



水泥和石灰制造业环境、健康与安全指南

前言

《环境、健康与安全指南》（简称《EHS指南》）是技术参考文件，其中包括优质国际工业实践（GIIP）所采用的一般及具体行业的范例。¹。如果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《EHS指南》。本《EHS指南》是针对具体行业，应与《通用EHS指南》共同使用，后者提供的指南针对所有行业都可能存在的EHS问题。如果遇到复杂的项目，可能需要使用针对多个行业的指南。在以下网站可以找到针对各行业的指南：<http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>

《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就能实现的指标和措施。在对现有设施应用《EHS指南》时，可能需要制定具体针对该场所的指标，并需规定适当的达标时间表。

在应用《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、环境的吸收能力）以及项目的其他因素。具体技术建议是否适用应根据有资格和经验的人员提出的专业意见来决定。

如果东道国的规则不同于《EHS指南》所规定的指标和措施，我们要求项目要达到两者中要求较高的指标和措施。如果根据项目的具体情况认为适于采用与本《EHS指南》所含规定相比要求较低的指标和措施，则在针对该场所进行的环境评估中需要对提出的替代方案作出详尽的论证。该论证应表明修改后的指标能够保护人类健康和环境。

适用性

《水泥和石灰制造业 EHS 指南》所包含的信息涉及到水泥和石灰制造项目。关于水泥制造项目均要涉及的原料开采活动，参见《建筑材料开采业 EHS 指南》的规定。附件 A 包括水泥和石灰制造业各种行业活动的说明。

本文件包含下列章节：

- 1 具体行业的影响与管理
- 2 指标与监测
- 3 参考文献

¹ 定义是：熟练而有经验的专业人员在全球相似情况下进行同类活动时，按常理可预期其采用的专业技能、努力程度、谨慎程度、预见性。熟练而有经验的专业人员在评估项目可采用的污染防控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、不同程度的环境吸收能力、不同程度的财务和技术可行性。



附件 A 行业活动的一般说明

1 具体行业的影响与管理

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。关于如何管理大多数大型工业活动建造阶段和报废阶段各种常见 EHS 问题的建议包含于《通用 EHS 指南》。

1.1 环境

水泥和石灰制造项目的环境问题主要包括：

- 大气排放物
- 能源消耗和燃料
- 废水
- 产生固体废弃物
- 噪声

大气排放物

水泥和石灰制造中的大气排放物产生于半成品和成品的搬运和储存，以及窑炉系统、熟料冷却机和磨机的运行。目前水泥的制造中使用数种窑炉 [预分解窑 (PHP)、预热窑 (PH)、长干窑 (LD)、半干窑、半湿法窑和湿法窑]。从环境绩效的角度看，一般倾向于采用预分解窑。立窑目前依然在使用，但一般只有小厂使用才有经济上的可行性，随着设备的更新，正在逐渐淘汰。

石灰制造目前使用的窑炉分为 4 个基本类型，用于生产不同（活性）类型的生石灰：转窑、直筒竖窑（10 多个类型）、活动篦式煅烧窑和气体悬浮煅烧窑。

废气

发电用燃烧源是本行业的常见燃烧源。对于容量不超过 50 MW · h 热功率的小型燃烧源，排放管理方面的指导，包括废气的大气排放标准，见《通用 EHS 指南》。对于容量超过 50 MW · h 的排放源，参见《热电 EHS 指南》的指导意见。

颗粒物

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。

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：

- 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；
- 在使用封闭式皮带运输机运输物料，以控制转运点的排放；
- 清洗皮带运输系统的回程皮带；



- 在有顶或封闭仓库内储存粉碎及预混的原料；
- 使用筒仓储存煤粉和石油焦；
- 在采取了防止风及其天气因素影响的场所储存废弃物衍生燃料；
- 在带有自动除尘设备的有顶/封闭仓库或筒仓内储存熟料；
- 在有自动回收和散装水泥车自动装车系统的筒仓内储存水泥；
- 筛分后的煅烧石灰储存在贮存仓或筒仓内，细颗粒消石灰储存在密封筒仓内；
- 对工厂进行例行维护和良好的内务管理，尽量降低少量漏气和溢漏；
- 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旋风分离器和袋式除尘器进行除尘；
- 尽可能采用自动包装和搬运系统，包括：
 - 使用带自动送袋装置和逃逸性排放物控制装置的回转包装机
 - 每口袋装料时均采用自动重量控制
 - 使用皮带运输机将包装好的产品送至码垛机
 - 成品堆放在有顶仓库内等待发运

对于与窑炉系统、熟料冷却机和磨机的运行有关的颗粒物排放，包括水泥熟料和石灰煅烧，除按正确方式平稳运行窑炉之外¹，建议采取以下污染防控手段：

- 使用除尘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；
- 使用静电除尘器（ESP）或纤维过滤系统（布袋除尘器）收集和控制窑气中的细微颗粒物²；
- 冷却机废气先用旋风分离器分离出大颗粒物，然后使用纤维过滤器进行过滤；
- 使用纤维过滤器捕集磨机产生的粉尘³，捕集的粉尘送回磨机。

氮氧化物

水泥窑的高温燃烧过程产生氮氧化物（NO_x）的排放⁴。除按正确方式平稳运行窑炉之外，建议采取以下污染防控手段：

- 尽可能降低二次风量（可起到的效果包括减少氧还原）；
- 在燃料中加水或直接向火焰中加水，以降低火焰温度（可起到的效果包括降低温度和增加羟基自由基的浓度）。降低火焰温度可能会对燃料的燃烧产生负面影响，有可能增加2%~3%的消耗，并且二氧化碳（CO₂）的排放会成比例增加；
- 使用低NO_x燃烧器，避免产生局部排放热点；
- 在预热预分解窑（PHP）和预热窑（PH）中，适当采用分级燃烧工艺¹；
- **石灰制造**：石灰的制造中产生的氮氧化物（NO_x）一般要少于水泥的制造。因为石灰石的煅烧温度通常较低，NO_x的排放较少，可使用低NO_x燃烧器加以控制。

¹ 平稳运行窑炉是指窑炉保持最佳运行状况。

² ESP在正常工作条件下很稳定，但是如果窑气中的一氧化碳（CO）浓度超过0.5%，会有爆炸的危险。为了防止爆炸，操作人员应确保对煅烧过程进行适当和连续的管理，包括连续监督CO浓度，特别是开车阶段，以便在必要时自动断电。

³ ESP不适合用于磨料机除尘。

⁴ 一氧化氮占NO_x排放量的90%以上。



二氧化硫

水泥制造中的二氧化硫（SO₂）排放主要是与原料中包含的挥发性硫或反应性硫有关²，与发电用燃料的质量也有关，但后者的居次要地位。除按正确方式平稳运行窑炉之外，建议采取以下减少SO₂的污染控制手段：

- 使用立式磨机，用废气吹扫磨机，以回收废热和降低废气中的硫含量。在磨机中，包含二氧化硫的废气与生料中的碳酸钙（CaCO₃）混合，产生硫酸钙（石膏）；
- 选择低含硫的燃料来源；
- 过滤废气之前，先加入脱硫剂，例如消石灰（Ca(OH)₂）、氧化钙（CaO）或 CaO 含量高的粉煤灰；
- 采用湿法或干法脱硫设备³。

因原料的含硫量较低，石灰制造中的 SO₂ 排放量普遍较低。限制 SO₂ 排放的手段包括：

- 选择挥发性硫含量较低的石灰石原料；
- 废气过滤之前，在废气中加入消石灰或碳酸氢盐；
- 在石灰窑的窑头罩内加入细粉状的生石灰或消石灰。

温室气体

温室气体排放，特别是二氧化碳（CO₂）⁴，主要是与燃料的燃烧或石灰石的脱碳有关，按重量百分比计算，纯净石灰石的CO₂含量达44%。除按正确方式平稳运行窑炉之外，建议采取以下手段来防控CO₂的排放：

- 生产复合水泥，复合水泥可显著减少燃料的消耗，因而减少单位成品的 CO₂ 排放量；
- 从工艺选择和操作入手提高能源效率（干窑/预热窑/预分解窑）；
- 选择含碳量/热值比低的燃料（例如天然气、燃料油或某些废弃物燃料）；
- 选择有机质含量较低的原料。

温室气体排放中，一氧化碳（CO）的比重极小（低于温室气体总排放量的0.5%~1%）⁵。一氧化碳排放一般都与原料的有机质成分有关。有关应对温室气体管理的更多建议包含于《通用EHS指南》。

重金属和其他空气污染物

水泥的制造可能会大量排放重金属（例如铅、镉和汞），来源是原料、化石燃料和废弃物燃料。非挥发性金属大都与颗粒物结合在一起。挥发性金属排放，例如汞⁶，通常来源于原料和废弃燃料，不采用过滤器进行控制。

限制重金属排放的建议手段包括：

- 采用高效的粉尘/颗粒物减少措施，见上文所述，以捕集结合态的金属。如果挥发性

1

² 如果原料的有机硫或黄铁矿（FeS）含量高，会增加 SO₂ 的排放量。

³ 干法脱硫的成本较高，因此使用范围没有湿法脱硫普遍，一般用于 SO₂ 排放量可能超过 1 500 mg/m³ 的情况（在标准状态下）。

⁴ 水泥和石灰厂不太可能排放温室气体 N₂O，原因是工艺温度高，并且在氧化条件下进行生产。唯一可能的来源是原料在生料磨机中直接释放的 N₂O。

⁵ 一氧化碳浓度是工艺的一个指标。一氧化碳浓度高通常是一个报警信号，表明制造工艺不正常（可能涉及燃料消耗量增加）。应连续监督一氧化碳。此外，如果使用静电除尘器（ESP），一氧化碳浓度超过 0.5%~1%时，有可能发展爆炸。

⁶ 汞主要是随原料进入窑炉的（大约 90%），少量是来自燃料（大约 10%）。



金属的浓度很高（例如汞），可能有必要使用活性炭进行吸附。由此产生的固体废弃物应作为有害废弃物加以管理，详见《通用 EHS 指南》；

- 通过物料选择制度，对原料和废弃燃料中的挥发性重金属成分进行监督和控制。根据烟气中挥发性金属的类型，可采用湿法洗涤和活性炭吸附加以控制；
- 以受控和稳定的方式运行窑炉，避免静电除尘器的紧急关机（如果厂内安装了静电除尘器）；
- 开车或停车阶段不应使用废弃物燃料。

废弃物燃料

水泥窑内是强碱性环境，而且火焰温度高（2 000℃），因此可使用高热值的废弃物燃料（例如废弃的溶剂、废油、旧轮胎、废塑料和有机化学废弃物，包括多氯联苯（PCB）、过期的有机磷农药和其他含氯材料）。使用废弃物燃料，如果控制和操作不当，可能导致挥发性有机化合物（VOC）、多氯二苯并二𫓖英（PCDD）和多氯二苯并呋喃（PCDF）、氟化氢（HF）、氯化氢（HCl）和有毒金属及其化合物的排放。

如果在水泥的制造中使用废弃物燃料或废弃物原料，须向当地主管机关取得具体的许可证。许可证应明确规定可作为燃料或原料使用的废弃物数量和类型，并应规定质量标准（例如热值）和具体污染物的浓度上限（例如多氯联苯、氯、多环芳烃、汞和其他重金属）。

此类空气污染物建议的防控手段包括：

- 采用减少颗粒物的手段，以减少非挥发性重金属的排放，并按《通用 EHS 指南》的规定，将捕集的废弃物料作为有害废弃物加以管理；
- 通过物料选择制度，对原料和废弃燃料中的挥发性重金属成分进行监督和控制。根据烟气中挥发性金属的类型，可采用湿法洗涤和活性炭吸附加以控制；
- 直接将包含挥发性金属或 VOC 浓度高的燃料注入主燃烧器，而不是二次燃烧器；
- 二次煅烧以及开车和停车阶段避免使用卤素含量高的燃料；
- 尽量缩短窑气冷却时间（从 500℃ 冷却至 200℃），以避免或最大限度减少已被销毁的 PCDD 和 PCDF 重新生成¹⁻³；
- 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》。
- 由于产品质量要求的原因，石灰制造中很少使用废弃物燃料和废弃物原料⁴。

¹ 在灼热的火焰和高温气体中，PCDD 和 PCDF 的结构被破坏，但是在温度较低时（250~500℃），会重新合成。在预分解窑和预热窑中，通常可以在很短的时间内降温至 200℃ 以下，并且在旋风分离器中的通过时间也很短，但是在其他类型窑炉中，要做到这一点，难度要大得多。

² 水泥工业使用活性炭来吸附微量挥发性金属（例如汞）、挥发性有机污染物或 PCDD-PCDF，目前依然处于试点阶段，主要是因为气体成分的差异。通过维持良好的运行状况和精心选择进料，可避免需要使用活性炭。

³ 关于 PCDD 和 PCDF 排放的预防和控制，更多的信息见 SINTEF，2006。

⁴ 制造石灰所使用的燃料来源对石灰产品的质量有显著的影响，主要是因为硫含量，硫会进入产品，降低产品的价值。如果燃烧不完全，许多燃料都会影响产品质量，因此从燃烧性质出发，天然气和燃料油目前是石灰制造中使用最普遍的燃料。如果不关心最终产品的硫含量，可使用煤（低硫）或石油焦作为燃料。由于产品质量要求的原因，石灰制造中很少使用废弃物燃料和废弃物原料。



能源消耗和燃料

水泥和石灰制造是能源密集型行业。在总生产成本中，电能和燃料的成本可达到 40%~50%。除了《通用 EHS 指南》规定的节能建议，水泥和石灰制造业还应遵守下列建议。

窑炉

新建工厂和进行大规模升级改造时，国际上在水泥熟料生产方面的推荐做法是采用带多级预热和预分解的干法窑（预热预分解窑）。预热预分解窑是水泥制造业使用最普遍的窑。预热预分解窑不仅热耗最低（原因是在旋风分离器内高比例回收窑气的余热，此外窑的热损低），而且没有水分蒸发（与使用料浆的湿窑相比），同时产能是最高的。预热窑由于操作简单，使用也很广泛。预热窑的热消耗仅略高于预热预分解窑，但产能显著低于预热预分解窑。其他类型的窑均视作已过时（长干窑[LD]、半干窑、半湿法窑和湿法窑¹）。为了进一步提高能源效率，可从冷却机回收热量用作工艺热风，例如通过预分解窑内的三次风管回收热量。

对石灰制造，套筒竖窑、并流蓄热竖窑和其他类型竖窑的能耗较低，燃料灵活性较大。不同窑的平均耗热和耗电情况见下文“资源利用与废弃物”部分。

冷却机

目前新安装的熟料冷却机都是“篦冷机”，篦冷机有许多不同的类型。冷却机的作用是尽快降低熟料的温度，并且将二次风加热到尽可能高的温度，以减少燃料的消耗。

燃料

煤粉（烟煤和粉煤）是水泥工业最常用的燃料，但石油焦因为成本较低，使用量也在增加。煤和石油焦的温室气体（GHG）排放比燃料油和天然气严重（大约比天然气高 65%）²。此外，燃料含硫量高（这是石油焦的典型特征）也可能带来问题，包括主要因为硫积聚而在窑内形成结圈的现象。水泥工业使用废弃物燃料来代替传统燃料的做法日益普遍，但是如上文所述，因此考虑相关的大气排放物问题³。

可能有必要采取减少污染的措施，以确保不会因为在水泥窑内煅烧废弃物而产生有毒排放物。如果水泥常采用废弃物燃料，则应采取足够的监督措施（见下文第 2 章所述）。

废水

工业过程废水处理

产生废水的主要是用于不同工艺阶段冷却用途（例如轴承、窑圈）的公用工程作业，有些作业可能产生 pH 值高和固体悬浮物含量高的过程废水。本行业工业过程废水的处理方法包括：流动和负荷均衡，同时调节 pH 值；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。工业废水管理，以及处理方法范例，参见《通用

¹ 欧洲近 80% 的水泥是采用干法窑生产的。非干法窑应在升级或扩建时改造为干法工艺。长干窑（LD）的耗热量要高得多，一般都有严重的维护问题，相关成本也高。半干窑和半湿窑（立波尔窑）的耗热量中等，原因是球团化的入窑生料中含有水分。由于要使用压滤机，因此半湿窑的耗电量和维护成本都较高。湿法窑（目前已基本淘汰）是最古老的立窑技术，耗热量最高，产能最低。立窑已不再被视为适宜采用的水泥生产技术。

² 燃料油和天然气的成本高于石油焦和煤，因此占欧洲水泥工业燃料总消耗量的比例不到 6%。

³ 在工业国家，使用废弃物作为替代燃料已成为常见的做法。据报导，欧洲联盟（欧盟）的燃料替代率平均达 12%。替代燃料包括燃料残余物、吸收剂材料、粉碎后的垃圾（例如塑料、橡胶）、低氯塑料、轮胎、纺织品、废水污泥和废滤料。



EHS 指南》。通过使用这些废水管理技术和良好实践做法，工厂的废水排放应可达到“指南指标”，详见本指南第 2 章的相关表格。

其他废水和水消耗

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，参见《通用 EHS 指南》。污染废水应送入工业过程废水处理系统。

雨水流经露天堆放的石油焦、煤和废弃物料，可能会被污染。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用（上文所述的）污染控制手段，也有助于最大限度减少对雨水的污染。如果雨水会接触堆积的物料，为了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，使颗粒物沉降后，然后再分离、控制和回收或排放。有关受污染雨水的管理，其他建议参见《通用 EHS 指南》。

关于减少耗水量的建议，特别在水属于紧缺自然资源的地方，参见《通用 EHS 指南》。

固体废弃物

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，主要是在生料制备过程中从原料内清除出来的废石。从旁路风和烟气中脱除的窑炉粉尘，如果不回收利用，则是另一个潜在的废弃物来源。

工厂的维护也会产生有限的废弃物（例如废油和废金属）。其他废弃物料可能包括含有窑炉粉尘的碱或氯化物/氟化物。¹ 在石灰生产中，粉尘、不合格的生石灰、以及消石灰，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、消石灰和球团产品）。

关于有害和无害废弃物管理的指导，参见《通用 EHS 指南》。

噪声

水泥和石灰制造工艺有几个阶段会产生噪声污染，包括：原料开采（见《建筑材料开业 ESH 指南》的讨论）；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。《通用 EHS 指南》规定了建议降噪措施的控制指标和环境噪声指标。

1.2 职业健康与安全

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是最严重的，主要包括：

- 粉尘
- 高温
- 噪声和振动
- 身体危害
- 辐射

¹ 老厂如果依然在使用已基本淘汰的半湿法工艺，因为使用压滤机而可能产生碱性滤液。



- 化学危害和其他工业卫生问题

粉尘

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，但最严重的是采石场作业（参阅《建筑材料开采业EHS指南》）、原料搬运和熟料/水泥研磨阶段。如果原料中有活性（晶体）硅灰石粉尘（SiO₂），接触这些粉尘是水泥和石灰制造业的一个潜在危害¹。预防和控制粉尘接触的方法包括²：

- 通过良好的内务管理和维护来控制粉尘；
- 使用带空调的封闭式操作空间；
- 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；
- 在水泥包装区使用通风设备（维持负压）；
- 使用适当的个人防护装备（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；
- 使用移动式真空清洁系统，防止粉尘在铺面的区域内累积；

高温

水泥和石灰制造业在窑炉或其他高温设备的操作和维护以及石灰水化工艺的放热反应中会接触到高温。建议的防控手段包括：

- 在工人可能靠近和近距离接触高温设备的地方采取屏蔽措施，使用必要的个人防护装备（PPE）（例如绝热手套和绝热鞋）；
- 缩短高温工区的换班间隔，最大限度缩短在高温环境下的工作时间；
- 必要时提供和使用自给供应空气或氧气的呼吸器；
- 对石灰水合工艺实施具体的个人防护安全规定，避免工人受放热反应的伤害。

噪声和振动

排风机和研磨机是水泥厂和石灰厂的主要噪声和振动来源。噪声控制措施可包括安装风机消声器、为研磨机操作人员提供封闭的操作间、设置声屏障，如果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》。

身体危害

水泥和石灰制造作业中的身体伤害主要是滑倒、绊倒和摔倒；接触坠落/移动物体；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（例如自卸车、单斗装载机、叉车）。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

¹ 美国政府工业卫生学家会议（简称 ACGIH）将硅酸盐水泥视作“有害粉尘”。长期接触细微颗粒的工人有尘肺病、肺气肿、气管炎和肺纤维化的风险。

² 有关预防和控制硅粉吸入危害，美国劳动部职业安全与健康署（简称 OSHA）在 Silica eTool 中提供了更多信息，详见：<http://www.osha.gov/SLTC/etools/silica/index.html>



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》¹。

辐射

有时候使用 X 射线机来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的操作人员，详见《通用 EHS 指南》。

化学危害和其他工业卫生问题

铬可能导致水泥搬运工发生过敏性接触性皮炎²。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），以防止皮肤接触，详见《通用EHS指南》。

在石灰生产厂，可能发生皮肤/眼睛/黏膜与 CaO/CaOH 意外接触的事故，需要进行评估、预防并通过应急程序和设备加以减缓。水分的存在可能造成灼伤。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。如有可能，生石灰工区应采取覆盖和封闭措施，以避免产生粉尘危害。有关化学危害管理的其他指导意见，参见《通用 EHS 指南》。

1.3 社区健康与安全

水泥和石灰制造厂建造、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是类似的，见《通用 EHS 指南》。

2 指标与监测

2.1 环境

废气与废水管理指南

表 1、2 和 3 给出了水泥和石灰制造业的废气和废水排放指标。水泥和石灰制造业工艺废气和废水排放指导值反映的是本行业的国际推荐值，监管框架获认可的国家在相关标准中采用该推荐值。通过应本文件前面各章讨论的污染防控手段，在设计和操作得当的工厂，在正常情况下是可以达到致谢指导值的。按照占每年运行小时数的百分比计算，在工厂或相关部门至少 95% 的运行时间内，废水排放应达到这些标准。如因考虑项目的具体情况造成偏离这些标准，应在环境评估中加以论证说明。

表 1 水泥制造业的大气排放指标*（在标准状态下）

污染物	单位	指导值
-----	----	-----

¹ 世界可持续发展工商理事会（简称 WBCSD）和水泥可持续性倡议（简称 CSI）发布的“水泥业健康与安全：良好做法范例（2004 年）”，详见：http://www.wbcdcement.org/pdf/tf3/tf3_guidelines.pdf

² 测试表明，美国水泥的铬（六价铬）含量为 $5 \times 10^{-6} \sim 124 \times 10^{-6}$ ，欧洲水泥为 $32 \times 10^{-6} \sim 176 \times 10^{-6}$ 。欧盟规定，水泥的可溶性铬（六价铬）含量不得超过水泥干重的 0.000 2%，以防止过敏性接触性皮炎。



颗粒物（新建窑炉系统）	mg/m ³	30 ^a
颗粒物（现有窑炉系统）	mg/m ³	100
粉尘（其他来源，包括熟料冷却、水泥研磨）	mg/m ³	50
二氧化硫（SO ₂ ）	mg/m ³	400
氮氧化物（NO _x ）	mg/m ³	600
氯化氢（HCl）	mg/m ³	10 ^b
氟化氢	mg/m ³	1 ^b
有机碳总量	mg/m ³	10
二噁英-呋喃	mg TEQ/m ³	0.1 ^b
镉和铊（Cd+Tl）	mg/m ³	0.05 ^b
汞（Hg）	mg/m ³	0.05 ^b
金属总量 ^c	mg/m ³	0.5

* 除非另有说明，否则系指通过窑炉烟道进行的排放。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。

^a 如果 40% 以上的放热是来自有害废弃物，则为 10 mg/m³（在标准状态下）。

^b 如果 40% 以上的放热是来自有害废弃物，则平均值的取样期间最短 30 min，最长 8 h。

^c 总数总量 = 砷（As）、铅（Pb）、钴（Co）、铬（Cr）、铜（Cu）、锰（Mn）、镍（Ni）、钒（V）和铋（Sb）

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。确定现场的具体排放标准时，可根据是否可以使用公共污水收集和处理系统及使用条件；如果是直接向地表水域排放，则根据《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。与蒸气和发电活动相关的燃烧源，如果容量等于或小于 50 MW·h，其废气排放标准包含于《通用 EHS 指南》，如果容量较大，则其废气排放标准包含于《热电 EHS 指南》。有关如何根据废气总排放量确定环境影响的指南包含于《通用 EHS 指南》。

表 2 石灰制造业的大气排放指标（在标准状态下）

污染物	单位	指导值 ^a
粉尘	mg/m ³	50
二氧化硫（SO ₂ ）	mg/m ³	400
氮氧化物（NO _x ）	mg/m ³	500
氯化氢（HCl）	mg/m ³	10

a 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
温度升高	°C	<3 ^b

^b 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度升高。



资源使用和废弃物

下列表 4~表 7 水泥和石灰制造业的一些资源使用和废弃物产生指标，可视作行业的效率指标，用于追踪绩效的长期变动。

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	3.0~4.2 ^{a, b, c, d, g}
电能—水泥	kW · h/t 水泥当量	90~150 ^{a, b, c}
电能—熟料研磨	kW · h/t	40~45
燃料能源—石灰	GJ/t 石灰	4~4.7: 混合进料立窑 ^b 3.6~6: 先进的立窑和转窑 ^b
电能—石灰	kW · h/t 石灰当量	5~15: 混合进料立窑 ^b 20~40: 先进的立窑和转窑 ^b
物料		
熟料生产的替代原料比例	%	2~10 ^{a, f, h}
水泥生产的替代原料比例	%	0~70/80: 高炉炉渣 ≥0~30: 粉煤灰

备注：注释和数据来源见表 5。

表 5 大气排放物及废弃物的产生

单位产品产出	单位	行业基准
废弃物	kg/t	0.25~0.6 ^a
大气排放物		
粉尘	g/t 水泥当量	20~50 ^a
氮氧化物 (NO _x)	g/t 水泥当量	600~800 ^b
硫氧化物 (SO _x)	kg/t	0.1~2.0 ^{a, h}
二氧化碳 (CO ₂)		
来自脱碳	kg/t	400~525 ^{a, e, f, h, k}
来自燃料	kg/t 水泥当量	150~350 ^{a, e, f, h}

^a Buzzi-Unicem (2004) .

^b IPPC (2001) .

^c Ernest Orlando Lawrence , Berkeley National Laboratory (2004) .

^d NRCan (2001) .

^e CIF (2003) .

^f Italcementi Group (2005) .

^g Environment Canada (2004) .

^h Lafarge (2004) .

ⁱ 受粉煤灰和其他添加物数量的影响。

^j 有几个国家认为废弃物焚烧产生的 CO₂ 排放是无害的 (至少是可生物降解部分) 。

^k World Business Council on Sustainable Development , Cement Sustainability Initiative , 2002.



表 6 水泥窑的耗热量和产能

窑类型	耗热量/ (MJ/t 熟料)	最大产能/ (t/d)
预热预分解窑 (3~6 级)	3 000~3 800 ^a	12 000
预热窑	3 100~4 200	4 000
长干窑	≤5 000	3 800
半干-半湿窑 (立波尔窑)	3 300~4 500	2 500
湿法窑	5 000~6 000	1 500~2 000

^a 在最佳状况下，六级预热预分解窑的耗热量可达到 2 900 MJ/t 熟料。

资料来源：IPPC (2001)。

表 7 四类石灰窑的平均耗热及耗电

窑类型 ¹	耗热量/ (MJ/t 石灰)	耗电量/ (kW · h/t 石灰)
立窑	3 600~4 500	5~45
转窑	4 600~5 400	18~40
活动篦式	3 700~4 800	31~38
气体悬浮预热窑 ²	4 600~5 400	20~25

资料来源：IPPC (2001)。

环境监测

制糖部门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废气、废水、资源使用方面的直接或间接指标。

监测的频率应当足以提供所监测参数的有代表性数据。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。监测数据应定期加以分析和审查，并与操作标准加以比较，以便采取必要的纠正行动。有关废气和废水取样及分析方法的更多指南包含于《通用 EHS 指南》。

2.2 职业健康与安全

职业健康与安全指南

sources.应根据国际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（简称ACGIH）公布的门槛限度值（TLV®）职业风险暴露指南和生物风险暴露指标（BEIs®）³、美国全国职业健康与安全协会（NIOSH）发布的《化学品危险手册》⁴、美国职业安全与健康署（简称OSHA）公布的可允许暴露限度（简称PELs）⁵、欧洲联

¹ 活性氧化钙生石灰的消耗量较高。

² 自 1986 年以来，据报道仅挪威有一家采用此工艺生产的石灰厂。

³ 刊载于：<http://www.acgih.org/TLV/>和 <http://www.acgih.org/store/>

⁴ 刊载于：<http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

⁵ 刊载于：http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992



盟成员国公布的指示性职业暴露限度值¹以及其他类似的来源。

事故和死亡率

项目应努力将项目工人（无论是正式雇员还是合同工）发生事故的次数减少到零点（尤其是可能导致失去工作时间、各种程度的伤残、甚至死亡的事故）。死亡率标准可参照发达国家此部门的死亡率数据（资料来源是公开发表的出版物，例如美国劳工统计数字局和英国健康与安全事务局、世界可持续发展工商理事会——水泥可持续性倡议组织发表的报告）²

职业健康与安全监测

应当针对具体的项目监测工作环境的职业危险。监测工作应当由获得认证的专业人员³进行设计和执行，并作为职业健康与安全监测制度的组成部分。工作场所还应保持职业事故与职业疾病、危险事件和其他事故的记录。有关职业健康与安全监测制度的更多指南包含于《通用EHS指南》。

3 参考文献和其他资料来源

- [1] Cembureau (European Cement Association). Best Available Techniques for the Cement Industry. A Contribution from the European Cement Industry to the Exchange of Information and Preparation of the IPPC BAT Reference for the Cement Industry. Brussels: Cembureau, 1999. <http://www.cembureau.be/>.
- [2] Cement Industry Federation (CIF). Cement Industry Environment Report. Manuka, ACT: CIF, 2003. <http://www.cement.org.au/>.
- [3] Cement Sustainability Initiative, World Business Council on Sustainable Development (WBCSD). Our Agenda for Action. Geneva: WBCSD, 2002. <http://www.wbcscement.org/agenda.asp>.
- [4] CSI. 2004. Formation and Release of POPs in the Cement Industry. Second edition. Geneva: WBCSD, 2006. http://www.wbcscement.org/pdf/formation_release_pops_second_edition.pdf.
- [5] CSI. 2005. Progress Report, Geneva: WBCSD, 2005. http://www.wbcscement.org/pdf/csi_progress_report_2005.pdf.
- [6] CSI. CO₂ Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry. Cement CO₂ Protocol, July. Geneva: WBCSD, 2005. <http://www.wbcscement.org/climate.asp>.
- [7] CSI. Environmental and Social Assessment Guidelines, 2005. http://www.wbcscement.org/web/publications/cement_esia_guidelines.pdf.
- [8] CSI. Guidelines on the Responsible Use of Fuel and Materials, 2005. <http://www.wbcscement.org/DocRoot/Vjft3qGjo1v6HREH7jM6/tf2-guidelines.pdf>.
- [9] European Commission. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4

¹ 刊载于: http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/

² 刊载于: <http://www.bls.gov/iif/> and <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm> and <http://www.wbcscement.org/>

³ 有资格的专业人员可包括持有证书的工业卫生专家、注册职业卫生专家、持有证书的安全专家或与此类专家具有同等资格的人。



- December 2000 on the incineration of waste. Brussels: EC, 2000. http://europa.eu.int/eur-lex/en/consleg/pdf/2000/en_2000L0076_do_001.pdf.
- [10] European Commission. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). Reference Document on Best Available Techniques (BREF) for Cement and Lime Production. Seville: EICCPB, 2001. <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>.
- [11] European Commission. Directorate-General Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies (IPTS). Promoting Environmental Technologies: Sectoral Analyses, Barriers and Measures. Brussels: EC, 2004. <http://www.jrc.es/>.
- [12] European Environment Agency (EEA). EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook. Copenhagen: EEA, 2005. <http://reports.eea.europa.eu/EMEP/CORINAIR4/en/page002.html>.
- [13] Environment Canada. Foundation Report on the Cement Manufacturing Sector. Draft No. 1, June. Gatineau, Quebec: Environment Canada, 2004. <http://www.ec.gc.ca/>.
- [14] GTZ-Holcim Public Private Partnership. Guidelines on co-processing Waste Materials in Cement Production. http://www.holcim.com/gc/CORP/uploads/GuidelinesCOPROCEM_web.pdf.
- [15] National Safety Council. Radon Radioactivity and the Fly Ash Market. Itasca, IL: National Safety Council. http://www.nsc.org/ech/radon/rad_faqs.htm.
- [16] Natural Resources Canada (NRC). Office of Energy Efficiency. Energy Consumption Benchmark Guide: Cement Clinker Production, 2001. http://oe.nrcan.gc.ca/publications/industrial/BenchmCement_e.pdf.
- [17] United States (US) Environmental Protection Agency (EPA). Code of Federal Regulation Title 40, Part 63. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories; Portland Cement Manufacturing Industry. Washington, DC: US EPA, 1999. <http://www.epa.gov/EPA-AIR/1999/June/Day-14/a12893.htm>.
- [18] US EPA. Cement Manufacturing Point Source Category. Effluent Limitations Guidelines, Cement Manufacturing Point Source Category. Washington, DC: US EPA, 2003. 40 CFR Part 411. http://www.access.gpo.gov/nara/cfr/waisidx_03/40cfr411_03.html.
- [19] US EPA. Code of Federal Regulation National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories; Lime Manufacturing Plants. Washington, DC: US EPA, 2004, Title 40, Part 63. <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/2004/January/Day-05/a23057.htm>.
- [20] US EPA. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Final Standards for Hazardous Air Pollutants for Hazardous Waste Combustors (Phase I Final Replacement Standards and Phase II). 40 CFR Parts 9, 63, 260 et al. Washington, DC: US EPA, 2005. <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/2005/December/Day-19/a24198.htm>.
- [21] US National Library of Medicine, National Institutes of Health. Haz-Map—Occupational Exposure to Hazardous Agents. Available at <http://hazmap.nlm.nih.gov/index.html>.
- [22] Marlowe, I., and D. Mansfield. Substudy 10: Environment, Health and Safety Performance Improvement, Toward a Sustainable Cement Industry. Independent Report commissioned by the World Business Council for Sustainable Development. AEA Technology. Geneva: WBCSD, 2002.



http://www.wbcdcement.org/pdf/final_report10.pdf.

- [23] World Business Council for Sustainable Development and the Foundation for Industrial and Scientific Research of Norway. Formation and Release of POPs in the Cement Industry, Second Edition. 2006. http://www.wbcdcement.org/pdf/formation_release_pops_second_edition.pdf.
- [24] Worrell, E and C. Galitsky. Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making. An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Sponsored by the US Environmental Protection Agency. Berkeley, LA: University of California, Berkeley, 2004. http://www.energystar.gov/ia/business/industry/Cement_Energy_Guide.pdf.
- [25] Wulf-Schnabel, J., and J. Lohse. Economic Evaluation of Dust Abatement Techniques in the European Cement Industry. Okopol: Institute for Environmental Strategies, 1999.

附件 A：行业活动的一般说明

水泥和石灰的生产工艺类似。两者都涉及石头原料的开采、研磨和均化，见图 A.1。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。卡车配送水泥的经济半径相对较小（大约距工厂 100~150 km），如果工厂靠近水体，可用驳船或轮船进行运输。一条紧凑型生产线（预热预分解窑[PHP]、预热窑[PH]，日产 3 000 t 熟料）一般须占地 400 000 m²，此外还须留有扩建用地[例如 250 000 m²]。项目设施的典型生命周期至少有 40~50 a。工厂的规模是一个重要因素，生产规模的差异对生产成本以及污染减少和控制技术的投资成本有很大的影响。要达到相同水平的环境绩效，小厂的水泥产量成本要高于大型工厂。

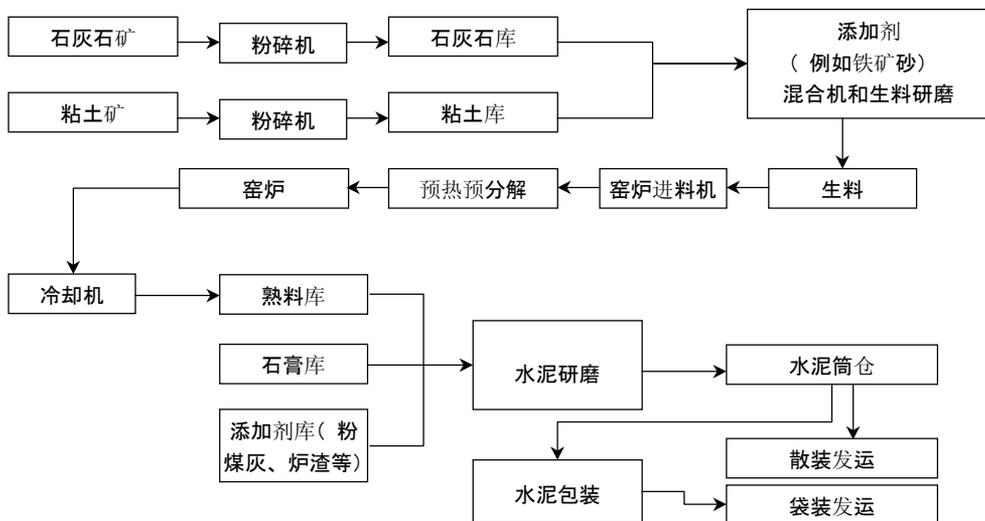


图 A.1：制造流程



水泥制造

水泥制造工艺是利用能量来处理主要由石灰石（碳酸钙， 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，然后加入石膏、石灰石等一起研磨，生产出水泥。

预混处理后，原料混合在一起，研磨成一定化学成分的均化混合物（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，生料进入转窑，分解（即在 900°C 左右分解 CaCO_3 ），放出二氧化碳（ CO_2 ），留下的是氧化钙（ CaO ）。然后，进行熟化，即 CaO 在高温下与二氧化硅、氧化铝和铁氧化物反应。为了达到一定的成分要求，可在原料混合物中加入其他成分（例如石英砂、铸造砂、氧化铁、氧化铝剩余料、高炉炉渣和石膏渣）。火焰及所产生气体的温度接近 2000°C 。高温熟料从窑炉内落入冷却机，必须尽快冷却，以提高熟料质量和通过加热二次风的方式回收能量。一般采用篦式冷却机（而不是卫星式冷却机）。冷却后的熟料与石膏和石灰石一起研磨，获得硅酸盐水泥，与其他材料一起混合可获得合成或复合水泥。然后，水泥装入筒仓或包装袋。混配成分都是有水力性质的材料（例如天然火山灰、粉煤灰、高炉炉渣，偶尔也用炉底灰）。如果使用粉煤灰和炉底灰，不得有炭残留物（一般是来自燃煤发电厂）。有时候少量加入 CaCO_3 作为填料。

石灰制造

石灰的生产方法是煅烧 CaCO_3 或白云岩（碳酸钙镁石，使用较少），提供足够达到 800°C 以上温度的热量，使原料分解产生氧化钙（ CaO ，也称生石灰）。然后，生石灰在 $1200\sim 1300^\circ\text{C}$ 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（根据活性，分为硬烧石灰、中烧石灰和轻烧石灰）。轻烧石灰是活性最强的石灰，广泛用于钢铁冶炼。另外，生石灰也可送往水合厂，与水发生强放热反应，获得熟石灰（氢氧化钙， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）。熟石灰有两种形式：干燥（粉末）或石灰乳（液体）。熟石灰的生产工序依次是选粉、粒度筛分、水合，最后入仓储存（干型），以散货或装袋形式出售或按罐出售（石灰乳）。应注意确保防止水分进入生石灰中（除空气中的水分之外），因为水分会导致水合反应，不仅放热，而且体积会膨胀，可能造成安全危险。