

兴澄轴承钢绿色冶炼实践

江阴兴澄特种钢铁有限公司 苗志奇 尹青 陆长河 华刘开 刘婉

摘要:“十四五”时期是实现“碳达峰”、“碳中和”目标的关键期和窗口期，荣获“制造业单项冠军产品”的兴澄特钢高性能轴承钢，其生产冶炼始终围绕“绿色制造”的宗旨，绿色冶炼的内容涵盖了绿色管理、绿色技术和绿色产品等方面。兴澄特钢通过建立科学的碳管理体系、智能化赋能超低排放改造、积极发布产品的碳足迹核查声明等措施持续加强轴承钢的绿色管理，不断开发低碳生产技术、智能制造技术、轴承钢绿色高效产业化技术等绿色技术，精心打造超低碳排放精品轴承钢和大规格风电轴承滚动体用清洁能源材料等绿色产品。在此基础上，兴澄特钢着眼未来，积极探索轴承钢的近零碳排放技术，深刻践行中信泰富特钢集团的“绿色引领”战略，致力于打造低碳高质量可持续发展“绿色制造”企业，赋能清洁能源产业链“制造绿色”，履行特钢担当和企业社会责任。

关键词:轴承钢；碳管理；低碳生产；智能制造；绿色高效

1. 引言

随着“十四五”时期我国制造强国战略的深入实施，“碳达峰”、“碳中和”目标进入关键期和窗口期，我国风电、轨道交通等产业规模不断扩大^[1,2]，风电单机容量、高铁/铁路营业里程比例不断增加。轴承作为“工业关节”和装备制造的“心脏”，是直接决定先进制造领域重大装备和主机产品质量的关键基础零部件^[3-6]。轴承钢作为轴承制造的关键基础材料，其质量控制水平和疲劳性能对轴承产品的加工质量、使用寿命和可靠性起着至关重要的作用^[7,8]。

兴澄特钢高性能轴承钢荣获工信部“制造业单项冠军产品”，实现了真空脱气炼钢条件下纯净度控制氧含量 ≤ 5 ppm、钛含量 ≤ 10 ppm，轴承钢冶金质量和疲劳寿命等已经接近国内外先进企业水平。多年来，兴澄特钢深刻践行中信泰富特钢集团的“绿色引领”战略，一直致力于打造低碳高质量可持

续发展“绿色制造”企业，赋能清洁能源产业链“制造绿色”，履行特钢担当和企业社会责任。本文主要从兴澄轴承钢的绿色冶炼实践方面对兴澄特钢的“绿色制造”理念加以阐述。

2. 轴承钢绿色管理

2.1 通过 EATNS 碳管理体系认证，不断提升碳管理水平

2023 年，兴澄特钢开展了 EATNS 碳管理体系认证工作，以生命周期碳管理为理念，采用风险和机遇思维，遵循“策划-实施-检查-改进”（PDCA）的管理原则，对企业生产经营等全过程碳排放、碳资产、碳交易、碳中和活动进行系统管理，并形成科学体系。

同时，兴澄特钢成立了由总经理担任组长，各相关部门、分厂负责人为成员的碳管理领导小组，并制定了《碳管理组织架构图》，明确各相关部门的职责与权限，推进“双碳”相关工作有效落地。2023 年 9 月，兴澄特钢获得上海环交所颁发的 EATNS 碳管理体系证书，成为全国行业首家通过碳管理体系认证的企业。

2.2 推进超低排放改造，有效实现减排

兴澄特钢已完成全流程超低排放改造，通过智能化赋能，建立无组织排放治理设施集中控制系统，通过对排放源点监测运行数据的智能管理和数据化展示，将无组织排放“有组织化”管理。兴澄特钢的物流系统已完成清洁运输改造，自建的 10 万吨级远洋码头，获得省级三星级“绿色港口企业”；厂内运输车更换为新能源汽车或达到国六排放标准的汽车；原料及产品运输主要为水运，大宗物料及产品采用清洁运输方式的比例超过 80%。

通过超低排放改造治理，兴澄特钢各项污染物排放大幅削减，颗粒物、二氧化硫、氮氧化物较超低排放治理之前的减排幅度分别为 18.9%、62.2%、58.3%。

2.3 发布轴承钢产品碳足迹核查声明书，促进绿色低碳发展

兴澄特钢积极发布轴承钢产品的碳足迹核查声明，主动承担企业自身环保责任和努力践行可持续发展理念。通过碳足迹认证，一方面企业可以全面了解自身产品在生产过程中的温室气体排放情况，从而有针对性地优化生产流程、改进生产工艺、降低能耗和排放；另一方面则有助于推动绿色供应链的建设，促使上下游企业共同关注产品环境影响，形成绿色发展的合力。

目前轴承钢产品的碳足迹核查涉及生产 1 吨轴承钢产品生命周期内（从摇篮到大门）的相关过程，包括上游原料获取和生产、原料运输、产品生产、废弃物处置等过程，部分产品的温室气体排放数据见表 1。

表 1 1 吨轴承钢产品的生命周期内（从摇篮到大门）的温室气体排放量

钢种	产品类型	温室气体排放量, kgCO ₂
100CrMnSi6-4	电炉轴承钢	2015.88
100CrMnSi6-4	转炉轴承钢	2625.11
100Cr6	电炉轴承钢	1939.08
100Cr6	转炉轴承钢	2581.91

3. 轴承钢绿色技术与典型绿色产品

3.1 低碳生产技术

兴澄轴承钢的全流程生产过程综合采用循环经济技术、资源综合利用技术、清洁生产技术、余热余能回收技术等多项低碳生产技术进行生产(图 1)，从炼铁源头的烧结开始利用烧结合余热发电，利用智能燃烧技术不断追求高炉热风炉的极致燃烧，并且高炉配套了 TRT 发电设备；炼钢过程应用转炉烟气的余热回收和钢包加盖节能技术；轧钢过程使用蓄热式加热炉、节能电机和高效水泵等实现节能减排。轴承钢全流程的低碳生产技术的应用，实现了吨

钢碳排放降低 7.63%。

兴澄特钢致力于生产设备节能技改，3号 3200m³高炉和 400m²烧结机获评全国节能降耗“优胜炉”称号。3号 3200m³高炉中采取精益热风炉操作等措施，降低高炉煤气消耗，精益化耐材浇筑工艺管理，降低吨铁耐材消耗，持续提升技术经济指标和节能降耗水平。400m²烧结机采用烟气内循环工艺，把烧结机风箱的烟气自由组合循环到烧结机台车料面使用，降低固体燃料，并且在混匀矿中配入适量的氧化铁屑和磁铁矿粉，降低烧结能源消耗，大幅提高能效水平。

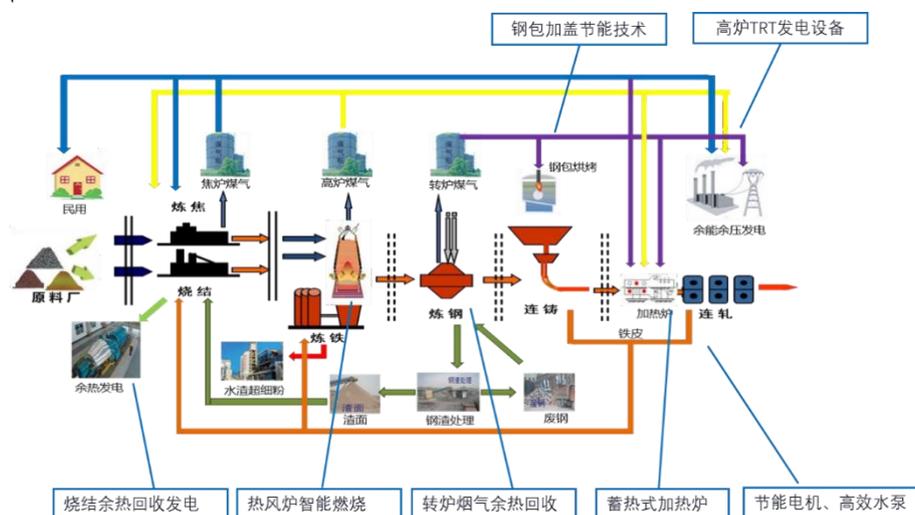


图 1 全流程采用多项低碳生产技术

除了轴承钢的生产全流程应用低碳生产技术以外，兴澄特钢采取多举措提升自发电及绿电使用比例，减少碳排放。通过建设高温高压煤气发电机组，回收利用钢铁生产过程中富余的冶金煤气，实现年发电量约 35 亿千瓦时；2022 年相继建设 3 台超高温亚临界煤气发电机组，满负荷生产可新增发电量约 19 亿千瓦时。同时推进厂房屋顶光伏项目，已建成 70 兆瓦光伏项目，年产生绿电约 1 亿千瓦时。2022 年持续推进可再生能源项目，拟建设光伏及风力发电，共计装机 45 兆瓦，建成后预计可新增绿电 6500 万千瓦时。

3.2 智能制造技术

目前，我国钢铁产业正处于结构调整的关键时期，智能制造已成为当今

制造业的核心竞争力。2023年12月14日，世界经济论坛(WEF)公布最新一批“灯塔工厂”名单，兴澄特钢在全球上千家入选工厂中脱颖而出，成为本次唯一一家钢铁行业“灯塔工厂”，也成为全球特钢行业首家“灯塔工厂”。为满足全球对定制钢材快速增长的需求，同时应对原材料和能源供应不稳定等问题，兴澄特钢部署了40多个智能(4IR)用例，实现“高定制”“高品质”“高效率”“可持续”的有机统一，展示了特钢技术的高度及其创造价值的内核。

通过构建“智能互联、智能装备、智能工厂、IT基础设施”一体化的智能制造体系(图2)，从四个维度持续推进智能制造建设，以点带面，先易后难，着力提升数字化管理能力，以数字制造、柔性制造、智慧制造推动制造模式转变。伴随智能制造的深入应用，兴澄特钢的定制订单增加了35.3%，不合格品率降低了47.3%，吨钢能耗降低了10.5%^[9]。

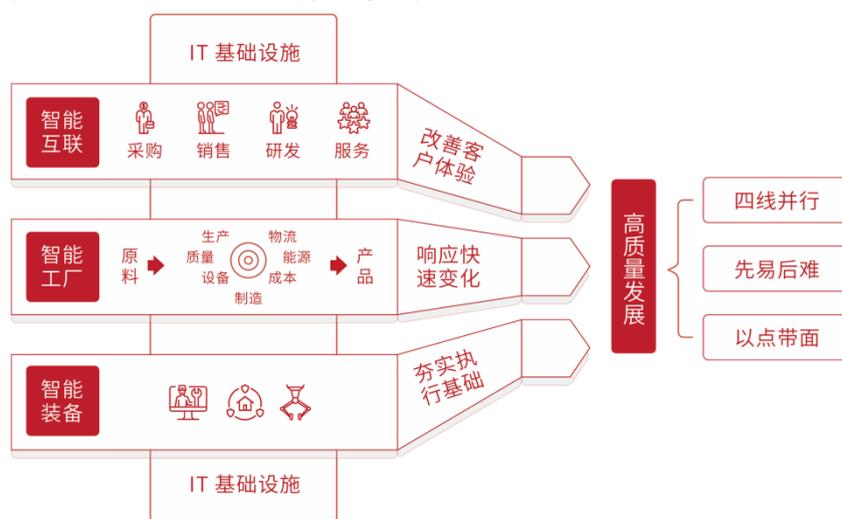


图2 智能制造体系示意图

3.3 长寿命高稳定性轴承钢绿色高效产业化核心技术

目前，日本、瑞典和美国等发达国家的高品质轴承钢生产技术均以模铸、连铸等真空脱气工艺为主^[10-12]，连铸技术水平不断迭代更新并逐步替代模铸。随着我国先进制造领域高端装备用轴承的大型化和高质量发展，以“超大规模连铸坯”替代“大型模铸锭”和“大型电渣锭”成为高品质轴承钢低碳化

发展的必然趋势。

兴澄特钢是世界上最大单体特钢生产企业，高性能轴承钢荣获工信部“制造业单项冠军产品”，产销量连续十三年世界第一。近年来，在以轴承钢为代表的高品质特殊钢绿色高效制造领域获国家科学技术进步二等奖等国家级/省部级奖励 6 项，主持或参与起草了轴承钢产品国家标准 7 项和国际 ISO 标准 1 项，授权国家专利 69 项。在国家“十三五”重点研发计划等项目的支持下，兴澄特钢攻克了轴承钢冶金质量控制、高品质特殊钢连铸等关键共性技术难题：

1) 形成了 $[O] \leq 5 \text{ ppm}$ 、 $[Ti] \leq 10 \text{ ppm}$ 的超洁净冶炼平台，开发了硫化物变性与氧化物冶炼耦合的夹杂物控制技术；

2) 首创世界最大规格直径 1200 mm 圆坯连铸成套装备，形成了特大型连铸坯凝固进程和表面温度控制技术、轻 + 大压下组合压下等系列核心技术；

3) 进行了大压缩比非均温轧制技术研究，形成了轴承钢大压缩比非均温高质量塑性成形技术；

4) 建立了轴承钢冶炼-连铸-轧制全流程质量智能化控制平台，大幅提升冶金质量和疲劳性能水平的稳定性。

3.4 轴承钢绿色产品

(1) 超低碳排放精品轴承钢

全球气候变化已然成为当代人类面临的最大挑战，低碳可持续发展是全球制造业发展的必由之路。全球绿色低碳转型离不开特钢。高强轻量化、长寿命特钢支撑钢铁使用效能提升，促进高端制造。风电、光伏、水电、氢能等清洁能源用钢支撑全球能源转型，为解密全球气候难题贡献特钢智慧。特钢低碳高质量发展成为当前乃至未来推进全球制造业及其产业链可持续发展的重要环节。

2024 年 5 月，兴澄特钢生产的超低碳排放精品轴承钢成功交付舍弗勒，

成功实现产品碳强度降低 50%以上。基于舍弗勒对钢铁材料的低碳需求，兴澄特钢通过测算产品碳足迹，规划低碳减排路线图，与客户共同开发钢铁低碳解决方案，推动低碳技术进步和绿色转型。生产绿钢的原料 95%以上采用废钢，电炉采用更高效环保的新设备，废钢经提前预热后投入电炉，入炉比例动态调整，产生的余热进行回收利用，实现了节能降耗和提高资源利用效率，满足了舍弗勒对绿钢产品的要求。

此次超低碳排放轴承钢产品成功供应国际顶尖汽车终端，有效推进了舍弗勒集团低碳目标进程，同时，该产品满足了全球高端汽车市场降碳的迫切需求，为全球高端汽车产业链降碳树立了标杆。

（2）清洁能源材料——大规格风电轴承滚动体用连铸轴承钢

风能作为一种无污染和可再生的绿色环保新型能源，在常规能源告急和全球生态环境恶化的双重压力下，风能的开发势在必行。风电轴承是风机的核心设备，风电轴承滚动体作为风电轴承机构的重要传动装置，对原材料轴承滚动体用钢要求很高。并且目前大尺寸风电轴承滚动体用钢主要依靠进口。

兴澄特钢采用当今世界先进的“高炉铁水→（KR 预处理）→转炉（BOF）初炼→钢包炉 LF 精炼→RH 脱气炉真空脱气→连铸→开坯及连轧成材→理化检验→球化退火处理→车光→精整及探伤→钢种确认→入库”的工艺技术，通过优化生产工艺流程、工艺参数，提高钢的纯净度、降低氧含量和有害元素含量，改善钢材内部组织等关键质量指标，研制和生产出具有世界先进水平的高纯净度、高均匀性、高稳定性风电轴承滚动体用钢，使产品满足 SKF、SCHAEFFLER 等技术要求，最终实现产品的批量生产，从而替代模铸，代替进口，打开国际高端市场，填补国内连铸生产风电轴承滚动体用钢的空白，推动风电行业的发展。

4. 近零碳排放技术探索

兴澄特钢拟打造国际一流、国内领先的近零碳排放电炉示范生产线，经测

算，采用“近零碳排放”电炉炼钢工艺，吨钢碳排放量可降低到 0.15 吨以下，实现减排 90 %以上。目前兴澄特钢设计采用“原料、能源替代+工艺装备改造”的路径实现“近零碳排炼钢模式”。

(1) “100%废钢+100%绿电”

100%废钢冶炼通过利用废钢资源，节省了长流程炼钢必须的焦化、烧结、高炉等高排放生产环节，每利用一吨废旧钢材相当于减排 1.6 吨二氧化碳。在同等生产规模下，电炉炼钢可以有效降低 75%以上的污染物排放。通过自产光电、风电、微风发电等方式实现 100%绿电冶炼。光电方面现有光电 22 兆瓦，2024 年完成 20 兆瓦建设。预计年发电 4600 万千瓦时。风电方面计划到 2024 年底完成 16.8 兆瓦 + 28 兆瓦建设，预计年发电 10880 万千瓦时。微风发电方面计划总装机数量 150 台套，2024 年底完成 15 兆瓦建设，预计年发电 7500 万千瓦时。

(2) “生物能源替代+炼钢用耐材、辅料采用无碳材料”

生物能源替代思路如图 3 所示。计划年产生生物天然气产量 990 万立方米，生物有机肥 2.2 万吨，年实现二氧化碳减排量 14.9 万吨。项目建成后完全能满足电炉冶炼及耐材烘烤的需求。

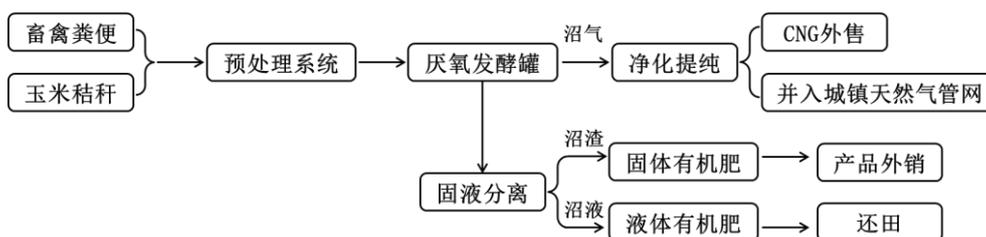


图 3 生物能源替代思路

经过原辅料降碳测算，炼钢用耐材、辅料采用无碳材料，可以实现合计降碳 0.13256 吨/吨钢（表 2）。

表 2 原辅料降碳测试表

原辅材料	单位	消耗 指标	降碳措施	降碳值	合计 CO ₂ 降 低值
合金类	kg/t	40	采用低碳合金	2.80	10.27
碳粉类	kg/t	15	不采用碳粉造渣，采 用生物质碳造泡沫渣	12.45	45.65
可燃气类	m ³ /t	20.1	采用生物质气体	17.60	64.54
其他含碳辅材	kg/t	18.3	采用无碳或低碳材料	3.30	12.10
合计 (kg/t)				36.15	132.56

(3) “工艺装备改造”

近零碳排生产工艺流程如图 4 所示。通过装备升级改造，同时采用钢包氢气烘烤技术、电炉炉壁氢氧枪技术、钢坯氢氧切割技术等，助力近零碳排生产的实现。



图 4 近零碳排生产工艺流程

5. 结论

(1) 兴澄特钢持续加强轴承钢绿色管理水平：对企业生产经营等全过程碳排放、碳资产、碳交易、碳中和活动进行系统管理，并形成科学体系，通过 EATNS 碳管理体系认证，不断提升碳管理水平；推进超低排放改造，颗粒物、二氧化硫、氮氧化物较超低排放治理之前的减排幅度分别为 18.9%、62.2%、

58.3%；发布 100CrMnSi6-4、100Cr6 等轴承钢产品碳足迹核查声明书，促进绿色低碳发展。

(2) 兴澄特钢不断开发轴承钢绿色技术：兴澄轴承钢的全流程生产过程综合采用多项低碳生产技术进行生产；通过构建一体化的智能制造体系并深入应用，兴澄特钢的定制订单增加了 35.3%，不合格品率降低了 47.3%，吨钢能耗降低了 10.5%；攻克攻克了轴承钢冶金质量控制、高品质特殊钢连铸等关键共性技术难题，形成长寿命高稳定性轴承钢绿色高效产业化核心技术。

(3) 兴澄特钢精心打造轴承钢绿色产品：生产的超低碳排放精品轴承钢成功交付舍弗勒，成功实现产品碳强度降低 50%以上；开发的大规格风电轴承滚动体用连铸轴承钢，替代模铸，代替进口，打开国际高端市场，填补国内连铸生产风电轴承滚动体用钢的空白，推动风电行业的发展。

(4) 兴澄特钢积极探索近零碳排放技术：设计采用“原料、能源替代+工艺装备改造”的路径，通过“100%废钢+100%绿电”以及“生物能源替代+炼钢用耐材、辅料采用无碳材料”等方式，实现“近零碳排放”电炉炼钢工艺，打造国际一流、国内领先的近零碳排电炉示范生产线。

参考文献

[1] 司俊龙, 艾琳, 邱辰. 2023 年中国风电发展现状与展望 [J/OL]. 水力发电, 1-5 [2024-10-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1845.TV.20241009.1543.004.html>.

[2] 忻剑鸣. “双碳”目标下城市轨道交通绿色低碳发展路径探索 [J]. 建筑科技, 2024, 8(9): 18 - 20.

[3] 陈敏, 李锋, 尹青, 等. 我国高端轴承钢的研发进展 [N]. 世界金属导报, 2021: B08.

- [4] 李涛, 马永强. 高端轴承钢生产及应用技术趋势 [N]. 世界金属导报, 2021: B09.
- [5] 曹文全, 俞峰, 王存宇, 等. 高端装备用轴承钢冶金质量性能现状及未来发展方向 [J]. 特殊钢, 2021, 42 (01): 1 - 10.
- [6] 李昭昆, 雷建中, 徐海峰, 等. 国内外轴承钢的现状与发展趋势 [J]. 钢铁研究学报, 2016, 28 (03): 1 - 12.
- [7] 吕富阳. 轴承钢的疲劳寿命与夹杂物的评定 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
- [8] 尹青, 曹文全, 吴小林, 等. 高洁净轴承钢 GCr15 滚动接触疲劳机制研究 [J]. 特殊钢, 2023, 44 (5): 113 - 120.
- [9] 中信泰富特钢. 中信泰富特钢 2023 年可持续发展报告 [R/OL]. 中信泰富特钢, 2024. <https://www.citicsteel.com/uploadfile/2024/0507/20240507112847757.pdf>.
- [10] 王一德, 唐荻, 党宁. 国外特殊钢产业的特点及发展趋势 [J]. 钢铁, 2013, 48 (06): 1 - 6.
- [11] 宗男夫, 张慧, 张兴中. 国内外高品质轴承钢净化与均质化控制技术的进展 [J]. 轴承, 2017 (01): 48 - 53.
- [12] 王忠英, 兰德年, 刘树洲. 特殊钢连铸现状及发展 [J]. 冶金管理, 2002 (S1): 30 - 35.