



# 燕赵钢铁实验室

## 技术成果

2025 年 7 月

# 目 录

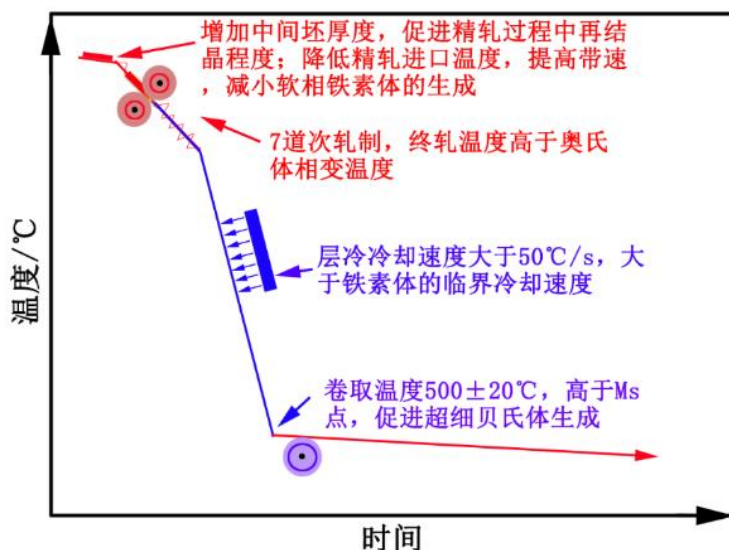
第一部分 高端化技术成果 .....	1
技术成果 1: 合金钢强度升级力学冶金关键技术 .....	1
技术成果 2: 超超高硬度高韧性微纳结构低合金钢制造技术 .....	2
技术成果 3: 高性能海陆风电用钢生产及应用技术 .....	3
技术成果 4: 低合金含量高强韧性冷轧汽车钢制备技术 .....	4
技术成果 5: 氧化物冶金理论研究与技术开发 .....	5
技术成果 6: 高碳高强工具钢生产关键技术 .....	6
技术成果 7: 高性能无取向硅钢及制备加工技术 .....	7
技术成果 8: 高强耐候贝氏体热轧/冷轧薄带材生产技术 .....	8
第二部分 智能化技术成果 .....	9
技术成果 1: 钢铁产品全生命周期碳足迹管理方案与智能平台 .....	9
技术成果 2: 便携式 LIBS 废钢成分分析仪 .....	10
技术成果 3: 基于大模型的高炉冶炼智能化转型关键技术 .....	11
技术成果 4: 连铸坯/连轧板材表面缺陷在线检测技术 .....	12
技术成果 5: 基于深度学习的废钢分类评级技术 .....	13
第三部分 绿色化技术成果 .....	14
技术成果 1: 烧结烟气 CO、NO 源头削减与过程协同治理新技术 .....	14
技术成果 2: 转炉熔渣气化脱磷绿色循环炼钢关键技术及应用 .....	15
技术成果 3: 高炉富氢冶炼技术 .....	16
技术成果 4: 低碳均质烧结技术 .....	17
技术成果 5: 钢铁企业低压余热蒸汽发电和钢渣改性气淬处理技术 .....	18
技术成果 6: 高炉熔渣在线调质直接纤维化关键技术 .....	19
技术成果 7: 冶金粉尘协同资源化关键技术 .....	20

## ◆ 第一部分 高端化技术成果

### 技术成果 1: 合金钢强度升级力学冶金关键技术

#### ➤ 技术内容

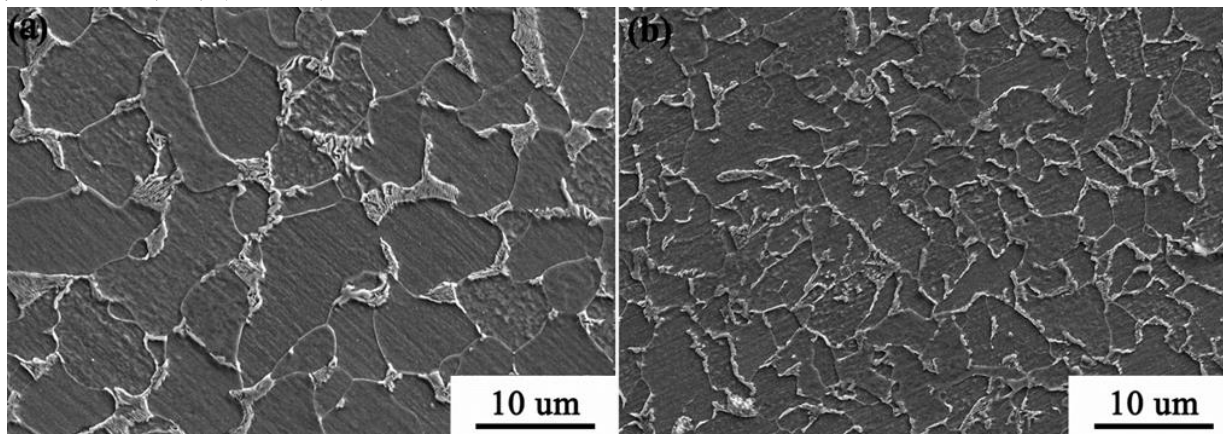
开发了合金钢强度升级力学冶金关键技术，解决合金钢合金成本高、性能稳定性差问题，通过控制轧制和控制冷却，同时优化冷却路径和卷取温度，实现再结晶行为的合理控制，实现相变行为的精准控制，在不增加合金和工艺成本的基础上，实现细晶强化和相变强化的协同，实现合金钢综合性能的提升。



力学冶金关键参数优化

#### ➤ 优势特色

充分发挥力学冶金的作用，通过消除和制造钢中缺陷（尤其是界面）、细化晶粒等手段来提高材料的综合性能，该技术可用于结构钢、低合金高强钢等钢种的降本提质。目前该技术已用于工业大生产，能使普通结构钢的合金成本降低 25 元/吨。



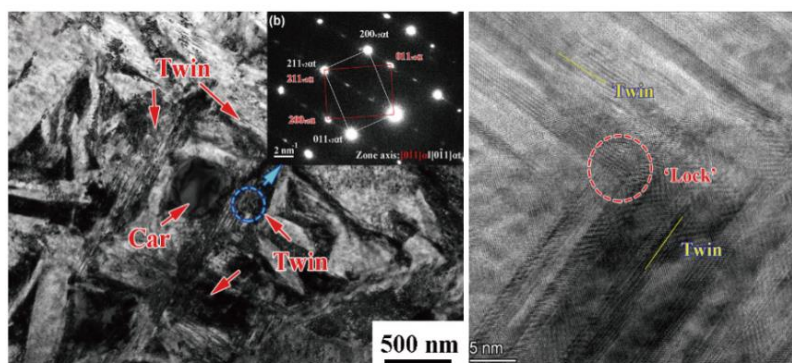
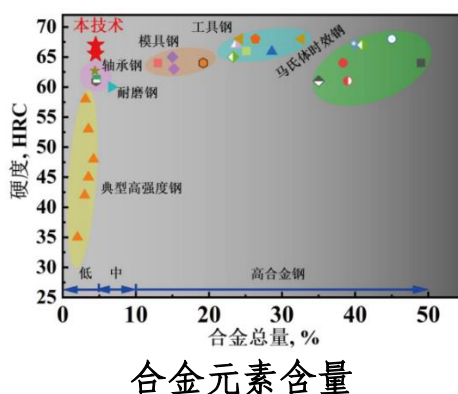
工艺升级前后组织形貌

## 技术成果 2: 超超高硬度高韧性微纳结构低合金钢制造技术

### ➤ 技术内容

利用贝氏体相变过程中，残余奥氏体逐渐富碳，在冷却至室温过程中促进生成纳米孪晶马氏体，形成纳米贝氏体-纳米孪晶马氏体的双纳米结构，可显著提高低合金钢的硬度。同时，保留有高含量的残余奥氏体，使得材料保持高韧性，以及高加工硬化能力。基于此，研发本项技术成果。

提出协同控制奥氏体动态再结晶与多阶相变行为获得微纳结构原理，充分发挥微观界面强化机制，实现低合金钢的超超高硬度和高韧性。开发了低合金钢微纳结构热加工技术，首次在低合金高碳钢实现超超高硬度 HRC65-67，并兼具高韧性 AK30-60J。阐明碳化物-纳米贝氏体基体间应力诱发交错分布微纳米孪晶马氏体 (<10 nm 厚) 增硬、碳原子短程扩散耦合高比例残奥增韧机制。



微观组织表征

### ➤ 优势特色

采用本技术制备的钢具有高的硬度，可以达到 64HRC 以上，适用于制造高端汽车齿轮箱轴承、长寿抗冲击耐磨钢球等高端零部件；采用本技术制备的钢在具有高硬度的同时，还有较高含量的残余奥氏体，适于污染环境下轴承等关键基础零部件的制造。

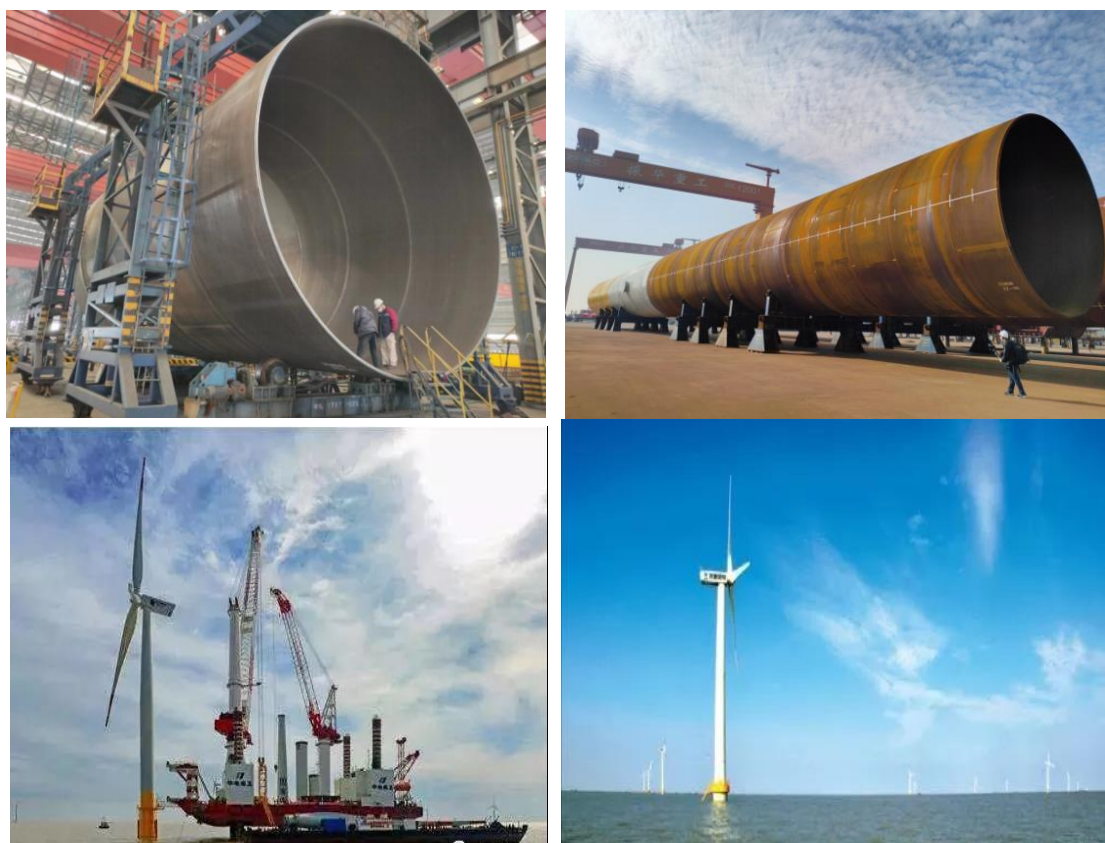
### 技术成果 3: 高性能海陆风电用钢生产及应用技术

#### ➤ 技术内容

本技术针对海洋和陆地风电用钢的关键技术难点，开发出了风电钢用纯净钢精炼技术，大幅提高风电钢板的探伤性能和卷制性能，钢板可满足无预热和大线能量焊接。开发出风电钢超低碳 Nb 微合金化技术和 TMCP 轧制技术，TMCP 轧制成材最大厚度 120mm，强度级别 355~500MPa 级别，钢板经焊接后满足国标 I 级探伤和 TOFT 探伤标准要求；开发出大厚度风电钢专用成分体系和热处理技术，最低可满足 -60℃ 的低温使用环境。

#### ➤ 优势特色

本技术结合用户需求，按照国标、欧标及船级社标准，开发生产出了 DH/EH36、S355G10、S420/500 等系列风电用钢 20 余个牌号，并在国内多个大型海上和陆地风电项目中实现应用，应用过程焊接和卷制性能良好，总应用量超过 30 万吨。



风电钢卷制及焊接现场情况

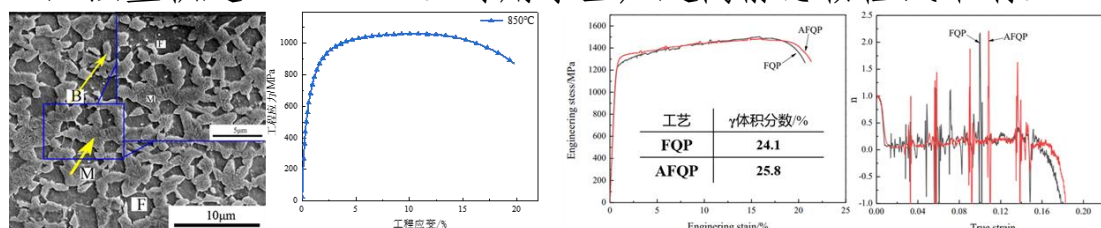
## 技术成果 4: 低合金含量高强韧性冷轧汽车钢制备技术

### ► 技术内容

综合考虑合金成本与冷轧工艺的适用性, 制备低合金含量高强韧性冷轧汽车钢, 包括高性能复相 (CH) 钢、一步配分淬火配分 (QP) 钢等。

#### (1) 高性能 CH 钢组织与性能调控技术

在双相钢低合金含量的基础上, 通过添加微量合金元素, 扩大贝氏体相区, 使双相组织变为多相组织, 从而提高其静态韧性, 扩大了双相钢的实际应用范围, 生产工艺简单易实现。60%压下率、冷轧退火 (850℃) 板相组成为铁素体、马氏体与贝氏体。抗拉强度大于 1000 MPa, 总伸长率大于 22%, 强塑积超 23 GPa·%。可用于生产超高静态韧性汽车钢。



冷轧复相钢组织与性能

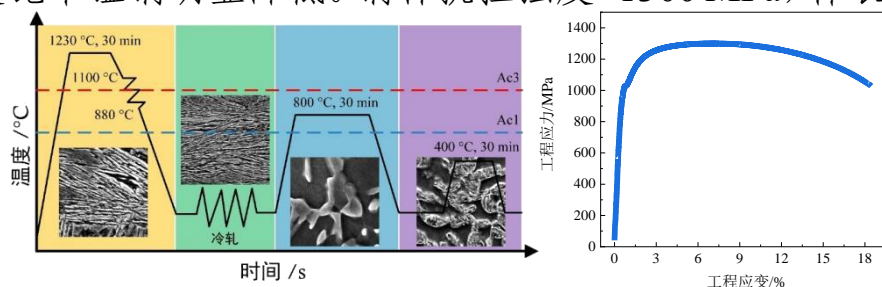
AFQP 预处理后加工硬化能力提高

#### (2) 先进高强 Q&P 钢生产技术

该技术在传统连退产线上能够实现。基于高强塑积 Q&P 钢化学成分的一步配分工艺, 可降低成本投入, 节约能耗。并且在较低冷速且无需淬火后提温条件下即可实现 Q&P980 钢生产, 可缩短工艺流程, 简化生产线配置。实现了“F+M+RA”组织的协同调控, 消除了吕德斯带。AFQP 工艺下, 抗拉强度可达 1500MPa, 伸长率为 20.2%, 力学性能优异。

#### (3) 相变诱导塑性贝氏体钢 (TBF) 低合金化技术

TBF 钢在成本、生产工艺等方面具有自身优势, 综合性能可填补中锰钢与 Q&P 钢间的性能差距。该技术通过热轧-冷轧-800℃两相区退火-400℃贝氏体区时效, 获得了由铁素体、贝氏体/回火马氏体、新生马氏体和残余奥氏体组成的多相微观结构。工艺较 Q&P 钢更为简单, 合金成本和冷轧产品工艺难度比中锰钢明显降低。钢种抗拉强度~1300 MPa, 伸长率~18.5%。



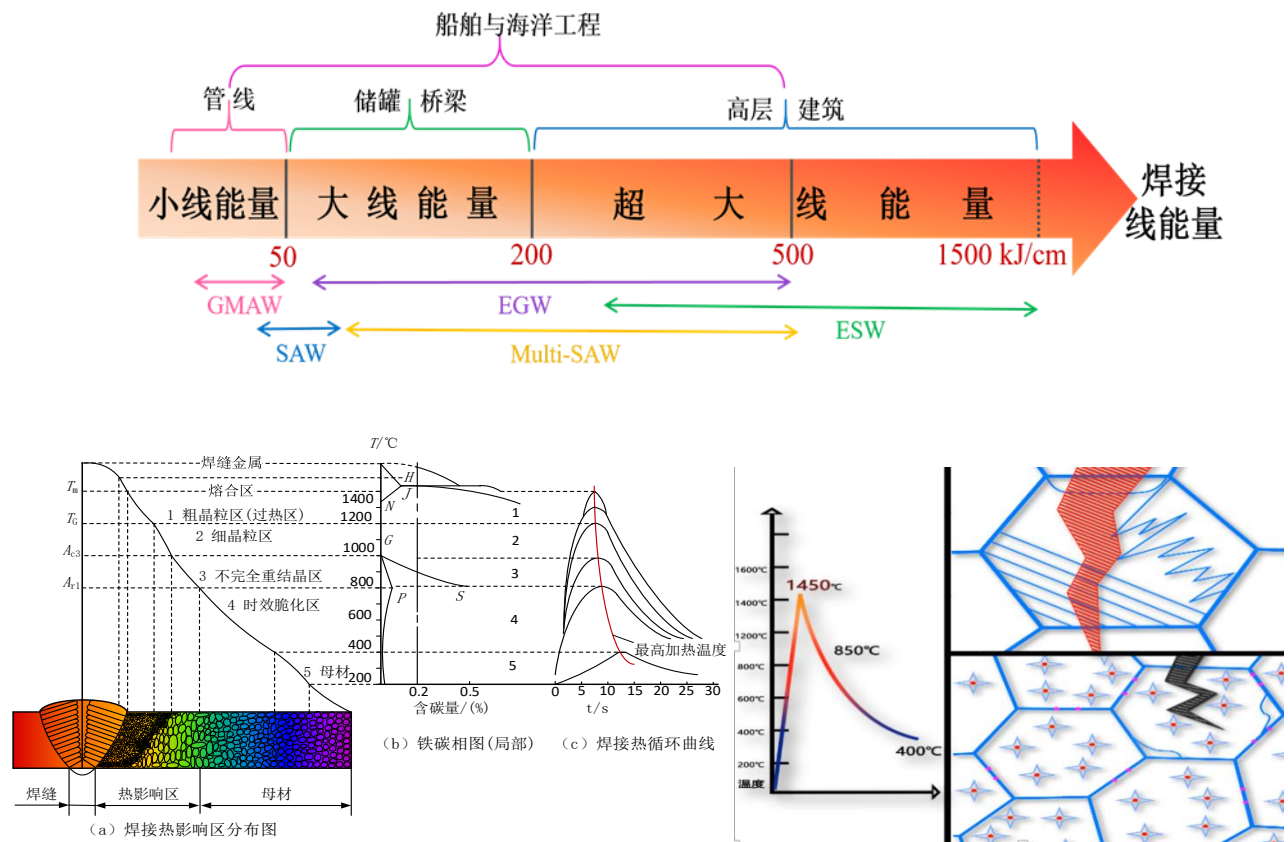
冷轧工艺和性能

# 技术成果 5: 氧化物冶金理论与技术开发

## ➤ 技术内容:

传统低合金高强钢在大热输入焊接时,焊接热影响区(HAZ)奥氏体晶粒严重粗化,生成韧性劣化组织、严重威胁工程使用安全性。厚板钢种能否适用于大线能量焊接已成为性能是否合格的重要指标。

本技术以促进晶内铁素体形核、生长为目标,以夹杂物控制为手段,围绕有益夹杂物体系设计与控制、微细夹杂物弥散分布机理与控制、晶内铁素体优先析出及控制、多元素微合金体系设计与控制等方面开展理论研究及关键技术开发,形成具有自主知识产权的氧化物冶金技术,成功应用并工业生产出高强度、高韧性大线能量焊接船体钢。



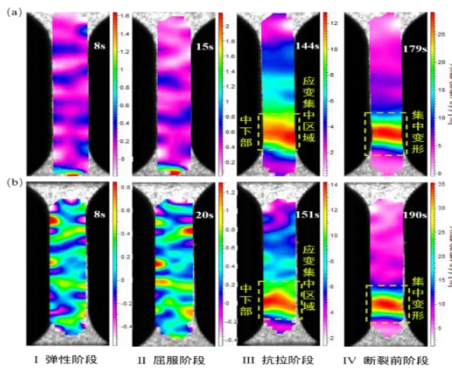
## ➤ 优势特色:

基于本项目,近年来与邯鄲钢铁集团有限责任公司、唐山中厚板材有限公司、首钢京唐钢铁联合有限责任公司等多家钢铁企业合作,新增销售额 65.09 亿元、利润 6.19 亿元。建立了大线能量焊接船体钢生产示范工程,极大推动我国船舶与海洋工程及相关产业发展。促进我省钢铁工业产品结构转型升级,对加快实现“钢铁大省”向“钢铁强省”转变具有重要意义。本项目成果可推广至高压容器钢、管线钢、高建钢等高附加值产品的开发及性能提高,大幅提升我国钢铁行业技术竞争力。

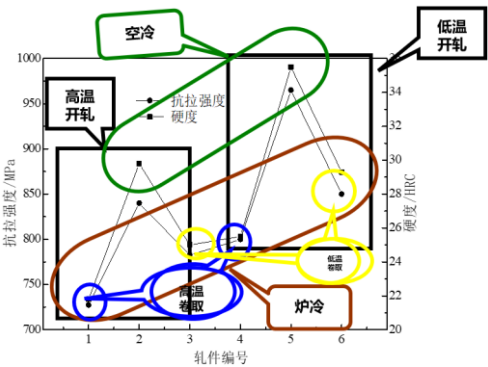
# 技术成果 6: 高碳高强工具钢生产关键技术

## ➤ 技术内容:

针对热轧高碳强工具钢经常出现的塑韧性缺陷、组织性能不稳定、氧化铁皮去除不净、扁卷等产品质量缺陷问题,开发了高碳高强热轧工具钢大批量稳定生产关键技术。通过项目实施,解决了高性能工具钢冷轧断带、开平脆断、分层和起皮等塑韧性缺陷问题,调控后质量异议发生率 $\leq 2.5\%$ ;提出了解决高性能工具钢组织性能不均匀性的指导性控轧控冷优化参数,调控后合格率 $\geq 98\%$ ;得到了卷取工艺参数对氧化铁皮特征的演变规律,提出了卷取温度和卷后冷速的组织性能优化和卷型质量提升的协同调控措施,调控后 3mm 以下规格扁卷率 $\leq 2.7\%$ 。



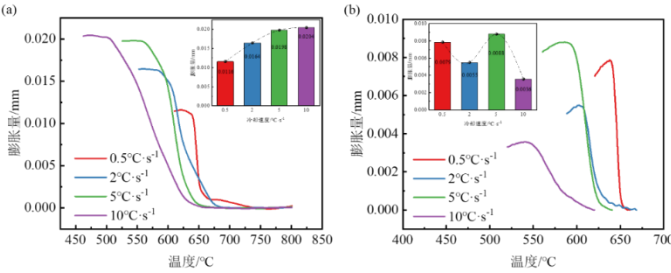
脆断板拉伸过程不同阶段下的应变云图



逆向式控制轧制方案及实施效果

## ➤ 优势特色:

在 CCT 与 TTT 曲线的基础上,结合有限元模拟,通过研究相变行为对扁卷的影响机理,以获得优异组织与性能的同时,也对卷取后带钢的卷形质量提供保障,从而以抑制扁卷发生的情况下达到符合生产需求的力学性能,同时为有效解决扁卷缺陷和提高产品性能提供理论指导。通过开展热轧高碳高强工具钢扁卷与组织性能协同调控、窄范围工艺参数的控制以及氧化铁皮形成机制与酸洗行为的研究,探讨相变行为对扁卷的影响机理,优化热轧工艺参数以及阐明表面氧化铁皮结构、厚度和相组成的形成机理,实现材料的塑韧性、组织性能均匀性、氧化铁皮易酸洗去除和卷型质量的良好匹配,使得降本增效提升 15~20%。



基于相变行为的卷型质量协同调控技术



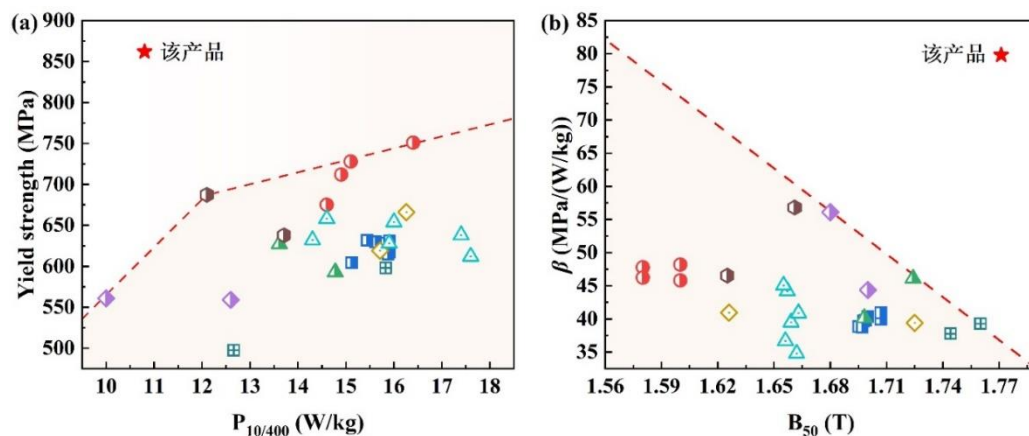
带钢卷型质量

## 技术成果 7: 高性能无取向硅钢及制备加工技术

### ► 技术内容:

高速电机（如新能源汽车的驱动电机）的发展要求转子用硅钢片需要更高的强度，而硅钢的强度与磁性能往往相互矛盾。为了实现力磁性能的平衡优化，基于高强度无取向硅钢的小样本数据，采用数据增强和逆向设计策略实现了合金成分的快速设计，成功开发了屈服强度 $\geq 750\text{MPa}$ ， $P_{10/400} \leq 12.1\text{W/Kg}$ ， $B_{50} \geq 1.7\text{T}$  的高性能无取向硅钢合金成分（厚度  $0.2\text{mm}$ ）。

针对设计的合金成分，系统研究了中间工艺参数（热轧、二次轧制/退火和时效）对合金组织性能的影响规律，采用多目标优化算法对工艺参数进行迭代优化，实现了合金综合性能的进一步提升，实测性能为屈服强度约  $860\text{MPa}$ 、 $P_{10/400}$  约  $10.8\text{W/Kg}$ ， $B_{50}$  约  $1.77\text{T}$ 。通过机器学习方法辅助硅钢合金成分设计与工艺优化，解决了硅钢强度与磁性能难以同时优化的难题。



所研发产品与其他无取向硅钢性能的对比

(a) 屈服强度-铁损; (b) 屈服强度/铁损-磁感应强度

### ► 优势特色:

在国内新能源汽车市场迅猛发展的背景下，国内电动汽车龙头企业相继推出超高速电机，其核心部件均采用高强度无取向硅钢片，凸显了开发兼具高强度与优良磁性能无取向硅钢的迫切需求与重要意义。该技术针对高速电机转子用硅钢片力磁性能矛盾的行业难题，运用机器学习方法快速开发了综合性能优异的硅钢成分，大幅缩短了研发周期与成本。与传统无取向硅钢相比，在未对铁损产生明显不利影响的前提下，实现了强度的大幅提升，在新能源汽车驱动电机等高速电机领域具有很好的应用前景，助力我国在新能源汽车核心部件技术领域占据优势地位，具有巨大市场潜力。

## 技术成果 8: 高强耐候贝氏体热轧/冷轧薄带材生产技术

### ► 技术内容:

针对光伏支架、光伏组件边框材料强度、成型、耐蚀、经济性不协调的行业问题，提出了新型高强耐候贝氏体钢的成分工艺设计方法，基于少Cr-Ni 低成本的成本设计，采用热轧、冷轧、连续退火工艺调控，组织以铁素体+粒状贝氏体替代传统的铁素体+珠光体组织，成功开发了抗拉强度 $>850\text{MPa}$ 、屈服强度 $>550\text{MPa}$ 、A80 延伸率 $>18\%$ 、T0 弯折完好、腐蚀速率降低 1 倍的高强韧、易成型、高耐候、经济性贝氏体热轧/冷轧薄带生产技术。



### ► 优势特色:

该技术可以替代传统的 Q355 热轧/冷轧薄带，在光伏支架、光伏组件边框、光伏幕墙、钢制窗户边框等对耐候、冷成型性能要求高的领域，实现轻量化和高安全性。目前开发的热轧贝氏体带材（厚度  $1.8\sim 2.5\text{mm}$ ）已替代现有的镀锌或锌铝镁带材用于光伏支架，冷轧贝氏体带材（厚度  $0.85\sim 1.1\text{mm}$ ）已替代光伏组件边框的铝合金型材，在某上市企业得到小批量应用，轻量化和经济性效益显著。

◆ 第二部分 智能化技术成果

技术成果 1：钢铁产品全生命周期碳足迹管理方案与智能平台

➤ 技术内容：

针对钢铁企业在碳排放管理方面，面临着数据分散、缺乏统一标准以及难以进行全生命周期碳足迹核算的问题，结合国内外碳排放核算标准和方法，深入比对分析欧盟与国内标准，通过对大量标准文档的研读，梳理出不同标准下数据结构和计算模型的差异与共性。对各工序及产品碳排放过程进行系统性建模，通过实地调研、数据采集与分析，确定各环节碳排放影响因素及关键参数。构建了通用性强的全产业链碳排放数据库，解决了钢铁企业碳排放数据整合与标准化问题，为全生命周期碳足迹核算提供了可靠的数据支持与算法保障。通过集成物料信息管理、工序信息管理、模型管理以及碳足迹相关项目精细化管理等功能模块。解决了钢铁企业碳排放管理过程中信息分散、分析效率低的问题，为企业提供了一站式的碳足迹分析与管理工具。



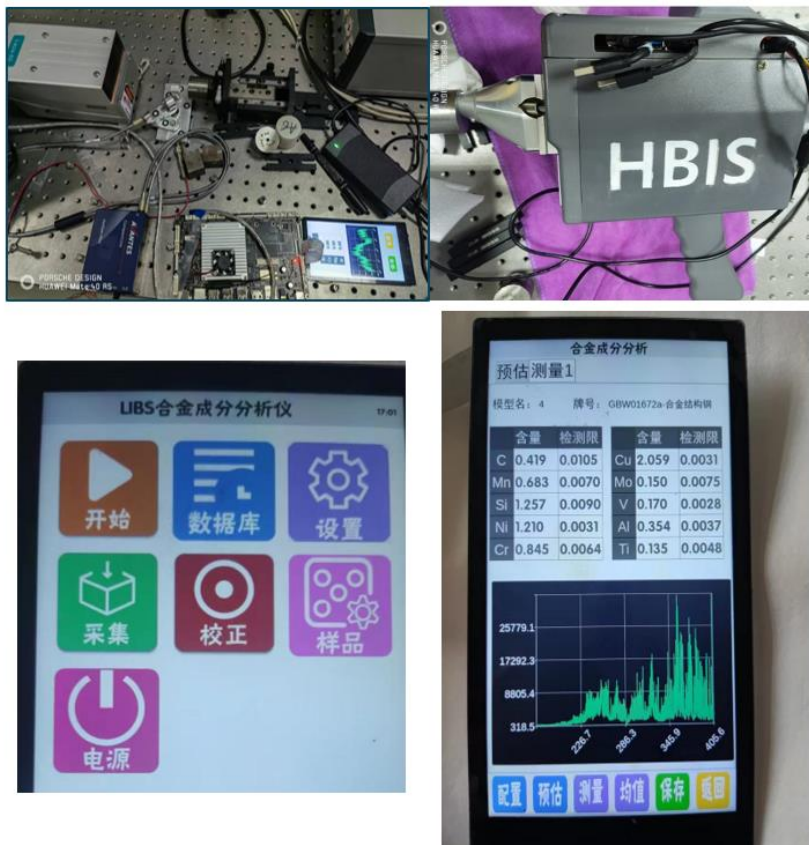
➤ 优势特色

数据库多维度的数据框架可有效适配多样化钢铁产品的碳排放管理需求，具有独特的数据架构，包含碳排放基础数据管理和碳核算算法及参数数据管理两大核心功能模块。解决了钢铁企业不同环节数据格式不一致，导致无法准确评估产品整体碳排放情况，影响减排策略制定等问题。使得企业能够对从原材料采购到产品最终使用及废弃处理的整个过程进行碳排放量化分析。目前已涵盖河北省 73 家钢铁生产及加工企业的生产数据，能精准核算各产品在不同生产阶段的碳排放数据，绘制河北省各市区县钢铁产能及碳排放热点图。平台实现了钢铁生产过程中基础数据的高效管理，通过精准的碳足迹分析，帮助企业识别出可优化的高碳排放环节，企业能够实时掌握生产过程中的碳排放动态，及时调整生产策略，实现有效减排。

## 技术成果 2: 便携式 LIBS 废钢成分分析仪

### ➤ 技术内容:

为满足炼钢工业现场实时分析的需求，自主研发了便携式废钢成分分析仪，以高精度小型化光路集成、嵌入式系统分析平台搭建以及数据挖掘人工智能算法分析为技术体系，全面解决电炉炼钢过程中成分快速精准反馈的核心难题。设备续航能力超过 2 小时，运行功耗低，可于 5 秒内完成废钢成分检测，系统内置多种人工智能算法分析模型，可针对不同钢种进行金属成分分析，牌号识别精度大于 96%。



### ➤ 优势特色:

本仪器采用自主研发的高精度小型化光路集成与嵌入式系统，结合先进的数据挖掘和人工智能分析算法，实现成分快速、精准检测。多种分析模型对复杂样品的分析能力明显优于传统检测手段，是废钢成分分析领域的标杆性成果。设备适用于钢铁企业电炉炼钢现场、废钢回收场所、金属再生资源加工等多个应用场景。在电炉炼钢工艺中，可快速识别废钢牌号，提高冶炼成品质量反馈速度，及时调整冶炼参数或工序，提高产品质量和竞争力；在废钢回收环节，可助力钢厂的废钢铁成分检验精准分类，可有效缩短分析时间、降低分析成本、提高生产效率及电炉炼钢质量。

### 技术成果 3: 基于大模型的高炉冶炼智能化转型关键技术

#### ➤ 技术内容:

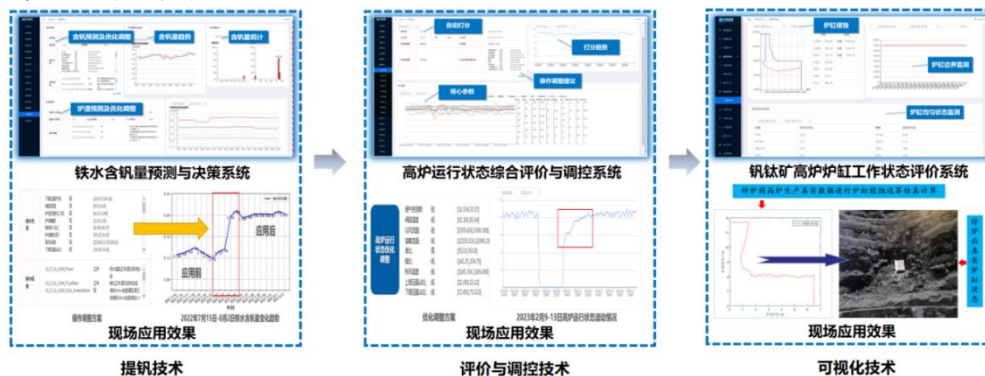
针对目前高炉炼铁工艺过程数据利用率低、智能化转型缓慢等关键问题，以复杂的高炉炼铁工艺为研究对象，聚焦高炉大数据应用与智能炼铁技术的研发，整合跨学科前沿技术并与实际现场应用需求相结合，成功实现了高炉大数据云平台交互、高炉冶炼过程的可视化、数据挖掘分析及智能优化。解决了冶金领域高炉“黑箱”操作的关键问题，以及智能化转型困难的痛点，为钢铁制造全流程绿色化、智能化发展奠定了重要应用基础。



大数据云平台与部分智能化操作系统

#### ➤ 优势特色:

该项技术成果已在河钢承钢落地，实现了高炉风量 ( $>4500\text{m}^3/\text{min}$ ) 稳定率 90% 以上，利用系数提高 14%，焦比降低 14kg/t，炉温受控率达到 95% 等指标。同时，中国钢铁工业协会科技成果评价会认为该成果达到国际领先水平。该成果的应用，可降低高炉炉况波动次数，使高炉长期稳定顺行，从而降低生产成本，提高铁水的产质量指标。同时，可减轻劳动工作强度，提升劳动生产效率和效益，降低钢铁企业的伤亡率等。对提升钢铁企业的节能减排效果也起到了积极的推动作用。该项技术成果可推动炼铁工艺数字化和智能化升级，从而增强行业竞争力，为钢铁产业绿色低碳发展和智能化转型奠定技术基础。

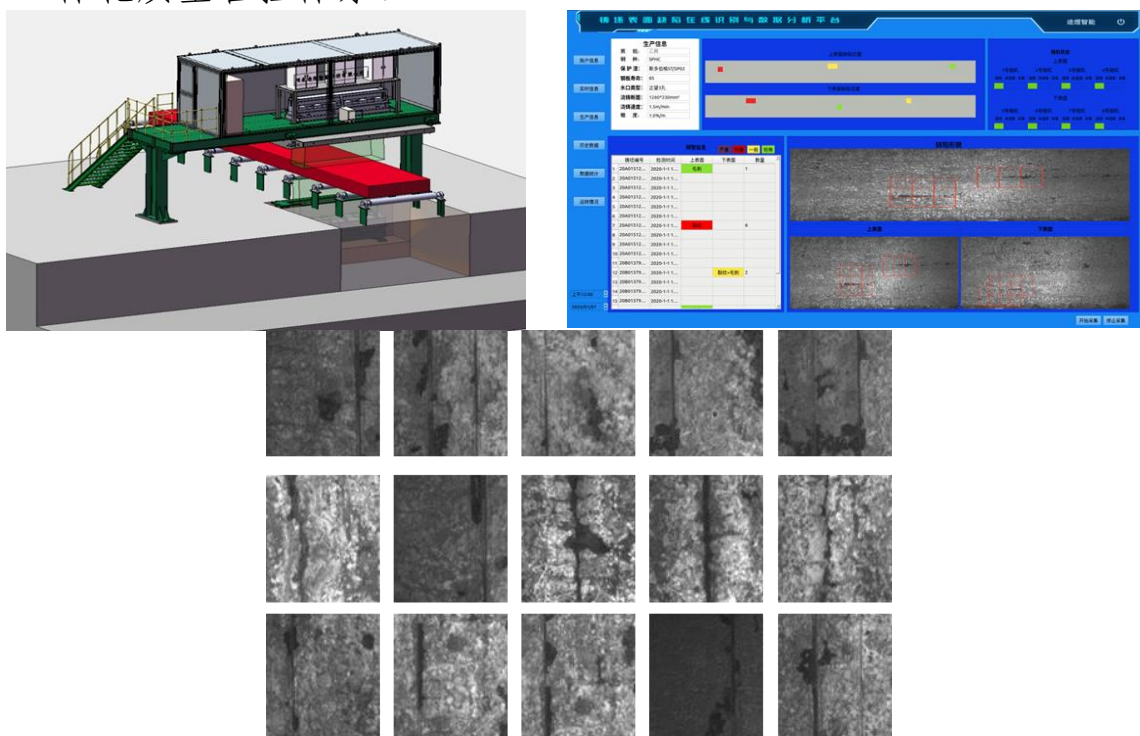


承钢现场应用效果图

## 技术成果 4: 连铸坯/连轧板材表面缺陷在线检测技术

### ► 技术内容:

连铸坯、热轧板材质量缺陷的实时检测技术，可以大幅度提升产线管理水平，对提高产线质量管控能力具有十分重要的技术意义和应用价值。成果基于智能制造理念，融合连铸连轧、机器视觉、深度学习等领域的前沿技术，并可采集连铸与热轧过程中的工艺参数与质量信息，开展针对板带表面质量问题的系统工艺优化。从而全面揭示连铸-轧制工艺参数与铸轧产品质量的影响机制和作用规律，构建一套完整的连铸、轧制过程工艺控制和一体化质量管控体系。



连铸坯/连轧板材表面缺陷在线检测系统

### ► 优势特色:

项目团队为冶金与人工智能专业交叉融合，以机器视觉、大数据分析、深度学习、机器人控制为抓手，推动钢铁制造业的智能化、数字化变革。本项目在瑞丰钢铁公司、敬业钢铁公司进行实施，可对铸坯、热轧钢板上下表面在线实时检测，可显示缺陷的位置、尺寸及缺陷种类。具有整块铸坯、钢板的拼接功能，并可按照钢板号、时间等检索方式进行“回放”查询。表面缺陷输出和缺陷判定阈值，可在线筛选缺陷输出类型和缺陷尺寸大小报警。可将缺陷的信息，包括尺寸、位置、类型以及缺陷的图像保存到数据库中，并进行检索。用户可以自行定义的缺陷判定条件进行声光报警并按甲方提供的标准要求对产品表面等级判定。

## 技术成果 5：基于深度学习的废钢分类评级技术

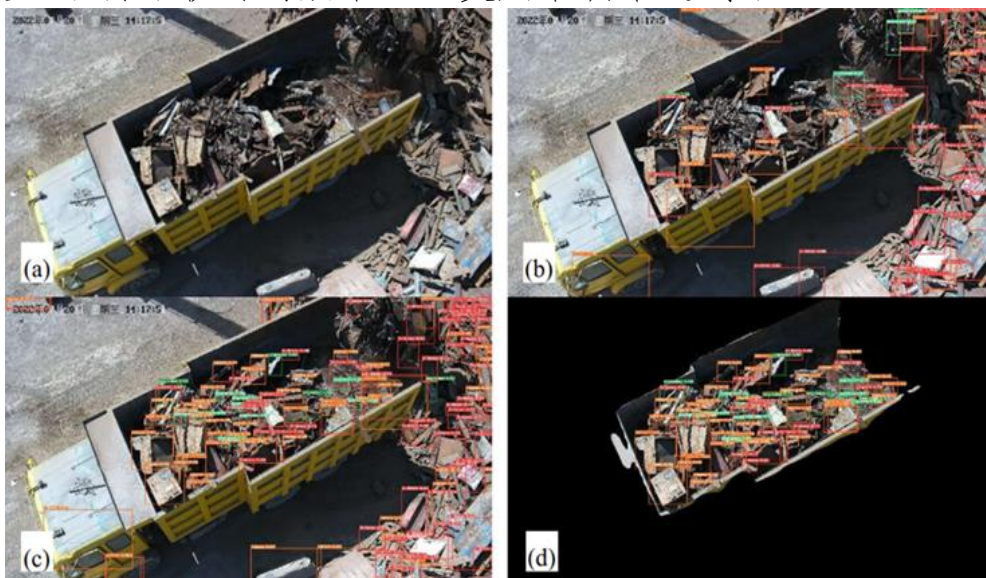
### ➤ 技术内容：

随着废钢回收与进口量的逐步扩大，废钢的多料型混装及掺杂等问题愈发凸显。常规的废钢验质主要依靠人工目测，受人为因素影响大、准确率低、效率慢。因此，利用 AI 手段精准高效地对废钢验收、入炉等环节进行智能化管理具有重要意义。本技术建立废钢判级的硬性标准，杜绝人为干扰。以数字技术的办法改进采购流程，废钢管理的精细化、可执行化。废钢验收环节实现安全验质、减员增效。



### ➤ 优势特色

团队在 2019 年开始立项基于 AI 的废钢料分类评级研究工作。学校实验室搭建了货车装载废钢模拟平台。通过数据库收集废钢各种料型图片，依靠视觉传感器提取废钢卸车过程中的图像信息，自动检索数据库数据，进行智能判定，识别料型、级别，并对杂质重量自动扣除。利用深度学习相关算法，收集不同级别的废钢样本进行训练，逐步提高模型精度。实时采集数据并检测，将检测结果送入回归预测模型中，预测出不同废钢的重量占比。当前，团队的 demo 样机已经顺利运行，对不同料型的废钢的扣杂扣重标定，取得了较好的效果。全类别准确率达到了 92.4%。

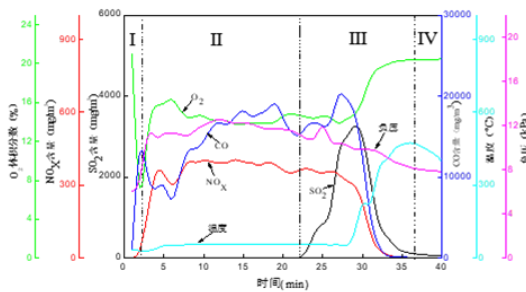


### ◆ 第三部分 绿色化技术成果

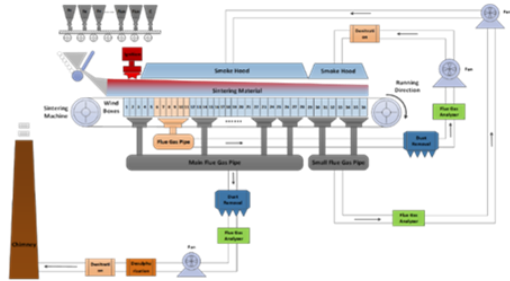
#### 技术成果 1: 烧结烟气 CO、NO 源头削减与过程协同治理新技术

##### ➤ 技术内容:

钢铁工业烧结烟气的 CO 排放浓度基本在 5000mg/m<sup>3</sup> 以上，是大气中分布最广和数量最多的污染物之一。基于烟气特征图谱大数据驱动工艺优化相结合手段，开发了通过烧结过程 CO、NO 高效协同治理技术；解决了烧结烟气 CO 无法高效低成本脱除的难题。该技术推广应用可使烧结烟气 CO 排放浓度降至 2000mg/m<sup>3</sup> 以下，削减率不低于 80%；整个工艺过程中不产生新的固废，无运行成本，不仅实现了烧结烟气 CO、NO 高效协同治理，而且可充分利用烟气显热和 CO 潜热。



烧结烟气污染物特征图谱

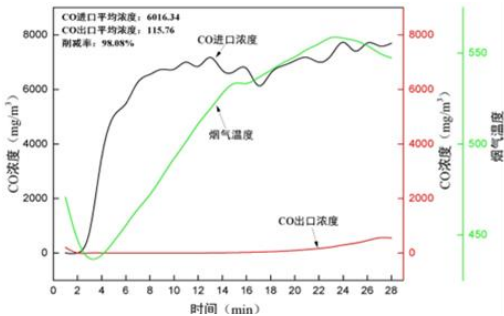


烧结烟气 CO、NO 过程治理工艺

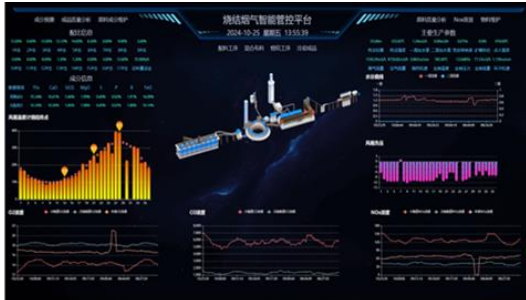
##### ➤ 优势特色:

拥有一种一氧化碳处理工艺、一种利用多种烟气进行烧结过程脱硝的方法等发明专利授权。依靠烧结过程中生成的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 易还原的氧化物强化氧化 CO；烧结产物铁酸钙可催化加速 CO 还原 NO 反应的进行。治理过程无需催化剂，不产生固废。可使烧结烟气 CO 排放浓度降至 2000mg/m<sup>3</sup> 以下，脱硝运行成本降 10%~20%，烧结 CO<sub>2</sub> 排放降低 25kg/吨钢。

该技术投资成本仅为末端催化治理技术的 1/3 到 1/2，基本无运行成本。为不同规模的烧结产线提供了一套源头-过程-末端全流程的烟气多污染物协同治理技术与烧结烟气智能管控系统平台。目前该技术已在新疆昆仑钢铁落地转化，正在河北省永洋特钢等企业实施。该技术将为烧结工序节能减排提供技术支撑，树立经济环保的典范。



烧结烟气 CO、NO 治理实验室效果



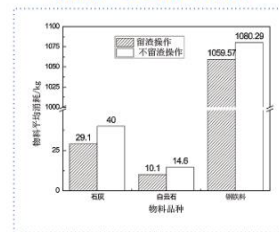
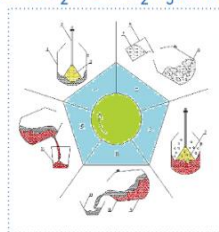
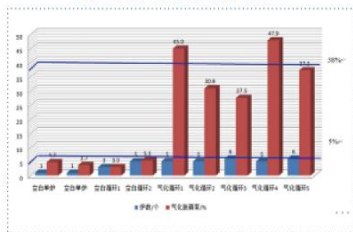
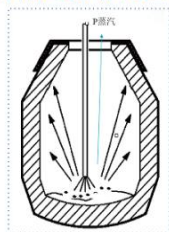
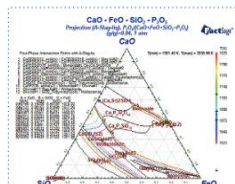
烧结烟气 CO、NO 治理智能管控平台

## 技术成果 2: 转炉熔渣气化脱磷绿色循环炼钢关键技术及应用

➤ 技术内容:

针对钢铁企业转炉渣外排存在的资源浪费和环保问题，通过气化脱磷循环炼钢新技术实现低磷、热熔态转炉渣在炉内循环利用。该技术利用高效复合脱磷剂，借助溅渣护炉期间的动力学优势和循环氮气作用，快速实现热态熔渣脱磷率达40%以上。

治理脱磷渣循环后已具备钢液脱磷的矿相结构并省去化渣时间，可直接发挥转炉前期低温高效脱磷作用。技术应用后，不仅从“生产源头”减少石灰、白云石等造渣料的消耗，缓解固废堆置的环保压力，同时已经形成脱磷渣系的热态熔渣发挥了脱磷优势，钢液质量得到明显提升，转炉冶炼控制难度有效降低。



### ► 优势特色

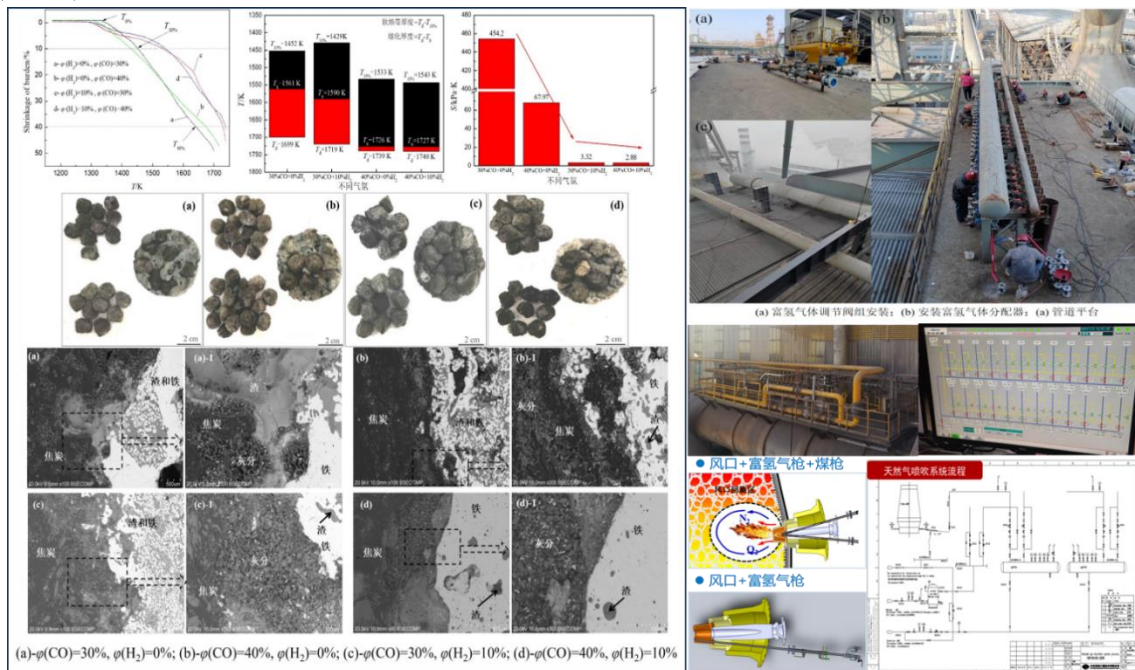
气化脱磷循环炼钢技术成果为转炉高效率、低能耗、高质量生产提供了新的工艺路径，技术可在具备溅渣护炉的转炉炼钢车间普遍推广应用，其成果达到国际先进水平，并获得河北省科学技术进步二等奖。在唐山钢铁集团有限责任公司、河北钢铁集团承德分公司及首钢京唐钢铁联合有限责任公司推广和应用。

该技术成果在生产源头对转炉渣产量进行控制,该技术推广应用后,相对于传统冶炼工艺,转炉石灰消耗节约 4-6kg/吨钢,白云石消耗减少 3-5kg/吨钢,钢铁料消耗降低 5-10 kg/t 钢,转炉冶炼一次拉碳命中率提高 7%,冶炼终点钢液 P 含量降低 0.004-0.007%,气化脱磷渣循环利用后,转炉冶炼平稳性增强。

### 技术成果 3：高炉富氢冶炼技术

#### ➤ 技术内容：

针对钢铁企业在高炉冶炼过程中碳排放量高、能源利用效率低的问题，高炉富氢冶炼技术通过从风口向高炉喷吹富氢气体，替代部分固体燃料作为还原剂，显著降低碳消耗和  $\text{CO}_2$  排放。该技术开发了高炉富氢喷吹关键工艺技术装备，结合现场实践形成系统的操作技术体系，实现氢能在炼铁行业的高效利用。应用该技术，可减少固体燃料比 10% 以上，降低  $\text{CO}_2$  排放量约 10~20%，且产量显著提高。该技术为钢铁行业的低碳绿色转型提供了有效路径。



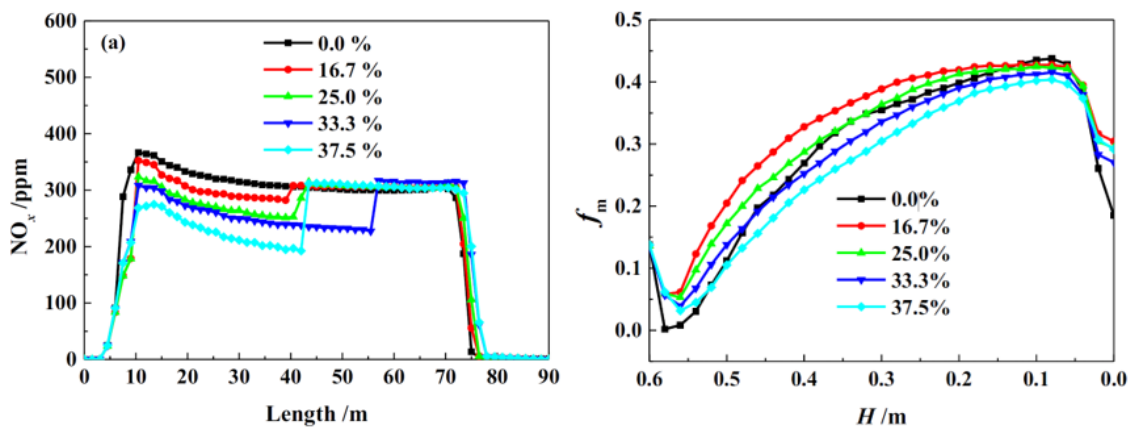
#### ➤ 优势特色：

高炉富氢冶炼技术具有较高的成熟度，已在多家钢铁企业实现工业化应用，技术处于国际领先水平。该技术的先进性体现在通过创新富氢气体喷吹系统和冶炼工艺优化，实现了高炉碳排放的大幅度降低，为钢铁行业低碳冶金技术树立了标杆。应用场景主要为高炉炼铁工序，适用于钢铁企业推进绿色低碳转型的需求。目前，该技术已在国内大型钢铁企业，如晋城钢铁，邯钢成功应用，结果表明，固体燃料比降低 10% 以上， $\text{CO}_2$  排放量减少约 10~20%，年均减排数百万吨  $\text{CO}_2$ ，带来显著的经济效益和社会效益。同时，通过提高能源利用效率，降低了生产成本。该技术推广迅速，已形成一套完整的实施方案，为更多钢铁企业提供可复制的解决方案。作为低碳冶金的核心技术之一，在全球范围内具有广泛的示范引领作用，有力推动了钢铁行业的绿色高质量发展。

## 技术成果 4：低碳均质烧结技术

### ➤ 技术内容：

低碳均质烧结技术针对钢铁企业烧结工艺中高能耗、高排放及产品质量波动问题，提出了实验与模拟结合的创新解决方案。通过烧结实验建立铁矿粉烧结匹配度评价体系，优化烧结混合料的强化制粒与偏析布料工艺。同时，基于数值模拟技术，建立准确描述烧结过程中流动、传热、传质及化学反应的工艺过程模型，实时反馈关键参数的调控对烧结质量的影响规律。通过本技术路线，可为钢铁企业个性化定制切实可行的低碳均质烧结工艺优化方案。该技术可耦合多种低碳绿色烧结技术，同时显著提高烧结效率，降低燃料比 5%~10%，减少 CO、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放量 7% 以上，提升烧结矿强度 2%~3%。有效降低烧结生产成本的同时，提升烧结过程的稳定性和产品质量。



不同烟气循环比例对烧结烟气 NO<sub>x</sub> 排放量及料层熔化率的影响

### ➤ 优势特色：

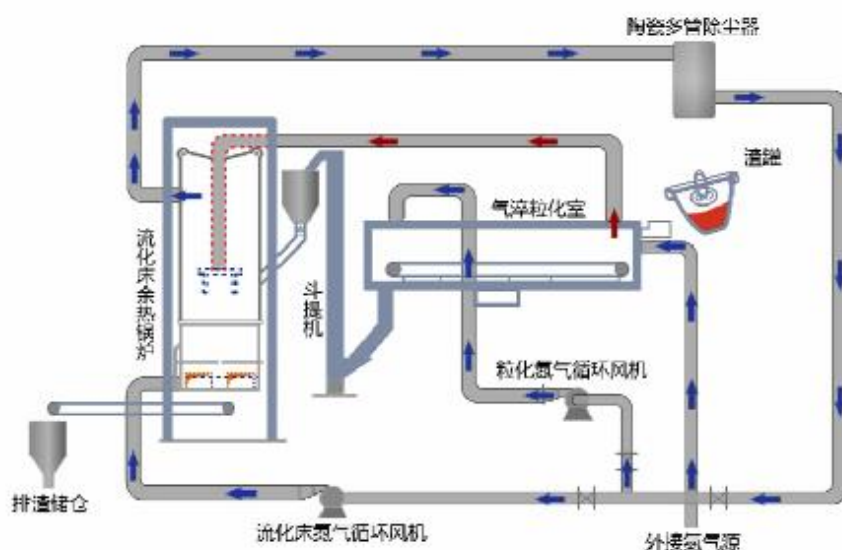
低碳均质烧结技术具有较高的成熟度，团队自主开发的烧结过程数值模拟软件也已成功应用于新余钢铁、方大特钢、山东钢铁等多家企业，显著提高了烧结生产效率，减轻环保治理压力。作为行业领先的低碳烧结关键技术，可根据企业实际生产条件，提供低成本、个性化的烧结工艺优化方案，在降低燃料消耗、污染物排放和提升产品质量方面表现出独特优势。

该技术通过优化烧结工艺参数以及集成低碳烧结新技术，可实现燃料消耗降低 5%~10%，CO、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 等有害气体排放减少 7% 以上，烧结矿成品强度提升 2%~3%，同时显著提升烧结矿生产过程稳定性，为企业带来降本增效的直接收益。同时实现污染排放和能源浪费的双重削减。因此，该技术兼具经济效益和社会效益，不仅有效降低企业生产成本，同时大幅减少环境污染。

## 技术成果 5: 钢铁企业低压余热蒸汽发电和钢渣改性气淬处理技术

### ➤ 技术内容:

研发了具有自主知识产权的钢渣气淬处理与余热回收和烧结、转炉烟气余热回收发电关键技术与成套装置，首次成功应用于唐山钢铁集团有限责任公司，建成钢渣气淬处理、烧结合余热发电和转炉余热发电三大示范工程，构建二次能源利用关键技术平台，三年累计节能 58 万吨标准煤，新增效益 7.44 亿元，实现了良好的经济效益和社会效益。研究成果达到了国际先进水平，对钢铁工业节能减排具有示范推动作用。



钢渣氮气气淬处理与余热回收工艺示意图

### ➤ 优势特色:

针对液态钢渣显热无法回收技术难题，研发的液态钢渣气淬处理及再利用关键技术达到了液态钢渣在线粒化、强化换热与活性控制的目的，实现了钢渣高值资源化利用。实现了吨渣回收蒸汽 110kg，气淬钢渣粒径<3 mm，单质铁提取率达 96 %。

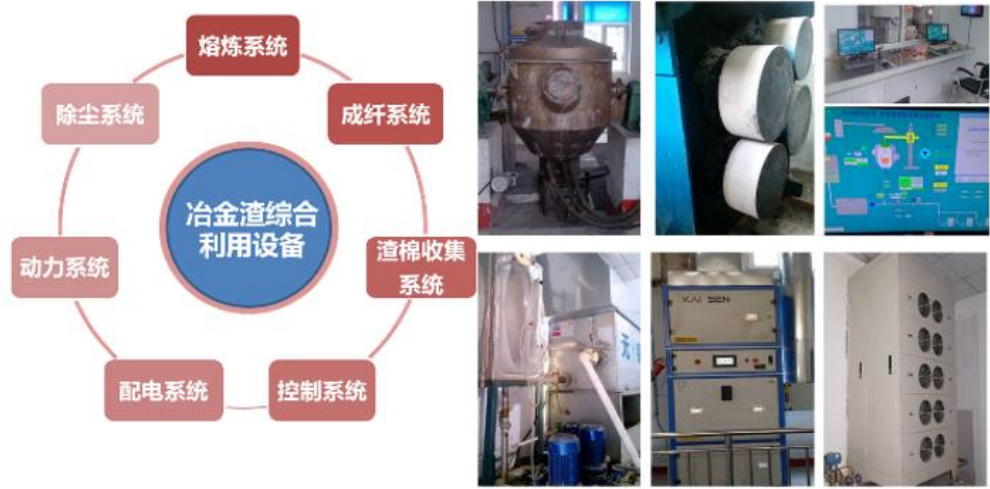


钢渣氮气气淬处理与余热回收成套技术与装备

### 技术成果 6：高炉熔渣在线调质直接纤维化关键技术

#### ➤ 技术内容：

开发了直接利用高炉熔渣显热在线调质及制备高附加值矿棉纤维技术：建立了液态高炉渣调质体系，开发了熔渣直接成纤等多项关键技术，成纤率达到 80%以上，矿渣纤维直径小于  $7\mu\text{m}$ ，分散性好；发明了一种矿渣棉纤维负载二氧化钛复合物光催化剂的制备方法，制备的光催化材料光催化活性高、降解率高达 95%以上，重复利用 4 次后，降解率仍达 70%左右，实现了熔渣显热的高效利用和附加值的大幅提升。



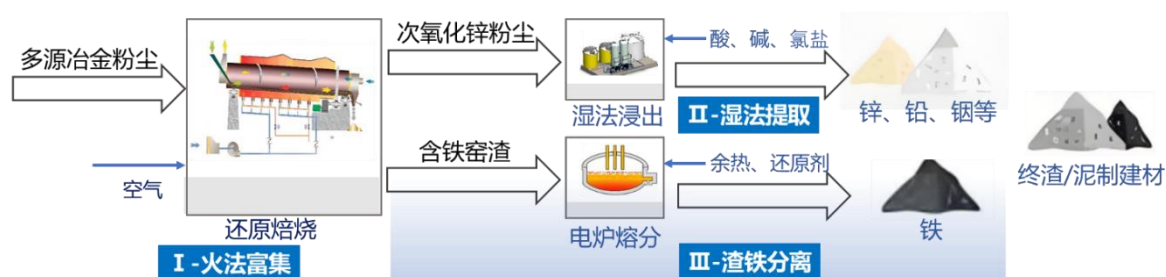
#### ➤ 优势特色：

国内外尚没有成熟运行的高炉熔渣在线调质成纤装置，利用本成果生产的纤维保温板与市场上的岩棉保温板对比，产品质量符合国家标准，除酸度系数外性能指标接近岩棉产品，但在节能与成本方面显著优于岩棉保温板。

保温板		保温管		吸声板	
容重128.38 kg/m <sup>3</sup> 质量吸湿率0.19%		容重145.57kg/m <sup>3</sup> 质量吸湿率1.19%		容重160.03 kg/m <sup>3</sup> 质量吸湿率0.53%	
指标	导热系数/W/ (m·K)	热荷重收缩温度/°C	能耗/ kWh/t棉	成本/元	环保
国家标准	≤0.044	≥600	---	---	---
本成果	≤0.039	640~710	700~800	1200	无毒
岩棉保温板	≤0.038~0.044	650~730	7000~8000	2000~2300	有毒

## 技术成果 7: 冶金粉尘协同资源化关键技术

### ➤ 技术内容:



### 多源冶金粉尘“火法富集-湿法提取-尾渣资源化”工艺路线

基于钢铁生产各工序粉尘成分互补优势，聚焦多源冶金粉尘规模资源化基础科学问题，提出了有价元素“火法富集-湿法提取-尾渣资源化”工艺路线，完善了火法-湿法相衔接、还原-氧化共反应、沉积-滤洗-萃取-蒸发相结合的基础理论体系，研发了多源冶金粉尘协同资源化关键技术。该项技术优势主要体现以下方面：一是通过多源冶金粉尘结构优化，实现全量资源化利用；二是能够实现含锌尘泥超低热值冶炼，提高碳的利用率，降低污染物排放量；三是能够有效控制回转窑的结圈行为，延长耐材使用寿命；四是能够通过炉温、烟温控制抑制冷却系统结垢，保证余热锅炉系统稳定运行；五是能够高效分离有价元素，实现稀散贵金属的梯级高效回收。

### ➤ 优势特色:



a 烧结机头灰提钾产线

b 回转窑提锌产线

c 尾渣资源化产线

### 多源冶金粉尘资源化推广应用情况

目前，烧结灰生产氯化钾技术、氯化钾快速蒸干技术在包头汇鑫嘉德节能减排有限公司应用，烧结灰处理能力达到，氯化钾产量达到 20 吨/天；多源冶金粉尘回转窑低热值提取氧化锌技术、多源冶金粉尘回转窑冶炼防止结圈关键技术在葫芦岛三和有色金属有限公司 2 条回转窑应用，多源冶金粉尘处理能力达到 500 吨/天，氧化锌产量达到 70 吨/天。



联系人：赵定国 15127559076，张金帅 13237186978