

· 组织和性能 ·

## 120 t BOF-LF-VD-CC 流程冶炼的 20CrMnTi 齿轮钢 氧含量和夹杂物特性

方宇荣 陈正权

(福建三钢闽光股份有限公司技术中心, 三明 365000)

**摘要** 采用全流程系统取样的方式,对 120 t BOF-LF-VD-CC 工艺生产 20CrMnTi 齿轮钢中氧含量和夹杂物特性的演变规律进行系统的分析和研究。实验结果表明,采用铝脱氧和高碱度 $[(CaO)/(SiO_2) = 3.8 \sim 7]$ 还原渣工艺,能使铸坯中  $T[O]$  低于  $20 \times 10^{-6}$ ;中间包钢水中平均  $T[O]$  增加  $6 \times 10^{-6}$ ;齿轮钢冶炼过程中,夹杂物完成了  $Al_2O_3 \rightarrow Al_2O_3-MgO \rightarrow Al_2O_3-CaO-MgO$  的转变。

**关键词** 120 t BOF-LF-VD-CC 流程 20CrMnTi 齿轮钢 氧含量 夹杂物

## Oxygen Content and Inclusion Characteristics of 20CrMnTi Gear Steel Produced by 120 t BOF-LF-VD-CC Process

Fang Yurong and Chen Zhengquan

(Technology Center, Fujian Sangang Minguang Co Ltd, Sanming 365000)

**Abstract** By the method of using a full-process system sampling, a systematic analysis and research on the evolution of the oxygen content and the inclusion characteristics in a 20CrMnTi gear steel produced in the process of 120 t BOF-LF-VD-CC have been carried out. The experimental results show that using the technology of aluminum deoxidation and the high-basicity  $[(CaO)/(SiO_2) = 3.8 \sim 7]$  reduction slag, the  $T[O]$  in the slab can be less than  $20 \times 10^{-6}$ ; the average  $T[O]$  of liquid in tundish gas increases by  $6 \times 10^{-6}$ ; during the steelmaking process of gear steel, the inclusions in steel have completed the transformation from  $Al_2O_3 \rightarrow Al_2O_3-MgO \rightarrow Al_2O_3-CaO-MgO$ .

**Material Index** 120 t BOF-LF-VD-CC Flowsheet, 20CrMnTi, Gear Steel, Content of Oxygen, Inclusions

齿轮钢是汽车、铁路、船舶、工程机械中使用特殊合金钢中要求较高的关键材料之一。20CrMnTi 齿轮钢作为一种用量最大、用途最广的低合金齿轮钢,主要用于生产各种应用的优质齿轮。

齿轮工作时,齿根受弯曲应力较大,容易造成齿根断裂,所以要求齿轮钢有较强的抗疲劳强度。基于此,生产高品质 20CrMnTi 齿轮钢时需要严格控制钢中  $T[O]$  和各类夹杂物,尤其是氧化物夹杂<sup>[1]</sup>。本文对齿轮钢冶炼过程中 Als 和炉渣的变化规律进行研究,并对  $T[O]$  和氧化物夹杂在冶炼过程的行为进行探讨。

### 1 生产工艺

采用 120 t BOF $\rightarrow$ LF $\rightarrow$ VD $\rightarrow$ CC 的工艺生产 20CrMnTi 齿轮钢,其化学成分见表 1。

转炉终点碳含量不低于 0.1%,出钢温度为 1 630 ~ 1 650 ℃。出钢过程加入 8 kg/t 石灰和 6 kg/t 的调渣剂,加入 2 kg/t 的 70% 含铝量的钢芯铝脱氧。LF 精炼采用白渣操作,白渣保持时间不低于 20 min,精

炼时间为 40 min,精炼过程中利用喂丝机喂入  $\Phi 13$  mm 铝线 100 m 和钙线 130 m。VD 真空处理 10 min,破空后软吹 28 min。连铸过程中,严禁钢包下渣,采用长水口防止钢水二次氧化,采用结晶器电磁搅拌和末端电磁搅拌技术,改善钢液质量。铸坯尺寸为  $\Phi 650$  mm,成材尺寸为  $\Phi 80$  mm。

### 2 实验方法

本次实验共进行 3 个炉次,每个炉次从 LF 进站,LF 出站,VD 破真空,软吹结束,中间包,铸坯至轧材提取钢样 7 个,渣样 3 个。从取得的吊桶样、铸坯样和轧材样上分别加工出 15 mm  $\times$  15 mm  $\times$  15 mm 的金相样和  $\Phi 5$  mm  $\times$  20 mm 的气体样,并对气体样和渣样进行化学成分分析,同时利用扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 功能对钢中夹杂物形貌、

表 1 20CrMnTi 齿轮钢化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of 20CrMnTi gear steel / %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ti	Als	Cu	O
0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.8 ~ 1.15	$\leq 0.035$	$\leq 0.035$	1.0 ~ 1.35	0.04 ~ 0.10	0.010	$\leq 0.2$	$\leq 0.0020$

类型和演变规律进行研究。

### 3 结果和分析

#### 3.1 精炼过程钢液 Al<sub>s</sub> 行为和炉渣成分

钢厂冶炼齿轮钢时,分别在转炉出钢和 LF 冶炼过程中分别加入 2 kg/t 的 70% 含铝量的钢芯铝和 Φ13 mm 铝线 100 m 进行脱氧。图 1 是钢中 Al<sub>s</sub> 变化情况,从图 1 中可以看出,LF 进站钢液 Al<sub>s</sub> 含量平均值为  $303 \times 10^{-6}$ ,LF 喂铝线后钢液 Al<sub>s</sub> 含量平均值为  $650 \times 10^{-6}$ 。有研究发现,钢液中 Al<sub>s</sub> 含量在 0.03% ~ 0.06% 时,可将钢中溶解氧降低到 0.0003% 左右,而且自由氧含量波动不大<sup>[2]</sup>。VD 过程中 Al<sub>s</sub> 损失  $184 \times 10^{-6}$ ,VD 真空结束,实验炉次中钢液 Al<sub>s</sub> 含量最低为  $350 \times 10^{-6}$ 。该冶炼工艺条件下,可以保证钢液 Al<sub>s</sub> 含量大于  $300 \times 10^{-6}$ ,可以有效控制钢液 T[O] 在较低的水平。

有研究发现,随着钢包渣中 (FeO + MnO) 的增加,钢中 T[O] 升高。同时有研究发现,预控制,钢中 T[O] 低于  $15 \times 10^{-6}$ ,炉渣 (FeO + MnO) 应当低于 1%<sup>[3]</sup>。表 2 是炉渣成分变化情况,从表 2 可以看出,炉渣中 (FeO + MnO)  $\leq 0.6\%$ ,炉渣氧化性较低,有利于控制钢中 T[O] 低于  $15 \times 10^{-6}$ 。炉渣 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 控制在 1.63 ~ 2.09。从表 2 中可以看出,炉渣碱度在 3.8 ~ 7.0,VD 破空后炉渣碱度在 5 ~ 7。

#### 3.2 钢中 T[O] 和 [N]

在讨论钢水纯净度时,钢中 T[O] 是首要关注的指标,钢中 T[O] 是溶解氧和化合态氧的总和<sup>[2]</sup>。有研究表明,氧化夹杂物中氧含量占 T[O] 的 70% ~ 80%<sup>[4-5]</sup>。

图 2 和图 3 是钢中 T[O] 和 [N] 的变化趋势图。从图 2 和图 3 中可以看出,LF-VD 精炼过程中,VD 软吹结束时氧含量最低,其平均值为  $18.6 \times 10^{-6}$ 。实验的 3 个炉次在 LF 精炼过程中均出现钢液 [N]

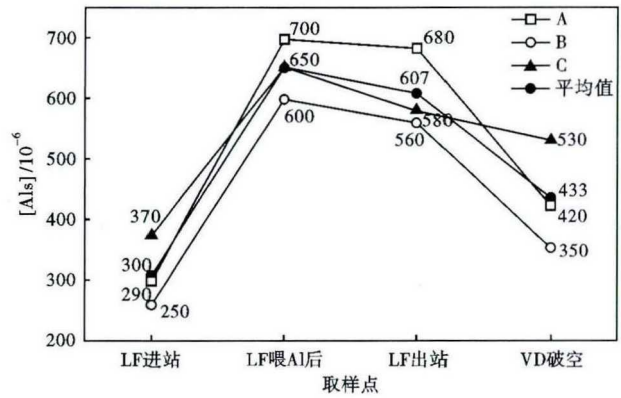


图 1 精炼过程 [Al<sub>s</sub>] 变化

Fig. 1 [Al<sub>s</sub>] change in steel during refining process

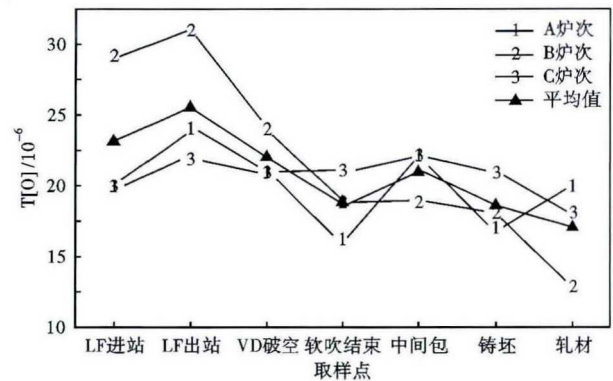


图 2 炼钢过程 T[O] 的变化

Fig. 2 Changes of T[O] during steelmaking process

升高的情况,[N] 平均值由 LF 进站的  $34.3 \times 10^{-6}$  升高为  $51 \times 10^{-6}$ ,升高 49%,同时发现钢液 T[O] 略有升高。这是由于 LF 加热过程中,电离空气中的氮和氧进入钢液造成的,说明存在钢液裸露吸气的情况。真空脱气后,钢液中的 T[O] 和 [N] 明显降低。破空后,在软吹的搅拌下夹杂物不断聚集长大上浮,最终被炉渣吸收离开钢液,此时 3 个炉次的平均 T[O] 达到最小值。

中间包时期钢液 [N] 平均值升高至  $78 \times 10^{-6}$ ,升高 77%,中间包时期增氮现象严重,说明存在负压吸气问题。钢液 T[O] 平均值升高  $6 \times 10^{-6}$ ,中间包吸气是制约钢液 T[O] 降低的关键原因。3 个实验炉次铸坯和轧材上钢中 T[O] 平均值为  $18.6 \times 10^{-6}$  和  $17 \times 10^{-6}$ ,且均低于

表 2 精炼渣组成  
Table 2 Ingredient of refining slag

炉次	取样点	精炼渣组成 / %							碱度 R (CaO)/(SiO <sub>2</sub> )	CaO/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	TiO <sub>2</sub>		
A	LF 进站	6.92	8.28	53.45	27.90	0.40	0.10	2.95	6.5	1.92
	LF 出站	6.93	8.28	53.04	28.28	0.43	0.07	2.96	6.4	1.88
	VD 破空	6.95	7.77	50.93	29.61	0.30	0.06	4.39	6.6	1.72
B	LF 进站	11.32	13.05	49.80	23.84	0.55	0.05	1.35	3.8	2.09
	LF 出站	11.21	10.70	49.30	26.03	0.44	0.13	2.20	4.6	1.89
	VD 破空	10.35	8.85	47.00	28.82	0.30	0.10	4.58	5.3	1.63
C	LF 进站	6.41	9.18	54.62	27.40	0.36	0.03	1.99	5.9	1.99
	LF 出站	7.32	7.70	53.56	28.74	0.35	0.10	2.23	7.0	1.86
	VD 破空	7.54	8.31	52.01	28.74	0.42	0.12	2.87	6.3	1.81

$20 \times 10^{-6}$ 。

### 3.3 冶炼过程中典型夹杂物

图 4 是齿轮钢冶炼过程中典型夹杂物形貌和成分信息。图 4(a) 是纯  $Al_2O_3$  夹杂物, 外包少量 MnS, 该类型夹杂物分布在 LF 进站阶段; 图 4(b) 是  $Al_2O_3$ -MgO, 外包少量 MnS, 该类型夹杂物中  $Al_2O_3$  含量较高, 主要分布在 LF 进站阶段; 图 4(c) 是  $Al_2O_3$ -CaO- MgO, 外包少量 CaS, 该类型夹杂物中  $Al_2O_3$  和 CaO 含量较高, 主要分布在 LF 出站至铸坯阶段; 图 4(d) 是  $Al_2O_3$ -CaO- MgO-CaS, 外包少量 MnS, 该类型夹杂物中 Ca 含量较高, 主要分布在软吹结束至轧材阶段; 图 4(e) 是  $Al_2O_3$ -CaO-CaS, 外包

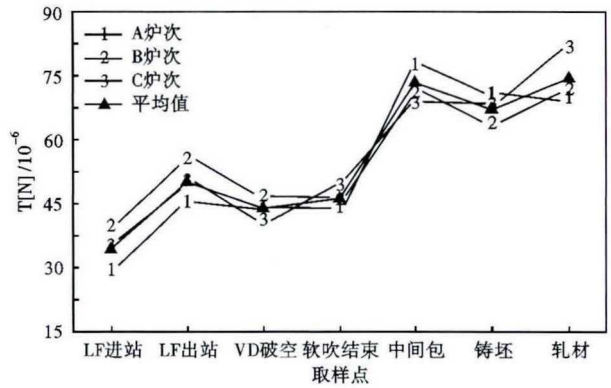
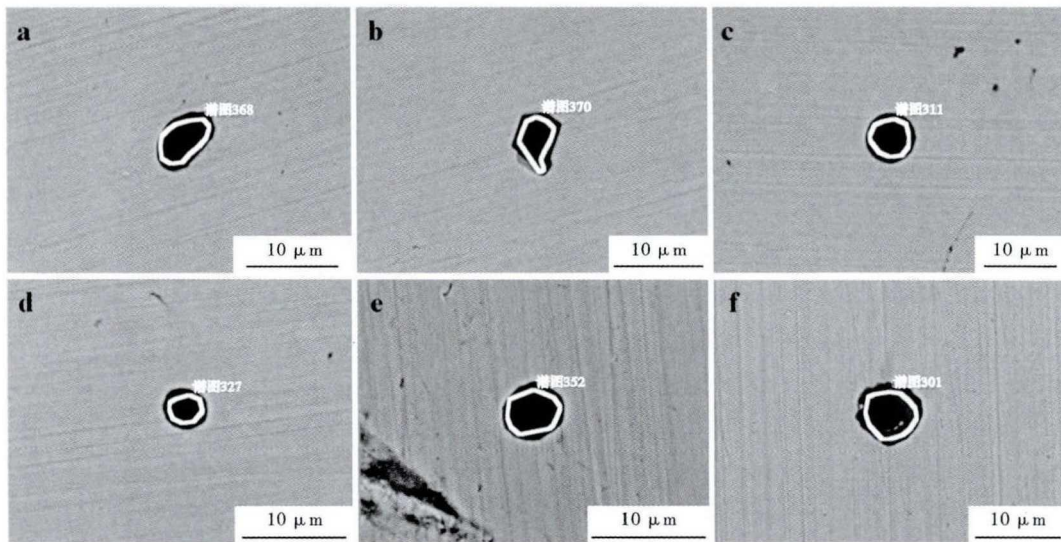


图 3 炼钢过程 T[N]的变化  
Fig. 3 Changes of T[N] during steelmaking process



图号	元素 /%					夹杂物类型及主要存在工序
	Mg	Al	Ca	Mn	S	
a	0	48.8	0	0.5	0.3	$Al_2O_3$ (外包少量MnS), LF进站
b	9.8	38.8	0	0.6	0.3	$Al_2O_3$ -MgO(外包少量MnS), LF进站
c	2.3	23.2	29.2	0	2.0	$Al_2O_3$ -CaO-MgO(外包少量CaS), LF出站至铸坯
d	3.1	11.9	29.3	0.5	17.2	$Al_2O_3$ -CaO-MgO-CaS(外包少量MnS), 软吹结束至轧材
e	0	10.5	29.2	0.4	17.4	$Al_2O_3$ -CaO-CaS(外包少量MnS), 软吹结束至轧材
f	4.8	25.8	10.2	6.05	11.0	$Al_2O_3$ -CaO-MgO-CaS-MnS, 轧材

图 4 炼钢过程 20CrMnTi 钢典型夹杂物形貌和成分  
Fig. 4 Morphology and composition of typical inclusions in 20CrMnTi steel during steelmaking process

少量 MnS, 该类型夹杂物主要分布在软吹结束至轧材阶段; 图 4(f) 是  $Al_2O_3$ -CaO- MgO-CaS-MnS, 该类型夹杂物分布在轧材阶段。

### 3.4 冶炼过程中夹杂物的演变

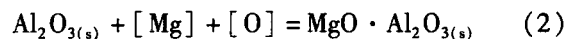
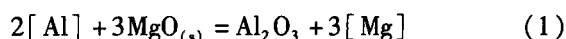
对在各个工序金相试样中非金属夹杂物进行能谱分析, 发现试样中夹杂物主要成分是钙、镁和铝元素的氧化物。因此将能谱分析得到的钙、镁和铝元素的原子质量分数换算成其对应氧化物质量分数, 并将对应氧化物表示在 CaO-MgO- $Al_2O_3$  三元相图

上, 如图 5 所示。

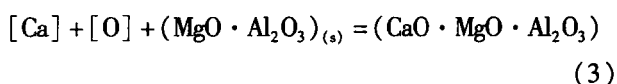
图 5 可以看出, LF 初期, 夹杂物中主要成分是  $Al_2O_3$ , 部分夹杂物为纯  $Al_2O_3$  夹杂, 这是钢液铝脱氧的结果, 此时的夹杂物形状不规则, 有较大尺寸夹杂物存在。LF 精炼结束时夹杂物中 CaO 和 MgO 含量升高, 其中 MgO 成分平均值为 23.35%, 这是由于钢液中发生了如式(1)~(3)所示的反应, 使夹杂物向  $Al_2O_3$ -CaO- MgO 夹杂物转变。

溶解铝与渣中中和耐火材料中的氧化镁发生反应

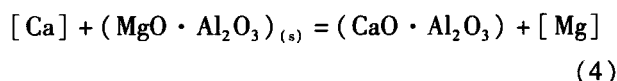
如下<sup>[6-7]</sup>:



钢液中钙含量达到一定程度时,会发生反应如下<sup>[8-9]</sup>:



VD 真空结束夹杂物中 MgO 含量平均值降低至 7.35%, CaO 含量平均值升高至 38.88%,这是由于钢液中连续发生了如式(4)所示的反应。



有研究发现, [Ca] 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -MgO 反应, 置换出部分 [Mg], 转化为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -CaO-MgO<sup>[10]</sup>。本实验钢液中夹杂物成分变化规律也证实该观点。随着冶炼的进行, 软吹结束时和中间包阶段夹杂物中 Ca 元素含量升高, 形成 CaS, 钢液中出现大量图 4(d, e) 类型夹杂物, 因此反应在 CaO-MgO- $\text{Al}_2\text{O}_3$  三元相图上, 软吹结束时和中间包阶段夹杂物中 CaO 含量降低。中间包阶段夹杂物中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量平均值由软吹结束时的 60.56% 上升至 64.60% 是由于钢液二次氧化引起的, 与前文中间包阶段钢液 T[O] 和 [N] 升高结论一致。铸坯中夹杂物成分平均值点为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (63.70%) - CaO (28.15%) - MgO (8.15%)。轧材中夹杂物硫元素含量较高, 与钙和锰元素结合形成

CaS 和 MnS。

#### 4 结论

(1) LF 进站钢液 Als 含量平均值为  $303 \times 10^{-6}$ , LF 喂铝线后钢液 Als 含量平均值为  $650 \times 10^{-6}$ 。VD 过程中 Als 损失  $184 \times 10^{-6}$ 。炉渣中  $(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 0.6\%$ , 炉渣氧化性较低。炉渣精炼过程中 CaO/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  控制在 1.63 ~ 1.92, 碱度在 3.8 ~ 7.0, VD 破空后炉渣碱度在 5 ~ 7。该工艺能使铸坯中 T[O] 低于  $20 \times 10^{-6}$ 。

(2) 3 个实验炉次 LF 和中间包阶段存在吸气情况, 中间包吸气情况严重, 中间包阶段 T[O] 平均值升高  $6 \times 10^{-6}$ , 夹杂物中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量平均值由软吹结束时的 60.56% 上升至 64.60%, 中间包吸气是制约钢液 T[O] 降低的关键原因。

(3) 齿轮钢冶炼过程中, 夹杂物完成了  $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$ -MgO  $\rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$ -CaO-MgO 的转变, VD 真空结束夹杂物中 MgO 含量降低, CaO 含量升高。随着冶炼的进行, 夹杂物中钙元素升高形成 CaS。轧材夹杂物中形成 CaS 和 MnS。

#### 参考文献

- [1] 高建伟, 刘军. 转炉生产齿轮钢氧化物夹杂控制的工艺优化[J]. 连铸, 2015, 40(3): 49-53.
- [2] 杨俊, 王新华, 王万军, 等. 超低氧车轮钢精炼过程非金属夹杂物的转变[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(07): 860-865 + 882.
- [3] 蒋晨旭, 岳峰, 刘建, 等. 90 t BOF-LF-VD 工艺冶炼 GCr15 轴承钢的氧化物夹杂变化行为[J]. 特殊钢, 2016, 37(1): 5-8.
- [4] 顾超. 高品质轴承钢疲劳寿命预测模型及夹杂物影响规律研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [5] 林路, 顾超, 包燕平, 等. 20CrMnTi 齿轮钢 LF 精炼渣优化[J]. 炼钢, 2017, 33(2): 15-19 + 27.
- [6] Guo J, Cheng S S and Cheng Z J. Mechanism of Non-Metallic Inclusion Formation and Modification and Their Deformation during Compact Strip Production (CSP) Process for Aluminum-Killed steel[J]. ISIJ International, 2013, 53(12): 2142-.
- [7] 陈秀娟, 郑少波, 洪新, 等. VD 炉内轴承钢中碳还原渣中 CaO 的热力学及影响因素分析[J]. 上海金属, 2005, 27(2): 26-33.
- [8] 董履仁, 刘新华. 钢中大型非金属夹杂物[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991: 46.
- [9] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 51.
- [10] 刘佳伟, 岳峰, 王子健. 100 t BOF-LF-RH-CC 流程冶炼 GCr15 轴承钢非金属夹杂的演变[J]. 特殊钢, 2017, 38(3): 61-65.

方宇荣(1978-), 男, 学士, 2001 年武汉科技大学(本科)毕业, 高级工程师, 炼钢技术、品种研发、钢中夹杂物的研究。E-mail: 455408379@qq.com

陈正权(1973-), 男, 高级工程师, 1997 年华东冶金学院(本科)毕业, 品种研发和钢中夹杂物的研究。

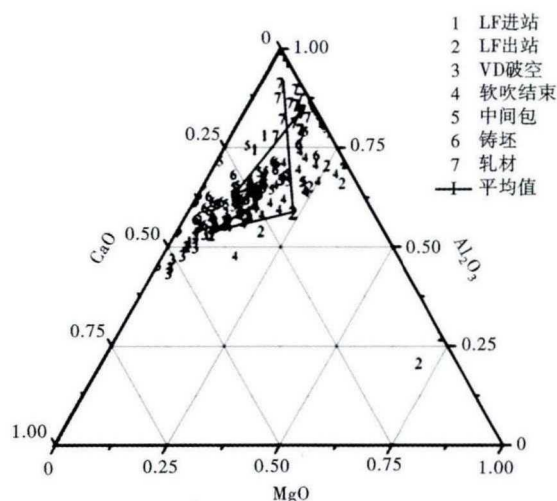


图5 冶炼过程 20CrMnTi 钢夹杂物演变相图

Fig.5 Phase diagram of evolution of inclusions in 20CrMnTi steel during smelting

收稿日期: 2020-05-15