

## X80 管线钢夹杂物控制工艺的研究

蒋育翔<sup>1,2</sup> 焦兴利<sup>2</sup>

(1 北京科技大学经济管理学院, 北京 100083; 2 马钢股份有限公司, 马鞍山 243000)

**摘要** X80 微合金化管线钢冶炼的工艺流程为 300 t 顶底复吹转炉-钢包吹氩微合金化-LF-RH。通过转炉气动挡渣法控制出钢下渣量  $\leq 4$  kg/t; 钢包顶底吹氩搅拌 6 min 铝粒脱氧; 控制 LF 顶渣  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.7 \sim 1.9$ , 碱度  $(\text{CaO}/\text{SiO}_2) = 4.5 \sim 6$ ,  $(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1.0\%$ ; RH 喂 FeCa 线 0.8 kg/t, 使  $T[\text{O}]$  达到  $13 \times 10^{-6}$ , 夹杂物尺寸  $\leq 10 \mu\text{m}$ ,  $\leq 5 \mu\text{m}$  夹杂物占 98.93%, 钢中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  尖晶石夹杂物转变为  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$  系三元夹杂。分析了冶炼过程夹杂物数量、尺寸形态和组成, 得出管线钢夹杂物变性的规律。

**关键词** 管线钢 转炉-钢包吹氩-LF-RH 工艺 夹杂物控制

## A Study on Process Control of Inclusion in Pipeline Steel X80

Jiang Yuxiang<sup>1,2</sup> and Jiao Xingli<sup>2</sup>

(1 School of Economics and Management, University of Science and Technology, Beijing 100083;  
2 Ma'anshan Iron and Steel Co Ltd, Ma'anshan 243000)

**Abstract** The process flow sheet to melt microalloying pipe line steel X80 is 300 t top and bottom combined blowing converter-ladle argon blowing and microalloying-LF-RH. With converter gas-dynamic slag stopper to control tapping slag amount  $\leq 4$  kg/t; ladle top and bottom blowing argon blowing for 6 min with aluminium bullet shooting; controlling LF top slag  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.7 \sim 1.9$ , basicity of slag  $(\text{CaO}/\text{SiO}_2) = 4.5 \sim 6$  and  $(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1.0\%$ ; with feeding FeCa wire 0.8 kg/t during RH refining process, the  $T[\text{O}]$  is decreased to  $13 \times 10^{-6}$ , the inclusion size  $\leq 10 \mu\text{m}$  and the  $\leq 5 \mu\text{m}$  inclusions account for 98.93% of the total inclusions, and the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  spinel inclusions are modified to  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$  series ternary inclusions. The inclusion amount, size, morphology and ingredient of inclusions during melting process are analyzed to get the modification regulation of inclusions in pipe line steel.

**Material Index** Pipeline Steel, Converter-Ladle Argon Blowing-LF-RH Process, Control of Inclusion

管线钢中的塑性夹杂物和脆性夹杂物是产生 HIC(氢致裂纹)的主要根源,而 SCC(硫化物应力开裂)的形成与 HIC 密切相关。因此,必须尽量减少钢中的夹杂物,精确控制夹杂物的形态,才能提高抗 HIC 和抗 SCC 能力。通过对管线钢生产过程中的取样分析,讨论了管线钢中  $T[\text{O}]$  控制对夹杂物去除的重要性,并从几何尺寸和形态控制的角度分析了当前夹杂物的控制工艺<sup>[1]</sup>。

### 1 管线钢的脱氧和去除夹杂物工艺

管线钢(表 1)采用铝脱氧工艺,工艺流程为出钢铝粒脱氧→合金微调站铝粒脱氧→钢包进 LF 加热位前加铝粒脱氧→LF 加热过程加铝粒造渣。各工序铝粒加入量和 Als 控制见图 1。从图 1 可以看

出,铝粒加入量在出钢时为 2.5 kg/t,由于钢液脱氧未完成,钢中酸溶铝由出钢的 0.05% 下降至合金微调站的 0.03%。此后分别在合金微调站、进站和造渣过程中加入铝粒,加入量在 0.3 ~ 0.5 kg/t,保持进 LF 时 Als 在 0.05% 的水平,可保证 LF 出站时的酸溶铝维持在 0.03%,控制钢中活度氧在较低的水平。

管线钢去除夹杂<sup>[2]</sup>主要通过合金微调站、LF 精炼和 RH 精炼操作进行控制,具体控制工艺如下:

- (1) 300 t 转炉采用顶底复吹吹炼和采用气动挡渣法降低出钢下渣量,下渣量控制  $\leq 4$  kg/t。
- (2) 在合金微调站进行大气量顶底复吹氩气搅拌 6 min 以上,促进成渣和夹杂物上浮。
- (3) 控制 LF 顶渣  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.7 \sim 1.9$ ,

表 1 X80 管线钢产品成分要求 / %

Table 1 Requirement of chemical composition of pipeline steel X80 product / %

C	Mn	Si	P	S	Nb	V	Ti	Al	N	Cu	Cr	Mo	Ni	B	Pcm	CE <sub>II</sub> <sup>d</sup>
0.09	1.85	0.42	0.022	0.005	0.11	0.06	0.025	0.06	0.008	0.30	0.45	0.35	0.50	0.0005	0.23	0.43

注:1.  $V + \text{Ni} + \text{Ti} \leq 0.15\%$ ; 2. Pcm(焊接裂纹敏感性指数) =  $C + \text{Si}/30 + (\text{Mn} + \text{Cu} + \text{Cr})/20 + \text{Ni}/60 + \text{Mo}/15 + \text{V}/10 + 5\text{B}$ ;

3. CE<sub>II</sub><sup>d</sup>(碳当量) =  $C + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Cu} + \text{Ni})/15$

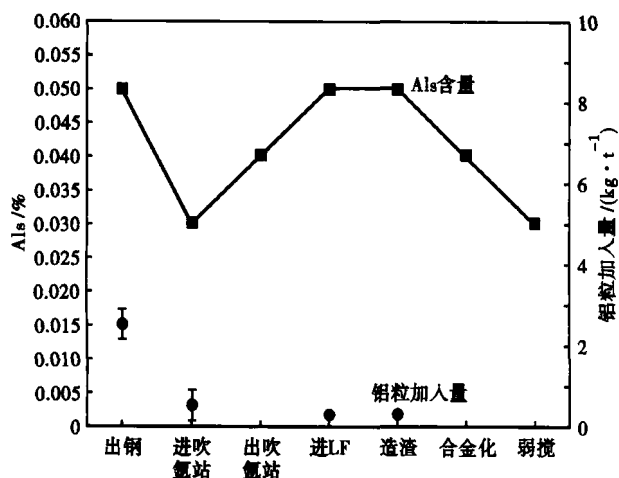


图1 管线钢铝脱氧工艺图

Fig. 1 Diagram of aluminum-deoxidizing for pipeline steel

$\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 4.5 \sim 6$ ,  $(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1.0\%$ 。

(4) 调整 LF 精炼过程的吹氩量的大小, 保证弱搅拌时间。

(5) 提高 RH 净循环时间, 控制净循环时间大于 12 min, 真空度低于 66.7 Pa, RH 后进行喂 FeCa 线对夹杂物进行变性, 喂线量 0.8 kg/t。

## 2 夹杂物分析

结合工艺流程, 本实验针对马钢连续生产的 8 炉

X80 管线钢进行了研究(夹杂物分析 5 炉, T[O] 分析 8 炉), 在每炉的转炉出钢、出合金微调站后、LF 终点和 RH 终点的工艺节点进行取样, 实验包括以下内容:

(1) 用图象分析仪测定夹杂物数量和尺寸; (2) 通过 SEM-EDS 观察和分析每个钢样的夹杂物的形貌和成分; (3) 全氧含量分析。

精炼过程中对不同工序环节(合金微调站进站、合金微调站出站、LF 出站和 RH 出站)用专门的取样器提取钢水(共取 8 炉), 取样后现场用水强冷<sup>[3]</sup>。

气体试样在所取钢样中取  $\Phi 5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的样棒, 采用红外吸收法(GB/T 11261-2006)测定钢中 T[O]<sup>[2]</sup>。

### 2.1 全氧和夹杂物总量的分析

各工位钢中 T[O] 平均值的变化如图 2(a) 所示, 吹氩前钢中 T[O] 平均值 0.007 2%, 到吹氩后降低到 0.005 5%, 经过精炼处理后降到了 0.002 5%, RH 真空处理过程中钢中 T[O] 继续降低, RH 终点时钢水中 T[O] 平均为 0.001 3%。

图 2(b) 是各工艺阶段夹杂物的总量变化。其变化趋势与全氧的变化趋相同。从转炉出钢后到 LF 阶段由于夹杂在不断的聚集和去除, 因此数量减

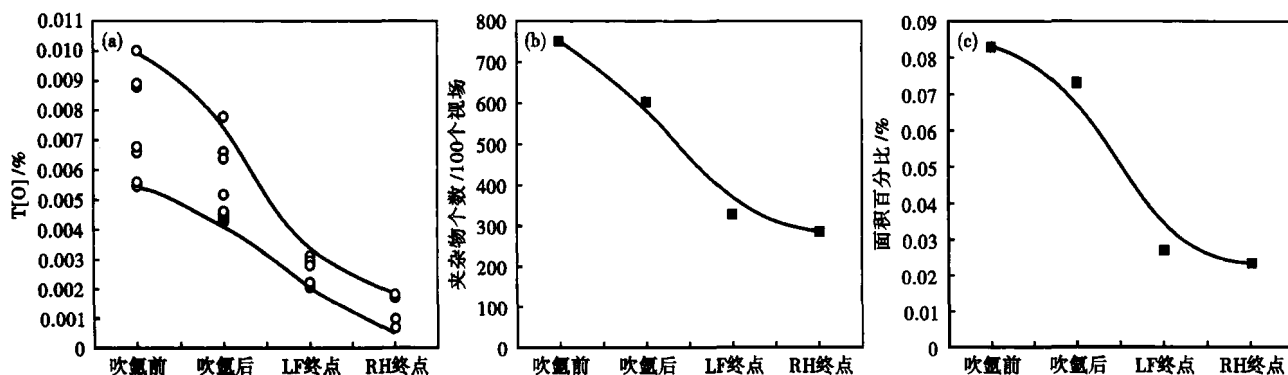


图2 各工位管线钢 T[O] (a)、夹杂物总量(b)和夹杂物面积百分比(c)的变化

Fig. 2 Change of T[O] (a), total amount of inclusions (b) and percentage of area of inclusions (c) in pipeline steel in each steel-making stage

少较快, 至 RH 虽然趋势减缓, 但弱搅拌操作仍保证了夹杂数量从 LF 出站的 327 个(100 个视场中夹杂物个数)减少到 RH 终点的 286 个。

考虑到在吹氩及夹杂物上浮的过程中, 相对小的夹杂物会聚集起来, 因此夹杂物大小不同, 单从夹杂物数量看只代表一个方面。根据各工位钢水夹杂物含量参数, 可作出钢水夹杂物面积百分比演变图(图 2c)。

从图 2(c) 可以看出, 夹杂物面积百分比总体是

呈逐步下降的趋势。吹氩前夹杂物面积百分比比较高为 0.083%; 经过大流量吹氩后, 部分较大尺寸夹杂得到去除, 但是大部分已聚集长大的中等尺寸夹杂仍未去除, 因此夹杂物面积百分比下降不明显, 降到了 0.073%; 经过 LF 精炼, 夹杂物去除明显, 降到了 0.027%。经过 RH 弱搅拌操作, 进一步下降到 0.023%。

从夹杂的数量和面积总趋势看, 与全氧的变化趋势基本一致, 因此结合降低钢中全氧的操作来提

高夹杂的控制水平至关重要。

## 2.2 钢中夹杂物的尺寸控制变化

表 2 为不同取样阶段夹杂物的尺寸分布和数量(每个阶段是 5 个试样的平均值)。吹氩前钢中夹杂物 95.14% 小于 5  $\mu\text{m}$ , 波动范围为 91.2% ~ 98.2%。转炉出钢后进行了吹氩操作, 由于吹氩过

程有较强的脱除夹杂物能力, 大型簇状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂已经基本去除; 小于 5  $\mu\text{m}$  的数量减少到 574 个, 所占比例为 94.6%, 波动范围减小至 93.4% ~ 97.5%。同时大于 5  $\mu\text{m}$  的夹杂数量变化不大, 比例仍在 5% 左右。比例变化不大是因为小于 5  $\mu\text{m}$  的尺寸增大, 而大于 5  $\mu\text{m}$  的继续长大聚合或聚合

表 2 各阶段管线钢夹杂物的尺寸和数量  
Table 2 Size and amount of inclusions in pipeline steel in each steelmaking stage

工位	数量/个				合计	夹杂物最大尺寸/ $\mu\text{m}$	比例/%			
	<5 $\mu\text{m}$	5~10 $\mu\text{m}$	10~20 $\mu\text{m}$	>20 $\mu\text{m}$			<5 $\mu\text{m}$	5~10 $\mu\text{m}$	10~20 $\mu\text{m}$	>20 $\mu\text{m}$
吹氩前	716	31.8	0.8	0	748.6	11.4	95.14	4.73	0.13	0
吹氩后	573.6	28.4	0.8	0	602.8	10.6	94.6	5.26	0.14	0
LF 结束	318.8	6.4	1.8	0.2	327.2	21.9	97.47	1.94	0.55	0.04
RH 结束	281.6	4.2	0.4	0	286.2	11.2	98.44	1.44	0.12	0

上浮, 所以本工位主要是数量有大的变化。

LF 精炼后, 小于 5  $\mu\text{m}$  的夹杂数量下降到 319 个, 10  $\mu\text{m}$  以上的大颗粒夹杂基本去除, 吹氩卷入的炉渣带进了少量大于 20  $\mu\text{m}$  的夹杂。小于 5  $\mu\text{m}$  的所占比例进一步升高到 97.5%, 波动范围为 96.5% ~ 98.2%; 大于 5  $\mu\text{m}$  的比例减小到 2.5%。本阶段处理时间较长, 去除夹杂效果明显, 不但数量降低很大, 而且大夹杂大量去除, 小夹杂比例升高。

RH 也是去除夹杂的重要工艺阶段, 这个工位进行了喂钙线和弱搅拌的操作, 5~10  $\mu\text{m}$  的夹杂继续减少, 大颗粒夹杂全部去除。从表 2 中可看出, 小于 5  $\mu\text{m}$  的所占比例升高到了 98.44%, 波动范围缩小为 97.6% ~ 99.3%。说明小于 5  $\mu\text{m}$  的夹杂物所占总夹杂物的比例不断升高, 且波动范围逐渐变小。大于 5  $\mu\text{m}$  的比例减小到 1.6%。

至上连铸前, 大于 5  $\mu\text{m}$  的夹杂物已基本去除, 夹杂物总量也降低到较低的水平。整个工艺阶段中, 越到后期, 夹杂的控制精度越高。说明马钢生产 X80 管线钢时, 对夹杂物的控制取得了较为理想的效果。

## 2.3 钢种夹杂物形态控制

表 3 是不同阶段夹杂物的主要化学成分, 可以看出, 在整个精炼过程中, 夹杂物中的各组分变化趋势不同。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  逐渐减少, 由吹氩前的 99.5% 降到

表 3 各阶段管线钢中夹杂物的主要成分 / %  
Table 3 Main ingredient of inclusions in pipeline steel in each steelmaking stage / %

工位	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO
吹氩前	0.41	99.5	0.09
吹氩后	17.15	78.15	4.79
LF 结束	16.11	64.5	19.39
RH 结束	5.49	54.28	40.23

RH 出站后的 54.28%。 $\text{CaO}$  开始只有 0.09%, 后逐渐增多, 到 RH 终点增至 40.23%。 $\text{MgO}$  从吹氩前的 0.41% 迅速增加到吹氩后的 17.15%, 之后开始随着  $\text{CaO}$  含量的增多逐渐减少, 最终减到 5.49%。

图 3(a) 是夹杂物平均成分的变化趋势图, 图 3(b) 是夹杂物成分在相图中的变化过程, 图 4 是各阶段典型的夹杂物形貌, 可以看出:

(1) 吹氩前阶段, 转炉出钢采用大量的铝进行脱氧, 钢中夹杂物大部分都是大小不同的颗粒状  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 有明显的棱角, 且发现簇群状的大型  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂, 极少数夹杂物含有少量  $\text{MgO}$ , 大部分尺寸大于 5  $\mu\text{m}$ 。从图 3(b) 相图上看, 夹杂物在  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$  三元系中处于刚玉区。

(2) 吹氩后, 转炉出钢后合金微调站进行了吹氩操作, 由于吹氩过程有较强的脱除夹杂物能力, 大型簇状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂已经基本去除。由于聚合作用, 5~10  $\mu\text{m}$  的夹杂开始增多。由于经过吹氩搅拌, 加入的渣料已经成渣, 夹杂中的氧化镁增多,  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  复合夹杂增多。从图 3(b) 相图上看, 在  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$  三元系中进入尖晶石区, 熔点大约为 2000  $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) LF 终点, 经过 LF 的精炼, 小于 5  $\mu\text{m}$  的夹杂数量下降, 10  $\mu\text{m}$  以上的大颗粒夹杂基本去除。钢中夹杂物大量转变为  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$  复合夹杂, 多为球形或类球形的夹杂物。夹杂物中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量降低到 64.50%。从图 3(b) 相图上看, 夹杂物仍在  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$  三元系中尖晶石区, 已靠近低熔点区, 熔点降到约 1800  $^{\circ}\text{C}$ 。

(4) RH 终点, 在 RH 进行了喂钙线和弱搅拌的操作, 5~10  $\mu\text{m}$  的夹杂继续减少。钙处理后为保证

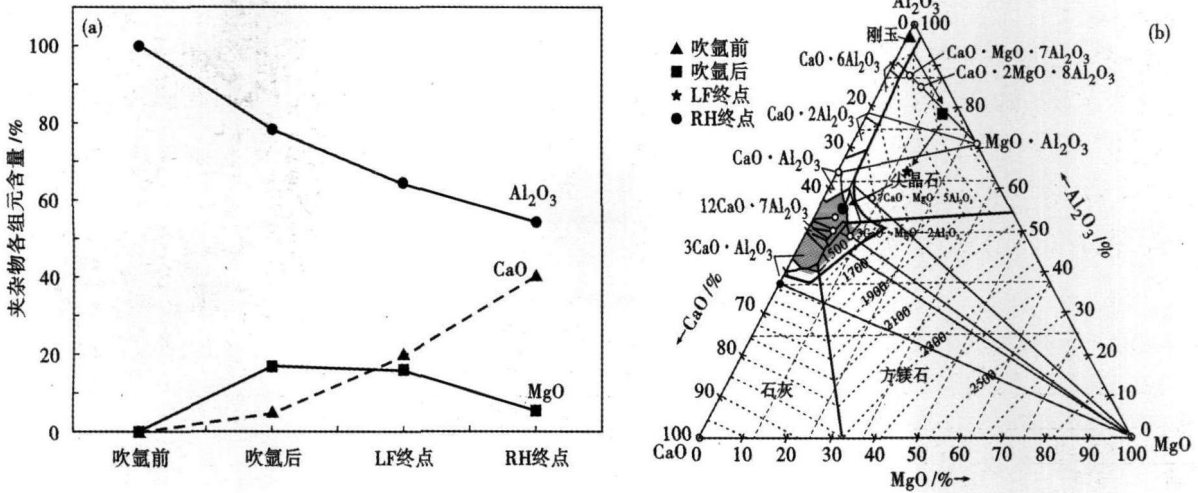


图3 管线钢中夹杂物成分的变化过程:(a)各组元含量;(b)相图中的位置

Fig. 3 Change process of ingredient of inclusions in pipeline steel in each steelmaking stage: (a) content of each ingredient; (b) location in phase diagram

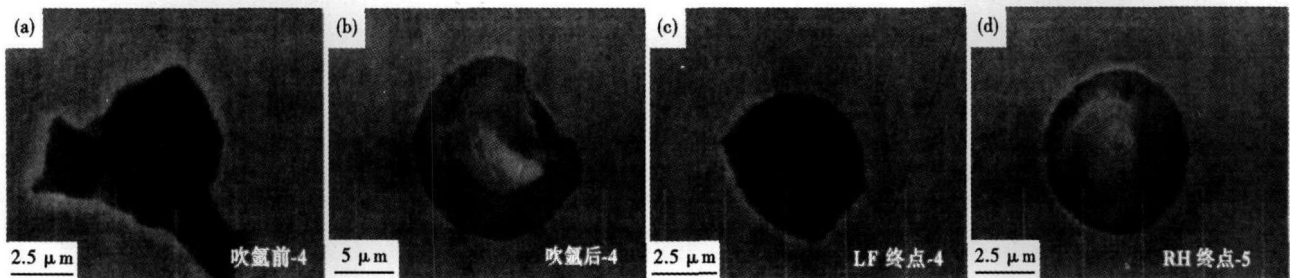


图4 各阶段管线钢中典型夹杂物形貌, SEM

Fig. 4 Morphology of inclusion in pipeline steel in each steelmaking stage, SEM

成分的均匀和夹杂物的上浮,必须保证一定的软吹时间。从图3(b)相图上看,夹杂物成分更加集中,进入了CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>三元系中低熔点区,熔点降到约1500℃。从SEM照片上可看出钢中夹杂物尺寸更小,都是球形或类球形的夹杂物。

图3(b)是整个生产过程夹杂物平均成分在CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>三元系的变化过程,可看到夹杂物从吹氩前-吹氩后-LF终点-RH终点,经历了Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>→MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>→CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的转变过程,熔点逐步降低,而且夹杂物成分越来越稳定。

### 3 结论

(1)为了减轻夹杂物对管线钢质量的危害,首先对夹杂物总量进行严格控制:采用铝强脱氧工艺使出钢脱氧后T[O]降到0.0072%,吹氩后进一步降低到0.0055%。通过LF精炼降至0.0025%,RH处理后达到0.0013%。随着T[O]降低钢中夹杂物个数和所占面积比例均大幅度降低。

(2)严格控制钢中夹杂物尺寸,RH精炼后钢中基本消除大于10μm的夹杂物,5~10μm的夹杂物仅占0.98%,小于5μm夹杂物达到98.93%。严格

控制夹杂物尺寸可大幅度减轻夹杂物对钢材性能的危害。

(3)通过精炼实现氧化物夹杂的变性处理,研究发现管线钢精炼过程中夹杂物形态的变化规律是:铝脱氧后生成大量Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,在合金微网站处理中基本转变为MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系尖晶石夹杂物。LF精炼后大部分尖晶石夹杂转变为CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系三元夹杂(夹杂物中CaO含量平均为19.39%)。经RH喂线后夹杂物中CaO含量大幅上升,MgO含量降低,使夹杂物成分进入低熔点区,达到变性效果。

### 参考文献

- 1 刘建华,包燕平. 高级别管线钢精炼工艺分析. 北京科技大学学报,2007,20(8):56
- 2 Atkinson H V, Shi G. Characterization of Inclusion in the Steel: Review Including the Statistics of Extreme Method Progress. Material Science, 2002, 43(48):463
- 3 GB10561-1989 钢中非金属夹杂物显微评定方法

蒋育翔(1968-),男,博士,高级工程师,1990年安徽工业大学毕业,洁净钢工艺研究。

收稿日期:2010-09-17