进行脱氧,原料成分如表 1 所示,依据铝脱氧平衡热力学^[6]及钛脱氧平衡热力学^[7]计算,当熔炼 400 g 原始钢锭时,加入铝、钛的量分别为 0.4 、 3.6 g 。然后利用吸附杆进行钢液中夹杂物吸附试验,研究吸附杆对不同脱氧方式下钢液中夹杂物的吸附能力。

表 1 原料成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of raw materials (mass fraction)

种类	Ti	Fe	C	N	O	Al	Si	S	Cu	Mn
原始钢锭			0.065	0.0032	0.012	0.11	0.12	0.035		0.34
铝箔	0.02	0.5					0.5		0.05	0.01
钛箔		0.1	0.03	0.012	0.1					

2 试验方案

首先进行铝脱氧(铝脱氧或钛脱氧)试验。将钢锭放入刚玉坩埚($\varnothing 60\text{ mm}\times 100\text{ mm}$)内,外部套上石墨坩埚($\varnothing 75\text{ mm}\times 100\text{ mm}$),放入 $1\text{ }700\text{ }^\circ\text{C}$ 立式管式气氛炉恒温区,通入氩气洗炉 5 min ,并一直作为保护气氛至试验结束;管式炉温度升至 $1\text{ }620\text{ }^\circ\text{C}$ 时开始保持恒温 2 h ,开始脱氧试验,向坩

埚内添加铝箔脱氧剂, 0.5 h 后对坩埚内钢液进行搅拌混匀,试验结束后,钢液随炉冷却至室温,取样观察脱氧后钢锭中夹杂物分布情况,并将其作为吸附试验的原料。

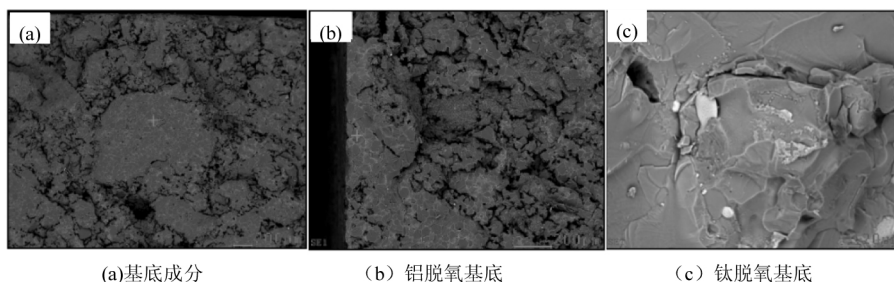
吸附杆吸附钢液中夹杂物试验。原料为脱氧后钢锭,重复步骤上面中的操作,熔化钢锭;当管式炉温度达到 $1\text{ }620\text{ }^\circ\text{C}$ 且保温 0.5 h 后,开始进行试验。将装有耐火材料吸附杆的旋转杆与旋转装置组合,

调制转速 100 r/min,且试验时间为 30 min(据(日)向井楠宏^[8]等人研究,浸入式水口内钢液的滞留时间约 0.5 s,试验中确定旋转电机转速为 100 r/min,即耐火材料旋转一周的时间为 0.6 s,钢液在耐材表面滞留时间相似,确定旋转时间为 30 min)。试验结束后取出旋转杆、停炉,钢液随炉冷却至室温,取样观察夹杂物吸附试验后钢锭中不同尺寸夹杂物个数及面积比率。

3 试验结果与讨论

3.1 钢液脱氧方式对吸附杆吸附层影响

定义吸附杆的吸附层为夹杂物在杆体壁面的附着层以及钢液、杆体壁面的反应层。图 2 为原始吸附杆基底(a)和吸附不同脱氧方式钢液中夹杂后吸附杆基底(b、c)电镜扫描。表 2 吸附杆基底电镜扫描的成分。



(a)基底成分

(b) 铝脱氧基底

(c) 钛脱氧基底

图 2 吸附杆基底成分电镜扫描结果

Fig.2 Scanning electron microscope of the base of adsorbent rod

表 2 吸附杆体表面吸附层成分

Table 2 Compositions of adsorption rod surface adsorption layer

元素	吸附杆基底		铝脱氧		钛脱氧	
	w/%	y/%	w/%	y/%	w/%	y/%
O	31.71	45.95	42.30	57.90	12.04	29.50
Mg	26.26	25.04	21.78	19.61		
Si	23.24	19.18	14.66	11.43		
Ca	12.41	7.18	9.6	5.25		
Cr						
Zr						
Al			2.97	2.41		
Mn	1.17	0.72				
Fe	4.68	1.94	8.69	3.41	12.69	8.91
Ti					75.27	61.60

由图 2 发现,钢液脱氧方式不同,吸附杆吸附层所含的夹杂物种类也不同。当原料钢锭为铝脱氧钢时,钢液中会含有大量 Al_2O_3 脱氧夹杂产物,利用扫描电子显微镜检测试验后吸附杆吸附层成分,通过对吸附杆表面、截面位置的检测,发现吸附层内含有 Al 元素,而吸附杆基底检测未发现 Al 元素,可见吸附杆对铝脱氧后钢液中夹杂物具有吸附作用;同理当原料钢锭为钛脱氧钢时,钢液中会产生大量含 Ti 夹杂物,利用扫描电子显微镜观察试验后吸附杆吸附层成分,发现吸附层内均含有 Ti 元素,可见吸附杆对钛脱氧钢液中夹杂物具有一定吸附作用。

3.2 不同脱氧方式对钢液中夹杂物的影响

铝脱氧后钢锭中夹杂物含量统计如表 3 所示。

钛脱氧后钢锭中夹杂物含量统计如表 4 所示。

表 3、4 为试验前后镁钙质吸附杆分别在铝脱氧、钛脱氧钢液中钢锭中部和边部不同尺寸夹杂物单位面积个数及面积比率的统计结果。统计结果发现,不同脱氧方式下,钢液中都会产生大量小于 1 μm 的夹杂物,且钛脱氧后钢液中 <5 μm 的夹杂物含量明显大于铝脱氧钢液。对比发现,在两种不同脱氧钢液中进行吸附杆吸附钢液中夹杂物试验后,钢液中夹杂物含量均有明显的下降,且钛脱氧钢液中夹杂物面积比率均减小明显。

3.3 不同脱氧方式夹杂物吸附试验前后钢液中夹杂物含量分析

图 3、4 为试验前后镁钙质吸附杆分别在铝脱氧、钛脱氧钢液中钢锭中部和边部不同尺寸夹杂物。

表 3 铝脱氧后钢锭中夹杂物含量统计
Table 3 Statistics of inclusion content in steel ingot after deoxidation with Al

铝脱氧试验(吸附前)					吸附后				
$d/\mu\text{m}$	试样中部		试样边部		$d/\mu\text{m}$	试样中部		试样边部	
	$n/(\text{个}\cdot\text{mm}^{-2})$	$\gamma/\%$	$n/(\text{个}\cdot\text{mm}^{-2})$	$\gamma/\%$		$n/(\text{个}\cdot\text{mm}^{-2})$	$\gamma/\%$	$n/(\text{个}\cdot\text{mm}^{-2})$	$\gamma/\%$
<1	263.094	5.16×10^{-3}	248.460	4.89×10^{-3}	<1	187.210	3.67×10^{-3}	165.855	3.25×10^{-3}
1~5	177.312	3.13×10^{-2}	192.462	3.40×10^{-2}	1~5	128.352	2.26×10^{-2}	107.561	1.90×10^{-2}
5~8	12.265	4.07×10^{-2}	11.654	3.86×10^{-2}	5~8	7.898	2.62×10^{-2}	5.062	1.68×10^{-2}
8~10	6.595	4.19×10^{-2}	4.741	3.01×10^{-2}	8~10	3.626	2.31×10^{-2}	3.144	2.00×10^{-2}
10~15	7.651	9.38×10^{-2}	8.365	1.02×10^{-1}	10~15	4.138	5.07×10^{-2}	3.352	4.11×10^{-2}
15~20	3.626	8.72×10^{-2}	2.948	7.09×10^{-2}	15~20	0.848	2.03×10^{-2}	0.580	1.39×10^{-2}
>20	2.103	6.60×10^{-2}	1.965	6.17×10^{-2}	>20	0.380	1.19×10^{-2}	0.256	8.04×10^{-3}

表 4 钛脱氧后钢锭中夹杂物含量统计
Table 4 Statistics of inclusion content in steel ingot after deoxidation with Ti

钛脱氧试验(吸附前)					吸附后				
$d/\mu\text{m}$	试样中部		试样边部		$d/\mu\text{m}$	试样中部		试样边部	
	$n/(\text{个}\cdot\text{mm}^{-2})$	$\gamma/\%$	$n/(\text{个}\cdot\text{mm}^{-2})$	$\gamma/\%$		$n/(\text{个}\cdot\text{mm}^{-2})$	$\gamma/\%$	$n/(\text{个}\cdot\text{mm}^{-2})$	$\gamma/\%$
<1	516.115	1.01×10^{-2}	547.356	1.07×10^{-2}	<1	369.061	7.24×10^{-3}	337.529	6.63×10^{-3}
1~5	339.090	5.99×10^{-2}	316.047	5.58×10^{-2}	1~5	234.972	4.15×10^{-2}	217.182	3.83×10^{-2}
5~8	17.661	5.86×10^{-2}	15.096	5.01×10^{-2}	5~8	10.082	3.34×10^{-2}	9.571	3.17×10^{-2}
8~10	10.598	6.74×10^{-2}	11.375	7.23×10^{-2}	8~10	7.580	4.82×10^{-2}	5.056	3.21×10^{-2}
10~15	12.755	1.56×10^{-1}	10.490	1.28×10^{-1}	10~15	6.694	8.21×10^{-2}	4.939	6.06×10^{-2}
15~20	5.085	1.22×10^{-1}	4.402	1.05×10^{-1}	15~20	2.359	5.67×10^{-2}	1.703	4.09×10^{-2}
>20	1.529	4.80×10^{-2}	1.594	5.01×10^{-2}	>20	0.670	2.10×10^{-2}	0.473	1.48×10^{-2}

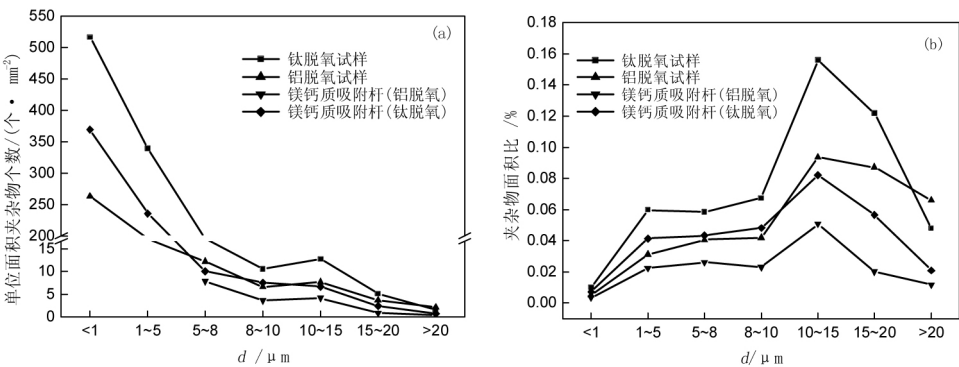


图 3 试样中部夹杂物统计
Fig.3 Statistics of inclusion in the middle of samples

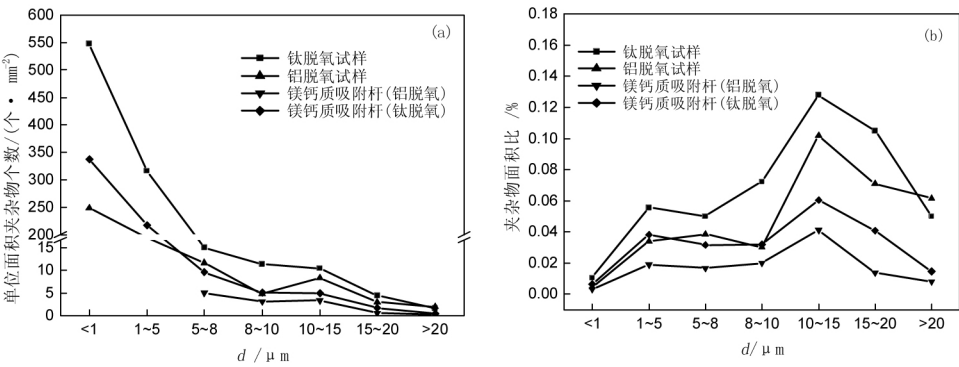


图 4 试样边部夹杂物统计
Fig.4 Statistics of inclusion in edge of samples

由图3、4可知,铝脱氧钢液中夹杂物经吸附杆吸附后,单位面积夹杂物个数减少,面积比率降低,且铝脱氧试验后钢液中形成大量 $<5\ \mu\text{m}$ 的显微夹杂,利用镁钙质吸附杆进行夹杂物吸附试验,钢液中 $<5\ \mu\text{m}$ 的夹杂物个数减少最为明显。

理论分析可知,吸附杆在旋转过程中,会在杆体表面形成层流底层,钢液中夹杂物由于受到钢液速度梯度引起的吸引力以及耐材壁面对夹杂物的吸附力,会向吸附杆表面运动,进而发生碰撞、附着,且当夹杂物与吸附杆表面发生碰撞,回弹系数、夹杂物初速度相同时,不同尺寸夹杂物与壁面碰撞,夹杂物尺寸越小,最大压缩距离越小,回弹距离也越小,夹杂物越易碰撞吸附在壁面,所以在钢液中 $<5\ \mu\text{m}$ 的夹杂物数量明显减少,且钢液边部夹杂物会向钢液中部运动,试验后试样边部夹杂物含量小于试样中部。

钛脱氧后钢液中夹杂物的数量明显大于单独利用铝做脱氧剂钢液中夹杂物的数量,主要是因为钛与钢液中的氧反应生成了大量的 TiO_x 夹杂物,数目多,尺寸小。钢液中夹杂物经吸附杆吸附后,试样中

夹杂物个数减少,面积比率降低,且钢液中 $<5\ \mu\text{m}$ 的夹杂物个数减少最明显。

利用镁钙质吸附杆进行夹杂物吸附试验后,钢液中夹杂物面积比率减小较大,因为脱氧后钢液中夹杂物含有少量 Al_2O_3 、 MnS 、 SiO_2 等较大尺寸夹杂物,而镁钙质耐火材料中的游离态的 CaO 可以吸收钢液中 Al_2O_3 、 SiO_2 和 S 等杂质。

4 结论

1) 钛脱氧方式下,钛与钢液中游离氧反应生成大量 TiO_x ,内生夹杂物远高于铝脱氧方式钢液。

2) 镁钙质吸附杆吸附试验后,两种脱氧方式夹杂物数量减少比例基本相同,钛脱氧方式下夹杂物面积减少比例降低,说明钛脱氧方式下,夹杂物比表面积大。吸附杆对不同脱氧方式不会改变夹杂物吸附比例。钛脱氧方式下钢液内生夹杂数量多,经吸附杆吸附后,钢液中仍有大量夹杂物存在。因此采用吸附杆去除夹杂时,要选择生成内生夹杂物少的脱氧方式。

参考文献

- [1] Kang Y, Thunman M, Sichen D, et al. Aluminum deoxidation equilibrium of molten iron-aluminum alloy with wide aluminum composition range at 1873 K [J]. ISIJ International, 2010, 49(10): 1483-1489.
- [2] Gaye H, Rocabois P, Lehmann J, et al. Kinetics of inclusion precipitation during steel solidification [J]. Steel Research, 1999, 70(8): 356-361.
- [3] Ma Z, Janke D. Characteristics of oxide precipitation and growth during solidification of deoxidized steel [J]. ISIJ International, 1998, 38(1): 46-52.
- [4] Lin D S, Lin J Y, Bo G Z, et al. Precipitation behavior of inclusion-induced intra-granular ferrite in Ti-deoxidized VN microalloyed steel [J]. Journal of University of Science & Technology Beijing, 2010, 32(5): 574-580.
- [5] Tao Shaoping, Zhong Xiangchong. Effect of MgO -based and Al_2O_3 -based refractories on inclusions in steel [J]. Iron and Steel, 2007, 42(5): 33-36.
(陶绍平, 钟香崇. MgO 基和 Al_2O_3 基耐火材料对钢中夹杂物的影响 [J]. 钢铁, 2007, 42(5): 33-36.)
- [6] Liu Da, Lei Hong. Discussion on the equilibrium thermodynamics of aluminum deoxidation in hot iron at 1873K [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2015, 14(12): 96-106.
(刘达, 雷洪. 关于1873K下铁液中铝脱氧平衡热力学的讨论 [J]. 材料与冶金学报, 2015, 14(12): 96-106.)
- [7] Liu Da, Lei Hong, Wang Tianlong, et al. Thermodynamic analysis of the deoxidization equilibrium of titanium in liquid steel at 1873 K [J]. Industrial Heating, 2015, 44(2): 45-47.
(刘达, 雷洪, 王天龙, 等. 1873 K下钢液中钛脱氧平衡的热力学分析 [J]. 工业加热, 2015, 44(2): 45-47.)
- [8] Kusuhiro Mukai, Xie De. Effect of refractory properties on adhesion of continuous casting immersion nozzle inclusions and adhesion model of inclusions [J]. Modern Metallurgy: Inner Mongolia, 2000(3): 51-57.
(向井楠宏, 谢德. 耐火材料性质对连铸浸入式水口夹杂物粘附的影响及夹杂物粘附模型的研究 [J]. 现代冶金(内蒙古), 2000(3): 51-57.)