

# 水泥生产系统富氧燃烧改造的性能模拟优化

陈涛<sup>1</sup>, 王玉亭<sup>2</sup>, 周月桂<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 国家电投智慧能源创新学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院 热能工程研究所, 上海 200240)

**摘要:** 以日产 3 000 t 熟料的水泥干法生产设备为研究对象, 采用 Aspen Plus 软件建立了水泥生产系统富氧燃烧改造的工艺流程模型, 研究了采用富氧煤粉燃烧方式生产水泥熟料的系统能量效率和 CO<sub>2</sub> 捕集成本。结果表明: 在相同的水泥熟料生产条件下, 当烟气再循环率为 51% 时富氧燃烧气氛下系统沿程温度分布与空气气氛下相匹配, 此时富氧燃烧整体氧气体积分数为 26.4%。富氧燃烧方式需要配置的空气分离装置和 CO<sub>2</sub> 纯化压缩装置将导致系统能量效率比传统生产方式下降 18.9%, 并且采用该方式生产 1 t 水泥熟料需花费 532.1 元。但在 CO<sub>2</sub> 捕集成本方面, 采用富氧煤粉燃烧技术生产水泥熟料的系统 CO<sub>2</sub> 捕集成本为 227.3 元/t, 比传统的燃烧后 CO<sub>2</sub> 捕集成本降低了 58%。因此, 对水泥熟料采用富氧燃烧技术生产, 可以保证熟料的产量和品质, 同时 CO<sub>2</sub> 捕集成本也比燃烧后 CO<sub>2</sub> 捕集成本更低, 具有显著优势。

**关键词:** 水泥生产; 富氧燃烧; 热力性能优化; 技术经济性分析; 系统集成

**中图分类号:** TQ172.6; X781.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2025)02-0181-09

## Simulation optimization of oxygen-fuel combustion retrofitting of cement production system

CHEN Tao<sup>1</sup>, WANG Yuting<sup>2</sup>, ZHOU Yuegui<sup>2</sup>

(1. College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Institute of Thermal Energy Engineering, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The dry process cement production equipment with a daily production capacity of 3,000 tonnes of clinker was taken as the research object, and Aspen Plus software was used to establish the corresponding production process model. The system energy efficiency of cement clinker production by using oxygen-fuel pulverised coal combustion was investigated, as well as the CO<sub>2</sub> capture and integration of the system. The results show that a flue gas recirculation rate of 51% results in an oxygen-fuel atmosphere with the overall oxygen concentration of 26.4% with the temperature profile of the system closest to the air atmosphere at the same cement clinker input condition. The air separation device and CO<sub>2</sub> purification and compression device required for oxygen-fuel combustion will lead to a decrease in the energy efficiency of the system, which is 18.9% lower than that of the traditional method, and the production of 1 tonne of cement clinker using this method costs 532.1 yuan. However, the CO<sub>2</sub> capture cost of the system for cement clinker production using oxygen-fuel pulverised coal combustion technology is 227.3 yuan/t, which is 58% lower than that of the traditional post-combustion CO<sub>2</sub> capture cost. Accordingly, the use of oxygen-fuel combustion technology for cement clinker production not only ensures the clinker yield and quality, but also has a significant carbon capture cost advantage as the CO<sub>2</sub> capture cost is lower than that of post-combustion carbon capture technologies.

**Key words:** cement production; oxygen-fuel combustion; thermal performance optimization; technical-economic analysis; system integration

收稿日期: 2023-11-06; 策划编辑: 白娅娜; 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.23110602

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976120)

作者简介: 陈涛(1998—), 男, 江苏常熟人, 硕士研究生。E-mail: SJTU\_ChenTao@sjtu.edu.cn

通讯作者: 周月桂(1972—), 男, 教授, 博士。E-mail: ygzhou@sjtu.edu.cn

引用格式: 陈涛, 王玉亭, 周月桂. 水泥生产系统富氧燃烧改造的性能模拟优化[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(2): 181-189.

CHEN Tao, WANG Yuting, ZHOU Yuegui. Simulation optimization of oxygen-fuel combustion retrofitting of cement production system[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(2): 181-189.



## 0 引言

水泥行业作为主要的建材行业，消耗了全球工业能源使用量的7%，其生产过程产生的CO<sub>2</sub>占全球排放份额约为5%，其中50%以上与流程相关，无法避免<sup>[1]</sup>。水泥生产过程的碳减排已成为推进可持续发展的重要措施，国际能源署(IEA)的研究表明碳捕集技术对水泥行业碳减排贡献率超过50%<sup>[2]</sup>。

适用于水泥生产碳减排的碳捕集方式主要有富氧燃烧技术和燃烧后捕集技术两种<sup>[3]</sup>。富氧燃烧方式有利于提高燃料燃烧速率和燃尽率，但也增加了额外能耗。燃烧后捕集方式适用范围更广，但是水泥生产排放的气体压力小、体积大、CO<sub>2</sub>浓度低，造成捕集系统庞大。GERBELOVÁ等<sup>[4]</sup>从技术性能、投资成本和运营成本方面对两者进行比较，得出水泥生产采用富氧燃烧碳捕集方式更经济。

目前，将富氧燃烧技术应用于水泥生产的研究逐渐增多。国际能源署<sup>[5]</sup>提出了2种水泥工业富氧燃烧生产方式：部分氧燃烧和全氧燃烧。朱文尚等<sup>[6]</sup>探讨了增氧燃烧技术在水泥生产中的利用现状，指出在操作及设备方面必须做相应的调整以满足水泥窑中温度场要求。MARIO等<sup>[7]</sup>研究了典型全尺寸水泥回转窑的富氧燃烧技术改造，通过调整燃烧器喷嘴的旋流角度实现了水泥回转窑从空气向富氧煤粉燃烧的转变。ATMACA等<sup>[8]</sup>对水泥厂回转窑进行热力学分析，发现燃料燃烧效率直接影响设备能量效率，使用耐火砖可显著降低回转窑的热损失，进而提高回转窑的能量效率。FELLAOU等<sup>[9]</sup>分析了整个水泥厂生产线的能耗，提出通过回收预热器热交换系统中的余热、优化生产线运行可有效提高工厂运行的总体能量效率。吴铁军等<sup>[10]</sup>提出富氧燃烧的水泥窑尾废气循环富集，提高烟气中CO<sub>2</sub>浓度，可以降低CO<sub>2</sub>捕集纯化成本。WANG等<sup>[11]</sup>根据水泥产量和碳捕集技术发展情况，指出水泥富氧燃烧生产碳捕集成本约为燃烧后碳捕集成本的60%。NHUCHHEN等<sup>[12]</sup>对采用天然气作燃料的水泥厂富氧燃烧生产熟料进行了技术经济评估，得出该生产方式燃料消耗增加了7%，碳捕集成本约为262~356元/t。ZHOU等<sup>[13]</sup>基于建模和模拟得出水泥生产采用燃烧后单乙醇胺(Monoethanolamine, MEA)碳捕集成本为541元/t。焦文婷等<sup>[14]</sup>提出了一种耦合碳捕集单元的水泥窑闪蒸式余热发电系统，碳捕集能耗较常规系统降低了约14%。已有研究主要关注回转窑内的气氛如何从空气向富氧燃烧转变，并对水泥厂生产线及部分设备的能量利用情况进行了定性

分析，但对水泥生产整个系统在富氧气氛下的沿程温度变化情况、水泥在富氧气氛下生产的系统能量利用情况以及系统CO<sub>2</sub>捕集成本的研究较少，且水泥富氧燃烧生产改造模型均未集成空气分离装置(ASU)和CO<sub>2</sub>纯化压缩装置(CPU)。

笔者首先采用Aspen Plus软件建立了典型水泥工业生产流程模型，并将模拟结果与参考数据作对比，验证了该模型的合理性；然后，在此基础上，维持燃料输入量不变，建立了耦合ASU和CPU后的水泥富氧燃烧生产新工艺流程模型；最后，对比了不同烟气再循环率的工况下，典型水泥生产工艺与新工艺在系统沿程温度分布上的差别，获得了经富氧燃烧改造后新工艺的能量效率，并计算了水泥熟料生产成本和CO<sub>2</sub>捕集成本。

## 1 水泥工业生产系统

提出了对水泥工业生产流程进行富氧燃烧改造的方案，为评估其性能，以日产3000t熟料的水泥干法生产设备为研究对象进行说明与分析<sup>[15]</sup>，如图1所示。该系统主要由五级旋风预热器、分解炉、回转窑和冷却机等组成。将主要包含CaCO<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的生料粉碎、研磨后输入系统。生料在一系列旋风分离器组成的预热器中加热，分解炉进一步将其温度提高到860~880℃，之后进入温度更高的回转窑中，经过一系列化学变化，最后经冷却得到水泥主要成分—熟料，将熟料同石膏等材料混合得到最终的水泥产品<sup>[16]</sup>。排烟与固体生料呈逆流流动，烟气从预热器顶端流出，经布袋除尘器脱离大部分颗粒后排出烟囱。主要涉及到5个化学反应过程<sup>[17]</sup>：

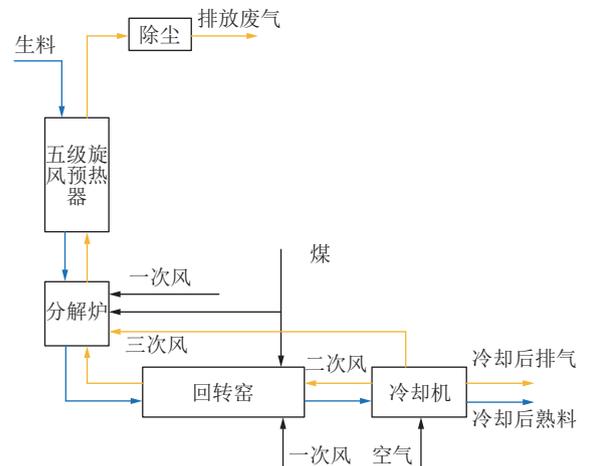
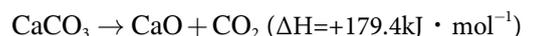


图1 典型水泥工业生产流程

Fig. 1 Production process of typical cement industry





依据图1所示流程图建立水泥工业生产流程模型,如图2所示。进入系统的煤燃料成分参数见表1,该生产系统的主要参数见表2,其中供给的空气作为助燃使用,不包括熟料冷却,漏风等情景。本文系统所用的生料组成成分及相应质量分数为  $\text{CaCO}_3$  79.47%,  $\text{SiO}_2$  14.34%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  3.49%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  2.7%。

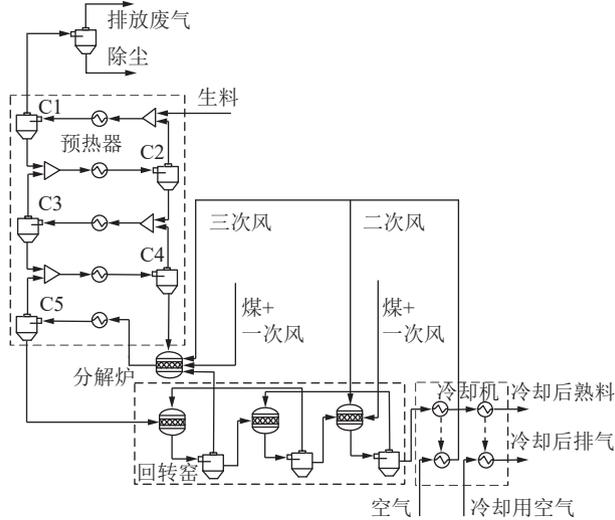


图2 典型水泥工业生产流程模型

Fig. 2 Modelling diagram of production process of typical cement industry

表1 水泥生产系统使用的煤燃料成分<sup>[18]</sup>

Table 1 Coal components used in cement production system<sup>[18]</sup>

参数	成分	数值	
		收到基	空气干燥基
元素分析/%	C	69.43	71.21
	H	4.12	4.23
	O	8.25	8.46
	N	1.25	1.28
	S	0.72	0.74
工业分析/%	水分	4.1	1.64
	灰分	11.99	12.3
	挥发分	28.48	29.21
	固定碳	55.43	56.85
低位发热量/(MJ · kg <sup>-1</sup> )		26.73	28.06

## 2 水泥工业生产系统富氧燃烧改造方案

对水泥采取富氧燃烧的生产方式,由于输入系

表2 水泥生产系统的主要参考参数<sup>[19-20]</sup>

Table 2 The main reference parameters for cement production system<sup>[19-20]</sup>

参数	数值
水泥熟料产量/(t · d <sup>-1</sup> )	3 000
生料供给参数	101.33 kPa, 60 °C, 55.56 kg/s
助燃空气供给参数	101.33 kPa, 25 °C, 36.85 kg/s
分解炉供给燃料参数	101.33 kPa, 60 °C, 2.45 kg/s
回转窑供给燃料参数	101.33 kPa, 60 °C, 1.54 kg/s
预热器固气分离效率/%	C1 C2 C3 C4 C5
	95.20 86.01 85.97 85.74 75.60

统的氧化剂只含有少量氮气,因此在燃烧过程中生成的  $\text{NO}_x$  等污染物含量较低;同时排放到环境的烟气中有高浓度的  $\text{CO}_2$  气体,经提纯后可以直接进行利用和封存。水泥生产流程的富氧燃烧改造主要包括保持输入的生料量和燃煤量不变,将一部分排放烟气再循环至熟料出口,同  $\text{O}_2$  混合后流经出口熟料,在冷却熟料的同时进行预热,后按一定比例分别输送至回转窑和分解炉,提供燃烧所需氧化剂,如图3所示。该改造方案耦合了空气分离装置(ASU)和  $\text{CO}_2$  纯化压缩装置(CPU),ASU通过深冷空分方式制备的氧化剂中含有体积分数95%的氧气,1.5%的氮气和3.5%的氩气<sup>[5]</sup>,系统排放的烟气进入CPU经过提纯压缩后进行后续的封存或利用,相关参数值见表3。

## 3 水泥工业生产系统分析方法

采用 Aspen Plus 软件对水泥工业生产流程进行仿真。该软件是基于稳态流程模拟的标准大型通用过程分析模拟器,具有完备的物性数据库使其可处理煤等非理想复杂物系,可为化工过程研究提供方便快捷的建模、集成和优化方案。

### 3.1 模型验证

使系统从排放烟气到回转窑出口熟料的系统沿程温度与参考数据<sup>[19-20]</sup>基本一致,如图4所示,此时分配至回转窑的二次风比率为34%。将模拟结果与文献<sup>[19]</sup>中日产3 000 t熟料的水泥工业生产系统数据进行比较,所有模拟结果与参考数据较符合,验证了所建立系统模型的准确性,见表4。模拟结果显示水泥熟料产品产量低于3 000 t/d,这主要是因为该模型输入原料中未考虑  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  等含量较少的杂质,同时本文所用燃料煤的灰分比文献<sup>[19]</sup>中所用的含量更少,导致混合到熟料产品中的灰成分偏少。

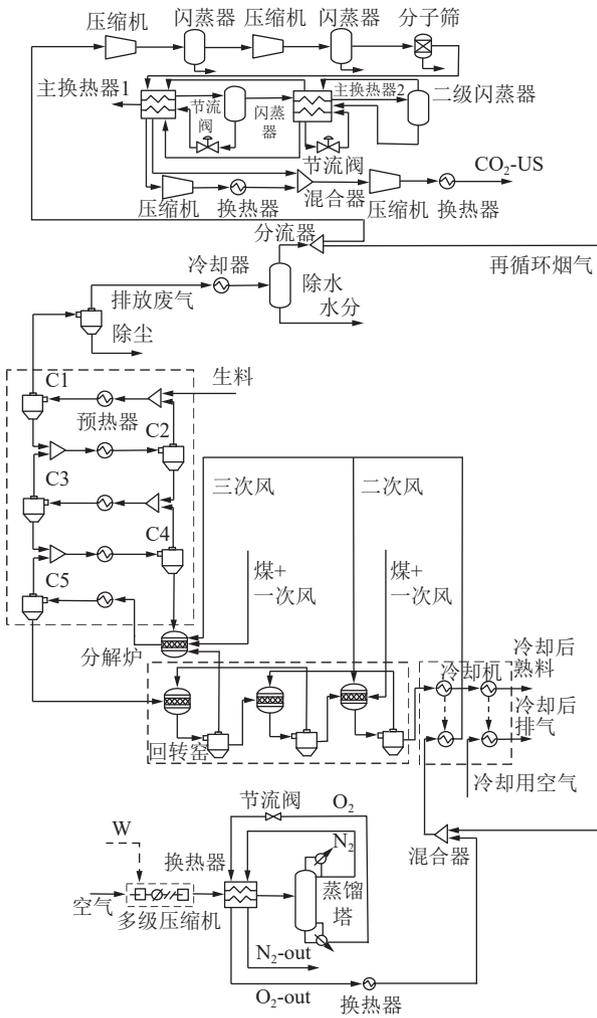


图3 水泥工业生产富氧燃烧改造工艺流程模型

Fig. 3 Modelling diagram of production process of oxygen-fuel combustion retrofitting for cement industry

表3 水泥工业富氧燃烧生产改造的参数

Table 3 Parameter values for oxygen-fuel combustion production transformation in cement industry

参数	数值
氧气供给参数	101.33 kPa, 25 °C, 8.93 kg/s
分解炉供给燃料参数	101.33 kPa, 60 °C, 2.45 kg/s
回转窑供给燃料参数	101.33 kPa, 60 °C, 1.54 kg/s

### 3.2 能量分析方法

熟料生产是能源使用最密集的步骤，熟料质量直接影响水泥质量，需要对能量输入进行精确控制。对于本文提出的水泥生产流程可看作稳态、定常流动过程，应用物料和能量平衡方程来求解功和热的相互作用以及能量效率<sup>[21]</sup>。

质量平衡方程可以表示为

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

式中： $\dot{m}$ 为质量流量，kg/s；下标 in 代表进入系统，

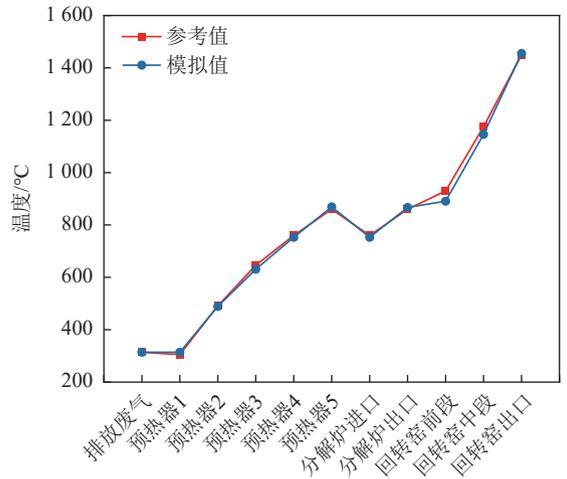


图4 系统沿程温度与参考数据对比

Fig. 4 System temperature along the path compared to reference data

表4 水泥生产系统模拟结果与参考数据对比

Table 4 Comparison of simulated results of cement production system with reference data

参数	成分	参考数据 <sup>[20]</sup>	模拟数据
熟料产品组分 质量分数/%	硅酸二钙(C <sub>2</sub> S)	14.3	12.3
	硅酸三钙(C <sub>3</sub> S)	65.8	66.9
	铝酸三钙(C <sub>3</sub> A)	10.0	9.5
	铁铝酸四钙(C <sub>4</sub> AF)	8.7	8.4
出口熟料温度/°C		1450	1455
分解炉温度/°C		860	867
熟料产量/(kg·s <sup>-1</sup> )		34.72	34.29

下标 out 代表离开系统。

能量平衡方程可以表示为

$$E_{RM}^{Phys} + E_{fuel}^{Phys} + E_{fuel}^{Chem} + W = E_{clinker}^{Phys} + E_{clinker}^{Chem} + \sum \dot{E}_{loss} \quad (2)$$

式中： $E_{RM}^{Phys}$ 为生料的物理能，MW； $E_{fuel}^{Phys}$ 为燃料的物理能，MW； $E_{fuel}^{Chem}$ 为燃料的化学能，MW； $W$ 为系统消耗的电功，MW； $E_{clinker}^{Phys}$ 为熟料的物理能； $E_{clinker}^{Chem}$ 为熟料的化学能，MW； $\dot{E}_{loss}$ 为系统每个单元净能量损失，包含系统散热和排烟损失，MW。

系统的能量效率可定义为剔除了未被利用的能量后系统能量输出与总能量输入的比率：

$$\eta = \frac{E_{clinker}^{Chem}}{E_{RM}^{Phys} + E_{fuel}^{Phys} + E_{fuel}^{Chem} + W} \quad (3)$$

### 3.3 经济性评价指标

对水泥采用富氧燃烧生产进行 CO<sub>2</sub> 捕获的经济性评价通过水泥熟料的生产成本和系统的碳捕集成本来评估<sup>[22-23]</sup>。

熟料生产成本 COC 的计算公式为

$$COC = C_{cap} + C_{fuel} + C_{RM} + C_{elc} + C_{O\&M} \quad (4)$$

$$C_{cap} = \frac{k \times (1+k)^n}{(1+k)^n - 1} \times TPC \quad (5)$$

式中:  $C_{cap}$  为年化成本, 万元; 年化成本同资本回收系数 (CRF) 和工厂总投资成本 (TPC) 有关,  $k$  为折旧率, %;  $n$  为设备寿命, 年;  $C_{fuel}$  为燃料成本, 万元;  $C_{RM}$  为生料成本, 万元;  $C_{elc}$  为电力成本, 万元;  $C_{O\&M}$  为固定运行维护成本, 万元。

$CO_2$  的捕集成本 CAC 可由下式计算<sup>[24]</sup>:

$$CAC = \frac{COC_{Capture} - COC_{NO\ Capture}}{SE_{NO\ Capture} - SE_{Capture}} \quad (6)$$

式中:  $COC_{Capture}$  为进行碳捕集系统的熟料生产成本, 万元/t;  $COC_{NO\ Capture}$  为不进行碳捕集系统的熟料生产成本, 万元/t;  $SE_{NO\ Capture}$  为不进行碳捕集系统的熟料比  $CO_2$  排放量, t/t;  $SE_{Capture}$  为进行碳捕集系统的熟料比  $CO_2$  排放量, t/t。

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 最佳烟气再循环率的确定

水泥分解炉和回转窑内反应温度尽可能匹配空气气氛情况是水泥生产系统富氧燃烧改造的关键指标。对于水泥富氧燃烧生产系统而言, 烟气再循环比率对系统温度分布有着重要影响, 进而影响产品质量。本文通过改变富氧系统烟气再循环比率进而调整系统整体氧浓度来确定保持燃料给料量不变、氧气供给量不变时系统的最佳烟气再循环率。

烟气再循环率设置 10%、30%、50%、70% 和 90% 五组工况, 分别模拟每组工况下的系统沿程温度曲线, 并与参考值进行对比, 如图 5 所示, 图中 FGR 为再循环烟气 (Flue gas recirculating) 的缩写。随着烟气再循环率的提高, 再循环的烟气体量增大, 排烟热损失增大, 导致回转窑出口熟料温度下降。发现当烟气再循环率为 50% 时, 富氧燃烧系统沿程温度与空气燃烧参考值的误差最小, 说明此时富氧燃烧系统沿程温度与空气燃烧系统沿程温度相匹配。

在水泥工业生产过程中, 分解炉的出口温度和回转窑出口的熟料温度是确保熟料产量和质量的关键指标。在富氧气氛下, 分解炉需要更高的温度才能达到和空气气氛下相同的生料分解率。因此, 仿真计算中富氧气氛下的分解炉温度更高。为进一步确定合适烟气再循环比率, 选取 45%~55% 范围进行进一步模拟, 由文献 [19] 可知, 为保证相同的生料分解率, 需保证分解炉出口温度不低于 900 °C, 回转窑出口温度不低于 1 450 °C。比较不同工况下分解炉出口温度和回转窑出口温度同参考温度的差

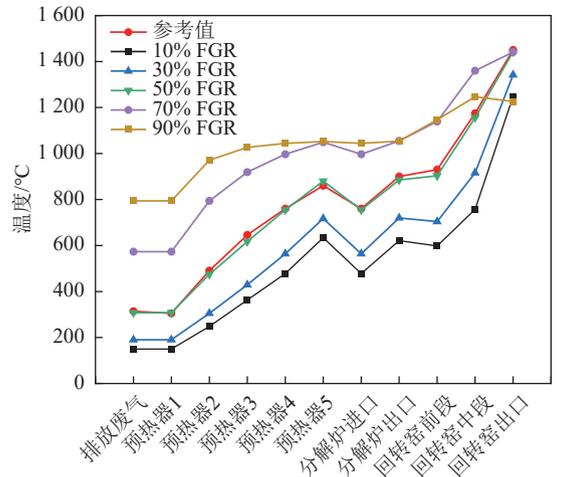


图 5 烟气再循环率 10%~90% 对应的系统沿程温度与参考数据对比

Fig. 5 Flue gas recirculation rate 10%-90% corresponding to the system temperature along the process comparison with reference data

值, 如图 6 所示。经过对比, 发现当烟气再循环率为 51% 时, 富氧系统的沿程温度最接近空气气氛情况, 此时分解炉温度为 911 °C, 可以保证生料分解率, 回转窑出口熟料温度为 1 454 °C, 熟料产量为 34.29 kg/s。可见在输入的生料量和煤量不变情况下, 使用富氧燃烧生产方式可以保证熟料的质量和产量, 同时由于沿程温度接近空气气氛参考值, 火焰温度对系统内衬的影响与空气气氛相当, 使得对系统的富氧改造成本最低。由模型计算结果可得到图 7 所示的不同烟气再循环率对应的氧浓度, 可知此时富氧系统总体氧浓度为 26.4%。富氧系统搭配的 ASU 参数及烟气再循环率 51% 时对应的 CPU 参数见表 5。

### 4.2 能量效率分析

对所提出的水泥生产富氧燃烧改造前后方案中能量流动进行分析, 进一步阐明提出的富氧燃烧改造方案能量利用率, 空气气氛和富氧燃烧气氛下系统能流桑基图如图 8 所示。本文提出方案的总能量输入包括煤燃料能量输入和生料物理能输入, 为 113.43MW, 由上文中所述 5 个熟料反应式及表 4 所示的熟料结果, 可知熟料化学能为 60.52 MW。由式 (3) 得到空气气氛系统能量效率为 53.4%。对于富氧燃烧改造后的水泥工厂, 由于再循环烟气在再循环至系统之前需要降温除去水分, 造成大量热损失, 且增加的 ASU 和 CPU 需要消耗大量电能, 能量效率下降至 43.3%。因此, 水泥生产系统富氧燃烧改造增加的 ASU 和 CPU 会使系统能量效率明显降低。

### 4.3 富氧燃烧系统经济性分析

水泥生产排放大量  $CO_2$  不利于全球减排大趋

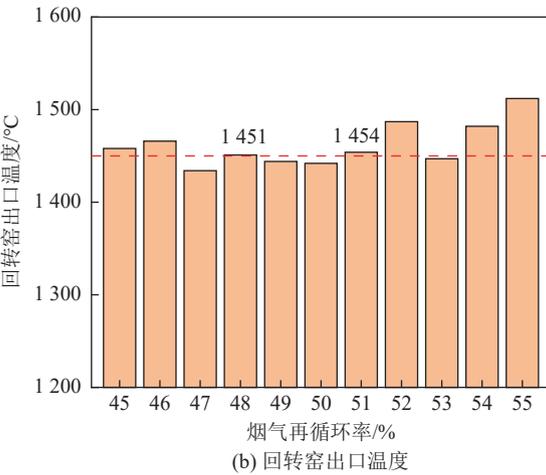
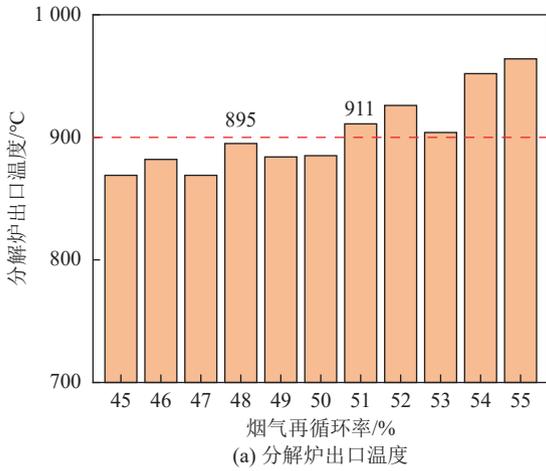


图 6 烟气再循环率 45%~55% 对应的系统分解炉和回转窑出口温度与参考数据对比

Fig. 6 Comparison of the outlet temperature of the calciner and rotary kiln of the system corresponding to flue gas recirculation rates of 45%-55% with reference data

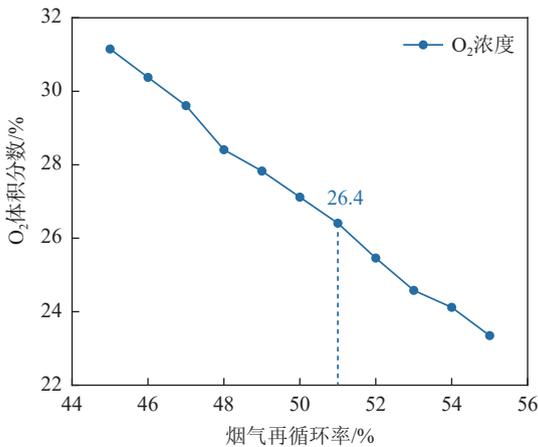


图 7 烟气再循环率 45%~55% 对应的系统整体氧气体积分数

Fig. 7 Flue gas recirculation rate of 45%-55% corresponds to the overall oxygen concentration of the system

势, 传统的水泥减排方案大都因为成本过高而无法推广应用。本文通过计算优化后水泥富氧燃烧生产

表 5 ASU 和 CPU 参数

Table 5 Parameters of ASU and CPU

参数	成分	数值
ASU <sup>[25]</sup>		
出口气体组成 体积分数/%	O <sub>2</sub>	95
	N <sub>2</sub>	1.5
	Ar	3.5
入口空气参数	101.325 kPa, 25 °C, 35.05 m <sup>3</sup> /s	
空气压缩机出口压力/kPa	630	
年能耗/GJ	2.58×10 <sup>5</sup>	
CPU <sup>[26]</sup>		
出口气体组成 体积分数/%	CO <sub>2</sub>	97.4
	O <sub>2</sub>	0.1
	N <sub>2</sub>	0.8
	Ar	1.4
出口气体参数	9 000 kPa, 25 °C, 0.05 m <sup>3</sup> /s	
年能耗/GJ	4.95×10 <sup>5</sup>	

的碳捕集成本来探究将富氧燃烧技术应用于水泥行业的经济性。由于水泥富氧燃烧生产系统还需加装 ASU 和 CPU, 为系统燃烧提供高浓度的氧气, 并对排放的含高浓度 CO<sub>2</sub> 的烟气进行净化处理。本文采用规模因子法对两项设备进行成本估算, 当需要估算不同规模的装置成本时需要参考基准机组。每个设备的成本可按式 (7)<sup>[27]</sup> 计算:

$$\text{cost}_1 = \text{cost}_0 \left( \frac{\text{size}_1}{\text{size}_0} \right)^n \quad (7)$$

式中:  $\text{cost}_1$  为换算后新设备成本, 元;  $\text{cost}_0$  为基准设备的成本, 元;  $\text{size}_1$  为现有设备的参数;  $\text{size}_0$  为基准设备的参数;  $n$  为不同设备的比例系数。

ASU 和 CPU 的基准设备和现有设备的参数、比例因子及投资见表 6。

水泥生产系统的投资主要包括总投资成本 (TPC) 和运行维护成本 (OPEX)。由调研可知水泥工业生产系统的生产投资达 5.2 亿元。根据文献 [28] 可知运行维护成本包括固定成本 (FC) 和可变成本 (VC)。

$$\text{FC} = C_M + C_{ins} + C_{lab} \quad (8)$$

式中  $C_M$  为维护费用, 万元;  $C_{ins}$  为保险费用, 万元;  $C_{lab}$  为劳动力成本, 万元。

基于材料更换和因素法的假设, 年度维护成本取为 TPC 的 2.5%, 其中维护人工成本相当于年度维护成本的 40%; 年度保险和地税为 TPC 的

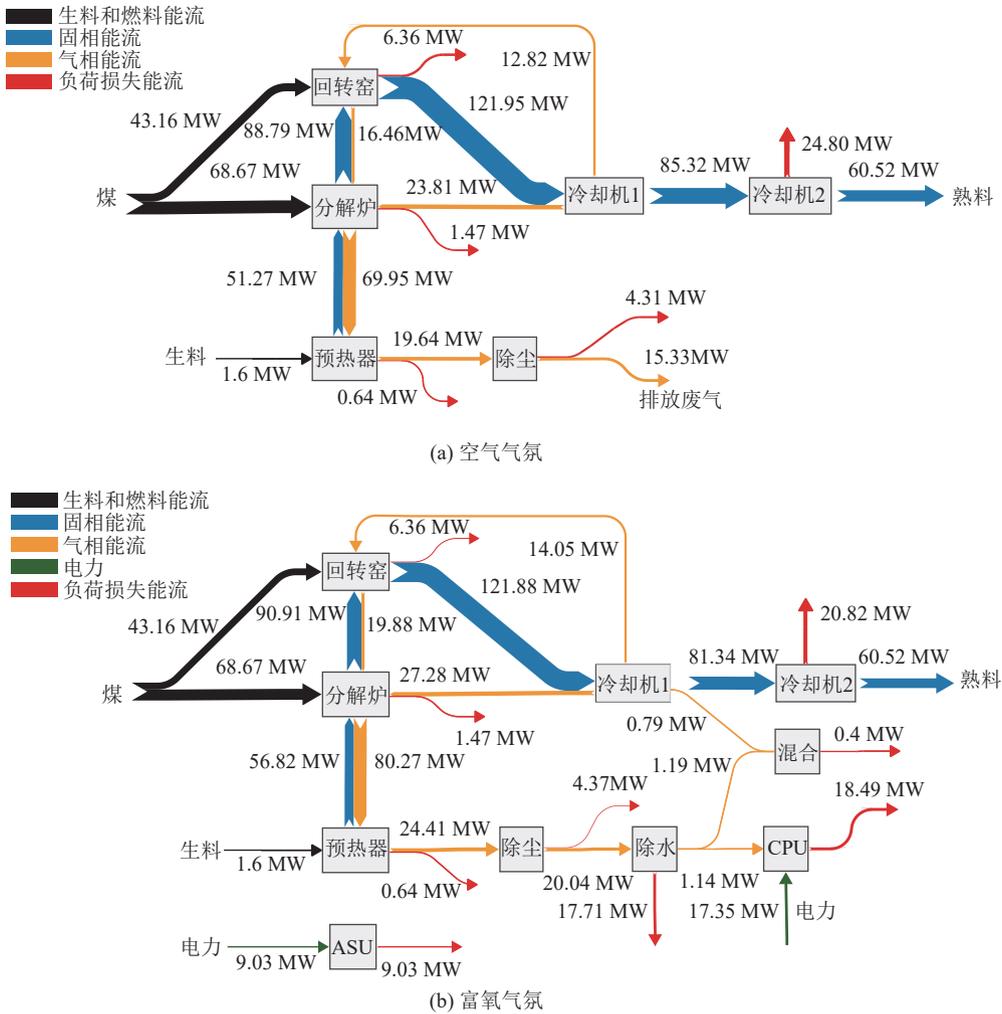


图 8 水泥空气气氛和富氧气氛燃烧生产系统能流

Fig. 8 System energy flow diagram of cement produced by combustion in the air atmosphere and oxygen-fuel atmosphere

表 6 ASU 和 CPU 设备的成本构成

Table 6 Cost structure of ASU and CPU devices

参数	设备	
	ASU	CPU
比例因子	0.7	1.0
基准220 t/h的设备成本/万元 <sup>[24]</sup>	1.25×10 <sup>5</sup>	—
基准540 t/h的设备成本/万元 <sup>[24]</sup>	—	2.66×10 <sup>4</sup>
现有32.13 t/h的设备成本/万元	3.24×10 <sup>4</sup>	—
现有102.99 t/h的设备成本/万元	—	5.07×10 <sup>3</sup>

2%; 劳动力成本包括运营、行政和辅助劳动力成本, 运营劳动力成本是根据员工人数来计算的, 水泥生产系统有 150 人, CO<sub>2</sub> 捕获系统操作运行有 20 人<sup>[28]</sup>, 每位员工每月的全额劳动力成本为 4 640 元/人<sup>[29]</sup>。行政和辅助劳动力成本为运营劳动力和维护人工成本的 30%。可变成本中, 电价为 0.582 4 元/kWh<sup>[30]</sup>, 煤燃料价格为 32 元/GJ<sub>LHV</sub><sup>[31]</sup>,

生料价格为 50 元/t<sup>[32]</sup>。

经济性分析的基本数据见表 7, 将其代入式 (4) 式 (8) 进行计算, 相应分析结果见表 8。可知, 采用富氧燃烧方式生产水泥熟料成本为 532.1 元/t, 碳捕集成本为 227.3 元/t, 明显低于燃烧后 MEA 碳捕集成本 541 元/t<sup>[13]</sup>。

## 5 结 论

1) 通过调整烟气再循环率, 确定了该水泥生产系统富氧燃烧情况下最佳烟气再循环率。当烟气再循环率为 51%、分配至回转窑的二次风比率为 34% 时, 富氧燃烧系统沿程反应温度最接近于空气气氛, 可以降低系统富氧燃烧改造成本, 此时系统总体 O<sub>2</sub> 浓度为 26.4%。

2) 水泥生产系统耦合了 ASU 和 CPU 并建立了相应的模型, 对水泥生产系统空气和富氧燃烧气氛下进行热力学性能分析, 空气燃烧气氛下系统能量效率为 53.4%, 富氧燃烧气氛下系统能量效率降为 43.3%, 主要是 ASU 和 CPU 耗电引起的效率降低。

表7 系统经济性分析基本参数

Table 7 Basic parameters of system economic analysis

参数	数值	
	空气燃烧	富氧燃烧
ASU设备成本/万元	0	$3.24 \times 10^4$
CPU设备成本/万元	0	$5.07 \times 10^3$
工厂总投资成本/万元	$5.20 \times 10^4$	$9.31 \times 10^4$
年运行时间/h	7 920	7 920
电价/(元·(kWh) <sup>-1</sup> )	0.582 4	0.582 4
煤价格/(元·GJ <sup>-1</sup> )	32	32
生料价格/(元·t <sup>-1</sup> )	50	50
固定运维费/万元	$3.59 \times 10^3$	$5.70 \times 10^3$
折旧率/%	8	8
设备寿命/a	25	25
生产线自身电力消耗/kWh	$1.59 \times 10^4$	$1.59 \times 10^4$
年用电量/kWh	$1.26 \times 10^8$	$3.35 \times 10^8$
年化成本/万元	$4.87 \times 10^3$	$8.72 \times 10^3$
年生料消耗量/万t	$1.58 \times 10^2$	$1.58 \times 10^2$
年煤燃料消耗量/万t	11.38	11.38
年用电费用/万元	$7.32 \times 10^3$	$1.95 \times 10^4$
年生料费用/万元	$7.92 \times 10^3$	$7.92 \times 10^3$
年煤燃料费用/万元	$1.02 \times 10^4$	$1.02 \times 10^4$

表8 系统经济性分析结果

Table 8 Results of system economic analysis

参数	数值	
	空气燃烧	富氧燃烧
年熟料产量/万t	97.78	97.78
年能耗/GJ	$3.64 \times 10^6$	$4.39 \times 10^6$
年CO <sub>2</sub> 排放量/万t	84.39	4.59
年CO <sub>2</sub> 捕集量/万t	0	79.81
COC/(元·t <sup>-1</sup> )	346.6	532.1
SECO <sub>2</sub> /(t·t <sup>-1</sup> )	0.863	0.047
CAC/(元·t <sup>-1</sup> )	0	227.3

3) 对优化后的水泥生产系统富氧燃烧改造进行了经济性分析, 该系统生产单位水泥熟料的CO<sub>2</sub>排放量为0.047t<sub>CO<sub>2</sub></sub>/t<sub>clinker</sub>, 降低了94.5%, 碳捕集成本为227.3元/t, 明显低于燃烧后的碳捕集成本。研究结果对中国水泥行业使用富氧燃烧技术改造实施碳

减排具有重要的参考价值。

## 参考文献 (References):

- [1] MARKEWITZ P, ZHAO L, RYSSEL M, et al. Carbon capture for CO<sub>2</sub> emission reduction in the cement industry in Germany[J]. *Energies*, 2019, 12(12): 2432.
- [2] BARCELO L, KLINE J, LAFARGE. The cement industry roadmap to reduce carbon emissions[C]//Carbon Management Technology Conference. Orlando, USA: CMTC, 2012: 2-12.
- [3] 朱刚. 碳中和目标下的水泥工业低碳技术研究[J]. *水泥工程*, 2022(4): 1-4, 21.  
ZHU Gang. Research on low carbon technology of cement industry under carbon neutral goal[J]. *Cement Engineering*, 2022(4): 1-4, 21.
- [4] GERBELOVÁ H, VAN DER SPEK M, SCHAKEL W. Feasibility assessment of CO<sub>2</sub> capture retrofitted to an existing cement plant: Post-combustion vs. oxy-fuel combustion technology[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 6141-6149.
- [5] Alcazer G, Bannon C, Cinti G, et al. ECRA CCS project report about phase II[R]. Duesseldorf: European Cement Research Academy, 2009: 41-46.
- [6] 朱文尚, 颜碧兰, 王俊杰, 等. 富氧燃烧技术及在水泥生产中的研究利用现状[J]. *材料导报*, 2014, 28(S1): 336-338.  
ZHU Wenshang, YAN Bilan, WANG Junjie, et al. Research status of oxygen-fuel combustion technology and utilization in cement production[J]. *Materials Reports*, 2014, 28(S1): 336-338.
- [7] DITARANTO M, BAKKEN J. Study of a full scale oxy-fuel cement rotary kiln[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 83: 166-175.
- [8] ATMACA A, YUMRUTAŞ R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 66(1-2): 435-444.
- [9] FELLAOU S, BOUNAHMIDI T. Evaluation of energy efficiency opportunities of a typical Moroccan cement plant: Part I. Energy analysis[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115: 1161-1172.
- [10] 吴铁军, 孔取和, 马明, 等. 水泥窑富氧燃烧废气循环碳捕集技术[J]. *新世纪水泥导报*, 2021, 27(4): 30-32, 6.  
WU Tiejun, KONG Quhe, MA Ming, et al. Carbon capture technology for oxy-fuel combustion and exhaust gas circulating of cement kiln[J]. *Cement Guide for New Epoch*, 2021, 27(4): 30-32, 6.
- [11] WANG Y F, HÖLLER S, VIEBAHN P, et al. Integrated assessment of CO<sub>2</sub> reduction technologies in China's cement industry[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 20: 27-36.
- [12] NHUCHHEN D R, SIT S P, LAYZELL D B. Decarbonization of cement production in a hydrogen economy[J]. *Applied Energy*, 2022, 317: 119180.
- [13] ZHOU W J, JIANG D, CHEN D J, et al. Capturing CO<sub>2</sub> from cement plants: A priori ty for reducing CO<sub>2</sub> emissions in China[J]. *Energy*, 2016, 106: 464-474.
- [14] 焦文婷, 程伟良. 耦合碳捕集的水泥窑闪蒸式余热发电系统热

- 力学分析[J]. 动力工程学报, 2023, 43(8): 1077–1084.
- JIAO Wenting, CHENG Weiliang. Thermodynamic analysis on flash-type waste heat power generation system coupled with carbon capture unit in cement kilns[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(8): 1077–1084.
- [15] Schorcht F, Kourti I, Scalet B, et al. Best available techniques(BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide[R]. Luxembourg: European Commission Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies, 2013: 506–526.
- [16] GAO T M, SHEN L, SHEN M, et al. Analysis of material flow and consumption in cement production process[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 553–565.
- [17] BENHELAL E, RAFIEI A. Overview of process modeling software: Utilizing alternative fuels in cement plant for air pollution reduction[J]. Energy Science and Technology, 2012, 4: 10–18.
- [18] FARIA D G, CARVALHO M M O, NETO M R V, et al. Integrating oxy-fuel combustion and power-to-gas in the cement industry: A process modeling and simulation study[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 114: 103602.
- [19] Anantharaman R, Berstad D, Cinti G, et al. CEMCAP framework for comparative techno-economic analysis of CO<sub>2</sub> capture from cement plants[R]. Milan: Zenodo, 2018: 3–24.
- [20] Campanari S, Cinti G, Consonni S, et al. Design and performance of CEMCAP cement plant without CO<sub>2</sub> capture[R]. Milan: Zenodo, 2016: 7–14.
- [21] 许德操, 李显桃, 李楠, 等. 基于碳捕集的水泥窑余热深度利用系统性能分析[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(11): 99–112.
- XU Decao, Li Xiantao, Li Nan, et al. Performance analysis of waste heat deep utilization of cement plant based on carbon dioxide capture[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(11): 99–112.
- [22] VOLDSUND M, GARDARSDOTTIR S, DE LENA E, et al. Comparison of technologies for CO<sub>2</sub> capture from cement production; Part 1: Technical evaluation[J]. Energies, 2019, 12(3): 559.
- [23] XUE X J, WANG Y T, CHEN H, et al. A coal-fired power plant integrated with biomass co-firing and CO<sub>2</sub> capture for zero carbon emission[J]. Frontiers in Energy, 2022, 16(2): 307–320.
- [24] CORMOS C C. Decarbonization options for cement production process: A techno-economic and environmental evaluation[J]. Fuel, 2022, 320: 123907.
- [25] 熊杰, 赵海波, 郑楚光. 深冷空分系统的过程模拟、优化及(用)分析[J]. 低温工程, 2011(3): 39–43.
- XIONG Jie, ZHAO Haibo, ZHENG Chuguang. Simulation optimization and exergy analysis of a cryogenic air separation[J]. Cryogenics, 2011(3): 39–43.
- [26] 韩冬, 段伦博, 段钰锋, 等. 富氧燃烧全流程建模及系统优化[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2241–2246.
- HAN Dong, DUAN Lunbo, DUAN Yufeng, et al. Process simulation and optimization of oxy-fuel combustion system[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2241–2246.
- [27] JAMES R E, TURNER M, SAMAEI A. Quality guidelines for energy system studies: Capital cost scaling methodology: revision 3 reports and prior[R]. Pittsburgh: National Energy Technology Laboratory, 2019: 19–20.
- [28] GARDARSDOTTIR S O, DE LENA E, ROMANO M, et al. Comparison of technologies for CO<sub>2</sub> capture from cement production; Part 2: Cost analysis[J]. Energies, 2019, 12(3): 542.
- [29] 中华人民共和国人力资源和社会保障部. 2022年企业薪酬调查信息 [EB/OL]. (2023-06-25)[2023-09-20]. <http://www.mohrss.gov.cn>.
- [30] 国家电网江苏省电力有限公司. 工商业用户电价 [R/OL]. (2023-08-28)[2023-9-20]. <http://www.js.sgcc.com.cn>.
- [31] 秦皇岛煤炭网. 环渤海动力煤价格指数 [EB/OL]. (2023-12-01)[2023-12-6]. <http://www.cqcoal.com>.
- [32] 李文福, 陈亚美. 煤矸石作为替代原料在我公司水泥生产中的应用[J]. 水泥工程, 2023(5): 44–46.
- LI Wenfu, CHEN Yamei. The application of coal gangue as an alternative raw material in the cement industry[J]. Cement Engineering, 2023(5): 44–46.