

## 世界银行集团免责声明

《环境、健康与安全指南》（简称《EHS 指南》）旨在提供世界银行国际金融公司（IFC）《环境和社会可持续性绩效标准》、世界银行《环境与社会框架》以及《EHS 指南》所定义之优质国际工业实践（GIIP）所采用的一般及具体行业的范例，同时提供各类 EHS 问题的相关信息。若某个项目有世界银行集团一个或多个成员国参与，则按照成员国政策和标准的要求，适用《EHS 指南》。

《通用 EHS 指南》提供了有关各行业部门 EHS 常见问题的信息。各具体行业部门的 EHS 指南（即《行业部门指南》）与《通用 EHS 指南》共同构成了供参考适用的《EHS 指南》。针对复杂项目，可能需适用多个《行业部门指南》。《EHS 指南》完整清单可参见以下网站：<https://www.ifc.org/ehsguidelines>。应用《EHS 指南》时，应根据每个项目确定的危险和风险灵活处理，其依据应当是 EHS 评估的结果，并应考虑到该场所的具体变量（例如东道国具体情况、环境的同化能力）以及项目的其他因素。

尽管已尽合理努力确保《EHS 指南》所述信息的准确性、完整性与即时性，但世界银行集团对其中所述信息的准确性、完整性、即时性、有效性或可靠性不做任何保证。世界银行集团对《EHS 指南》所含信息之任何错误、遗漏或不符之处不承担任何责任，也不对使用或未能使用或依赖于其中所包含的任何信息、方法、流程、建议、结论或判断承担责任或义务。世界银行集团对《EHS 指南》是否与任何司法管辖区的国际性、国家性或次国家性法律要求或与任何行业标准之间是否相一致或是否相符不作任何陈述。世界银行集团明确表示，对于因使用或依赖《EHS 指南》或其所述信息而产生或与之相关的任何类型的损害，包括特殊损害、间接损害、附带损害、后果性损害或补偿性损害，世界银行集团不承担任何责任或义务。

就《EHS 指南》的发布与提供而言，世界银行集团任何成员机构均没有为任何个人或实体提供专业服务或其他服务，也未代表任何个人或实体提供此类服务，也不同意履行任何个人或机构对另一个人或实体应尽的任何义务。请在参与（或拒绝参与）任何项目活动之前，应向有相关资质且经验丰富的人士寻求专业建议。

《EHS 指南》某些部分可能含有第三方网站的链接。所链接的网站不受世界银行集团的控制，世界银行集团对所链接的任何网站之内容或该等网站所含任何链接概不负责。针对所链接的该等网站或其内容的准确性或可靠性，世界银行集团不做背书，也不作任何其他陈述。

世界银行集团由国际复兴开发银行（IBRD）、国际开发协会（IDA）、国际金融公司（IFC）、多边投资担保机构（MIGA）和国际投资争端解决中心（ICSID）组成。本免责声明中，提及世界银行集团即指任何或所有此等成员机构，具体视上下文需要而定。

《EHS 指南》中任何内容均不应构成对世界银行集团任何成员机构特权和豁免权的放弃，也不应被视为对该等特权和豁免权的限制，世行集团明确保留这些权利。

# 水泥和石灰制造业环境、健康与安全指南

## 引言

1. 《环境、健康与安全指南》（简称《EHS 指南》）属于技术参考文件，其中包括优质国际工业实践（GIIP）所采用的通用范例及具体行业范例。<sup>1</sup>若一个项目有世界银行集团的一个或多个成员国参与，则按照成员国政策和标准的要求，适用该等《EHS 指南》。《通用 EHS 指南》提供了针对所有行业部门都可能存在的 EHS 问题指南，而各具体行业部门 EHS 指南应与《通用 EHS 指南》文件共同参考使用。针对复杂项目，可能需适用多个行业部门指南。各行业部门 EHS 指南的完整清单可参见以下网站：[www.ifc.org/ehsguidelines](http://www.ifc.org/ehsguidelines)。
2. 《EHS 指南》所规定的指标和措施是通常认为在新设施中采用成本合理的现有技术即可实现的指标和措施。对现有设施应用《EHS 指南》时，可能需制定针对该设施的特定目标以及适当的完成时间表。
3. 应用《EHS 指南》时，应根据每个项目确定的危险和风险灵活处理，其依据应当是环境评估的结果，并应考虑到该场所的具体变量（例如东道国具体情况、环境同化能力）以及项目的其他因素。具体技术建议是否适用，应根据有资质且经验丰富的人士的专业意见来决定。
4. 针对具体项目，若东道国的 EHS 要求不同于《EHS 指南》所规定的指标和措施，则应适用两者中要求较高的指标和措施。若根据具体项目情况，认为适于采用低于该等《EHS 指南》要求的指标和措施，则在对项目进行具体环境评估时，必须对所提议的替代方案进行全面充分论证，证明替代绩效指标足以保护人类健康和环境。

## 适用性

5. 《水泥和石灰制造业 EHS 指南》所述信息涉及水泥和石灰制造流程。关于水泥制造流程通常涉及的原料开采活动，请见《建筑材料开采业 EHS 指南》的规定。<sup>2</sup>此类 EHS 指南不涉及石棉水泥的生产。目前石

<sup>1</sup> GIIP 定义如下：熟练且有经验的专业人士在全球相似情况下开展同类活动时，按常理可预期其采用的专业技能、努力程度、谨慎程度和预见性。熟练而有经验的专业人士在评估项目可采用的污染防治技术时可能遇到的情况包括但不限于：不同程度的环境退化、不同程度的环境同化能力，以及不同程度的财务和技术可行性。

<sup>2</sup> 石灰岩特殊的化学、水文、地质条件和相关的小气候条件，可导致演变出独有的生物多样性和相关生态功能。重点在于要评估并在必要时减轻项目对石灰岩特定生物多样性的潜在影响，包括对相关物种、其栖息地及其所提供生态功能的影响。要了解更多信息，请见 Birdlife International 等机构，《石灰岩地区的开采和生物多样性》（2014），<https://www.birdlife.org/sites/default/files/Extraction-and-Biodiversity-in-Limestone-Areas.pdf>；世界自然保护联盟（IUCN），《水泥和混凝土行业的生物多样性管理：生物多样性指标和报告体系》（*Biodiversity Management in the Cement and Aggregates Sector: Biodiversity Indicator and Reporting System*）（Gland, 瑞士: IUCN, 2014），<https://www.iucn.org/content/biodiversity-management-cement-and-aggregates-sector-biodiversity-indicator-and-reporting-system-birs>；全球水泥与混凝土协会（GCCA），《采石场复原和生物多样性管理可持续性指南》（伦敦: GCCA, 2020），[https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2020/05/GCCA\\_Guidelines\\_Sustainability\\_Biodiversity\\_Quarry\\_Rehabilitation\\_May\\_2020-1.pdf](https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2020/05/GCCA_Guidelines_Sustainability_Biodiversity_Quarry_Rehabilitation_May_2020-1.pdf)

棉水泥生产受国际金融公司（IFC）排除清单的限制。附录A包括水泥和石灰制造业各种行业活动的完整概述。本文件包含下列章节：

<b>1. 具体行业的影响与管理.....</b>	<b>3</b>
1.1 环境 .....	3
1.2 职业健康与安全.....	15
1.3 社区健康和安全.....	20
<b>2. 绩效指标与监测 .....</b>	<b>21</b>
2.1 环境 .....	21
2.2 职业健康与安全.....	26
<b>3. 参考文献和其他资料来源.....</b>	<b>27</b>
<b>附录 A：行业活动概述.....</b>	<b>35</b>

## 1. 具体行业的影响与管理

6. 本章概述水泥和石灰制造业在操作阶段发生的EHS问题，并提出如何对其进行管理的建议。如何管理大多数大型工业设施建设阶段和报废阶段各种常见EHS问题的建议，请见《通用EHS指南》。

### 1.1 环境

7. 水泥和石灰制造项目的环境问题主要源于：

- 能源消耗
- 温室气体
- 大气排放物
- 噪声和振动
- 废水
- 固体废弃物

□ □ □ □

8. 水泥和石灰制造属于能源密集型行业。除《通用EHS指南》规定的节能建议外，水泥和石灰制造业还应遵守以下热能和电能使用的行业能效指南。



9. 目前水泥生产采用的窑炉包括预热预分解窑（PHP）、预热窑（PH）、干法长窑（LD）以及半干窑、半湿法窑（Lepol）、湿法窑和竖窑。<sup>3</sup>预热预分解窑是水泥制造业使用最普遍的窑。<sup>4,5</sup>此窑不仅热耗最低（原因是在旋风分离器内高比例回收窑气的余热，且预分解窑利用了所回收的余热），没有水分蒸发（与使用料浆的半湿法窑或湿法窑有所不同），且产能最高。预热窑比热能消耗通常比预热预分解窑高 5%到 15%。<sup>6</sup>因此，新建工厂和进行大规模升级改造时，生产水泥熟料的优质国际工业实践（GIIP）要求使用配备多级预热预分解窑的干法窑（通常为五到六级，具体取决于燃料和原料的含水量）。<sup>7</sup>

10. 除水泥窑炉技术的选择外，还可通过优化设计和工厂操作进一步提高热能效率，包括提高产能利用率、优化长度/直径比、优化窑炉设计、优化窑炉烧制系统、均匀稳定的操作条件、优化工艺控制、提供三次风管（用于预分解窑）、保持接近化学计量但氧化的窑炉条件、使用矿化剂、减少进气泄漏，以及确保窑炉耐火材料的规格。<sup>8</sup>在条件优化的情况下，多级预热预分解窑比热能消耗应在 2.9 至 3.3 千兆焦（GJ）/吨熟料的范围内。<sup>9</sup>

11. 石灰生产则使用长回转窑（LRK）、带预热窑的回转窑（PRK）、并流蓄热竖窑（PFRK）、套筒竖窑（ASK）等各类窑炉。套筒竖窑、并流蓄热竖窑等混合进料竖窑，以及其他立窑/竖窑，与回转窑相比，热能消耗显著降低（3 到 5 千兆焦/吨石灰），且燃料灵活性极大提升。回转窑则在 5 到 8 千兆焦/吨石灰范围

<sup>3</sup> 干法长窑（LD）耗热量远高于预热预分解窑（PHP），且通常存在极大的维护问题和相关成本。半干窑和半湿法窑（Lepol）因球团窑进料中的含水量而属于中度耗热。半湿法窑因配备了压滤机而耗电量和维护成本都较高，且目前通常被视为已过时。湿法窑属于最古老的回转窑技术，耗热量最高，目前已大量弃用。

<sup>4</sup> 据全球水泥与混凝土协会（GCCA）（2019 年该组织报告了数据的成员在全球熟料总产量中占比为 22%）维护的数据库“正确统计数据”显示，2019 年，预热预分解窑（PHP）在 GCCA 成员的全球熟料产量中占比约达 65%，预热窑（PH）和干法长窑（LD）分别占 20% 和 2% 左右，半干窑、半湿法窑、湿法窑和竖窑合计约占 13%。见 GCCA，数据集 8TGK%，“正确统计数据”数据库中“按窑型划分的熟料总产量占比（%）”，“全球水泥制造业二氧化碳和能源信息数据库”（伦敦：GCCA，2019），<https://gccassociation.org/gnr/>。

<sup>5</sup> 2013 年，中国水泥产量占全球总产量的 60%。截至 2011 年，中国生产的水泥有 86% 均出自预热预分解窑（PHP）（2000 年仅为 10%）。见 Jing Ke 等人，“中国水泥制造业二氧化碳排放量估算：方法和不确定性”，《能源政策》（Energy Policy）57（2013）：第 172 页至 181 页，[https://china.lbl.gov/sites/all/files/6329\\_ep\\_cement\\_co2.pdf](https://china.lbl.gov/sites/all/files/6329_ep_cement_co2.pdf)。印度是 2013 年全球排名第二的水泥生产国，且印度几乎所有水泥产量都源自于干窑技术，其中约 50% 的产能构建于过去十年。2013 年，印度有 40% 的水泥均出自预热预分解窑（PHP）。见国际能源署（IEA）和世界可持续发展工商理事会（WBCSD），《技术路线图：印度水泥制造业的低碳技术》（巴黎：IEA，2013），[https://docs.wbcsd.org/2013/02/Low\\_Carbon\\_Technology\\_for\\_the\\_Indian\\_Cement\\_Industry IEA\\_WBCSD\\_Feb\\_2013.pdf](https://docs.wbcsd.org/2013/02/Low_Carbon_Technology_for_the_Indian_Cement_Industry IEA_WBCSD_Feb_2013.pdf)。

<sup>6</sup> 预热窑（PH）和预热预分解窑（PHP）的热能消耗范围基于 Frauke-Scharcht 等人的数据，《最佳可行技术：水泥、石灰和氧化镁生产参考文件》，欧盟工业排放指令（2010/75/EU）（布鲁塞尔：欧盟委员会，2013），第 1.3.3 节表 1.18，第 47 页，[https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM\\_Published\\_def\\_0.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM_Published_def_0.pdf)；以及 GCCA，“正确统计数据”数据库。

<sup>7</sup> Scharcht 等人，《最佳可行技术》，第 4.2.3.2 节，技术 C，第 343 页。

<sup>8</sup> 优化煅烧炉热效率和预热窑（PH）的其他技术，见 Scharcht 等人《最佳可行技术》第 1.4.2.1.1 节，第 100 页。

<sup>9</sup> Scharcht 等人，《最佳可行技术》，第 1.4.2.1.1 节，第 100 页至 101 页。使用替代燃料可推动能耗低于这个范围，具体取决于燃料的热量和含水量。使用旁通烟道可加大能耗。

内。<sup>10</sup>除能耗方面的考虑外，影响窑炉选择的关键因素还包括石灰石的特性（例如，并流蓄热竖窑通常无法处理粒度极小的石灰石）、燃料利用率与燃料特性，以及客户对石灰制品特性的要求。若石灰制品产量和质量方面的考量允许，则使用竖窑被视为优质国际工业实践（GIIP），因为此类窑炉具备卓越的环境/能效性能。<sup>11</sup>（并流蓄热竖窑属于竖窑中最节能的一类。）

<sup>12</sup>. 石灰窑热能效率可通过以下方式优化：（1）采取能源管理和过程控制措施，包括优化燃料质量（高热值/低湿度）、流速和燃烧条件；（2）选择具备最佳石材粒度的石灰石；（3）在长回转窑和带预热窑的回转窑中限制空气过量；（4）定期维护设备，包括保障窑炉耐火材料/隔热内衬的完整性；以及（5）采用各类石灰窑特定的其他技术。<sup>12</sup>

□ □ □ □ □

13. 熟料冷却机的目的是尽快降低熟料温度，从而控制产品质量并形成适合于最终研磨/混合阶段的熟料温度。回收自熟料冷却机的热空气，为窑炉的主燃烧器燃烧和预热预分解窑提供燃烧空气，也可用于其他干燥目的，从而可降低燃耗。目前新安装的熟料冷却机都是“篦冷机”，篦冷机有诸多不同类型。安装此类冷却机的主要原因在于，与其他类型的冷却机相比，其冷却能力较大且热回收效率较高。（下一代篦冷机热回收率通常可达65%到75%。）<sup>13</sup>优质国际工业实践（GIIP）要求采用固定式预分选筛等高效篦冷机以及热优化技术。此类技术包括使用流动阻力较大的篦冷机篦板（目的是让冷却空气更均匀地分布）、控制向各个篦段供应的冷却空气量，以及对冷却机风扇使用变速驱动器。<sup>14</sup>

---

<sup>10</sup> Schacht等人，《最佳可行技术》，表2.23，第223页。

<sup>11</sup> 欧洲石灰协会（EULA），《竞争激烈且高效的石灰行业：可持续欧洲的基石（石灰路线图）》（布鲁塞尔：EULA，2014），第3节，第14页，[https://www.eula.eu/a-competitive-and-efficient-lime-industry-cornerstone-for-a-sustainable-europe-lime-roadmap-summary/。](https://www.eula.eu/a-competitive-and-efficient-lime-industry-cornerstone-for-a-sustainable-europe-lime-roadmap-summary/)

<sup>12</sup> 各类石灰窑的其他能效优化技术，见Schacht等人，《最佳可行技术》，第2.4.1节表2.34，第252页。

<sup>13</sup> 工业生产力研究所（IIP），“切换至高效篦冷机”，“能效技术数据库”（日期不详），<http://www.iipnetwork.org/wp-content/letd/content/conversion-high-efficiency-grate-coolers.html>.

<sup>14</sup> Schacht等人，《最佳可行技术》，第1.4.2.1.1节，第100页。

14. 电能消耗的范围在约 80 到 120 千瓦时/吨水泥之间。<sup>16,17,18</sup>为风机和其他设备供电的电机，尤其是用于研磨的电机，在水泥生产设施的总耗电量中占据相当份额（一座水泥厂通常有 500 多台电机）。<sup>19</sup>水泥生产过程不同阶段有着不同的电能需求，其中：原料研磨和均化约占总耗电量的 30%；熟料生产约占 25%；水泥生产（包括精磨、混合和包装/运输）约占 45%。<sup>20</sup>

15. 使用高效设备和节能技术，可最大限度减少水泥加工过程中的耗电量。此类技术包括：（1）对生料研磨/处理、燃料管理和精磨所用的磨机和分离机采取自动化过程控制措施；（2）电力管理系统；（3）高能效设备，例如机械物料输送系统（功耗小于气动系统）和重力式混合/均化筒仓系统（功耗小于空气流化系统）；（4）垂直和水平研磨设备（辊磨机和辊压机/高压研磨设备的效率通常比球磨机高 50%），以及用于生料、燃料制备和水泥研磨的第三代高效分离机；<sup>21</sup>（5）高效低压降预热窑旋风分离器（用于减少窑炉废气系统内的功耗）；（6）用于运输、研磨和窑炉相关操作的高效且维护良好的电机；以及（7）对窑炉、冷却机、预热窑、分离机和磨机等的电机和风扇使用变速驱动器。总体来看，以上技术可实现电能节约，且可缩短投资回收期。<sup>22,23</sup>

16. 石灰生产的电耗在总能耗中占比较小（约 10%），通常在 60 千瓦时/吨石灰的范围内。要提高电能使用效率，主要可采取以下步骤：（1）采取过程和电力管理控制措施；（2）提高电机效率；以及（3）使用

<sup>15</sup> 其他实用信息请见欧盟委员会《能源效率最佳可行技术参考文件》（布鲁塞尔：欧盟委员会，2009），  
[https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ENE\\_Adopted\\_02-2009.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ENE_Adopted_02-2009.pdf)。

<sup>16</sup> Wang Yufei、Zhengping Hao 和 Samuel Höller，“中国水泥业二氧化碳减排政策分析”，欧洲节能经济理事会（ECEEE）《2012 年夏季工业能效研究报告》（德国伍珀塔尔：伍珀塔尔研究所（Wuppertal Institute），2012），  
[http://epub.wupperinst.org/files/4635/4635\\_Wang.pdf](http://epub.wupperinst.org/files/4635/4635_Wang.pdf)

<sup>17</sup> 全球水泥与混凝土协会（GCCA），“正确统计数据”，数据集 33AGW。

<sup>18</sup> Scharcht 等人，《最佳可行技术》，第 1.3.3.2 节，第 49 页。

<sup>19</sup> 见工业生产力研究所（IIP），“高效电机与驱动器”（日期不详）<http://www.iipnetwork.org/wp-content/letd/content/high-efficiency-motors-drives.html>。

<sup>20</sup> 欧洲水泥工业协会（CEMBUREAU），“电能效率”，《水泥在 2050 年低碳经济中的作用》（布鲁塞尔：CEMBUREAU，2013），第 39 页至 41 页，<https://lowcarboneconomy.cembureau.eu/wp-content/uploads/2018/09/cembureau-full-report.pdf>。如本指南前言所述，国际金融公司《建筑材料开采业 EHS 指南》列出了原料开采的 EHS 要素。

<sup>21</sup> 工业生产力研究所（IIP），“精磨用立式辊磨机”（日期不详），<http://www.iipnetwork.org/wp-content/letd/content/vertical-roller-mills-finish-grinding.html>。

<sup>22</sup> 同上，“水泥”（日期不详）。

<sup>23</sup> Worrell、Ernst、Katerina Kermeli 和 Christina Galitsky，《水泥生产的能效改进和成本节约机会—能源与工厂管理人员的能源之星®指南》（华盛顿特区：美国环境保护署（EPA），2013），第 19 页至 82 页，  
[http://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/ENERGY%20STAR%20Guide%20for%20the%20Cement%20Industry%202027\\_08\\_2013\\_Rev%20js%20reformat%2011192014.pdf](http://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/ENERGY%20STAR%20Guide%20for%20the%20Cement%20Industry%202027_08_2013_Rev%20js%20reformat%2011192014.pdf)。

高效设备，以此优化冷却和破碎/研磨流程。<sup>24</sup>以上步骤可极大节省能源，例如电机效率最大可提升10%。<sup>25</sup>

□ □ □ □

17. 水泥行业的温室气体排放，尤其是二氧化碳( $\text{CO}_2$ )排放，<sup>26</sup>主要源于熟料生产过程中石灰石的煅烧（约占二氧化碳总排放量的55%）、加热窑炉所用的燃料（约占二氧化碳总排放量的35%，通常因使用煤和石油焦等碳密集型燃料而产生），以及电力的使用和运输（约占二氧化碳总排放量的10%，具体取决于电力的来源）。<sup>27</sup>水泥生产过程中温室气体排放的强度取决于：（1）窑炉进料的成分；（2）用于燃烧的燃料类型；（3）工厂总体的能效水平和对窑炉技术的选择；（4）熟料和水泥的比例；以及（5）电力供应的碳强度。<sup>28</sup>虽然传统化石燃料仍是全球主要水泥生产国的主要燃料来源，<sup>29</sup>（包括2015年分别在全球水泥产量中排名第一和第二的中国和印度），<sup>30</sup>但全球利用废弃物燃料<sup>31</sup>和生物质燃料替代化石燃料的情况正在增长。<sup>32</sup>

18. 石灰生产过程中的石灰石脱碳和燃料相关的二氧化碳排放，与水泥生产类似。但是，与水泥生产相比，石灰生产的电耗和相关二氧化碳排放通常较少。主要石灰生产厂也以传统化石燃料为主。

19. 水泥或石灰生产项目以及相关的火力发电所产生的温室气体排放量，应每年根据国际公认的方法和良好实践进行量化。

<sup>24</sup>欧洲石灰协会(EULA)，《竞争激烈且高效的石灰行业：可持续欧洲的基石(石灰路线图)》，第5.1.1节，第27页至36页。

<sup>25</sup>同上，第14页。

<sup>26</sup>水泥和石灰厂因高温和氧化条件而不太可能排放出强效温室气体一氧化二氮( $\text{N}_2\text{O}$ )。一氧化二氮的唯一潜在来源是原料在生料磨机中直接释放。

<sup>27</sup>世界可持续发展工商理事会(WBCSD)，《二氧化碳与气候保护》(日内瓦：WBCSD，日期不详)，<https://www.wbcsd.org/Programs/Climate-and-Energy>。

<sup>28</sup>可使用可再生能源进行水泥生产，包括风力发电、太阳能光伏发电、太阳能热发电以及小型水力发电。是否部署此类技术，取决于可再生能源是否可用、相关的电价以及工厂规模等因素。见国际能源署(IEA)《技术路线图：水泥行业的低碳转型》(巴黎：国际能源署，2018)，37，<https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>。EHS部门对自备可再生能源电力的使用率较低。

<sup>29</sup>水泥制造业最常用的燃料是煤粉(黑煤和褐煤)。但石油焦因成本较低而使用量在增加。煤和石油焦产生的温室气体排放量高于碳密集度较低的燃料，例如单位排放量比天然气高出约65%。此外，燃料中硫含量较高(石油焦一大特征)，可能引发各类问题，包括窑圈上堆积硫。

<sup>30</sup>欧洲水泥工业协会(CEMBUREAU)，《水泥和混凝土：重要事实与数据》(布鲁塞尔：欧盟委员会，2020)，<https://cembureau.eu/cement-101/key-facts-figures>。

<sup>31</sup>水泥制造业常用的废弃物燃料包括各种热值不等的无害废弃物和有害废弃物。常用废弃物燃料清单见Schacht等人，《最佳可行技术》，第1.2.4.3.1节，第22页。此类废弃物燃料可能包括废弃溶剂、废油、旧轮胎、废弃物衍生燃料(RDF)和废塑料。

<sup>32</sup>常规化石燃料约占全球水泥制造业燃料的85%(以占总能耗的百分比计算)，其次是混合化石/废弃物燃料(约10%)和生物质燃料(约5%)。2000年，常规化石燃料约占95%，混合化石/废弃物燃料约为4%，生物质燃料约占1%。见全球水泥与混凝土协会(GCCA)，“正确统计数据”，有关“全球”和“欧盟28个成员国”的数据集25aAGFC。

20. 《通用EHS指南》就温室气体排放管理给出了建议。除本指南前几节探讨的能效措施外，在水泥生产中最大限度减少二氧化碳排放的行业技术还包括：<sup>33</sup>

- 生产混合水泥，其中熟料部分替代为粉煤灰、高炉炉渣、天然火山灰、煅烧粘土和/或磨碎的石灰石，或每单位最终产品的能源密集度和温室气体密集度低于熟料的新型水泥基材料，可极大降低燃料消耗和随后的二氧化碳排放量。<sup>34,35,36</sup>
- 用碳含量与热值之比较低的替代性燃料替代常规燃料或与常规燃料（煤/石油焦）混烧，包括改用碳密集度较低的燃料（例如天然气，若不可行，则改用燃料油）、特定的废弃物燃料（例如后文“大气排放物”一节和“废弃物燃料、废弃物和相关大气排放物”小节所述之废弃物燃料）、生物质燃料（例如大米、咖啡壳、棕榈仁壳、木材废料等），或改用废弃物衍生燃料（RDF）（此类替代燃料以足够的经济成本提供）。<sup>37</sup>
- 用氧化钙（CaO，即生石灰）的非碳原料（例如高炉炉渣、褐煤灰、煤灰、混凝土破碎砂等）部分替代石灰石原料，以减少煅烧产生的工艺二氧化碳排放和燃料二氧化碳排放。<sup>38,39</sup>
- 从窑炉、熟料冷却机和预热窑系统排放的废气，都含有可用于原料和燃料干燥和/或发电的有用能。水泥制造虽然通常没有较大的低温加热需求，但余热回收后剩余的热量，可通过热回收锅炉回收，用于单独的发电循环，也可补充燃料燃烧产生的蒸汽，用于现场自备发电。可用于余热发电的废

<sup>33</sup> 应考虑水泥行业的碳捕集、封存或再利用技术，因为其技术可行性与商业可行性在未来将得到更明确的验证。更多信息请见国际能源署温室气体研究与开发计划机构（IEAGHG）《在水泥行业部署碳捕集与封存技术》（2013），[https://ieaghg.org/docs/General\\_Docs/Reports/2013-19.pdf](https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-19.pdf)。

<sup>34</sup> 例如，对于含30%至70%粒化高炉炉渣粉（GBFS）的水泥，每吨水泥二氧化碳排放量可减少100至430公斤，而每吨水泥的典型排放量为750公斤二氧化碳。混合水泥使用量的增加取决于替代物料是否可用、其特性和价格、各国家标准，以及水泥产品的预期用途等市场因素。见工业生产力研究所（IIP），《混合水泥替代品》（日期不详），<http://www.iipnetwork.org/wp-content/letd/content/blended-cement-alternatives.html>。

<sup>35</sup> 主要水泥生产国熟料和水泥的比例各不相同。2011年，中国的这一比例为63%（2005年为73%）；印度2013年为70.5%（2005年为77.8%）；欧盟2013年为73.6%（2005年为75.8%）；美国2013年为83.5%（2005年为83.7%）。关于中国熟料和水泥的比例，见Ke等人，“二氧化碳排放量估算”，第7页。有关印度、欧盟和美国的信息，请见全球水泥与混凝土协会（GCCA），“正确统计数据”，针对“印度”、“欧盟28个成员国”和“美国”的数据集92AGW。

<sup>36</sup> 国际能源署（IEA）和世界可持续发展工商理事会（WBCSD）（2018），《水泥行业的低碳转型》，第32页至35页。

<sup>37</sup> 国际金融公司（IFC），《在水泥厂加大替代性燃料的用量：国际最佳实践》（华盛顿特区：国际金融公司，2017），[https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/33180042-b8c1-4797-ac82-cd5167689d39/Alternative\\_Fuels\\_08+04.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IT3Bm3Z](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/33180042-b8c1-4797-ac82-cd5167689d39/Alternative_Fuels_08+04.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IT3Bm3Z)。

<sup>38</sup> 见：Worrell、Kermeli和Galitsky，《水泥生产的能效改进和成本节约机会—能源与工厂管理人员的能源之星®指南》，第76页至80页；以及工业生产力研究所（IIP），《替代性原料》（日期不详）。可在多大程度上使用替代性原料，具体取决于可用的常规原材料（例如石灰石）有怎样的成分，以及替代性原料（例如二氧化硅、氧化铝、氧化镁）是否可用、其成本、成分和硫含量。

<sup>39</sup> 选择有机物含量较低的原料，以避免加大二氧化碳排放量，并避免产生少量的一氧化碳（CO）排放（熟料煅烧过程中，一氧化碳排放量通常低于气体排放总量的0.5%至1%）。一氧化碳浓度是工艺的一个指标。一氧化碳浓度高通常属于一个报警信号，表明制造工艺不正常（可能涉及燃料上升）。应持续监测一氧化碳排放情况。此外，若使用静电除尘器（ESP），一氧化碳浓度超过0.5%~1%时，可能发生爆炸。

热量，取决于窑炉系统的设计和生产、原料的含水量，以及生料磨机系统、固体燃料系统和水泥磨机内干燥所需的热量。废热回收发电可通过各类朗肯循环系统（尤其是蒸汽朗肯循环系统）满足水泥厂高达 30% 的电力需求。蒸汽朗肯循环系统在废热回收系统中占绝大部分比例。其他还有有机朗肯循环系统和卡利纳循环系统。<sup>40</sup>

21. 针对石灰生产，可通过以下方式最大限度减少温室气体排放：（1）如上文“能源消耗”一节所述，使用更高效的竖窑（取决于产量和石灰制品的规格）并对窑炉进行优化；（2）从窑炉和石灰消化过程中回收废热（废热可用于原料干燥和研磨）；以及（3）在技术受限的情况下，转为使用温室气体密集度较低的燃料，包括废弃物燃料、天然气（若不可行，则使用燃料油）和生物质燃料。<sup>41</sup>

□ □ □ □ □

22. 水泥和石灰制造中的大气污染点源排放物产生于窑炉系统、熟料冷却机和磨机的运行以及半成品和成品的搬运和储存。也可能产生非点源粉尘排放。

23. 火力发电在水泥和石灰制造业很普遍。《通用 EHS 指南》为管理热输入能力最高为 50 兆瓦热 (MW<sub>th</sub>) 的小型燃烧源排放给出了指导意见，包括废气排放的大气排放标准。热输入能力大于 50 MW<sub>th</sub> 的排放源，则由《热力发电厂 EHS 指南》给出指导意见。

□ □ □

24. 颗粒物 (PM) 排放是水泥和石灰制造业最严重的环境影响之一。下面介绍主要的颗粒物排放来源及建议的防控方法。

25. 针对窑炉系统、熟料冷却机的运行（包括水泥熟料和石灰煅烧）造成的颗粒物排放，除按正确方式平稳运行窑炉之外，<sup>42</sup>建议采取以下污染防控手段：

- 使用过滤器捕集窑炉和冷却机排出的粉尘，回收的颗粒物分别作为生料和熟料加以再利用；
- 以织物过滤系统<sup>43</sup>作为首选控制手段，将静电除尘器 (ESP) 用作备选<sup>44</sup>，采集并控制窑气、旁路气体粉尘和冷却机排气中的细微颗粒物 (PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>)。

<sup>40</sup>废热回收相关的指导意见，请见国际金融公司 (IFC) 和工业生产力研究所 (IIP)，《水泥行业的废热回收：市场和供应商分析》（华盛顿特区：国际金融公司与工业生产力研究所，2014 年），[https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics\\_ext\\_content/ifc\\_external\\_corporate\\_site/sustainability-at-ifc/publications/report\\_waste\\_heat\\_recovery\\_for\\_the\\_cement\\_sector\\_market\\_and\\_supplier\\_analysis](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/report_waste_heat_recovery_for_the_cement_sector_market_and_supplier_analysis)。

<sup>41</sup>欧洲石灰协会 (EULA)，《竞争激烈且高效的石灰行业》，第 5 节，第 27 页至 42 页。

<sup>42</sup>平稳运行窑炉指窑炉保持最佳运行状况。

<sup>43</sup>织物过滤器也称“袋式”过滤器或“袋滤室”过滤器。本文件使用“织物过滤器”这一说法。

<sup>44</sup>静电除尘器 (ESP) 在正常运行条件下虽然可靠，但窑炉排出的废气中一氧化碳浓度高于 0.5% 时，可能发生爆炸。为防止这种情况发生，操作人员应确保对烧制过程进行适当且连续的管理和控制，包括连续监测一氧化碳浓度，尤其是

26. 对于磨机运行产生的颗粒物排放，建议的控制技术是使用织物过滤器<sup>45</sup>捕集磨机粉尘，并在磨机内回收。

27. 对于与半成品和成品搬运和储存（包括原料的粉碎和研磨）、固体燃料搬运和储存、物料运输（例如使用卡车或皮带运输机）以及包装作业有关的颗粒物排放，建议的污染防控手段包括：

- 在使用排风机产生负压的封闭系统内进行物料的处理（例如粉碎作业、生料粉磨和熟料研磨）。排风机出口的空气使用织物过滤器进行除尘。<sup>46</sup>
- 使用封闭式皮带运输机运输物料，以控制转运点的排放，包括清洁回程皮带所用的系统。
- 为熟料和固体燃料设计足够大的有顶仓库，以避免频繁往返于外部库存点进行重复搬运。例如，通常工厂贮存于有顶仓库或筒仓的熟料量，可保障15到30天的生产，从而可最大限度减少熟料搬运，使得每年窑炉维护停工期内也能继续进行水泥生产。
- 尽可能采用自动包装和搬运系统，包括：（1）配置有自动下料机和无组织排放控制装置的回转包装机；（2）卸货过程中每袋均采用自动重量控制；（3）使用皮带运输机将袋装产品送至包装码垛机；以及（4）将装有成品的托盘储存于有顶仓库内，以备后续运输。
- 为减少材料和燃料库的扩散或扬尘而采用以下储存方式：（1）有顶或封闭仓库内储存粉碎及预混的原料；（2）使用筒仓储存煤粉和石油焦等常规燃料；（3）在防风防降水区域储存废弃物衍生燃料；（4）在带有自动除尘/粉尘回收设备的有顶/封闭仓库或筒仓内储存熟料；（5）在有自动除尘/粉尘回收系统和散装水泥车自动装车系统的筒仓内储存水泥；（6）筛分后的煅烧石灰储存于贮存仓或筒仓内；以及（7）细颗粒消石灰储存于密封筒仓内。也可在装料/卸料点进行喷水和使用化学抑尘器（包括加湿技术），以此减少储存区/堆放区的颗粒物排放。
- 进行日常工厂维护并保持良好的内务管理，尽量减少空气泄漏和溢出，并在日常操作与异常情况下使用移动式和固定式真空装置。
- 物料搬运作业采用简单的线性布局，以减少设立多个转运点的必要性，包括道路运输区域的铺设、润湿和清洁程序。

28. 《通用EHS指南》就管理其他扩散源的颗粒物排放给出了进一步建议，包括车辆在水泥或石灰生产设施内或其附近行驶所产生的粉尘。



29. 水泥窑高温燃烧过程可产生氮氧化物( $\text{NO}_x$ )排放。<sup>47</sup>除平稳运行窑炉外，还建议采取以下污染防控手段：

在窑炉启动期间，以便在必要时自动断电。静电除尘器的尺寸也应适当，以便在大型窑炉发生故障时（在此情况下，会有大量未燃烧的高温熟料被迫在较冷的废气中经过）起缓冲作用。

<sup>45</sup> 静电除尘器（ESP）因投资成本高且启动和关闭期间效率低（排放量相对较高）而不适用于磨机除尘。

<sup>46</sup> 针对石灰水合工艺，织物过滤器因烟气中湿度高/温度低而无法使用时，湿式除尘器或许有效。Schacht等人，《最佳可行技术》，第4.6.3.2节，第361页。

<sup>47</sup> 一氧化氮占  $\text{NO}_x$  排放量的 90%以上

- (适用时在主窑和预分解窑中) 使用低 NO<sub>x</sub> 燃烧器, 避免产生促进 NO<sub>x</sub> 形成的局部火焰热点。<sup>48</sup>
- 使用低 NO<sub>x</sub> 煅烧炉。
- 使用氮含量较低的燃料。
- 在预热预分解窑 (PHP) 和预热窑 (PH) 中适当采用分级燃烧工艺。
- 优化一次风量和二次风量, 以确保适当的燃烧/燃烧条件并严格控制氧气过量, 从而最大程度减少 NO<sub>x</sub> 的形成和排放。
- 采取火焰冷却手段<sup>49</sup>, 即在燃料中加水或直接向火焰中加水, 以降低火焰温度并提高羟基自由基的浓度。

30. 除上述用于 NO<sub>x</sub> 还原的主要控制技术外, 还可按需采用选择性非催化还原 (SNCR) 等二次技术。<sup>50</sup>

31. 石灰制造中产生的氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 通常少于水泥制造, 因为石灰石煅烧温度通常较低。除平稳运行窑炉外, 还可使用优化的低 NO<sub>x</sub> 燃烧器控制 NO<sub>x</sub> 排放。<sup>51</sup>



32. 加热 (燃烧) 过程中, 不完全燃烧通常产生总有机化合物 (TOC) 或挥发性有机化合物 (VOC)。窑炉内处于正常稳态条件时, 排放量较低。(窑炉) 启动或异常操作 (故障) 条件下, 浓度可能上升。此类事件的发生频率不一, 例如在每周一次或两次到每两个月或三个月一次之间。生料中存在的有机物随着进料被加热而挥发时, 设备 (预热窑、预分解窑) 的主要工艺步骤中可能产生总有机化合物 (TOC) 排放。且有机物在 400° C 到 600° C 的温度之间释放。

33. 正常情况下, TOC 排放量通常较低, 但工厂使用的原料中含有有机挥发性成分时, 排放量可能上升。若能够选择, 则不得通过原料进料路线将挥发性有机化合物含量高的天然原料或废弃原料送入窑炉系统, 也不得在二次烧制中使用卤素含量高的燃料。可通过工艺优化 (例如稳定并优化工厂的运行、烧制工艺和/或燃料和原料进料的均化) 保持低 TOC 排放。若 TOC 浓度上升, 可像其他行业那样考虑用活性炭吸附。<sup>52</sup>

<sup>48</sup> 针对使用带预分解窑的低 NO<sub>x</sub> 燃烧器, 请见 Scharcht 等人, 《最佳可行技术》, 第 4.2.6.1 节, 第 349 页。针对燃烧器优化, 若初级燃烧器运行时空气百分比较低, 则低 NO<sub>x</sub> 燃烧器将对 NO<sub>x</sub> 水平产生边际影响。采用火焰冷却手段, 可能提高能耗, 导致燃料用量增加 2% 到 3%, 从而导致二氧化碳排放量上升。见 Scharcht 等人, 《最佳可行技术》, 第 1.4.5.1.2 节, 第 130 页。

<sup>49</sup> 火焰冷却手段的进一步描述, 请见古吉拉特邦清洁生产中心 (GCPC), 《水泥制造业的清洁生产机会》(日期不详), <http://www.gpcenvis.nic.in/Experts/Cement%20sector.pdf>。

<sup>50</sup> 选择性非催化还原 (SNCR) 和还原剂及其应用的更多信息, 请见 Scharcht 等人, 《最佳可行技术》, 第 1.4.5.1.7 节, 第 134 页至 139 页。

<sup>51</sup> 低 NO<sub>x</sub> 燃烧器目前已应用于回转窑, 某些特定条件 (空气百分比较高) 下也可应用于套筒竖窑。而将水泥窑所用的低 NO<sub>x</sub> 燃烧器技术直接用到石灰窑上, 并非易事。水泥窑中火焰温度较高, 且已针对此窑开发出了低 NO<sub>x</sub> 燃烧器, 用于降低初期较高的“热 NO<sub>x</sub>”水平。而石灰窑大多 NO<sub>x</sub> 水平较低, “热 NO<sub>x</sub>”不那么显著。且燃烧器技术须根据所使用的燃料 (即常规化石燃料或废弃物燃料) 进行调整。并流蓄热竖窑 (PFRK) 属于无焰燃烧, 因此, 低 NO<sub>x</sub> 燃烧器不适用于此类窑炉。见 Scharcht 等人, 《最佳可行技术》, 第 2.4.6.1.3 节, 第 274 页。

<sup>52</sup> 见 Scharcht 等人, 《最佳可行技术》。



34. 水泥制造的二氧化硫( $\text{SO}_2$ )排放主要源于原料所含的挥发性硫或反应性硫，与窑炉内所用燃料的质量也有关，但后者居次要地位。<sup>53</sup>建议采取以下减少 $\text{SO}_2$ 的污染控制手段：

- 选择挥发性硫含量低的原料和燃料
- 优化熟料燃烧过程,具体通过以下手段实现：稳定窑炉的运行；确保热料在窑炉立管中均匀分布；以及防止燃烧过程中出现还原条件。优化窑炉入口区域的氧气浓度，有助于捕集窑尾物料中的 $\text{SO}_2$ ，但须与降低氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和一氧化碳(CO)排放相平衡。
- 使用立式磨机，用废气吹扫磨机，以回收能量并降低废气中的硫含量（磨机中含二氧化硫的废气与生料中的碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )混合后生成硫酸钙(石膏)）。
- 过滤废气前，向废气中注入吸收剂，例如氢氧化钙( $\text{Ca(OH)}_2$ ，即熟石灰)、氧化钙( $\text{CaO}$ )或氧化钙含量高的粉煤灰。
- 采用湿法或干法脱硫设备。<sup>54</sup>

35. 石灰生产的二氧化硫排放与燃料和原料的硫含量、窑炉的设计/类型以及产品要求相关。竖窑，包括并流蓄热竖窑(PFRK)，与回转窑或配备预热窑的回转窑相比，二氧化硫排放量较低。选择低含硫的燃料和原料，可降低二氧化硫排放量。<sup>55</sup>



36. 水泥和石灰生产过程中可能大量排放铅、镉、汞等重金属，具体排放量取决于原料、化石燃料和废弃物衍生燃料中重金属的含量。

37. 如上文所述，非挥发性金属大多与颗粒物结合，可采用防尘/防颗粒措施进行控制。按照《通用EHS指南》所述，所捕集的废料应按有害废弃物进行管理。

38. 汞等挥发性金属仅部分被原始含粉尘气体吸附，(吸附程度)具体取决于废气的温度。限制挥发性重金属排放的建议手段如下：

- 通过监测和物料选择制度(包括利用选择性开采技术避开金属浓度高的物料)，控制投入物料和废弃物燃料中的挥发性重金属含量。

<sup>53</sup> 有机硫或硫化亚铁( $\text{FeS}$ )含量高的原料可导致二氧化硫( $\text{SO}_2$ )排放量上升。由于烧结区、煅烧区和预热窑(PH)下部炉段存在强碱性，因此，与燃料一道引入窑炉的硫经氧化后会形成二氧化硫，但不会导致二氧化硫排放量显著上升。见Scharcht等人，《最佳可行技术》，第1.3.4.3节(第66页)和第1.4.3.2节(第111页)。

<sup>54</sup> 二氧化硫排放在水泥生产中通常不严重，但也可采用干式和湿式除尘器控制其排放。干式除尘成本高于湿式除尘，因此，与后者相比使用不大广泛，且通常在二氧化硫排放量可能高于1500毫克/标准立方米( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )时才使用。

<sup>55</sup> 石灰生产中二氧化硫排放控制的更多信息，请见Scharcht等人，《最佳可行技术》，第2.4.6.2节，第279页。

- 若挥发性重金属浓度较高（尤其是汞），可采用选择性输送粉尘或富汞窑灰“脱汞”，结合吸附剂喷射，从而限制窑灰中汞含量的上升。<sup>56</sup>由此产生的固体废弃物应按照《通用EHS指南》的规定作为有害废弃物加以管理。湿式洗涤和活性炭吸附等多种污染物控制措施，也可有效控制高浓度挥发性重金属。<sup>57</sup>



39. 水泥窑内属于强碱性环境，且火焰温度高（高达 $2000^{\circ}\text{C}$ ），因此，可采用高热值废弃物燃料，例如废弃溶剂、废油、旧轮胎、废弃物衍生燃料（RDF）和废塑料。特殊情况下，水泥窑也可用于处理热值或矿物价值低且不参与熟料生产过程的废弃物。而只有满足了工艺控制、排放控制和输入控制（例如控制重金属含量、热值、灰分含量和氯含量）相关的某些要求（在下文探讨），方可考虑对有害废弃物（包括多氯联苯（PCB）、废弃的有机氯农药和其他氯化材料）进行这种协同处理。虽然可用废弃物燃料取代化石燃料，但若控制和操作不当，使用废弃物燃料或共处理有害废弃物，可能导致挥发性有机化合物、多氯二苯并二噁英（PCDD）和多氯二苯并呋喃（PCDF）等持久性有机污染物以及氟化氢、氯化氢（也可能源自含氯化物的原料所产生的挥发性有机化合物）和有毒金属及其化合物的排放，具体取决于废弃物燃料的成分。

40. 在水泥生产中使用废弃物燃料或共处理有害废弃物的工厂，应记录所用废弃物的数量和类型以及所用的质量标准，例如最低热值，以及多氯联苯（PCB）、氯、多环芳烃、汞和其他重金属等特定污染物的最高浓度。在水泥厂为替代其他燃料或销毁废弃物而燃烧废弃物时，应采取充分的排放监测手段（在本指南第2节中探讨）。此类空气污染物建议的防控手段包括：<sup>58</sup>

- 采用“重金属”一节所述的物料选择与控制措施，监测并控制投入物料和废弃物燃料的挥发性重金属含量。非挥发性金属则应按照“颗粒物”一节所述建议进行管理。
- 对拟作为废弃物燃料或原料使用的有害及无害废弃物，采用适当的储存和搬运做法，详见《通用EHS指南》。
- 直接将含有挥发性金属或挥发性有机化合物（VOC）浓度高的燃料注入主燃烧器，不经过二次燃烧器。
- 二次煅烧以及启动和关机阶段避免使用卤素含量高的燃料。

<sup>56</sup> 这种选择性输送粉尘或富汞窑灰“脱汞”技术，在“生料磨机关闭”模式下更有效。窑炉在此模式下属于单独运行，不与生料磨机同步运行，同步运行是为了利用窑气干燥生料磨机中的生料，而粉尘来自预热窑（PH），且未在生料磨机内“稀释”，因此汞浓度较高。烟气温度应尽可能低，最好低于 $130$ 摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ），方可实现较高的吸附效率。见联合国环境规划署（UNEP）《最佳可行技术和最佳环境实践指南》中“水泥熟料生产设施”（纽约：UNEP，2016年），第3.2.1节和3.2.2节，第10页至12页，

[http://mercuryconvention.org/Portals/11/documents/publications/BAT\\_BEP\\_E\\_interractif.pdf](http://mercuryconvention.org/Portals/11/documents/publications/BAT_BEP_E_interractif.pdf)。

<sup>57</sup> 汞主要以氧化物的形式排放时，湿式除尘器最有效。单质汞含量较高时，除非使用添加剂对汞进行氧化，否则湿式除尘器效果并不显著。活性炭过滤器设计为模块化过滤器填充层，以适应不同水平的过气量和窑炉能力。见联合国环境规划署（UNEP），“水泥熟料生产设施”，第3.3.1节和3.3.3节。

<sup>58</sup> 全球水泥与混凝土协会（GCCA）在其《水泥制造业燃料和原料协同处理指南》（伦敦：GCCA，2019b）中给出了废弃物燃料和物料管理的进一步指导意见，[https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2019/10/GCCA\\_Guidelines\\_FuelsRawMaterials\\_v04\\_AMEND.pdf](https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2019/10/GCCA_Guidelines_FuelsRawMaterials_v04_AMEND.pdf)。

- 在不预热的情况下，确保湿法长窑和干法长窑内窑炉废气迅速冷却至200°C以下。<sup>59</sup>

41. 石灰制造因产品质量要求，而极少使用废弃物燃料和废弃物原料。<sup>60</sup>

□ □ □ □ □

42. 水泥和石灰制造工艺有多个阶段都会产生强噪声，包括：原料开采（参见《建筑材料开采业ESH指南》）；研磨和储存；原料、半成品和成品的搬运和运输；以及排风机的运行。噪声排放的控制可能包括：为风机安装静噪器；为磨机操作人员配备封闭式操作室；使用隔音屏障、噪声偏转器和隔音材料。《通用EHS指南》规定了建议降噪措施的控制指标和环境与工作场所的噪声指标。

□ □

□ □ □ □ □ □ □

43. 废水主要产生自不同工艺阶段对设施（例如轴承、窑圈）的冷却。水泥和石灰制造业工业过程废水的处理方法包括：通过调节PH值来均衡流量与负荷；使用沉降池或澄清池，通过沉淀来减少固体悬浮物；通过多介质过滤来减少不可沉降的固体悬浮物。工业废水分管理以及处理方法范例，参见《通用EHS指南》。

---

<sup>59</sup> PCDD和PCDF在灼热的火焰和高温气体中被破坏，但温度较低（250–500°C）时可重新合成。预热预分解窑（PHP）和预热窑（PH）中，通常可在短时间内降温至200°C以下，因为旋风分离器中流动极快，但在其他窑型中较难实现。由于气体成分不同，使用活性炭吸附汞等痕量挥发性金属、挥发性有机化合物或多氯二苯并对二恶英-多氯二呋喃，仍处于试验阶段。良好的操作条件和谨慎选择投入物料，可避免使用活性炭。防控多氯二苯并对二恶英和多氯二呋喃排放的相关信息，见世界可持续发展工商理事会（WBCSD），《水泥工业中持久性有机污染物的形成和释放》，第2版（日内瓦：WBCSD，2006），<http://docs.wbcsd.org/2006/01/FormationAndReleaseOfPOPsInCementIndustry.pdf>。

<sup>60</sup> 制造石灰所用的燃料来源对所产石灰的质量有重大影响，主要原因在于硫含量。硫会进入产品并降低产品的价值。若燃烧不完全，不同燃料都会对产品质量产生影响。因此，天然气和石油因其燃烧特性而属于石灰生产中最常用的燃料。若不关心最终产品的硫含量，则可使用煤（低硫）或石油焦作为燃料。



44. 公用工程作业产生的无污染废水、无污染雨水和卫生污水管理方面的指导意见，参见《通用 EHS 指南》。污染废水应送入工业过程废水处理系统。

45. 雨水流经堆放的石油焦、煤和废弃物料，可能被污染。对堆放的物料应进行遮盖或围挡，并采取防止雨水流入堆放区的控制措施，从而防止雨水与物料接触。对原料、熟料、煤和废弃物的粉尘排放采取建议的污染控制手段，也有助于最大限度减少对雨水的污染。若雨水会接触所堆放的物料，为保护土壤和地下水免受污染，堆场地面应作铺面处理或以其他方式进行衬砌，在周围采取控制雨水沿地表向堆场外流动的控制措施，并将这些雨水收集在衬砌水池内，待颗粒物沉降后，再分离、控制、回收或排放。受污染雨水管理相关的其他建议参见《通用 EHS 指南》。

46. 水泥制造虽然并非用水密集型行业，但也会在季节性干旱地区造成水资源紧张。降低水消耗的相关建议，尤其是在水可能属于有限自然资源的地区降低水消耗的相关建议，请见《通用 EHS 指南》。除内务管理措施外，水泥公司还通过采用干式冷却系统（而非发电循环冷凝器等蒸发式冷凝器）成功降低了水消耗。



47. 水泥和石灰制造业中，固体废弃物的来源包括熟料生产中的废弃物（主要是在采石场或在生料制备过程中从原料中去除的废石），以及因不合格而废弃的熟料。从旁路风和烟气中脱除的窑炉粉尘，若不回收利用，则属于又一个潜在的废弃物来源，且可被归为有害废弃物。工厂的维护也会产生有限的废弃物（例如废油和废金属，以及可能含重金属的窑炉耐火材料）。其他废弃物可能包括窑炉聚积的粉尘内含有的碱、氯化物或氟化物。<sup>61</sup>

48. 石灰生产中，粉尘、不合格的生石灰以及消石灰，通常都重复利用/回收再利用，用于生产某些商业性产品，例如建筑用石灰、土壤稳定用石灰、消石灰和颗粒产品。

49. 有害和无害废弃物管理的相关指导意见，请见《通用 EHS 指南》。

## 1.2 职业健康与安全

50. 水泥和石灰制造项目对职业健康和安全的影响在操作阶段最严重，主要包括：<sup>62</sup>

- 有害粉尘
- 爆炸和火灾

<sup>61</sup> 仍在使用已基本淘汰的半湿法工艺的老旧工厂，使用压滤机也可能产生碱性滤液。

<sup>62</sup> 职业健康与安全影响更详细的信息，可查询优质国际工业实践（GIIP）/职业健康与安全（OHS）标准，例如美国职业安全与健康署（US OSHA）《1910—常规工业标准》、英国健康与安全事务局（HSE）相关条例和规范，以及澳大利亚和新西兰的相关指南和规范。

- 危险能量
- 电气危害
- 密闭空间
- 复杂危险的吊装作业
- 焊接、切割和钎焊（动火作业）
- 高温
- 噪声和振动
- 身体危害
- 辐射
- 化学危害和其他工业卫生问题

□ □ □ □

51. 水泥和石灰的制造中，工人在大多数产生粉尘的阶段都会接触到细微颗粒，而其中最严重的是采石场作业（参见《建筑材料开采业 EHS 指南》）、原料搬运和熟料/水泥研磨阶段。尤其是暴露于活性（结晶）二氧化硅（SiO<sub>2</sub>）呼吸性粉尘，以及原料和产品中含有的石棉（例如水泥粉尘），属于水泥和石灰制造业一大潜在危害，须按照特定的健康与安全标准加以控制。<sup>63</sup>防控粉尘接触的方法包括：

- 通过良好的内务管理和维护来控制粉尘，包括使用移动式真空清洁设备防止铺面区域堆积粉尘。
- 使用带空调的封闭式操作间。
- 在转运点使用配备了排放控制装置的封闭式传送带/升降机，减少扬尘排放。
- 使用粉尘分离回收系统去除工作区域的粉尘，特别是在研磨机工区。
- 在水泥装袋区使用通风（抽吸）设备。
- 测量工人的有害粉尘接触量。

<sup>63</sup>防控二氧化硅吸入危害的相关信息，可在多个来源查询，包括：安大略省健康与安全部（Health and Safety Ontario），《工作场所的二氧化硅》（2011年）；美国职业安全与健康署（OSHA）《常规工业和海事产业可吸入结晶二氧化硅标准》（2018）；美国政府工业卫生学家会议（ACGIH），2021年门槛限值（TLV）和生物暴露指数（BEI）；美国职业安全与健康署（OSHA），《职业与安全健康标准》“1910.1053 Z部分：有毒有害物质、可吸入结晶二氧化硅”，<https://www.osha.gov/laws-regulations/standardnumber/1910/1910.1053> 和“1910.1001 Z部分：石棉”，<https://www.osha.gov/laws-regulations/standardnumber/1910/1910.1001>；

ASTM 国际标准组织，“ASTM E1132 13e1：与职业接触可吸入结晶二氧化硅相关的健康要求标准实施规程”（宾夕法尼亚州西康舍霍肯，2013），<https://www.astm.org/Standards/E1132.htm>；英国健康与安全事务局（HSE），《健康有害物质的控制，2002年条例：许可的实践和指导准则》，L5 第6版（2013），<https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/l5.pdf>；以及 Cecala、Andrew B.等人，《工业矿物开采和加工的粉尘控制手册》，报告编号 RI9701，第2版（辛辛那提：NIOSH 出版社，2019），<https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2019-124.pdf>。

- 使用个人防护装备（例如口罩和呼吸器），以防接触采取上述工艺及工程控制措施后剩余的粉尘；<sup>64</sup>
- 执行呼吸防护计划。须在呼吸防护书面计划中规定标准操作程序（SOP），用于保护全体工人免受呼吸道危害。该程序须列出专门的计划管理员、呼吸器选择标准、医疗评估程序、适合性测试程序、正确使用的程序、维护和空气质量改善程序（供气呼吸器）、防护计划与工作场所评估以及培训内容。<sup>65</sup>

□ □ □ □ □

52. 水泥制造业所用的大量不同工艺和燃料均可引起火灾和爆炸。窑炉内每生产一公斤熟料水泥的煤炭平均用量为0.2到0.3吨，这使得煤炭的储存、搬运和传送成为水泥行业最常见的火灾隐患。其他主要的火灾隐患包括现场专用发电设备、变压器和开关装置等电气部件以及空袋储存。

53. 水泥厂最常见的爆炸危害是煤尘（粉尘爆炸）。煤送入窑炉燃烧前会被粉碎成较小颗粒，极大增加了火灾/爆炸的风险。磨煤机使用的袋式过滤器可能自发性爆炸或因静电而爆炸。此外，爆炸性混合物积聚，例如空气中均匀分散的煤尘或空气中的一氧化碳，也可能导致静电除尘器发生爆炸。

54. 相关建议做法，请见《通用EHS指南》和适当的优质国际工业实践（GIIP）标准。<sup>66</sup>

<sup>64</sup> 要了解更多信息，请见英国健康与安全事务局（HSE），《工作用呼吸防护设备—实用指南》，HSG53第4版（2013），<https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/hsg53.pdf>；ASTM国际标准组织，《ASTM F3387-19：呼吸防护标准实施规程》（宾夕法尼亚州西康舍霍肯，2019），doi:[10.1220/F3387-19](https://doi.org/10.1220/F3387-19)，<https://www.astm.org/Standards/F3387.htm>，和/or Nancy J.Bollinger与Robert H.Schultz，《NIOSH工业呼吸防护指南》，DHHS出版号87-116（1987），<https://www.cdc.gov/niosh/docs/87-116/pdfs/87-116.pdf?id=10.26616/NIOSHPUB87116>。

<sup>65</sup> 要了解更多信息，请见美国职业安全与健康署（OSHA）《职业与安全健康标准》“1910.134(c) I部分：呼吸防护计划”，<https://www.osha.gov/laws-regulations/standardnumber/1910/1910.134>，或ASTM，《呼吸防护标准实施规程》，<https://www.astm.org/Standards/F3387.htm>。

<sup>66</sup> 见：美国职业安全与健康署（OSHA），“1910 H部分：有害物料”，<https://www.osha.gov/laws-regulations/standardnumber/1910/1910SubpartH>；“L部分：消防”，<https://www.osha.gov/laws-regulations/standardnumber/1910/1910SubpartL>；“S部分：电气”；<https://www.osha.gov/laws-regulations/standardnumber/1910/1910SubpartS>；美国消防协会（NFPA），《NFPA 68-2002：燃爆超压泄放指南》，2002年版，第13卷，《2004/2005年国家消防规范》，<https://webstore.ansi.org/standards/nfpa-fire/nfpa682002>；《NFPA 69：防爆系统标准》，<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=69>；《NFPA 70：国家电气规范》（2020）<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=70>；《NFPA 77：静电建议规程》（2019），<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=77>；《NFPA 85：锅炉和燃烧系统危险防控规范》（2019），<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=85>；《NFPA 86：烤炉和熔炉标准》（2019），<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=86>；《NFPA 499：化学工区电气装置可燃粉尘与危险位置分级的建议规程》（2021），<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=499>；《NFPA 654：可燃颗粒固体制造、加工和搬运过程中防止火灾和粉尘爆炸的标准》

□ □ □ □

55. 电力、机械、液压、气动、化学、热能等机器和设备中的能量，可能对工人有害。机器和设备的维修维护过程中，意外启动或储存能量释放可能导致工人严重受伤甚至死亡。相关建议做法，请见《通用 EHS 指南》和适当的优质国际工业实践（GIIP）/职业健康与安全（OHS）标准。<sup>67</sup>

□ □ □ □

56. 水泥生产属于能源密集型行业。水泥厂安装有重型电气设备，用于控制、分配和利用电力。且水泥厂通常配备专用发电机组。电路和电动机械、电动工具与设备的操作和维护，是触电、电弧闪光、烧伤、火灾和爆炸等电气危害的常见源头。相关建议做法，请见《通用 EHS 指南》和适当的优质国际工业实践（GIIP）/职业健康与安全（OHS）标准。<sup>68</sup>

□ □ □ □

57. 水泥厂作业中，工人常因工作原因须进入密闭空间，例如熔炉、袋滤室、料仓、破碎机、溜槽、筒仓和研磨机。密闭空间内出现死亡和重伤，通常源于缺乏妥善的危险识别、控制措施和/或相关培训。相关建议做法，请见《通用 EHS 指南》和适当的优质国际工业实践（GIIP）/职业健康与安全（OHS）标准。<sup>69</sup>

□ □ □ □ □ □ □ □

58. 水泥厂有大型重型设备常需在维护时更换或拆除。此时可能要求在复杂危险的情况下开展吊装作业，包括：吊运人员或有害物料；吊装道路障碍物或清理通道；超过设备 75% 标称负载的起重操作；吊臂间隙小于 3 英尺的吊装操作；须在带电线路 20 英尺范围内经过、存在近距离危险的吊装作业；以及串联或多台

---

(2020)，<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=654>；以及美国机械工程师协会（ASME），《锅炉与压力容器规范》（2021），<https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-complete-code-boiler-pressure-vessel-code-complete-set>。

<sup>67</sup>示例包括：美国职业安全与健康署（OSHA），“1910 J 部分：一般环境管制”、“1910.147：有害能源控制（上锁/挂牌）”（<https://www.osha.gov/laws-regulations/standardnumber/1910/1910.147>；美国职业安全与健康署（OSHA），“1910 S 部分：电气”、“1910.333 工作实践的选择和使用”，<https://www.osha.gov/laws-regulations/standardnumber/1910/1910.333>；美国安全专业人员协会（ASSP），ANSI/ASSP Z244.1-2016（R2020）《有害能源控制：上锁、挂牌和替代方法》，<https://webstore.ansi.org/standards/asse/ansiasspz2442016r2020>；以及英国健康与安全事务局（HSE），《HSG253—工厂和设备的安全隔离》（2006），<https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg253.htm>。

<sup>68</sup>见：美国职业安全与健康署（OSHA），“1910 S 部分：电气”；美国国家标准化协会（ANSI）/全国电气规范（NEC）和英国健康与安全事务局（HSE），《HSG85—工作用电：安全工作实践》（2013），<https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg85.htm>。

<sup>69</sup>美国职业安全与健康署（OSHA），“1910 J 部分：一般环境控制”、“1910.146：密闭空间许可证要求”，<https://www.osha.gov/laws-regulations/standardnumber/1910/1910.146>；《ASTM D4276-02：密闭区域进入的标准实施规程》（2020），<https://www.astm.org/Standards/D4276.htm>；以及澳大利亚标准局（Standards Australia），《AS 2865-2009—密闭空间》，<https://www.standards.org.au/standards-catalogue/sanz/publicsafety/sf-037/as--2865-2009>。

起重机吊装。相关建议做法，请见《通用EHS指南》和适当的优质国际工业实践（GIIP）/职业健康与安全（OHS）标准。<sup>70</sup>

□□□□□□□□□□□□

59. 水泥厂很大程度依赖于金属结构和金属设备。此类结构与设备会随时间的推移而磨损，需长期维护。焊接和切割属于水泥厂维护部门的日常操作，通常涉及高空作业或进入密闭空间等其他危险。相关建议做法，请见《通用EHS指南》和适当的优质国际工业实践（GIIP）标准。<sup>71</sup>

□□

60. 水泥厂高温危害可能以两种形式发生：与高温表面和物料直接接触，或在高温下长时间工作出现热应激和热应变。

61. 操作和维护窑炉、预热器塔、静电除尘器或其他高温设备的过程中，与高温水泥、高温熟料、来自除尘器的旁路粉尘或其他物料的直接接触，和/或经历石灰消化过程中的放热反应，均可能发生灼伤。同样，在高温下长时间工作也可能产生热应激和热应变，尤以窑炉工人为甚。相关建议做法，请见《通用EHS指南》和适当的优质国际工业实践（GIIP）标准。<sup>72</sup>

□□□□□

62. 水泥和石灰生产有大量阶段都可能导致工人暴露于噪声之中，包括：原料开采活动（请见《建筑材料开采业EHS指南》）；研磨和储存；搬运和运输原料或半成品与成品；以及排风扇运行。《通用EHS指南》给出了建议的降噪措施以及环境与工作场所建议的噪声水平。

---

<sup>70</sup>美国机械工程师协会（ASME），《ASME B30.19-2016—索道、起重机、吊杆、起重机、吊钩、千斤顶和吊索的安全标准》，[https://webstore.ansi.org/Standards/ASME/ASMEB30192016?source=blog&\\_ga=2.74808987.801118766.1632709424-2025001869.1632150268](https://webstore.ansi.org/Standards/ASME/ASMEB30192016?source=blog&_ga=2.74808987.801118766.1632709424-2025001869.1632150268);美国职业安全与健康署（OSHA），“1910 N部分—材料搬运和储存”，<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartN>；以及美国职业安全与健康署（OSHA），《施工安全与健康条例》“1926 CC部分—施工中的起重机和吊杆”，<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926SubpartCC>。

<sup>71</sup>美国职业安全与健康署（OSHA），“1910 Q部分—焊接、切割和钎焊”，<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartQ>；英国健康与安全事务局（HSE），《健康与安全焊接资源》，<https://www.hse.gov.uk/welding/publications.htm>；澳大利亚安全工作署（Safe Work Australia），《业务守则示范：焊接工艺》，<https://www.safeworkaustralia.gov.au/doc/model-code-practice-welding-processes>；以及美国国家职业安全与健康研究所（NIOSH），出版号DHHS-NIOSH-88-110，《建议标准准则：焊接、钎焊和热切割》（1988），<https://www.cdc.gov/niosh/docs/88-110/default.html>。

<sup>72</sup>见：美国政府工业卫生学家会议（ACGIH）“热应激和热紧张”一节，“2016年TLV和BEI：化学物质和物理制剂的门槛限值和生物暴露指数”（辛辛那提：ACGIH，2016）；美国国家职业安全与健康研究所（NIOSH），《建议标准准则：高温和高温环境的职业暴露》，<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2016-106/default.html>，以及美国国家职业安全与健康研究所（NIOSH）“热应激”（Heat Stress）网页，<https://www.cdc.gov/niosh/topics/heatstress/default.html>。

63. 水泥厂和石灰厂主要的噪声与振动来源有破碎/研磨操作、磨机、溜槽和料斗、移动式设备、排风扇和鼓风机。噪声控制措施可包括：安装风机静噪器；为研磨机操作人员提供封闭的操作间；使用隔音屏障、噪声偏转器、隔音材料。若噪声无法降低至可接受的水平，则采取个人听觉保护措施，详见《通用EHS指南》。

□ □ □ □

64. 水泥和石灰制造作业中的身体伤害主要有：滑倒、绊倒和摔倒；受坠落物体/移动物体的撞击；以及扭伤/用力过度。其他可能发生身体伤害的情况还有碰撞或身体卷入移动机械（例如自卸卡车、单斗装载机、叉车和装袋机）。与设备维护有关的活动，例如粉碎机、磨机、选份机、风机、冷却机和皮带运输机，是重要的身体危害来源。有关此类危害的管理，详见《通用EHS指南》。<sup>73</sup>

□ □

65. X射线机有时用于连续监测向生料磨送料的皮带运输机上的生料混合物。应采用电离辐射防护措施来保护射线机操作人员，详见《通用EHS指南》。

□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □

66. 铬可能导致水泥搬运工发生过敏性接触性皮炎。<sup>74</sup>这一潜在危害的防控方法包括降低水泥混合物中可溶性铬的比例，以及使用个人防护装备（PPE）防止皮肤接触，详见《通用EHS指南》。

67. 氧化钙（CaO，即“生石灰”）与水反应生成氢氧化钙（Ca(OH)<sub>2</sub>，即“熟石灰”）。氢氧化钙是一种高度腐蚀性的苛性碱溶液。湿润的皮肤、眼睛或黏膜意外接触生石灰或熟石灰粉末且持续充足时间，可导致腐蚀性组织烧伤。这也是一种强烈的爆炸性放热反应，可产生含石灰的蒸汽和高温水喷溅，两种反应都因高温和腐蚀性而极为危险。若情况允许，则将此类化合物以粉末形式处理的区域或熟化石灰的区域应采取覆盖和封闭措施，以避免产生粉尘危害。应配备快速冲洗受影响身体表面的设施，包括在生石灰工区配备洗眼台。石灰消化过程中应提供个人防护设备，例如护目镜、手套、防护服和靴套，并采用适当的安全防护程序。有关化学危害管理的其他指导意见，请见《通用EHS指南》。

### 1.3 社区健康与安全

68. 水泥和石灰制造厂建设、运营和报废阶段对社区健康与安全的影响与大多数工业设施都类似，见《通用EHS指南》。

69. 在社区健康与安全相关的影响和风险中，要重点关注：（1）交通拥堵和停靠工厂附近等待装载车辆数量增加；（2）卡车超载；以及（3）大量工人进入，尤其是在项目施工期间。针对第一种情况，若不加以管理，此类等候区可发展成非正式居住点，可能导致当地社区的健康与安全暴露风险上升。此类等候区应

<sup>73</sup>要获得进一步指导意见，请见世界可持续发展工商理事会（WBCSD），《水泥行业的健康与安全：良好实践示例》（日内瓦：WBCSD，2004）[http://ficem.org/CIC-descargas/Suiza/CSI/Health-and-Safety-in-the-Cement-Industry\\_Examples-of-Good-Practice-2004.pdf](http://ficem.org/CIC-descargas/Suiza/CSI/Health-and-Safety-in-the-Cement-Industry_Examples-of-Good-Practice-2004.pdf)。

<sup>74</sup>欧盟规定，水泥的可溶性铬含量不得超过水泥干重的0.0002%，以防止过敏性接触性皮炎。

设置大门、配备监控设备并远离道路，且应在专门的设施内为司机和其他操作人员提供更衣室和卫生间。针对卡车超载，应在工厂执行装载程序和载重限制特定的指南与管理制度，以避免道路安全事故风险升级。针对工人大量进入，应制定具体的员工管理方案，以保障当地社区的健康与安全。

## 2. 绩效指标与监测

### 2.1 环境

□ □ □ □ □ □ □ □ □ □

70. 表1、表2和表3给出了水泥和石灰制造业的大气排放与废水分管理指南。水泥和石灰制造业工艺大气排放与废水的指导值反映的是本行业的优质国际工业实践（GIIP）指标，监管框架获认可的国家在相关标准中采用该推荐值。正常运行条件下，采用本文件前述章节所探讨的污染防控手段，可在设计和操作得当的工厂达到此类指导值。此类指导值不得通过稀释实现，且工厂或相关部门在其至少95%的运行时间内均应达到，并按照占每年运行小时数的百分比计算。如因考虑项目的具体情况造成偏离此等标准，则应在环境评估中加以论证说明。

71. 废水排放指南适用于处理后的废水直接排放进入一般用途的地表水域。现场具体排放标准的确定，可基于公共污水收集和处理系统的可用性及其运营条件，若是直接向地表水域排放，则参考《通用EHS指南》所述的承受水域使用分类来确定。大气排放指南适用于工艺排放物。与蒸汽发生活动和发电活动相关的燃烧源，若其额定热功率等于或小于50兆瓦热，则其大气排放标准在《通用EHS指南》中规定。额定热功率大于50兆瓦热的燃料源，则其大气排放标准在《热力发电厂EHS指南》中规定。如何根据废气总排放量确定环境影响的相关指南，在《通用EHS指南》中给出。

□ □ □ □ □ □ □

72. 表4列出了水泥和石灰制造业资源使用和废弃物产生的相关指标，可视为此行业新建机械的优质国际工业实践（GIIP）指标，用于追踪绩效的长期变动。<sup>75</sup>

<sup>75</sup> 表4勘误(2025年4月)内容包括：修正“熟料和水泥的比例”的行业基准值为“低于70% - 75%”（原为30%）；明确水泥添加剂包含范围，并新增脚注f及相关参考文献；同时扩展脚注e以阐明熟料比例对温室气体排放的影响。

表1 水泥制造业的大气排放指标\*

污染物	单位	指导值
颗粒物 (使用静电除尘器(ESP)、织物过滤器和/或混合式除尘器进行干烟气清理的新建窑炉系统)	mg/Nm <sup>3</sup>	25 <sup>a</sup>
颗粒物 (现有窑炉系统)	mg/Nm <sup>3</sup>	100
粉尘 (其他点污染源, 包括熟料冷却、水泥研磨)	mg/Nm <sup>3</sup>	25
二氧化硫(SO <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	400 <sup>b</sup>
氮氧化物(NO <sub>x</sub> )  (采用选择性非催化还原(SNCR)技术时)烟道气中的氨气(NH <sub>3</sub> )泄漏	mg/Nm <sup>3</sup>	600 NDA <sup>c</sup> DA 定义见脚注 <sup>c</sup>
氯化氢(HCl)	mg/Nm <sup>3</sup>	<30 - 50 <sup>d</sup>
氟化氢	mg/Nm <sup>3</sup>	1 <sup>e</sup>
有机碳总量	mg/Nm <sup>3</sup>	30 <sup>f</sup>
二恶英-呋喃	ng TEQ/Nm <sup>3</sup>	0.1 <sup>e</sup>
镉和铊(Cd+Tl)	mg/Nm <sup>3</sup>	0.05 <sup>e</sup>
汞(Hg)	mg/Nm <sup>3</sup>	0.05 <sup>e</sup>
金属总量 <sup>g</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	0.5
<b>注:</b>		
除非另有说明, 否则是指通过窑炉烟道进行的排放。除非另有说明, 日均值一般修正至273°K、101.3 kPa、10%氧气和干气状态。		
ng TEQ/ Nm <sup>3</sup> =每标准立方米的纳克毒性当量值。		
见 Van den Berg 等人, “2005年世界卫生组织对二恶英和二恶英类化合物的人类和哺乳动物毒性当量因子进行的重新评估”, 《毒理学》期刊 (Toxicological Sciences) 93, 第2期 (2006年10月): 223-241。doi:10.1093/toxsci/kfl055; 以及世界卫生组织《国际化学品安全规则》指南, <a href="http://www.who.int/ipcs/assessment/tef_values.pdf">http://www.who.int/ipcs/assessment/tef_values.pdf</a> 。		
NDA=未降级空气区域; DA=降级空气区域。若超过相关环境空气质量标准(定义见《通用EHS指南》), 则应视为降级空气区域。针对每一种污染物的NDA/DA标准还有待建立。基于环境、社区健康、技术和经济考量, 可通过环境评估(EA)对更严格或更宽松的指南值进行论证, 但不能超过国家立法规定的限值。任何情况下, 都应通过环境评估证明排放对环境的影响符合《通用EHS指南》第1.1节的要求。		
<sup>a</sup> 使用静电除尘器(ESP)、织物过滤器和/或混合式过滤器的新建窑炉, 其煅烧过程的烟气颗粒物排放水平可降低至<10 - 20 mg/Nm <sup>3</sup> (日平均值)。见 Schacht 等人, 《最佳可行技术》, 第4.2.5.3节, 第348页。若40%以上的放热均来自有害废弃物, 则指导值为10 mg/ Nm <sup>3</sup> 。见欧盟委员会(EC)有关废弃物焚烧的2010/75/EU指令。		
<sup>b</sup> 二氧化硫(SO <sub>2</sub> )指导值请见 Schacht 等人, 《最佳可行技术》表4.4, 第351页。		

<sup>c</sup>针对 NO<sub>x</sub> 的指导值 600 mg/ Nm<sup>3</sup>源自世界银行国际金融公司（IFC）的项目基准值，且应适用于未降级空气区域（NDA）。针对位于降级空气区域或生态敏感地区的项目，NO<sub>x</sub> 水平可能需低于该指导值，方可保障人类健康和保护环境。应在项目影响评估中对采用 600 mg/Nm<sup>3</sup>这一指导值进行论证，包括对实现低于指导值所需的措施进行详细的技术和财务可行性分析。要达到指导值或更低的值，可能需采取选择性非催化还原（SNCR）等二次污染控制手段。采用 SNCR 技术时，还应根据《通用 EHS 指南》给出的有害物料管理指南，评估和缓解与运输、储存和使用还原剂（例如氨和尿素）相关的风险。

<sup>d</sup>氨泄漏的指导值取决于初始 NO<sub>x</sub> 水平和 NO<sub>x</sub> 减排效率。

<sup>e</sup>针对氯化氢（HCl）、氟化氢（HF）、镉和铊、汞以及总金属，该指导值是采样期（现场测量，至少 30 分钟）内的平均值或者日平均值。针对氯化氢（HCl）和氟化氢（HF），请见 Schacht 等人，《最佳可行技术》，第 4.2.6.5 节，第 352 页。针对总金属，请见其中第 4.2.8 节表 4.5，第 353 页。针对二恶英-呋喃，该指导值是 6 到 8 小时采样期的平均值。二恶英-呋喃请见欧盟委员会（EC）《最佳可行技术参考文件》第 4.2.7 节，第 353 页。若 40%以上的放热均来自危险废弃物，则该指导值是最少 30 分钟、最长 8 小时的采样期平均值。参见欧盟委员会有关废弃物焚烧的第 2010/75/EU 号指令。

<sup>f</sup>应进行详细的沉积物评估，以确定沉积物中的有机碳总量，并确定最终总有机化合物（TOC）阈值，使其低于所规定的 30 mg/Nm<sup>3</sup> 指导值。

<sup>g</sup>总金属 = 砷（As）、铅（Pb）、钴（Co）、铬（Cr）、铜（Cu）、锰（Mn）、镍（Ni）、钒（V）和锑（Sb）。见 Schacht 等人，《最佳可行技术》，表 4.5，第 353 页。

表2 石灰制造业的大气排放指标		
污染物	单位	指导值 <sup>a</sup>
粉尘	mg/Nm <sup>3</sup>	25
二氧化硫 (SO <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	针对并流蓄热竖窑 (PFRK)、套筒竖窑 (ASK)、混合进料立窑 (MFSK)、OSK 和带预热窑的回转窑 (PRK) : 200; 针对长回转窑 (LRK) : 400
氮氧化物 (NO <sub>x</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	针对并流蓄热竖窑 (PFRK)、套筒竖窑 (ASK)、混合进料立窑 (MFSK)、OSK 为 350; 针对长回转窑 (LRK) 和带预热窑的回转窑 (PRK) (LRK) : 500
氯化氢 (HCl)	mg/Nm <sup>3</sup>	10
<b>注:</b>		
二氧化硫 (SO <sub>2</sub> ) 指导值请见 Scharcht 等人, 《最佳可行技术》, 表 4.10, 第 365 页。氮氧化物指导值同上, 表 4.9, 第 364 页。		
<sup>a</sup> 除非另有说明, 否则均系日均值修正至 273° K、101.3 kPa、10%氧气和干气状态。		

表3 水泥和石灰制造业的废水排放指标		
污染物	单位	指导值
pH	S.U.	6 - 9
固体悬浮物总量	mg/L	50
油脂	mg/L	10
温升	°C	<3 <sup>a</sup>
<sup>a</sup> 在综合考虑环境水质、承受水域用途、潜在接受体和同化能力的基础上, 按科学方法认定一个混合区, 此为混合区边缘的温升。		

表4 资源和能源消耗

单位产品投入	单位	行业基准
燃料能源: 水泥	GJ/t 熟料	预热预分解窑 (PHP) : 2.9 - 3.3 <sup>a</sup>
电能: 水泥	kWh/t 水泥	80 - 105 <sup>b</sup>
电能: 熟料研磨	kWh/t 水泥	28 - 45 <sup>c</sup>
燃料能源: 石灰	GJ/t 石灰	4 - 4.7 混合进料立窑 <sup>d</sup> 3.6 - 6 先进的立窑和转窑 <sup>d</sup>
电能: 石灰	kWh/t 石灰当量	5 - 15 混合进料立窑 (MFSK) <sup>d</sup> 20 - 40 先进的立窑和转窑 <sup>d</sup>
温室气体排放	二氧化碳 (当量) 排放量 (kg/t 水泥)	550 - 700 (包括电力消耗产生的温室气体排放) <sup>e</sup>
熟料和水泥的比例	%	熟料含量低于 70-75% (即添加剂含量达到 25-30%以上, 包括石膏及替代熟料的水泥基材料, 如高炉炉渣、粉煤灰、火山灰、硅灰、烧页岩、石灰石, 以及其他材料, 如煅烧粘土)。 <sup>f</sup>

<sup>a</sup>国际金融公司基准; Schacht 等人, 《最佳可行技术》; 以及 Worrell、Kermeli 和 Galitsky, 《能效提升》。

<sup>b</sup>国际金融公司基准; 全球水泥与混凝土协会 (GCCA), “正确统计数据 (2018)”, 数据集 33AGW。应参考 GCCA 的最新数据。

<sup>c</sup>工业生产力研究所 (IIP), 日期不详, “精磨用立式辊磨机”

<sup>d</sup>Schacht 等人, 《最佳可行技术》。

<sup>e</sup>国际金融公司基准包括现场生成和/或来自电网的电能消耗温室气体排放值。需注意, 排放量的波动幅度可能超出上述范围, 具体取决于熟料和水泥的比例, 并受水泥产品组成、窑用燃料类型及其他因素影响。

<sup>f</sup>需注意, 熟料和水泥的比例会因水泥产品成分及对应产品标准要求 (如 EN 197-6、ASTM C150、C595、IS 269:2015 或地方水泥质量标准) 而存在显著差异。基准值仅具参考性, 部分终端应用场景需更高的熟料和水泥比例, 因此需根据实际情况调整。但行业趋势是提倡熟料占比低的水泥, 此类水泥的应用正日益广泛。

□ □ □ □

73. 水泥和石油制造业的环境监测制度应针对所有被确定为可能对环境造成重大影响的活动 (包括在正常操作条件下和受干扰条件下的情况)。环境监测活动的对象应当是具体项目在大气排放、废水、资源使用方面的直接或间接指标。<sup>76</sup>

74. 监测的频率应当足以提供所监测参数的代表性数据。监测应由受过训练的人员进行, 应遵循监测和记录规范, 并采用正确校准和维护的设备。监测数据应定期分析和审核, 并与操作标准相比对, 以便采取一切必要的纠正行动。《通用 EHS 指南》就大气排放物和废水取样及分析方法给出了进一步指南。

<sup>76</sup> 建议的环境监测参数和频率请见 Schacht 等人, 《最佳可行技术》第 4.2.2 节 (第 341 页) 和 WBCSD (2012)。

75. 工厂在水泥制造中使用废弃物燃料或废弃原料时，应对用作燃料或原料的废弃物记录数量与类型，并应记录多氯联苯（PCB）、氯、多环芳烃、汞和其他重金属等特定污染物的最低热值和最高浓度等质量指标。

## 2.2 职业健康与安全

□ □ □ □ □ □ □ □

76. 应根据国际上公布的风险暴露标准评估职业健康与安全状况。此类标准的例子有：美国政府工业卫生学家会议（ACGIH）发布的职业暴露阈值限制和生物接触限值；<sup>77</sup>美国国立职业安全与健康研究所（NIOSH）发布的《化学品危害口袋指南》；<sup>78</sup>美国职业安全卫生署（OSHA）发布的允许接触限值（PEL）；<sup>79</sup>以及欧盟职业安全卫生署（EU-OSHA）发布的指示性职业接触限值。<sup>80</sup>

□ □ □ □ □ □

77. 项目管理的目的之一应当是保证项目工人（不管是直接雇佣还是间接雇佣的工人）的生产事故为零，尤其是可导致误工、不同等级残疾甚至死亡的事故。死亡率标准可参照发达国家水泥和石灰制造业的死亡率数据，具体可查阅来自以下权威机构的出版物；美国劳工统计局、美国矿山安全与卫生局（MSHA）、英国健康与安全事务局、世界可持续发展工商理事会（WBCSD）与全球水泥与混凝土协会（GCCA）水泥可持续性发展倡议。<sup>81</sup>

□ □ □ □ □ □ □ □

78. 应当对工作环境进行监测，以发现具体项目的职业危害。作为职业健康与安全监测项目的一项内容，监测操作应当委派经认证的专业人员制订并执行。<sup>82</sup>生产设施还应维护一份有关职业事故、疾病和危险事件及其他事故的记录。还应监测工作环境中二氧化硅、石棉和其他颗粒物的浓度与暴露情况。应定期监测工人肺部疾病的发病率。《通用EHS指南》给出了职业健康与安全监测项目的进一步指南信息。

<sup>77</sup> 相关出版物链接如下：<https://portal.acgih.org/s/store#/store/browse/cat/a0s4W00000g02f8QAA/tiles>.

<sup>78</sup> 见美国疾病控制与预防中心（CDC），《NIOSH化学危害手册》，DHHS出版号2005-149（辛辛那提：NIOSH出版社，2007年），<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-149/pdfs/2005-149.pdf>。

<sup>79</sup> 见OSHA，“表Z-1空气污染物限值”（日期不详），检索自以下链接：

[http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_table=STANDARDS&p\\_id=9992](http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992)。

<sup>80</sup> 见欧盟职业安全健康局（EU-OSHA），《2019/1831号指令：指示性职业暴露限值》，2019，<https://osha.europa.eu/en/legislation/directive/directive-20191831-indicative-occupational-exposure-limit-values>。

<sup>81</sup> 可分别在<http://www.bls.gov/iif/>、<http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>、<https://www.wbcsd.org/>、<https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative>或<https://gccassociation.org/>查询。

<sup>82</sup> 经认证的专业人员可能包括注册工业卫生师、注册职业卫生员或注册安全专员或同等人员。

### 3. 参考文献和其他资料来源

ACGIH. 2018. *2018 TLVs and BEIs*. <https://www.acgih.org/science/tlv-bei-guidelines>.

ACGIH. 2021. *2021 Threshold Limit Values (TLVs) and Biological Exposure Indices (BEIs)*.  
[https://www.techstreet.com/standards/2021-threshold-limit-values-tlvs-and-biological-exposure-indices-beis?product\\_id=2198547](https://www.techstreet.com/standards/2021-threshold-limit-values-tlvs-and-biological-exposure-indices-beis?product_id=2198547).

ACGIH. 2016. *2016 TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices*. Cincinnati: ACGIH.

ANSI/NEC and HSE. 2013. *HSG85 Electricity at Work: Safe Working Practices*.  
<https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg85.htm>.

ASME. 2021. *Boiler and Pressure Vessel Code*. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-complete-code-boiler-pressure-vessel-code-complete-set>.

ASME. n.d. *ASME B30: Safety Standard for Cableways, Cranes, Derricks, Hoists, Hooks, Jacks, and Slings*,  
<https://blog.ansi.org/2019/01/asme-b30-volumes-safety-standard-lifting/#gref>.

ASSP. 2020. *ANSI/ASSP Z244.1-2016 (R2020) The Control of Hazardous Energy: Lockout, Tagout and Alternative Methods*. <https://webstore.ansi.org/standards/asse/ansiasspz2442016r2020>.

ASTM International. 2013. *ASTM E1132 13e1: Standard Practice for Health Requirements Relating to Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica*. West Conshohocken, PA.  
<https://www.astm.org/Standards/E1132.htm>.

ASTM International. 2019. *ASTM F3387-19: Standard Practice for Respiratory Protection*. West Conshohocken, PA. doi: [10.1520/F3387-19](https://doi.org/10.1520/F3387-19). <https://www.astm.org/Standards/F3387.htm>.

ASTM International. 2020. *ASTM D4276-02: Standard Practice for Confined Area Entry*.  
<https://www.astm.org/Standards/D4276.htm>.

Australian and New Zealand guidelines and codes of practice. 2016.  
<https://www.commerce.wa.gov.au/worksafe/australian-standards-and-australian-new-zealand-standards>.

BirdLife International, Fauna & Flora International, FFI, IUCN, and WWF. 2014. *Extraction and Biodiversity in Limestone Areas*. Joint Briefing Paper. <https://www.birdlife.org/sites/default/files/Extraction-and-Biodiversity-in-Limestone-Areas.pdf>.

Bollinger, Nancy J. and Robert H. Schultz. 1987. *NIOSH Guide to Industrial Respiratory Protection*. DHHS NIOSH Publication Number 87-116. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/87-116/pdfs/87-116.pdf?id=10.26616/NIOSHPUB87116>.

CDC. 2007. *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards*. DHHS (NIOSH) Publication No. 2005-149.  
<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-149/default.html>.

Cecala, Andrew B et al. 2019. *Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing*, Report no. RI9701 (2nd ed.). Cincinnati: NIOSH Publications.

<https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2019-124.pdf>.

CEMBUREAU. 2013. *The Role of Cement in the 2050 Low Carbon Economy*. Brussels: CEMBUREAU.  
<https://lowcarboneconomy.cembureau.eu/wp-content/uploads/2018/09/cembureau-full-report.pdf>.

CEMBUREAU. 2020. *Cement and Concrete: Key Facts and Figures*. Brussels: EC. <https://cembureau.eu/cement-101/key-facts-figures>.

EC. 2009. *Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency*. Brussels: EC.  
[https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ENE\\_Adopted\\_02-2009.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ENE_Adopted_02-2009.pdf).

EC. 2010. *Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 of November 2010 on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control)*. Official Journal of the European Union. L 334/17. Brussels: EC.  
I think they refer to this <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075>.

EU-OSHA. n.d. *Exposure to Chemical Agents and Chemical Safety*.  
<https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/exposure-to-chemical-agents-and-chemical-safety/osh-related-aspects/council-directive-91-414-eec>.

EU-OSHA, *Directive 2019/1831: Indicative Occupational Exposure Limit Values*, 2019,  
<https://osha.europa.eu/en/legislation/directive/directive-20191831-indicative-occupational-exposure-limit-values>

EULA. 2014. *A Competitive and Efficient Lime Industry, Cornerstone for a Sustainable Europe (Lime Roadmap)*. Brussels: EULA. <https://www.eula.eu/a-competitive-and-efficient-lime-industry-cornerstone-for-a-sustainable-europe-lime-roadmap-summary/>.

GTZ-Holcim Public Private Partnership. 2006. *Guidelines on Pre- and Co-processing of Waste in Cement Production*. [https://www.giz.de/de/downloads/giz-2020\\_en\\_guidelines-pre-coprocessing.pdf](https://www.giz.de/de/downloads/giz-2020_en_guidelines-pre-coprocessing.pdf).

GCCA. n.d. *Global Cement and Concrete Association* <https://gccassociation.org/>

GCCA. 2019a. *GCCA Sustainability Guidelines for the monitoring and reporting of emissions from cement manufacturing*. Version 0.1. London: GCCA. [https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2019/10/GCCA\\_Guidelines\\_Emissions\\_v05\\_AMEND.pdf](https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2019/10/GCCA_Guidelines_Emissions_v05_AMEND.pdf).

GCCA. 2019b. *GCCA Sustainability Guidelines for co-processing fuels and raw materials in cement manufacturing*. Version 0.1. London: GCCA. [https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2019/10/GCCA\\_Guidelines\\_FuelsRawMaterials\\_v04\\_AMEND.pdf](https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2019/10/GCCA_Guidelines_FuelsRawMaterials_v04_AMEND.pdf).

GCCA. 2019c. “Getting the Numbers Right.” *Global Cement Database on CO<sub>2</sub> and Energy Information*. London: GCCA. <https://gccassociation.org/gnr/>.

GCCA. 2020. *GCCA Sustainability Guidelines for Quarry Rehabilitation and Biodiversity Management*. Version 0.1. London: GCCA. [https://gccaassociation.org/wp-content/uploads/2020/05/GCCA\\_Guidelines\\_Sustainability\\_Biodiversity\\_Quarry\\_Rehabilitation\\_May\\_2020-1.pdf](https://gccaassociation.org/wp-content/uploads/2020/05/GCCA_Guidelines_Sustainability_Biodiversity_Quarry_Rehabilitation_May_2020-1.pdf).

GCPC. n.d. *Cleaner Production Opportunities in Cement Manufacturing Sector*.  
<http://www.gpcenvis.nic.in/Experts/Cement%20sector.pdf>.

IIP. n.d. *Alternative Raw Materials*. <http://www.iipnetwork.org/wp-content/Ietd/content/alternative-raw-materials.html>.

IIP. n.d. *Blended Cement Alternatives*. Industrial Efficiency Technology Database. <http://www.iipnetwork.org/wp-content/Ietd/content/blended-cement-alternatives.html>.

IIP. n.d. *Cement*. Industrial Efficiency Technology Database. <http://www.iipnetwork.org/wp-content/Ietd/content/cement.html>.

IIP. n.d. *Conversion to High-Efficiency Grate Coolers*. Energy Efficiency Technology Database.  
<http://www.iipnetwork.org/wp-content/Ietd/content/conversion-high-efficiency-grate-coolers.html>.

IIP. n.d. *High Efficiency Motors & Drives*. Industrial Efficiency Technology Database.  
<http://www.iipnetwork.org/wp-content/Ietd/content/high-efficiency-motors-drives.html>.

IIP. n.d. *Industrial Efficiency Technology Database*. <http://www.iipnetwork.org/wp-content/Ietd/index.html>.

IIP. n.d. *Vertical Roller Mills for Finish Grinding*. Industrial Efficiency Technology Database.  
<http://www.iipnetwork.org/wp-content/Ietd/content/vertical-roller-mills-finish-grinding.html>.

IEA and WBCSD. 2013. *Technology Roadmap: Low-Carbon Technology for the Indian Cement Industry*. Paris: IEA.  
[https://docs.wbcsd.org/2013/02/Low\\_Carbon\\_Technology\\_for\\_the\\_Indian\\_Cement\\_Industry IEA\\_WBCSD\\_Feb\\_2013.pdf](https://docs.wbcsd.org/2013/02/Low_Carbon_Technology_for_the_Indian_Cement_Industry IEA_WBCSD_Feb_2013.pdf).

IEA. 2018. *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Technology Report. Paris: IEA.  
<https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>.

IEAGHG. 2013. *Deployment of CCS in the Cement Industry*. [https://ieaghg.org/docs/General\\_Docs/Reports/2013-19.pdf](https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-19.pdf).

IFC. 2017. *Increasing the Use of Alternative Fuels at Cement Plants: International Best Practice*. Washington, DC: IFC. [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/33180042\\_b8c1\\_4797-ac82-cd5167689d39/Alternative\\_Fuels\\_08+04.pdf?MOD=AJPERES&CVID=1T3Bm3Zbn](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/33180042_b8c1_4797-ac82-cd5167689d39/Alternative_Fuels_08+04.pdf?MOD=AJPERES&CVID=1T3Bm3Zbn).

IFC and IIP. 2014. *Waste Heat Recovery for the Cement Sector: Market and Supplier Analysis*. Washington, DC: IFC and IIP.  
[https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics\\_ext\\_content/ifc\\_external\\_corporate\\_site/sustainability-at-ifc/publications/report\\_waste\\_heat\\_recovery\\_for\\_the\\_cement\\_sector\\_market\\_and\\_supplier\\_analysis](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/report_waste_heat_recovery_for_the_cement_sector_market_and_supplier_analysis).

IS. 2015. IS 269:2015. ISI Marked Certification for Ordinary Portland Cement.

IUCN. 2014. *Biodiversity Management in the Cement and Aggregates Sector: Biodiversity Indicator and Reporting System (BIRS)*. Gland, Switzerland: IUCN.

<https://www.iucn.org/content/biodiversity-management-cement-and-aggregates-sector-biodiversity-indicator-and-reporting-system-birs>.

Ke, Jing, Michael McNeil, Lynn Price, Nina Zheng Khanna, and Nan Zhou. 2013. “Estimation of CO<sub>2</sub> Emissions from China’s Cement Production: Methodologies and Uncertainties.” *Energy Policy* 57 (June): 172 – 181. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.028>; [https://china.lbl.gov/sites/all/files/6329\\_ep\\_cement\\_co2.pdf](https://china.lbl.gov/sites/all/files/6329_ep_cement_co2.pdf).

Madlool, Naseer Abboodi, Rahman Saidur, Md Shouquat Hossain, and Nasrudin Abd Rahm. 2011. “A Critical Review on Energy Use and Savings in the Cement Industry.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 2042 – 2060.

[https://www.researchgate.net/publication/215599462\\_A\\_critical\\_review\\_on\\_energy\\_use\\_and\\_savings\\_in\\_the\\_cement](https://www.researchgate.net/publication/215599462_A_critical_review_on_energy_use_and_savings_in_the_cement).

Ministry of Labour, Training and Skills Development of Ontario, Canada. 2011. *Silica on Construction Projects*. <https://www.labour.gov.on.ca/english/hs/pubs/silica/>.

NFPA. 2002. *NFPA 68-2002: Guide for Venting of Deflagrations*, 2002 edition. Vol. 13, 2004/2005 National Fire Codes. <https://webstore.ansi.org/standards/nfpa-fire/nfpa682002>.

NFPA. n.d. *NFPA 69: Standard on Explosion Prevention Systems*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=69>.

NFPA. 2020. *NFPA 70: National Electric Code*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=70>.

NFPA. 2019. *NFPA 77: Recommended Practice on Static Electricity*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=77>.

NFPA. n.d. *NFPA 85: Boiler and Combustion Systems Hazards Code*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=85>.

NFPA. 2019. *NFPA 86: Standard for Ovens and Furnaces*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=86>.

NFPA. 2021. *NFPA 499: Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=499>.

NFPA. 2020. *NFPA 654: Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=654>.

NIOSH. 1988. Publication No. DHHS-NIOSH-88-110. *Criteria for a Recommended Standard: Welding, Brazing, and Thermal Cutting.* <https://www.cdc.gov/niosh/docs/88-110/default.html>.

NIOSH. *Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Heat and Hot Environments.* <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2016-106/default.html>.

NIOSH Heat Stress webpage. <https://www.cdc.gov/niosh/topics/heatstress/default.html>.

US OSHA. n.d. 1910 General Industry Standards. <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910>.

OSHA. n.d. *Occupational and Safety Health Standards, 1910.1001 Subpart Z, Asbestos.* <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910.1001>.

OSHA. n.d. *Occupational and Safety Health Standards, 1910.1053 Subpart Z, Toxic and Hazardous Substances, Respirable Crystalline Silica.* <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910.1053>.

OSHA. n.d. *Occupational and Safety Health Standards, 1910.134(c) Subpart I, Respiratory Protection Program.* <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910.134>.

OSHA. n.d. *1910, Subpart H, Hazardous Materials,* <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartH>.

OSHA. n.d. *Subpart L, Fire Protection,* <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartL>.

OSHA. n.d. *Subpart S, Electrical,* <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartS>.

OSHA. n.d. *1910 Subpart J, General Environmental Controls 1910.147: The Control of Hazardous Energy (Lockout/Tagout)* <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910.147>.

OSHA. n.d. *1910 Subpart S, Electrical, 1910.333 Selection and Use of Work Practices,* <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910.333>.

OSHA. n.d. *1910 Subpart J, General Environmental Controls 1910.146: Permit-Required Confined Spaces,* <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910.146>.

OSHA. n.d. *1910 Subpart N, Materials Handling and Storage,* <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartN>.

OSHA. n.d. *Safety and Health Regulations for Construction: 1926 Subpart CC, Cranes and Derricks in Construction,* <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1926/1926SubpartCC>.

OSHA. n.d. *1910 Subpart Q, Welding, Cutting and Brazing,* <https://www.osha.gov/laws-regulations/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartQ>.

OSHA. 2018. *OSHA's Respirable Crystalline Silica Standard for General Industry and Maritime.*

Fact Sheet. <https://www.osha.gov/Publications/OSHA3682.pdf>.

Passant, Neil, Martin Peirce, Howard J. Rudd, David W. Scott, Ian Marlowe, and John D. Watterson. UK *Particulate and Heavy Metal Emissions from Industrial Processes*. AEA Technology. [https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/empire/AEAT6270Issue2finaldraft\\_v2.pdf](https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/empire/AEAT6270Issue2finaldraft_v2.pdf).

Renzoni, Roberto, Christophe Ullrich, Sandra Belboom, and Albert Germain. 2010. *Mercury in the Cement Industry*. CEMBUREAU and the WBCSD Cement Sustainability Initiative.  
[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11617/CEMENT\\_Industry\\_-\\_Hg\\_report\\_CEMBUREAU\\_April\\_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11617/CEMENT_Industry_-_Hg_report_CEMBUREAU_April_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Safe Work Australia. n.d. *Model Code of Practice: Welding Processes*.  
<https://www.safeworkaustralia.gov.au/doc/model-code-practice-welding-processes>.

Schorcht, Frauke, Ioanna Kourti, Bianca Maria Scalet, Serge Roudier, and Luis Delgado Sancho. 2013. *Best Available Techniques (BAT): Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide*. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). Joint Research Center Reference Reports. Brussels: European Commission.  
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC83006>.

Shan, Yuli, Zhu Liu, and Dabo Guan. 2015. “CO<sub>2</sub> Emissions from China’s Lime Industry.” *Applied Energy* 166 (May). doi:[10.1016/j.apenergy.2015.04.091](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.091);  
[https://www.researchgate.net/publication/277907090\\_CO2\\_emissions\\_from\\_China%27s\\_lime\\_industry](https://www.researchgate.net/publication/277907090_CO2_emissions_from_China%27s_lime_industry).

Standards Australia. 2009. *AS 2865-2009: Confined Spaces*. <https://www.standards.org.au/standards-catalogue/sanz/publicsafety/sf-037/as-2865-2009>.

UK HSE. n.d. *Health and Safety Statistics*. <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>.

UK HSE. n.d. Health and Safety Welding Resources. <https://www.hse.gov.uk/welding/publications.htm>.

UK HSE. n.d. Regulations and codes of practice. <https://www.hse.gov.uk/pubns/books/index-legal-ref.htm>.

UK HSE. 2006. *HSG253: The Safe Isolation of Plant and Equipment*.  
<https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg253.htm>.

UK HSE. 2013. *Control of Substances Hazardous to Health, Regulations 2002: Approved Code of Practice and Guidance*, L5 (6th ed.). <https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/l5.pdf>.

UK HSE. 2013. *Respiratory Protective Equipment at Work, A Practical Guide*, HSG53 (4th ed.).  
<https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/hsg53.pdf>.

UNEP. 2016. “Cement Clinker Production Facilities” in *Guidance on Best Available Techniques and Best Environmental Practices*. New York: UNEP.  
[http://mercuryconvention.org/Portals/11/documents/publications/BAT\\_BEP\\_E\\_interractif.pdf](http://mercuryconvention.org/Portals/11/documents/publications/BAT_BEP_E_interractif.pdf).

United States Department of Labor. n.d. *Injuries, Illnesses, and Fatalities*. Bureau of Labor Statistics.

[https://www.bls.gov/iif.](https://www.bls.gov/iif)

United States Department of Labor. n.d. Occupational Safety and Health Standards—Toxic and Hazardous Substances. *Table Z-1 Limits for Air Contaminants*.

[https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_table=STANDARDS&p\\_id=9992.](https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992)

US EPA. 1999. *Code of Federal Regulation Title 40, Part 63, Subpart LLL—National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants from the Portland Cement Manufacturing Industry*. Washington, DC: US EPA.  
[www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?node=sp40.12.63.III](http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?node=sp40.12.63.III).

US EPA. 2004. *Code of Federal Regulation Title 40, Part 63, National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories; Lime Manufacturing Plants*. Washington, DC: USA EPA.  
<https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution/lime-manufacturing-plants-national-emission-standards-hazardous-air>.

US EPA. 2008. *Code of Federal Regulation Title 40, Part 63, Subpart EEE—National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants from Hazardous Waste Combustor*. Washington, DC: US EPA.  
<https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution/hazardous-waste-combustors-national-emission-standards-hazardous>.

US EPA. 2012. *Title 40, Chapter I, Subchapter N, Part 411 Cement Manufacturing Point Source Category*. Washington, DC: USA EPA. <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2014-title40-vol29/pdf/CFR-2014-title40-vol29-part411.pdf>.

Van den Berg, Martin, Linda Birnbaum, Michael Denison, Mike Vito, William Farland, Mark Feeley, Heidelore Fiedler et al. 2006. “The 2005 World Health Organization Re-evaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-Like Compounds.” *Toxicological Sciences* 93, no.2 (October): 223 – 241. doi: [10.1093/toxsci/kfl055](https://doi.org/10.1093/toxsci/kfl055).

Wang, Yufei, Zhengping Hao, and Samuel Höller. 2012. “Analysis of CO<sub>2</sub> Mitigation Policies in the Chinese Cement Industry.” *ECEEE 2012 Summer Study on Energy Efficiency in Industry*. Wuppertal, Germany: Wuppertal Institute. [http://epub.wupperinst.org/files/4635/4635\\_Wang.pdf](http://epub.wupperinst.org/files/4635/4635_Wang.pdf).

WBCSD. n.d. Cement Sustainability Initiative. <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative>.

WBCSD. n.d. *CO<sub>2</sub> and Climate Protection*. Geneva: WBCSD.  
<https://www.wbcsd.org/Programs/Climate-and-Energy>.

WBCSD. 2004. *Health and Safety in the Cement Industry: Examples of Good Practice*. Geneva: WBCSD.  
[http://ficem.org/CIC-descargas/Suiza/CSI/Health-and-Safety-in-the-Cement-Industry\\_Examples-of-Good-Practice-2004.pdf](http://ficem.org/CIC-descargas/Suiza/CSI/Health-and-Safety-in-the-Cement-Industry_Examples-of-Good-Practice-2004.pdf).

WBCSD. 2005a. *Environmental and Social Impact Assessment (ESIA) Guidelines*. Geneva: WBCSD.  
<https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Guidelines-for-Environmental-and-Social-Impact-Assessment-ESIA>.

WBCSD. 2005b. *Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process*. Geneva: WBCSD. <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/2429/30121>.

WBCSD. 2006. *Formation and Release of POPs in the Cement Industry* (2nd ed). Geneva: WBCSD.  
<http://docs.wbcsd.org/2006/01/FormationAndReleaseOfPOPsInCementIndustry.pdf>.

WBCSD. 2011a. *CO<sub>2</sub> and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry*. Version 3.0. Geneva: WBCSD. <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/CO2-Accounting-and-Reporting-Standard-for-the-Cement-Industry>.

WHO. International Programme on Chemical Safety guidelines. [http://www.who.int/ipcs/assessment/tef\\_values.pdf](http://www.who.int/ipcs/assessment/tef_values.pdf).

Worrell, Ernst, Katerina Kermeli, and Christina Galitsky. 2013. *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making—An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers*. Washington, DC: EPA.  
[http://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/ENERGY%20STAR%20Guide%20for%20the%20Cement%20Industry%202013\\_08\\_2013\\_Rev%20js%20reformat%2011192014.pdf](http://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/ENERGY%20STAR%20Guide%20for%20the%20Cement%20Industry%202013_08_2013_Rev%20js%20reformat%2011192014.pdf).

### 附录 A：行业活动概述

79. 水泥和石灰的生产工艺类似。如图 A.1 所示，两者都涉及石头原料的开采、研磨和均化。为了最大限度降低运输成本，便于使用皮带运输机，水泥和石灰制造厂的选址一般都毗邻原料来源，并靠近产品的市场。水泥和石灰制造属于能源密集型行业，需消耗大量的热能和电能，具体取决于所采用的生产工艺类型和相关设备。

□ □ □ □

80. 水泥制造工艺是利用能量来处理主要由石灰石（碳酸钙， $\text{CaCO}_3$ ）、黏土（硅酸铝）、砂石（二氧化硅）和铁矿砂构成的原料，生产出熟料，再加入石膏、石灰石等物料一起研磨，生产出水泥。一条紧凑型单一生产线（熟料生产能力为每天 3000 吨的预热预分解窑（PHP）或预热窑（PH））通常需占用一个约 40 万平方米的平坦区域，以及一个通常为 25 万平方米或以上的区域，以备未来扩建。项目设施的使用寿命至少为 40 到 50 年。工厂每天通常处理 2500 到 12000 吨水泥。工厂的规模极为重要，因为生产规模的差异可极大影响生产成本，从而影响污染治理与控制技术的投资成本。小型与大型工厂均可实现同等的环境绩效，但工厂越小，每单位水泥生产成本就越高。

81. 经第一步破碎和预混处理后，原料混合在一起，研磨成所需化学成分的均化混合物（即生料）。生料的细度和粒径分布对烧结过程有重要影响。混合后，生料进入预热窑（PH）、预分解窑以及回转窑进行煅烧，即在  $900^\circ\text{C}$  左右分解碳酸钙，由此释放出二氧化碳，并留下氧化钙。之后进行熟化，即氧化钙在  $1400^\circ\text{C}$  到  $1500^\circ\text{C}$  的高温下与二氧化硅、氧化铝和铁氧化物反应。此时，为满足一定的成分要求，可在原料混合物中添加其他成分（例如石英砂、铸造砂、氧化铁、氧化铝废渣、高炉炉渣和/或石膏渣）。火焰及所产生气体的温度接近  $2000^\circ\text{C}$ 。高温熟料从窑炉内落入冷却机，且须在冷却机内尽快冷却，方可提高熟料质量并通过加热二次风的方式回收热能。目前一般采用篦式冷却机（而非已过时的卫星式冷却机）。冷却后的熟料与石膏和石灰石一起研磨，得到硅酸盐水泥，再与其他材料一起混合后得到合成水泥或复合水泥。水泥于之后装入筒仓或包装袋。混配成分都属于具备水力特性的材料（例如天然火山灰、粉煤灰、高炉炉渣，偶尔也用炉底灰）。若使用粉煤灰和炉底灰，则不得有碳残留物（一般是来自燃煤发电厂）。有时候少量添加碳酸钙作为填料。

□ □ □ □

82. 石灰的生产方法是在  $800^\circ\text{C}$  以上的温度煅烧碳酸钙或白云岩（即碳酸钙镁石，使用较少），使原料分解产生生石灰（即氧化钙）。生石灰在  $1200^\circ\text{C}$  至  $1300^\circ\text{C}$  的温度下保持一段时间，以调整活性。烧结石灰可以生石灰的方式交付给最终用户（按照活性分为硬烧石灰、中烧石灰和轻烧石灰）。轻烧石灰是其中活性最强的一类，广泛用于钢铁冶炼。此外，生石灰也可送往水合厂，与水发生强放热反应，获得熟石灰（即氢氧化钙）。熟石灰有两种形式：石灰粉（干型）或石灰乳（液态）。熟石灰的生产工序依次是粒度筛分和水合，最后入罐储存（石灰乳）或入仓储存（干型），以散货或装袋形式出售。

图 A.1 水泥制造流程

