



# 基本金属冶炼业环境、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。<sup>1</sup>。如果世界银行集团的一个或多个成员参与项目，则应根据这些成员各自政策和标准的要求执行本《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

《基本金属冶炼业 EHS 指南》涵盖了与铅、锌、铜、镍及铝等基本金属的熔炼与精炼相关的信息。本指南不包括原材料的开采和集中的信息。该部分信息涵盖在《采矿业 EHS 指南》中。附录 A 对该行业活动的通用描述。

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

<sup>1</sup> 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。



3 参考文献和其他资料来源

附录 A 行业活动的通用描述

## 1 具体行业的影响与管理

本章概述基本金属冶炼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

与金属熔炼和精炼操作阶段相关的重要环境问题如下：

- 废气排放
- 废水
- 危险物料
- 残渣及废弃物
- 噪声

#### 废气排放

##### 颗粒物<sup>1</sup>

颗粒物（或含有金属）排放可能来自无组织排放和点排放，包括矿石、精矿和二次原料的验收、预处理、装卸、运输（如传送机、车辆运输）和存储（如户外堆放）等过程；也可能来源于热处理（如烧结、熔炼、焙烧和吹炼）、浸出工艺（如干料装卸、过滤和浸取残渣的存放）、火法精炼（如熔炉加工和热料转移）、减排系统（如袋式除尘器）的物料收集与运输，以及熔炼铸造（如对熔融金属和浮渣的操作）等过程中产生的高温气体。无组织排放的量可能比被收集和消除的量还要多，因此，对无组织排放进行控制就显得尤为重要了。

防止和控制颗粒物排放的措施包括：

- 根据减少颗粒物排放的潜在能力将所有进料物进行表征划分；
- 将可能形成粉尘的物料储存在密闭的建筑物或容器内，并使用气动的或封闭的输送系统。覆盖所有运输车辆；
- 通过高效的工厂布局和设计，减少传输物料的数量并缩短运输距离；
- 尽可能地减少废气体积（如使用富氧熔炼工艺）；
- 尽可能地将作业设计成连续操作式的，确保环境控制系统最优化，操作流畅稳定<sup>2</sup>。
- 使用密封的减压加热炉和反应器，或改造现有的加热炉，使其尽可能密闭（如：在电

<sup>1</sup> 颗粒物（灰尘）被分为粒径小于 100 μm 的总颗粒物（TPM）、粒径小于 10 μm 的颗粒物（PM10）及粒径小于 2.5 μm 的颗粒物（PM2.5）。颗粒物的危害取决于其大小及性质（如 PM2.5 的颗粒更易吸入）、其相对溶解度及颗粒物所含物质的浓度及毒性。

<sup>2</sup> 例如，三菱及奥托昆普/肯尼科特公司的转化阶段采用连续的闪速熔炼/闪速转化工艺，不需要钢包转移，因此消除了二次烟气的源头。



弧炉顶部设置“第四孔”，尽可能有效地抽出工艺过程中的气体)；

- 对来自工艺容器、进料和卸料点以及输送系统的排放物，采用封闭、收容的方式处理或使用机罩来收集；
- 采用密闭系统或配置了机罩的系统进行物料转移，如通过电极添加物料、通过鼓风口或喷枪添加物料、在进料系统上使用牢固的旋转阀等措施；
- 在工艺的不同阶段使用阀门控制装置自动改变抽气点，以对准烟气源抽气，从而将能耗降至最低。由于屋顶通风机能耗高且收集效率低，只有在其他方式不可行时才使用此方式；
- 根据废气气流的特点（例如：考虑颗粒物的温度和粒径），选用静电除尘器、袋式除尘器、洗涤器或旋风除尘器控制颗粒物排放<sup>1</sup>。
- 维护采集器机罩、管道和滤池系统，以保证收集或提取率维持在设计水平；
- 覆盖所有的运输车辆，封闭存储和加工设备；
- 通过洒水最大限度地减少现场路面、储料堆和其他排放源的大气颗粒物排放；
- 勤于厂房管理，并提供车辆清洗设施，以避免废物在厂区内外的转移。

### 金属

除了主要基本金属之外，原料中还可能包含微量的其他金属（例如铝、砷、铋、铍、镉、铬、铜、锆、金、铟、铅、汞、镍、硒、银、铊、锡和锌）。

包括高温冶金（例如在烧结、熔炼、煅烧和吹炼过程中会产生大量的高温气体，其中包含颗粒物、金属烟雾）、火法精炼（例如在炉法熔炼和高温物质转移过程中会产生细颗粒物和金属烟雾）、电精炼（例如由电解液产生的酸雾）、熔化和铸造（例如熔融金属、浮渣处理和袋式除尘器颗粒形成的金属烟雾）等冶金工艺在内的所有生产过程都可能会产生各种形式的金属或化合物排放物，污染物可能以颗粒物、雾、烟气或者液体等形式存在。这些金属对环境的影响程度取决于其存在形式、毒性和浓度<sup>2</sup>。

应用颗粒物控制措施来实现对金属颗粒物排放的控制。

**汞：**熔炼和精炼工艺有可能释放汞。这两个工艺中产生的金属排放有专门记录。颗粒物减排措施可用来有效的控制大多数含金属的废气，但汞在常温下会以蒸汽的形式存在，并可逃逸出某些控制设备。将颗粒物控制系统的入口气体充分冷却，是确保汞被充分吸收的重要措施；

<sup>1</sup> 以下内容摘自欧洲委员会（2001）年会。关于有色金属行业的最佳可利用技术（BREF）的参考文献：纤维织物过滤器在去除熔炼操作中产生的细小颗粒物方面效率高，所以该工业部门广泛采用纤维织物过滤器系统。但由于存在盲点且对火敏感，所以并不适用于所有情况。在袋式除尘器室前设置了沉降及冷却室和废热回收锅炉，以减少火灾发生的可能、调节颗粒物并回收废气中所含热量。静电除尘器（EP）在本行业也有广泛应用，且其适用温度、压力及灰尘负荷范围都很大。静电除尘器对颗粒物粒径大小并不敏感，并在湿润条件及干燥条件下都可运行。设计时考虑了防腐及防磨措施。然而，静电除尘器（EP）通常无法达到纤维织物过滤器对细小颗粒物的去除效率。在潮湿、饱和的废气中含有大量颗粒物，且必须予以清除时，（例如锌与铜的初级生产过程产生的废气，其中含有灰尘及二氧化硫，采用洗涤器及湿式静电除尘器进行清洗）湿式静电除尘器则是必要的设备。湿式静电除尘器也用来清除电极焙烧炉产生的废气中的焦油烟雾。密闭电弧炉产生的富含CO的废气的除尘通常采用串联湿式洗涤器，该气体用做高热值气体。钢带煅烧机生成的废气中所含灰尘磨蚀性强但易于润湿，也采用串联湿式洗涤器进行处理。在除尘的同时还起到了冷却废气的作用。旋风分离器通常不适合于本行业部门排放物的控制。其针对细小颗粒的集尘效率太低，无法有效处理炉体排放物。操作经验表明旋风分离器不能适应现代排放标准。然而，在吞吐量可变的大型工艺中，将其作为初级处理手段与其他技术结合使用，还是非常有效的。

<sup>2</sup> 欧洲委员会（2001）。有色金属工业最佳适用技术（BREF）参考文件。



也可以使用活性炭介质来吸附汞<sup>1</sup>。

### 二氧化硫

金属硫化物精砂经烘焙、烧结、熔炼、吹炼或精炼处理，会产生二氧化硫（SO<sub>2</sub>），化石燃料的燃烧也会产生二氧化硫（SO<sub>2</sub>）。废气中的二氧化硫浓度是二氧化硫排放的重要控制指标。未经处理的废气中二氧化硫的浓度高于5%~7%时，可以将其转化成硫酸。要使废气中二氧化硫浓度更低，需要使用含硫量较低的原料，或采用洗涤装置吸附硫，从而降低大气中的二氧化硫排放，使周边大气中二氧化硫浓度适当。富氧熔炼可使尾气排放量减少，并提高二氧化硫的浓度，从而获得更高的转化率，并减少污染物的排放量。

二氧化硫排放的预防与控制措施包括：

- 采取固硫措施进行安全储存和/或综合利用（例如：硫酸、液体二氧化硫、化学肥料和单质硫）；
- 选用减少排气量和增加二氧化硫浓度的技术<sup>2</sup>；
- 利用工艺控制系统保证持续运行；
- 采用气体清洗工艺去除低浓度废气中的二氧化硫；
- 采用密闭工艺设备和容器，以避免无组织排放；
- 采用预处理（例如浮选法）措施去除硫化物杂质，并减少进料中的硫含量；
- 采用低硫燃料（例如天然气取代重燃料油或者焦炭）和原材料（例如低硫原材料）。

### 氮氧化物

氮氧化物排放物主要在燃料的燃烧过程中产生（例如熔炼用煤和火法精炼用天然气）。氮氧化物可能由燃料或精矿中的含氮成分形成，也可能是热力型氮氧化物。在铝生产过程的电解过程中，由于阳极中存在氮也可能形成氮氧化物。

- 在火法精炼炉和其他燃烧设备中使用气体中的氮氧化物含量低的燃气炉和分阶段空气燃烧技术，使产生的氮氧化物达到最少；
- 在由含二氧化硫废气生产硫酸的过程中，如果废气中的氮氧化物含量过高影响到了硫酸的质量和可用性，可以通过处理焙烧烟气来去除其中的高浓度氮氧化物（例如使用氧化净气机）；
- 使用全氧燃烧器可减少氮氧化物的形成。使用富氧技术时，因燃烧器中使用纯氧会带来较高炉温，进而导致氮氧化物形成，此时需考虑采取燃烧器氧气引流措施。

### 二噁英和呋喃类

金属生产过程中（特别是采用二次原料进行生产或者某些需要氯化处理的工艺）可能会产生多氯二联苯并二噁英和多氯二联苯并呋喃（例如火法精炼）。合成过程或废旧材料中的杂质在不完全燃烧过程中，可形成多氯二联苯并二噁英和多氯二联苯并呋喃<sup>3</sup>。

<sup>1</sup> 除了残余物质控制方法（如 Boliden/Norzink 和 Outokumpu 控制处理系统中的氯化汞或甘汞）外，关于控制汞排放的技术和方法的更多详细信息由欧洲委员会（2001）提供。参见有色金属工业最佳适用技术（BREF）参考文件，第 135 页。

<sup>2</sup> 冶炼过程有两种基本方式，熔池熔炼和闪速熔炼。闪速熔炼过程因使用富氧而产生自热（自发）或者接近自热的运行。熔池熔炼过程通常使用低等级富氧。氧的使用也提高了二氧化硫的浓度，使得硫回收系统（通常是硫酸生产或者液体二氧化硫生产）能够更加有效的收集气体。欧洲委员会（2001）。有色金属工业最佳适用技术（BREF）参考文件。

<sup>3</sup> 废旧材料中存在的油类和其他有机物或者其他来源的碳（部分燃烧的燃料和还原剂，例如焦炭）所形成的微碳颗粒在 250~500℃ 的范围内，与无机氯化物或有机氯反应生成二噁英。这是一个从头合成工艺，铜和铁等金属可作为催化剂。欧洲委员会



二噁英和呋喃的防控措施包括以下几方面：

- 在燃烧和/或加热废金属前，通过精选去除或尽量减少废金属中的有机物质（如塑料和木屑）；
- 对燃烧设备进行控制和维护，以确保在设定的温度和停留时间下进行有效的燃烧，从而保证二噁英的分解，并避免气体遇冷后恢复成原有物质；
- 考虑在固定床反应器或移动床反应器中使用活性炭，或将活性炭直接放到气流中，随后再将其当作滤渣除去。

### 挥发性有机化合物

挥发性有机物（VOCs）的产生源于不完全燃烧和某些成分的脱脂、溶剂的提取等工艺，以及用于储存溶剂和燃料的容器的排气口。如果用于熔炼和精炼再生金属的原料中包含有机物，也会释放出 VOCs。

VOCs 排放的预防、减少及控制措施，建议如下：

- 尽量使用水基溶剂，或者使用毒性最小的适用溶剂；
- 收容排放物（例如使用密封装置或整流罩）；
- 使用混合/分离器，尽量减少 VOCs 与空气的接触从而尽量减少其挥发；
- 采用补燃器、洗涤器、生物过滤器或生物反应器、活性炭捕集器、或者激冷器/冷凝器系统等设备来控制 VOCs 的散发；要采用何种设备要根据气流的成分等具体情况来确定；
- 填充溶剂瓶或燃料罐的时候，使用运输载体的后通气孔将待转移气体转移到运输载体，并利用传送部件的自动再密封功能阻止其泄漏。

### 酸雾和肿

电解沉积、硫酸的加压浸出和生产等其他过程中，可能会产生含有可溶性金属离子的酸雾。铅酸电池的破裂也会产生酸雾。当一定的微量金属和酸混合时（如在浸出工艺中）可能产生肿。除了在曝气过程、剧烈的混合反应、化学反应的辅助过程和流动液体的滴水口会产生酸雾外，在电解沉积电池的反应中也会产生酸雾。

防控酸雾和肿挥发的措施如下：

- 监控工艺控制参数以减少或消除不利因素；
- 在容器上安装整流罩，在电解液表面保持足够的泡沫层，使用控制装置（如洗涤器）对废气和雾进行处理；
- 在硫酸车间用烟囱和烛形过滤器控制酸雾的排放；
- 收集和处理在电池碾磨台上产生的酸雾（例如，用湿洗涤器和薄雾过滤器等方法）。

### 一氧化碳

一些高温冶金工艺（即在密闭埋弧电炉中采用卡尔博——热法生产铁合金）会产生富含一氧化碳的废气。CO 的排放量随金属种类和生产工艺的不同有很大不同。控制和减少 CO 排放的措施包括收集和提纯富含 CO 的气体（例如使用串联湿式洗涤器等），并将其作为燃料出售或使用。不完全燃烧过程、含有机物的二次原料的熔炼、精炼过程也可能产生 CO。此类 CO



的控制措施与上述 VOCs 的控制措施类似。

### 温室气体

二氧化碳：熔炼和精炼过程会产生大量二氧化碳<sup>1</sup>。二氧化碳的主要来源有：精矿的熔炼、用于发电供热的化石燃料直接燃烧、为了用化石燃料发电以使设备运转而形成的废气物间接排放（例如用于铝熔炼中的电解）等。本节中所涉及的导致温室气体排放的其他间接因素与化学试剂的使用有关。装置外生产过程用到的化学试剂会释放出大量的温室气体。减少温室气体的排放需要采取措施提高能源利用效率和降低能耗，这两点将在下一节“能量消耗和利用效率”中予以论述。其他关于温室气体管理的建议请参阅《通用EHS指南》。

全氟化碳（只在炼铝过程中产生）<sup>2, 3</sup>：炼铝过程中的阳极效应（原材料进料速率和铝生产速率的短时间不平衡）会产生两种全氟化碳、四氟化碳（CF<sub>4</sub>）和六氟乙烷（C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>）。这些物质一旦产生，以现有的技术很难将其从气流中除去。

当电解液中氧化铝含量降至 1%~2% 以下时发生阳极效应，并使电极表面形成一层气体膜。阳极表面形成的气体膜中断了金属的生成，并导致电解池电压从 4~5 V 左右升高到 8~50 V。全氟化碳的产生取决于阳极效应<sup>4</sup>的频率和持续时间。

全氟化碳的控制措施（及减少温室气体排放量的措施）如下所述<sup>5</sup>：

- 更多的使用回收铝（在能量消耗方面，使用回收铝要比使用粗铝明显的少）；
- 提高电能转化效率；
- 尽量减弱产生全氟化碳的阳极效应；
  - 调整电解池电压和铝土添加量，以控制阳极效应
  - 采用与工艺控制相结合的铝土半自动点式进料系统
- 改变还原技术，尽量减少化石来源碳的使用<sup>6</sup>。

能量消耗及其利用效率：熔炼与精炼设施需要消耗大量的能量，尤其是用于干燥、加热、熔炼、烟化、熔解及运输的燃料及用于电解和动力服务/设备的电能的消耗更大。《通用 EHS 指南》包含了提高能量利用效率的内容。以下是适用于该工业部门的具体节能措施：

- 评估熔炼与加工的替代技术，优化能量利用效率（如闪速熔炼所需能量是传统高炉熔炼的一半左右，回收铝熔炼所需能量通常远远低于粗铝熔炼所需能量）；
- 采用热量、能量回收技术，最大程度利用能量（如废热锅炉、热交换器、蒸汽驱动器）

<sup>1</sup> 在铝的生产过程中，阳极碳与电解产生的氧气反应及与空气发生的副反应也会产生二氧化碳。然而，该过程的排放量远低于燃烧化石燃料产生用于电解的电能所排放的二氧化碳量。

<sup>2</sup> 京都议定书中要求减排的六种温室气体中，两种全氟化碳（即四氟化碳和六氟化二碳）属于铝熔炼过程的副产品。全球变暖潜能值是评价各种温室气体在气候变暖方面影响大小的指标。可针对特定的时间区间（如 20 至 500 年）、特定的温室气体浓度等级（如当前值）计算全球变暖潜能值。直接与间接影响都要予以考虑。间接影响包括大气化学方面的变化（如臭氧的形成方面）及平流层水蒸汽的变化。二氧化碳的全球变暖潜能值定义为 1，以此为基准计算其他温室气体的对应值。四氟甲烷的全球变暖潜能值是二氧化碳的 6 500 倍（按 100 年的时间区间计算），六氟化二碳的全球变暖潜能值是二氧化碳的 9 200 倍（按 100 年的时间区间计算）。联合国气候变化框架公约（UNFCCC）。

<sup>3</sup> 国际铝业学会。温室气体议定书：铝行业温室气体排放监控与报告，2006 年 10 月。详细信息，请登录 [www.world-aluminium.org/environment/climate/ghg\\_protocol.pdf](http://www.world-aluminium.org/environment/climate/ghg_protocol.pdf) 了解。

<sup>4</sup> 欧洲委员会（2001）。有色金属行业的最佳可利用技术（BREF）参考文献：

<sup>5</sup> 国际铝业学会。“全氟化碳排放：十年进展”。要了解详细信息，请登录 [www.world-aluminium.org/environment/climate/index.html](http://www.world-aluminium.org/environment/climate/index.html)。

<sup>6</sup> 不使用碳的还原技术目前正处于试用阶段。



<sup>1</sup>，如从火法工艺产生的废气中回收热量与能量。各设备所用的热回收技术会有很大差别，但是都可能包括使用富氧空气减少能量消耗、使用蒸汽发生锅炉回收熔炼与煅烧工艺产生的废气中的热量、用熔炼与精炼工艺产生的热熔化二次原料。

#### 羰基镍（仅适用于镍的生产）

生产羰基镍是生产纯镍的一个中间步骤。其他羰基化合物如羰基钴及羰基铁也会随之产生，这取决于所用工艺。富含金属羰基化合物的气体应经焚烧处理，将金属羰基化合物转化为金属氧化物和二氧化碳。应采用相应的控制技术捕集富含金属羰基化合物的气体焚烧后形成的金属氧化物和二氧化碳。

#### 氟化物（仅适用于铝的生产）

气态氟化物的主要来源是电解罐。所产生的气态氟化物主要以氟化氢的形式存在，其产生于氟化铝及冰晶石与氢气的反应。可通过烟气收集技术实现对氟化物排放的控制。收集到的烟气（通常占总烟气量的 98% 以上）可以通过向其中加入铝土吸收氟化物、然后采用袋式除尘器（粉尘回用于电解罐）或湿式洗涤器（其效率通常介于 99.5% 到 99.9%）的方法得以净化。

#### 焦油和多环芳烃（仅限于铝的生产）

阳极焙烧装置可能会释放出焦油和多环芳烃。为了防止和控制这些污染物的释放，可以采取以下几个方面的措施：

- 提高燃烧效率；
- 换用其他类型的阳极；
- 采用氧化铝清洗器和纤维网过滤装置去除焦油和多环芳烃；
- 使用干型阳极糊并使阳极上端处于低温环境，以减少多环芳烃排放；

#### 阳极制备（仅限于铝的生产）

氧化铝电解法生产铝的过程中将消耗阳极，在此过程中释放出的氧将会燃烧掉碳。这些阳极的制备通常是在阳极焙烧装置内完成的，在焙烧装置内含碳材料（包括石油沥青）被附着到金属核上并通过焙烧来增强其强度。烘焙过程会释放出挥发性烃类和其他污染物（例如原材料中含有的硫）。可行的情况下，可以通过在烘焙炉内燃烧挥发性有机排放物来利用它的热能。从焙烧室排出的废气经清洗或吸附处理后，在与原铝熔化炉相连的装置中进行过滤，从而将碳氢化合物返回到生产过程；另外，也可以根据生产场地及生产规模使用补燃器和湿式静电除尘器。

## 废水

### 行业工艺废水

熔炼和精炼行业的废水源主要包括：湿法冶金过程中产生的工艺废水（如焙烧烟气的清洗、淋洗、净化和电解）、湿法烟气清洁产生的废水、炉渣粒化处理废水/冷却水、径流水/雨水。废水通常含有可溶或不溶金属化合物、油以及有机物。直接接触的冷却水（例如某些铸造操作中）可能会含有较高浓度的金属和悬浮物，这种废水应该引入废水处理系统进行处理。

<sup>1</sup> 熔融工艺的具体能效指南参见欧洲委员会（2001）有色金属工业最佳处理技术（BREF）参考文献。



### 工艺废水的处理

本章节的工业废水处理工艺包括源头隔离和预处理，即通过化学沉淀、混凝和絮凝等方法降低重金属浓度。典型的废水处理步骤包括：用于分离油和可浮起固体的油水分离器或溶气气浮；用于分离可滤固体的过滤操作；流动与负荷均一化；利用沉降池减少悬浮固体的沉降工艺；在指定的危险废弃物填埋场对残余物进行脱水处理与填埋处置。可能需要额外的工程控制的工艺包括：（1）采用膜过滤、电解或其他物理/化学方法去除金属的先进技术，（2）用活性炭或化学氧化法去除难降解有机物，（3）采用适当的技术（如反渗透、离子交换、活性炭技术等）降低出水的毒性。

《通用 EHS 指南》中讨论了工业废水管理方法，并列出了废水处理技术。通过采用上述废水处理技术和先进的废水管理技术，生产设施应达到指南中规定的废水排放标准，此标准显示在本工业部门文件的第 2 章节中的相关表格中。

### 其他废水及水消耗

关于实用操作产生的未污染废水、未污染雨水、生活污水的管理指南，请参阅《通用 EHS 指南》。熔炼与精炼行业的非接触式冷却水系统可采用直流式设计，也可采用配备蒸发式冷却塔的循环系统。直流系统出水通常在采用适当的降温措施后排入地表水。雨水接触原料堆或沉积了气相污染物的表面后可能会被污染。关于雨水的管理指南请参阅《通用 EHS 指南》。污染的废水应并入工业废水处理系统。节水措施，尤其是在水资源紧张地区的节水措施，请参阅《通用 EHS 指南》。

### 危险物料

熔炼与精炼行业会使用大量的酸、碱和其他化学试剂（如在金属的浸出与沉淀过程中用于污染控制系统的化学试剂）和工艺气体（如氧气、二氧化碳、氩气、氮气、氯气、氢气及其他气体）。关于危险物料安全存储、运输及使用的管理指南请参阅《通用 EHS 指南》。

### 残渣及废弃物

熔炼与精炼行业的危险残渣、非危险残渣及废弃物来源于：由火法冶炼工艺产生的炉渣、浮渣、废铕及挡渣；熔炉产生的废弃衬里与耐火材料；减排系统产生的废弃物（如烟灰、粉尘、淤泥及废弃滤料）；水处理系统产生的污泥（如湿式洗涤系统及水处理系统，污泥中可能含有石膏 $[\text{CaSO}_4]$ 及金属氢氧化物及硫化物）；浸出、提纯工艺产生的污泥和电解生产中产生的废弃物。

应尽可能将熔炼与精炼生产<sup>1</sup>产生的副产品及废弃物回用于工艺（如浮渣、废铕、挡渣、电解罐、熔炉的衬里以及清除的其他废弃物）中。熔炼阶段产生的大量炉渣可经处理后（如烟化处理后回收残余金属）生产惰性颗粒物售卖给其他行业使用，如在水泥及绝热产品的生产中。来自减排系统的废弃物、浸出及废水处理产生的污泥可回用于热处理阶段，这取决于设备的工艺集成程度。阳极及池底污泥可回用用以回收金属。工业危险与非危险废弃物的管理与安全处

<sup>1</sup> 最大限度减少废物排放与废物回收和再利用的可能性的详细指南参见欧洲委员会（2001），有色金属工业最佳处理技术（BREF）参考文献



置的指南请参阅《通用EHS指南》。适用于非铁类金属的熔炼与精炼行业的特定废弃物的产生与管理的指南信息阐述如下：

#### **废旧阴极（仅限于铝的生产）**

废旧阴极，亦称为废旧阴极碳，是粗铝制造业的主要废弃物。废旧阴极含有碳成分及耐火材料，其中碳成分原先为电解槽中的阴极，耐火材料包括各种绝热材料。废旧阴极炭块含有可溶性氟化物及氰化物，遇潮即会产生碱性渗滤液。废旧阴极炭块应当进行处理并尽可能回收利用（例如，用于火法熔炼炉中、冰晶石的生产、水泥业，或者作为燃料使用），或者是根据《通用 EHS 指南》中的危险废物管理指南进行处理。

#### **赤泥（仅限于铝的生产）**

赤泥产生于由铝土矿提取铝的过程，是一种碱性物质，需通过存储来加以控制，通常将其存储于密封池中，以减少地表水及地下水受污染的风险。从赤泥析出的过量废水回用于生产工艺中。

### **噪声**

由于熔炼和精炼过程中使用到大量的机械设备、运输工具，以及需要大量的体力劳动和能源消耗（特别是加热炉和蒸汽的使用），不可避免地会产生噪声。噪声主要产生于原料及产品的运输和装卸过程、生产过程（包括高温冶金、研磨和铣削操作）、泵及鼓风机的使用、蒸汽通风以及自动化报警系统。噪声管理措施请参阅《通用 EHS 指南》。

## **1.2 职业健康与安全**

职业健康和安全问题的研究应视为包括危害源识别分析[HAZID]、危害和可操作性研究[HAZOP]或其他风险评估研究在内的综合危害或风险研究体系的一部分，研究结果用于制定健康安全管理计划、设计生产设备和安全工作体系以及安全工作规程的制定和交流中。

《通用 EHS 指南》中介绍了用于处理职业健康安全的主要风险的设备设计、操作及监控的措施。《通用 EHS 指南》中还包含关于设备建设和退役活动的详细指南和所有工业的健康安全培训、个人防护设备以及物理、化学、生物和放射物危害指南

熔炼与精炼中的职业健康与安全问题还包括：

- 化学品接触
- 物理危害
- 噪声
- 辐射
- 受限空间
- 电场和磁场

### **化学品接触**

熔炼与精炼行业使用大量的危险材料，包括酸、碱和其他化学试剂（如在金属的浸出与沉淀过程中，用于污染控制系统的化学试剂）和工艺气体（如氧气、二氧化碳、氩气、氮气、氯



气、氢气及其他气体)。各阶段生产过程及维修作业的操作和其他活动排放的有机及无机灰尘、蒸汽、废气、烟雾都可能使工人面临接触危险物料的风险。

无机危险物料通常包括可溶的及不可溶的基本金属（如镍、铜，及痕量污染物，如砷、铋、铊、汞、镉及其他材料）。痕量污染物及其金属的种类及数量取决于矿石的性质及所采用的特定工艺。在浸出及/或电解精炼操作中存在接触酸雾的风险。可能接触到的有机危险物料包括二噁英、呋喃、残余有机溶剂、沥青烟气中的多环芳香族物质及灰尘（产生于碳电极厂及铝的还原工艺）。可能接触到的废气中可包含二氧化硫、氨气、一氧化碳、氧气、砷、氯气、氟化物及其他物质。某些废气具有金属性质，如钴、铁及镍的羰基化合物。

化学品接触和其他危险物接触的管理指南包括个人防护装备（PPE）的使用，详情请参阅《通用 EHS 指南》。此外，防止、减少及控制潜在的化学品接触的措施建议如下：

- 在可行的范围与程度内，封闭并隔离潜在在废气排放源；
- 对可能发生突发和意外危险的地区进行持续监控（例如：砷化氢或氰化氢可能泄漏的地点）
- 使用个人职业卫生采样设备对工人的接触情况进行监督；
- 进行培训并鼓励良好的个人卫生习惯，禁止在工作场地抽烟及进食；
- 使工艺与物料处理在可行的范围与程度内实现自动化，并为操作者提供防护罩；
- 提供局部排气通风装置以减少接触有害气体（如，二氧化硫、一氧化碳及硫酸烟雾）的可能性。

### 物理危害

物理危害，包括由熔炉、熔融金属造成的高温接触及工效应力。这些在工作中涉及到的高温金属（如高温冶金作业）、酸、苛性碱、溶剂、浸出滤液及电精炼溶液等物理危害可能会导致与设备操作、燃烧和爆炸相关的人身伤害。

物理危害的管理措施请参阅《通用 EHS 指南》。此外，推荐如下措施以防止、减少和控制潜在的热伤害：

- 在炉前使用水帘或气幕；
- 在需要的地方采取现场冷却；
- 为操作人员安装封闭的空调隔间；
- 提供有效的热辐射防护服和风冷防护服；
- 给予充足时间让工作人员适应高温工作环境，在凉爽区域建立休息室，并且提供充足的饮料便于员工经常饮用。

### 噪声

重型设备运行及熔炉作业会产生高分贝噪声，因此熔炼和精炼工人有暴露于高分贝噪声环境的潜在风险。由于大部分噪声源是无法予以阻止的，控制办法应包括给受噪声危害的员工配备听力保护设备，以及执行工作轮换计划以减少累积接触。关于职业噪声管理的补充建议请参阅《通用 EHS 指南》。



## 辐射

工艺流程中某些设备（例如，传感器和微粒监测器）及实验室设备含有放射源，会使工作人员暴露于辐射源下，形成职业接触。关于辐射接触管理的建议措施，请参阅《通用 EHS 指南》。

## 受限空间

熔炼和精炼厂的某些设备和位置要求员工进入受限空间工作。工厂应按照 EHS 通用指南的相关内容，设定并执行进入受限空间作业的规程。

## 电场和磁场

电场和磁场（EMF）由不可见的磁力线或电场线组成，环绕于所有带电设备周围。电场由电位差所产生，其强度随着电位差的增大而增大。磁场由电流的流动所产生，其强度随着电流的增大而增大。电场可被导电物质或其他材料所屏蔽，如树木和建筑材料。磁场可穿透大多数物质，并且难以屏蔽。电场与磁场均随距离增大而迅速衰减。电解还原槽由直流电提供能量，电解室中产生的电磁场主要为静态场或固定场。与低频电磁场相比，这些场更不容易显示其产生的稳定、可重现的生物效应。槽室中测得的磁场通量级通常在静态磁场、次射频场、静电场的阈值以内。还原室内可能存在特低频电磁场照射，特别是邻近于整流器的区域。电解室中的通量级最小，低于现行标准<sup>1</sup>。EMF照射可能还与电弧炉及其他的电气设备有关<sup>2</sup>。

### 1.3 社区健康与安全

熔炼和精炼设施是污染物重要排放源，可使附近社区受到健康与安全危害的影响。其中一个显著的风险是金属细颗粒对社区的土地和住宅的累积性污染及其继发性的影响、对居民和附近生态系统的健康危险。沉积金属（如镉、铜、铅、锌和锰）以及其他污染物，也对附近地区的农作物和牲畜产量、农产品的质量存在潜在的影响。第 1.1 节所论述的排放控制措施可将这些影响最小化。

应该通过与包括社区居民在内的所有利益相关方开展合作，针对熔炼和精炼设施，制定并坚持一项全面的环境、健康、安全计划。这项计划应该包括以下部分：

- 在社区中开展与熔炼厂运作有关的健康危害教育，提高社区居民健康意识；
- 如果必要，进行基本的健康评估；
- 调查污染地点的遗留问题，包括评价与修复方法；
- 在受影响的社区和相关监管机构的参与下，制定一套应急准备与响应方案；
- 对以上问题及社区的其他健康安全问题的进一步的指导请参阅《通用 EHS 指南》。

<sup>1</sup> 国际劳工组织，职业健康与卫生百科全书，第四版，第 3 卷，第 XIII 部分，第 82 章，请登录 <http://www.ilo.org/encyclopedia/> 获取相关信息。

<sup>2</sup> 使用心脏起搏器的人员不能从事还原操作，因为存在磁场诱发心率不齐的风险。



## 2 指标和监测

### 2.1 环境

#### 废气排放和污水排放指南

表 1 和表 2 介绍了熔炼与精炼项目的废气排放和污水排放浓度指南。该行业的工艺污水排放和废气排放指导值是各国的相关标准在公认的法规框架内所体现的国际行业惯例。通过上文介绍的污染防控技术，我们可以知道，经过合理设计和操作的装置在正常的操作条件下基本上可以满足这些指南的要求的。这些废气和废液必须在工厂设备或生产机器年运行时间至少 95% 的时间范围内，在不经稀释的情况下达到以上排放水平。在环境评估中，所产生的水平偏差应当根据当地特定的项目环境进行调整。

废气排放指南适用于处理废气排放物。与热能消耗不高于 50 MW 的热电生产相关的燃烧源排放物管理指南，请参见《通用 EHS 指南》。能耗更高的燃烧源排放物管理指南，请参见《热能 EHS 指南》。《通用 EHS 指南》还包含基于总排放量的环境研究指南。

废液处理指南适用于已处理废液直接排放到常规用途的地表水中。特定场地的排放水平可以按照公共经营的污水回收和处理系统的可行性及特定条件设定；或者如果废液直接排放到地表水中，排放水平可依据《通用 EHS 指南》中规定的受水区的用途分类设定。这些废液必须在工厂设备或生产机器年运行时间至少 95% 的时间范围内，在不经稀释的情况下达到以上排放水平。在环境评估中，所产生的水平偏差应当根据当地特定的项目环境进行调整。

#### 资源利用

表 3 列举了熔炼和精炼中选定工艺的能源和水资源消耗的一个实例。这一实例可以作为日后该部门的能效指标及用来检测生产绩效变化。

#### 环境监测

该行业的环境监测项目的执行应当面向在正常操作和异常条件下可能对环境产生重大潜在影响的所有生产活动。环境监测活动应当以适用于特定项目的废气、废水和资源利用的直接或间接指标为基础。

环境监测的频率应当足以为监测参数提供具有代表性的数据。环境监测应由受过系统训练的人员使用经正确校准的、维护良好的设备按照检测和记录程序进行。监测得出的数据应经定期分析和检查，并与操作标准相对比，以便采取合适的矫正行动。《通用 EHS 指南》中介绍了对废气废水监测的抽样和分析方法。

表 1 镍、铜、铅、锌及铝熔炼和精炼行业气体排放物

污染物	排放源（按金属类型/熔炼工艺确定）	单位	指导值
-----	-------------------	----	-----



污染物	排放源（按金属类型/熔炼工艺确定）	单位	指导值
二氧化硫 (SO <sub>2</sub> )	铜：初级熔炼及转化 铅与锌：初级熔炼、煅烧及烧结 镍：硫化物精矿及中间产品的煅烧及烧结	转化效率高于 99.1%（废气中 SO <sub>2</sub> 占 1%~4%） 转化效率高于 99.7%（废气中 SO <sub>2</sub> 占 5%）	
	铜：二次熔炼及转化、初级及二级火法精炼、电渣清除及熔化 铝：粗铝及再生铝生产的熔融金属，经保温及脱气处理 铅与锌：原料预处理、二次熔炼、热精炼、熔解、炉渣烟化及威尔兹回转窑操作	mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	<50~200 <sup>1, 2, 3</sup>
氮氧化物 (NO <sub>x</sub> )	铜：二次熔炼及转化、初级及二级火法精炼、电渣清除及熔化 铝：粗铝及再生铝生产的熔融金属，经保温及脱气处理，物料预处理及再生铝的熔解与熔炼 铅与锌：纯净物料的熔解、炼制合金、锌粉生产、物料预处理、二级熔炼、热法精炼、熔解、炉渣烟化及威尔兹回转窑操作 镍：浸出、化学提取及精炼、电解沉积及溶剂萃取；物料预处理所用的焚烧或后燃烧、煅烧、熔炼调质处理及熔解等工艺	mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	100~300 <sup>4, 5, 6</sup>
酸雾/废气	铜：湿法冶金及电解沉积工艺 铅与锌：化学精炼、电解沉积及溶剂萃取 镍：浸出、化学抽提与化学精炼、电解沉积及溶剂萃取	mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	50 <sup>1, 7</sup>
VOC/溶剂 (以其中所含碳计)	铜：湿法冶金及电解沉积工艺 铅与锌：化学精炼、电解沉积及溶剂萃取 镍：浸出、化学抽提与化学精炼、电解沉积及溶剂萃取	mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	5~15 <sup>9</sup>
灰尘 <sup>22</sup>	铜：二次熔炼及转化、初级及二级火法精炼、电渣清除及熔化、二级烟气收集系统及干燥 铝：粗铝电解、粗铝及再生铝生产过程中熔融金属的保温及脱气处理，物料预处理及再生铝的熔解与熔炼 铅与锌：纯净物料的熔解、炼制合金、锌粉生产、物料预处理、二级熔炼、热法精炼、熔解、炉渣烟化及威尔兹回转窑操作 镍：物料预处理所用的焚烧或后燃烧、煅烧、熔炼调质处理及熔解等工艺	mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	1~5 <sup>3, 10, 11</sup>



污染物	排放源（按金属类型/熔炼工艺确定）	单位	指导值
总碳 (以碳计)	铜：二次熔炼及转化、初级及二级火法精炼、电渣清除及熔化 铝：物料预处理，及再生铝的熔解与熔炼等工艺 铅与锌：纯净物料的熔解、炼制合金、锌粉生产、物料预处理、二级熔炼、热法精炼、熔解、炉渣烟化及威尔兹回转窑操作 镍：物料预处理所用的焚烧或后燃烧、煅烧、熔炼调质处理及熔解等工艺	mg/Nm <sup>3</sup>	5~50 <sup>12, 13</sup>
二噁英	铜：二次熔炼及转化、初级及二级火法精炼、电渣清除及熔化、二级烟气收集系统及干燥 铝：物料预处理，及再生铝的熔解与熔炼等工艺 铅与锌：纯净物料的熔解、炼制合金、锌粉生产、物料预处理、二级熔炼、热法精炼、熔解、炉渣烟化及威尔兹回转窑操作 镍：物料预处理所用的焚烧或后燃烧、煅烧、熔炼调质处理及熔解等工艺	[TEQ（毒性当量）] ngTEQ/m <sup>3</sup>	0.1~0.5 <sup>3, 10, 14, 15, 16</sup>
氨		mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	5 <sup>17</sup>
氯	镍：浸出、化学抽提与化学精炼、电解沉积及溶剂萃取	mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	0.5 <sup>2, 18</sup>
CO 及金属羰基化合物		mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	5 <sup>19</sup>
砷	铅与锌：化学精炼、电解沉积及溶剂萃取	mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	0.5 <sup>6</sup>
汞	各种金属/熔炼工艺	mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	0.02
氯化氢	铝：粗铝及再生铝生产过程中熔融金属的保温及脱气处理，物料预处理及再生铝的熔解与熔炼	mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	5 <sup>1</sup>
氟化氢		mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	0.5 <sup>10, 20</sup>
总氟化物	铝：粗铝电解、物料预处理，及再生铝的熔解与熔炼等工艺	mg/m <sup>3</sup> （在标准状态下）	0.8 <sup>10, 22</sup>
全氟碳氢化合物	铝：粗铝电解		0.1（阳极效应/池/天）



污染物	排放源（按金属类型/熔炼工艺确定）	单位	指导值
1. 碱式洗涤器（半干燥及纤维织物过滤器、湿式洗涤器或使用石灰、氢氧化镁、氢氧化钠的双碱系统）			
2. 钠或氧化铝/硫化铝与石灰复合系统联用			
3. 对于铜的熔炼工艺，采用加入石灰的纤维织物过滤器可使排放的 SO <sub>2</sub> 浓度控制在 500 mg/m <sup>3</sup> 以内			
4. 低氮氧化物燃烧器			
5. 氧气燃料燃烧器			
6. 氧化清洗器			
7. 除雾器			
8. 不包括铝的熔炼。			
9. 防范措施、冷凝器、碳及生物过滤器			
10. 纤维织物过滤器			
11. 温度控制			
12. 后燃烧			
13. 优化的燃烧技术			
14. 后燃烧器加淬火			
15. 活性炭吸附			
16. 氧化催化剂			
17. 酸式洗涤器			
18. 收集与再利用			
19. 工艺控制及密封的反应器			
20. 氧化铝洗涤器			
21. 不包括铝的熔炼			
22. 金属排放物由工艺产生的灰尘的所决定。成分各异，并受工艺中灰尘排放源及所加工的原材料影响			

资料来源：在一定程度上以欧洲有色金属行业（2001）\*最佳适用技术为依据。以连续监测、273 K 和 101.3 kPa 的标准条件、氧含量测定值以及未经空气稀释的干气体等条件为基准，计算出相关大气排放物的日平均排放值。在连续监测不可行的情况下，此值为取样期间的平均值。采用热清洗或高温分解系统（如切屑干燥与去膜）分解燃烧生成物时（如挥发性有机物和二噁英），氧气占干燥气体的 6%。

表 2 镍、铜、铅、锌及铝熔炼和精炼行业气体排放物

污染物	熔炼类型	单位	指导值
pH 值	全部	S.U.	6~9
总悬浮固体	全部	mg/L	20
化学需氧量	全部	mg/L	50
氟化物	铝	mg/L	5
碳氢化合物	铝	mg/L	5
铝	铝	mg/L	0.2
铜 (Cu)	铜	mg/L	0.1
铅 (Pb)	铜、铅及锌	mg/L	0.1
砷 (As)	铜、铅及锌	mg/L	0.05
镍 (Ni)	镍、铜	mg/L	0.1
镉	铜、铅及锌	mg/L	0.05
锌 (Zn)	铜、铅及锌	mg/L	0.2
汞 (Hg)	全部	mg/L	0.01
温升	全部	°C	<3 <sup>a</sup>
毒性		视具体情况而定	

资料来源：在一定程度上以欧洲有色金属行业最佳适用技术为依据。

a 按科学方法预测的混合区，考虑了周边水质、受体水源的用途、潜在受体及同化能力等因素。

表 3 能源消耗与水消耗

设备类型	能源消耗 (GJ/t) <sup>a</sup>
------	--------------------------



铜—以精矿为原料生产	14~20
铜—电解精炼	1.1~1.4
铝的生产	8~13.5
铝—初级生产（电解，包括阳极生产）	53~61
铝—竖炉，初级生产	6.8~10.3 <sup>b</sup>
铝—竖炉，二级生产	4.4~5.5 <sup>b</sup>
铝—转炉，二级生产，配备有 CX 系统和 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 生产系统	4.0~4.7 <sup>b</sup>
铝—QSL 法	2.3~3.5 <sup>b</sup>
铝—Kivcet 法	4.9 <sup>b</sup>
铝—顶吹转炉	4.0~4.4 <sup>b</sup>
锌—电解	15
锌—密闭鼓风炉及 New Jersey 蒸馏	44 <sup>b</sup>
锌—威尔兹回转窑	26 <sup>b, c</sup>
锌—炉渣烟化	7.7 <sup>b, d</sup>
镍—由含镍 4%~15%的硫化物矿产生的硫	25~65
镍—精炼	17~20
设备类型	水消耗 (kg/t)
铝的生产	1 000~6 000
铝—初级生产（电解，包括阳极生产）	200~12 000

资料来源：欧洲有色金属行业最佳适用技术

注释：

- a 亿焦耳 (10<sup>9</sup>焦耳) 每公吨
- b 以焦炭、煤炭、天然气用量、电力消耗，尤其是石油燃料的热值为计算依据
- c 以每浸出 1 t 威尔兹氧化物计算
- d 以每吨炉渣计算

## 2.2 职业健康与安全

### 职业健康与安全指南

职业健康与安全性能应按国际公认的接触风险指南进行评估，包括美国政府工业卫生学家会议 (ACGIH)<sup>1</sup> 发布的阈值 (TLV<sup>®</sup>) 职业性接触指南和生物接触限值 (BEI<sup>®</sup>)、美国职业安全健康研究所 (NIOSH)<sup>2</sup> 发布的危险化学品的袖珍指南、美国职业安全健康局 (OSHA)<sup>3</sup> 发布的允许接触限值 (PEL)、欧盟成员国<sup>4</sup> 发布的指示性职业接触限值以及其他类似资源。

### 事故率和死亡率

各种项目均应尽全力保证参与项目的工人（不管是直接雇佣或是间接雇佣的工人）的生产事故为零，尤其是那些会导致误工、不同等级残疾甚至死亡的事故。设备生产率可以参考相关

<sup>1</sup> 可登录 <http://www.acgih.org/TLV/> 和 <http://www.acgih.org/store/> 查询相关信息

<sup>2</sup> 可登录 <http://www.cdc.gov/niosh/npg/> 查询相关信息

<sup>3</sup> 可登录 [http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_table=STANDAR DS&p\\_id=9992](http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDAR DS&p_id=9992) 查询相关信息

<sup>4</sup> 可登录 [http://europe.osha.eu.int/good\\_practice/risks/ds/oel/](http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/) 查询相关信息



机构（如美国劳工部劳动统计局和英国健康与安全执行局）<sup>1</sup>发布的信息，按照发达国家的设备性能设定基准。

## 职业健康与安全监测

应当对工作环境进行监测，以发现特定项目的职业危险物。作为职业健康与安全监测项目的一部分，监测操作应当委派专业人员<sup>2</sup>制定并执行。管理者还应记录事故、疾病和危险事件。《通用EHS指南》中介绍了职业健康与安全监测项目的其他指南信息。

## 3 参考文献和其他资料来源

- [1] American Council of Government Industrial Hygienists (ACGIH). 2006. Threshold Limit Values (TLV) and Biological Exposure Indices (BEI). Cincinnati, OH. <http://www.acgih.org/TLV>.
- [2] Ayres, R. U., Ayres L W, Rade I. The Life Cycle of Copper its Co-Products and By-Products. Mining, Minerals and Sustainable Development Report, International Institute for Environment and Development (IIED). London: IIED, 2002. [http://www.iied.org/mmsd/mmsd\\_pdfs/ayres\\_lca\\_main.pdf](http://www.iied.org/mmsd/mmsd_pdfs/ayres_lca_main.pdf).
- [3] Bergsdahl, H., Stomman A H, E.G. Hertwich. The Aluminum Industry. Environment Technology and Production, 2004. [http://www.indecol.ntnu.no/indecolwebnew/publications/reports/rapport04/rapport8\\_04web.pdf](http://www.indecol.ntnu.no/indecolwebnew/publications/reports/rapport04/rapport8_04web.pdf).
- [4] Environment Canada. Environmental Code of Practice. Canadian Environmental Protection Act, 1999. Base Metals Smelters and Refineries. Document EPS 1/MM/11E. Gatineau, Québec: Environment Canada, 2006. <http://199.212.18.76/ceparegistry/documents/code/smelters/toc.cfm>.
- [5] European Agency for Safety and Health at Work (OSHA). Occupational Exposure Limits. Available at: [http://osha.europa.eu/good\\_practice/risks/ds/oe/](http://osha.europa.eu/good_practice/risks/ds/oe/).
- [6] European Commission. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). Reference Document on Best Available Techniques (BREF) in the Non-Ferrous Metals Industries. Seville: EIPPCB, 2001. <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>.
- [7] European Union. Directory of Community Legislation. EurLex. EU Council Directive 1999/30/EC of 22 April 1999 relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air. Brussels: EU, 1999. <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31999L0030:EN:HTML>.
- [8] Indian Central Pollution Control Board (CPCB). National Air Quality Monitoring Programme (NAMP). National Ambient Air Quality Standards. Delhi: CPCB. <http://www.cpcb.nic.in/as.htm>.
- [9] Indian Central Pollution Control Board, Environmental Standards, Inorganic Chemical Industry, Wastewater Standard. <http://www.cpcb.nic.in/index.php>.
- [10] International Finance Corporation (IFC) World Bank Group. Draft General Environmental Health and Safety

<sup>1</sup> 可登录 <http://www.bls.gov/iif/> 和 <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm> 获取相关信息

<sup>2</sup> 有合格资质的专家包括执证的工业卫生学家、注册职业卫生学家、执证安全专家或有同等资质的人员。



- Guidelines, 2006a. [http://www.ifc.org/ifcext/policyreview.nsf/Content/EHSGuidelinesUpdate\\_Comments](http://www.ifc.org/ifcext/policyreview.nsf/Content/EHSGuidelinesUpdate_Comments).
- [11] International Organization for Standardization (ISO). ISO 14001 Environmental Management Systems Standards. <http://www.iso.org/iso/en/stdsdevelopment/whowhenhow/how.html>.
- [12] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards. NIOSH Publication, 2005, 149. <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>.
- [13] Natural Resources Canada. Guide to Energy Efficiency Opportunities in Canadian Foundries. In Partnership with the Canadian Foundry Association, 2006. <http://oe.nrcan.gc.ca/cipec/ieep/newscentre/foundry/index.cfm?attr=24>.
- [14] The Nickel Institute. Lifecycle Assessment Data. Overall Inventories and Potential Impacts: Ferronickel, Nickel Oxide, and Class I Nickel. Last revised, 2003. [http://www.nickelinstitute.org/index.cfm?ci\\_id/317.htm](http://www.nickelinstitute.org/index.cfm?ci_id/317.htm).
- [15] Norgate, T E Rankin, W. J.. 'An Environmental Assessment of Lead and Zinc Production Processes', Proceedings, Green Processing 2002, International Conference on the Sustainable Processing of Minerals, May 2002: 177-184. [http://www.minerals.csiro.au/sd/CSIRO\\_Paper\\_LCA\\_PbZn.pdf](http://www.minerals.csiro.au/sd/CSIRO_Paper_LCA_PbZn.pdf).
- [16] Occupational Health and Safety Administration (OSHA). Standards – 29 CFR TABLE Z-1 Limits for Air Contaminants.-1910.1000 TABLE Z-1 Permissible Exposure Limits, 2006. [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).
- [17] Occupational Health and Safety Administration (OSHA). Occupational Health and Safety Administration System 18001 Occupational Health and Safety Management System. <http://www.ohsas-18001-occupationalhealth-and-safety.com>.
- [18] Price, L. Worrell, J.S., Sinton, J and J. Yun. Industrial energy efficiency policy in China. The Proceedings of the 2001 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry, 2001. <http://ies.lbl.gov/iespubs/50452.pdf>.
- [19] United Kingdom (UK) Department of Environment Food and Rural Affairs. The Air Quality Strategy for England, Scotland, Wales and Northern Ireland. January 2000. Working Together for Clean Air, 2000. <http://www.defra.gov.uk/environment/airquality/strategy/strategy.htm>
- [20] UK Health and Safety Executive. Health and Safety Commission. Health and Safety Statistics, 2006a. <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>.
- [21] UK Health and Safety Executive. Health and Safety Commission. Statistics of Fatal Injuries, 2006b. <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>.
- [22] United States(US)Department of Labor. Bureau of Statistics. Injuries, Illness and Fatalities Program. Table R8. Incidence rates for nonfatal occupational injuries and illnesses involving days away from work per 10,000 full-time workers by industry and selected events or exposures leading to injury or illness, 2003. <http://www.bls.gov/iif/oshwc/osh/case/ostb1386.pdf>.
- [23] United States(US) Environmental Protection Agency (EPA). Air Toxics. Final Rules. Emission Standards for Hazardous Air Pollutants. Washington, DC: US EPA, 2006a. <http://www.epa.gov/ttn/atw/mactfnlalph.html>.



- [24] US EPA. Proposed National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Area Sources: Polyvinyl Chloride & Copolymers Production, Primary Copper Smelting, Secondary Copper Smelting, & Primary Nonferrous Metals Zinc, Cadmium and Beryllium. Washington, DC: US EPA, 2006b. <http://www.epa.gov/ttn/atw/mactfnlalph.html>.
- [25] US EPA. Final Rule National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Primary Aluminum Reduction Plants: Final rule; amendments. Washington, DC: US EPA, 2005. <http://www.epa.gov/ttn/atw/alum/alumpg.html>.
- [26] US EPA. Final Rule. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Primary Copper Smelting-Final rule. Washington, DC: US EPA, 2002. <http://www.epa.gov/ttn/atw/copper/copperpg.html>.
- [27] US EPA. Federal Register Effluent Limitations Guidelines 40 CFR 125.30-125.32. Effluent Limitations Guidelines, Pretreatment Standards, and New Source Performance Standards for the Commercial Hazardous Waste Combustor Subcategory of the Waste Combustors Point Source Category. Washington, DC: US EPA, 2000. <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPAWATER/2000/January/Day-27/w2019.htm>.
- [28] US EPA. Final Rule. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants Primary Lead Smelting. Washington, DC: US EPA, 1999. <http://www.epa.gov/ttn/atw/leadp/leadppg.html>.
- [29] U.S. National Institute of Environmental Health Sciences. EMF Questions and Answers. EMF Rapid. Electric and Magnetic Fields Research and Public Information and Dissemination Program, 2002. <http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/booklet>.
- [30] World Health Organization (WHO). Air Quality Guidelines Global Update. Geneva: WHO, 2005. <http://www.euro.who.int/Document/E87950.pdf>
- [31] WHO. Air Quality Guidelines for Europe. 2nd Edition. Geneva: WHO, 2000. <http://www.euro.who.int/document/e71922.pdf>.

## 附录 A：行业生产活动概述

### 基本金属的熔炼和精炼

基本金属（铜、铅/锌和镍）<sup>1</sup>熔炼和精炼的工艺步骤基本相似，如图A1所示。本文附录介绍了铝的熔炼过程。根据矿石品级和类型（例如含硫化物的矿石或红土矿）的不同，矿渣中可能包含诸如金、银、镉、砷、硒等残余金属，可以将这些金属回收成为熔炼副产品。以下内容将对各个工艺步骤做简要描述：

#### 预处理

预处理包括：通过研磨和干燥浆化精矿及分选/分离废料，为后续处理提供进料。

#### 煅烧

煅烧是一个热熔炼过程。通过加热、干燥和氧化精矿，使含硫量达到一个最适合熔炼的值。

<sup>1</sup> 加拿大环境部—加拿大环境评价法，环境实用规程，基本金属熔炼及精炼。



不完全煅烧通常用于硫化铜镍预处理后进行硫熔炼，而完全煅烧可以去除硫并用于生产金属氧化物，方法如下：（1）用碳或一氧化碳还原；（2）在硫酸中浸析，然后使用电解沉积工艺。如果经济上可行，煅烧过程中释放的二氧化硫将作为硫酸或液态二氧化硫重新利用，或者在尾气处理中将二氧化硫去除。

## 熔炼

熔炼过程产生熔融的金属，通常采用熔解工艺从低品位金属和杂质中分离贵金属。熔炉中加入煅烧中形成的金属精矿、助熔剂、燃料和氧气，熔炉中发生燃烧及氧化反应，使得金属熔化并部分分离。熔融硫（铜、镍、锌）或条形的浓缩金属（铅）从熔炼过程生产出来。硫用于生产铸件，并可在进一步加工前进行冷却。工艺废气由熔炉通风管道或高空烟气罩收集，并经处理去除其中的二氧化硫、颗粒物、烟气等。熔渣通常需要处理回收其中的残余有价值的金属。

## 吹炼

吹炼用来去除铜镍硫中残余的硫和铁，也可处理高品位的废料金属。工艺气体经冷却后，用气体净化设备去除其中的颗粒物。吹炼可采用间歇式工艺，也可采用连续式工艺。连续炉体可以更好地收集工艺尾气，并可在吹炼中用氧气取代空气，从而使废气中二氧化硫浓度更高，并可收集后用于生产硫酸<sup>1</sup>。将熔融过程中产生的熔融硫（硫化铜-铁）送入熔炉中，熔融物在空气中被氧化，从而去除铁及硫等杂质（转化为炉渣）。炉渣中的氧化物可以撇去。把在吹炼过程中产生的富含铜、镍的炉渣回送到熔融工艺中，从中回收铜和镍。也可采用电弧炉处理炉渣回收镍，之后再排放炼渣。

## 火法或阳极精炼

粗铜在铸造或电解精炼之前，采用火法精炼除去其中的杂质，并减少其中硫和氧含量。粗铜通过进一步的精炼可获得火法精炼铜产品或者阳极铜（其纯度可达到 99.5%），这种铜可用在后续的电解精炼过程中。

火法精炼的方法是将熔化的粗铜置于火精炼熔炉中（熔化时可能会加入助熔剂），并向熔融物中鼓入空气，除去其中的杂质硫。但在熔融物中会有氧气残留，再通入天然气、丙烷、氨气或者木材来去除这部分氧气。火法精炼的铜可铸成阳极，利用电解法进一步提纯，也可直接成型出售。

## 电解精炼

电解精炼可用于铜、镍和铅的精炼生产中，由低纯度的金属生产高纯产品。待精炼金属作为阳极，在电解池中被分解为酸性水溶液中的电解质或者可溶性盐。在此工艺中纯金属电镀或者沉积于用作阴极的启动金属板上，而金属杂质则溶解于电解液中或沉淀出来（通常会形成淤泥）。电解精炼过程后形成的阳极残渣中会含有贵金属，需要回收重新利用，在阴极沉积的金属会被铸造成型。电解过程生成的不纯的电解液在去除多余杂质后回用于电解精炼工艺，对除

<sup>1</sup> 较易挥发的金属如锌和铅也可从废气中去除。



去的杂质进行深度处理回收其中的金属。

### **羰基精炼**

羰基精炼用于精炼粗制氧化镍。首先是将一氧化碳加入到粗制氧化镍中，在高压下，会形成羰基镍。羰基镍极易挥发，因而可挥发后从固体杂质中分离出来，然后从废气中回收羰基镍。再加热羰基镍，一氧化碳会释放出来并同时生成纯的镍粉或镍球。一氧化碳废气则被回收重复利用。

### **浸出**

浸出是在精炼和电解熔炼之前进行的，主要是用酸或其他溶剂从矿石或精矿中将金属分解出来。用于浸出的金属一般呈氧化态，硫矿石很少采用浸出的方法，主要是因为其所需的条件会促进氧化。所产生的浸出液经溶剂萃取并提纯后用于电解沉积和精炼。

### **电解沉积**

电解沉积用于铜和镍的精炼，同时还用于回收浸出工艺中溶于富集液的金属。浸出液经提纯后充入包含惰性阳极和触发阴极的电解池，施加电流，溶解的金属离子就会沉积在阴极。电解沉积过程中会生成氧气、酸雾和废电解液（被回用于浸出以再利用）。生成的阴极可直接出售，也可将其上的金属剥离用于铸造。

### **铸造**

在铸造工艺中，金属熔化后通过一个保温炉，进入连铸机。在连铸机中生产各种形状的金属。铸造或是连续的或是静态的。静态铸造使用一个轮形体，其中包含一系列模具，需要用水冷却。连续铸造工艺可用来生产金属丝。加热后的钢坯可挤压出生产管道，轧制成一定形状的预热的板坯和铸锭产生金属丝。固定压模铸造工艺用于制造钢锭。

### **铝的生产**

铝的生产开始于铝土矿的采掘和选矿。在采矿中，铝土矿被运到碎石机中粉碎产生碎石矿，然后对碎石矿进行筛选和储存，以备交付铝厂。某些情况下，需要对矿石进行精选（清洗、大小分类、液固分离），除去黏土和硅土等多余物质，以改善矿石的品质。

在铝厂中，铝土矿进一步被磨碎或碾碎成适当大小的颗粒，以利于通过热氢氧化钠热液消化法充分提取矿石中的铝。在除去工艺液体中的金属氧化物（即通常所说的红泥）和固体细颗粒的混合物后，从工艺液中析出三水合铝晶体，该晶体送入回转炉或流化床煅烧炉中煅烧，生成氧化铝。一些氧化铝的生产工艺中还包含一个液体纯化步骤。

粗铝采用氧化铝的电解法生产。熔融氧化铝溶解于冰晶石（ $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ）电解液中，向电解液中通入电流，可使氧化铝分解，在阴极形成液体铝，在阳极产生氧气。氧气然后与电极上的碳反应，生成二氧化碳及一氧化碳。熔融铝汇集于各电解槽或电解罐的底部并通过真空法吸出。该电解工艺通常大规模进行，用到很多串联连接的电解罐，并在工艺建筑物内产生强磁场。



生产再生铝的原材料是碎料、碎片和碎渣。多余杂质会影响铝产品质量、增加废气排放，需要通过粉碎、磁选、干燥等预处理步骤将其去除。再生铝生产的主要工艺是在盐覆盖的情况下在回转炉中进行熔化。该工艺可实现盐渣处理和再利用。通过感应熔炉或平底炉熔炼的其他生产工艺不需要盐或仅需要少量的盐，并且耗能低。然而，这样的工艺只适用于高品位的废料。有时某些其他的精炼步骤也是必要的，这取决于产品的具体用途。

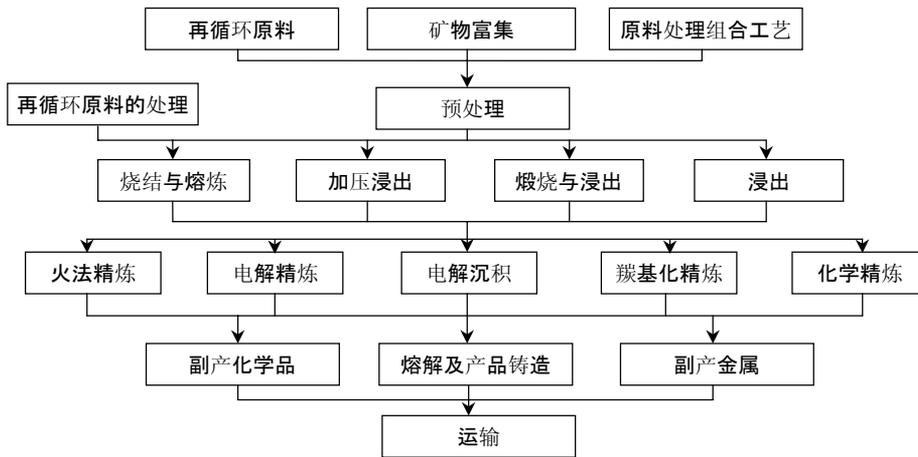


图 A.1 熔炼与精炼工艺模块