



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Frontier Research on Carbon Neutrality—Article

## 中国双碳目标下流程制造业生命周期工程评价方法及应用

李明阳, 高峰, 聂祚仁\*, 孙博学, 刘宇, 龚先政

National Engineering Laboratory for Industrial Big-data Application Technology, College of Material Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 13 March 2023

Revised 9 May 2023

Accepted 10 August 2023

Available online 1 May 2024

#### 关键词

碳中和

生命周期工程

流程工业

碳减排技术

生态设计

### 摘要

工业部门是中国碳排放的主要来源之一。为了实现碳减排目标,中国致力于提升资源利用效率、减少能源消耗,并在流程工业中实现碳中和。将生命周期工程技术应用于材料流程工业,寻求材料性能、资源消耗与环境影响在整个生命周期中的最优解,是促进材料全生命周期能源节约和碳减排的有效途径。本研究介绍了原材料替代、流程再造、燃料替代、能量回收利用、物质循环再生五类流程工业节能减碳技术。并详细介绍了生命周期工程技术的内涵、方法体系和国内外发展现状。面向资源和能源消耗、碳排放、产品性能和制造过程中的二次资源回收利用等多维度,建立了材料流程工业生命周期碳排放综合分析方法,并结合有色行业的低碳制造流程设计进行了示例应用。研究表明,采用先进技术制备的原生及再生铝合金有效降低了资源消耗和碳排放。本方法为中国工业低碳化、零碳化产品设计生产提供了科学有效的思路 and 解决方案。

© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

气候变化已成为人类社会可持续发展面临的亟待解决的全球性问题。为了应对这一挑战,《巴黎协定》提出将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,并努力将温度上升幅度限制在 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内[1]。截至2021年12月底,全球已有136个国家、115个地区、235个主要城市和2000家顶尖企业中的682家制定了碳中和目标[2]。2020年,中国宣布了自己的“双碳”目标,即力争2030年实现碳排放达峰,努力争取2060年实现碳中和[3]。与发达国家相比,中国实现碳中和目标的时

间更短,任务更加艰巨,但这也显示出了中国为人类解决气候变化问题贡献力量的雄心与决心。

国际能源署(IEA)给出的中国不同行业的碳排放结构显示,能源领域(电力和热力,56.39%)及工业领域(28.65%)是中国碳排放的主要来源[4]。据统计,中国钢铁、建材、石化与化工、有色金属四大类基础材料生产占全国能耗的30%以上,占工业总能耗的50%以上[5]。材料生产是典型的流程制造业,其碳减排是工业领域碳减排的重中之重。因此,大力推进材料制造流程的生态化转型与升级,促进材料生产流程的资源、能源消耗减量

\* Corresponding author.

E-mail address: [zrnjie@bjut.edu.cn](mailto:zrnjie@bjut.edu.cn) (Z. Nie).

化,碳排放趋零化是材料产业实现绿色低碳循环发展的重要措施之一。

本文针对流程工业碳减排技术需求和发展趋势,主要介绍了生命周期工程技术的方法体系、材料流程工业生命周期碳排放综合分析方法,并结合有色金属产品低碳制造流程设计制备应用案例,为材料行业低碳发展路径、零碳化产品设计生产提供科学思路和解决方案。

### 1.1. 材料流程工业碳减排技术趋势

基础材料制造领域应着重发展原料替代与流程再造技术,从改变原料、反应机理、制造方式等手段削减制造过程中由于碳酸盐分解等化学反应造成的碳排放。目前,一些可预见的具有发展潜力的减碳技术主要包括如下几类。

#### 1.1.1. 原料的替代技术

原料的替代技术(MAT)是指在部分行业使用不产生CO<sub>2</sub>的原料或生物原料代替产生CO<sub>2</sub>的原料,以此来减少或不产生由原料引起的CO<sub>2</sub>排放。例如,在钢铁生产过程中,利用氢气还原替代焦炭还原[6];在水泥生产过程中,利用固废或非碳酸盐原料等替代碳酸钙原料等[7-9]。这类技术主要应用在建材、冶金及化工领域,在显著减碳的同时能够协同处置大宗固体废弃物,对绿色低碳循环经济体系的构建具有重要意义。

#### 1.1.2. 燃料替代技术

燃料替代技术(FAT)是指使用可再生清洁能源替代工业生产中煤、天然气等化石燃料的使用。例如,氢燃料可以替代钢铁、水泥、玻璃生产过程中的煤或天然气等化石燃料[10-11],从而降低碳排放。在水泥熟料煅烧过程中,煤炭燃烧产生的碳排放约占水泥工业碳排放的25%-40%。通过采用生物质燃料替代传统的煤炭[12-13],能够实现燃料方面的碳中和。生物质替代燃料包括农业废物(秸秆、稻壳、稻草、油菜秆等)、城市垃圾、高炉生物质炭燃料等。

#### 1.1.3. 能量回收利用技术

能量回收利用技术(ERRT)是指工业生产过程中产生的可回收利用的多余能源,如工业余热、可燃气体及含能固态介质(如钢渣)等[14-16],通过一定技术手段或工艺流程及装备进行回收并加以再利用的技术。此外,由于某些工业流程存在如甲烷等可燃气体逃逸的现象[17],对这些可燃气体进行回收,不仅能够提高能源利用率,而且有助于实现碳减排。

#### 1.1.4. 物质回收利用技术

物质回收利用技术(MRRT)是指对工业或生产、生活中产生的仍有利用价值的废弃物,如污水、固废、废旧金属等,进行高效回收并高值化利用的技术。其主要包括工业固废回收与循环利用技术、废旧金属低碳循环再造技术等[18,19]。物质回收利用技术能够替代或减少某些高碳排放原材料或产品的生产和使用,能够减少废弃物焚烧或填埋等传统处理方式导致的相关温室气体排放,获得间接的碳减排效益。

#### 1.1.5. 流程再造技术

流程再造技术(PRT)是指以制造流程变革性重构为手段,以提质增效技术为支撑,与燃料/原料替代技术共同解决燃料燃烧与过程排放问题,在能源系统零碳化进程完成前,实现工业领域快速脱碳。例如,全废钢电炉冶炼技术、传统高炉流程富氢和新能源冶金技术及碳循环与跨行业联产技术[20]。有色金属行业有湿法冶金清洁生产技术、短流程规模化制备、生物冶金还原技术[21-24]。建材行业有干法制粉技术、CO<sub>2</sub>循环利用技术及多能互补煅烧技术等[25-26]。基础材料行业的变革性流程重构技术基本上仍处于研发阶段。

从产品质量的角度来看,碳减排技术的应用对资源消耗和材料性能的影响具有很强的不确定性。以铝资源回收为例,尽管再生铝合金的碳排放仅为原生铝合金的5%左右[27],然而由于回收过程杂质元素累积量等不确定因素的影响,很大程度上会降低再生铝合金产品的性能。尤其是在多次循环利用后,性能下降程度会愈加明显[28]。因此,如何在新技术、新工艺设计之初,从全流程制造系统的层面综合量化产品性能、资源能源消耗与碳排放的关系,是流程工业及产品碳减排技术方案设计与选择需重点关注的科学问题。

### 1.2. 生命周期工程技术

生命周期工程是以生态设计为主导,以满足使用性能、节约资源、保护环境为目标,将毒害替代、绿色工艺规划、清洁生产、资源循环等诸多技术与理论应用到产品的生命周期中,系统优化全产业链条的性能、成本与环境表现,是由材料科学、制造科学和环境科学深层次交叉而形成的国际重要科学研究前沿领域[29]。生态设计又称生命周期设计或绿色设计,是生命周期工程理论的主导与核心,其主旨是指将环境因素纳入产品设计中,在保证产品使用性能与经济可行性的同时,最大限度降低产品全生命周期对环境影响的设计方法[30-31]。

进入21世纪以来,生命周期工程研究在国际上迅速开展。在生命周期思想的指导下,建立了基于多因素、多目标优化的产品生命周期工程的理论框架及体系结构,以生态设计为核心,综合考虑产品性能、成本、社会、环境等多方面的要素,指导整个产业链的全面优化[32–35]。生态设计方法作为生命周期工程的基础与核心,已被广泛应用于各种产品和工业设计之中[36–41]。Ramani等[42]尝试对生态设计方法进行扩展延伸,介绍了生态设计方法的一些不足,并结合一些研究提出了将下游生命周期数据整合到生态设计之中至关重要。Kamalakkannan和Kulatunga [43]提出了参数化生命周期评估方法,并将其用于生态设计优化之中。Belucio等[44]提出一种新型的决策支持方法,该方法在设计阶段评估环境影响和成本,并使用保温材料进行验证。Borge-Diez等[45]及Ratner等[46]将生态设计方法应用于能源系统之中,分别对可再生能源容量回收问题及电网的节能设计进行了方法应用。

材料制造领域是生命周期工程技术应用的重要方向之一。通过构建材料生态设计技术流程,从源头优化解决各环节的资源与环境问题,指导材料组分设计、工艺优化与重构、再生循环技术等开发,寻求材料性能、资源消耗与环境影响在整个生命周期中的最优解,是促进材料全流程实现碳中和的有效途径之一。

## 2. 材料流程工业碳排放综合分析方法

本文通过建立基于资源-碳排放-性能指标的多因素综合表征模型,对不同设计方案进行评判与择优,量化碳排放与材料产品性能、资源能源消耗之间的关系。

### 2.1. 性能综合评价模型

性能评价旨在量化材料的性能表现对设计需求的满足程度。研究通过建立需求-性能矩阵来衡量指标参数的重要程度及各指标参数的归一化,如表1所示。 $W_{R_i}$ 表示设计需求对于应用领域的重要程度,即需求权重。 $C_{ij}$ 表示性能 $P_j$ 对需求 $R_i$ 的贡献程度。

材料多个性能与整体应用需求的对应关系及其重要程

度,即性能权重系数,采用如下公式计算:

$$PD_j = C_{1j} \times W_{R_1} + C_{2j} \times W_{R_2} + \dots + C_{ij} \times W_{R_i} \quad (1)$$

$$PW_j = \frac{PD_j}{\sum_{\varphi=1}^{\varphi_{\max}} PD_{\varphi}} \quad (2)$$

式中, $i$ 代表需求数量, $i \in \{1, 2, \dots, i_{\max}\}$ ;  $j$ 代表性能数量, $j \in \{1, 2, \dots, j_{\max}\}$ 。 $i_{\max}$ 和 $j_{\max}$ 代表性能和需求的数量。 $PD_j$ 或 $PD_{\varphi}$ 代表第 $j$ 或第 $\varphi$ 类性能需求, $PW_j$ 代表第 $j$ 类性能权重。 $\varphi$ 代表性能类别数量, $\varphi \in \{1, 2, \dots, \varphi_{\max}\}$ ,且 $\varphi_{\max} = j_{\max}$ 。

利用材料各项性能的权重系数与测试指标值,可以得到某种材料的综合性能指标值,如公式(3)所示。

$$PI = \sum_{j=1}^{j_{\max}} (PW_j \times \frac{P_j}{P'_j}) \quad (3)$$

式中,PI表示材料的单一性能指标的值; $P_j$ 表示目标对象的第 $j$ 类性能测试指标的值; $P'_j$ 表示参考对象的第 $j$ 类性能测试指标的值。

### 2.2. 资源影响综合评价模型

矿产资源、化石能源、水资源、土地资源等多种资源的存在形式不同,具有不同的衡量标准及物理单位,因此无法对所有资源种类直接进行综合量化。基于热力学函数焓的资源耗竭特征化模型,可以科学客观地表征材料生产所造成的各类自然资源损失,确定材料生产的资源依赖强度,实现对资源耗竭的特征化处理[47]。该模型的应用一方面可以将材料生命周期过程所造成的矿产资源、化石能源、水资源以及土地资源的消耗与损害表征为统一指标(物理单位相同),另一方面还可以同时反映资源“量”与“质”在材料生产过程中的变化规律。在规定参考环境与元素化学计算模型的基础上,可对各类自然资源进行系统量化。

#### 2.2.1. 基于焓指标的矿产资源消耗模型

从自然界中开采的矿物的化学成分通常较为复杂,例如,开采出的铁矿石并非单一的磁铁矿而是由多种纯矿物(磁铁矿、石英、长石、角闪石、透闪石等)组成的混合物;因此,仅以某种纯矿物的焓值表示矿石整体的资源属性不符合LCA的研究范围。如公式(4)所示,天然矿物

表1 性能-需求矩阵

Requirement	Requirement weight factor	Performance 1 ( $P_1$ )	Performance 2 ( $P_2$ )	...	Performance $j$ ( $P_j$ )
Requirement 1 ( $R_1$ )	$W_{R_1}$	$C_{11}$	$C_{12}$	...	$C_{1j}$
Requirement 2 ( $R_2$ )	$W_{R_2}$	$C_{21}$	$C_{22}$	...	$C_{2j}$
...	...	...	...	...	...
Requirement $i$ ( $R_i$ )	$W_{R_i}$	$C_{i1}$	$C_{i2}$	...	$C_{ij}$

化学焓的计算包括两部分：一是对不同纯矿物的焓值进行加和；二是计算纯矿物混合所造成的焓损失。

$$Ex_{Na} = \sum x_{Ai} Ex_{Ai} + R_1 T_0 \sum n_{Ai} \ln m_{Ai} \quad (4)$$

式中， $Ex_{Na}$ 代表单位质量天然矿物的化学焓； $Ex_{Ai}$ 代表单位质量纯矿物的化学焓； $x_{Ai}$ 代表纯矿物在天然矿物中的质量分数（%）； $R_1$ 为热力学常数（ $R_1 = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ）； $T_0$ 为常温； $n_{Ai}$ 为纯矿物在单位质量天然矿物中的物质的量； $m_{Ai}$ 为纯矿物在天然矿物中的摩尔分数（%）。

### 2.2.2. 基于焓指标的化石能源消耗模型

按照天然矿物化学焓的计算模式，对化石能源化学焓进行精准的计算是较为困难的。而焓能比值法专门针对成分复杂的有机燃料化学焓进行计算，其核心思想是通过确定有机燃料的化学焓值与其发热量的比值来对其化学焓值进行估算，如式（5）所示：

$$\beta = \frac{Ex_{org}}{H_1} \quad (5)$$

式中， $\beta$ 代表有机燃料的焓能比； $Ex_{org}$ 代表有机燃料的焓值； $H_1$ 代表有机燃料的低发热量。

### 2.2.3. 基于焓指标的水资源消耗模型

研究建立的水资源使用影响评价模型的思路是以材料生产流程中水资源使用后产生的基本变化为出发点，水资源经过利用后会发生三种变化，分别是：①进入产品被固化（如化学键被打断），②损耗（如蒸发和遗散流失等）和③作为废水排放到环境（产品系统的污水经处理后达到工业或国家排放标准的废水）。资源损害表征如公式（6）所示：

$$WRDI = \Delta Ex_1 \times \sum m_\alpha + \Delta Ex_2 \times \sum m_\beta + \Delta Ex_3 \times \sum m_\gamma \quad (6)$$

式中，WRDI为水资源耗竭指数； $m_\alpha$ 、 $m_\beta$ 和 $m_\gamma$ 分别为不同生产工序相应的废水量、蒸发量和固化量； $\Delta Ex_1$ 、 $\Delta Ex_2$ 和 $\Delta Ex_3$ 为与三种消耗方式相对应的资源损失因子。

### 2.2.4. 基于焓指标的土地资源消耗模型

对于土地资源，首先确定人类使用行为对土地固碳能力的影响，在此基础上，将人类使用行为所导致的土地固碳量的损失转化为土地固焓量的损失。可通过光合反应的

能量变化将土地固碳能力转化为其固定化学焓的能力，如公式（7）所示。

$$ExLF_{occ, res} = BL_{occ, res} \times CR_{C \rightarrow Ex} \quad (7)$$

式中， $ExLF_{occ, res}$ 为土地资源在占用阶段和恢复阶段的资源损失因子； $CR_{C \rightarrow Ex}$ 为碳-焓转化系数； $BL_{occ, res}$ 为土地占用阶段和恢复阶段的固碳量损失。

### 2.2.5. 综合评价模型

根据建立的资源影响综合评价模型，进一步构建材料生态设计的资源影响指标体系，如表2所示。指标体系将资源影响（一级指标）分为资源消耗指数与资源品质下降指数：资源消耗指数包含矿产资源消耗、化石能源消耗与可再生资源消耗三个三级指标；而资源品质下降指数包含水资源使用与土地资源使用两个三级指标。通过指标体系，可以全面、客观地对材料在全生命周期中对资源的影响进行综合表征。

先进技术或工艺应用后吨产品资源消耗强度（RCI）可用公式（8）来计算：

$$Ex_{TA} = Ex_0 + Ex_t - Ex_i \quad (8)$$

式中， $Ex_{TA}$ 为先进技术应用后的资源消耗强度； $Ex_0$ 为先进技术应用前的资源消耗强度； $Ex_t$ 为先进技术的资源消耗强度的变化； $Ex_i$ 为先进技术替换掉的工艺或流程的资源消耗强度。

先进技术的应用可能需要采用新型设备，设备制造也会产生资源耗竭。 $Ex_{eq}$ 为设备制造的资源消耗强度，则先进技术开始具有资源节约效益的临界产量 $P_b$ 可以采用公式（9）计算。当该技术应用后，产品产量 $P > P_b$ 时，先进技术的安装运行即具有资源节约效益。

$$P_b = \frac{Ex_{eq}}{Ex_t - Ex_i} \quad (9)$$

## 2.3. 碳排放综合分析模型

工业领域碳排放主要来源主要包括工业生产过程中的各类能源燃烧消耗产生的温室气体排放、工业生产过程中的生产所需使用的二次能源电力产生的间接排放及各工艺流程中由于各类反应所产生的直接温室气体排放。工业领域

表2 资源影响指标体系

Primary index	Second-level index	Third-level index	Index items
Resource impact index	Resource consumption index	Ore consumption	Metallic ore, non-metallic ore, etc.
		Renewable resource consumption	Solar energy, wind energy, wood, etc.
		Fossil energy consumption	Coal, oil, natural gas, etc.
	Resource quality decline index	Water quality decline	Surface water, underground water, etc.
		Land quality decline	Land occupation, land transformation, etc.

碳排放的核算与分析需要依据碳排放来源确定特定的特征化参数。其主要包括能源种类、能源消耗量、能源排放系数（因子）、电力结构、不同发电方式的排放系数、各中间产品产量及最终产品产量等。依据这些参数，构建流程工业碳排放核算特征化模型，如式（10）所示。

$$G = \sum_{\eta} \left[ \sum_{\varepsilon} \left[ \sum_{p=1}^{\theta} (f_{p,\varepsilon} \times Q_p) \times E_{\varepsilon,\eta} + \sum_{p=1}^{\theta} (e_p \times Q_p) \times E_{e,\eta} + \sum_{p=1}^{\theta} (P_p \times Q_p) \right] \times CI_{\eta} \right] \quad (10)$$

式中， $G$ 表示温室气体排放结果； $\eta$ 表示温室气体排放类型； $\varepsilon$ 表示能源类型； $p$ 表示产品； $\theta$ 表示产品数量； $f_{p,\varepsilon}$ 表示 $p$ 产品单元过程 $\varepsilon$ 能源的消耗量； $E_{\varepsilon,\eta}$ 表示 $\varepsilon$ 类能源 $\eta$ 类温室气体排放因子； $e_p$ 表示产品单元过程电力的消耗量； $E_{e,\eta}$ 表示电力生产 $\eta$ 类温室气体排放因子； $P_p$ 表示 $p$ 产品单元过程工艺排放量； $Q_p$ 表示产品 $p$ 在整个生产过程中的消耗量； $CI_{\eta}$ 为 $\eta$ 的温室气体排放特征化因子， $Q_{\theta}=1$ 。

在流程工业中应用先进技术，其减碳方式主要包括两类：一是降低能源的消耗量，从而实现碳排放降低；二是通过工艺优化或革新，将直接降低或清除碳排放。先进技术在流程工业中的应用，可以依据量化特征化参数进行核算。先进技术应用后的能源消耗量及直接排放量可通过式（11）~（13）计算。

$$f_{p,\varepsilon} = f_{\alpha,p,\varepsilon} + f_{t,\varepsilon} \quad (11)$$

$$e_p = e_{\alpha,p} + e_{t,\varepsilon} \quad (12)$$

$$P_p = P_{\alpha,p} + P_{t,\varepsilon} \quad (13)$$

式中， $f_{\alpha,p,\varepsilon}$ 代表先进技术应用前 $\varepsilon$ 能源消耗量； $f_{t,\varepsilon}$ 代表先进技术应用 $\varepsilon$ 能源消耗变化量； $e_{\alpha,p}$ 代表先进技术应用前电力消耗量； $e_{t,\varepsilon}$ 代表先进技术应用电力变化量； $P_{\alpha,p}$ 代表先进技术应用前直接排放量； $P_{t,\varepsilon}$ 代表先进技术应用碳排放变化量。

#### 2.4. 资源-碳排放-性能多因素综合表征模型

在获得资源影响、碳排放与材料性能三项单一指标值后，可以将三者相综合得到生态设计综合指标值，构建综合表征模型[公式（14）]。

$$EDI = \frac{P}{RC+E} = \frac{\sum_{j=1}^{j_{\max}} \left( \frac{PW_j}{\sum_{k=1}^{m_i} ap_k} \times p_j \right)}{\left[ \left( \sum_{u=1}^{n_u} Ex_u \times RC_u \right) + \left( \sum_{r=1}^{n_r} PE_r \times A_r \right) \right] + \left[ \sum_{\omega=1}^{n_{\omega}} E_{\omega} \times CI_{\omega} \right]} \quad (14)$$

式中，EDI为生态设计综合指标值； $P$ 为性能指标值； $R$ 为资源消耗指标值； $E$ 为碳排放指标值； $RC_u$ 表示不可再生资源 $u$ 的消耗量（kg或MJ）； $Ex_u$ 表示不可再生资源 $u$

的焓值（MJ·kg<sup>-1</sup>）； $n_u$ 表示 $u$ 的最大数量； $PE_r$ 表示可再生资源 $r$ 的焓值（MJ·kg<sup>-1</sup>或MJ·m<sup>-2</sup>）； $A_r$ 表示可再生资源 $r$ 的消耗量（kg或m<sup>2</sup>，其中，kg为水资源的单位，m<sup>2</sup>为土地资源的单位）； $n_r$ 表示 $r$ 的最大数量； $E_{\omega}$ 表示 $\omega$ 种温室气体的排放量（kg）； $CI_{\omega}$ 表示 $\omega$ 温室气体的特征化因子[CO<sub>2</sub>当量（eq）·kg<sup>-1</sup>]； $n_{\omega}$ 表示 $\omega$ 的最大数量。

此外，还可针对各指标构建矩阵模型进行综合表征，如公式（15）所示。

$$A = \begin{bmatrix} w_{PI} & w_{RI} & w_{GI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PI_1 & PI_2 & \dots & PI_n \\ RI_1 & RI_2 & \dots & RI_n \\ GI_1 & GI_2 & \dots & GI_n \end{bmatrix} = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n] \quad (15)$$

式中， $w_{PI}$ 、 $w_{RI}$ 和 $w_{GI}$ 分别代表性能、资源影响及碳排放的权重系数； $n$ 代表产品或项目的数量； $PI_n$ 代表 $n$ 产品的性能指标值； $RI_n$ 代表 $n$ 产品的资源影响指标值； $GI_n$ 代表 $n$ 产品的碳排放指标值； $a_n$ 代表 $n$ 产品或方案的综合结果。

受限于权重系数的影响，在进行综合表征前，需将各个单一指标去量纲化处理，以实现各个指标的综合计算，可采用公式（16）的方法。

$$index_n = \frac{ind_n}{ind_{rc}} \quad (16)$$

式中， $index_n$ 代表 $n$ 产品或方案指标去量纲后结果； $ind_n$ 代表 $n$ 产品或方案原始指标结果； $ind_{rc}$ 代表 $n$ 产品或方案参考指标结果。需要事先从所比较的项目或产品中选择最大值作为参考指标。参考指标优先选择对比方案或产品中最大值，可将 $index$ 设为介于0~1之间，便于处理与结果展示。

此方法需要注意的是各指标的需求导向。例如，性能越大越优，而资源影响和碳排放越小越优。不同的导向会使最终计算结果无法进行对比。处理此问题可将某一导向指标取倒数进行处理，使所有指标具有同样的导向。依据不同导向确定各产品或方案的结果导向。例如，将PI取倒数，则1/PI越小越优，综合1/PI、RI、GI计算后， $a_n$ 则越小越优。

随着流程工业低碳化发展，众多先进技术必将被逐渐应用于工业生产之中。然而，先进技术和减碳手段应用前后，性能、碳排放及资源消耗强度等多因素的量化及综合对比缺少行之有效的办法，缺少采用技术手段对多因素影响的综合表征方法。通过第2节所介绍的方法，能够实现各类减碳技术应用前后的性能、碳排放和资源强度的科学量化，探明各类减碳技术手段的环境友好潜力，并且依据第2.4节中所给出的综合表征模型，能够实现三种因素的综合对比，能够为技术普及提供可行性和政策决策支持。

### 3. 案例研究

有色金属行业双碳技术发展应首先从制造流程开发节能降碳技术，包括绿色低碳冶金技术、先进短流程技术、再生与循环利用工程技术、碳捕集利用技术等。本文以铝行业为例，采用有色金属行业低碳发展方向中的先进技术应用、再生资源利用等进行铝生产工业流程生命周期工程设计，寻求流程工业减碳最优解。铝生产过程的先进减碳技术来源于课题组前期研究结果[3]，相关减碳技术如附录A中的S1节所示。

#### 3.1. 系统边界

以A356铝合金为研究对象[48]，分别计算原铝（PA）铝合金、再生铝（RA）合金、应用先进技术后的原铝（PATA）铝合金的资源消耗强度及碳排放强度，结合对应产品性能，实现铝生产系统的生命周期工程设计，以性能、资源负荷及碳排放强度为导向，对铝产品进行择优对比。选取的功能单位为1 t A356铝合金。

以中国原铝与再生铝典型生产工艺流程为基准，确立两者的系统边界，如图1所示。原铝铝合金生产单元过程包括铝土矿开采、氧化铝生产、炭阳极生产、电解铝电解、铝锭铸锭及铝合金加工六个单元过程，应用先进技术后的原铝铝合金生产过程除原铝单元过程外，考虑各类技术对能源、物质变化对温室气体排放的影响[图1（a）]。再生铝铝合金生产考虑运输、预处理、重熔及铸锭、铝合金加工四个单元过程[图1（b）]。

用于铝合金生产的燃料主要包括煤、天然气、电、燃料油、蒸汽、煤气、汽油、柴油等。与能源相关的温室气体排放是这些能源燃烧过程中产生的 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 。考虑了工艺过程产生的温室气体排放，包括石灰石煅烧产生的 $\text{CO}_2$ 及阳极效应产生的 $\text{CF}_4$ 和 $\text{C}_2\text{F}_6$ 。固定资产投资，如厂房建设、设备生产及维护等不考虑在系统范围内，并且忽略生产过程由于原辅料运输所产生的温室气体排放。

#### 3.2. 数据来源

原铝和再生铝生产技术参数及能源消耗数据主要来源

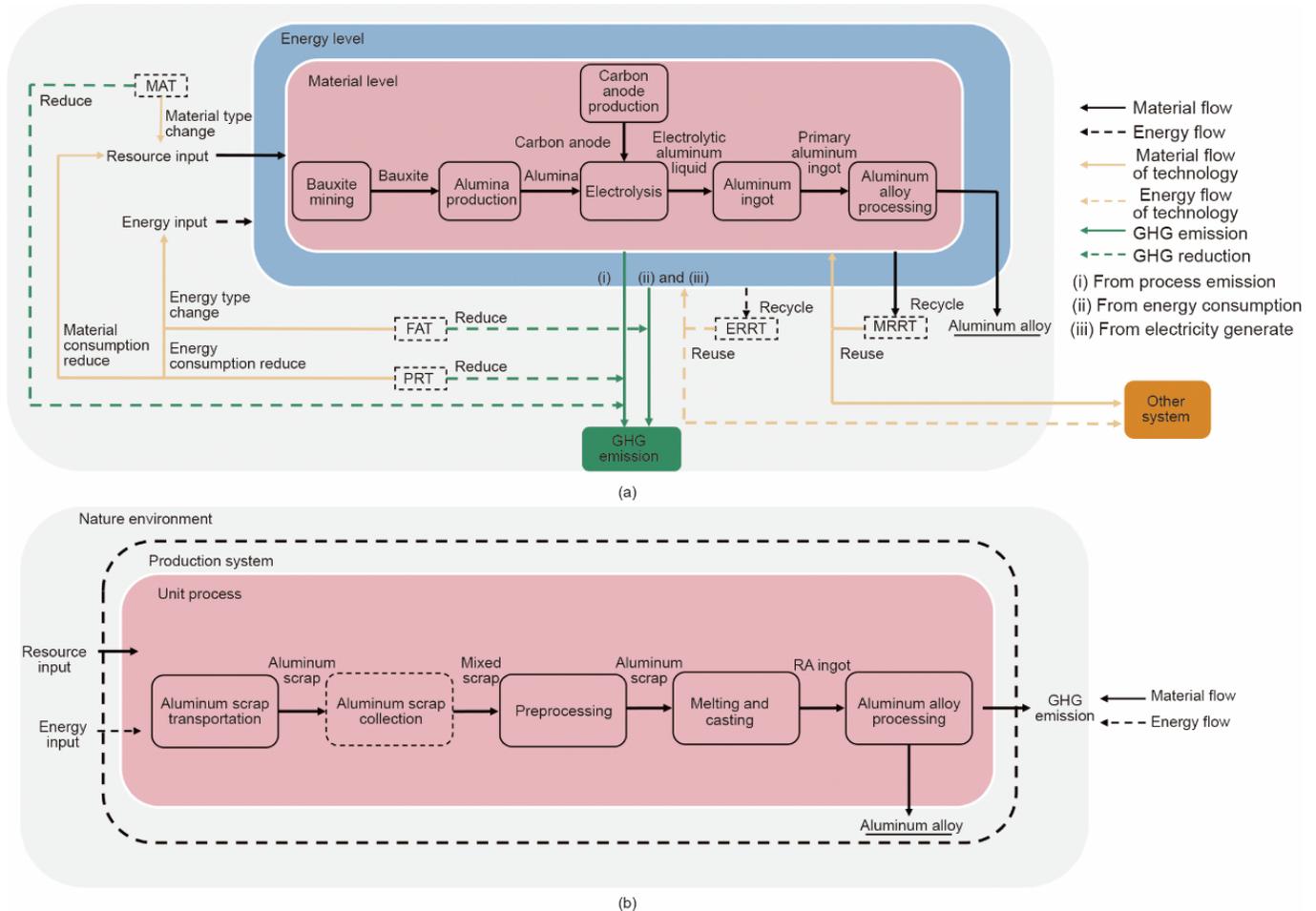


图1. 铝合金生产系统边界图。(a) 原生铝合金生产的系统边界；(b) 再生铝合金生产的系统边界。

于《中国有色金属工业年鉴》(2020年)[49]中的典型企业调研报告及有关文献。铝加工生产技术参数及能源消耗数据主要来源于中国典型铝生产企业调研数据及有关文献。铝土矿开采过程数据来源于Sino-center数据库[50]。电解铝温室气体排放计算主要参照《中国电解铝生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》[51]。氧化铝生产及铝加工过程温室气体排放计算参照政府间气候变化专门委员会(IPCC)的固定源排放计算方法,化石燃料低位发热量、单位热值含碳量、燃料碳氧化率与电解铝核算方法相同。电力生产的温室气体排放因子依据《2019年中国区域电网基准线排放因子》取全国的平均值[52]。再生铝生产的温室气体主要来源于运输过程、熔铸过程燃料的使用及使用的电力的间接排放。燃料燃烧排放参照IPCC固定源排放计算方法,电力计算方法与原铝生产过程电力计算方法相同。

## 4. 结果与讨论

### 4.1. 资源消耗强度(RCI)

依据资源耗竭因子对原生铝合金加工过程清单数据进行特征化处理,计算得到原铝生产的资源消耗强度及先进技术应用后的原铝铝合金生产资源消耗强度,如图2所示。生产1 t PA和PATA铝合金的资源消耗强度分别约为

366  $\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1}$ 合金及320  $\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1}$ 合金,先进技术应用带来的资源节约潜力约为12.57%。其中,原生铝锭累计焓消耗分别约为344  $\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1}$ 合金及298  $\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1}$ 合金。由先进技术应用带来的资源焓节约量约为46  $\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1}$ 合金,降低13.37%。先进技术的应用使电解铝生产过程焓值降低13.07%,炭阳极生产过程焓值降低4.04%,氧化铝生产过程焓值降低29.49%。

PA与PATA资源耗竭来源对比如图3所示。由能源消耗降低而减少的焓值占比97.71%,由资源消耗降低而减少的焓值占比2.29%,因此生产累计焓的降低主要来源于能源消耗焓值降低。这也说明12种先进技术以节能为主要特征。资源消耗降低的焓值主要来源于电解铝生产中炭阳极消耗的减少。能源消耗降低的焓值主要来源于电力、天然气、蒸汽、煤消耗的减少,体现在资源累积焓方面,其值分别下降33.51%、32.60%、30.37%、13.54%。

同样地,依据资源耗竭因子对再生铝生产过程清单数据进行特征化处理,计算得到再生铝合金生产的资源消耗强度如图4所示。以再生铝锭为原料,生产1 t RA铝合金的资源消耗强度为48.44  $\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1}$ 合金,相当于生产1 t再生铝的资源消耗强度为17.48  $\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1}$  Al。再生铝生产的资源消耗强度约为原生铝生产的4.78%。再生铝生产资源耗竭主要来源是天然气、柴油、电力的消耗以及熔剂的消耗,分别占比44.59%、33.47%、10.98%及6.97%。铝合

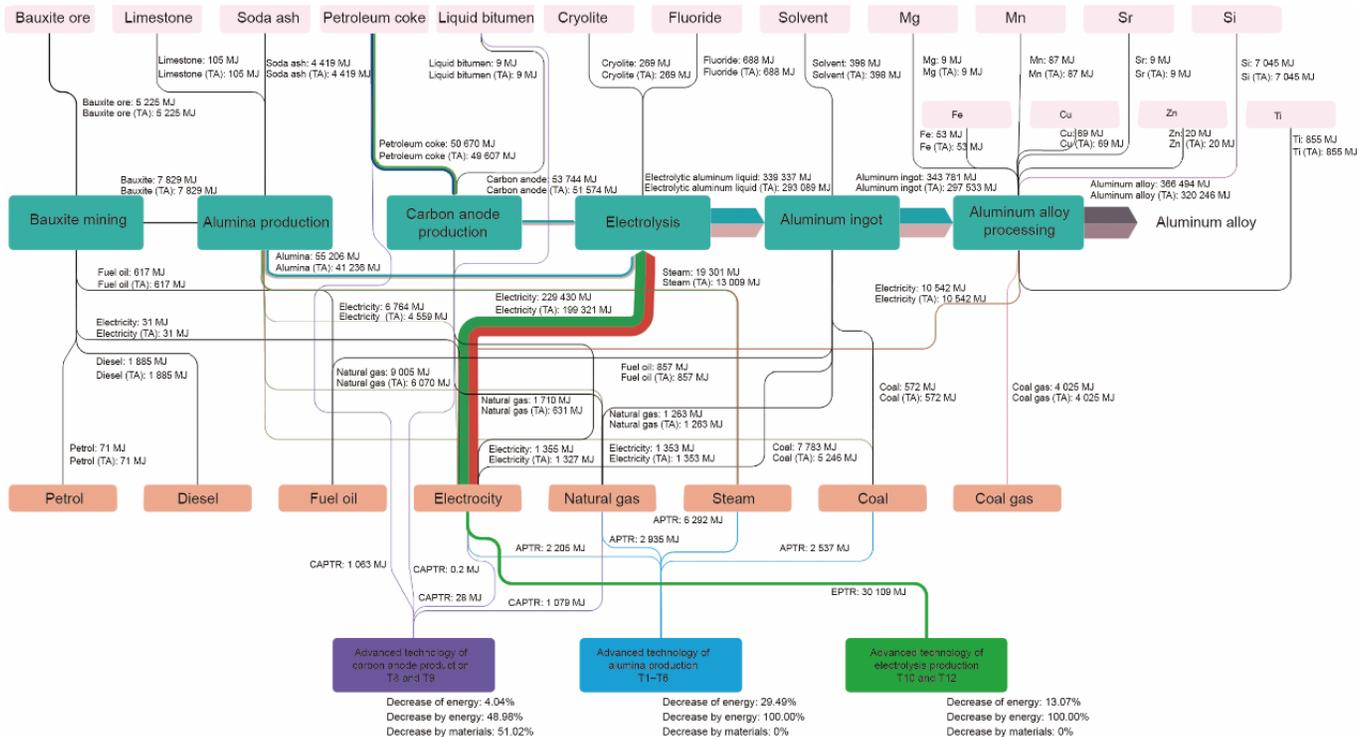


图2. PA和PATA生产的资源流动图。APTR: 铝土矿生产技术减排; CAPTR: 炭阳极生产技术减排; EPTR: 电解生产技术减排; T1~T12: 先进技术1~12; TA: 先进技术。

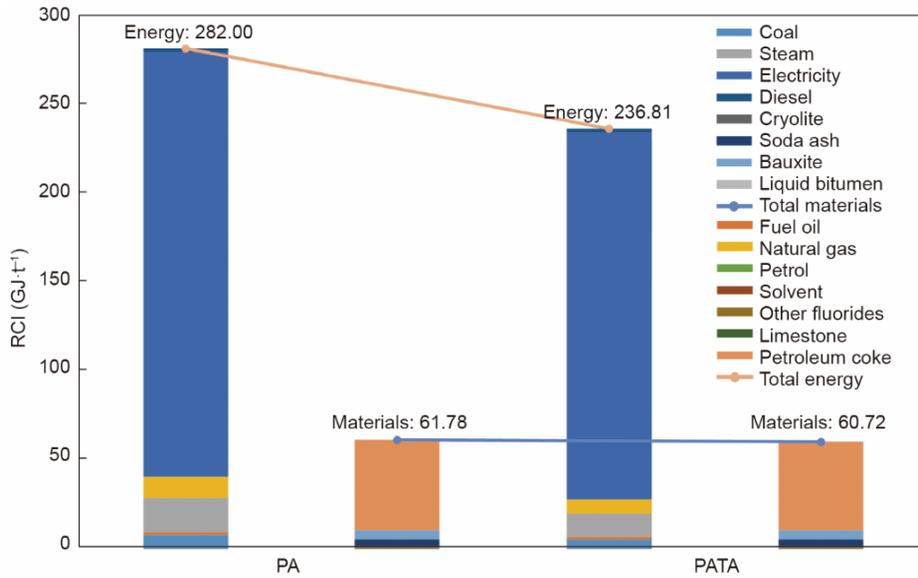


图3. 单位PA和PATA合金生产的累积焓贡献。

金加工、再生铝熔铸、运输及预处理过程的累积焓值占比分别为46.89%、31.76%、19.90%及1.45%。再生铝合金的资源消耗强度为原生铝合金资源消耗强度的13.22%。采用循环再生技术回收利用含铝废料资源，节约效益显著。

#### 4.2. 碳排放强度(CEI)

三种路径制备A356铝合金的碳排放结果如图5和图6所示。PA与PATA铝合金对比来看，生产1t铝合金碳排放量分别为17.4t和14.8t，碳减量为2.6t，降低14.94%。因此应用先进技术能够显著降低碳排放量。图7是生产1t铝合金的PA与PATA的碳排放贡献对比。先进技术的应用降低能耗相关碳排放约785 kg CO<sub>2</sub> eq·t<sup>-1</sup>合金，降低电力间接碳排放约1692 kg CO<sub>2</sub> eq·t<sup>-1</sup>合金。

先进技术应用后的氧化铝生产、炭阳极生产及电解铝生产过程的碳排放分别降低30.09%、35.19%、11.98%。RA铝合金碳排放量为1.89 t CO<sub>2</sub> eq·t<sup>-1</sup>合金，是原生铝合金碳排放量的10.86%，再生铝碳排放量是原铝的5.54%。铝废料再生利用温室气体减排效益明显。再生铝合金生产各单元过程碳排放贡献占比依次为铝合金加工49.29%、熔铸34.29%、运输12.48%及预处理过程3.95%。从碳排放类型对比来看，除CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>及N<sub>2</sub>O外，原铝生产中铝电解阳极效应产生全氟化碳气体(CF<sub>4</sub>和C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>)，而再生铝合金制造过程没有这两种温室气体的排放。

#### 4.3. 性能指标

再生铝锭所利用的废杂铝往往存在很多附着物。经常规分拣和清洗处理后仍有一部分无法完全除净的附着物进

入熔炼阶段，致使再生铝液中含有较多的非金属夹杂物和溶解性杂质元素，而这些杂质在熔炼阶段能否得到有效的清除和控制决定着再生铝及其合金的力学性能以及最终产品的品质。净化不充分的合金中会有大量气孔和氧化物夹杂，受力时易产生应力集中，导致产品性能下降。因此理论上讲，再生铝锭纯度小于原生铝锭，因而再生铝材性能弱于原生铝材。由于节能减碳技术应用与产品质量相关数据的局限，假设PA与PATA产品性能相同。

本文选取拉伸强度、屈服强度、延伸率作为主要性能指标，以再生铝和原生铝为原料的A356铝合金的三种力学性能在附录A中的表S2给出。由表可知，RA与PA相比，三种性能均出现一定的下降。为进行综合表征，首先构建性能-需求矩阵。表3是以A356铝合金使用需求为导向确立的性能需求矩阵。主要需求包括抗变形能力、耐用性、易于加工和成型（考虑了成品率）三种，权重分别为50%、25%及25%，依据公式(1)和(2)，计算出三类性能权重系数分别为拉伸强度(33.5%)、屈服强度(32.25%)及延伸率(34.25%)。依据表S2、性能权重系数和公式(3)，计算出三种路径制造铝合金的单一化性能指标，依据公式(16)求得三者单一性能指标分别为1(PA或PATA)、0.986(RA)。

#### 4.4. 综合表征

表S3显示了铝合金三方生产的RCI、CEI和性能的结果(附录A中的第S3节)。在进行综合表征之前，有必要对结果进行去量纲化处理，并统一三个因素的需求导向。结果如表4所示。由于资源消耗、碳排放和性能的权重系

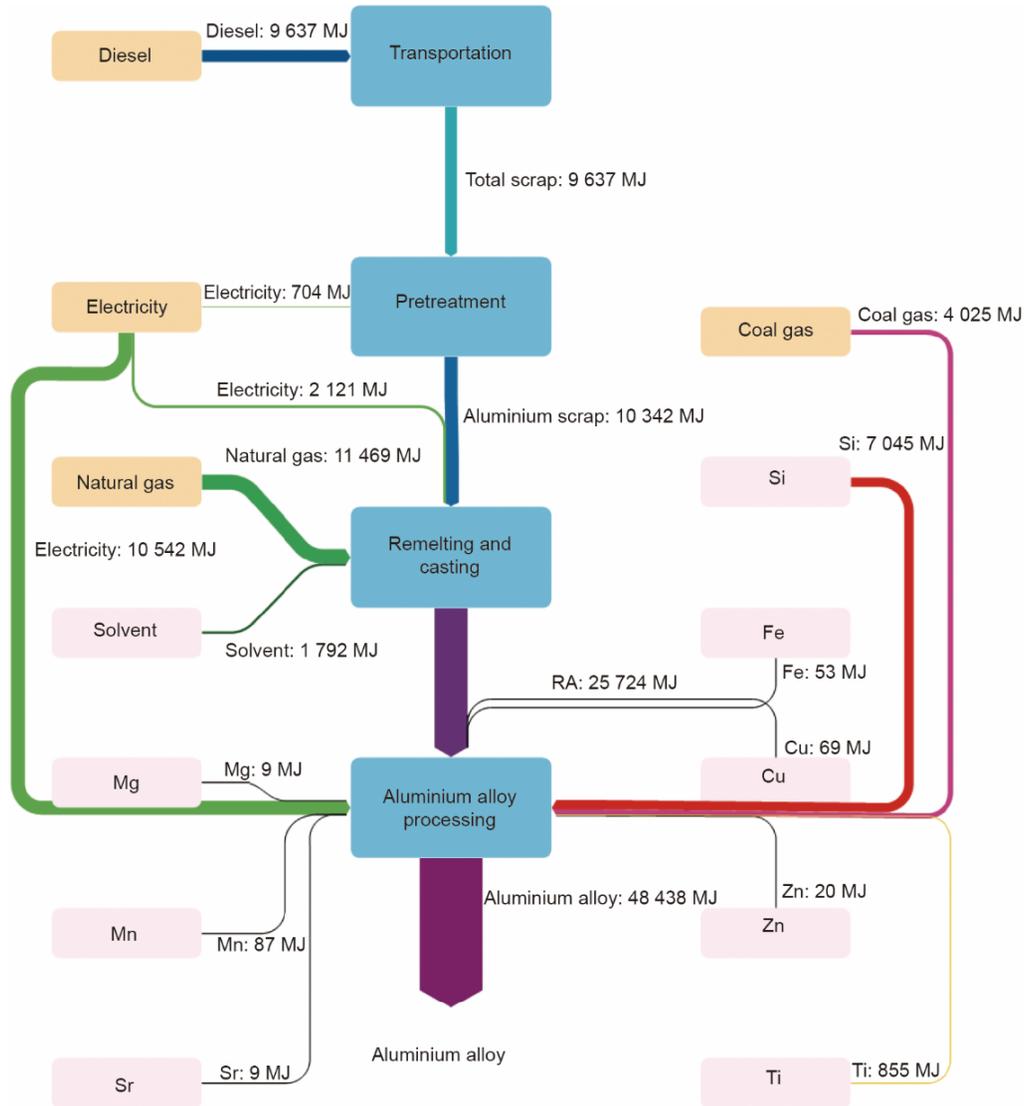


图4. 单位RA生产资源流动图。

数受到主观因素的影响，确定了四种类型的权重系数。权重系数、计算过程和结果见附录A中的第S4节。

三种方法生产A356铝合金的综合结果依次为RA、PATA、PA。A356 RA铝合金的综合性能优于PA合金。如果只考虑PA生产的技术优化，采用PATA生产的A356铝合金可以有效地节约资源和能源。如果只考虑用再生产品替代原生产品，则A356 RA铝合金的综合性能明显优于PA合金。用RA-A356合金代替PA-A356合金可以在最小化牺牲性能的情况下减少其碳排放和资源消耗，因此有助于实现双碳目标。

## 5. 局限性及其讨论

前文已经对PA、PATA及RA三种路径制备的合金进

行了性能、资源耗竭和碳排放综合对比。然而这个结果具有较强的主观性，受到了性能、资源耗竭和碳排放的权重影响。尽管四种权重下三种路径的结果都是RA最优，但这是因为三者的资源耗竭、碳排放相差较大导致的。如若几种方案各类参数较为接近，那么不同权重下就会产生不同的最优解。因此，如何克服权重问题，客观地寻找到最优方案是非常重要的步骤。

本文尝试在已有的性能、资源耗竭和碳排放方法上，进一步深化综合表征模型，依据公式(14)的基本思想，采用python编程，寻求各方案的最优因子集，如式(17)所示。因子集数*i*越大，则表明方案满足大部分需求的能力越高，则方案更优。

$$S = \{c_k, d_k, g_k\} (c_k + d_k + g_k = 1, k \in \mathbf{N}^+) \quad (17)$$

式中，*S*表示权重系数集；*c<sub>k</sub>*、*d<sub>k</sub>*和*g<sub>k</sub>*表示权重系数； $\mathbf{N}^+$

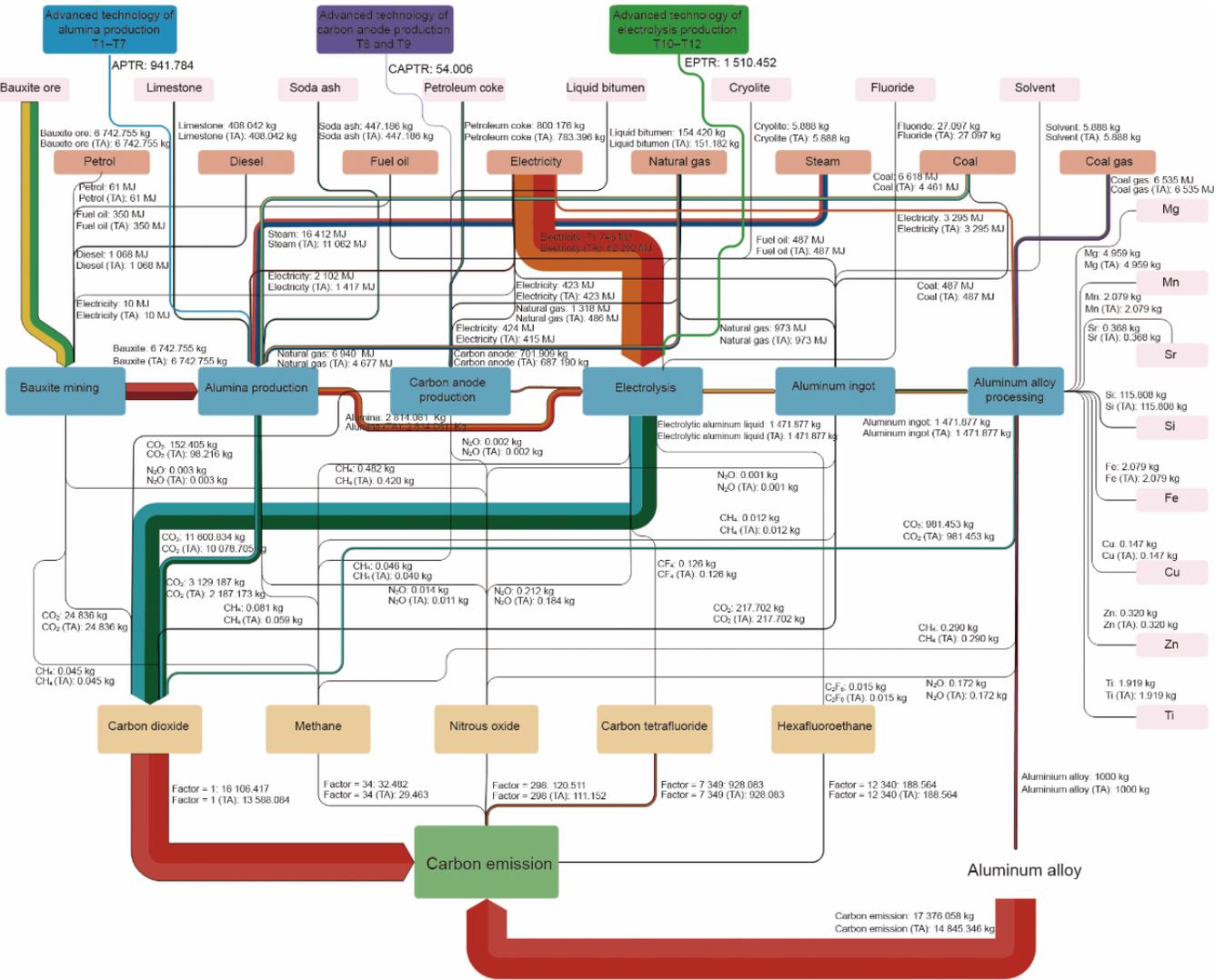


图5. PA 和 PATA 生产碳排放流动图。

表示除零以外的自然数。

进一步地，构建综合表征模型，如式（18）所示。对该模型进行 Python 编程并求得结果。程序代码在附录 A 的第 S5 节中给出。

$$EDI = c \times PER + d \times RCI + g \times CEI \quad (18)$$

式中， $c$ 、 $d$ 和 $g$ 代表权重系数；PER 代表性能结果。

通过代码运行结果， $k=5152$ ，其中 $k_{RA}=5148$ 、 $k_{PATA}=3$ 和 $k_{PA}=1$ 。因此，RA 合金综合性能最优，且占有绝对优势。PATA 与 PA 相比，PATA 更优。

## 6. 结论

流程工业碳减排技术是我国工业领域实现双碳目标的重要支撑。流程工业的低碳发展需要利用生命周期工程技术，从制造全流程入手，综合分析多种碳减排技术应用与

组合的效果，才能最大限度地发挥技术集成优势，从而全面构建流程工业低碳化发展路径。本文通过阐述生命周期工程技术的理论框架及方法体系，为原材料替代、流程再造、燃料替代、能量回收利用、物质回收利用等流程工业节能减碳技术体系的高效组合与重构提供了理论基础。

以典型 A356 铝合金产品为例，从制造流程资源和能源消耗、碳排放、产品性能、二次资源循环利用等角度开展生态设计多维分析，为基础材料流程低碳化技术集成、零碳化产品设计生产提供了科学依据和解决方案。研究表明，与 PA 铝合金相比，无论是 PATA 铝合金还是 RA 铝合金都能够显著降低资源消耗强度及碳排放强度。减碳技术的应用促进 1 t A356 铝合金资源消耗强度降低 13.37%，RA 资源消耗强度仅为 PA 的 13.22%。在碳排放方面，减碳技术的应用将能够降低约 14.94% 的碳排放，再生铝合金的碳排放仅为原生铝合金的 10.86%，再生铝

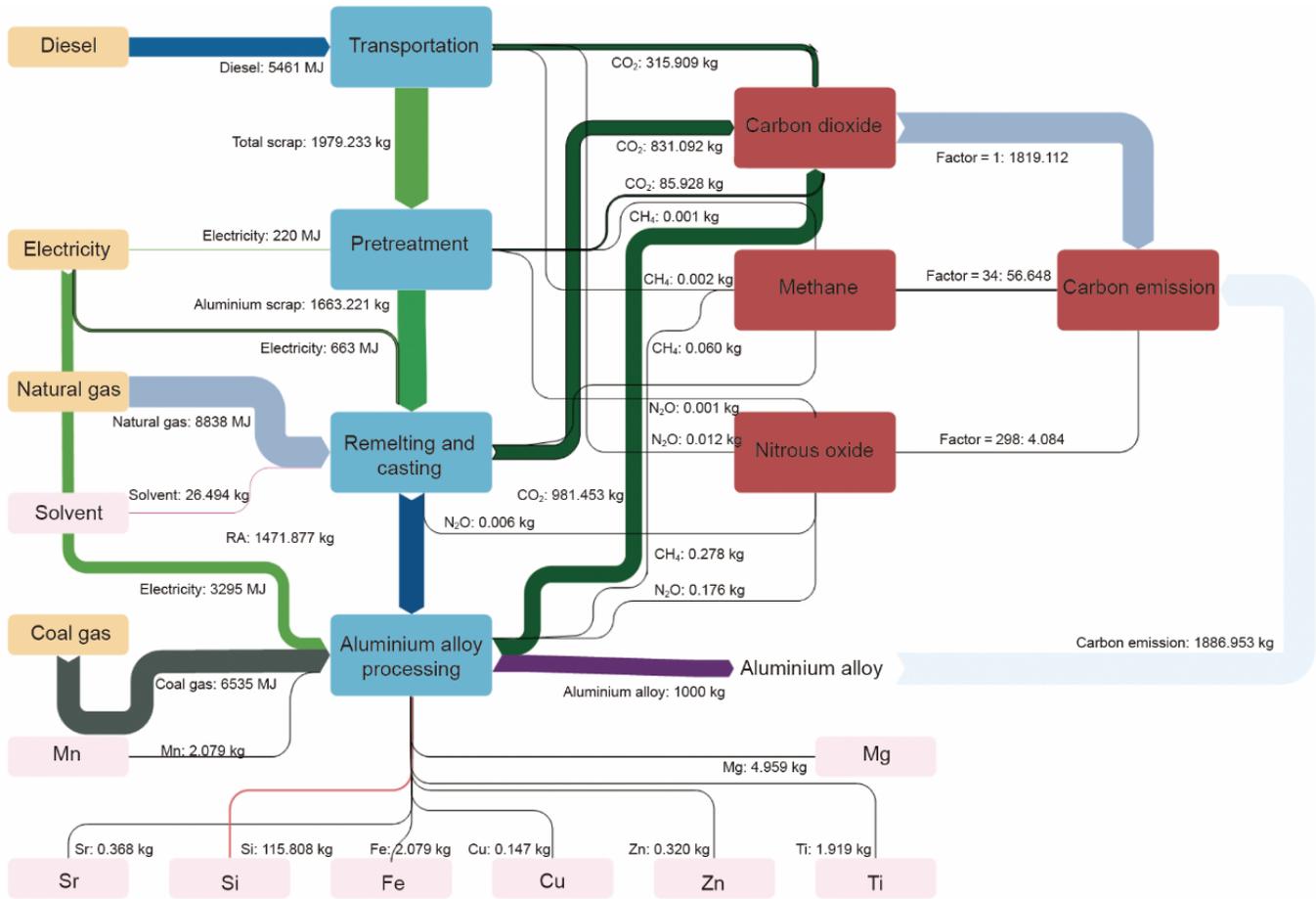


图 6. RA 合金生产碳排放流动图。

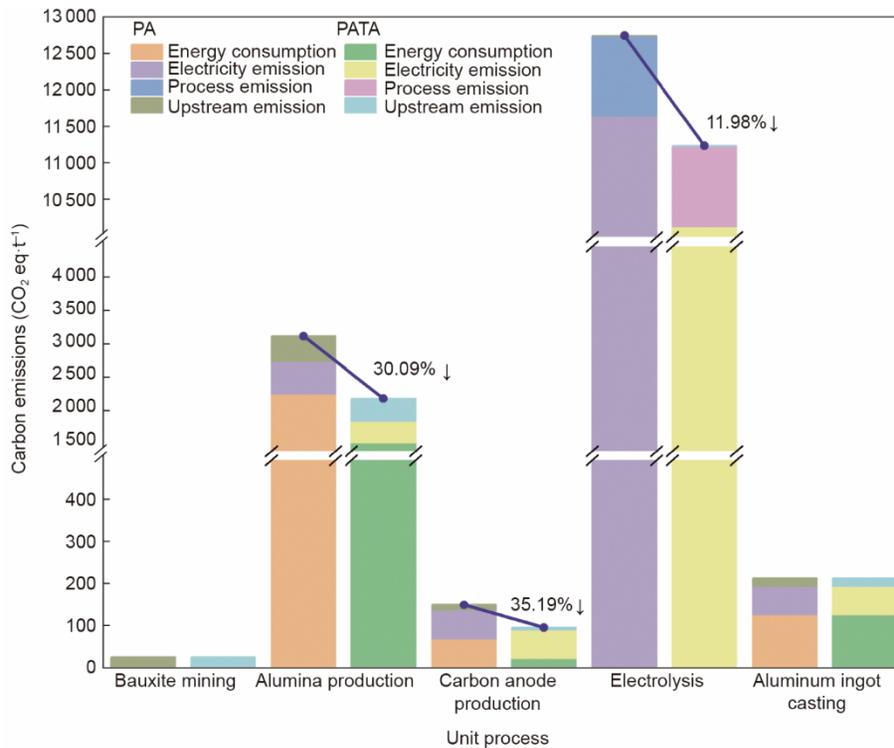


图 7. 单位 PA 和 PATA 合金生产碳排放对比。

表3 目标铝合金性能-需求矩阵

Performance-demand	Weights	Tensile strength	Yield strength	Elongation
Anti-deformation	50%	37.00%	37.00%	26.00%
Durability	25%	40.00%	40.00%	20.00%
Processing and molding	25%	20.00%	15.00%	65.00%
Performance weights	100%	33.50%	32.25%	34.25%

表4 标准化结果

Category	RCI	CEI	Performance
PA	1.00	1.00	1.000
PATA	0.87	0.85	1.000
RA	0.13	0.12	1.014

生产的碳排放量是原铝生产碳排放量的5.54%。性能方面，RA铝合金性能比PA有所降低。结合三个指标构建综合表征矩阵模型，在四种需求权重下，RA的综合性能均优于PATA和PA。

## 致谢

本研究得到了国家重点研发计划(2021YFB3704201和2021YFB3700902)的支持。

## Compliance with ethics guidelines

Mingyang Li, Feng Gao, Zuoren Nie, Boxue Sun, Yu Liu, and Xianzheng Gong declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.08.025>.

## References

- [1] Mitchell D, Allen MR, Hall JW, Muller B, Rajamani L, Le Quéré C. The myriad challenges of the Paris Agreement. *Philos Trans R Soc A* 2018; 376(2119):20180066.
- [2] Gao Z, editor. Boao forum for Asia—sustainable development: Asia and the world annual report 2022—Asia in action towards green transition. Beijing: University of International Business and Economics Press; 2022.
- [3] Li M, Gao F, Sun B, Liu Y, Gong X, Nie Z. Zero carbon-emission technology route construction and multifactor analysis of aluminum production in China. *J Clean Prod* 2022;370:133535.
- [4] International Energy Agency (IEA). Energy statistics data browser. Report. Paris: IEA; 2023.
- [5] Department of Energy Statistics of the National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook 2013. Report. Beijing: China Statistics Press; 2013. Chinese.
- [6] Pistorius PC. Steelmaking decarbonization options with current technology. *Metall Mater Trans B* 2022;53(3):1335–8.
- [7] Wang L, Jin Y, Nie Y, Li R. Recycling of municipal solid waste incineration fly ash for ordinary Portland cement production: a real-scale test. *Resour Conserv Recycl* 2010;54(12):1428–35.
- [8] Tan Q. Co-benefit analysis of greenhouse gases mitigation in China major industrial sectors [dissertation]. Beijing: Tsinghua University. 2015. Chinese.
- [9] Wang Y, Cui S, Liu Y, Sun B, Gong X, Gao F. Evaluation and comparison of exergy-based resource consumption for fly ash utilisation in a cement clinker production system and landfill disposal. *Int J Exergy* 2021;36(2–4):414–29.
- [10] Mathioudakis D, Karageorgis P, Papadopoulou K, Lyberatos G. LCA and LCC of dried and shredded food waste as an alternative fuel for the cement industry. *Waste Manag Res* 2021;39(10):1264–9.
- [11] Rahman A, Rasul MG, Khan MMK, Sharma S. Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. *Fuel* 2015; 145: 84–99.
- [12] Meng X, Chen M, Gu A, Wu X, Liu B, Zhou J, et al. China's hydrogen development strategy in the context of double carbon targets. *Nat Gas Ind B* 2022;9(6):521–47.
- [13] Li Z, Zhang W, Zhang R, Sun H. Development of renewable energy multi-energy complementary hydrogen energy system (a case study in China): a review. *Energy Explor Exploit* 2020;38(6):2099–127.
- [14] Chen H, Wang Y, An L, Xu G, Zhu X, Liu W, et al. Performance evaluation of a novel design for the waste heat recovery of a cement plant incorporating a coal-fired power plant. *Energy* 2022;246:123420.
- [15] Christodoulides P, Agathokleous R, Aresti L, Kalogirou SA, Tassou SA, Florides GA. Waste heat recovery technologies revisited with emphasis on new solutions, including heat pipes, and case studies. *Energies* 2022;15(1):384.
- [16] Alex TC, Mucsi G, Venugopalan T, Kumar S. BOF steel slag: critical assessment and integrated approach for utilization. *J Sustain Metall* 2021;7(4): 1407–24.
- [17] Yang X, Gao Y, Zhu M, Springer C. Assessing methane emissions from the natural gas industry: reviewing the case of China in a comparative framework. *Curr Clim Change Rep* 2022;8(4):115–24.
- [18] Hartmann S, Koval' L, Škrobánková H, Matýšek D, Winter F, Purgar A. Possibilities of municipal solid waste incinerator fly ash utilisation. *Waste Manag Res* 2015;33(8):740–7.
- [19] Lu X, Zhang Z, Hiraki T, Takeda O, Zhu H, Matsubae K, et al. A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap. *Nature* 2022; 606(7914): 511–5.
- [20] Gao J, Qi Y, Yan D, Wang F, Xu HC. Development path and key technical problems of low carbon ironmaking in China. *China Metall* 2021;31:64–72. Chinese.
- [21] Luo J, Duan N, Xu F, Jiang L, Zhang C, Ye W. System-level analysis of the generation and distribution for Pb, Cu, and Ag in the process network of zinc hydrometallurgy: implications for sustainability. *J Clean Prod* 2019;234:755–66.
- [22] Shen L, Zhao H, Qiu G. Review of low-carbon bio-hydrometallurgical technology. *J China Univ Min Technol* 2022;51:419–33. Chinese.
- [23] Zhang P, Guo Q, Wei G, Meng L, Han L, Qu J, et al. Leaching metals from saprolitic laterite ore using a ferric chloride solution. *J Clean Prod* 2016;112: 3531–9.
- [24] Jia Y, Tan Q, Sun H, Zhang Y, Gao H, Ruan R. Sulfide mineral dissolution microbes: community structure and function in industrial bioleaching heaps. *Green Energy Environ* 2019;4(1):29–37.
- [25] Mezquita A, Monfort E, Ferrer S, Gabaldón-Estevan D. How to reduce energy and water consumption in the preparation of raw materials for ceramic tile manufacturing: dry versus wet route. *J Clean Prod* 2017;168: 1566–70.
- [26] Wang Y, Liu Y, Cui S, Sun B, Gong X, Gao F, et al. Comparative life cycle assessment of different fuel scenarios and milling technologies for ceramic tile production: a case study in China. *J Clean Prod* 2020;273:122846.
- [27] Ding N, Gao F, Wang ZH, Gong XZ. Comparative analysis of primary aluminum and recycled aluminum on energy consumption and greenhouse gas emission. *Chin J Nonferrous Met* 2012;22:2908–15. Chinese.
- [28] Helbig C, Huether J, Joachimsthaler C, Lehmann C, Raatz S, Thorenz A, et al. A terminology for downcycling. *J Ind Ecol* 2022;26(4):1164–74.
- [29] Lee DE, Melkanoff MA. Issues in product life cycle engineering analysis. In: Proceedings of the 19th Design Automation Conference: Volume 1—Mechanical System Dynamics; Concurrent and Robust Design; Design for Assembly and Manufacture; Genetic Algorithms in Design and Structural

- Optimization; 1993 Sep 19–22; Albuquerque, NM, USA. New York: ASME; 1993. p. 75–86.
- [30] ISO/TR 14062: 2002: Environmental management—integrating environmental aspects into product design and development. ISO standard. Geneva: ISO; 2002.
- [31] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 24256–2009: General principle and requirements of eco-design for products. Chinese standard. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China; 2009. Chinese.
- [32] Kellens K, Jeswiet J. Life Cycle Engineering. In: Chatti S, Laperrière L, Reinhart G, Tolio T, editors. CIRP encyclopedia of production engineering. Berlin: Springer; 2019. p. 1502–3.
- [33] Cooper JS, Vigon BW. Life cycle engineering guidelines. Report. Cincinnati: US Environmental Protection Agency. 2001.
- [34] A. James Clark School of Engineering. College park: center for advanced life cycle engineering. Report. University of Maryland. College Park: University of Maryland. 2023.
- [35] Oh H, Han B, McCluskey P, Han C, Youn BD. Physics-of-failure, condition monitoring, and prognostics of insulated gate bipolar transistor modules: a review. *IEEE Trans Power Electron* 2015;30(5):2413–26.
- [36] Buzuku S, Farfan J, Kässi T, Kraslawski A. Analysis and ranking of drivers for eco-design implementation in the finnish pulp and paper industry. *Procedia Manuf* 2018;17:1049–57.
- [37] Prinčaud M, Cornier A, Frölich D. Developing a tool for environmental impact assessment and eco-design for ships. *Proc Inst Mech Eng Part M* 2010; 224(3):207–24.
- [38] Li GF, Kong JY, Jiang GZ, Zhao G, Xie LX. Green design and manufacturing in electromechanical product. *Appl Mech Mater* 2010;29–32:985–90.
- [39] Bianco I, Thiébat F, Carbonaro C, Pagliolico S, Blengini GA, Comino E. Life cycle assessment (LCA)-based tools for the eco-design of wooden furniture. *J Clean Prod* 2021;324:129249.
- [40] Navajas A, Uriarte L, Gandía L. Application of eco-design and life cycle assessment standards for environmental impact reduction of an industrial product. *Sustainability* 2017;9(10):1724.
- [41] Yu WD, Cheng ST, Miao CM, Perng GY. Green innovation of green roof technology—a case study. *Mater Sci Eng Technol* 2017;48(5):420–9.
- [42] Ramani K, Ramanujan D, Bernstein WZ, Zhao F, Sutherland J, Handwerker C, et al. Integrated sustainable life cycle design: a review. *J Mech Des* 2010; 132(9):091004.
- [43] Kamalakkannan S, Kulatunga AK. Optimization of eco-design decisions using a parametric life cycle assessment. *Sustain Prod Consum* 2021;27: 1297–316.
- [44] Belucio M, Rodrigues C, Antunes CH, Freire F, Dias LC. Eco-efficiency in early design decisions: a multimethodology approach. *J Clean Prod* 2021;283: 124630.
- [45] Borge-Diez D, Ortega-Cabezas PM, Colmenar-Santos A, Blanes-Peiró JJ. Contribution of driving efficiency and vehicle-to-grid to eco-design. *Energies* 2020;13(15):3997.
- [46] Ratner S, Gomonov K, Revinova S, Lazanyuk I. Eco-design of energy production systems: the problem of renewable energy capacity recycling. *Appl Sci* 2020;10(12):4339.
- [47] Nie ZR. Exergy-based resource depletion analysis in materials life cycle assessment. Beijing: Science Press; 2021.
- [48] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 1173–2013: Casting aluminum alloy. Chinese standard. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China; 2013. Chinese.
- [49] China Nonferrous Metals Industry Association. The yearbook of nonferrous metals industry of China (2020). Report. Beijing: China Nonferrous Metals Industry Association; 2021. Chinese.
- [50] CNMLCA. Material life cycle assessment databased-sinocenter. Report. Beijing University of technology; 2022.
- [51] National Development and Reform Commission. Greenhouse gas emissions accounting methodology and reporting guidelines for Chinese electrolytic aluminum producers (for trial implementation). Report. Beijing: National Development and Reform Commission; 2013. Chinese.
- [52] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2019 Annual emission reduction project China regional grid baseline emission factors. Report. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China; 2020. Chinese.