



环境统计

2025 年

目 录

第 1 章 环境统计基础知识.....	3
一、 统计和环境统计的涵义	3
二、 统计研究的对象	4
三、 环境统计的任务	6
四、 统计的法制建设	7
第 2 章 生态环境统计报表制度.....	9
一、 我国环境统计的发展历程	9
二、 “十四五”生态环境统计工作面临的主要问题	13
三、 生态环境统计调查制度	15
四、 生态环境管理统计调查制度	17
五、 环境统计分析	18
第 3 章 污染物排放统计.....	21
第 1 节 “三废”排放统计的基本计算方法.....	21
一、 污染源调查	21
二、 实测法	23
三、 物料衡算法	24
四、 排放系数法	26
第 2 节 废气污染排放统计	27
一、 燃料的消耗量	28
二、 燃料燃烧废气排放量的计算	31
三、 燃烧产生烟尘量的计量	33
四、 燃料燃烧过程中 SO ₂ 排放量	34
五、 燃料燃烧 NO _x 排放量的计算.....	35
六、 燃料燃烧 CO 排放量的计算	35
七、 生产工艺过程废气排放的计算	36
八、 露天焚烧垃圾废气排放系数	36
九、 交通废气排放量	37
十、 废气污染治理指标	37
第 3 节 废水排放统计	38
一、 用水总量	38
二、 废水排放统计指标	41
第 4 节 工业固体废物排放统计	45
一、 工业固废的分类	45
二、 工业固废的产生量	46
三、 工业固体废物综合利用量	51
四、 工业固体废物处置量	52
五、 工业固体废物贮存量	52
六、 工业固体废物排放量	53
第 5 节 环境噪声的计量	53
一、 环境噪声的评价	54
二、 等效声级	55
第 6 节 放射性污染统计	56
一、 放射性污染统计	56
二、 电磁辐射污染统计	57
第 7 节 小型工业企业污染和生活及其他污染统计.....	57
一、 分散、小型工业企业污染情况统计.....	57
二、 社会生活及其它污染统计	61

第 4 章 典型工业企业污染分析与统计	63
第 1 节 水泥工业污染和统计	63
一、水泥制造工业简介	63
二、新型干法水泥生产工艺	63
三、水泥生产排污节点分析	68
四、水泥制造行业的污染源环境管理	70
第 2 节 火电工业污染与统计	71
一、火电工业简介	71
二、火力发电生产工艺	71
三、火电企业的排污节点	76
四、相关政策、法律法规、技术标准与管理制度	84
第 3 节 钢铁工业污染与环境统计	85
一、钢铁工业简介	85
二、钢铁行业的生产工艺及子类行业	85
三、钢铁生产工艺排污节点分析	94
第 4 节 啤酒工业污染与环境统计	104
一、啤酒行业简介	104
二、啤酒行业生产工艺	104
三、啤酒行业排污节点	107
四、相关环境政策	111

第4章 典型工业企业污染分析与统计

第1节 水泥工业污染与环境统计

一、水泥制造业简介

水泥作为一种重要的胶凝材料，在现代社会的基础设施建设和工程领域中扮演着不可或缺的角色，其用途广泛且关键。在建筑工程领域，水泥是混凝土和砂浆的核心成分。交通建设方面，公路和高速公路的路面基层与面层常常采用水泥稳定碎石、水泥混凝土等材料。在水利工程中，水泥的抗渗性和耐久性使其成为关键材料。水泥以其优异的胶凝性能和广泛的适用性，成为现代工程建设中不可或缺的基础材料，为社会的发展和进步提供了坚实的物质保障。

我国水泥工业的主要污染物为颗粒物和有害气体，颗粒物主要是由于水泥生产过程中原料、燃料和水泥成品储运，物料的破碎、烘干、粉磨、煅烧等工序产生的废气排放或外逸而引起的。水泥生产对大气环境产生影响的有害气体主要是：二氧化硫（ SO_2 ）、氮氧化物（ NO_x ）、二氧化碳（ CO_2 ）、氟化氢（ HF ）等。水泥行业是继电力、机动车之后的氮氧化物第三大排放源，水泥行业属于窑炉行业，生产工艺上除了烧煤外，还要大量使用石灰石、铁粉、粘土。由于需要高温条件，水泥窑熟料烧成火焰温度高达 1700°C ，这也是水泥烧制过程中产生大量 NO_x 的主要原因。目前我国新型干法水泥窑 NO_x 的排放普遍在 $800\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以上。

由于生料制备煅烧的差别，生产方法可分为新型干法与立窑 2 种。水泥熟料煅烧主要有两种方式：一种是以回转窑为主要生产设备，包括新型干法窑、预热器窑、余热发电窑、干法中空窑、立波尔窑、湿法回转窑；另一种则是以立式窑为主要生产设备，包括普通立窑和机械化立窑。不同的水泥生产工艺与设备在规模效益、能源消耗、资源利用、污染排放等方面存在较大差别。到 2015 年底，经过节能减排和行业结构调整，我国新型干法生产水泥的比例已近 97.0%，立窑生产水泥的比例降至 3.0%。根据国家产业政策要求，窑径 2.5m 以下干法中空窑（生产高铝水泥的除外）、立波尔窑、湿法回转窑（主要用于处理污泥、电石渣等的除外）、窑径 3.0m 以下机械化立窑、普通立窑等近年来已逐步淘汰，水泥生产格局发生了显著变化。新型干法窑外预分解技术已成为我国水泥生产的主导工艺，海螺等一大批企业集团迅速成长，带领中国水泥工业向着大型化、集约化方向迈进，我国最大规模的新型干法水泥生产线日产熟料 1.2 万吨，已达到国际领先水平。

二、新型干法水泥生产工艺

水泥生产分为三个阶段：石灰质原料、粘土质原料与少量校正原料经破碎后，按一定比例配合、磨细并调配为成分合适、质量均匀的生料，这一过程称为生料制备；生料经预热器或预分解系统预热 / 分解后，在水泥窑内煅烧至部分熔融所得到的以硅酸钙为主要成分的水泥熟料，称为熟料煅烧；第三阶段为水泥粉磨，即熟料加入适量石膏，有时还有一些混合材料或外加剂共同磨细成为水泥成品。水泥在贮存时应进行检验，合格的水泥可以包装或散装出厂。

（一）水泥工业的原辅料

水泥熟料生产的原料主要包括钙质原料、硅铝质原料和铁质原料，辅料主要有石膏和混合材。

钙质原料主要有石灰石、电石渣等；硅铝质原料主要有砂岩、页岩、粘土、粉煤灰、煤矸石等；铁质原料主要指铁矿石、铁矿粉、硫酸渣等；混合材主要指粉煤灰、粒化高炉矿渣、火山灰质材料等。

(1) 原料

钙质原料：

石灰石：石灰石其主要成分是 CaCO_3 ，纯石灰石的 CaO 最高含量为 56%，其品位由 CaO 含量确定。有害成分为 MgO 、 K_2O 、 $(\text{Na}_2\text{O}、\text{K}_2\text{O})$ 和游离 SiO_2 。

电石渣：电石和水反应制取乙炔过程中排出的浅灰色细粒渣，主要成分：氢氧化钙。

硅铝质原料：

页岩：页岩是一种沉积岩，由黏土物质硬化形成的易碎裂的岩层，成分复杂，除粘土矿物（如高岭石、蒙脱石、水云母等）外，还含有碎屑矿物（石英、长石、云母等）和自生矿物（铁、铝、锰的氧化物与氢氧化物等）形成具有薄页状层理结构的粘土岩。

砂岩：砂岩由石英颗粒（沙子）形成，通常呈淡褐色或红色，主要含硅、钙、黏土和氧化铁。主要成份石英（成份占 52% 以上）；粘土（占 15% 左右）；针铁矿（占 18% 左右）；其它物质（占 10% 以上）。

粘土：一般的粘土都由硅酸盐矿物在地球表面风化后形成。一般在原地风化，颗粒较大而成分接近原来的石块的，称为原生黏土或者是一次黏土。这种黏土的成分主要为氧化硅与氧化铝。

粉煤灰：粉煤灰是煤燃烧后的烟气中收捕下来的细灰，是燃煤电厂排出的主要固体废物。我国火电厂粉煤灰的主要氧化物组成为： SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 TiO_2 等。

煤矸石：是采煤过程和洗煤过程中排放的固体废物，是一种在成煤过程中与煤层伴生的一种含碳量较低、比煤坚硬的黑灰色岩石。其主要成分是 Al_2O_3 、 SiO_2 ，另外还含有数量不等的 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 、 SO_3 和微量稀有元素（镓、钒、钛、钼）。

铁质原料：

铁矿石：铁矿物种类繁多，主要有磁铁矿（主要成分为 Fe_3O_4 ）、赤铁矿（主要成分为 Fe_2O_3 ）、菱铁矿（主要成分为 FeCO_3 ）等。

硫酸渣：硫酸渣又称黄铁矿烘渣或烧渣。是一种用黄铁矿制造硫酸或亚硫酸过程中排出的化工废渣。主要化学成分 Fe_2O_3 (20-50%)， SiO_2 (15-65%)， Al_2O_3 (10%)， CaO (5%)， MgO (<5%)， S (1-2%)，一般还含有 Cu 、 Co 等。

(2) 辅料

石膏：石膏是一种矿物名，主要化学成分是硫酸钙（ CaSO_4 ）。

粉煤灰见硅铝质原料中的粉煤灰。

粒化高炉矿渣：在高炉冶炼生铁时，所得以硅酸盐与硅铝酸盐为主要成分的熔融物，经淬冷成粒后，即为粒化高炉矿渣。

火山灰质材料：火山灰质混合材是天然的及人工的以氧化硅、氧化铝为主要成分的矿物质原料。它磨成细粉加水后并不硬化，但与石灰混合后再加水拌和，则不但能在空气中硬化，而且能在水中继续硬化。

表4.1 水泥工业原辅料消耗表

生料	水泥
100%	100%

石灰石	黏土	铁粉	熟料	石膏	混合材
80%	18%	2%	75%	5%	20%

(3) 产品

从水泥行业的产品有三种，由生料经制备、焙烧成熟料产品；由生料制备、焙烧、磨配成水泥产品；由熟料磨配成水泥产品。不同的水泥产品的原料、生产工艺流程、能耗均有差异，因此单位产品的产排污强度不尽相同。

(4) 能耗和水耗

能耗：

与新型干法水泥相比，小立窑、湿法窑等落后工艺能耗高。水泥熟料煅烧过程需要较高的煅烧温度，消耗大量的天然能源—煤炭，每生产 1t 水泥熟料约消耗 120kg 标煤，单位热耗与其他工艺相比有明显优势。

下表是各种水泥生产工艺单位煤耗的对比。

表4.2 全国水泥行业各类窑型平均煤耗

生产方法	熟料标准煤耗 Kg标煤/t	熟料煤耗折原煤Kg	
		原煤/t	(原煤热值 20934千焦/t)
新型干法窑	115	161	
立窑	160	224	
中空干法窑	186	260	
湿法旋窑	200	280	

注：数据参照袁文献等著《水泥生产工艺和规模与单位产品废气排放量的关系探讨》（《水泥》2005年第4期）和《水泥工业发展专项规划》

表4.3 水泥生产各工艺过程的电力消耗

工艺过程	单位水泥电耗 kwh/t	占电力总消耗比例%
原料开采	3.6	3.96
生料制备	27.3	24.8
生料煅烧	25.6	23.3
熟料磨配、包装、运输	42.0	38.2
其他	11.5	10.5
总计	110.00	100

注：数据摘自《水泥工艺网》

水耗：

综合水耗立窑约为 0.15m³/t 熟料，新型干法约为 0.08~0.1m³/t 熟料，粉磨站约为 0.05m³/t 水泥。

(二) 新型干法水泥工艺流程

新型干法水泥生产技术是目前主流的水泥生产工艺，以悬浮预热、窑外分解技术为核心，具有能耗低、效率高、环保性好、自动化程度高等优势。其工艺流程可分为原料制备、生料粉磨与均化、预热分解、熟料煅烧、熟料冷却、水泥粉磨六大核心环节，辅以燃料制备、废气处理等辅助系统，形成完整的生产链。

典型的新型干法水泥生产工艺流程见图 8.1 所示。

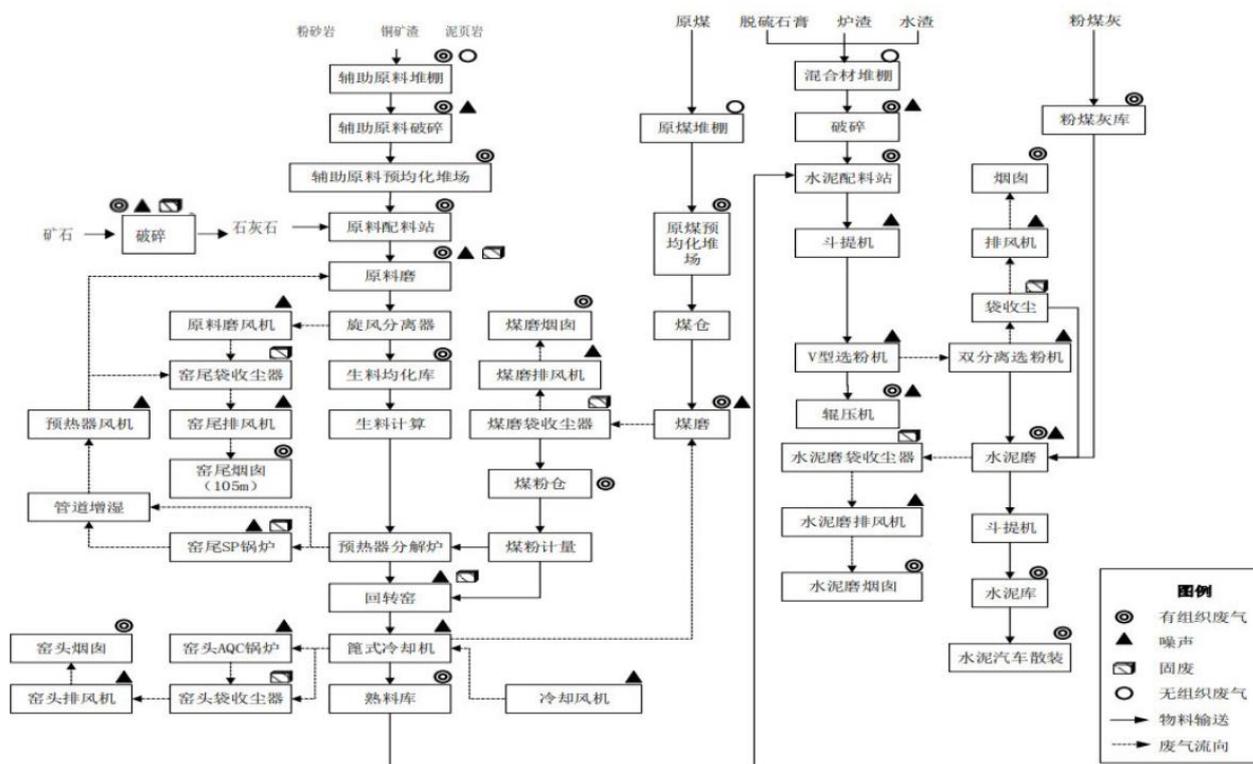


图 4.1 新型干法水泥典型生产工艺流程

1. 生料制备

(1) 破碎工艺

将石灰石通过破碎机进行一次和二次破碎，碎成 20 毫米石块，常用的破碎设备有锤式、颚式、反击式、冲击式、辊式、圆锥式破碎机等。为了提高粉磨效率，通常在磨机上加选粉设备，即将开路磨机改为闭路磨机，破碎废气会产生粉尘污染。

(2) 预均化工艺

石灰石的储存多采用长形或圆形预均化堆场，粘土或砂岩的储存多采用长形堆场，由程序自动控制堆料机和取料机根据物料的特性进行作业，均化效果好，成份稳定，并有效控制了生料储存和均化过程产生的无组织粉尘的排放，以粉尘浓度为主。

(3) 烘干工艺

将生料通过烘干机加热干燥（中空干法需要烘干，其他旋窑主要对煤烘干），烘干设备有回转式和悬浮式烘干机、烘干塔等，回转式烘干机内温度约 700℃，排放废气量约 1300m³/t 料。一般水泥厂采用的烘干方法有磨外烘干和磨内烘干两种。烘干设备有两种，一种是烘干兼粉磨的磨机，如循环提升磨、风扫式磨、立式磨，这种磨机能同时进行烘干与粉磨；另一种是采用单独燃烧室（热风炉）的烘干设备。烘干设备产生的粉尘浓度较高。

现在许多新型干法水泥生产多采用窑磨一体化的烘干方式，不仅节约了燃煤，还减少了废气排放量。

(4) 生料粉磨

主要有球磨、管磨、立式磨和烘干与研磨同时进行的中间卸料磨等。分别通过生料磨和煤磨将混合料和煤磨成粒径在几十 μm 的粉料。生料磨制分干法和湿法两种。干法磨制一般采用闭路操作系统，即原料经磨机磨细后，进入选粉机分选，粗粉回流入磨再行粉磨的操作，并且多数采用物料在磨机内同时烘干并

粉磨的工艺，所用设备有管磨、中卸磨及辊式磨等。湿法磨制通常采用管磨、棒球磨等一次通过磨机不再回流的开路系统，但也有采用带分级机或弧形筛的闭路系统的。粉磨和煤磨经选粉后的废气量约 $800\text{m}^3/\text{t}$ 料，粉磨选粉后产尘浓度一般在 $20\sim 30\text{g}/\text{m}^3$ ，煤磨选粉后产尘浓度一般在 $60\text{g}/\text{m}^3$ 。绝大多数的熟料加工企业都利用焙烧工艺的废气余热进行烘干物料，既降低了烘干燃煤能耗，又减少了烘干烟气量，许多企业实现了窑磨一体化。

(5) 生料粉均化

来自生料磨的生料粉，经提升机送入库顶，经物料分配器后，均匀进入斜槽输送入库。均化库中有一中心室，位于库底六个出料口，每次不少于二个出料口出料，中心室底部充气，式混合后生料再次混合，达到粉料的均化作用。均化后生料经计量后，由窑尾提升机和锁风装置，喂入预热器。

(6) 煤粉制备

进场的原煤堆存在煤棚，经预均化推送进皮带输送机、提升机入煤仓，再喂入煤磨机进行烘干和粉磨，磨后的煤粉进入旋风分离器收集，再送入煤粉仓，废气净化后排放，煤粉经计量后由风机将 40% 的煤粉送入窑头，60% 的煤粉送入预分解炉。烘干的热源多采用篦冷机热风。

2. 熟料煨烧

(1) 新型干法旋窑煨烧

核心是水泥熟料煨烧的窑外预分解技术，它是在悬浮预热技术的基础上发展起来的，不同型式的分解炉与各种预热器组成了不同类型的窑外分解系统。与在回转窑内完成预热、分解、烧成多个过程的传统工艺相比，它将熟料煨烧过程变成为在两套独立的设备内进行的两阶段操作：即在悬浮预热器和分解炉内完成生料预热和石灰石分解 ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, 900°C)；在回转窑内高温条件下 ($1400\sim 1500^\circ\text{C}$) 完成熟料烧成 (形成硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙等)。由于在分解炉内引入第二热源 (使用约 60% 的燃料)，降低了烧成带热负荷，提高了回转窑运转率和生产能力，同时也使能源消耗、污染物 (特别是 NO_x 、 SO_2) 排放大大降低。产生的废气量约 $3400\text{m}^3/\text{t}$ 熟料，窑尾粉尘浓度 $60\text{g}/\text{m}^3$ ，窑头冷却 (一般采用篦冷机) 废气粉尘浓度也在 $60\text{g}/\text{m}^3$ 以上。

(2) 立窑煨烧

立窑是静止的竖窑，分普通立窑和机械立窑，属半干法生产。立窑是先将生料与煤混合粉磨制成小于 20mg 的料球，由立窑上部加入窑内。料球在窑内被预热烘干，被煤粉烧成熟料。烧好的熟料由底部经卸料篦子卸出。冷风将熟料冷却，本身也得到预热，到高温区供料球中的煤粉燃烧用，废气由窑顶排出。立窑的直径以前 $1.7\sim 2.5\text{m}$ ，现在扩大到 $2.5\sim 3.2\text{m}$ ，高 $8\sim 11\text{m}$ ，立窑的日产量已达 $250\sim 300\text{t}/\text{d}$ 。普通立窑采用间歇式生产，能耗热耗较高，产生的废气量约 $3900\text{m}^3/\text{t}$ 熟料，粉尘浓度 $13\text{g}/\text{m}^3$ 。

(3) 熟料冷却

高温熟料从窑口自然落入篦床，通过篦板推动后移，鼓风机由下鼓入冷空气冷却熟料，再经破碎机破碎至 $\leq 25\text{mm}$ 后落入输送机。热交换后的热风可作为二次风入窑，三次风入分解炉及作为生料或煤粉烘干的热风，其余废气经除尘后经排气筒排放。

(4) 熟料库

出篦冷机的熟料与篦冷机回收的粉尘经封闭的链斗输送机送至熟料库贮存，外运的熟料装车运输，冷却后的水泥熟料经输送机送往熟料库贮存。

3. 水泥配磨包装

(1) 水泥配磨

熟料、混合材和石膏有输送系统分别送入配料库，经过计量，按比例送入辊压机、水泥磨进行配磨。辊压机、水泥磨产生的废气均需安装高效除尘器，保证排放达标。经水泥磨磨配后的水泥由末尾提升机提入水泥库。

(2) 储存包装

水泥库为圆形筒仓，仓顶有除尘器，库底可卸出水泥。如卸入水泥槽车运出厂，属于水泥散装出厂；如采用包装机装袋，堆存，并通过输送机装车运输，属于袋装出厂。

1t 袋装水泥包装运输，排放粉尘 4.48kg，其中水泥粉尘 3.96kg。散装水泥采用机械化密闭运储，改善劳动条件，净化环境，保障工人身体健康。使用相同散装水泥，排放粉尘 0.28kg，其中水泥粉尘仅 0.13kg。

(三) 水泥生产企业的主要生产设备

表4.4 水泥企业主要生产设备

项 目	设备（设施）名称
备料系统	装载机、皮带输送机、运输车辆、预均化库、粘土堆棚、煤堆棚、铁质原料堆棚、配料库、石膏库等
生料制备系统	破碎机、磨机（辊式、球磨、立磨）、链板输送机、斗式提升机、皮带输送机、贮料仓、配料库、均化库、生料库、除尘器
熟料煅烧系统	预热器、新型干法旋窑、分解炉、篦式冷却机、破碎机、熟料库、输送机（拉链式、链斗式）、烘干机、风机、除尘器、低氮燃烧器
水泥配磨系统	配料库、辊压系统、水泥粉磨、除尘器、水泥库
水泥储运系统	水泥库（罐）、袋装水泥库、水泥槽罐车、包装机、水泥运输车辆、输送机（皮带、拉链式、链斗式）
其它生产辅助设施	氨水罐区、脱硝装置、污水处理厂、余热发电站

三、水泥生产排污节点分析

水泥生产企业排污节点：水泥工业的环境污染因素中，大气污染十分突出；水污染较小，也可以回用；水泥生产的固体废物主要是回收的粉尘，基本都会被水泥厂综合利用；水泥设施的环境噪声一般都比较高，对周围环境的噪声影响较大。

水泥生产的特点为物料处理量大，粉状物料或成品输送环节多。在物料破碎、输送、粉磨、煅烧、包装、储存等环节中，几乎每道工序都伴随着粉尘的产生和排放。产生的粉尘类型主要有：(1)原料粉尘；(2)煤粉尘；(3)水泥窑粉尘；(4)熟料粉尘；(5)水泥粉尘。粉尘的排放方式分为有组织排放和无组织排放两大类。有组织排放包括从热力设备烟囱和各种通风设备排气筒排放的粉尘。无组织排放包括各种物料在装卸、运输、堆存过程中自由散发出来的粉尘。粉尘最大的排放源为窑尾废气，其次是窑头废气。SO₂、NO_x等产生于熟料煅烧过程，由窑尾烟囱排入大气。

表4.5 水泥生产企业的排污节点说明

生产设施	污染产生原因	排污节点和主要环境因素	控制措施
------	--------	-------------	------

备料系统	运料车、装载机、皮带输送机、预均化库（或料库）、配料库和堆棚	通过运料车和皮带输送机将石灰石、粘土原料、煤炭、铁质原料、配料运至预均化库、配料库和堆棚，原辅料堆场都应设筒仓或封闭式棚仓；	原料、煤炭、配料在运料、卸料、堆料、上料、储料都会产生粉尘、煤尘污染；原料、煤炭、配料装卸会因遗撒、扬散产生尘污染；运输车辆和装载机机械会产生噪声	皮带输送机应设封闭防尘廊道；应加强预均化库、棚库、堆棚、配料库的封闭性，减少无组织粉尘排放；装卸应减少遗撒；库棚和道路如有遗撒及时收集以防扬尘
生料制备系统	破碎机、磨机（辊式、球磨、立磨）、链板输送机、斗式提升机、皮带输送机、贮料仓、配料库、均化库、生料库、除尘器	破碎机、磨机、配料库、均化库、生料库进出口、排气口会产生粉尘污染；输送机、提升机在推动物料移动过程会产生扬尘；磨机需冲洗；除尘器收集尘灰；破碎机、磨机工作产生噪声	破碎机、磨机、配料库、均化库、生料库会产生含尘有组织废气；破碎机、磨机、配料库、均化库、生料库进出口，输送机、提升机工作过程会产生扬尘泄漏；产生磨机冲洗废水；除尘器产生固废尘灰；破碎机、磨机等产生较强噪声	破碎机、磨机、配料库、均化库、生料库排气口应装置袋式除尘器，进出口应加强密闭措施，减少废气泄漏；通过皮带输送机上料和出料时产生无组织粉尘；磨机冲洗废水进污水厂；除尘器尘灰回用；破碎机、磨机应采取一定降噪措施
熟料煅烧系统	预热器、新型干法旋窑、分解炉、篦式冷却机、破碎机、熟料库、输送机（拉链式、链斗式）、烘干机、风机、除尘器、低氮燃烧器	窑头、窑尾、篦式冷却机、烘干机产生燃烧烟气；破碎机、熟料库进出口、排气口产生含尘废气；输送机、提升机输送物料产生含尘废气；除尘器收集尘灰；窑头、窑尾废气排放设自动监控 风机等设备工作产生噪声	窑头、窑尾、篦式冷却机、烘干机产生燃烧烟气主要污染物烟尘、SO ₂ 、NO _x 、氟化物、CO ₂ 等；破碎机、熟料库排气口产生有组织含尘废气；输送机、提升机、破碎机、熟料库进出口产生无组织含尘废气；产生冷却废水，主要污染物SS；除尘器产生固废尘灰；风机、破碎机等设备产生较强机械噪声	窑头、窑尾、篦式冷却机、烘干机、破碎机、熟料库收集外排废气应除尘，水泥旋窑应对废气采取脱硝措施；记录和检查窑头、窑尾废气排放的自动监控数据；并定期校验 破碎机、熟料库排气口应装袋式除尘器；输送机、提升机、破碎机、熟料库进出口应加强封闭防扬尘措施；氨水在运输、卸车、使用应严格控制氨气泄漏；除尘器尘灰回用；冷却废水应经过处理回用；风机、破碎机应采取降噪措施
水泥配磨系统	配料库、辊压系统、水泥粉磨、除尘器、水泥库、输送机	配料库、水泥粉磨、水泥库排气口产生含尘废气；配料库、水泥库、辊压系统、水泥粉磨进出口、输送机产生无组织废气排放；除尘器收集尘灰；磨机需冲洗；水泥粉磨等设备工作产生噪声	配料库、水泥粉磨、水泥库排气口排放粉尘（有组织）；配料库、水泥库、辊压系统、水泥粉磨进出口、输送机产生无组织扬尘排放；除尘器产生固废尘灰；产生磨机冲洗废水；水泥粉磨等设备产生较强机械噪声	配料库、水泥粉磨、水泥库排气口应设袋式除尘器；配料库、水泥库、辊压系统、水泥粉磨进出口、输送机应加强密闭措施，降低扬尘；除尘器尘灰回用；磨机冲洗废水进污水厂；水泥粉磨等设备应采取降噪措施
水泥储运系统	水泥库（罐）、袋装水泥库、水泥槽罐车、包装机、水泥运输车辆、输送机（皮带、拉链式、链斗式）	水泥库（罐）排气口产生废气（有组织）；水泥槽罐车、包装机、水泥运输车辆、输送机产生无组织扬尘；除尘器收集尘灰	水泥库（罐）排气口排放粉尘（有组织）；水泥槽罐车、包装机、水泥运输车辆、输送机产生无组织扬尘排放；除尘器产生固废尘灰	水泥库（罐）排气口应设袋式除尘器；包装机应加强集气措施；水泥槽罐车、水泥运输车辆在装车时减少遗撒，水泥库区应及时清扫以撒的水泥，减少运输扬尘；除尘器尘灰回用
辅助工段	氨水罐区	氨水罐在卸氨水、输送氨水过程产生泄漏	氨水在运输、卸车、使用过程中产生氨气泄漏	严格氨水进出料的台账管理，设备维护管理，风险防范管理
	脱硝装置	脱硝装置在运行时，消耗氨水或尿素	脱硝装置运行和氨氧化物排放有自动监控	记录和检查脱硝装置运行的自动监控数据；并定期校验
	机修车间	废水；机修车间地面的雨水会产生含油废水。产生清洗零件或车辆的废水 固体废物：机修车间产生的废机油和含油废棉纱等固体废物	含油废水含污染物 SS、COD、石油类等。 机修车间产生的废机油和含油废棉纱，属于危险废物	机修车间地面的雨水应事先雨污分流，污染的雨水和机修生产废水应收集经隔油、沉淀进入污水处理系统，以防含油废水进入雨水系统。 机修车间产生的废机油和含油废棉纱应符合危险废物的收集、贮存、转移运输的管理要求
	污水处理厂	来自旋窑冷却废水、磨机冲洗	废水主要污染物 SS、COD、	废水经处理水质达到回用水标准后，

	废水、地面冲洗废水、办公区生活废水	BOD ₅ 、总氮； 废水处理产生污泥	主要回用于厂区生产和生产循环冷却水以及设备喷水部分补充 污泥回用
厂区环境管理	保持地面整洁； 进行雨水的清污分流	车辆运输产生扬尘； 地面的雨水会将含地面的灰渣冲走，产生污水	厂区积水与雨水收集进行清污分流； 厂区和道路及时清扫运输车辆遗洒， 道路应经常洒水降尘

四、水泥制造行业的污染源环境管理

以河北省为例，对于水泥制造行业相关的政策与环境标准如下（部分）。

（一）产业政策

《河北省水泥产业结构调整方案》（2013-2017 阶段），提出“6643”工程目标：到 2017 年累计压减水泥产能 6000 万吨以上。空间布局：燕山-太行山带优化提升，环首都圈、环省会圈有序退出。路径：环保、能耗、质量、技术等六项强制性标准倒逼，配合财政资金奖补和产能置换。

《河北省水泥工业节能减排实施意见》（冀工信原〔2020〕381 号），总量控制：不再备案新增熟料产能；新建项目必须采用国际、国内先进技术工艺。淘汰落后：2012 年底前已淘汰窑径 3.0 m 以下机立窑等落后产能；后续按年度滚动目录继续退出。能效对标：吨水泥综合能耗 ≤ 93 kgce；规模 ≥ 2000 t/d 的新型干法窑脱硝效率 $\geq 70\%$ 。清洁生产：2015 年底前全部企业达到清洁生产企业水平；重点企业要达“清洁生产先进企业”。综合利用：鼓励利用水泥窑协同处置污泥、生活垃圾及工业废渣。

《支持重点行业和重点设施超低排放改造（深度治理）的若干措施》（河北省政府办公厅，2020），完成超低排放改造并稳定达标的水泥企业：应税大气污染物排放浓度 $<$ 标准 30% 的，环保税减按 75% 征收； $< 50\%$ 的减按 50% 征收。优先纳入省级“千项技改”专项和工业转型升级资金支持范围。《关于推进全省重点行业环保绩效创 A 的实施意见》（2022 年省委常委会审议通过），2023-2025 年推动水泥行业创建环保绩效 A 级企业；达到 A 级者在重污染天气期间可自主减排。

产业政策文件重点把握“产能置换、退出目录、奖补资金、绩效创 A”四条主线；环境管理以 DB13/2167-2020 为底线，以《水泥创 A 标准》为升级目标；新建、改建项目还需同时满足《水泥行业准入条件》（工信部原〔2010〕第 127 号）及最新版《建设项目环境准入负面清单》要求。

（二）环境标准类（现行地方标准）

《水泥工业大气污染物超低排放标准》DB13/2167-2020，适用范围：现有及新建、改建、扩建水泥工业企业或生产设施。

主要排放限值（基准氧含量 10%）：颗粒物：10 mg/m³（窑尾）；SO₂：30 mg/m³（窑尾）；NO_x：100 mg/m³（窑尾）。实施时间：新建企业 2020-05-01 起执行；现有企业 2021-10-01 起执行。

《河北省重点行业环保绩效 A 级标准 水泥行业（试行）》（2023 年发布），在 DB13/2167-2020 基础上进一步收紧：SO₂：20 mg/m³（窑尾）；NO_x：50 mg/m³（窑尾）。

另对无组织排放、清洁运输、数字化监测、节能降碳等提出 8 大类细化要求。

配套监测与执法要求：所有水泥熟料生产线须安装烟气在线监控（CEMS）并与生态环境部门联网。对完成超低排放并稳定运行的企业，实施差异化环保执法（以非现场监管为主）。

（三）水泥制造行业的环境统计

对于水泥企业的环境统计工作而言，可以采用本书前述的三种方法，但更为多用的是监测和系数法，系数法中排放因子的确定，参见我国第二次污染普查中的“301 水泥、石灰和石膏制造行业系数手册”相应

内容。

第2节 火电工业污染与统计

一、火电工业简介

火力发电是利用可燃物（如煤炭、石油、天然气等）燃烧产生的热能，通过发电动力装置转换成电能的发电方式，是我国电力工业的重要组成部分。据智研咨询数据，2023 年我国火力发电累计装机容量达 139032 万千瓦，2024 年 1-11 月，这一数字增长至 143426 万千瓦，同比增长 4%。在发电量方面，2023 年我国火电发电量达 6.23 万亿千瓦时，占全社会发电量的 70%，2024 年火力发电贡献了全国 67.36% 的发电量，约 6.3 万亿度电。从结构来看，2023 年我国火力发电以煤电为主，占比达 90.16%，气电为辅，占比为 9.04%。虽然近年来新能源装机容量不断攀升，但火电在保障电力供应、调节电网稳定等方面依旧发挥着不可替代的关键作用。

我国能源结构中化石能源比重偏高，煤炭消费比重高达 66%，比世界平均水平高 35.8 个百分点远远高于其他国家；发电量中煤电比例为 75。我国“富煤、缺油、少气”的能源结构决定了在能源消费结构中煤炭将长期占据核心地位。我国电力结构中，利用燃煤发电一直是我国电源的主力。我国火电行业消耗如此大量的煤炭，对大气环境的影响巨大。煤烟型污染是大气污染的重要特征。在节能减排中火电行业一直是工业行业中大气主要污染物指标排放量居首位的行业，因此对有发电设施的企业和各级环保部门来说，火电行业的污染管理工作都是极为重要的。我国是原煤生产和消费大国，但原煤在中国一次能源消费中，从 2014 年的 65.6%，降低到 2015 年的 63.7%。如此之高的燃煤比例，必然会带来环境问题，而要对电力行业进行环境统计等相关的工作，就必须对其生产工艺有一定的了解。

二、火力发电生产工艺

（一）火电厂的分类

火电厂类型，以煤、石油或天然气作为燃料的发电厂统称为火电厂；除上述燃料外，还有垃圾、煤矸石等为燃料的火电厂。

1. 按燃料分类：

①燃煤发电厂，即以煤作为燃料的发电厂；②燃油发电厂，即以石油（实际是提取汽油、煤油、柴油后的渣油）为燃料的发电厂；③燃气发电厂，即以天然气、煤气等可燃气体为燃料的发电厂；④余热发电厂，即用工业企业的各种余热进行发电的发电厂。此外还有利用垃圾及工业废料作燃料的发电厂；

2. 按原动机分类：

凝汽式汽轮机发电厂、燃汽轮机发电厂、内燃机发电厂和蒸汽-燃汽轮机发电厂等。燃煤电厂按其功能分为凝汽式电厂和热电厂。两者生产工艺流程基本相同，只是热效率的利用途径有差别。前者安装凝汽式机组，仅向外界供应电能；后者安装供热机组，除供电外，还向用户供应蒸汽和热水。

凝汽式汽轮机做功后的蒸汽基本全部进入凝气器，存在冷源损失。热电汽轮机做功后的蒸汽部分对外

供热，部分进入凝气器，循环热效率提高。

3. 按供出能源分类：

汽式发电厂，即只向外供应电能的电厂；热电厂，即同时向外供应电能和热能的电厂。

4. 按发电厂总装机容量的多少分类：

小容量发电厂，其装机总容量在 100MW 以下的发电厂；容量发电厂，其装机总容量在 100~250MW 范围内的发电厂；中容量发电厂，其装机总容量在 250~600MW 范围内的发电厂；容量发电厂，其装机总容量在 600~1000MW 范围内的发电厂；大容量发电厂，其装机容量在 1000MW 及以上的发电厂。

5. 按蒸汽压力和温度分类：

①中低压发电厂，其蒸汽压力在 3.92MPa(40kgf/cm²)、温度为 450°C 的发电厂，单机功率小于 25MW；地方热电厂；②高压发电厂，其蒸汽压力一般为 9.9MPa(101kgf/cm²)、温度为 540°C 的发电厂，单机功率小于 100MW；③超高压发电厂，其蒸汽压力一般为 13.83MPa(141kgf/cm²)、温度为 540 / 540°C 的发电厂，单机功率小于 200MW；④亚临界压力发电厂，其蒸汽压力一般为 16.77MPa(171 kgf/cm²)、温度为 540 / 540°C 的发电厂，单机功率为 300MW 直至 1000MW 不等；⑤超临界压力发电厂，其蒸汽压力大于 22.11MPa(225.6kgf/cm²)、温度为 550 / 550°C 的发电厂，机组功率为 600MW 及以上。

6. 按供电范围分类：

①区域性发电厂，在电网内运行，承担一定区域性供电的大中型发电厂；②孤立发电厂，是不并入电网内，单独运行的发电厂；③自备发电厂，由大型企业自己建造，主要供本单位用电的发电厂（一般也与电网相连）。

火电厂的种类虽很多，但从能量转换的观点分析，其生产过程却是基本相同的，概括地说是把燃料(煤)中含有的化学能转变为电能的过程。整个生产过程可分为三个阶段。

(二) 火电工业的原辅料

火电行业使用的原料主要是发电用燃料，我国 2014 年工业行业能效分析显示，我国电力行业平均能耗结构为燃油占 1.8%、电能占 5.3%、燃气占 4.4%、燃煤占 87.9%。火电行业燃料主要为燃煤、燃气、燃油，燃煤火电行业燃料消耗的 91.95%。

【燃煤】：单位发电量消耗的燃煤量与机组水平有关（热电效率）还与原煤热值有关。

【燃油】：电厂用重油主要是石油蒸馏后的残油（包括直馏渣油、裂化残油）和焦化残余的焦油，主要用于工业燃料。成分主要含碳 85%~90%、含氢 10%~12%、含灰分 0.3%、含硫 1%~3%，含氮 0.3%~1%。燃烧时产生烟尘、SO₂、NO_x 等污染物。

重油和原油中的硫在燃烧时几乎全部转化为 SO₂，氮在燃烧时 20%~40% 转化为 NO_x。

【燃气】：天然气是从地下天然生产出来的可燃气体，成分随产地有所差异，可燃成分主要是 CH₄。

天然气的比重约 0.6~0.7kg/m³，发热值约 37600~46000kJ/m³。天然气具有发热值高，不含硫分，不含 CO 等特性。天然气中的硫分，可分为无机硫和有机硫两类。无机硫分只有 H₂S，有机硫分有硫醇、硫醚、二硫醚、二硫化碳、硫酚等。我国高含硫天然气田(含硫 2%~4%)气产量占全国天然气产量的 60%。根据机组容量大小，一立方米天然气可发 3.0—3.6 度电，故 1 兆瓦电量需要消耗天然气 280—330 立方米。

辅料：

【水】：火电行业的水耗分装机水耗和发电水耗。火电发电用水量的绝大部分是用于冷却，因此与机

组的冷却方式有直接关系。

【石灰石】（脱硫剂）：主要用于脱硫剂。我国目前采用的烟气脱硫技术，主要是湿式石灰石-石膏法工艺和设备。如果石灰石的纯度在 90~95%，钙硫比 1.05~1.07，脱除 1kgSO₂ 需消耗 1.757~1.820kg 石灰石。湿式石灰石-石膏法设备每处理 1t SO₂ 就会产生脱硫石膏 2.7t。

【脱硝剂】：电厂脱硝采用的脱硝剂主要有氨水（25%）和尿素。去除 1 kg NO_x 消耗液氨（99%）0.40 kg，消耗氨水（25%）1.58 kg，消耗尿素 0.70 kg。

（三）火电厂的生产工艺

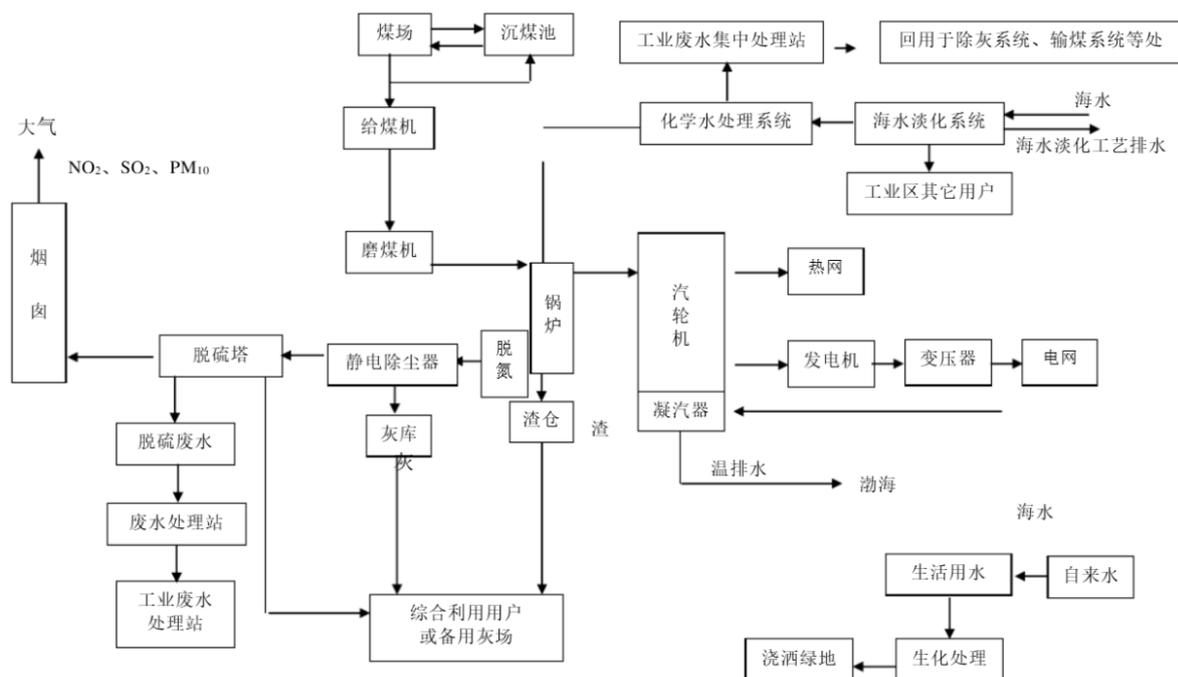


图4.1 典型火力发电生产工艺（海水脱硫）

火电厂主要包括几个功能系统：燃料的化学能在锅炉中转变为热能，加热锅炉中的水使之变为蒸汽，称为燃烧系统；锅炉产生的蒸汽进入汽轮机，推动汽轮机旋转，将热能转变为机械能，称为汽水系统；由汽轮机旋转的机械能带动发电机发电，把机械能变为电能，称为电气系统。

概括就是：燃料在锅炉中燃烧，将其热量释放出来，传给锅炉中的水，化学能转变成热能，产生高温高压蒸汽；蒸汽通过汽轮机又将热能转化为旋转动力，以驱动发电机输出电能。

火力发电的整个生产系统一般由 5 个系统组成：①燃料储运系统；②燃烧系统、③汽水系统；④电气系统；⑤渣灰系统等。

燃料吹送系统（包括煤粉和燃气）、锅炉、除尘设施、脱硫设施、脱硝设施、烟囱、燃煤电厂还包括输灰系统（包括灰库或灰坝）等。

燃烧系统的工艺流程是：磨好的煤粉或燃气通过空气预热器来的热风，打入喷燃器送到锅炉进行燃烧产生高温烟气，首先加热炉膛内的水冷壁管与过热器管，然后经过烟道内的再热器、省煤器和空气预热器排出锅炉。

锅炉产生的烟气再经过除尘装置，除去其中的飞灰，最后由引风机送经除尘器、脱硫、脱硝装置后，由引风机通过烟囱排入高空。

电厂锅炉按燃烧方式分类，可分为层燃炉、室燃炉、旋风炉、沸腾燃烧锅炉（即流化床燃烧锅炉）。

（3）汽水热力系统

水在锅炉炉膛内被加热成饱和蒸汽，通过过热器时，继续被加热变为过热蒸汽，再经主蒸汽管道送入汽轮机，从汽轮机某个中间级抽部分蒸汽分别送入回热加热器和除氧器，供回热给水 and 加热除氧。

高温高压蒸汽在汽轮机内膨胀做功后，如仅为发电则全部进入凝汽器（有凉水塔或空冷机）凝结为水；如为热电厂，则部分进入凝汽器凝结为水，部分经管网送往供热用户。凝结水经低压回热器进入除氧器，再经水泵、高压加热器送入锅炉。在汽水循环使用过程，为了补充蒸汽和水的损失，需将一定量的新水经过化学处理成软化水后再进入除氧器，除氧器出来的水供给锅炉循环使用。如果采用凉水塔作为凝汽器，需不断用循环泵将冷水送入凝汽器的冷凝管内与蒸汽进行热交换，冷却水可来自地表水体或冷却水池；

如采用空冷就不会产生循环冷却水，是采用空冷机产生的流动空气使蒸汽凝结。经过许多阀门，难免产生滴、漏现象，多少会造成水的损失，必须不断地向系统中补充经过化学处理过的软化水，补给水一般都补入除氧器中。据水质情况，锅炉软化水制备一般采用反渗透加混合离子交换的除盐系统或树脂离子交换。反渗透制备软化水会排放部分高盐废水，树脂离子交换制备软化水系统的树脂再生会产生酸碱废水。

（4）电气系统

电气系统设备包括电机、变电设备、输电设备等。

发电机发出的电除少部分自用外，绝大部分由主变压器升压后经高压配电装置和输电线向外供电。发电厂自用部分由变压器降压后，经厂用配电装置和输电线供厂内电器使用。

（5）渣灰系统

燃煤烟气经除尘器除尘处理，为方便综合利用，一般采用干式除灰，产生的粉煤灰采用气力输送系统，由仓泵、气源、管道和灰库等部分组成，采用程序控制方式，实现系统设备的协调有序运行。灰库库顶设布袋除尘器，用于灰库排气。锅炉出渣采用干式或湿式除渣。高温炉渣经冷渣机冷却或水冷后，进入链式除渣机或刮板式除渣系统，由仓泵、气源、管道和灰库等部分组成，采用程序控制方式，实现系统设备的协调有序运行。灰库库顶设布袋除尘器，用于灰库排气。锅炉出渣采用干式或湿式除渣。高温炉渣经冷渣机冷却或水冷后，进入链式除渣机或刮板式除渣。

（四）火电工业能耗和水耗

能耗：

在火电的污染物计算中，统计消耗的燃料非常重要。通过燃料消耗量和单位燃料排放的废气污染物的数量，可以确定燃料燃烧过程中排放出的烟尘、SO₂、NO_x的产生量，是环境统计、总量核算、排污收费计算热力和火电行业大气污染物产生量的重要参考指标。

我国火电厂燃料以煤为主，大型煤粉锅炉的设计因煤种不同而异。煤炭的挥发分、水分、灰分和灰渣特性对煤粉炉的燃烧影响很大，对煤燃烧时的着火、稳燃、残碳率和结渣都有很大影响。电厂为了稳定燃煤的成分稳定，一般必须进行混煤配煤。在火电厂的整个生产过程即燃烧—热—蒸汽—发电工艺中，都会产生能量损失。发电厂产生的电能与输入锅炉的热能之比称发电厂的效率。

一般火力发电厂的效率约为 30%~40%。目前，为了提高发电效率、减少污染排放，新建火电厂的装机容量都比较大，就是这个原因。根据发电设备和燃烧方式不同，每度电的煤耗有所区别，一般在 0.4~0.6kg 原煤/kWh，超临界的能达到 0.38kg 原煤/kWh。

标准煤是指每千克收到基低位热值为 29.27 兆焦 (MJ) (相当于 7000 千卡) 的煤。标煤耗分发电标煤耗和供电标煤耗。火电厂每生产 1 kWh 的电能所消耗标准煤的数量称发电标煤耗，单位是 g/kWh。火电厂每供应 1kWh 的电能所消耗标准煤的数量称供电标煤耗，单位是 g/(kWh) 按照能量守恒原理，3.6 兆焦的热量相当于 1 kWh 的电量，也就是说，每发 1 kWh 电，理论上需要标准煤 $3.6 \div 29.27 = 0.123$ (kg)，即理论发电标准煤耗应该是 123g/kWh。

电厂发电标煤耗的计算：

电厂发电标煤耗 (g/kWh) = 电厂发电标准煤耗量 (t) $\times 10^2$ / 发电量 (万 kWh)

供电标煤耗的计算：

供电标煤耗 (g/kWh) = 发电标煤耗 / (1 - 厂用电率)

水耗：

一般火电水耗指标分为空冷机组和自然冷却机组。

空冷机组水耗指标是常规自然冷却机组水耗指标的 1/3.5~1/5 之间；

机组规模越小空冷机组节水能力相对越强，如 300MW 的空冷机组的水耗指标约是带冷却塔的二次循环冷却机组的 1/5；600MW 的空冷机组的水耗指标约是带冷却塔的二次循环冷却机组的 1/4.5；1000MW 的空冷机组的水耗指标约是带冷却塔的二次循环冷却机组的 1/3.5；

空冷机组中，直接空冷比间接空冷节水能力略强，如 300MW 直接空冷机组与间接空冷的水耗指标比约为 0.76；600MW 直接空冷机组与间接空冷的水耗指标比约为 0.99；1000MW 直接空冷机组与间接空冷的水耗指标比约为 0.98；

随着机组规模的增大，直接空冷与间接空冷的节水能力区别不大；海水直流冷却比空冷机组耗水还要小，比例约为 0.75。

三、火电企业的排污节点分析

火电厂和工业锅炉排放废气中所含污染成份很多，主要有 SO₂、NO_x、CO、颗粒物 (烟粉尘)、重金属和微量元素，如 As、Hg、Ni、Mn 等，由于火电厂规模巨大，燃料消耗量特别大，产生的大气污染物数量在全国各行业中居首位，因此其大气污染物的控制、减排和治理，始终被列为节能减排的首位。目前，我国和世界各国对火电厂排放烟气中污染物的控制集中于 SO₂、NO_x 和烟尘，我国也开始研究对重金属 Hg 的控制。

火电工业的三个生产系统中大气污染物主要产生于燃烧系统。其中煤炭贮输运系统、煤磨与石灰石磨机、锅炉燃料燃烧系统会产生大量无组织排放与有组织排放的废气；水污染物主要来自定期清洗锅炉的废

水及补水车间、机修车间废水、生活污水，电厂产生大量不污染的间接冷却水；火电厂的固体废物主要来自锅炉炉渣和除尘器去除的粉煤灰、脱硫石膏渣。这些固体废物大多可以再利用。

在燃煤处理方面，矿井运来的原煤经大型分级破碎机破碎到 200mm 以下，再经筛分，将 <25mm 的作为末煤产品；再将 200~25mm 的块原煤送分选和介质回收系统。

1. 火电工业废气污染源

(1) 废气中颗粒物

煤炭运抵电厂后经过计量、卸载、储存、输送、筛分、破碎等作业会产生大量的粉尘污染，而且主要为无组织排放。厂内输煤系统中产生的污染主要来自煤炭露天堆放产生的风蚀扬尘、煤炭装卸产生的作业扬尘、煤炭输送过程扬尘和制粉过程扬尘。煤炭露天堆放扬尘防治措施是封闭式煤仓和防风抑尘网，并在煤场周围设置喷淋装置，洒水抑尘，煤场周围植树绿化；煤炭作业扬尘防治措施是采用喷水和封闭；煤炭输送过程扬尘防治措施是输煤栈桥、输煤转运站及碎煤机室应采用密闭装置，并配置袋式除尘器。烟气脱硫用脱硫剂，如石灰或石灰石（粉）一般储存在筒仓中。

火电企业的除尘设施主要在烟气排放口、煤炭破碎和粉磨设施废气排放口、干式输灰和灰库系统废气排放口、石灰石破碎和废石膏库废气排放口等处，电站锅炉包括室燃和流化床燃烧两种方式。室燃炉即为煤粉锅炉；流化床锅炉又分为鼓泡流化床锅炉和循环流化床锅炉。

表4.6 煤炭卸货、储存和处理过程中的治理技术

治理技术	技术适用性
煤炭洗选	适用于高灰份煤、且需长距离运输
降低高度与喷雾	煤炭装卸，尽量减少煤炭在空中停留时间
封闭与袋式除尘	输煤栈桥、输煤转运站及碎煤机室
露天煤场设喷洒装置+干煤棚+周边绿化	适用于南方多雨、潮湿、风速较低的地区，且煤场周围 200m 范围内无环境保护目标
露天煤场设喷洒装置+周边绿化	适用于北方风速较低的地区，且煤场周围 1000m 范围内无环境保护目标
储煤筒仓	适用于贮煤量较小、配煤要求高的电厂，可有效防止煤尘
喷洒装置+防风抑尘网	风速较大或环境较敏感的地区，如沿海、沿江或城市附近
喷洒装置+封闭式煤仓	风速大或环境敏感的地区，如沿海或城市附近

表4.7 石灰或石灰石粉卸货、储存和处理过程中的治理技术

治理技术	技术适用性
密闭罐车	适用于石灰石粉或石灰粉的运输
筒仓	适用于石灰或石灰石粉的储存
强劲的抽取与过滤设备的输送机	适用于石灰或石灰石粉的卸载
布袋除尘器	适用于石灰石的运输和卸料

表4.8 无组织排放控制措施

生产设备的无组织排放控制	运输设备的无组织排放控制
(1) 设备的密闭性；	(1) 是用传送带、移动料斗运输还是气动运输
(2) 进出口的负压措施；	(2) 封闭性措施；
(3) 废气集气装置；	(3) 进出口的负压措施；
(4) 喷水（或水雾）降尘；	(4) 喷水（或水雾）降尘；
(5) 挡风板或挡风帘。	(5) 挡风板或挡风帘。

储料场的无组织排放控制 (1) 喷洒装置+封闭式筒仓; (2) 喷洒装置+防风抑尘网; (3) 露天堆场设喷洒装置+周边绿化; (4) 喷洒装置; (5) 防风墙。	采取抑尘措施的效果: (1) 采用筒仓式贮存抑尘效果高于 95%, (2) 防风抑尘网(单层尘网抑尘效果可达 85%, 双层综合效果可达 95%左右。) (3) 喷雾加湿防尘措施的、挡尘板、挡尘帘抑尘效果达 50% (4) 防尘墙措施的, 抑尘效果可达 20~30%。
--	---

火电厂由于烟气量大、产尘浓度高,为了达到国家和地方规定的标准,除尘技术主要采用静电除尘器、袋式除尘器和电袋组合除尘器。电除尘器最大的优点是设备阻力低,处理烟气量大,去除率高,运行费用低,维护工作量少,使用温度范围广。但是,锅炉工况、负荷变化以及燃煤煤质(粉尘比电阻变化)均会影响其除尘效率。袋式除尘器不受烟尘比电阻的影响,而且去除细颗粒物的能力比电除尘器还要好,滤袋是布袋除尘器最关键的设备之一,直接影响除尘效率。滤袋寿命的长短一般与滤袋材质、制作质量、过滤烟气温度、流穿滤袋速度等有关,对除尘器运行性能的评定起着关键的作用。

火电企业的除尘设施主要在烟气排放口、煤炭破碎和粉磨设施废气排放口、干式输灰和灰库系统废气排放口、石灰石破碎和废石膏库废气排放口等处,电站锅炉包括室燃和流化床燃烧两种方式。室燃炉即为煤粉锅炉;流化床锅炉又分为鼓泡流化床锅炉和循环流化床锅炉。

表4.9 火电锅炉烟气烟尘初始浓度估算值 (mg / Nm³)

燃煤低位热值 千卡/kg 原煤	灰分 %	烟气量 Nm ³ /t 煤	烟气烟尘初始浓度 mg/m ³
5200	25	8500	27900
4800	27	8000	32000
4500	29	7600	36000
4000	32	7000	43000
3700	35	6500	51100

火电厂除尘主要采用静电除尘器、袋式除尘器和电袋组合除尘器。对锅炉产生的烟气,燃煤和石灰石的破碎、粉磨设备的废气排放口都应采取集气除尘措施。

表4.10 燃煤电厂主要除尘技术分析

技术名称	适用范围	除尘效率	运行成本	说明
电除尘 (一般三、四或五电场)	环境非敏感地区;煤种比电阻适中的新建或改造机组	三、四、五电场电除尘器的除尘效率分别为:98%、99.5%、99.6%以上,粉尘初始浓度在30g/m ³ 以下,排放浓度可达50mg/m ³ 左右,有时可达20mg/m ³ 以下	电除尘器的一次投资为50-100元/kW;治理成本为30-80元/t尘。除尘器电耗占火电厂发电量的0.1%~0.4%。三电厂设备电耗31kw/10万m ³ h烟气、四电厂设备电耗41kw/10万m ³ h烟气、五电厂设备电耗51kw/10万m ³ h烟气	电除尘器效率很高,特别是对细颗粒物去除效率高;运行温度一般小于200°C;运行成本低;可在任何正压力条件下运行;不适用于比电阻过高和过低的粉尘
袋式除尘	环境敏感地区或排放标准要求严格地区的新建机组或改造机组;特殊煤种、循环流化床锅炉、干法脱硫后的烟气除尘;大气环境非敏感地区的新建机组或改造机组可根据煤种及	粉尘初始浓度在30g/m ³ 以下,排放浓度可达14-17mg/m ³	一次投资在100元/kW左右;袋式除尘器运行费用包括运行时因能量消耗和滤料更换及维修费用等,一般为300元/t尘	运行温度一般小于200°C;过滤速度通常在0.01到0.04m/s之间,因应用、过滤器类型和织物而异;滤袋寿命随着煤的硫含量升高和过滤速度的升高而下降;单个滤袋在平均年过滤率达到所

	经济条件选择采用			安装的滤袋的约 1%时出现故障
电袋复合式除尘	环境敏感地区的新建或改造机组；大气环境非敏感地区的新建或改造机组可根据煤种及经济条件选择采用。	除尘效率大多可保持在 99.9%以上，粉尘初始浓度在 30g/m ³ 以下，排放浓度可达 10-12mg/m ³	初期投资介于电除尘和带式除尘之间，运行费用为 200 元左右/t 尘	运行温度一般小于 200℃；运行成本较袋式除尘器低；可在任何正压力条件下进行

表4.11 各类除尘器的除尘效率 η 表

类型	除尘效率 (%)	平均除尘率 (%)	类型	除尘方式	平均除尘率 (%)
单筒旋风除尘器	50~70	60	三电场静电除尘器		99.1%
多管旋风除尘器	60~80	70	四电场静电除尘器		99.4%
湿法除尘/脱硫	80~90	85	五电场静电除尘器		99.6%
机械+湿法	85~95	90	布袋除尘器	玻璃纤维布袋	99
管式静电除尘器	80~85	82		复式布袋除尘	> 99.5%
二电场静电除尘器		98%		复式电袋除尘	99.98%

(2) 火电工业的脱硫技术

目前我国火电行业主要应用的脱硫技术有炉内脱硫的喷脱硫剂法、流化床法和炉后脱硫的石灰石—石膏法、氨法和海水法。另外，干法技术有喷脱硫剂法和流化床法等；半干法技术主要指旋转喷雾干燥法；再生法有碱式硫酸铝法、活性炭法等。SO₂/NO_x 联合脱除技术有吸附法、电子束法、等离子体法等。火电烟气脱硫工艺综合比较情况见表所示。

目前我国 90% 以上的脱硫设施为石灰石—石膏法，石灰石—石膏法的脱硫量可依据石灰石消耗量判断。这一技术虽然对减轻烟气中的 SO₂ 污染起到了重要作用，但同时又产生了硫化石膏副产品。其中湿式石灰石-石膏法设备每处理 1tSO₂ 就会产生脱硫石膏 2.7t。

表4.12 火电锅炉 SO₂ 初始浓度估算值 (mg/ Nm³)

燃煤低位热值 千卡/kg 原煤	硫分 %								
	0.3	0.5	0.8	1.0	1.2	1.4	1.7	2	2.5
5200	600	1000	1600	2000	2400	2800	3400	4000	5000
4800	638	1060	1700	2100	2550	2970	3600	4250	5300
4500	670	1100	1790	2230	2680	3130	3800	4470	5590
4000	720	1200	1930	2420	2910	3400	4120	4850	6060
3700	780	1300	2080	2600	3120	3650	4420	5220	6520

目前我国火电行业主要应用的脱硫技术有炉内脱硫的喷脱硫剂法、流化床法和炉后脱硫的石灰石—石膏法、氨法和海水法。另外，干法技术有喷脱硫剂法和流化床法等；半干法技术主要指旋转喷雾干燥法；再生法有碱式硫酸铝法、活性炭法等。SO₂/NO_x 联合脱除技术有吸附法、电子束法、等离子体法等。火电烟气脱硫工艺综合比较情况见表所示。

表4.13 火电烟气脱硫工艺综合比较表

工艺名称	石灰石-石膏法	简易湿法	氨法脱硫	旋转喷雾干燥法	炉内喷钙, 烟气增湿法	海水吸收法	循环流化床法	电子束辐照法
工艺流程	主流程简单, 制浆部分	较简单	脱硫部分简单, 制肥部	制浆部分复杂	较简单	简单	简单	较简单

	复杂		分复杂					
钙硫比	1.05	1.1	---	1.5	2~2.5	---	1.2	---
脱硫率 %	>90	65	>95	60 ~75	50~70	>90	65~80	80~85
脱硝率 %	7	---	30	--	---	---	---	80
烟气再热	需	需	需	不需	不需	需	不需	需

注：本文参照黄伟等.《火电厂烟气脱硫工艺技术经济分析与选择》. 中国科协 2004 年学术年会电力分会场暨中国电机工程学会 2004 年学术年会论文集。

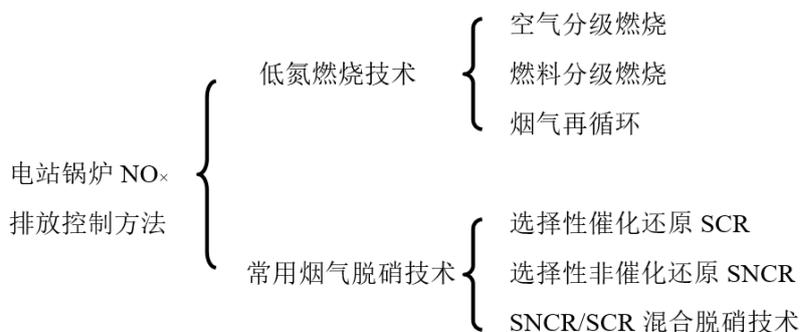
目前我国 90% 以上的脱硫设施为石灰石—石膏法，石灰石—石膏法的脱硫量可依据石灰石消耗量判断。以下我们对各种条件下（不同的石灰石纯度、不同的 Ca/S）去除 1kg SO₂ 需消耗石灰石量进行计算得出下表所列数据，可供核查计算时方便查对。

表4.14 各种条件下去除 1kg SO₂ 需消耗石灰石量对照表 (kg 石灰石/kg SO₂)

Ca/S	纯度 60%	纯度 70%	纯度 80%	纯度 85%	纯度 90%
1.01	2.626	2.251	1.970	1.854	1.751
1.03	2.678	2.295	2.009	1.890	1.785
1.05	2.730	2.340	2.048	1.927	1.820
1.07	2.782	2.385	2.087	1.964	1.855
1.10	2.860	2.451	2.145	2.019	1.907

(3) 火电工业的 NO_x 排放控制技术

控制 NO_x 的措施主要有两类：燃烧过程中的减排技术（低氮燃烧技术）和燃烧后的脱硝技术。低氮燃烧技术主要分为低氮燃烧器和分级燃烧技术。采用低氮燃烧+SNCR 技术，不添加催化剂的方法称为选择性非催化还原法，简称 SNCR，在催化剂的作用下，采用低氮燃烧+SCR 技术。



低氮燃烧技术主要有三种类型。

第一种是低氮燃烧器。这是第一代低氮燃烧技术；

第二种是分级燃烧技术。也是第二代低氮燃烧技术；

第三种是还原燃烧技术，也是第三代低氮燃烧技术。

表4.15 低氮技术简介

低氮方法	减排原理	减排效率
低氮燃烧器（第一代）	以低过剩空气系数、降低空气预热温度等技术，降低 NO 产生量	20%~30%
分级燃烧（第二代）	以，降低燃烧器一次风区域内的氧浓度技术，降低 NO 产生量	30%~40%
还原燃烧技术（第三代）	以还原已经在燃烧器区域或炉膛内生成的氮氧化物，降低 NO 产生量	40%~60%

脱硝技术：

脱硝技术包括 SCR 烟气脱硝技术、SNCR 烟气脱硝技术、SNCR+SCR 混合法脱硝技术三种，其中以 SNCR 烟气脱硝技术最差。

控制 NO_x 的措施主要有两类：燃烧过程中的减排技术（低氮燃烧技术）和燃烧后的脱硝技术。低氮燃烧技术主要分为低氮燃烧器和分级燃烧技术。采用低氮燃烧+SNCR 技术，不添加催化剂的方法称为选择性非催化还原法，简称 SNCR，在催化剂的作用下，采用低氮燃烧+SCR 技术。

控制 NO_x 的措施主要有两类：燃烧过程中的减排技术（低氮燃烧技术）和燃烧后的脱硝技术。低氮燃烧技术主要分为低氮燃烧器和分级燃烧技术。采用低氮燃烧+SNCR 技术，不添加催化剂的方法称为选择性非催化还原法，简称 SNCR，在催化剂的作用下，采用低氮燃烧+SCR 技术。

表4.16 脱硝技术简介

脱硝方法	原理	反应条件	脱硝效率
选择性催化还原法 (SCR 脱硝技术)	SCR 系统 NO _x 脱除效率通常很高，喷入到烟气中的氨几乎完全和 NO _x 反应。有一小部分氨不反应而是作为氨逃逸离开了反应器。一般来说，对于新的催化剂，氨逃逸量很低。但是，随着催化剂失活或者表面被飞灰覆盖或堵塞，氨逃逸量就会增加，为了维持需要的 NO _x 脱除率，就必须增加反应器中 NH ₃ /NO _x 摩尔比。	当温度低于 800°C 时，反应速度很慢，此时需要添加催化剂。 SCR 可分为高温工艺、中温工艺和低温工艺，高温工艺的适宜温度范围为 345~590°C；中温工艺的适宜温度范围为 260~380°C；低温工艺的适宜温度范围为 80~300°C。	50~60% 加低氮可达 80~90%
非选择性还原催化法烟气脱硝技术 (SNCR 脱硝技术)	是在无催化剂参与条件下，以含氨基的还原剂将烟气中的 NO _x 还原为 N ₂ 和 H ₂ O。	在不添加催化剂的条件下，较理想的还原反应为 800°C~900°C，	一般为 25%~50%。加低氮可达 50~60%
SNCR+SCR 组合脱硝技术	脱硝综合改造技术是通过燃烧改造使氮氧化物的排放由 600~800 mg/m ³ 降至 350~400 mg/m ³ ，再利用 SNCR 技术使其降至 200 mg/m ³ ，最后采用 SCR 的简化模式使 NO _x 排放浓度降到 100 mg/m ³ 以下		加低氮可达 85%

(4) 脱硝消耗脱硝剂分析

NO= 消耗氨 70.45kg/h
 NO₂= 消耗氨 7.45kg/h
 逃逸量=消耗氨 1.40kg/h

} 理论 NH₃ 用量 79.30 kg/h

NH₃/ NO_x=0.61ppm

理论 NH₃ 用量 79.30 kg/h

NO 处理量 124.32 kg/h 折 NO₂ 处理量 190.62

NO₂ 处理量 10.08 kg/h

折 NO₂ 处理总量 200.7 kg

NH₃/ NO_x质量比 79.30/200.7=0.395 kg NH₃/1 kg NO_x

去除 1 kg NO_x消耗液氨 (99%) 0.40 kg

消耗氨水 (25%) 1.58 kg

消耗尿素 0.70 kg

表4.17 脱硝剂的技术比较

项目	液氨	氨水	尿素
反应器费用	便宜	较贵 (150%)	最贵 (180%)
生产 1KG 氨气需要的原料量	1.01KG (99%氨)	4KG(25%氨)	1.76KG

运输费用	便宜	贵	便宜
安全性	有毒	有害	无害
储存条件	高压	常压	常压, 干态
储存方式	储罐 (液态)	储罐 (液态)	料仓 (微粒状)
初投资费用	便宜	贵	贵
运行费用	便宜	贵	贵
设备安全要求	有法律规定	需要	基本不需要

(5) 火电工业的废水治理

大型热电厂典型的污水来源主要有来自化学水处理车间的酸碱污水、电除尘器冲灰系统产生的冲灰水、锅炉房冲渣污水、锅炉定期排污水、循环水系统的排污水、输煤系统冲洗水、油库产生的含油污水和厂区生活污水等。

污水中的主要污染物为悬浮物、石油类以及少量的有机物。

表4.18 火电厂主要废水来源和污染因子

种类	废水来源	污染因子
经常性废水	生活、工业水预处理装置排水	SS
	锅炉补给水处理再生废水	pH、SS、TDS
	凝结水精处理再生废水	pH、SS、TDS、Fe、Cu 等
	锅炉排污水	pH、 PO_4^{3-}
	取样装置排水	pH、含盐量不定
	实验室排水	pH 与试剂有关
	主厂房地面及设备冲洗水	SS、石油类
	输煤系统冲洗煤场排水	SS、
非经常性废水	烟气脱硫系统废液	pH、SS、重金属、 F^{-1}
	锅炉化学清洗水	pH、SS、石油类、COD、重金属、F
	空气预热器冲洗废水	pH、SS、COD、 Fe^{-1}
	除尘器冲洗废水	pH、SS、COD
	油区含油废水	SS、石油类、酚
	蓄电池冲洗废水	pH
停炉保护废水	NH_3 、 N_2H_4	

酸碱污水来自化水车间的树脂再生过程, 大型热电厂的锅炉补充水一般采用除盐水, 因此其再生污水中既含有酸又有碱, 二者中和后, 污水一般成酸性, pH 值超标, 其它水质指标均可满足要求。

冲渣水主要来自锅炉的水力输渣系统的脱水仓, 渣水的污染物主要为无机性悬浮物或沉淀物, 较为清洁。

含油废水主要为油罐区及油泵房地面冲洗水等含油污水, 主要是油污量超标, 脱硫废水中超标物主要为汞、铅等特殊重金属、氟、pH 值和悬浮物。

其它工业污水主要包括锅炉房定连排污水、循环水系统排污、锅炉化学清洗污水、空气预热器清洗排水、煤厂及输煤系统冲洗水等非经常性排水, 主要是 pH、COD、重金属、SS 等成分超标, 锅炉房定连排污水水量较小, 而且较为清洁。

表4.19 某火电企业各生产节点水质情况 (mg/L)

	CODcr	SS	pH 值	油	NH_3-N
补水车间酸碱废水	1	100	3~11	1	
锅炉排污水	10	80	8.5~9.4	1	

地面和设备冲洗水	10	50	6~9	10	
实验室废水	20	50	3~10	1	
锅炉化学清洗水	400	2000	2~12	1	
煤场污水	1	1000~2000	3~8	1	
含油废水	10	20	6~8	50	
综合废水	300~500	100~200			20

燃煤电厂的各类污水治理技术见下表所示。

表4.20 燃煤电厂污水治理技术

废水种类	主要污染物	处理工艺	去向或回用途径
反渗透浓排水	重金属与盐类	絮凝沉淀	FGD 系统
机修车间废水	石油类、SS	油水分离、生化	排放或煤场喷洒
湿法脱硫废水	pH、SS、重金属等	石灰处理、混凝澄清、中和	干灰调湿、灰场喷洒，冲渣水、冲灰水
锅炉酸洗废水	COD、SS、pH 等	氧化、混凝澄清	集中处理站
冲灰渣水	SS、pH	沉淀、中和	重复利用
循环冷却系统排水	盐类	反渗透等除盐工艺	集中处理站，除盐后回冷却系统
厂房地面冲洗水 与污染的雨水	SS、石油类	混凝澄清	集中处理站
生活污水	COD、BOD、SS	二级生化处理	绿化、集中处理站

(6) 固体废物处置与利用

火电厂的废渣数量巨大，废渣来源主要包括锅炉的冷灰（约占 20%）和除尘器的粉煤灰（约占 80%）。锅炉出渣采用干式或湿式除渣。高温炉渣经冷渣机冷却或水冷后，进入链式除渣机或刮板式除渣机，干式除渣输送至渣仓储存，湿式除渣输送至渣池储存。渣仓（池）中的渣定期运走综合利用。垃圾焚烧火电厂和农作物秸秆焚烧火电厂烟气处理措施与燃煤火电厂有所不同，所产生的灰渣也需特别处理。湿式石灰石-石膏法设备每处理 1tSO₂ 就会产生脱硫石膏 2.7t，可以综合利用。

(7) 噪声污染控制

燃料制备系统中的最高噪声设备是磨煤机，燃煤电厂大多采用钢球磨煤机（低速磨煤机），其主要噪声源是筒体转动而产生的噪声，一般在 100 dB（A）以上。而电动机、齿轮传动部件等产生的噪声均处于次要地位。设备 1m 处噪声大大超过 90 dB（A）的噪声容许限值，一般均需要治理。

主要的治理方法有：（1）筒体外壳铺设阻尼层，可降噪 10 dB（A）左右。（2）隔声套——将多层吸声、隔声阻尼材料组合在一起，把磨煤机筒体紧紧地捆绑起来，与筒体一起旋转。可将设备整体噪声降到 95 dB（A）左右。（3）隔声罩——这是最有效的措施，隔声量一般不低于 20dB（A）。

表4.21 噪声及其它污染控制措施表

噪声源	噪声水平 dB（A）	采取措施	噪声源	噪声水平 dB（A）	采取措施
汽轮机	76~108	车间封闭，加隔音罩	冷却塔	70~85	车间封闭
励磁机	82~108	车间封闭	增压风机	75~100	车间封闭，加隔音罩
变压器	73~82	车间封闭	送风机	90~110	车间封闭、安装消声器
发电机	84~106	车间封闭，加隔音罩	引风机	70~95	车间封闭，加隔音罩
破碎机	95~105	车间封闭	空压机	82~97	车间封闭
磨煤机	82~120	车间封闭	给水泵	82~105	加隔音罩
湿磨机	85~100	车间封闭，加隔音罩	锅炉排汽	115~130	安装消声器
灰渣泵	82~105	车间封闭，加隔音罩			

四、相关政策、法律法规、技术标准与管理制度

(一) 大气污染防治政策

《大气污染防治行动计划》（国发〔2013〕37号）

提出控制煤炭消费总量、推进清洁能源替代、深化工业污染治理等措施，明确火电行业需实施脱硫、脱硝、除尘改造。

《打赢蓝天保卫战三年行动计划》（国发〔2018〕22号）：要求重点区域火电企业实施超低排放改造，推进煤炭消费减量替代，强化区域联防联控。

(二) 相关环境标准

(1) 大气环境标准

《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223-2011）：规定了火电厂大气污染物排放限值、监测要求及管理规定，适用于燃煤、燃油、燃气发电锅炉及燃气轮机组。

《关于京津冀大气污染传输通道城市执行大气污染物特别排放限值的公告》（环境保护部公告 2018 年第 9 号）特别排放限值执行要求：京津冀及周边“2+26”城市、长三角等重点区域的火电企业需执行更严格的大气污染物特别排放限值。

(2) 水污染物排放标准

《火电厂水污染物排放标准》（GB 13456-2012）：规定了火电厂废水排放限值、监测及管理要求，适用于燃煤、燃油发电锅炉及燃气轮机组。

(3) 固体废物管理标准

《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》（GB 18599-2020）：规范火电厂粉煤灰、炉渣等一般工业固体废物的贮存、填埋及综合利用。

《危险废物贮存污染控制标准》（GB 18597-2023）：适用于火电厂脱硝废催化剂等危险废物的贮存管理。

(4) 噪声控制标准

《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB 12348-2008）：规定火电厂厂界噪声排放限值，适用于厂界环境噪声的评价与管理。

《火电行业排污许可证申请与核发技术规范》（环水体〔2016〕189号）：规定了火电企业排污许可证申请、核发及管理要求，明确产排污节点、污染治理设施及监测计划。

《火电建设项目环境影响评价文件审批原则（试行）》：明确火电项目选址、污染防治措施及区域削减要求，强化生态环境分区管控。

第3节 钢铁行业环境统计

一、钢铁工业简介

钢铁行业是国民经济发展的支柱产业，在我国工业化、城镇化进程中发挥着重要作用。钢铁工业是衡量一个国家综合国力和工业水平的重要因素，也是资源、能源消耗和污染排放的重点产业，也是国家推进节能减排工作的重点产业。钢铁工业的特点是产业规模大、生产流程长，从矿石开采到产品的最终加工，需要经过很多生产工序，其中的一些主体工序资源、能源消耗量都很大，污染物排放量也比较大。钢铁行业在节能减排、降低碳排放方面已取得一定成效。

我国钢铁工业作为基础工业经过结构调整、装备更新为主的快速发展，已形成了包括由矿山、烧结、焦化、炼铁、炼钢、轧钢以及相应的铁合金、耐火材料、炭素制品等多生产部门构成的庞大工业体系。我国钢铁工业生产仍以长流程为主，我国钢铁工业处于不同层次、多种结构、各种生产技术经济指标共同发展阶段。我国正处于经济快速发展阶段，废钢资源积累较少，必然造成炼钢时的废钢利用比例低。我国钢铁工业发展迅速，进入新世纪以来，仅十几年的工业化进程，中国产钢量从2000年的1.285亿t上升到2015年的8.038亿t，年均增长41.70%，增量是世界之最。

二、钢铁行业的生产工艺及子类行业

钢铁工业生产过程包括采选、烧结、炼铁、铁合金冶炼、炼钢（连铸）、轧钢等生产工艺。钢铁工业中废气、污水、废渣的产生量都很大，尤其废气量更大。我国钢铁工业中来自烧结、炼铁、焦化等炉窑产生的含尘和有害气体的废气，原料运输、装卸、加工产生的无组织含尘废气，已成为许多地方的主要污染源。

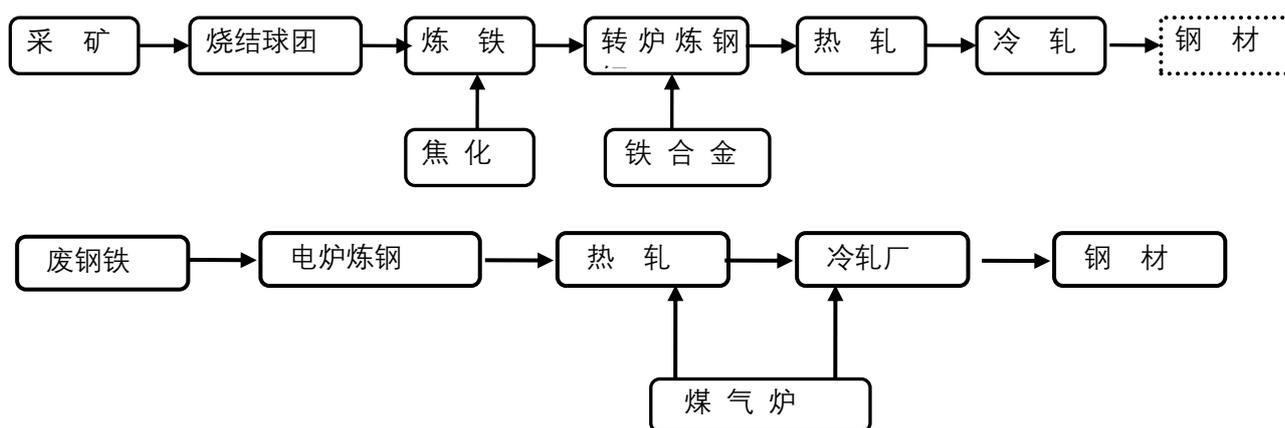


图4.3 典型钢铁生产工艺流程图示意图（矿石为原料，以及以废钢铁为原料流程）

废气主要污染因子为颗粒物、SO₂、NO_x，氟化物、氯化氢、二噁英等。废水污染因子主要为：COD、石油类、重金属、酚、氰等。固体废物主要包括：含铁尘泥、除尘灰、铁渣、钢渣以及碳钢酸洗废酸（盐酸、硫酸）等。

（一） 烧结工业的原辅料

1. 原料

烧结工艺是利用铁矿粉、返矿、配入适量的燃料和熔剂，按一定比例在高温下经过烧结或球团工艺制成烧结矿或球团矿。烧结工艺流程包括原辅料（含铁原料、燃料、熔剂）的输入、破碎筛分（棍式、锤式破碎机、冷筛），配料（移动皮带，矿槽，圆盘给料机，电子秤），拌合（配料桶），混合料通过混合料矿槽（摆动皮带）、泥辊（宽皮带）、九辊布料器铺到烧结机台车上。

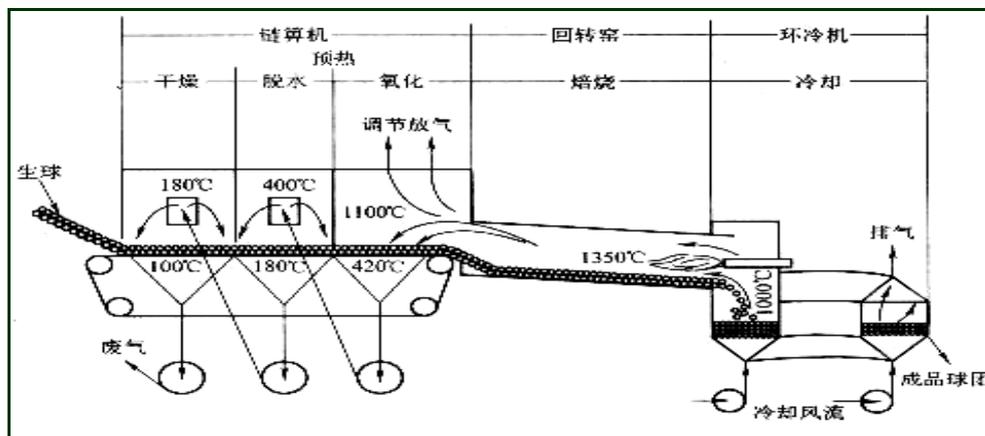


图4.4 烧结工艺示意图

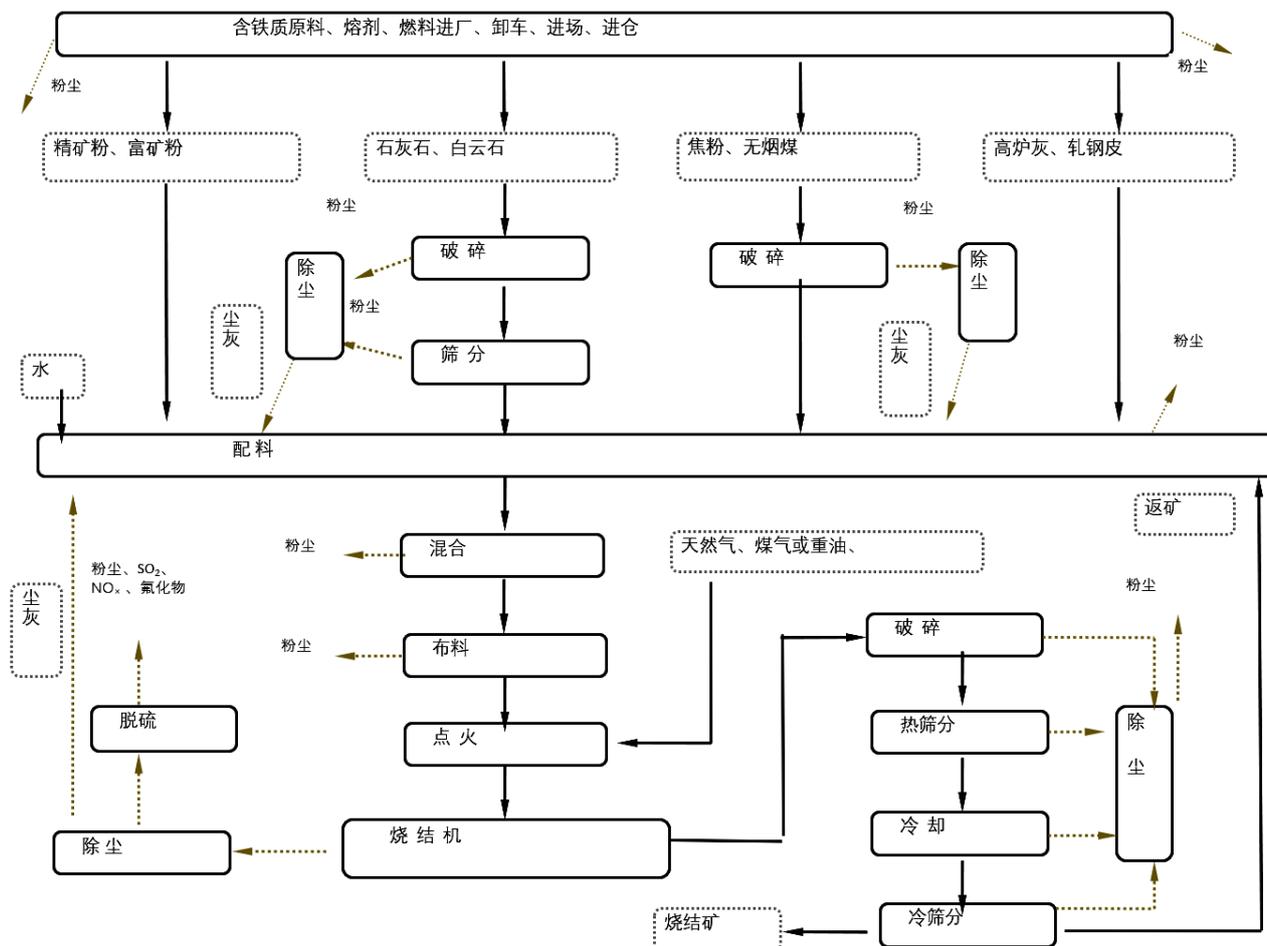


图4.5 烧结工艺流程示意图

带式烧结机是由头尾星轮带动的装有混合料的台车并配有点火、抽风装置的机械设备。台车在头部加料并点火，至尾部卸料。通过抽风机抽风烧结，在有效烧结长度内，将混合料由上至下烧透，生成烧结矿。烧结过程中还有一重要的风路系统，它的核心设备是主抽风机。烧结机焙烧出的烧结块再通过破碎、过筛

分、除尘等环节，得到一定大小的烧结矿成品，同时分出矿粉。高温焙烧机焙烧出的球团再经冷却、筛分得到成品球团矿。烧结工艺的冷却有带式 and 环式两种，鼓风式带冷机是与各式烧结机（环烧、带烧、平烧）配套的高效通用烧结矿冷却设备。鼓风环式冷却机是冶金企业大中型烧结机的主要配套设备。经冷却的成品矿进入矿槽贮存待运，或直接经传送带送往高炉装料设备带配料。

球团生产的原料为焦炭粉（或煤粉）和熔剂（石灰石或白云石）。球团使用的原料主要为含铁原料，达 70%。烧结生产使用的主要原料为含铁原料（精矿粉、富矿粉、高炉瓦斯泥、转炉泥以及轧钢氧化铁皮等）、熔剂（石灰石、白云石、菱镁石、生石灰和消石灰等）、燃料（无烟煤、焦粉、煤气等）。烧结燃料耗量为 40~50 kg 标煤/t 产品，综合能耗为 55~70 kg 标煤 / t 产品。球团生产的原料为焦炭粉（或煤粉）和熔剂（石灰石或白云石）。球团使用的原料主要为含铁原料，达 70%，多以焦粉、重油、煤气为燃料，燃料耗量为 18~20 kg/t 矿。综合能耗 30~45 kg 标煤/t 矿。

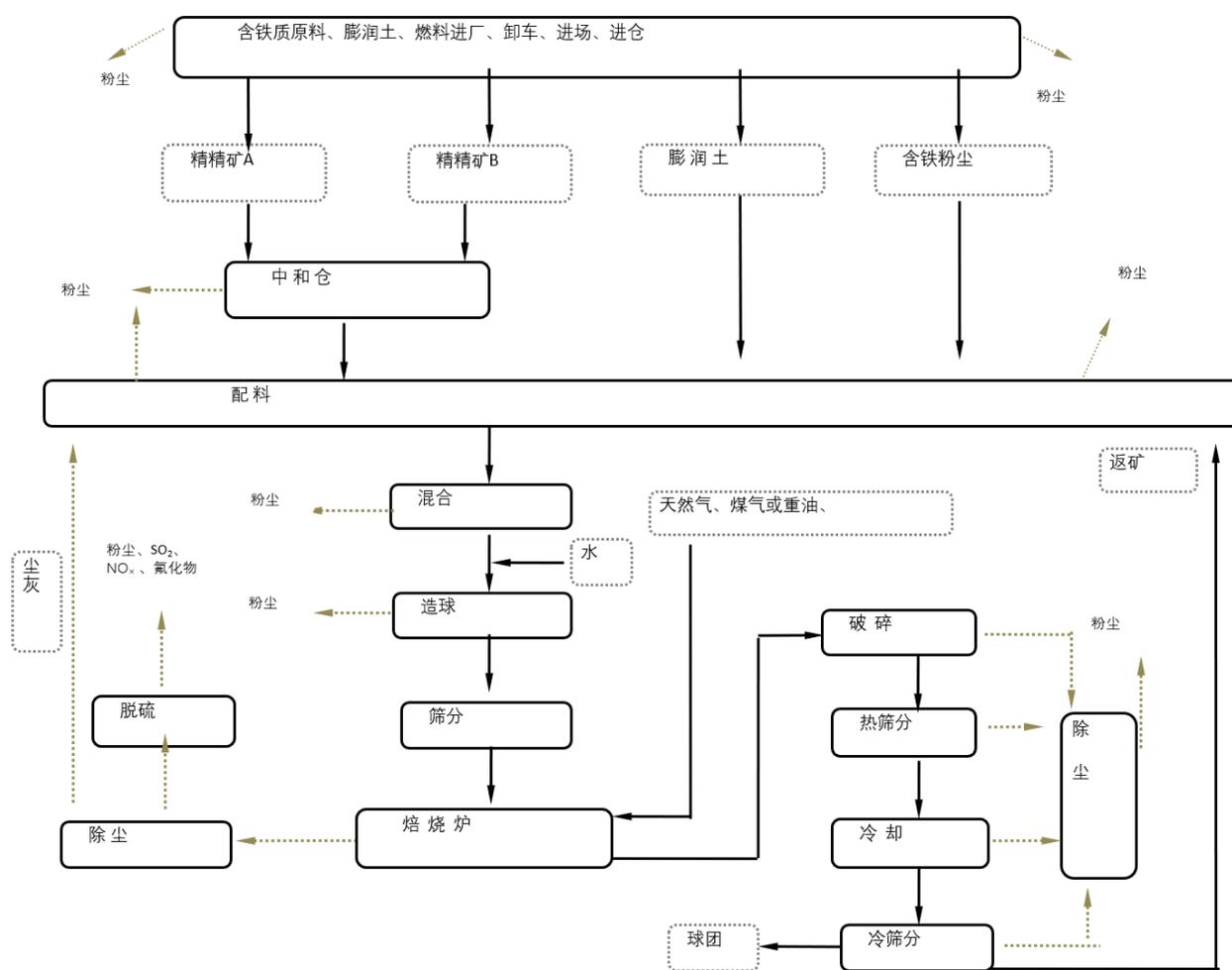


图4.6 球团工艺流程示意图

【铁精矿粉】：是由铁矿石（含有铁元素或铁化合物的矿石）经过选矿、破碎、分选、磨碎等加工处理而成的矿粉。铁矿粉的种类主要分为磁铁矿粉（主要成分 Fe_3O_4 ）；赤铁矿粉（主要成分 Fe_2O_3 ）；褐铁矿粉（主要成分 Fe_2O_3 ）；菱铁矿粉（主要成分 $FeCO_3$ ）的硅酸盐矿粉；以及硫化铁矿（主要成分 FeS_2 ）。

【返矿】：烧结矿返矿分为热返矿（烧结机尾两侧和表层的未烧好的烧结矿）、冷返矿（烧结矿经冷却和整粒后的筛下物）和高炉料槽下返矿（高炉料槽中的烧结矿在入炉前进行筛分时的筛下物）3 种。

2. 辅料（熔剂）

烧结熔剂主要有石灰石、白云石、菱镁石、生石灰和消石灰等。

【石灰石】：主要成分是碳酸钙。石灰石块状/粉状：烧失量 40.79%，硅 4.62%，铝 1.21%，铁 0.52%，钙 50.16%，镁 1.10%。石灰石平均含硫 0.025%。

【白云石】：白云石晶体属三方晶系的碳酸盐矿物。化学成分为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 。白云石粉/块：硅 0.19%，铝 0.15%，铁 0.17%，钙 32.1%，镁 21.19%。白云石平均含硫 0.038%。

【菱镁石】：菱镁矿石主要成份为 (MgCO_3) ，菱镁矿的特性与方解石相似。

【生石灰】：主要成分为氧化钙，平均含硫 0.03%。利用生石灰代替部分石灰石作为烧结熔剂，可强化烧结过程。

【消石灰】：俗称熟石灰，是一种白色粉末状固体，主要成份是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。可以改善烧结成球性。

3. 燃料

烧结使用的燃料主要有焦粉、无烟煤、煤气等。烧结燃料耗量为 40~50 kg 标煤/t 产品，综合能耗为 55~70 kg 标煤 / t 产品。2013 年烧结工序能耗中，固体燃料约占 80%，电力约占 13%，点火燃料约占 6.5%，其它约为 0.5%。球团多以焦粉、重油、煤气为燃料，燃料耗量为 18~20 kg/t 矿。综合能耗 30~45 kg 标煤 / t 矿。

【焦粉】：焦炭的筛下物。焦粉具有焦炭的一切物理与化学性质。焦粉热值在 6500~7500 kcal/kg，灰分在 3~8%，挥发分在 1%~6%，平均含硫率在 0.5%。

【无烟煤】：热值在 6000~7200 kcal/kg，灰分在 10~18%，挥发分在 6%~10%，平均含硫率在 0.3%。

【煤气】：钢铁企业混合煤气热值在 13.39~15.06 MJ/m³。高炉煤气热值在 3.52~4.19 MJ/m³，含 H₂S 10mg/m³；焦炉煤气热值在 18.26 MJ/m³，含 H₂S 100mg/m³。

【水】：烧结和球团生产都需要补充用水，用水量按不同工艺类型，使用量也不相同。

(二) 炼铁工艺

高炉炼铁工艺包括供料系统、上料系统、炉顶系统、粗煤气系统、炉体系统、出铁场系统、渣处理系统、热风炉系统和煤粉喷吹系统。辅助系统包括铸铁机和修罐库。

入炉的块矿（烧结矿、球团、块矿）焦炭分别有传输系统送入各自的矿槽，通过给料机、筛分后称量卸到供料皮带运至炉顶装料入炉。筛后的焦粉由汽车运回烧结厂。装入料罐的铁矿石、焦炭和熔剂通过料钟向下运动，从高炉下部风口鼓入预热空气（1000~1300℃），喷入燃料（油、煤或天然气等）。原燃料向下降落，原料经过加热、还原、熔化、造渣、渗碳、脱硫等一系列熔炼、被还原成金属铁（铁水）。熔炼产生大量高温高炉煤气向上运动，铁水从高炉底部的出铁口流出，铁渣从炉体下部出渣口排出。

熔炼好的铁水间断从出铁口流入铁水罐，出铁口会产生强烈的喷射烟气，铁水用铁水罐车送至铸铁机浇铸成铁锭或送至转炉炼钢。从出渣口定期排出炉渣，炉渣经渣沟送入粒化槽，渣沟的粒化箱喷射冷却水使炉渣冷却成粒化，过滤后的水渣经皮带运输机转运至渣场。

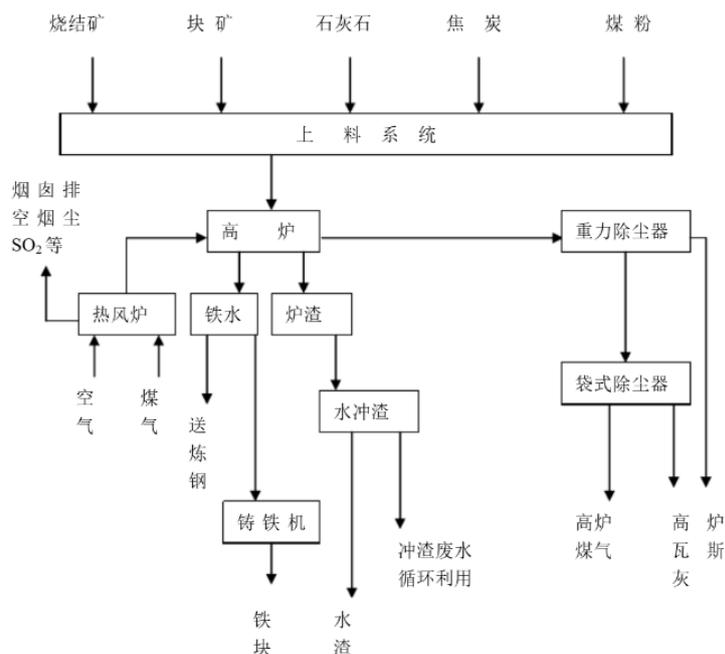


图4.7 炼铁流程简易示意图

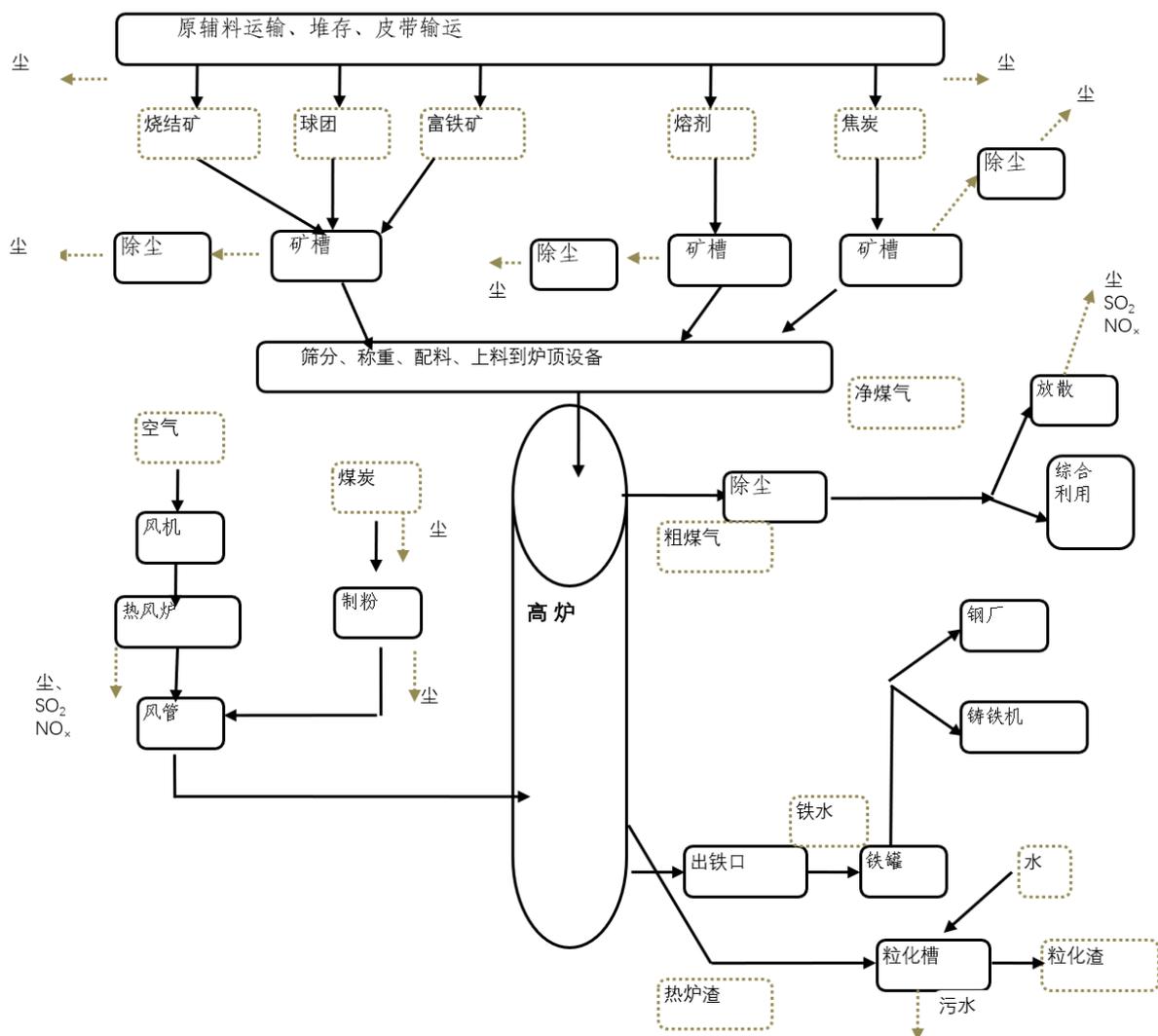


图4.8 炼铁典型生产工艺流程

1. 炼铁工业的原料

高炉炼铁主要原料有含铁原料（铁矿石、烧结矿或球团矿），助熔剂（石灰石、硅石等），还有还原剂（焦炭），辅助还原剂（煤粉、石油、天然气、塑料）通常，冶炼 1t 生铁需 1.5~2.0t 铁矿石（一般情况下 1.8t 铁矿石可产 1t 生铁），0.5~0.7t 燃料（高炉燃料主要是焦炭和煤粉，还有重油、煤气、煤、天然气），0.2~0.4t 熔剂，总计需要 2~3t 原料。炼铁工序（含烧结、炼焦）能耗约占钢铁企业总能耗的 72%，钢铁工业要降低吨钢综合能耗应该尽量降低炼铁工序能耗。高炉炼铁所需能量有 78% 来自燃料燃烧，应该降低燃料比和提高二次能源利用率。降低炼铁工序的能耗是钢铁行业节能减排的关键环节。炼铁系统（包括烧结、球团、焦化、炼铁）能耗占钢铁联合企业总能耗的 70%，成本占 60%，污染物排放占 70% 以上。

2. 辅料

【石灰石】：主要成分是碳酸钙。石灰石平均含硫 0.025%。

【硅石】：又称石英砂、二氧化硅。硅石中 SiO_2 是主成分， Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 等均为杂质。

（三） 炼钢工业的原辅料

炼钢分为转炉炼钢和电炉炼钢，不仅炼钢设备不同，炼钢使用的原辅材料也有差异。炼钢过程需要供给足够的能源才能完成，这些能源主要有焦炭、电力、氧气、惰性气体、压缩空气、燃气、蒸汽、水等；炼钢过程也会释放部分能量，包括煤气、蒸汽等。炼钢的工序能耗就是冶炼每吨合格产品（连铸轧钢坯或钢锭），所消耗各种能量之和扣除回收的能量。转炉煤气和蒸汽回收率高一些的钢企转炉工序能耗要低一些，一般煤气回收率大于 $80\text{m}^3/\text{t}$ 钢，蒸汽回收率大于 $50\text{kg}/\text{t}$ 钢的企业转炉工序能耗值可以实现为负值。

1. 转炉炼钢的原辅料

铁水由铁水罐运输倒至混铁炉内，经脱硫、挡渣后，加入石灰，另兑 10% 以下废钢，倒入转炉。倒入转炉的铁水，吹入纯氧进行熔炼，使铁水中过量碳氧化，碳含量低于预定值时，停止吹炼出钢。装料和出钢时炉身可以倾斜。出钢时钢水注入钢水包，送连铸工序。转炉内氧化过程释放大量热能使炉内达到足够高的温度。炼钢用原材料分为主原料、辅原料和各种铁合金。

（1） 主原料：

氧气顶吹转炉炼钢用主原料为铁水和废钢(生铁块)。

（2） 辅料：

炼钢用辅原料通常指造渣剂(石灰、萤石、白云石、合成造渣剂)、冷却剂(铁矿石、氧化铁皮、烧结矿、球团矿)、增碳剂以及氧气、氮气、氩气等。

（3） 各种铁合金：

炼钢常用铁合金有锰铁、硅铁、硅锰合金、硅钙合金、金属铝等。

2. 电炉炼钢工业的原辅料

电炉炼钢先将零散的废钢铁进行配料、挤压、剪切，进料前炉底应先铺占料重 1.5% 左右的石灰，再将处理后的废钢铁倒入料筐，用天车吊至炉内按要求布料。

炉料装完通电加热使炉料熔化，从通电开始到炉料全部熔清为止称为熔化期，熔化其主要是熔化炉料，造好炉渣。第二阶段氧化期，炉内除吹氧助熔外，还吹入天然气或轻油或煤粉，增加融化的热量。炉内吹氧脱碳和加矿脱碳。氧化结束将熔融的炉渣通过炉门使用耙子扒除钢渣。第三阶段还原期从扒渣完毕到出钢，主要任务是脱氧、脱硫、控制化学成分。

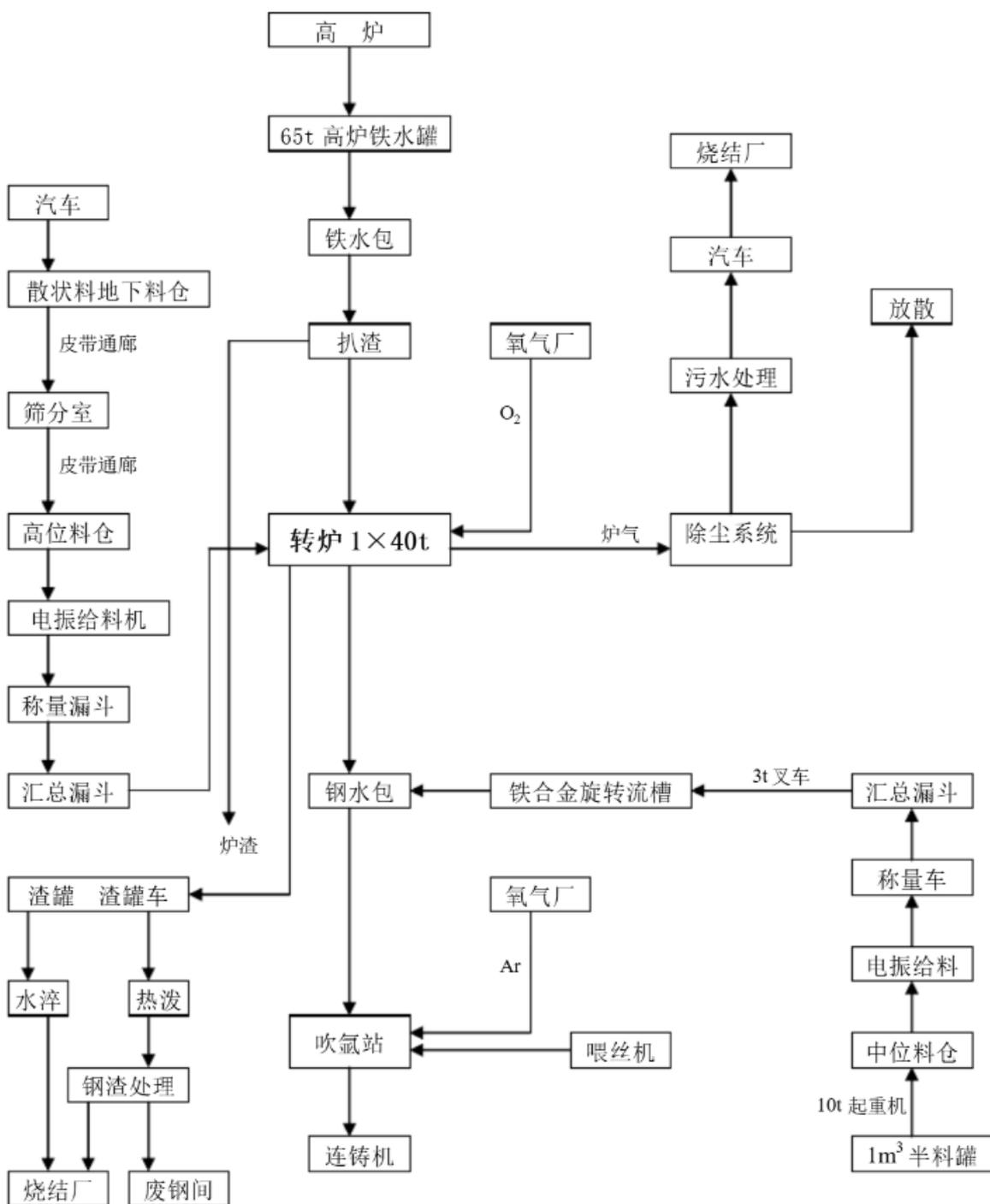


图4.9 炼钢的典型工艺流程

出钢后立即检查炉衬，需填补炉底时，应先将炉底残渣全部扒出，然后进行填补。电炉炼钢原料有铁质原料、氧化剂、造渣材料、合成渣料、耐火材料、其它用途材料：

(1) 铁质原料：

【废钢】：电炉炼钢原料中，废钢用量约占 60~100%。有害杂质如油漆、塑料等。

【生铁】：生铁或铁水为炼铁得到的铁水和炼铁铸造的生铁，碳含量较高。

【直接还原铁】：是精铁粉或氧化铁在炉内经低温还原形成的低碳多孔状物质。

【铁合金】：常用的铁合金有硅铁、硅锰、锰铁、铬铁、钼铁、钒铁、铝丝、碳丝及镍、铌铁等。

(2) 氧化剂

【氧化铁皮】：钢锭及钢坯在轧制过程中表面氧化层脱落而产生的铁屑。钢铁厂氧化铁皮数量约为钢材产量的2%~3%

【氧气】：氧气主要采用氧气站或氧气瓶供氧。氧气站采用管道输送氧气。

(3) 造渣材料

【石灰和白云石】：弧炉使用的石灰和轻烧白云石一般是通过料仓储存，可在电弧炉出钢过程中随钢流加入钢包中，或在炉外精炼时加入

【萤石】：萤石又名氟石，化学成分为氟化钙。萤石的作用主要是降低冶炼温度和降低炉渣粘度。

【碳球】：炼钢用碳粉喷入炼钢炉内均匀地散布于钢液中使炉渣发泡。

【高铝矾土】：主要由一水铝石和含水铝硅酸盐组成

(4) 合成渣料

【脱硫剂】：铁水脱硫剂分为石灰系、碳化钙系、苏打系、镁系等4类。

【熔融合成精炼渣】：适用于钢包精炼作精炼净化剂。具有很强的脱氧、脱硫效果，可减少钢中气体、降低钢中夹杂。

(5) 耐火材料

炉底耐材、钢包耐材、中包耐材等。

(6) 其它用途材料

如电极、增碳剂、保温剂、保护渣等。

(四) 铸、轧钢

铸钢的方法主要分为锭模铸造和连续铸造两种类型。

连续铸钢工艺：由炼钢炉倒出的钢水经炉外精炼处理后，用钢水包运送到浇铸位置注入中间包（钢包回转台），通过中间包钢水连续浇铸在结晶器中，待形成坯壳后，从结晶器以稳定的速度拉出，再经喷水冷却、凝固，铸坯通过拉坯机、矫直机后，脱去引锭杆，完全凝固的直铸坯由切割设备切成指定长度的连铸坯后，经运输辊道或汽车进入轧钢车间。

模铸工艺：是将冶炼合格的钢水浇铸到钢锭模内，待钢锭冷却后取出。再送到加工车间加热、开坯、轧成钢材。目前除了一些小钢厂外基本很少使用。

轧钢工艺用钢锭、锻轧钢坯和连铸钢，辅料有轴承油、润滑油、聚合氯化铝、氢氧化钠、聚丙烯酰胺等。

热轧工艺：

板坯由连铸机出坯辊道或汽车送到热轧车间板坯库，热钢坯直接送加热炉加热，冷钢坯由吊车吊至上料台架，再经加热炉加热。

加热的钢坯进入加热炉的装炉辊道，再由出钢机托出，通过出炉辊道、输送辊道输送，经高压水除鳞装置除鳞后，进入可逆粗轧机轧制，粗轧后再用高压水除鳞装置二次清除氧化铁皮，然后进入精轧机组。精轧过程采用水直接冷却系统经过多次轧制成规定的板材或线材，通过机械打卷或打捆入热轧成品库。

热轧工序的能耗主要是均热炉、退火炉消耗的。使用的能源主要是高炉煤气、混合煤气、重油等，热轧吨钢需消耗高炉煤气 500~600 m³/t 钢，或消耗混合煤气 200~240 m³/t 钢，或消耗重油 50~60 kg/t 钢。高炉容量增大，入炉的铁矿品位提高 1%，就可使焦比下降 1.5%，产量提高 2.5%，吨铁渣量减少 30kg，

允许多喷吹 15kg / t 铁煤粉。

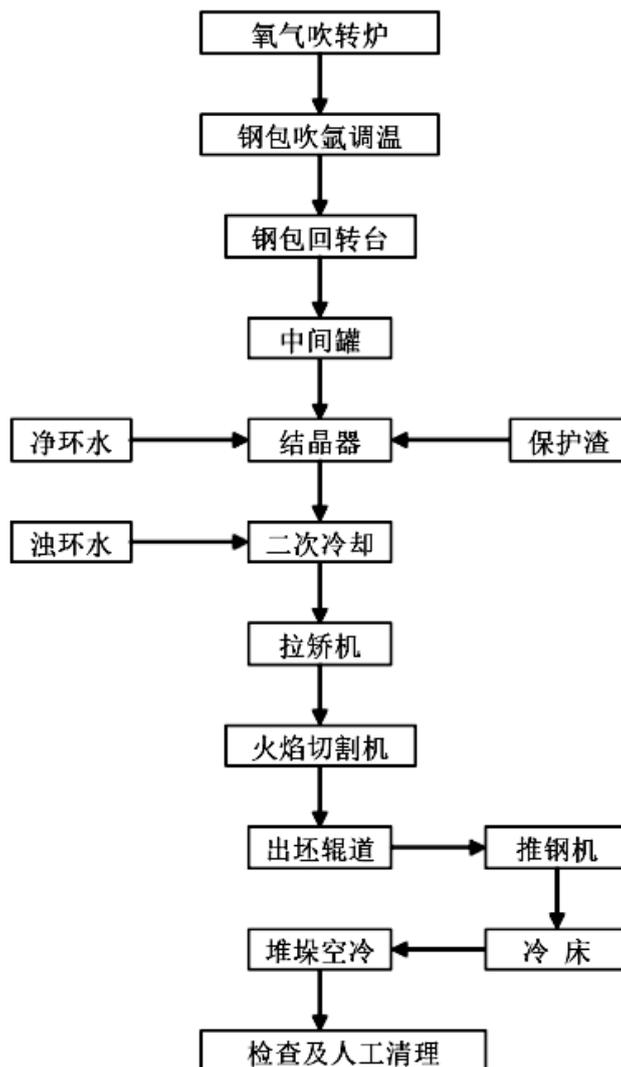


图4.10 连铸工艺流程示意图

冷轧工艺:

钢铁厂的冷轧产品主要有普通冷轧板、镀锡板、镀锌板和彩涂板。冷轧的主要生产工序：酸洗、冷轧、退火、平整、剪切，电镀板在酸洗后还要脱脂，退火前也需脱脂（碱洗）。

坯料在冷轧前须经过连续酸洗机组清除氧化铁皮，以保证带钢表面光洁。酸洗后进行连续冷轧，轧到一定厚度还须进退火炉退火，使钢软化。在退火之前还需进行脱脂，脱脂后的带钢，在保护气体中进行退火。退火后的带钢在进行平整，剪切。工艺润滑剂的种类：有轧制油和乳化液两大类（水作载体）。常用的是乳化液。

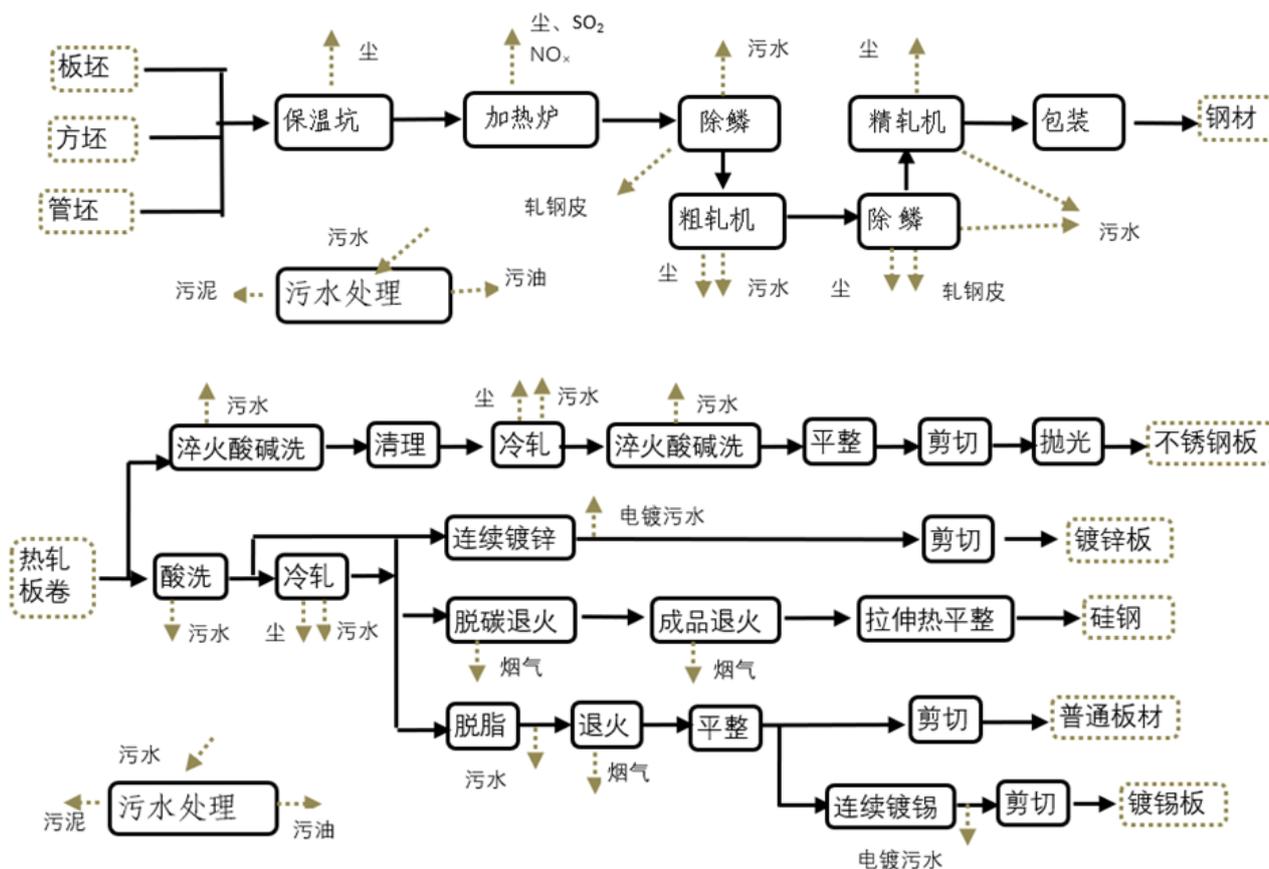


图4.11 典型轧钢生产工艺流程图（热轧和冷轧）

（五） 钢铁工业二次能源的回收利用

钢铁工业生产过程中，所用的能源约有 70%是要转换为各种形式的二次能源，钢铁工业的二次能源主要有三类：（1）各种副产煤气；（2）余热；（3）余能（余压）。钢铁生产过程中产生的二次能源，主要体现在产品的余热（红焦炭、赤热的炉渣，烧结矿和球团矿的显热、液态的铁水和钢水的显热，以及铸坯的热量等），外排废气的显热（包括烧结、球团、热风炉、加热炉、焦炉等）、各类煤气（高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气等）高炉炉顶煤气的压力能，以及冶炼设备冷却水所带走的热量，以及炉体散热等形式。这里有占 34%的副产煤气，炉渣显热约占 9%，其余是余热等。

三、 钢铁生产工艺排污节点分析

（一） 钢铁行业环境要素分析

钢铁工业的生产，污染主要是以废气为主，产生废气的节点如下表所示。

表4.22 钢铁行业废气来源

工 序		污 染
原辅料 进厂	固体	原辅料、燃料、废钢铁运输、卸车、堆场贮存、上料、传输过程产生扬尘（主要是无组织）；
	液体气提	酸、油运输、卸车、管道传输过程产生泄漏。
烧结		破碎、筛分、配料、拌合、传输、烧结产生无组织扬尘；破碎、筛分、配料、拌合设备、料仓产生有组织废气含颗粒物，干燥、焙烧、冷却产生烟气含颗粒物、SO ₂ 、NO _x 。
高炉炼铁		高炉进料、出铁、出渣、炉体、铁水装罐、运输、铁渣水冷粒化、渣场运输产生无组织含尘废气；上料、出铁、出渣、水冷粒化集气口产生有组织含尘废气；热风炉烟气含颗粒物、SO ₂ 、NO _x 、CO、H ₂ S 等；

炼钢		转炉铁水、废钢的转运、倾倒、钢水倾倒、转运过程和撇渣、运渣、渣场装卸过程产生大量含尘废气，电炉废钢加工、电炉布料、出渣、出钢、钢包运输、过程产生大量含尘工艺废气，连铸钢水包运输、倾倒、结晶器拉坯、坯材切割、中间包烘烤过程排放含尘废气，模铸钢水包运输、倾倒、结晶器拉坯、坯材切割、中间包烘烤过程排放粉尘；转炉吹炼、烟罩提升产生吹炼烟气、精炼炉产生精炼烟气 含颗粒物、CO、SO ₂ 、NO _x 、氟化物，电炉熔炼、精炼产生熔炼废气，含颗粒物、CO、NO _x 、氟化物、SO ₂ 、二噁英、铅、锌等。
轧钢	热轧	热轧加热炉产生燃烧废气，含颗粒物、NO _x 、SO ₂ ；退火炉产生燃烧烟气，含颗粒物、SO ₂ 、NO _x ，
	冷轧	冷轧产生含尘废气；冷轧退火炉产生燃烧烟气，含颗粒物、SO ₂ 、NO _x ，冷轧产生含尘废气；

除废气之外，钢铁行业生产之中，也涉及到了废水污染，主要的废水污染见下表。

表4.23 钢铁行业废水来源

工序	废水来源
烧结	湿式除尘排水、地面冲洗水含有高的悬浮物
炼铁	主要为高炉煤气洗涤水、冲渣废水、地面冲洗水，含悬浮物、酚、氰等
炼钢	水冷却废水、湿法除尘废水、地面冲洗水，主要污染物 SS、石油类、COD、氨氮、氰化物、氯化物
轧钢	除磷废水和直接冷却水、电镀废水含 COD、SS、石油类、pH 值、金属锌

钢铁企业工业污水按其来源来分，可以分为循环冷却水系统排污水；脱盐水、软化水及纯水制取设施产生的浓盐水；钢铁厂各工序在生产运行过程中产生的废水等。

烧结工序废水（冲洗地坪废水、湿式除尘废水、脱硫废液等）；炼铁废水（高炉煤气洗涤水、炉渣粒化废水、铸铁机喷淋冷却废水等）；炼钢废水（转炉烟气湿法除尘废水、精炼装置抽气冷凝废水、连铸生产废水、火焰清理机废水）；热轧生产废水（轧机、卷取机、除磷、冷却、冲洗废水）；冷轧废水（冷轧酸碱废水、冷轧含油和乳化液废水、含铬废水等）；自备电厂废水（高含盐废水、）；焦化（酚氰废水、氨氮废水、高 COD 废水等）。

(二) 废气来源与防控

1. 无组织排放的防控

对于钢铁行业而言，由于涉石料类的原料较多，因此在运输、储存过程之中，会涉及到颗粒物等无组织排放形式的污染，具体的污染情况与防控措施如后文所述。

表4.24 煤炭卸货、储存和处理过程中的治理技术

治理技术	技术适用性
煤炭洗选	适用于高灰份煤、且需长距离运输
降低高度与喷雾	煤炭装卸，尽量减少煤炭在空中停留时间
封闭与袋式除尘	输煤栈桥、输煤转运站及碎煤机室
露天煤场设喷洒装置+干煤棚+周边绿化	适用于南方多雨、潮湿、风速较低的地区，且煤场周围 200m 范围内无环境保护目标
露天煤场设喷洒装置+周边绿化	适用于北方风速较低的地区，且煤场周围 1000m 范围内无环境保护目标
储煤筒仓	适用于贮煤量较小、配煤要求高的电厂，可有效防止煤尘
喷洒装置+防风抑尘网	风速较大或环境较敏感的地区，如沿海、沿江或城市附近
喷洒装置+封闭式煤仓	风速大或环境敏感的地区，如沿海或城市附近

表4.25 石灰或石灰石粉卸货、储存和处理过程中的治理技术

治理技术	技术适用性
密闭罐车	适用于石灰石粉或石灰粉的运输

筒仓	适用于石灰或石灰石粉的储存
强劲的抽取与过滤设备的输送机	适用于石灰或石灰石粉的卸载
布袋除尘器	适用于石灰石的运输和卸料

表4.26 无组织排放控制措施

生产设备的无组织排放控制 (1) 设备密闭; (2) 进出口的负压措施; (3) 废气集气装置; (4) 喷水(或水雾)降尘; (5) 挡风板或挡风帘。	运输设备的无组织排放控制 (1) 是用传送带、移动料斗运输还是气动运输 (2) 封闭性措施; (3) 进出口的负压措施; (4) 喷水(或水雾)降尘; (5) 挡风板或挡风帘。
储料场的无组织排放控制 (1) 喷洒装置+封闭式筒仓; (2) 喷洒装置+防风抑尘网; (3) 露天堆场设喷洒装置+周边绿化; (4) 喷洒装置; (5) 防风墙。	采取抑尘措施的效果: (1) 采用筒仓式贮存抑尘效果高于 95%, (2) 防风抑尘网(单层尘网抑尘效果可达 85%, 双层综合效果可达 95%左右。) (3) 喷雾加湿防尘措施的、挡尘板、挡尘帘抑尘效果达 50% (4) 防尘墙措施的, 抑尘效果可达 20~30%。

2. 烧结废气

表4.27 烧结工艺废气

工序	产污节点	主要污染物
备料	原料运输进厂、堆料、堆场或仓棚、仓库	颗粒物
	取料、传输、提升受料矿槽	
烧结工艺	破碎、筛分	颗粒物等
	配料、拌合、传输封闭不严会产生大量含尘废气	
	烧结焙烧, 烧结机机头机尾会产生大量烧结烟气 (球团)焙烧, 生球干燥、焙烧过程	
冷却	破碎、筛分、运输、冷却、矿仓产生含尘废气; 冷却机产生冷却烟气;	颗粒物、SO ₂ 、CO、NO _x 等

表4.28 钢铁烧结工艺颗粒物治理技术

产尘位置	治理措施
原料堆场	洒水抑尘、冲水防尘、化学覆盖剂固尘、植树绿化阻尘及防尘网挡尘等。工艺设施产生的粉尘采取设备密闭防尘和机械抽风除尘的粉尘防治技术。
输送、贮存、配料、混料系统及球团造球工艺精矿干燥系统	采用电除尘器、布袋除尘器处理。粉尘排放浓度: 电除尘器可小于 50mg/m ³ , 布袋除尘器可小于 20mg/m ³ 。
烧结机头废气粉尘	电除尘技术, 粉尘排放浓度控制最好的基本在 20mg/m ³ 的范围内。同时电除尘器内斜气流技术和旋转电极技术可以增加处理效果。
烧结机尾废气粉尘	电除尘器, 也可采用袋式除尘器。
破碎冷却、成品整粒及成品矿槽系统粉尘	电除尘器除尘系统粉尘排放浓度可控制在 50mg/m ³ 的范围内。袋式除尘器除尘系统粉尘排放浓度可控制在 20mg/m ³ 的范围内。

烧结生产过程中产生的 SO₂ 需要进行治理, 目前常用的脱硫的方法和经济指标如表 所示。

表4.29 烧结工艺 SO₂ 治理技术

产生部位	治理技术	特点
烧结机头废气 SO ₂ 治理技术	石灰石-石膏法	产生的脱硫副产物是石膏，每脱除 1tSO ₂ 约产生 3t 的石膏
	氨法	副产物经蒸发结晶后为硫铵，每脱除 1tSO ₂ 约产生 3.6t 的硫铵
	镁法	一种是抛弃法，一种是回收法，即再焙烧回收氧化镁
	干（半干）法脱硫工艺	脱硫副产物的产生量为脱除 1tSO ₂ 约产生 2.5t（活性炭吸附法除外）

烧结生产过程产生的固体废物主要是除尘设施的含铁尘泥（含铁 40% 以上）等，产尘量为 25~40 kg/t 矿。烧结生产过程产生的固体废物一般都可将可再用废物返回到烧结生产工艺中去。

3. 炼铁污染

炼铁颗粒物治理，备煤系（粉碎配料）统颗粒物治理技术，煤场扬尘主要是风吹煤堆以及精煤装卸过程中产生的扬尘。

表4.30 备煤系（粉碎配料）统的粉尘治理

产尘位置	治理措施
煤场扬尘	堆取料机机械化减少装卸扬尘，半地下煤库贮煤，露天贮煤场四周设置挡风抑尘网墙可以抑制粉尘 85% 以上；煤库或煤场设置喷洒水装置（包括管道喷洒或机上堆料时喷洒），对煤堆进行不定时洒水，以增加其表面湿度；植树绿化阻尘。
煤破碎	煤预粉碎机室和煤粉碎机室均采用布袋除尘方式，废气捕集率大于 95%，除尘效率大于 99.5%，外排废气含尘浓度低于 30mg/m ³ 。煤转运站、煤粉碎机室、运煤通廊等均设计为封闭式结构，并在主要扬尘场所设洒水抑尘设施，以防止煤尘逸散。

炼铁 SO₂ 治理技术见下表所示。

表4.31 炼铁工艺 SO₂ 治理技术

产生部位	治理措施
高炉炉顶的煤气回收系统管网不平衡、高炉煤气点火放散所产生 SO ₂ 、NO _x	采用重力除尘、文一塔湿法除尘、提高高炉煤气回收利用率、减少高炉煤气点火放散
高炉出铁场产生粉尘、SO ₂ 、NO _x	铁渣沟加盖、各尘源点设收尘罩，布袋除尘
高炉渣处理系统产生 SO ₂ 、H ₂ S	水粒化高炉熔渣所产生的 SO ₂ 排气筒直接排放、水热泼干渣所产生的 SO ₂ 无组织直接排放
炼焦车间装煤、推焦、湿熄焦、放焦产生粉尘、CO、SO ₂ 、甲烷、焦油气、苯并芘等	旋风除尘器；采用重力除尘+两文一塔湿法除尘；尾气燃烧或回收利用；洗涤塔净化
热风炉燃烧煤气、粉煤、石油、塑料等燃料	采用清洁燃料，如净化后的高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气、低硫煤粉作燃料
焦炉加热 SO ₂ 、NO _x	安装脱硫装置或进行尾气燃烧回收利用；利用 H.P.F 法脱硫；A/O 生物脱氮技术

炼铁厂废水治理见下表所示。

表4.32 炼铁废水治理常用技术

废水种类	治理措施	去除效果分析	技术说明
高炉煤气洗涤水的处理	石灰软化—碳化法工艺流程	沉淀去除悬浮物采用辐射式沉淀池为多，效果较好。	泵送回煤气洗涤设备循环使用；浓缩池溢流水回沉淀池，或直接去吸水井供循环使用；瓦斯泥送人贮泥仓，供烧结

			作原料。
	投加药剂法工艺流程	使水质保持稳定	在沉淀池出口的管道上投加阻垢剂，阻止碳酸钙结垢，同时防止氧化铁、二氧化硅、氢氧化锌等结合生成水垢
	酸化法工艺流程	沉泥经脱水后，送烧结利用	经辐射式沉淀池自然沉淀(或混凝沉淀)，上层清水送至冷却塔降温，然后由塔下集水池输送到循环系统，在输送管道上设置加酸口
	石灰软化—药剂法工艺流程	达到协同效应，增强水质稳定效果	本处理法采用石灰软化(20%~30%的清水)和加药阻垢联合处理
高炉冲渣废水处理	渣滤法	可以降低水的暂时硬度，滤料也不必反冲洗，循环使用比较好实现	滤池占地面积大，一般都要几个滤池轮换作业，并难以自动控制，因此渣滤法只适用于小高炉的渣水分离
	槽式脱水法 (RASA 拉萨法)	脱水后的水渣由槽下部的阀门控制排出，装车外运；脱水槽出水夹带浮渣，一并进入沉淀池，沉淀下的渣再返回脱水槽，溢流水经冷却循环使用	脱水面积远远大于滤池，故占地面积较少
	转鼓脱水法 (INBA 印巴法)	由于所有的渣均在转鼓内被分离，没有浮渣产生，不必再设沉淀设施，极大地提高了效率	依靠自重落至转鼓中心的输出皮带机上，将渣运出，实现水与渣的分离

4. 炼钢污染

表4.33 炼钢工艺废气来源

工序	产污节点	主要污染物
铁水预处理	铁水倒罐、前扒渣、后扒渣、清罐、预处理过程等	颗粒物
转炉炼钢	吹氧冶炼（一次烟气）	CO、颗粒物、氟化物（主要成分为 CaF ₂ ）
	兑铁水、加废钢、加辅料、出渣、出钢等（二次烟气）	颗粒物
电炉炼钢	吹氧冶炼（一次烟气）	颗粒物、CO、NO _x 、氟化物（主要成分为 CaF ₂ ）、二噁英、铅、锌等
	加废钢、加辅料、兑铁水、出渣、出钢等（二次烟气）	
精炼	钢包精炼炉（LF）、真空循环脱气装置（RH）、真空脱气处理装置（VD）、真空吹氧脱碳装置（VOD）等设施的精炼过程	颗粒物、CO、氟化物（主要成分为 CaF ₂ ）
连铸	中间罐倾翻和修砌、连铸结晶器浇铸及添加保护渣、火焰清理机作业、连铸切割机作业、二冷段铸坯冷却等	颗粒物
其他	原辅料输送、地下料仓、上料系统、钢渣处理等	颗粒物
	中间罐和钢包烘烤	SO ₂ 、NO _x

炼钢颗粒物治理技术。

表49 炼钢颗粒物治理技术

产尘位置	治理措施
------	------

铁水预处理	排烟罩+袋式除尘器
转炉炼钢	转炉一次烟气：LT 干法除尘；第四代 OG 法系统除尘 转炉二次烟气：转炉挡火门封闭+袋式除尘器 转炉三次烟气：厂房封闭+屋顶抽风+袋式除尘器
电炉炼钢	电炉烟气：第四孔排烟+密闭罩+屋顶罩+袋式除尘器、导流罩+屋顶罩+袋式除尘器
炉外精炼	LF 烟气：半密闭罩+袋式除尘器

炼钢厂废水治理技术，炼钢废水治理技术如下表所示。

表4.34 炼钢废水污染治理技术

废水种类	治理技术	技术指标	适用性
转炉煤气洗涤废水	混凝沉淀法废水处理技术	水循环率 $\geq 95\%$ ，排水 SS $\leq 50\text{mg/L}$	炼钢工艺转炉煤气洗涤废水处理
连铸废水	三段式废水处理技术	一次沉淀：旋流池水力负荷 $25\sim 30\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ，停留时间 $8\sim 10\text{min}$ ； 二次沉淀：采用平流沉淀池时，水力负荷 $1\sim 3\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ，停留时间 $1\sim 3\text{h}$ ，采用斜板沉淀池时水力负荷 $3\sim 5\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ，停留时间约 30min ；出水 SS 浓度 $\leq 20\text{mg/L}$	炼钢工艺对回用水水质要求较严的连铸废水处理
	化学除油法废水处理技术	水温 $\leq 40^\circ\text{C}$ ，出水 SS $\leq 20\text{mg/L}$ 、石油类 $\leq 10\text{mg/L}$	炼钢工艺对回用水水质无特殊要求的连铸废水处理

5. 轧钢污染

表4.35 冷轧生产废气污染源及污染物

污染物	排放源	排放工艺
烟气	工业炉	工业炉运行时染料产生烟气
酸雾	连轧、推拉式酸洗、电镀锡、电镀锌、热镀锌、中性盐电解酸洗、电解酸洗、混酸酸	酸洗连轧、推拉式酸洗、电镀锡、电镀锌、热镀锌、中性盐电解酸洗、电解酸洗、混酸酸洗、电解脱脂槽、涂层、酸再生装置等工艺过程产生的含酸气体
碱雾	热镀锌机组、连退机组、脱脂清洗段等	热镀锌机组连退机组、脱脂等设备、的碱洗槽、漂洗槽等设备在工艺过程产生的含碱气体
乳化液油雾	冷轧机组、湿平整机、修磨抛光机组等设备	轧机组、湿平整机修磨抛光机组等设备工作时产生乳化液油雾
粉尘	热轧精轧机、拉矫机、焊机、酸再生、干平整机、管坯精整、方坯精整、抛丸机、修磨机、锌锅、锡锅、铅浴炉等88备	热轧精轧机、拉矫机、焊机、酸再生、干平整机、管坯精整、方坯精整、抛丸机、修磨机、锌锅、锡锅、铅浴炉等设备运行时产生的烟尘

轧钢颗粒物治理技术见下表所示。

表4.36 轧钢颗粒物治理技术

技术名称	原理	特点
塑烧板除尘技术	利用塑烧板内部的多微孔结构阻留含尘废气中的粉尘，阻留下来的粉尘再经压缩空气反吹，落入灰斗进行收集	该技术除尘效率高，维护费用低，但一次性投资较高。适用于轧钢工艺热轧工序火焰清理机和精轧机等设备的除尘
袋式除尘技术	利用纤维织物的过滤作用对含尘气体进行净化	该技术除尘效率高，适用范围广，可附带去除吸附在颗粒物上的重金属。适用于轧钢工艺冷轧工序干式平整机、拉矫机、焊机、抛丸机、修磨机等设备的除尘，以及钢管穿孔吹氮喷砂工序、

		矫直及精整吸灰工序等的除尘
湿式电除尘技术	以放电极和集尘极构成静电场,使进入的含尘气体被电离,荷电的含尘微粒向集尘极运动并被捕集,在集尘极释放电荷,并在水雾作用下冲入灰斗,排入循环水池	该技术除尘效率大于95%,外排废气含尘浓度低于50mg/m;但设备耗电量大,且有废水产生。适用于轧钢工艺热轧工序火焰清理机等设备的除尘

轧钢厂废水治理技术,轧钢废水污染治理技术如下表所示。

表4.37 轧钢废水污染治理技术

技术名称	原理	特点
三段式热轧废水处理技术	废水先后流经一次沉淀池(旋流井)和二次沉淀池(平流沉淀池或斜板沉淀池)去除其中的大颗粒悬浮杂质和油质,出水进入高速过滤器,进一步对废水中的悬浮物和石油类污染物进行过滤,最后经冷却塔冷却后循环使用	该技术可去除废水中的大部分氧化铁皮和泥沙,适用于轧钢工艺热轧直接冷却废水的处理。处理后的出水可经冷却返回热轧浊环水系统循环使用
稀土磁盘热轧废水处理技术	通过磁场力的作用,去除废水中的可磁化悬浮物	该技术不添加化学药剂,避免二次污染;占地面积小,工艺流程短,投资低 适用于轧钢工艺热轧直接冷却废水的处理。处理后的出水经冷却返回热轧浊环水系统循环使用
两段式热轧废水处理技术	利用一次铁皮沉淀池与化学除油器组合的方式进行废水的处理	该技术可使出水悬浮物浓度低于30mg/L,石油类污染物浓度低于5mg/L;但沉降效果不稳定,出水水质波动大
旁滤冷却层流冷却废水处理技术	针对层流冷却系统对水质要求不高的特点,仅对层流冷却后的部分废水进行过滤、冷却处理;处理后的出水再与未经处理的层流冷却废水混合,返回层流冷却系统循环使用	该技术可减少废水中污染物含量、降低水温,出水水质可达到层流冷却回用水要求
混凝沉淀石墨废水处理技术	通过投加混凝剂使废水中的悬浮物以絮状沉淀物形式从废水中分离	该技术处理后的出水悬浮物浓度可低于200mg/L,出水与清水混合后可返回浊环水系统循环使用
超滤预处理技术	利用超滤膜只透过小分子物质的特性,截留废水中的悬浮物、胶体、油类等物质	该技术适用于轧钢工艺浓碱及乳化液废水、光整废水和湿平整废水的预处理
化学破乳预处理技术	通过投加化学药剂使废水中的乳化液脱稳,在混凝剂或气浮剂作用下从水体中分离	该技术适用于轧钢工艺浓碱及乳化液废水的预处理,破乳处理前需调节pH值
化学还原沉淀预处理技术	在酸性条件下,将六价铬还原成三价铬,再调节pH值使三价铬以难溶于水的氢氧化铬沉淀形式从废水中分离	该技术适用于轧钢工艺含铬废水的预处理
化学沉淀预处理技术	将废水中的重金属物质转化为相应的难溶性沉淀从水体中分离	该技术适用于轧钢工艺重金属(主要是锌、锡)废水的预处理
中和预处理技术	向混合后的酸、碱废水中投加碱类或酸类物质,调节废水的pH值	该技术适用于轧钢工艺酸性废水、磷化废水的预处理及各类冷轧废水预处理前的pH值调节
生化处理技术	利用微生物的新陈代谢作用,降解废水中的有机物。轧钢工艺废水处理中常采用的生化处理技术主要有膜生物反应器(MBR)和生物滤池等	适用于轧钢工艺浓碱及乳化液废水、光整废水和湿平整废水预处理后的综合处理,以及稀碱含油废水的处理

混凝沉淀技术	通过投加絮凝剂,使水体中的悬浮物胶体及分散颗粒在分子力的作用下生成絮状体沉淀从水体中分离	该技术适用于轧钢工艺冷轧废水的综合处理
--------	--	---------------------

6. 钢铁行业固废污染

固体废物主要来源于烧结(含铁尘泥、废矿石、除尘灰、废油(危废)、脱硫渣);炼铁(铁水冶炼渣、瓦斯尘泥、脱硫渣);炼钢(钢渣、尘泥、氧化铁皮、脱硫渣、废钢碳钢酸洗废酸);轧钢(废氧化皮、水处理池污泥,废油、电镀废渣、废液、废酸、废碱均属危险废物)。

表4.38 钢铁企业固体废物处置利用

生产工序	固体废物类型	数量	处置利用
烧结(球团)	除尘尘灰		回用
炼铁	炼铁渣	296~700kg/t(平均340)	综合利用
	除尘尘灰、尘泥		回用
	废耐火材料		处置
转炉炼钢	钢渣	110~170 kg/t	综合利用
	除尘尘灰、尘泥	平均19 kg/t	回用
	废耐火材料		处置
电炉炼钢	钢渣	150~190 kg/t	综合利用
	除尘尘灰、尘泥		回用
	废耐火材料		处置
热轧	尘灰、污泥		回用
冷轧	尘灰、污泥		回用
	废酸		综合利用
	污油		综合利用

7. 噪声治理

钢铁企业的主要环境噪声来源于大型运输车辆、装载机、输运设施、转炉、电炉、蒸汽放散阀、火焰清理机、火焰切割机、煤气加压机、吹氧阀站、空压机、真空泵、各类风机、水泵等机械产生的噪声。

表4.39 噪声及其它污染控制措施表

工序	产噪设备	主要污染成份	采取措施
原料	除尘风机	强度 95dB(A)	消声器
	堆取料机	强度 85dB(A)	距离衰减
球团	高压辊磨机	强度 105dB(A)	密闭隔声机房
	强力混合机	强度 85dB(A)	设备间密闭隔声
	圆筒造球机	强度 95dB(A)	设备间密闭隔声
	筛分机	强度 90 dB(A)	设备间密闭隔声
	链蓖机排烟风机	强度 110 dB(A)	机房隔声、设消声器
	环冷机冷却风机	强度 100dB(A)	机房隔声、设消声器
	精矿干燥机	强度 95dB(A)	设备间密闭隔声
烧结	主抽风机	强度 120dB(A)	消声器
	冷却风机	强度 115dB(A)	消声器
	除尘风机	强度 100dB(A)	消声器
	筛分机	强度 105dB(A)	隔声罩

焦化	除尘、排烟风机	强度 105dB(A)	消声器、隔声罩
	干熄焦发电锅炉排气管	强度 120dB(A)	消声器
炼铁	煤气减压阀	强度 115dB(A)	消声器
	高炉炉顶排气管	强度 120dB(A)	消声器
	高炉煤气均压放散	强度 110 dB(A)	消声器
	高炉煤气余压发电机组	强度 105dB(A)	隔声罩
	高炉鼓风机组	强度 105dB(A)	隔声罩
	除尘风机	强度 100 dB(A)	消声器
炼钢连铸	OG 风机	强度 130 dB(A)	消声器
汽化冷却	安全阀排气管	强度 110 dB(A)	消声器
	真空泵	强度 100 dB(A)	包扎隔声材料、设隔声间
	空压机	强度 110 dB(A)	消声器
	切割清理机	强度 95 dB(A)	厂房隔声
	排蒸汽风机	强度 105dB(A)	隔声罩
热轧厂	轧线设备	强度 100 dB(A)	厂房隔声
	感应加热炉	强度 105dB(A)	隔声间
	空压机	强度 90 dB(A)	消声器
	除尘风机	强度 100 dB(A)	消声器
自备电厂	汽轮机发电机组	强度 110dB(A)	隔声罩
	锅炉鼓风机	强度 105dB(A)	消声器
	锅炉引风机	强度 105dB(A)	隔声罩
	汽包安全阀排气管	强度 130dB(A)	消声器

四、钢铁生产相关的污染源环境管理

(一) 产业政策

《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》生态环境部等五部委，2019-04-28；

《钢铁行业节能降碳专项行动计划（2024—2025 年）》；

《钢铁行业规范条件（2024 年修订）》工信部 2024 年第 34 号公告；

对于河北省而言，钢铁行业的环境管理工作是环保工作中的重要组成部分，因此河北省已构建起“严于国标、覆盖全流程”的钢铁行业环境政策与标准体系。下述为部分文件。；

《河北省重点行业大气污染综合治理实施方案》（冀气领办〔2019〕53 号）；

《河北省钢铁企业环保绩效全面创 A 工作方案》（2022-2024 年）；

《河北省钢铁行业节能降碳行动计划（2023-2025 年）》；

(二) 环境标准类（现行地方标准）

《铁矿采选工业污染物排放标准》（GB 28661—2012）；

《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》（GB 28662—2012）；

《炼铁工业大气污染物排放标准》（GB 28663—2012）；

《炼钢工业大气污染物排放标准》（GB 28664—2012）；

《轧钢工业大气污染物排放标准》（GB 28665—2012）；

《铁合金工业污染物排放标准》（GB 28666—2012）；

《钢铁工业水污染物排放标准》（GB 13456—2012）；

《炼焦化学工业污染物排放标准》（GB 16171—2012）。

清洁生产标准：

HJ/T 189-2006《清洁生产标准 钢铁行业》；

省级排放标准（地标 DB13）：

DB 13/ 2169-2018《钢铁工业大气污染物超低排放标准》；

DB 13/ 2863-2018《炼焦化学工业大气污染物超低排放标准》；

《河北省重点行业环保绩效 A 级标准 钢铁行业（长流程）（试行）》，此文件还有短流程版本；

《唐山市人民政府关于执行重点行业大气污染物排放特别要求的通知》唐政字〔2021〕82 号；

（三） 技术指南与配套文件

《钢铁企业超低排放改造工作方案编制指南（试行）》；

《钢铁及焦化行业超低排放评估监测技术指南》；

《重污染天气重点行业绩效分级及减排措施——钢铁行业》2023 修订；

（四） 水泥制造行业的环境统计

对于钢铁工业的环境统计而言，同样可以采用本文前述中的相关方法，如实测法、物料衡算法、系数法等，如使用系数法，可以参考《第二次全国污染源普查产排污系数手册 工业源》中钢铁行业相关的部分。

第4节 啤酒行业生产工艺与排污节点

一、啤酒行业简介

我国的啤酒产量已经稳居世界第一，但我国啤酒原料长期依赖进口是个不争的事实。近几年，受进口原料价格波动的影响，我国啤酒行业生产成本压力越来越大。啤酒原料特别是啤酒大麦的生产发展长期滞后于啤酒工业的发展，致使我国啤酒大麦长期依赖进口，成为世界上最大的啤酒大麦进口国。

啤酒是世界通用性饮品，以优质大麦为主要原料，啤酒花为香料，经过制麦芽、糖化、发酵等工序制成的富含营养物质和二氧化碳的酿造酒。为了降低成本，提高出酒率，改善啤酒风味和色泽，增强啤酒的保存性，在糖化操作时，常用大米、大麦、玉米和蔗糖等中的某一种代替部分麦芽，我国一般用大米为辅料，欧美国家用玉米。现在啤酒厂的吨酒麦芽用量已从最早的 120kg 降到 100kg，现在又进一步减少到 85kg 左右，啤酒酒精含量约为 3~6%，是世界产量最大的酒种。

我国啤酒业主要侧重于低端产品的生产，低廉的“普通”品牌大约占市场的 85%到 90%、国内高档品牌占 7%到 10%、国际高档品牌仅占 3%到 5%。虽然不同品牌的产品琳琅满目，但是产品间的差异很微小，大多数的产品都是同质化，产品形象混乱。而且，大部分企业过于重视销售额，没有根据市场的实际需求生产出适销对路的啤酒产品，而是一味生产低端的同质化产品，造成供过于求，同一企业内不同产品间出现价格和市场竞争等问题。在啤酒产量大幅度提高的同时，也向环境中排放了大量的有机废水。据统计，每生产 1 t 啤酒需要 10~30t 新鲜水，相应地产生 10~20t 废水。我国现在每年排放的啤酒废水已达 1.5 亿 t。由于这种废水含有较高浓度的蛋白质、脂肪、纤维、碳水化合物、废酵母、酒花残渣等有机无毒成分，排入天然水体后将消耗水中的溶解氧，既造成水体缺氧，还能促使水底沉积化合物的厌氧分解，产生臭气，恶化水质。

表4.40 我国 2001 年~2014 年啤酒年产量 （单位：万千升/年）

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
年产量	2274	2384	2537	2910	3062	3515	3931	4103	4236	4483	4899	4902	5062	4922

2014 年全球啤酒产量 19100 万千升，我国啤酒产量占全球产量的 25.77%。从 2002 年起，我国啤酒产量就已超过美国，连续 13 年啤酒总产量居世界第一，成为世界第一啤酒生产大国。

二、啤酒行业生产工艺

啤酒是以麦芽（包括特种麦芽）、酒花、酵母和水为主要原料，以大米或其它谷物为辅助原料，经麦芽汁的制备，加酒花煮沸，并由酵母发酵酿制而成的，含有二氧化碳、起泡的、低酒精度（2.5%-12%）的饮料酒。

（一）原料

【大麦】大麦是一种坚硬的谷物，成熟比其他谷物快得多，正因为用大麦制成麦芽比小麦、黑麦、燕麦快，所以才被选作酿造的主要原料。没有壳的小麦很难发出麦芽，而且也很不适合酿酒之用。

【麦芽】麦芽由大麦制成。大麦经浸渍发芽后制成鲜麦芽，再经干燥和焙焦从除根后制成麦芽。

【酒花】酒花是属于荨麻或大麻系的植物。酒花生有结球果的组织，正是这些结球果给啤酒注入了苦味与甘甜，使啤酒更加清爽可口，并且有助消化。

【酵母】酵母是真菌类的一种微生物。在啤酒酿造过程中，酵母是魔术师，它把麦芽和大米中的糖分发酵成啤酒，产生酒精、二氧化碳和其他微量发酵产物。

【水】水在啤酒中水占90%左右，酿造用水的质量好坏，直接影响到啤酒的质量与风味，啤酒酿造用水是指糖化用水和洗涤麦槽用水，这两部分水直接参与工艺反应，它是啤酒的主要成分，在麦汁制备以及发酵过程中，许多物理变化、酶反应、生物化学和生物学的变化都与水质直接有关，所以酿造用水是决定啤酒质量的重要因素之一。啤酒制造还要消耗酵母洗涤用稀释用水、冷却水及洗涤用水等，属于耗水量大的行业。啤酒酿造所需要的水质的洁净外，还必须去除水中所含的矿物盐。每生产一千升11%啤酒大约消耗4~9.5m³的水。

(二) 辅料

在糖化操作时，常用大米、大麦、玉米和蔗糖等中的某一种代替部分麦芽，我国一般用大米为辅料，欧美国家用玉米。

【大米】大米淀粉含量高于其他谷类，蛋白质含量低。用大米代替部分麦芽，不仅麦汁的浸出率高，而且可以改善啤酒风味、降低啤酒的色泽。我国啤酒厂用大米的数量一般在1/3~1/5，若采用外加酶糖化的工厂，大米的用量可达50%左右。

【玉米】淀粉的性质与大麦淀粉大致相同。但玉米胚芽含油质较多，影响啤酒的泡持性和风味。除去胚芽，就能除去大部分的玉米油。脱胚玉米的脂肪含量不应超过1%。以玉米为辅助原料酿造的啤酒，口味醇厚。玉米为国际上用量最多的辅助原料。

【淀粉】

【糖类】大都在产糖地区应用，一般使用量为原料的10~20%。添加的种类主要有蔗糖、葡萄糖、转化糖、糖浆等。

表4.41 啤酒生产原辅料

原辅料	说明
麦芽	麦芽由大麦制成。用大麦制麦芽比小麦、黑麦、燕麦快，没有壳的小麦很难发出麦芽，所以选用带壳大麦作酿造的主要原料。大麦发芽过程将内含地难溶性淀粉转变为用于酿造工序的可溶性糖类。
酒花	酒花属麻系植物。酒花有结球果组织，结球果给啤酒注入了苦味与甘甜，使啤酒更加清爽可口，并且有助消化。
酵母	真菌类的一种微生物。在啤酒酿造过程中，酵母把麦芽和大米中的糖分发酵成啤酒，产生酒精、二氧化碳和其他微量发酵产物。这些微量但种类繁多的发酵产物与其它那些直接来自于麦芽、酒花的风味物质一起，组成了成品啤酒的感官特征。
糖	在某些啤酒中精炼糖是重要的添加物。它使啤酒颜色更淡，杂质更少，口味更加爽快。通过加入大米来获取精炼糖，使啤酒的口味更加清爽，以符合消费者口味的需要。
水	啤酒90%以上成份是水，水在啤酒酿造过程起重要作用。酿造所需水质必须洁净，应为去除矿物盐的软水。

(三) 产品

按生产方式分类：鲜啤酒（不经巴氏灭菌或瞬时高温灭菌的新鲜啤酒。）、纯生啤酒（不经巴氏灭菌或瞬时高温灭菌的新鲜啤酒，而采用物理方法进行无菌过滤。）、熟啤酒（经巴氏灭菌或瞬时高温灭菌的啤酒。）

表4.42 生产 1 吨啤酒的资源消耗

	水耗	综合能耗	煤耗	电耗
国际一级标准	< 6m ³		80kg 标煤	85kwh
国内清洁生产一级标准	< 6m ³	115 kg 标煤	80kg 标煤	85kwh
国内现有平均水平	5~12 m ³			70~120

能耗和水耗：

啤酒是以麦芽（包括特种麦芽）为主要原料，以大米或其它谷物为辅助原料，经麦芽汁的制备，加酒花煮沸，并由酵母发酵酿制而成的，含有二氧化碳、起泡的、低酒精度（2.5%~12%）的饮料酒。

表4.43 啤酒生产企业资源能源利用指标

清洁生产指标等级	一级	二级	三级
取水量/（m ³ /kL）	≤6	≤8	≤9.5
标准浓度 11° 啤酒耗粮/（kg/kL）	≤158	≤161	≤165
电耗/（kwh/kL）	≤85	≤100	≤115
耗标煤量/（kg/kL）	≤80	≤110	≤130
综合能耗/（kg/kL）	≤115	≤145	≤170

参考《清洁生产标准—啤酒制造业》

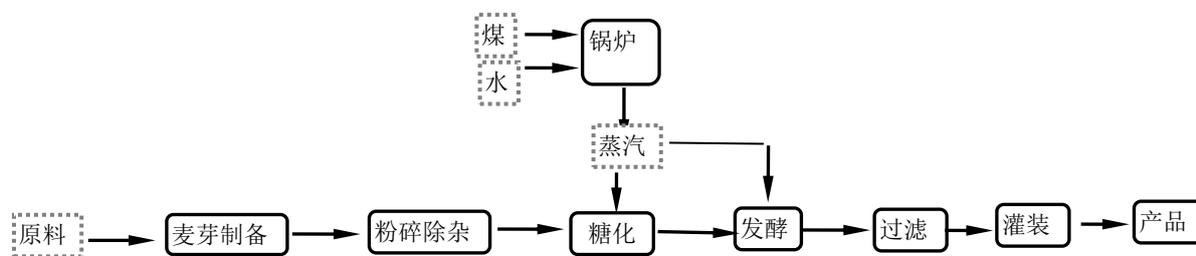


图4.12 啤酒行业生产流程

啤酒的生产过程大体可以分为四大工序：麦芽制造；麦汁制备；啤酒发酵；啤酒包装与成品啤酒。

（一）原料进厂

原料（袋装大麦或麦芽粉、酒花等）、辅料（袋装的大米、淀粉等）、等通过运输车辆运输进厂，入库，倒袋、入仓。燃料（煤炭）等通过运输车辆卸入煤仓。主要产生扬尘废气。

（二）麦芽制备

麦芽制备工序整个浸渍周期长达 48~72h。麦芽制备工段分为大麦贮存、筛选、浸渍、发芽、干燥和除根等六个工序。用水浸渍大麦，俗称浸麦，浸麦用水中常投加化学药品，如饱和澄清石灰水、甲醛水溶液、高锰酸钾、氢氧化钠或氢氧化钾溶液。麦芽干燥过程分烘干和焙焦两个过程，使酶停止活动，干燥成干麦芽。除根是利用除根机加工。麦芽制备工序主要产生浸麦废水和冷却废水。

（三）原料粉碎

将麦芽、大米分别由粉碎机粉碎至适于糖化操作的粉碎度，制得麦芽粉。有些啤酒企业直接购入麦芽粉，以上工序就没有了。粉碎工序产生含尘废气和洗涤废水。

（四）糖化

将粉碎的麦芽和淀粉质辅料用温水分别在糊化锅、糖化锅中混合，调节温度。糖化锅先维持在适于蛋白质分解作用的温度（45~52℃）进行糊化。再将糊化锅中液化完全的醪液兑入糖化锅后，维持在适于糖化的温度（62~70℃）制造麦醪。糖化后滤除麦糟得到麦汁。此工序中将产生麦汁冷却水、装置洗涤水、

麦糟、热凝固物和酒花糟，装置洗涤水主要是糖化锅洗涤水，过滤槽洗涤水和沉淀槽洗涤水，除此之外，糖化过程还要排出酒花糟、热凝固物等大量悬浮固体

麦醪温度的上升方法有浸出法和煮出法两种。蛋白、糖化休止时间及温度上升方法，根据啤酒的性质、使用的原料、设备等决定用过滤槽或过滤机滤出麦汁后，在煮沸锅中煮沸，添加酒花，调整成适当的麦汁浓度后，进入回旋沉淀槽中分离出热凝固物，澄清的麦汁进入冷却器中冷却到 5~8℃。

（五）发酵

冷却后的麦汁添加酵母送入发酵池或圆柱锥底发酵罐中发酵，用蛇管或夹套冷却并控制温度。进行下面发酵时，最高温度控制在 8~13℃，发酵过程分为起泡期、高泡期、低泡期，一般发酵 5~10 日。发酵成的啤酒称为嫩啤酒。

为了使嫩啤酒后熟，将其送入贮酒罐中或继续在圆柱锥底发酵罐中冷却至 0℃左右，调节罐内压力，使 CO₂ 溶入啤酒中。贮酒期需 1~2 月，在此期间残存的酵母、凝固物等逐渐沉淀，啤酒逐渐澄清。

发酵工段中除产生大量的冷却水外，还产生发酵罐洗涤水、废消毒液、酵母漂洗水和凝固物。

（六）过滤

为了使啤酒澄清透明成为商品，啤酒在-1℃下进行澄清过滤。对过滤的要求为：过滤能力大、质量好，酒和 CO₂ 的损失少，不影响酒的风味。过滤方式有硅藻土过滤、纸板过滤、微孔薄膜过滤等。

（七）灌装

啤酒生产的最后一道工序，包括洗瓶、灌酒、封口、杀菌、贴标和装箱生产线。产品入库。

四、啤酒工业主要生产设备。

表4.44 啤酒工业主要生产设备

项 目	设备（设施）名称
原料进厂	运输车辆、装卸机械、胶带输送机、原料仓、辅料仓、煤棚等
麦芽制备	筛选设备、输运设备、浸渍池、发芽室、风机、除根机、烘干机
原料粉碎	运料车、粉碎机、皮带输送机、斗式提升机、螺旋式输送机等
糖化	糊化锅、糖化锅、过滤槽、煮沸锅、旋沉槽等
发酵	发酵罐、清酒罐等
过滤	过滤机等
灌装	灌装机、保鲜桶、封口机等
辅助工程	锅炉、污水厂、送风设备、制冷机组、冰水罐等

三、啤酒行业排污节点

（一）排污节点分析

啤酒行业的主要污染物是废水、废气、废渣。啤酒生产过程中，每道工序又都会有废水排出，除去同时排放的固体废物（热凝固蛋白、废酵母泥、废硅藻土、废麦糟等）、粉尘（粉碎的细粉）外，啤酒厂废水的主要来源有：糖化过程的糖化、过滤洗涤水；发酵过程的发酵罐、管道洗涤、过滤洗涤水；灌装过程洗瓶、灭菌、破瓶啤酒及冷却水；除啤酒生产各工序排出废水外，动力部门还会排出冷却水。其中，包装工序排出的冲洗水属低浓度有机废水；酿造过程排出的废水一般污染物浓度较高，属高浓度有机废水。啤酒生产过程中产生的废气主要有发酵过程中产生的 CO₂ 和锅炉废气等。当前啤酒行业主要环境问题是水

污染。

啤酒生产过程用水量很大，特别是酿造、罐装工序过程，由于大量使用新鲜水，会产生大量废水。我国不同啤酒企业用水量相差较大，每生产 1 t 啤酒耗水 10~50 m³，这取决于生产规模及管理水平，国内先进清洁生产水平为治理前每 t 啤酒废水排放量约 11 m³ 左右。

啤酒生产总排放废水中富含糖类、醇类、蛋白质、淀粉、果胶、维生素、废酵母等物质，属于中高浓度有机废水，虽然无毒，但易于腐败，排入水体要消耗大量的溶解氧，对水体环境造成严重危害。啤酒废水的水质和水量在不同季节有一定差别，处于高峰流量时的啤酒废水，有机物含量也处于高峰。其中的主要污染因子是 pH、COD_{Cr}、BOD₅、悬浮物、氨氮，pH 值约在 5~12，COD 的浓度约在 1000~3000 mg/L，BOD 的浓度约在 600~1500 mg/L，SS 的浓度约在 300~1000 mg/L，啤酒废水的可生化性较好，BOD/COD 约为 0.5~0.7，属于可生化性较好的废水，生化处理去除效率高达 80%~90% 以上，且处理成本较低。

啤酒生产的废气主要来自两方面：

1. 蒸汽锅炉产生的燃料燃烧烟气，主要取决于使用的燃料和锅炉；
2. 污水处理厂会产生恶臭气体，应采取除臭控制措施。

啤酒生产的各道工序都会产生废渣，包括过滤出的废麦糟、酵母泥、废硅藻土、废酒泥等。废麦糟是麦汁制作过滤后的废物，湿麦糟中含有 0.5~2.0% 的可洗出浸出物（残糖），粗蛋白 5%，可消化蛋白 3.5%，可溶性非氮物 10%，粗纤维 5%，灰分 1% 等；废酵母是洗涤酵母过程过滤后的废物，其中含有丰富的蛋白质（以干物质计，含量达 50%）、维生素（特别是 B 族维生素，含量及种类均较多）、核酸和其他含磷有机物等。

啤酒行业的原料是大麦、酒花、大米，生产过程只利用了其中的淀粉，大部分蛋白质留在了麦糟及凝固物中，同时，还排出废酒花、废酵母、废酒、CO₂ 等，都是无毒无害的物质，且有一定的营养成分。每 t 啤酒的可回收固体废物包括：废麦糟 200~300kg（含水 80%）、酵母 6~9 kg、废硅藻土 7~10 kg 等。当污水采用生化法处理时，每削减 1t BOD₅ 约产生污泥 0.6t。

当前啤酒行业资源能源利用效率低、环境污染严重和经济效益低下，推行循环经济、加强清洁生产良性的持续发展模式是成为我国啤酒行业最为紧迫的问题。

具体的排污节点见下图：

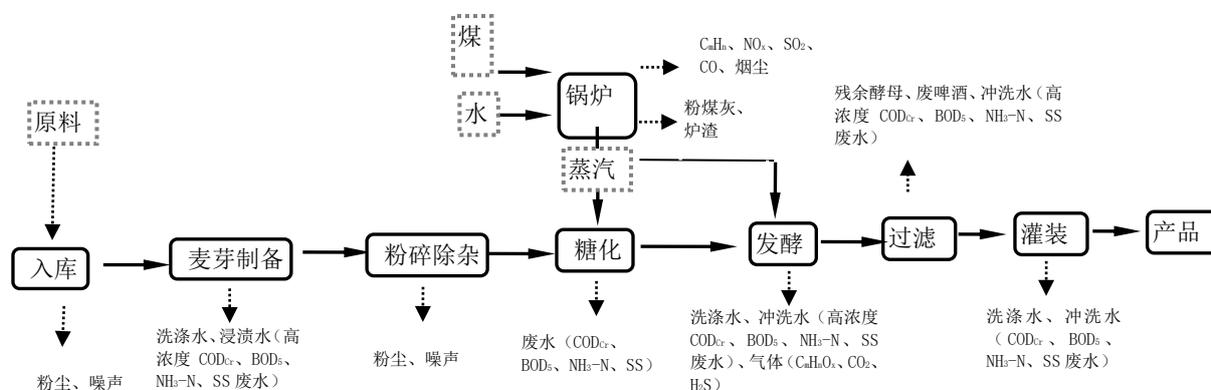


图4.13 啤酒生产企业排污节点图

啤酒行业排污节点表。

表4.45 啤酒行业排污节点表

	生产设施	污染产生原因	排污节点和主要环境因素	控制措施
备料	运输车辆、装卸机械、胶带输送机、原料仓、辅料仓、煤棚	原辅料和燃料进厂、卸货, 贮存、上料过程产生废气和噪声	产生含粉尘废气, 多属于过程无组织排放; 产生运输车辆噪声、装卸运输机械噪声	产尘多的工位要采取集气除尘;
麦芽制备	筛选设备、输运设备、浸渍池、发芽室、风机、除根机、烘干机等	大麦的筛选、输运、浸渍、发芽、除根、干燥、烘干过程产生废气和噪声	产生有异味的废气; 产生清洗、浸渍废水, 地面清洗废水主要含 COD、SS、氨氮等; 风机噪声较高	产尘多的工位要采取集气净化、除味; 废水引入污水站处理
原料粉碎	运料车、装载机、粉碎机、皮带输送机、斗式提升机、螺旋式输送机等	物料粉碎及运输, 机械设备运行	原料、配料在运料、卸料、堆料、上料、储料都会产生粉尘污染; 进出料口、排气口会产生粉尘污染; 运输车辆和装载机械会产生噪声, 破碎机、磨机工作产生噪声。	皮带输送机应设封闭防尘廊道; 应加强料库的封闭性, 减少无组织粉尘排放; 装卸应减少遗撒; 库棚和道路如有遗撒及时收集以防扬尘 破碎机、磨机排气口应装置袋式除尘器, 进出口应加强密闭措施, 减少废气泄漏; 破碎机、磨机应采取一定降噪措施
糖化	糊化锅、糖化锅、过滤槽、煮沸锅、旋沉槽等	设备清洗、车间清洗、蒸煮过程	冲洗水、冷凝水、洗涤水 风机等设备工作产生噪声 蒸煮过程中产生异味	采取密封及气体收集处理措施 设置污水收集设施 风机应采取降噪措施
发酵	发酵罐、清酒罐等	设备清洗、车间清洗、发酵过程	清洗过程产生含有大量有机物的洗涤水、冲洗水 发酵过程中产生异味	采取密封及气体收集处理措施 设置污水收集设施
过滤	过滤机等	设备使用、清洗、车间清洗	过滤过程产生含有大量有机物的废液、洗涤水、冲洗水	设置污水收集设施
灌装	灌装机、保鲜桶、封口机等	灌装设备使用	产生噪声	采取降噪措施
辅助工程	锅炉房	燃烧产生烟气; 煤场、灰库会产生扬尘 锅炉、除尘产生灰渣 风机等设备工作产生噪声	锅炉燃烧烟气, 污染物烟尘、SO ₂ 和NO _x ; 煤场、灰库会产生扬尘; 锅炉、除尘产生灰渣; 风机等设备工作产生噪声	烟气应除尘、脱硫; 煤场、灰库应采用抑尘措施; 灰渣外运处置或综合利用 风机应采取降噪措施
	污水处理厂	处理生产废水、办公区生活废水	废水主要污染物 PH、色度、悬浮物、BOD、COD _{cr} 、氨氮、总氮、总磷、臭气等; 废水处理产生污泥	废水经处理水质达到回用水标准后, 主要回用于厂区生产和生产循环冷却水以及设备喷水部分补充 污泥回用
	厂区环境管理	保持地面整洁; 进行雨水的清污分流; 生产工艺很多环节产生异味	车辆运输产生扬尘; 地面的雨水会将含地面的灰渣冲走, 产生污水	厂区积水与雨水收集进行清污分流; 厂区和道路及时清扫运输车辆遗洒, 道路应经常洒水降尘

表4.46 啤酒生产企业主要污染要素

污染类型	主要污染指标
废气	主要污染物有 C ₂ H ₆ 、NO _x 、SO ₂ 、CO、烟尘等
污水	主要污染物有 PH、色度、悬浮物、BOD、COD _{cr} 、氨氮、总氮、总磷等
固体废物	主要有包括粉煤灰、炉渣、污泥、酒糟

噪声	粉碎机、风机、运输车辆等产生的噪声
----	-------------------

(二) 啤酒行业污染处理技术

1. 无组织排放的防控

在啤酒生产过程中，原料进厂后需要经过糖化、发酵、过滤等工序，存在着不同程度的异味排放（有组织或无组织）。

啤酒企业粉尘无组织排放大多产生于原料运输、物料粉碎、转运、物料下料口等环节，若对上述过程设置了有效的收尘设施，则可以有效地减少和消除粉尘的无组织排放，否则扬尘无法避免，粉尘的无组织排放就会加重。

2. 除尘控制措施

表4.47 各类除尘器的除尘效率 η 表

除尘方式	平均除尘率 (%)	类型	除尘方式	平均除尘率 (%)
三级电除尘	99.1%	四级电除尘		99.4%
双旋风除尘器	85~95	布袋除尘器	玻璃纤维布袋	99
组合旋风除尘器	80~95		复式布袋除尘	> 99.5%
组合旋风除尘器	70~85		复式电袋除尘	99.98%

3. 废水措施措施

啤酒厂产生的废水主要含糖类，醇类等有机物，有机物浓度较高，虽然无毒，但易于腐败，排入水体要消耗大量的溶解氧，对水体环境造成严重危害。啤酒废水的水质和水量在不同季节有一定差别，处于高峰流量时的啤酒废水，有机物含量也处于高峰。

国内啤酒厂废水中：COD_{Cr} 含量为：1000~2500mg/L，BOD₅ 含量为：600~1500 mg/L，该废水具有较高的生物可降解性，且含有一定量的凯氏氮和磷。因为啤酒废水的 BOD/COD 比高达 0.5 以上，所有具有良好的生物可降解性能，处理方法主要选择生物氧化法。

在生物氧化过程中，有些微生物如球衣细菌、酵母菌等体系大、密度小，菌胶团细菌不能在活性污泥法的处理构筑物中正常生长，导致处理效果不理想。因此，早期啤酒污水通常采用生物膜法，一般可选用生物接触氧化法。生物接触氧化法利用池内填料聚集球衣细菌等微生物，使处理取得理想的效果，也可先采用厌氧处理，降低污染负荷，再用好氧生物处理。目前国内的啤酒厂工业污水的污水处理工艺，都是以生物化学方法为中心的处理系统。

(1) 好氧处理工艺

好氧生物处理是在氧气充足的条件下，利用好氧微生物的生命活动氧化啤酒废水中的有机物，其产物是二氧化碳、水及能量（释放于水中）。这类方法没有考虑到废水中有机物的利用问题，因此处理成本较高。活性污泥法、生物膜法、深井曝气法是较有代表性的好氧生物处理方法。

(2) 水解—好氧处理工艺

水解酸化可以使啤酒废水中的大分子难降解有机物转变成为小分子易降解的有机物，出水的可生化性能得到改善，这使得好氧处理单元的停留时间小于传统的工艺。与此同时，悬浮物质被水解为可溶性物质，使污泥得到处理。水解反应工艺式一种预处理工艺，其后面可以采用各种好氧工艺，如活性污泥法、接触氧化法、氧化沟和 SBR 等。啤酒废水经水解酸化后进行接触氧化处理，具有显著的节能效果，COD/BOD

值增大，废水的可生化性增加，可充分发挥后续好氧生物处理的作用，提高生物处理啤酒废水的效率。因此，比完全好氧处理经济一些。

(3) 厌氧—好氧联合处理技术

厌氧处理技术是一种有效去除有机污染物并使其碳化的技术，它将有机化合物转变为甲烷和二氧化碳。对处理中高浓度的废水，厌氧比好氧处理不仅运转费用低，而且可回收沼气；所需反应器体积更小；能耗低，约为好氧处理工艺的 10%~15%；产泥量少，约为好氧处理的 10%~15%；对营养物需求低；既可应用于小规模，也可应用大规模。

厌氧法的缺点是不能去除氮、磷，出水往往不达标，因此常常需对厌氧处理后的废水进一步用好氧的方法进行处理，使出水达标。常用的厌氧反应器有 UASB、AF、FASB 等。其中以升流式厌氧污泥床(UASB)技术在啤酒废水的治理方面应用最为成熟。

啤酒生产中酒糟、废酵母、废酒花等将全部回收进行综合利用，用于做饲料。碎瓶将全部回收进行综合利用。

表4.48 固体废物处理方式

序号	污染物	处理方式
1	麦糟、米糟	外售给饲料厂
2	废酵母	
3	玻璃瓶及商标纸	分别由玻璃厂和造纸厂回收
4	污泥	由有资质的单位处理
5	废硅藻土	由环卫部门统一收集处理
6	生活垃圾	

4. 噪声治理

从污染源分析可知，该项目的噪声源主要是空气压缩机、冷冻机、原辅料及产品的交通运输车辆等，它们运行时的噪声源强声级在 80~95 分贝之间。

噪声防治拟采用下列措施：

- (1) 生产车间、辅助车间、公用工程均应按低噪声要求进行设计；
- (2) 项目噪声设备均选用低噪声设备；
- (3) 对于空压机、冷冻机噪声，项目拟将空压机、冷冻机设置在专门的房内，对内墙敷设吸声消声材料，并对空压机、冷冻机底座采取减振措施；
- (4) 通过采用低噪声离心或轴流通风机、加装减震垫圈、风管进出口设置消声器等措施，可以消除噪声影响；
- (5) 辅助车间强噪声设备不设窗户，用隔声门隔音；
- (6) 为经常工作在噪声较大的环境里的工作人员配戴耳塞；
- (7) 在厂内道路两侧、建筑物周围的空地上，搞好绿化，多种植些阔叶树木，改善厂内环境、降低噪声的影响。

四、啤酒行业的污染源环境管理

(一) 产业政策

《中国酒业“十四五”发展指导意见》（2024年发布）目标：到2025年啤酒产量达3900万千升（较

“十三五”末增长 11.4%)，销售收入 2100 亿元 (增长 40%)，利润 300 亿元 (增长 100%)。

《关于推动轻工业高质量发展的指导意见》(2022 年)支持方向：发展多样化、个性化、低度化酒类产品，包括无醇啤酒等创新品类。

《啤酒制造业污染防治技术政策(征求意见稿)》源头控制：采用干排糟技术、二次蒸汽回收系统，推广超高浓度酿造技术。资源循环：废水回用率新建企业 $\geq 50\%$ ，现有企业 $\geq 40\%$ ；二氧化碳回收率 100%，废酵母、废硅藻土全量回收。清洁生产：2020 年底前 80%以上企业达到国内清洁生产先进水平。

《工坊啤酒产品认证与评价实施规则》(T/CBJ 3304-2024)适用范围：工坊啤酒厂(糖化麦汁能力 $\leq 50\text{kL}/\text{批}$)和啤酒工坊(糖化麦汁能力 $\leq 10\text{kL}/\text{批}$)的认证与星级评价。要求：生产能力 $\geq 10\text{kL}/\text{年}$ ，设备需满足 6 种以上啤酒风格生产，采用第三方认证确保规范性。

《啤酒单位产品能源消耗限额》(GB 32047-2025)

实施时间：2026 年 8 月 1 日。

能耗分级：1 级(能效标杆值)、2 级(准入值)、3 级(限定值)，覆盖酿造、包装全流程能耗。

预计效益：实施后年节约 26 万吨标煤，拉动 6 亿元技改投资。

(二) 环境标准

《啤酒工业污染物排放标准》(GB 19821-2005)适用范围：啤酒与麦芽生产废水、废渣及大气污染物管理。核心指标：废水：排入自然水体的 COD $\leq 80\text{mg}/\text{L}$ ，BOD₅ $\leq 20\text{mg}/\text{L}$ ；排入城镇污水处理厂的 COD $\leq 500\text{mg}/\text{L}$ 。废渣：酒糟、废酵母需 100%回收利用或无害化处置，符合 GB 18599 标准。修订更新：2020 年增加对污水集中处理设施的管理要求，允许企业与处理设施签订协议约定排放限值。

地方标准：河南省《啤酒工业水污染物排放标准》(DB41/681—2025)实施时间：2025 年 4 月 1 日。新增内容：强化协商约定污染物的监测与合同管理，衔接排污许可要求。

大气污染物相关标准：

锅炉废气：执行 GB 13271-2014，燃气锅炉 NO_x $\leq 150\text{mg}/\text{m}^3$ 。恶臭污染物：氨、硫化氢执行 GB 14554-93，厂界氨 $\leq 4.9\text{mg}/\text{m}^3$ 。VOCs 无组织排放：厂区内执行 GB 37822-2019，NMHC $\leq 6\text{mg}/\text{m}^3$ (监控点处 1h 平均)。

噪声与固废标准：

噪声：厂界执行 GB 12348-2008，3 类区昼间 $\leq 65\text{dB}(\text{A})$ 。危险废物：废活性炭、废机油等需按 GB 18597-2023 规范贮存，委托有资质单位处置。

《清洁生产标准 啤酒制造业》(HJ/T 183-2006)分级指标：一级(国际先进)、二级(国内先进)、三级(国内基本水平)，涵盖生产工艺、资源利用、污染物产生等 6 类指标。关键要求：单位产品综合能耗 $\leq 115\text{kg}$ 标煤/kL(一级)，水耗 $\leq 6.0\text{m}^3/\text{kL}$ 。