

稀土钢绿色创新的理论探索研究

左匡天^{1*}, 李姝怡^{1,2}

(1. 内蒙古科技大学 经济与管理学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 包头钢铁(集团)有限责任公司, 内蒙古 包头 014010)

摘要:在钢中应用稀土可促进镧铈等高丰度稀土元素的高效利用,推动钢铁产业的创新发展。本文分析了稀土钢产品生产特点,归纳了稀土钢绿色创新的方向,应用开放复杂巨系统与霍尔系统工程理论,基于物理(Wuli)-事理(Shili)-人理(Renli) (WSR)方法论分析了稀土钢绿色创新的焦点,建立了稀土钢绿色创新评定三维理论模型,涵盖了一系列稀土钢绿色创新数据特征的指标集,能够保障稀土钢绿色创新正常运行,同时实现本质技术创新与资源、环境、生态、效益均衡协同发展,搭建了从企业、市场、社会、政府全角度促进稀土钢绿色创新协同发展的调控激励机制。该模型为处于转型升级关键时期的稀土钢发展提供了新思路,为稀土钢绿色创新提供了理论支持和实际路径指引。

关键词:稀土钢;绿色创新判定三维模型;WSR方法论;绿色创新;模型

中图分类号:F426

文献标识码:A

文章编号:1004-0277(2025)06-0144-11

作为中国现代化产业体系建设和制造强国建设重要基石的钢铁工业目前处于转型升级的关键时期^[1],稀土钢作为钢铁工业的典型资源型产品,同样面临结构调整的难题。2023年10月《国务院关于推动内蒙古高质量发展奋力书写中国式现代化新篇章的意见》提出的“加强稀土等战略资源开发利用”和“将包头建设成为全球最大的稀土新材料基地和全球领先的稀土应用基地”重大任务,给稀土钢带来了新的发展机遇。在钢中应用稀土镧和铈促进高丰度稀土元素的高效利用、稀土钢生产技术的创新、稀土钢产品的推广应用、稀土钢市场价值体现等方面需要从技术层面、管理层面、用户使用层面进行深入分析,推动稀土钢创新发展。

本文从技术经济角度,应用物理(Wuli)-事理(Shili)-人理(Renli) (WSR)方法论,全面分析了稀土钢绿色创新的内涵与概念、制约因素及控制机制,探索分析了稀土钢绿色创新的方向与路径,目的在于促进稀土钢升级换代、品牌化建设,提高稀土钢产品市场占有率、实现国家稀土战略资源在钢中高效、高值化应用。

1 绿色创新与稀土钢绿色创新的研究现状

人类社会进步越来越关注环境、经济、社会的协调与发展,而绿色创新就是以环保和可持续发展为目标,实现“资源节约型、环境友好型、可持续发

展”的创新理念,其包括的所有目标在于实现能源效率、经济增长和环境保护之间平衡的创新实践,促进协同进步^[2~5]。

绿色创新被视为企业应对环境挑战时的一种战略性解决方案,包括绿色产品和绿色工艺相关的技术创新,同时实现能源节约和减少环境污染、废物资源再利用、环保产品设计及企业环境管理上的技术进步等一系列创新举措,与传统创新相比,由于注重污染的防治和降低企业的环境负担能够为企业带来额外的经济回报,并增强其在市场中的竞争优势^[6~11]。Saunila 等^[12]认为如果企业在经济方向上加以重视、对政策的导向和社会的可持续发展加以关注,推动绿色创新活动就会越容易开展与实施。任娟娟等^[13]将绿色创新进行系统化梳理,提出可建立一个由企业、大学、科研机构、政府等协同合作的体系,并利用技术创新、绿色产业创新和绿色供应链创新等重要手段,致力于低碳经济和提高能源利用率,形成一种复杂网络关系系统。绿色创新投入和产出之初,经济效益和环境效益产出均显著负向^[14],但环境规制与绿色技术创新之间是非线性的且存在门槛效应^[15],呈先下降后上升的U型轨迹^[16],所以绿色创新过程必须重视对相关环境规制政策进行优化,形成覆盖整个产品生命周期和产业链条的环境规制政策体系^[17]。另外,要针对性地加强数字政府建设,释放数字政府在促进绿色转型中的潜力,发挥绿色技术创新的政策引领作用^[18],同时关注绿色创新主要的知识溢出的传导路径,逐步形成完整、完善的绿色创新智数库^[19]。

中国钢铁工业绿色创新的目标就是要持续原创新工艺、新装备和新技术,利用物质流、能量流和信息流的交换交流,对全流程和产品实施全生命周期评价,将大数据和智能制造技术耦合应用,构建一个绿色、高效的生产系统,并建立绿色钢铁评价体系,推动“绿色化、智能化、品牌化”的新一代流程钢厂^[20]。钢铁企业通过持续不断推出改善人类生存环境质量的绿色创新项目^[21],即创新设计、创新过程、创新目标和创新成果的绿色化^[22],实现经济

效益的增长。

稀土在钢中应用具有改善钢材性能的优点,但也存在诸如稀土合金材料制备、稀土加入钢中技术、炼钢工艺顺行和钢材组织性能稳定调控等技术问题^[23~25]。有关稀土钢的专利反映在核心技术、技术创新、技术区域保护等方面与日本相比还存在差距^[26]。孙宝珍等^[27]阐明稀土钢产业符合国家绿色低碳和高质量发展方向,能够助力下游产业绿色低碳高质量发展。曹晓明等^[28]认为稀土钢生命周期评价是实现稀土钢绿色制造、生态设计、打造绿色产品的重要方法。稀土钢的研究绝大多数是在冶金工艺技术层面的,稀土钢绿色创新仅开展了LCA评价,缺乏全面性、整体性的研究。

稀土钢作为钢铁工业的资源型产品,要达到稀土(镧铈)资源平衡利用,对环境、生态影响少,市场用户接受度好,实现经济与社会效益,绿色创新是其重要发展方向之一。稀土钢绿色创新要根据其生产与使用的流程特点,作为一个开放的复杂系统对待,站在系统的视角全面思考稀土钢绿色创新,系统开展稀土钢绿色创新的理论探索,提出稀土钢更新换代、满足绿色创新的发展路径和调控机制。

2 稀土钢绿色创新研究的方法论选择

稀土作为国家重要的战略资源,在钢铁材料中应用,能够细化组织,变质夹杂物,提升强度、低温冲击韧性等综合性能。稀土(镧、铈、镨、钕等)17种元素中,作为高丰度的镧、铈元素在钢中应用最为广泛,也支撑了稀土钢绿色创新和产业发展。稀土钢生产工艺包括连铸连轧、模铸等,根据稀土钢牌号不同,生产流程也有差异,所以稀土钢绿色创新方法的选择要有普适性和协同性。

2.1 稀土钢生产流程及绿色创新方向分析

中国特钢企业协会颁布的《稀土钢通用技术要求》团体标准^[29],定义稀土钢为:“采用铁矿共伴生稀土矿冶炼或者在炼钢过程中添加稀土元素,生产得到的钢材产品”。同时也说明常用稀土镧铈元素能使钢材一方面或多方面性能得到改

善。另有文献^[30]报道:铁矿共生稀土矿生产铁水的高炉渣中含稀土氧化物,可以在炼钢过程直接合金化。根据稀土钢定义及有关文献分析,如图 1 所示,按照资源区、生产区、市场区以及含稀

土原料端、高炉炼铁端、钢水冶炼连铸端、钢坯轧制端、用户使用端说明了稀土钢生产流程以及涉及到的稀土原料提炼技术、稀土钢生产技术和稀土钢应用技术等内容。

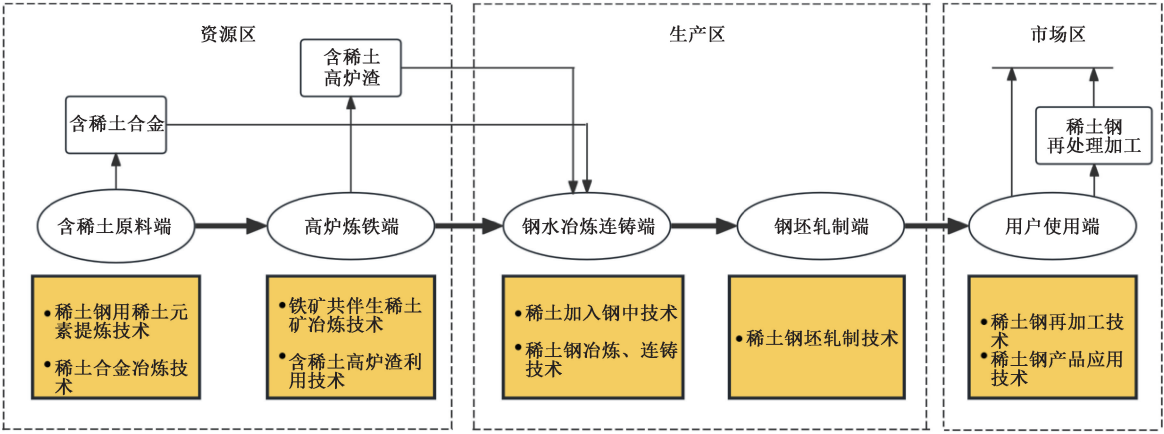


图 1 稀土钢生产流程及生产技术方向示意图

Fig. 1 Schematic diagram of production process and technical direction of rare earth steel

稀土钢从生产到市场全过程涉及到了技术、工艺、服务、管理等诸多方面,与资源、环境、生态、效益不可分割,与企业、市场、社会、政府具有密切关联性。稀土钢的绿色创新就是上述这些因素组成的一个系统创新,见图 2。在充满物质、能量、信息交流的大环境中,在政府、市场、社会、企业共同支撑的大平台上,稀土钢绿色创新的本质技术创新结合资源、环境、生态、效益各个分体系因素单元形成绿色创新的系统。图中各因素单元所处场景、相互作用与耦合关系充分说明,从单一的稀土钢技术创新上升到稀土钢绿色创新,表现出了复杂性、社会性,需要整体性、系统性考虑各因素单元均衡发展、协同进行。

2.2 绿色创新方法论分析

稀土钢技术创新本身就是一个复杂的冶金工艺过程,而绿色创新更涉及了资源、环境、生态、效益诸多方面,是复杂的也是开放的系统。该系统包含的子系统多、层级多、不同种类多,非常符合钱学森院士提出的开放复杂巨系统理论^[31]的特征。可以借助该系统理论框架和方法论,构建一个“从定

性到定量”的综合集成研讨体系^[32,33],利用计算机技术把试验数据、统计数据、专家研判和多种信息有机结合进行分析,使遇到的具有定量特征的问题以及具有定性特征的难点命题,最终都通过定量指标来标定,达到对稀土钢绿色创新系统的过程进行调控的目的。

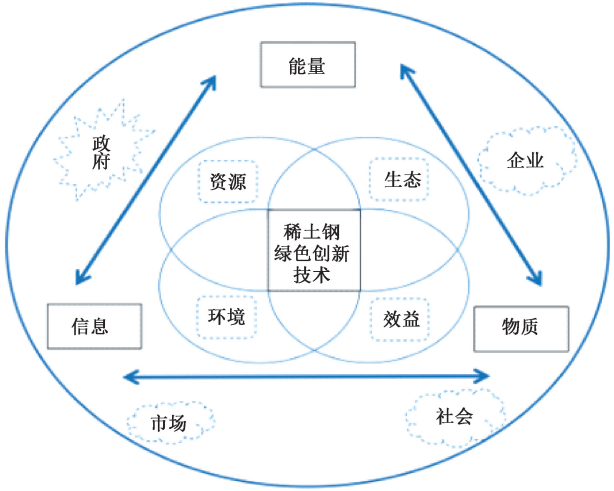


图 2 稀土钢绿色创新系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the green innovation system for rare earth steel

美国系统工程专家霍尔提出一种系统工程理论框架三维结构模型^[34],集中体现了系统论的总体化、综合化、最优化、程序化和标准化特点。稀土钢绿色创新具体过程的调控内容可以应用该理论,从时间、逻辑、知识三个维度把系统工程活动通过七个紧密相连的阶段在时间维度上依次展开,对每个阶段再按照七个逻辑步骤关联完成。同时结合完成这些阶段和步骤所需的各种专业知识,构成稀土钢绿色创新系统工程的理论基础。

物理-事理-人理方法论(WSR)是从物理现象、事物逻辑和人的理性三方面来全面地分析问题、解决问题的一种系统方法论,在许多复杂性问题的解决上也取得了一定的成效^[35],可应用于推动企业创新、保障环境安全以及能源安全等关键领域^[36]。该

方法论的模式内容如图 3 所示^[37]。“物理”就是针对客观物质世界及其法则、规则,以科学态度对“物”的含义进行分析来解决问题,具有客观存在与真实性^[34]。“事理”是指运用管理科学和系统科学来协调追求解决问题的效率,指导“怎么去做”。而“人理”是利用人文与社会科学知识来指导“应该如何做”和“最好怎么做”,寻求解决问题的最佳成效。

稀土钢的绿色创新包括一系列严谨的技术创新,包括多因素单元的协同,也包括各类组织关注支持,比较契合 WSR 方法论三个方面的研究方向。应用 WSR 方法论,就是从稀土钢绿色创新系统的本质物质世界、系统组织和“人”的动能结合进行整体构想,开展稀土钢绿色创新的理论探索。

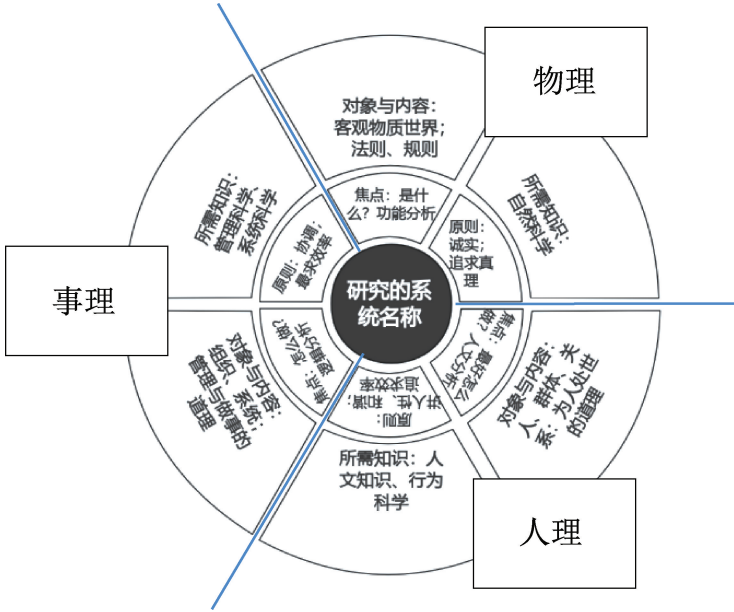


图 3 WSR 方法论的模式内容^[37]

Fig. 3 Pattern content of Wuli-Shili-Renli methodology^[37]

3 基于 WSR 方法论构建稀土钢绿色创新理论

任娟娟等^[13]曾利用 WSR 理论建立了制造业绿色创新指数三维模型,研究了制造业“资源-环境-生态-效益”复合系统的绿色创新内涵、预警机制、

实施方案。稀土钢绿色创新鲜见类似报道,本文把稀土钢绿色创新看作绿色创新-制造业绿色创新-钢铁工业绿色创新层级下的一个子系统,依托图 1、图 2 的内容进行研究。依照图 3 中 WSR 方法论研究的模式内容,稀土钢绿色创新系统核心是技术本质创新以及技术创新与资源、环境、生态、效益之间

均衡发展,寻求真理对应“物理”部分。本质技术创新与资源、环境、生态、效益均衡发展形成绿色创新主体后,预测判断并调控影响绿色创新运行发展的因素,如何才能有效率对应“事理”部分。稀土钢绿色创新又处于政府、市场、社会与企业共同作用范围,如何达到有成效对应“人理”部分。开展“物理”“事理”“人理”分别对应的“是什么”“怎么做”“最好怎么做”进行聚焦研究,构建稀土钢绿色创新理论。

3.1 稀土钢绿色创新的“焦点”分析

焦点之“是什么”,稀土钢绿色创新研究对象包括所涉及的本质技术创新、资源高效应用、对环境的低排放、生态保持与修复,以及本质技术创新与资源、环境、生态、效益之间的关联关系等。上述研究可以构建一个“从定性到定量”的综合集成研讨体系,具有明显定量特点的直接进行攻关研发,对于表面上开始仅能定性描述的,也要归纳出特征指标进行攻关研发。通过多类型、多层次、多维度的稀土钢升级换代的工艺技术攻关研发,解决稀土镧钪资源高效利用(包括固废再利用)、生产过程中耗能及气(汽)液固废排放、对生态文明影响,以及稀土钢技术创新对资源、环境、生态、效益的影响和相互制约问题,使得稀土钢绿色创新完成本质技术创新同时也兼顾了资源高效利用、节能减排、生态保护,并获得经济与社会效益,实现均衡发展。

焦点之“怎么做”,稀土钢绿色创新的“事理”就是在“物理”解决问题的基础上,通过本质技术创新与资源、环境、生态、效益的关联进行分析,对趋势进行预测,提出需要控制的目标边界。本质技术创新与资源、环境、生态、效益之间产生了冲突矛盾就会制约均衡发展,也就表现出绿色创新的运行出现偏差,为了避免出现偏差或者降低偏差的影响程度,就需要建立一个能够使系统中各方面都能均衡发展的控制与调节机制。对于整个绿色创新系统的控制,需要通过对系统中各要素进行分析,选取合理的方法,构建有效的控制模型。应用模型可以提前对可能出现的偏差进行预判和预报,及早采取

防范手段,防止偏差加大,降低风险影响,保障稀土钢绿色创新的良好运行。提前发现影响稀土钢绿色创新系统正常运行或者带来风险的问题因素,并能够及时修正优化,防止事态恶化,就是建立稀土钢绿色创新良好运行发展控制机制的目的。

焦点之“最好怎么做”“可能是怎么做”,正如图 2 所示,稀土钢绿色创新系统处于包括企业、市场、社会、政府在内的大环境中。推进稀土钢绿色创新,实现绿色创新系统中本质技术创新与资源、环境、生态、效益的协同发展是稀土钢绿色创新的最终目标。这一过程中需要企业主动开展技术创新,需要政府在政策方面给予扶持引导和资源配置,需要市场给予机会使用稀土钢,需要社会给予稀土钢高度的关注,所以只有共同努力才能很好实现稀土钢绿色创新,才能形成“企业-市场-政府-社会”各方主体的有机结合、合作联动的动态机制。人及与人关联的组织,其作用与影响力是必须要得到重视的,稀土钢绿色创新不同于单一的技术创新,而是要充分考虑人的能动性会对企业的主动程度、政府的引导程度、市场的容纳程度、社会的关注程度等方面的影响作用。

3.2 稀土钢绿色创新评定三维模型的建立

基于 WSR 方法论通过对稀土钢绿色创新“焦点”分析,基本上明晰了稀土钢绿色创新的主体涵义,包括技术创新的方向及要达到的目标,本质技术创新与资源、环境、生态、效益之间的均衡及其调控机制,企业、政府、市场、社会共同努力最终获得具有协同发展及可调控的稀土钢绿色创新。图 4 就是通过应用开放复杂巨系统与霍尔系统工程理论,基于 WSR 方法论建立的稀土钢绿色创新评定三维模型。

其中,“物理”内容就是通过研发攻关和大数据归纳得到的各因素单元目标特征指标集,其中稀土钢迭代技术指标目标集是指稀土钢本质技术创新的下一代目标值,是结合技术进步及条件提出的目标,主要起技术创新的引导作用。稀土钢本质技术创新指标集与系统内各单元创新指标集是指系统

中稀土钢本质技术创新、资源高效利用、减排控制、环境保护、生态修复以及获得经济与社会效益能够达到的最优指标集。对于稀土钢本质创新指标要通过进行技术攻关不断突破与提高,对于其他因素单元来说主要是控制能够满足本身发展的要求。系统内各因素单元间关联指标集是在各单元创新指标的基础上,归集出的能够满足技术创新与各因素单元之间均衡的指标,而大系统协同关键指标集就是稀土钢绿色创新的主体内涵,是要求大系统内各因素单元当下指标都要能够达到协同发展的目标集。

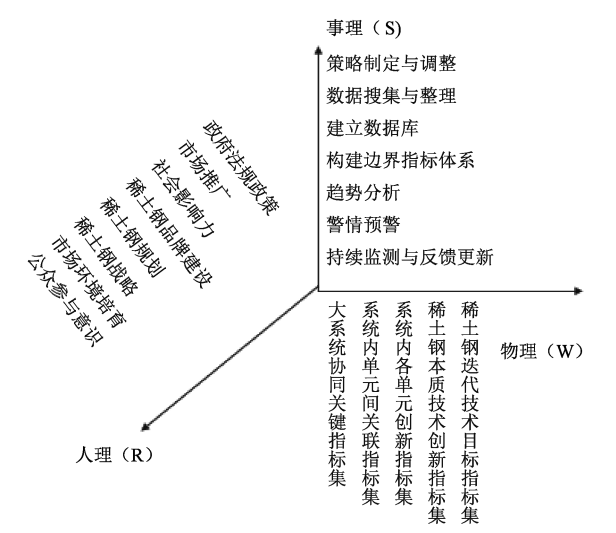


图 4 基于 WSR 方法论的稀土钢绿色创新评定三维模型

Fig. 4 Three dimensional model for green innovation evaluation of rare earth steel based on WSR methodology

应用霍尔三维结构模型研究稀土钢绿色创新的“事理”,把时间维作为工作进程,逻辑维作为基础性工作,知识维作为各种技术、理论及前人经验等,归纳出三个维度的内容,提出稀土钢绿色创新的调控机制。首先针对稀土钢产品特点,根据“物理”的结果把能够影响稀土钢绿色创新运行的具体因素单元指标进行程度分析,确定加权算法,建立有机模型。收集与稀土钢绿色创新相关的数据、信息等内容,利用模型进行数据与信息梳理,建立起稀土钢绿色创新协同发展的边界指标体系。收集当下数据,利用有机模型进行分析,同时结合专业

人员、智库分析研判,得出当下数据对稀土钢绿色创新运行影响的趋势,并修正数据库。警情预警阶段是“事理”的关键所在,就是利用有机模型结合数据库数据的修正,比对当下数据,分析稀土钢绿色创新运行可能出现的偏差,提出预警内容并及时调整,降低危险影响。根据实际数据和信息反馈,优化因素,完成稀土钢绿色创新运行的控制和调节,保障系统中各因素单元的协同发展。

稀土钢产品除了具有一般钢材产品的特征外,还要结合稀土资源优势。具有稀土资源优势的企业在稀土钢产品开发、稀土钢绿色创新方面是第一抉择者、践行者,需要制定稀土钢战略和稀土钢产业规划,同时企业还必须进行稀土钢品牌建设,并通过多种媒体和各种活动宣传稀土钢绿色创新实际案例,扩大社会影响力,提高社会的关注度。钢材产品从调研、设计、研发、生产到用户使用和推广过程中,用户的接受程度、使用意见起着引领作用。具有绿色创新的稀土钢产品,不仅仅是生产技术的进步,更包含了资源、环境、生态方面的进步,具有对人类友好的特征,从这方面要影响市场给予稀土钢产品在市场竞争中平等甚至优先机会。稀土钢的结构调整、升级换代、绿色创新需要得到用户支持,更需要市场反馈进行不断优化。针对钢铁工业,现在政府的政策法规表现出一定的限制性,但也起到了引导作用。同样对于稀土钢绿色创新,政府的作用是不可替代的,需要政府在稀土钢绿色创新上给予支持,并向社会宣传稀土钢绿色创新,修订、完善甚至出台新的政策法规支持稀土钢绿色创新。稀土钢绿色创新的“人理”就是建立一种绩效调控激励机制,激发企业、政府、市场、社会的能动性作用,通过有机联动促进稀土钢绿色创新的效果体现。

4 稀土钢绿色创新评定模型的应用

稀土钢绿色创新评定模型在建立过程中,充分考虑了稀土钢绿色创新的内涵本质与相关的外延因素,尽管是一个理论性探索的概念模型,但包括

了若干具体的指标集。这些指标集的基础数据来源于不同类型、不同维度因素单元的技术研发结果,体现出稀土钢绿色创新遵循了科学规律,具有真实性、可操作性。这些指标集包括以数据指标集为基础建立的能够维护绿色创新系统良好运行、避免危机或者降低危机影响程度,并能使系统中各单元均衡发展的调控机制;包括从企业、政府、市场、社会全角度考虑建立的绿色创新系统中各因素单元协同推进保障效果的调控激励机制。所以利用WSR方法论建立的稀土钢绿色创新评定模型,可以作为稀土钢绿色创新的理论指引,能够指导稀土钢绿色创新行为。

在本模型实际应用过程中,需要针对具体的稀土钢品种类型、生产工艺,将模型进行具体条件下的“转化”。转化过程在“物理”方面是对模型中本质技术创新涉及的具体指标,与各因素单元(资源、环境、生态、效益)涉及的具体指标进行要素分析,确定关键核心因素及其要素和影响权重等,得出模型系统内各因素单元的协同关键指标集。该指标集也作为模型“事理”的基础数据库数据,构建边界指标体系。模型的“人理”针对稀土钢绿色创新过程中如何发挥相关组织的能动性作用,内容是共性的,可以统一考虑。通过稀土钢绿色创新理论概念模型“转化”,可以作为针对某一类稀土钢品种(或者某一种生产工艺的稀土钢)的绿色创新评定模型进行应用,如采用连铸工业生产的耐磨钢、管线钢,采用模铸工业生产的铸铁、铸钢等。

建立稀土钢绿色创新评定模型的主要意图是通过方法论系统研究稀土钢的绿色创新。把稀土钢绿色创新从传统的单一的某个方面的技术创新提升到全面考虑与资源、环境、生态、效益组成的大系统中多要素的协同绿色创新。所以,在应用稀土钢绿色创新评定模型过程中,一定要进行系统全面性的分析,把稀土钢绿色创新的本质技术创新放到资源、环境、生态、效益因素单元集合交叉位置,提炼出覆盖技术、资源、环境、生态、效益绿色创新的协同指标集,以数据形式体现出稀土钢绿色创新的

科学性、稳定性。所以,应用该模型具体指导稀土钢绿色创新时,既要重视稀土钢本质技术的深入创新,还要分析本质技术创新与资源、环境、生态、效益的相互制约作用。

稀土钢作为资源型产品,绿色创新主要从资源的高效利用尤其是中国高丰度镧铈资源平衡利用、高附加值利用角度出发,企业首先自主开展研究、开发技术和产品,直到得到市场、社会、政府认可的系统性创新。所以稀土钢绿色创新评定模型是把激发企业自主性、创造性,促进市场接受,宣传得到社会关注,影响政府给予支持等形成合力的新路径,事在人为非常贴切这一共同努力过程。应用稀土钢绿色创新评定模型,可以激发政府为开展稀土钢绿色创新制定政策法规,引导政府强化稀土钢绿色创新的支持,由此提高稀土钢在社会的关注度,促进市场开拓。

稀土钢绿色创新评定模型描述了如何推动稀土钢不断发展的路线图,具体就是模型中稀土钢迭代技术目标指标集,该指标集就是要把稀土钢绿色创新的技术目标定位不拘泥于当下能够良好运行指标的限制,而是提出更高的目标值。此指标集也可以影响引导与本质技术创新密切相关的资源、环境、生态、效益等几个方面的创新,这就体现出稀土钢绿色创新的螺旋式上升的协同发展理念。在“事理”方面,特别有持续监测与反馈更新的环节,就是不断进行新一轮的过程识别与影响因素判断,目的也是盯住大系统协同关键指标集并考察新的指标集数据变化带来的风险影响,从而保障绿色创新运行水平并不断优化提升。

5 结语及建议

稀土钢绿色创新评定模型是通过分析稀土钢产品生产特点,本质技术创新与资源、环境、生态、效益等创新协同发展相互作用,以及如何促进企业、政府、市场、社会的共同支持建立起的理论模型。该模型应用了开放复杂巨系统与霍尔系统工程理论,借鉴了WSR方法论,具有科学性、真实性、

可操作性,可以指导推进稀土钢绿色创新,为处于转型升级关键时期的稀土钢发展提供新思路,对于钢铁产品和稀土协同绿色创新有一定的指导作用。

绿色创新的研究与实践是战略性的,尽管开始阶段在投入产出上是负向的,但经过良好运行后会取得经济与社会效益。同时,在考虑绿色创新的内涵与外延时,一定要视野开阔,全方位,多因素,强化主要因素与相关因素的协同进步、共同发展,重视相关组织的共同支持作用与激励作用。

参考文献:

[1] 朱立光. 以新质生产力推动钢铁产业高端化、智能化、绿色化发展[J]. 河北冶金, 2024,(6): 1-9.
Zhu L G. Promoting the high-end, intelligent and green development of the steel industry with new quality productivity[J]. Hebei Metallurgy, 2024,(6): 1-9.

[2] 刘自敏, 李娟, 申颢. 绿色金融政策与城市经济高质量发展——来自绿色金融改革创新试验区的证据[J]. 金融理论与实践, 2023(5): 38-52.
Liu Z M, Li J, Shen H. Green finance policies and high-quality development of urban economy: Evidence from the green finance reform and innovation pilot zone[J]. Financial Theory & Practice, 2023(5): 38-52.

[3] 朱承亮. 中国制造业绿色创新绩效及其行业差异[J]. 城市与环境研究, 2017, 4(1): 73-84.
Zhu C L. Green innovation performance evaluation and industry difference of China's manufacturing industry[J]. Urban and Environmental Studies, 2017, 4(1): 73-84.

[4] 陈华斌. 试论绿色创新及其激励机制[J]. 软科学, 1999, 13(3): 43-44.
Chen H B. On green innovation and its incentive mechanism[J]. Soft Science, 1999, 13(3): 43-44.

[5] 应瑞瑶, 周力. 资源禀赋与绿色创新——从中国省际数据的经验研究看“荷兰病”之破解[J]. 财经研究, 2009, 35(11): 92-102.
Ying R Y, Zhou L. Resource endowment and green innovation: Analysis of the solution to the Dutch disease based on an empirical study of 30 provinces' data in Chi-

na[J]. Journal of Finance and Economics, 2009, 35(11): 92-102.

[6] OECD. Environmental Innovation and Global Markets[M]. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development, 2008.

[7] Beise M, Rennings K. Lead markets and regulation: A framework for analyzing the international diffusion of environmental innovations[J]. Ecological Economics, 2005, 52(1): 5-17.

[8] Lin H, Zeng S X, Ma H Y, Qi G Y, Tam V W Y. Can political capital drive corporate green innovation? Lessons from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 64: 63-72.

[9] 李海萍, 向刚, 高忠仕, 付强. 中国制造业绿色创新的环境效益向企业经济效益转换的制度条件初探[J]. 科研管理, 2005, 26(2): 46-49.
Li H P, Xiang G, Gao Z S, Fu Q. A study on institutional conditions of the benefits transferring: From environmental benefits to enterprise's profits of an enterprise's green innovation process in the Chinese manufacturing industries[J]. Science Research Management, 2005, 26(2): 46-49.

[10] El-Kassar A N, Singh S K. Green innovation and organizational performance: The influence of big data and the moderating role of management commitment and HR practices[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2019, 144: 483-498.

[11] 徐建中, 贯君, 林艳. 制度压力、高管环保意识与企业绿色创新实践——基于新制度主义理论和高阶理论视角[J]. 管理评论, 2017, 29(9): 72-83.
Xu J Z, Guan J, Lin Y. Institutional pressures, top managers' environmental awareness and environmental innovation practices: An institutional theory and upper echelons theory perspective[J]. Management Review, 2017, 29(9): 72-83.

[12] Saunila M, Ukko J, Rantala T. Sustainability as a driver of green innovation investment and exploitation[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 179: 631-641.

[13] 任娟娟, 张峰, 程钧谟. 基于 WSR 方法论的制造业绿色创新指数模型解析[J]. 财会月刊, 2021,(8):

- 133-140.
- Ren J J, Zhang F, Cheng J M. Analysis of manufacturing green innovation index model based on WSR methodology[J]. Finance and Accounting Monthly, 2021, (8): 133-140.
- [14] 王曼曼. 制造业绿色低碳创新投入与产出的耦合协调及互动关系[J]. 技术与创新管理, 2024, 45(1): 9-18.
- Wang M M. Research on the coupling and interaction of green low-carbon innovation input and output in manufacturing industry[J]. Technology and Innovation Management, 2024, 45(1): 9-18.
- [15] 陈庆, 刘飞. 环境规制能促进制造业绿色创新吗?——基于动态博弈的理论分析与实证检验[J]. 科技创业月刊, 2024, (6): 10-18.
- Chen Q, Liu F. Can environmental regulation drive green Manufacturing? A theoretical and empirical study based on dynamic game theory[J]. Journal of Entrepreneurship in Science & Technology, 2024, (6): 10-18.
- [16] 沈运红, 孙阳瑛. 环境规制、污染水平与制造业绿色技术创新——二维异质性视角下的制造业最优规制选择[J]. 信息与管理研究, 2023, 8(增刊 2): 68-80.
- Shen Y H, Sun Y Y. Environmental regulation, pollution level and green technology innovation in manufacturing: Optimal regulation choice of manufacturing industry from the perspective of two-dimensional heterogeneity[J]. Journal of Information and Management, 2023, 8(Sup 2): 68-80.
- [17] 管旭琳. 利用环境规制政策来促进江苏制造业绿色创新发展[J]. 江苏商论, 2023, (9): 71-76, 81.
- Guan X L. Utilizing environmental regulation policies to promote the green innovation development of Jiangsu's manufacturing industry[J]. Jiangsu Commercial Forum, 2023, (9): 71-76, 81.
- [18] 邓祥艳, 马胜利. 数字政府对制造业绿色技术创新的影响研究[J]. 科技创业月刊, 2024, 37(6): 40-46.
- Deng X Y, Ma S L. A study on the impact of digital government on green technology innovation in manufacturing industry[J]. Journal of Entrepreneurship in Science and Technology, 2024, 37(6): 40-46.
- [19] 毕克新, 申楠. 制造业绿色创新系统知识溢出的传导机制[J]. 学术交流, 2016, (4): 122-128.
- Bi K X, Shen N. Transmission mechanism of knowledge spillover in green innovation system of manufacturing industry[J]. Academic Exchange, 2016, (4): 122-128.
- [20] 王新东, 田京雷, 宋程远. 大型钢铁企业绿色制造创新实践与展望[J]. 钢铁, 2018, 53(2): 1-9.
- Wang X D, Tian J L, Song C Y. Innovative practice technology and outlook in large iron and steel enterprise green manufacturing[J]. Iron & Steel, 2018, 53(2): 1-9.
- [21] 甄志勇, 毕克新. 制造业绿色创新系统的政府行为优化——兼论对日本核事故的教训吸取[J]. 学习与探索, 2011, (4): 176-178.
- Zhen Z Y, Bi K X. Government behavior optimization of green innovation system in manufacturing industry—Also discussing the lessons learned from Japan's nuclear accident[J]. Study & Exploration, 2011, (4): 176-178.
- [22] 杨庆义. 绿色创新是西部区域创新的战略选择[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2003, 9(1): 35-37.
- Yang Q Y. Green innovation is the strategic choice of the regional innovation for western area[J]. Journal of Chongqing University (Social Sciences Edition), 2003, 9(1): 35-37.
- [23] 陈飞达, 江海涛, 田世伟, 杨永刚, 肖虎. 稀土元素在钢中的作用研究进展[J]. 轧钢, 2024, 41(3): 1-10, 20.
- Chen F D, Jiang H T, Tian S W, Yang Y G, Xiao H. Research progress on the role of rare earth elements in steel[J]. Steel Rolling, 2024, 41(3): 1-10, 20.
- [24] 张晓峰, 智建国, 刁望才, 麻晓光. 稀土钢工业生产中稀土收得率影响因素分析[J]. 包钢科技, 2024, 50(1): 24-27.
- Zhang X F, Zhi J G, Diao W C, Ma X G. Analysis on influencing factors of yield of rare earth in industrial production of rare earth steel[J]. Science & Technology of Baotou Steel (Group) Corporation, 2024, 50(1): 24-27.
- [25] 郑晓楠, 胡煜, 赖朝彬. 稀土钢连铸过程水口结瘤

- 的研究现状[J]. 江西冶金, 2022, 42(4): 10-15.
- Zheng X N, Hu Y, Lai C B. Research status of nozzle clogging during continuous casting of rare earth treated steel[J]. Jiangxi Metallurgy, 2022, 42(4): 10-15.
- [26] 邓阿妹, 魏凤, 李涛, 王笑. 基于全球专利数据的稀土钢技术创新发展研究[J]. 稀土, 2023, 44(6): 141-154.
- Deng A M, Wei F, Li T, Wang X. Research on technological innovation and development of rare earth steel based on global patent data[J]. Chinese Rare Earths, 2023, 44(6): 141-154.
- [27] 孙宝珍, 韩善旭. 包钢股份积极践行可持续发展——自主研发稀土钢, 助力下游产业绿色低碳高质量发展[J]. 冶金财会, 2024, 43(6): 21-23.
- Sun B Z, Han S X. Baotou Steel Co., Ltd. actively practices sustainable development-independent research and development of rare earth steel to help downstream industries develop in a green, low-carbon and high-quality way[J]. Metallurgical Financial Accounting, 2024, 43(6): 21-23.
- [28] 曹晓明, 班华, 程德富, 王全利. 包钢稀土钢生命周期评价研究[J]. 包钢科技, 2017, 43(3): 87-90.
- Cao X M, Ban H, Cheng D F, Wang Q L. Research on life cycle assessment of rare earth steel in Baotou Steel [J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2017, 43(3): 87-90.
- [29] T/SSEA 0036—2019. 稀土钢通用技术要求[S].
- T/SSEA 0036—2019. General technical requirements for rare earth steel [S].
- [30] 瞿伟, 任慧平, 智建国, 董方, 齐建波. 铝热还原含稀土高炉渣直接合金化行为正交试验研究[J]. 稀有金属, 2020, 44(7): 735-743.
- Qu W, Ren H P, Zhi J G, Dong F, Qi J B. Behavior of aluminothermic reduction rare earth containing blast furnace slag for direct alloying using orthogonal testing [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44(7): 735-743.
- [31] 钱学森. 再谈开放的复杂巨系统 [A]. 许国志. 系统科学与工程研究论文集[C]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000.
- Qian X S. Talking about open complex giant systems again[A]. Xu G Z. Collection of research papers in systems science and engineering[C]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 2000.
- [32] 王丹力, 郑楠, 刘成林. 综合集成研讨厅体系起源、发展现状与趋势[J]. 自动化学报, 2021, 47(8): 1822-1839.
- Wang D L, Zheng N, Liu C L. Hall for workshop of metasynthetic engineering: The origin, development status and future[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(8): 1822-1839.
- [33] 王慧斌, 徐小群. 综合集成研讨厅体系及应用研究[J]. 信息与控制, 2001, 30(6): 516-521.
- Wang H B, Xu X Q. Study of hall for work shop of metasynthetic engineering and applications [J]. Information and Control, 2001, 30(6): 516-521.
- [34] 顾基发, 唐锡晋, 朱正祥. 物理-事理-人理系统方法论综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(6): 51-60.
- Gu J F, Tang X J, Zhu Z X. Survey on Wuli-Shili-Renli system approach [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(6): 51-60.
- [35] 张彩江, 孙东川. WSR 方法论的一些概念和认识[J]. 系统工程, 2001, 19(6): 1-8.
- Zhang C J, Sun D C. Some concepts and understandings about WSR [J]. Systems Engineering, 2001, 19(6): 1-8.
- [36] 董勋, 孟凡生. 基于 WSR 的企业集成创新知识转移研究[J]. 科学管理研究, 2012, 30(6): 53-56.
- Dong X, Meng F S. The research of knowledge transfer of integrated innovation based on the WSR [J]. Scientific Management Research, 2012, 30(6): 53-56.
- [37] 顾基发, 唐锡晋. 物理-事理-人理系统方法论: 理论与应用[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2006. 1-185.
- Gu J F, Tang X J. Wuli-Shili-Renli System Approach [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 2006. 1-185.

Theoretical Exploration and Research on Green Innovation of Rare Earth Steel

ZUO Kuang-tian^{1*}, LI Shu-yi^{1,2}

(1. School of Economic and Management, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China;
2. Baotou Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Baotou 014010, China)

Abstract:The application of rare earths in steel can promote the efficient utilization of abundant rare earth elements such as lanthanum and cerium, and promote the innovative development of the steel industry in this paper. The production characteristics of rare earth steel products were analyzed, and the direction of green innovation in rare earth steel was summarized. Based on the Wuli-Shili-Renli (WSR) methodology, the key areas of green innovation for rare earth steel were identified, and a three-dimensional theoretical framework for evaluating green innovation was established, and a comprehensive set of index systems characterizing rare earth steel green innovation data was covered. It establishes a regulatory framework to ensure the smooth operation of rare earth steel green innovation, promoting balanced and coordinated development among essential technological innovations, resources, environment, ecology, and benefits. Additionally, it sets up an incentive mechanism from the perspectives of enterprises, markets, society, and the government to foster green innovation and coordinated development in the rare earth steel industry. This model offers a novel approach for the development of rare earth steel during this pivotal transformation and upgrading period, providing robust theoretical support and practical guidance for rare earth steel green innovation.

Key words:rare earth steel; the 3D model of green innovation judgment; WSR methodology; green innovation; model