

· 工艺技术 ·

## 25Mn 钢 $\Phi 185$ mm $\times$ 13 mm 冷拔管内表面麻点状缺陷的 分析和控制工艺

邓明明<sup>1</sup> 彭其春<sup>1</sup> 肖云清<sup>1</sup> 彭自胜<sup>2</sup> 肖鸿光<sup>2</sup> 范其良<sup>2</sup>

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 华菱集团衡阳钢管(集团)有限公司, 衡阳 421001)

**摘要** 25Mn 钢( $\% : 0.24\text{C}, 0.25\text{Si}, 0.87\text{Mn}, 0.016\text{P}, 0.011\text{S}$ )冷拔管的生产流程为铁水预处理-90 t EAF-LF-VD- $\Phi 250$  mm 圆坯 HCC-穿孔-热轧至  $\Phi 197$  mm  $\times$  17 mm 管-冷拔至  $\Phi 185$  mm  $\times$  13 mm 管。采用光学、扫描电子显微镜、能谱仪和电子探针分析了 25Mn 钢冷拔管内表面麻点状缺陷。结果表明,麻点状缺陷呈翘皮状和凹坑状,翘皮状缺陷成因是  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO})$  复合夹杂与钢基体变形量不一,凹坑状缺陷成因是  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MnS}-\text{CaS}$  复合夹杂聚集长大后磨削加工过程中脱落。通过将原铝脱氧精炼工艺优化成硅钙合金脱氧工艺,使精炼渣碱度由原 6.76 降至 2.26,精炼渣中  $(\text{MgO})$  由原 5.33% 提高至 7.23%,  $(\text{Al}_2\text{O}_3)$  由 26.05% 降低至 12.76%,使钢中的硬脆性夹杂转变为延展性优良的硅酸盐类夹杂,消除了 25Mn 钢冷拔管内表面麻点状缺陷。

**关键词** 25Mn 钢  $\Phi 185$  mm  $\times$  13 mm 冷拔管 麻点状缺陷 复合夹杂 硅钙线脱氧 精炼渣碱度

### Analysis on Mottled Spots Defect of Internal Surface of $\Phi 185$ mm $\times$ 13 mm Cold-Drawn Tube of Steel 25Mn

Deng Mingming<sup>1</sup>, Peng Qichun<sup>1</sup>, Xiao Yunqing<sup>1</sup>, Peng Zisheng<sup>2</sup>, Xiao Hongguang<sup>2</sup> and Fan Qiliang<sup>2</sup>  
(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Hengyang Steel Tube Co Ltd, Hualing Group, 421001)

**Abstract** The production flowsheet for cold-drawn tube of steel 25Mn ( $\% : 0.24\text{C}, 0.25\text{Si}, 0.87\text{Mn}, 0.016\text{P}, 0.011\text{S}$ ) is hot-metal pretreatment-90 t EAF-LF-VD- $\Phi 250$  mm round bloom HCC-piercing-hot rolling to  $\Phi 197$  mm  $\times$  17 mm tube-cold rolling to  $\Phi 185$  mm  $\times$  13 mm tube. The mottled spots defect of internal surface of steel 25Mn cold-drawn tube is analyzed by using optical microscope, scanning electron microscope (SEM), energy spectrum meter and electron probe analyzer. Results show that the mottled spots defect is warped skin and concave pitting; the warped skin defect is caused by aggregated  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO})$  compound inclusions which deformation is different from base steel and the aggregated growing up of  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MnS}-\text{CaS}$  compound inclusions fall off in cutting process to form concave pitting. With optimizing the original aluminium deoxidizing process to silico-calcium alloy deoxidizing process, decreasing the refining slag basicity from original 6.76 to 2.26, increasing the refining slag  $(\text{MgO})$  from 5.33% to 7.23% and decreasing the  $(\text{Al}_2\text{O}_3)$  from 26.05% to 12.76% to modify the brittle inclusions in steel to silicate inclusions with better ductility, therefore the internal mottled spots defect of internal surface of steel 25Mn cold-drawn tube is eliminated.

**Material Index** Steel 25Mn,  $\Phi 185$  mm  $\times$  13 mm Cold-Drawn Tube, Mottled Spots Defect, Compound Inclusions, Deoxidizing by Silicon-Calcium Wire, Refining Slag Basicity

高精度冷拔管因其生产效率高、表面质量好、基体强度和材料利用率优良的特点,在煤矿井下支护、汽车、冶金、工程机械等行业有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。但在冷拔过程中高精度冷拔管内表面会产生较大的变形,由于坯料内的部分硬脆性夹杂物与钢基体的变形量无法做到协调统一,易形成表面裂纹、表面翘皮和表面凹坑等缺陷<sup>[2]</sup>,影响冷拔管的表面质量。钢管厂拟采用 25Mn 冷拔管生产液压缸缸筒,其内表面粗糙度要求控制在  $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ,故需严格控

制 25Mn 冷拔管的内表面质量,减少或消除表面缺陷的形成。但该钢管厂在 25Mn 冷拔管试生产过程中,内表面出现了麻点状缺陷,本文针对该缺陷进行试验分析,探讨了缺陷的形成原因并提出了工艺改进措施,改进后成功消除了 25Mn 冷拔管内表面的麻点状缺陷。

#### 1 25Mn 冷拔管生产工艺及缺陷微观形貌

钢管厂试生产 25Mn 冷拔管的炼钢工艺流程:

通讯作者:彭其春,教授,武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室,武汉 430081  
E-mail: pengqichun@163.com

铁水预处理→90 t 电弧炉冶炼(铝块脱氧)→LF 精炼(喂铝线二次脱氧,精炼时间为 30 min)→VD 真空脱气(真空度控制在 66.7 Pa 以下保持 10 min,然后软吹 15 min)→HCC 水平连铸机连铸;取铸坯样采用直读光谱仪分析其化学成分,如表 1 所示。由表 1 可知,铸坯的化学成分符合 GB/T699-1999 对 25Mn 钢的要求。

将直径为 250 mm 的圆铸坯穿孔并热轧成 197 mm × 17 mm(壁厚)的无缝钢管后再进行冷拔加工。冷拔加工流程:酸洗磷化皂化→冷拔[1 道次拔制至 185 mm × 13 mm(壁厚)]→去应力退火矫直→滚刮后切头去尾入库。在亮光下对冷拔管的内表面进行检验时,发现了 2 处十分细小的黑色麻点状缺陷,肉眼无法直接看清其具体形貌。横向切取(mm)15 × 10 × 10 的缺陷样,置于扫描电镜下进一步放大观察,其微观形貌分别呈翘皮状和凹坑状,如图 1(a, b)所示。图 1(a)中翘皮状缺陷面积约为 1.5 mm<sup>2</sup>,周围十分平整;图 1(b)中凹坑状缺陷面积约为 0.1 mm<sup>2</sup>,凹坑边缘有明显的机械擦伤痕迹,存在沿轧向分布的表面沟槽。

2 缺陷分析

2.1 翘皮状缺陷分析

在翘皮状缺陷处纵向截取 (mm)15 × 10 × 10 的金相样,粗磨精磨抛光后置于 100 倍的金相显微镜下观察其截面金相形貌,如图 2(a)所示。然后将该金相样腐蚀后置于 100 倍的金相显微镜下,观察缺陷周围的金相组织,如图 2(b)所示。图 2(a)显示翘皮状缺陷纵截面呈长条状,长度约为 250 μm,缺陷处存在夹杂物;图 2(b)显示缺陷处的周围金相组织无异常,为均匀细长的等轴铁素体和珠光体组织。

采用电子探针对缺陷位置进行波谱分析,得出钢中缺陷处夹杂物主要成分为 Mg、Al、Ca、O 和少量的 Si、S。Si、S 元素在缺陷处的分布量与周围正常组织中的分布量基本相同,在缺陷处未见明显的聚集;Al、Mg、O 元素在翘皮状缺陷方形长大处聚集十分明显,聚集处 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 的含量很高,推测为镁铝尖晶

表 1 25Mn 钢标准和铸坯的化学成分 / %  
Table 1 Chemical composition of standard and casting bloom of steel 25Mn / %

项目	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
国标	0.22 ~ 0.29	0.17 ~ 0.37	0.7 ~ 1.0	≤ 0.25	≤ 0.30	≤ 0.25	≤ 0.035	≤ 0.035
铸坯	0.24	0.25	0.87	0.04	0.02	0.05	0.016	0.011

石夹杂。由此可知,缺陷处的夹杂物为 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(MgO)系大型复合夹杂(镁铝尖晶石外层包裹着 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系夹杂),镁铝尖晶石属硬脆性的不变形夹杂物,CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系夹杂在常温固态下的变形量也较小,在轧制和冷拔过程中很难与钢基体的变形量保持一致,从而引发表面翘皮状缺陷。

由上述夹杂物成分推断复合夹杂形成机理,铝脱氧过程中生成的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂在精炼过程中与钢液中的 [Mg] 发生反应生成镁铝尖晶石,而钢液中的 [Ca] 又对镁铝尖晶石进行变性,钢液中的 [Mg]、[Ca] 主要来自于精炼渣中 MgO 和 CaO 在钢渣界面处的分解反应。由于镁铝尖晶石尺寸较大且钢液中的 [Ca] 含量不高,动力学驱动力不足,只有镁铝尖晶石的外层变性为了 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系夹杂。不完全变性反应生成的 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(MgO) 复合夹杂在炼钢

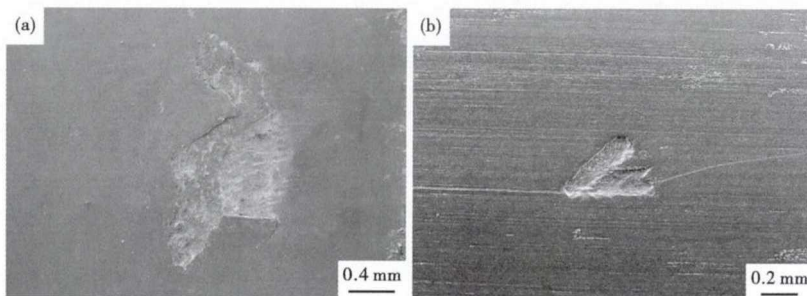


图 1 25Mn 钢 Φ185 mm × 13 mm 冷拔管内表面缺陷微观形貌:(a)翘皮;(b)凹坑  
Fig. 1 Micro-morphology of internal surface defect of steel 25Mn Φ185 mm × 13 mm cold-drawn tube: (a) warped skin; (b) concave pitting

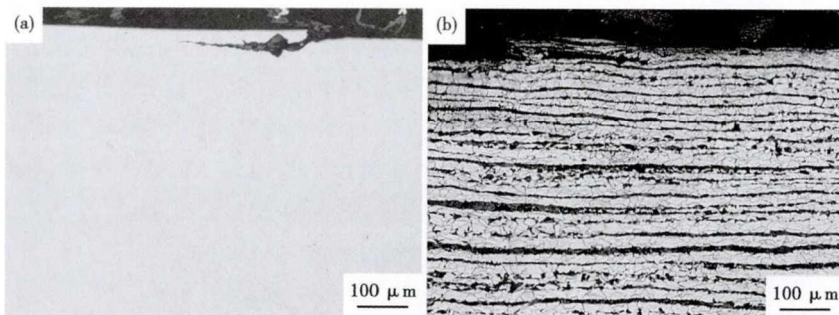
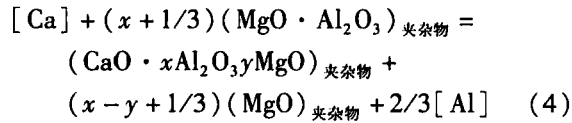
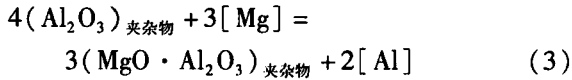
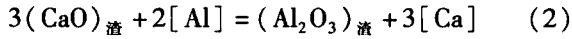
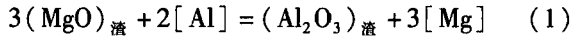


图 2 25Mn 钢 Φ185 mm × 13 mm 冷拔管翘皮缺陷部位截面夹杂物(a)和组织(b)形貌  
Fig. 2 Morphology of inclusion (a) and structure (b) at warped skin defect position of steel 25Mn Φ185 mm × 13 mm cold-drawn tube cross-section

温度下呈液态,易聚集长大,最终在铸坯凝固过程中生成了此类大尺寸的  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO})$  复合夹杂,在轧制和冷拔过程进一步沿轧向延展长大,严重影响了冷拔管的质量。精炼过程中,  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO})$  复合大型夹杂的生成反应式如(1)~(4)。



采用铝脱氧工艺,钢液中的  $[\text{Al}]$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂含量较高,在 LF 精炼过程中,有利于钢渣界面反应式(1)、(2)正向进行,使得钢液中的溶解镁钙含量上升,进而促进钢液夹杂物间的反应式(3)、(4)正向进行,生成  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO})$  复合夹杂。

## 2.2 凹坑状缺陷分析

对凹坑内多点进行能谱分析,未检测到异常元素;精密定位切割后沿凹坑处磨制金相抛光面,用光学金相显微镜观察,凹坑处仍然未见夹杂物残留,但在远离凹坑的次表面和基体内均有不同程度的夹杂物存在,采用扫描电镜观察夹杂物形貌和能谱分析见图3。由电镜图谱和能谱分析结果可知,夹杂物主要由  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnS}$ 、 $\text{CaS}$  和少量  $\text{MgO}$ 、 $\text{SiO}_2$  组成,图3(b)中单独存在的  $\text{MnS}$  夹杂呈细长条状,属 A 类易变形夹杂物,基本不会影响钢基体的冷拔变形;而图3(a,c)中以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为核心(电镜中颜色较深部分)外包  $\text{MnS}$  或  $\text{CaS}$ (电镜中颜色较浅部分)的 D 类不变形复合夹杂,分别呈角状和球状,不利于冷拔过程中钢材的变形。研究表明<sup>[3]</sup>,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂可以作为硫化物夹杂生成的异形核核心,生成此类复合

夹杂。根据以上观察分析,推测 25Mn 冷拔管内表面的此类凹坑状缺陷成因:钢液凝固过程中,在铸坯内壁近表层形成了局部夹杂物聚集,在内壁加工磨削过程中,暴露于表面并在轧制冷拔过程中脱落,最终形成此类凹坑状缺陷。

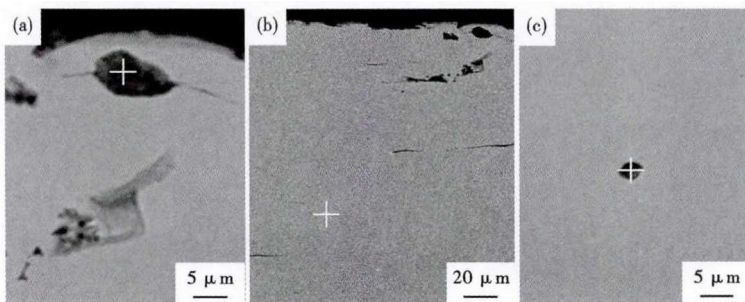
## 3 缺陷控制措施及效果

### 3.1 缺陷控制措施分析

翘皮状缺陷由大尺寸且不易变形的  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO})$  复合夹杂引起,凹坑状缺陷由  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MnS}-\text{CaS}$  复合夹杂的聚集脱落引起。针对上述两类夹杂物,钙处理是一种有效地解决办法,但铝脱氧钢精炼过程需高碱度的精炼渣,而钙处理会进一步提高渣碱度,使得渣流动性严重降低,对夹杂物的吸附能力变差,导致钙处理后聚集长大的液态  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  系大型夹杂不易上浮去除,会较多的残留在钢液中;虽然低熔点的  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  系夹杂在较高的轧制温度下,具有良好的变形能力,但钢材在常温冷拔过程中,固态的  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  系夹杂变形量很小<sup>[4]</sup>,会引发冷拔管内表面的翘皮状缺陷。故不能采用钙处理来控制麻点状缺陷的形成。

针对引发翘皮状缺陷的大尺寸  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO})$  复合夹杂,可通过抑制钢液中溶解钙与镁铝尖晶石间的不完全变性反应来控制,钢液中固态的镁铝尖晶石尺寸比液态的  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO})$  系复合夹杂小,冷凝后对钢基体的损伤较小。唐萍等<sup>[5]</sup>研究发现控制较低的精炼渣碱度,渣中较高的  $\text{MgO}$  含量( $>3\%$ )可使得钢液中的镁铝尖晶石保持稳定不发生转变。

对于  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MnS}-\text{CaS}$  系复合夹杂,可通过控制钢液中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂生成的方式去除。为减少钢中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂生成量,可采取硅钙合金脱氧取代铝脱氧工艺,硅钙合金脱氧主要生成  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  夹杂,钢



区域	原子百分数 /%							
	O	Mg	Al	S	Ca	Mn	Si	Fe
(a)	50.61	4.33	29.87	2.42	6.93	-	1.95	3.88
(b)	-	-	-	31.52	-	33.15	-	35.33
(c)	37.19	2.61	27.86	14.77	9.00	5.41	-	3.15

图3 25Mn 钢  $\Phi 185$  mm  $\times$  13 mm 冷拔管凹坑处次表面(a)(b)和基体中(c)的夹杂物形貌和成分(原子百分数)

Fig. 3 Morphology and composition (atomic percentage) of inclusions at subsurface at concave pitting (a) (b) and in matrix (c) of steel 25Mn  $\Phi 185$  mm  $\times$  13 mm cold-drawn tube

液中  $Al_2O_3$  夹杂主要来源于精炼渣中  $Al_2O_3$  在钢渣界面处的分解反应,分解出来的溶解铝进入钢液中并与钢液中的溶解氧结合。在  $CaO-Al_2O_3-SiO_2$  三元体系中,钙斜长石( $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ )与磷石英和硅灰石( $CaO \cdot SiO_2$ )相邻的周边低熔点区硅酸盐类(C类)夹杂具有高的延展性<sup>[6]</sup>,在拔制过程中,可随钢基体的变形而变形。要生成此区域内的硅酸盐类夹杂,需控制夹杂物中的  $Al_2O_3$  平均质量分数在 22% 以内,钢液中的 Al 质量分数在 0.000 5% 左右<sup>[7]</sup>,因此要降低精炼渣中的  $Al_2O_3$  含量。

以上分析表明,采取硅钙合金脱氧取代铝脱氧工艺和调整精炼渣成分(降低精炼渣碱度,调高渣中 MgO 含量降低渣中  $Al_2O_3$  含量),可有效防止钢液中  $CaO-Al_2O_3-(MgO)$  系复合夹杂和  $Al_2O_3-MnS-CaS$  系复合夹杂的生成,促进钢液中目标区域内高延展性的硅酸盐类夹杂生成。

### 3.2 工业试验效果

在钢管厂 25Mn 的生成流程上采取如下措施:硅钙合金脱氧取代铝脱氧,硅钙合金加入量为 3 kg/t<sub>钢</sub>;精炼渣成分调整如表 2 所示。针对工艺改进前后的铸坯样采用氧氮分析仪进行氧氮分析,其结果为:铝脱氧工艺下  $16 \times 10^{-6} O, 104 \times 10^{-6} N$ ;硅钙合金脱氧工艺下  $11 \times 10^{-6} O, 105 \times 10^{-6} N$ 。工艺改进后铸坯中的氧含量降低了  $5 \times 10^{-6}$ ,说明钢中

表 2 铝脱氧和硅钙脱氧的精炼渣成分和碱度

Table 2 Ingredient of refining slag of aluminium deoxidation and silicon-calcium deoxidation and basicity

脱氧剂	渣成分 / %						碱度 (R)
	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	TFe	
铝	8.64	58.37	5.33	26.05	0.855	0.665	6.76
硅钙合金	23.24	52.42	7.23	12.76	1.197	0.931	2.26

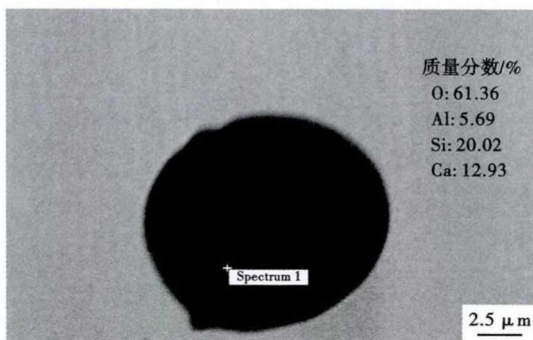


图 4 硅钙合金脱氧 25Mn 钢铸坯中的典型夹杂物形貌,SEM  
Fig. 4 Morphology of typical inclusion in casting bloom of steel 25Mn by silicon-calcium deoxidation, SEM

的夹杂物数量得到了进一步减少,钢材的洁净度得到了提高。

采用扫描电镜结合能谱仪对硅钙合金脱氧铸坯中的夹杂物类型进一步观察分析,结果如图 4 所示。电镜能谱结果表明,钢中夹杂物呈球形,其主要成分为 O、Al、Si、Ca,Al 含量很低,该夹杂物属目标区域内的易变形类硅酸盐夹杂。将硅钙合金脱氧工艺下的铸坯经后续冷拔加工后,管内表面在亮光下检验时麻点状缺陷消失。

### 4 结论

(1) 25Mn 冷拔管内表面麻点状缺陷微观形貌呈翘皮状和凹坑状。翘皮状缺陷由大尺寸的  $CaO-Al_2O_3-(MgO)$  系复合夹杂在冷拔过程中与钢基体的变形量不一致引起。凹坑状缺陷由  $Al_2O_3-MnS-CaS$  复合夹杂聚集后在加工磨削过程中的脱落引起。

(2)  $CaO-Al_2O_3-(MgO)$  系复合夹杂的生成为钢渣界面间的不完全钙处理反应。 $Al_2O_3-MnS-CaS$  系复合夹杂的生成为铝脱氧过程中的  $Al_2O_3$  作为硫化物夹杂的异质形核的核心,在钢液凝固过程中在钢基体近表层发生偏聚。

(3) 采取硅钙合金脱氧取代铝脱氧,降低精炼渣碱度,调高渣中 MgO 含量,降低渣中  $Al_2O_3$  含量,使钢中的夹杂物数量减小,并且夹杂物类型转变为高延展性的硅酸盐类夹杂,消除了 25Mn 冷拔管内表面的麻点状缺陷。

### 参考文献

- [1] 谢松,刘效春,项传宝.高精度冷拔钢管效益分析[J].煤矿机械,2003(11):85-87.
- [2] 刘叶.无缝钢管内表面翘皮解析[J].江苏技术师范学院学报(自然科学版),2009,15(1):46-48.
- [3] Oikawa K, Ohtani H, Ishida K, et al. The Control of the Morphology of MnS Inclusions in Steel during Solidification [J]. The Iron and Steel Institute of Japan, 1995, 35(4):402-408.
- [4] 张立峰.钢中非金属夹杂物几个需要深入研究的课题[J].炼钢,2016,32(4):1-16.
- [5] 李敬想,唐萍,潘银虎,等.精炼渣成分与轴承钢夹杂物类型关系热力学分析[J].工程科学学报,2016,38(1):195-200.
- [6] Bernard G, Ribound P V, Urbain G. Oxide Inclusions Plasticity [J]. La Revue de Metallurgie-CTT, 1981, 78(5):421-433.
- [7] 何肖飞,王新华,陈书浩,等.低碱度低氧化铝精炼渣对帘线钢夹杂物控制[J].钢铁,2014,49(6):30-36.

邓明明(1992-),男,硕士研究生,2015年武汉科技大学(本科)毕业,铸坯与轧材质量控制研究。

E-mail:1273554730@qq.com

收稿日期:2017-06-15