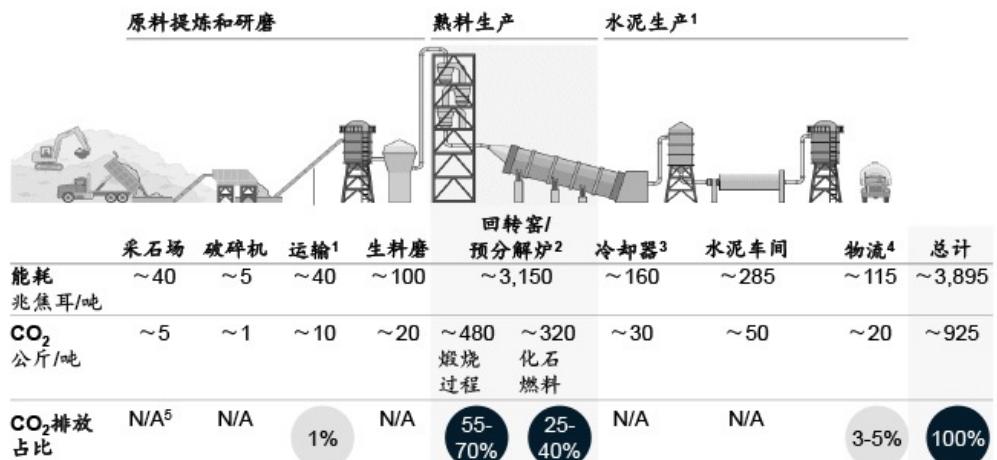


图1 水泥制造是一个非常复杂的过程，熟料生产阶段排放约95%的CO₂

水泥生产全周期过程中的能耗和排放细分



1. 假设1kWh/吨/100米

2. 假设全球平均值，数据来自全球水泥和混凝土协会的《Getting the Numbers Right》报告(2017)

3. 假设是5kWh/吨熟料的往复式炉排冷却器

4. 假设货车运输平均距离为200公里

5. 排放被纳入电力行业

资料来源：麦肯锡化工咨询业务；专家访谈；小组分析

McKinsey
& Company

我国水泥工业碳排放配额的计算方法

核算方法

配额的计算方法可以分为两种，历史法和基准法。历史法即按照控排单位的历史排放水平核定碳配额，适用于生产工艺产品特征复杂的行业。某些行业工艺多样、产品复杂，套用一个行业基准容易造成不公，多使用历史法核定。历史法有波动性，当企业增加产能或减少产能时，就会影响其历史排放数据，可能造成企业获得的碳配额与实际产能不符；导致某些粗放式生产的企业反而比前期节能减排达标的企业获得更高配额。历史法考虑企业先期减排量能够避免这种情况。目前上海市的试点规定了历史法应当考虑企业先期减排量。

基准法即按行业基准排放强度核定碳配额，适用于生产流程及产品样式规模标准化的行业。在目前碳试点市场中，火电行业都要求使用基准法核定碳配额，因为其产品单一、生产流程大同小异，套用一个行业基准容易评估。

建材行业采用历史排放法，综合考虑企业的历史排放基数、先期减排行动和新增项目等因素，确定企业年度碳排放配额。水泥工业的计算公式为：

$$\text{企业年度碳排放配额} = \text{历史排放基数} + \text{先期减排配额} + \text{新增项目配额}$$

案例分析与情景讨论

(1) 历史排放法的案例分析

试点地区水泥企业按照历史法进行核算，例如，按照试点企业三年排放边界和碳排放量变化情况，选取方法如下：期间排放边界未发生重大变化的企业，碳排放量相对稳定的，取年排放数据的平均数，重大变化指企业新上或关停主要生产系统、动力设施。例如，2014年-2016年三年的排放边界发生重大变化的企业中：2014年排放边界发生重大变化的，取2015—2016年排放数据的平均数；2015年排放边界发生重大变化的，取2016年排放数据；2016年排放边界发生重大变化的，取边界变化后经补充盘查的2016年内连续稳定生产月份的排放数据所推算的全年数据。

(2) 节能减排技术改造和能源管理情景分析

例如，试点企业在2006—2011年期间实施了节能技改或合同能源管理项目，且得到国家有关部门按节能量给予资金支持的，可获得先期减排配额。先期减排配额量依据核定节能量换算得到的碳减排量30%确定，在2013—2015年期间，按每年10%分3年发放。新增项目配额量应当考虑项目全年基础配额和产能。新增项目配额发放后可作为当年年度配额使用。

我国与国际MRV体系对比分析

欧盟在2003/87/EC和2009/29/EC指令基础上，形成了较为完善的法律体系。我国7家碳交易试点陆续出台了碳排放总量控制与配额交易相关的地方性法律、规范或条例，目前正在从国家层面推动我国碳交易市场的全面

发展。国外碳排放监测、报告、核查及认证的机制建立，主要是为碳排放权交易市场服务的，以技术和金融手段相结合来达到最终碳减排目的。国内外碳排放监测、报告、核查及认证的方法比较如表1所示。

表1 国内外碳排放监测、报告、核查及认证体系的对比

	国际 (EU ETS)	国内 (7省市试点)
M监测	系数估算法，精确计算法（考虑有机碳含量，不考虑间接排放）	数估算法，精确计算法（存在争议，尚未统一）
R报告	统一编制模板，具有法律效力	报告内容标准不统一
V核查	抽样调查、数理统计为主	核查机构未统一标准，发展方向基于过程的、多指标核查分析
A认证	第三方国际机构认证	暂行条例发布，有待完善

从涵盖行业种类来看，欧盟EU-ETS排放交易体系框架包括的行业非常广泛，第一阶段包含了能源、钢铁、水泥、陶瓷、玻璃、造纸等行业，第二阶段范围扩大到交通、有色金属铝、化学等行业，之后又将航空业纳入。美国的加州碳排放交易体系和RGGI碳交易制度涵盖的行业种类较少，以电力产业为主。我国试点省市的碳排放控制体系涵盖范围各不相同，与当地产业结构和行业参与积极性有关。例如，深圳市将制造业、建筑业以及交通业纳入强制减排范围，上海市不仅将钢铁、石化、化工等工业纳入强制减排范围，还将航空、机场、铁路、宾馆、金融等非工业纳入。广东省将水泥、陶瓷等建材行业和钢铁、石化等化学冶金行业国际 (EU ETS) 国内 (7省市试点) M监测系数估算法，精确计算法（考虑有机碳含量，不考虑间接排放）数估算法，精确计算法（存在争议，尚未统一）R报告统一编制模板，具有法律效力报告内容标准不统一V核查抽样调查、数理统计为主核查机构未统一标准，发展方向基于过程的、多指标核查分析A认证第三方国际机构认证暂行条例发布，有待完善纳入强制减排范围。

从监督管理机构来看，国际通用形式是通过立法明确管理部门，引入第三方进行监督。欧盟碳排放交易机制没有明确规定相关成员国排放权监管机构，针对监管机构的权利义务责任给出了原则性规定，成员国在享有一定自主权基础上根据本国国情指定监管机构。欧盟EU-ETS排放交易体系由欧盟中央管理处 (Central Administrator) 对欧盟成员国的配额申请进行审批，由欧盟独立交易等登记系统 (Community Independent Transaction Log) 对碳交易进行监管，在欧盟委员会统一领导下由各国监管机构组成。欧盟委员会发布的排放交易指令是欧盟碳排放权交易机制的法律基础，是各成员国共同遵循的统一标准，由相应的成员国的监管机构执行来完成的。

美国在国家层面没有建立碳交易监管机构，其监管机构主要在地方层面和来自第三方。如美国加州环保局监管其总量控制与交易计划。美国各州都具备碳市场监督权，大部分监管工作基本由第三方机构承担。例如美国东北部RGGI碳市场由非盈利性机构RGGI Inc负责监测二氧化碳配额拍卖和交易市场。我国目前我国的国家发改委和地方发改委既是MRV体系和碳排放权交易管理机构，也同时是监督机构，尚未引入第三方监督机构。

02

有那些水泥企业可能会纳入全国碳市场名单？

2021年《中国上市公司碳排放排行榜（2021）》在京发布。榜单由“总量榜”和“强度榜”组成。总量榜上榜的100家上市公司，二氧化碳排放总量合计44.24亿吨，占全国总量约44.7%，其中中国建材、海螺水泥等15家水泥企业上榜。数据显示，2020年度，中国二氧化碳排放总量约为99亿吨。

上榜的15家水泥企业是中国建材、海螺水泥、金隅集团、冀东水泥、华润水泥、华新水泥、山水水泥、天瑞水泥、亚洲水泥、祁连山、万年青、天山股份、亚泰集团、西部水泥、塔牌集团，排放总量榜上榜的水泥企业有9家在前50位，有6家在后50位。15家水泥企业2020年度碳排放总量为8.93亿吨，占全国总量约9%。

中国水泥生产企业较多，目前中国水泥行业上市公司主要有冀东水泥(000401)、上峰水泥(000672)、万年青(000789)、天山股份(000877)、四川双马(000935)、塔牌集团(002233)、海南瑞泽(002596)、红墙股份(002809)、西藏天路(600326)、青松建化(600425)、宁夏建材(600449)、海螺水泥(600585)、尖峰集团(600668)、祁连山(600720)、宁波富达(600724)、华新水泥(600801)、福建水泥(600802)、亚泰集团

(600881)、博闻科技(600883)、北元集团(601568)、金隅集团(601992)等。

中国水泥行业重点企业

企业名称	公司简称	公司代码	成立时间
唐山冀东水泥股份有限公司	冀东水泥	000401	1994年
甘肃上峰水泥股份有限公司	上峰水泥	000672	1997年
江西万年青水泥股份有限公司	万年青	000789	1997年
新疆天山水泥股份有限公司	天山股份	000877	1998年
四川双马水泥股份有限公司	四川双马	000935	1998年
广东塔牌集团股份有限公司	塔牌集团	002233	1995年
海南瑞泽新型建材股份有限公司	海南瑞泽	002596	2002年
广东红墙新材料股份有限公司	红墙股份	002809	2005年
西藏天路股份有限公司	西藏天路	600326	1999年
新疆青松建材化工(集团)股份有限公司	青松建化	600425	2000年
宁夏建材集团股份有限公司	宁夏建材	600449	1998年
安徽海螺水泥股份有限公司	海螺水泥	600585	1997年
浙江尖峰集团股份有限公司	尖峰集团	600668	1989年
甘肃祁连山水泥集团股份有限公司	祁连山	600720	1996年
宁波富达股份有限公司	宁波富达	600724	1993年
华新水泥股份有限公司	华新水泥	600801	1993年
福建水泥股份有限公司	福建水泥	600802	1993年
吉林亚泰(集团)股份有限公司	亚泰集团	600881	1993年
云南博闻科技实业股份有限公司	博闻科技	600883	1990年
陕西北元化工集团股份有限公司	北元集团	601568	2003年
北京金隅集团股份有限公司	金隅集团	601992	2005年

资料来源：智研咨询整理

从地区分布来看，21家企业主要分布在河北、甘肃、江西、新疆、四川、广东、海南、西藏、宁夏、安徽、浙江、湖北、福建、吉林、云南、陕西、北京等地区，其中浙江、广东、新疆、甘肃各有两家。

中国水泥行业重点企业分布



资料来源：智研咨询整理

从区域层面看：广东省印发碳排放分配方案,58家水泥企业位列控排名单!(附名单)

广东省2021年度控排企业名单	
序号	企业名称
1	广州市越堡水泥有限公司
2	广州市珠江水泥有限公司
3	广州石井水泥公司
4	中材天山（珠海）水泥有限公司
5	华润水泥（汕头）有限公司
6	广东东北江实业集团有限公司
7	佛山海螺水泥有限责任公司
8	乐昌市中建材水泥有限公司
9	翁源县中源发展有限公司
10	广东鸿丰水泥有限公司
11	南雄市彤置富水泥建材投资有限公司
12	华润水泥（湛江）有限公司
13	廉江市丰诚水泥有限公司
14	湛江海螺水泥有限责任公司
15	肇庆市金岗水泥有限公司

16	广州石井德庆水泥厂有限公司
17	华润水泥（封开）有限公司
18	四会市骏马水泥有限公司
19	德庆县盈启建筑材料有限公司
20	华新水泥（恩平）有限公司
21	江门海螺水泥有限公司
22	茂名石化胜利水泥有限公司
23	惠州固力水泥集团有限公司博罗分公司
24	惠州塔牌水泥有限公司
25	惠州市光大水泥企业有限公司
26	华润水泥（惠州）有限公司
27	蕉岭县龙腾旋窑水泥有限公司
28	梅州宁江水泥有限公司
29	梅州皇马水泥有限公司
30	梅州金塔水泥有限公司
31	广东塔牌集团股份有限公司
32	梅州市塔牌集团蕉岭鑫达旋窑水泥有限公司
33	梅州市梅县区泰山建材有限公司
34	梅州市梅县区恒发建材有限公司
35	东源辉科建材发展有限公司
36	河源和兴水泥有限公司
37	河源市金杰环保建材有限公司
38	华润水泥（阳春）有限公司
39	阳春海螺水泥有限责任公司
40	广东银岭环保新材料科技有限公司
41	广东春潭水泥制造有限公司
42	英德市英马水泥有限公司
43	广东新南华水泥有限公司
44	英德市宝江水泥材料有限公司
45	广东清远广英水泥有限公司
46	广东清新水泥有限公司
47	英德龙山水泥有限责任公司
48	英德海螺水泥有限责任公司
49	台泥（英德）水泥有限公司
50	东莞华润水泥厂有限公司
51	云浮市云安区九洲建筑材料有限公司
52	郁南鸿运水泥有限公司
53	广东广信青洲水泥有限公司

54	中材天山（云浮）水泥有限公司
55	中材罗定水泥有限公司
56	中材亨达水泥有限公司
57	华润水泥（罗定）有限公司
58	青洲水泥（云浮）有限公司

水泥地理

河南省发布的关于2022年河南省能碳管理示范企业的公示。其中，登封市嵩基水泥有限公司、天瑞集团郑州水泥有限公司、洛阳中联水泥有限公司等16家水泥企业入选。

03

水泥企业如何减排应对

1、使用替代燃料，降低化石燃料

水泥工业的碳排放主要来源于水泥熟料的生产过程。资料显示，生产1t熟料需0.161~0.296t煤，煤燃烧会产生0.383~0.704tCO₂，加上生成熟料时碳酸钙分解产生的CO₂，每生产1t水泥熟料会排放0.894~1.215tCO₂。

水泥生产过程中可以使用替代燃料来减少CO₂的排放，业内人士表示，替代燃料是更优先、更具成本效益的手段，到2050年可推动行业约10%的碳减排。而废弃物是更好的潜在碳减排资源。一方面有机废弃物可作为燃料，另一方面固体废弃物可代替熟料，减少石灰石的使用，从而进一步减少生产过程中的碳排放。同时，废弃物利用在我国有着政策利好、供应量相对持续、垃圾分类状况不断改善三方面支撑。

2、碳捕获、利用与封存技术CCUS

碳捕集、利用与封存（Carbon Capture, Utilization and Storage，简称CCUS），即把生产过程中排放的二氧化碳进行提纯，继而投入到新的生产过程中进行循环再利用或封存。长期以来，CCUS一直被认为是减少化石能发电和工业过程中二氧化碳排放的关键技术。CCUS技术是CCS（Carbon Capture and Storage，碳捕获与封存）技术新的发展趋势，与CCS相比，可以将二氧化碳资源化，能产生经济效益，更具有现实操作性。

2018年10月31日，由海螺建设的世界首条水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化环保示范项目成功投运，首开碳捕捉利用实现产业化的先河。

3、新能源技术的应用

利用厂区空地布局光伏发电、储能等业务，实现电力自给。海螺水泥多个生产基地开展建设光伏项目，如分宜海螺、英德海螺等等，截至2020年装机量130MW，累计发电量2.79亿度。塔牌水泥拟投资13亿元建设分布式光伏发电储能一体化项目，装机规模220MWp（兆瓦），建成后每年可减少约14.28万吨CO₂排放。

4、优化调整水泥产品原材料结构，减少熟料用量

湖南省工信厅原材料处二级调研员 湖南省硅酸盐学会副理事长丁美荣曾表示，减少熟料用量与用混合材替代部分熟料是水泥混凝土工业发展趋势，也是提高建筑物寿命和水泥混凝土工业健康及低碳发展的必然选择。我国水泥中熟料系数为0.678，若降到0.55，以出厂水泥计，碳排放可减少18%。

5、发展低碳胶凝材料

据了解，目前低碳胶凝材料主要有低钙水泥、低熟料水泥和碱激发材料等。低钙水泥体系主要有高贝利特硅酸盐水泥、硫（铁）铝酸盐水泥等。

其中，已有研究机构表明以高贝利特硫铝酸盐水泥为基础的低钙水泥，具有和硅酸盐水泥相近的性能，同时二氧化碳排放量降低25%左右。硫（铁）铝酸盐水泥它的熟料烧成过程中自身碳酸盐分解直接排放的CO₂要比硅酸

盐水泥约低40%，同等工艺条件下，燃料燃烧直接排放的CO₂要比硅酸盐水泥约低30%，水泥CO₂减排约35%；碱激发材料是指不用或使用少量水泥熟料，主要由铝质或硅质固体原料（如粒化高炉矿渣、粉煤灰、火山灰、钢渣等）和碱激发剂，按比例直接混合磨细而成的具有一定水硬性的胶凝材料。相比硅酸盐水泥，碱激发材料的CO₂排放降低了约80%。

6、通过节能减排技术进步和应用推广实现减排目标

节能减排技术推进和应用推广方面，水泥企业可以通过不断提升改造生产线，提升能效实现减碳排放，其中包括高效粉磨技术推广（辊压机终粉磨技术），高效低阻旋风预热器、高能效分解炉及第四代冷却机技术装备的使用等等。相关研究结果显示，该路径从每吨熟料热耗、电耗方面，可帮助水泥行业降低约20%的碳排放。

碳达峰和碳中和是一场世界级的绿色革命洪流，对水泥行业而言，是实现绿色低碳可持续发展的关键。在要求提前碳达峰，实现碳中和的过程中，水泥行业要坚持以碳减排和降污染为重点，发挥技术性减碳的优势，不断创新研发低碳技术、产品，实现水泥行业的高质量发展。

从化石能源燃烧利用的环节来看，近年来热能的利用效率有所提高。生产1吨熟料，在2000年要耗能3.75吉焦，到2014年需要3.5吉焦，平均每年能耗降低0.5% [3]。此后，根据国际能源署的数据，熟料生产的耗能强度停滞在每吨3.4-3.5吉焦 [7]。以这样的耗能计算，生产10吨熟料，大抵相当于一套小户型住宅一个供暖季所耗的热能。

能耗降速有点慢，不过，还是有多种办法减碳增效。一个途径就是废热回收利用。

回转窑所需的高温是靠化石燃料燃烧产生的热维持的，而这些热有44%会浪费掉 [8]。如果能将这些废热再回收和利用，可以大大节约燃料，进而减少碳排放。印度的一项案例研究显示，将废热用于发电，可将水泥厂燃料利用率提高5% [9]。但也要注意到，目前主流的废热利用方式是发电，对于减碳来说，目前来说，效果很有限。

一个从源头考虑的策略是，减少化石燃料使用甚至不用化石燃料。国内外在持续探索燃料替代和协同处置技术，期待实现熟料生产对化石能源的“零消耗”。

世界水泥巨头拉法基公司自2013年起，一直在努力用低碳和碳中性燃料替代化石燃料。碳中性燃料主要是生物质，因为生物质里面的碳终究会释放出来，用作燃料不会新增大气中的碳。

2019年，拉法基公司就宣称，他们在尼日利亚一座水泥厂的回转窑燃料有一半是生物质燃料，且主要来自农业垃圾，该公司还在努力从城市固体废弃物中挖掘更多燃料。

事实上，在水泥窑炉中加入诸如轮胎、有机废物、污水污泥和塑料等固体废弃物的做法，从上世纪70年代就已经出现。

一开始，这些做法更多是为了降低企业成本，因为垃圾肯定要比煤炭便宜，一些地方政府甚至会付钱给水泥企业，作为城市垃圾处理的一种方式。

近年来，水泥行业更是积极推动固体垃圾作为燃料的企业策略，更多称其为解决塑料垃圾和减缓气候变化的社会责任担当，比如，总部位于墨西哥的西麦斯集团。



图2 拉法基公司在尼日利亚的水泥厂一半窑用燃料是生物质 | 图源：lafarge.com.ng/



图3 垃圾衍生燃料Climafuel | 图源: letsrecycle.com/

西麦斯集团从垃圾中处理出来的燃料不仅自己用，还做成一个品牌Climafuel，在市场上出售。Climafuel燃料用纸张、纸箱、纺织物、木材、塑料等垃圾处理而成。据西麦斯集团官网，西麦斯在英国的水泥厂用Climafuel替代了20%-60%煤和焦炭在内的化石能源，用以加热水泥窑炉。中国水泥企业华新在垃圾衍生燃料方面也有近20年技术积累。

此外，用氢等不含碳的燃料完全替代化石燃料，减碳最为彻底，但是成本太高，短期内完全替代的希望不大。行业也在探索用绿色电力替代化石燃料。

不过，只在燃料上下功夫，无助于解决水泥行业碳排放的另一个更大的来源——石灰石煅烧排放的二氧化碳。

碳捕获 & 混凝土

处理石灰石煅烧排放的二氧化碳，最直接的方法是碳捕获与封存，即把排放的二氧化碳分离出来，或可回收直接使用，或可储存到地层深处，长期与大气隔绝，还可以转化成矿物二次利用。

捕获二氧化碳可以就地原厂利用。水泥与水、砂子、石子等混合做成混凝土时，通上二氧化碳，控制合适的反应条件，又会生成碳酸钙，封存在混凝土中，并且不降低混凝土性能。加拿大CarbonCure公司已经将此技术完全商业化，目前已装备到300多家水泥厂，计划到2030年的时候每年减碳5亿吨，相当于减少1亿辆燃油车[14]。



图4 装有CarbonCure阀门的二氧化碳气罐 | 图源CarbonCure

不过，CarbonCure的技术需要将二氧化碳从废气里提纯并封装，还是不太方便。澳大利亚公司Calix发明了一种新的窑，可以让二氧化碳收集变得容易。传统的窑，原料和燃料是混在一起的；而Calix的窑则不然，窑内是研磨好的石灰和水蒸气，在窑外加热，窑内气体排出，简单冷凝就将水蒸气变成水，剩余的就是纯二氧化碳，捕获之后，便于再次利用 [15]。

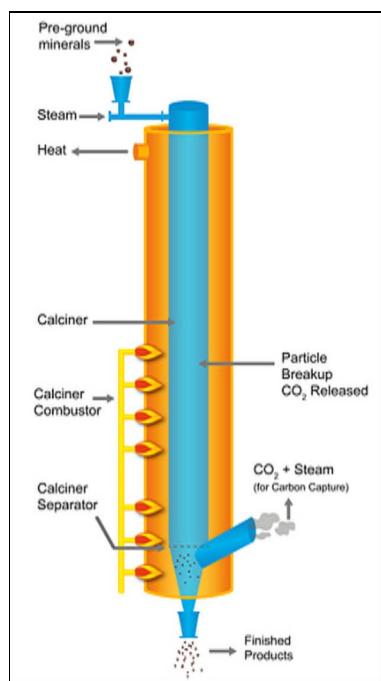


图5 Calix发明的外加热窑，非常便于二氧化碳捕获 | 图源：Calix

欧盟对Calix的技术青睐有加，将其纳入2千万欧元的大科研项目“低排放强度石灰和水泥”（Low Emissions Intensity Lime and Cement, LEILAC）。

2019年，德国海德堡水泥公司在比利时的一家水泥厂开始对这一技术进行中试试验。中试结果成功分离出二氧化碳，并且没有增加燃料投入，对产品和生产装置没有显著的负面影响。据Calix发布的消息，中试装置的升级版将于2023年在德国汉诺威进行示范生产，示范厂将能捕获20%的碳排放，也就是每年10万吨级的二氧化碳 [16]。此外，学术界和产业界也在合作将前沿科学进展用于改良传统的混凝土。

曼彻斯特大学和英国全国工程公司合作发明了石墨烯增强混凝土——混凝土（Concretene）。混凝土性能更优，还能减少30%的碳排放，已经有了第一个商业应用。2021年10月，混凝土在曼彻斯特为一歌舞厅浇筑了面积为756平方米的整块地板 [17]。

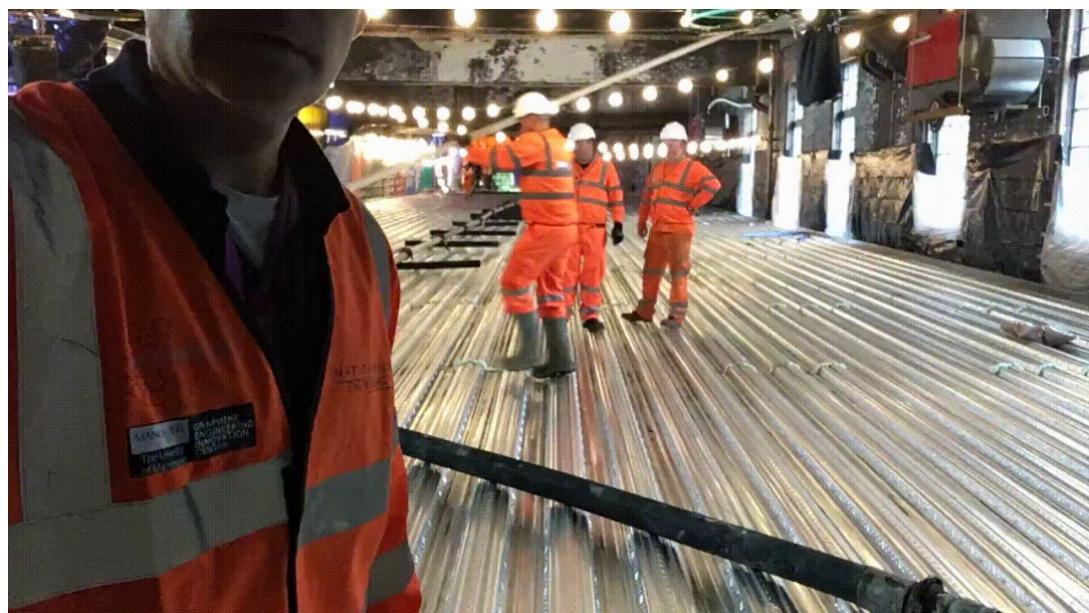


图6 用混凝土浇筑舞厅地板



图7 莱斯大学闪蒸加热制石墨烯

那么，原料石墨烯从哪里来？美国莱斯大学找到了一种低廉的来源——旧轮胎。莱斯大学发明一种闪蒸工艺，可以把旧轮胎热解后残留的碳或旧轮胎碎片变成混层石墨烯，混层石墨烯可以直接加到水泥里。在解决城市固体垃圾的同时，将垃圾中的碳固定在混凝土中

减碳不仅要靠理工硬科技，信息技术也可以贡献一份力量。

欧洲水泥行业巨头拉法基豪瑞公司2019年启动了“明日工厂”计划，开发了一个技术信息系统，将机器人、人工智能、预测性维护（Predictive Maintenance，实时监控流水线状态，依据装备的状态发展趋势和可能的故障模式，预先制定预测性维护计划）等技术有机融为一体。拉法基豪瑞旗下80%的水泥厂已经接入此系统，据测算，工厂运营效率提高15%-20%，减碳10% [19]。

水泥行业是排碳大户，对于全球减碳意义重大。

- 废热回收利用，提高能效；
- 燃料替代，比如从垃圾中回收利用生物质燃料、无碳氢燃料、绿色电力等；
- 原料替代，比如粉煤灰替代水泥，添加石墨烯；
- 改进生产工艺，比如添加碳捕获和矿化流程，提高生产线的数字化水平

来源：扑克投资家、中国水泥杂志等