

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20230268

钢铁企业创新基础设施及研究进展

王国栋^{1,2}, 刘振宇^{1,2}, 张殿华^{1,2}, 储满生^{1,2,3}

(1. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学钢铁共性技术协同创新中心, 辽宁 沈阳 110819; 3. 东北大学低碳钢铁前沿技术研究院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 钢铁企业创新基础设施(SEII—Steel Enterprise Innovation Infrastructure)是基于创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,以技术创新为驱动、以信息网络为基础,面向高质量发展,为提高钢铁企业的核心竞争力需要而打造的钢铁产业升级、融合、创新的基础设施体系。提出了 SEII 的基本架构,SEII 是以工业互联网为载体、以底层 LPPL(Lab-Pilot-Production Line)的数据感知和精准执行为基础、以边缘过程设定模型数字孪生化和边缘-底层 CPS(Cyber-Physical System)化为核心、以数字驱动的云平台为支撑的服务于钢铁企业的数字化创新平台。分析了 SEII 的绿色化、数字化、高质化、强链化的特征功能,即绿色化关键工艺-装备创新功能、超级智能的 CPS 过程控制功能、高效率低成本的产品创新功能、全产业链协调管理优化运行功能;指出发挥中国特色社会主义举国体制的优越性,开发 SEII,并建立国家、地方、企业的 SEII 多级管理系统,对于钢铁工业的绿色化数字化转型、提高钢铁产业的产品质量和生产效率、强化钢铁行业产业链的强度和韧性、促进钢铁行业高质量发展具有极为重要的意义。钢铁行业的 SEII 建设已经开始,SEII 的建设实践成果表明,钢铁行业实体经济与数字经济/数字技术深度融合,可以发挥钢铁行业的数据资源、数据科技应用场景的巨大优势。采用数据驱动、软件定义、数据感知/数据处理的双层架构,将充分发挥数字技术的放大、倍增、叠加作用,大大加快钢铁行业数字化转型的速度,降低钢铁行业数字化转型的成本。目前 SEII 建设已经取得的重要进展充分表明,在 SEII 支撑下,钢铁行业核心竞争力明显增强,展现出钢铁行业未来创新发展、协调共享、大踏步高质量发展的美好前景。

关键词: 创新基础设施; 数据科学; 数字技术; 绿色化; 数字化; 高质化; 强链化; 转型升级; 工业互联网; 信息物理系统; 边缘; 云平台

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2023)09-0002-13

Steel Enterprise Innovation Infrastructure(SEII) and its research development

WANG Guodong^{1,2}, LIU Zhenyu^{1,2}, ZHANG Dianhua^{1,2}, CHU Mansheng^{1,2,3}

(1. The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China;
2. Collaborative Innovation Center of Steel Technology, Northeastern University, Shenyang 110819,
Liaoning, China; 3. Institute for Frontier Technologies of Low-Carbon Steelmaking,
Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: Steel Enterprise Innovation Infrastructure (SEII) is an infrastructure system for upgrading, integrating, and innovating the steel industry, driven by technological innovation and managed with industrial network, based on the development concept of innovation, coordination, green, openness, and sharing. SEII is aimed at high-quality development and aims to improve the core competitiveness of steel enterprises. The basic framework of SEII was put forward, it is a digital innovation platform serving steel enterprises based on the Industrial Internet. The underlying level LPPL(Lab-Pilot-Production Line) is in charge of providing sensors collected data to the system and accurate execution of operation orders from the edge. The digital twin, that is process set-up model in the edge, and the bottom LPPL consist of a CPS, which is the core of SEII. The digital driven cloud platform is in charge of the operation management and serves of the system. It is analyzed that the characteristic functions of SEII's include greening (GX), digitization(DX), high quality(MID), and strong chain(SC), namely the key process equipment innovation function for greening, the super intelligent CPS process control function, the high-efficiency and low-cost products innovation function, and the coordinated management and optimization operation function of the entire industry

chain. It is pointed out that giving full play to the advantages of China's socialist national system, developing SEII, and establishing a national, local, and enterprise SEII multi-level management system are of great significance for GX-DX-MID-CS of the steel industry, and promoting its high-quality development. The construction of SEII began. The practical results of construction of SEII indicate that the deep integration of the steel industry real economy and digital science/technology can leverage the enormous advantages of data resources and data technology application scenarios in the steel industry. The double-layer architecture of data driving, software definition, data perception/data processing will give full play to the effect of amplification, multiplication and superposition of digital technology, greatly accelerate the digital transformation of the steel industry, and reduce the cost of digital transformation of the steel industry. The significant progress made in the construction of SEII at present fully demonstrates that with the support of SEII, the core competitiveness of the steel industry has significantly increased, showcasing a bright prospect for the future innovation advance, coordinated sharing, and high-quality development of the steel industry.

Key words: innovation infrastructure; data science; data technology; greening; digitization; high-quality; strong chain; transformation and upgrading; industrial internet; cyber physical system (CPS); edge; cloud platform

根据 2020 年 4 月 20 日国家发改委新闻发布会正式明确的新型基础设施定义^[1],钢铁企业创新基础设施 (SEII—Steel Enterprise Innovation Infrastructure)可以确定为:基于创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,以技术创新为驱动、以信息网络为基础,面向高质量发展,为提高钢铁企业的核心竞争力需要而打造的钢铁产业升级、融合、创新的基础设施体系。本文提出了 SEII 的基本架构,分析了 SEII 的 4 个基本功能,即绿色化关键工艺-装备创新功能、超级智能的 CPS(Cyber-Physical System)过程控制功能、高效率低成本的产品创新功能、全产业链协调管理优化运行功能。建设和发展 SEII 将解决钢铁全流程“黑箱”、“不确定性”问题,推动钢铁行业创新发展、转型升级,实现“绿色化、数字化、高质量、强链化”,提高企业持续发展的核心竞争力,促进中国钢铁行业成为国际领先的行业集群。本文总结了目前 SEII 建设已经取得的重要进展,并展望了在 SEII 支持下钢铁行业高质量发展的美好前景。

1 SEII 是企业创新发展的核心竞争力,SEII 建设势在必行

1.1 数字时代钢铁行业面临的机遇与挑战

进入 21 世纪以来,人类社会进入了数字时代,数据指数级爆发式增长,数量越来越大、种类越来越多、速度越来越快、价值越来越高。数据已经成为全球新一轮产业竞争的制高点、改变国际竞争格局的新变量。钢铁工业作为一个生产钢铁原材料的大型流程工业行业,面临巨大的挑战和前所未有的发展机遇。

1.1.1 钢铁行业发展战略:绿色化、数字化、高质量、强链化

钢铁行业是国家的支柱行业,它必须以高效率、

低成本、节能降耗、环境友好的生产过程,向制造业提供质优、价廉、绿色钢铁材料,以满足国民经济、国防安全、人民生活的需要。因此,钢铁行业必须要执行绿色化、数字化、高质量、强链化战略,建设具有绿色化关键工艺-装备创新功能、超级智能的 CPS 过程控制功能、高效率低成本的产品创新功能、全产业链协调管理优化运行功能的 SEII,践行“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念,确保钢铁行业实现可持续进步,高质量发展,为中国式现代化做出应有的贡献。

1.1.2 数字时代钢铁工业发展面临的挑战

钢铁工业为大型复杂流程工业,全流程各工序均为“黑箱”,实时信息极度缺乏,属于严重的“不确定性”生产过程。主流程“黑箱”事关钢铁行业产品质量、产量、效率、稳定性、成本、生态等最关键问题,是钢铁工业竞争力的核心。钢铁工业最重要的关键共性任务,就是破解全流程“黑箱”,变“黑箱”为“透明”,掌握“黑箱”中的规律,指导生产过程的绿色化改造、数字化智能化控制、钢铁产品优质化、全产业链的强链化。解决“黑箱”问题唯一也是最好的方法,就是数据科学/数字技术与实体经济融合、解决“不确定性”问题的数据分析方法。

1.1.3 数字时代是钢铁工业腾飞崛起的机遇

钢铁行业全流程、全产业链的“黑箱”为数据科学与数字技术的应用提供了丰富的应用场景资源,而钢铁行业在自动化、信息化方面长期积累的良好基础,又为数据科学与数字技术的应用提供了无比丰富的数据资源,这 2 点是钢铁行业数字化崛起的重要机遇。与制造业相比,钢铁行业还在数字技术应用方面具有特殊的优势,即在钢铁全部主流程上,经过信息采集、数据分析之后,系统做出智慧决策,

可以直接反馈赋能于物料,构成闭环赋能的信息物理系统 CPS。材料行业要充分利用这一优势,努力建设以 CPS 为核心的钢铁企业创新基础设施 SEII,将钢铁全流程的“黑箱”变“透明”,真正搞清楚“黑箱”中的规律,解决钢铁行业面临的绿色化、数字化、高质化、强链化方面的重大问题。

1.2 SEII 的架构与主要功能

1.2.1 SEII 的概念

为了发挥钢铁行业应用场景和数据资源的优

势、加速建设数字钢铁、实现数字经济/数字技术与钢铁行业实体经济融合,轧制技术与连轧自动化国家重点实验室(RAL)提出了图 1 所示的 SEII 基本架构,并介绍了国际上材料创新基础设施的发展情况^[2]。SEII 是以工业互联网为载体、以底层生产线的数据感知和精准执行为基础、以边缘过程设定模型的数字孪生化 and 边缘-底层 CPS 化为核心、以数字驱动的云平台为支撑的服务于钢铁企业的数字化创新基础设施。

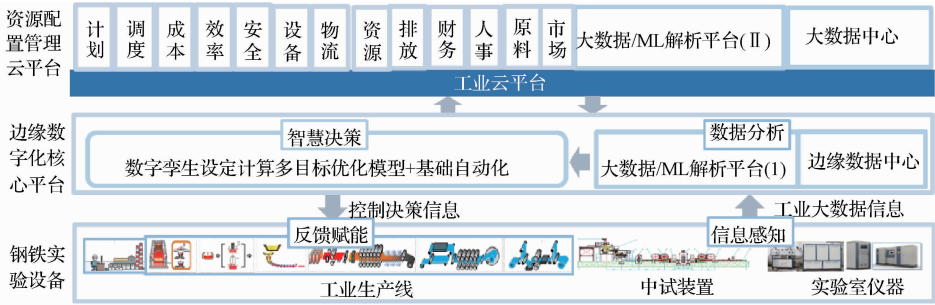


图 1 工业互联网架构下的钢铁企业创新基础设施
Fig. 1 SEII within THE architecture of industrial network

1.2.2 SEII 的网络架构

在将产线与实验室仪器、中试装备一起作为 SEII 底层的一部分时,对产线进行管控的工业互联网系统一并进入 SEII。

中国钢铁行业生产线的传统管控系统是采用国际上通用的 5 层架构,即基础自动化(BA)-过程控制系统(PCC,边缘)-制造执行系统(MES)-企业资源管理系统(ERP)-商务智能(BI)。云平台之上是“云端智能层”,行使低实时性的 MES、ERP 和 BI 功能,实现质量、效率、设备能力、成本、资源等多个目标综合协调。云平台下是“本地决策层”,行使高实时性 PCC、BA 和传感器等功能,辅以人工智能、大数据等新技术,强化计算能力,提高实时性等。“云端智能层”与“本地决策层”两层级之间在线实时动态调整,灵活协调,实现质量、效率提升。

当前,为了适应钢铁行业数字化转型的要求,钢铁行业正在由传统的机理、模型驱动的多层控制系统架构向数据驱动的扁平化双层架构过渡。这种双层架构的底层是数据采集和执行机构,而上层在边缘和云平台分别配置数据中心/机器学习单元。借此,在边缘和底层之间构成 CPS,实现高实时低延迟的快速、实时控制功能;而在云平台 and 边缘、底层之间,实现低实时、多目标的综合管理功能,支撑边缘与底层构成的 CPS 系统的运行。这是搭建 SEII

架构的重要考虑因素。

1.3 SEII:钢铁企业可持续发展的数字化创新基础设施

1.3.1 SEII:绿色化关键工艺-装备创新功能

SEII 的底层是其实体部分,它既为 SEII 上层的数据分析提供数据资源,又接受并执行上层决策的指令,控制生产过程的优化运行。SEII 底层包含 3 类实验设备,即原理性实验仪器、过渡性的中试装备、企业的实际生产线(LPPL, Lab-Pilot-Production Line)。它们都是向系统(包括边缘和云中的数据/机器学习单元)提供数据的工具。

第一类实验设备是原理性的实验室研究设施,即各类模拟研究系统(全流程、全场景)和检验、分析系统等。

第二类实验设备是各工序过渡性中试设备(Pilot Facilities),即按比例缩小的生产线原型系统。轧制及热处理的中试研究设备可以在学校、研究单位、企业实验室内建设;但前部冶金工序的中试设备应满足环境、公辅介质、能源电力配套设施等方面的高要求,需要在企业的生产环境中建设。

第三类是生产线的设备,既包括生产线的主体设备,也包括工业互联网架构下主体设备的管理、控制系统和各类公辅设施。由于实际生产线也包含在内,所以底层设备上安装的执行机构将接收边缘部

分发出的指令,调整设备操作设定值,控制设备智能、优化运行。

上述三部分统一在工业互联网的架构下,成为一个整体,它既是向系统提供数据的实验工具,又通过自己不断更新与进步而成为企业绿色化工艺与装备“智能制造”的研发创新平台。为了实现生产过程的绿色化转型,需要从原理到中试再到生产线,对工艺、装备进行改进或升级,依次进行新原理实验室仪器和相应的中试装备的开发研究,提供数据以开发新的绿色化工艺与装备的原型设备,并在此基础上,进一步研究、设计、开发、制造、安装、调试生产线的新工艺、新装备,利用在线运行数据,最终实现新工艺、新装备的调试和优化运行,创造价值。这是一系列工艺-装备-产品-服务一体化的创新过程,是企业实现绿色化发展必不可少的基础手段。

中国改革开放后,生产线工艺、设备以及产品技术主要靠引进,实验室仪器、中试装备等创新手段基本处于空白,更谈不上自主创新绿色化工艺与装备的能力。国外当时虽然有少量研究仪器和设备,但是他们不肯将这些核心技术出售。即使为了拿到项目他们勉强出售几件,使用效果也不好,例如某公司引进的电工钢研究设备,从购入就从未好用过。因此,当时中国仅有的少数产品技术研究均以实际生产线上的大生产实验为主,例如使用 200~300 t/炉的转炉钢水和每块 30~50 t 重的钢坯,研究开发成本奇高,效率极差,根本无法完成研究优化的目标。到 1998 年,宝钢^[3]首先提出了对实验室仪器和中试装备的需求,推动了中国有关院校实验室仪器和中试装备的研发。经过近 20 余年的持续不断努力,中国钢铁企业不但逐渐具有了底层工艺、装备、产品开发的研究手段和原始创新能力,而且具有了设计、制造、安装、调试、应用创新工业产线设备的能力。这些发展企业的思路和措施,保证了中国绿色化工艺、装备的自主研发和创新。

正是 SEII 底层的各类实验设备为大家提供了这种能力。它们可以通过改革创新底层实验仪器、中试装备乃至生产线的工艺与装备,进行原有生产过程的优化创新,打通生产流程中的“痛点”“堵点”“难点”,化解“短板”,解决生产过程面临的环境、资源、排放等绿色化问题,促进企业的绿色化发展。

因此,可以说 SEII 具有绿色化关键工艺-装备创新能力。

1.3.2 SEII:超级智能的 CPS 过程控制功能

钢铁行业的边缘部分紧挨着生产线。位于边缘

的过程控制系统承担生产线操作规程预设(有些情况下还有动态设定)的任务,设定模型的精度和水平直接与产品质量、生产效率、过程稳定性密切相关,这是钢铁企业的核心创新能力所在。

引进的边缘系统时至今日仍然是模型或经验驱动的,精度水平远远不能适应现代化生产的需求,数字化转型已经迫在眉睫,刻不容缓。SEII 提供破解“黑箱”的数据、机器学习、深度学习等科学方法,可以用来分析底层信息感知获得的数据,从而形成对生产过程进行科学分析的原位分析系统,建立起描述生产过程中材料形状、组织、表面各要素演变规律的数字孪生。基于数据分析获得的数字孪生模型和实时大数据,可以利用多目标优化的方法做出科学决策(即系统设定),并回馈到生产线由执行机构精准执行,从而形成“信息感知、数据分析、科学决策、回馈赋能”的闭环赋能循环。底层数据采集系统/执行机构与上层边缘数据中心/机器学习构成双层架构,实时交互,回馈赋能,将企业实时控制过程由模型和机理驱动转型为数据驱动,构成全流程、全场景的自学习、自组织、自适应、高度自治的智能化控制系统,即 CPS 系统。

这是数字驱动、软件定义、高度自治的数字化、信息化、智能化控制系统,是世界上最先进的现代化生产过程智能控制系统的精髓与核心。

因此,可以说 SEII 具有超级智能的 CPS 过程控制功能。

1.3.3 SEII:高效率、低成本的产品创新功能

长期以来,人们长期依靠第一性原理等基础研究理论,从原子-分子的层面开始,经过微观-介观-宏观的大量理论研究和分析模拟,企图实现材料开发和创新。但是,由于这种材料开发过程巨大的工作量和诸多的“不确定性”,以及宏观材料内部组成和边界条件的极端复杂性,这种方法严重延滞了材料开发过程,推高了研发成本,影响材料业向制造业提供急需材料的进度,以至于制约了制造业的快速发展。在这种情况下,作为高质化核心的生产过程优化与创新以及颠覆性、原创性、引领性新产品开发过程,必然改变思路,绕过机理与经验主导的建模方法,代之以数据驱动的、以数据/机器学习为主要认知方式的数据科学方法,即数据分析方法,建立描述生产过程中组织演变规律的数字孪生,与底层一起构成 CPS,进而利用生产线的大数据信息解决新材料开发过程中的各种“不确定性”问题,进行材料设计、规程设定、实时控制,大幅提高新产品的研发效

率,降低新产品的研发成本,发挥数据科学与实体经济结合的“放大、倍增、叠加”作用,高效率、低成本满足制造业对钢铁原料的需求,解决长期存在的材料“卡脖子”问题。

当然,在高质量、低成本快速完成材料的研发之后,研究者可以依据实际研发结果,进行深入的理论分析,找到解决问题的核心和关键,借此倒逼理论研究水平快速提升,发现新的原理和机制,从而推动新一代材料科学的发展。

所以,SEII 具有高效率低成本的产品创新功能。

1.3.4 SEII:全产业链协调管理优化运行功能

1)企业内部数据驱动的全流程资源配置与管理功能。云中中原有的 MES、ERP 管控系统依照模型与机理驱动的设定系统计算结果进行生产过程计划与管理,在生产过程中依照操作时序启动相应的操作,实现对过程的自动化控制。所以,这是一个模型驱动的自动化系统。但是,在经过彻底数字化改造的 SEII 体系中,云中的资源配置与管理系统在生产过程中随时接收来自数据驱动的边缘信息物理系统的设定计算指令,进行生产、质量、计划、物流、能源、排放、成本、原料、市场、人力资源、标识、安全等资源的配置与优化,由边缘指挥底层的执行机构,向生产线提供物质和能量,支持边缘 CPS 循环赋能过程完美实现。与底层-边缘之间的信息物理系统不同,这是一个十分复杂、范围广泛的信息传递过程。

与此同时,云中部分还不断地接收来自底层信息采集系统的大量设备、物流、能源等方面的运行数据状态信息,利用云中的数据/机器学习单元(II)对设备、物流、能源、排放等过程进行运行状态分析,评估运行过程的健康性,以及对运行和维修等过程进行操作指导,从而保证边缘与底层构成的信息物理系统健康、正常运行。

2)SEII 具有全产业链一体化协调、优化运行的数字化管理功能。对企业所处的全产业链而言,SEII 具有全产业链一体化协调、优化管理运行功能。企业 SEII 云中的系统还通过物联网与钢铁原料行业,即铁矿采选、煤炭、能源行业等紧密相连,在原料与能源供应、质量控制、物流平衡等方面协同合作。钢铁行业的销售部门,还要通过互联网与下游的各行业用户融通,在市场分析、产品销售、质量保证、后续制造技术交底服务、物流平衡与管理等方面进行战略与战术方面的协调与配合。云中系统与上下游的协调式连接,助力形成完整的、强大的产

业链。

未来,随着在钢铁企业逐步建立起 SEII,国家将通过互联网建立起国家统一管理的全国、地方、企业多层次的大型 SEII 管理系统,用以管理和指导各行业、各级 SEII 系统的建设、运行、改进与发展,形成一个强大、完整、安全的全产业链一体化协调、优化运行的数字化管理系统。

产业链安全是企业的生命线。SEII 连接产业链的上下游、贯穿钢铁材料全生命周期,利用数字技术协调、优化产业链的一体化运行,强链补链,实现对上下游以及全产业链、全生命周期的优化服务和安全运行。钢铁生产者不但要承担起生产过程中对资源和环境的责任,而且要承担起钢铁产品设计、流通消费、回收利用、废物处置等全生命周期的资源与环境责任,保护环境,造福社会,惠及子孙万代。

所以,SEII 具有全产业链协调、优化、管理运行功能。

1.3.5 钢铁创新基础设施的总体功能

SEII 是数据时代钢铁工业最先进的数字化、智能化科技创新系统。它具有 4 个重要功能,即绿色化关键工艺-装备创新功能(绿色化)、超级智能的 CPS 过程控制功能(数字化)、高效率低成本的产品创新功能(高质化)、全产业链协调管理优化运行功能(强链化)。根据“围绕产业链部署创新链,围绕创新链布局产业链”的原则,可以确定这 4 个功能之间的逻辑关系。其中“绿色化”“高质化”“强链化”的实现,最终需要高新技术的支撑。对材料行业来讲,这种支撑来自“数字化”功能,“绿色化”“高质化”“强链化”最终归结为“产业数字化”,归结为将实体经济与数字经济、数字技术的深度融合。所以,“钢铁产业数字化”是实现钢铁“四化”的可靠抓手。而数字化的核心是超级智能的 CPS,它的建设和发展将破解钢铁行业全流程“黑箱”,使其变“透明”,建立钢铁行业的智慧“大脑”,推动钢铁行业“绿色化”“高质化”“强链化”,创新发展、转型升级,实现“绿色化、数字化、高质化、强链化”的宏伟目标,提高企业持续发展的核心竞争力,促进中国钢铁行业成为国际领先的行业集群。

所以,建设 SEII 是钢铁企业高质量发展的强烈需求,必建不可。而建设 SEII 最核心、最关键的任务就是建立钢铁行业的“大脑”,建立钢铁行业的指挥中心,建立可以自学习、自适应、自组织、高度自治的管理、控制系统——信息物理系统。

拼尽全力,加速建设“数字钢铁”,实现钢铁行业

的数字化转型,是大家必须承担的光荣而艰巨的战略任务!

当然,随着社会的发展,又会提出新的问题、新的需求,因而需要开发新的工艺和装备、研究制造前所未有的产品,SEII 必须推陈创新、不断进步,与时俱进,持续发展。SEII 的发展和创新没有尽头,历久弥新,永远在路上。

因此,高校、研究机构的科研人员,必须与企业深度融合,同心协力,艰苦奋斗,全力建设 SEII。不仅与企业一起开发、建设 SEII,形成企业的核心竞争力,支撑企业在 SEII 的基础上优化运行、生产、创造价值,而且能够与企业一起持续不断的创新,不断发展 SEII,以绿色化、数字化、高质化、强链化的创新成果,满足国民经济发展、国防安全、人民生活不断提出的新需求。

2 SEII 的进展

2.1 SEII 进展之一:支撑钢铁行业绿色化转型

2.1.1 基于 SEII 底层的钢铁行业绿色化转型

20 世纪 90 年代开始,钢铁行业即已开始 SEII 底层的自主开发、建设与应用,以解决企业面临的绿色化问题。

国外钢铁企业也没有系统的 SEII 底层研究与开发的经历。20 世纪 90 年代,国内正处于“引进”“跟跑”阶段,还谈不上自主开发与创新。虽然也曾经利用生产设备开发新钢种,但昂贵的研究成本和极低的绿色化实效使企业难以承受。

实行工艺-装备-产品一体化的开发,必须经历实验室仪器开发、中试装备开发、生产线设备开发 3 个阶段,这些仪器和装备用以提供一定数量的实验数据。国内高校与研究机构围绕企业对实验室仪器、中试装备的需求,持续进行实验室模拟、检验、分析设备与冶金加工中试设备的开发,协助企业技术中心、研究院建设完善的实验研究平台。截至目前,高校与研究机构已经为宝武、鞍钢、太钢、沙钢、包钢、河钢等大型企业提供了与各自产品特色相匹配的实验室模拟分析设备,例如热力模拟实验机、连续退火模拟实验机、取向与无取向硅钢热处理模拟分析装备、不锈钢热处理模拟装备等。为这些公司的技术中心、研究院等研究开发平台建设了小型连铸实验机和热轧实验轧机、温轧实验轧机、冷轧实验轧机等轧制实验设备,协助他们将小高炉、小转炉、电渣炉等改造成为中试设备。目前,中国钢铁行业采用的研究与中试装备完全自主供给,还有一些研究

仪器和设备逆向输出到发达国家和地区。高校与研究机构的科研人员变“授之以鱼”为“授之以渔”,使企业具有了自主创新能力。企业认为,这是“为企业插上腾飞的翅膀,装上永不停歇的发动机”。高校、研究机构与企业合作完成的项目“现代轧制技术、装备和产品研发创新平台”,2012 年获得国家科技进步二等奖。

以实验室与中试实验设备为基础,高校与研究机构进一步与钢铁企业合作,与一重、二重、营口流体、太重、常熟重机等机械制造企业协同创新,进行生产线上重要工艺与装备技术的开发,实现中厚板轧机、热轧后超快冷系统、热处理生产线辊式淬火机等绿色化重型装备及控制系统的国产化和自主化,从而实现了 SEII 底层装备的全面系列自主创新,项目“首钢 3 500 mm 中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制”“国产 1 450 热连轧关键技术及设备研究与应用”“热轧板带钢新一代控轧控冷技术及应用”“高等级中厚钢板连续辊式淬火关键技术、装备及应用”等先后获得国家科技进步二等奖。自主创新开发“中国制造”的设备掀开了国家创新历史新的一页,对中国钢铁业的发展发挥了重要的作用。

2.1.2 2011 协同创新中心产学研深度融合,工艺-装备-产品一体化协同创新,促进钢铁行业绿色化转型

2014 年,国家批准建立 2011 钢铁共性技术协同创新中心,中心与企业协同,进行了一大批工艺装备研究平台的合作开发与建设。

钢铁协同创新中心按照既定的绿色化目标,积极组织研究力量,面向国家重大战略需求,面向经济社会主义战场,面向世界科技发展前沿,面向人民的生命健康,形成了涵盖选矿、炼铁、炼钢、连铸、热轧、冷轧及短流程工艺在内的钢铁生产全流程工艺与装备技术研发团队。

针对钢铁流程中“痛点”“难点”“堵点”“短板”,团队加强 SEII 底层的建设,进行钢铁全流程、工艺-装备-产品一体化协同创新,节能减排,提质增效,解决钢铁生产过程带来的资源与环境问题,努力实现全流程绿色化生产。

钢铁协同创新中心工艺与装备创新平台凝练出“先进冶炼、连铸工艺与装备技术”“先进常规流程热轧工艺与装备技术”“先进短流程热轧工艺与装备技术”“先进冷轧、热处理和涂镀工艺与装备技术”“绿色资源开发利用”等 5 个工艺装备研发的绿色化方向。同时又围绕上述方向凝练出重要的数字化方向

“钢铁行业与有色行业智能制造”,对前面 5 个研究方向实施产业数字化的支撑。协同创新中心沿着这些研究方向,与 20 余家钢铁企业、50 余条生产线开展协同创新,共同开发了 15 项绿色化、数字化关键共性技术,涵盖钢铁生产过程的全流程、全场景。这些工作为钢铁工业转型发展、实现“绿色化、数字化、高质化、强链化”发挥了不可替代的重要作用,得到行业的认可和企业的高度评价。

在此期间,中心牵头承担国家“十三五”项目 7 项,参加“十三五”项目 63 项,承担企业重大科研项目(合同额超过 500 万元)103 项。中心还承担 NS-FC 重大项目 2 项,重点项目 28 项,面上项目 42 项,各级、各类纵向科研经费近 5 亿元。

中心运行以来,牵头项目“高品质特殊钢绿色高效电渣重熔关键技术的开发和应用”获得国家科技进步一等奖、项目“钢材热轧过程氧化行为控制技术开发及应用”“连铸凝固末端重压下技术开发与应用”“贫杂铁矿石资源化利用关键技术集成与工业示范”等 5 项成果获国家科技进步二等奖,此外还获得省部级一等奖 32 项、二等奖 31 项,冶金科技特等奖 1 项、一等奖 12 项、二等奖 11 项。

在国家出版基金重点项目的支持下,总结在钢铁关键共性技术方面的实践创新,由冶金工业出版社出版《钢铁工业协同创新关键共性技术丛书》^[4],共 23 部,总计 1 060 余万字。该丛书应 Springer Nature 公司的建议,正在翻译出版,走向世界^[5]。该书的续集《钢铁工业协同创新关键共性技术丛书(续)》正在撰写中。此外,还出版各类专著、教材、研究报告等 76 部。

为了总结建设期间协同创新的重要理论成果,2019 年 2 月在《钢铁研究学报》以“协同创新,高质量发展,建设世界先进钢铁工业集群”^[6]为题的专辑发表了钢铁关键共性技术研究论文 22 篇。

2.1.3 近年全产业链协同创新,着手解决钢铁产品全生命周期带来的资源与环境问题

自 2010 年以来,中国钢铁行业开始了延续 20~30 年的井喷式发展,年产钢量约占世界年产钢量的一半。这个高产周期必然导致未来出现一个高废钢周期,废钢增长曲线与下降的钢产量曲线将在 30~50 年后相交。此时废钢量将超过钢铁需求量,这意味着那时中国将进入“全废钢”时代。富含铁素的废钢资源将取代铁矿石,成为“黄金矿产”资源。如果在今后 30~50 年的时间内能够很好地解决废钢资源的质量问题,则中国借此将大部分解决钢铁

冶金生产带来的“双碳”问题以及中国固有的铁矿资源匮乏问题。子孙万代将通过循环利用这些可再生资源而无钢铁后顾之忧。这是一个中国特色的问题。

世纪之交,为应对环境和资源方面的问题,国际上提出了生产者责任延伸制度(EPR)^[7]。2016 年中国国务院出台文件,推行 EPR。文件指出:生产者责任延伸制度是指将生产者对其产品承担的资源环境责任从生产环节延伸到产品设计、流通消费、回收利用、废物处置等全生命周期的制度。实施生产者责任延伸制度,是加快生态文明建设和绿色循环低碳发展的内在要求,对推进供给侧结构性改革和制造业转型升级具有积极意义。

因此,协同创新中心以 EPR 文件为指针,提出实现优质废钢有效利用的“四全”和“四化”,即必须针对未来的全废钢时代,从钢铁材料全生命周期、全生产流程、全产业链(“四全”)协同,实现废钢资源的管理、循环和利用,加强全流程生产管理的数字化、信息化、标识化以及优质废钢拆解回收机器人化(“四化”),进行产业重构和经营模式创新,以解决中国钢铁行业与制造业共同面临的资源、能源、环境等重大问题。废钢问题必须立即从现在做起。

这项研究工作将解决钢铁产品全生命周期带来的资源与环境问题,彻底摆脱对高炉等铁前系统的依赖,用高品质废钢代替中国十分匮乏的铁矿石,从根本上解决双碳达标和铁矿资源匮乏两大难题,实现中国钢铁行业的永续发展,为子孙万代造福,意义十分重大。

2.2 SEII 进展之二:加速钢铁行业数字化转型

2.2.1 数字化转型创新之路

1)第一阶段(1988—2014 年),以热轧钢材组织性能预测技术和人工智能技术在轧制中的应用为主进行研究,并开发热轧板带集约化生产技术^[8]。

中国关于钢铁行业数字化转型的研究可以追溯到 20 世纪 80 年代。1988 年,东北大学金属加工系根据国际发展情况,开始组织教师与研究生进行热轧钢材组织性能预测技术的研究,为后来的数字孪生建模奠定了理论基础。所以,本文就以 1988 年作为 RAL 从事数字化转型研究的起始年份。这一阶段的研究,在理论解析、实验研究、实际应用等方面均取得了重要进展。国际上首次发表了刘振宇等^[9]关于人工神经元网络技术应用于材料研究的论文。系列研究及应用成果 1999 年获得辽宁省科技进步二等奖。

2005年,上海梅钢与东北大学RAL承担国家“十一五”科技支撑计划,针对梅钢1422热连轧机,基于热轧钢材组织性能预测技术开发了智能化钢种归并技术,推行热轧带钢集约化生产,实现了热轧生产“一钢多能”的目标。这项技术简化了炼钢和连铸工艺,提高了生产效率和产品成材率,缩短了新产品开发周期,实现了对市场需求的快速响应,在生产中应用高效稳定,降低了合同余材。本项研究获得冶金科技奖三等奖。

在此阶段,RAL的自动化团队围绕钢铁行业生产过程自动化,与冶金自动化院、冶金企业的信息公司合作,建设了一批轧钢厂自动化系统,并初步应用数字化、智能化技术进行了创新。其中,产学研合作完成的“首钢3500mm中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制”“国产1450热连轧关键技术及设备研究与应用”“冷轧板形控制核心技术自主研发与工业应用”分别于2005年、2006年、2011年获得国家科技进步二等奖。热连轧、冷连轧、中厚板厂的信息化、自动化系统是这3个项目的重要内容。

在此期间,RAL还乘当时智能技术发展的机会,开展轧制过程智能技术应用研究,并在本钢、宝钢等工业产线应用,提高了企业数字化、智能化的水平。RAL总结此阶段智能化技术的研究成果,在冶金工业出版社出版专著《金属轧制过程的人工智能优化》^[10],2001年金属轧制过程的人工智能优化项目获得国家科技进步二等奖。

2)第二阶段(2014—2017年),大数据背景下建立高保真度材料组织性能预测模型的研究^[8]。

2014年8月22日在东北大学RAL召开了“基于大数据的炼钢-连铸-轧钢-热处理一体化钢铁材料组织性能控制研讨会”。会议分析了大数据、人工智能等新一代信息通信技术为提高组织性能预测精度所带来的机遇,确立了基于大数据的一体化钢铁材料组织性能控制的任务与目标。2015年,基于大数据的智能化热轧工艺优化设计系统开发工作启动,先后与鞍钢、宝钢梅钢、河钢承钢合作,以工业大数据驱动,利用大数据处理与挖掘技术,进行材料力学性能预测,获得高保真度的预测模型,即数字孪生,为钢材性能的高精度智能化控制奠定了基础。

3)第三阶段(2017—2019年),信息物理系统和数字孪生的研究^[8]。

RAL承担了“十三五”原材料领域关于智能制造的3项重点专项。借此契机,东北大学与各合作单位协同努力,以工业互联网为载体,利用大数据/

AI对数学模型优化,建立高精度的动态数据孪生,形成CPS系统的核心,部分技术应用于鞍钢、河钢承钢等钢铁企业热轧过程。

4)第四阶段(2019年至今),与河钢邯钢、抚顺新钢铁、鞍钢等单位合作,SEII建设由探索阶段逐步进入实质阶段^[8]。

该阶段的研究内容包括SEII的工业互联网架构、底层的组成与建设、数据科技求解边缘“黑箱”系统、数据驱动的信息物理系统、云中资源配置与管理系统、软件定义下的系统改造、建设路径、关键技术、钢铁数字化转型的成本和工期、数字化队伍技术建设、创新生态等。目前,这些问题的路数基本清楚,多数在钢铁生产流程中进行研究和付诸实施。通过产学研的协同创新,目前铁前、轧钢、转炉炼钢的SEII试点建设取得重要进展,连铸也在不断探索、前进、取得进展中。

经过30余年产学研协同创新,在基础研究和工业实践上均取得突破,以CPS为核心的钢铁工业“大脑”统领钢铁生产大踏步前进,迎来钢铁生产全流程数字化转型、高质量发展的大好局面。

2.2.2 钢铁生产过程数字化转型取得突破性进展

1)产学研深度融合,高炉数字化转型成果斐然。

铁前团队在抚顺新钢铁700m³高炉进行“数字炼铁”、高炉数字化转型的研究,完成“数据和机理双驱动的智能炼铁关键技术研发与应用”项目。2021年底通过钢铁工业协会鉴定。专家认为,达到国际先进水平,局部国际领先。

与抚顺新钢铁合作,承担发改委国家重大低碳项目“高炉大数据智能降碳关键技术研发与应用”。

承担中国宝武“钢铁工业大脑”战略项目,研究宝钢4号高炉基于数据信息与机器学习方法分析渣皮脱落对炉温的影响,并承担宝钢4号高炉三维操作炉型在线监控模型的开发和应用专题。

承担中国宝武低碳基金基于工业大数据和人工智能的高炉智能化炼铁基础研究。

此外,还承担本钢、昆钢、河钢邯钢的企业合作项目,分别对高炉炉缸活跃性、智能配矿系统、炉热等问题进行研究,实现高炉的数字化转型。

2022年以来开始的一批企业合作的数字化炼铁项目聚焦于高炉整体运行数字化转型以及数字化配矿、烧结、球团、焦化等技术的协同开发。

2)产学研深度融合,轧钢厂数字化转型加速推进。

与山钢等企业合作,在山钢4300中厚板等生

产线完成项目“基于机器视觉的宽厚板轮廓及板形 CPS 智能制造技术研发与应用”“高端精品带钢高效冷轧数智化生产关键核心技术攻关与产业化”“高精度冷连轧数字孪生模型与 CPS 系统关键技术研发及应用”等 3 项科研项目,分别获得 2022 年冶金科技奖一等奖、2022 年机械工业科学技术一等奖、2023 年辽宁省科技进步一等奖。

2022 年与宝钢、鞍钢、河钢、山钢等单位共同承担科技部“十四五”重点专项“钢铁轧制全流程工艺优化与管控软件开发”,已经启动执行。

2022 年承担辽宁省科技厅重大项目,“辽宁-鞍钢-东大高品质钢铁材料制备及应用中试基地项目”。含鞍钢 3 个轧钢厂,均为建设原位分析系统,实现数字化转型,项目在进行中。

2.2.3 2022 年 10 月:《数字钢铁白皮书》发布

为加快建设“数字中国”,实现钢铁行业数字化转型,推动数字钢铁建设,张殿华教授领导的东北大学数字钢铁团队联合国内外相关专家总结协同创新队伍在产业数字化攻关中的成果,撰写了《数字钢铁白皮书》^[11]。2021 年 11 月 23 日,由中国金属学会、冶金工业出版社主办,东北大学、轧制技术及连轧自动化国家重点实验室协办的《数字钢铁白皮书》首发暨钢铁工业数字化转型座谈会,作为第 13 届中国钢铁年会的分会场以线上线下结合的方式召开。

冶金工业出版社苏长永社长、中国工程院原副院长干勇院士、中国工程院钱锋院士、中国金属学会理事长张晓刚、中国金属学会常务副理事长田志凌等^[12]在致辞中指出,《数字钢铁白皮书》观点清晰、案例翔实,必将凝聚行业共识,加快推动钢铁工业数字化转型;《数字钢铁白皮书》的发布,为钢铁行业优化升级,开辟新领域、新赛道指明了方向;将开启中国钢铁数字化转型新的里程碑。

数字钢铁团队正在撰写的《数字钢铁关键技术丛书》,已经与冶金工业出版社签订合同,并入选 2023 年国家新闻出版署审定的重点出版图书项目^[13]。这套丛书重点阐述在互联网、大数据、云计算、5G 通讯网络等现代数字化、信息化技术支撑下的钢铁行业产学研深度融合,在选矿、炼铁、炼钢、连铸、热轧、冷轧、热处理等各个工序数字化转型过程中攻克关键技术,为中国和世界钢铁工业的数字化转型、高质量发展贡献力量。

2.3 SEII 进展之三:推动钢铁产品走向世界前列

聚焦颠覆性的工艺和装备技术,不断开发“第一”或“唯一”产品。“没有最好,只有更好”。以“四

个面向”为导向,聚焦绿色、高端、优质钢铁产品的开发,将成果用到大国重器上,用到尖端武器上,用到人民的生活中。

由于数字化技术在开发产品具有“放大、倍增、叠加”作用,应当加速建设 SEII,发挥其高效率、低成本产品创新功能的作用,提高新产品开发的效率,降低新产品开发的成本,利用数字化促进钢铁产品向高质化、高端化发展。

2.3.1 利用 SEII 底层提供实验数据离线建模分析,开发高新产品

前已述及,利用 SEII 底层具备的 UFC 等在线组织调控设备和辊式淬火机等离线热处理装备,可以进行热轧钢材组织性能调控。故在目前生产线完整地完数字化转型之前,利用 SEII 底层实验室仪器、中试装备、生产线装备(LPPL)逐级实验,提供数据供离线建模和分析。近年来,利用开发的在线和离线热处理工艺与装备进行了多项产品开发,均已经取得重要进展,应用于国民经济、国防建设、人民生活的各领域,满足了国家的重大需求。例如大型集装箱船必需的高止裂性船板、豪华邮轮用大宽厚比薄中板、工程机械用超薄规格(厚度为 2~5 mm)高强钢板、耐磨板、海洋平台齿条用超厚钢板等^[14]。

镍系低温钢是建造 LNG 超低温储运设施最重要的结构材料,支撑能源、化工产业实现清洁、高效发展,是发展清洁能源“卡脖子”的原材料。南钢、鞍钢、太钢等单位与高校、研究单位产学研合作,在国家项目的支撑下,协同创新,积极进行 9Ni 钢、低镍 LNG 钢、高锰 LNG 船储罐用钢冶炼、连铸、热轧、热处理、精整等全套生产技术开发,取得了国际领先的创新成果,并实现了大规模产业化生产。

高校师生与本钢、北汽新能源、马钢、鞍钢等企业合作,采用钒微合金化技术,世界首发 2 000 MPa 级热冲压钢裸板在新车型上应用。接着,又开发了具有自主知识产权的薄铝硅镀层热冲压钢及其激光拼焊一体式热冲压成形门环等技术。这一系列创新工作,打破了国外巨头的垄断,提高了产品性能和生产效率,降低了生产成本,并已经批量生产与应用。

高校与南钢、涟钢等钢铁企业及三一重工、徐工等工程机械企业联合,创新产销研用深度融合模式,开发出系列的热处理装备,生产不同厚度规格的 Q890、Q960、Q1100、Q1300 系列超高强钢板。涟钢的薄规格(最小厚度为 2 mm)高强工程机械用钢和

耐磨钢国际领先,目前,已经成为世界最大的薄规格热处理高强板生产基地,具备年产能力120万t以上,成为生产薄规格高强钢板的单项世界冠军。

南钢、山钢等单位,在炉卷轧机上开发厚度、板形等宽薄板稳定化生产工艺,生产最薄为3.5mm的宽幅板材,实现了邮轮用宽薄板的稳定生产,供货中国豪华邮轮建造。

河钢舞钢与东北大学等高校深入合作,率先立项建设目前国内唯一、断面尺寸世界最大的大型板坯电渣炉,产品广泛应用于模具、发电、大飞机工程等特大重点工程。舞钢与高校合作自主研制世界首套300mm特厚板辊式淬火机等关键装备,为大单重、大断面、特殊用途厚板热处理产品研发与应用奠定装备技术基础,180~210mm厚度齿条钢满足了海洋工程的急需。河钢舞钢成为生产优质超厚热处理钢板的“单打世界冠军”。

鞍钢、南钢、高校等单位合作,利用新一代控轧控冷技术与装备开发集装箱船用高止裂性用钢,国内率先研发出厚度为100mm的EH47、EH40止裂钢板,实现了100mm厚止裂钢全球唯一供货,应用于多艘巨型24000TEU集装箱船。

宝钢与高校合作,自主创新,国际首创热轧无缝钢管在线组织性能调控关键技术、装备开发及应用,引领钢管生产技术更新换代,开发出高等级套管、管线管、结构管等热轧无缝钢管的全新成分体系及工艺技术,实现了3大类品种、全规格系列化生产。

高校与企业合作开发出复杂断面型钢的新一代TMCP系列装备及控制技术,根据H型钢的规格、产线特点及轧制工艺,分别开发出型钢轧后超快速冷却及轧后淬火-回火系列成套装备、控制系统及冷却数学模型,成功应用于马钢大型厂、津西钢铁、日照钢铁、河北天柱钢铁及马钢重型线等产线,解决了型材控轧控冷、提质升级问题。

高校研究钢材热轧氧化行为控制这一世界性难题,开发出跟踪热轧过程氧化行为的智能控制系统,形成了具有完全自主知识产权的热轧氧化铁皮成套控制技术,不仅解决了普遍存在的典型表面缺陷问题,而且使氧化皮因具有免酸洗、易酸洗或耐腐蚀等特殊功效而“变废为宝”。目前该技术已经推广应用于一大批钢铁企业,产品满足了工程机械等下游合资企业对表面质量的严格要求。目前该技术已经输出至韩国浦项制铁、现代制铁等企业生产线。

同时提升强度和塑性,是钢铁材料领域长期以

来存在的重大难题。面对上述挑战,RAL袁国教授研究团队经过在SEII底层的持续创新,提出“马氏体拓扑学结构设计+亚稳相调控”协同增塑新机制,成功制备出系列低成本C-Mn系新型超高强钢,打破了超高强钢对复杂制备工艺和昂贵合金成分的依赖,突破了现有2000MPa级马氏体高强钢抗拉强度-均匀伸长率的性能边界。实现了1600~1900MPa屈服强度、2000~2400MPa抗拉强度和18%~25%均匀伸长率的极致性能。论文发表在2023年1月12日刊出的《Science》^[15]。目前,研究团队正在与企业合作,将该技术进一步应用于工业大规模生产。

自21世纪以来,RAL完成的项目“宝钢高等级汽车板品种、生产及使用技术的研究”“低碳铁素体/珠光体钢的超细晶强韧化与控制技术”分别获得2004年、2005年国家科技进步一等奖,“提高C-Mn钢综合性能的微观组织控制与制造技术”获得2007年国家发明二等奖,“高钒高耐磨合金及复合技术的工程化应用”获得国家科技进步二等奖。

2.3.2 高效率、低成本的数据/机器学习方法研究取得重要进展

RAL徐伟教授团队以材料基因工程理念为核心,展开了“物理信息协同的多模态钢铁材料数据挖掘以及机理逆向揭示”的研究,针对钢铁材料体系数据所具有的多尺度长链条、多来源多模态、高质量数据不足等特点,通过多种数据挖掘策略的开发,建立“先预测,再反向深度解析机制”的可解释性人工智能建模思路,使人工智能算法反哺材料学的机制深化。具体而言,其创新性构建了增维式卷积神经网络、多模态回归网络、损失累积式迁移学习网络等适用于钢铁材料体系数据的系统性新算法构架,从而实现了在实验室小样本条件下从固态相变普适性计算与相变机制反向深化,到复杂性能预测,乃至原型合金综合设计的深化式数据挖掘与分析,并进一步推进实验室小样本数据与工业大数据的融合迁移,指导工业产品优化与实验室研发合金向工程化应用的高效率转化。该方法体系补足了纯信息学方法在可解释性方面的不足,提升了材料学方向对数据与复杂机制的解析深度,通过2个学科方法的深度有机结合,打破了数据挖掘技术与物理冶金知识体系深度融合的学科壁垒,从而实现了基于数据挖掘的材料基因工程在钢铁材料领域的成功应用。迄今,该团队已经在ACTA等材料顶级刊物上发表多篇有影响力的相关论文^[16-19]。

2.3.3 利用 ML 全局解析,解决金属成形研究的难题

热轧过程集成化程度极高、工序复杂,是钢铁生产的核心工序。生产过程中,产品组织演变、形状尺寸和表面状态三者强耦合、密切相关,且同处于一个典型的“黑箱”之中。自 20 世纪 30 年代以来,尽管进行了大量的理论分析和实验研究,但是传统建模方法研究均为形状尺寸、组织性能和表面质量彼此独立进行,没能针对这些密切相关问题进行全局分析,因而降低了各相关参数的预测精度,产品质量控制无从谈起。信息物理系统以高保真数字孪生为基础,可实时优化并精准控制制造过程的全局,是摆脱上述难题困扰的全新技术途径。为此,RAL 刘振宇教授团队通过工业大数据理论和机器学习方法,利用轧件轧制力、组织演变与界面摩擦状态在热轧过程中的耦合关系,建立了高保真全局化动态数字孪生模型,获得了力能、变形、轧制、表面的高精度预测模型,大幅度提高了产品的控制精度与生产效率。

针对 2 250 mm 热连轧生产钛微合金高强钢,通过耦合机器学习使热轧过程全面“黑箱变白”,轧制力预测精度由国际 TMIEC 模型的±25%提升至±10%以内,大幅降低了薄规格产品产生边浪的风险;采用高保真组织演变数字孪生优化了 700 MPa 级超高强钢生产工艺,性能波动降低 50%以上且产品实现了免酸洗。4 300 mm 产线生产高强管线钢宽厚板,采用耦合机器学习开发了高效轧制工艺,实现了奥氏体晶粒和析出相尺寸细化,在力学性能和道次轧制负荷保持不变的基础上,使粗轧/精轧之间的待温时间缩短近 25%。

2.4 SEII 进展之四:强链补链,构筑完整、和谐、协调、坚韧的产业链

当前,国际形势错综复杂,新一轮科技革命和产业变革风起云涌,国际竞争更趋激烈。在这种情况下,尽管中国已拥有全球最完整的制造体系,但仍存在部分核心环节和关键技术受制于人、产业基础能力与高端产品供给能力有待提升等问题。大家必须提高风险意识,既要锻造产业链、供应链长板,又要尽快补齐产业链、供应链短板,在关系国家安全的领域和节点下力气攻关,构建自主可控、安全可靠的自主供应体系。

钢铁行业一定要强链补链,建设完整、和谐、协调、坚韧的产业链和供应链,服务于社会发展和人民生活、服务于千秋万代的资源和环境,造福人民和社会,子孙万代幸福绵长。产业链是达到上述目标的

生命线、当前“强链补链”是第一要务。

2.4.1 对接合作、协同创新、强链补链

围绕产业链部署创新链,围绕创新链布局产业链。在 2011 协同创新中心组建运行过程中,加强产学研深度融合,协同创新。通过产学研的“对接”、联合成立各类研究机构,针对钢铁全流程各工艺环节的问题,组成创新链;针对创新链欲解决的问题,再建立高新技术产业链,特别是信息化、数字化技术产业链,以高新技术治“痛点”,破“难点”,补“短板”,强链补链,建成强大的数字化产业链。

在协同创新中心第一、第二运行周期已经解决一批关键共性技术问题的基础上,2023 年开始的第 3 期协同创新运行周期通过产学研融合、融通、对接,又在全流程 9 个研究方向上确立一批具有重大战略意义的新课题,可望继续取得一批有重要意义的原创性、颠覆性、引领性绿色化创新成果,增强中国钢铁工业的核心竞争力,为中国钢铁工业中国式现代化、高质量发展做出新的贡献。

2.4.2 全产业链互相融通融合协同合作,承担全生命周期生产者责任

利用工业互联网将钢铁工业与上游的冶金原燃料供应端、下游的钢铁产品使用端连接起来,促进钢铁行业与各相关行业协调发展,承担生产者的责任,互相融通、融合、协同、合作,进行资源的优化配置与管理,在实现效益最大化的同时,促进面临的资源、环境问题彻底解决。

例如,钢铁全生命周期的数字化、标识化管理,实现钢铁行业与下游制造业、建筑业、交通业、能源业等融通、合作,解决钢铁材料的循环、科学、高效利用,这一项目正在实施中。

3 SEII 未来发展前景

3.1 发展总体目标

未来,随着中国钢铁企业逐步建立起 SEII,有望达到绿色化、数字化、高质化、强链化的高级境界,钢铁企业的竞争力将不断增强。在这种情况下,在发达的工业互联网下,可以建立起国家统一管理的全国、地方、企业多层次的大型 SEII 管理系统,管理、指导各级、各行业 SEII 系统的建设、运行、改进、创新与发展,形成一个强大、完整、安全的全产业链一体化协调、优化运行的数字化管理平台。

3.2 未来 5 年发展目标(2023—2027 年)

1)完成 SEII 建设标准与规范的制定,指导、规范 SEII 的建设与运行。

2)建成 10~15 条企业样板线的创新基础设施,局部地区建成区域政府部门指导的企业创新基础设施管理系统,树立钢铁行业绿色化数字化转型、高质量发展的标杆。

3)研发成功一批创新的绿色化工艺装备与技术,如优质废钢循环利用技术(第 1 阶段,废钢比例 30%);氢冶金-零碳钢铁冶金短流程中试线;薄板坯连铸(铝合金、钛合金);薄带连铸制造超级电工钢技术;温轧技术(高强钢、钛合金、铝合金等);喷射轧制(铜-铁合金等);薄镀层热冲压钢激光拼焊热冲压一体化制造技术;免镀层热冲压技术等。

4)开发一批国家迫切需求的前沿、引领性创新产品,如系列超级电工钢;超高强、高韧钢(应用于坦克、深水潜艇、汽车零件);新能源汽车电池包用高强钢;超低温压力容器用钢(人造太阳 Iter 超导冷却系统用材);高氮航空轴承钢;高温合金;耐蚀合金;高速磁悬浮列车轨道用软磁材料厚板;精密合金等。

3.3 未来 15 年发展目标(至 2037 年)

1)创新基础设施系统建设。重要产钢地区建成区域政府部门管理的企业创新基础设施管理系统,初步形成国家级钢铁企业创新基础设施管理系统,钢铁行业基本完成数字化转型。

2)研发成功若干项新一代绿色化工艺装备与技术,如优质废钢循环利用技术;氢冶金-零碳钢铁冶金短流程生产线;高废钢比、全废钢冶炼技术(第 2 阶段,废钢比例超过 50%);寄生于 SEII 的 FDP 平台全部发挥作用,助力节能减排、绿色发展等。

3)开发若干国家迫切需求的创新型、引领型新一代产品,如乘用车白车身均一化材料设计;能源材料,包括电池、储电池电极、包壳、催化剂;非晶材料;高熵材料;3D 打印产品等。

4 结语

SEII 作为数据时代最先进的数字化、智能化科技创新平台,具有 4 个基本功能,即绿色化关键工艺-装备创新功能、超级智能 CPS 过程控制功能、高效率低成本产品创新功能、全产业链协调管理优化运行功能。SEII 的建设和发展将促进钢铁行业的数字化转型,全流程“黑箱”变“透明”,推动钢铁行业实现“绿色化、数字化、高质化、强链化”,提高企业可持续发展的核心竞争力,促进中国钢铁行业成为国际领先的行业集群。

中国的钢铁行业一定能够走到世界钢铁科技发展的前沿,到达国际钢铁业发展的前列,成为国际领

先的工业集群。相信经过 10~20 年的努力,这个目标一定可以达到!一定能够达到!

参考文献:

[1] 温建功.中国新基建政策梳理[EB/OL]. [2019-05-19]. <http://www.iii.tsinghua.edu.cn/info/1058/2657.htm>. (WEN J G. Sorting out China's New Infrastructure Policies[EB/OL]. [2019-05-19]. <http://www.iii.tsinghua.edu.cn/info/1058/2657.htm>.)

[2] 王国栋,刘振宇,张殿华. 材料科学技术转型发展与钢铁创新基础设施的建设[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(10): 1003. (WANG G D, LIU Z Y, ZHANG D H. The transformation and development of materials science and technology and the construction of steel innovation infrastructure[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(10): 1003.)

[3] 戚国勤. 宝山钢铁(集团)公司技术中心设计探讨[J]. 上海冶金设计, 1998(4): 21. (XIAN G Q. Discussion on the design of Baoshan Iron and Steel (Group) Company's Technical Center[J]. Shanghai Metallurgical Design, 1998(4): 21.)

[4] 钢铁工业协同创新关键共性技术丛书[M]. 王国栋,主编. 北京:冶金工业出版社, 2022. (Series of Key Common Technologies for Collaborative Innovation in the Steel Industry[M]. WANG G D, ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2022.)

[5] 冶金工业出版社与施普林格-自然集团签订战略合作协议[EB/OL]. [2023-02-25]. https://m.sohu.com/a/646309935_121118710/?pvid=000115_3w_a. (Metallurgical Industry Press and Springer Nature Group signed a strategic cooperation agreement[EB/OL]. [2023-02-25]. https://m.sohu.com/a/646309935_121118710/?pvid=000115_3w_a.)

[6] 协同创新,高质量发展,建设世界先进钢铁工业集群[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(2): 247. (Collaborative innovation, high quality development, and building a world advanced steel industry cluster[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(2): 247.)

[7] LINDHQUIST T. Extended Producer Responsibility in Cleaner Production: Policy Principle to Promote Environmental Improvements of Product Systems[D]. Sweden: The International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE), Lund University, 2002.

[8] 王国栋,刘振宇,张殿华. RAL 关于钢材热轧信息物理系统的研究进展[J]. 轧钢, 2021, 38(1): 1. (WANG G D, LIU Z Y, ZHANG D H. Research progress on RAL's information physics system for steel hot rolling[J]. Steel Rolling, 2021, 38(1): 1.)

[9] LIU Z Y, WANG W D, GAO W. Prediction of the mechanical properties of hot-rolled C-Mn using artificial neural networks[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 57(3/4): 332.

[10] 王国栋,刘相华,等. 金属轧制过程的人工智能优化[M]. 北京:冶金工业出版社, 2001. (WANG G D, LIU X H, et al. Artificial Intelligence Optimization of Metal Rolling Process

[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.)

[11] 《数字钢铁白皮书》编写组. 数字钢铁白皮书[M/OL]. 2022 [2023-05-19]. <http://www.founderfx.cn/elecPublish/index.html#/content?id=11290>. (Digital Steel White Paper Writing Group. Digital Steel White Paper[M/OL]. 2022 [2023-05-19] <http://www.founderfx.cn/elecPublish/index.html#/content?id=11290>.)

[12] 冶金工业出版社.《数字钢铁白皮书》首发暨钢铁工业数字化转型座谈会成功举行[EB/OL]. [2022-11-28]. https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404840713396289907#_loginLayer_1683637018263. (Metallurgical Industry Press. The first launch of Digital Steel White Paper and the symposium on digital transformation of steel industry was successfully held[EB/OL]. [2022-11-28]. https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404840713396289907#_loginLayer_1683637018263.)

[13] 2023 年度国家出版基金资助项目评审结果公布[EB/OL]. [2023-04-21]. <https://www.maigoo.com/news/664121.html>. (Announcement of the evaluation results of the National Publishing Fund funded projects in 2023[EB/OL]. [2023-04-21]. <https://www.maigoo.com/news/664121.html>.)

[14] 王国栋. 钢铁产品创新十年 向党和人民交出满意答卷[J]. 世界金属导报,2022(37/38/39). (WANG G D. Ten years of innovation in steel products delivers satisfactory answers to the party and the people[J]. World Metal Herald,2022(37/38/39).)

[15] LI Y J, YUANG, LI L L, et al. Ductile 2 GPa steel with hierarchical substructure[J]. Science, 2023,379(6628):1683.

[16] REN D, WANG C, WEI X, et al. Building a quantitative composition-microstructure-property relationship of dual-phase steels via multimodal data mining[J]. Acta Materialia, 2023: 118954.

[17] WEI X L, SYBRAND van der Z, JIA Z X, et al. On the use of transfer modeling to design new steels with excellent rotating bending fatigue resistance even in the case of very small calibration datasets[J]. Acta Materialia, 2022, 235:118103.

[18] WEI X, ZHANG C, HAN S, et al. High cycle fatigue SN curve prediction of steels based on transfer learning guided long short term memory network[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 163: 107050.

[19] SHEN C, WANG C, WEI X, et al. Physical metallurgy-guided machine learning and artificial intelligent design of ultrahigh-strength stainless steel[J]. Acta Materialia, 2019, 179: 201.



《钢铁》杂志征稿启事

《钢铁》杂志创刊于 1954 年,由中国科学技术协会主管,中国金属学会、钢铁研究总院有限公司和北京钢研柏苑出版有限责任公司主办,国内外公开发行。该杂志是中国冶金领域历史悠久、学术水平高的中文核心期刊之一,也是反映钢铁工业科技成就的主要刊物之一,现为月刊。中国金属学会理事长张晓刚担任编委会主任委员,徐匡迪院士、殷瑞钰院士、张寿荣院士、翁宇庆院士、干勇院士为编委会顾问。《钢铁》设有由 89 位国内知名学者、企业家等组成的编委会,专家库有 1 600 多位外审专家,强大的专家团队保证了《钢铁》的学术水平和文章质量。中文核心期刊冶金工业类 22 种期刊中排名第 1;2022 年公布的科技核心期刊核心影响因子为 1.955,扩展影响因子为 2.650。

《钢铁》现为大 16 开本,144 页,国内外公开发行,每期定价 90 元,全年 1 080 元。国内统一刊号:CN 11-2118/TF,国际标准刊号:ISSN 0449-749X,并拥有广告经营许可证。

《钢铁》的宗旨是贯彻落实习近平总书记“把论文写在祖国的大地上”的重要讲话精神,面向生产、结合实际;坚持为中国钢铁工业生产建设服务,报道钢铁工业的科技成就、生产工艺的技术进步、品种质量的改善提高、新技术新产品的开发应用和专业理论应用研究等,以提高钢铁行业科技工作者和管理人员的科技水平,促进钢铁工业的发展。

《钢铁》设置的主要栏目有专家论坛、综合论述、原料与炼铁、炼钢、压力加工、钢铁材料、环保与能源、冶金流程工程、前沿技术、装备技术、技术交流等。

《钢铁》杂志 2005 年 10 月《钢铁》入选由国家新闻出版

总署创建的“中国期刊方阵”,名列“双百”第 74 名;1992 年起《钢铁》连续 9 版被中文核心期刊数据库收录;《钢铁》被认定为《中国科学引文数据库》(CSCD)来源期刊;《钢铁》被国际著名检索机构 Scopus 收录;《钢铁》已被国际公认的综合性工程检索刊物化学文摘《CA》列为收录的中国科技期刊之一;日本的科学技术文献速报、俄罗斯的文献杂志等也收录《钢铁》文章。

1 征稿对象

从事钢铁冶金生产、管理、设计、科研、教学和钢材使用部门的科技人员、专家学者和管理干部等。

2 征稿范围

《钢铁》在继续报道和推广钢铁工业关键共性技术的基础上,特向作者征集具有创新性、高水平、有重要意义的原始性研究学术论文以及反映学科最新发展状况的文献综述和技术类文章。

3 投稿和联系方式

请登录“中国钢铁期刊网”网站(<http://www.chinamet.cn>)。点击“钢铁”的图标或刊名导航条,进入期刊首页了解详情。

联系人:尚海霞,党玉华,何 祺;
邮 箱:gangtiebianjibu@126.com;
电 话:010-62182345;
通讯地址:北京市海淀区学院南路 76 号;
邮 编:100081。