● 实用成型技术 Practical Shaping Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.06.024

高品质 IF 钢碳含量控制关键技术研究

张 敏[1],曾建华[1],李平凡[2],雷 辉[2]

(1. 攀钢集团研究院有限公司 钒钛资源综合利用国家重点实验室,四川 攀枝花 617000;2.攀钢集团攀枝花钢钒有限公司 提钒炼钢厂,四川 攀枝花 617067)

摘 要:针对攀钢某厂超低碳钢生产过程中存在的 RH 深脱碳能力弱、脱碳结束到钢液连铸过程增碳严重的问题,通过 RH 脱碳工艺参数进行优化,无碳钢包技术的综合应用,使 IF 钢成品的碳碳量得到了有效控制。

关键词:超低碳钢;IF 钢;强制脱碳;无碳钢包

中图分类号:TF769 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)06-0609-05

Study on Key Technology of Carbon Content Control of High Quality IF Steel

ZHANG Min[1], ZENG Jianhua[1], LI Pingfan[2], LEI Hui[2]

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, China; 2. Vanadium Refining Steel Branch, Pangang Group Steel & Vanadium Co., Ltd., Panzhihua 617067, China)

Abstract: In view of the problems existing in the production of ultra-low carbon steel in a certain plant of Panzhihua iron and steel Co., Ltd., such as the weak capacity of RH deep decarburization, the serious carbon enhancement from the end of decarburization to the continuous casting process of molten steel, through the optimization of RH decarburization process parameters and the comprehensive application of carbon-free ladle technology, the carbon content of IF steel products is effectively controlled.

Key words: ultra-low carbon steel; IF steel; forced decarburization; carbon-free ladle

随着汽车工业的进步,目前我国汽车销售量每年已远远超过 2 000 万辆。国产汽车也越来越得到大众的认可,但国产的 IF 钢(无间隙原子钢)主要用于中低档轿车和卡车[1],中高档轿车的汽车面板钢仍然需要从国外大量进口。随着环保越来越受重视,汽车轻量化是实现节能减排的有效手段。因此,开发出超深冲性能的 IF 钢对于汽车轻量化的实现具有重要意义[2]。影响 IF 钢冲击性的主要元素是钢中的 C、N 等元素含量。随着真空技术的进步,钢中的氮含量很容易控制到 40×10^{-6} 以下,氮的危害基本得到控制。而以间隙原子固溶在钢中的碳会阻碍超低碳钢形成组织结构,且随着 IF 钢中间隙原子碳含量增加,钢的变形抗力增加,在严重影响成形性能的同时钢板成材率显著降低[3],因此要求钢中的碳含量越低越好。目前,国内以宝钢为代表的汽车板生产企业已能成功将 IF 钢成品碳控制在 20×10^{-6} 以内,对于稳定 IF 钢品质具有重要意义。

收稿日期:2019-02-25

作者简介:张 敏(1982-),女,四川遂宁人,硕士,高级工程师.主要从事精炼工艺技术方面的工作.

电话:0812-3380790,E-mail:61727885@qq.com

在 IF 钢等超低碳钢的冶炼过程中,决定成品碳含量的因素较多,如:RH(真空循环脱气精炼装置)处理脱碳工艺制度、VCD(RH 真空脱碳过程)结束后钢液的碳含量,以及 RH 脱碳结束-连铸钢液增碳量。其中,影响 RH 脱碳工艺制度中的浸渍管直径、驱动气体流量、真空度、碳浓度、氧浓度以及脱碳时间等都将不同程度地影响脱碳效果。

1 超低碳钢生产工艺流程

IF 钢主要采用板坯生产,其生产工艺流程如图 1 所示。

2 超低碳钢中碳含量控制现状分析

现工艺下 VCD 脱碳结束-连铸中间包钢中碳含量变化如图 2 所示。图 3 为 RH 处理结束 IF 钢中碳含量分布情况。

由图 2 和图 3 可知,IF 钢 RH 真空处理结束后钢液碳含量普遍较高,其中碳含量≤20×10^{-6} 的仅 15%炉次左右,大部分炉次碳含量位于(20~30)$\times10^{-6}$ 之间,还有 12%左右的炉次碳含量大于 30×10^{-6}。目前攀钢 IF 钢的深脱碳能力较国内宝钢、鞍钢等厂家

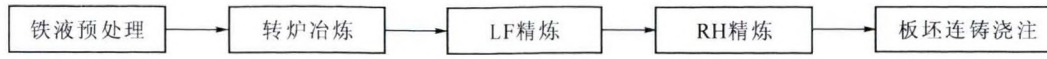


图 1 IF 钢冶炼工艺流程图

Fig.1 Flow chart of IF steel smelting process

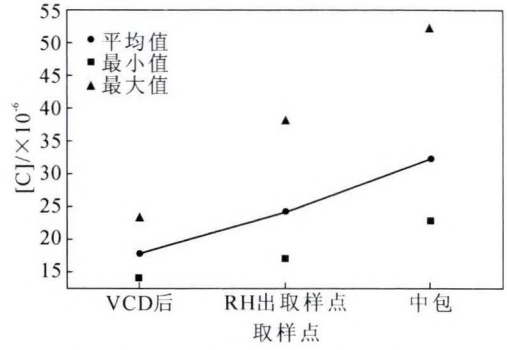


图 2 IF 钢脱碳结束–连铸钢中碳含量

Fig.2 IF steel decarburization and carbon content in continuous cast steel

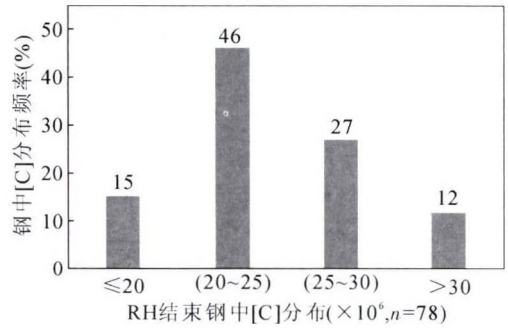
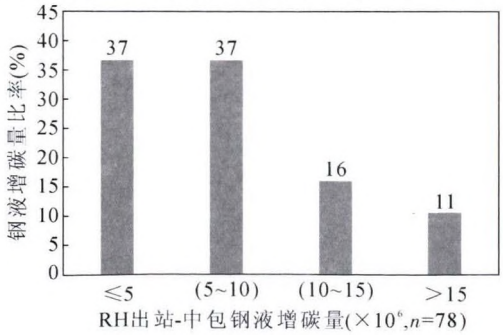


图 3 RH 结束 IF 钢中碳含量分布

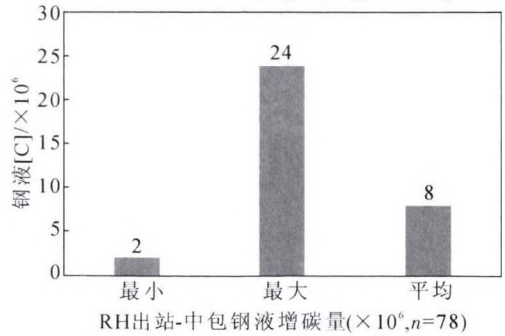
Fig.3 Distribution of carbon content in IF steel after completion of RH

要弱，且 RH 合金化过程和 RH- 连铸过程增碳也很严重，导致成品碳含量高且波动范围宽，难以满足汽车面板等高品质 IF 钢的需求。通过上述分析可知，影响 IF 钢等超低碳钢成品碳的关键因素一是 RH 的深脱碳能力，即 VCD 结束时钢中的碳含量；二是“VCD 脱碳结束–连铸中间包”过程钢液的增碳量。这两个因素最终决定 IF 钢成品碳含量。

图 4 为 RH 出站至连铸中间包的增碳量。可见，RH 出站至连铸中间包的增碳量为(2~24)×10⁻⁶，平均增碳量为 8×10⁻⁶，高于国内外先进水平的(1~3)×10⁻⁶。



(a)分布频率



(b)增碳量分布情况

图 4 RH 结束–中包钢水增碳量分布

Fig.4 Distribution of carbon increase in molten steel between RH and tundish

综上所述，目前攀钢 IF 钢碳含量控制存在的主要问题是：RH 脱碳水平不稳定，VCD 结束碳含量高的炉次较多；脱碳结束至连铸过程的增碳量也较高，导致成品碳含量波动范围宽且很难稳定控制，高级别的 IF 钢难以实现量产。

3 强制脱碳工艺技术研究

前述分析可知，影响成品钢中碳含量的主要因素是真空脱碳能力以及脱碳结束–连铸过程的增碳量。而影响真空脱碳能力的因素众多，前面已经提及。对于许多老厂而言，改变浸渍管直径等设备条件难度较大。本文根据攀钢实际生产情况，主要从如何提升 RH 强制脱碳能力以及降低 RH 结束–连铸中间包钢液增碳量等方面进行分析研究。

生产实践表明，RH 脱碳初始碳含量低、自由氧含量高时，RH 脱碳处理后钢中碳含量并不很低，但自由氧含量偏高，这就需要加入大量的铝脱氧，导致成本增加以及钢中 Al_2O_3 夹杂物的增多[4]，从而降低了钢液的洁净度以及影响钢液的可浇性。尽管 RH 处理初始碳含量较低会适当降低脱碳时间，但会相应增加后搅时间。另外，要求较低的初始碳含量，会增加转炉的负荷，对生产不利。针对上述问题，为有效地实现 RH 最佳的脱碳效果以及生产出高品质的 IF 钢，研究并建立了 IF 钢强制脱碳工艺制度。

3.1 RH 脱碳过程分析

真空处理过程中，VCD 自然脱碳或 MFB 顶枪吹 O_2 强制降碳过程均由下列几步反应完成，即：

$$\frac{1}{2}O_{2g} \rightarrow [O]_l \quad (1)$$

$$[O]_l \rightarrow [O]_{g\text{-}l} \quad (2)$$

$$[C]_l \rightarrow [C]_{g\text{-}l} \quad (3)$$

$$[C]_{g\text{-}l}+[O]_{g\text{-}l} \rightarrow CO_g \quad (4)$$

钢液中碳含量高（[C]/[O]>0.66）时[5]，即脱碳反应前期，脱碳反应速率的影响因素为钢中的氧浓度。脱碳速度 V_C 可用下式表示。

$$V_C=\frac{d[C]}{dt}=-K'_C\cdot[C] \qquad (5)$$

式中，K'_C 为碳的传递容量系数，min^{-1}；t 为脱碳时间；[C]为钢中碳含量。

式(3)的反应为一级反应，需对钢液进行吹氧强制脱碳处理。在高温真空条件下，式(1)、式(4)反应进行得很快；在 RH 脱碳中后期（文中称为脱碳反应的第二阶段），钢中的碳含量低，氧含量高，[C]、[O]反应十分微弱，[C]在钢液中的扩散成为了真空脱碳反应的限制性环节，此刻式(5)由一级反应转变为更高等级的反应。因此，保证脱碳后期充足的反应时间是提高 RH 脱碳效果的重要因素之一。因此，提高脱碳反应前期的碳氧反应速率，在不影响现有生产节奏的条件下，可缩短碳氧反应进入第二阶段的时间。

3.2　强制脱碳工艺制度建立

对于强制吹氧脱碳工艺，多数研究者均采用 RH 处理前期吹氧[5,6]。攀钢现有吹氧脱碳工艺为：真空开始处理时，将真空度降到 8×10^3 Pa 左右（一般 1 min 以内可实现），开始吹氧强制脱碳。吹完氧后，尽快降低真空度到 300 Pa 以下，这一过程需要 6~8 min。实践表明，这一工艺并未取得较好的效果。分析认为主要存在以下原因：真空脱碳初期钢中碳浓度高，生成的 CO、CO_2 废气较多，此时需要低真空度促进反应的深度进行，如图 5 所示；另外，此阶段碳氧反应剧烈，钢液喷溅严重，如果再对钢液吹氧将加剧钢液喷溅，导致真空室壁上残留较多冷钢，这些冷钢有可能在钢液脱碳结束合金化阶段时进入到钢液中导致钢液增碳。

由图 5 可见，当真空度降到 1×10^3 Pa 时真空室废气中的 CO、CO_2 气体浓度陡然上升，说明此时碳氧反应开始剧烈进行；而后随着真空度的继续降低，废气中的 CO、CO_2 气体浓度均大幅上升；当真空度降到 300 Pa 以下时，钢中碳氧反应达到顶峰并持续剧烈反应。

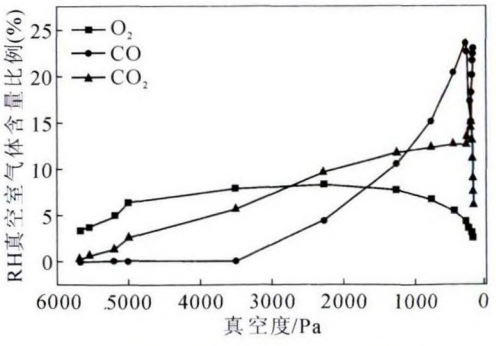


图 5　真空度与真空废气成分的关系

Fig.5　Relationship between vacuum and vacuum exhaust gas composition

由图 6 可见，当真空脱碳时间在 2~4 min 时，废气中的 CO、CO_2 气体浓度逐渐升高；当脱碳时间为 4 min 的时候，废气中的 CO_2 浓度达到最大值 15%左右；以后开始逐渐降低，而 CO 浓度逐渐升高；当脱碳 5 min 后，钢中的 CO_2 浓度仅 6%左右，此时 CO 含量在 23%左右，说明此时碳氧反应仍在剧烈进行，但已开始呈减弱趋势。此时，钢液中的氧含量已降低较多，主要发生的 C-O 反应为 C+O=CO。因此，在脱碳 5 min 后，需对钢液进行吹氧强制脱碳，以补充钢中的氧含量。

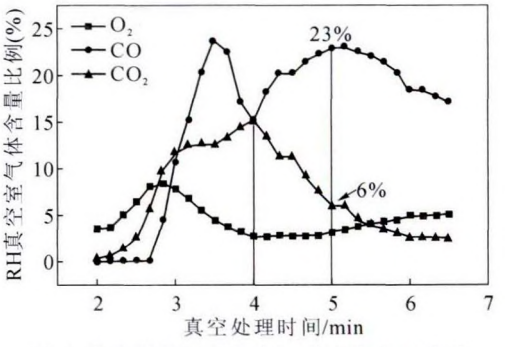


图 6　真空脱碳时间与真空脱碳能力的关系

Fig.6　Relationship between vacuum decarburization time and vacuum decarburization capacity

为确定适合攀钢设备及工艺条件下的强制吹氧脱碳工艺，进行了不同强制吹氧开始时间对真空脱碳速率影响的研究。在控制 VCD 后钢液自由氧含量 a[O]≤0.035%条件下，测得不同吹氧时间下 VCD 后钢液中的碳含量如图 7 所示。

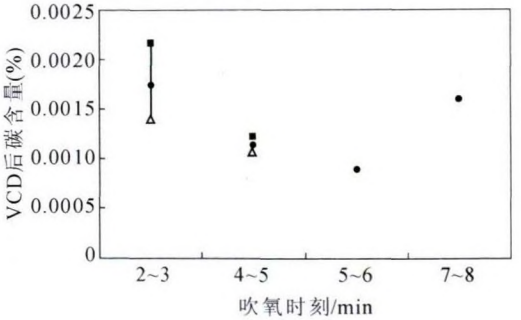


图 7　起始吹氧时间对 VCD 后碳含量的影响

Fig.7　Effect of initial oxygen blowing time on VCD end carbon content

由图 7 可见，开始吹氧时间为真空处理开始后 4~6 min 时，VCD 结束可获得较低的碳含量。这是由于此阶段吹氧即可避免与前期自然脱碳反应剧烈区重叠，又可避免后期吹氧利用率较低的问题。因而，

确定 RH 强制脱碳起始吹氧时间为 RH 处理开始后 5~6 min。

图 8 为常规自然脱碳工艺、常规强制脱碳工艺及改进后强制脱碳工艺过程脱碳速率对比。可见，三种工艺条件下，传统的强制脱碳工艺在开始脱碳初期的脱碳速率略高于其它两种，而改进后的强制脱碳工艺在第二阶段的脱碳速率要高于自然脱碳工艺和常规强制脱碳工艺。

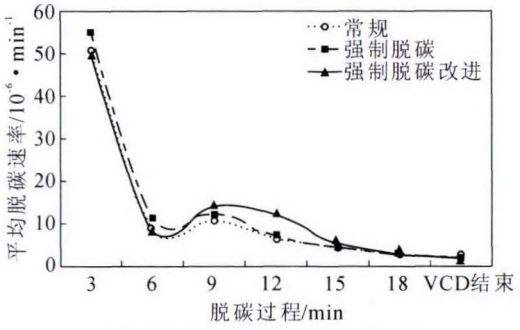


图 8 三种脱碳工艺脱碳速率对比

Fig.8 Comparison of decarburization rates of the three decarburization processes

表 1 为同期 3 种工艺真空 VCD 后碳含量对比。可见，采用改进后的强制脱碳工艺，VCD 后的碳含量较低，且 VCD 后的 a[O]基本能控制在 0.003%左右，有利于钢中夹杂物的控制。

表1 真空VCD后碳含量对比

Tab.1 Comparison of carbon content after VCD end

项目	VCD 后碳含量 /×10⁻⁶	样本数 / 炉
常规工艺	14～23	15
强制脱碳	9～21	11
强制脱碳改进	8～18	22

4 连铸过程增碳控制工艺技术研究及效果

由前面分析可知，目前攀钢 IF 钢 RH 处理结束-连铸过程增碳量较高，基本上在(5~11)×10⁻⁶，高于国内外先进水平的(1~3)×10⁻⁶。如此高的增碳量，导致高级别的 IF 钢很难实现稳定量产。另外，钢中碳含量高且波动大，影响了后续产品性能的进一步提升。因此，针对攀钢钢包特性以及钢种特点，研制了适用于攀钢 IF 钢的无碳钢包砖，其理化指标如表 2 所示。

无碳钢包成功应用后，IF 钢成品碳含量得到了有效控制，采用无碳钢包和常规钢包的 IF 钢 RH 出站-成品增碳情况如表 3 所示。可见，采用无碳钢包后 IF 钢成品[C]得到了有效控制，RH 出站-连铸过程增碳量由平均 9×10⁻⁶ 降低到 3.5×10⁻⁶。成品碳实现稳定控制，对于后续轧制过程性能的提升具有一定的意义。

表2 无碳钢包理化指标

Tab.2 Physical and chemical indicators of carbon-free steel ladle

项目	指标
(Al_2O_3+MgO)含量,%	≥85.0
C 含量,%	≤1.0
体积密度 / g·cm⁻³	≥2.95
常温耐压强度 / MPa	≥35
加热永久线变化(1 500 ℃×3 h),%	-1.0～+1.0
耐火度 /℃	≥1 780

表 3 IF 钢使用无碳钢包过程增碳情况（%）

Tab.3 Carbon increases when using carbon-free ladle

钢包类型		RH 出站	成品	增碳	样本炉数
正常钢包	范围	0.001 4~0.002 2	0.002 4~0.003 4	0.000 6~0.001 5	10
	平均	0.001 85	0.002 75	0.000 9	
无碳钢包	范围	0.000 6~0.001 5	0.001 2~0.002	0.000 1~0.000 6	15
	平均	0.001 2	0.001 55	0.000 35	

超低碳钢冶炼工艺优化后的综合应用效果显著，工艺改进前后铸坯总氧含量 T[O]对比如图 9 所示，IF 钢成品[C]分布图 10 所示。可见，IF 钢成品[C]≤0.002 0%的比例由 51.28%提高到 86.35%，[C]≤25×10⁻⁶ 的比例由 63.61%提高到 94.51%，实现了 IF 钢[C]≤30×10⁻⁶ 的稳定控制。铸坯 T[O]由(12~20)×

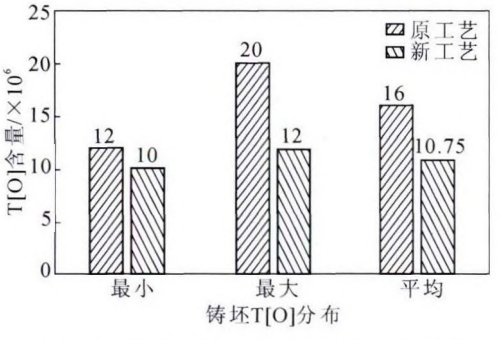


图 9 工艺优化前后铸坯 T[O]含量控制情况

Fig.9 Comparison of T[O] control of slab before and after process improvement

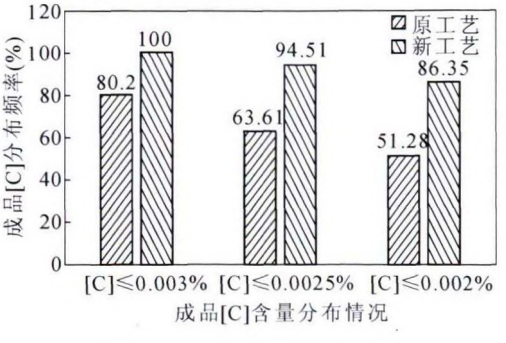


图 10 IF 钢成品[C]分布对比

Fig.10 IF steel finished product [C] distribution

（下转第 624 页）

参考文献：

[1] 李世普，医学.生物医用材料导论 [M].武汉工业大学出版社.2000.

[2] 卢志华,李呈顺,马育栋.多孔氧化铝陶瓷制备技术研究进展[J].中国陶瓷,2018,54(2):1-7.

[3] 王佳宁.氧化锆氧化铝陶瓷复合材料对人牙周膜细胞增殖、凋亡和骨诱导活性的影响 [J].中国组织工程研究,2017,21(26):4155-4159.

[4] 刘路路,万辉,楚雪梅.生物陶瓷材料的应用及发展前景[J].中国战略新兴产业,2018(40):60.

[5] Edwards J, Brunski J, Higuchi H. Mechanical and morphologic investigation of the tensile strength of a bone - hydroxyapatite interface [J]. Journal of biomedical materials research,1997,36(4):454-468.

[6] 廖明顺.多孔材料力学性能数值模拟[J].硕士学位论文[D].昆明:昆明理工大学,2006.

[7] 袁义云,宋迎东,孙志刚.孔隙率对多孔陶瓷材料失效强度的影响[J].航空动力学报,2008,23(9):1623-1627.

[8] 杨福生，洪波.独立分量分析及其在生物医学工程中的应用[J].国外医学:生物医学工程分册,2000,23(3):129-134.

[9] 姚康德,王向辉,侯信.组织工程相关生物材料[J].天津理工学院学报,2005,16(4):1-5.

[10] 龚明明,谭丽丽,耿芳,等.新型多孔镁压缩性能的有限元分析[J].金属学报,2008,44(2):237-242.

[11] 王以进，王介麟.骨科生物力学 [M].北京：人民军医出版社.1989.

[12] 胡江，陶祖莱.组织工程研究进展 [J].生物医学工程学杂志,2000,17(1):41-42.

[13] 曾机灿，齐伟力.股骨生物力学的有限元研究 [J].医学综述,2008,14(20):3101-3103

[14] 李英雷,胡时胜,李英华.A95陶瓷材料的动态压缩测试研究[J].爆炸与冲击,2004(3):233-239.

[15] 顾其胜,候春林,徐政.实用生物医用材料学[M].上海:上海科学技术出版社.2005:20-79.

(上接第612页)

10^{-6}降低到(10~12)×10^{-6},钢的洁净度得到了大幅提升。

5 结论

(1)通过对RH脱碳机理以及国内IF钢RH深脱碳方式的研究,结合攀钢实际情况,建立了新的RH强制脱碳工艺制度。该技术应用后,IF钢VCD后[C]由之前的14~23×10^{-4}%降低到8~18×10^{-4}%,RH深脱碳效果得到明显提升。

(2)通过对无碳钢包的研制与应用,IF钢RH出站-成品增碳量由之前的6~15×10^{-4}%(平均9×10^{-4}%)降低到1~6×10^{-4}%(平均3.5×10^{-4}%)。无碳钢包的应用,对于超低碳钢成品碳的稳定控制具有重要作用。

(3)研究成果综合应用后,IF钢成品[C]≤0.002 0%的比例由之前的51.28%提高到86.35%,[C]≤0.002 5%的比例由63.61%提高到94.51%,[C]≤0.003 0%的比例由80.20%提高到100%，为高品质IF钢的开发提供了重要的技术支撑。

参考文献：

[1] 赵文涛.超低碳IF钢的生产工艺优化[D].鞍山:辽宁科技大学,2016.

[2] 刘仁东,郭金宇,王福.鞍钢高强汽车用钢研发进展[J].上海金属,2013,35(4):47-42.

[3] 杨丽,宋进英.超低碳IF钢碳含量生产控制[J].铸造技术,2018,39(8):1795-1798.

[4] 孙群,林洋,李伟东.RH精炼脱碳与夹杂物控制[J].北京科技大学学报,2011,33(S1):142-146.

[5] 周彦召,邹长东,赵家七,等.RH真空深脱碳工艺的优化[J].炼钢,2014,30(3):24-28.

[6] 张锦刚,李德刚,于功力,等.IF钢生产过程中RH-TB真空脱碳效果的工艺研究[J].钢铁,2006,41(6):32-35.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共8章:1、铸铁件均衡凝固与有限补缩;2、铸铁件冒口补缩设计及应用;3、压边浇冒口系统;4、浇注系统大孔出流理论与设计;5、铸件均衡凝固工艺;6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺;7、浇注系统当冒口补缩设计方法;8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页,特快专递邮购价226元。

邮购咨询:李巧凤 029-83222071,技术咨询:13609155628