

LFV 生产超低碳不锈钢真空处理 防喷溅工艺措施

吴灯鹏, 程新军

(东芝水电设备(杭州)有限公司, 浙江杭州 311504)

摘要: 在使用EAF(电弧炉)+LF(钢包精炼炉)+VOD(真空吹氧脱碳精炼炉)设备冶炼超低碳不锈钢的真空处理阶段, 钢液容易发生喷溅, 影响正常生产和设备运行, 甚至会引发安全事故。分析了钢液喷溅的成因, 提出可操控的工艺整改措施, 以降低钢液喷溅对真空处理过程的影响。

关键词: VOD; 精炼; 吹氧脱碳; 钢液喷溅

公司在投入LF+VOD精炼设备之后, 成功生产了大量超低碳不锈钢铸件($C \leq 0.03\%$), 材质主要为ZG04Cr13Ni5Mo。VOD设备结构如图1所示, 在VOD真空吹氧脱碳阶段, 极易发生钢液喷溅, 影响正常生产。其形式主要分为飞溅和喷溅两种^[1]。飞溅主要是由于底吹氩流量过大, 而钢包净空高度不够引起。表现为飞溅的钢液、炉渣凝固后粘附在钢包法兰口及VOD内包盖上。导致VOD处理结束后LF包盖和钢包法兰无法完全啮合, 只能静置钢液, 紧急清理钢包口渣液, 才能继续作业。喷溅主要是在高真空和底吹氩条件下, 瞬时生成的大量CO气体带动钢液液面急剧上升。一方面渣液大量粘附在包盖难以清理; 另一方面, 高温钢液对包盖耐材长时间热辐射使其强度降低, 耐材难以承受渣钢重量会大量剥落, 内包盖裸露部位容易熔穿。VOD处理过程中的钢液温度很高, 喷溅对钢包渣线部位的耐材的冲刷非常剧烈, 长时间会导致钢包熔穿, 造成漏包事故。这些情况都是重大的安全隐患。尽管VOD过程中的钢液喷溅无法完全避免, 但是可以通过改善工况条件、改变工艺参数以及加强生产流程管理来最大限度避免大沸腾的发生^[2]。

1 钢液喷溅的成因及危害

LFV生产超低碳不锈钢($C \leq 0.03\%$)工艺流程如图2所示。VOD设备参数如表1所示。根据多炉生产经验分析, 引起喷溅原因分为生产管理和生产工艺两方面, 可从炉前工况、工艺参数、操作方式去改善。钢液吊包扒全渣进入VOD进行真空处理, 当真空度达到设定值开始真空吹氧, 拉瓦尔氧枪的氧气射流在熔池渣钢界面向钢液渗透和溶解, 此时钢液中的C、Si、Cr、Mn、Fe均被氧化。其中Fe的氧化物FeO作为中间产物迅速被其他元素还原。直观表现则是吹氧前期气体分析仪显示的尾气浓度变化, 一般前5 min(时间视钢液量及进VOD前温度、成分、氧气流量等多个因素而定)O₂浓度从18%快速下降, CO、CO₂浓度几乎无变化。在高真空和氩氧混吹及较低温度下, 由氧势图可查的, 此时硅与氧的亲合力比碳大, 主要发生Si的氧化反应(见式(3)、(4))及部分Cr的氧化反应。Si的氧化放出大量的热使钢液升温。在此炉况下, 金属元素的氧化反应达到平衡, 开始发生高碳区的脱碳反应(见式(1)、(2)), 短时间内生成大量的CO气泡在底吹氩气和高真空度共同作用下, 带动钢液液面的急剧上升。这就是大沸腾(喷溅)产生的原因。具体化学反应过程

作者简介:

吴灯鹏(1992-), 男, 学士, 主要研究方向为铸钢件铸造工艺、LF+VOD冶炼工艺。
电话: 17681821018, E-mail: 2467178846@qq.com

中图分类号: TG232

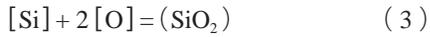
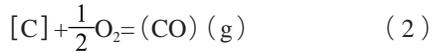
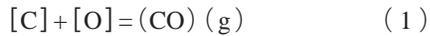
文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)05-0603-06

收稿日期:

2020-08-24 收到初稿,
2020-10-26 收到修订稿。

见式(1)-(4):



常见生产中钢液喷溅会造成以下危害:

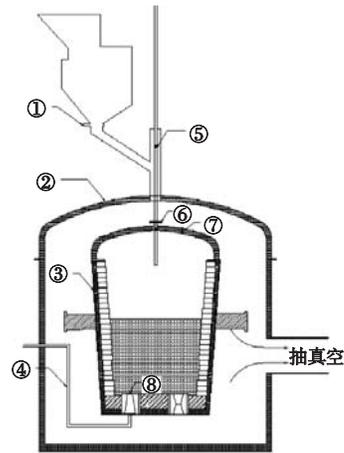
(1) 钢包的净空高度不够,大量CO气泡和底吹氩气使钢液产生飞溅。钢渣溅到钢包法兰,冷却凝固后粘结在上面,冷的渣钢难以清理,耗费人力物力;钢包移动至LF工位时,无法清理的钢渣导致钢包法兰和LF炉盖法兰面无法啮合,炉盖无法降至下限,因PLC程序互锁,无法继续作业。

(2) 进VOD炉前碳和硅的含量控制很关键,偏高或偏低都容易引起真空喷溅。钢液在VOD处理阶段升温主要热源便是来自C和Si的氧化。如果C和Si含量偏低,VOD吹氧脱碳温度偏低,由于高温有利于碳还原铬,“去碳保铬”的目的无法达到,铬损严重;钢液表面形成的富铬渣(Cr_2O_3 和 Cr_3O_4 富集到渣中)在VD(高真空碳脱氧,碳与氧结合能力进一步增强)阶段被碳还原生成大量CO气体引起大沸腾(喷溅)^[2]。若C和Si含量过高,氧化放热过多使钢液温度太高会加速包衬耐材损耗。无论是内包盖还是钢包,耐材在冶炼过程中大量损耗,容易导致包体熔穿。

(3) 如图4所示,在吹氧脱碳过程中,若钢液发

生大沸腾,氧枪里面通水冷却,若发生渗漏,后果严重。

(4) 如图1所示,钢包吹氩的透气砖是安装在距离钢包中心 $\frac{2}{3}$ 处的偏心位置,在VOD处理过程中,沸腾的钢液在底吹氩气和生成的CO搅拌下,形成对渣线部位耐材剧烈的冲刷,导致此处耐材损耗加剧(形成一条凹槽)。



1. 合金料斗 2. 真空罐盖 3. 钢包 4. 氩气管道 5. 氧枪
6. 氧枪耐热盖 7. 真空内包盖 8. 氩气透气砖

图1 VOD精炼炉结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of VOD refining furnace structure



图2 LFV冶炼工艺流程

Fig. 2 Smelting process of LFV

表1 VOD设备参数表
Table 1 VOD device parameters table

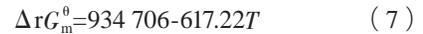
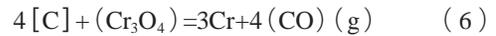
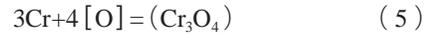
抽气能力/ ($kg \cdot h^{-1}$)	极限真空 度/Pa	氧枪流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	氧枪出口 马赫数/Ma	氧气压 力/MPa	氧枪最大 行程/mm	氧枪长 度/mm	氧枪冷 却方式	蒸气压 力/MPa	蒸气流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	氩气流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)
250	≤ 67	1 000	3	≥ 0.9	4 500	5 600	水冷	≥ 0.75	$\leq 10\ 000$	3~25

2 钢液防喷溅的工艺措施

(1) 进VOD炉前C、Si含量的控制。C、Si含量的控制要在LF调整合金成分阶段完成。从图3检测数据来看,吹氧开始CO、CO₂的尾气浓度曲线基本为零。吹氧初期,大部分氧气与硅反应对钢液进行化学升温,硅的放热是前期钢液升温的主要热源。接着CO气体浓度快速上升表明此时进入高碳区反应阶段,由于此阶段限制脱碳速率的因素是氧气的供给,罐体内O₂由18%左右降至0,由于反应产生气体量大于吹入气体,而真空泵抽气能力不变,真空度开始回升。当CO达到峰值(统计数据为50%~65%)开始下降,CO₂尾气浓度开始上升,则标志着进入低碳区真空吹氧脱碳阶段。此时限制脱碳速率的因素由O₂的供给变成钢液中C的传质速度。生产发生过(C+Si) > 1%,其中Si > 0.6%,VOD结束后钢液温度超过1 700 ℃,由于温度过高加上包衬损耗超标引起钢包熔穿。C、Si含量过低则会引起钢液升温不足,无法满足正常生产要求。根据目前积累的生产数据,控制(C+Si) < 0.7%,其中C < 0.4%,Si < 0.3%。Si可根据进炉温度适当调整,若进炉温度偏低,可适量增加Si的含量进行化学升温以弥补钢液温度不足。

(2) 进炉温度。如图2流程所示,由于精炼钢液需要深脱硫,钢包从LF工位运转到VOD前,需要扒全渣。扒渣过程中钢液温降很大,一般根据钢液量和扒渣时长进行预估,所以温控只能在扒渣前。进入VOD钢液温度过低,在初吹氧阶段钢液表面会形成一层流动性较差的富铬渣,渣中氧化铬(Cr₃O₄)的质量分数将远远高于通常的20%~30%^[2]。在底吹氩气不足以吹开渣面时,富铬渣将严重阻碍氧气射流与钢液充分接触,导致脱碳量和效率降低,氧气利用率低,吹氧时长增加;到了VD(一般真空度降到67 Pa以下进行碳脱氧)处理阶段,真空度的提高使P_{CO}降低,C与富铬渣发生反应,生成CO气泡比正常脱碳情况下多,容易发生大沸腾^[2]。生产中还有些不可控因素导致进炉温度偏低(如设备临时故障维修时间过长,透气砖部分堵塞导致钢液温度不均匀等),在吹氧初期高碳区脱氧阶段CO废气浓度偏低且持续时间偏长,就要考虑是否因形成富铬渣而引起脱碳效率下降。钢液温度偏低,需将钢包移到LF工位重新造渣升温,达到规定温度再入VOD进行真空处理。生产中进VOD前Cr一般控制在11%~12%,由碳还原铬的公式(6)、(7)可知,高温有利于碳还原铬^[4]。因此进入VOD的钢液温度适当提高,有利于提高Cr的收得率和氧气利用率,防止钢液大沸腾的发生。为此制定了合理的进炉温度,根据生产数据统计将进炉温度控制在1 580~1 620 ℃,既能减少喷溅又能保护炉衬。

当钢液Cr > 9%时:



式中: ΔrG_m^0 为标准吉布斯自由能变, J/mol; T 为钢液绝对温度, K。

(3) 钢包净空高度。根据图4钢包尺寸及氧枪行程位置可计算不同吨位钢包的净空高度值。在实际生产过程中,当钢液净空高度偏小时,要满足氧气射流与钢液面充分接触且保证氧枪安全使用,只能缩短氧枪行程。从图可以看出,氧枪最高位置只能在内包盖出口(此时氧枪行程3 150 mm),氧枪与钢液的最小安全距离只能通过钢包净空高度来控制,也就是限制钢包最大生产吨位。沸腾时钢液短时间内向上涌起的高度可达600~800 mm^[1]。为防止大沸腾时钢液溢出钢包,最小净空高度需≥800 mm。内包盖距离钢包口575 mm,对应的氧枪离钢液面安全高度≥1 375 mm。根据钢包容积计算20 t钢包最多生产25 t钢液,40 t钢包最多生产45 t钢液,才能满足钢液即使发生大沸腾也不会大量溢出包口的要求。

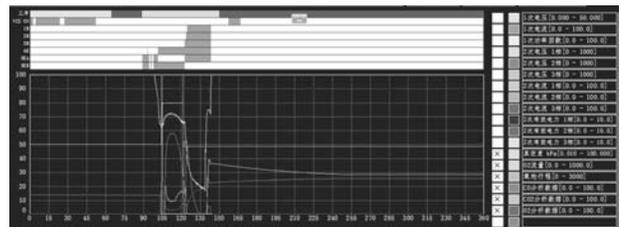


图3 VOD过程尾气及真空度变化监测表
Fig. 3 VOD process exhaust gas and vacuum degree change monitoring table

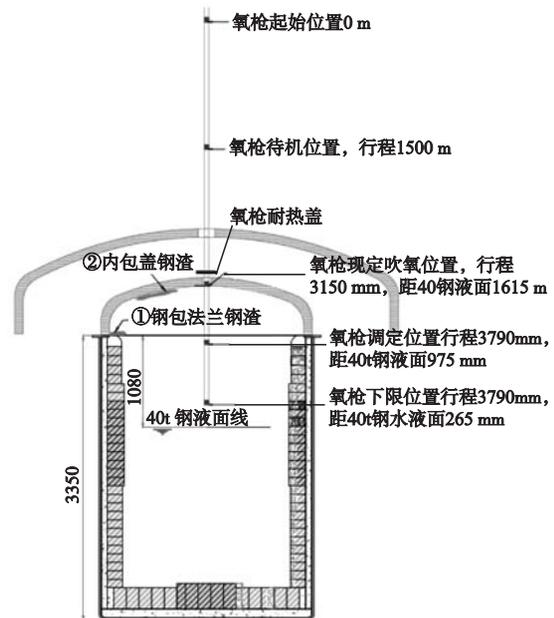


图4 氧枪限位示意图

Fig. 4 Schematic diagram of oxygen lance limit

(4) 吹氧与吹氩规范。在钢包净空高度一定的情况下, 氧枪高度需要根据钢包净空高度进行适当调整。吹氧及吹氩强度则根据吹氧初期、高碳区脱碳、低碳区脱碳和高真空碳脱氧四个阶段分别设置参数。吹氧开始氧气射流在钢液液面溶解和扩散; 主要是合金元素的氧化, 尾气CO、CO₂浓度无明显变化, Si的氧化使钢液快速升温, 初期要较小氧气流量和相当大的氩气流量, 保证钢包上下钢液温度均匀且快速进入脱碳期。当在一定炉况下, 硅的氧化达到平衡状态, 开始进入高碳区的脱氧反应, 此时产生CO气体, 对应的气体分析仪CO气体浓度快速上升, 根据生产数据来看, 峰值区间在55%~65%, 此期间要适当可适当增加氧气流量、减小氩气流量, 减少喷溅的同时加快氧气与C的反应速率, 保证脱碳和钢液升温速率。当尾气CO浓度开始下降, CO₂开始上升, 进入低碳区反应, 限制C-O反应的因素由氧气的供给变成C的传质速度, 此时应调大氩气流量, 适当减小氧气流量, 加快碳氧的结合速率。当CO₂也开始下降, O₂浓度开始上升, 且真空度开始增大, 则表明此步骤下, C-O反应趋于平衡, 开始停氧, 进入高真空碳脱氧阶段。此阶段可增大氩气流量, 通过底吹Ar形成更多小真空室进一步降低P_{CO}来促进碳脱氧的反应正向进行。合理的吹氧、吹氩规范不仅可降低真空喷溅的发生还能获得气体含量

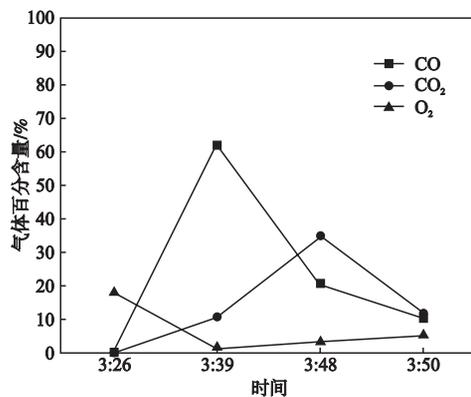
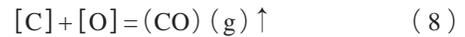


图5 VOD处理过程尾气变化节点图

Fig. 5 Node diagram of exhaust gas changes during VOD treatment

更低的钢液。

(5) 真空度。式(8)-(9)为真空脱碳的理论依据。根据冶金动力学理论, 在不提高钢液温度及不改变其他条件下, 可以通过抽真空来降低P_{CO}, 使式(8)描述的化学反应正向进行。



$$\lg K = \lg P_{CO} / a_{[C]} a_{[O]} = -1160/T + 2.003 \quad (9)$$

式中: a_[C]、a_[O]为钢液中C、O活度; P_{CO}为真空中CO的分压, %; K为钢液碳氧反应的平衡常数; T为钢液绝对温度, K。

公司采用的五级蒸汽泵, 生产中真空处理采取步进模式。如图6所示, 步骤2真空度下限设计为9 kPa, 实际生产时可抽到6 kPa左右。真空吹氧脱碳主要是在步进模式的步骤2进行。真空度越高, 碳氧反应越剧烈, 单位时间内产生的气体越多, 钢液喷溅越厉害。之前在6 kPa下吹氧, 钢液飞溅严重, 因此将初始吹氧真空度调低, 设置为10~13 kPa。实际生产过程中, 碳氧剧烈反应时产生气体增多, 真空度可降至13~15 kPa。若真空度变化过快, 反应气体过多, 必要时可手动开启真空泄压阀来破真空, 阻止钢液溢出。其弊端整个VOD处理过程得重头开始, 大大延长作业时间。所以最佳方式, 还是控制吹氧过程中的真空度, 以使吹氧脱碳反应的正常进行。



图6 真空步骤控制界面

Fig. 6 Vacuum step control interface

表2 VOD吹氧过程工艺参数更改对比
Table 2 VOD oxygen blowing process parameter change comparison

项目	进VOD温度/℃	净空高度/m	氧枪行程/m	氧气流量 (m ³ ·h ⁻¹)	氧气压力 (MPa)	停氧O ₂ 含量/%	氩气流量 (m ³ ·h ⁻¹)	(C+Si)/%
改善前	1 550~1 570	975	3 790	700~800	≥0.9	9~12	5~7	0.9~1.0
改善后	1 580~1 620	1 615	3 150	500~550	0.8~0.9	≤5	3~5	≤0.70

3 工艺实施效果

从图7、图8可以看出，采取工艺措施后，采用相同钢包精炼时，总的氧气消耗和吨钢氧气消耗均有大幅下降；同时从图9可以看出，控制停氧时氧气浓度不仅不影响VOD处理结束碳含量（统计结果C 0.005%~0.01%），而且真空喷溅也少很多；从图10可以看出，控制C+Si量，出VOD钢液温度有所下降，且

防喷溅效果明显。图11对比可明显看出内包盖上基本无钢渣粘附。影响真空钢液喷溅因素很多，除以上之外，还要做好氩气透气砖的通气试验，保证氩气瓶的氩气存储量和压力，氩气不通直接会造成钢液的上下温差过大和C的传质速度降低，进而影响正常的脱碳反应的进行引发真空喷溅。

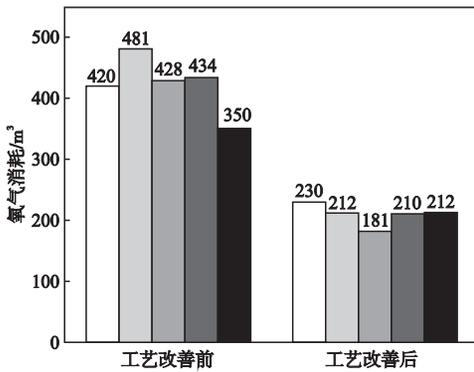


图7 20 t钢包VOD过程耗氧量对比

Fig. 7 Comparison of oxygen consumption in 20 t ladle VOD process

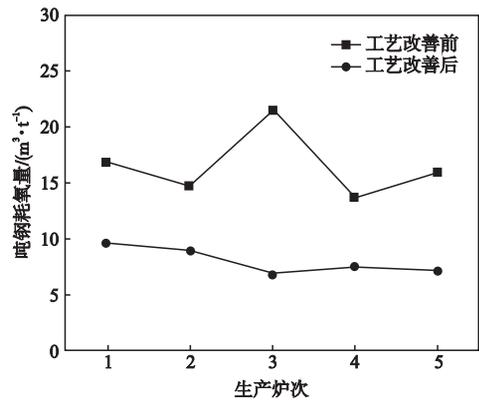


图8 20 t钢包VOD过程吨钢耗氧量对比

Fig. 8 Comparison of oxygen consumption per ton of steel in 20 t ladle VOD process

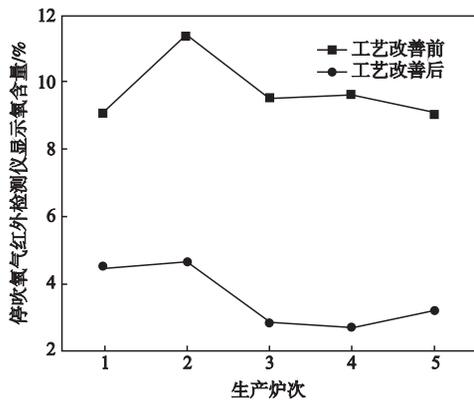


图9 20 t钢包VOD过程停吹氧气时氧含量对比

Fig. 9 Comparison of oxygen content when oxygen is stopped during VOD process of 20 t ladle

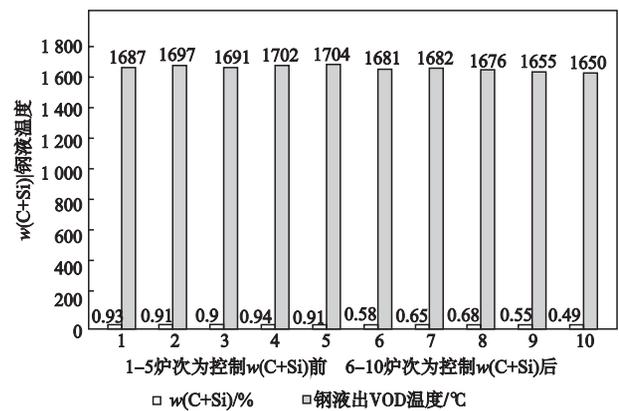


图10 20 t钢包进VOD前成分控制对比

Fig. 10 Comparison of composition control of 20 t ladle before entering VOD

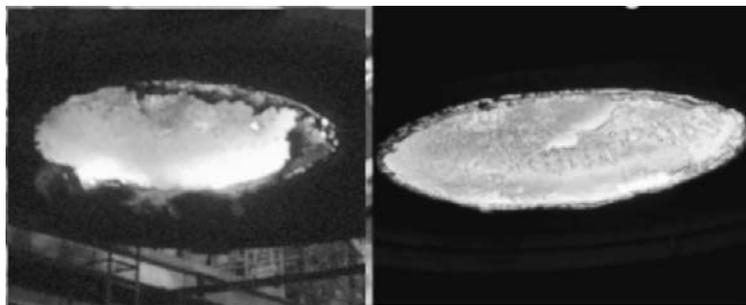


图11 工艺措施实施前后VOD内包盖粘渣对比

Fig. 11 Comparison of sticky residue of VOD inner cover before and after the implementation of process measures

4 结束语

(1) 严格控制进VOD炉前的C、Si元素含量， $C+Si < 0.70\%$ ，最好是 $C < 0.4\%$ ， $Si < 0.3\%$ 。

(2) 控制进VOD炉前温度，进炉温度应控制在 $1\ 580\sim 1\ 620\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 根据钢液量选择合适的钢包(20/40 t)，以保证足够的净空高度，最小净空高度 $\geq 800\text{ mm}$ ，氧枪距

钢液液面 $\geq 1\ 375\text{ mm}$ 。本公司在使用VOD设备进行生产时，20 t钢包最多生产25 t钢液，40 t钢包最多生产45 t钢液。

(4) VOD处理过程制定合理的吹氧，吹氩规范，氧气流量控制在 $500\sim 550\text{ m}^3/\text{h}$ ，氩气流量控制在 $3\sim 5\text{ m}^3/\text{h}$ 。

(5) 真空吹氧脱碳阶段控制真空度在一定范围，根据生产经验数据一般在 $10\sim 13\text{ kPa}$ 。

参考文献:

- [1] 张虎, 周见. SKF和VD炉真空精炼过程中钢水的沸腾 [J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2005, 15 (2): 15-16.
- [2] 李实, 池和冰, 刘兹, 等. VOD精炼不锈钢过程中真空喷溅的预防与控制 [J]. 北京科技大学学报, 2011, 33 (增刊1): 88-92.
- [3] 安杰, 耿振伟, 李忠伟, 等. 钢水C、Si含量对VOD精炼不锈钢喷溅的影响 [J]. 特殊钢, 2012, 33 (3): 26-28.
- [4] 黄希祐. 钢铁冶金原理(修订版) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989: 55.

Technical Measures for Preventing Splashing During Vacuum Treatment of Ultra-Low Carbon Stainless Steel Produced by LFV

WU Deng-peng, CHENG Xin-jun
(Toshiba Hydro power (Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou 311504, Zhejiang, China)

Abstract:

In the vacuum treatment stage when EAF+LF+VOD equipment is used to smelt ultra-low carbon stainless steel, molten steel is easy to splash, which affects normal production and equipment operation, and even causes safety accidents. The author analyzes the causes of molten steel splashing and puts forward controllable process improvement measures to reduce the influence of molten steel splashing on vacuum treatment process.

Key words:

VOD; refine; decarbonization by blowing oxygen; molten steel splash
