

## 深度报告——碳排放

全国碳市场扩容系列专题（二）：  
水泥熟料生产——固废利用释放绿色潜能

走势评级：CEA：震荡  
报告日期：2024 年 9 月 10 日

## ★水泥熟料行业的基准值测算

基于《企业温室气体排放核算与报告指南 水泥熟料生产》（征求意见稿）的设定，水泥熟料生产过程的碳排放包括过程排放、化石燃料燃烧排放和电力消耗排放。过程排放即碳酸盐分解排放，可以使用缺省值或实测值，使用非碳酸盐原料可以获得排放因子扣减；化石燃料燃烧和电力消耗排放需使用实测值。经测算，我国硅酸盐水泥熟料的实际平均过程排放强度约 0.5190-0.5243tCO<sub>2</sub>/t，化石燃料燃烧排放强度约 0.3tCO<sub>2</sub>/t，电力消耗排放强度约 0.0163tCO<sub>2</sub>/t。假定水泥熟料行业配额分配基准值依旧延续行业总体均衡原则，考虑不同规模熟料生产线的基准值略有差异，硅酸盐水泥熟料的基准值或落在 0.835-0.900tCO<sub>2</sub>/t 的范围内。

## ★部分水泥熟料生产企业配额盈缺情况

我们收集整理了 10 家水泥集团企业的相关生产数据，据大致推算，行业配额盈余将主要集中于新天山水泥、海螺水泥、冀东水泥和华新水泥等集团企业，这些企业的优势主要在于较低的产品煤耗。其中，华新水泥和冀东水泥分别在燃料替代率和原料替代率方面具有明显的优势，其熟料产品碳排放强度远低于其他企业。此外，经测算，当熟料单位产品综合煤耗和电耗均达到国标规定的 2 级能耗等级以上水平时，大概率不会存在配额缺口或缺口较小。

## ★水泥行业减排展望

由于近年需求的下降，我国水泥行业已经实现碳达峰，进入了新的绿色发展阶段。燃料替代和原料替代对水泥产品碳排放强度的下降具有较为明显的作用，基于现有的技术水平和资源状况，燃料替代具有较大的减排潜力，而原料替代的大范围推广则存在一定阻碍。此外，短期内水泥行业的总量减排也将得益于需求的进一步下降和低效产能的迅速淘汰。而在更远的未来，碳中和目标的实现或将依赖于 CCUS 技术的规模化、商业化应用。

## ★风险提示

碳市场扩容进程缓慢，碳排放核算方式变化等。



东方证券  
ORIENT SECURITIES

期货

金晓 首席分析师（能源与碳中和）

从业资格号：F3005393

投资咨询号：Z0012069

Tel: 8621-63325888-2483

Email: xiao.jin@orientfutures.com

联系人：

张可可 分析师（碳排放）

从业资格号：F03117993

Email: keke.zhang@orientfutures.com

## 主力合约行情走势图（碳排放）



**重要事项：**本报告版权归上海东证期货有限公司所有。未获得东证期货书面授权，任何人不得对本报告进行任何形式的发布、复制。本报告的信息均来源于公开资料，我公司对这些信息的准确性和完整性不作任何保证，也不保证所包含的信息和建议不会发生任何变更。我们已力求报告内容的客观、公正，但文中的观点、结论和建议仅供参考，报告中的信息或意见并不构成交易建议，投资者据此做出的任何投资决策与本公司和作者无关。

**有关分析师承诺，**见本报告最后部分。并请阅读报告最后一页的免责声明。

## 目录

1、水泥行业概况.....	5
2、水泥行业的能耗和温室气体排放.....	7
2.1、水泥生产过程的主要能耗和排放环节.....	7
2.2、我国水泥行业能耗现状.....	9
3、水泥行业即将纳入全国碳市场.....	14
3.1、水泥熟料生产温室气体排放核算浅析.....	14
3.2、水泥熟料生产配额分配方案的设想.....	18
3.3、部分水泥熟料生产企业配额盈缺情况.....	21
4、水泥行业减排展望.....	22
4.1、排放总量控制：从“去产量”到“去产能”.....	22
4.2、降低熟料系数：提升固废利用水平.....	23
4.3、燃料替代：挖掘 RDF 减排潜力.....	25
4.4、原料替代：推广应用存在阻碍.....	29
5、风险提示.....	32

## 图表目录

图表 1：2023 年全球水泥产量分布.....	5
图表 2：2023 年全球水泥熟料产能分布.....	5
图表 3：我国水泥及水泥熟料产量历史变动.....	5
图表 4：我国水泥熟料产能及产量.....	5
图表 5：2023 年分省水泥产量结构.....	6
图表 6：2023 年 TOP6 省份近年水泥产量变化.....	6
图表 7：水泥分类（按照水硬性矿物分类）.....	6
图表 8：水泥产业链.....	7
图表 9：新型干法水泥回转窑生产工艺流程图.....	8
图表 10：水泥生产流程简图及主要碳排放环节.....	9
图表 11：水泥熟料产能规模结构（截至 2023 年底）.....	9
图表 12：水泥熟料落后产能政策梳理.....	10
图表 13：水泥单位产品能源消耗限额等级.....	11
图表 14：部分地区水泥熟料生产线能耗分布情况.....	11
图表 15：部分地区水泥熟料生产线电耗分布情况.....	11
图表 16：部分地区水泥熟料生产线煤耗分布情况.....	12
图表 17：部分地区水泥企业水泥制备工段电耗分布情况.....	12
图表 18：2023 年我国水泥行业能耗情况.....	12
图表 19：部分水泥上市公司水泥熟料生产碳排放强度.....	13
图表 20：水泥行业能效管理政策梳理.....	13
图表 21：2023 年度水泥熟料行业能效“领跑者”企业.....	14
图表 22：水泥熟料生产温室气体排放核算边界.....	15
图表 23：化石燃料燃烧排放计算相关参数.....	15
图表 24：常用化石燃料相关参数缺省值.....	16
图表 25：过程排放计算相关参数.....	16
图表 26：熟料对应的过程排放因子的取值.....	17
图表 27：非碳酸盐替代原料对应的扣减系数.....	17
图表 28：硅酸盐水泥熟料生产不同原料/燃料替代水平对应碳排放强度.....	18
图表 29：其他碳市场水泥行业基准值设定.....	19
图表 30：部分水泥集团 2023 年光伏装机情况.....	20
图表 31：部分水泥集团 2023 年光伏发电量.....	20
图表 32：全国碳市场水泥行业基准值假设.....	20
图表 33：部分水泥生产集团配额盈缺情况.....	21

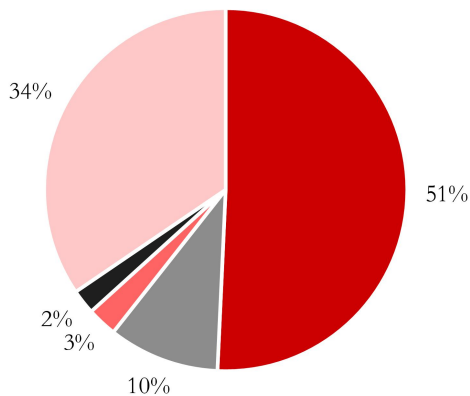
图表 34：配额盈亏平衡的标准情形.....	22
图表 35：北方地区水泥产量先于南方地区见顶.....	22
图表 36：水泥行业错峰生产政策.....	23
图表 36：低熟料系数水泥.....	24
图表 37：通用硅酸盐水泥的组分要求.....	24
图表 37：水泥行业主要替代燃料.....	25
图表 38：我国垃圾分类/固体废物管理体系相关政策文件.....	26
图表 39：我国 SRF 相关标准文件.....	27
图表 40：2018 年部分国家和地区水泥熟料生产燃料结构情况.....	28
图表 41：水泥行业主要替代原料.....	29
图表 42：我国电石产能及产能利用率.....	30
图表 43：我国电石产能及产量增长率.....	30

## 1、水泥行业概况

水泥是一种常用的基础建筑材料，广泛应用于各类工程建设当中。我国是全球最大的水泥生产国和消费国，水泥产量连续 38 年位居全球第一。2023 年，我国水泥产量占全球的 51%，水泥熟料产能占全球的 53%。由于终端需求萎缩，水泥熟料产能利用率自 2020 年以来持续下滑，水泥及水泥熟料产量也不断减少，产能过剩问题日益凸显，水泥行业正面临长周期结构性调整。

图表 1：2023 年全球水泥产量分布

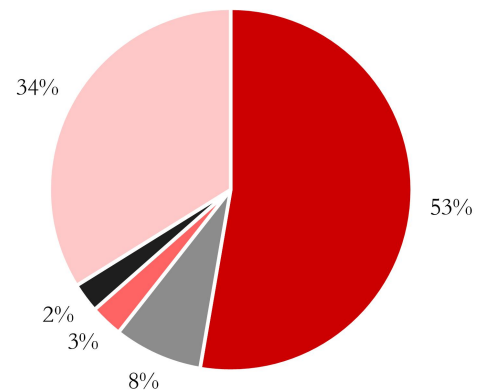
■ 中国 ■ 印度 ■ 越南 ■ 美国 ■ 其他国家



资料来源：US Geological Survey, Cement Statistics and Information, 东证衍生品研究院

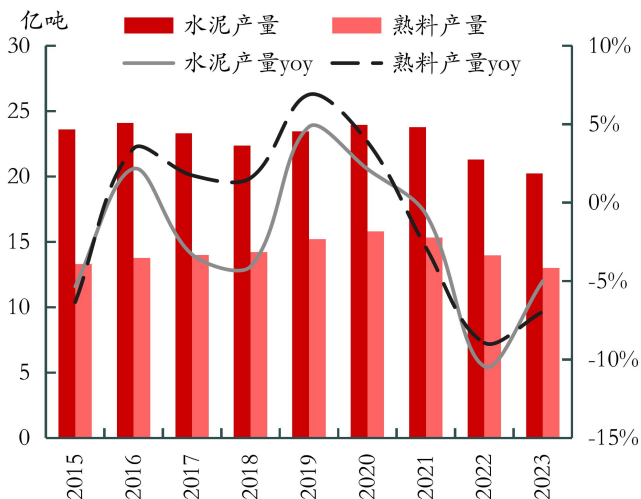
图表 2：2023 年全球水泥熟料产能分布

■ 中国 ■ 印度 ■ 越南 ■ 美国 ■ 其他国家



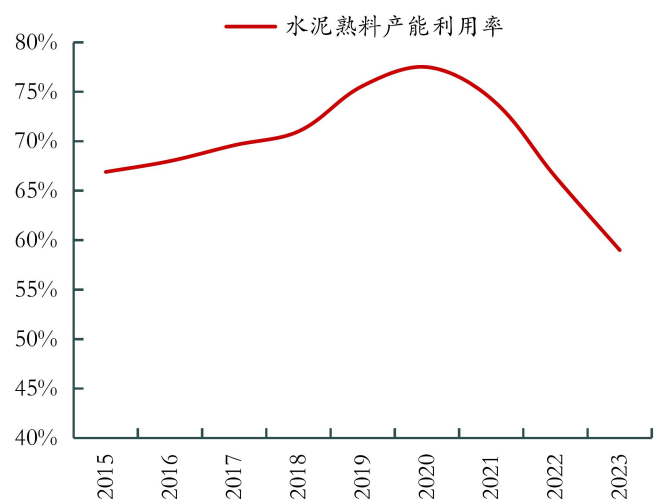
资料来源：US Geological Survey, Cement Statistics and Information, 东证衍生品研究院

图表 3：我国水泥及水泥熟料产量历史变动



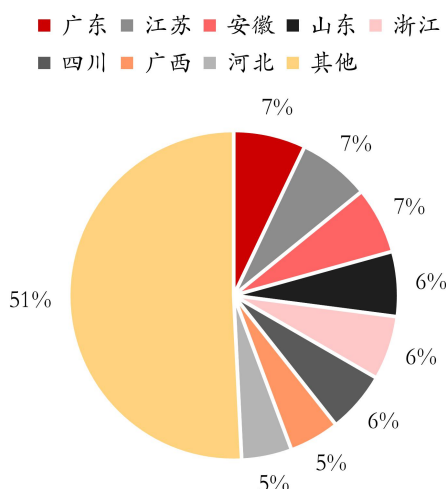
资料来源：生态环境部环评中心，东证衍生品研究院  
\*2023 年熟料产量为估计值

图表 4：我国水泥熟料产能及产量



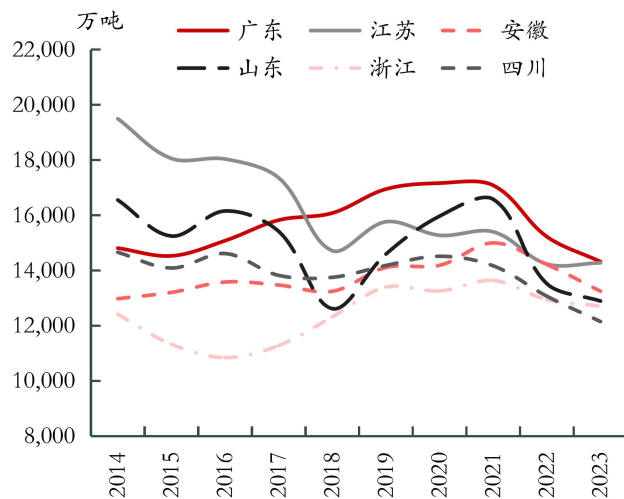
资料来源：数字水泥网，中国水泥协会，东证衍生品研究院

图表 5：2023 年分省水泥产量结构



资料来源：国家统计局，东证衍生品研究院

图表 6：2023 年 TOP6 省份近年水泥产量变化



资料来源：国家统计局，东证衍生品研究院

水泥行业是我国仅次于电力和钢铁行业的第三大碳排放行业，我国水泥行业能源消费约占建材行业的 70%-80%，碳排放量超过全国碳排放总量的 10%。由于近年产量的下降，水泥行业已经提前实现碳达峰，进入了新的绿色发展阶段。

按照水硬性矿物成分，水泥可分为通用硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥、氟铝酸盐水泥等，此外，根据具体的混合材料和技术特性可进一步细分。按照用途和特性，水泥也可以分为两大类，通用水泥和特种水泥，通用水泥即一般建筑工程通常采用的水泥，即通用硅酸盐水泥所包含的六类水泥。特种水泥是指具有特殊性能和用途的水泥，适用于不同的特定的工程项目建设。在我国，特种水泥仅占全部水泥产量的 1-2%。

图表 7：水泥分类（按照水硬性矿物分类）

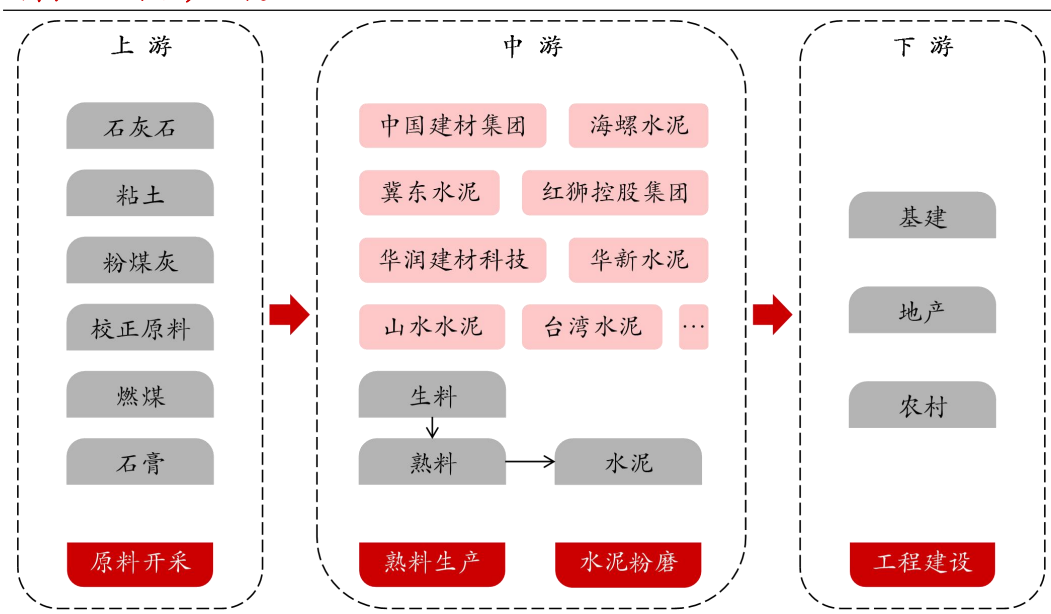
种类	主要水硬性矿物	具体类型	特性/用途
通用硅酸盐水泥	硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙	硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥	适用于一般建筑工程
铝酸盐水泥	铝酸钙	-	早强、耐热、抗硫酸盐腐蚀等
硫铝酸盐水泥	无水硫铝酸钙、硅酸二钙	-	早强、抗渗、抗冻、耐蚀等
铁铝酸盐水泥	无水硫铝酸钙、铁铝酸钙、硅酸二钙	-	快硬、早强、抗渗、抗冻、耐蚀耐磨等
氟铝酸盐水泥	氟铝酸钙、硅酸二钙	-	快硬、抗渗、抗冻、长期强度稳定等

资料来源：GB/T 4131-2014，GB 175-2023，GB/T 20472-2006，公开资料整理，东证衍生品研究院

水泥产业链上游主要是石灰石等原材料以及煤炭和电力等动力来源。石灰石约占生产原材料的 80%，生产一吨水泥熟料大约需要 1.3-1.5 吨石灰石、0.3-0.4 吨粘土以及少量其他

原料。水泥的生产过程可以简称为“两磨一烧”，即生料粉磨、回窑煅烧、熟料粉磨。原料掺混粉磨得到水泥生料，生料在水泥窑中煅烧成熟料，其中，燃煤燃烧后排出的粉煤灰也可以作为水泥熟料生产的原料。水泥熟料中加入适量石膏和其他混合材料粉磨即得到水泥，熟料是主要的水硬性胶凝物质，石膏用于调节水泥的凝结时间，而混合材用于调节水泥某些方面的性质。水泥下游需求主要来自于基建、房地产开发和农村建设。

图表 8：水泥产业链



资料来源：公开资料整理，东证衍生品研究院

## 2、水泥行业的能耗和温室气体排放

### 2.1、水泥生产过程的主要能耗和排放环节

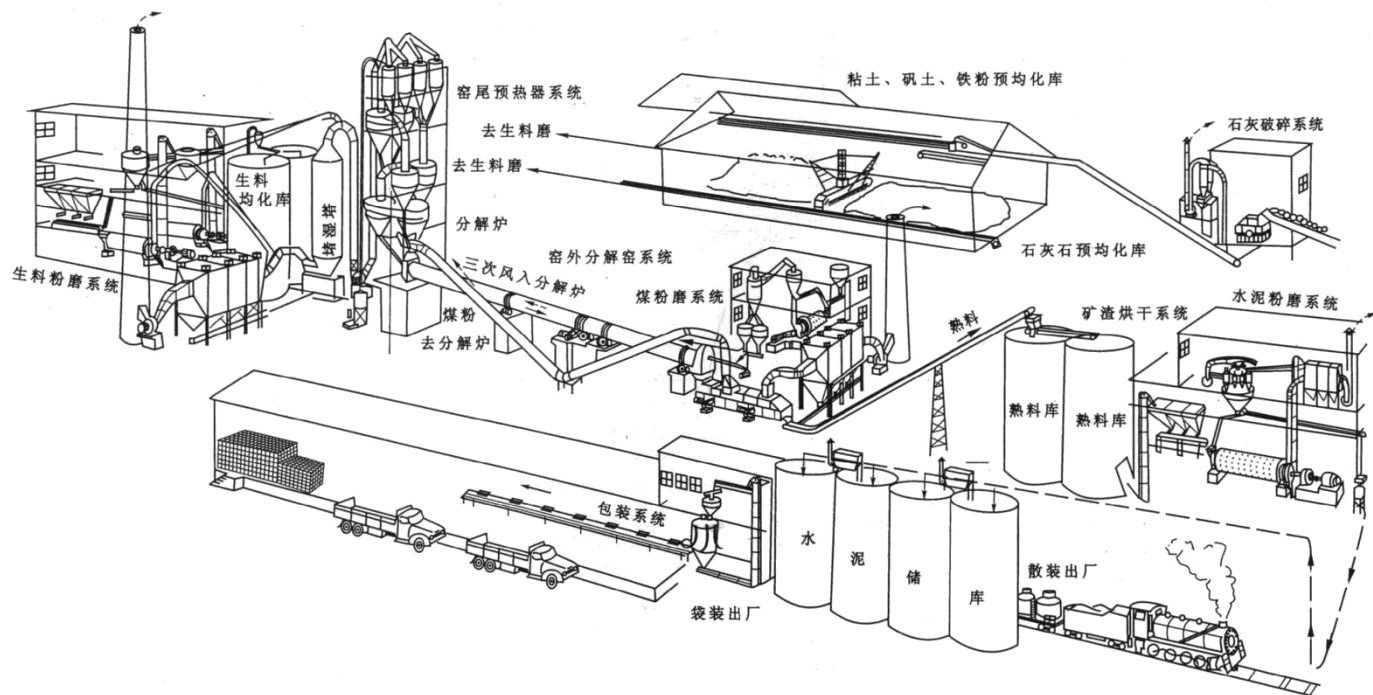
水泥生产过程的能耗主要是化石燃料和电力，温室气体排放则主要来自于燃料燃烧的直接排放和主要冶炼过程中化学反应的直接排放，电力消耗产生的间接排放占比较小。

目前水泥生产所广泛使用的工艺是新型干法水泥生产工艺，该工艺以悬浮预热和预分解技术为核心，采用新型原料、燃料预均化技术和节能粉磨技术及装备，实现水泥生产过程的自动化、高效、低耗和环保。目前我国新型干法水泥占比已接近 100%。

以新型干法水泥回转窑生产工艺为例，主要的电耗系统包括原料预处理系统（破碎、均化、粉磨等）、煤粉磨系统以及水泥粉磨系统等。化石燃料消耗主要用于回转窑内的熟料煅烧过程，其产生的热量可分为三部分，一部分是系统的表面散热，主要有预热器系统、窑系统、篦冷机等，一部分用于熟料烧成，该过程会产生大量的二氧化碳排放，还有一部分废气带走，主要是窑头和窑尾排出的中低温废气，这部分废气可进行余热回收发电，目前我国水泥熟料生产线余热发电系统已达到可装生产线的 95% 以上。



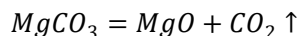
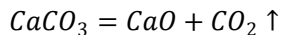
图表 9：新型干法水泥回转窑生产工艺流程图



资料来源：知识贝壳

## 1. 过程排放

过程排放即回转窑中煅烧过程的碳酸盐分解产生的二氧化碳排放，这是水泥生产过程中排放量最大的环节，占总排放量的 60% 左右。石灰石的主要成分是  $\text{CaCO}_3$ ，在熟料煅烧过程中，石灰石受热分解，生成  $\text{CaO}$  并释放出  $\text{CO}_2$ 。石灰石中伴生有白云石，其化学成分为  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ，是熟料中  $\text{MgO}$  的主要来源。



根据 GB 175-2023 规定，硅酸盐水泥熟料中硅酸钙矿物含量（质量分数）不小于 66%， $\text{CaO}$  与  $\text{SiO}_2$  质量比不小于 2.0，则每生产 1 吨水泥熟料理论上排放大约 0.53kg  $\text{CO}_2$ 。

## 2. 化石燃料燃烧排放

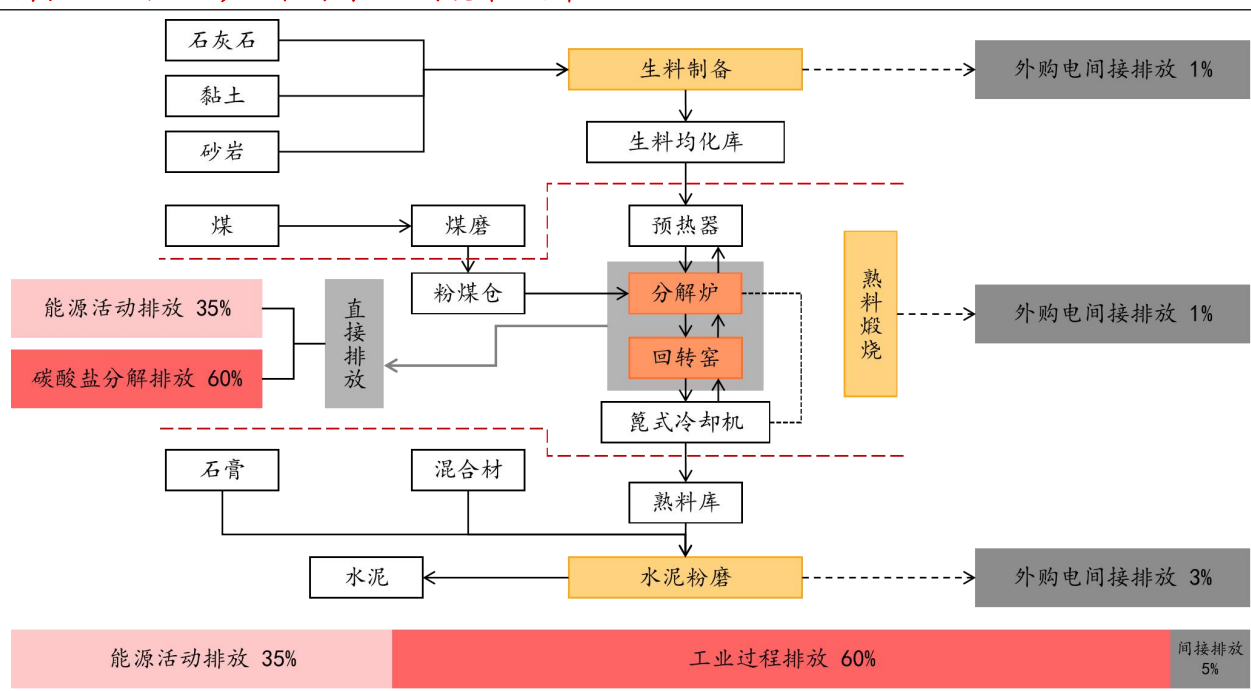
我国水泥行业 92% 以上的热量由烟煤及以烟煤为主的混煤提供。此外，在水泥窑点火时也会使用少量柴油或燃料油。每次水泥窑点火升温需要 3-5 吨柴油，每年每条线约点火 2-10 次，北方近年来错峰生产较多，点火次数也较多。化石燃料燃烧排放占生产过程总排放量的 35% 左右。



### 3. 电力消耗排放

大部分水泥生产企业综合电耗在 65-95kWh/t, 其中熟料生产过程的电耗约为 40-60kWh/t, 水泥粉磨电耗为 25-35kWh/t, 全厂粉磨系统电耗占全部电耗的 60%以上。用电结构上看, 绝大部分生产线配套了余热发电系统, 其发电量可替代约 1/3 的生产用电, 外购电则仍然以煤电为主。

图表 10: 水泥生产流程简图及主要碳排放环节



资料来源：RMI，东证衍生品研究院

## 2.2、我国水泥行业能耗现状

从生产线规模来看, 根据数字水泥网数据, 截至 2023 年底, 我国共有 1537 条在产水泥熟料生产线 (不包括特种水泥), 以 4,000t/d 及以上生产线为主, 最大规模为 12,000t/d, 2,500t/d 以下生产线正在逐步淘汰。

图表 11: 水泥熟料产能规模结构 (截至 2023 年底)

规模 (t/d)	生产线条数	熟料设计产能 (万吨/年)	占比
全国	1537	183,220	100%
4000 (含) 以上	797	126,942	69.3%
2500 (含) -4000	611	50,074	27.3%
2500 以下	129	6,204	3.4%

资料来源：数字水泥网，东证衍生品研究院

生产线规模的扩张在节约人力成本的同时，也明显优化了水泥生产的各项能耗和污染物排放指标。目前，全国多地区已经明确了水泥熟料生产线的整合和退出方案，预计到2025年前后2,500t/d以下生产线将基本淘汰。

**图表 12：水泥熟料落后产能政策梳理**

地区	时间	文件	产能淘汰相关内容
山东	2024年6月	《山东省水泥行业改造提升工作方案（2024-2026）》	加快低效产能淘汰退出，除特种水泥熟料和化工配套水泥熟料生产线外，2500吨/日及以下的水泥熟料生产线2024年底前全部整合退出。
广西	2024年6月	《广西空气质量持续改善行动实施方案》	逐步淘汰2,000t/d以下新型干法水泥熟料生产线（特种水泥生产线除外）、60万吨/年以下水泥粉磨站。
浙江	2024年5月	《浙江省空气质量持续改善行动计划》	加快推进水泥生产重点地区水泥熟料产能整合，到2025年完成不少于8条2500吨/日及以下熟料生产线整合退出。到2025年6月底，水泥行业全面完成有组织、无组织超低排放改造。
重庆	2024年4月	《重庆市材料行业碳达峰实施方案》	鼓励优势企业通过市场化兼并重组方式整合市内低效产能、逐步退出2,500t/d及以下水泥熟料生产线（特种水泥除外）。
福建	2023年6月	《全面实施水泥行业超低排放改造的意见》	鼓励2,500t/d新型干法窑“上大压小”，改造为5000t/d及以上，同步达到超低排放水平。
宁夏	2021年11月	《宁夏回族自治区能耗双控产业结构调整指导目录（试行）》	淘汰2,500t/d以下水泥熟料生产线、JT窑、直径3.2米以下水泥磨机（含矿粉磨机）（2023年，化工配套水泥熟料生产线2024年）；淘汰2,500t/d的水泥熟料生产线（化工配套水泥熟料生产线除外）（2025年）
江西	2021年11月	《江西省“十四五”应对气候变化规划》	加快淘汰2000t/d及以下普通水泥熟料生产线，产能利用率较低的地区加快淘汰2500t/d及以下普通水泥熟料生产线。
吉林	2021年9月	《吉林省冶金建材产业发展“十四五”规划》	通过省内产能置换，建设规模4,000t/d（含）以上熟料生产线，提高单线规模和能效水平，逐步退出2,500t/d以下熟料生产线。

资料来源：公开资料整理，东证衍生品研究院

根据《2022年水泥行业绿色发展水平评估报告》，2021年全国29省（区、市）（上海无熟料企业、西藏未上报）1,080家水泥熟料企业（占全国熟料企业比例约92.4%）能源消费总量约1.78亿吨标准煤，经核查二氧化碳排放量达13.43亿吨，折合单位熟料二氧化碳排放量为0.846吨二氧化碳/吨熟料，较2021年下降0.94%，碳排放强度较低的地区包括新疆、内蒙古、宁夏、陕西、湖北、福建等。

2022年11月，我国正式开始实施新版《水泥单位产品能源消耗限额》（GB 16780-2021），与前一版本（GB 16780-2012）相比，新版标准全面更新了各项能耗限额值，能耗3级指标要求提升了约5%，2级指标提升了约5%-7%，要求生产水泥及水泥熟料产品的现有企业满足3级能耗要求，新建、改建和扩建企业满足2级能耗要求<sup>1</sup>。从新版修订过程的调研数据来看，样本生产线熟料单位产品综合能耗处于1-3级限定值范围内的产能比例分别为5%、20%和75%，即需升级或淘汰约25%的落后熟料产能。

<sup>1</sup> 当企业采用协同处置或替代燃料时，其单位产品综合能耗、综合煤耗与综合电耗计算不包括协同处置消耗的能源量和替代燃料量，综合能耗和综合煤耗计算应扣除余热发电量折算的标准煤量。

图表 13：水泥单位产品能源消耗限额等级

指标	能耗限额等级 (GB 16780-2021)			能耗限额限定值 (GB 16780-2012)		
	1 级	2 级	3 级	先进值	新建	现有
水泥单位产品综合能耗 (kgce/t)	≤ 80	≤ 87	≤ 94	≤ 88	≤ 93	≤ 98
熟料单位产品综合能耗 (kgce/t)	≤ 100	≤ 107	≤ 117	≤ 110	≤ 115	≤ 120
熟料单位产品综合电耗 (kWh/t)	≤ 48	≤ 57	≤ 61	≤ 56	≤ 60	≤ 64
熟料单位产品综合煤耗 (kgce/t)	≤ 94	≤ 100	≤ 109	≤ 103	≤ 108	≤ 112
水泥制备工段电耗 (kWh/t)	≤ 26	≤ 29	≤ 34	≤ 32	≤ 36	≤ 40

资料来源：国家标准化管理委员会

目前，山东、甘肃、新疆、吉林、内蒙古、湖南、云南等地区在近两年公布了全部或部分熟料生产线的能耗或电耗情况。从已公布的数据来看，熟料生产线综合能耗和综合煤耗数据方差较大，但各省均值相对接近；综合电耗数据方差较小，湖南省电耗水平明显低于其他省份。

图表 14：部分地区水泥熟料生产线能耗分布情况

地区	时间	在产水泥生产线 数量 (条)	熟料单位产品综合能耗分布情况				
			1 级	2 级	3 级	不达标	均值 (kgce/t)
山东	2021 年	96	22	23	42	9	108.26
甘肃	2021 年	37	9	-	-	1	-
新疆	2022 年 (自治区)	46	11	8	22	5	107.92
	2022 年 (兵团)	10	3	1	6	0	103.95
吉林	2022 年	20	1	5	14	0	109.24
	2023 年	18	1	8	9	0	106.67
内蒙古	2022 年	42	11	12	19	0	102.05
	2023 年	45	8	10	27	0	107.11
湖南	2023 年	58	12	23	23	0	103.97

资料来源：兵团工信局，甘肃省工信厅，湖南省工信厅，吉林省工信厅，内蒙古自治区工信厅，山东省发改委，新疆维吾尔自治区工信厅，东证衍生品研究院

图表 15：部分地区水泥熟料生产线电耗分布情况

地区	时间	在产水泥生产线 数量 (条)	熟料单位产品综合电耗分布情况				
			1 级	2 级	3 级	不达标	均值 (kWh/t)
云南	2022 年	90	3	35	44	8	57.49
新疆	2022 年 (自治区)	46	5	16	10	5	56.48
	2022 年 (兵团)	10	1	3	5	1	55.72
内蒙古	2023 年	45	2	14	28	1	57.18
湖南	2023 年	58	13	35	10	0	51.62

资料来源：兵团工信局，湖南省工信厅，内蒙古自治区工信厅，新疆维吾尔自治区工信厅，云南省工信厅，东证衍生品研究院

**图表 16：部分地区水泥熟料生产线煤耗分布情况**

地区	时间	在产水泥生产线 数量（条）	熟料单位产品综合煤耗分布情况				
			1 级	2 级	3 级	不达标	均值 (kgce/t)
新疆	2022 年（自治区）	46	10	6	25	5	100.99
	2022 年（兵团）	10	3	1	6	0	96.94
内蒙古	2023 年	45	9	7	28	1	100.09
湖南	2023 年	58	21	18	19	0	95.29

资料来源：兵团工信局，湖南省工信厅，内蒙古自治区工信厅，新疆维吾尔自治区工信厅，东证衍生品研究院

**图表 17：部分地区水泥企业水泥制备工段电耗分布情况**

地区	时间	水泥企业数量 （家）	水泥制备工段电耗分布情况				
			1 级	2 级	3 级	不达标	均值 (kWh/t)
山东	2021 年	290	21	57	147	65	31.92
云南	2022 年	83	7	21	54	1	30.49
新疆	2022 年（自治区）	66	1	8	41	16	32.89
	2022 年（兵团）	12	0	2	9	1	32.50
内蒙古	2023 年	105	9	14	81	1	30.99

资料来源：兵团工信局，湖南省工信厅，内蒙古自治区工信厅，新疆维吾尔自治区工信厅，东证衍生品研究院

从行业整体情况来看，电耗方面，根据水泥网预估，大部分水泥企业熟料单位产品综合电耗在 2 级水平，2023 年全国均值约 56kWh/t；同时由于国内熟料生产线基本都配备了余热发电系统，吨熟料发电量约为 30kWh，扣除余热发电自用电，实际外购电约为 28kWh/t；水泥制备工段电耗均值约为 28-29kWh/t。用煤方面，预计行业平均熟料单位产品综合煤耗约为 105kgce/t。

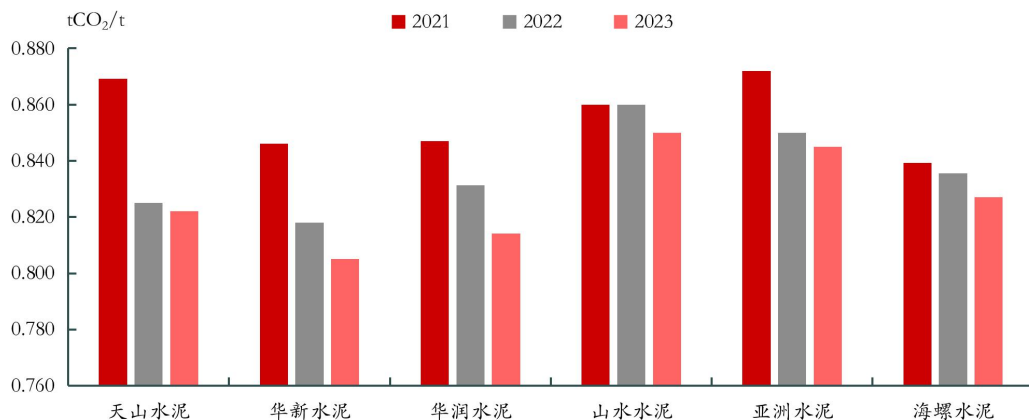
**图表 18：2023 年我国水泥行业能耗情况**

指标	能耗限额等级		
	1 级	2 级	3 级
熟料单位产品综合电耗 行业预估占比情况	5%	60%	30%
熟料单位产品综合煤耗 行业预估占比情况	6%	25%	62%
水泥制备工段电耗 行业预估占比情况	18%	42%	35%

资料来源：中国水泥网

碳排放方面，从相关上市公司来看，在目前可公开查询到相关数据的企业中，华新水泥的熟料碳排放强度处于绝对的行业领先水平，2023 年熟料单位产品碳排放强度为 0.805tCO<sub>2</sub>/t，其黄石公司的碳排放强度仅 0.748tCO<sub>2</sub>/t。华新水泥的碳排放优势主要源自于其高比例的燃料替代率和原料替代率。

图表 19：部分水泥上市公司水泥熟料生产碳排放强度



资料来源：公司公告，东证衍生品研究院

为了规范水泥生产的行业发展秩序、推动水泥行业的节能降耗工作，我国近几年不断出台和完善相关的政策指引。随着水泥熟料生产纳入全国碳市场，碳排放强度大的企业将面临更大的绿色转型压力。根据 GB 16780-2021，国家发展改革委等部门制定了《工业重点领域能效标杆水平和基准水平(2023 年版)》，其中水泥熟料的能耗基准水平为 117kgce/t，标杆水平为 100kgce/t。结合政策指引，预计 2025 年国内所有水泥熟料生产线的综合能耗均在 117kgce/t 以下，30%的生产线在 100kgce/t 以下。

图表 20：水泥行业能效管理政策梳理

时间	文件名称	相关内容
2021 年 7 月	《水泥玻璃行业产能置换实施办法》	位于国家规定的大气污染防治重点区域实施产能置换的水泥熟料建设项目，产能置换比例不低于 2:1；位于非大气污染防治重点区域的水泥熟料建设项目，产能置换比例分别不低于 1.5:1。
2021 年 9 月	《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》	新建、扩建水泥等高耗能高排放项目严格落实产能等量或减量置换。充分发挥政府投资引导作用，构建与碳达峰、碳中和相适应的投融资体系，严控水泥等高碳项目投资。
2021 年 10 月	《2030 年前碳达峰行动方案》	加强产能置换监管，加快低效产能退出，严禁新增水泥熟料、平板玻璃产能，引导建材行业向轻型化、集约化、制品化转型。推动水泥错峰生产常态化，合理缩短水泥熟料装置运转时间。鼓励建材企业使用粉煤灰、工业废渣、尾矿渣等作为原料或水泥混合材。
2021 年 10 月	《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见》	到 2025 年，通过实施节能降碳行动，水泥等重点行业 and 数据中心达到标杆水平的产能比例超过 30%，行业整体能效水平明显提升，碳排放强度明显下降，绿色低碳发展能力显著增强。
2021 年 11 月	《中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》	明确重点区域严禁新增水泥熟料产能。
2022 年 2 月	《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022 版）》	水泥行业要推广节能技术应用，加强清洁能源原燃料替代，合理降低单位水泥熟料用量。到 2025 年，水泥行业能效标杆水平以上的熟料产能比例达到 30%，能效基准水平以下熟料产能基本清零。
2022 年 11 月	《建材行业碳达峰实施方案》	“十四五”期间，水泥等重点产品单位能耗、碳排放强度不断下降，水泥熟料单位产品综合能耗水平降低 3%以上。“十五五”期间，建材行业绿色低碳关键技术产业化实现重大突破，原燃料替代水平大幅提高，基本建立绿色低碳循环发展的产业体系。



2023 年 6 月	《工业重点领域能效标杆水平和基准水平（2023 版）》	对拟建、在建项目，应对照能效标杆水平建设实施。对能效介于标杆水平和基准水平之间的存量项目，鼓励加强绿色低碳工艺技术装备应用。对能效低于基准水平的存量项目，各地要明确改造升级和淘汰时限。
2023 年 11 月	《空气质量持续改善行动计划》	高质量推进水泥等重点行业及燃煤锅炉超低排放改造。
2023 年 12 月	《关于印发集成电路制造、锂离子电池及相关电池材料制造、电解铝、水泥制造四个行业建设项目环境影响评价文件审批原则的通知》	新建、改建、扩建水泥熟料制造项目应采用资源利用率高、污染物产生量小的清洁生产技术、工艺和设备，单位产品的物耗、能耗、水耗、资源综合利用和污染物产生量等指标应达到清洁生产国内先进水平。水泥熟料制造项目应配置余热回收利用装置。新建水泥熟料制造项目的单位产品综合能耗应达到能效标杆水平，鼓励改建、扩建水泥熟料制造项目的单位产品综合能耗达到能效标杆水平。
2023 年 12 月	《产业结构调整指导目录（2024 年本）》	限制类项目：2000 t/d（不含）以下新型干法水泥熟料生产线（特种水泥生产线除外），60 万吨/年（不含）以下水泥粉磨站。
2024 年 1 月	《关于推进实施水泥行业超低排放的意见》	推动现有水泥企业超低排放改造，到 2025 年底前，重点区域取得明显进展，50%左右的水泥熟料产能完成改造；到 2028 年底前，重点区域水泥熟料生产企业基本完成改造，全国力争 80%左右水泥熟料产能完成超低排放改造。开展节能减污降碳技术改造，严格执行水泥单位产品能源消耗限额要求，吨熟料二氧化碳直接排放不高于 0.85 吨。
2024 年 5 月	《水泥行业节能降碳专项行动计划》	到 2025 年底，水泥熟料产能控制在 18 亿吨左右，能效标杆水平以上产能占比达到 30%，能效基准水平以下产能完成技术改造或淘汰退出，水泥熟料单位产品综合能耗比 2020 年降低 3.7%。2024—2025 年，通过实施水泥行业节能降碳改造和用能设备更新形成节能量约 500 万吨标准煤、减排二氧化碳约 1,300 万吨。到 2025 年底，水泥窑使用替代燃料技术生产线比例达到 30%，水泥行业替代燃料消费比例力争达到 10%。到 2025 年底，水泥行业综合利用废弃物总量达到 8 亿吨。

资料来源：公开资料整理，东证衍生品研究院

2024 年 4 月，工信部对 2023 年重点行业能效“领跑者”进行公示，水泥行业 4 家企业入选高替代燃料企业熟料单位产品综合能耗最低为 78.18kgce/t，少量替代燃料企业熟料单位产品综合能耗最低为 89.66kgce/t，代表了我国水泥行业的能效先进水平。

**图表 21：2023 年度水泥熟料行业能效“领跑者”企业**

	企业	熟料单位产品综合能耗 (kgce/t)
高替代燃料	华新水泥（道县）有限公司	78.18
	华新水泥（黄石）有限公司	79.28
少量替代燃料	吴忠赛马新型建材有限公司	89.66
	冀东海天水泥闻喜有限责任公司	90.23

资料来源：工信部

### 3、水泥行业即将纳入全国碳市场

#### 3.1、水泥熟料生产温室气体排放核算浅析

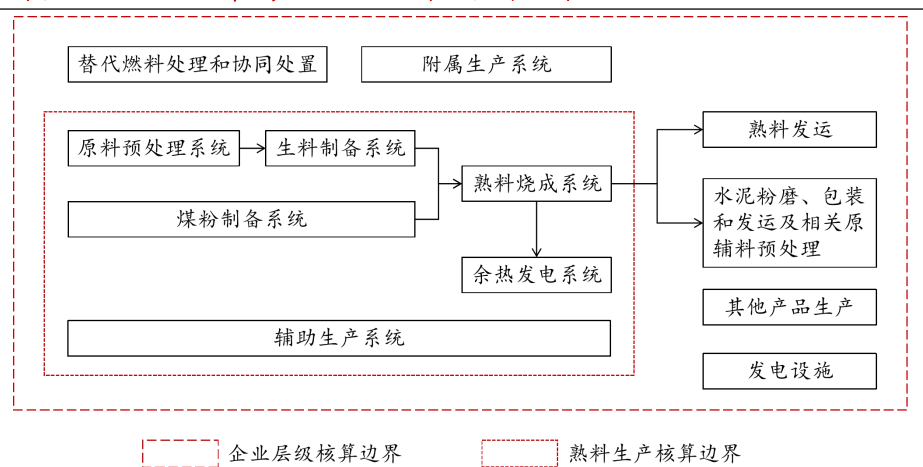
根据生态环境部 2024 年 4 月 3 日发布的《企业温室气体排放核算与报告指南 水泥熟料生产》（征求意见稿）（以下简称《指南》），水泥熟料生产企业熟料生产的核算边界为从原燃料进入生产产区到熟料入库为止，其中：a）主要生产系统包括用于熟料生产的原料预处理、生料制备、煤粉制备、熟料烧成、余热发电系统，不包括水泥粉磨及其相关



原辅料预处理；b) 辅助生产系统包括除尘及脱硫脱硝系统、机修车间、空压机组、化验室、中控室、生产照明等，不包括替代燃料处理和协同处置系统。

考虑到数据质量管理以及核算和监管能力等问题，目前《指南》仅对设施层级即熟料生产工序的碳排放进行配额分配和排放核查，企业层级的碳排放仅作为报告项，不开展核查。因此目前我们重点关注熟料生产过程中的温室气体排放。

图表 22：水泥熟料生产温室气体排放核算边界



资料来源：生态环境部，东证衍生品研究院

水泥熟料生产的化石燃料燃烧排放量的计算公式为：

$$E_{\text{ck 燃烧}} = FC_{\text{ck}} \times NCV_{\text{ar}} \times CC \times OF \times \frac{44}{12}$$

图表 23：化石燃料燃烧排放计算相关参数

符号	内涵	单位	取值
$E_{\text{ck 燃烧}}$	化石燃料燃烧排放量	吨二氧化碳 (tCO <sub>2</sub> )	-
$FC_{\text{ar}}$	燃煤消耗量	吨 (t)	实测值
$NCV_{\text{ar}}$	燃煤收到基低位发热量	吉焦/吨 (GJ/t)	缺省值或实测值
$CC$	燃煤单位热值含碳量	吨碳/吉焦 (tC/GJ)	缺省值
$OF$	燃煤碳氧化率	%	缺省值

资料来源：生态环境部

《指南》中指出，燃煤低位发热量使用缺省值，而只有满足一些特定条件时方可使用实测值，且这些条件较为严苛，大部分企业难以达到。燃料化石燃料使用情况除了受到水泥窑热值利用率的影响外，也取决于水泥生产线使用垃圾衍生燃料、固体回收燃料、生物质燃料、市政污泥等替代燃料的使用情况。

图表 24：常用化石燃料相关参数缺省值

化石燃料品种		计量单位	低位发热量 (GJ/t, GJ/10 <sup>4</sup> Nm <sup>3</sup> )	单位热值含碳量 (tC/GJ)	碳氧化率 (%)
固体	水泥生产用燃煤	t	23.076	0.02618	99（水泥窑）
液体	原油	t	41.816	0.02008	98
	燃料油	t	41.816	0.02110	
	汽油	t	43.070	0.01890	
	柴油	t	42.652	0.02020	
	煤油	t	43.070	0.01960	
	液化天然气	t	51.498	0.01720	
	液化石油气	t	50.179	0.01720	
	焦煤油	t	33.453	0.02200	
气体	天然气	10 <sup>4</sup> Nm <sup>3</sup>	389.310	0.01532	99
	高炉煤气	10 <sup>4</sup> Nm <sup>3</sup>	33.000	0.07080	
	转炉煤气	10 <sup>4</sup> Nm <sup>3</sup>	84.000	0.04960	
	焦炉煤气	10 <sup>4</sup> Nm <sup>3</sup>	173.854	0.01210	
	炼厂干气	t	45.998	0.01820	

资料来源：生态环境部

过程排放的计算公式为：

$$E_{\text{ck 过程}} = Q_{\text{ck}} \times EF_{\text{ck}} - \sum_{i=1}^n (Q_{\text{a,i}} \times EF_{\text{a,i}})$$

若企业熟料的采样、制样、检测实施全流程视频监控且实验室通过中国合格评定国家认可委员会（CNAS）认可，熟料的过程排放因子可按以下公式计算：

$$EF_{\text{ck}} = FR_1 \times \frac{44}{56} + FR_2 \times \frac{44}{40}$$

图表 25：过程排放计算相关参数

符号	内涵	单位	取值
$E_{\text{ck 过程}}$	熟料生产的过程排放量	吨二氧化碳（tCO <sub>2</sub> ）	-
$Q_{\text{ck}}$	熟料产量	吨（t）	实测值
$EF_{\text{ck}}$	过程排放因子	吨二氧化碳/吨（tCO <sub>2</sub> /t）	缺省值或实测值
$Q_{\text{a,i}}$	第 i 类非碳酸盐替代原料消耗量	吨（t）	实测值
$EF_{\text{a,i}}$	第 i 类非碳酸盐替代原料对应的扣减系数	吨二氧化碳/吨（tCO <sub>2</sub> /t）	缺省值
$FR_1$	氧化钙含量	%	实测值
$FR_2$	氧化镁含量	%	实测值

资料来源：生态环境部

水泥生产过程中，可以利用非碳酸盐原料来替代一定比例的石灰石。常用的非碳酸盐原料主要包括电石渣、钢渣、造纸白泥、脱硫石膏、磷石膏、硫酸渣等，其中电石渣的主要成分是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，含量最高可达 90% 以上，因此其减排潜力最大。如果电石渣替代比例达到 100%，则硅酸盐水泥熟料的过程排放强度约为  $0.055\text{tCO}_2/\text{t}$ ，按照 100 元/吨的碳价计算，全电石渣熟料生产线的碳排放成本将比不使用替代原料的生产线减少 48 元/吨熟料。如果不使用非碳酸盐替代原料，那么水泥熟料的最大过程排放强度即为生态环境部发布的对应的过程排放因子，其中白色硅酸盐水泥熟料过程排放因子最大，铝酸盐水泥熟料的过程排放因子最小。由于我国水泥熟料产品中约 98% 为硅酸盐水泥熟料，因此下文主要讨论硅酸盐水泥熟料的碳排放强度。

**图表 26：熟料对应的过程排放因子的取值**

熟料	过程排放因子 ( $\text{tCO}_2/\text{t}$ )
硅酸盐水泥熟料	0.535
白色硅酸盐水泥熟料	0.550
硫（铁）铝酸盐水泥熟料	0.413
铝酸盐水泥熟料	0.292

资料来源：生态环境部

**图表 27：非碳酸盐替代原料对应的扣减系数**

原料	扣减系数 ( $\text{tCO}_2/\text{t}$ )
电石渣	0.480
熟石灰、镁渣、铁合金炉渣	0.430
钢渣、黄磷渣、钒钛渣、氮渣、造纸白泥、飞灰	0.325
脱硫石膏、磷石膏、钛石膏、氟石膏、硼石膏、模型石膏	0.245
硫酸渣、镍渣、锰渣、锌渣、锡渣	0.116

资料来源：生态环境部

电力消耗排放的计算公式为：

$$E_{\text{ck 电}} = \left( AD_{\text{消耗电}} - AD_{\text{余热发电}} - AD_{\text{购入电网非化石电}} - AD_{\text{自发自用非化石电}} \right) \times EF_{\text{电}}$$

与铝冶炼行业排放核算不同的是，在计算水泥熟料消耗电力时，需要额外扣除余热发电量，目前我国绝大部分水泥熟料生产线都配套了余热发电系统，且整体热值回收率较高。但由于电力消耗产生的间接排放在水泥熟料生产过程中占比极小，因此不同水泥熟料生产企业排放强度的差异可能主要还是来自于替代原料和替代燃料的利用情况。

以电石渣替代率为例，我们计算了不同煤耗、电耗和原料替代率水平下硅酸盐水泥熟料生产线的碳排放强度，主要落在  $0.35\text{--}0.88\text{tCO}_2/\text{t}$  的区间内。如果不考虑原料替代，则大部分硅酸盐水泥熟料生产线的碳排放强度区间为  $0.825\text{--}0.896\text{tCO}_2/\text{t}$ 。

**图表 28：硅酸盐水泥熟料生产不同原料/燃料替代水平对应碳排放强度**

熟料单位产品综合 煤耗 (kgce/t)	熟料单位产品综合 电耗 (kWh/t)	电石渣 替代率	直接碳排放强度 (tCO <sub>2</sub> /t)	间接碳排放强度 (tCO <sub>2</sub> /t)	总碳排放强度 (tCO <sub>2</sub> /t)
94	48	0%	0.7965	0.0285	0.8250
		100%	0.3165	0.0285	0.3450
	57	0%	0.7965	0.0339	0.8303
		100%	0.3165	0.0339	0.3504
	61	0%	0.7965	0.0362	0.8327
		100%	0.3165	0.0362	0.3527
100	48	0%	0.8132	0.0285	0.8416
		100%	0.3332	0.0285	0.3616
	57	0%	0.8132	0.0339	0.8470
		100%	0.3332	0.0339	0.3670
	61	0%	0.8132	0.0362	0.8494
		100%	0.3332	0.0362	0.3694
109	48	0%	0.8605	0.0285	0.8890
		100%	0.3805	0.0285	0.4090
	57	0%	0.8605	0.0339	0.8943
		100%	0.3805	0.0339	0.4143
	61	0%	0.8605	0.0362	0.8967
		100%	0.3805	0.0362	0.4167

资料来源：东证衍生品研究院

注：水泥生产用燃煤外其他化石燃料的使用情况忽略不计；假设可予以扣除的耗电量占用电量的 50%

### 3.2、水泥熟料生产配额分配方案的设想

目前，将水泥熟料生产纳入管控范围的碳市场主要包括欧盟碳市场、美国加州碳市场，以及我国北京、广东、天津、重庆、福建和湖北试点碳市场，其中除了天津试点碳市场使用历史强度法计算配额分配量外，其余碳市场均使用基准线法。各试点碳市场在核算边界上存在微小差异，但基本都落在我们前文计算的碳排放强度区间内。因此我们认为，水泥行业纳入全国碳市场后，大概率仍然使用基准线法计算配额分配数量，同时延续行业总体均衡的原则，不额外增加行业负担。

**图表 29：其他碳市场水泥行业基准值设定**

碳市场	适用时间	配额计算方法	基准值 (tCO <sub>2</sub> e/t) / 计算公式	覆盖范围
欧盟碳市场	2021-2025 年	基准线法	0.693	直接排放
美国加州碳市场	2019 年至今	基准线法	0.742	直接排放
北京试点碳市场	2023 年	基准线法	水泥熟料生产: 0.86 协同处置废弃物(a 类): 0.3 协同处置废弃物(b 类): 0.1	直接排放+ 间接排放
广东试点碳市场	2023 年	基准线法	4000t/d (含) 以上普通熟料生产线: 0.884 2000 (含) -4000t/d 普通熟料生产线: 0.8909 2000t/d 以下普通熟料生产线: 0.950 白水泥熟料生产线: 1.108	
天津试点碳市场	2023 年	历史强度法	2023 年产量×2022 年碳排放强度×0.98	
重庆试点碳市场	2023 年	基准线法	0.811 (征求意见稿)	
	2022 年	基准线法	0.8244	
福建试点碳市场	2022 年	基准线法	4000t/d (含) 以上熟料生产线: 0.8191 2000 (含) -4000t/d 熟料生产线: 0.8253	
湖北试点碳市场	2022 年	基准线法	2022 年位于第 50%位水泥企业的单位熟料碳排放强度	

资料来源：北京市生态环境局，重庆市生态环境局，福建省生态环境厅，广东省生态环境厅

如前述，水泥熟料生产的碳排放强度差异主要来自于替代原料和替代燃料的利用情况，因此基准值的设定应当以行业整体原料替代率和燃料替代率为重要数据依据。

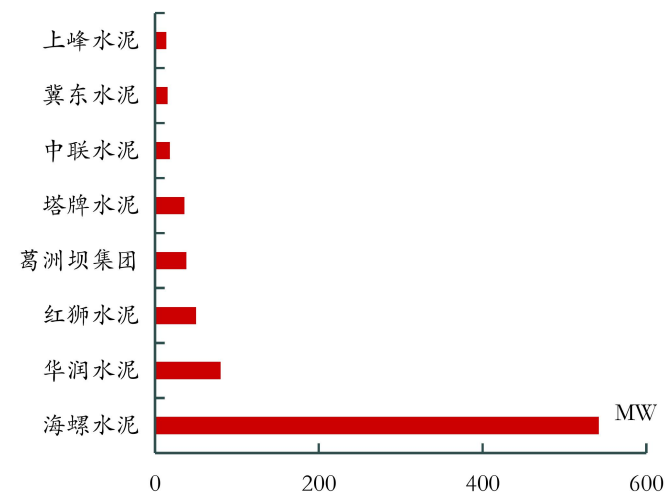
首先，原料替代方面，电石渣是最常用的替代原料，目前已基本实现在水泥行业的全部固废利用；其他类型的替代原料存在不同程度的应用限制，替代率较低。据不完全统计，目前全国有超过 30 条全电石渣水泥熟料生产线，其产能占全国总产能的约 1.35%，再加上使用部分替代原料的生产线，考虑部分上市公司整体原料替代率情况，我们假设全国水泥行业原料替代率约为 2%-3%，则硅酸盐水泥熟料的实际平均过程排放因子约为 0.5190-0.5243tCO<sub>2</sub>/t。

其次，燃料替代情况，我国目前水泥行业燃料替代率仅约 5%。根据生态环境部统计，水泥行业 92% 以上的热量由烟煤及以烟煤为主的混煤提供。按照前文的预估，假设行业平均熟料单位产品综合煤耗（已扣除替代燃料量和余热发电折算量）约为 105kgce/t，未扣除替代燃料量和余热发电量的实际综合煤耗约为 114.41kgce/t，折算为热值即为约 3.35GJ/t，其中 92% 的热值折算为水泥生产用燃煤，即每吨水泥熟料消耗约 133.51 千克燃煤，3% 的热量折算为柴油，即每吨水泥熟料消耗约 2.36 千克柴油。其他部分按照基准值计算，则单位熟料的化石燃料燃烧排放强度行业均值约为 0.30tCO<sub>2</sub>/t。

最后，用电结构方面，如前文所述，扣除余热发电自用电，熟料生产净输入电量约为 28kWh/t。我们收集整理了部分水泥生产集团的光伏装机情况和发电量情况，其中，截至 2023 年底，海螺水泥共有 542MW 在运行光伏发电装机，在行业中处于遥遥领先地位，2023 年累计光伏发电量为 4.29 亿千瓦时。海螺水泥、华润水泥、红狮水泥、葛洲坝集团等 8 家水泥集团共建成约 800MW 光伏发电体系。据不完全统计，截至 2023 年底，水泥行业

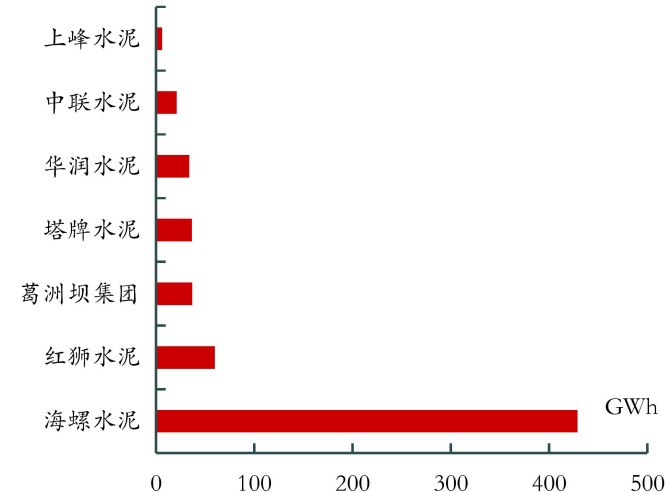
光伏发电装机量约 1GW，2023 年全年发电量约 8 亿千瓦时，仅占净输入电量的约 2%。  
不考虑绿电交易情况，则单位熟料电力消耗碳排放强度行业均值约为 0.0163tCO<sub>2</sub>/t。

图表 30：部分水泥集团 2023 年光伏装机情况



资料来源：公开资料整理，公司公告，东证衍生品研究院  
注：红狮水泥、中联水泥为估计值

图表 31：部分水泥集团 2023 年光伏发电量



资料来源：公开资料整理，公司公告，东证衍生品研究院  
注：红狮水泥、中联水泥为估计值

综上,我们预计 2023 年我国硅酸盐水泥熟料生产平均碳排放强度约为 0.8353-0.8407tCO<sub>2</sub>/t。白色硅酸盐水泥熟料碳排放强度略高于该值,硫(铁)铝酸盐水泥熟料和铝酸盐水泥熟料的碳排放强度则相对较低,基准值设定应与之类似。

除了按照熟料种类进行划分外,参考地方碳市场的配额分配方案,全国碳市场中硅酸盐水泥熟料基准值的设定可能也会按照生产线规模来进一步划分,规模越大,基准值越小。我们假定将硅酸盐水泥熟料划分为 4000t/d(含)以上、2000(含)-4000t/d 以及 2000t/d 以下。按照行业总体均衡原则设定基准值,那么硅酸盐水泥熟料的基准值均值或落在 0.835-0.841tCO<sub>2</sub>/t 的范围内,参考广东碳市场,我们假定三类生产线的基准值分别为 0.835、0.842、0.900tCO<sub>2</sub>/t,其他三类特种水泥熟料的基准值按照对应排放因子的差异进行折减。

图表 32：全国碳市场水泥行业基准值假设

熟料类型	基准值 (tCO <sub>2</sub> e/t)
硅酸盐水泥熟料	4000t/d(含)以上普通熟料生产线: 0.835 2000(含)-4000t/d 普通熟料生产线: 0.842 2000t/d 以下普通熟料生产线: 0.900
白色硅酸盐水泥熟料	0.850
硫(铁)铝酸盐水泥熟料	0.713
铝酸盐水泥熟料	0.592

资料来源：东证衍生品研究院



### 3.3、部分水泥熟料生产企业配额盈缺情况

2006 至 2016 年，我国前十大水泥集团企业熟料产能集中度从 16% 上升至 57%，此后基本稳定在 57%-58% 的水平，产能排在前列的集团主要包括新天山水泥、海螺水泥、冀东水泥等，部分上市公司在其 ESG 报告中公布了熟料生产的煤耗、电耗、清洁能源利用或替代原燃料的使用情况。基于前文我们对配额基准值的假设，经计算，水泥行业配额盈余将主要集中于新天山水泥、海螺水泥、冀东水泥和华新水泥等集团企业，这些企业的优势主要在于较低的产品煤耗。

图表 33：部分水泥生产集团配额盈缺情况

集团企业名称	2023 年熟料产量 (亿吨)	综合煤耗 (kgce/t)	余热发电量 (GWh)	原料替代率 (%)	燃料替代率 (%)	熟料电耗 (kWh/t)	清洁能源使用电量 (亿 kWh)	碳排放强度 (tCO <sub>2</sub> /t)	配额盈余 (万吨)
天山股份	2.05	100.22		2.13*	1.57	50.02	0.4*	0.8223	310
海螺水泥	1.90 <sup>#</sup>	96.5*		2*	8	50*	4.29	0.8114	464
冀东水泥	0.68 <sup>#</sup>	98*		8.21	8.08	54*	-	0.7860	345
红狮集团	0.47	96*		1*	13.5	52*	0.69	0.8160	88
华润建材科技	0.51	98.2	1,536	0.13*	5.55	52*	0.40	0.8282	39
华新水泥	0.52	88.5*		3.24*	22.8	52*	-	0.7848	277
山水水泥	0.35	98.6	1,403	1*	1.5*	54	-	0.8298	22
亚洲水泥	0.23	102*		0.7*	0.5*	54*	-	0.8374	-5
上峰水泥	0.16	102.57	4,730	1*	-	52.37	0.06	0.8362	0
葛洲坝集团	0.12 <sup>#</sup>	102*		3*	-	54*	0.37	0.8233	16

资料来源：公开资料整理，东证衍生品研究院

注：标<sup>#</sup>产量以 70% 产能利用率计算；\* 为预估值；不考虑特种水泥熟料；过程排放默认使用缺省值，可能与实测值存在较大误差。

此外，针对水泥熟料生产过程中的关键指标，即煤耗、电耗、原料替代、燃料替代等指标，我们计算了仅使用替代原料、仅使用清洁能源电力以及均不使用三种情形下企业能够维持配额盈亏平衡所需要达到的综合煤耗水平<sup>2</sup>。此处，吨熟料余热发电量取行业均值 30kWh/t，熟料单位产品综合电耗取 2 级能耗限额 57kWh/t。根据计算结果，针对 4000t/d 及以上规模水泥熟料生产线（即基准值约为 0.835tCO<sub>2</sub>/t），如果其熟料单位产品综合煤耗和电耗均能达到 2 级能耗等级以上水平，则大概率不会存在配额缺口或缺口较小；如果原料替代率能达到 5.54% 以上，则熟料单位产品综合煤耗和电耗均能放宽至 3 级能耗等级；全部使用清洁能源电力能替代约 5.8 kgce/t 的燃煤消耗。

<sup>2</sup> 根据 GB 16780-2021，综合煤耗指标的计算应扣除替代燃料量，即燃料替代率不影响综合煤耗数值，故此处不考虑仅使用替代燃料的情形。

图表 34：配额盈亏平衡的标准情形

情形	综合煤耗 (kgce/t)	吨熟料余热发电 (kWh/t)	原料替代 率 (%)	熟料电耗 (kWh/t)	清洁电力 占比 (%)	碳排放强度 (tCO <sub>2</sub> /t)
不使用替代原料和清洁能源电力	99.12	30	0	57	0	0.835
	100.04	40	0	57	0	0.835
	101.06	30	0	48	0	0.835
使用替代原料、不使用清洁能源电力	101.06	30	1	57	0	0.835
	109.00	30	5.54	61	0	0.835
	117.63	30	10	61	0	0.835
使用清洁能源电力、不使用替代原料	100.57	30	0	57	25	0.835
	102.02	30	0	57	50	0.835
	104.93	30	0	57	100	0.835

资料来源：公开资料整理，东证衍生品研究院

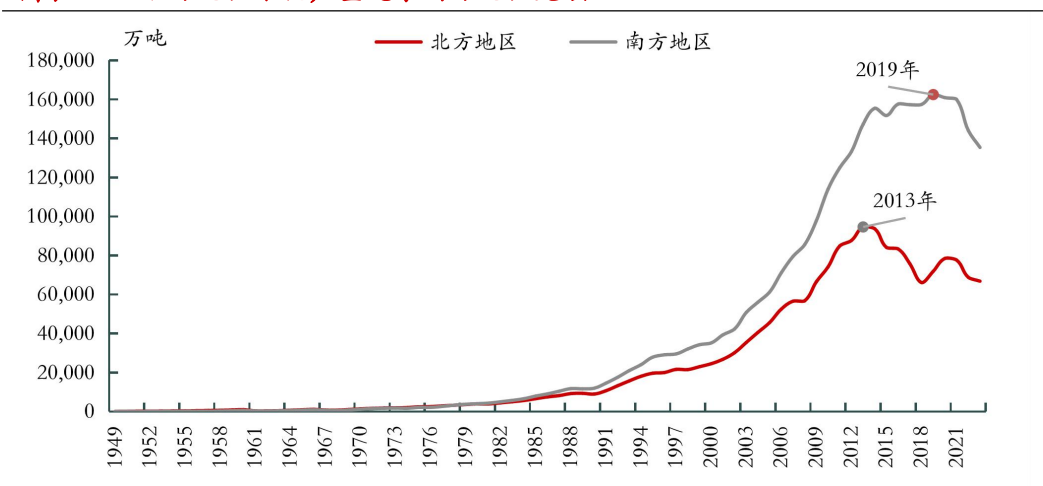
注：仅针对 4000t/d 及以上规模水泥熟料生产线

## 4、水泥行业减排展望

### 4.1、排放总量控制：从“去产量”到“去产能”

2014 年，我国水泥产量见顶，达到了历史最高的 24.9 亿吨，此后进入窄幅震荡阶段，直到 2022 年产量才出现了大幅下降。2014 年总量见顶的原因是北方市场需求的见顶及迅速回落，而南方市场需求仍处于上升通道中，同时大体弥补了北方市场需求的下降，使得全国水泥产量进入平台期。

图表 35：北方地区水泥产量先于南方地区见顶



资料来源：国家统计局，东证衍生品研究院

北方需求见顶使得水泥产能过剩矛盾更加突出，2014 年 11 月，新疆维吾尔自治区率先在全国实施“错峰生产”，通过 4-5 个月的错峰停窑，一定程度上缓解了产能过剩矛盾。之

后，东北三省及北京、天津、山东等省市也开展了错峰生产试点，成效显著。2015 年 11 月，工信部与环保部联合发布《关于在北方采暖区全面试行冬季水泥错峰生产的通知》，将错峰生产这一调控手段在北方全面铺开，2020 年 12 月，水泥常态化错峰生产在全国开展。从政策目的上看，错峰生产一方面是为了缓解产能过剩矛盾，另一方面是为了控制水泥行业的污染排放。

图表 36：水泥行业错峰生产政策

时间	文件	主要内容	关于政策目的表述
2015 年 11 月	《关于在北方采暖区全面试行冬季水泥错峰生产的通知》	北方地区 2015—2016 年采暖季全面试行水泥错峰生产。	减缓大气污染，缓解产能严重过剩矛盾，促进水泥行业节能降耗，提质增效。
2016 年 10 月	《关于进一步做好水泥错峰生产的通知》	在 2015 年北方地区全面试行错峰生产的基础上，进一步做好 2016—2020 年期间水泥错峰生产，包括利用电石渣生产水泥的生产线都应进行错峰生产。	化解水泥行业产能严重过剩矛盾，合理缩短水泥熟料装置运转时间，有效压减过剩熟料产能，同时避免水泥熟料生产排放与取暖锅炉排放叠加，减轻采暖期大气污染。
2020 年 12 月	《关于进一步做好水泥常态化错峰生产的通知》	推动全国水泥错峰生产地域和时间常态化。所有水泥熟料生产线都应进行错峰生产。各地工业和信息化主管部门要组织电石渣生产水泥熟料的生产线与当地非电石渣水泥熟料生产企业沟通协调，通过“错峰置换”参与错峰生产。	进一步巩固去产能成果，促进水泥行业绿色低碳发展和质量效益提升。

资料来源：工信部，东证衍生品研究院

尽管错峰生产成效在短期相对明显，但长期来看较为有限，甚至会对行业产生负面影响。错峰生产发挥了“去产量”的作用，但并未根本性解决产能过剩的问题。错峰生产让能耗低和能耗高的生产线同时停产，在一定程度上保护了高能耗、高成本的产能，阻碍了落后产能通过市场机制完成出清，甚至可能使得部分“僵尸产能”复产。错峰生产的效果日渐削弱，错峰模式也发生了一定的变化，各地停窑时间大幅增加，2017 年，全国水泥错峰停窑时间不到 60 天，2023 年许多省市的计划停窑天数已经超过了 100 天，实际后续又延长了停窑时间。而 2024 年，部分地区计划全年停窑天数已经达到了 200 天，如果继续按照这种模式运转下去，无疑会带来资源浪费等问题，并且会打击低能耗、低排放的优质企业。

因此，无论是通过提高能耗门槛引导低效产能退出，还是通过更加严格的产能置换来优化产能质量，最终都必须通过“去产能”来根本性地解决供需矛盾，同时优化内部产能结构，实现更加可持续的排放总量下降。

## 4.2、降低熟料系数：提升固废利用水平

水泥熟料系数即生产一定量的水泥所需要的水泥熟料的质量占比。熟料系数通常取决于水泥品种、熟料成分、水泥的配比以及生产过程中的损耗等因素。低熟料系数意味着单位质量水泥所掺加的熟料比例更少，碳排放强度更低，是水泥行业减排的重要方向。目

前我国水泥熟料系数约为 60%-65%，远低于全球平均水平以及欧盟水平。我国近年来关于水泥行业低碳发展的文件无疑都提及了关于降低水泥熟料系数的发展方向。

图表 36：低熟料系数水泥

时间	文件	相关表述
2022 年 2 月	《水泥行业节能降碳改造升级实施指南》	推动以高炉矿渣、粉煤灰等工业固体废物为主要原料的超细粉替代普通混合材，提高水泥粉磨过程中固废资源替代熟料比重，降低水泥产品中熟料系数，减少水泥熟料消耗量，提升固废利用水平。合理推动高贝特水泥、石灰石煅烧黏土低碳水泥等产品的应用。
2024 年 1 月	《关于推进实施水泥行业超低排放的意见》	提高矿渣、粉煤灰工业废物掺加比例，降低熟料系数。
2024 年 5 月	《水泥行业节能降碳行动方案》	支持发展低钙水泥熟料、低熟料系数水泥、硫（铁）铝酸盐等特种水泥。

资料来源：工信部，东证衍生品研究院

根据自 2024 年 6 月 1 日开始实施的新版《通用硅酸盐水泥》标准（GB 175-2023），目前通用硅酸盐水泥中允许掺加的混合材料包括粒化高炉矿渣/矿渣粉、石灰石、粉煤灰、火山灰质混合材料和砂岩。其中硅酸盐水泥允许掺加的混合材料比例上限最低，矿渣硅酸盐水泥允许掺加的比例上限最高。

图表 37：通用硅酸盐水泥的组分要求

品种	代号	组分（质量分数）/%				
		熟料+石膏	混合材料			
			粒化高炉矿渣/矿渣粉		石灰石	
硅酸盐水泥	P·I	100	-		-	
	P·II	95~100	0~5		-	
			-		0~5	
		熟料+石膏	主要混合材料			替代混合材料
			粒化高炉矿渣/矿渣粉	粉煤灰	火山灰质混合材料	
普通硅酸盐水泥	P·O	80~94	6~20			0~5
矿渣硅酸盐水泥	P·S·A	50~79	21~50	-	-	0~8
	P·S·B	30~49	51~70	-	-	
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	60~79	-	21~40	-	0~5
火山灰质硅酸盐水泥	P·P	60~79	-	-	21~40	
		熟料+石膏	混合材料			
			粒化高炉矿渣/矿渣粉	粉煤灰	火山灰质混合材料	石灰石
复合硅酸盐水泥	P·C	50~79	21~50			

资料来源：GB 175-2023

目前普通硅酸盐水泥是六类通用硅酸盐水泥中产量最大、应用范围最广的品种，这在一定程度上限制了行业整体熟料系数的下降。我国矿渣硅酸盐水泥的产量也不低，与普通硅酸盐熟料相比，其更适用于大型混凝土工程、水下工程以及易受化学侵蚀的工程，并在许多场景下能对普通硅酸盐水泥进行完全替代。我国高炉矿渣利用率已经超过了80%，主要用于水泥生产和混凝土加工。加之水泥需求量的见顶，矿渣硅酸盐水泥的产能占比具有一定的增长空间。此外，在不影响水泥基本性能的情况下，可以通过调整水泥细度、增加粉体比表面积来提高熟料系数的下降潜力。

在明确不同类型水泥的应用场景下，尽量使用低熟料系数的水泥，或者研发新型低钙水泥、无熟料水泥等低碳水泥，提高矿渣、粉煤灰等混合材料的掺加比例，将实现固废处置和水泥低碳发展的共赢局面。

### 4.3、燃料替代：挖掘 RDF 减排潜力

在传统的水泥熟料生产过程中，化石能源消耗量极大，尤其是在我国，水泥生产对燃煤高度依赖，参考海外水泥行业的绿色发展途径，使用替代燃料并逐渐提高燃料替代率是一种必然选择。

可用于水泥窑的替代燃料主要包括：垃圾衍生燃料/固体回收燃料、生物质燃料、干市政污泥、轮胎衍生燃料等。基于我国的实际状况，不同燃料的应用前景和减排潜力存在一定的差异。

**图表 37：水泥行业主要替代燃料**

替代燃料	热值 (MJ/kg)	产量 (万吨)	产量分布	主要优势	主要劣势
垃圾衍生燃料、固体替代燃料	16-22	未知	全国	原料分布广泛	含水量高
生物质	14-21	350,000	河南、黑龙江、山东	原料分布广泛	含水量高、有季节性
糠醛渣 (生物质)	16-20	400-500	山东、河南、河北	原料来源稳定	含水量高、硫含量高
市政污泥	8-12	5,500	全国	产量高	处置技术不成熟、热值低、含沙量高、有机质低
轮胎衍生物	30	2,000	全国	热值高	价格昂贵

资料来源：中国水泥协会

#### 1、垃圾衍生燃料/固体回收燃料

垃圾衍生燃料 (Refuse Derived Fuel, RDF) 是由非危险废物类可燃性固体废物制成的燃料，可以在许多行业中作为化石燃料的替代物。RDF 的常见来源主要包括城市生活垃圾、建筑拆除废物和工业废弃物等，固体废物经破碎、筛选、干燥等步骤后压缩成 RDF 燃料棒，具有热值高、燃烧稳定、易于储存运输、二次污染低等特点。

固体回收燃料 (Solid Recovered Fuels, SRF) 属于 RDF，二者的区别在于，SRF 是符合一定标准要求的燃料，而 RDF 属于通用概念，没有指标要求。从海外经验来看，欧洲早在



2011 年就建立了完整了 SRF 标准体系，包括定义、生产要求、热值测定、成分测定、性能测定等。同时，ISO 也在 2021-2022 年陆续发布了一系列 SRF 相关标准。欧洲地区 RDF/SRF 的发展让水泥行业极大受益，2021 年，德国水泥行业替代燃料热值替代率就达到了 69.3%，其中 70% 以上为 RDF/SRF。

目前我国尚未形成成熟的 RDF/SRF 市场，水泥企业需求无法得到充分满足，主要有以下几个方面的原因：

第一，垃圾分类收集制度不严格，固体废物管理规范程度有待提升。目前我国城市生活垃圾存在混合收集、处置粗放等问题，资源化利用率低，垃圾处理方式仍然以填埋和焚烧发电为主，经济性较低。大部分地区没有执行严格的垃圾分类制度，公众意识不足，为后续的回收处置制造了很大的障碍。工业固废方面，由于其附加值低、有害物质多、处理难度大，且相关部门监管不严，缺乏有力的政策支持手段，也存在回收处置率低的问题。分类管理体系不完善，使得最终用于 RDF/SRF 生产的各类固体废物体量十分有限。

**图表 38：我国垃圾分类/固体废物管理体系相关政策文件**

发布时间	部门	文件名称
2018 年 12 月	国务院	《“无废城市”建设试点工作方案》
2020 年 11 月	住建部等	《关于进一步推进生活垃圾分类工作的若干意见》
2021 年 3 月	发改委等	《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》
2021 年 5 月	住建部	《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》
2021 年 9 月	生态环境部	《“十四五”塑料污染治理行动方案》
2021 年 12 月	生态环境部等	《“十四五”时期“无废城市”建设工作方案》
2022 年 1 月	发改委	《关于加快废旧物资循环利用体系建设的指导意见》
2024 年 2 月	国务院	《关于加快构建废弃物循环利用体系的意见》
2024 年 7 月	生态环境部	《一般工业固体废物规范化环境管理指南（征求意见稿）》

资料来源：公开资料整理，东证衍生品研究院

第二，产品标准体系尚未建立，生产技术尚未成熟。由于我国 RDF/SRF 相关研究起步较晚，目前还没有形成全国统一的产品标准体系，仅有部分团体标准，且大部分技术或质量方面的要求没有得到明确的引导和规范。这也导致我国现有的 RDF/SRF 生产企业的产品可能存在较大质量差异，且不一定适用于新型干法水泥生产工艺。



图表 39：我国 SRF 相关标准文件

发布时间	标准类型	标准编号	标准名称	归口单位
2021 年 11 月	团体标准	T/CIC 046—2021	固体替代燃料定义与分类	中国工业合作协会
2021 年 11 月	团体标准	T/CIC 047—2021	固体替代燃料制备技术规范	中国工业合作协会
2021 年 11 月	团体标准	T/CIC 048—2021	火力发电用固体替代燃料	中国工业合作协会
2021 年 11 月	团体标准	T/CIC 049—2021	水泥窑用固体替代燃料	中国工业合作协会
2023 年 3 月	团体标准	T/CAEPI 63—2023	固体回收燃料 术语	中国环境保护产业协会
2023 年 3 月	团体标准	T/CAEPI 64—2023	固体回收燃料 分级与分类	中国环境保护产业协会

资料来源：公开资料整理，东证衍生品研究院

目前我国每年会产生超过 2.5 亿吨城市生活垃圾、40 亿吨一般工业固体废物。在剔除掉价值较高的一般可回收物以及非可燃物后，假定可以被 RDF/SRF 生产所利用的固体废物约 3 亿吨，平均热值为 20MJ/kg，则约可替代 2.6 亿吨水泥生产用燃煤，具有完全覆盖水泥替代燃料需求的潜力，但考虑到实际回收率和其他行业的需求，仍需其他类型的替代燃料进行补充。

## 2、生物质燃料

水泥行业可使用的生物质燃料主要包括秸秆、糠醛渣、稻壳、木屑、树皮等。以秸秆为例，我国目前秸秆综合利用率超过 80%，利用方式主要有肥料化、饲料化、燃料化、基料化和原料化五种，其中以肥料化和饲料化利用为主，燃料化占总利用量的比例约 15%-20%。按照每年 10 亿吨的秸秆产生量计算，假设 3% 的秸秆可用作水泥窑的替代燃料，大约可以替换约 900-1,200 万吨的水泥生产用燃煤，占水泥行业总消耗量的约 5%，且秸秆的产生具有明显的季节性，替代性十分有限。再考虑其他类型的生物质燃料，现有技术下的燃料替代潜力约为 8%-10%。

## 3、市政污泥

市政污泥即城市生活污水处理过程中产生的剩余污泥，其水分之外的成分包括各类有机物、无机物、重金属和微生物等。市政污泥的主要无害化处理方式包括农业利用、建材利用、卫生填埋以及干化焚烧等，其中焚烧占比约 50%，水泥窑协同焚烧就是其中比较重要的一种处理方式。

我国污泥处理行业在近十年迅速发展，根据 E20 研究院数据，近 6 年我国新增污泥处理项目中，71% 采用了脱水干化技术，污泥处置项目中，焚烧技术占比为 59%。住建部数据显示，2022 年我国污水处理厂干污泥产生量为 1,370 万吨，假设其中 20% 用于水泥生产，则仅可替代约 100 万吨水泥生产用燃煤，替代潜力极小。

此外，从成本效益和利用率的角度来看，目前干化焚烧并不是污泥最佳的处置方式。且出于水泥品质和其他污染物排放的考虑，污泥在水泥窑中的掺烧比例也存在一定限制。因此，与其说污泥是水泥行业的替代燃料之一，不如说水泥窑是污泥资源化利用的重要方式。

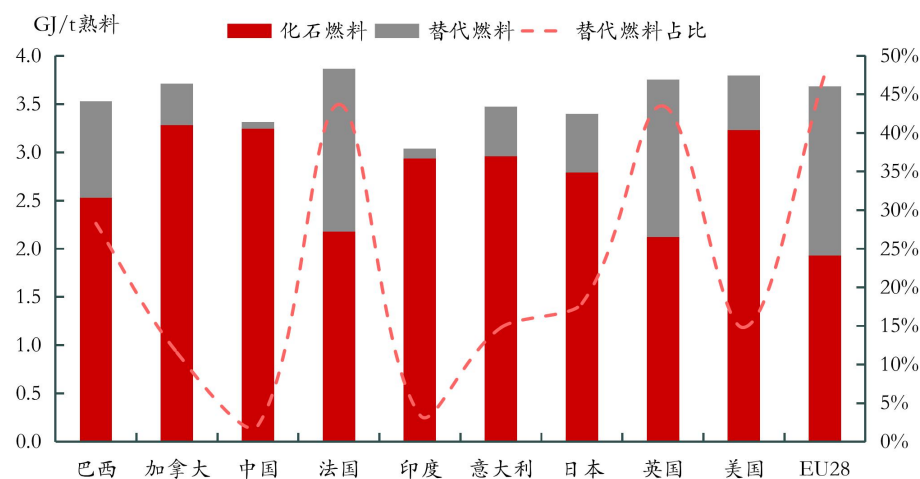
#### 4、轮胎衍生物

我国废旧轮胎的处置方式通常包括轮胎翻新、胶粉生产、再生胶生产以及热裂解等，其中再生胶生产是我国主流的处理方式，占总处理量的约 50%，而轮胎衍生燃料项目目前在我国并没有得到大面积推广。在工信部制定的《废旧轮胎综合利用行业规范条件》（2020 本）中，提到“旧轮胎翻新是节约资源、实现轮胎减量化的首选方法；废轮胎资源化利用的主要方式为生产再生橡胶、橡胶粉及热裂解。鼓励将再生橡胶、橡胶粉作为部分或全部原材料进行制品生产”，全文并未提及轮胎衍生燃料的生产。

废轮胎的热值约 30-40MJ/kg，明显远高于燃煤。国外在水泥窑使用轮胎衍生燃料方面有着成熟的经验。例如，美国废旧轮胎中约 60%被用作燃料，其中 50%左右用于水泥窑。当然，这得益于其庞大的汽车市场、先进的技术水平以及各类补贴政策等。目前我国每年约产生 2,000 万吨废旧轮胎，回收率约 50%，与欧美地区相比有极大的增长空间。但是从综合利用的优先级以及处理过程的污染程度来看，轮胎衍生燃料行业短期内并不会在我国有较大规模的发展，对水泥行业的燃料替代潜力极小。

因此，从技术水平和资源禀赋等方面来看，未来我国水泥行业替代燃料可能将主要来自于 RDF/SRF。参考目前发达国家的发展状况，燃料替代率最高或达到 50%。

图表 40：2018 年部分国家和地区水泥熟料生产燃料结构情况



资料来源：IEA，东证衍生品研究院

#### 4.4、原料替代：推广应用存在阻碍

碳酸盐分解是传统水泥生产过程中排放量最大的过程，原料替代即使用非碳酸盐原料替代传统碳酸盐原料（石灰石等）。《国家应对气候变化规划（2014-2020 年）》中指出“水泥行业要鼓励采用电石渣、造纸污泥、脱硫石膏、粉煤灰、冶金渣尾矿等工业废渣和火山灰等非碳酸盐原料替代传统石灰石原料”，目前我国水泥行业原料替代技术仍处于发展初期。

图表 41：水泥行业主要替代原料

替代原料	主要成分	钙质化合物含量	产生量（万吨）	石灰石理论替代量（万吨）	应用特点
电石渣	$\text{Ca(OH)}_2$	$\text{Ca(OH)}_2 > 90\%$	3,400	4,500	钙含量高，减碳潜力大，含水量高，产量低
镁渣	$\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$	$\text{CaO}$ （40%-55%）	500	450	钙含量高，有一定减碳潜力，易磨性好，产量低
钢渣	$\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO}$	$\text{CaO}$ （40%-60%）	12,000	12,000	钙含量高，有一定减碳潜力，成分波动大，易磨性差，稳定性差
造纸白泥	$\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Ca(OH)}_2$	$\text{CaCO}_3$ （80%-90%）	500	450	钙含量高，减碳潜力大，含水量高，碱性高，产量低
脱硫石膏	$\text{CaSO}_4$	$\text{CaSO}_4$ （70%-80%）	15,000	9,000	钙含量高，含水量高，硫含量高
磷石膏	$\text{CaSO}_4$	$\text{CaSO}_4$ （60%-70%）	7,000	3,000	钙含量高，含水量高，杂质含量较大

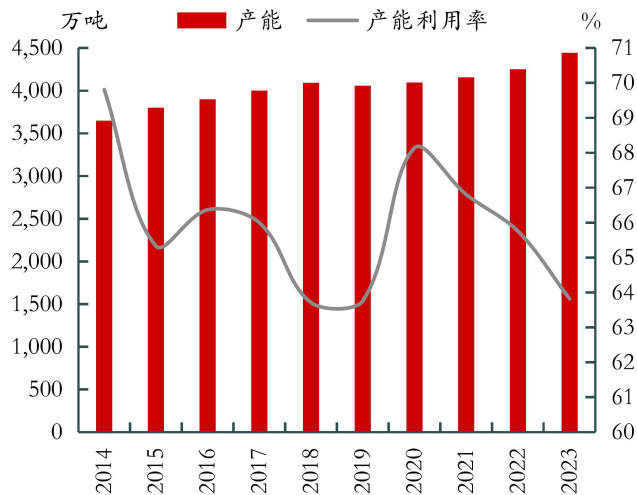
资料来源：公开资料整理，中国水泥协会，东证衍生品研究院

##### 1、电石渣

电石渣是电石生产过程中的副产品，其主要成分是  $\text{Ca(OH)}_2$ ，质量分数超过 90%，减排潜力较大，是水泥行业优质的替代原料。电石的主要下游产品是 PVC，因此目前国内许多大型电石法 PVC 生产企业都配备了电石渣水泥熟料生产线，且可以实现电石渣对石灰石的 100% 替代。

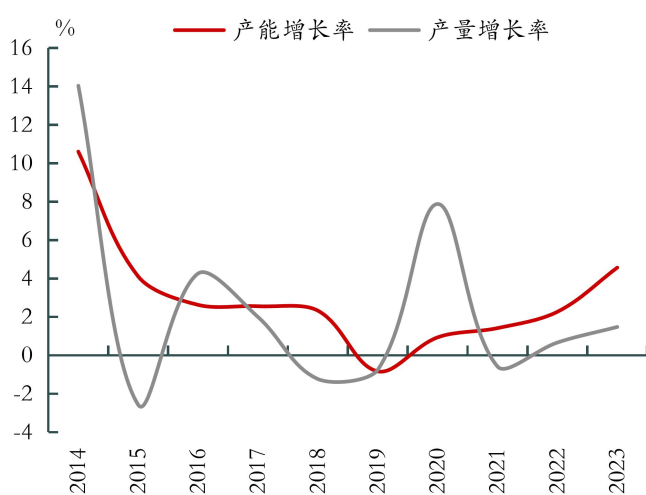
每吨电石约产生干基电石渣 1.2-1.5 吨，2023 年电石产量约 2,500 万吨，预计电石渣产量约 3,000-3,800 万吨，如果全部用于水泥生产，约可替代 4,300-5,400 万吨石灰石，占水泥行业总石灰石消耗量的 2.5%。同时，电石行业目前面临着产能过剩以及环保政策的压力，电石渣资源在未来不会出现明显增长，资源有限，在水泥行业的推广存在一定阻碍，因此电石渣暂无法在水泥熟料生产中形成大规模的原料替代格局。

图表 42：我国电石产能及产能利用率



资料来源：卓创资讯

图表 43：我国电石产能及产量增长率



资料来源：卓创资讯

## 2、镁渣

镁渣是皮江法炼镁过程中产生的固废，其主要成分包括  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{MgO}$  等。我国每年的镁渣产生量在 500 万吨左右，综合利用率约 30%，目前镁渣累计堆存量或已超过 6,000 万吨。我国镁渣主要作为水泥中的活性混合材料或混凝土膨胀剂，也可用于生产水泥熟料或脱硫剂等。镁渣的化学成分与水泥熟料相似，因此可以作为混合材料生产镁渣硅酸盐水泥<sup>3</sup>。

我国在镁渣代替部分石灰石生产水泥熟料方面也有着较丰富的实践经验，在生料中掺加适量镁渣降低熟料烧成的热耗，大幅提高熟料各阶段的强度，但掺量不宜过大，相关研究表明生料中镁渣的合理掺量为 10% 左右。此外，镁产业规模相对较小，且近几年产量较为稳定，短期扩张空间有限，很难熟料生产中实现大范围推广。

## 3、钢渣

钢渣是钢铁冶炼过程中的主要固废，其主要成分包括  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{FeO}$  等。我国每年的钢渣产生量在 1 亿吨以上，但利用率仅在 20%-30%，目前钢渣累计堆存量已经超过 10 亿吨。我国 90% 以上回收利用的钢渣用于道路铺设、工程回填和返回烧结。与镁渣相同的时，钢渣的化学成分也与水泥熟料相似，目前，在我国水泥生产应用中，钢渣也绝大部分用作水泥混合材料，即生产钢渣矿渣硅酸盐水泥<sup>4</sup>，仅有少量用作水泥生料配料的铁质校正料，且其作为生料组分的研究也有待成熟。

<sup>3</sup> 由硅酸盐水泥熟料和适量石膏以及规定的镁渣等混合材料制成的水硬性凝胶材料。根据 GB/T 23933-2009，镁渣的质量分数要求为 12%-25%。

<sup>4</sup> 由硅酸盐水泥熟料和适量石膏以及一定比例的钢渣粉、粒化高炉矿渣磨细制成的水硬性凝胶材料。根据 GB/T 13590-2022，钢渣粉的质量分数要求为 10%-30%。

由于钢渣易磨性差、稳定性差、水化活性低且矿物成分波动较大，在目前的技术下，其暂时无法在水泥行业开展大规模应用。此外，相关研究表明，钢渣在替代部分水泥生料时，能降低碳酸钙的分解温度，但其掺混量也不易过大，否则会影响水泥熟料的品质，掺量在 10% 时熟料品质较高。因此，总体上看，尽管钢渣在我国资源较为丰富，但其短期在水泥熟料生产过程中的减排作用仍较为有限。

#### 4、造纸白泥

造纸白泥是制浆造纸企业在碱回收过程中产生的固废，其主要成分是  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  等。目前我国造纸白泥的传统处置方式主要是填埋和焚烧，均会对环境造成严重污染。资源化利用方式包括烟气脱硫、烧结砖生产、水泥生产、土壤改良等。我国每年产生造纸白泥约 500 万吨，其传统的处置方式是焚烧和填埋，均会造成较大的环境污染。

造纸白泥与石灰石成分相似，可以直接在水泥熟料生产过程中替代部分石灰石。但造纸白泥成分更为复杂，存在一定的处理难度，且其中残留的  $\text{NaOH}$  等成分可能会对熟料生产产生一定影响。但造纸白泥的资源量极小，也很难在我国水泥行业形成大规模替代。

#### 5、脱硫石膏

脱硫石膏是采用湿式石灰石—石膏法工艺对烟气进行脱硫的副产物，其主要成分与天然石膏相同，为  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。根据生态环境部数据，2019 年我国重点工业企业产生脱硫石膏 1.3 亿吨，其中产生量最大的行业是电力、热力生产和供应业，占比为 83.3%，脱硫石膏综合利用率为 71.3%。我国脱硫石膏的主要资源化利用途径是替代天然石膏，主要集中在中低端的水泥行业和石膏建材行业。用作水泥缓凝剂<sup>5</sup>是脱硫石膏最主要的利用渠道，约占脱硫石膏利用量的 70%。其次是生产石膏类建材制品，此外还有少量应用于农业领域改良盐碱地。

采用石膏作为水泥缓凝剂时掺入量较少，仅为熟料的 5% 左右，因此脱硫石膏的利用量也极少。而在配置水泥生料时掺入一定的石膏可以生产硫铝酸盐水泥熟料，如果用脱硫石膏同时替代天然石膏和石灰石，其在硫铝酸盐水泥生料中的占比可以达到 70%。硫铝酸盐水泥熟料烧制完成后也可以使用脱硫石膏替代部分天然石膏进行共同粉磨生产硫铝酸盐水泥。而在硅酸盐水泥熟料的生产过程中，受到熟料成分的限制，脱硫石膏暂不能实现明显的原料替代。

#### 6、磷石膏

磷石膏是湿法生产磷酸的副产物，其主要成分也是  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，与脱硫石膏略有不同的是，磷石膏中  $\text{CaSO}_4$  含量略低，且杂质中包含磷、氟等物质，这类杂质会以水为载体

<sup>5</sup> 在混凝土搅拌过程中掺入的添加剂，主要功能是延长水泥的硬化时间。



对土壤环境和水环境造成污染，因此磷石膏利用前通常需要进行预处理。磷石膏的品位和杂质易受影响，不同地区和企业产生的磷石膏的化学成分存在较大的差异，往往需要根据具体的成分进行特殊处理，这也导致其相关的工艺参数难以把控，利用效率较低。

我国磷石膏的主要利用途径包括水泥添加剂、筑路、填充、制作石膏板/石膏粉等，其中作为水泥添加剂的比例超过 30%。与脱硫石膏类似，磷石膏去除部分杂质和有机物后可以制成水泥缓凝剂，也可以替代天然石膏生产硫铝酸盐水泥熟料，但预处理成本较高。在生产硅酸盐水泥方面，磷石膏的应用除受到熟料成分的限制之外，还面临着一定的技术限制，也暂不能实现大规模原料替代。

整体看来，目前水泥熟料生产过程中最优的替代原料是电石渣，但其产生量极少，因此当前没有能够大规模替代石灰石以减少碳酸盐分解排放的原料和技术。

综上，基于现有的技术水平和资源状况，水泥行业的总量减排将得益于以下几个方面：1) 水泥实际需求下降；2) 淘汰低效产能；3) 降低熟料系数；4) 燃料替代；5) 原料替代；6) 设备能效提升；而针对以上途径无法减少的碳排放，则需要未来借助 7) CCUS 技术。未来 15-20 年内，对我国减排贡献度较大的途径可能是需求收缩，其次是设备能效提升。此外，2030-2040 年燃料替代也有望伴随着固废处置水平的提升得到大范围推广，而原料替代的潜力十分有限。CCUS 技术的规模化、商业化应用则可能需要更长时间的等待。

## 5、风险提示

全国碳市场扩围不及预期，碳排放核算方式变化等。



**期货走势评级体系（以收盘价的变动幅度为判断标准）**

走势评级	短期（1-3 个月）	中期（3-6 个月）	长期（6-12 个月）
强烈看涨	上涨 15%以上	上涨 15%以上	上涨 15%以上
看涨	上涨 5-15%	上涨 5-15%	上涨 5-15%
震荡	振幅-5%-+5%	振幅-5%-+5%	振幅-5%-+5%
看跌	下跌 5-15%	下跌 5-15%	下跌 5-15%
强烈看跌	下跌 15%以上	下跌 15%以上	下跌 15%以上

**上海东证期货有限公司**

上海东证期货有限公司成立于 2008 年，是一家经中国证券监督管理委员会批准的经营期货业务的综合性公司。东证期货是东方证券股份有限公司全资子公司。公司主要从事商品期货经纪、金融期货经纪、期货交易咨询、资产管理、基金销售等业务，拥有上海期货交易所、大连商品交易所、郑州商品交易所、上海国际能源交易中心和广州期货交易所会员资格，是中国金融期货交易所全面结算会员。公司拥有东证润和资本管理有限公司，上海东祺投资管理有限公司和东证期货国际（新加坡）私人有限公司三家全资子公司。

自成立以来，东证期货秉承稳健经营、创新发展的宗旨，坚持以金融科技助力衍生品发展为主线，通过大数据、云计算、人工智能、区块链等金融科技手段打造研究和技术两大核心竞争力，坚持市场化、国际化、集团化发展方向，朝着建设一流衍生品服务商的目标继续前行。

## 免责声明

本报告由上海东证期货有限公司（以下简称“本公司”）制作及发布。

本公司已取得期货投资咨询业务资格，投资咨询业务资格：证监许可【2011】1454号。

本研究报告仅供本公司的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。

本研究报告是基于本公司认为可靠的且目前已公开的信息撰写，本公司力求但不保证该信息的准确性和完整性，客户也不应该认为该信息是准确和完整的。同时，本公司不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。本公司会适时更新我们的研究，但可能会因某些规定而无法做到。除了一些定期出版的报告之外，绝大多数研究报告是在分析师认为适当的时候不定期地发布。

在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需求。客户应考虑本报告中的任何意见或建议是否符合其特定状况，若有必要应寻求专家意见。本报告所载的资料、工具、意见及推测只提供给客户作参考之用，并非作为或被视为出售或购买投资标的的邀请或向人作出邀请。

在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任，投资者需自行承担风险。

本报告主要以电子版形式分发，间或也会辅以印刷品形式分发，所有报告版权均归本公司所有。未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，不得将报告内容作为诉讼、仲裁、传媒所引用之证明或依据，不得用于营利或用于未经允许的其它用途。

如需引用、刊发或转载本报告，需注明出处为东证衍生品研究院，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

---

## 东证衍生品研究院

地址：上海市中山南路318号东方国际金融广场2号楼21楼

联系人：梁爽

电话：8621-63325888-1592

传真：8621-33315862

网址：[www.orientfutures.com](http://www.orientfutures.com)

Email：[research@orientfutures.com](mailto:research@orientfutures.com)