

鞍钢炼钢工艺技术发展及展望

李德军，赵成林，杨光，金喆，李博洋，张维维，黄玉平

1. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室，辽宁 鞍山 114009；
2. 鞍钢集团钢铁研究院，辽宁 鞍山 114009

Development and prospect about steelmaking technology in Angang

LI De-jun, ZHAO Cheng-lin, YANG Guang, JIN Zhe, LI Bo-yang, ZHANG Wei-wei, HUANG Yu-ping

1. State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, Liaoning, China;
2. Iron & Steel Research Institutes of Ansteel Group Corporation, Anshan 114009, Liaoning, China

鞍钢集团是世界 500 强企业，拥有 31 家境外公司及机构，500 多家国内外客户及合作伙伴，产品销售覆盖全球 70 多个国家和地区，是众多国际知名企业的全球供货商。在炼钢技术上自主开发集成了多项核心技术，形成了一批具有自主知识产权、具有世界先进水平的炼钢新技术。在这些核心技术的支撑下，使鞍钢在汽车用钢、铁路用钢、造船和海洋工程用钢、桥梁钢、核电钢、家电用钢、集装箱用钢、电工钢、石油石化用钢、高端制品用钢和特殊钢等系列产品一直处于国内领先水平。

1. 炼钢系统装备概况

鞍钢股份炼钢厂现装备有公称 100 吨转炉 6 座、150 吨转炉 2 座、180 吨转炉 1 座、260 吨转炉 3 座，100 吨 LF 炉 6 座、180 吨 LF 炉 1 座、260 吨 LF 炉 2 座，100 吨 VD 炉 1 座，100 吨、180 吨、260 吨 RH 精炼装置各 2 座，180 吨 ANS 精炼装置 2 座，8 台板坯连铸机、5 台方(圆)坯连铸机。形成了“铁水预处理—转炉—钢水扒渣—炉外精炼—连铸”的现代化生产工艺格局，产品直供下道工序中厚板厂、大型厂、热轧带钢厂、无缝厂、线材厂等主体生产厂。

2. 炼钢技术进步

技术创新是实现高质量发展的强大动能，是推动钢铁企业发展的关键，也是提高企业在市场竞争力的重要方法。作为全球 500 强企业，鞍钢集团始终站在国际水平的高端和整个冶金行业发展的高度，在炼钢技术创新上持续发力，不断加大研发强度和研发投入，各项技术都得到了全面提高，尤其在钢液净化控制及绿色化冶炼技术上达到了国内先进水平。在炼钢技术不断提升下，也为高附加值钢种工业纯铁等高端新产品的开发提供了有力保证。

2.1. 洁净化冶炼技术

为了提高钢液的洁净度，从铁水预处理到连铸在炼钢的各个工序上进行了新技术开发。

2.1.1. 铁水涌动扒渣技术

在喷吹方法或 KR 法脱硫之后的扒渣工序中，由于设备和铁水包残渣分布等原因，造成残渣很难彻底扒净，在转炉吹炼过程中容易造成“回硫”，增加了炉外精炼负担。为此，鞍钢针对此不足进行了科研攻关，开发了涌动扒渣技术^[1-3]，其工艺原理如图 1 所示。

涌动式扒渣工艺的主要原理为：在铁水罐上方垂直插入一支喷枪，利用喷枪向铁水罐内喷吹氮气，吹入的氮气泡受热后膨胀，导致铁水与气体的混合物密度显著降低，喷枪周围的铁水与气体混合物在浮力作用

下迅速上浮，同时在喷枪孔周围不断有液态铁水进行补充，铁水液面产生了横向移动，铁水脱硫渣在铁水与脱硫渣摩擦力的作用下随铁水进行了横向移动，随着扒渣过程的进行，脱硫渣不断涌向扒渣侧，形成了半月型脱硫渣面，显著减小了扒渣板在扒渣过程中的扒渣行程。同时由于吹入氮气形成的涌动效应减小了脱硫渣面的面积，在脱硫渣体积一定的条件下，增加了渣层厚度和扒渣板单次扒渣的扒渣量，提高了扒渣效率，达到降低扒渣铁损、提高扒净率的目的。

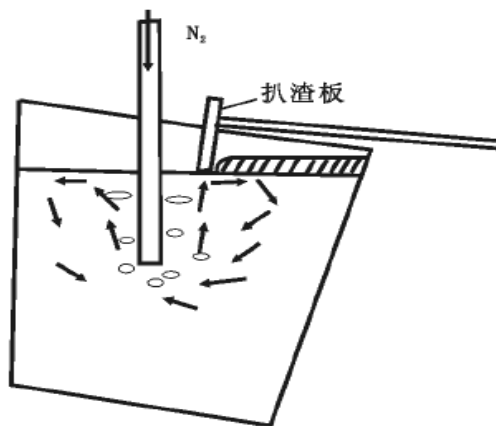


图 1 涌动式扒渣工艺原理图

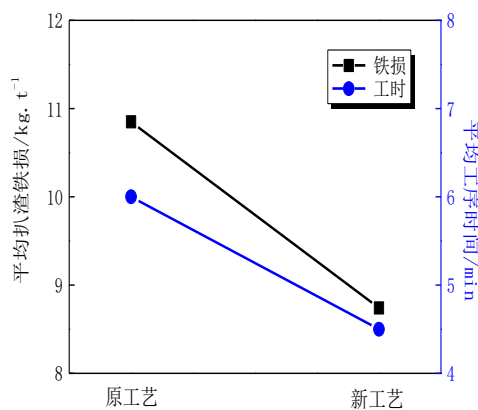


图 2 铁损及工时对比

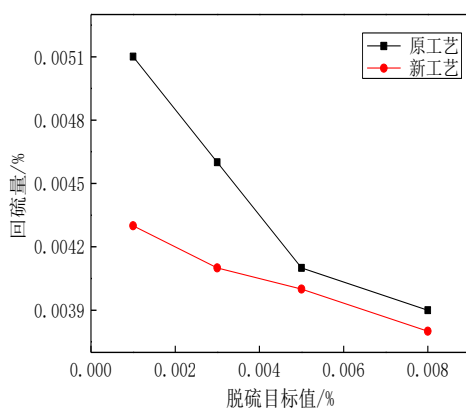


图 3 转炉回硫量的对比

通过铁水涌动扒渣技术，使铁水在预处理过程中的各项指标较原有工艺都得到了明显改善，其各项指标详细情况如图 2 和图 3 所示。从图中可以看出，采用涌动式扒渣工艺较原有工艺扒渣铁损及工序时间得到了大幅降低，转炉的回磷量也有明显改善。

2.1.2. 转炉双联深脱磷技术

钢中磷含量是衡量钢液洁净化的重用指标之一，为了提高转炉炼钢脱磷效果，根据鞍钢转炉及冶炼品种的特点开发了前半钢冶炼与后半钢冶炼的转炉双联深脱磷技术。通过大量的生产数据采集整理，对前半钢和后半钢的温度、炉渣碱度和炉渣中 FeO 含量与脱磷率的关系进行了分析研究。前半钢的最佳出钢温度控制到 1450~1490℃，炉渣中碱度控制到 2.0~2.5，终渣 FeO 含量应控制在>25%；在后半钢冶炼中，脱磷率则随终点炉渣中 FeO 含量的增加而降低，但变化幅度不大，为此应保证终点渣中 FeO>30%，脱磷效率随出钢温度降低而增加，需将出钢温度控制到 1640℃以下。为了满足生产低磷、超低磷钢种，在前期大量试验数据的基础上，从供氧制度、加料制度方面研究了适用于鞍钢转炉的双联控制工艺，与普通工艺进行了比较其结果如图 4 所示^[4]。

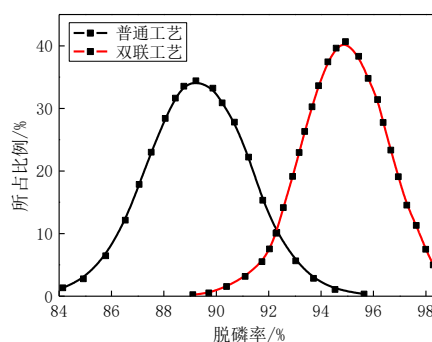


图 4 双联工艺与普通工艺脱磷率比较

从图 4 中可以看出，双联法的脱磷效率要明显好于普通工艺，所占最高比例的脱磷率达到了 95%，而普通工艺所占最高比例的脱磷率只有 89%。采用双联法工艺生产后，完全满足了低磷、超低磷钢种的生产要求。

2.1.3. 新型螺旋电磁搅拌技术

19 世纪 80 年代，法国学者发明了适合连铸钢坯二冷区用的组合式螺旋磁场搅拌器。与常规的电磁搅拌相比，螺旋电磁搅拌能更加充分地促进钢液在三维方向上的传质、传热，有助于促进钢液的同时凝固，对消除铸坯的内部缺陷并提高其质量具有更佳的效果^[5]。然而早期开发的组合式螺旋搅拌器因体积过大、搅拌器结构复杂、内外搅拌器之间相互屏蔽以及维护费用高等，使该技术到目前为止尚未得到大范围的推广和应用。为此，鞍钢开发了具有自主知识产权的新型螺旋电磁搅拌器，最大优点是仅靠一套线圈和铁芯就能够实现对钢液进行三维搅动，大幅度降低了体积和维护成本。新型螺旋电磁搅拌技术在鞍钢的大方坯上进行了成功应用，其效果如图 5 所示。



图 5 新型螺旋电磁搅拌器工业应用效果

为了获得更好的电磁搅拌效率，对螺旋电磁搅拌器各项参数进行了优化，在此基础上进行了相应的数值模拟，根据模拟结果对工艺进行了优化。为了比较搅拌器的应用效果，在相同的试验条件下以帘线钢为实验对象，对普通搅拌器与螺旋搅拌器的使用效果进行了比较，其结果如图 6 所示^[6]。

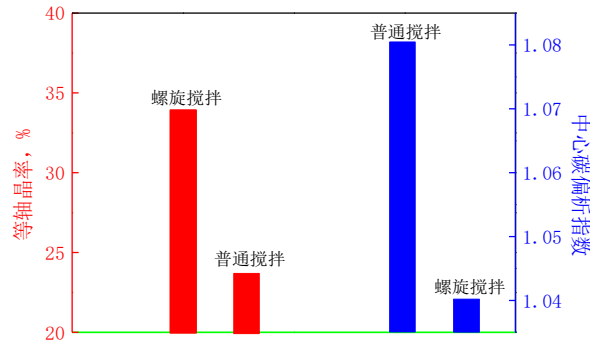


图 6 普通搅拌与螺旋搅拌使用效果比较

从图 6 可以看出，螺旋电磁搅拌由于更加有效地促进三维方向上的传质、传热，有利于等轴晶率提高，与传统电磁搅拌，螺旋电磁搅拌的铸坯平均等轴晶率从 23% 提高至 34%，铸坯中心碳偏析由 1.08 降至 1.04，使铸坯质量得到了大幅提高。

2.1.4. 洁净化控制水平

（1）成分控制。洁净钢生产的关键是对钢成分的控制，鞍钢对洁净钢中主要元素的控制情况如下^[7-8]：

1) T[O] 控制。为了提高钢液洁净度，对钢中的氧含量控制至关重要，为此，从以下几方面进行了控制：控制转炉终点碳氧积 ≤ 0.0019 ；采用降低钢包顶渣氧化性的钢包顶渣改质技术；采用 Si、Mn、Al、Al-Mn、Ti 等复合脱氧技术；采用保护浇铸、气幕挡墙技术等。实现了在超低碳钢 (IF 钢) $T[O] < 12 \times 10^{-6}$ ，管线钢 $(\times 80) T[O] < 15 \times 10^{-6}$ ，硅钢 $T[O] < 7 \times 10^{-6}$ ，轴承钢 $T[O] < 6 \times 10^{-6}$ 的生产水平。

2) N 含量控制。主要从脱氮和防止增氮两个方面考虑，采用 VD 真空脱气处理技术和转炉出钢控氮及保护浇铸技术。帘线钢 N 含量稳定控制在 40×10^{-6} 以下。

3) H 含量控制。优化钢包、水口等耐火材料烘烤工艺，控制入炉合金及造渣材料，采用 VD, RH 真空处理脱气处理工艺等。在 RH 或 VD 搬出时，H 达到 0.5×10^{-6} 以下。

4) P 含量控制。采用 ARP 技术、转炉“双渣”脱磷技术及防止钢水回磷控制技术。根据钢种需要，采取不同的脱磷工艺路线保证脱磷程度。单渣法转炉出钢 P 含量已稳定控制为 $(80 \sim 100) \times 10^{-6}$ ，双渣法 P 含量为 $(60 \sim 80) \times 10^{-6}$ ，单枪双联法 P 含量为 $(40 \sim 50) \times 10^{-6}$ ，双枪双联法 P 含量为 $(30 \sim 40) \times 10^{-6}$ 。

5) S 含量控制。KR 铁水预处理可实现铁水 S 含量 $< 20 \times 10^{-6}$ ，转炉控制钢水回硫 $< 30 \times 10^{-6}$ 精炼实现 LF, ANS, VD 深脱硫，管线钢和硅钢硫含量可控制在 $< 10 \times 10^{-6}$ 的水平。

（2）夹杂物控制。在洁净钢生产过程中，除了要求对成分进行严格的控制外，根据钢种和技术条件对夹杂物的数量、尺寸、分布也有一定的要求。夹杂一般在较长时间内零星地产生，难以碰撞聚合，不易长大上浮去除。通过采取各项措施改进后，目前鞍钢 IF 钢实现的控制水平为： $\leq 10 \mu\text{m}$ 的 A1203 夹杂物占总量 90% 以上， $\geq 20 \mu\text{m}$ 的 A1203 夹杂物不到 1%；管线钢 $\leq 5 \mu\text{m}$ 的硫化钙锰夹杂物占总量 90% 以上， $\geq 15 \mu\text{m}$ 的不到 1%；帘线钢 $\leq 5 \mu\text{m}$ 的氮化钛夹杂物占总量 90% 以上， $\leq 10 \mu\text{m}$ 的硅酸盐夹杂物占总量 95% 以上。各钢种的实际控制水平如表 1 所示。

2.2. 绿色化冶炼技术

以科技进步为手段，走“绿色”炼钢之路，实现和达到无污染少排放炼钢，是鞍钢多年来积极探索和努力奋斗的目标。

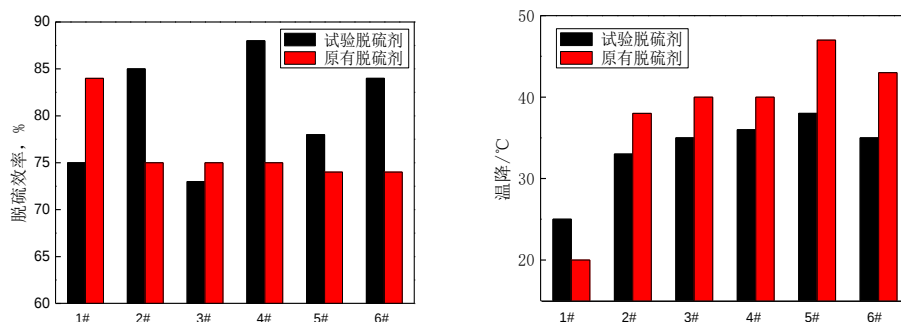
2.2.1. 无氟环保 KR 脱硫剂开发

为了消除氟污染，实现 KR 脱硫的绿色化，鞍钢对无氟环保 KR 脱硫剂进行了开发研究^[9]。从脱硫的机理出发，通过理论分析，在石灰中配加铝粉、铝矾土、铁矾土等配料能够起到与萤石相类似的作用，有利于促进脱硫。为此，采用了实验室实验和工业试验相结合的方式，配制了不同试验脱硫剂进行了工业试验，其各组试验脱硫剂的脱硫效果如图 7 所示。

表 1 主要钢种的控制水平

10⁻⁶

元素	IF 钢	管线钢	硅钢	帘线钢	工业纯铁
C	10	-	10	-	29
N	13	30	14	25	21
T[O]	10	20	7	15	12
P	-	40	-	-	15
S	-	6	8	-	16
H	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Ti	-	-	-	<10	<10
夹杂物尺寸	<10 μ m	<15 μ m	<20 μ m	<5 μ m	<5 μ m



(a) 脱硫效率; (b) 铁水温降

图 7 试验脱硫剂与原有脱硫剂效果比较

通过工业试验发现，4#脱硫剂（5%铝+20%铝矾土+75%石灰）的使用效果最佳，其脱硫效率可以达到 88%，较原有脱硫剂其脱硫效率提高了 13 个百分点，在铁水温降上与原有脱硫剂相比，可减少铁水温降 4℃，这更有利于对低温铁水的脱硫处理。

2.2.2. 大废钢比冶炼技术开发

废钢作为转炉冶炼主要金属料，由于具有清洁、低碳、可循环、低本等诸多优点，能够大幅度降低环境污染和综合能耗，各钢铁企业为了提高转炉的废钢比都进行了技术攻关。鞍钢为了提高转炉废钢比，提出了如下措施^[10]：（1）通过铁水包加盖和一罐制提高入转炉铁水温度；（2）转炉少渣及留渣冶炼；（3）应用大出钢口；（4）降低中间包过热度。通过上述措施，铁水出铁结束至进钢厂的运输时间降低了近 20min，铁水一罐制比率达到了 90%以上，入转炉铁水温度由 1300℃提高到 1330℃，转炉入炉总渣量减少 12kg/t，出钢时间缩短了 1~3min，出钢温降减少了 10~15℃，为废钢比的提高创造了良好条件。通过以上措施废钢比有了大幅提高，图 8 为各年废钢单耗情况。为了继续提高转炉废钢比，加大了研发力度，争取在 2025 年实现转炉废钢比达到 25%。

2.2.3. LF 无氟绿色化生产技术

LF 炉原有工艺在造渣过程中都配加了一定萤石, 不仅导致对钢包渣线的冲刷及侵蚀相对比较严重, 降低了钢包使用寿命还对环境产生污染。为了实现 LF 炉高效、长寿命、绿色化, 进行了系统研究, 采取了以铝矾土代替萤石作为助熔剂。同时, 采用在出钢过程中向钢水内加入 3.5~4.0 kg/t 钢的小粒白灰(一种价格低廉的转炉石灰筛下料)或白灰球(一种价格低廉的转炉石灰筛下料制成的小球), 利用出钢时钢水的冲击搅拌和钢水的高温化渣, 实现出钢过程的快速成渣。通过以上的技术攻关不仅实现了 LF 无氟绿色化生产, 同时还降低了生产成本^[11]。

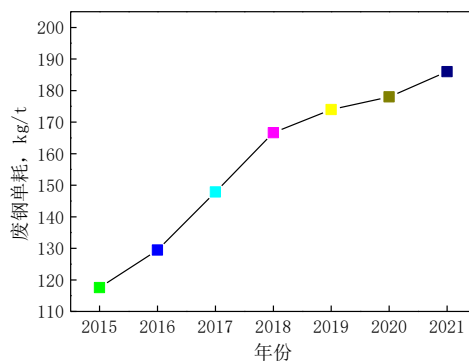


图 8 废钢单耗趋势

2.3. 工业纯铁开发

工业纯铁是一种重要的钢铁基础材料, 主要用于冶炼各种高温合金、耐热合金、精密合金、马氏体时效钢等航空航天、军工和民用合金或钢材。根据其用途主要分为电磁纯铁、原料纯铁和军工纯铁三大类。目前已实现工业化生产和应用的纯铁又称为工业纯铁, 纯度为 99.6%~99.8%。鞍钢经过多年的技术研发, 成功地开发出以转炉炼钢+LF+RH 真空处理+连铸的工艺生产工业纯铁工艺。鞍钢集团相继开发出铁基非晶合金专用纯铁、铝电解槽专用纯铁、钕铁硼永磁合金专用纯铁、特殊钢专用纯铁、功能材料专用纯铁等多个系列纯铁产品, 进一步拓展了工业纯铁的应用范围, 其产品质量达到了国际领先水平, 鞍钢的工业纯铁纯度与国内外先进企业的水平比较如表 2 所示^[12]。

表 2 国内外工业纯铁洁净度水平 (质量分数)

厂家	C	Si	Mn	P	S	O	N
鞍钢	0.0040	0.01	0.04	0.0015	0.0016	0.0012	0.0021
太钢	0.0040	0.01	0.11	0.0050	0.0040	0.0030	0.0038
宝钢	0.0029	0.01	0.15	0.0090	0.0060	0.0022	0.0030
日本 JFE	0.003	0.003	0.04	0.0030	0.0030	0.0016	0.0040

2.3.1. 非晶合金专用纯铁

非晶体材料的特殊结构赋予了其独特的性能, 以与钢铁最为接近的铁基非晶合金为例, 由于凝固过程的冷速很大, 液态金属来不及形核就已经转变为固态, 凝固后的非晶合金也就没有晶态合金诸如位错、滑移、晶界等晶体缺陷, 因此非晶合金具有良好的机械性能和耐腐蚀性能。铁基非晶合金的制备是以非晶母合金熔液的熔炼为基础, 通常是在感应炉内将工业纯铁、金属硅等原料熔化为均匀的母液, 工业纯铁中的杂质元素含量及金属硅的加入量、收得率直接影响非晶合金的产品质量及制造成本。

根据铁基非晶合金的制备特点, 2017 年, 鞍钢率先开发出含硅 3%-5%、铁、硅元素含量总和大于 99.90% 的非晶合金专用工业纯铁, 通过优化冶炼、连铸及铸坯冷却工艺, 解决了冶炼过程大量加入硅铁合金对钢水铝含量的影响以及铸坯表面质量等问题。产品应用于铁基非晶带材生产企业后, 工业纯铁中硅元素的收

得率可达 99%以上，大大降低了非晶合金制备过程金属硅的使用量，缩短了非晶母合金的处理时间及非晶材料的制备成本，同时工业纯铁中杂质元素含量低的特点能够将非晶合金磁性能提升 15%以上。

2.3.2. 铝电解槽专用纯铁

中国是世界最大的电解铝生产国，产量已经连续 20 多年位居世界首位，2020 年中国电解铝产量 3708 万吨，占全球电解铝产量的 56.8%。同时，在中国的有色金属生产中，电解铝制取能耗占有色产业链总能耗的 75%左右，工业铝电解生产大幅度节能减排技术久攻不破，已成为制约铝电解工业发展的瓶颈问题。

与普通钢材相比，工业纯铁具有纯度较高、导电性好的特点，工业纯铁与普通钢材导电性对比如表 3 所示。从表 3 中可以看出，在室温下工业纯铁的导电性明显好于普通钢材，其电导率是普通钢材的 2 倍以上。

表 3 工业纯铁与普通钢材导电性对比

试样	宽度 (mm)	长度 (mm)	厚度 (mm)	电阻 ($\mu\Omega$)	电阻率 ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	电导率 $\times 10^6$ (S/m)
工业纯铁	6.8	29	6.76	64.6	10.2	9.8
普通钢材	6.8	29	8.69	107.8	22.2	4.5

对导电性能影响最大的是钢铁基体的连续性，因此，通过提高纯铁产品的表面质量及内部质量，降低 C、N、Mn、P、S、Cu 等杂质元素及残余元素含量，以避免在纯铁产品中产生过多的位错和晶格畸变，保证高温状态下良好的导电性能。将工业纯铁应用于铝电解过程中，有效提升了电流效率，降低生产能耗及碳排放。

3. 展望

习近平总书记指出，要以智能制造为主攻方向推动产业技术变革和优化升级，推动制造业产业模式和企业形态根本性转变，以“鼎新”带动“革故”，以增量带动存量，促进我国产业迈向全球价值链中高端。今后鞍钢在炼钢技术发展中，将以党中央、国务院高度重视智能制造发展为导向，通过科技创新，突破炼钢技术瓶颈，实现鞍钢在绿色智能化发展、物联网与大数据深度融合、生产效率、运营成本、服务能力、技术质量等方面来提升鞍钢炼钢技术的全面发展。

参考文献

- [1] 万雪峰, 曹东, 马勇等.铁水罐涌动式扒渣技术研究[J].炼钢, 2016, 32(3):8-13.
- [2] 曹东.鞍钢铁水涌动式扒渣技术研究[J].鞍钢技术, 2017(1):16-19.
- [3] 赵自鑫, 费鹏, 赵雷等.鞍钢鲑鱼圈铁水预处理涌动式扒渣工艺实践[J].鞍钢技术, 2017(1):39-42.
- [4] 栾花冰, 王爽, 孙振宇等.鞍钢 100t 顶吹转炉双联法脱磷工艺的研究[J].鞍钢技术, 2018(1):26-29.
- [5] 吴存有, 周月明, 侯晓光.电磁搅拌技术的发展[J].世界钢铁, 2010(2):36-40.
- [6] 郭庆涛, 唐雪峰.单绕组螺旋电磁搅拌对高碳大方坯中心偏析影响的研究[J].材料导报, 2022,36(8):1-5.
- [7] 王向辉, 王成青, 赵晨光等.鞍钢洁净钢生产平台分析[J].鞍钢技术, 2013(5):58-64.
- [8] 廖亚莉, 姚宇峰.鞍钢纯净钢的生产与质量控制[J].铸造技术, 2017, 38(12):3040-3042.
- [9] 李德军, 王鹏, 宋吉锁等.无氟型 KR 铁水脱硫剂脱硫效果实验分析[J].鞍钢技术, 2021(6):21-25.
- [10] 李伟东, 何海龙, 李冰等.鞍钢提高转炉废钢比的生产实践[J].鞍钢技术, 2019(5):53-56.
- [11] 梅雪辉, 许海亮, 刘磊等.LF 无氟化快速脱硫工艺研究与实践[J].鞍钢技术, 2021(5):45-48.
- [12] 张维维, 廖相巍, 贾吉祥等.工业纯铁及超纯铁的研发进展[J].鞍钢技术, 2015(3):6-11.