

《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水
泥行业余热利用》
行业标准

编 制 说 明

《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥行业余热
利用》标准起草组
二〇二五年六月

目 录

1 工作简介	1
1.1 任务来源	1
1.2 标准编制的目的和意义	2
1.3 工作组成员及分工	3
1.4 主要工作过程	4
2 标准编制的原则和主要内容	4
2.1 标准编制原则	4
2.2 标准的主要内容	5
2.2.1 范围	5
2.2.2 规范性引用文件	5
2.2.3 术语和定义	6
2.2.4 温室气体减排量评估内容	6
1) 概述	6
2) 边界及排放源识别	6
3) 温室气体种类确定	7
4) 项目及基准线情景制定	7
5) 减排量计算	8
6) 监测及数据质量管理	9
7) 确定减排量评估报告的编制	9
2.2.5 附录 A（资料性）	9
3 主要试验（或验证）情况分析	11
4 知识产权说明	16
5 产业化情况和预期达到的经济效益等情况	16
6 采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国外同类标准水平的对比情况	17
7 本标准与现行的相关法律、法规、规章及相关（包括强制性标准）一致性	18
8 重大分歧意见的处理经过和依据	19
9 标准性质的建议说明	19
10 贯彻标准的要求和实施建议	19
11 废止现行相关标准的建议	19
12 其它说明	19

1 工作简介

1.1 任务来源

温室气体排放所带来的全球气候变化问题，已经成为主流科学界的共识。气候变暖、极端天气、生物多样性等很多不利影响已经频繁显现并且形势越来越严峻，应对气候变化问题已经刻不容缓。调整能源结构、提高能源效率、发展新能源与可再生能源、推动工艺技术进步是减少温室气体排放的重要措施。中国已于 2020 年提出“2030 碳达峰 2060 碳中和”的宏伟目标，这是我国应对全球气候变化、实现人类可持续发展作出的重大战略决策。绿色、低碳、节能高效、可持续发展将成为企业发展的方向。碳减排将成为各行业各领域未来一段时间内的主要工作。

水泥行业的碳排放主要来源为燃料燃烧排放、生产过程排放以及使用电力的间接排放。2022 年全球水泥产量 41.63 亿吨，碳排放 27 亿吨左右，占全球能源相关碳排放的 7.5%；2022 年全国水泥产量 21.3 亿吨，估算 CO₂ 排放约 12 亿吨左右，水泥行业二氧化碳的排放量仅次于电力和钢铁行业，位于全国第三。2023 年全国水泥产量 20.23 亿吨，比 2022 年略有下降，刚过去的 2024 年，全年水泥产量 182524 万吨，同比下降 9.5%，但依然维持在产量高位运行。

政策层面，2021 年 7 月，工信部发布《水泥玻璃行业产能置换实施办法》，提高了水泥项目产能置换比例，对产业结构调整目录限制类的水泥产能以及跨省置换水泥项目，产能置换比例一律不低于 2: 1。

2021 年 12 月 3 日，工信部印发了《“十四五”工业绿色发展规划》，明确提出，开展水泥窑高比例燃料替代、二氧化碳耦合制化学品、可再生能源电解制氢、百万吨级二氧化碳捕集利用与封存等重大降碳工程示范。

2022 年 11 月 2 日工信部等四部门联合印发《建材行业碳达峰实施方案》。《实施方案》提出，“十四五”期间，建材产业结构调整取得明显进展，行业节能低碳技术持续推广，水泥、玻璃、陶瓷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。确保 2030 年前建材行业实现碳达峰。

2022 年 11 月 17 日，由工业和信息化部原材料工业司发布了《水泥行业碳减排技术

指南》，提出到 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，到 2030 年，能效基准水平和标杆水平进一步提高，行业整体能效水平和碳排放强度达到国际先进水平，为如期实现碳达峰目标提供有力支撑。

2023 年 4 月国家标准委近日联合国家发展改革委、工业和信息化部等部门发布了《碳达峰碳中和标准体系建设指南》。提出的碳达峰碳中和标准体系包含基础通用标准、碳减排标准、碳清除标准和市场化机制标准 4 个一级子体系、15 个二级子体系和 63 个三级子体系，细化了每个二级子体系下标准制修订工作的重点任务。在碳减排标准子体系中关于节能标准方面，要加快制定节能设计规划、能量平衡测算、能源管理体系、能源绩效评估、经济运行、合理用能、节能诊断、节能服务、绿色节约型组织评价等基础标准。完善能效对标、节能技术评价、系统节能、能量回收、余能利用、能量系统优化、高效节能设备、节能监测、节能量测量和验证、能源计量、数字赋能技术、区域能源系统、分布式能源系统、能源管控中心等节能共性技术标准。

2024 年 2 月工业和信息化部印发《工业领域碳达峰碳中和标准体系建设指南》，提出到 2025 年，初步建立工业领域碳达峰碳中和标准体系，制定 200 项以上碳达峰急需标准，重点制定基础通用、温室气体核算、低碳技术与装备等领域标准，为工业领域开展碳评估、降低碳排放等提供技术支撑。到 2030 年，形成较为完善的工业领域碳达峰碳中和标准体系，加快制定协同降碳、碳排放管理、低碳评价类标准，实现重点行业重点领域标准全覆盖，支撑工业领域碳排放全面达峰，标准化工作重点逐步向碳中和目标转变。

由此可见在碳减排的大趋势下，水泥行业面临的压力和任务非常大。水泥企业需采用先进技术与工艺、提高能源利用效率，并掌握企业碳排放量与减排量相关数据，从而有效评估碳减排潜力，科学合理制定碳减排计划和措施，从而支撑水泥行业顺利完成碳达峰碳中和的目标。

2024 年 12 月工业和信息化部办公厅《关于印发 2024 年第六批行业标准制修订计划的通知》（工信厅科函〔2024〕503 号）文件批准了由中国建筑材料联合会归口管理的《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥行业余热利用》行业标准的制订计划，项目计划号为 2024-1903T-JC，主要起草单位为天津水泥工业设计研究院有限公司。

1.2 标准编制的目的和意义

水泥生产属于高能耗行业，对能源的消耗十分巨大，其生产过程中产生大量余热。国家鼓励企业采取各种工艺技术对余热资源加以回收利用，GB 16780-2021《水泥单位产

品能源消耗限额》标准的实施，也对水泥厂的能源利用提出了更高的要求，对新装备新技术的应用也起到了一个重要的推动作用。根据目前水泥厂的工艺布置和主机配置看，整个水泥厂可以看做是一个大的余热利用系统，预热器、篦冷机、余热发电、各种粉磨烘干设备均可以看做是熟料烧成过程中释放的余热的利用设备。水泥熟料烧成系统是燃料燃烧、生料分解和煅烧熟料的主要场所，预热器和冷却机是燃料燃烧热量回收利用的主要设备，目前新建水泥厂均采用高效低阻六级预热器以降低预热器出口温度，充分利用熟料煅烧的余热资源；采用第四代冷却机以提高二三次风温，提高燃料燃烧效率，从而降低烧成热耗。随着煤磨、生料磨和水泥磨的发展，其热利用效率也在不断提高，电耗逐渐降低，比如对于生料辊压机的利用，可较大幅度降低电耗。

配套高效率低温发电系统，可进一步充分利用余热资源。余热发电是中国十大重点节能工程之一，据统计截至 2021 年，水泥行业低温余热发电技术普及率超过 80%。其中相关技术标准 GB50588-2017《水泥工厂余热发电标准》、GB/T 31346-2014《节能量测量和验证技术要求 水泥余热发电项目》、JC/T 2258-2014《水泥窑余热利用装备技术条件》等不断提高余热发电利用的质量和规范化程度。对余热资源的有效利用可以大幅降低企业能源消耗，降低生产成本，减少碳排放，助力行业如期实现碳达峰碳中和的既定目标。

由此可见，随着熟料烧成技术的进步，预热器换热效率和冷却机热回收效率的不断提高，熟料烧成过程中的热量利用率进一步提高，烧成热耗进一步降低，较大幅度降低了窑尾废气的排出量。同时随着余热发电技术的进步，高效粉磨设备的发展，对于烧成系统排出废气的利用率也在不断提高，这都为余热利用提供了条件。

本标准的制定，对企业自行进行基于水泥行业余热利用的温室气体减排量核算评估提供了有效手段，可为企业高效利用余热资源，优化资源配置，升级更新装备及技术，实现行业碳减排提供了技术支持和政策保障，有力支撑双碳目标的实现。

1.3 工作组成员及分工

本标准由天津水泥工业设计研究院有限公司负责组织协调，吸收了相关的高校、企业等参加制订工作。本标准的主要起草单位为：天津水泥工业设计研究院有限公司、华新水泥股份有限公司、北京工业大学、北京国建联信认证中心有限公司、天津中材工程研究中心有限公司。

各起草单位具体分工见下表：

表 1 参编单位分工

单 位	工作分工
天津水泥工业设计研究院有限公司	主要负责标准立项、编制征求意见稿、标准讨论会组织及筹备、标准相关文献搜集及分发、行业征求意见汇总、标准正文的编写及修改等。
华新水泥股份有限公司	为本标准提供大量的现场运行数据，为标准的编制提供了支撑，验证了计算科学性，回复部分标准审查意见。
北京工业大学	负责本标准的理论指导工作和最新的科技查新，并对结果进行分析反馈。
北京国建联信认证中心有限公司	负责本标准的验证试验工作，并对结果进行分析反馈。
天津中材工程研究中心有限公司	负责本标准的验证试验工作，并对结果进行验证分析及反馈。

1.4 主要工作过程

2021 年 12 月，天津水泥工业设计研究院有限公司牵头成立了标准起草组，查询相关文献资料，着手开展标准立项及起草工作，并于 2023 年 5 月向建材联合会提交了标准制订立项建议书并立项成功。

2024 年 10 月和 12 月经过工信部两轮标准立项答辩，于 2025 年 1 月根据文件《关于印发 2024 年第六批行业标准制修订计划的通知》（工信厅科函〔2024〕503 号）确定正式立项成功，项目计划号为 2024-1903T-JC。

2025 年 2~3 月，编制标准制定策划书，并于 3 月 17 日组织召开标准启动会。介绍标准立项背景、标准编制框架及主要内容，各参与单位人员及专家对标准制定的内容提出相关建议或意见，确保标准内容的编写要求和质量。

2025 年 3 月~2025 年 6 月，根据标准启动会专家人员意见形成初步标准草案，并进行实际标准调研工作，结合实际调研结果最终完成符合要求的标准征求意见稿。

2 标准编制的原则和主要内容

2.1 标准编制原则

本标准根据 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》进行制订。

本标准制定的指导思想是通过制定基于项目的 CO₂ 减排评估技术规范，确定温室气体种类，制定项目及基准线情景，确定减排量的计算方法，研究水泥行业余热利用的温室气体减排情况，规范水泥回转窑企业实施节能减排诊断，鼓励企业充分利用和挖掘水泥余热资源，并依据上位标准 GB/T 33760-2017 《基于项目的温室气体减排量评估技术规范 通用要求》，配合 GB/T33756-2017《基于项目的温室气体减排量评估技术规范 生产水泥熟料的原料替代项目》，强化水泥企业的节能减碳责任意识，评估企业节能减排潜力，促进企业在现有生产线上采用先进的技术和装备进行节能降碳技术改造，降低温室气体排放，提高余热资源利用率和能源综合利用水平，为水泥行业的绿色低碳可持续发展提供技术支撑。

2.2 标准的主要内容

本标准共分七章：1. 范围；2. 规范性引用文件；3. 术语和定义；4. 温室气体减排量评估内容；5. 附录 A（资料性）

以下结合各章内容分别说明如下：

2.2.1 范围

本标准规定了基于水泥行业余热利用项目的二氧化碳气体减排量评估的术语和定义、评估内容、情景确定及排放源识别、减排量计算、监测及数据质量管理、减排量评估报告编制等。

本标准适用于指导硅酸盐水泥熟料和通用水泥生产企业基于余热利用项目的温室气体减排量评估。硅酸盐水泥熟料和通用水泥企业具有熟料煅烧系统，是余热产生的源头，而其采用的生产工艺和设备成熟，能够反映当前我国水泥行业的主流技术水平，具有很好代表性。

2.2.2 规范性引用文件

根据 GB/T 1.1 《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写规则》中的 6.2.3 条规定编写，并列出本标准正文中应用的标准文件一览表。标准编写内容主要参照上位标准 GB/T 33760 《基于项目的温室气体减排量评估技术规范 通用要求》的基本要求，关于 CO₂ 气体减排量计算主要参考 GB/T 32150 《工业企业温室气体排放核算和报告通则》和 GB/T 32151.8 《温室气体排放核算与报告要求 第 8 部分：水泥生产企业》。通过规范性引用文件的使用，可以实现企业完成一定边界范围内基于项目情景的 CO₂ 减排量的评估计算，了解自身企业节能减排的潜力和方向，合理优化使用能源，进一步降低温室

气体排放。

2.2.3 术语和定义

本文件中的术语和定义参考了 GB/T 32150《工业企业温室气体排放核算和报告通则》和 GB/T 33760《基于项目的温室气体减排量评估技术规范 通用要求》，即 GB/T 32150、GB/T 33760 界定的术语和定义适用于本文件。并根据标准的实际使用边界和情景，提出了水泥行业余热的术语和定义：在熟料或水泥生产过程中，由工艺设备运行产生的废弃热能，包括但不限于废气、废水、固体物料显热、设备表面热辐射等。

2.2.4 温室气体减排量评估内容

1) 概述

水泥行业余热形式多种多样，通过回收利用此类热能或提升现有余热利用系统的效率，可减少化石能源、外购电力及热力的消耗，从而降低温室气体排放。对余热利用的工段和利用方式进行明确以更好地对余热进行利用，同时对水泥行业余热利用项目温室气体减排量评估内容进行确认，主要包括：

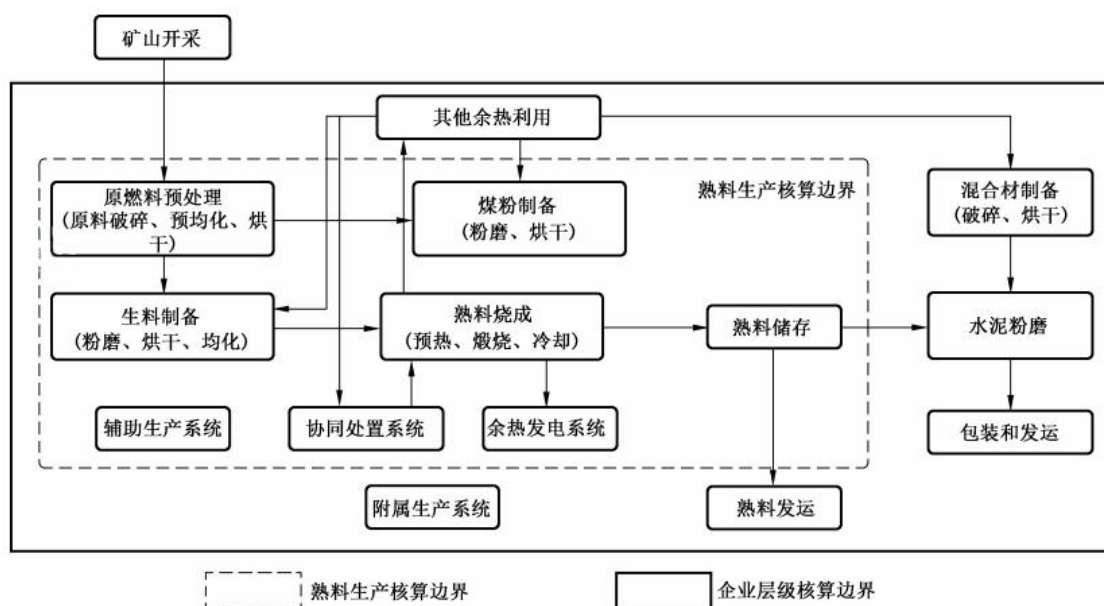
- a)项目边界及排放源识别；
- b)项目及基准线情景确定；
- c)减排量计算；
- d)监测及数据质量管理；
- e)减排量评估报告编制。

2) 边界及排放源识别

水泥行业余热利用项目边界原则上应包括余热直接利用系统（如粉磨烘干系统），余热回收产生二次能源的系统（如余热发电系统）及利用二次能源的系统，为余热利用、回收而引入的其他相关设备设施等，其最大可能项目边界为GB/T32151.8规定的企业碳排放核算边界，见图1。

基准线及项目排放源为边界范围内化石燃料燃烧产生的温室气体排放，碳酸盐原料分解产生的过程温室气体排放以及设备设施使用电力热力产生的温室气体排放。

水泥行业余热形式和利用方式多种多样，具体项目的边界和排放源需根据项目的具体内容和情景确定。水泥行业余热利用典型项目的边界和排放源，详见附录A。



注：不含与水泥生产无关的能源消耗产生的碳排放。

图 1 项目边界

水泥生产主要工艺流程为“两磨一烧”，对其进行研究能够体现现有工艺和技术水平，具有代表性。烧成系统主要用于煅烧水泥熟料，是产生余热的来源，同时也是余热的主要利用场所。余热发电系统是窑头窑尾余热的主要回收利用系统，目前大部分水泥厂均安装有余热发电系统。原燃料预处理、生料制备、煤粉制备、混合材制备和水泥粉磨系统也主要利用余热进行烘干。随着现在水泥厂替代燃料的使用和废弃物处置的增多，也需要余热进行烘干，也有企业积极开展窑筒体辐射的热量利用和热泵低温余热的利用。由于水泥行业余热形式和利用方式多种多样，情形复杂，因此最大可能项目边界为GB/T32151.8规定的企业碳排放核算边界。

3) 温室气体种类确定

水泥行业余热利用项目涉及的温室气体种类仅为二氧化碳。

4) 项目及基准线情景制定

基于项目的温室气体排放需要设定基准线情景和项目类型，通过与基准线情景比较，计算基于项目的温室气体减排量。目前水泥企业不再新增产能，现有水泥生产线可以进行节能降耗改造，因此项目类型分为已有余热利用系统的改造项目和增加余热回收利用系统的新增项目。对于已有项目的改造可以根据实际情况采用部分新技术新工艺新设备，降低能源消耗，改造项目基准线情景参考改造前的水泥生产线的技术水平，从而可以评

估局部改造对余热利用的情况。对于新增项目，应以利用新增项目回收的余热的单元在项目实施前的具体情况选取继续目前生产技术的基准线情景。

表 2 水泥行业余热利用项目类型及可能的基准线情景示例

项目类型	可能的基准线情景	水泥行业余热利用项目示例 (包括但不限于以下项目)
改造项目	改造前的技术水平	熟料烧成系统用耐火材料整体提升技术， 五级预热器改造低能耗六级预热器， 冷却机升级换代（三代更换为四代）， 冷却机更换为中置辊破， 改进余热发电系统热电转换效率。
新增项目	该部分余热直接排入大气，其对应的能源需求（如供暖、发电等）由项目边界内增加化石燃料消耗或外购电力/热力满足。	窑筒体热辐射回收利用， 热泵低温余热回收利用， 窑头余风全循环余热回收利用。

5) 减排量计算

水泥行业的碳排放主要来源为燃料燃烧排放、生产过程排放以及使用电力的间接排放。水泥生产过程中的二氧化碳排放主要源于熟料生产过程，其中石灰石煅烧产生生石灰的过程所排放的二氧化碳，约占全生产过程碳排放总量的 55-70%；高温煅烧过程需要燃烧燃料，产生的二氧化碳约占全生产过程碳排放总量的 25-40%。

减排量计算与基准线排放量相比，项目减少的温室气体排放量即为该项目的减排量。温室气体排放量核算按GB/T32151.8进行，一定时期内因减排项目产生的减排量可按照公式（1）进行计算。

$$ER = (e_B - e_P) \times Q_P \cdots \cdots \cdots (1)$$

式中：

ER ——一定时期内，项目减排量，单位为吨二氧化碳（ tCO_2 ）；

e_B ——同一时期内，基准线排放强度，单位为吨二氧化碳每吨（ tCO_2/t ）；

e_P ——同一时期内，项目排放强度，单位为吨二氧化碳每吨（ tCO_2/t ）

Q_P ——同一时期内，项目情景下的熟料或水泥产量，单位为吨二氧化碳（ tCO_2 ）。

熟料或水泥生产企业基准线或项目情景排放强度按公式（2）计算：

$$e = E/Q \qquad \qquad \qquad (2)$$

式中：

E ——同一时期内，对应情景下的核算排放量，单位为吨二氧化碳(tCO_2)；

Q ——同一时期内，对应情景下的熟料或水泥产量，单位为吨(t)；

在减排量计算过程中引入了排放强度的计算，使得减排量计算更有针对性和准确性。

6) 监测及数据质量管理

为获得准确的数据进行温室气体减排量的计算，项目业主应建立监测计划用于指导取得、记录和分析项目和基准线情景的温室气体排放量的数据和信息。水泥余热利用项目温室气体减排量评估的监测程序制定应按照 GB/T 33760。

水泥企业物料的消耗量都很大，要保证计量准确，需对计量器具有严格要求，使其配备的计量器具要满足相关要求，定期检定和校准，检定和校准机构应具有测量仪器/表检定资质。检定和校准相关要求应依照国家相关计量检定规程执行。

在项目实施中，项目业主应按照规定实施监测准则和程序，通过各类测量仪器/表的监测获得温室气体排放数据，记录、汇编和分析有关数据，并对数据存档，保证测量管理体系符合质量和规范要求。

应建立和应用数据质量管理程序，对与项目和基准线情景有关的数据和信息进行管理，包括对不确定性进行评价。在对温室气体减排量进行计算时，宜尽可能减少不确定性。其他数据质量管理要求按照 GB/T 33760。

7) 确定减排量评估报告的编制

在完成监测及数据质量管理后需要编制减排量评估报告，评估报告编制要求和内容按照 GB/T 33760 执行。评估报告应能够反映项目业主的信息，项目所采用的工艺技术简介，基准线情景的说明，减排量的多少及计算过程中采用的准则、程序、数据及来源等，确保减排量的计算合理准确，能够反映项目减排的真实情况，能够为项目业主了解生产线运行情况，存在的问题、瓶颈或发展优化的潜力，提供指导和提升的帮助，最终实现有效的温室气体减排任务。

2.2.5 附录 A（资料性）

典型项目和基准线边界及排放源见表 3。本表所列边界和排放源为典型项目示例，具体项目的边界和排放源需根据项目具体设计方案、利用途径、与主工艺的耦合关系等具体情况详细分析确定。

表 3 典型的余热利用项目边界和排放源

项目示例		项目边界	排放源
改造项目	熟料烧成系统用耐火材料整体提升技术	熟料烧成主要生产系统和辅助生产系统，主要包括：入窑生料和煤粉的计量与输送，生料预热(和分解)，熟料烧成与冷却以及相关设备设施等。	化石燃料燃烧产生的温室气体排放，碳酸盐原料分解产生的过程温室气体排放，设备设施使用电力热力产生的温室气体排放。
	五级预热器改造低能耗六级预热器		
	冷却机升级换代（三代更换为四代）		
	冷却机更换为中置辊破		
	改进余热发电系统热电转换效率	余热发电系统及相关设备设施等	设备设施使用电力热力产生的温室气体排放
新增项目	窑筒体热辐射回收利用	窑筒体热辐射回收系统及有效利用回收的热能的系统	化石燃料燃烧产生的温室气体排放，设备设施使用电力热力产生的温室气体排放。
	热泵低温余热回收利用	热泵低温余热回收系统及有效利用回收的热能的系统	
	窑头余风全循环余热回收利用	窑头余风全循环系统及有效利用回收的热能的系统	

水泥行业余热利用形式多样，常见的项目示例主要涉及水泥熟料烧成系统，其中通过对烧成系统进行改造，提高对余热的利用较为普遍。比如熟料烧成系统用耐火材料整体提升技术，通过更换导热系数更低的耐火材料，如纳米隔热材料和气凝胶等，可以有效减少烧成系统的表面散热，降低烧成热耗。五级预热器改造低能耗六级预热器可有效降低预热器出口的废气温度，降低余热温度，降低烧成热耗；冷却机三代改四代，冷却机更换为中置辊破均能够提高冷却机的热回收效率，提高二三次风温，有利于煤粉燃烧，从而降低烧成热耗。这些余热利用项目均能够降低烧成热耗，因此为便于统计计算，可将预热器出口至冷却机熟料出口作为项目边界，包含熟料烧成主要生产系统和辅助生产系统，主要包括：入窑生料和煤粉的计量与输送，生料预热(和分解)，熟料烧成与冷却以及相关设备设施等。在项目范围内的排放源包含三类：化石燃料燃烧产生的温室气体排放，碳酸盐原料分解产生的过程温室气体排放，设备使用电力热力产生的温室气体排放。

改进余热发电系统热电转换效率可以提升现有状况下的余热利用效率，增加发电量，从而减少排放，其项目边界为余热发电系统及相关设备设施等，该范围内排放源仅为相关设备使用电力热力产生的温室气体排放，易于统计和计算。

窑筒体余热回收利用、热泵低温余热回收利用和窑头余风全循环余热回收利用等项目，在水泥厂的应用较少，因此归于新增项目一类。对于这类项目，在项目增加之前，其余热一般是直接排入大气，当增加项目之后，其回收的热能会被相应的工段使用，从而降低了原有工段使用化石燃料或外购电力热力产生的温室气体排放。比如窑筒体余热回收利用供暖项目，其回收的热量可用于宿舍办公区的供热，从而减少锅炉供热或外购热力。热泵低温余热回收利用供生活热水项目，通过对水泥厂的低温废气废水的余热进行回收提供用于日常办公生活的热水，可减少通过电力或化石燃料获取热水的温室气体排放。窑头余风全循环余热回收利用可提高入窑头余热锅炉的废气温度，从而提高余热发电量。这些项目的实施都减少了利用项目产生热能的相应单元的温室气体排放，因此其项目边界应包含新增项目的设备设施边界，也应包含使用新增项目的热能的设备设施边界，这样便于能源用量的统计和计算。其项目边界内的排放源为化石燃料燃烧产生的温室气体排放和设备设施使用电力热力产生的温室气体排放。

3 主要试验（或验证）情况分析

天津水泥院作为国内主要的水泥行业的设计研究院，在现有水泥厂技术改造升级和新建生产线方面具有较高的技术水平、工程建设能力和装备制造能力，为水泥行业的技术进步做出了较大贡献。近些年来随着国家节能环保减排的不断推进，已经完成多项技改升级和新线建设，在能耗和电耗方面都取得了较好的效果，减少了 CO₂ 的排放。下面介绍一些典型项目进行分析说明。

1) 新建熟料烧成系统

表 4 山东滕州东郭项目

指标	设计值	考核数据值
系统热耗, kg 标煤	≤95	93.2
熟料单位产品电耗, kWh/t	45	42
预热器出口温度, °C	260	250
预热器出口压力, Pa	-4600	-4800

三次风温, °C	950	978
出篦冷机熟料温度, °C	65±环境温度	65

表 5 浙江建德南方项目

指标	设计值	考核数据值
产量, tpd	6500	6646.7
系统热耗, kg 标煤	≤94	93.6
烧成系统电耗, kWh/t	≤20	19.7
预热器出口温度, °C	260	270
预热器出口压力, Pa	-4600	-4450
三次风温, °C	950	990
出篦冷机熟料温度, °C	45±环境温度	45

按照水泥单位产品能源消耗限额二级水平（主流技术）熟料单位产品综合煤耗为 100kgce/t.cl 比较，东郭项目和建德南方项目每天燃料减排 CO₂ 约 109t 和 115t，同时考虑六级预热器比五级预热器发电量降低约 10 度电，东郭项目和建德南方项目外购电排放 CO₂ 增加 34t 和 39t，每天 CO₂ 净减排约 75t 和 76t。

按照水泥单位产品能源消耗限额二级水平（目前的主流水平）熟料单位产品综合电耗为 57kW·h/t.cl 比较，东郭项目和建德南方项目每天电力消耗 CO₂ 减排约 52t 和 58t。



图 2 东郭水泥（左图）和建德南方水泥（右图）

2）五级预热器改造低能耗六级预热器

徐州中联预热器五改六项目改造前后指标对比情况见下表。

表6 徐州中联五改六项目

项目	改前	改后	效果
热耗 (kcal/kg.cl)	749	651	↓98
电耗 (kW.h/t.cl)	56	53	↓3
预热器出口温度 (°C)	345	260	↓85
预热器出口阻力 (Pa)	-5200	-5200	6sp
熟料温度 (°C)	190	90	↓100



图 3 徐州中联

徐州中联五改六项目改后热耗大幅度降低，每天燃料 CO₂ 减排量 388t，同时考虑六级预热器比五级预热器发电量降低约 10 度电，外购电排放 CO₂ 增加 59t，每天 CO₂

净减排约 329t。

3) 熟料烧成系统用耐火材料整体提升技术

近些年来对不同项目进行标定的结果如下：

表 7 烧成系统表面散热对比（kcal/kg.cl）

项目	厂名	回转窑	预热器 /分解炉	三次风管	冷却机	合计
常规耐火材料项目	TRRZ	29.66	20.82	1.29	2.24	54.02
	HRPN1#	28.65	20.11	1.24	2.17	52.17
	HRNN1#	33.87	18.96	3.01	2.20	58.05
	HRNN2#	29.37	14.41	2.14	4.00	49.92
	HBYZ	20.44	19.31	3.19	2.23	45.17
	HNMD1#	23.70	17.08	2.83	1.85	45.47
平均		27.45	17.38	2.27	2.40	49.50
耐火材料提升项目	WHNF	18.66	22.36	2.48	1.41	44.91
	HKNF3#	18.92	14.86	5.83	0.75	40.36
	JSNF	21.23	13.86	2.79	0.64	38.52
平均		19.60	17.03	3.70	0.93	41.26

通过对比发现，当使用导热系数更低的耐火材料可有效降低熟料烧成系统的表面散热，大约 8kcal/kg.cl，从而降低熟料烧成热耗降低温室气体排放。按降低 1kg 标煤/吨熟料计算，约 2.8kgCO₂/吨熟料的减排量。

4) 冷却机升级换代（三代更换为四代）

马来西亚 YTL 冷却机改造前后指标对比情况见下表。

表 8 马来西亚 YTL KK4 冷却机改造

产量/t/d	改前/kcal/kg.cl	改后/kcal/kg.cl	效果/kcal/kg.cl
6200	805	781	↓24



图 4 YTL KK4 项目

马来西亚 YTL KK4 冷却机改造改后热耗大幅度降低，每天燃料 CO₂ 减排量 59t。

5) 改进余热发电系统热电转换效率

根据文献¹报道,为充分利用水泥厂余热发电系统废气,山东东华科技有限公司对余热发电关键设备汽轮机进行降压改造。通过增大汽轮机的通流面积的方式,降低汽轮机主汽压力,通过改善通流量的方式,提高主蒸汽流量,提升汽轮机的发电效率。2#汽轮机改造之前的发电功率大多在 6~8 MW,改造之后的发电功率大多在 8~10 MW,说明通流量改造效果良好,发电功率显著提升。

6) 窑筒体热辐射回收利用

根据文献²报道,中材节能公司设计开发了一种低成本、模块式水泥回转窑余热回收装置,用以回收高温筒体表面的辐射能,可产生热水。以产能 5000t/d 水泥熟料生产线为例,若布置长度为 24m 的余热回收装置,供热节能量:采暖季 11~4 月,节约标煤 610t。根据文献³报道,为了充分利用水泥窑的余热资源,通过窑筒体换热罩这种余热回收装置将水泥回转窑筒体表面的余热资源进行回收,再通过供热管道将热量输送给厂区的各用户,进一步满足企业用户的内部用热需求,以河南某 5000t/d 水泥厂为例,利用水泥回转窑筒体换热进行供热,可提供 85℃热水 20t/h,计算热负荷 570kW,供暖面积可达 10000m²。采用该套余热回收装置后,按窑实际年 300d 计算,每年可回收热量 $570\text{kW} \times 24\text{h} \times 300\text{d} = 4104000\text{kWh}$,相当于标准煤 $4104000 / (7000/860) = 504206\text{kg}$,具有非常显著的社会和经济效益,实现了节能减排和资源综合利用的目的。

7) 热泵低温余热回收利用

根据文献⁴报道,枣庄市某水泥厂余热回收改造,通过蒸汽驱动溴化锂吸收式热泵、集热罩换热器、冷却器盘管换热器等 3 种方式分别对回转窑窑头窑尾余热锅炉产生的蒸汽、发电系统循环冷却水余热、回转窑筒体辐射热、空压机冷却器热量等 4 种工业余热进行了全面回收利用,热量利用率可达到 96.43%,年余热利用量 480206GJ,折标准煤 16384.63t,节能效果、环保效应显著。

8) 窑头余风全循环余热回收利用

衢州江山南方水泥新建生产线采用了窑头余风全循环技术,可提高入余热发电的风温,见下图,从而提高余热发电量,其发电量一般 30kWh/t.cl 以上(一般六级预热器发电量 26~28kWh/t.cl)。

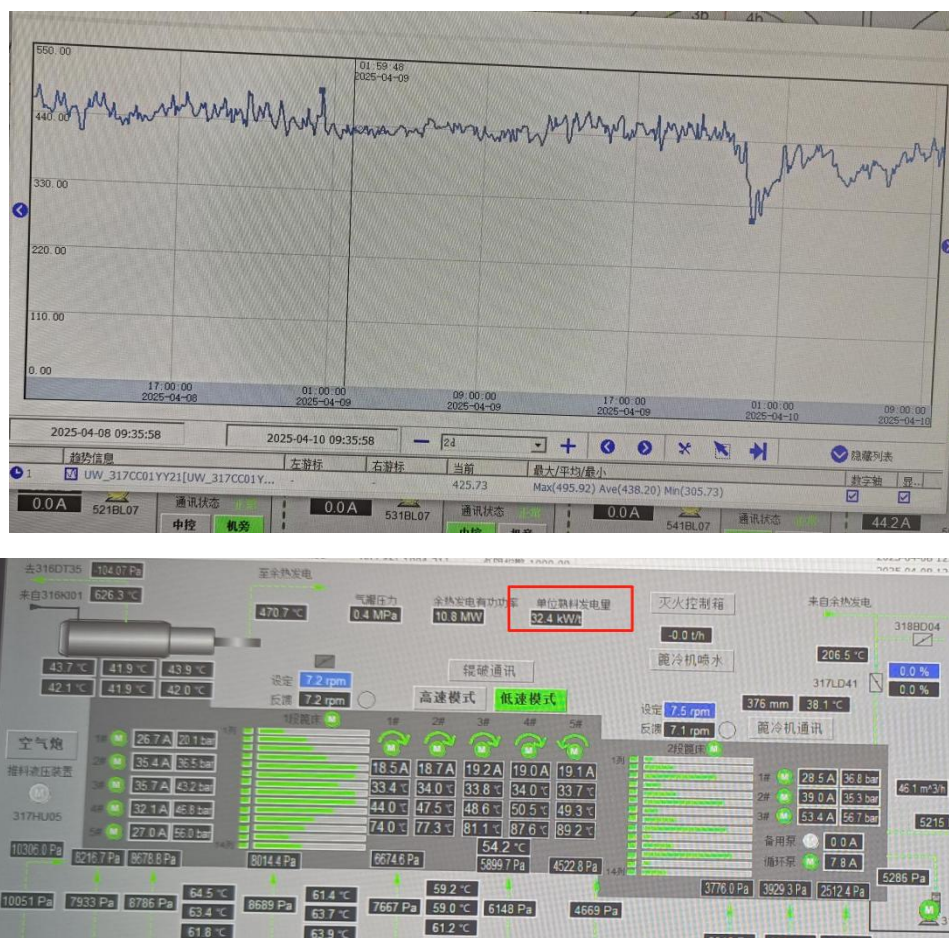


图 5 入余热发电风温和发电量

通过以上实例和文献报道资料，通过采用新技术新装备或原有系统升级改造，有效降低了烧成系统的热耗，从源头降低了余热的产生量，并提高了现有余热的利用率，实现了 CO₂ 的减排。可供水泥企业根据实际情况了解自身工艺设备的优化升级方向，发掘节能降耗减排的潜力，提高用能效率，获得更大的经济效益和社会效益。

4 知识产权说明

本标准不涉及专利与相关的知识产权问题。

5 产业化情况和预期达到的经济效益等情况

本标准属于评估技术规范类标准，对水泥行业的节能降碳减排工作有重要的技术支撑作用。本标准的制定进一步补充了水泥行业基于特定项目的 CO₂ 减排量评估技术规范标准体系，可以更好地指导水泥企业开展节能检测和节能诊断，科学合理的分析系统的余热利用状况，提升余热利用效率，降低能源消耗，节约生产成本，为减少碳排放提供技术指导，为行业实现高质量绿色发展提供有力的技术支撑。

水泥生产制造行业目前所采用的主流工艺流程为两磨一烧，其中烧成系统是主要的燃料消耗和物料分解的场所，在产生大量余热资源的同时也伴随着大量的碳排放，是水泥行业主要的碳排放环节，每吨熟料约产生 0.8t 左右的碳排放，远高于电力消耗产生的碳排放。水泥生产过程可以看做一个大的余热利用的过程，预热器排出的余热可以看做是加热生料剩余的余热，这些热量可以用作窑尾余热发电，原料烘干等工段，窑头篦冷机排出的余热可以用作窑头余热发电，燃料，水泥工段等的烘干利用。

要充分利用余热资源，首先是通过源头减少余热资源的产生，高效利用能源，再者对排出的余热资源进行高效利用，是有效减少碳减排的措施。因此要减少碳排放，需要水泥生产过程采用新技术新工艺和新设备，或对现有生产线进行节能升级改造。

通过高效的预热器换热系统降低出预热器的废气温度，提高篦冷机的热回收效率，采用烘干效率高的粉磨系统，采用发电效率高的余热发电系统能够有效降低热耗，减少余热资源的排出量和余热资源的高效利用。因此本标准的制定可以提升企业的竞争力，降低能耗水平，节约能源，降低生产成本，为企业带来良好的经济效益，也能促进行业的技术水平进步和碳排放量减排目标的实现。

6 采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国外同类标准水平的对比情况

近些年来，随着温室气体减排的重视，为规范评估特定项目下的温室气体减排量，2017 年我国发布了 GB/T 33760-2017《基于项目的温室气体减排量评估技术规范 通用要求》，规定了基于项目的温室气体减排量评估的术语和定义、基本原则、要求与方法，适用于指导项目的温室气体减排量评估规范的编制，也可为基于项目的温室气体减排量评估提供参考。本标准按照国家标准 GB/T 33760-2017 进行起草工作。

国际上通用的项目层次上温室气体减排评估类标准主要有两个，一个是国际标准化组织（ISO）发布的《温室气体 第 2 部分：项目层面上对温室气体排放和清除的量化与报告的规范及指南》（ISO 14064-2），规定了项目层面上温室气体（GHG）减排或清除增加活动量化、检测和报告的原则和要求及指南。另一个是世界资源研究所（WRI）和世界工商业务委员会（WBCSD 联合发布的《The GHG protocol for project accounting》，也是项目层面温室气体减排量化方法的重要方法。

在 ISO 14064-2 中，GHG 项目是指改变基准线的状况从而产生 GHG 减排或清除增加的一项或多项活动。基准线情景是一个假设性的情景，用于作为比较的基准，以评估和量化 GHG 减排项目或活动的实际效果。它代表了如果没有实施特定的 GHG 减排措施，

那么在正常情况下会发生的 GHG 排放或清除水平。基准线情景为比较项目实施前后的 GHG 排放和清除变化提供了一个标准。其中，GHG 减排是 GHG 项目与基准线情景相比，在 GHG 排放方面的减少量。GHG 清除是通过 GHG 汇从大气中收回 GHG。GHG 清除增加是 GHG 项目与基准线情景相比，在 GHG 清除方面的增加量。基准线情景是指没有建议的 GHG 项目时，能够最合适地表现最可能发生状况的假定参考情况。GHG 减排或清除增加才是 GHG 项目对减缓气候变化的成效，GHG 清除并不一定能够产生减缓气候变化的成效。

The GHG protocol for project accounting 是 GHG Protocol 的一部分，用于指导项目层面的温室气体排放核算。基于“最合理替代情景”设定基准线，具有较高的市场认可度，侧重市场化机制。强调透明度和可比性，帮助项目管理者准确地测量和报告其温室气体排放，从而促进减排措施的实施和效果评估。

水泥行业余热资源丰富，用途广泛，但目前国内外还未有基于水泥行业余热利用项目层次的温室气体减排量评估的国家标准或行业标准，本标准的编制相对国际或国外标准具有以下特点：

1) 按照国家标准 GB/T 33760-2017《基于项目的温室气体减排量评估技术规范 通用要求》进行编制，拥有我国特有的标准体例架构与表述形式，这种编制形式符合我国水泥工作使用者的习惯，更易于应用。其基准线的设置也考虑了改前改后工艺装备的更新升级和新建项目最新技术的应用，依据本标准进行的 CO₂ 减排量评估，能够帮助企业对标行业或领域的先进技术水平，促进企业进行技术和设备升级。

2) 以水泥行业余热利用为切入点，将水泥生产企业两磨一烧的主要工艺流程融入其中，其温室气体减排的核算涵盖了水泥企业的主要工段，具有很好的代表性和实用性。

3) 本标准结合我国水泥行业实际情况，设置改造或新建两种项目类型。水泥企业碳排放核算方法比较成熟，数据获取及监测容易，且准确度有保证，使得该标准具有实际使用和指导作用。

因此本标准的制定将进一步丰富该系列标准体系，并与 GB/T 33756 一起构成水泥行业温室气体减排标准体系，促进水泥行业温室气体减排的推进。

7 本标准与现行的相关法律、法规、规章及相关（包括强制性标准）一致性

该标准将与 GB/T 33760-2017《基于项目的温室气体减排量评估技术规范 通用要求》、GB/T 33756-2017《基于项目的温室气体减排量评估技术规范生产水泥熟料的原料替代项

目》、GB/T 32151.8-2023 《碳排放核算与报告要求 第8部分：水泥生产企业》等相关标准配套实施，进一步完善水泥行业碳排放和碳减排的标准体系，与水泥行业产品标准、设计标准等标准要求亦有很好的衔接。

经广泛调研和多方面征求意见，本标准符合现行的相关法律、法规、规章及相关标准（包括强制性标准）的要求，具有一致性。

8 重大分歧意见的处理经过和依据

本标准在制定过程中，起草工作组多方面收集各类反馈意见，并根据标准制定准则给予分类处理和完善，无重大分歧意见。

9 标准性质的建议说明

建议将本标准作为行业推荐性标准。

10 贯彻标准的要求和实施建议

本标准颁布实施后，相关部门应督促检查本标准的实施情况，并制定相应的实施方法，使本标准得到认真执行，真正起到指导生产、保证质量、促进企业节能降耗的作用。

11 废止现行相关标准的建议

本标准为新制定标准，无现行相关标准。

12 其它说明

无其它说明事项。

附 参考文献

1. 高冉, 蒲 辉, 张 兵等. 水泥厂余热发电系统降压提效改造[J]. 水泥, 2024 (2): 54-56.
2. 李连锁, 水泥回转窑筒体表面辐射能余热回收装置的应用[J]. 水泥技, 2016 (1): 52~53.
3. 董红岩. 水泥回转窑筒体表面余热利用方案的工程设计[J]. 中国水泥, 2023 (3): 72~76.
4. 甘胜滕, 赵猛, 李琳等. 枣庄某水泥生产线余热农业高效利用实例分析[J]. 建筑节能, 2023 (5): 91~96.

《基于项目的温室气体减排量评估技术规范 水泥行业余热利用》标准起草组

2025 年 6 月