

水泥制造业绿色低碳技术研究进展

沈鸿海, 刘宇*, 郑焱, 龚先政

北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124

摘要 随着中国碳达峰、碳中和目标的提出, 水泥制造业的绿色低碳转型成为行业发展的主要趋势, 相关节能降碳关键技术的研发部署与应用需求日益迫切。从原料替代、燃料替代、节能提效和碳捕集利用4个方面梳理了当前水泥行业已经实现商业化应用与正处于研发阶段的绿色低碳技术, 综述了各类技术的碳减排潜力, 分析了各种技术的协同环境效益、推广限制条件等因素。

关键词 碳排放; 水泥; 低碳技术; 碳减排潜力

2020年9月22日, 习近平总书记在第七十五届联合国大会上宣布: 中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, CO₂排放力争2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和^[1]。中国是世界上最大的水泥生产国^[2], 水泥行业年CO₂排放量超过12亿t, 占全国工业碳排放总量的20%以上^[3], 占建材行业碳排放总量的70%以上; 吨水泥熟料的综合能耗约为108 kgce(千克标准煤), 碳排放量约为0.8 t^[4], 其中60%来自碳酸盐原料分解, 35%来自燃料燃烧, 5%来自电能消耗^[5]。随着水泥熟料产量的增加, 中国水泥行业CO₂排放量持续增长(图1), 到2020年达到13.79亿t, 年均增长率约为2.71%。

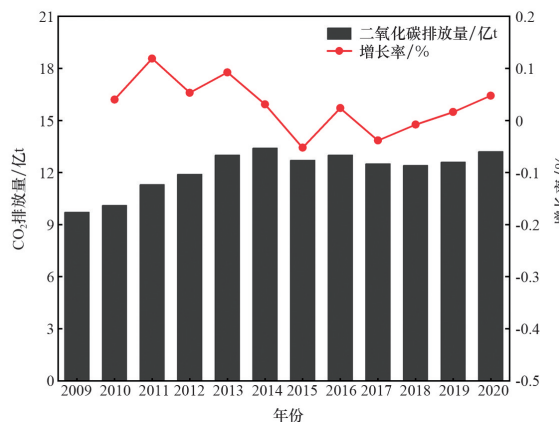


图1 历年水泥CO₂排放量

结合工业和信息化部等四部门联合印发的《建材行业碳达峰实施方案》, 水泥行业的降碳减排是

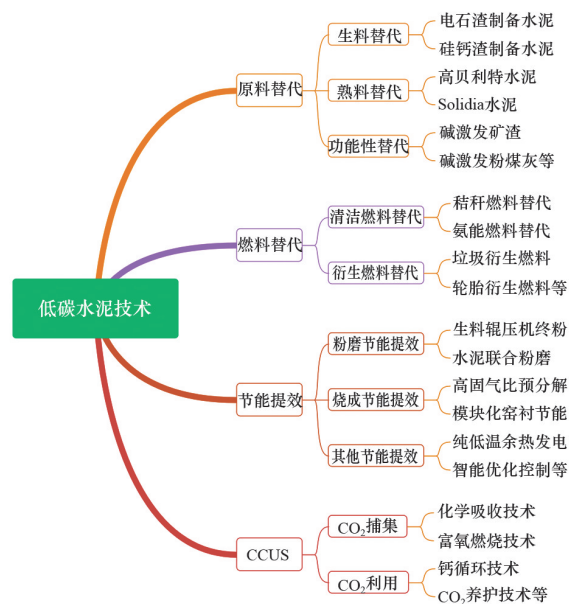
收稿日期: 2023-07-19; 修回日期: 2023-10-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3901205); 北京工业大学城市碳中和科技创新基金项目(048000514122666)

作者简介: 沈鸿海, 硕士研究生, 研究方向为材料生命周期评价与生态设计, 电子信箱: shenhonghai199@163.com; 刘宇(通信作者), 副教授, 研究方向为生命周期评价, 电子信箱: liuyu@bjut.edu.cn

引用格式: 沈鸿海, 刘宇, 郑焱, 等. 水泥制造业绿色低碳技术研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(4): 21-30; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.04.002

建材行业乃至整个工业领域实现“双碳”目标的重点与难点。随着“双碳”国家战略的持续深入,以科技创新驱动的行业绿色低碳转型需求日益迫切。本文从原料替代、燃料替代、节能提效、碳捕集利用与封存(CCUS)4个方面系统梳理31项水泥行业已经实现商业化应用或正处于研发阶段的低碳技术(图2),分析各类技术的碳减排潜力、协同环境效益与推广制约条件。



1 原料替代技术

碳酸盐原料煅烧分解造成的工业过程排放是水泥制造业的主要碳排放来源。工业过程排放无法通过能源系统的零碳化改造实现减排,需要从原料端考虑削减或替代碳酸盐原料/熟料用量,同时兼顾产品的服役性能,该类技术主要以100%使用天然矿石的硅酸盐水泥作为减排潜力的计算基准。根据不同替代对象,可将相关技术划分为生料替代、熟料替代和水泥功能性替代3个研究方向。

1.1 生料替代技术

从生产工艺角度来看,60%的碳排放来自碳酸盐原料分解($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$),生料替代技术采用非碳酸盐原料提供水泥生产所需的CaO,能够有

效降低石灰石分解产生的 CO_2 排放,显著降低水泥生产的碳排放量。

电石渣是电石生产乙炔过程中产生的废渣,其主要成分为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,可提供水泥熟料生产所需钙质^[6],降低熟料烧成热耗,电石渣替代比达到70%时可使吨熟料产品碳足迹降低约391 kg,且矿产资源消耗、土地占用等环境影响均有所改善。硅钙渣是碱石灰石烧结法提取高铝粉煤灰过程中产生的固体废弃物,主要成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 等,可减少生料配料中石灰石的比例,降低熟料煅烧温度^[7],改善熟料的易磨性,当生料中硅钙渣替代比为30%左右时,吨水泥熟料碳排放会降低约18%,该技术的应用能够缓解堆弃处理导致的土地占用和水资源污染等环境问题^[8]。钢渣包含水泥生产所需的钙质成分,使用钢渣能够改善生料的易烧性,降低熟料烧成的煤耗,生料中搭配采用约4%的钢渣能够使单位熟料 CO_2 排放减少约15 kg^[9],实现工业固废资源化利用的同时降低矿产资源的消耗。

1.2 熟料替代技术

生产1 t硅酸盐水泥熟料要排放约0.86 t的 CO_2 ,通过固废等替代熟料降低水泥中的熟料系数可实现碳减排,但中国水泥熟料系数已达0.678,继续降低的潜力有限,而且可能影响水泥熟料品质。另外,低碳水泥体系基于新型矿物组成替代硅酸盐熟料,减少熟料中钙质含量并降低烧成温度,具备在不影响建造质量的情况下实现碳减排的潜力。

高贝利特水泥的生产工艺和设备与传统硅酸盐水泥基本相同, C_2S 矿物含量约50%~55%,该技术降低石灰质原料用量并使烧成温度降低约 100°C ^[10],节约煤耗5%~15%,理论上可实现20%的碳减排量,相关应用案例碳减排效果显著^[11]。贝利特-硫铝酸盐水泥(Belite calciumsulfoaluminate ternesite, BCT)在熟料矿物体系中引入硫硅钙石和硫铝酸钙,烧成温度降低至 $1250\sim 1300^\circ\text{C}$ 左右,相比普通硅酸盐水泥(ordinary portland cement, OPC)预计节约10%~15%的燃料和电力消耗, CO_2 排放降低30%左右^[12]。Solidia Cement矿相组成主要包含 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (CS)和 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ (C_3S_2),低钙硅酸钙相的形成减少石灰石的用量,使熟料烧成温度降低

200℃,吨水泥熟料碳排放相比 OPC 水泥降低约 245 kg^[11]。石灰石煅烧粘土水泥 (limestone calcined clay, LC₃) 是基于石灰石和煅烧粘土混合的新型三元水泥,利用煅烧粘土和石灰石的协同作用,具有与 OPC 水泥相似的强度^[13],LC₃ 技术可降低高达 144 kgCO₂/t 的碳排放量^[14],且无需对当前生产线进行密集型改造。

1.3 水泥功能性替代技术

低碳胶凝材料具有水泥的胶凝功能,生产工艺非“两磨一烧”^[15],单位产品 CO₂ 排放量较水泥有明显降低,水泥功能性替代技术通过该类材料在混凝土生产中替代水泥组分,能够从根源上减少水泥用量,实现混凝土生产的低碳转型。

现阶段碱激发水泥 (alkali-activated cement, AAC) 是最主要的低碳胶凝材料,根据含钙量的不同分为高钙硅铝酸盐材料 (矿渣等) 和低钙硅铝酸盐材料 (粉煤灰等)^[16]。碱激发矿渣胶凝材料以粒化高炉矿渣 (granulated blast furnace slag, GBFS) 为原材料,GBFS 是通过热化学还原法生产铁的过程中产生的固废,生产碱激发矿渣胶凝材料有利于促进工业固废的可循环利用,相较 OPC 水泥混凝土,碱激发矿渣胶凝材料理论上避免了碳酸盐分解过

程,生产能耗仅为 OPC 的 40%~60%,能够降低 25%~50% 的 CO₂ 排放量^[17]。碱激发粉煤灰胶凝材料通过碱激发剂化学激发粉煤灰制备,相较 OPC 水泥具有显著的低碳固废优势,与同等抗压强度的混凝土相比,具有更好的耐腐蚀、抗融冻和抗渗等性能,可降低约 32% 的 CO₂ 排放^[18],缓解固废堆弃导致的土地占用和环境污染等问题^[19]。

1.4 原料替代技术的发展趋势及制约因素

生料替代技术是水泥制造业实现工业过程温室气体深度减排的关键,但替代生料存在含水量高^[20]、产地分布集中^[21]、成分可控性差等制约因素,导致部分技术难以在全区域、全行业大范围推广,需要加强替代生料的区域化可用性并拓展可利用的非碳酸盐钙质原料类型。熟料替代技术进一步降低熟料系数的空间有限,而新型低碳水泥仍受限于市场规模、研发成本、工艺要求^[22]等制约因素;水泥功能性替代技术尚处于实验室研发阶段,原料来源复杂导致低碳胶凝材料凝结硬化过程可控性较差,针对不同来源的原料配制出性能相对稳定的低碳胶凝材料,是未来技术推广需要解决的关键问题。典型原料替代技术的碳减排潜力、协同环境效益及推广制约因素如表 1 所示。

表 1 典型水泥原料替代技术的碳减排潜力、协同环境效益及推广制约因素

技术大类	技术名称	碳减排潜力/%	协同环境效益	推广制约因素
生料替代技术	电石渣制备水泥技术	约 46	节约矿产资源,缓解土地占用 ^[8]	含水量高,产地集中 ^[20] 碱含量偏高 钢渣成分复杂影响产品性能 ^[21]
	硅钙渣制备水泥技术	约 18		
	钢渣制备水泥技术	约 2 ^[9]		
熟料替代技术	高贝利特水泥技术	约 20 ^[11]	减少 SO ₂ 排放	上下游市场规模较小 ^[11]
	BCT 水泥技术	约 30 ^[12]	降低化石能源消耗 ^[13]	烧成工艺要求偏高 ^[22]
	Solidia 水泥技术	约 30 ^[11]	降低生产用水	—
	LC ₃ 水泥技术	约 22 ^[14]	节约矿产资源 ^[14]	高品质高岭土资源稀缺
水泥功能性替代技术	碱激发矿渣胶凝材料	25~50 ^[17]	缓解固废堆弃导致的环境问题 ^[19]	原料复杂难以保证性能 ^[17]
	碱激发粉煤灰胶凝材料	约 32 ^[18]		

注:生熟料替代技术碳减排潜力单位为 CO₂ 减排量/t 水泥熟料,功能性替代技术碳减排潜力单位为 CO₂ 减排量/t 混凝土。

2 燃料替代技术

在熟料煅烧过程因煤等化石燃料燃烧造成的

CO₂ 排放约占碳排放总量的 35% 左右,利用低碳/零碳燃料完全或部分替代煤作为热源,可实现水泥制造能源活动碳排放的大幅削减,该类技术通常根据

煤燃烧情景作为减排量核算的对比基准。根据替代燃料的来源,可分为清洁(零碳)燃料替代技术和衍生燃料替代技术。

2.1 清洁(零碳)燃料替代技术

清洁燃料替代技术旨在利用低碳可再生能源(生物质、氨等)对传统化石燃料进行替代,从而减少熟料煅烧过程中因能源活动造成的CO₂排放,现阶段主要清洁(零碳)燃料有生物质燃料、氨、氢等。

生物质燃料泛指由生物质萃取的固体、液体或气体燃料,具备碳中性的特点,是全球公认的“零排放”绿色能源。相较煤炭,生物质燃料生产水泥可以降低15%~25%的碳排放^[23],现阶段中国主要的水泥生物质替代燃料有秸秆、稻壳和木材废料等。秸秆燃料替代技术可实现40%的燃料替代率,单位水泥熟料降低约108 kg的CO₂排放^[24],并且显著减少NO_x、SO₂、有害废气和废渣的排放。掺氨水泥生产技术采用绿氨作为水泥生产的替代燃料,理论上煤炭替代率可达20%以上,生产过程中SO₂排放降低。氨作为储氢介质燃点高,同体积下液氨所含氢元素是液氢的1.6倍,是全球目前热门的无碳可循环燃料^[25]。氢能技术理论上可以大比例替代燃煤,甚至实现能源活动CO₂的零排放,替代比例达到20%时,可使吨熟料的碳排放降低约32%,目前国际上知名水泥公司均在大力发展氢能技术,但尚无工业示范级别的应用。

2.2 衍生燃料替代技术

衍生燃料替代技术利用含能废物替代化石燃料,降低水泥生产的燃煤使用比例^[26],并避免焚烧/填埋等传统废弃物处置造成的温室气体排放,达到减污降碳协同效果。常见的水泥衍生燃料有生活

垃圾、废轮胎、混合工业废料等。

垃圾衍生燃料技术将生活垃圾和各种工业废弃物经适当的预处理制成废弃物衍生燃料(refuse derived fuel, RDF),替代传统化石燃料实现CO₂减排^[27],该技术实施前后单位熟料的碳足迹相差10.65 kg的CO₂ eq(二氧化碳当量),降低约1.38%的碳排放,生产过程中SO₂、NO_x和PM的排放明显降低,且可以将垃圾燃烧产生的二噁英等有毒残留物固定到熟料当中。轮胎衍生燃料技术可实现10%~30%的化石燃料替代率^[28],废旧轮胎的热值约为30~37 MJ/kg,热值较煤炭高且单位热值CO₂排放低,氮氧化物的排放及灰分中的重金属含量降低,且该技术的生产线改造成本相对较低,发达国家水泥行业绿色转型过程中应用广泛。

2.3 燃料替代技术的发展趋势及制约因素

清洁(零碳)燃料替代技术在碳减排潜力和协同环境效益方面具有明显优势,且符合中国构建低碳高效能源体系的战略规划,但现阶段该类技术普遍处于基础研究阶段且替代燃料的比例有限,部分替代燃料属于危险化学品且制造成本昂贵,需要兼顾低成本零碳燃料开发并进行匹配零碳燃料的流程改造,以实现100%替代传统化石燃料。衍生燃料替代技术较发达国家50%以上替代比率存在一定差距^[29],当前中国衍生燃料存在成分复杂、热量替代率低等问题,部分衍生燃料会引起熟料中ZnO含量增加,导致水泥强度降低^[30],建立完善的衍生燃料收储体系,加快高品质预处理技术的研究以推进衍生燃料高值化利用,是水泥行业推广该类技术后续发展的重点。典型燃料替代技术的碳减排潜力、协同环境效益及推广制约因素如表2所示。

表2 典型水泥燃料替代技术的碳减排潜力、协同环境效益及推广制约因素

技术大类	技术名称	碳减排潜力/%	协同环境效益	推广制约因素
清洁燃料替代技术	秸秆燃料替代技术	约13 ^[24]	减少NO _x 、SO ₂ 排放 ^[24]	资源季节性、热值波动大 ^[23]
	掺氨水泥生产技术	约8	减少SO ₂ 排放 ^[25]	属于危化品、制备成本偏高
衍生燃料替代技术	垃圾衍生燃料技术	约1.38	减少二噁英排放	热值波动大、成分稳定性差 ^[29]
	轮胎衍生燃料技术	3.2~19.2 ^[28]	减少SO ₂ 排放 ^[27]	ZnO含量增加影响水泥质量 ^[30]

注:清洁燃料和衍生燃料替代技术碳减排潜力单位为CO₂减排量/t水泥熟料。

3 节能提效技术

水泥行业约40%的碳排放来自于能源活动^[31],包括煅烧用煤、柴油与生产电耗,节能提效技术在不改变用能类型的前提下,通过减少单位产品的能源消耗实现碳减排,通常该类技术的实施成本相对较低^[32],主要根据《水泥单位产品能源消耗限额》中的3级能耗限额等级作为节能降碳量的对比基准。根据不同工序,可分为粉磨节能提效、烧成系统节能提效和其他节能提效技术等。

3.1 粉磨节能提效技术

粉磨阶段的能源消耗以电能为主,约占水泥制造总电力消耗的80%^[33],碳排放主要为外购电力相关的间接排放。粉磨节能提效技术通过改造升级粉磨设备实现单位产品电耗降低,从而减少粉磨阶段产生的间接碳排放。

传统的生料球磨技术采用钢球作为介质对物料进行机械研磨,粉磨颗粒接近球形,有益于熟料煅烧和水泥水硬化^[34],受限于电耗较高(约20~25 kWh/t)且占地面积大,该技术逐渐被其他粉磨技术所替代。生料立磨终粉技术的工作原理是利用滚筒外泄的压力将原料碾碎,相较球磨系统,其粉磨效率更高且能耗更低,单位产品电耗约为15~18 kWh/t^[35],具有干燥能力强、产品化学成分稳定、粒度分布均匀等特点^[36],但并不具备球磨技术在生产颗粒形态上的独特优势。生料辊压机终粉技术基于高压挤压料层粉碎原理,配以适当的打散分级装置,具有更高的粉磨效率,单位产品电耗约为14 kWh/t,实现单位水泥熟料降低约1%的CO₂排放^[35]。辊压机+球磨机的联合粉磨是目前水泥行业较为理想的高效粉磨技术,辊压机实施预粉磨处理后采用球磨机终粉,保留粉磨颗粒球形优势,能耗较单纯采用球磨技术降低,显著提升粉磨效率的同时降低约43%~50%的电耗^[37],是目前粉磨系统的主要节能改造方向。

3.2 烧成系统节能提效技术

熟料烧成是水泥行业节能低碳转型聚焦的最主要环节,该工段贡献接近100%的煤耗和20%~30%的电耗^[38]。烧成系统节能提效技术围绕节煤

降电进行系统低碳改造,包括窑尾预分解系统优化、回转窑节能升级和新型窑头熟料冷却等技术方向。

窑尾预分解系统由预热器旋风筒和分解炉构成^[39]。高效低压损六级预分解系统通过改善各级旋风筒连接管道内的气固换热、提高各级旋风筒的分离效率等技术措施,可实现烧成系统煤耗降低至95 kg/t,预分解系统节电1.5 kWh/t。高固气比水泥悬浮预热分解技术增加物料换热器和反应器中的固气比,强化气固两相的换热传质和反应^[40],可实现单位熟料烧成能耗降低5~10 kgce/t,减少SO₂和NO_x等气体排放。回转窑节能改造主要包括提高燃烧效率和降低热能损耗2个途径^[41]。高效低氮燃烧器通过精确结构参数控制端口火焰形状,提高煤粉混合效果^[42],实现吨熟料煤耗降低2.5 kg,综合电耗降低2.1 kWh,氮氧化物排放降低至318 mg/m³。集成模块化窑衬节能技术以合成原料为基础,利用不同材料的导热系数,将各层材料固化在其各自能够承受的温度范围内,可实现单位熟料烧成能耗降低5~20 kgce/t,保证回转窑的使用效果和安全稳定性^[43]。篦式冷却机是熟料冷却系统的关键设备,直接关系到熟料烧成阶段的能耗水平^[44]。第4代高效篦冷机通过增加固定篦床的面积,加强二三次供风区域的风量并提高窑头余热发电风温,相较3代篦冷机整体冷却效率明显提高,可实现吨水泥熟料降低约1.2%的CO₂排放^[45]。

3.3 其他节能提效技术

新型干法水泥窑尾废气温度约320℃,冷却熟料产生废气温度约250℃,基于这些含能废气进行发电^[46],通过提高余热发电效率降低水泥厂外购电量,能够间接减少CO₂排放。水泥窑纯低温余热发电技术利用窑头和窑尾余热锅炉生产的主蒸汽及低压蒸汽进入汽轮机做功,做功后的蒸汽被冷却凝结成水并除氧,之后由给水泵输送至窑头和窑尾余热锅炉生产蒸汽,汽轮机做功带动发电机发电,可以达到节电降耗和降低水泥生产成本的目的^[47]。5000 t/d的水泥熟料生产线采用该技术可降低约18%的综合能耗,每年减少CO₂排放量约6万t,节约标准煤约2.5万t,并能够显著减少SO₂和NO_x的排放^[48]。

智能化节能提效技术通过对生产全过程各工艺重点用能设备能耗数据的实时监测,挖掘节能空间并制定运行改善措施^[49],从而提高水泥生产的能源利用效率及节能降碳水平。新型干法水泥窑生产运行节能监控优化系统集成单线对高比特率数字用户线(SHDSL)、紫蜂(ZigBee)等通信技术,构建包括生产现场、中控室、数据中心和数据用户的大规模节能减排监测网络,并根据这些信息调控生产工艺参数,该技术应用于4500 t/d的新型干法水泥生产线,成功实现节能量13500 tce/a。熟料煨烧过程智能优化控制系统则针对水泥熟料煨烧阶段,将人工智能与流程工业过程控制深度融合,集成以煨烧带关键信息测量为核心的煨烧工况智能感知技术,构建水泥熟料煨烧过程智能控制系统平台^[50],目前该系统能够实现吨熟料生产煤耗降低1.0~5.0 kg,随着该技术全国推广率的提高,可实现单位熟料综合能耗进一步下降。

3.4 节能提效技术的发展趋势及制约因素

粉磨和烧成系统节能提效技术体系已在新建企业广泛采用,这类技术的节能降碳效果能够相互集成,实现技术碳减排潜力的效应叠加且不受季节/地域限制,但该类技术实施通常需要对原有生产线进行停机改造,大量的时间成本投入,在一定程度上限制了该类技术的快速推广,需要采取适当的产业政策或地方政府政策加以引导和支持。而余热回收发电技术几乎已全部覆盖中国5000 t/d及以上规模的水泥生产线,若非出现颠覆性技术改进,该类技术碳减排潜力的进一步提高存在瓶颈。智能化节能提效技术则能够集成其他碳减排技术发挥降碳节能作用,单独界定其节能减排效果和经济效益较为困难,但随着该类技术投资成本问题的逐步改善,将有助于从整体上提高水泥行业的能效、降低能耗和CO₂排放。典型节能提效技术的碳减排潜力、协同环境效益及推广制约因素见表3。

表3 典型水泥节能提效技术的碳减排潜力、协同环境效益及推广制约因素

技术大类	技术名称	碳减排潜力/%	协同环境效益	推广制约因素
粉磨节能提效技术	生料立磨终粉技术	约0.66 ^[35]	降低电耗、降低化石能源消耗 ^[40]	原有生产线改造时间成本偏高
	生料辊压机终粉技术	约1 ^[35]		
	水泥联合粉磨技术	约1.5 ^[37]		
烧成系统节能提效技术	高固气比预分解技术	约5 ^[40]	减少资源耗竭,实现SO ₂ 和NO _x 等减排 ^[40]	
	高效低氮燃烧器	约1 ^[42]		
	模块化窑衬节能技术	约1		
	第四代高效篦冷机	约1.2 ^[45]		

注:粉磨和烧成系统节能提效技术碳减排潜力单位为CO₂减排量/t水泥熟料。

4 CCUS 技术

Tan 等^[51]预测即使原料替代、燃料替代及节能提效等技术实现了大范围推广,在已有技术认知下中国水泥制造业至2060年仍有1亿~2亿t的CO₂排放难以完全削减。CCUS技术通过对产生CO₂的捕集实现难减排排放的最终消除,但该技术的应用需要考虑如何对捕集的CO₂进行利用或封存,以防止其再次排放到大气中,通常根据捕集CO₂量与为捕集CO₂额外造成的碳排放之间的差值来衡量碳减

排效果。根据技术环节,该类技术可分为CO₂捕集和CO₂利用两类。

4.1 CO₂捕集技术

国际能源署(IEA)发布的《全球水泥低碳技术路线图》预测至2050年,水泥制造业需要通过碳捕集技术实现约48%的碳减排量^[52]。该类技术可以将CO₂从水泥生产过程排放的废气中分离捕集,主要分为直接捕集技术和捕集条件营造技术。

化学吸收技术利用具有选择性吸收特质的化学溶剂对水泥生产排放的CO₂进行吸收,并在高温

条件下对富集液进行解析分离^[53],该技术成熟度较高,可以实现工业级以上纯度的液态 CO₂捕集^[54]。变压吸附技术在不同分压条件下利用吸附剂对 CO₂进行物理吸附解吸,相较传统物理吸附技术,其吸附容量有所提升,捕集纯度达 40%~60%^[55],相较化学吸收技术具有投资成本少、占地面积小等优势。富氧燃烧技术采用高含氧量气体进行助燃,提高燃料的燃尽率,生产单位熟料综合能耗可降低约 6 kgce/t^[54],排放烟气中 CO₂含量达到 90% 以上,是一种碳捕集条件营造技术。外燃式旋窑碳捕集技术根据捕集 CO₂量的要求,将原本送入预热器下料管的生料,分出一定量送入外燃式高温煅烧回转窑中分解,该技术针对碳酸盐分解过程产生的 CO₂营造捕集环境,适用于新建生产线配套建设^[56]。

4.2 CO₂利用技术

封存和利用是捕集 CO₂的 2 种下游处置方法,现阶段封存技术尚且无法保证长期储存并存在泄露风险。CO₂利用技术则通过将捕集 CO₂应用到水泥生产系统或其他产品系统,规避碳封存的安全隐患并实现二氧化碳资源化循环利用。

钙循环技术以钙基材料做吸附剂,基于 CaO 碳化和 CaCO₃分解反应进行循环吸附脱附,失活吸附剂将作为水泥生产的原料^[57],实现捕集 CO₂的循环利用。CO₂养护混凝土技术将 CO₂介入水泥基材料水化尚未完成阶段,既可以充分利用捕集的 CO₂,又能够加速混凝土的水硬化过程^[58]。在其他系统利用捕集 CO₂方面,蒙西水泥集团 CO₂聚合物生产线利用捕集的 CO₂作为全降解塑料生产的原料^[59];拉法基豪瑞集团建设的 CCUS 项目将水泥生产过程中捕集的 CO₂用于农业生产,每年投入使用的 CO₂高达 70 万 t^[60]。

4.3 CCUS 技术的发展趋势及制约因素

CO₂捕集技术现阶段在水泥行业处于中试或工业示范初级阶段,该类技术实施需要增加新的工艺及设备,技术实施成本较高,而 CO₂利用技术尚处于研发阶段或中试阶段,且目前捕获的 CO₂下游市场需求不足,致使捕集 CO₂的利用率较低^[12]。当前 CCUS 技术面临经济、市场、技术和政策等多方面的制约,要实现规模化发展尚存在较多阻力。因

此,未来水泥行业需要着重加强针对 CCUS 技术的定向研究并解决技术运行成本偏高的问题,同时兼顾基于中国水泥企业生产数据、源汇匹配和经济效益等因素系统地研究 CCUS 技术的碳减排潜力,从而明确水泥企业开展 CCUS 技术的可行性。

5 结论

水泥制造业作为能源密集型产业,在“双碳”目标的驱动下,迫切需要相关低碳水泥技术的研发部署与应用推广,以支撑行业的绿色低碳转型。基于水泥行业当前温室气体排放的主要来源,从原料替代、燃料替代、节能提效和 CCUS 4 个方面系统梳理了电石渣原料替代、秸秆燃料替代、水泥联合粉磨等 31 项绿色低碳技术,分析了各类技术的碳减排潜力,并讨论其协同环境效益、推广制约条件等因素。结果显示,本文讨论的典型技术均具有一定的碳减排潜力,且部分技术兼具缓解矿产资源消耗、降低污染物排放等协同效益,但同时也可能存在影响水泥产品性能、市场规模较小或实施成本过高等限制技术在短时间内大规模市场应用的因素。目前,原料替代技术发展成熟度较高,但存在原料来源复杂等限制,尚不具备全面替代传统熟料/水泥的条件;燃料替代技术发展滞后于国际水平,热替代率相比国际先进水平仍有差距,未来形成成熟的替代燃料收集、分类、加工产业将有望大幅度降低水泥生产的碳排放;节能提效技术发展已处于国际先进水平,未来加大技术普及,将成为水泥行业碳达峰的重要支撑;而 CCUS 技术普遍处于中试或示范阶段,但随着技术成熟与规模化效应展现,CCUS 的减排成本逐渐降低,将成为水泥行业实现中远期碳中和目标的核心技术之一。

基于现有技术发展现状,展望水泥行业实现“双碳”的目标。面向 2030 年碳达峰需求,对现有工艺设备进行升级改造,提高粉磨、烧成等环节的能源利用效率,是兼顾考虑经济发展与减排目标的有效途径。面向 2060 年碳中和远景目标,水泥行业深度减排的技术攻关应从原料、燃料、流程、捕集四端发力,兼顾技术成本、协同环境效益、实施风险

等多维因素,从短期与中长期、整体与局部的角度探求多目标最优的技术组合与发展路径。此外,针对颠覆性技术的及时发现与已有技术发展的跟踪评估,拓宽水泥绿色低碳技术的评估维度,构建包含技术发展水平,技术减排潜力,技术协同效益、技术实施风险等多维度的技术评估体系,将更加有利于为水泥行业绿色低碳转型过程中的技术遴选与路径规划提供建议与支撑。

参考文献(References)

- [1] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [2] Sui X, Zhang Y, Shao S, et al. Exergetic life cycle assessment of cement production process with waste heat power generation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 88: 684-692.
- [3] Zhi X, An X, et al. Low carbon technology roadmap of China cement industry[J]. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2023, 12(6): 771-774.
- [4] Naqi A, Jang J G. Recent progress in green cement technology utilizing low-carbon emission fuels and raw materials: A review[J]. *Sustainability*, 2019, 11(02): 1-18.
- [5] 罗雷, 郭呦呦, 李寅, 等. 碳中和下水泥行业低碳发展技术路径及预测研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(6): 1527-1537.
- [6] 王勇, 张萌, 曹元辉, 等. 电石渣水泥生产对水泥行业碳减排的影响分析[J]. *水泥*, 2022, 545(7): 10-12.
- [7] 刘丽芬, 张文生, 涂长江, 等. 利用硅钙渣部分替代石灰石生产硅酸盐水泥熟料的工业试验[J]. *水泥*, 2015, 453(3): 12-13.
- [8] 刘晶, 汪澜. 应用替代原料减少水泥行业CO₂排放实例分析[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(7): 97-99.
- [9] 李鹏鹏, 任强强, 吕清刚, 等. 面向双碳的低碳水泥原料/燃料替代技术综述[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(8): 35-42.
- [10] Gartner E, Sui T. Alternative cement clinkers[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 114: 27-39.
- [11] 张宾, 赵有强, 林永权, 等. 水泥工业二氧化碳循环利用现状[J]. *中国水泥*, 2021(4): 75-81.
- [12] Environment U N, Scrivener K L, John V M, et al. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 114: 2-26.
- [13] Taylor-Lange S C, Lamon E L, Riding K A, et al. Calcined kaolinite-bentonite clay blends as supplementary cementitious materials[J]. *Applied Clay Science*, 2015, 108(5): 84-93.
- [14] Martirena F, Scrivener K. Low carbon cement LC₃ in Cuba: Ways to achieve a sustainable growth of cement production in emerging economies[M]. Dordrecht: Springer, 2018.
- [15] Habert G. Assessing the environmental impact of conventional and "green" cement production[J]. *Eco-efficient Construction and Building Materials*, 2014, 46: 199-238.
- [16] 姜乐乐, 姜福香. 碱激发胶凝材料的研究进展[J]. *上海涂料*, 2021, 59(2): 42-47.
- [17] Chen L. Perforated cenospheres: A reactive internal curing agent for alkali activated slag mortars[J]. *Cement & concrete composites*, 2019, 104: 35-44.
- [18] Teh S H, Wiedmann T, Castel A, et al. Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymer concrete in Australia[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 152: 312-320.
- [19] 童国庆, 张吾渝, 高义婷, 等. 碱激发粉煤灰地聚物的力学性能及微观机制研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(4): 129-134.
- [20] Zhao H T, Liu Y, Li X Q, et al. Research progress on low-carbon technologies and assessment methods in cement industry[J]. *Materials Science Forum*, 2021, 103: 933-943.
- [21] Wang Q, Yan P Y, Han S. The influence of steel slag on the hydration of cement during the hydration process of complex binder[J]. *中国科学: 技术科学(英文版)*, 2011, 54(2): 7.
- [22] 魏丽颖, 汪澜, 颜碧兰. 国内外低碳水泥的研究新进展[J]. *水泥*, 2014, 450(12): 1-3.
- [23] Habert G, Billard C, Rossi P, et al. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives[J]. *Cement & Concrete Research*, 2010, 40(5): 820-826.
- [24] 张邦松. 生物质秸秆作为替代燃料在水泥工厂的应用[J]. *中国水泥*, 2023(2): 56-58.
- [25] 罗志斌, 孙潇, 高啸天, 等. 双碳背景下绿色氨能的应用场景及展望[J]. *南方能源建设*, 2023, 10(3): 47-54.
- [26] Sakri A, Aouabed A, Nassour A, et al. Refuse-derived fuel potential production for co-combustion in the cement industry in Algeria[J]. *Waste Management & Research*, 2021, 39(9): 1174-1184.
- [27] 马旭, 吴佳涿, 李文祎. 碳中和背景下我国水泥工业替代燃料发展的若干思考[J]. *新世纪水泥导报*, 2022, 28(3): 1-5.

- [28] Ankaya S. Investigating the environmental impacts of alternative fuel usage in cement production: A life cycle approach[J]. *Environment, Development and Sustainability: A Multidisciplinary Approach to the Theory and Practice of Sustainable Development*, 2020, 22: 18–39.
- [29] 崔源声, 方艳欣, 王硕. 国外水泥工业替代燃料的最新发展趋势[J]. *水泥*, 2018(1): 9–12.
- [30] Schneider M, Romer M, Tschudin M. Sustainable cement production—present and future[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, (7): 41.
- [31] Zheng C, Zhang H, Cai X, et al. Characteristics of CO₂ and atmospheric pollutant emissions from China's cement industry: A life-cycle perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 282(7): 124533.1–124533.10.
- [32] 佟庆, 魏欣旸, 秦旭映, 等. 我国水泥和钢铁行业突破性低碳技术研究[J]. *上海节能*, 2020(5): 380–385.
- [33] Atmaca A, Kanoglu M. Reducing energy consumption of a raw mill in cement industry[J]. *Energy*, 2012, 42(1): 261–269.
- [34] 赵计辉, 王栋民, 王学光. 现代水泥工业中高效节能的粉磨技术[J]. *中国粉体技术*, 2013, 19(4): 65–71.
- [35] 夏凌风, 郭珍妮. 水泥行业碳减排途径及贡献度探讨[J]. *中国水泥*, 2022(11): 14–19.
- [36] 陈钦松. 立磨水泥终粉磨应用实践及制成水泥质量[J]. *中国水泥*, 2022, 242(7): 81–83.
- [37] 陈忆红, 郭瑞广, 李伟洋. 基于水泥联合粉磨系统节能降耗途径的分析[J]. *散装水泥*, 2020, 208(5): 5–7.
- [38] 殷昭波. 水泥熟料烧成系统电耗分析探讨[J]. *水泥工程*, 2020, 198(5): 10–12.
- [39] 郭君毅. 水泥生产工艺节能技术探讨[J]. *四川水泥*, 2021(6): 13–14.
- [40] “高固气比水泥悬浮预热分解技术”入选第四批国家重点节能技术推广[J]. *建材发展导向*, 2012, 10(1): 81.
- [41] 江旭昌. 浅论水泥回转窑窑型的发展[J]. *新世纪水泥导报*, 2020, 26(1): 5–17.
- [42] 张宪合, 张长春, 刘传路. 低氮燃烧脱硝技术成功改造案例分析[J]. *中国水泥*, 2020, 216(5): 79–81.
- [43] Pieper C, Wirtz S, Schaefer S, et al. Numerical investigation of the impact of coating layers on RDF combustion and clinker properties in rotary cement kilns[J]. *Fuel*, 2021, 283: 118951.1–118951.14.
- [44] 华俊. 水泥熟料篦式冷却机的技术发展和应用研究[J]. *四川建材*, 2022, 48(9): 182–183.
- [45] 钟永超, 李帅波, 康宇, 等. 第三代篦冷机整体更换为第四代中置辊破冷却机的实践[J]. *水泥*, 2020(8): 47–49.
- [46] 李丹, 郑伟, 刘彦伟. “双碳”背景下水泥行业发展之路[J]. *中国水泥*, 2022, (5): 82–84.
- [47] 冯金生. 关于水泥窑纯低温余热发电技术的探究[J]. *居舍*, 2018(35): 165.
- [48] 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.
- [49] Yan X H, Jing S H. Research on key technologies of cement intelligent control cloud platform client[J]. *DESTech Transactions on Engineering and Technology Research*, 2018, 42(9): 56–71.
- [50] Guzman M P, Rubia B N, Peris P M, et al. Methodological development for the optimisation of electricity cost in cement factories: The use of artificial intelligence in process variables[J]. *Electrical engineering*, 2022, 3: 104–119.
- [51] Tan C, Yu X, Guan Y R. A technology-driven pathway to net-zero carbon emissions for China's cement industry[J]. *Applied Energy*, 2022, 325: 119804.
- [52] 付立娟, 杨勇, 卢静华. 水泥工业碳达峰与碳中和前景分析[J]. *中国建材科技*, 2021, 30(4): 80–84.
- [53] 杨晴, 孙云琪, 周荷雯, 等. 我国典型行业碳捕集利用与封存技术研究综述[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(01): 101–110.
- [54] 任勇. 碳中和目标下海螺水泥减排二氧化碳的实践[J]. *新世纪水泥导报*, 2021, 27(2): 6–8.
- [55] Fytlanos G, Grimstedt A, Hanna K, et al. Corrosion and degradation in MEA based post-combustion CO₂ capture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 46: 48–56.
- [56] 孙立勋, 韩力. 中国水泥行业CCUS技术库的构建与分析[J]. *四川水泥*, 2020(1): 4–5.
- [57] Dean C C, Dugwell D, Fennell P S. Investigation into potential synergy between power generation, cement manufacture and CO₂ abatement using the calcium looping cycle[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4: 2050–2053.
- [58] 缪昌文, 穆松. “双碳”目标下水泥基材料绿色低碳路径思考与展望[J]. *未来城市设计与运营*, 2022(2): 10–16.
- [59] 高旭东, 范永斌, 王郁涛. 水泥行业“十三五”科技发展报告[J]. *中国水泥*, 2021(07): 28–39.
- [60] 朱兵兵, 郑志龙, 邹兴芳. 水泥企业碳减排技术路径浅析[J]. *水泥*, 2021(10): 4–5.

Research progress on low-carbon technologies in cement manufacturing industry

SHEN Honghai, LIU Yu*, ZHENG Yan, GONG Xianzheng

Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract With the goal of emission peak and carbon neutrality, the green and low-carbon transformation of the cement manufacturing industry has become a major trend in the development of the industry, and the R&D deployment and application of related energy-saving and carbon-reducing key technologies are increasingly urgent. This paper systematically compares the green low-carbon technologies that have been commercially applied in the cement industry and those that are in the R&D stage from four aspects: raw material substitution, fuel substitution, energy saving and efficiency improvement, and carbon capture and utilization, reviews the carbon reduction potential of various technologies, and analyzes and discusses the synergistic environmental benefits, promotion constraints and other factors of various technologies to provide suggestions and support for the selection of technologies in the process of low-carbon green transformation in the cement industry.

Keywords carbon emission; cement; low-carbon technology; carbon reduction potential ●



(责任编辑 王丽娜)