

中国水泥生命周期粉煤灰替代的 CO₂ 减排研究

肖 静,梁学敏,张逸畅,张岳玲* (华北电力大学环境科学与工程学院,资源环境系统优化教育部重点实验室,北京 102206)

摘要: 采用中国水泥企业温室气体排放核算方法及政府间气候变化专门委员会的能源使用 CO₂ 排放计算方法,将不同粉煤灰替代率下原料及能源使用引起的 CO₂ 减排进行核算.结果表明,与燃煤电厂产业共生可减排 92.676kgCO₂/t 水泥.而粉煤灰替代熟料是中国水泥 CO₂ 减排的主要部分,与替代生料结合可产生最大 CO₂ 减排 373.303kg/t 水泥.另外,粉煤灰替代部分水泥形成混凝土的碳化作用,到 2050 年可吸收 192.015kgCO₂/t 水泥.粉煤灰替代后,对余热发电变化及外购清洁电力使用比例增加引起的减排进行预测,发现此项举措可有效促进水泥行业“双碳”目标达成.

关键词: 水泥; 生命周期; 粉煤灰替代; CO₂ 减排; 产业共生

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2022)04-1934-11

Study on CO₂ reduction of cement with fly ash substitute from the perspective of life cycle in China. XIAO Jing, LIANG Xue-min, ZHANG Yi-chang, ZHANG Yue-ling* (MOE Key Laboratory of Resources and Environmental Systems Optimization, College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China). *China Environmental Science*, 2022,42(4): 1934~1944

Abstract: The CO₂ reduction induced by material in the situation of fly ash replacement is calculated by the guideline of Greenhouse Gas Emissions of Chinese Cement Enterprises. Meanwhile, the CO₂ reduction induced by energy employment also defined by the methods from Intergovernmental Panel on Climate Change. The results show that considering industrial symbiosis with coal-fired power plants, 92.676kg/t cement of CO₂ are reduced. It is demonstrated that the replacement of clinker with fly ash is the main part leading to CO₂ reduction in China's cement industry. When combined with the replacement of raw materials, the maximum CO₂ reduction per ton of cement can be up to 373.303kg. In the application stage, the carbonization effect of concrete formed by fly ash and Portland cement has increased, and one ton of cement will adsorb 192.015kg of CO₂ by 2050. In the context of fly ash replacement, the emission reduction caused by the change of waste heat generation and the clean electricity employment with different proportion are forecasted. It is found that the measure can also effectively promote the achievement of carbon peak and neutrality goals.

Key words: cement; life cycle; fly ash substitution; CO₂ reduction; industry symbiosis

我国水泥行业在“双碳”目标中面临的减排压力巨大^[1],粉煤灰替代带来的 CO₂ 减排效应是水泥行业绿色发展的重要方法.目前粉煤灰替代的研究主要集中在部分熟料^[2-4]和水泥的替代^[5-6],以往研究表明粉煤灰替代后均可显著减少 CO₂ 排放,但鲜有粉煤灰替代原料的研究以及水泥生命周期粉煤灰替代引起的 CO₂ 减排计算,大多数研究聚焦水泥生产过程的 CO₂ 排放,然而我国水泥制品在其使用阶段长期以来对 CO₂ 的吸收量巨大^[7],对 CO₂ 减排意义重大,从全生命周期角度更能精确核算,从而更为全面体现粉煤灰替代对水泥行业 CO₂ 减排的影响.水泥生命周期各阶段都会对 CO₂ 排放造成影响,需要科学系统的方法进行定量分析和评价.因此本文从生命周期视角出发,考虑电厂作为上游产业,粉煤灰在水泥生产中的 CO₂ 减排效应,探讨了不同替代率下生料制备、熟料煅烧、水泥粉磨及使用过程中

对 CO₂ 减排的影响,核算了余热发电的变化以及清洁电力使用引起的 CO₂ 减排量.

1 数据来源和方法

1.1 系统边界及数据来源

资源开采数据获取较为复杂且其 CO₂ 排放对整个生产流程影响较小,假设水泥企业未配备自有矿山,系统内所有原料及能源获取均采用外购方式.如图 1 所示,系统边界包括原料运输(包括替代材料粉煤灰)、一次能源运输、生料制备、熟料煅烧、水泥粉磨以及水泥使用等阶段,功能单元为 1t 水泥.系统边界内所有过程数据来自于数据库和文献.其中水

收稿日期: 2021-09-13

基金项目: 中国工程院咨询项目(2016-ZD-14);总理基金资助项目(DQGG0209-13)

* 责任作者, 讲师, zhangyueling@ncepu.edu.cn

泥基础情景(BS)下水泥原料和回转窑各过程热耗数据来源于《水泥生产技术基础(第二版)》^[8],水泥厂和电厂的分布数据来源于中国工程院能源专业知识服务系统数据库,其他数据来源于一些行业报告和相关文献。

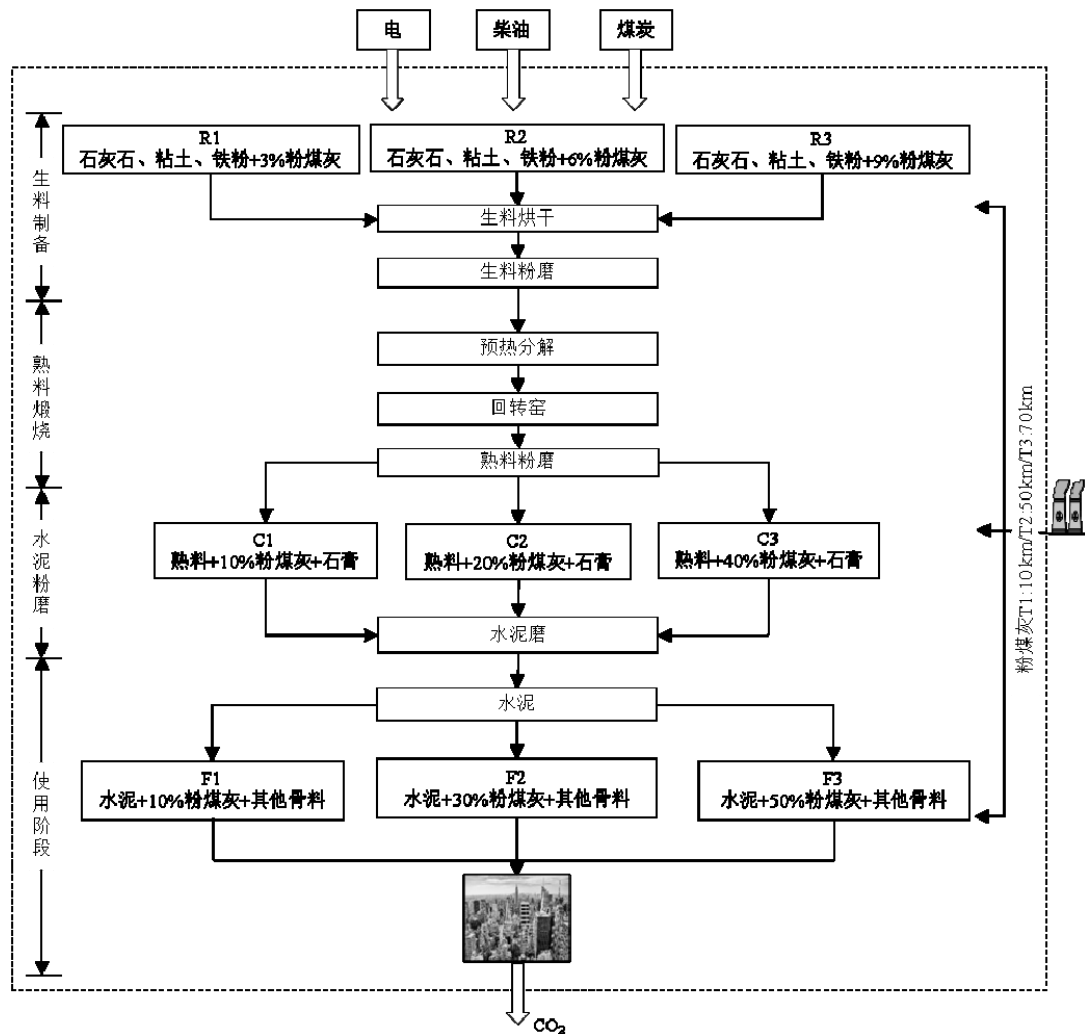


图1 水泥生产 CO₂ 排放系统边界

Fig.1 System boundary of CO₂ emissions from cement

1.2 研究方法

1.2.1 CO₂ 排放、吸收原理及核算方法 如图2所示,水泥生产 CO₂ 排放分为直接排放和间接排放,其

中直接排放由碳酸钙分解和煤炭燃烧产生,间接排放来自电力使用;CO₂ 吸收来自水泥使用阶段的碳酸化反应。

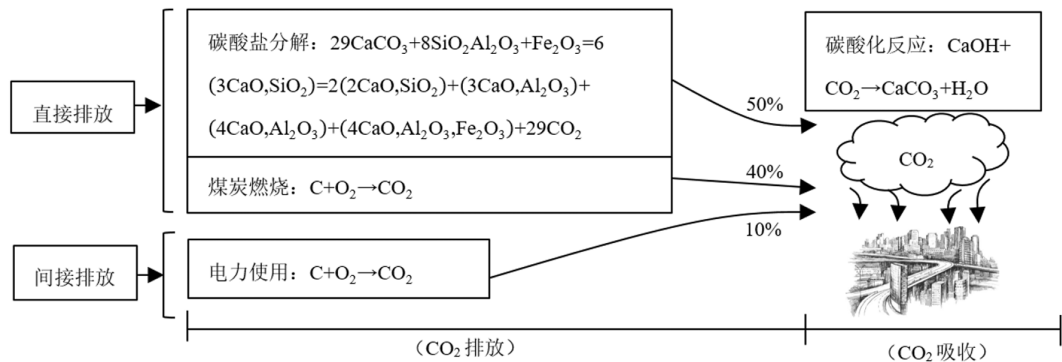


图2 水泥生命周期 CO₂ 排放及吸收原理

Fig.2 Principle of CO₂ emissions and absorption from cement life cycle

水泥生产过程的CO₂排放依据《中国水泥生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》计算,能源消耗产生的CO₂依据政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的方法计算.水泥生产各阶段CO₂排放及吸收计算公式见表1.

表 1 水泥全生命周期过程 CO₂ 排放计算方法
Table 1 Calculation method of CO₂ emissions during the life cycle of cement

运输阶段	材料运输	$E_{tr} = \sum M_i \times D_i \times 0.1211 \times 2$	E_{tr} 为运输产生的 CO ₂ ,kg; M_i 为生产 1t 水泥所需材料 i 的质量,t; D_i 为运输材料 i 的距离,km;0.1211 为 18t 重型柴油货车单位重量、单位运输距离的 CO ₂ 排放因子,kgCO ₂ /(t·km); 2 指考虑空驶率,原料产地到水泥企业距离的 2 倍 ^[9]
	上游企业粉煤灰分配的 CO ₂	$C_c = \frac{\text{¥}V_{\text{by-product}}}{\text{¥}V_{\text{total}}}$ $E_{ash} = \frac{C_c \times E_{fc}}{0.109} \times M_{ash}$	$\text{¥}V_{\text{by-product}}$ 为粉煤灰的市场价格,元; $\text{¥}V_{\text{total}}$ 为粉煤灰和电力的市场价格,元; E_{ash} 为粉煤灰承担的上游电厂 CO ₂ ,kg; M_{ash} 为参加粉煤灰的质量,kg;0.109 为燃煤电厂生产 1kW·h 电生成粉煤灰的质量,kg
	电耗	$E_c = AD_c \times EF_c$	E_c 为电力使用 CO ₂ 排放,t; AD_c 使用电量,MWh; EF_c 为电力 CO ₂ 排放因子,0.6101tCO ₂ /MWh ^[10]
熟料煅烧	原料分解	$E_{pr} = Q_c \times \left[(FR_1 - FR_{10}) \times \frac{44}{56} + (FR_2 - FR_{20}) \times \frac{44}{40} \right] \times 1000$	E_{pr} 为原料中碳酸盐分解产生的 CO ₂ 排放,t; Q_c 为水泥熟料产量,t; FR_1 为熟料中氧化钙(CaO)的含量,%; FR_{10} 为熟料中不是来源于碳酸盐分解的氧化钙(CaO)的含量,%; FR_2 为熟料中氧化镁(MgO)的含量,%; FR_{20} 为熟料中不是来源于碳酸盐分解的氧化镁(MgO)的含量,%
	燃料燃烧	$E_c = 2.7725 \times M_c$	E_c 为煤炭燃烧产生的 CO ₂ 排放,kg; M_c 为耗煤量,kg;2.7725 为标煤的 CO ₂ 排放因子,kgCO ₂ /kg ^[11]
水泥粉磨	电耗	$E_c = AD_c \times EF_c$	同生料制备
使用阶段	碳化反应	$E_u = \frac{E_{pr} \times 29.64\% \times n}{100}$	E_u 为单位水泥年吸收的 CO ₂ ,kg;29.64% ^[12] 为不掺粉煤灰单位水泥 100a 内通过碳化反应吸收的 CO ₂ ; n 为水泥碳化速度为不掺粉煤灰时的倍数
余热发电	—	$AD_u = \frac{Q \times 30\% \times 95\% \times 13.5\%}{3.6}$	Q 为水泥生产总热耗,kJ; AD_u 为余热发电量,kW·h;30% ^[13,14] 、95% ^[15] 和 13.5% ^[16] 分别为水泥生产总热耗未利用的百分比、余热回收热效率和余热发电热效率

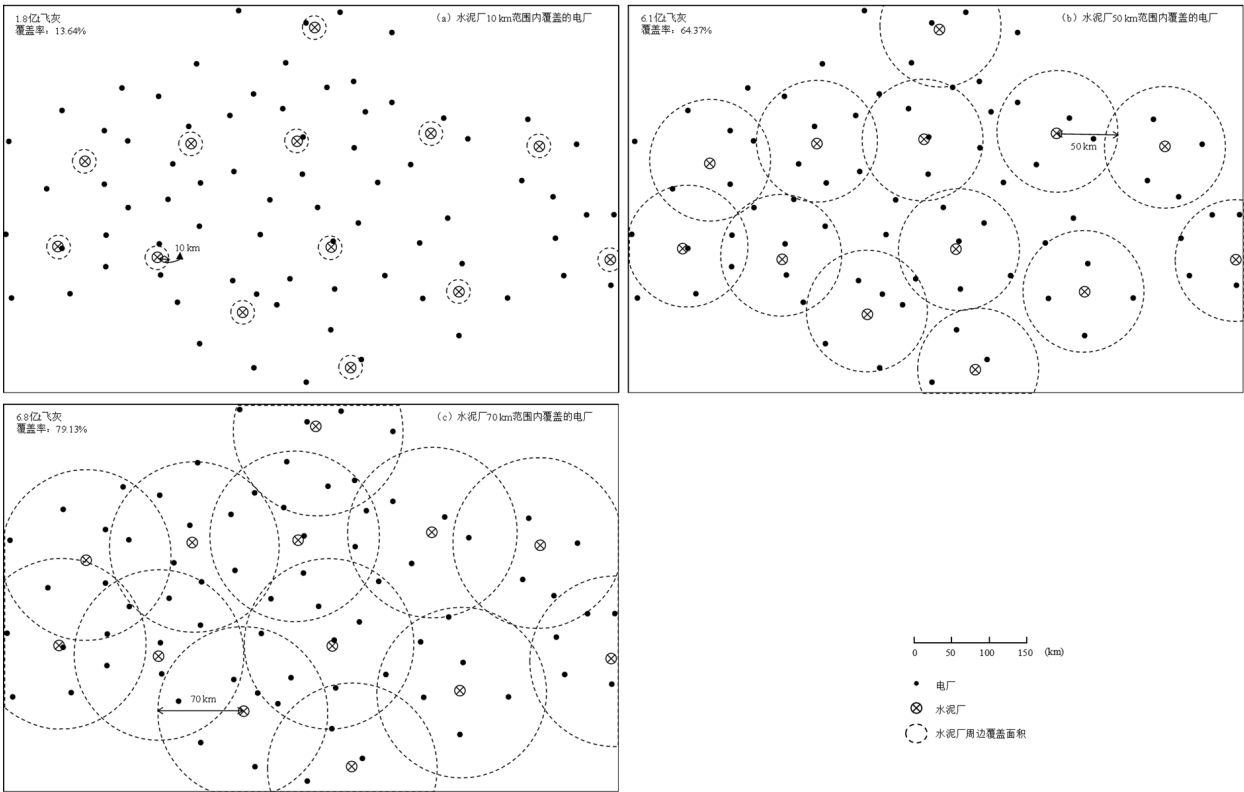


图 3 水泥厂和电厂分布示意
Fig.3 Schematic diagram of the distribution of cement plants and power plants

1.2.2 情景分类 运输阶段(T)——如图 3 所示,根据电厂和水泥厂分布情况及电厂粉煤灰储量^[17],水泥厂直线距离 10km 的电厂覆盖率约为 13.64%,可提供 1.8 亿 t 粉煤灰,代表产业共生政策尚未实施时;水泥厂直线距离 50km 的电厂覆盖率约为 64.37%,可提供 6.1 亿 t 粉煤灰,代表产业共生政策初步实施;水泥厂直线距离 70km 的电厂覆盖率约为 79.13%,可提供 6.8 亿 t 粉煤灰,代表产业共生政策实施良好.故将粉煤灰运输距离分 3 种情景:10km(T1)、50km(T2)、70km(T3).石灰石、黏土、铁粉等运输到水泥厂的公路距离为 3km^[18],石膏的运输距离为 7km^[19],煤炭运输距离为 50km^[18].

生料替代(R)——为了保证水泥的性能,在水泥生产中要对二氧化硅、氧化钙、氧化铝和三氧化二铁 4 种主要氧化物的投入量严格控制.通常用水硬率(HM)、硅率(SM)和铝率(IM)作为水泥质量控制的指标,HM 的取值范围为 1.8~2.4;SM 的取值范围为 1.7~2.7;IM 的取值范围为 0.8~1.7,3 个指标的数学表达式如式 1、式 2 和式 3^[8]所示,可通过 HM、SM 和 IM 3 个指标综合确定粉煤灰的替代率.

$$HM = \frac{CaO}{Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3}$$

(1)

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

(2)

$$IM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

(3)

式中:CaO、Al₂O₃、SiO₂、Fe₂O₃ 分别为原料中该化学成分的质量分数.石灰石、黏土、铁粉、以及粉煤灰中 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO 等化学成分的质量分数见表 2^[8],其中 LOSS 为烧失量.

表 2 原料的化学成分及质量分数

Table 2 Chemical composition and mass fraction of materials

原料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	LOSS
石灰石	0.021	0.004	0.003	0.530	0.003	0.436
粘土	0.758	0.120	0.039	0.005	0.010	0.051
铁粉	0.336	0.043	0.496	0.051	0.019	0.022
粉煤灰	0.369	0.201	0.108	0.184	0.008	0.032

如图 4 所示,将粉煤灰的替代率从 1%开始,以 1%的间隔增加,代入式 1、式 2、式 3 进行计算,符合这 3 个指标,替代率继续增加,直至达到值 ω 不符合

为止,水泥生料中粉煤灰的最大替代率为(ω-1)%.通过计算,9%为最大整数替代率,粉煤灰的生料替代率为 3%(R1)、6%(R2)和 9%(R3).

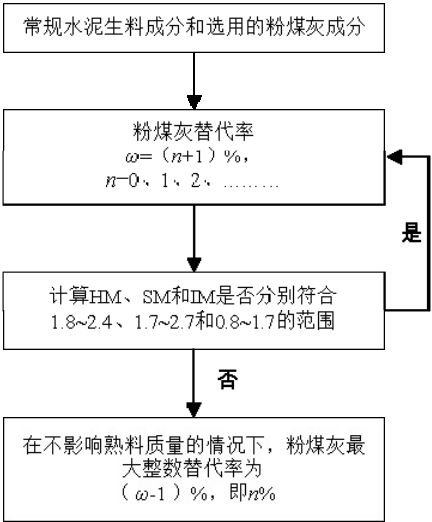


图 4 粉煤灰替代率计算流程
Fig.4 Calculation process of fly ash replacement rate

熟料替代(C)——粉煤灰代替 10%的熟料制成普通硅酸盐水泥(C1)、粉煤灰代替 20%的熟料制成粉煤灰硅酸盐水泥(C2)和粉煤灰代替 40%的熟料制成粉煤灰硅酸盐水泥^[8](C3).

水泥替代(F)——粉煤灰替代 10%的硅酸盐水泥制成混凝土(F1)、粉煤灰替代 30%的硅酸盐水泥制成混凝土(F2)、粉煤灰替代 50%的硅酸盐水泥^[19-20]制成混凝土(F3).

1.3 清单分析

表 3 水泥生产原料清单(t/t 水泥)

Table 3 List of materials for cement production(t/t cement)

水泥	石灰石	粘土	铁粉	粉煤灰	石膏
BS	1.386	0.134	0.042	/	0.050
R1	1.345	0.130	0.041	0.029	0.050
R2	1.303	0.126	0.039	0.059	0.050
R3	1.262	0.122	0.038	0.088	0.050
C1	1.248	0.120	0.038	0.095	0.050
C2	1.109	0.107	0.034	0.190	0.050
C3	0.832	0.080	0.025	0.380	0.050
F1	1.386	0.134	0.042	0.111	0.050
F2	1.386	0.134	0.042	0.429	0.050
F3	1.386	0.134	0.042	1.000	0.050

物质输入部分只考虑石灰石、粘土、铁粉、粉煤灰和石膏等主要水泥生产原料,原料清单如表 3

所示.

2 结果与讨论

2.1 运输阶段

2.1.1 原料运输 水泥企业所需粉煤灰的常规运输距离为 100km^[21],但粉煤灰直线运输距离为 70km,粉煤灰总质量约为 6.8 亿 t,基本已经满足按照 2020 年水泥产量 23 亿 t,需 6.9 亿 t 粉煤灰的需求^[22],在水泥厂 70km 范围内实现与电厂的产业共生是可行的.

表 4 原料运输 CO₂ 排放量及其与常规运距的比较(kg/t 水泥)

Table 4 CO ₂ emissions from material transportation and the difference from conventional distance(kg/t cement)				
水泥	T1	T2	T3	100km
BS	0.614	0.614	0.614	0.614
R1	0.633	0.777	0.849	0.956
R2	0.652	0.939	1.083	1.298
R3	0.671	1.102	1.317	1.64
C1	0.673	1.137	1.368	1.716
C2	0.732	1.659	2.123	2.818
C3	0.849	2.704	3.631	5.022
BS	/	/	/	/
R1	-0.323	-0.18	-0.108	/
R2	-0.646	-0.359	-0.215	/
R3	-0.97	-0.539	-0.323	/
C1	-1.043	-0.58	-0.348	/
C2	-2.086	-1.159	-0.695	/
C3	-4.172	-2.318	-1.391	/

注:负值为CO₂减少,正值为CO₂增加.

各替代率下CO₂排放量及其与常规运输距离比

较结果如表 4 所示,其中基准情形(BS)为无粉煤灰替代.表 5 显示与 BS 相比,粉煤灰的运输距离越长,替代率越高,CO₂ 排放增加越多,尽管粉煤灰添加使其其他原料量减少,继而减少其运输 CO₂ 排放,但粉煤灰的运输距离较长,造成该阶段排放增加.与常规运输距离 100km 相比,通过与电厂相对地理位置优化出的距离 70km,最多可减少 1.391kg/t 水泥的 CO₂ 排放.

另外,粉煤灰作为燃煤电厂的副产品,与石灰石、粘土、铁粉等原料相比,粉煤灰没有开采阶段的 CO₂ 排放,所以产业共生时,考虑无需开采的优势,可抵消其运输的 CO₂ 排放.不同替代率下二者抵消结果如表 5 所示.

表 5 产业共生下粉煤灰添加引起的 CO₂ 减排量(kg/t 水泥)
Table 5 CO₂ reduction caused by fly ash addition under industrial symbiosis (kg/t cement)

项目	BS	R1	R2	R3	C1	C2	C3
T1	/	7.395	14.789	22.184	23.869	47.739	95.478
T2	/	7.251	14.502	21.753	23.406	46.812	93.624
T3	/	7.179	14.359	21.538	23.174	46.348	92.696
100km	/	7.072	14.143	21.215	22.826	45.653	91.306

由表 5 可知,产业共生情况下粉煤灰的替代均使 CO₂ 排放减少,当运输距离为 70km,产业共生下粉煤灰引起的 CO₂ 减排最大为 92.696kg/t 水泥.可出台相关政策,促进水泥厂和电厂的产业共生,从最大程度上减少由粉煤灰运输带来的 CO₂ 排放,不仅可推动粉煤灰的资源化利用,而且有助于实现水泥行业低碳发展.

表 6 回转窑热耗、煤炭用量以及煤炭运输 CO₂ 排放量(kJ/t 水泥)

Table 6 Heat consumption, coal consumption in kilns and CO₂ emissions from coal transportation (kJ/t cement)

项目	BS	R1	R2	R3	C1	C2	C3
吸热过程	物料自 25 ℃加热到 450 ℃	717.472	709.468	701.464	693.460	689.363	605.038
	黏土脱水	65.471	63.507	61.543	59.579	58.924	39.283
	物料自 450 ℃加热到 900 ℃	822.271	813.098	803.925	794.752	790.057	693.414
	碳酸盐 900 ℃分解	2279.471	2211.087	2142.702	2074.319	2051.524	1367.683
	分解的碳酸盐自 900 ℃加热到 1400 ℃	599.680	581.689	563.699	545.709	539.712	359.808
	熔融净热	105.807	104.627	103.446	102.266	101.662	89.226
合计		4590.172	4483.475	4376.779	4270.085	4231.242	3154.452
放热过程	脱水黏土产物结晶	16.466	15.972	15.478	14.984	14.819	9.880
	水泥化合物形成	421.212	416.513	411.814	407.116	404.711	355.205
	合计	437.678	432.485	427.292	422.099	419.530	365.084
理论热耗 Q		4152.494	4050.990	3949.487	3847.985	3811.713	2789.367
标煤(kg)		141.748	138.283	134.818	131.353	130.115	95.217
煤炭运输 CO ₂ 排放量(kg/t 水泥)		1.717	1.675	1.633	1.591	1.576	1.153

2.1.2 煤炭运输 与水泥生产中煤炭的使用量相比,柴油的使用量可以忽略不计,此部分只对煤炭运输产生的 CO₂ 排放进行计算^[23].所需煤炭量根据煅烧阶段所需热耗计算,水泥生产中主要的吸热来自于黏土脱水,物料的加热,碳酸盐分解以及加热、熔融净热等过程,主要的放热来自脱水黏土产物结晶放热、水泥化合物形成等过程^[8],回转窑热耗理论值为总吸热量与总放热量的差值.粉煤灰不同替代率下上述过程的热耗结果如表 6 所示.

与 BS 相比,粉煤灰替代使煤炭的使用量减少,随着替代率的增加,煤炭的用量减少越多.添加粉煤灰之后,常规原料的使用减少,这使相关吸热过程的单位质量热耗减少.另外,粉煤灰还有其独特的优势,与黏土相比,粉煤灰含水率低,所以黏土脱水所需热耗降低.而且粉煤灰有相当数量的 CaO 以硅酸盐等形式存在,节省大量碳酸盐分解热.物料自 450℃加热到 900℃时,由于粉煤灰的蓄热系数为 3.92W/(m²·K)^[24],而黏土和石灰石的蓄热系数高达 10W/(m²·K)^[25],加热到同一个温度所需热耗也较少.粉煤灰的加入有效减少了煅烧阶段的热耗,进而使所需煤炭减少,因此煤炭的运输阶段 CO₂ 排放减少.该阶段 CO₂ 排放量以及其与 BS 的差值如图 5(a)所示,生料替代最多可减少 CO₂ 排放 0.063kg/t 水泥,熟料替代最多可减少 CO₂ 排放 0.282kg/t 水泥.

2.2 生料制备

粉煤灰的含水量一般低于 1%,而粘土等原料的含水量高达 15%以上^[26],另外粉煤灰粒径一般小于 10μm^[27],而主要原料石灰石、铁粉等粒径大约为厘米和毫米,粉煤灰的替代可节省干燥耗电和粉磨耗电.单位原料干燥耗电 8.19kW·h^[28],单位原料粉磨耗电 16kW·h^[29].不同替代率下该阶段耗电量如表 7 所示,CO₂ 排放量及其与 BS 的差值如图 5(b)所示.粉煤灰的替代率越大,干燥和粉磨所需电耗越小,相应的 CO₂ 减排量就越大,此处最大减排量为 9.220kg CO₂/t 水泥.

另外,如前文 2.1 所述,粉煤灰替代造成煤炭用量减少,煤粉制备耗电也相应减少.单位煤粉制备耗电 30kW·h^[29],则不同替代率下煤粉粉磨耗电量如表 8 所示,产生的 CO₂ 排放量及其与 BS 的差值如图 5(c)所示.此处最大减排量为 0.852kg CO₂/t 水泥.

表 7 各替代率下原料干燥和粉磨的耗电量(kW·h)及 CO₂ 排放量(kg/t 水泥)

Table 7 Electricity consumption(kW·h) and CO₂ emissions (kg/t cement) of material drying and grinding at various substitution rates

水泥	耗电量		CO ₂ 排放量	
	原料干燥	原料粉磨	原料干燥	原料粉磨
BS	12.792	24.991	7.804	15.247
R1	12.408	24.241	7.570	14.789
R2	12.025	23.491	7.336	14.332
R3	11.641	22.741	7.102	13.875
C1	11.513	22.492	7.024	13.722
C2	10.234	19.992	6.244	12.197
C3	7.675	14.994	4.683	9.148

表 8 各替代率下煤炭粉磨耗电量(kW·h)和 CO₂ 排放量(kg/t 水泥)

Table 8 Electricity consumption(kW·h) and CO₂ emissions (kg/t cement) of coal grinding at various replacement rates

项目	BS	R1	R2	R3	C1	C2	C3
耗电量	4.252	4.148	4.045	3.941	3.903	3.554	2.856
CO ₂ 排放量	2.594	2.531	2.468	2.404	2.381	2.169	1.743

2.3 熟料煅烧

原料中碳酸盐分解和煤炭燃烧产生的 CO₂ 约占总排放的 92%^[23,30-31],不同替代率下该阶段由原料分解和煤炭燃烧产生的 CO₂ 见表 9.

表 9 各替代率下熟料煅烧的 CO₂ 排放量(kg/t 水泥)

Table 9 CO₂ emissions from Calcination at various replacement rates (kg/t cement)

项目	BS	R1	R2	R3	C1	C2	C3
碳酸盐分解	583.625	566.290	548.955	531.620	526.567	466.900	350.175
煤炭燃烧	392.995	383.389	373.782	364.176	360.743	328.491	263.988

表 10 各替代率下水泥粉磨电耗(kW·h)及 CO₂ 排放量(kg/t 水泥)

Table 10 Electricity consumption(kW·h) and CO₂ emissions (kg/t cement) from cement grinding at various replacement rates

项目	BS	C1	C2	C3
电耗	25	22.625	20.25	15.5
CO ₂ 排放量	15.253	13.804	12.355	9.457

原料分解方面,粉煤灰替代生料,由于粉煤灰中的 CaO 以硅酸盐、氯酸盐和铁酸盐形式存在,含碳

酸盐的原料使用量下降,煅烧时 CO_2 排放减少,而在替代熟料时,减少了熟料的使用量,也相应减少了熟料生产的 CO_2 . 煤炭燃烧方面,粉煤灰替代生料,由 2.1 中对煤炭用量的分析可知,其独特的物理性质和化学成分可明显降低煅烧时的理论热耗,煤炭用量相应减少,燃烧产生的 CO_2 也减少. 粉煤灰替代熟料,减少了熟料用量,相应减少了熟料生产的煤炭燃烧 CO_2 排放. 与 BS 的差值如图 5(d)所示,此阶段最大可

减排 363.231kg CO_2 /t 水泥.

2.4 水泥粉磨

粉煤灰替代熟料,由于其自身粒度较小,可减少粉磨耗电,粉磨单位水泥耗电量为 $25\text{kW}\cdot\text{h}^{[29]}$,各替代率下粉磨电耗和 CO_2 排放如表 10 所示. 粉煤灰的替代率越高,此阶段 CO_2 排放量越少. 与 BS 的差值如图 5(e)所示. 此阶段最大 CO_2 减排量为 5.796kg/t 水泥.

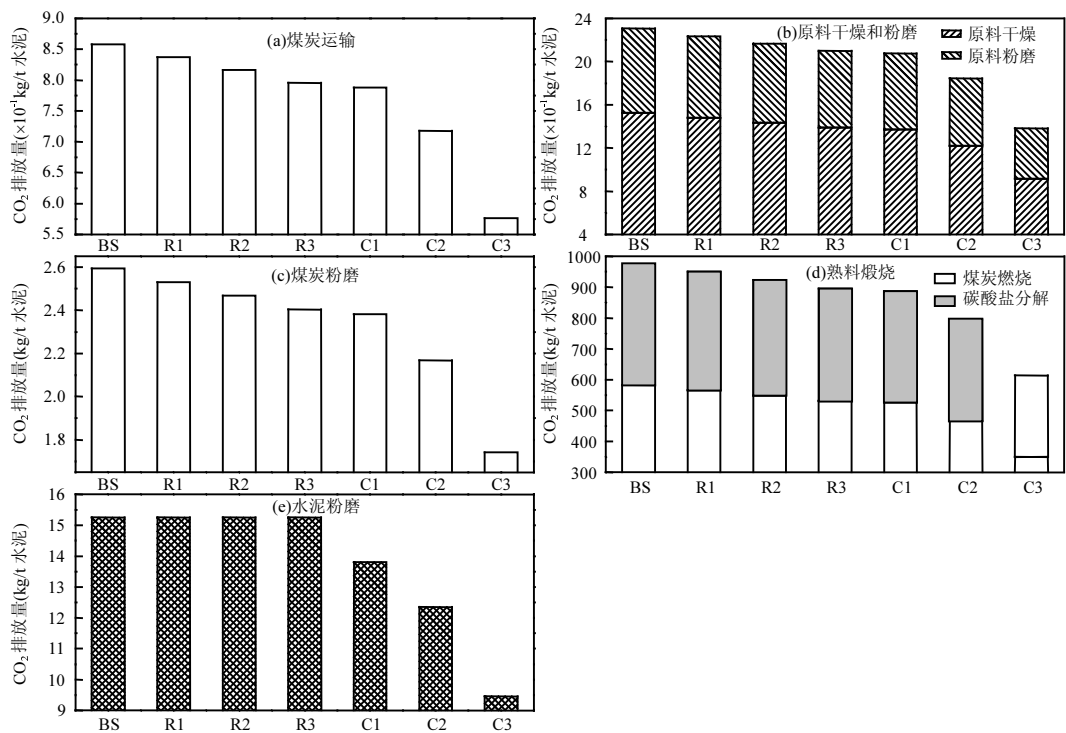


图 5 各替代率下不同阶段 CO_2 排放量
Fig.5 CO_2 emissions from different stages at various substitution rates

2.5 使用阶段

表 11 各替代率下水泥使用阶段 CO_2 减排量预测(kg/t 水泥)
Table 11 Prediction of CO_2 reduction in cement application at various replacement rates (kg/t cement)

年份	BS	F1	F2	F3
2030	17.299	27.678	41.517	64.005
2050	51.896	83.034	124.550	192.015

水泥制成混凝土后,在使用过程中,空气中 CO_2 可渗透到混凝土内,与其碱性物质起化学反应后生成碳酸盐和水,使混凝土碱度降低,此过程称为碳化过程^[32]. 碳化条件相同,粉煤灰掺量越大,越有利于 CO_2 气体扩散,粉煤灰水泥的抗碳化性能越差,粉煤

灰替代水泥有助于自身使用阶段的 CO_2 减排^[33]. 张扬等^[34]选取粉煤灰掺量为 0%、10%、20%和 30%的混凝土为研究对象,通过自然条件下的碳化,研究了粉煤灰掺量对混凝土碳化的影响,实验结果表明:掺 10%、20%和 30%粉煤灰的混凝土碳化速度分别为不掺粉煤灰的 1.6、1.9、2.4 倍. 线性拟合发现混凝土碳化速度和粉煤灰添加量之间呈线性关系,当粉煤灰掺加量为 40%和 50%时,混凝土碳化速度分别为不掺粉煤灰的 2.8 和 3.7 倍. 根据以上研究,各替代率下碳化作用的 CO_2 减排情况如表 11 所示. 当替代率为 F3 时,到 2030 年 CO_2 减排量为 64.005kg/t 水泥,到 2050 年 CO_2 减排量为 192.015kg/t 水泥.

2.6 余热发电及清洁电力使用

水泥生产 总热耗定义为单位熟料(kg)所需热量(kJ),即物料预热—脱水—分解—化合吸收热+综合损失热.从水泥生产总热耗的定义来看水泥生产总热耗为 2.1.2 的理论热耗 Q .由 2.1.2 中讨论,粉煤灰替代使物料的生产总热耗变低,余热发电量相应变低,由 2.2、2.3 和 2.4 的讨论,粉煤灰替代节省电耗、余热发电及外购电力的变化如表 12 所示.余热发电量的减少小于粉煤灰替代引起的电耗节省,因此可以减少外购电力,由此带来的最大 CO₂ 减排量为 12.484kg/t 水泥.

表 12 水泥生产外购电量减少(kW·h)及 CO₂ 减排量(kg/t 水泥)

Table 12 Reduction of purchased electricity(kW·h) and CO₂ emission (kg/t cement)

项目	BS	R1	R2	R3	C1	C2	C3
余热量(kJ/t 水泥)	159.767	155.862	151.956	148.051	146.656	133.544	107.321
余热发电量	44.380	43.295	42.210	41.125	40.738	37.096	29.811
余热发电的减少量	0.000	1.085	2.170	3.254	3.642	7.284	14.568
节省电耗	0.000	10.019	11.324	12.576	15.382	21.932	35.031
减少的外购电量	0.000	8.934	9.154	9.322	11.740	14.648	20.463
CO ₂ 减排量	0.000	5.451	5.585	5.687	7.163	8.937	12.484

表 13 2030 年、2040 年和 2050 年我国能源发电结构预测
Table 13 Forecast of China's energy generation structure in 2030, 2040 and 2050

年份	燃煤(%)	清洁能源(%)
2030	47	53
2040	36	64
2050	9	91

水泥企业通过粉煤灰替代策略可有效减少外购电量,但仍然需要大量的外购电力才能满足生产需要,2030 年、2040 年和 2050 年的能源发电结构^[35-37]如表 13 所示.若外购电力采用清洁电力,各替代率下外购电量和采用清洁电力可实现的 CO₂ 减排量如表 14 所示,外购电量仅考虑生料制备阶段及水泥粉磨阶段电耗之和减去余热发电量.水泥企业的外购电力采用清洁电力在 CO₂ 减排方面有巨大空间.随着清洁电力比例的逐渐增加,CO₂ 减排量在 2030 年、2040 年 2050 年都有显著增加,到 2050 年最大 CO₂ 减排量为 17.319kg/t 水泥.

表 14 外购电量(kW·h)及清洁电力 CO₂ 减排量(kg/t 水泥)
Table 14 CO₂ reduction of purchased electricity(kW·h) and clean electricity (kg/t cement)

项目	R1	R2	R3	C1	C2	C3
外购电量	31.195	22.261	22.041	21.874	19.455	16.547
2030	10.087	7.198	7.127	7.073	6.291	5.351
2040	12.181	8.692	8.606	8.541	7.597	6.461
2050	17.319	12.359	12.237	12.144	10.801	9.187

2.7 CO₂ 减排评价

2020 年我国水泥产量约 23 亿 t,排放 CO₂ 约 14.66 亿吨,约占中国 CO₂ 排放总量的 14.30%.如表 15 所示,各阶段 CO₂ 减排量从高到低依次是熟料煅烧、使用阶段、运输阶段、生料制备及水泥粉磨.熟料煅烧阶段的 CO₂ 减排量可使全国 CO₂ 排放减少 8.57%,运输阶段产业共生后的 CO₂ 减排量可使全国 CO₂ 排放减少 2.08%;到 2050 年,粉煤灰替代的水泥制品吸收的 CO₂ 可使全国 CO₂ 排放减少 1.23%.

实际生产中,生料制备和熟料煅烧两个阶段可同时进行粉煤灰替代,若结合清洁电力使用,单位水泥 CO₂ 减排为 461.675kg,CO₂ 总减排量为 10.619 亿 t,占 2020 年总排放量的 74.10%.如果要使全球温度升高控制在 2℃ 以内,到 2050 年全球 CO₂ 排放量要比峰值水平减少 50% 以上^[38-39].麦肯锡测算,要使全球温度升高不超过 1.5℃,中国水泥行业到 2050 年碳减排要达到 70% 以上.研究结果表明,要达到“双碳”目标,粉煤灰替代及清洁电力使用可以是水泥行业未来的主要发展方向.

表 15 水泥生命周期各阶段最大 CO₂ 减排量及贡献

Table 15 Maximum CO₂ emission reduction and its contribution in each stage of cement life cycle

阶段	单位水泥 CO ₂ 减排量(kg/t 水泥)	总减排量 (亿 t)	水泥行业占比 (全国占比)
运输阶段	92.676	2.132	14.54%(2.08%)
生料制备	10.072	0.232	0.58% (0.23%)
熟料煅烧	363.231	8.354	56.96%(8.57%)
水泥粉磨	5.796	0.133	0.89% (0.13%)
使用阶段(2050 年)	192.015	4.416	8.57% (1.23%)

3 经济可行性

如表 16 所示,将最大替代率下水泥企业的原料和煤耗、电耗等成本与 BS 成本进行比较,粉煤灰替代后 1t 水泥可节省成本 159.973 元,说明水泥企业采用粉煤灰作为替代物具有良好的经济可行性.

表 16 粉煤灰替代后的水泥企业经济效益

Table 16 Cement economic benefit induced by fly ash substitution

项目	石灰石	粘土	铁粉	粉煤灰	煤炭	电力(kW·h)		合计
						生料制备	水泥粉磨	
BS(t)	1.386	0.134	0.042	0.000	0.142	42.045	25.000	/
生料 9%+熟料 40%(t)	0.707	0.068	0.021	0.481	0.085	21.814	13.363	/
单价(元)	130 ^[40]	126.30 ^[41]	1800 ^[42]	45 ^[43]	601 ^[44]	0.635 ^[45]		/
购置成本(元)	-88.270	-8.336	-37.800	+21.645	-34.257	-12.847	-7.389	-167.254
单位运输成本 ^[46] (元/t)	4.970	4.970	4.970	26.150	26.150	/	/	/
运输成本(元)	-3.375	-0.328	-0.104	+12.578	-1.491	/	/	+7.281
合计(元)	/	/	/	/	/	/	/	-159.973

注:-表示成本减少,+表示成本增加.

4 结论

- 4.1 水泥企业与直线距离 70km 的电厂进行产业共生,可满足水泥企业的粉煤灰需求,并有效降低其运输 CO₂ 排放.
- 4.2 保证水泥质量前提下,生料替代率最高可为 9%,该替代率下 CO₂ 减排量为 82.511kg/t 水泥.
- 4.3 同时进行生料替代和熟料替代,最多可减少 CO₂ 排放 452.586kg/t 水泥.
- 4.4 在清洁电力预测情况下,到 2050 年 CO₂ 减排最大为 17.319kg/t 水泥.
- 4.5 最高的生料和熟料替代率,结合清洁电力使用,到 2050 年,减排量为 461.675kg/t 水泥,占 2020 年水泥行业总排放的 74.10%.

参考文献:

[1] Liu J, Tong D, Zheng Y, et al. Carbon and air pollutant emissions from China's cement industry 1990–2015: trends, evolution of technologies, and drivers [J]. Atmospheric chemistry and physics, 2021,21(3):1627–1647.

[2] Jamora J B, Gudia S E L, Go A W, et al. Potential CO₂ reduction and cost evaluation in use and transport of coal ash as cement replacement: A case in the Philippines [J]. Waste Management, 2020,103:137–145.

[3] Wen Z, Chen M, Meng F. Evaluation of energy saving potential in China's cement industry using the Asian–Pacific Integrated Model and the technology promotion policy analysis [J]. Energy Polic, 2015,77: 227–237.

[4] Wei J, Cen K. Empirical assessing cement CO₂ emissions based on China's economic and social development during 2001–2030 [J]. The Science of the total environment, 2019,653:200–211.

[5] Kayali O, Sharfuddin Ahmed M. Assessment of high volume replacement fly ash concrete – Concept of performance index [J]. Construction and Building Materials, 2013,39:71–76.

[6] Hussain S, Bhunia D, Singh S B. Comparative study of accelerated carbonation of plain cement and fly-ash concrete [J]. Journal of

Building Engineering, 2017,10:26–31.

[7] Guo R, Wang J, Bing L, et al. Global CO₂ uptake by cement from 1930 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(4):1791–1805.

[8] 刘辉敏.水泥生产技术基础 [M]. 北京:化学工业出版社, 2016.

Liu M H. Fundamentals of cement production technology [J]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.

[9] 章玉容.粉煤灰混凝土生命周期环境影响综合评价 [D]. 北京:北京交通大学, 2016.

Zhang Y R. Comprehensive assessment of life cycle environmental impact of fly ash concrete [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

[10] 中华人民共和国生态环境部.关于做好 2018 年度碳排放报告与核查及排放监测计划制定工作的通知[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtgz/201904/t20190419_700400.shtml2019–04–19/2019–07–10.

Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China.The Circular on reporting and verifying carbon emissions in 2018and formulating emission monitoring plans [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtgz/201904/t20190419_700400.shtml2019–04–19/2019–07–10.

[11] 杨 昆,王永胜,刘翠玲.山西省重点行业碳排放情况的 LMDI 分析和聚类评价 [J]. 低碳世界, 2016,6(10):3–4.

Yang K, Wang Y S, Liu C L.LMDI Analysis and cluster evaluation of Carbon Emission of Key Industries in Shanxi Province [J]. Low carbon world, 2016,6(10):3–4.

[12] Shen W, Cao L, Li Q, et al. Quantifying CO₂ emissions from China's cement industry [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015,50:1004–1012.

[13] Yin Q, Du W, Cheng L. Optimization design of waste heat power generation systems for cement plants based on the thermal resistances analyses [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118:1190–1204.

[14] Rad E A, Mohammadi S. Energetic and exergetic optimized Rankine cycle for waste heat recovery in a cement factory [J]. Applied Thermal Engineering, 2018,132:410–422.

[15] 彭菊生.低温余热朗肯循环发电系统的设计研究 [J]. 低温工程, 2020,42(6):69–73.

Peng J S. Design and research of low temperature waste heat rankine cycle power generation system [J]. Cryogenic Engineering, 2020,42(6): 69–73.

- [16] 陈王曦. 焦炉烟气余热回收发电技术分析 [J]. 节能, 2020, 39(7): 91-93.
Chen W X. Power generation technology analysis of coke oven flue gas waste heat recovery [J]. Energy saving, 2020, 39(7): 91-93.
- [17] 中国工程院. 能源专业知识服务系统 [DB/OL]. <http://2018.energy.ckcest.cn/home2021-04-21>.
Chinese Academy of Engineering. Professional knowledge service for energy [DB/OL]. <http://2018.energy.ckcest.cn/home>, 2021-04-21.
- [18] 姜 睿, 王洪涛. 中国水泥工业的生命周期评价 [J]. 化学工程与装备, 2010, 39(4): 183-187.
Jiang R, Wang H T. Life cycle evaluation of cement industry in China [J]. Chemical engineering and equipment, 2010, 39(4): 183-187.
- [19] Md U H, Chi S P, Irene M C L, et al. Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2017, 120: 199-208.
- [20] Kayali O, Ahmed M S. Assessment of high volume replacement fly ash concrete - Concept of performance index [J]. Construction and Building Materials, 2013, 39(S1): 71-76.
- [21] 水泥网. 扩大销售半径, 降低运输成本, 水泥行业或将迎来变革 [EB/OL]. <https://www.ccement.com/news/content/54619311244965.html2019-04-08>.
Cement. Expand sales radius, reduce transportation costs, cement industry or will usher in change [EB/OL]. <https://www.ccement.com/news/content/54619311244965.html2019-04-08>.
- [22] 李春峰. 安徽淮南市粉煤灰现状及利用分析 [J]. 广东化工, 2016, 43(13): 150-151.
Li C F. Status and utilization analysis of fly ash in huainan City, Anhui Province [J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(13): 150-151.
- [23] 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, 2021, 282.
- [24] 郑大轩, 李洁文, 郭文彪. 粉煤灰品质及掺量对混凝土性能影响试验研究 [J]. 当代化工, 2021, 50(2): 262-265.
Zheng D X, Li J W, Guo W B. Experimental study on the effect of fly ash quality and dosage on concrete properties [J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, 50(2): 262-265.
- [25] 施 荣. 建筑材料 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2016: 292.
Shi R. Building materials [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2016: 292.
- [26] 陈三嫻, 陈 峰. 粉煤灰对水泥土强度及固化过程的影响 [J]. 福建工程学院学报, 2021, 19(1): 61-67.
Chen S S, Chen F. Effect of fly ash on strength and curing process of soil-cement [J]. Journal of Fujian Institute of Technology, 2021, 19(1): 61-67.
- [27] 郑 宇. 粉煤灰体系粒度分布特征的统计分析 [J]. 四川建材, 2014, 40(3): 5-7.
Zheng Y. Statistical analysis of particle size distribution characteristics of fly ash system [J]. Sichuan Building Materials, 2014, 40(3): 5-7.
- [28] 张 文. 水泥粉磨系统能源消耗及节能分析 [J]. 建材技术与应用, 2021, 42(2): 11-13.
Zhang W. Energy consumption and energy saving analysis of cement grinding system [J]. Technology and Application of Building Materials, 2014, 42(2): 11-13.
- [29] 天津水泥工业设计研究院有限公司. 立磨用于水泥终粉磨 [EB/OL]. <https://www.docin.com/p-275455623.html2011-10-19>.
Tianjin Cement Industry Design and Research Institute Co. LTD. Vertical mill is used for cement final grinding [EB/OL]. <https://www.docin.com/p-275455623.html2011-10-19>.
- [30] 俞海勇, 杨 辉, 张 贺, 等. 水泥生命周期碳排放研究 [J]. 四川建材, 2017, 43(1): 1-3.
Yu H Y, Yang H, Zhang H, et al. Sichuan building materials, 2017, 43(1): 1-3.
- [31] Chen L, Xu L, Cai Y, et al. Spatiotemporal patterns of industrial carbon emissions at the city level [J]. Resources, conservation and recycling, 2021, 169: 105499.
- [32] 张 宇, 段华波, 张 宁. 深圳市建筑水泥流量-存量分析及环境影响评估 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 482-489.
Zhang Y, Duan H B, Zhang N. Analysis of cement flow and stock of urban buildings and its environmental impact assessment in Shenzhen City [J]. China Environmental Science, 2021, 41(1): 482-489.
- [33] 魏云梅, 姚瑞轩, 陈 爽, 等. 生活垃圾焚烧飞灰加速碳酸化深度除氯与水洗除氯对比研究 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(9): 4184-4192.
Wei Y M, Yao R X, Chen S, et al. Removal of chloride from MSWI fly ash: a comparison of accelerated carbonation and water flushing [J]. China Environmental Science, 2014, 41(9): 4184-4192.
- [34] 张 扬, 牛荻涛, 李盛斌. 粉煤灰混凝土碳化试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(27): 275-278.
Zhang Y, Niu D T, Li S B. Research on carbonation of fly ash concrete [J]. Science technology and engineering, 2017, 17(27): 275-278.
- [35] 曹艺严, 陈 济, 刘秉祺, 等. 电力增长零碳化(2020-2030): 中国实现碳中和的必经之路 [R]. 北京: 落基山研究所, 2021.
Cao Y Y, Chen J, Liu B Q, et al. Zero carbon power growth (2020~2030): the only way to achieve carbon neutrality in China [R]. Beijing: Rocky Mountain Institute, 2021.
- [36] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2015.
Energy Research Institute of National Development and Reform Commission. Scenarios and approaches for China's 2050 high proportion of renewable energy development [R]. Beijing: Energy Research Institute of National Development and Reform Commission, 2015.
- [37] Haldorsen H H, Leach P. Energy 360: Invited perspective: The outlook for energy: A view to 2040 [J]. Journal of Petroleum Technology, 2015, 67(4): 14-19.
- [38] Jiang K J, He C M, Jiang W Y, et al. Transition of the Chinese economy in the face of deep greenhouse gas emissions cuts in the future [J]. Asian Economic Policy Review, 2021, 16(1): 142-162.
- [39] 何建坤. 全球气候治理新机制与中国经济的低碳转型 [J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2016, 69(4): 5-12.
He J k. New mechanism of global climate governance and the low-carbon transition of China's economy [J]. Journal of Wuhan University (Philosophy and Social Sciences), 2016, 69(4): 5-12.
- [40] 卢 晗, 郑 鑫, 李 薇, 等. 燃煤电厂脱硫技术及超低排放改造费效分析 [J]. 环境工程, 2018, 36(1): 97-102.

- Lu H, Zheng X, Li W, et al. Desulfurization technology and efficiency analysis of ultra-low emission retrofitting cost for coal-fired power plants [J]. Environmental engineering, 2018,36(1):97-102.
- [41] 刘家利,郭孟狮,李 炎.135MW 机组锅炉掺烧半焦试验及经济性分析 [J]. 洁净煤技术, 2017,23(2):86-91.
- Liu J L, Guo M S, Li Y. Experiment and economic analysis of mixing coke in boiler of 135MW unit [J]. Clean coal technology, 2017,23 (2):86-91.
- [42] 张珊珊,历长云,潘跃武.铜包铁粉的应用及制备 [J]. 粉末冶金技术, 2020,38(6):465-474.
- Zhang S S, Li C Y, Pan Y W. Application and preparation of copper coated iron powder [J]. Powder metallurgy technology, 2020,38(6): 465-474.
- [43] 水泥网.国内部分地区 11 月份最新粉煤灰价格 [EB/OL]. <https://www.ccement.com/news/content/1148994.html>,2010-11-01.
- Cement.The domestic parts of the latest price of fly ash in November [EB/OL]. <https://www.ccement.com/news/content/1148994.html> 2010-11-01.
- [44] 梁爱光.煤炭价格持续高位震荡 非市场因素暗流扰动 [EB/OL]. <https://www.ccement.com/news/content/10923125636975003.html>2021-09-06.
- Liang A G. The price of coal continued high and volatile non-market factors undercurrent disturbance [EB/OL]. <https://www.ccement.com/news/content/10923125636975003.html>2021-09-06.
- [45] 刘思佳,张 超,周树鹏.我国电价的国际比较分析 [N]. 国家电网报, 2021-03-23(8).
- Liu S J, Zhang C, Zhou S P. International comparative analysis of China's electricity price [N]. State Grid News, 2021-03-23(8).
- [46] 货拉拉.货拉拉基本费用,货拉拉收费标准 [DB/OL]. <https://www.huolala.cn/price.html>2020-09-15.
- Huolala. Basic cost of goods and labrador, goods and labrador charging standard [DB/OL]. <https://www.huolala.cn/price.html>2020-09-15.
- 致谢:** 本研究的水泥企业和电厂空间分布情况由中国科学院青岛生物能源与过程研究所田亚峻老师协助完成,在此表示感谢.
- 作者简介:** 肖 静(1996-),女,河北石家庄人,华北电力大学环境科学与工程学院硕士研究生,主要研究方向为水泥生产碳排放计算.发表论文 2 篇.