

本科毕业论文（设计）

题目名称：水泥工业碳减排路线探究

学院名称

专业名称

工程造价

学生姓名

学号

指导教师

二〇二二年六月

水泥工业碳减排路线探究

摘要：在全球气候变暖问题与我国在联合国上承诺“2030 碳达峰、2060 碳中和”的背景下，水泥工业作为高 CO_2 排放的能源密集型产业，面临着减少排放与许多可用低碳技术选择的巨大压力。因此，应迅速采取有效地应对措施，以尽量减少我国水泥工业对全球变暖和全球气候变化带来的不利影响。此次研究的目的是探究我国水泥行业到 2060 年实现碳中和应采取的措施与技术路径。

本研究首先介绍了水泥生产过程中 CO_2 的不同排放源，挖掘世界先进水泥生产技术企业使用的各类节能增效技术，分析中国水泥工业碳排放情况。总结研究了减少水泥工业 CO_2 排放的各类技术，主要技术有：提高能源利用效率、替代燃料和熟料替代、余热发电技术等。

其次，本研究结合水泥生产过程中电力消耗与熟料煅烧阶段碳排放分别进行分析与研究，发现水泥生产阶段的电力消耗可以最终由水泥生产企业使用余热发电、太阳能、风能发电等清洁电力的使用，实现水泥生产过程中电力消耗的零碳排放。同时大力推广使用替代燃料、全氧燃烧技术等可以降低水泥熟料煅烧过程中碳排放 40~50%。

最后，虽然水泥行业的各种节能措施都有望减少排放到大气中的 CO_2 ，但是我国水泥工业现有的技术仍不足以实现水泥生产零碳排放。我国水泥行业还需要运用与熟料和水泥生产工艺有关的发明和技术来减少 CO_2 的排放，同时实施创新高效的二氧化碳捕获、利用和封存（CCUS）等突破性技术，以在 2060 年实现水泥工业的二氧化碳零排放。

关键词：水泥工业；减排路径；低碳技术；碳减排；碳中和

Exploring the route of carbon emission reduction in cement industry

Abstract: In the context of global warming and China's commitment to "2030 carbon peaking and 2060 carbon neutral" at the United Nations, the cement industry, as an energy-intensive industry with high CO₂ emissions, is under great pressure to reduce emissions and many available carbon reduction options. Therefore, effective countermeasures should be taken quickly to minimize the negative impact of China's cement industry on global warming and global climate change. The objective of this study is to investigate the measures and technological pathways that should be taken by the cement industry in China to achieve carbon neutrality by 2060.

This study first introduces the different sources of CO₂ emissions in the cement production process, digs into the various energy-saving and efficiency-enhancing technologies used by the world's advanced cement production technology companies, and analyzes the carbon emissions of China's cement industry. Various types of technologies to reduce CO₂ emissions in the cement industry are summarized and studied, and the main technologies are: improving energy utilization efficiency, alternative fuels and clinker substitution, and waste heat and power generation technologies.

Secondly, this study combines the analysis and research of electricity consumption and carbon emission of clinker calcination stage in cement production process respectively, and finds that the electricity consumption in cement production stage can be eventually used by cement producers to achieve zero carbon emission of electricity consumption in cement production process by using clean electricity such as waste heat power generation, solar energy and wind power generation. Meanwhile, vigorously promoting the use of alternative fuels, oxy-fuel combustion technology, etc. can reduce carbon emissions during the calcination of cement clinker by 40~50%.

Finally, although various energy-saving measures in the cement industry are expected to reduce CO₂ emissions into the atmosphere, the existing technologies in China's cement industry are still not sufficient to achieve zero carbon emissions from cement production. The cement industry in China still needs to apply inventions and technologies related to clinker and cement production processes to reduce CO₂ emissions, as well as implement breakthrough technologies such as innovative and efficient carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) to achieve zero CO₂ emissions from the cement industry by 2060.

Keywords: Cement Industry; Carbon Emission Reduction; Emission Reduction Pathway; Low Carbon Technology; Carbon Neutral

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题背景	1
1.2 选题意义	2
1.2.1 国家环境可持续发展.....	2
1.2.2 水泥工业长足发展.....	2
1.3 国内外研究现状	3
1.4 主要研究目标与内容	3
1.4.1 研究目标.....	3
1.4.2 研究技术路线图.....	4
1.4.3 研究内容.....	4
第 2 章 水泥工业与碳排放情况.....	6
2.1 水泥工业生产技术与碳排放分析	6
2.1.1 水泥工业生产技术.....	6
2.1.2 水泥工业生产碳排放.....	7
2.1.3 水泥生产电耗造成的 CO ₂ 间接排放	8
2.1.4 水泥熟料煅烧阶段的 CO ₂ 直接排放	9
2.2 世界水泥工业现状	11
2.2.1 世界水泥工业发展概况.....	11
2.2.2 世界各国水泥工业碳达峰.....	11
2.2.3 国际水泥工业碳减排技术.....	12
2.3 中国水泥工业概况	13
2.3.1 中国水泥工业发展历程.....	13
2.3.2 我国水泥工业生产现状.....	14
2.3.3 我国水泥工业 CO ₂ 排放现状	15
2.4 本章小结	16
第 3 章 水泥生产电力消耗碳减排分析.....	17
3.1 我国水泥工业综合电耗	17

3.1.1 电力消耗的碳排放核算.....	17
3.2 水泥生产流程电耗	17
3.2.1 原料处理阶段电力消耗.....	18
3.2.2 生料制备阶段电力消耗.....	18
3.3 水泥生产研磨电耗碳减排	19
3.3.1 研磨技术变革.....	19
3.3.2 研磨技术比较.....	20
3.3.3 我国研磨技术使用情况.....	20
3.3.4 研磨技术碳减排.....	21
3.4 水泥窑余热发电技术	21
3.5 水泥生产电耗碳减排措施总结	22
3.6 本章小结	23
第 4 章 水泥生产熟料煅烧碳减排分析.....	24
4.1 我国水泥工业综合能耗	24
4.2 熟料煅烧阶段使用替代燃料的碳减排	24
4.2.1 水泥生产可使用的替代燃料.....	24
4.2.2 世界范围替代燃料使用情况.....	26
4.2.3 我国替代燃料使用现状.....	27
4.2.4 使用替代燃料减少 CO ₂ 排放	28
4.3 熟料煅烧阶段使用替代原材料	28
4.3.1 水泥生产使用替代原材料减少 CO ₂ 排放	28
4.3.2 水泥厂使用粉煤灰替代原料与燃煤电厂产业共生.....	29
4.3.3 使用替代原材料与电厂进行产业共生碳减排情况.....	29
4.4 降低熟料水泥比和熟料替代	30
4.5 使用高效氧燃烧技术碳减排	31
4.5.1 水泥工业使用全氧燃烧技术.....	31
4.5.2 全氧燃烧节能机制.....	31
4.6 本章小结	32
第 5 章 水泥工业 CCUS 技术减排分析	33
5.1 全球 CCUS 技术现状	33

5.1.1 燃烧后捕获.....	34
5.1.2 燃烧前捕获.....	34
5.1.3 全养燃烧捕获.....	34
5.2 碳捕捉碳封存技术与应用前景	35
5.2.1 化学吸收法.....	36
5.2.2 物理吸附法.....	36
5.2.3 直接分离法.....	37
5.3 使用 CCUS 技术 CO ₂ 减排评估	37
5.3.1 碳捕捉碳封存技术经济效益分析.....	37
5.3.2 在水泥行业采用 CCUS 的障碍和实用建议	37
5.4 本章小结	38
第 6 章 中国水泥碳减排路线分析.....	40
6.1 产量是水泥工业碳减排的关键因素	40
6.2 采用清洁能源与高效节能管理技术	41
6.3 发展水泥行业原料与燃料替代技	41
6.4 发展创新与使用水泥工业 CCUS 技术	42
6.5 本章小结	43
第 7 章 结论与展望.....	44
7.1 结论	44
7.2 展望	45
致谢.....	46
参考文献.....	47

第1章 绪论

1.1 选题背景

水泥作为世界上极为重要的建筑业材料，在改善人民生活环境，提高人民生活质量上，有着无可替代的作用^[1]。水泥产业作为我国国民经济发展中极为重要的基础产业的同时，水泥工业已经成为了我国经济发展水平和综合实力的重要标志^[2]。但是水泥工业作为天然资源密集型产业和能源密集型产业的双重结合，便有着高污染、高能耗、高资源消耗等多种问题^[3,4]。在水泥生产过程中除了有着大量的粉尘、颗粒物、SO₂、氮氧化合物等大量大气污染物外，还有大量的温室气体（GHG）的排放^[5]，尤其是 CO₂ 的排放，是人为排放的温室气体的主要贡献者之一。

长期以来，CO₂ 作为最主要的温室气体的不断增加，地球整体所保留的热能增加，如图 1-1 所示，生态系统和地球气候系统可能已经达到甚至突破了重要的临界点，生态系统将产生不可逆转的变化，如不采取有效措施减少二氧化碳的排放，预计到 2065 年全球气温将上升 5℃。届时全球暖化、冰川加速融化、世界海平面将升高 24~30 厘米^[6]，世界上大多数国家将被海洋淹没。我国的许多省份，尤其是发达的沿海地区将被海洋所覆盖，地球陆地面积将减少 20~30%，良好的生态环境遭受严重损害，变暖导致未来日益频繁和严重的极端天气事件，灾害不断，病害流行，直接威胁人类生存^[1,7]。

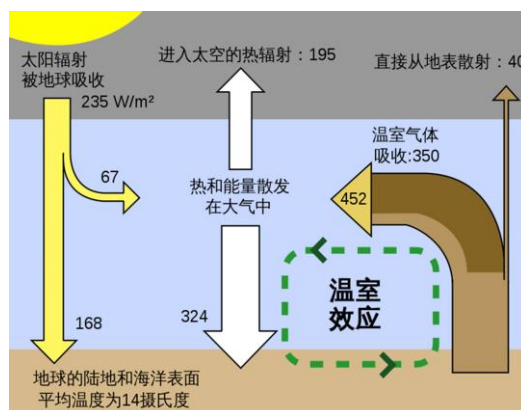


图 1-1 温室效应原理^[8]

全球变暖导致的各种问题已经影响了世界的发展，不断威胁着人类的生存，温室气体造成的各种气候影响被视为当今社会面临的最为困难的环境挑战。水泥工业作为中国社会经济 CO₂ 排放的主要来源，也给中国带来了重大挑战^[4,9]。因此，我国在面对气候变化的问题上，应不断加强应对气候变化的能力，积极采取有效的 CO₂ 减排措施，为缓解全球气候问题不断做出积极贡献。

1.2 选题意义

1.2.1 国家环境可持续发展

随着国家的快速发展,我国将不断转向以低排放、低消耗、低污染的低碳绿色经济发展路线,取代一直以来的高能耗、高污染、高度资源依赖型经济发展模式,向绿色低碳经济转型也是我国走可持续发展的必经之路^[9]。同时,2020年9月22日,习近平总书记在第七十五届联合国大会上庄严宣布,我国将不断采取更有力的政策与措施,在2030年实现二氧化碳排放达峰,并力争在2060年实现碳中和^[10]。

中国碳排放最主要来源是来自水泥行业,占据中国建筑业碳排放总量的80%以上。水泥工业作为碳中和中十分重要的领域,减排难度也是最大的一环。因此,在全球水泥工业碳达峰、碳中和快速进行的趋势下,分析探究我国水泥工业碳减排路线显得尤为重要,并有着非常重大意义^[11,12],也为维护经济发展与环境保护的关系,为建设美丽中国、可持续发展等指明了发展与保护协同共生的新路径。

水泥行业向绿色低碳的转型与发展,是要在国家方针与政策的正确引导下,坚持技术上的不断创新、不断提高能源利用效率、减少对自然界矿物燃料与原料的使用,不断降低单位水泥产品的CO₂排放。在资源消耗、能源使用、工业技术上的不断循环改进,最终才能实现国家生态环境的改善与国家经济的可持续发展^[4]。

1.2.2 水泥工业长足发展

水泥是混凝土的粘合剂,是人类社会最大的制造产品,是建筑业的基本原料。水泥作为最重要的粘合性建筑材料,它与水混合后会形成一种可加工的糊状物,能够在空气中和水下硬化。如果没有水泥,我们周围的建筑物、技术和工业建筑、基础设施、水坝、道路或桥梁就不会建成^[13]。

水泥产量也是社会基础设施建设的一个非常重要的代表指标。在过去的100年里,世界人口从1.5亿增加到70亿,现在有近30亿人居住在城市或城市周边,尤其是在发展中国家,人口和城市化比率近年来不断增加。因此,水泥产量不断增加,特别是在中国、印度和其他城市化率高、经济增长的发展中国家。基础设施的改善大多代表一个国家的发展,但可持续发展不仅满足当代人的需要,也不损害后代人满足自身需要的能力,因此对于水泥工业进行节能减排、探究低碳路线是让水泥工业得到长足发展的重要措施,在某种程度上,水泥行业的可持续发展体现并影响着社会发展的可持续性。

鉴于中国城镇化仍在继续,从2010年到2025年,住房和城乡建设部预计,目前生活在农村地区的3亿中国人将进入城市。水泥行业不会快速进入冬季,但不会频繁出现

大幅增长,未来5年(可能是2020~2025年)中国水泥需求将达到峰值^[14]。我国水泥熟料的过剩产能,也将成为水泥行业非常严峻的挑战。许多日产2000吨熟料以下的水泥生产线,虽然在一些发达国家属于某种先进能力,但由于落后产能而被关闭。尽管政府试图限制新增产能,但大多数水泥企业仍在寻找机会扩大自己的熟料产能以超越竞争对手,以最大限度地提高市场份额和收益,而水泥产能必须受到一定的限制。驱动力正在从市场需求和竞争的混乱转向整体、可持续和低碳路线的智慧。

1.3 国内外研究现状

对于现代工业化企业来说,资源、能源与环境三者之间的相互制约已经成为了限制水泥工业发展的关键因素。节能减排是科技进步和企业可持续发展的必然选择。水泥行业作为能源消耗和污染排放的大户,应该节约资源,应对能源危机和环境压力^[15]。

目前世界大多数发达国家在水泥工业已经进行了绿色转型,使用诸多先进技术,德国、美国、日本等水泥生产碳排放已经达峰,欧洲国家使用先进的可替代燃料燃烧技术,美国大力发展高效氧燃烧技术,提高燃烧效率。德国日本等国家正大力发展更先进的工业化技术,大步迈向零碳排放的水泥工业。

我国在十三五规划以来,水泥工业的节能减排与增效做了诸多努力,目前我国部分先进的水泥生产企业工艺技术已处于世界领先水平,水泥生产综合能耗也已能够达到世界先进水平,水泥生产碳排放量逐年下降。但我国水泥生产厂商数量众多,对水泥生产先进技术的使用程度参差不齐。我国水泥工业碳排放仍然居高不下,为实现我国提出的“2030年碳达峰、2060碳中和”的目标仍有巨大差距,我国水泥的绿色化生产仍需做出更多努力。

1.4 主要研究目标与内容

1.4.1 研究目标

水泥作为经济建设中使用最多最为广泛的重要原料,同时也作为国民经济中重要的基础产业。水泥工业的高速发展,国家社会经济的建设中起到了强有力的支撑作用,做出了不可磨灭的贡献。长期以来,局限于水泥工业高能耗、高污染与高度资源依赖的生产模式^[4],在资源、能源都极度匮乏的时代,生态环境的日益恶化的时代,水泥工业已经很难以曾经的发展模式继续下去。

水泥工业要想得以长久的发展,向低碳绿色的水泥工业转型,将是水泥行业发展的必经之路;加快推进水泥工业低碳生产技术研发和使用,实现水泥工业的绿色生产与节能减排,是水泥工业发展面临的紧迫任务。

我国作为世界上最大的水泥生产国，CO₂ 排放居世界首位的情况下，想要实现“2030 碳达峰、2060 年碳中和”的目标将面临非常严峻的挑战。面对我国是世界上最大的发展中国家，积极研究分析水泥生产过程中的技术细节与碳排放过程，将低碳绿色的水泥生产技术加以应用，努力推动实现水泥工业碳达峰、碳中和。

本次研究目标在于探究目前的中国水泥工业的碳减排路线，研究分析中国目前的水泥工业生产现状，结合工业生产现状，探究水泥工业化生产过程中的减碳思路与方向，提出切实可行的方法，减少水泥工业生产的碳排放。作为世界上最大的发展中国家，在保障国家发展稳步前进的情况下，为世界生态环境做出应有贡献，努力推动实现中国“2030 碳达峰、2060 碳中和”的远景目标。

1.4.2 研究技术路线图

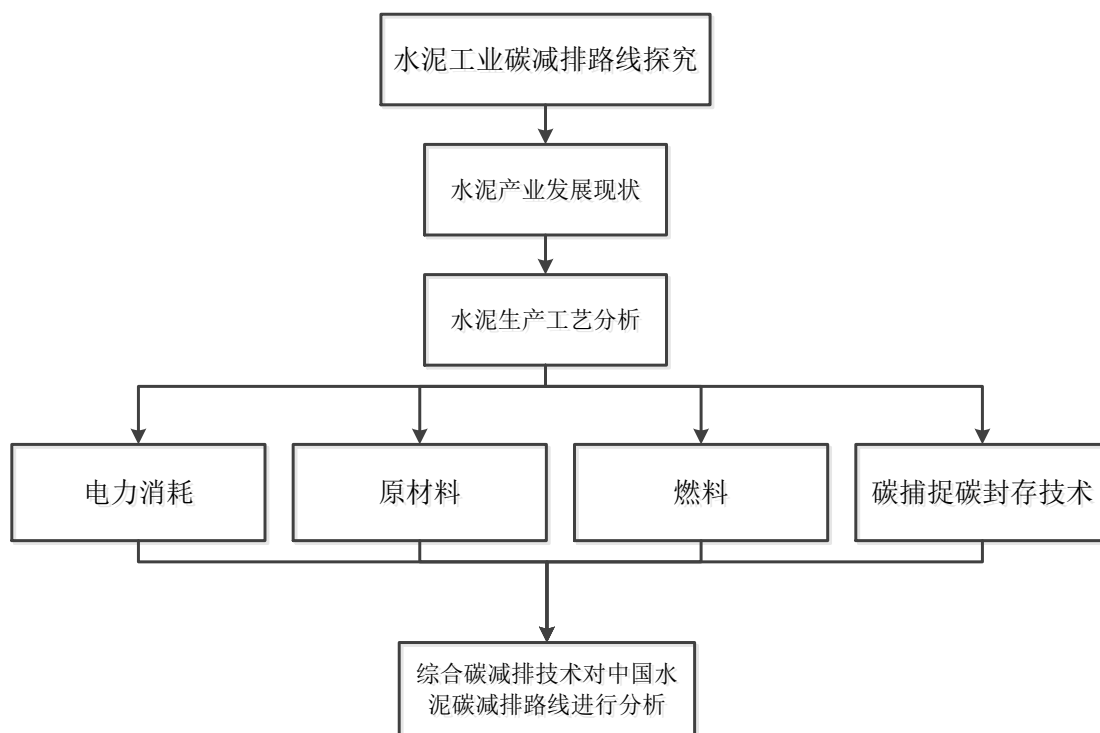


图 1-2 研究技术路线图

1.4.3 研究内容

此次课题将从以下几个内容展开，在习近平总书记提出的“绿水青山就是金山银山”的先进理念之下，面对全球变暖、环境污染和资源枯竭的各种世界环境问题，在 2030 年实现碳达峰，2060 年实现碳中和的背景之中。以水泥工业的碳达峰、碳中和为目标，探究对我国水泥工业碳排放的减排潜力。对中国水泥工业碳减排技术进行探究，挖掘发达国家水泥工业碳达峰路线与技术工业。分析我国水泥生产企业已有碳减排技术普及趋

势，研究水泥工业碳减排及其经济效益，在技术普及循序渐进的过程中对中国水泥碳减排路线进行相应分析预测与可行性探究。

具体研究内容包括：

（1）探究分析水泥工业技术变革与水泥工业构建生产碳减排路径方法

研究分析现目前中国水泥工业生产发展情况，通过分析现阶段水泥生产工艺技术，探讨水泥生产过程中碳排放来源与碳排放强度等情况；结合世界水泥发展历程，与现阶段发达国家水泥生产与技术使用情况，了解国际上水泥生产先进技术使用情况，与我国水泥工业现阶段生产现状与技术使用情况，总结我国水泥发展历程，分析减排路径。

（2）分析水泥生产过程中主要碳排放来源以及相应的技术的减排潜力

对水泥生产过程中的主要碳排放工艺进行节能减排分析，对比国内外先进生产技术差异，对水泥生产过程中主要环节分析其中可采取的减排措施，减排潜力进行分析，在时间长度上探究水泥工业碳达峰碳中和的趋势。

（3）研究水泥生产中尚未普及的先进生产技术以及未来我国水泥工业中的应用

综合（1）和（2）中的研究内容与结果，积极寻找国内国际上处于研究实验阶段尚未普及的先进生产技术与工艺流程，分析尚未普及的新技术在我国水泥生产中的适用情况，研究未来二十到三十年内，先进生产技术对我国碳减排潜力、综合应用进行一定分析与预测以及生产成本等经济效益上的可行性研究。

第2章 水泥工业与碳排放情况

本章节主要探究水泥工业生产流程现状，发展历程，从水泥生产工艺的角度分析水泥碳减排路线，计算分析水泥工艺生产过程中 CO_2 排放量，通过对比世界与中国水泥工业目前的发展，分析国内外先进技术，探究中国水泥工业碳减排路线。

2.1 水泥工业生产技术与碳排放分析

2.1.1 水泥工业生产技术

目前水泥生产使用新型干法技术，新型干法水泥生产技术是指以窑外预分解技术为核心，把现代科学技术和工业生产的最新成果广泛地应用于水泥生产的全过程，形成一套具有现代高科技特征和符合优质、高产、节能、环保以及大型化、自动化的现代水泥生产方式。

如图 2-1，水泥的生产可以概括为“两磨一烧”，分为生料制备、熟料煅烧和水泥粉磨三个阶段。在第一阶段，首先，将以石灰质为主的原料粉碎。随后，把这些原料按照一定比例混合并研磨成所需的生料。在第二阶段，熟料在水泥窑中通过将准备好的生料加热到大约 1450°C 的高温，然后从冷却器中排出。在第三阶段，冷却的熟料与石膏掺合料一起研磨，制造成水泥成品^[16]。

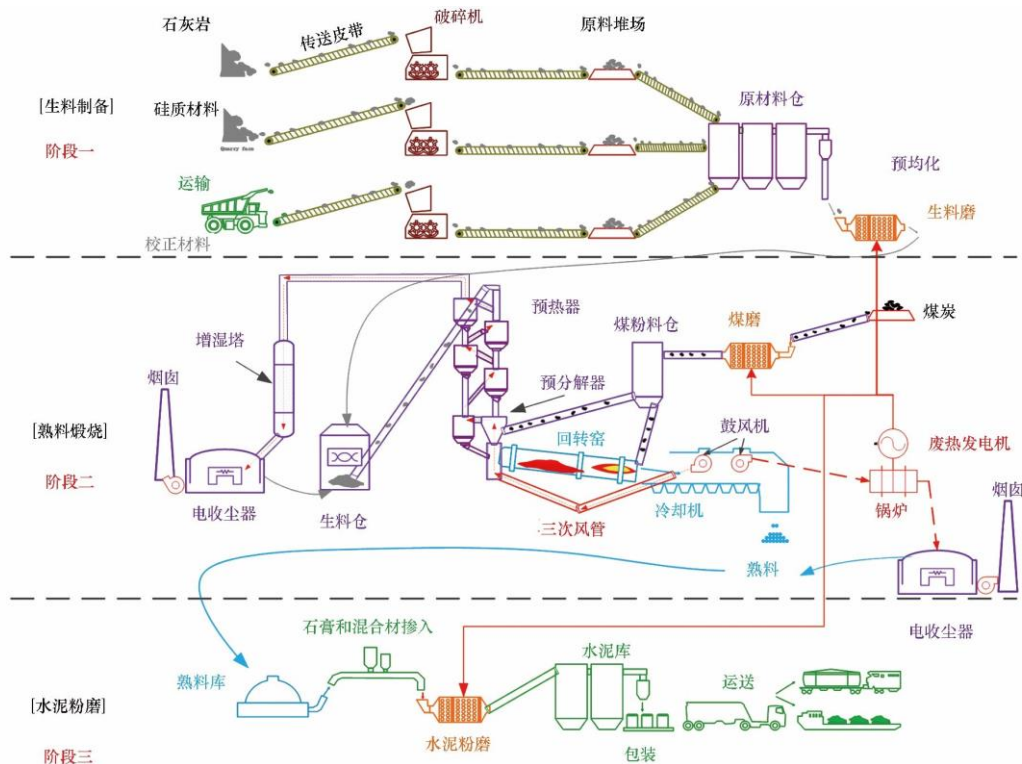


图 2-1 典型水泥厂的生产流程（预分解窑工艺，NSP）^[17]

2.1.2 水泥工业生产碳排放

通过图 2-2 展示的简化后的水泥生产流程，CO₂ 排放主要包括以下三部分^[18]：

(1) 与工艺相关的 CO₂ 排放 (E_p)：石灰石含有碳酸钙 CaCO₃ 和 MgCO₃，是水泥生产中最重要原材料，与工艺相关的 CO₂ 主要从熟料煅烧阶段这些碳酸盐化合物的分解中释放出来。

(2) 与燃料相关的 CO₂ 排放 (E_c)：与燃料相关的 CO₂ 排放直接源自燃料燃烧。在高温煅烧过程中，消耗了许多燃料为熟料煅烧提供高温环境。传统的化石燃料（煤、石油焦、天然气等）和替代燃料（塑料、轮胎、污泥等）均可用于水泥生产。

(3) 与电力相关的 CO₂ 排放量 (E_i)：与电力相关的 CO₂ 排放量间接来自电力消耗。在水泥厂，研磨机、风机和其他电气设备由电力驱动。与电力相关的 CO₂ 排放量因实际生产厂家购买的电力的排放因子而异。

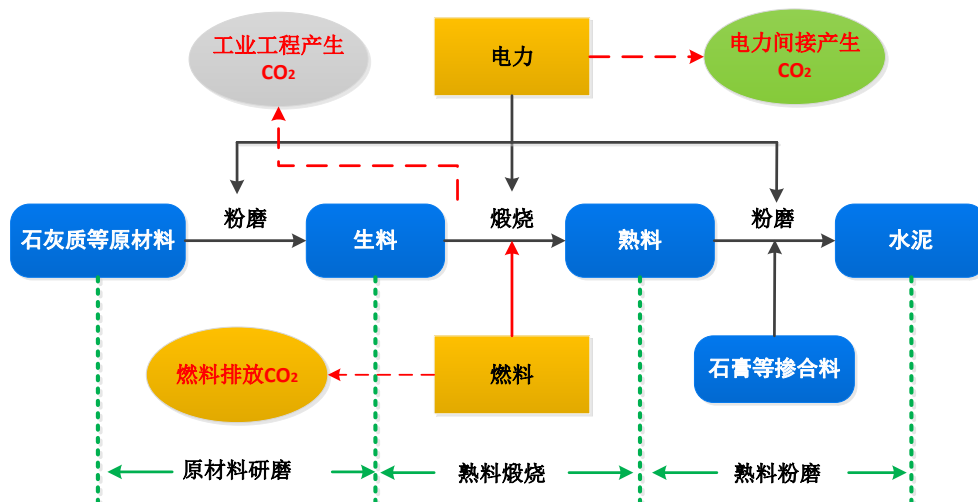


图 2-2 简化水泥生产过程侧重 CO₂ 的排放

水泥生产过程中典型的 CO₂ 排放可分为直接 CO₂ 排放和间接 CO₂ 排放。直接 CO₂ 排放主要包括工艺过程相关 CO₂ 排放和燃料相关 CO₂ 排放。间接 CO₂ 排放量是指从外部购买并在水泥生产全过程中消耗的电力^[16]。

水泥厂排放的 CO₂ 总排放量可以认为是工厂消耗热能和发电所需排放量的总和。对于水泥熟料生产过程中 CO₂ 总排放量可以使用式 2-1 进行估算。

$$E_{co_2} = E_p + E_c + E_i \quad (2-1)$$

$$E_p = Q_{cl} \times \left(FR_{CaO} \times \frac{44}{56} + FR_{MgO} \times \frac{44}{40} \right) \quad (2-2)$$

$$E_c = Q_{cl} \times C_{cl} \times EF_c \quad (2-3)$$

$$E_i = Q_{cl} \times E_{cl} \times EF_e + Q_{ce} \times E_{ce} \times EF_e \quad (2-4)$$

式中：

- E_{co_2} —水泥行业 CO₂ 排放总量，t；
 E_p —工业过程 CO₂ 排放量，t；
 E_c —能源活动 CO₂ 排放量，t；
 E_i —CO₂ 间接排放量，t；
 Q_{cl} —熟料产量，t；
 FR_{CaO} —熟料中 CaO 的含量，%；
 FR_{MgO} —熟料中 MgO 的含量，%；
 Q_{cl} —吨熟料煤耗，gcet/t（以标准煤计）；
 EF_c —燃料燃烧的 CO₂ 排放因子，gcet/t（以标准煤计）；
 E_{cl} —吨熟料电耗，kW h/t；
 EF_e —电网 CO₂ 排放因子，t/（kW h）；
 Q_{ce} —水泥产量，t；
 E_{ce} —吨水泥电耗，kW h/t。

2.1.3 水泥生产电耗造成的 CO₂ 间接排放

如图 2-2 所示，水泥生产过程中主要的电力消耗由水泥生产研磨、熟料冷却的过程产生，电力消耗间接产生的 CO₂ 的排放可以通过式 2-3 可以计算的得出，如图 2-3 所示水泥生产主要 CO₂ 排放占比，电力消耗产生的 CO₂ 排放约占水泥生产过程中 CO₂ 排放总量的 12% 左右。

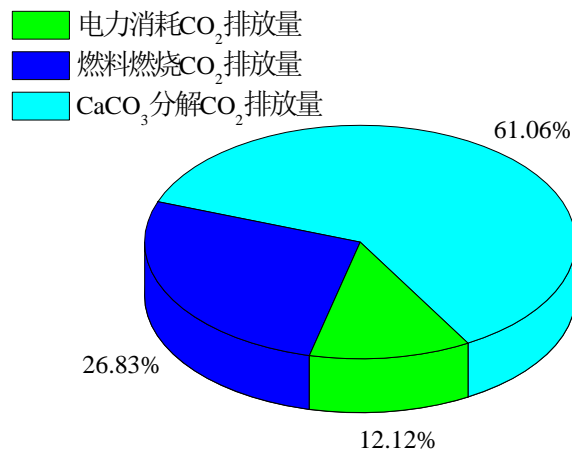


图 2-3 水泥生产各项目 CO₂ 排放量占比

2.1.4 水泥熟料煅烧阶段的 CO₂ 直接排放

水泥生产过程中第二阶段熟料煅烧是 CO₂ 排放量最大的一个阶段，也是减排难度最大的一环，在熟料煅烧过程中由于碳酸钙的煅烧和燃料燃烧，产生了大量的 CO₂。熟料煅烧阶段产生的 CO₂ 大约占整个水泥生产过程中的 90%，如图 2-4 所示，其中 30~40% 的 CO₂ 的排放是由于燃料燃烧产生，50~60% 是由于 CaCO₃ 分解产生^[19]。

同时，在熟料燃烧过程中，几乎所有燃料都被燃烧，在此过程中排放的 CO₂ 量取决于燃料类型。在中国煤炭是水泥工业大量使用的传统燃料，其燃烧排放大量的 CO₂ 也是目前作为减排的关键之一。

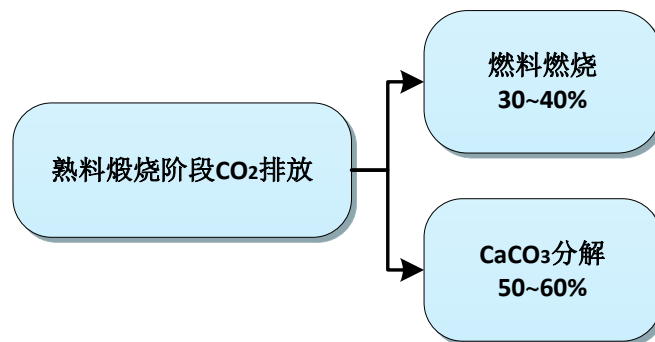


图 2-4 水泥生产熟料煅烧阶段水泥 CO₂ 排放情况

（1）CaCO₃ 分解产生的 CO₂ 排放

石灰石是生产水泥的主要原料。如图 2-5 所示，可以看出大部分水泥生料的典型配比有近 85% 是石灰质，石灰质在约 1450 °C 下燃烧制成熟料并与添加剂混合。然后将成品精细研磨以生产不同类型的水泥。

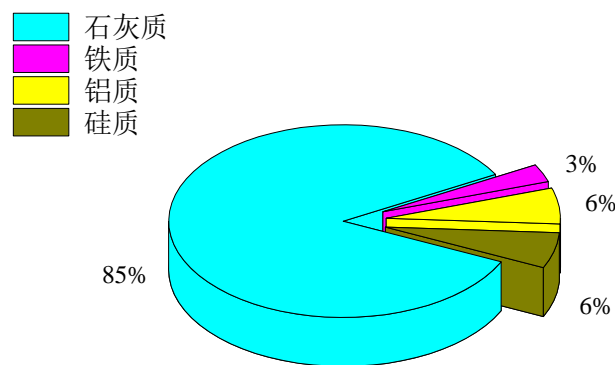
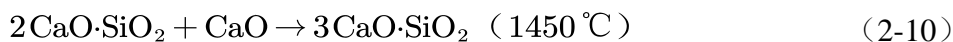
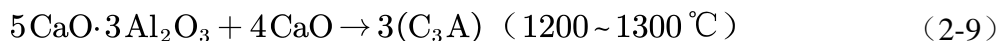
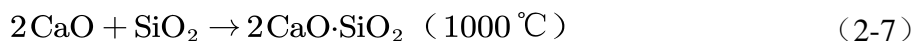
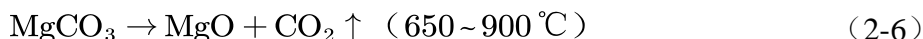
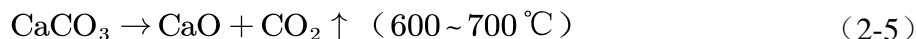


图 2-5 水泥生料的典型配比

近一半以上的 CO₂ 是在煅烧过程中石灰石转化分解产生的。如式 2-5、式 2-6 可以表示熟料煅烧过程产生 CO₂ 气体的主要反应，式 2-7 到式 2-10 表示熟料煅烧过程产生水泥的有效成分与组成的主要化学反应：



大约 64~67%的熟料成分是 CaO，其余部分由氧化铁和氧化铝组成。每吨熟料产生约 0.6 吨 CO₂。CO₂ 的排放取决于熟料和水泥的比例，这个比率通常在 0.5~0.95 之间变化。该过程产生的 CO₂ 的量根据熟料煅烧过程中原材料（石灰质）的损失而变化。图 2-6 显示了水泥制造过程中 CO₂ 排放的质量平衡结果^[20]。

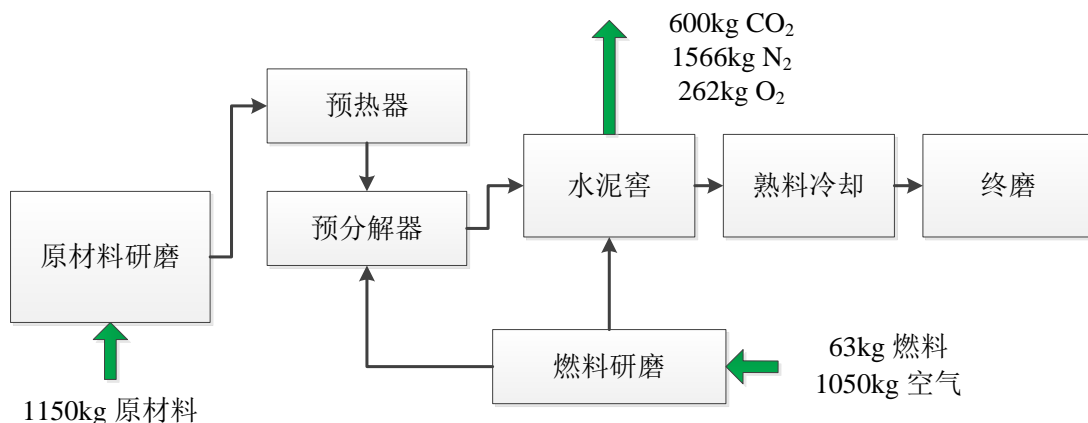


图 2-6 典型的水泥工艺质量平衡

（2）燃料燃烧过程 CO₂ 排放量

如表 2-1 展示了常用燃料的不同碳排放因子，通常，煤、燃料油、石油焦、天然气或柴油等化石燃料用于水泥工业的窑炉和预热器系统，以产生形成熟料所需的高温。世界可持续发展工商理事会指出，水泥制造过程中释放的温室气体中约有 30~40%是在这一阶段产生的。

表 2-1 来自不同种类能源的排放因子^[21]

能量类型	排放因子（tCO ₂ /tce）
煤炭	2.6604
燃油	2.2100
生物质燃料	0.2~1.8

2.2 世界水泥工业现状

2.2.1 世界水泥工业发展概况

硅酸盐水泥（OPC）起源于 1796 年英国人詹姆士·帕克（James Parker）用泥灰岩烧制一种棕色水泥，人称“罗马水泥”。1824 年英国人约瑟·阿斯普丁（Joseph Aspdin）用石灰石和粘土烧制成水泥，命名为波特兰水泥，并取得专利权。波特兰水泥日后在水泥中取得绝对地位。经过两百多年的不断发展，成为全球最常使用，产量最大的人造材料。

19 世纪下半叶，相对简单的水泥生产工艺流程，带动了欧美水泥工业的快速发展。二战后水泥产量增长尤为迅速。1950 年全球水泥产量达到 1.34 亿吨，1980 年达到 8.32 亿吨，目前以超过 40 亿吨。

从全球水泥目录中获得了所有水泥生产场地及其运营商、产能和国家的综合清单，并与世界可持续发展工商理事会年鉴进行了比较和补充，全球所有活跃和注册的水泥厂都绘制并显示在图 2-7 中^[22]。在图 2-7 中可以看出，与其他国家相比我国有着大量密集的水泥生产线。

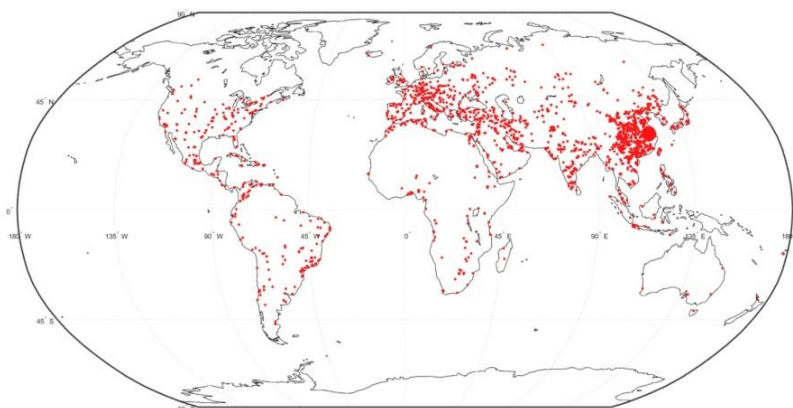


图 2-7 全球水泥生产基地

2.2.2 世界各国水泥工业碳达峰

根据 Andrew 对世界水泥工业碳排放统计数据^[23]，目前国际上许多发达国家水泥工业均已实现碳达峰^[12]。图 2-8 所示，德国、日本和意大利等国的水泥工业已经实现较为稳定性的碳达峰状态。德国水泥工业于 1972 年实现碳达峰，CO₂ 排放为 2524 万吨，并呈单峰式达峰，现在德国水泥工业 CO₂ 稳定在 1300 万吨左右，正向碳中和的目标大步迈进。日本水泥工业碳排放呈三峰式达峰，CO₂ 排放于 1970 年、1977 年、1993 年分别达峰，达峰时碳排放量分别是 3819 万吨、4190 万吨和 4256 万吨。俄罗斯和意大利的水泥工业 CO₂ 碳排放都呈平台式达峰，分别于 1977~1989 年、1980~2007 年达峰（达峰碳

排放量 1850 万吨左右)。美国水泥工业碳排放在 2006 年以 4685 万吨 CO₂ 达到峰值，目前碳排放维持在 4000 万吨。此外，英国、法国等国家水泥工业也都实现了碳达峰。

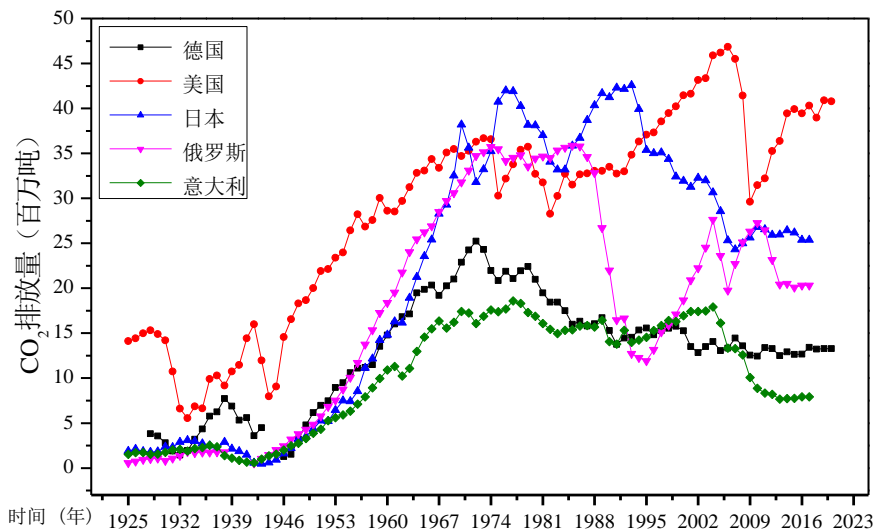


图 2-8 德国、美国、日本、俄罗斯、意大利水泥碳达峰情况示意图

2.2.3 国际水泥工业碳减排技术

1997 年 12 月，在日本京都召开《联合国气候变化框架公约》缔约方第三次会议，通过了《京都议定书》，限制发达国家温室气体排放量以抑制全球变暖。由此，很多国家针对 CO₂ 排放巨大的水泥工业碳排放环节进行技术革新，纷纷寻求减排策略。如表 2-2 为目前国际上对减少 CO₂ 排放的各项潜在措施^[24]。

表 2-2 国际减少水泥工业 CO₂ 排放的潜在措施

CO ₂ 排放量	直接措施	间接措施
能源相关	提高热能效率	提高电能效率 应用余热回收
	转向低碳替代燃料，包括生物质和原材料	
	增加熟料替代品的使用	
流程相关	用脱碳原料代替石灰石	提高混凝土中水泥的使用效率
	应用碳捕集与封存（CCS）技术	

例如欧洲国家更新工艺技术、采用节电设备、用废弃物做燃料等。日本除采用低温余热发电外，还大力研发生态水泥。意大利发现使用先进技术窑炉和替代燃料表现出更佳生态效率。美国则更多地采用提高能源效率、使用添加剂、进行碳封存等方法。这些技术性减排措施概括而言，主要包括了原料和燃料替代、工艺改进、余热发电、使用复合水泥、发展散装水泥、碳捕集和封存技术（CCS）、碳捕集和利用技术（CCU）以及开发新型低钙水泥（SC）等。

2.3 中国水泥工业概况

2.3.1 中国水泥工业发展历程

我国从十九世纪五十年代开始大规模从德国、捷克、丹麦等有先进技术国家引进成套的设备建设新厂，到十九世纪五十末水泥产量达到 0.12 亿吨，经过持续不断的发展，到七十年代末水泥产量较五十年代相比增长六倍，达到 0.74 亿吨。

1980 年到 1995 年，随着国民经济的迅速发展和水泥工业技术的积累，这一时期全国水泥年产量直线上升。1985 年，我国水泥年产量达到 1.46 亿吨，产量跃居世界首位。1990 年，我国水泥年产量达 2.1 亿吨，约占世界总年产量的 15%。1995 年，我国水泥年产量达 4.76 亿吨，比 1990 年增长 50% 以上。

1995 年，建材工业提出了“由大变强”的跨世纪发展战略，开始了水泥产业结构调整，一大批新型干法水泥生产线投产。2000 年，我国水泥年产量达 5.97 亿吨，占世界水泥年产量的 34.8%^[25,23]。

随着我国水泥产量的迅速增长，我国水泥产能在 2011 年已经达到 25 亿吨，其中熟料产能接近 15 亿吨。预计到 2025 年我国的水泥生产能力将达到 30 亿吨以上，其中熟料产能 18 亿吨以上。如图 2-9 展示了我国水泥产量与世界其他国家的比例。

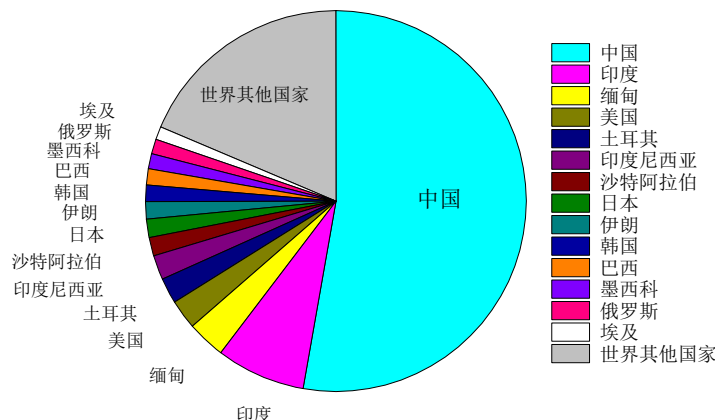


图 2-9 2020 中国水泥产量与世界其他国家占比

二十世纪六七十年代出现的新型干法技术，大幅提高了水泥生产的效率与生产能力，水泥行业在规模、能耗、排放等方面取得了长足进步。由于经济的飞速发展和建设的需要，未来对水泥的需求量会越来越大，同时水泥工业的年耗煤量也会随着迅速增加，占建材行业年耗煤量的比例会越来越高，这对于我国储量越来越少的煤炭资源来说情形异常严峻，因此，寻求一种节约能源减少排放的水泥生产工艺是可持续发展的必然趋势。促进水泥工业向大型化进一步发展，也是实现水泥工业现代化的必经之路。

2.3.2 我国水泥工业生产现状

中国水泥自 1985 年起，经过多年发展，产量已连续 30 年居于世界首位。1978 年至 2021 年期间，我国水泥年产量从 6500 万吨上升到 2014 年的最大 24.8 亿吨，生产的水泥占全球水泥供应量的 56%，而且我国水泥产业在过去三十年中主导了全球水泥产量增长的 74%^[26,27]。

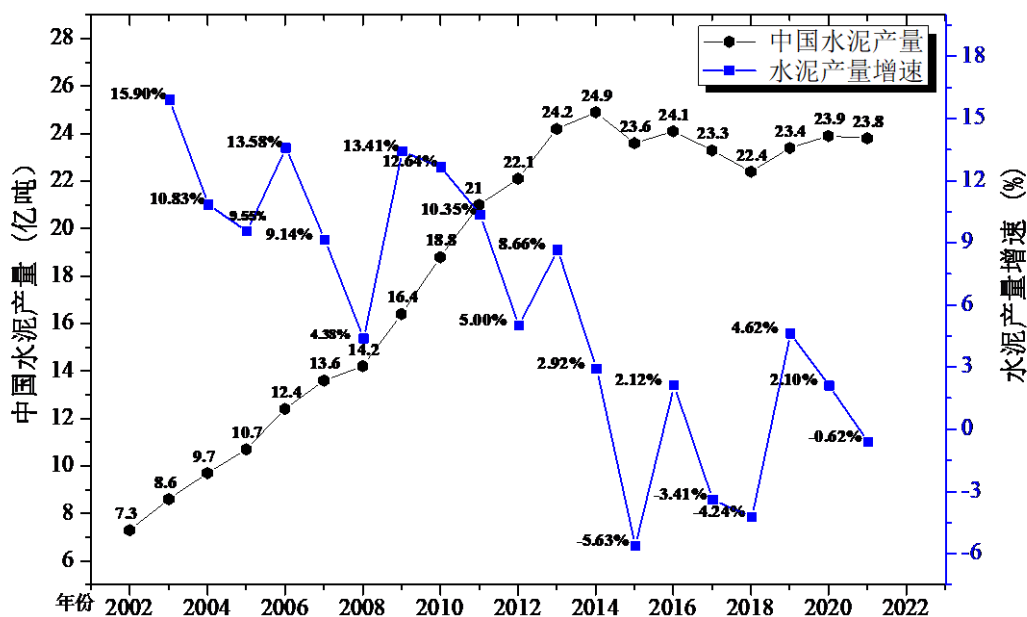


图 2-10 2002-2020 年我国水泥产量与水泥产量增速

如图 2-10 所示，2021 年，中国水泥产量 23.8 亿吨、占全球水泥产量的比重为 57.6%，较 2005 年增加了 13.1 亿吨。同时水泥生产占中国能源总消费量的 8%，2014 年，中国水泥产量达到 24.8 亿吨，为历史最高。此后，在国家去产能政策施行下，水泥产量增速逐渐放缓维持在 $\pm 5\%$ 左右，水泥产量保持在 24.8 亿吨以下、22 亿吨以上。

根据生产经营许可证统计，除特种水泥熟料生产线和少许新型立窑外，我国新型干法水泥产量比重已接近 100%，如图 2-12 所示，实际产能在 2500 吨/日及以下的产能约占总产能的 28%，2500 吨/日至 8000 吨/日（含）约占 70%，8000 吨/日以上产能约占 2%，生产通用水泥的新型干法窑单线平均规模提升至 3605 吨/日以上^[28]。

此外，中国水泥行业也遇到了严重的产能过剩，如图 2-11 为我国目前水泥厂布局，至 2020 年 12 月我国共有新型干法窑水泥生产线 1609 条，熟料产量达到 15.79 亿吨，产能达到 18.30 亿吨^[29]，但整体利用率始终低于 0.8。

如此巨大的水泥产能导致 CO_2 排放量也十分巨大，中国面临的挑战可能更为严峻，我们可以预见，现有基础设施生产将继续释放大量温室气体，这将危及国家气候目标，

即在 2030 年之前达到 CO_2 排放峰值并在 2060 年之前实现碳中和^[30]。为此，在碳达峰、碳中和的背景之下，结合我国水泥工业现状研究水泥行业碳减排路线尤为重要。



图 2-11 中国水泥厂的当前布局^[31]

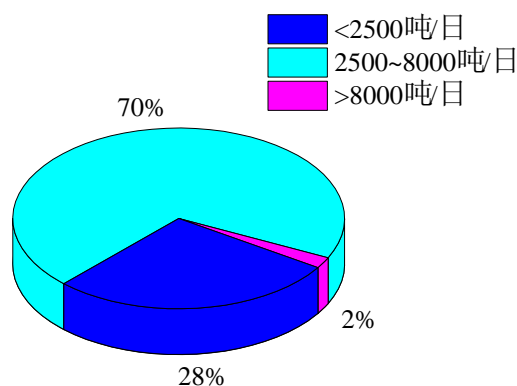


图 2-12 全国水泥生产线产能分布占比

2.3.3 我国水泥工业 CO_2 排放现状

目前我国水泥行业的碳排放量占总碳排放量的近 10~13%，水泥行业消耗的工业能源总量约为 12~15%，成为仅次于电力行业的第二大 CO_2 贡献者。 CO_2 排放量增速已超过我国 GDP 增速，极可能对中国经济可持续增长和社会发展构成重大威胁。

作为全球最大的水泥生产国，我国面临的挑战可能更为严峻，尽管过去的缓解努力已经开始取得成果。从 1978 年到 2020 年，水泥产量从 65 万吨上升到 2395 万吨，平均每年增长 9% 左右，不仅占 2018 年全球水泥总产量的 56%，而且在过去三十年的全球增长中占 74% 的主导地位。

我国水泥工业产量巨大，发展极为迅速，如图 2-13、图 2-14 展示了随着中国水泥产量的急剧提升，我国水泥工业 CO_2 的排放也逐年走高，在 2020 年水泥工业 CO_2 排放量达到 24 亿吨以上，占世界水泥工业 CO_2 排放的 50% 以上^[32,33,27]。

在目前全球气候问题的影响下，我国在水泥工业碳减排、碳中和上的任务也迫在眉睫。但是我国水泥工业相比其他发达国家水泥工业技术不够先进，对能源消耗资源循环利用等方面发展较晚，同时我国在水泥工业的核心工艺熟料煅烧上，主要采用煤炭为主要燃料，其燃烧中释放的大量 CO_2 ，水泥生产其他部分有大量的能源电力的消耗也会直接或间接的造成 CO_2 的大量排放。由于碳中和碳减排方面技术尚不成熟，先进生产技术使用范围较少，同时从生产工艺的技术迭代来看，暂时还没有出现突破性或颠覆性的技术；从胶凝材料的成分创新来看，目前也还没有新的材料可以替代硅酸盐水泥在工业生产和应用。因此，基于工艺能源技术的改进与利用，或许是我国水泥行业开展碳减排工

作的少数选择之一。

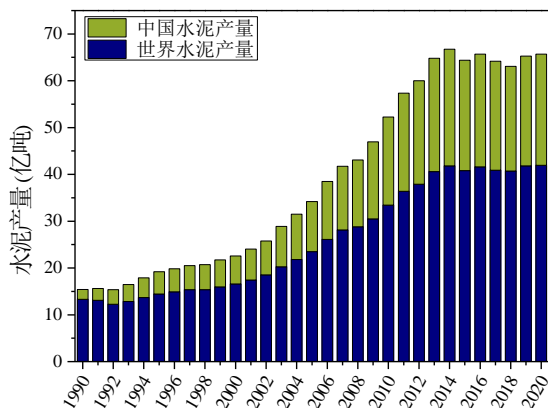


图 2-13 1990~2020 年中国和世界水泥产量增长

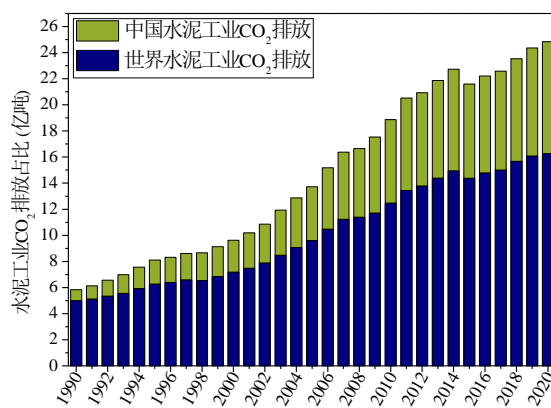


图 2-14 1990~2020 年中国 CO₂ 排放占比

2.4 本章小结

本章介绍了水泥工业的生产技术，分析了水泥工业生产过程中 CO₂ 的排放来源与过程。分析了世界上水泥工业强国的水泥工业发展现状，以及德国、意大利、日本等国的水泥工业碳达峰路线，分析总结其中使用的先进技术，为我国水泥工业碳减排路线的研究做出了一定依据。最后简述了我国水泥工业的发展历程与碳排放现状，综合研究了我国目前水泥生产企业的技术现状，表明我国现阶段在水泥碳减排路线上在能源消耗上、工艺技术上、水泥生产燃料原材料的使用上仍有巨大发展空间，后续章节将会围绕电耗、工艺技术上的碳排放、新技术的使用来进行水泥工业碳减排的路线探究。

第3章 水泥生产电力消耗碳减排分析

我国水泥行业经过多年发展，目前我国水泥工业电耗水平有明显降低，尤其一部分先进企业的电耗指标已到达或超越世界先进水平，但由于我国水泥生产企业水平参差不齐，有许多企业的生产综合电耗仍然相对较高，仍然一定的发展空间。本章主要研究水泥生产过程中由于电力消耗间接造成的 CO₂ 减排研究。

3.1 我国水泥工业综合电耗

如图 3-1 展示了水泥行业的综合电耗，能源成本在其总生产成本中所占比例较高。随着国家经济的不断发展，可利用的资源和环境制约日益严峻。因此，水泥行业的节能减排已成为工艺开发的选择之一。节能理念决定了国家节能目标的实现。数据分析表明，能源效率的提高可以减少电能的使用，从而降低水泥生产电力消耗造成的碳排放。

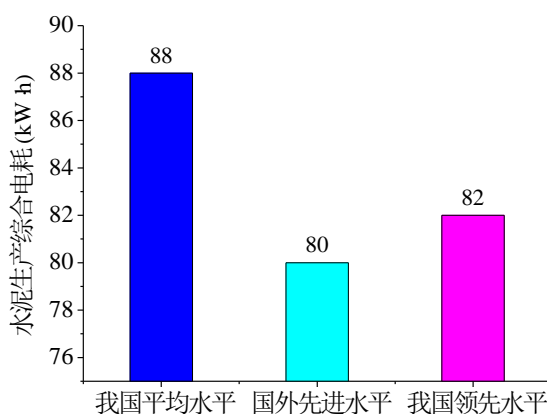


图 3-1 水泥工业生产综合电耗

3.1.1 电力消耗的碳排放核算

通过表 2-1 可以对水泥生产电耗碳排放核算。水泥生产电耗碳排放量（吨）=单位水泥综合电耗（kW h）×电力二氧化碳排放因子（kW h/t）。

表 3-1 水泥生产电耗碳排放核算^[34]

项目	单位消耗量	排放因子	CO ₂ 排放量	占比
电力消耗	97kW h/t	0.8kW h/t	77.6kg/t	10.6%

3.2 水泥生产流程电耗

水泥生产过程中主要的电力消耗从表 3-2 中可以看出，在水泥生产过程中，电力的消耗主要在于原料提取、混合、研磨、均化、熟料生产、水泥研磨和输送、包装和装载。

其中，粉磨是电耗研磨仍然是水泥生产中最大的能源消耗来源。在现阶段生产中，水泥生产的单位电耗约 75~90kW h/t, 大约 60~70%的电耗用于原料、煤和熟料的研磨。因此，降低水泥厂电耗最主要措施即降低粉磨工业工程中的耗电量。

表 3-2 水泥生产过程中单位水泥电力消耗

水泥生产流程	单位水泥电耗 (kW h/t)	占比 (%)
生料粉磨	36	37.1
熟料烧成	22	22.7
水泥研磨	38	39.2
水泥发送	1	1
总计	97	100

3.2.1 原料处理阶段电力消耗

原料处理包括了原材料开采、原料破碎、原料均匀化过程。原材料处理过程中主要是电耗引起的 CO₂ 的排放，如表 3-3 展示了原料处理阶段的电耗碳排放量。磨粉机的电耗主要受电机功率所影响，研磨介质的负荷越低，研磨介质的质量越低，磨粉机的电耗就越低。其中在原料破碎阶段破碎机的电耗是可以作为碳减排路线的主要突破口。

表 3-3 4000t/d 以上（含 4000t/d）生产线原料处理阶段电力消耗与 CO₂ 排放量

	国际先进水平	全国先进水平	国内平均水平
电力消耗 (kW h/t 原料)	0.9	1.4	2.5
CO ₂ 排放 (kg/t 原料)	0.85	1.33	2.37

3.2.2 生料制备阶段电力消耗

生料制备过程中包含了生料粉磨和生料均匀化过程，同原料处理阶段相同我国在生料制备阶段 CO₂ 的排放主要来源也是由电力消耗造成。如表 3-4 展示了生料制备阶段的电耗碳排放量。同原材料处理时的原料破碎不同，生料制备阶段的生料粉磨也会造成大量的电力消耗，由下表对比可以看出国内平均电耗水平与国际先进水平有一定差距，但由于我国水泥产业体量巨大这一部分电耗差距也显得尤为重要。

表 3-4 4000t/d 以上（含 4000t/d）生产线生料制备阶段电力消耗与 CO₂ 排放量

	国际先进水平	全国先进水平	国内平均水平
电力消耗 (kW h/t 原料)	15.1	16.15	18.5
CO ₂ 排放 (kg/t 原料)	14.33	15.32	17.55

3.3 水泥生产研磨电耗碳减排

水泥生产过程通常概括为“两磨一烧”。所谓“两磨”是指包括水泥生料制备和水泥制备在内的两个粉磨过程。据估计，在水泥生产过程中，两个粉磨过程的电耗占到总电耗的 65%。因此，采用新型粉磨设备是降低水泥生产能耗的主要途径，也是减少 CO₂ 排放的重要途径^[35]。

粉磨作为水泥行业环境污染的第二大贡献者，它是整个生产过程中最大的电力消耗者^[36]。水泥生产用电 31~44%用于水泥粉磨，26%用于生料粉磨，3~7%用于燃料粉磨，28~29%用于熟料生产，其余用于固体燃料粉磨、水泥装载和包装等^[37]。实施高效的研磨和研磨技术可以为水泥生产节省高达 14%的电力需求。安装高效研磨技术所节省的电力取决于所需的产品质量，因为更高的强度等级需要更精细的研磨设施。为生料磨通风机安装高效风机，采用变频和高效电机，是最具成本效益的两种节电措施，在水泥研磨中用立式辊压机与立磨机代替球磨机，可以实现最大的节电潜力。

3.3.1 研磨技术变革

对材料的粉磨加工有着悠久的历史。在中国古代，粉体加工技术从杵发展到碾子和石磨，研磨设备和被研磨材料之间的接触从“点接触”发展到“线接触”，然后是“平面接触”。因此，研磨效率显著提高，研磨能耗降低。在古代智慧的孕育下，如表 3-5 展示了现代研磨技术也经历了从球磨机的“点接触”到辊磨机和高压辊磨机的“线接触”的进步^[38]。

表 3-5 研磨历史进展

	点接触	线接触	面接触
古代	杵子 	碾子 	石磨 
现代	球磨机 	辊压机 	立磨机 

3.3.2 研磨技术比较

表 3-6 展示了使用不同研磨设备对矿渣和熟料进行研磨的效果对比。可以看出球磨与立磨对比消耗更多的能耗，使用运行过程的运行维护对比立磨也有诸多不足，结果表明，非球磨技术的运用将是水泥工业未来的发展趋势。

表 3-6 矿渣和熟料研磨之间的对比

		矿渣	熟料
能耗（kW h/t）	球磨机	65~75	35~40
	立磨	26~29	21~25
运行维护	球磨机	能耗高，需干分级，环境协调性差	能耗高，需干分级，环境协调性差
	立磨	能耗低，烘干、研磨、分级一体成型，环境协调性好	能耗低，烘干、研磨、分级一体成型，环境协调性好

3.3.3 我国研磨技术使用情况

我国水泥企业原来大多是采用低效的球磨机，效率只有 5~8%^[39]，现在普遍采用立式磨、辊压磨、挤压磨、高细磨等代替原有的球磨机；以大磨机取代小磨机，淘汰直径小于 1.83m 的小型球磨机；改进粉磨工艺流程，增添预破碎机、选粉机；采用耐磨钢球、耐磨衬板及节能型衬板等，如图 3-2 展示了我国水泥行业各种研磨系统的使用比例。

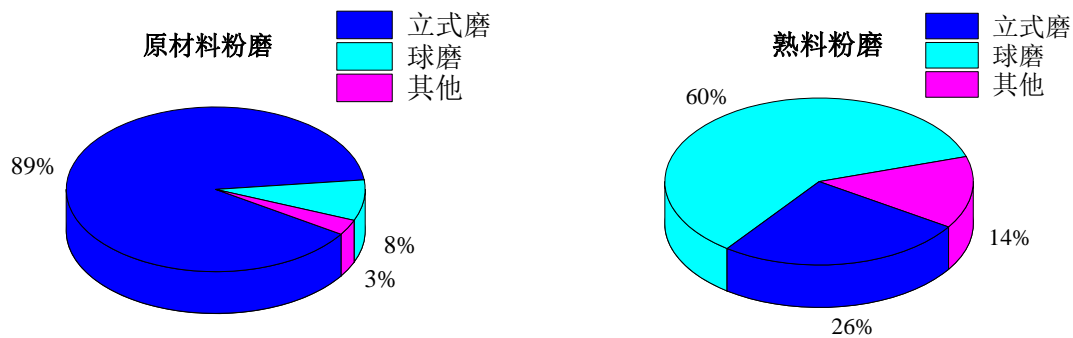


图 3-2 2020 年我国水泥行业不同种类粉磨工艺的使用情况

如表 3-7 所示，当前阶段，在粉磨系统中，辊压机系统、立式辊磨成为重要选择，按照粉磨机理加以分析，由于辊压机为受限高压粉碎，相比于辊磨粉磨效果较为良好，但幅度有限，相比于球磨系统，辊压机系统更加省电，因为辊压机内用风量、阻比较低，

通风耗电量比较低,但辊压机中斗提耗电量较高。系统生料的耗电量有 2~3kW h/t 差值,按照生熟料的折合比为 1.5,熟料的配比为 75%,相比于球磨系统,辊压机的耗电量减少 2~3kW h/t。

表 3-7 原料研磨技术比较

标准	立磨	球磨机	辊压机
最大进料量	高达 25%	不带干燥箱, 最多 3%	6~10% 选粉机内或外干燥
		带干燥箱, 最多 6%	
		带干燥箱和外干燥, 最多 12%	
单位能耗	60~70%	100%	40~50%

在水泥粉磨过程中,约 42%的水泥工业粉磨过程将由多项水泥研磨技术综合使用,此外,新型预磨技术也是通过改进落后球磨技术有效提高能效的关键技术,到 2050 年该技术的份额将稳步增长至 20%。在原料粉磨过程中,球磨技术将逐渐被立磨和辊压技术取代,预计到 2030 年退出市场^[40],同时,2030 年后,辊压技术进一步推广,到 2050 年达到 76.8%。

3.3.4 研磨技术碳减排

我国水泥工业的粉磨设备仍以传统球磨为主,而且小型球磨的粉磨电耗又远高于大型球磨。通过推广使用立磨、辊压机等节能粉磨设备,以及采用变频技术和其他节能措施,我国水泥生产的电能消耗可进一步降低。

每生产 1 吨水泥需要粉磨近 3 吨的物料(包括生料、燃煤、熟料和混合料等)。与传统球磨相比,立磨、辊压机等新型粉磨设备单位电耗可节省 30~40%。按 2020 年平均吨水泥电耗降低 10kWh 估算,则全行业每年可节省电耗约 240 亿 kWh,结合全国水泥电耗碳排放因子平均水平 0.8kW h/t,间接减排 CO₂ 约 2000 万吨。

3.4 水泥窑余热发电技术

用于发电的余热回收发电技术(EHR)现在被认为是水泥生产的全球新兴术语,尽管在该行业已久为人知。与水泥制造过程相关的降低能源消耗和排放的最大机会将通过改进高温处理获得。可以改进能源管理,升级现有设备,采用新的高温处理技术和研发,为水泥制造工艺开发全新的概念。

使用蒸汽发生器从窑尾废气中回收余热;减少窑内热量的损失可以考虑用于高温处理的改进^[41]。每余热发电 1 千瓦时可减少 CO₂ 排放约 0.9 千克,近年来我国水泥窑余热发电技术(EHR)得到普遍应用,几乎 80%以上的熟料生产设施都配备了 EHR。通过

EHR 设施,水泥厂本身可以生产 38~50kW h/t 熟料的电力,几乎相当于总用电量的一半,可补偿吨水泥生产电耗的三分之一到二分之一^[42]。

3.5 水泥生产电耗碳减排措施总结

目前在我国水泥生产过程中,大力发展先进水泥研磨技术,发展生产智能化,发展低温余热发电技术,加大清洁电能的利用,对于水泥生产电力消耗有大幅优化效果,让水泥生产过程中电力消耗造成的碳排放大幅减少。

总结水泥生产流程中电力消耗,以及生产技术如图 3-3 所示,电力碳减排措施综合如表 3-8 所示。

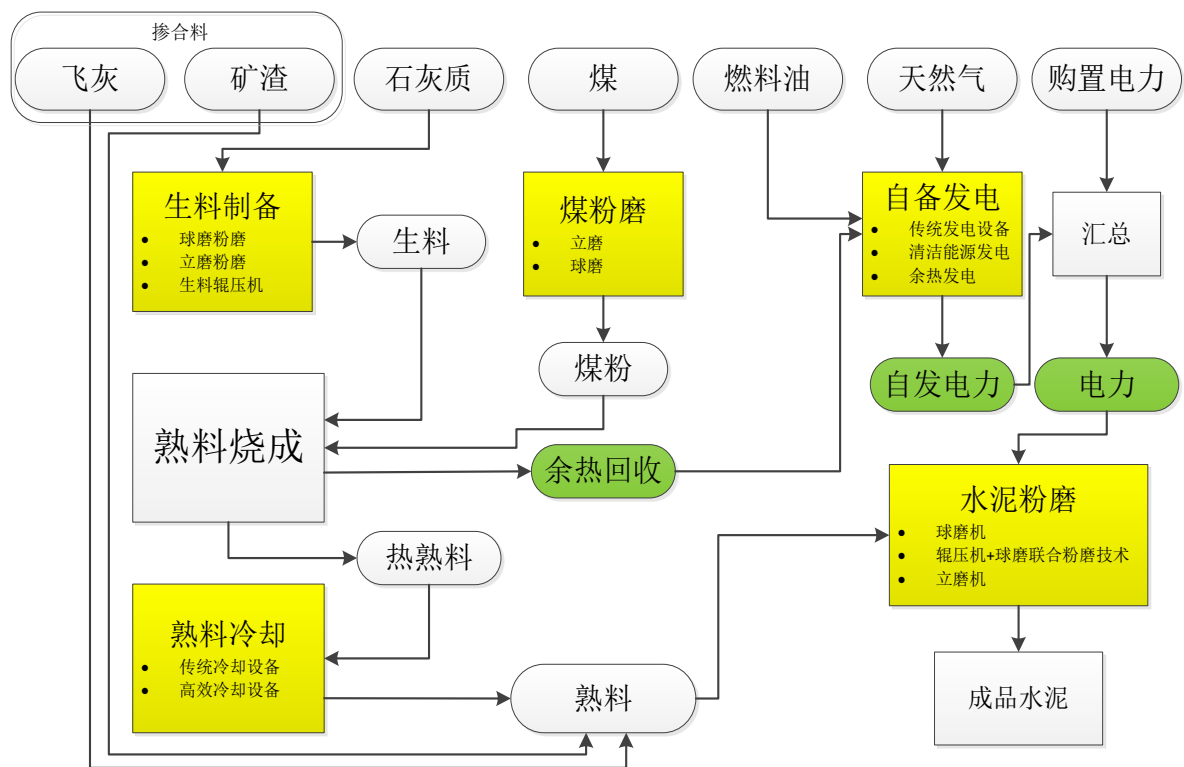


图 3-3 水泥生产流程注重电力消耗

表 3-8 水泥生产阶电力减排措施总结

减碳措施	减少电能消耗	间接 CO ₂ 减排潜力
高效研磨机	10~16kW h/t 水泥	7~10kgCO ₂ /吨水泥
原料多级联合研磨系统	0.8~1.7kW h/t 熟料	0.4~0.9kgCO ₂ /t 熟料
高效分离器	2.0~5.08kW h/t 水泥	1.1~5.2kgCO ₂ 水泥
变速驱动技术	3.0~9.15kW h/t 水泥	1.5~5.2kgCO ₂ /t 水泥

在熟料冷却过程中，高效冷却技术由于其成本优势将成为主流，预计到 2050 年将占据 80% 的份额。2020 年后普通冷却技术将被淘汰。

目前世界其他国家大多数水泥厂已经采用了智能电机控制中心（MCC）^[43]、能源管理系统（EMS）、节能窑炉和先进冷却器等创新技术。除此之外，水泥制造商还涉足可再生能源，以进一步减少因发电而产生的碳排放。

同时水泥生产企业采用余热发电可提供水泥生产用电的 40~50%，利用风力、光伏等清洁电能可实现电力消耗自给自足，可以使得水泥工业生产电力消耗零排放。各种清洁电力的使用如图 3-4 所示。



水泥窑余热发电

吨熟料发电功率 50kW·h



光伏发电

6 万平方发电功率 10 kW·h



风力发电

单台风机发电功率 1500 kW·h

图 3-4 水泥工业过程中清洁能源的利用

3.6 本章小结

本章分析了水泥行业的综合电耗，进行水泥工业电耗碳排放核算，从水泥生产过程中消耗巨大的研磨、冷却等过程进行碳减排探究，研究分析出对水泥研磨技术的变革与提高将显著提高生产效率与降低电耗。同时配合使用清洁能源、低温余热发电技术可以实现水泥工业电耗的零碳排放。

第4章 水泥生产熟料煅烧碳减排分析

前面章节我们已经对水泥生产过程中电力消耗碳减排进行了分析，第二章分析了水泥生产熟料煅烧阶段碳排放情况，下面我将对水泥生产过程中产生大量二氧化碳的排放的熟料煅烧过程进行碳减排路线分析。

4.1 我国水泥工业综合能耗

熟料生产占全过程能耗和 CO_2 排放的 80% 以上。我国《节能减排“十三五”规划》提出，到 2020 年水泥熟料生产综合能耗下降到 105kgce/t 。如图 4-1、图 4-2，2015 年的实际值为 112kgce/t ，2020 年的熟料生产综合能耗值为 $109\text{kgce/t}^{[44]}$ ，虽然我国水泥先进企业的能耗与排放指标已达到或超过世界先进水平，但与“十三五”规划目标的目标还有一定差距。目前我国水泥生产综合能耗，我国单位熟料综合能耗由 2013 年的 123.5kgce/t 降低到 2018 年的 116kgce/t ，五年降幅 6.1%，年均降幅达到 1.2%。

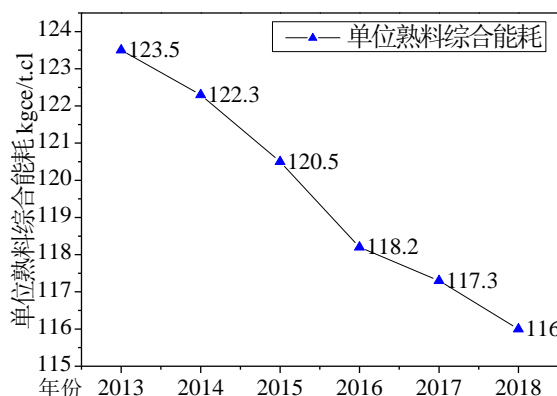


图 4-1 2018 年我国水泥行业单位熟料综合能耗情况

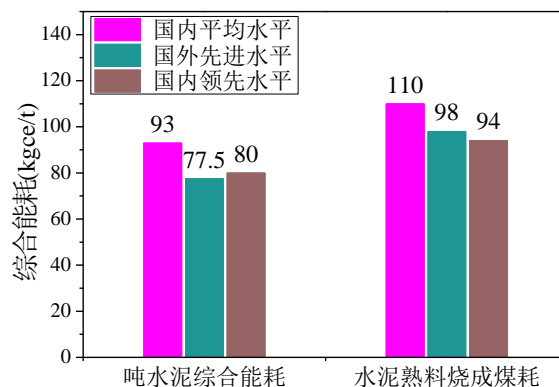


图 4-2 国内外水泥工业主要能耗指标对比

4.2 熟料煅烧阶段使用替代燃料的碳减排

4.2.1 水泥生产可使用的替代燃料

燃料的碳含量燃烧产生的 CO_2 排放与比热需求以及碳含量与燃料热值的比率成正比。我国是煤炭生产大国，在水泥生产煅烧过程中大量使用煤炭作为燃料，煤炭燃烧产生大量的 CO_2 。其他国家还使用其他类型的燃料，例如：石油焦、天然气、燃料油，以及从废物和生物质中获得的一些其他类型的替代燃料。煤炭、石油、天然气等传统燃料对全球水泥行业的热能需求贡献了近 94%，而生物质和基于废物的替代燃料的贡献仅略达到 5% 左右^[45]。

水泥窑因其高工艺温度而非常适合废物燃烧，对应用替代燃料具有许多得天独厚的优势^[1]，通过燃烧废物或生物质作为替代燃料，可以减少二氧化碳排放。水泥生产可以

使用废物来替代原材料和传统燃料。使用废物衍生燃料可降低环境影响和燃料成本。替代燃料的燃烧是从废物中回收热能，节能减排减碳的理想方法。

替代燃料通常包括农业和非农业生物质残留物、石油基废物、杂项废物以及化学和危险废物，图 4-3 展示了目前可使用的替代燃料。同时如医药废物、废旧轮胎、固体再生燃料（SRF）、垃圾衍生燃料（RDF）、污水处理污泥（ETP）等，这种使用合适的废物作为水泥工业替代燃料过程称为水泥窑协同处理垃圾系统。



图 4-3 目前可使用的各类替代燃料

城市的一些可燃性工业固体废弃物、生活垃圾以及污泥等碳含量较低，但却可以提供熟料煅烧阶段所需的热量，可作为水泥生产的替代燃料。目前有研究表示污泥的热值不仅完全可以满足水泥生产，处理其中所含的金属元素还可以替代生产环节中约 14% 的生料^[35]。

替代燃料的替代品取决于所使用的替代燃料的类型。替代率可以从 80~100%。同时在水泥工业中使用替代燃料的好处包括^[46]：

- a) 减少二氧化碳排放；
- b) 由于使用廉价的燃料，熟料生产成本降低；
- c) 保护资源，降低不可再生的化石燃料的使用；
- d) 合理的材料二次利用；
- e) 由于不存在灰烬、土壤和污水，燃烧无残留；
- f) 危险物质被破坏，由于过程中温度高，气体残留时间长，燃烧材料逆流原理和氧化气氛；
- g) 热效率高。由于工业过程中 1450℃ 的高温水平、较长的气体残余时间、燃烧材

料、逆流原理和氧化气氛，有害物质将被销毁；

- h) 开业完成大量的垃圾处理工作；
- i) 实现良好的生态平衡。

如图 4-4 形象的展示燃料水泥工业中替代燃料共燃烧的优势。

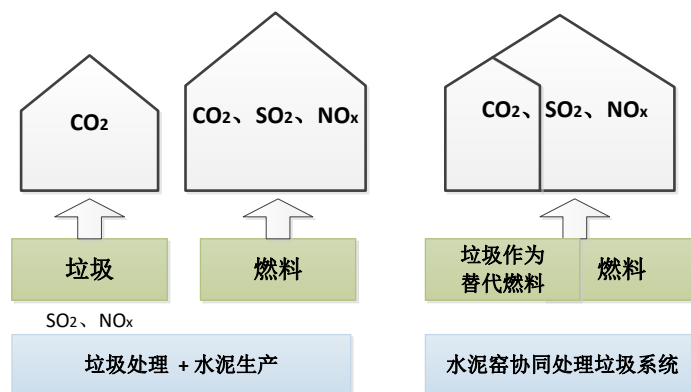


图 4-4 水泥工业中替代燃料共燃烧的优势

4.2.2 世界范围替代燃料使用情况

对于替代燃料在水泥生产热能中的平均份额而言，亚太地区(24%)低于欧洲(40%)和美洲(26%)。最近关于亚洲水泥行业的文献也强调使用工业废物和生物质作为广泛使用的煤炭的替代品，在未来保持低碳密集和可持续发展的巨大潜力。

在美国，水泥厂 20~70%的能源需求来自替代燃料是很常见的。很少有个别工厂使用适当的废料达到 100%的替代率。近年来，欧洲水泥厂对废料的使用得到了广泛的推广欧洲的替代率约为 17%。比利时、法国、德国、荷兰和瑞士的平均替代率已达到总能源使用量的 35~70%以上。现在，欧盟包含 268 家水泥厂，其中超过 64%的设施使用废料作为替代燃料。替代燃料的使用程度因国家不同而不同。表 4-1 显示了一些欧洲国家在 2010 年和 2011 年之间用替代燃料替代化石燃料的比例^[47]。

如表 4-1 所示，最高的比率(83%)属于荷兰，但有几个国家达到了显著的替代率，如奥地利、德国和挪威约 60~63%或瑞士和比利时 47~49%。另一方面，尽管意大利和西班牙只实现了较低的替代率，分别约为 8.6%和 22.4%，但这些国家在最近几年增加了替代燃料的替代量。就西班牙而言，与 2004 年相比，替代燃料的使用增加了约 22%，当时约有 17.5 万吨的废物材料被作为能源回收材料使用。这些发现表明，替代燃料在水泥行业仍有很大的未实现的潜力。此外，2009 年，波特兰水泥协会估计，在美国，许多工厂用替代燃料满足了他们 20~70%的能源需求。

在意大利一家水泥厂使用回收塑料作为替代燃料，其热量替代率为 22%，与意大利

工厂的平均热量替代率为 4%相比，使用废物衍生燃料是环保的，因为它可以同时减少水泥厂和垃圾填埋场的排放。

表 4-1 2010-2011 年选定欧洲国家用废料替代化石燃料的比率^[47]

国家	替代率（%）	国家	替代率（%）
意大利	8.6	奥地利	63.1
西班牙	22.4	瑞士	49.0
丹麦	25.0	比利时	47.3
法国	29.4	德国	62.0
瑞典	29.0	荷兰	83.0
挪威	60.0	英国	39.5
平均 UE-27（2010）		30.5	

在日本水泥行业，利用生物质燃料和回收的废弃化石燃料等替代燃料和原材料（AFR）替代自然资源，缓解了自然资源枯竭的压力。在香港水泥行业使用回收木材废料生产的木屑颗粒作为辅助燃料和碎玻璃，使用本地产生的废玻璃瓶替代熟料可减少超过 17 万吨 CO₂ 排放量^[47]。

4.2.3 我国替代燃料使用现状

中国目前是消费大国，产生大量的生活垃圾，经过分析，我国城市生活垃圾中在城市垃圾中，有食物垃圾、纸类、塑料、橡胶、纺织品类、庭院垃圾、金属和大型电器、玻璃陶瓷、其他惰性材料、其他成分等。其中食物垃圾综合占比最大，约为 55%，其他纸类占比约 15%，塑料占比 18%，织物类占比 2%，其他垃圾占比 10%^[48-50]。

我国城市生活垃圾中含碳量估计约为 30~40%，每吨垃圾燃烧可产生约 1~1.5 吨 CO₂。使用生活垃圾作为水泥煅烧原材料，可以减少近一半原材料煅烧产生的 CO₂^[51]。

由国外发达国家发展“替代燃料”产业的经验可知，垃圾分类是发展“替代燃料”产业的重要条件。我国已开始推行垃圾的分类，如上海、北京、天津等许多大中城市已作为一项法律规定明确下来。

我国的水泥产能已严重过剩，2000t/以下的水泥生产线很快将被全部淘汰，发达地区 4000t/d 的水泥生产线都已属于被淘汰之列。被淘汰水泥厂的场地和部分设备，都可

以作为建设“替代燃料”生产线之用，使水泥生产转型为生产“替代燃料”的环保产业。对“替代燃料”产业化的快速发展，肯定会起到事半功倍的作用。这些都为“替代燃料”产业的快速发展创造了良好条件^[1]。

我国水泥窑协同处理垃圾技术起步较晚，且我国垃圾分类做的尚不成熟，在使用生活垃圾作为可替代燃料方面还有很大的空间有待挖掘。目前我国仅约 5%的生产线开展了固体废物协同处置^[52]，应持续加大水泥行业综合利用固体废物力度。

4.2.4 使用替代燃料减少 CO₂ 排放

中国是最大的水泥生产国，但是我国在应用可燃废弃物工程技术方面却远远落后于时代了，成为我国水泥工业发展中的一块短板。中国新丰水泥工业园是协同处置的一个明显例子，将城市产生的废物纳入水泥生产。同时发现使用电石渣和石灰石渣代替传统原料的原材料变化、使用玉米秸秆代替煤炭作为替代燃料，使用替代燃料、能源效率和熟料替代，到 2050 年，水泥行业的排放量可减少到 15.5 亿吨。

水泥生产中在燃料方面的替代是相对灵活的，可以被生态替代品如生物质替代，从而有望减少 15%的 CO₂ 总排放量。

目前国外使用最佳的燃料替代率已接近 100%，国内平均仅 2%，预计 2030 年可达到 10%，可减少二氧化碳排放 26kg/t 水泥，表 4-2 展示使用替代燃料的 CO₂ 减排潜力。

表 4-2 使用替代燃料对 CO₂ 排放的减排潜力

碳减排措施	不同缓解措施的潜力	
	减少热能消耗	直接 CO ₂ 减排潜力
替代燃料	47.8~71.7kCal/kg 熟料	高达 30~40kgCO ₂ /t 熟料

4.3 熟料煅烧阶段使用替代原材料

4.3.1 水泥生产使用替代原材料减少 CO₂ 排放

水泥熟料是水泥的主要成分，水泥熟料的生产过程排放大量 CO₂。钢铁的高炉矿渣细粉、煤电粉煤灰、硅钙渣、电石渣、碱渣、天然火山灰、稻谷灰等可替代部分熟料，降低水泥中熟料的含量，从而大大降低水泥工业的 CO₂ 排放量。根据 IEA 和 CSI 的全球水泥工业碳中和路线图，到 2030 年水泥生产熟料比例将减到 64%；到 2050 年，熟料比例将减少到 60%。

中国也在积极推动熟料替代。我国是工业大国，每年钢铁、火电、乙炔、氨碱行业产生大量钢渣、矿渣、粉煤灰、硅钙渣、电石渣等固体废弃物，这些工业固体废弃物用于替代熟料，可实现熟料减量。

我国于 2000 年初开始与磷石膏、高炉渣、粉煤灰、硫酸渣、烟气脱硫石膏、钢渣、煤矸石等废物作为水泥生产原材料进行协同处置。

《国家应对气候变化规划(2014-2020 年)》中针对出“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。据统计，我国每年产生约 40 亿吨的钢渣、硅钙渣、电石渣、碱渣等固体废弃物，因此进行水泥原料替代是我国水泥行业碳减排的重要抓手。常见的电石渣配料 60%时可实现 40%的碳减排量，2019 年我国的电石渣产生量约为 2600 万吨，全部替代可实现约 938.8 万吨 CO_2 年减排量，减排效果显著：我国每年钢渣 1.49 亿吨，生料中配料 4% 钢渣可实现单位熟料 CO_2 排放降低 $4.4\text{kg}^{[53]}$ 。

4.3.2 水泥厂使用粉煤灰替代原料与燃煤电厂产业共生

中国有大量的燃煤发电厂，燃煤发电厂生产产生的大量粉煤灰等废弃物可以作为水泥生产的原材料。

水泥企业所需粉煤灰的常规运输距离为 100km，粉煤灰直线运输距离为 70km，基本已经满足按照 2020 年水泥产量 23 亿吨，需 6.9 亿吨粉煤灰的需求，如图 4-5，在水泥厂 70km 范围内实现与电厂的产业共生是可行的。

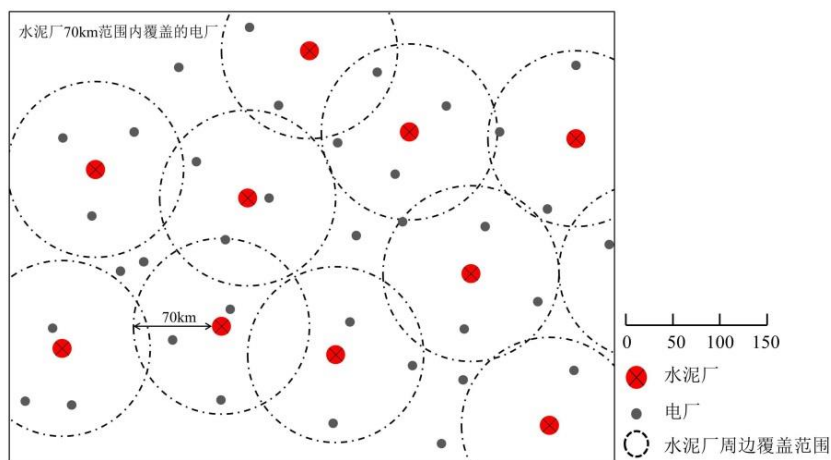


图 4-5 水泥厂和电厂分布示意图

根据我国电厂和水泥厂分布情况及电厂粉煤灰储量，水泥厂直线距离 70km 的电厂覆盖率约为 79.13%，可提供 6.8 亿吨粉煤灰，产业共生政策实施良好^[54]。

4.3.3 使用替代原材料与电厂进行产业共生碳减排情况

原材料中碳酸盐的分解是与工艺相关的 CO_2 排放的原因。因此，减少 CO_2 排放的一种有效方法是利用非碳酸盐 CaO 源代替碳酸盐作为原材料。在用氢氧化钙代替 CaCO_3 生产 C_3S 的情况下，直接 CO_2 排放量减少了约 78%。中国年产电石渣，主要成分为

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、来自氯碱工业的约为 $2.01 \times 10^{10} \text{kg}$ 。对于那些有电石渣可用的水泥厂， CO_2 的减少将很容易实现。

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 CO_2 排放；保证水泥质量前提下，生料替代率最高可为 9%，该替代率下 CO_2 减排量为 82.511kg/t 水泥；同时进行生料替代和熟料替代，最多可减少 CO_2 排放 452.586kg/t 水泥；在清洁电力预测情况下，到 2050 年 CO_2 减排最大为 17.319kg/t 水泥；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%，表 4-3 展示了水泥工业原料替代对 CO_2 减排潜力。

表 4-3 水泥工业原料替代对 CO_2 减排潜力

碳减排措施	减少热能消耗	直接 CO_2 减排潜力
原料替代	2.3~95.6kCal/kg 熟料	高达 100kg CO_2 /t 熟料

4.4 降低熟料水泥比和熟料替代

熟料生产是水泥生产增加温室气体排放的主要因素^[55]。熟料是大多数类型水泥的基本元素，与水反应时起到硬化剂的作用。降低熟料比例有助于减少每吨水泥的总排放量，因为燃料消耗和特定工艺排放都取决于熟料与水泥的比例。从大部分的工厂数据进行分析，发现在熟料制造中生产一吨产品需要 4.69 吨材料，大约浪费率在 74.12% 左右^[56]。

减少混合水泥中的熟料量可被视为减少二氧化碳排放的最有效方法之一。研究发现，用添加剂替代熟料的混合水泥对减少二氧化碳排放有最显著的贡献。在混合水泥中，通过用粉煤灰等添加剂替代部分熟料来降低熟料/水泥的比例。在水泥中加入约 10% 的粉煤灰将大大减少每年的二氧化碳排放量。加入粉煤灰后，水泥和混凝土的质量也可以得到改善。此外，石灰石、高炉矿渣、天然沸石、硅灰和火山灰也可作为添加剂使用。据报道，粒化高炉渣是广泛使用的添加剂之一。这些基于工业的副产品与磨碎的熟料混合，得到混合的水泥产品。据估计，通过混合水泥减少二氧化碳排放的全球潜力至少是水泥生产中二氧化碳总排放量的 5%。水泥生产过程中矿物添加量的变化，在过去 30 年里，该比例基本保持在 20% 左右。

各种研究发现的合适的熟料替代品包括玉米芯、大理石粉尘^[57]、粉煤灰、石灰石粉^[58]、氧气炉矿渣、煤废料、城市生活垃圾焚烧灰^[59]、氧化铝、赤泥脱水制备的材料、碎玻璃、石灰石煅烧粘土（LC3）和天然火山灰材料。尽管有几种选择，但它们在水泥生产中的使用取决于当地的可用性、季节性以及与其他行业的竞争。

根据 Aritra Pal 的研究^[60], 30%的粉煤灰、15%的石灰石和 5%的石膏可以替代 50%的水泥生产所需的熟料。Md. UzzalHossain 研究^[60]发现使用碎玻璃代替熟料 20%可减少 17%的温室气体排放, 并节省约 16%的能源消耗。

国际上也有印度水泥行业已逐渐开始使用高炉渣(GBFS)——钢铁行业的副产品、粉煤灰——燃煤发电站的残留物, 以及用于替代水泥熟料的天然火山材料, 印度水泥行业的整体熟料系数从 2010 年的 0.74 下降到 2017 年的 0.71。

使用替代原材料与低熟料水泥技术, 可以极大程度上降低水泥工业碳排放。

4.5 使用高效氧燃烧技术碳减排

4.5.1 水泥工业使用全氧燃烧技术

在全氧燃烧中, 几乎是在纯氧而不是在空气中燃烧。因此, 产生的烟气主要由 CO_2 和水蒸气组成, 它们很容易通过脱水分离, 产生高纯度的 CO_2 气流。如果燃料在纯氧中燃烧, 火焰温度过高。然而, 富含 CO_2 或 H_2O 的烟气可以循环到燃烧器中以减少过多的热量。氧气通常通过低温(低温)空气分离和向燃料供应氧气的新方法产生, 例如膜和化学循环。图 4-6 说明了使用再循环烟气的全氧燃料过程。

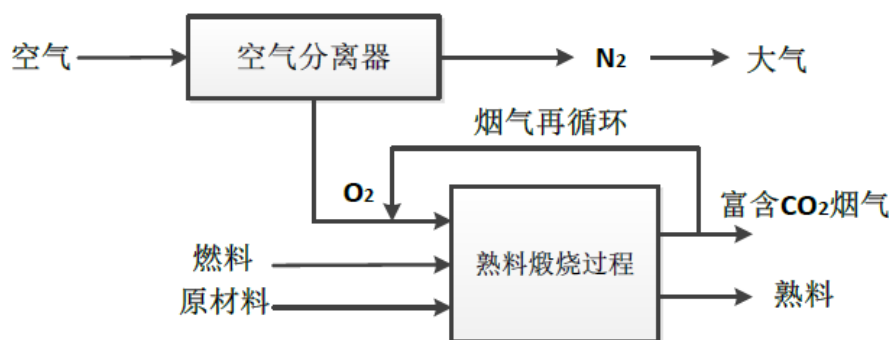


图 4-6 带烟气再循环的全氧燃烧技术

4.5.2 全氧燃烧节能机制

在普通的空气助燃中, 空气中只有的氧气参与燃烧, 其余约的氮气不参与燃烧, 而且还形成废气带走大量热量, 造成能源的极大浪费。全氧燃烧技术彻底改变了传统以普通空气助燃的老式方法, 结束了千百年来仅靠空气助燃的历史, 被誉为燃烧领域的“二次革命”。

在相同的燃烧温度下, 助燃空气中氧浓度越来越高时, 节能效果就会越好; 另一种情况, 在相同的氧气浓度下, 火焰的燃烧温度越来越高时, 节能效果就会越好。所以, 在水泥回转窑中采用全氧燃烧技术会获得较高的火焰燃烧温度, 节能效果更加明显。

全氧燃烧节能机制:

- (1) 提高火焰温度
- (2) 缩短火焰长度
- (3) 提高窑内气流对物料的辐射传热速率
- (4) 加快燃烧速度，促进完全燃烧
- (5) 降低燃料燃点
- (6) 提高热能利用率
- (7) 降低空气过剩系数
- (8) 减少烟气排放量
- (9) 提高水泥质量

4.6 本章小结

本章节分析研究了水泥生产过程中熟料煅烧阶段 CO_2 排放的减排措施，分析研究了现目前可以使用的燃料替代技术，原材料替代技术，以及在熟料煅烧阶段可以进行节能增效的富氧燃烧技术。分析研究了这项技术的节能减排潜力与可以应用状况。政府政策引导企业共同控制城市垃圾和固体处置，提高熟料原料和燃料替代，促进水泥行业绿色低碳发展。提高混合材活性，降低水泥中熟料掺量，每吨水泥碳排放可降低约 26%。由于替代燃料、生物质燃料及衍生燃料大多为碳中性，代替燃煤可产生显著的 CO_2 减，降低燃煤消耗、提高替代燃料的使用比例，是水泥生产实现减少直接排放的重要技术。

第5章 水泥工业 CCUS 技术减排分析

碳捕集、贮存及利用（CCUS）是目前世界上最先进的环保技术之一，被认为是未来大规模减少温室气体排放的最经济可行的办法，在我国未来 2030 年碳达峰的情况下，随着水泥低碳工业先进技术普及以后，水泥工业 CO_2 的减排与零碳排放只能通过 CCUS 技术来进行。

5.1 全球 CCUS 技术现状

国际能源机构（IEA）2℃ 设想（2DS）中 2050 年累计直接 CO_2 减排贡献。从图 5-1 可以看出，减排贡献最大的措施是降低水泥中熟料占比，其次是 CCUS、清洁生产技术的发展、燃料替代和提高能源效率。

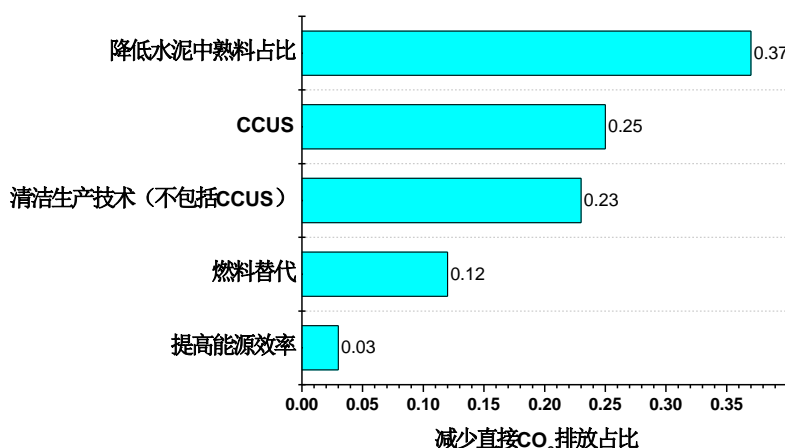


图 5-1 水泥低碳技术对 CO_2 减排的贡献

CCUS 属于技术实施难度大，技术不稳定性影响相对较高的技术，目前我国使用极少，属于较为先进技术。同时对水泥企业的资金成本投入较大的一项技术。

但碳封存碳捕捉技术也是对 CO_2 减排力度最大的一项技术，在其他技术情形能获得的 CO_2 减排收益最大的技术措施下能让 CO_2 排放减少的不可缺少的一项措施。

在碳捕获技术中，浓缩的 CO_2 溶液被运输并隔离在地下或深海中。二氧化碳捕获和储存（CCS）可能会成为使用这种技术减少 CO_2 的新兴方法，二氧化碳可以被捕获并储存很长时间。CCS 技术在水泥生产中的应用可将 CO_2 的碳排放量减少 65~70%。在水泥制造过程中，在 CaCO_3 转化为 CaO 和燃料燃烧为过程提供热量的过程中会产生 CO_2 。已经研究和开发了在燃烧点捕获 CO_2 的不同方法。这些技术包括：化学吸收、富氧燃烧、物理吸附、直接分离等方法。这些可能性中的每一种的实施成本都是高度不确定的；成本与技术性能、经济增长和燃料类型直接相关。水泥工业中捕集过程可以分为：燃烧后

捕集、富氧燃烧捕集和燃烧前捕集^[61,62]。图 5-2 展示了三种 CO₂ 捕获系统的概念。

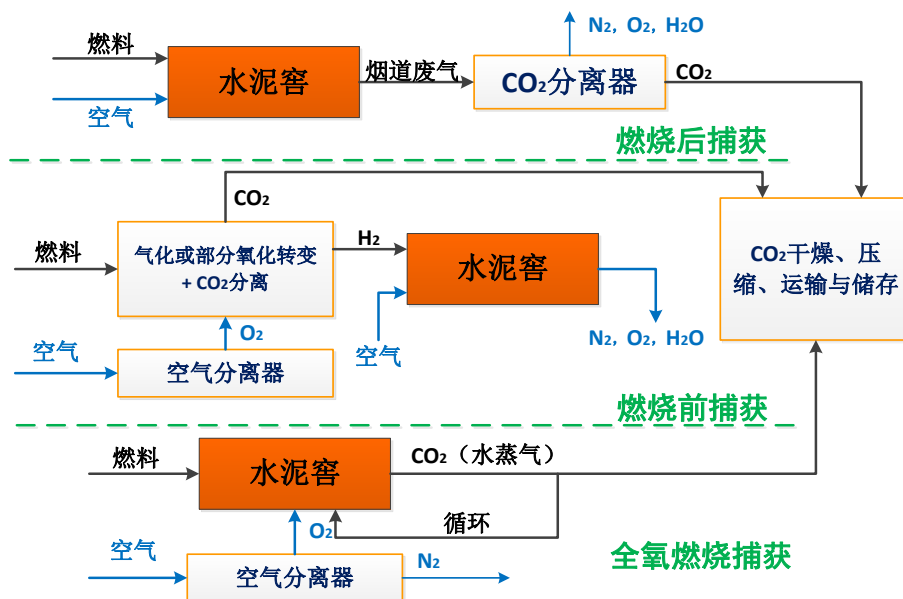


图 5-2 水泥工业中三种 CO₂ 捕获系统过程

5.1.1 燃烧后捕获

燃烧后捕获是从烟道气中捕获通过化石燃料和生物质在空气中的燃烧产生的 CO₂。烟道气不直接排放到大气中，而是大部分通过 CO₂ 分离设备。在大多数情况下，CO₂ 可以从低压和低 CO₂ 含量的烟气中捕获，燃烧后减排技术的效率随着废气中 CO₂ 浓度的增加而增加。CO₂ 被送入储存库，剩余的烟道气被排放到大气中。CO₂ 分离通常使用化学吸附剂进行吸附吸收。

5.1.2 燃烧前捕获

燃烧前捕集是燃料与氧气或空气水蒸汽反应产生含有一氧化碳和氢气的“合成气”。然后一氧化碳在催化反应器中与蒸汽反应以产生 CO₂ 和更多的氢气。然后通常通过物理或化学吸收过程分离二氧化碳，由此产生的富含氢的燃料进入水泥窑中作为煅烧燃料。

但目前，水泥厂暂时没有使用燃烧前捕捉技术，与普通的水泥窑相比，富含氢气的燃料燃烧所需要的设计体积更小。因此，要将预燃烧技术应用于水泥生产，需要对熟料燃烧工艺进行改造。在水泥行业，需要建造一个具有二氧化碳捕集技术的独立制氢厂。水泥厂余热可为制氢过程中的重整和变换反应提供一定的能量。尽管天然气、轻烃和煤制氢是一项已经相对成熟的技术，但随后的 CO₂ 捕获和储存尚未得到应用。

5.1.3 全氧燃烧捕获

在全氧燃烧中，几乎是纯氧而不是空气用于燃烧。因此，烟气中主要含有 CO₂ 和

H₂O。如果燃料在纯氧中燃烧，火焰温度过高。然而，富含 CO₂ 或 H₂O 的烟气可以循环到燃烧器中以减少过多的热量。

5.2 碳捕捉碳封存技术与应用前景

不同的捕集过程，例如燃烧前、燃烧后以及富氧燃烧，现已在电力、水泥和钢铁行业进行了广泛的测试和证明。在 CO₂ 运输方面，我国缺乏 CO₂ 专用管道基础设施，主要由卡车实施。而在美国，管道运输的效率相对更高，长度超过 500 公里。CO₂ 自上个世纪以来，欧洲国家已在商业上部署利用，而其他方法，如提高天然气回收率和水生产相对较新^[63]。纯存储项目因为不具有成本效益，应用实施相对困难，这里不做过多分析。著名的纯封存案例包括挪威的 Sleipner 和 Snøhvit 项目以及中国的神华项目，这些项目都将 CO₂ 注入深层咸水含水层进行封存^[64]。所有这些过程的成功都需要大量的实验室和工程工作，例如技术设计、现场筛选、材料质量、经济评估、环境评估、地震勘探、风险监测等，使 CCUS 成为一个极其复杂的系统。

CCUS 技术在常规水泥生产厂的应用已有大量研究，其中一些技术问题已被确定为参数，对 CCUS 技术的部署进行限制。因此，应该进行彻底的研究，以使水泥厂使用 CCUS 技术成为现实。以下是 CCUS 从上游到下游系统产生的物理和化学技术指标的数量：

- (1) 由于烟道气流中 CO₂ 的浓度很高，因此将使用大容量溶液。
- (2) 当颗粒物质、SO_x 和 NO_x 等杂质与 CO₂ 混合时会发生溶剂降解，这会导致 CO₂ 捕集材料降解。
- (3) 大多数分离技术需要额外的能量。例如，目前发电厂采用的 CO₂ 减排策略占能源损失的 30%。
- (4) 为了将捕获的 CO₂ 从大气压压缩到管道压力（高达 2000psia），需要巨大的辅助电源负载。
- (5) CO₂ 管道系统在设计、施工、控制和监测阶段的复杂应用。
- (6) 可用于 CO₂ 储存系统的战略位置有限。
- (7) 物流、场地位置、可行性和来源能力方面的信息缺乏，阻碍了全球 CCUS 政策和投资的制定。
- (8) CCUS 技术的大规模仍然被认为是不确定的且不稳健，因此，它需要广泛的研究和实验以使其在工业上可行^[65]。

这些技术限制只能不断扩展 CCUS 过程的知识边界来克服。学术机构和行业必须投

入更多的时间来优化现有技术以减少能源和材料消耗，以及寻找、测试和商业化捕获 CO_2 的新技术。此外，必须找到捕获和封存捕获的 CO_2 的新机会。重点应放在其他储存地点的适用性和容量上，而不仅仅是石油和天然气储层（例如海洋），在生产过程中利用 CO_2 作为原材料（例如在甲醇或氨过程中），并为 CO_2 应用矿物碳化技术封存。

由于碳捕获成本在很大程度上与地理位置、碳税、蒸汽来源、电力组合、电价、燃料价格和工厂的具体特点等因素有关，一般为特定工厂选择最适合的技术，需要进行具体的技术和经济评估。结合近 8 年水泥工业 CO_2 捕获技术研究的相关信息，目前水泥工业 CO_2 捕获技术准备水平见图 5-3。

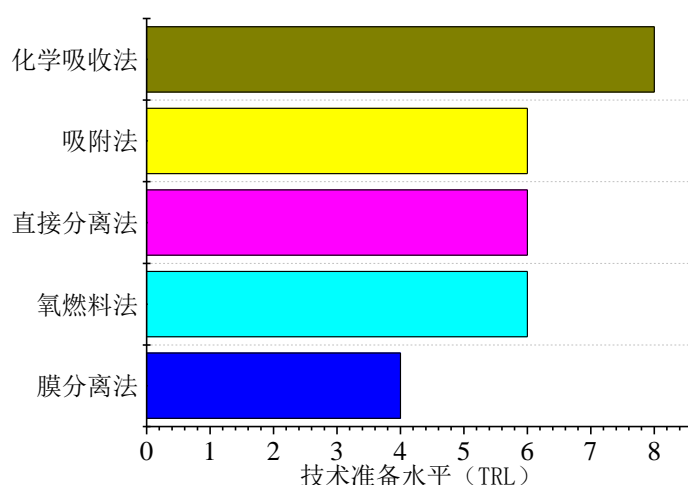


图 5-3 目前水泥工业 CO_2 捕获技术准备水平

最后将 CCUS 技术改造到现有水泥厂是完全可行的，因为传统工厂进行烟气在循环等方式将排放的低浓度 CO_2 改变为高浓度较纯的 CO_2 流技术上较为简单。迄今为止，已经考虑了几种不同的技术，即化学吸收、物理吸附、直接分离来捕获水泥工业中的 CO_2 ^[66]。

5.2.1 化学吸收法

化学吸收是基于 CO_2 与化学溶剂之间的反应捕获 CO_2 的过程。该过程通常使用两个反应塔，一个从烟道气中捕获 CO_2 ，另一个在较高温度下操作，以释放纯 CO_2 并再生化学溶剂以供进一步操作。胺类溶剂化学吸收法是最成熟的 CO_2 分离技术，几十年来一直广泛应用于天然气净化过程^[67,65]。类似的工艺可用于从水泥制造过程中捕获 CO_2 。

5.2.2 物理吸附法

CO_2 的物理分离基于吸附、吸收、低温分离或脱水和压缩技术。在物理吸附中，烟气中存在的 CO_2 被选择性吸附在固体颗粒（例如活性炭、氧化铝、金属氧化物或沸石）的表面，而在物理吸附中，液体溶剂将 CO_2 从其他颗粒中分离出来。烟气成分。捕获后，

CO₂ 通常通过升高温度(变温吸附(TSA))、压力(变压吸附(PSA))或变真空吸附(VSA) 释放^[66]。

5.2.3 直接分离法

在水泥生产过程中直接分离 CO₂ 是最新技术,它涉及通过使用特殊煅烧炉间接加热石灰石来生产纯 CO₂。该技术直接从石灰石中生产 CO₂,无需将其与其他燃烧气体混合,从而显着降低与 CO₂ 分离相关的能源成本。由 Calix 在比利时 Lixhe 的海德堡水泥厂开发的低排放强度石灰和水泥 (LEILAC) 试点工厂是该技术在实践中得到应用的一个例子^[68,69]。

5.3 使用 CCUS 技术 CO₂ 减排评估

对于 CCUS 的 CO₂ 减排量,我们主要用碳捕获率乘以 CO₂ 排放量来计算 CO₂ 捕集量。由于目前技术尚不够成熟,部分捕获技术效率相对较低,目前能在工业上使用的燃烧后捕集与富氧燃烧捕集技术的捕获率分别为 74%和 61%。

5.3.1 碳捕捉碳封存技术经济效益分析

初步计算表明,CCUS 技术在水泥生产中的应用可减少多达 65~70%的碳排放。如果可行,CO₂ 碳捕获和储存成本可能为 180 美元/吨至 915 美元/吨。表 5-1 总结了采用和不采用捕集技术的工厂的成本。

表 5-1 不同 CO₂ 减排目标的结果

CO ₂ 减少量 (%)	成本 (百万美元/年)	成本增加 (%)
0	25	0
1	25.60	2.4
5	25.72	2.9
10	26.80	7.3
20	29.35	17.4
30	33.31	33.2
50	38.85	55.4

5.3.2 在水泥行业采用 CCUS 的障碍和实用建议

如前所述,在水泥制造过程中尚未采用商业 CCUS 技术。(IEA) 和世界可持续发展倡议组织 (CSI) 就未来 CCUS 技术在水泥工业发展所做的预测,CCS 技术到 2020~2025 年才可能在极少数示范工厂运行,到 2035 年才可进入商业化运营,2050 年才有可能大面积应用推广。这是由于各种障碍和挑战造成的,下面将对 CCUS 技术应用在水泥工业

进行一定分析。

目前世界各国对控制 CO_2 排放的兴趣高涨推动了 CO_2 捕获、利用和储存 (CCUS) 技术成为减少水泥工业 CO_2 排放的先进技术。基本上, CCUS 的目的是捕获 CO_2 以防止排放到大气中, 然后将其利用 (即作为化学过程中的原料、生产碳酸盐、提高石油采收率等) 或将其储存在安全的位置 (即在深盐层、油气储藏和不可开采的煤层中)。因此, CCUS 技术包括三个一般阶段:

- (1) 应用从烟道气流中捕获 CO_2 的工艺
- (2) 将捕获的 CO_2 运输到利用或储存地点
- (3) 长期将 CO_2 利用并储存

尽管对减少 CO_2 的关注和工业需求日益增加, 但 CCUS 仍未在工业中全面商业化和实践。图 5-4 展示了从四个主要工业过程 CO_2 运输方法、 CO_2 利用和储存中捕获 CO_2 的各种技术以及这些技术的当前采用状态^[66]。

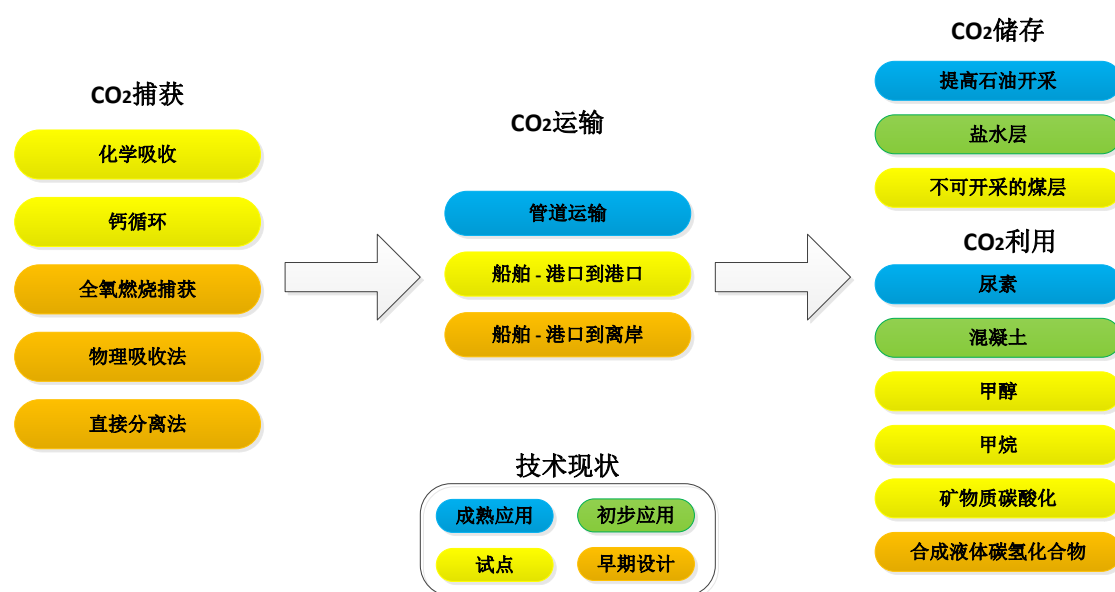


图 5-4 2019 年世界 CO_2 捕集、运输、利用和封存的不同技术及其实施情况

5.4 本章小结

初步计算表明, CCUS 技术在水泥生产中的应用可减少多达 65~70% 的碳排放。只有采用 CCUS 技术, 才能真正快速、高效实现碳减排、碳达峰与碳中和。就碳捕获技术而言, 水泥工业推荐采用化学吸收法, 化学吸收法的技术准备水平较高, 有的已有应用案例。在中国水泥工业到 2030 年后为能够实现 2060 年碳中和的目标, 则下一步的重点仍将是碳捕获与碳封存。

第6章 中国水泥碳减排路线分析

本章节综合前面章节所分析的水泥工业碳减排技术，结合水泥产量、能源使用情况、替代燃料与原材料以及先进的碳捕捉碳封存技术进行水泥工业碳减排路线分析，以及给出相应的结论并提出相应的建议与措施。

6.1 产量是水泥工业碳减排的关键因素

水泥产量受经济发展阶段（经济增长的速度、固定资产投资等）、城市化水平（基础设施建设和房地产开发）和水泥替代材料等影响。随着经济社会的绿色转型，我国水泥产量将下降，并带动行业碳排放量的减少。因此，要推进水泥行业碳达峰及持续减排，必须要加强产量控制，严格执行水泥熟料产能减量置换；避免过度房地产化的开发建设方式和大拆大建等导致的水泥过度消费。

从发达国家来看，水泥工业发展的主要动力是新建建筑物和基础设施改造升级；从发展中国家来看，城市化、工业化是水泥产量增加的主要动力，印度和其他亚洲发展中国家、非洲地区的水泥产量会随着基础设施的不断发展而增加，中国水泥产量达峰后需求量将缓慢下降。

中国是水泥大国，连续多年来水泥总产量位居世界第一。根据 2020 年美国地质调查局数据，如图 6-1 我国人均水泥产量为 1.65 吨，约是德国的 4.5 倍，美国的 6 倍，世界人均水平的 3 倍，这与我国经济长期依赖城镇化发展有关，随着未来需求量的下降，2050 年我国水泥产量预计将减少至 7.5 亿吨，通过产量压缩可减少约 8.6 亿吨的碳排放，在高需求下水泥产量在 2060 年最多可能达到 16 亿吨。

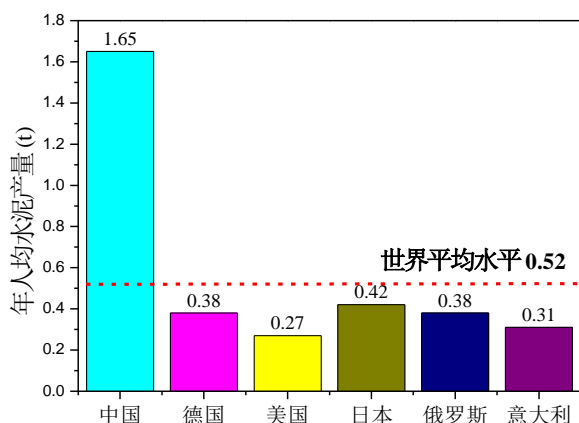


图 6-1 2020 年各国人均水泥产量

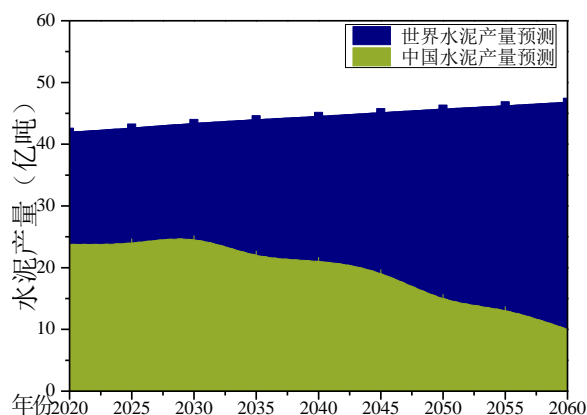


图 6-2 我国未来水泥产量预测

根据对我国水泥市场需求趋势的分析，未来 5~8 年内我国水泥消费量将达到峰值，

我国水泥最大市场需求量为 23~25 亿吨，我国水泥产量预测如图 6-2 所示。

加快低效产能退出，坚决依法依规关停退出低效产能。鼓励不具备规模效益、能效水平达不到基准水平的、污染物排放达不到清洁生产要求的、水耗超标的低效水泥生产线，有序开展节能减排技术改造，整改后仍不合格的在 2024 年底前淘汰。

仅考虑水泥熟料及水泥产量的变化，预计我国水泥行业 2030 年 CO_2 排放量将较 2020 年减少 $1.4 \times 10^8 \text{t}$ 。行业 CO_2 排放量可于“十四五”中期达峰，峰值为 $13.8 \times 10^8 \sim 14.2 \times 10^8 \text{t}$ ，经过 2~3 年的峰值平台期后呈持续下降的趋势，到 2030 水泥行业碳排放量将较 2020 年下降 15~18%。

6.2 采用清洁能源与高效节能管理技术

加快水泥熟料高效能低碳烧成装备和技术的应用，提升能源资源利用效率。鼓励高效低阻预热预分解系统、分解炉分级燃烧改造、高效全氧燃烧技术、节能风机电机、高效熟料篦冷机、节能辊压机终粉磨系统、外循环生料立磨等高效节能粉磨技术装备的推广应用。加快水泥窑新型耐火材料和成套技术、高效脱氮脱硫除尘一体化技术等推广应用^[28]。

同时探索天然气、太阳能、风能、氢能等清洁能源技术应用。在推进水泥行业 CO_2 减排的各项技术措施中，高效节能改造是当前阶段最有效的措施^[70]，到 2030 年单位熟料煤耗下降 7%，可带动水泥行业 CO_2 排放较 2020 年减少 3800 万吨。

6.3 发展水泥行业原料与燃料替代技

加快非碳酸盐原料替代，提高水泥原料含钙固废资源替代石灰石比重，全面降低二氧化碳过程排放量。

强化水泥企业全生命周期绿色管理，大力推行绿色设计，加快实施超低排放改造，全面实现清洁生产，鼓励创建绿色矿山、绿色工厂、绿色园区，构建绿色供应链。完善绿色低碳技术和产品检测、评估、认证体系，扩大绿色建材产品供给，提升绿色建材产品质量。

加快新型干法水泥窑替代燃料等技术研发，减少煤炭消费。支持垃圾衍生燃料、塑料、橡胶、生物质燃料等可燃废弃物高比例替代燃煤，推动替代燃料高热值、低成本、标准化预处理。鼓励水泥窑协同处置磷石膏、赤泥、电解锰渣等固体废物和垃圾焚烧飞灰等危险废弃物。

目前，我国仅约 5% 的生产线开展了固体废物协同处置^[70]，应持续加大水泥行业综合利用固体废物力度。使用生活垃圾等固体废物替代燃煤是重要的行业减碳措施，若采

用燃料替代技术的生产线比例提至 40%，可带动行业 CO₂ 排放减少 1700 万吨。

6.4 发展创新与使用水泥工业 CCUS 技术

在水泥工业中实现碳综合除工业过程中减碳外，另一重要途径是水泥工业烟气的再利用减碳。加大水泥窑烟气碳捕集纯化等建材行业窑炉碳捕集技术、二氧化碳资源化利用和封存技术的研发和推广应用，加快降低生产运行成本。CCUS 技术的合理采用将有助于碳排放总量控，图 6-3 展示了水泥工业过程碳中和方案。

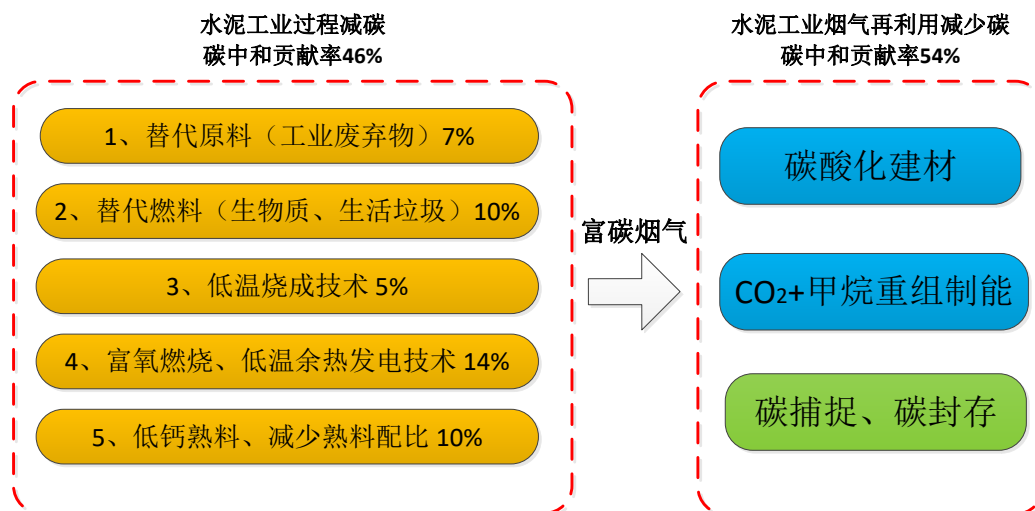


图 6-3 水泥工业碳中和方案

只有采用 CCUS 技术，可以真正快速、高效实现碳减排、碳达峰与碳中和。就碳捕获技术而言，水泥工业可以加快采技术准备水平较高的化学吸收法，同时也有已应用的案例进行调查研究。在未来 30 年中水泥工业碳减排的研究重点，仍将落足于碳捕获与碳封存技术。如图 6-4 为通过研究得出的水泥工业碳减排技术路线图。

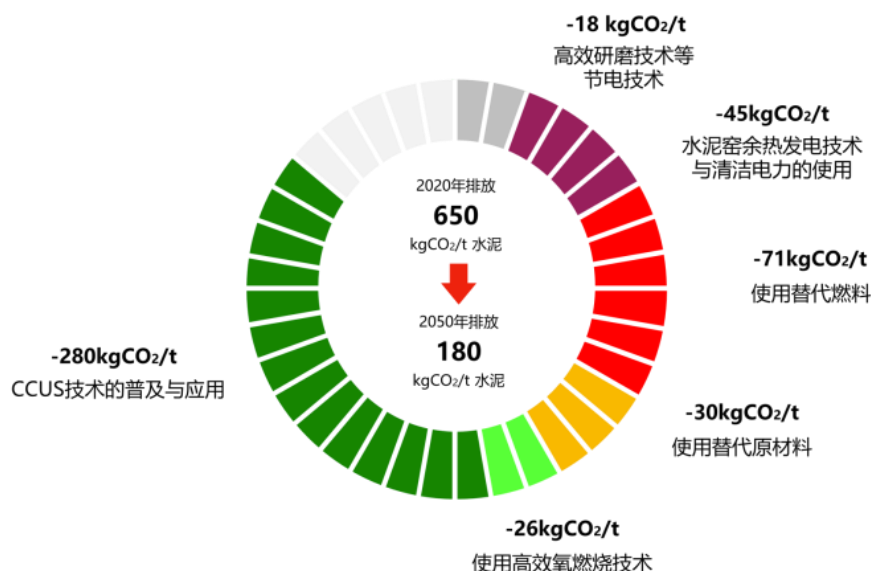


图 6-4 水泥行业碳减排技术路线图

6.5 本章小结

本章结合第 2 章、第 3 章、第 4 章和第 5 章进行综合分析，结合我国水泥生产工业现状，探究水泥工业碳减排路线，简单预测了我国未来水泥产量，预计到 2030 年基本维持年产量 24 亿吨，2030 年后水泥产量将逐渐下降，水泥工业造成的 CO₂ 排放也随之减少；发展先进的能源管理技术、不断推广使用先进的设备，利用余热发电技术与清洁电力的使用可以中和水泥生产中电耗造成的碳排放；大力发展水泥行业原料与燃料替代、高效氧燃烧技术，将极大程度上改善水泥生产工艺过程中 CO₂ 的排放，可以达到 40~50% 的 CO₂ 排放；最后水泥行业不可避免的产生的 CO₂，将可以在未来使用先进的碳捕捉、碳封存技术以实现水泥生产的零碳排放。

第7章 结论与展望

7.1 结论

针对我国水泥产业规模巨大，水泥生产过程中的高能耗、高碳排放等问题，通过对国内外文献的阅读研究，中国水泥工业碳减排仍有诸多改善空间。生产技术与先进设备的使用必然是水泥工业实现节能减排的永恒主题，可燃废弃物的使用即是“开源”，也是节能，持续发展水泥窑协同处理垃圾，对我国环境污染以及可持续发展的快速转型有着十分重要的意义，发展太阳能，风能发电等绿色清洁电力，是水泥工业中碳减排的重要一环，没有清洁能源的使用水泥工业的零碳排放将不复存在。同时，大力发展具有自主知识产权的富氧燃烧、全氧燃烧技术，积极运用 CCUS 技术，可以极为有效的实现水泥工业碳减排。

研究其主要结论如下：

（1）基于现目前水泥生产工艺流程及技术，结合我国水泥生产的时间情况，通过水泥生产过程中碳排放的科学计算，可以得出水泥工业过程中碳减排路线目前只能主要集中在减少电耗引起的间接碳排放与生产工艺过程中原材料和燃料的直接排放。

（2）研究分析了世界上多属发达国家在水泥工业生产中使用的诸多创新技术，但由于我国现阶段水泥生产厂家众多，水泥生产技术参差不齐，主要问题集中在我国水泥产能过剩平均生产适用效率低于 0.8，同时我国高质量水泥使用较少，人均水泥消耗量 1.65 吨远高于世界平均水平 0.52 吨，发达国家人均水泥使用量维持在 0.3 吨左右。在未来我国水泥消耗量下降到世界平均水平后到 2030 年水泥行业碳排放量将减少 15~18%。

（3）水泥生产过程中由于电力消耗造成的二氧化碳间接排放，主要来自水泥生料熟料以及燃料的研磨、高温熟料的冷却的环节中。但在节能风机电机、高效熟料篦冷机、节能辊压粉磨系统、外循环生料立磨等高效节能粉磨技术装备的推广应用，将降低水泥生产过程中 7% 以上的间接碳排放。使用水泥窑低温余热发电技术可以补偿水泥生产电耗的 1/3~1/2，未来配合光伏太阳能板发电、风力发电等清洁电力的使用预计 2050 年将实现电力消耗过程的零碳排放。

（4）水泥生产过程中燃煤燃烧造成了 40% 的直接二氧化碳排放，燃煤含碳量很高，对比使用生物质或其他替代燃料对二氧化碳减排有极佳的促进作用。目前我国在替代燃料的使用上占比极低，拥有水泥窑协同处理垃圾废弃物能力的水泥企业占比只有 5% 左右，世界各国尤其是欧洲国家在使用各类替代燃料方面有着先进成熟的技术，部分水泥

厂使用替代燃料技术可以达到 80~100%，使用替代原材料可以减少 50% 以上的由于燃料燃烧产生的 CO_2 。同时，水泥工业碳减排“替代燃料”产业化的快速发展，与在水泥生产中大力发展使用全氧燃烧技术将会对水泥工业碳减排起到事半功倍的作用。

(5) 水泥熟料煅烧过程中石灰质的分解造成了 60% 的直接碳排放，使用电石渣、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可以实现约 40% 的减碳量，并节省 16% 的能源消耗。

(6) 研究发现在 2030~2050 年，随着先进生产技术，积极的能耗措施的使用后，水泥工业并不能在生产过程中实现碳中和，仍然有相对 50% 的 CO_2 气体排出，实现碳中和必须要在水泥工业中使用 CCUS 技术，对 CO_2 进行碳捕集、封存及利用。使用化学吸收法、吸附法等先进技术理论上可以实现 CO_2 的零排放，目前我国已有极少数先进水泥生产厂家进行试点，加强 CCUS 技术研究于应用，在 2050 年实现全面商业化，2060 我国水泥工业碳达峰的目标定能实现。

7.2 展望

本研究展开了对水泥工业碳减排路线的初步探究，但是，由于此研究涉及范围研究面相对较广，仍有许多问题需要加强深入研究，此次研究缺少对于我国目前各个省份的水泥生产细节及其案例的相关研究，对新技术的普及与应用的预测性研究还相对较少，对不同种类水泥生产的技术细节研究相对不足，同时也仅针对目前使用最广泛的硅酸盐水泥生产做了一定的分析研究，对于现阶段很多新型水泥生产应用的研究还有诸多不足，有一定局限性。

最后，由于本人能力有限，还有诸多研究不够深入到位，水泥行业碳中和碳减排势在必行，水泥工业的绿色转型也将随着国家的不断发展而发展。也希望未来也能更深入的投入到水泥生产碳减排方向上的研究，为我国的生态环境、工业技术的发展贡献出自己小小的一份力量。我相信在不久的将来我国水泥工业必能蓬勃发展，水泥生产技术定能在未来达到世界先进水平。2030 实现碳达峰，2060 碳中和的远景目标定能早日实现。

致谢

兜兜转转，一路走来，对老师同学们的感激之情无以言表，感谢所有在我大学生涯中所有给予过帮助的老师同学，是你们使我的青春更加丰富多彩。

这里由衷感谢我的毕业论文指导老师，学习生活中，老师都与学生平等自由的交流，对我悉心教诲，无论生活中的琐屑小事，还是专业知识上的困扰，老师都能给予帮助，是难得的良师益友。在论文写作过程中，老师与老师都为我提供了很多有价值的资料与宝贵的建议。大到写作思路与方向小到语言细节的把控，都离不开两位老师的细心指导与点拨。

感谢老师在论文写作过程中给予我的科研方法与格式要求及规范的建议，以及在论文后期对我论文进行的细致入微的检查，这些细节上知识让我受益匪浅。

感谢土建学院的老师、等老师们，为给我们传授知识在往返之间不知多少春秋，在我的本专科学习中给予许多帮助，感谢你们，成为我学习成长道路上的指路明灯。

感谢辅导员老师，应技学院老师等老师，他们在我大学生活中给予了许多帮助，感谢你们，让我在学校里感受到家一般的温暖。

感谢一起完成论文写作的等同学，和他的相互交流与协作对我论文的撰写有很大的帮助；感谢等同学大学一直以来对我的帮助与关心；感谢室友同学对我的理解与支持；感谢师兄师姐的照顾。

感谢我的父母，感谢你们无私的养育之恩，感谢你们在我求学道路上的默默付出和帮助。

感谢我的女朋友陪我走过的这两年，因为有你我才能成为更加优秀的那个人，在未来，我一定成长成为那个你值得依靠的人，陪你一同走下去，相互扶持共同成长。

最后感谢身边所有帮助过我的人，祝你们可以生活幸福，永远开心！

参考文献

- [1] 江旭昌. 我国水泥工业当前应大力发展“替代燃料”产业[J]. 新世纪水泥导报, 2021, 27(06): 18-23.
- [2] Ernst Worrell, Lynn Price, Nathan Martin, 等. Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry[J]. Annual Review of Energy and the Environment, 2001, 26(1): 303-329.
- [3] 江旭昌. 我国水泥工业当前应大力发展“替代燃料”产业[J]. 新世纪水泥导报, 2021, 27(6): 17-23.
- [4] 汪澜. 水泥低碳生产技术评述[C]//2010'中国国际水泥峰会. 北京, 2010: 193-204.
- [5] Chen W, Hong J, Xu C. Pollutants generated by cement production in China, their impacts, and the potential for environmental improvement[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 61-69.
- [6] Nations U. 气候变化 | 联合国[EB]//United Nations. United Nations.
- [7] Karen Akerlof, Edward W. Maibach, Dennis Fitzgerald, et al. Do people “personally experience” global warming, and if so how, and does it matter?[J]. Global Environmental Change, 2013, 23(1): 81-91.
- [8] Greenhouse effect[Z/OL]//Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Greenhouse_effect&oldid=1065456401.
- [9] 汪澜. 再论中国水泥工业 CO₂ 的减排[J]. 中国水泥, 2008(02): 36-39.
- [10] 应对气候变化与生态环境协同治理吹响集结号_中国环境新闻网[EB/OL]. [2022-05-14]. http://www.cfej.net/city/zxzx/202101/t20210127_818959.shtml.
- [11] 邹玉琳. 江苏大气污染的影响因素研究[D]. 东南大学, 2017.
- [12] 白玫. 中国水泥工业碳达峰、碳中和实现路径研究[J]. 价格理论与实践, 2021(04): 4-11+53.
- [13] Igliński B, Buczkowski R. Development of cement industry in Poland – History, current state, ecological aspects. A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141: 702-720.
- [14] Shen W, Liu Y, Yan B, et al. Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 75: 618-628.
- [15] 杨志芳, 卿山, 王华, 等. 富氧燃烧在水泥生产中的应用[J]. 工业加热, 2013, 42(4): 7-10.
- [16] Cao Z, Shen L, Zhao J, et al. Toward a better practice for estimating the CO₂ emission factors of cement production: An experience from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 527-539.
- [17] 曹植, 沈镭, 刘立涛, 等. 基于自下而上方法的中国水泥生产碳排放强度演变趋势分析[J]. 资

- 源科学, 2017, 39(12): 2344-2357.
- [18] Song Nie, Jian Zhou, Fan Yang, et al. Analysis of theoretical carbon dioxide emissions from cement production: Methodology and application[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 334: 130270.
- [19] Ofosu-Adarkwa Jeffrey, Xie Naiming, Javed Saad Ahmed. Forecasting CO₂ emissions of China's cement industry using a hybrid Verhulst-GM(1,N) model and emissions' technical conversion[J]. RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS, 2020, 130.
- [20] Gante Caruso H. Reduction of CO₂ Emissions from Cement Plants[J]. 2007.
- [21] 王思博. 水泥行业温室气体排放核算方法研究[D]. 中国社会科学院研究生院, 2012.
- [22] Farfan J, Fasihi M, Breyer C. Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 217: 821-835.
- [23] Andrew R. Global CO₂ emissions from cement production[J]. 2021.
- [24] Izumi Y, Iizuka A, Ho H J. Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 312: 127618.
- [25] 杨志芳. 富氧燃烧在水泥回转窑中的应用研究[D]. 昆明理工大学, 2013.
- [26] Robbie M. Andrew. Global CO₂ emissions from cement production[J]. Earth System Science Data, 2018, 10(1): 195-217.
- [27] 国家数据-国家统计局[EB/OL]. [2022-04-03]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zbs=A0E0H&sj=2021>.
- [28] 李琛. 2021 年水泥行业结构调整发展报告[J]. 中国水泥, 2022(1): 10-17.
- [29] 李伟峰, 马素花, 沈晓冬. 我国水泥工业减碳技术现实路径刍议[J]. 新世纪水泥导报, 2021, 27(06): 12-17.
- [30] Tong D, Zhang Q, Zheng Y, et al. Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 °C climate target[J]. Nature, 2019, 572(7769): 373-377.
- [31] Tongyuan Wu, S. Thomas Ng, Ji Chen. Deciphering the CO₂ emissions and emission intensity of cement sector in China through decomposition analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2022: 131627.
- [32] Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States | U.S. Geological Survey[EB/OL]. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/historical-statistics-mineral-and-material-commodities>.

- [33] China: cement CO₂ emissions 1960-2020[EB/OL]//Statista. <https://www.statista.com/statistics/1198671/carbon-dioxide-emissions-cement-manufacturing-china/>.
- [34] 汪澜. 肩负起水泥工业零碳流程再造的重任[J]. 中国水泥, 2021(05): 36-39.
- [35] 虞虹. 从“水泥生产的碳中和”浅谈现代绿色化学新思想[J]. 化学教学, 2021(11): 93-97.
- [36] Song D, Yang J, Chen B, et al. Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production chain[J]. Applied Energy, 2016, 164: 916-923.
- [37] Madlool N A, Saidur R, Hossain M S, et al. A critical review on energy use and savings in the cement industries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(4): 2042-2060.
- [38] Delong Xu, Yuansheng Cui, Hui Li, et al. On the future of Chinese cement industry[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 78: 2-13.
- [39] 朱郁. 清洁生产与水泥工业[J]. 建材发展导向, 2009, 7(04): 22-24.
- [40] Cheng-Yao Zhang, Biying Yu, Jing-Ming Chen, et al. Green transition pathways for cement industry in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 166: 105355.
- [41] Kabir G, Abubakar A I, El-Nafaty U A. Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant[J]. Energy, 2010, 35(3): 1237-1243.
- [42] Li C, Nie Z, Cui S, et al. The life cycle inventory study of cement manufacture in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 72: 204-211.
- [43] 贲道春, 张亚华, 董超, 等. 江苏省建材行业团体标准《水泥工业用回转窑》解读[J]. 江苏建材, 2021(06): 86-89.
- [44] 江苏水泥工业资源与能源消耗分析[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/ztc/ztfx/dfxx/200710/t20071025_33762.html.
- [45] 刘姚君, 汪澜. 水泥窑协同处置固体废物技术减排潜力与成本分析[J]. 水泥, 2018(03): 11-14.
- [46] Ali M B, Saidur R, Hossain M S. A review on emission analysis in cement industries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(5): 2252-2261.
- [47] Aranda Usón A, López-Sabirón A M, Ferreira G, et al. Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 23: 242-260.
- [48] 孔令强, 田光进, 柳晓娟. 中国城市生活固体废物排放时空特征[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1408-1417.
- [49] 王延涛, 曹阳. 我国城市生活垃圾焚烧发电厂垃圾热值分析[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(5):

41-44.

- [50] 魏潇潇, 王小铭, 李蕾, 等. 1979~2016 年中国城市生活垃圾产生和处理时空特征[J]. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3833-3843.
- [51] 赵磊, 陈德珍, 刘光宇, 等. 垃圾热化学转化利用过程中碳排放的两种计算方法[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1634-1641.
- [52] 刘作毅. 谈水泥行业碳减排路径[J]. 中国建材, 2021(7): 98-99.
- [53] 罗雷, 郭旸旸, 李寅明, 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, 2021: 1-17.
- [54] 肖静, 梁学敏, 张逸畅, 等. 中国水泥生命周期粉煤灰替代的 CO₂减排研究[J]. 中国环境科学, 2021: 1-11.
- [55] Daniel Andrés Salas, Angel Diego Ramirez, Carlos Raúl Rodríguez, et al. Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113: 114-122.
- [56] Gao T, Shen L, Shen M, et al. Analysis of material flow and consumption in cement production process[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 553-565.
- [57] Aliabdo A A, Abd Elmoaty A E M, Auda E M. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 28-41.
- [58] Knop Y, Peled A. Sustainable Blended Cements—Influences of Packing Density on Cement Paste Chemical Efficiency[J]. Materials, 2018, 11(4): 625.
- [59] Diliberto C, Meux E, Diliberto S, et al. A zero-waste process for the management of MSWI fly ashes: production of ordinary Portland cement[J]. Environmental Technology, 2020, 41(9): 1199-1208.
- [60] Adesanya D A, Raheem A A. Development of corn cob ash blended cement[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 347-352.
- [61] Gibbins J, Chalmers H. Carbon capture and storage[J]. Energy Policy, 2008, 36(12): 4317-4322.
- [62] M. B. Ali, R. Saidur, M. S. Hossain. A review on emission analysis in cement industries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(5): 2252-2261.
- [63] Jiang K, Ashworth P, Zhang S, et al. Print media representations of carbon capture utilization and storage (CCUS) technology in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 155: 111938.
- [64] Jiang K, Ashworth P, Zhang S, et al. Print media representations of carbon capture utilization and

- storage (CCUS) technology in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 155: 111938.
- [65] Emad Benhelal, Ezzatollah Shamsaei, Muhammad Imran Rashid. Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: A review[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 104: 84-101.
- [66] IEA P. CCUS in clean energy transitions[M]//Technical Report. 2020.
- [67] Rashid M I, Benhelal E, Farhang F, et al. ACEME: Direct Aqueous Mineral Carbonation of Dunitite Rock[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2019, 38(3): e13075.
- [68] Benhelal E, Rafiei A, Shamsaei E. Green Cement Production: Potentials and Achievements[J]. International Journal of Chemical Engineering and Applications, 2012: 407-409.
- [69] Benhelal E, Shamsaei E, Rashid M I. Novel modifications in a conventional clinker making process for sustainable cement production[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 221: 389-397.
- [70] 贺晋瑜, 何捷, 王郁涛, 等. 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(02): 347-355.