

基于四阶段 DEA 模型的有色金属-新能源产业链 现代化测度及影响因素研究^①

方文龙^{1,2}, 赖丹^{1,3}, 李彦蓉¹, 易贤华¹

(1.赣南科技学院 能源金属产业研究院, 江西 赣州 341000; 2.江西理工大学 经济管理学院, 江西 赣州 341000; 3.中国科学院 赣江创新研究院, 江西 赣州 341000)

摘要: 基于四阶段 DEA 模型, 测算了我国有色金属-新能源产业链各环节创新效率, 并结合 Tobit 模型检验其影响因素。结果表明: 经 SFA 模型调整, 产业链创新效率呈现矿产品>精炼产品>新能源材料>新能源应用的特征, 纯技术效率是制约产业链各环节创新效率提升的关键因素; 空间上产业链创新效率呈现“西强东弱”的分布特征, 产权上国企高于非国企; 供应商集中度、企业规模、员工质量与创新效率正相关, 市场竞争程度、资产负债率、股权集中度与创新效率负相关。为提升产业链创新效率, 应从降低新能源企业创新风险、提高新能源企业收益、推动产业集聚等方面加大政策支持力度。

关键词: 产业链现代化; 创新效率; 有色金属; 新能源; 四阶段 DEA; 供应链; 产业集群; 测度模型; 影响因素分析; 上下游产业链
中图分类号: F426.1 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.033

文章编号: 0253-6099(2025)01-0179-09

Measure and Influencing Factors for Modernization of Non-Ferrous Metal-New Energy Industrial Chain Based on Four-Stage DEA Model

FANG Wenlong^{1,2}, LAI Dan^{1,3}, LI Yanrong¹, YI Xianhua¹

(1. Research Institute of Energy Metal Industry, Gannan University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. School of Economics and Management, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 3. Ganjiang Institute of Innovation, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: The innovation efficiency of each link of China's non-ferrous metal-new energy industrial chain was measured based on a four-stage DEA model, and its influencing factors were analyzed with the Tobit model. Based on the study, the following conclusions can be made: after SFA model adjustment, the four links of the industrial chain, i.e. mineral products, refined products, new energy materials and new energy application, can be arranged in descending order in terms of innovation efficiency, and pure technical efficiency is the key factor restricting the improvement of the innovation efficiency of each link of the industrial chain; the innovation efficiency of the industrial chain also presents the characteristics of being stronger in the west and weaker in the east in terms of spatial distribution; state-owned enterprises can demonstrate high innovation efficiency than non-state-owned enterprises; the concentration of suppliers, enterprise size, and the quality of employees are positively correlated to the innovation efficiency, while the degree of market competition, the debt to asset ratio, and the equity concentration are negatively correlated to the innovation efficiency. In order to improve the innovation efficiency of the industrial chain, more efforts should be made in policy support for reducing innovation risks of new energy enterprises, increasing the returns of new energy enterprises, and promoting the formation of industrial clusters.

Key words: modernization of industry chain; innovation efficiency; non-ferrous metals; new energy; four-stage DEA; supply chain; industry clustering; measure model; influencing factor analysis; upstream and downstream in industrial chain

① 收稿日期: 2024-08-25

基金项目: 江西省哲学社会科学重点研究基地项目(23ZXSKJD41); 国家社会科学基金(23BGL218); 国家自然科学基金(72363018)

作者简介: 方文龙(1995—), 男, 江西崇仁人, 博士研究生, 主要从事资源经济与管理研究。E-mail: 2360999278@qq.com

通信作者: 赖丹(1977—), 女, 江西瑞金人, 硕士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事资源经济与管理研究。E-mail: laidanz@163.com

按照联合国产业分类目录,我国是全球唯一拥有该目录下全部工业门类的国家,但我国产业基础能力薄弱以及产业链现代化水平不高的问题逐渐凸显,产业国际竞争力有待提升^[1]。党的二十大报告提出“坚持创新在我国现代化建设全局中的核心地位”,把科技自立自强作为国家发展的战略支撑^[2],因此提升产业链创新能力,打造自主可控、安全可靠的现代化产业体系刻不容缓^[3]。创新效率作为衡量创新能力的重要指标之一,提高创新效率至关重要。

由于有色金属资源空间分布不均衡,以及有色金属产业在区域间的发展不均衡,全球对有色金属资源的争夺和有色金属产业竞争日益激烈^[4]。有色金属有众多终端应用产业,如电子信息、新能源、高端装备、航空航天等^[5]。当前,全球碳中和目标范围逐渐扩大,科学技术不断突破,新能源产业竞争力大幅度提升,在新能源获取、传输存储、高效使用等众多产业中,有色金属均发挥了关键作用,是支撑新能源产业发展不可或缺的物质基础;新能源产业又为有色金属产业提供广阔的发展空间,两大产业表现为强烈的产业链上下游关系^[6],因此,有色金属-新能源产业链未来发展空间巨大,发展前景明确。

为掌握我国在有色金属-新能源产业链领域发展主导权,提升产业链现代化水平,塑造大国竞争新优势,对有色金属-新能源产业链各环节创新效率进行测度并挖掘影响产业链创新效率提升的因素,是当前亟须关注和解决的重点问题。

1 研究现状

关于产业链现代化的研究,已有文献主要集中于探讨产业链现代化的概念、影响因素及测度模型等方面。产业链现代化是经济发展和转型升级的必然结果,也是大国经济在参与国际分工和产业竞争中的内生选择,是建设现代产业体系的基本要求,其含义可以从多个维度进行分析,但本质是要实现基础产业高级化,加强上下游企业之间技术经济的关联性,增强区域间产业协同性,提高产业链与创新链、资金链和人才链嵌入的紧密度,由此构建现代产业体系,提高供给体系质量^[7-9]。与此同时,众多文献从不同维度探究了产业链现代化影响因素,且这些影响因素呈现鲜明的时代特征。但最经典的仍是“创新之父”——熊彼特提出的规模与市场竞争假说。他认为创新需要持久和制度化,只有大企业才能担负起研发面临的高额费用,而创新成果的收获则要求企业对市场具有某种控制能力^[10]。同样,产业链现代化建设离不开创新驱动,创

新则较容易出现在大企业以及那些容易获取政府补贴的企业中^[11]。此外,关于产业链现代化测度模型,相关研究主要集中于产业嵌入创新链的测度上,学者们从不同角度使用了不同的测算方式,主要从间接测度和直接测度两个方向展开。间接测度即使用代理指标测度^[12]。直接测度主要通过构建相应指标体系,运用不同模型对其进行评价^[13]。测算模型包括参数法的随机前沿分析和非参数法的数据包络分析,两者均有优缺点。Fried 等提出的四阶段 DEA 模型有效结合了两种模型的优点,并得到广泛应用^[14],国内学者也运用该模型对不同研究对象进行了评价^[15-17]。

从产业链视角看,有色金属与新能源属于产业链的两个不同环节,有色金属为新能源提供其所需的物质基础,新能源为有色金属高值化提供应用方向,两个产业通过产业链紧密联系在一起^[18]。国际能源总署(IEA)2021年发布的报告显示,新能源技术对有色金属的依赖越来越明显^[19]。但纵观已有文献,学者们大多集中于单一产业环节创新效率的测算,在研究对象上缺乏基于产业链视角的创新效率实证研究,在研究样本上对有色金属产业和新能源产业关注不足,在研究内容上,忽视了产业链创新效率影响因素的挖掘。本文以产业链为研究对象,采用考虑了环境因素、随机扰动因素的四阶段 DEA 模型测算有色金属-新能源产业链各环节创新效率,并运用 Tobit 模型分析产业链创新效率的影响因素,为提升产业链整体创新能力建言献策。

2 研究设计

2.1 四阶段 DEA 模型

Fried 等指出传统 DEA 模型没有考虑管理无效率、环境因素和统计噪声对决策单元效率评价的影响,四阶段 DEA 模型能够有效剔除上述 3 种因素的影响^[14],从而将决策单元置于同等环境下对效率进行评价,更具比较价值,结果更贴近实际。参考文献[21-22],构建四阶段 DEA 模型。

1) 第一阶段,传统 DEA 模型。采用 BCC 模型对有色金属-新能源产业链各环节 6 年 462 个样本进行创新效率的初步评价,参考文献[16]构建模型如下:

$$\begin{aligned} & \min \theta - \varepsilon(\hat{e}^T S^- + e^T S^+) \\ & s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n X_j \lambda_j + S^- = \theta X_0 \\ \sum_{j=1}^n Y_j \lambda_j - S^+ = Y_0 \\ \lambda_j \geq 0; S^-, S^+ \geq 0 \end{cases} \quad (1) \end{aligned}$$

式中: j 为决策单元, $j=1,2,\dots,n$; X 和 Y 分别为投入和产出向量。

DEA 模型本质上是一个线性规划问题。若 $\theta=1, S^+=S^-=0$, 则决策单元 DEA 有效;若 $\theta=1, S^+\neq 0$ 或 $S^-\neq 0$, 则决策单元弱 DEA 有效;若 $\theta<1$, 则决策单元非 DEA 有效。BCC 模型计算出来的效率值为综合技术效率(TE), 可以进一步分解为规模效率(SE)和纯技术效率(PTE), $TE=SE\times PTE$ 。

2) 第二阶段,相似 SFA 回归模型。利用 SFA 回归模型剔除环境因素和统计噪声对决策单元效率的影响,模型如下:

$$S_{ni} = f^n(z_i; \beta^n) + v_{ni} + \mu_{ni} \quad (i = 1, 2, \dots, I; n = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

式中: S_{ni} 为第 i 个决策单元第 n 项投入的松弛值; z_i 为环境变量; β^n 为环境变量的系数; $v_{ni} + \mu_{ni}$ 为综合误差项,其中 $v_{ni} \sim N(0, \sigma_{v_n}^2)$ 表示统计噪声、 $\mu_{ni} \geq 0$ 表示管理无效率,假定 $\mu_{ni} \sim N^+(\mu^n, \sigma_{\mu_n}^2)$ 服从在零点截断的正态分布,实证时通常假定其服从半正态分布 $\mu_{ni} \sim N(0, \sigma_{\mu_n}^2)$ 。另外假定 v_{ni}, μ_{ni} 相互独立,并且与 k 个环境变量也相互独立; $f^n(z_i; \beta^n)$ 为确定的可行松弛前沿,而 $f^n(z_i; \beta^n) + v_{ni}$ 为随机的可行松弛前沿,采用极大似然技术估计未知参数。

根据罗登跃^[22]、陈巍巍^[23]等人的推导,管理无效率的分离公式为:

$$E(\mu_i | \varepsilon_i) = \frac{\lambda \sigma}{1 + \lambda^2} \left[\frac{\phi\left(\frac{\varepsilon_i \lambda}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{\varepsilon_i \lambda}{\sigma}\right)} + \frac{\lambda \varepsilon_i}{\sigma} \right] \quad (3)$$

式中: $\sigma_*^2 = \frac{\sigma_\mu^2 \sigma_v^2}{\sigma^2}$, $\lambda = \sigma_\mu / \sigma_v$; $\phi(\cdot), \Phi(\cdot)$ 分别为标准正态分布的密度函数和分布函数。

计算随机误差项 μ , 计算公式如下:

$$\hat{E}[v_{ni} | v_{ni} + \mu_{ni}] = s_{ni} - z_i \hat{\beta}^n - \hat{E}[u_{ni} | v_{ni} + \mu_{ni}] \quad (i = 1, 2, \dots, I; n = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

3) 第三阶段,剔除环境因素和统计噪声的干扰后,将所有决策单元调整于相同的外部环境中,调整公式如下:

$$X_{ni}^A = X_{ni} + [\max_i \{z_i \hat{\beta}^n\} - z_i \hat{\beta}^n] + [\max_i \{\hat{v}_{ni}\} - \hat{v}_{ni}] \quad (i = 1, 2, \dots, I; n = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

式中: X_{ni}^A 为调整后的投入; X_{ni} 为调整前的投入; $[\max_i \{z_i \hat{\beta}^n\} - z_i \hat{\beta}^n]$ 是对外部环境因素进行调整; $[\max_i \{\hat{v}_{ni}\} - \hat{v}_{ni}]$ 是将所有决策单元置于相同环境下。

4) 第四阶段,调整后投入产出变量的 DEA 效率

分析。运用调整后的投入产出变量再次测算各决策单元的效率,此时的效率已经剔除环境因素和随机因素的影响,是相对真实准确的。

2.2 Tobit 回归模型

由于被解释变量为归并数据,上限为 1,又属于面板数据,根据数据的结构特征,本文采用面板 Tobit 回归模型。个体因素无法忽视,应采用个体效应估计,但面板 Tobit 模型无法得到个体异质性的充分估计量,因此,参考文献[24-25],采用面板 Tobit 随机效应模型。

2.3 变量的选取

1) 投入变量。通过文献梳理,发现影响创新投入的主要因素是人力和资本。参考文献[17],本文以固定资产+在建工程、企业营业成本、企业研发投入资金总额、企业研发人员数量表征。

2) 产出变量。创新产出大致包括技术和经济两类产出。参考文献[15],本文以专利授权数量和企业期末净利润衡量。

DEA 模型要求指标的选取满足“同向性”。参考文献[26],运用 Stata16 对投入产出变量进行相关性检验,结果如表 1 所示。结果表明,各项指标均显著正相关,满足 DEA 模型“同向性”的要求,说明本文指标选取合适。

表 1 投入产出指标的 Pearson 相关系数

变量	Inp1	Inp2	Inp3	Inp4
Outp1	0.894 * * *	0.998 * * *	0.839 * * *	0.697 * * *
Outp2	0.406 * * *	0.285 * * *	0.429 * * *	0.309 * * *

注: * * * 表示在 1% 水平上显著。

3) 环境变量。按照 Fried 等的研究,环境变量选取应遵循分离假设原则,即决策单元自己无法通过管理等方式控制,但会对决策单元创新效率产生影响^[14]。借鉴文献[1,15,17],本文从宏观环境、中观环境和微观企业特性三个层面选取指标。宏观环境层面:一是选取区域人均 GDP,地区经济发展状况对企业创新有深远影响,但地区经济发展的影响不完全受企业控制,应予以剔除;二是选取政府补助,该指标作为企业直接的资金来源,能够很大程度降低创新成本,提高企业创新积极性,但能否获得政府补助不受企业自身控制,应予以剔除。中观环境层面:选取行业,产业链上企业分属不同行业,主要包括采矿业,制造业,电力、热力、燃气、水生产及供应业三类,不同行业经营特性差异巨大,这种差异对企业创新会产生影响,但这种差异不由单个企业产生,应予以剔除。微观企业特

性方面:选取上市年限、企业规模和产权性质三个指标,这三个指标决定企业能否承受研发失败带来的创新风险,对企业创新产生一定影响,但上市年限长短、企业规模大小、产权性质不由企业自身决定,应予以剔除。具体变量定义见表2。

表2 变量定义

Table 2 Definition of variables

维度	要素	变量符号	单位
投入变量	固定资产+在建工程	Inp1	亿元
	企业营业成本	Inp2	亿元
	企业研发人员数量	Inp3	人
	企业研发投入资金总额	Inp4	亿元
产出变量	专利授权数量	Outp1	项
	企业期末净利润	Outp2	亿元
环境变量	区域人均GDP	Inv1	—
	政府补助	Inv2	亿元
	行业类型	Inv3	—
	上市年限	Inv4	—
	产权性质(国企取1,非国企取0)	Inv5	—
	企业规模(年末总资产)	Inv6	亿元

2.4 数据来源

按有色金属到新能源领域加工利用的递进关系,有色金属-新能源产业链可以概括为有色金属矿产品→有色金属精炼产品→生产新能源所需有色金属材料→新能源终端应用产业(以下简称矿产品→精炼产品→新能源材料→新能源应用)。按照上述产业链的递进关系,本文从Choice金融终端数据库,依据公司经营范围、主营业务类型和产品应用,手工筛选出处于产业链不同环节的上市公司样本,为保证研究结果不被异常值干扰,删除了样本内*ST、ST、退市整理期、暂停或终止上市的公司,删除2018年以后上市的公司,最终得到77家公司样本。筛选的原则是矿产品、精炼产品企业的主营业务必须涉及新能源产业,新能源材料、新能源应用企业的主营业务必须涉及有色金属。企业创新专利数据、财务数据、公司治理数据均取自Choice金融终端数据库,研究期间为2017—2022年。产业链各环节公司数量见表3。

表3 产业链不同环节企业数量

Table 3 Number of enterprises in different links of industrial chain

产业链环节	企业数量				国企数量
	东部	中部	西部	合计	
矿产品	2	0	0	2	0
精炼产品	12	5	3	20	6
新能源材料	7	2	1	10	1
新能源应用	33	6	6	45	8

注:国企包括中央国有企业和地方国有企业,划分依据来自Choice金融终端数据库。

3 实证分析

3.1 第一阶段:传统DEA-BCC模型的分析

第一阶段主要运用BCC模型对产业链现代化创新效率进行测算,结果如表4所示。由表4可知,不考虑随机误差和外部环境因素干扰项时,整个产业链企业的创新效率均值为0.836,说明有色金属-新能源产业链从技术创新投入到产出仍有16.4%的上升空间。从产业链不同环节看,创新效率2017—2022年均值由高到低分别是精炼产品→矿产品→新能源应用→新能源材料,反映产业链前端创新效率整体高于产业链后端;从纯技术效率和规模效率均值看,精炼产品均值高于后端新能源材料及新能源应用。可能的原因在于样本企业中,前端精炼产品上市企业上市年限都比较大,而后端新能源材料及其应用企业上市年限较短,企业原始积累、规模等都不如产业链前端企业。

表4 2017—2022年产业链不同环节调整前创新效率测度结果
Table 4 Measurement results of innovation efficiency of different links of industrial chain before adjustment from 2017 to 2022

类型	产业链环节	调整前均值						均值
		2017	2018	2019	2020	2021	2022	
创新效率	矿产品	0.815	0.886	0.900	0.811	0.847	0.737	0.832
	精炼产品	0.852	0.849	0.878	0.849	0.856	0.886	0.862
	新能源材料	0.794	0.742	0.809	0.811	0.832	0.951	0.823
	新能源应用	0.821	0.798	0.808	0.806	0.864	0.862	0.827
	整体均值	0.836						
纯技术效率	矿产品	0.837	0.904	0.906	0.812	0.850	0.750	0.843
	精炼产品	0.887	0.862	0.908	0.887	0.882	0.925	0.892
	新能源材料	0.805	0.846	0.862	0.859	0.894	1.000	0.877
	新能源应用	0.830	0.821	0.841	0.857	0.896	0.935	0.863
规模效率	矿产品	0.967	0.977	0.993	1.000	0.997	0.976	0.985
	精炼产品	0.964	0.987	0.967	0.958	0.971	0.959	0.968
	新能源材料	0.987	0.896	0.946	0.946	0.937	0.951	0.944
	新能源应用	0.989	0.974	0.962	0.938	0.964	0.923	0.958

图1为2017—2022年产业链各环节调整前创新效率

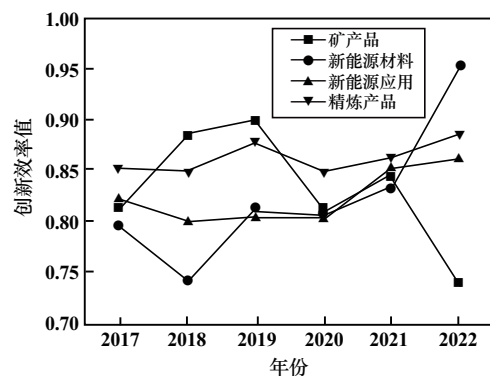


图1 产业链各环节调整前创新效率值

Fig. 1 Innovation efficiency of each link industrial chain before adjustment

率。从 6 年总的变化趋势看,前端矿产品环节创新效率整体呈下降趋势,而后端新能源材料及其应用环节创新效率整体呈上升趋势,且新能源材料环节创新效率上升幅度大于新能源应用环节创新效率,精炼环节创新效率整体较为稳定,大致在 0.85 上下徘徊。将 77 家企业按产权性质、区域划分并比较 2017—2022 年创新效率差异,结果见表 5。由表 5 可知,在创新效率、

纯技术效率和规模效率均值上,中央国企、地方国企要高于民营企业 and 外企,西部地区企业高于东部、中部地区企业,说明技术创新投入产出转换效率上,中央国企、地方国企要高于民营企业 and 外企,西部地区企业高于东部和中部地区企业。原因可能在于创新效率的测度未剔除环境因素和统计噪声的影响,因此,本文运用 SFA 模型对创新效率进行调整。

表 5 2017—2022 年不同产权性质、不同区域企业创新效率测度结果

Table 5 Measurement results of innovation efficiency of enterprises with different property rights in different regions from 2017 to 2022

SFA 调整前后	效率	产权性质				区域		
		中央国企	地方国企	民营企业	外企	东部	中部	西部
调整前	创新效率	0.915	0.906	0.816	0.850	0.840	0.791	0.870
	纯技术效率	0.925	0.942	0.853	0.888	0.879	0.822	0.888
	规模效率	0.989	0.961	0.958	0.956	0.957	0.962	0.981
调整后	创新效率	0.963	0.902	0.907	0.850	0.903	0.901	0.949
	纯技术效率	0.973	0.925	0.938	0.870	0.934	0.923	0.964
	规模效率	0.989	0.975	0.965	0.975	0.964	0.975	0.985

说明:产权性质的划分依据来自 Choice 金融终端数据库,其中国企包括中央国有企业和地方国有企业,外企包括外资独资经营企业、外资企业和中外合资经营企业三类。

3.2 第二阶段: SFA 模型的实证分析

以传统 DEA 模型计算出的松弛变量作为被解释变量,将 6 个环境变量作为解释变量,使用软件 Frontier4.1 进行估计,结果如表 6 所示。

表 6 第二阶段 SFA 模型估计结果

Table 6 SFA model estimation results of the second stage

变量	固定资产冗余	营业成本冗余	研发经费冗余	研发人员冗余
C	-14.44 * (-1.73)	-1 969.89 * * * (-47.58)	-11.07 * * * (-11.10)	-8.94 * * * (-8.77)
Inv1	0.99 * (1.86)	55.45 * (1.84)	0.84 * (1.91)	-5.25 * * * (-3.06)
Inv2	1.40 * * * (6.02)	232.08 * * * (3.45)	-0.03 * * * (-3.03)	44.61 * * * (6.35)
Inv3	0.04 (0.48)	14.22 (0.53)	-0.07 * * * (-4.23)	1.76 (0.68)
Inv4	0.58 * * (2.34)	332.27 * * (2.01)	0.12 * * * (3.56)	17.64 * * * (8.57)
Inv5	-0.48 (-0.55)	-164.13 * (-1.70)	0.42 * * * (3.86)	-2.56 * * (-2.45)
Inv6	0.000 8 * * * (-4.51)	-1.99 * * * (-6.52)	0.000 6 * * * (0.39)	-0.10 * * * (-2.85)
δ_2	31.81 * * * (6.39)	4 816 495 * * * (4 793 884.4)	29.71 * * * (29.71)	45 459.08 * * * (45 376.08)
γ	0.93 * * * (4.54)	0.95 * * * (25.73)	0.92 * * (2.51)	0.99 * * * (2.91)
LR	62.68 * * * (4.54)	38.17 * * * (25.73)	40.36 * * * (2.51)	50.57 * * * (2.91)

注: * * *、* *、* 分别表示在 1%、5%、10% 水平上显著;括号内数值为 t 值;C 为常数项; δ_2 表示模型中与技术效率相关的参数,其通常与时间变量或其他影响效率的因素相关,用于捕捉技术效率随时间或其他因素的变化; γ 表示非效率项(技术无效率)在总误差中的相对重要性;LR 表示似然比检验统计量(likelihood ratio),用于检验模型整体显著性。

4 组投入变量冗余与环境变量回归结果显示:LR 均在 1% 水平上显著,说明模型选择合理; γ 值均接近 1 且均至少在 5% 水平上显著,表明管理无效率对 4 组投入的冗余产生主要影响;解释变量系数大多至少在 10% 水平上显著,说明 6 种环境变量对投入松弛有显著影响,进一步表明指标选取的合理性及 SFA 模型的准确性。

通过观察 6 组环境变量的回归系数,主要得出如下结论:

1) 区域人均 GDP 与固定资产、营业成本、研发经费的回归系数均在 10% 水平上显著为正,表明有良好市场环境的区域有利于最大程度发挥投入的价值,减少创新资源的浪费,提高创新效率;而区域人均 GDP 与研发人员显著负相关,即减少研发人员的投入冗余,可以提高企业的创新资源配置。

2) 政府补助与固定资产、营业成本、研发人员的回归系数均在 1% 水平上显著为正,说明政府补助不利于减少企业这三项投入冗余,可能的原因是企业过分依赖政府补助获得创新所需资金反而会产生“寻补贴”行为,大大降低创新转化效率;而政府补贴与研发经费显著负相关,说明政府资金的注入有利于降低企业对研发资金的投入,有效降低了资金投入冗余。

3) 行业类型与固定资产、营业成本、研发人员的回归系数为正,但没有通过显著性检验,而与研发经费显著负相关。可能的解释是行业类型存在环境效应,处在不同行业的企业可能受行业特性、资源等差异的

束缚,影响创新效率。

4) 上市年限与固定资产、营业成本、研发经费、研发人员的回归系数至少在 5% 水平上显著为正,说明企业上市年限越长,所拥有的管理经验越丰富,越有利于减少资源浪费,从而提高创新效率。

5) 产权性质与营业成本、研发人员的回归系数至少在 10% 水平上显著为负,说明有色金属-新能源产业链上国企的产权属性有利于其整合资源,形成规模优势,提高创新效率。

6) 企业规模与固定资产、研发经费的回归系数至少在 1% 水平上显著为正,说明规模大的企业往往面临高资产和研发经费投入,相应的退出成本较高,创新资源并未得到有效配置;而企业规模与营业成本、研发人员的回归系数至少在 1% 水平上显著为负,说明规模越大的企业越能有效发挥人力资源和成本节约优势,集中力量专注研发,提高创新效率。

由此可见,环境变量对创新效率会产生不同的影响,有必要予以剔除,探索相同条件下的创新效率。

3.3 第三~四阶段:调整后的创新效率测算

根据第二阶段所得,运用式(5)将所有决策单元调整于相同的外部环境中,调整后的投入与原始产出再次运用 DEA-BCC 模型进行创新效率的测算,所得结果即为剔除环境和随机误差干扰后置于相同条件下的创新效率值,结果如表 7 所示。

表 7 2017—2022 年产业链不同环节调整后创新效率测度结果

Table 7 Innovation efficiency measurement results of different links of industrial chain after adjustment from 2017 to 2022		调整后均值							均值
类型	产业链环节	2017	2018	2019	2020	2021	2022		
创新效率	矿产品	0.978	0.968	0.971	0.986	0.969	0.969	0.973	
	精炼产品	0.938	0.935	0.927	0.922	0.935	0.953	0.935	
	新能源材料	0.773	0.783	0.966	0.975	0.964	0.966	0.904	
	新能源应用	0.902	0.893	0.891	0.888	0.888	0.916	0.896	
	整体均值		0.927						
纯技术效率	矿产品	0.991	0.994	0.998	0.996	0.986	0.983	0.991	
	精炼产品	0.957	0.955	0.945	0.947	0.949	0.981	0.956	
	新能源材料	0.783	0.969	0.974	0.982	0.965	1.000	0.945	
	新能源应用	0.935	0.925	0.918	0.917	0.918	0.944	0.926	
规模效率	矿产品	0.987	0.974	0.974	0.990	0.983	0.986	0.982	
	精炼产品	0.980	0.979	0.981	0.973	0.985	0.971	0.978	
	新能源材料	0.987	0.814	0.993	0.993	0.999	0.966	0.958	
	新能源应用	0.961	0.961	0.967	0.963	0.967	0.970	0.965	

由表 7 可知,调整后整个产业链企业的创新效率均值为 0.927,较调整之前有较大幅度提高。从产业链不同环节看,创新效率 2017—2022 年均值由高到低分别是矿产品→精炼产品→新能源材料→新能源应用,

整个产业链创新效率出现“倒挂”,且纯技术效率和规模效率亦是如此。可能的解释是产业链前端国企占比高、上市时间长且规模优势凸显,掌握着大量创新资源和创新要素,所以凭借技术、资金、人才等优势引领有色金属-新能源产业链技术创新,而后端新能源企业多属于民企,上市时间短,创新要素积累不够,难以提高创新效率。

此外,调整后的有色金属-新能源产业链四个环节的创新效率、纯技术效率均值都在不同程度上有所提高。通过对比调整前后的创新效率发现,前端矿产品创新效率变化最大,由调整前的波动下降到调整后处于四个环节最高水平,说明产业链前端受环境因素的影响很大。调整后除新能源材料在 2018—2019 年出现急剧上升外,产业链其他环节创新效率变得更平缓(如图 2 所示)。通过对比调整前后的创新效率、纯技术效率和规模效率发现,调整前,产业链各环节规模效率整体较高,趋于前沿面,而纯技术效率整体较低,说明调整前产业链各环节创新效率受纯技术效率的影响较大;调整后规模效率变化不大,纯技术效率都有较大程度提高,这进一步说明产业链各环节创新效率主要受纯技术效率的影响。

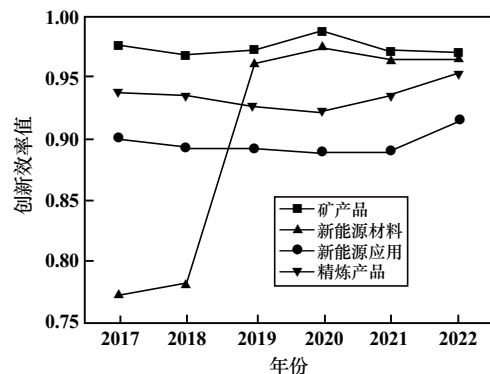


图 2 产业链各环节调整后创新效率值

Fig. 2 Innovation efficiency of each link in industrial chain after adjustment

通过对比产权性质、区域调整前后的变化发现,调整后创新效率、纯技术效率和规模效率均值都高于调整前,且创新效率、纯技术效率和规模效率均值上,中央国企、地方国企高于民营企业 and 外企,西部地区企业高于东部和中部地区企业。调整后国企创新效率仍高于非国企,可能的原因在于中央国企、地方国企特殊的功能定位使其积累了大量的创新资源和创新要素,对其创新效率的提高产生了助推作用。调整后西部地区企业创新效率仍高于东部和中部地区企业,可能的原因在于:从样本看,西部地区企业样本较少,且主要集

中在四川、重庆、陕西等创新水平较高的省份;新能源产业具有明显的资源依赖性,表现出极强的区域产业集聚特性,新能源产业中的太阳能光伏、风能、水能、生物质能等企业凭借西部地区赋予的天然自然资源禀赋发展迅猛。这些原因综合使得西部地区有色金属-新能源产业链创新效率高于东部和中部。

3.4 影响因素分析

围绕熊彼特假说,有关企业规模、市场力量与创新之间关系的争论,已在学术界持续数年^[11]。此外,企业创新活动具备不确定性、积累性、协同性、不对称性以及复杂多样性,这要求企业具备一支能快速适应市场动态变化、并具有较强学习吸收能力的员工梯队^[27]。同时,融资结构是影响企业获取创新所需资金的重要因素,不合理的融资结构会阻碍企业创新效率的提高^[28]。合理的股权结构可以有效缓解委托代理问题,降低企业创新成本,提高创新积极性和创新效率。因此,本文从市场结构、行业结构、企业内部组织结构三个维度选取市场竞争程度、供应商集中度、企业规模、员工质量、资产负债率、股权集中度 6 个指标,分析其对有色金属-新能源产业链创新效率的影响。

以四阶段 DEA 模型测得调整后的创新效率值为被解释变量,并将其拆解为纯技术效率和规模效率两部分,将上述 6 个影响因素作为解释变量分别与 innovation efficiency、pure technical efficiency 和 scale efficiency 回归,探究解释变量影响产业链创新效率的具体路径。数据来源于 Choice 金融终端数据库,研究期间为 2017—2022 年,模型如下:

$$E_{Crstait} = \alpha_0 + \alpha_1 E_{hhiit} + \alpha_2 E_{scit} + \alpha_3 E_{sizeit} + \alpha_4 E_{fncit} + \alpha_5 E_{debit} + \alpha_6 E_{scit} + \mu_{1it} + \varepsilon_{1it} \quad (9)$$

$$E_{Vrstit} = \lambda_0 + \lambda_1 E_{hhiit} + \lambda_2 E_{scit} + \lambda_3 E_{sizeit} + \lambda_4 E_{fncit} + \lambda_5 E_{debit} + \lambda_6 E_{scit} + \mu_{2it} + \varepsilon_{2it} \quad (10)$$

$$E_{Scaleit} = \beta_0 + \beta_1 E_{hhiit} + \beta_2 E_{scit} + \beta_3 E_{sizeit} + \beta_4 E_{fncit} + \beta_5 E_{debit} + \beta_6 E_{scit} + \mu_{3it} + \varepsilon_{3it} \quad (11)$$

式中: i, t 分别代表企业和年份; α, β, λ 均为方程回归系数; μ 为个体效应; ε 为随机误差项; $Crsta$ 、 $Vrsta$ 、 $Scale$ 分别代表创新效率、纯技术效率和规模效率; hhi 表示市场竞争程度,采用赫芬达尔指数衡量; sc 表示供应商集中度,采用前五名供应商占比衡量; $size$ 表示企业规模,采用总资产的自然对数衡量; fnc 表示员工质量,采用本科及以上学历人员占比衡量; $debt$ 表示融资结构,采用资产负债率衡量; sc 表示股权集中度,采用前五大股东持股比例衡量。

为确保结果的稳健性,本文对解释变量进行上下 1% 水平缩尾(winsorize)处理。具体回归结果如表 8 所示。表 8 结果显示:从创新效率维度,在市场结构方

面,市场竞争程度与创新效率显著负相关,说明行业内市场势力越集中,竞争强度越高,利润被摊薄,造成创新不足,不利于提高创新效率;在行业结构方面,前五名供应商占比与创新效率显著正相关,说明有色金属-新能源产业链供应商越集中,越有利于稳定供应链,为创新提供良好的环境,提升创新效率;在企业内部组织结构的四个方面,企业规模、员工质量与创新效率显著正相关,资产负债率、股权集中度与创新效率显著负相关,说明规模越大、员工质量越高,越有利于企业提高创新效率,而负债越高、股权越集中,越不利于企业提高创新效率。这与多数学者已有研究结论一致,也符合熊彼特假说。

表 8 回归结果分析

Table 8 Regression result analysis

变量	创新效率	纯技术效率	规模效率
市场竞争程度	-0.242 8 * * * (-3.29)	-0.233 4 * * * (-3.13)	-0.130 0 * * * (-3.14)
供应商集中度	0.000 9 * * * (3.08)	0.001 2 * * * (3.66)	0.000 3 (1.39)
企业规模	0.000 05 * (1.86)	0.000 1 * * * (3.37)	-0.000 007 (-1.24)
员工质量	0.000 9 * (1.69)	0.001 1 * (1.74)	0.000 3 (1.03)
融资结构	-0.000 8 * * * (-2.73)	-0.001 0 * * * (-3.24)	-0.000 003 (-0.20)
股权集中度	-0.001 7 * * * (-4.16)	-0.001 6 * * * (-3.52)	-0.001 1 * * * (-4.10)
C	1.003 2 * * * (32.33)	1.026 2 * * * (29.20)	1.026 4 * * * (54.17)
Σu	0.086 9 * * * (10.56)	0.080 8 * * * (9.63)	0.041 6 * * * (9.70)
Σe	0.059 3 * * * (24.29)	0.061 7 * * * (22.23)	0.039 7 * * * (24.60)
N	462	462	462

注: * * *、* *、* 分别表示在 1%、5%、10% 水平上显著;括号内数值为 t 值; C 为常数项; Σu 为个体随机效应的标准差; Σe 为随机误差项的标准差; N 为样本量。

从纯技术效率维度,6 个影响因素的显著性、方向对纯技术效率的影响与对创新效率的影响一致,而对规模效率的影响除市场竞争程度和股权集中度显著外,其余影响因素均不显著,由此可见,有色金属-新能源产业链现代化创新能力主要通过纯技术效率影响创新效率。

4 结论与建议

运用四阶段 DEA 模型对我国有色金属-新能源产业各环节创新效率进行测算并探究其影响因素,主要

结论如下:

1) 经过 SFA 模型调整,时间上,有色金属-新能源产业链四个环节的创新效率、纯技术效率均值都在不同程度上有所提高,前端矿产品创新效率变化最大,由调整前的波动下降到调整后处于四个环节最高水平,说明产业链前端受环境因素的影响很大,调整后除新能源材料在 2018—2019 年出现急剧上升外,产业链其他环节创新效率变得更平缓。

2) 不管调整与否,前端创新效率始终高于后端,整个产业链创新效率出现“倒挂”现象,呈现矿产品→精炼产品→新能源材料→新能源应用的特征,且纯技术效率是制约产业链创新效率提升的关键因素。

3) 空间上,调整前后产业链创新效率均呈现“西强东弱”的分布特征,主要原因是西部拥有丰富的新能源资源禀赋区位优势,使得大量新能源产业向西部集聚,整体抬升了西部地区的创新效率;产权上,国企高于非国企。

4) 供应商集中度、企业规模、人力资源与创新效率正相关,市场竞争程度、资产负债率、股权集中度与创新效率负相关,这些影响因素主要通过影响纯技术效率影响产业链创新效率。

基于上述研究结论,对提升产业链现代化水平提出以下建议:

1) 降低产业链后端应用领域的创新风险。测算结果显示,前端环节的创新效率高于后端环节,这主要受纯技术效率偏低的制约。因产业链后端技术研发创新风险高,难以吸引大量资本投入,建议设立专项研发资金或对研发活动进行专项补助,尽快在新能源终端技术和应用产品上形成突破,以此降低产业链终端应用的研发风险。

2) 提高产业链终端环节的收益水平。建议从终端应用产品生产企业的原料供给和能源消耗方面给予优惠,降低企业的生产成本;在各种税收上进行鼓励性减免,降低企业的税收成本;在融资上给予政策倾斜以降低企业的资金成本;在工商、土地、产品检验、人才培养、技术引进等各个方面给予政策支持,减少企业的各种费用,从而吸引投资进入产业链终端应用环节,提高研发创新积极性。

3) 促使有色金属-新能源产业链形成产业集聚,塑造竞争新优势。全球产业发展历程表明,产业集聚对于产业发展有着积极的推动作用。建议出台“有色金属-新能源产业链发展空间规划”,通过制定产业链发展空间规划,明确有色金属-新能源产业的发展空间布局,使分散的研发力量和分散的应用产业迅速集聚。在集

聚区采取各种优惠措施和特殊产业扶持政策,有针对性地解决产业链终端应用发展中的困难和问题。

参考文献(References):

- [1] 马朝良. 产业链现代化下的企业协同创新研究[J]. 技术经济, 2019, 38(12): 42-50.
MA Chaoliang. A study on the enterprises' collaborative innovation under the industrial chain modernization[J]. Journal of Technology Economics, 2019, 38(12): 42-50.
- [2] 杨洋, 裴童心, 李晓晖, 等. 产业政策对光伏产业链现代化发展的影响分析: 基于创新效率和全要素生产率的视角[J]. 海南大学学报(人文社会科学版), 2024, 42(6): 53-63.
YANG Yang, PEI Tongxin, LI Xiaohui, et al. On the impact of the industrial policy on the modernization and development of the photovoltaic industry chain: From the perspective of innovation efficiency and total factor productivity[J]. Journal of Hainan University (Humanities & Social Sciences), 2024, 42(6): 53-63.
- [3] 方文龙, 聂婉妮, 赖丹. 企业数字化转型、资源配置与绿色创新能力[J]. 财会月刊, 2023, 44(13): 139-145.
FANG Wenlong, NIE Wannan, LAI Dan. Enterprise digital transformation, resource allocation and green innovation capability[J]. Finance and Accounting Monthly, 2023, 44(13): 139-145.
- [4] 陈伟强, 汪鹏, 钟维琼. 支撑“双碳”目标的关键金属供应挑战与保障对策[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1577-1585.
CHEN Weiqiang, WANG Peng, ZHONG Weiqiong. Challenges and security strategies of China's critical metals supply for carbon neutrality pledge[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): 1577-1585.
- [5] 汪鹏, 王翹楚, 韩茹茹, 等. 全球关键金属-低碳能源关联研究综述及其启示[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 669-681.
WANG Peng, WANG Qiaochu, HAN Ruru, et al. Nexus between low-carbon energy and critical metals: Literature review and implications[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 669-681.
- [6] 赖丹, 方文龙, 吴一丁, 等. 美日欧重稀土供应链战略对中国稀土产业的影响[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 88-99.
LAI Dan, FANG Wenlong, WU Yiding, et al. The impact of US, Japan and Europe's strategy of reconstructing rare earth supply chain on China's counterpart[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(21): 88-99.
- [7] 黄汉权, 盛朝迅. 现代化产业体系的内涵特征、演进规律和构建途径[J]. 中国软科学, 2023(10): 1-8.
HUANG Hanquan, SHENG Chaoxun. Characteristics, evolutionary laws, and construction approaches of modern industrial system[J]. China Soft Science, 2023(10): 1-8.
- [8] 汪延明, 李家凯. 产业链现代化: 基于概念内涵的辨析逻辑[J]. 科学管理研究, 2023, 41(1): 65-73.
WANG Yanming, LI Jiakai. Modernization of industrial chain: Logic of discrimination based on concept connotation[J]. Scientific Management Research, 2023, 41(1): 65-73.
- [9] 宋华, 杨雨东. 中国产业链供应链现代化的内涵与发展路径探析[J]. 中国人民大学学报, 2022, 36(1): 120-134.
SONG Hua, YANG Yudong. An analysis on the connotation and devel-

- opment of the modernization of Chinese industrial and supply chains[J]. Journal of Renmin University of China, 2022,36(1):120-134.
- [10] SCHUMPETER J. Development[J]. Journal of Economic Literature, 2005,43(1):108-120.
- [11] 荆文君. 互联网行业垄断会阻碍创新吗?:兼论熊彼特假说争论的新解释视角[J]. 财经问题研究, 2021(7):44-56.
JING Wenjun. Will the monopoly phenomenon in the Internet industry hinder innovation? A new interpretation perspective of the schumpeterian hypothesis controversy[J]. Research on Financial and Economic Issues, 2021(7):44-56.
- [12] 张虎,张毅,韩爱华. 我国产业链现代化的测度研究[J]. 统计研究, 2022,39(11):3-18.
ZHANG Hu, ZHANG Yi, HAN Aihua. Research on the measurement of modernization of industrial chains in China[J]. Statistical Research, 2022,39(11):3-18.
- [13] 毛冰. 中国产业链现代化水平指标体系构建与综合测度[J]. 经济体制改革, 2022(2):114-120.
MAO Bing. Construction of index system and comprehensive measurement of China's industrial chain modernization level[J]. Reform of Economic System, 2022(2):114-120.
- [14] FRIED H O, LOVELL CAK, SCHMIDT S S, et al. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis[J]. Journal of Productivity Analysis, 2002,17:157-174.
- [15] 王恒田,杨晓龙. 中国光伏产业创新效率测评及提升路径研究[J]. 科学管理研究, 2021,39(3):49-57.
WANG Hengtian, YANG Xiaolong. Research on technology innovation efficiency and improvement paths of China's solar photovoltaic industry[J]. Scientific Management Research, 2021,39(3):49-57.
- [16] 李宏宽,何海燕,单捷飞,等. 剔除非管理性因素影响的我国集成电路产业技术创新效率研究:基于广义三阶段 DEA 和 Tobit 模型[J]. 管理工程学报, 2020,34(2):60-70.
LI Hongkuan, HE Haiyan, SHAN Jiefei, et al. Research on technology innovation efficiency of China's IC industry eliminating the influence of non-operating factors: Analysis based on generalized GRA-DEA and Tobit[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2020,34(2):60-70.
- [17] 韩斌,冯筱伟,苏屹,等. 中国新能源汽车上市公司创新效率测度及影响因素研究:基于三阶段 DEA 与 Tobit 面板模型[J]. 科技进步与对策, 2023,40(6):110-120.
HAN Bin, FENG Xiaowei, SU Yi, et al. Innovation efficiency measurements and influencing factors of Chinese new energy vehicle listed enterprises: An analysis based on three-stage DEA and Tobit panel model[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2023,40(6):110-120.
- [18] GRANDELL L, LEHTILAE A, KIVINEN M, et al. Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies[J]. Renewable Energy, 2016,95:53-62.
- [19] KHATIB H. IEA world energy outlook 2010: A comment[J]. Energy Policy, 2011,39(5):2507-2511.
- [20] 鲁志国,孟霏. 基于三阶段 DEA 模型战略性新兴产业技术创新效率测算[J]. 统计与决策, 2022,38(8):158-162.
LU Zhiguo, MENG Fei. Measurement of technological innovation efficiency of strategic emerging industries based on three-stage DEA model[J]. Statistics & Decision, 2022,38(8):158-162.
- [21] 刘晨,崔鹏. 研发投入、企业规模与人工智能企业的生产效率:基于三阶段 DEA 模型与 Tobit 模型的二阶段分析[J]. 财贸研究, 2022,33(5):45-55.
LIU Chen, CUI Peng. R&D investment, enterprise scale and production efficiency of AI enterprises: Two stage analysis based on three stage DEA model and Tobit model[J]. Finance and Trade Research, 2022,33(5):45-55.
- [22] 罗登跃. 三阶段 DEA 模型管理无效率估计注记[J]. 统计研究, 2012,29(4):104-107.
LUO Dengyue. A note on estimating managerial inefficiency of three-stage DEA model[J]. Statistical Research, 2012,29(4):104-107.
- [23] 陈巍巍,张雷,马铁虎,等. 关于三阶段 DEA 模型的几点研究[J]. 系统工程, 2014,32(9):144-149.
CHEN Weiwei, ZHANG Lei, MA Tiehu, et al. Research on three-stage DEA model[J]. Systems Engineering, 2014,32(9):144-149.
- [24] 李松青,包春蕾,刘顺翊. 我国矿业企业生态效率评价及影响因素研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):164-170.
LI Songqing, BAO Chunlei, LIU Shunyi. Ecological efficiency evaluation and influencing factors for mining enterprises in China[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(2):164-170.
- [25] 张浩,毛家辉,汪天宇. 我国智能制造企业技术创新效率提升的主要影响因素:基于三阶段 DEA-Tobit 模型的分析[J]. 科技管理研究, 2023,43(22):95-101.
ZHANG Hao, MAO Jiahui, WANG Tianyu. Main influencing factors of technological innovation efficiency improvement of intelligent manufacturing enterprises in China: Analysis based on the three-stage DEA-Tobit model[J]. Science and Technology Management Research, 2023,43(22):95-101.
- [26] 马文斌,朱欢. 绿色低碳企业创新效率测度及影响因素研究:基于三阶段 DEA 与 Tobit 模型[J]. 软科学, 2024,38(6):61-66.
MA Wenbin, ZHU Huan. Innovation efficiency measurements and influencing factors of green and low-carbon enterprises: Based on three-stage DEA and Tobit panel model[J]. Soft Science, 2024,38(6):61-66.
- [27] YI S, FENG Y C. Regional innovation systems based on stochastic frontier analysis: A study on thirty-one provinces in China[J]. Science, Technology and Society, 2015,20(2):204-224.
- [28] 赖丹,罗琴,方文龙. 企业税负、财务柔性 with 有效技术创新:基于减税降费视角[J]. 会计之友, 2023(3):10-17.
LAI Dan, LUO Qin, FANG Wenlong. Corporate tax burden, financial flexibility and effective technological innovation: Based on tax reduction and fee reduction perspective[J]. Friends of Accounting, 2023(3):10-17.
- 引用本文: 方文龙,赖丹,李彦蓉,等. 基于四阶段 DEA 模型的有色金属-新能源产业链现代化测度及影响因素研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):179-187.
FANG Wenlong, LAI Dan, LI Yanrong, et al. Measure and influencing factors for modernization of non-ferrous metal-new energy industrial Chain based on four-stage DEA model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):179-187.