

深圳市重点行业清洁生产技术汇编

(2023 年)

深圳市生态环境局

深圳市源清环境技术服务有限公司

二〇二四年二月

深圳市重点行业清洁生产技术汇编

(2023 年)

◎主编：曾 婷

◎副编：毛 玲 韩振超

◎编写：谢 威 张 萍 林杰华

郭奕灿 何 琬 吴焕圳

段龙城



电子版扫码查看

目 录

总 则	1
一、原辅材料替代	3
方案一：抛光工序 无氮抛光液	4
方案二：图形制造工序 干膜替代湿膜	6
方案三：镀铜层钝化工序 苯并三氮唑钝化代替铬钝化	9
二、技术工艺改进	12
方案四：印刷工序 印刷行业工艺改进	13
方案五：涂布工序 正极涂布停机开裂改善	15
方案六：注液工序 锂电池注液工艺优化	16
方案七：分容工序 电芯分容工艺优化	18
方案八：涂装预处理工序 无磷工艺替代磷化工艺	19
三、设备升级改造	23
方案九：喷涂工序 静电喷涂设备替代普通喷枪	24
方案十：印刷工序 胶印机升级替代	25
方案十一：切割工序 光纤激光切割机替代传统切割机	27
方案十二：贴膜工序 自动贴膜机代替人工贴膜	29
方案十三：蚀刻工序 真空蚀刻代替普通蚀刻	31
方案十四：注塑工序 注塑机节能改造	33
四、过程控制	38
方案十五：原辅料输送工序 NMP 储存输送系统	39
方案十六：卷材纠正 光电探测器纠偏	41

五、废弃物的处置.....	43
(一) 废气的收集与治理.....	44
方案十七：废气收集与治理 废气收集及处理设施增加延时控制装置.....	44
方案十八：废气治理 抑雾剂.....	45
(二) 固体废弃物处理.....	48
方案十九：危废处理 活性炭脱附再生系统.....	48
(三) 废水治理.....	51
方案二十：脱硫废水治理 脱硫废水综合利用改造.....	51
(四) 碳捕集、利用与封存.....	55
方案二十一：碳捕集、利用与封存 二氧化碳转化干冰.....	56
方案二十二：碳捕集、利用与封存 微藻固碳项目.....	58
附录 I 深圳市重点行业清洁生产技术汇编（2021 年）.....	61
附录 II 深圳市重点行业清洁生产技术汇编（2022 年）.....	62



电子版扫码查看

索 引

一、金属表面处理及热处理加工业

- 方案一：抛光工序 无氮抛光液..... 4
- 方案三：镀铜层钝化 苯并三氮唑钝化代替铬钝化..... 9
- 方案八：涂装预处理工序 无磷工艺替代磷化工艺..... 19
- 方案九：喷涂工序 静电喷涂设备替代普通喷枪..... 24

二、电子电路制造业

- 方案二：图形制造工序 干膜替代湿膜..... 6
- 方案十二：贴膜工序 自动贴膜机代替人工贴膜..... 29
- 方案十三：蚀刻工序 真空蚀刻代替普通蚀刻..... 31

三、印刷业

- 方案四：印刷工序 印刷行业工艺改进..... 13
- 方案十：印刷工序 胶印机升级替代..... 25
- 方案十六：卷材纠正 光电探测器纠偏..... 41

四、电池制造业

- 方案五：涂布工序 正极涂布停机开裂改善..... 15
- 方案六：注液工序 锂电池注液工艺优化..... 16
- 方案七：分容工序 电芯分容工艺优化..... 18
- 方案十五：原辅料输送工序 NMP 储存输送系统..... 39

五、塑料制品业

- 方案十四：注塑机节能改造..... 33

六、通用工序

方案十一：切割工序 光纤激光切割机替代传统切割机.....	27
七、废弃物的处置	
（一）废气的收集与治理.....	44
方案十七：废气收集与治理 废气收集及处理设施增加延时控制 装置.....	44
方案十八：废气治理 抑雾剂.....	45
（二）固体废弃物处理.....	48
方案十九：有机废气治理 活性炭脱附系统.....	48
（三）废水治理.....	51
方案二十：脱硫废水治理 脱硫废水综合利用改造.....	51
八、碳捕集、利用与封存	
方案二十一：碳捕集、利用与封存 二氧化碳转化干冰.....	56
方案二十二：碳捕集、利用与封存 微藻固碳项目.....	58
附录 I 深圳市重点行业清洁生产技术汇编（2021 年）	61
附录 II 深圳市重点行业清洁生产技术汇编（2022 年）	62

总 则

当前，我国已经进入全面巩固污染治理成果，深入打好污染防治攻坚战，以降碳为重点战略方向，推动减污降碳协同增效的重要阶段。推行清洁生产是贯彻落实节约资源和保护环境基本国策的重要举措，而深入推进重点行业清洁生产审核是践行绿色发展理念的重要途径，是实现减污降碳协同增效的重要手段。

为了能更好地指导和引导深圳市重点行业企业开展清洁生产审核、采用先进适用的清洁生产工艺和技术，自 2021 年开始，深圳市生态环境局牵头开展了重点行业清洁生产技术方案筛选评估工作，编制印发了《深圳市重点行业清洁生产技术方案汇编（2021 年）》及《深圳市重点行业清洁生产技术方案汇编（2022 年）》。

2023 年，为了进一步引导深圳市重点行业深入实施清洁生产改造，深圳市生态环境局继续组织开展清洁生产技术方案筛选评估工作。通过对 2022 年实施强制性清洁生产审核的 75 家企业所实施的 1600 余个清洁生产方案进行初筛、现场走访调研、专家座谈等，深入了解各技术方案的实施过程，核算各技术方案实际运行的环境效益及经济效益等，依据筛选评估原则对各技术方案的技术性、环境效益、经济效益进行综合评估，最终确定了 22 个清洁生产方案 25 个案例纳入技术汇编。

同时，为方便读者查阅，本技术汇编将《深圳市重点行业清洁生产技术方案汇编（2021 年）》《深圳市重点行业清洁生产技术方案汇编（2022 年）》方案一览表作为附录一并附上。

表 1 筛选评估成果汇总表

序号	方案类型		方案名称
1	原辅材料替代		方案一：抛光工序 无氮抛光液
2			方案二：图形制造工序 干膜替代湿膜
3			方案三：镀铜层钝化工序 苯并三氮唑钝化代替铬钝化
4	技术工艺改进		方案四：印刷工序 印刷行业工艺改进
5			方案五：涂布工序 正极涂布停机开裂改善
6			方案六：注液工序 锂电池注液工艺优化
7			方案七：分容工序 电芯分容工艺优化
8	设备升级改造		方案八：涂装预处理工序 无磷工艺替代磷化工艺
9			方案九：喷涂工序 静电喷涂设备替代普通喷枪
10			方案十：印刷工序 胶印机升级替代
11			方案十一：切割工序 光纤激光切割机替代传统切割机
12			方案十二：贴膜工序 自动贴膜机代替人工贴膜
13			方案十三：蚀刻工序 真空蚀刻代替普通蚀刻
14			方案十四：注塑工序 注塑机节能改造
15	过程控制		方案十五：原辅料输送工序 NMP 储存输送系统
16			方案十六：卷材纠正 光电探测器纠偏
17	废弃物的处置	废气的收集与治理	方案十七：废气收集与治理 废气收集及处理设施增加延时控制装置
18			方案十八：废气治理 抑雾剂
19		固体废弃物处理	方案十九：危废处理 活性炭脱附再生系统
20		废水治理	方案二十：脱硫废水治理 脱硫废水综合利用改造
21		碳捕集、利用与封存	方案二十一：碳捕集、利用与封存 二氧化碳转化干冰
22			方案二十二：碳捕集、利用与封存 微藻固碳项目

本技术汇编各方案中节电的碳减排量折算系数为 0.4512tCO₂e/MWh，来源于 2020 年 6 月广东省生态环境厅印发的《广东省市县（区）级温室气体清单编制指南（试行）》中规定的全省平均碳排放因子。

一、原辅材料替代

原辅材料是指生产过程中需要的原料和辅助用料的总称。原辅材料自身性质（例如挥发性、可降解性、毒性等）在一定程度上决定了产品及其生产过程对环境的危害程度和产生的废弃物的毒性，选择对人类、环境低毒、无毒的原辅材料是清洁生产的重要方面。

由原辅材料而导致产生废弃物的主要原因有：

- 1.原辅材料纯度不高；
- 2.原辅材料的毒性及危害性较大；
- 3.原辅材料运输、贮存的损失；
- 4.原辅材料的投入量、配比不合理；
- 5.原辅材料超定额标准。

针对初步筛选出的企业进行现场调研，在原辅材料替代方面的已实施方案主要集中在减少有毒、有害污染物的产生与排放方面上。

结合各技术方案的现场调研情况，本技术汇编对其中技术上具有一定的适用性及推广性，且环境效益及经济效益较为明显的技术方案进行汇总介绍。各清洁生产方案如下表所示：

表 1.1 方案类型与方案名称一览表

序号	方案名称
1	方案一：抛光工序 无氮抛光液
2	方案二：图形制造工序 干膜替代湿膜
3	方案三：镀铜层钝化工序 苯并三氮唑钝化代替铬钝化

方案一：抛光工序 无氮抛光液

不锈钢材料在切割完成之后，表面会附着一层灰色的氧化膜或毛刺，需要对其进行抛光处理。抛光过程需要使用一种常用的表面处理剂——抛光液，它可以去除物体表面的污垢、氧化物和微小凸起，使物体表面光滑、亮丽，增强其美观度和质感。抛光工序根据反应类型可分为物理抛光、化学抛光和电化学抛光。三种抛光的基础原理见下表：

表 1.2 三种抛光技术原理一览表

抛光类型	技术原理	作用机理
物理抛光	利用抛光粉与物体表面的摩擦作用进行抛光	物理摩擦
化学抛光	利用化学抛光液与物体表面杂质发生化学反应，达到溶解、整平的抛光效果	化学反应
电化学抛光	利用金属表面微观凸点在化学抛光液和适当的电流密度条件下的电解化学反应，对物体对物理表面的污垢或杂质进行转移，进而达到抛光目的	电解化学反应

结合上表，涉及化学反应的，均需要使用抛光液，抛光液组分较为复杂，部分含氮抛光液可造成废水中的氨氮、总氮等污染因子超标，提升企业废水处理费用。

1.技术原理

抛光液中的化学成分可以与物体表面的氧化物、污垢等发生化学反应，使其分解或转化为易于清除的物质。抛光液的常见成分为酸（硝酸、盐酸、磷酸、硫酸等）、增溶剂、缓蚀剂、络合剂和光亮剂等。

由于硝酸具有强氧化性，可有效缓解腐蚀速度，加速金属表面氧化膜的生成，避免过度腐蚀，所以大多抛光液中均含有硝酸成分。硝酸型含氮抛光液的使用过程中，可产生大气 NO_x 及废水氨氮、总氮等污染物，污染环境和危害人体健康。

实际生产过程中，可结合产品要求，通过提高其他组分的占比或优化生产条件，降低或取消硝酸组分的使用。

2.适用范围

适用于化学抛光和电化学抛光工序。从环保性考虑，抛光液化学成分优化可有效减少污染物的产生。企业需结合实际生产，在满足环境管理要求的前提下，考虑自身废水处理站的处理能力，合理选用适合产品要求的抛光液。

3.应用案例

某 SMT 模板的专业制造企业，其主要生产工艺包括激光切割、电解抛光与清洗、丝网粘贴、检验和包装等。

(1) 实施情况

企业在生产过程中需要对不锈钢工件进行激光切割，切割过程中工件表面会形成一些细小的毛刺。企业利用低电压高电流产生瞬间放电将工件表面的毛刺溶解，然后在抛光液的作用下，对去完毛刺的工件进行电解抛光，从而达到光洁的效果。

方案实施前，企业使用含氮抛光液，抛光后清洗工序产生的废水中含有氨氮、总氮等污染物。企业在废水处理过程中，出现了总氮超标情况。

方案实施后，企业调整抛光液配比，将原含氮抛光液改良为无氮型抛光液，从源头减少总氮的产生量，使得废水总氮能稳定达标排放。

方案实施前后抛光液的主要成分见下表：

表 1.3 方案实施前后抛光液的主要成分对比一览表

主要成分	方案实施前：含氮型抛光液	方案实施后：无氮型抛光液
硫酸	25%	25%
硝酸	18%	/
磷酸	15%	15%
水	42%	60%

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施前,企业使用含有硝酸的抛光液进行生产;方案实施后,企业调整抛光液配方,不再使用硝酸,提高了水的占比,从源头上避免抛光清洗废水中氨氮、总氮等污染物的产生,降低了废水的总氮超标风险。

②经济效益

本方案前期研发抛光药水,投资约 2.5 万元。方案实施后,企业氨氮、总氮浓度大幅度降低,可减少废水处理运行费用,同时减少因废水超标而造成的行政处罚。

方案二：图形制造工序 干膜替代湿膜

干膜和湿膜是制作线路板的原材料,其中干膜是一种高分子的化合物,在紫外线的照射下可聚合反应生成一种稳定的物质附着于板面,该物质可起到阻挡电镀和蚀刻的作用。湿膜是一种感光油墨,该油墨对紫外线较为敏感,在紫外线照射下可进行固化。

1.技术原理

干膜是由聚酯薄膜、感光胶膜及聚烯烃薄膜组成的三层夹芯结构。其中聚酯薄膜层具有一定的硬度,起保护作用并作为感光胶膜的载体;感光胶膜是干膜的主要部分,主要作用是抗蚀刻、耐电镀和掩孔;聚烯烃薄膜主要起保护膜的作用,隔绝尘土、避免机械划伤或卷膜等导致感光胶膜损伤。



图 1.1 干膜结构示意图

根据显影和去膜的方法，可将干膜分为溶剂型、水溶性和剥离型三种，具体特性见下表：

表 1.4 干膜分类与特性一览表

分类		特性
溶剂型干膜		1) 需要消耗大量的有机溶剂； 2) 需要配套价格昂贵的显影和去膜设备及辅助装置，生产成本高，溶剂毒性高，对环境影响大，所以日趋被水溶性干膜所取代，一般仅在特殊要求时才使用。
水溶性干膜	半水溶性	1) 显影剂和去膜剂以水为主，并含有 15% 的有机溶剂； 2) 成本较低。
	全水溶性	1) 显影剂和去膜剂是高锰酸钾的碱性溶液； 2) 成本最低，毒性较小。
剥离型干膜		1) 不需用任何显影溶剂； 2) 利用干膜的感光部分与未感光部分对聚酯薄膜表面和加工件表面附着力的差别，在从曝光板上撕下聚酯薄膜时，未曝光的干膜随聚酯薄膜剥离下来，在加工工件表面留下已曝光的干膜，由此得到所需要的干膜图像。

根据上表，本汇编推荐使用较为环保的水溶性干膜和剥离型干膜。干膜压贴在覆铜板表面，进行曝光显影形成线路图案。干膜压印易于操作、精度高、速度快，且不易产生污染。湿膜使用曝光油墨涂布在覆铜板上，干燥后进行曝光显影，其生产效率较低，操作过程中产生有机废气。

干膜替代湿膜，可使用自动贴膜机进行贴膜，不出现夹膜，提升生产效率；干膜可结合电路特点进行盖孔，污染较小。

2.适用范围

适用于线路与阻焊图形制造。企业需结合自身条件，在满足环境管理要求的前提下，根据产品特性与功能要求，合理选择干膜。

3.应用案例

某单双面、多层 FPC、RFPCB 及 FPCBA 的研发、制造和销售企业，其主要生产工艺包括钻孔、沉铜、镀铜、贴膜、曝光显影、蚀刻退膜、丝印、层压等工序。

(1) 实施情况

方案实施前，企业使用曝光油墨涂布在覆铜板上，干燥后进行曝光显影，生产效率较低，油墨使用过程中产生有机废气，涂布工序需要 2 人操作。

方案实施后，企业使用干膜高分子材料替代曝光油墨进行电路图形的制造，生产过程中使用自动贴膜机进行将干膜贴附在覆铜板上，生产效率较高，且无有机废气产生，该工序只需要 1 人操作设备。

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施前，企业使用曝光油墨，油墨曝光过程中产生有机废气，油墨使用过程中产生危险废物。

方案实施后，企业使用干膜进行电路图形制造，无废气产生。干膜包装物不属于危废，减少了危险废物的产生。

②经济效益

企业使用干膜替代湿膜，减少了 1 位人工投入，按照每月 5000 元，则可节省 $5000 \text{ 元/月} \times 12 \text{ 月/年} = 6 \text{ 万元/年}$ 。

方案实施后，每年可节省危废处理费用 2 万元。

干膜购买成本比湿膜成本增加 7 倍，但企业生产效率大幅度提升，且成品率显著提高。

方案三：镀铜层钝化工序 苯并三氮唑钝化代替铬钝化

铜及其合金以良好的物理、化学性能广泛应用于各行业，但在高温、潮湿或含氧化性介质的环境条件下极易发生化学或电化学腐蚀，影响使用性能和寿命。

为避免影响镀件性能，一般采用铬酸盐对镀件进行钝化处理，生成极薄的铬酸盐膜，以防止外界的氧化，但六价铬属于致癌物质，总铬为一类污染物，环境危害性较大。目前大多企业使用三价铬替代六价铬进行钝化处理，但三价铬仍会造成废水中含有一类污染物总铬。因此，建议企业结合实际情况选取苯并三氮唑钝化剂对镀铜层进行处理。

1.技术原理

苯并三氮唑，又称 BTA，其水溶液根据所处环境的 pH 不同，其反应原理也不同。

(1) 在强酸性的 BTA 溶液中，铜层表面的 Cu_2O 易溶解，BTA 可直接与 Cu_2O 反应生成一层稳定的 Cu(I) BTA 复合膜，也可与溶解后的 Cu^+ 反应生产 Cu(I) BTA 复合膜。

(2) 在弱酸、中性及弱碱性等近中性的 BTA 溶液中，BTA 与铜表面的水发生置换反应吸附在铜表面，Cu 被氧化成 Cu^+ ，两者相互作用生成 Cu(I) BTA 。

(3) 在碱性的 BTA 溶液中，铜表面被一层氧化物所覆盖，BTA 首先化学吸附在铜表面，随后与铜氧化物形成 Cu(I) BTA 聚合物膜。

综上所述，BTA 可以与铜材表面的氧化膜或基底层的 Cu^+ 反应，在表面形成聚合状的 Cu(I) BTA 复合膜（分子式见下图），并构成 $\text{Cu-Cu}_2\text{O-Cu(I) BTA}$ 复合膜多层膜结构，进而保护铜材基体。

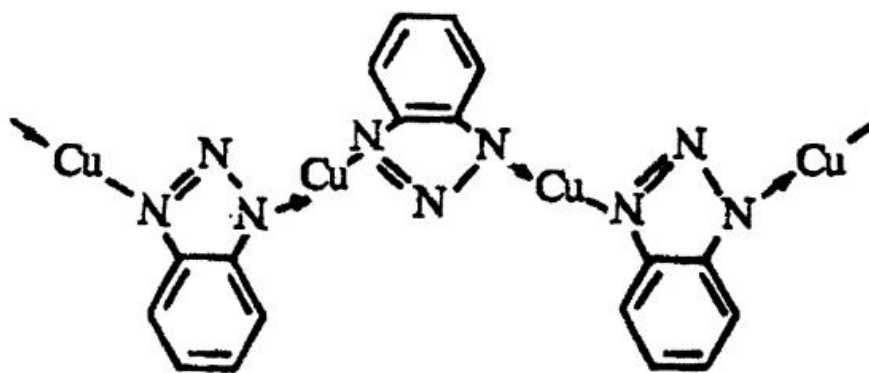


图 1.2 Cu (I) BTA 分子式结构

2.适用范围

适用于镀铜层的钝化、缓蚀。企业需结合产品特点和工艺要求，在满足环境管理要求的前提下，合理的选择钝化剂。

3.应用案例

某生产徽章、胸针、领带夹、袖扣、钥匙扣等多种五金饰品制造企业，其主要生产工艺包括冲压、压铸、抛光、电解除油、镀碱铜、镀焦铜、镀酸铜、镀镍、镀金、镀银、钝化、电泳、烘干、印刷、喷漆等。

(1) 实施情况

方案实施前，企业采用铬酸盐对镀铜件进行钝化；方案实施后，企业将不需要电泳的镀铜件的钝化工序更换为用 BTA 钝化，减少铬酸酐的使用。方案实施前后钝化剂 MSDS 中的主要成分见下表：

表 1.5 方案实施前后钝化剂主要成分一览表

钝化原料成分	方案实施前 含铬酸盐钝化剂	方案实施后 BTA 钝化剂
铬酸盐	≤20%	/
表面活性剂	/	5-10%
乳化剂	/	10-15%
苯并三氮唑	/	0.5-5%

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施前，企业使用铬酸盐对镀铜件进行钝化，钝化后的清洗废水均为含铬废水，内含一类污染物，废水需要单独进行预处理；方案实施后，企业使用以苯并三氮唑为主要成分的钝化剂对不需要电泳的镀铜件进行钝化。

根据企业核算数据，可减少铬酸盐钝化液 200kg/a，进一步减少了含铬废水的产生。

②经济效益

方案实施后，企业减少了含铬废水的产生量，进一步节省了废水处理成本。从采购成本考虑，单位面积的产品钝化剂使用量几乎一致，苯并三氮唑钝化剂采购成本较原铬酸盐钝化剂采购成本贵 1-2 倍，故本方案经济效益不明显。

二、技术工艺改进

技术工艺水平决定了原辅材料消耗量、能耗、水耗、产品产量和质量、废弃物产生量和性质。先进适用的技术工艺可以提高原辅材料和能源的利用效率，减少废弃物的产生，是实现清洁生产的一条重要途径。

因技术工艺落后而导致产生废弃物的主要原因有：

- 1.技术工艺落后，原辅材料利用率不高；
- 2.反应及转化步骤过长；
- 3.连续生产能力差；
- 4.生产稳定性差；
- 5.需使用有毒有害的原辅材料。

针对初步筛选出的企业进行现场调研，在技术工艺改进方面的已实施方案主要集中在改进优化技术工艺、减少原辅材料消耗、减少污染物的产生与排放等方面上。

结合各技术方案的现场调研情况，本技术汇编对其中技术上具有一定的适用性及推广性，且环境效益及经济效益较为明显的技术方案进行汇总介绍。各清洁生产方案如下表所示：

表 2.1 方案类型与方案名称一览表

序号	方案名称
1	方案四：印刷工序 印刷行业工艺改进
2	方案五：涂布工序 正极涂布停机开裂改善
3	方案六：注液工序 锂电池注液工艺优化
4	方案七：分容工序 电芯分容工艺优化
5	方案八：涂装预处理工序 无磷工艺替代磷化工艺

方案四：印刷工序 印刷行业工艺改进

印刷是将文字、图画、照片、防伪等原稿经制版、施墨、加压等工序，使油墨转移到纸张、纺织品、塑料品、皮革、PVC、PC 等材料表面上，批量复制原稿内容的技术。

1.技术原理

印刷过程中使用的油墨、光油等种类较多，可根据实际生产情况，综合考虑原辅材料、工序等进行优化，减少原辅材料的使用和污染物的产生，提高产品的合格率。

2.适用范围

适用于各类纸制品的印刷工序，需结合企业实际，在满足环境管理的条件下，合理地从原辅材料的替代、调整和技术工艺等方面改进。

3.应用案例

案例一：丝印改胶印

某印刷烟标、酒盒、电子消费产品和药品包装企业，其主要生产工艺包括印前处理、CTP 制版、显影、定影、冲版、涂胶、烤版、印刷、表面处理（上光、覆膜、烫金、丝印）、裱纸、模切、粘盒、手工制作和包装等。

（1）实施情况

方案实施前，企业采用丝网印刷工艺进行文字图案印刷，印刷油墨附着在印版上，在刮印刮刀的作用下，丝印镭射油通过印版的网眼挤压成型在纸盒上，丝印镭射油用量较大，且洁版液使用较为频繁，生产效率、成品率均较低。

方案实施后，企业结合产品特性，使用逆向胶印工艺代替丝网印刷工艺。逆向胶印工艺利用橡皮布将印版上的图文印刷在纸盒上，生产过程使用 UV 油墨，提高生产效率。

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施前，丝网印刷工艺采用丝印镭射油，丝印网版使用后需要使用洁版液进行清洗。

方案实施后，逆向胶印工艺采用 UV 油墨。

方案实施前后，丝印镭射油和 UV 油墨用量基本一致，根据企业运行数据统计，可从源头减少有机废气产生量约 3.6%。

②经济效益

胶印 UV 油墨采购成本比丝印镭射油高约 13%，无明显经济效益。

案例二：增设印刷表面处理工序

某印刷烟标、酒盒、电子消费产品和药品包装企业，其主要生产工艺包括印前处理、CTP 制版、显影、定影、冲版、涂胶、烤版、印刷、表面处理（上光、覆膜、烫金、丝印）、裱纸、模切、粘盒、手工制作和包装等。

(1) 实施情况

方案实施前，企业未对纸张表面进行加工处理直接进行后续加工，常导致纸盒折叠处爆色严重，成品率低。

方案实施后，企业在纸张表面加印替塑水油，使纸盒表面具有较高的张力和拉力，整体较为耐磨、耐折防爆、耐老化，提高了成品率。

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施后，企业产品的报废率降低，减少了不合格产品的产生，降低了固废产生量。

②经济效益

本方案提升了产品的成品率，间接地提高了企业的利润率。

方案五：涂布工序 正极涂布停机开裂改善

1.技术原理

产品涂布收尾停机时，有部分产品停留在烤箱内，造成产品的额外报废，导致磷酸铁锂、箔材、NMP 等原材料的非正常消耗。通过在涂布产品尾端增加一段铝箔，采用拉空铝箔进行收尾，减少产品的报废，节约了磷酸铁锂、箔材、NMP 等原材料的浪费。

2.适用范围

适用于锂电池制造的涂布工序。

3.应用案例

某锂电池制造企业，主要产品为磷酸铁锂电池，主要生产工艺包括正负极配料、涂布、辊压、烘烤、分条、卷绕、极耳焊接、注液、化成、在线擦拭、老化、分容、检测、配组、出货等。

（1）实施情况

产品涂布收尾停机时，如果烤箱内有产品停留，则会造成产品额外的报废。企业通过改进涂布机收尾方式，减少不良品的产生。

（2）实施效果

①环境效益

NMP 是该企业 VOCs 的来源之一，根据企业日常生产数据进行核算，报废产品每年消耗 NMP 的量为：极片长度 27m×极片宽度 0.5285m×极片面密度 410g/m²×浆料 NMP 含量 40%×每天拉空箔次数 25×300 天=17.55 吨/年。NMP 在涂布的工艺条件下，按 100%挥发计，则可减少 17.55 吨/年 VOCs 的产生量。

②经济效益

方案共投资 38.7 万元。

方案实施前，因停机收尾导致产品报废而造成的经济损失为：
 $13722\text{kg}(\text{磷酸铁}) \times 160 \text{ 元/kg} + 1584\text{kg}(\text{箔材}) \times 60 \text{ 元/kg} = 229.056 \text{ 万元}$ ；

方案实施后，每年增加铝箔用量 $21.5\text{kg}(\text{箔材}) \times 300 = 6450\text{kg}$ ，按照铝箔 60 元/kg 计算，则每年增加费用 $6450\text{kg} \times 60 \text{ 元/kg} = 38.7 \text{ 万元}$ 。

则每年节约费用： $229.056 \text{ 万元} - 38.7 \text{ 万元} = 190.356 \text{ 万元}$ 。

方案六：注液工序 锂电池注液工艺优化

1.技术原理

电解液是锂电池组成的重要材料之一，电解液的吸收量关系到电池的容量和循环寿命，电解液吸收不足会造成电池容量下降、电池内阻增大和循环寿命迅速衰减。

锂电池一次注液后，通过高温老化使得电解液浸润到极片里，参与化学反应，实现化学能与电能的转化。为确保电解液浸润完全，以及补充因化成及老化产生的损耗，需要进行二次注液并且封口。为防止粉尘污染和增强浸润效果，注液后可人工把电池用胶塞封口，化成前拔掉，化成后再次封口，二次注液前拔掉。这种方式一般要配备化成后抽真空设备，因为化成产生的气体需要排出，封口后则不利于气体排出。

锂离子电池自动注液机注液工作原理是将注液孔与注液箱连接形成密封空间，并对注液箱抽真空，待电池内部形成负压后，打开注液阀，电池液由于气压差自动从中转箱流入注液箱，封闭注液阀。

2.适用范围

适用锂电池注液工序，其它类似工艺可参考。

3.应用案例

某锂电池制造企业，主要产品为磷酸铁锂电池，主要生产工艺包括正负极配料、涂布、辊压、烘烤、分条、卷绕、极耳焊接、注液、化成、在线擦拭、老化、分容、检测、配组、出货等。

(1) 实施情况

方案实施前，由于是闭口注液，注液量过多，抽真空时电解液带出量较大，因此，需要分两次进行注液。

方案实施后，改为开口注液，并通过加装带出液滞留杯，将抽真空带出的电解液滞留，待完成抽真空后再将带出液回流至电芯内。通过控制注液量，简化注液工序，实现一次注液完成。

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施前，锂电池注液工序每只电池需两次注入电解液，通过工艺改进实现每只电池只需注一次电解液。减少了注液次数，可减少注液过程中 VOCs 的排放。

方案实施后，由于减少了一次注液工序，注液设备也减少了一次使用。注液设备总功率为 7.5kW，实际运行时间为 24h/d，年运行天数为 300 天，功率因数为 0.725，则可节约用电 $(7.5\text{kW}\times 24\text{h}/\text{d}\times 0.725\times 300\text{d}/\text{年})/2=1.96$ 万 kW·h/年，可减少二氧化碳排放量 $=1.96$ 万 kW·h/年 $\times 4.512\text{tCO}_2\text{e}/\text{万 kW}\cdot\text{h}=8.84$ tCO₂e/年。

②经济效益

方案总投资为 0.5 万元，效益如下：

①节约电费：电费按 1 元/kW·h 计，则可节省电费 $=1.96$ 万 kW·h/年 $\times 1$ 元/kW·h $=1.96$ 万元/年。

②节约人力：方案实施后可节约 2 人，人力成本按 6 万/年计，

则可节省 12 万元/年。

③提升生产效率： $(4 \times 2 / 6 - 1) \times 100\% = 33.33\%$ 。

方案七：分容工序 电芯分容工艺优化

电池的分容是指通过容量测试筛选出合格电池的过程，只有测试的容量满足或大于设计的容量，才是合格的，而小于设计容量的电池为不合格。

分容的目的有两个：一是淘汰不合格电池。电池首次分容后，需静置一段时间，一般不少于 15 天，在这个期间，有些内在的质量问题就会表现出来，比如说自放电过大，内阻变大等静置期结束后，再次进行检测分容，把容量达不到等级、有质量问题的电池淘汰。二是对筛选出单体的内阻和容量相同的单体进行组合，只有性能接近的才能组成电池组。

1.技术原理

同批次电池由于质量不一，充电完成时间也不一致，若等所有电池充电完成，既浪费能源且工作效率不高。因此，可将分容充电的条件设定为一定比例的电池充电完成，剩余未完成充电的则标记为暂不合格品，多批次暂不合格品再混合进行分容，可节省能源及提高分容工作效率。

2.适用范围

适用于锂电池的分容工序。

3.应用案例

某锂电池制造企业，主要产品为磷酸铁锂电池，主要生产工艺包括正负极配料、涂布、辊压、烘烤、分条、卷绕、极耳焊接、注液、化成、在线擦拭、老化、分容、检测、配组、出货等。

(1) 实施情况

对铝壳电芯分容工艺中的结束条件进行优化，由全部电池充电结束改为容量满足 95% 的电池充电结束，优化后 0.4C 充电时间由 120min 缩短至 100min，0.5C 充电时间由 190min 缩短至 150min，降低能耗同时提高了分容效率。

(2) 实施效果

①环境效益

节约电量： $5000(\text{支}/\text{天}) \times (3.65(\text{V}) \times 50(\text{A}) \times 1/1000) / \text{支} \times 300 \text{ 天}/\text{年} = 27.38 \text{ 万 kW}\cdot\text{h}/\text{年}$ 。

减少二氧化碳排放量： $27.38 \text{ 万 kW}\cdot\text{h}/\text{年} \times 4.512\text{tCO}_2\text{e}/\text{万 kW}\cdot\text{h} = 123.54\text{t CO}_2\text{e}/\text{年}$ 。

②经济效益

节约电费： $27.38 \text{ 万 kW}\cdot\text{h}/\text{年} \times 1 \text{ 元}/\text{kW}\cdot\text{h} = 27.38 \text{ 万元}/\text{年}$ ；同时分容效率由 7.75h/轮提升至 6.75h/轮，提升 13%。

方案八：涂装预处理工序 无磷工艺替代磷化工艺

1.技术原理

基材涂装前需要经过预处理，为涂装提供良好的基面，这是决定涂层质量重要因素之一。目前，涂装预处理工艺可分为磷化工艺及无磷预处理工艺，无磷预处理工艺包括陶化工艺、硅烷化工艺、硅-陶复合工艺等。

磷化工艺：磷化工艺应用历史悠久，已成为大规模涂装生产不可缺少的工序。其原理是将基材浸泡在含有磷酸及磷酸二氢盐的高温溶液中，基材表面形成以磷酸盐沉淀物组成的晶粒状磷化膜，并产生磷酸盐沉渣和氢气。

陶化工艺：陶化技术实质上是用无机锆酸盐来钝化金属表面的过

程，在金属表面形成一层耐蚀的氧化锆膜。由于陶化液为酸性，成膜过程中基材表面含有的铁被酸溶蚀，使基材表面 H^+ 浓度降低，导致锆酸根各级离解平衡向右移动，生成 ZrF_6^{6-} 。当表面离解出的 ZrF_6^{6-} 与溶解中的金属离子 Fe^{2+} 达到溶度积常数 K_{sp} 时，就会形成锆酸盐沉淀。锆酸盐沉淀与水分子一起形成成膜物质，以 $[Zr]$ 为膜晶核不断堆积，晶核继续长大成为晶粒，无数个晶粒堆积形成转化膜。陶化剂不含重金属、磷酸盐和任何有机挥发组分，成膜反应过程中几乎不产生沉渣，可处理铁、锌、铝、镁等多种金属。

硅烷化工艺：在金属表面处理过程中，水解后的复合硅烷聚合物的 $Si-OH$ 基因与金属表面氧化层中的氢氧化物 ($Me-OH$) 先形成氢键而快速吸附到金属表面上，在随后的晾干或者烘干过程中， $Si-OH$ 与 $Me-OH$ 发生缩聚反应形成牢固的共价键 ($Si-O-Me$)。一方面，硅烷在金属表面上形成 $Si-O-Me$ 共价键与金属之间的结合非常牢固；另一方面剩余的硅烷分子通过 $Si-OH$ 基团之间的缩聚反应形成 $Si-O-Si$ ，从而在金属表面形成具有三维网状结构的硅烷膜，该硅烷膜通过交联反应再与涂层结合在一起，形成牢固的化学键。所以，硅烷膜可使电泳漆/粉膜与金属基材牢固结合。

硅-陶复合工艺：虽然硅烷膜具备较强的吸附力和耐蚀性，但因其膜层厚度较小，其内部潜在着大量的孔隙，如果腐蚀介质侵入则可能会诱发局部腐蚀情况，它的抗腐蚀性可能远达不到磷化膜。为此，在硅烷体系内添加氟锆酸，形成纳米复合膜。复合膜中含有来自硅烷的 $Si-O-Me$ 键以及漆膜反应所特有的官能团，能让漆膜牢牢的吸附在金属表层。另外，硅烷锆盐键合会得到较厚的复合膜，且氧化锆颗粒可以很好的处理硅烷二维网格潜在的孔隙情况，膜层厚度进一步提升，使基体抗腐蚀性显著提升。由上可知，该复合膜不仅具有有机硅烷膜属性，还具有无机锆盐膜特质。

综上所述，各种无磷的新型涂装前预处理技术解决了传统磷化存在的弊端，它们具有无磷、无渣、不含重金属离子等特点，在保证产品性能的同时也解决了环境污染的问题，达到节能减排的环保目的。

但采用无磷预处理工艺生产的转化膜对电泳涂装的导电性有一定的影响，一般选择此类转化膜药剂需要进行前处理+电泳涂料匹配性实验。

表 2.2 涂装预处理工艺对比表

工艺类型	磷化工艺	陶化工艺	硅烷化工艺	硅-陶复合工艺
工位数	9 个	7 个	酸性硅烷 7 个 碱性硅烷 5 个	7 个
操作难易程度	工艺操作较复杂	易出现反锈或附着力差	操作简单，硅烷液只需检测 pH、电导率等	操作简单
连续生产	每周至少一次停线清理磷化渣	基本可 24 小时连续生产	基本可 24 小时连续生产	基本可 24 小时连续生产
沉渣量	多	少	少	少
膜厚	2-3 μm	0.3-0.5 μm	0.3-0.5 μm	0.3-0.5 μm
物料单耗	50-80 $\text{m}^2/\text{公斤}$	150-200 $\text{m}^2/\text{公斤}$	200-400 $\text{m}^2/\text{公斤}$	150-200 $\text{m}^2/\text{公斤}$
药液成本	较低	较高	较高	较高
废水处理成本	较高	较高	较低	较低
综合成本	较高	较高	较低	较低
限制应用	1.含磷和重金属。 2.磷化渣产生量大。	1.裸陶化膜抗腐蚀能力差于裸硅烷膜，易返锈。 2.适用范围窄。 3.含氟，引入新污染因子。	1.裸硅烷膜在室内放置超过 24h 易返锈。	1.含氟，引入新污染因子。

2.适用范围

适用于涂装前预处理工序，企业需结合实际生产，在满足环境管理要求的前提下，合理选用适合产品要求的预处理工艺。

3.应用案例

某企业家电制造企业，主要生产美发用品、厨房用品、按摩器、汽车灯等各类小型家电产品，主要生产包括注塑、喷漆前处理、喷漆、移印等工序。

(1) 实施情况

方案实施前，企业喷漆前预处理工序采用磷化工艺，在生产过程中使用磷化剂会产生含磷废水。为减少含磷废水的产生，该企业将磷化工艺改为硅-陶复合工艺。

(2) 实施效果

①环境效益

a.硅-陶复合处理剂已较为成熟，可以直接把磷化槽替换为硅-陶处理槽，不需要表调，减少了表调过程中物耗、水耗及能耗。

b.硅-陶复合处理剂的使用量与添加量一般只有磷化剂的三分之一左右，且不含磷，可减少含磷废水产生量，在同等产能下，可减少磷酸盐排放量 0.082kg/a。

c.硅-陶复合处理剂用水可循环使用，节约新鲜水约 30%。

②经济效益

该方案总投资为 6.2 万元，主要考虑环境效益。

三、设备升级改造

设备作为技术工艺的具体体现，在生产过程中也具有重要作用，设备的适用性、自动化水平、电能消耗情况、维护保养情况等均会影响产品质量、废弃物的产生与排放情况。

因设备而导致产生废弃物的主要原因有：

- 1.设备老旧，存在跑冒滴漏情况；
- 2.设备自动化控制水平低；
- 3.相关设备之间配置不合理；
- 4.设备缺乏有效的维护和保养；
- 5.设备的功能不满足技术工艺的要求。

针对初步筛选出的企业进行现场调研，在设备升级改造方面的已实施方案主要集中在设备自动化及节能等方面上。

结合各技术方案的现场调研情况，本技术汇编对其中技术上具有一定的适用性及推广性，且环境效益及经济效益较为明显的技术方案进行汇总介绍。各清洁生产方案如下表所示：

表 3.1 方案类型与方案名称一览表

序号	方案名称
1	方案九：喷涂工序 静电喷涂设备替代普通喷枪
2	方案十：印刷工序 胶印机升级替代
3	方案十一：切割工序 光纤激光切割机替代传统切割机
4	方案十二：贴膜工序 自动贴膜机代替人工贴膜
5	方案十三：蚀刻工序 真空蚀刻代替普通蚀刻
6	方案十四：注塑工序 注塑机节能改造

方案九：喷涂工序 静电喷涂设备替代普通喷枪

1.技术原理

传统液体喷涂、人工手喷的作业方式存在油漆浪费量大、环境污染严重、清理困难、生产效率低、产品色差较大、质量不稳定等问题，而静电喷漆可有效解决这些问题。

静电喷漆是以被涂物为正电极，通常接地；涂料雾化装置为负电极，接电源负高压，这样在两极之间就形成了高压静电场。由于在负电极发生电晕放电，可使喷出的涂料介质带电，并进一步雾化。遵照“同性相斥，异性相吸”的原理，已带电的涂料介质受电场力的作用下，涂料对被涂物形成环抱效果，沿电力线定向地流向带正电的被涂物外观，堆积成一层均匀、附着牢固的薄膜。静电喷漆技术也可采用正极性电晕放电，但负极性电晕放电的临界电压较正极性电晕放电低，较为稳定、不易发生火花。

静电喷漆设备包括喷枪、雾化喷嘴、静电发生器、供漆泵浦等，根据功能不同可分为手动静电喷漆和自动静电喷漆，自动静电喷漆实质上是将静电喷漆设备安装在机器人、往复机上，实现自动、连续作业。

2.适用范围

适用于喷涂工序。

3.应用案例

某自行车制造企业，主要从事自行车零配件、五金制品、铝合金制品的加工生产，主要生产工艺为机加工、装配、表面处理（除油、酸洗、皮膜）、喷漆、烘干等。

（1）实施情况

方案实施前，企业采用人工手喷的方式进行喷漆，喷枪为普通喷枪，造成水性漆用量大。

方案实施后，企业新增 1 台静电喷涂设备替代普通喷枪用于水性漆的喷涂。

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施后，在同等产能下，可节约 5%的水性漆用量，按照方案实施前水性漆年用量 13.673 吨计，可节约水性漆 0.684 吨/年。

②经济效益

方案实施后，可节约水性漆采购费用和末端治理设施运行费用 0.5 万元/年。此外，采用自动化喷涂方式，提高了生产效率。

方案十：印刷工序 胶印机升级替代

印刷机是印刷文字和图像的机器，一般由装版、涂抹、压印、输纸等结构组成，复制出特定需求的印制品。

1.技术原理

海德堡速霸 CX140 胶印机运用第三代智能操作导航系统 Intellistart 3 和全新的智能状态显示 Intelliline，可进行自动排单、自动转换印刷活件、自动添加油墨等操作；智能控制系统配置自动装版+墨路自动清洗装置+组合式中央润版液供给系统和墨路温控系统+适用于白墨单元的附加水箱+增强型预置收纸。

该设备采用绿色印刷，内置着墨平衡系统可确保快速着墨，并使水墨维持稳定；连续润版系统配置 5 辊式润版系统，智能的预润版功能可根据不同工况自动调整，从而保证印版干净，可防止停机时的过渡润版；可实现减酒精或免酒精，帮助减少甚至避免使用酒精；采用径流式涡轮风机，总体能耗可以减少 50%；高效主驱动系统可确保高达 95%的出色能效。

该设备配置 12 个印刷单元和 2 个上光单元，幅面升级至 1040 毫米，速度升级至 16500 张/h，可实现印刷、上光、UV、逆向上光一次成型印刷，提高生产效率，减少人工成本和油墨消耗量。

2.适用范围

适用于纸制品的印刷工序。

3.应用案例

某印刷烟标、酒盒、电子消费产品和药品包装企业，其主要生产工艺包括印前处理、CTP 制版、显影、定影、冲版、涂胶、烤版、印刷、表面处理（上光、覆膜、烫金、丝印）、裱纸、模切、粘盒、手工制作和包装等。

（1）实施情况

方案实施前，企业使用 CP20002+L 胶印机进行印刷作业，多色印刷需要多次印刷，着墨率不稳定，生产效率较低。

方案实施后，企业将印刷设备升级至海德堡速霸 CX140 胶印机，其自动化和智能化程度较高，可减少人工操控，有效缩短印刷时间，提升产能，实现设备的升级换代。

（2）实施效果

①环境效益

方案实施后，企业采用海德堡速霸 CX140 胶印机可实现一次印刷替代二次印刷、减酒精或免酒精和可防止过渡润版等，从而减少油墨、乙醇和润版液的消耗量。在同等产能下，预计可节省 1%的油墨，7%的乙醇，3%的润版液。

方案实施前，企业年使用油墨 75838kg、乙醇 12556kg、润版液 1366kg。方案实施后，同等产能下，可节约油墨： $75838\text{kg/a} \times 1\% = 0.76\text{t/a}$ ；节约乙醇 $12556\text{kg/a} \times 7\% = 0.88\text{t/a}$ ；节约润版液

$1366\text{kg/a} \times 3\% = 0.04\text{t/a}$ 。结合原料成分分析，可减少 VOCs 产生量 $0.76\text{t/a} \times 1.4\% + 0.88\text{t/a} \times 100\% + 0.04\text{t/a} \times 20\% = 0.9\text{t/a}$ 。

②经济效益

本方案投资 2550 万元，包括设备采购、安装及调试成本。方案实施后可节约油墨、乙醇及润版液等原辅材料的使用量，减少了操作员工的数量，降低了人工成本。生产效率的提高，可间接带来经济效益。由于市场经济变动，方案实施前后产品种类、原辅材料消耗、生产工艺均有变动，故无法对节约成本进一步核算。

由于本方案投资额较高，总体不具备明显的经济效益。

方案十一：切割工序 光纤激光切割机替代传统切割机

激光切割机是利用激光光束释放的能量对金属或非金属材料进行分割。

1.技术原理

激光加工系统是一套计算机系统，可以根据产品轮廓形状进行编排修改，进行个性化加工，实现多工位操作，自动化程度高。

光纤激光切割机通过多个二极管泵产生激光束，激光束通过软光纤电缆传输到激光切割头，利用高功率高密度激光束照射被切割材料，使材料快速被加热至汽化温度，蒸发形成孔洞，随着光束的移动，形成连续的切缝，从而完成对板材的非接触切割。

光纤激光切割机具有以下优点：运行速度快、定位与重复定位精度高、切割间距窄、切割边缘光滑、板材热影响区较小、无刀具损失和接触能量损失；电光转换效率为 25%-30%，输出功率 500-35000W，半导体泵寿命 20 万次以上，基本免维护，适合柔性加工，稳定性好。

2.适用范围

适用于金属、非金属等各种材料的切割。

3.应用案例

某五金制品、铝制品、塑胶制品、手机壳的生产加工企业，其主要生产工艺包括冲压、切割、镗雕、电镀等。

(1) 实施情况

方案实施前，企业采用传统切割机，加工维度单一、控制精度差、生产效率低。

方案实施后，企业采用五轴光纤激光切割机，提高了产品的加工精度和生产效率；对于个性化产品，可通过激光加工计算机系统的编排修改，满足多重产品的加工要求。

传统切割机与五轴激光切割机的对比分析见下表：

表 3.2 企业切割机更换前后基础信息对比表

指标	实施前：传统切割机	实施后：五轴激光切割机
加工纬度	立柱、锥柱	多重纬度和柱状
控制精度	≤0.1mm	≤0.05mm
加工效率	≥4000mm ² —5000mm ²	≥8000mm ² —10000mm ²
设备功率	2.5kW	1.5kW
使用寿命	≤10 年	≥10 年
操作人员	2 人	1 人

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施前，企业共有 3 台传统切割机，单台设备功率 2.5kW，总功率 7.5kW。方案实施后，企业将原有 3 台传统切割机全部更换为 2 台五轴激光切割机，单台设备功率 1.5kW，总功率 3kW。

切割机年运行时间按 2090h 计算，则年可节省用电量= $(7.5-3)$ kW \times 2090h/a=0.94 万 kW \cdot h，年减少二氧化碳排放量=0.94 万 kW \cdot h \times 4.512tCO₂e/万 kW \cdot h=4.24tCO₂e。

②经济效益

本方案两台五轴激光切割机共投资 70 万元。

方案实施后，可减少员工 4 人，按照人均工资为 5000 元/月，则可节省人工工资：4 人 \times 5000 元/（人 \cdot 月） \times 12 月/a=24 万/a；可节省用电 0.94 万 kW \cdot h/a，电费单价按照 1 元/kW \cdot h 计算，则可节约电费 0.94 万 kW \cdot h \times 1 元/kW \cdot h=0.94 万元。

综上所述，可产生经济效益 24.94 万元/a，投资回报期约为 2.8 年。

方案十二：贴膜工序 自动贴膜机代替人工贴膜

人工贴膜主要是指利用人工手动将干膜贴附在覆铜板上，并根据生产需求进行裁切和收料，生产效率较低。

自动贴膜机主要是将干膜贴压在覆铜板上，设备采用超强模块化、双组压辊设计，内置自动追踪系统，可由片对卷自动贴膜机和自动裁切机等设备组成自动线，根据生产需求将干膜精准贴压在铜板上，并进行自动裁切和收料。

使用自动贴膜机代替人工贴膜，可有效提高生产效率，减少膜渣的产生。

1.技术原理

覆铜板通过自动投板装置 从存板区投放到入料段，经过自动拍中、等距追踪，板面清洁后进入压膜段。压膜装置将干膜连续贴覆到铜板上下表面，再通过收卷轴将连续压膜后制品收取成卷。压膜装置具有加压加热、上下送膜以及冷却除静电装置，收卷轴带有边缘纠偏系统。当连续压膜后的铜板需要直接裁切成片时，将铜板从压膜段送

入裁切收料段，通过传感器自动寻边并裁切前后两片铜板间多余干膜，再由自动收板装置收取到存板区。

使用自动贴膜机后，贴膜工序操作简单，运行效率高，贴膜良品率高，无干膜碎。

2.适用范围

适用于线路板贴膜工序。

3.应用案例

某单双面、多层 FPC、RFPCB 及 FPCBA 的研发、制造和销售企业，其主要生产工艺包括钻孔、沉铜、镀铜、贴膜、曝光显影、蚀刻退膜、丝印、层压等工序。

（1）实施情况

方案实施前，企业采用人工贴膜进行线路图形制作，生产效率较低，后续退膜工序膜渣产生量较大。

方案实施后，企业采用自动贴膜机进行线路图形制作。更换后的自动贴膜机运行速度为 0.1-2.0m/min，追踪精度 $\pm 1.0\text{mm}$ ，贴附精度 $\pm 1.0\text{mm}$ ，裁切精度 $\pm 0.5\text{mm}$ ，显著提高了企业的成品率和生产效率。

（2）实施效果

①环境效益

方案实施前，企业采用人工贴膜，生产效率低，贴膜的精准度较低；方案实施后，企业使用自动贴膜机进行自动贴膜，全程自动化、精准化控制，可节省干膜的消耗量。

根据企业核算，在同等产能下，每年可减少废膜渣 4.5 吨。

②经济效益

本方案投资 55.3 万元，用于购置设备并配套相关附属设施，为一次性投入，除必要的设备维护保养，后续不需要再进行投入。

方案实施后，节省了干膜的用量，每年可减少干膜购买及废膜渣处置费用 2.6 万元。

方案十三：蚀刻工序 真空蚀刻代替普通蚀刻

蚀刻是 PCB 生产制造过程中导电图形形成的重要环节，主要是利用蚀刻液去除基材上不需要的铜面。

1.技术原理

普通蚀刻在 PCB 板上下两面均布置有均匀的喷嘴，蚀刻液通过喷嘴与板进行接触。一般情况，板下表面的喷淋药液在接触板面反应后，在重力作用下直接回到储药槽里，但板上表面会形成蚀刻液的“水池”，影响蚀刻的均匀性，导致板上表面四周比中间部位的蚀刻速度快，出现侧蚀现象。利用真空蚀刻代替传统的普通蚀刻可有效解决“水池”现象，提高蚀刻的均匀性。

真空蚀刻的原理是在蚀刻喷嘴之间离板表面距离接近的位置安装负压吸管，实际应用时需要把握真空力度、喷淋压力和铜箔厚度等因素。负压吸管对板面溶液的吸引力应是等于或稍大于喷淋量，工作时负压吸管将反应过的蚀刻液吸走，不在板上表面积累，使中间部位与边缘部位获得新鲜蚀刻液的机会均等，从而保证了蚀刻速率的一致。

2.适用范围

适用于线路板蚀刻工序。

3.应用案例

某单双面、多层 FPC、RFPCB 及 FPCBA 的研发、制造和销售企业，其主要生产工艺包括钻孔、沉铜、镀铜、贴膜、曝光显影、蚀刻退膜、丝印、层压等工序。

(1) 实施情况

方案实施前，企业采用传统的蚀刻方法，蚀刻线路精度和成品率较低，易造成咬蚀过量，降低了蚀刻液的使用效率，增加了废蚀刻液的产生量。

方案实施后，企业采用真空蚀刻，提高了蚀刻线路的精度和成品率，节省了新鲜蚀刻液的使用，也减少了废蚀刻液的产生。

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施前，企业采用普通蚀刻技术进行生产；方案实施后，企业采用真空蚀刻技术替代传统的普通蚀刻，在同等产能下，年减少危废蚀刻液 2500kg。

②经济效益

本方案投资 8.1 万元，主要对设备进行改造。方案实施后，企业生产效率可提高 13%，良品率提升 1%，间接带来了可观的经济效益。

方案十四：注塑工序 注塑机节能改造

1.技术原理

传统液压注塑机能耗主要体现在液压系统、加热系统、冷却系统、其他电器操控系统，通常情况下液压系统能耗约占注塑机能耗 80%，加热系统能耗约占 15%，其他电器操控系统能耗约占 5%。因此，传统液压注塑机节能改造技术主要针对液压系统和加热系统。

(1) 加热系统节能技术

加热系统节能技术主要有电磁加热节能技术、红外加热技术、纳米节能环加热技术、料仓热风回收技术等。

①电磁加热技术运用电磁感应原理，将料筒通过绝热保温材料进行隔热处理，然后在料筒周围布满电磁感应线圈，最后通入电流，料筒因电磁感应产生涡流，达到自发生热的目的。此外，由于料筒有绝缘隔热保温材料的覆盖，在降低热能损耗的同时，也提高了热能利用率。

②红外加热节能技术运用热辐射原理，在料筒外围放置红外灯管，然后用镜面将红外灯管与外界环境进行隔绝，为防止镜面在反射过程中的热量消耗，也需要将镜面进行隔热处理。红外灯管在发热过程中产生的热辐射由于镜面的反射作用，红外光依次打在料筒四周，以此来保证料筒所需要的热量。

③纳米节能环加热技术，通过覆盖隔热效果良好的纳米保温层来实现节约热能的技术，并没有改变加热系统的工作原理和工作结构。红外加热圈内部纳米保温层通常采用纳米气凝粘胶，气凝粘胶具有柔软、易裁剪、密度小、无机防火、整体疏水、绿色环保等特性，可替代玻璃纤维制品、石棉保温毡、硅酸盐纤维制品等不环保、保温性能差的传统柔性保温材料。

④料仓热风回收技术是通过安装一套热风回收装置，将料仓的余热回用至下料口。传统注塑机采用电阻丝缠绕料筒外壁进行加热，使

物料熔化。电阻丝位于外层，产生的热能只有部分传递到物料，热能利用率较低，且散发的热量又对车间温度造成影响。因此，可用集热器及隔热垫块包裹料筒外层，集热器外层再设保温棉，有效收集料筒外散热量后，通过风机及输送管道，将热风输送至下料口用于物料的干燥和软化。

2. 液压系统节能技术

液压系统在运行过程中由于其控制调节参数不能满足工艺所需要的动力，致使能量消耗问题的产生，为了改变这一现状，可将液压系统的驱动泵进行改善，如：变量泵、变频器及伺服电机的应用。变量泵可实现液压系统的自适应调节功能，提高液压系统的反应速度，加快液压系统的调节速率；变频器驱动主要是增加变频器，以改变电机的转速，从而改变排量，节省能耗；伺服电机带动定量泵，输出的动力与负载时刻成正比，大大节省了动力，节能效果尤为明显。

伺服注塑机的动力系统分为伺服电机、伺服驱动器、编码器、齿轮泵、压力传感器和驱动控制模块，其中驱动控制模块是使伺服注塑机的效能优于传统注塑机的关键模块。伺服动力系统是由伺服驱动器接收驱动控制模块发出的流量、压力指令，转换为转速指令发送给伺服电机；伺服电机带动齿轮泵旋转并输出流量、压力，而压力传感器采集系统压力数据并反馈至伺服驱动器，伺服电机则将转速信息反馈给伺服驱动器；伺服驱动器通过转换将实际的流量和压力信息反馈给驱动控制模块，通过比对实际流量、压力与指令流量、压力的偏差，驱动控制模块再调整指令流量、压力，实现闭环控制，达到工艺要求。

伺服控制系统能按预定要求自动反馈控制注塑装置的机械运动，其控制量是注塑机的机械位移、位移速度或加速度，能使输出的位移准确跟踪输入的位移；液压伺服控制系统则以电机驱动液压泵，将液压泵的机械运动转化为压力推进液压油，再控制各个阀门改变液压油流向，从而推动液压缸做出不同方向和行程的动作，满足注塑机各种动作需求。伺服电机作为执行元件，根据输入电压信号控制其转子转

速、转矩并驱动控制对象，具有控制速度快、控制精度高、机电时间常数小、线性度高等特性，因此，应用液压伺服控制系统能够达到良好的自动控制效果，有效节约注塑机各部件运转的能源损耗。

此外，随着注塑机节能技术不断提升，出现了全电动注塑机，采用电驱动系统替代了液压驱动，整台机的每个动作均是由电机驱动，故也称全电机。由于没有液压驱动，故消除了液压系统所产生的耗损（例如：溢流、油管孔径改变、油管擦、油管方向改变、油泵效率、冷却水所需的水泵等等）。虽然伺服电机本身的效率及滚珠丝杆所产生的磨擦在运作过程中会产生一定的能耗，但与传统液压系统能耗相比低很多。因此，对于全电机来说，主要的能耗来自于加热系统。

2.适用范围

适用于注塑机节能改造。

3.应用案例

案例一

某小家电和个人护理类电器产品的设计与制造企业，产品主要有电吹风、直/卷发器、修眉刀等，生产工艺。

（1）实施情况

注塑机作为企业的主要生产设备，用能占比较大。为节约生产成本，企业决定对注塑机进行节能改造，将 26 台注塑机加热系统更换为纳米红外节能电热圈。

（2）实施效果

①环境效益

据统计，方案实施前单台注塑机加热系统功率为 9.75kW，方案实施后单台节能电热圈功率为 4kW，工作温度在 200-310℃时，实际耗用功率为额定功率的 22.7%，则 26 台注塑机改造后每年可节约用

电为： $26 \text{ 台} \times (9.75-4) \text{ kW/台} \times 22.7\% \times 24\text{h/d} \times 264\text{d} = 36.46 \text{ 万 kW}\cdot\text{h}$ 。
年减少二氧化碳排放量 = $36.46 \text{ 万 kW}\cdot\text{h} \times 4.512\text{tCO}_2\text{e/万 kW}\cdot\text{h} = 164.51\text{tCO}_2\text{e}$ 。

②经济效益

该方案总投资为 23.14 万元。按照平均电费 1 元/kW·h 计算，每年减少电费 = $36.46 \text{ 万 kW}\cdot\text{h} \times 1 \text{ 元/kW}\cdot\text{h} = 36.46 \text{ 万元}$ ，投资回本期 = $23.14 \text{ 万元} \div 36.46 \text{ 万元/年} = 0.63 \text{ 年}$ 。

案例二

某塑料制品制造企业，主要生产塑胶制品、木制品、塑胶模具、模具等产品，主要生产工艺包括：混料、注塑、修边、移印、烫金等。

(1) 实施情况

方案实施前，企业注塑车间有 120 台注塑机，数量较多。其中大部分为自带伺服注塑机或是已进行了伺服电机改造，但仍有 5 台使用年限近 20 年的旧注塑机，且未进行伺服改造，性能方面有所降低，能耗高。因此，企业决定对 5 台老注塑机进行逐步更换，升级为新型伺服注塑机。

(2) 实施效果

①环境效益

实施该方案，可以提高原料、能源利用率，降低不良品的产生，减少能耗。同时，新型伺服注塑机整机处于低噪音运行状态，在低速运行时，降噪效果更为明显。

根据企业 2019 年改装伺服注塑机的测试报告，节电率可达 75%。5 台老注塑机总功率为 196.6kW，年工作天数 300 天，每天运行 22 小时，实际运行负荷率取 70%，则年可节省用电量 = $196.6\text{kW} \times 70\% \times 22\text{h/d} \times 300\text{d} \times 75\% = 681219 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。年减少二氧化碳排放

量=68.12 万 kW·h×4.512tCO₂e/万 kW·h=307.36tCO₂e。

②经济效益

该方案总投资为 171.86 万元。用电单价平均 1 元/kW·h 计算，则年节省电费 68.12 万元，投资回报期约为 2.5 年。

此外，采用新型伺服注塑机有利于提升公司的市场竞争力，提高生产效率和成型精度，一次成品率可提高 0.3%以上，从而减少了不良品的产生，减少因破碎回用而增加的生产成本，产生的经济效益难以准确计算，在此不做统计。

四、过程控制

过程控制对生产过程起到至关重要的作用，反应参数是否处于受控状态并达到优化水平或工艺要求，对产品的生产效率和次品率都有直接的影响，同时也直接关系到废弃物的产生量。

因过程控制而导致产生废弃物的主要原因有：

1. 计量表、检测分析仪器或监测精度达不到要求；
2. 某些工艺参数（如温度、浓度、压力等）未处于最优状态；
3. 过程控制的水平未能满足技术工艺要求。

针对初步筛选出的企业进行现场调研，在过程控制方面的已实施方案主要集中在过程控制水平等方面上。

结合各技术方案的现场调研情况，本技术汇编对其中技术上具有一定的适用性及推广性，且环境效益及经济效益较为明显的技术方案进行汇总介绍。各清洁生产方案如下表所示：

表 4.1 方案类型与方案名称一览表

序号	方案名称
1	方案十五：原辅料输送工序 NMP 储存输送系统
2	方案十六：卷材纠正 光电探测器纠偏

方案十五：原辅料输送工序 NMP 储存输送系统

1.技术原理

N-甲基吡咯烷酮（NMP），分子式为 C_5H_9NO ，相对分子质量 99，沸点 $203^{\circ}C$ ，弱碱性，略有氨味，属于氮杂环化合物的一种无色至淡黄色透明的油状液体，具有化学稳定性好、热稳定性高、沸点高、低黏度、无腐蚀、毒性低、挥发性低和可生物降解等优点，能溶解于大多数有机及无机化合物、极性气体、天然及合成高分子化合物，对人体具有低毒性。NMP 被广泛应用于涂料、锂电池、塑胶、化学生产药剂、农用化学制品等领域。

NMP 在氧气和水同时存在的情况下，约在 $120\sim 200^{\circ}C$ 的低温下即可发生水解和氧化反应。因此，NMP 作为溶剂在各领域的应用过程中，通常在 NMP 加入之前在容器中充入惰性气体将空气排净，避免 NMP 与空气接触，但这不能完全避免 NMP 与空气的接触，同时也无法避免与操作人员的接触。

NMP 储存输送系统在整个储存和输送过程中全密闭，有效地避免了 NMP 与空气及操作人员的接触。NMP 储存输送系统一般包括 NMP 储液罐、卸车泵、供液泵、车间缓存罐组成，储液罐顶部进料阀通过卸车泵与罐车相连，将 NMP 由罐车输送至储液罐，再由底部下料阀通过供液泵与车间缓存罐相连，将 NMP 输送至车间缓存罐。

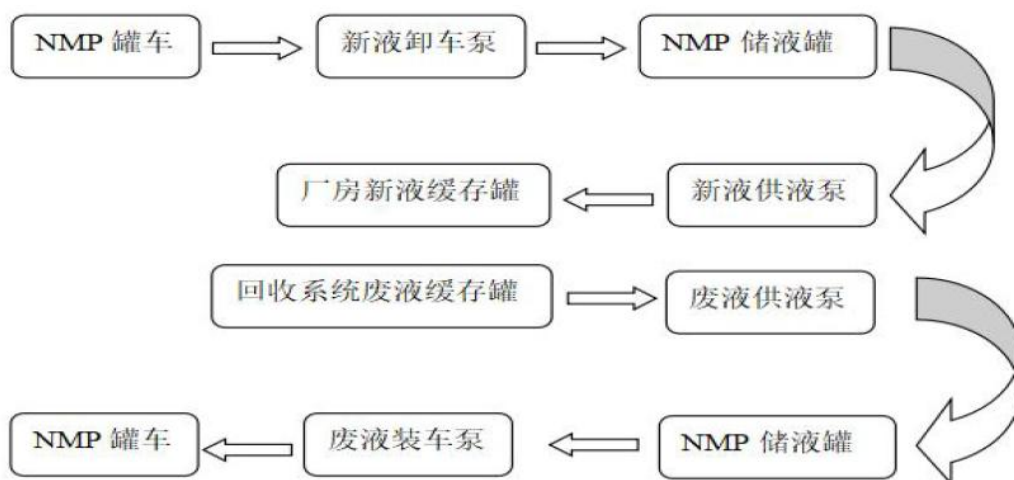


图 4.1 NMP 储存输送系统流程图

2.适用范围

适用于液态/气态原辅料储存输送。

3.应用案例

某锂电池制造企业，主要产品为磷酸铁锂电池，主要生产工艺包括正负极配料、涂布、辊压、烘烤、分条、卷绕、极耳焊接、注液、化成、在线擦拭、老化、分容、检测、配组、出货等。

(1) 实施情况

方案实施前，企业 NMP 溶剂为人工桶装运输，配料过程中用取料管将 NMP 抽至搅拌机；冷凝回收的 NMP 废液通过泵抽至 200L 的桶内，这些过程都会产生少量的 VOCs 废气，且与操作人员有一定的接触。

配料过程中产生的无组织废气可经车间内废气收集系统进入废气处理设施；但废液池在室外，无组织废气未进行收集处置。

因此，企业新增一套 NMP 储存输送系统，采用全密闭管道输送、回收物料，减少 NMP 使用、废液转存过程中 VOCs 的无组织排放及与操作人员的接触。

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施后，减少 NMP 使用、废液转存过程中 VOCs 无组织排放，根据企业提供的相关数据核算，在同等产能下，每年可减少 VOCs 无组织排放约 2 吨。

②经济效益

方案总投资为 300 万元，无明显直接经济效益，但可从源头减少 VOCs 的产生，进一步节约了废气处置成本，降低对操作人员和周边环境的影响。

方案十六：卷材纠正 光电探测器纠偏

卷材类产品的生产和加工过程中，平整性和一致性是至关重要的。如果发生变形或者偏移，将导致后续产品皱褶、交错等不一致的差错，影响后续加工工序。为了避免出现残次品，可使用光电探测器对加工过程进行纠偏。

1.技术原理

光电探测器通常由传感器、控制器和驱动装置等构成，其运行原理是通过光电传感器对被测产品的边缘或线条进行实时探测，读出卷材实际位置与设定位置的偏移量，并将测得的实时误差信号发送到控制器，经过数据逻辑运算处理后，产生与偏移量转换成正比的控制信号，控制信号经过控制器放大、校准后，输出至驱动装置，驱动装置根据信号的大小，驱动纠偏导正机构，将偏离标定位置的被测物纠正到设定的位置。

2.适用范围

适用于卷筒材料的横向跑偏控制。

3.应用案例

某印刷烟标、酒盒、电子消费产品和药品包装企业，其主要生产工艺包括印前处理、CTP 制版、显影、定影、冲版、涂胶、烤版、印刷、表面处理（上光、覆膜、烫金、丝印）、裱纸、模切、粘盒、手工制作和包装等。

（1）实施情况

方案实施前，企业采用超声波探测器进行纠偏，超声波纠偏是利用超声波探测器发送超声波信号，当其与卷材相互作用时，通过测量超声波信号的时间差以及回声强度判断卷材是否偏离目标位置，进而确定是否通过控制器对卷材进行纠偏。超声波纠偏受环境影响较大，精度相对较低，存在一定偏差，影响产品质量。

方案实施后，企业采用光电探测器对卷材进行纠偏，主要通过光电传感器接收到光线的位置判断卷材是否偏离目标位置，确定是否进行纠偏操作。光电纠偏精度较高，高速运转下稳定性好，产品质量较佳。

（2）实施效果

①环境效益

方案实施后，采用光电探测器进行纠偏精度较高，可解决超声波探测器纠偏不准的问题，提高产品的定位精准度，提升了产品质量，减少了报废卷材。

②经济效益

方案实施后，企业成品率明显提升，间接增加了企业的收入及提高了企业形象。本方案无明显经济效益。

五、废弃物的处置

废弃物本身所具有的性质直接关系到它是否可以被利用和循环使用，也决定了废弃物的处理与处置方式的选择。

因废弃物而导致产生废弃物的主要原因有：

- 1.对可利用废弃物没有进行循环使用；
- 2.废弃物的理化性质不利于后续处理和处置；
- 3.单位产品废弃物产生量高于国内外先进水平。

针对初步筛选出的企业进行现场调研，在废弃物处置方面已实施方案主要集中在废气收集与治理，固体废弃物处理，废水治理，碳捕集、利用与封存等方面上。

结合各方案实施情况及实施效果，本技术汇编对废气收集与治理、废水治理、碳捕集、利用与封存等中环境效益和经济效益较为明显的技术方案进行汇总介绍。各清洁生产方案如下表所示：

表 5.1 方案类型与方案名称一览表

序号	方案类型	方案名称
1	废气的收集与治理	方案十七：废气收集与治理 废气收集及处理设施增加延时控制装置
2		方案十八：废气治理 抑雾剂
3	固体废弃物处理	方案十九：危废处理 活性炭脱附再生系统
4	废水治理	方案二十：脱硫废水治理 脱硫废水综合利用改造
5	碳捕集、利用与封存	方案二十一：碳捕集、利用与封存 二氧化碳转化干冰
6		方案二十二：碳捕集、利用与封存 微藻固碳项目

（一）废气的收集与治理

方案十七：废气收集与治理 废气收集及处理设施增加延时控制装置

1.技术原理

废气收集及处理设施与排放废气工艺设备独立控制，存在因操作不当导致废气收集率不足，车间废气浓度较高，影响员工身体健康。通过增加延时控制装置，将废气收集及处理设施与排放废气工艺设备绑定，两套设施同时启动。此外，可根据实际生产及污染物排放需求，设定废气收集及处理设施延迟关闭时间，提高废气收集率。

2.适用范围

适用于废气收集与处理设施延时控制。

3.应用案例

某自行车制造企业，主要从事自行车零配件、五金制品、铝合金制品的加工生产，主要生产工艺为机加工、装配、表面处理(除油、酸洗、皮膜)、喷漆、烘干等。

（1）实施情况

为提高车间废气收集效率，改善车间工作环境，企业增设废气收集及处理设施延时控制装置，使废气收集及处理设施在生产设施关闭后半小时内关闭。

（2）实施效果

①环境效益

方案实施后，提高了废气收集率，改善了车间环境，减少了无组织废气排放。

②经济效益

该方案总投资为 0.05 万元，无明显直接经济效益。

方案十八：废气治理 抑雾剂

电镀及退镀工序使用的化学物质在特定生产条件下会形成酸雾、碱雾等具有刺激性气味的气体。如碱性镀液中，阴极电流效率不高，当阳极使用面积较小、阳极电流密度过大造成阳极钝化或采用不溶性阳极时，阳极有氧气析出，形成气泡夹带着镀液上浮至液-气界面形成雾气。为降低槽液挥发及减轻车间刺激性气味，可使用抑雾剂减少电镀过程中雾气的产生。

1.技术原理

抑雾剂主要由表面活性剂、有机化合物或多种表面活性剂的复配物组成。抑雾剂一般直接加入槽液内，覆盖在液-气表面形成具有一定机械强度和弹性的分子膜。

表面活性剂中的憎水基团垂直排列指向槽液外部，亲水基团指向槽液内部，可降低槽液表面张力，槽液中析出的带着酸雾或碱雾的气泡在上升过程中受分子膜的阻挡不立即破裂而聚集于液面形成泡沫层，液雾在气泡中聚集成较大的雾滴，在重力的作用下，回到槽液内。

抑雾剂组成成分复杂，企业应根据工艺特点，选择具有耐酸、碱，化学性质稳定、不易分解、不与槽液组分发生化学或电化学反应的物质，保证对生产过程无影响，不影响镀层的质量。

2.适用范围

适用于酸洗除锈、镀碱锌、退镀等易产生酸雾、碱雾或含氰碱雾的工序。企业需结合自身实际生产，在满足环境管理的条件下，合理选择抑雾剂。

3.应用案例

案例一：

某五金制品等工件表面处理企业，其主要生产工艺包括镀镍、镀锌镍合金、镀锌、镀酸铜、镀碱铜、镀镍、镀仿金、镀白铜锡、电泳、烘干等。

（1）实施情况

方案实施前，企业镀碱锌车间刺激性气味较大，车间环境差。方案实施后，企业在镀液中添加抑雾剂，电镀时产生的大量气体促使抑雾剂在液面形成一层致密的泡沫覆盖层，当气泡冲出液面进入泡沫后，由于表面张力降低和泡沫层的摩擦，气泡破裂，带出的碱性微粒被截留在泡沫层内，受重力作用，回流至槽内。

（2）实施效果

①环境效益

方案实施前，企业镀碱锌车间内刺激性气味较大；方案实施后，企业将抑雾剂加入槽液中，减少了碱雾的挥发，改善了车间的操作环境。

②经济效益

企业使用抑雾剂时间较短，且受大环境影响，企业处于间断性生产的情况，故未对具体采购成本进行统计核算。但抑雾剂的使用，提高了原辅材料的利用率，同时减少了碱雾的挥发，可进一步降低企业废气处理成本。

案例二：

某从事五金制品、电子元件等产品的电镀加工和阳极氧化加工企业，其主要生产工艺包括前处理、镀铜、镀镍、镀锌、镀铬、钝化、烘干等。

(1) 实施情况

电镀企业生产过程中，由于生产条件控制的不稳定，会有部分不符合产品要求的镀件需要进行退镀，退镀需要使用硝酸、盐酸等化学品，都具有较强的挥发性。

方案实施前，企业退镀工序产生大量酸雾。方案实施后，企业在退镀槽内添加抑雾剂，该抑雾剂兼有缓蚀和抑雾的双重功能，可保证退镀后裸露的金属层不被过度腐蚀，同时有效抑制酸雾的挥发。

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施前，企业退镀工序酸雾产生量较大，车间刺激性气味较重；方案实施后，企业将抑雾剂加入槽液中，减少了酸雾的挥发，改善了车间操作环境。

②经济效益

抑雾剂的使用增加了企业原辅材料的购买费用，但可提高退镀液的利用效率，提升产品退镀合格率，可带来间接经济效益。同时，减少了酸雾的产生也可降低企业废气收集及处理成本。

（二）固体废弃物处理

方案十九：危废处理 活性炭脱附再生系统

活性炭作为常用的有机废气吸附材料，通常不具备原位再生条件，吸附饱和的活性炭被当作危险废物处理，不仅会对环境产生二次污染，还会浪费活性炭资源，增加企业运营成本。活性炭脱附再生系统可实现活性炭的“再生”，实现循环回用，稳定运行。

1.技术原理

活性炭吸附废气是物理过程，是可逆的，故可通过热空气升温方式解吸。活性炭脱附系统包含脱附和燃烧模块。

脱附主要是利用热气流（75-110℃）将吸附饱和的活性炭中的废气吹脱下来，使得活性炭能够实现再生，重复使用。脱附下来的废气浓度较吸附时的浓度提高几十倍，该废气可送至燃烧模块，在燃烧室进行催化燃烧，废气氧化分解。燃烧后的高温气体经换热器换热，换热后的洁净气体一部分用作活性炭脱附时的热气流送往脱附模块，另一部分经排气筒达标排放。

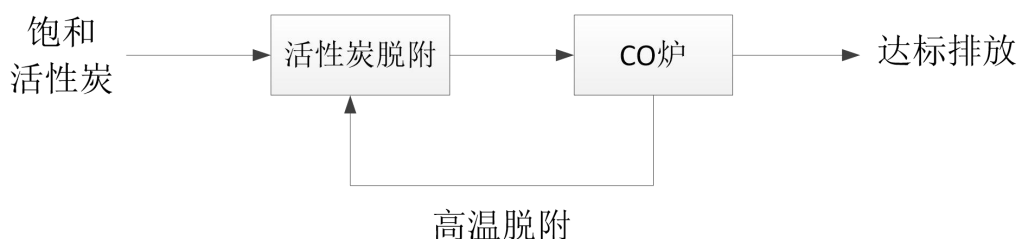


图 5.1 活性炭脱附系统示意图

活性炭脱附再生系统可在企业独立设置，实现活性炭的脱附-再生，脱附-再生后的活性炭可重新装回废气处理设施继续使用。该设施可降低企业活性炭购买和危废处置成本，减轻企业经济压力。

2.适用范围

在满足环境管理的前提下，可用于废气处理系统中废活性炭的再生，不适用于含有催化剂中毒失活的物质如铅化合物和硫、磷、卤族元素的化合物等。

3.应用案例

某控制器、LED射灯、LED日光灯、汽车电子等电子器件制造企业，其主要生产工艺包括刷锡膏、贴装、回流焊、插件、波峰焊、喷胶、烘干等。

(1) 实施情况

企业喷胶、烘干等工序产生有机废气，有机废气经“水喷淋+UV光解+活性炭”处理后达标排放。方案实施前，企业废气处理设施的活性炭吸附饱和后直接交由危废处置单位处置，拉运频次和处理费用较高。

方案实施后，企业增加一套活性炭脱附再生设备，处置能力为3000m³/h，定期对废气处理设施的活性炭进行脱附再生，保持活性炭的吸附能力，在保证废气处理效率的同时减少危险废物废活性炭的产生和转运。

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施前，企业废活性炭交由有资质危废单位进行处置；方案实施后，企业利用活性炭脱附再生设备对废活性炭进行脱附再生。

根据企业统计核算，在同等产能下，可节省活性炭使用量70吨/年，减少废活性炭90吨/年。

②经济效益

本方案投资 53.8 万元，主要用于购置设备及设备安装调试。活性炭脱附设备运行过程中主要是利用电能运行及燃烧，消耗电量未进行单独统计，故无法统计其运行成本。

方案实施后，企业减少了活性炭的购买和废活性炭处理成本。活性炭购买成本按照 5000 元/吨计算，则年节省活性炭购买费用 70 吨/年 \times 5000 元/吨=35 万元/年。废活性炭处置费用按照 3000 元/吨计算，则年节省危废处理费用 90 吨/年 \times 3000 元/吨=27 万元/年。

综合上述，方案实施后，企业可节省活性炭购买及危废处置费用约 62 万元，但增加了活性炭脱附再生设备的运行成本。

（三）废水治理

方案二十：脱硫废水治理 脱硫废水综合利用改造

1.技术原理

燃煤电厂脱硫废水具有如下特性：1)呈弱酸性，pH 在 4.5~6.5 之间；2)含盐量高，且浓度变化范围广，一般在 20~50g/L；3)硬度（钙镁离子浓度）高，结垢风险高；4)悬浮物高，一般在 20~60g/L；5)成分复杂，水质波动大；6)氯离子含量高，腐蚀性强且回用困难。因此，脱硫废水成为燃煤电厂最复杂和最难处理的废水，是实现燃煤电厂废水零排放的关键。

脱硫废水的处理方式有：

（1）蒸发结晶

蒸发结晶技术是使废水中的水分汽化，废水中的杂质固化成结晶盐后外排处置，从而达到废水零排放的目的。

蒸发结晶系统通常包括结晶器、强制循环泵、离心机、干燥器、打包机等。实际工程中，结晶常与蒸发联用，涉及的技术也主要是 MVR（机械再压缩蒸发结晶）和 MED（多效蒸发结晶）。其中，MVR 是通过机械驱动的压缩机将蒸发器蒸出的蒸汽压缩至较高压力，即再压缩机给蒸汽增加能量，二次蒸汽被重复使用。通过较少的电能产生的机械能被加入到工艺加热介质中，再进入连续循环，不需要一次蒸汽作为加热介质，避免的能源的浪费，可节约 85% 的能源。是一种应用广泛的结晶工艺，工艺成熟，耗电量约为 50~80kW·h/m³废水。MED 的核心是利用前一效产生的蒸汽作为后一效的加热蒸汽，重复利用此原理，可进一步降低鲜蒸汽的消耗。整个传热过程中，第一效的高加热温度和后一效的低沸点温度形成了总温差，分配于各效中，但随着效数的增加，其温差也越来越小，但为达到蒸发效率须依次增加换热面积，这样会使投资费用显著增加。

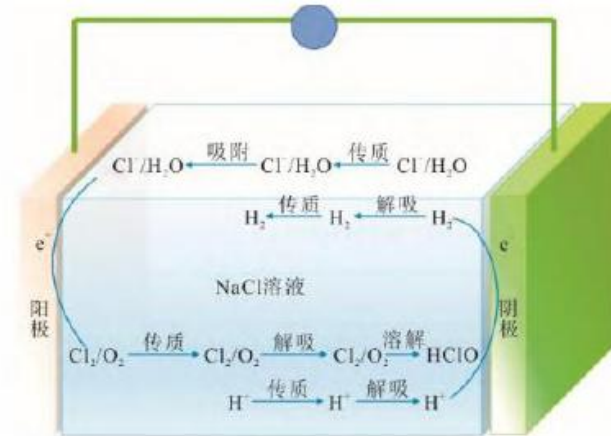


图 5.3 电解制氯工作原理图

电解制氯技术的一次投资成本相对较小，处理量大，运行成本也较小，主产物次氯酸钠具有多方面的应用潜力，该工艺具有强大的竞争优势。

2.适用范围

在满足环境管理的前提下，可用于脱硫废水处理。

3.应用案例

某火力发电企业，主要生产工艺包括：输煤、燃烧、热力、发电、除灰渣。

(1) 实施情况

为合理科学利用脱硫废水，化解环保风险，改变大量脱硫废水回用输煤的恶性循环，同时解决脱硫废水含固量影响脱硫废水处理系统达标运行、石灰乳加药系统吸潮板结堵塞等问题，企业决定采用蒸发结晶、烟道蒸发、电解制氯等多技术联合的方式对脱硫废水进行综合利用与改造。

(2) 实施效果

①环境效益

脱硫废水不外排，减少对土壤、水体等的污染，实现水资源的梯级利用，同时很大程度上节约水资源，对缓解水资源紧张具有重要意义。

②经济效益

该方案投资 1516.6 万元。该方案主要考虑减少脱硫废水对环境的影响，无直接经济效益。

（四）碳捕集、利用与封存

二氧化碳捕集、利用与封存（Carbon Capture, Utilization And Storage, 以下简称“CCUS”）是碳减排重要手段之一，CCUS 技术由 CO₂ 捕集、运输、利用和封存这四个环节组成。

1.碳捕集

捕集是指在燃烧过程不同阶段，通过物理吸收、化学吸收、吸附法等方法捕获并分离 CO₂ 的过程。碳捕集是 CCUS 项目中最关键技术，也是成本占比最高的环节。按燃烧的不同阶段，可分为燃烧前捕集、富氧燃烧和燃烧后捕集。

燃烧前捕集技术是指在一定的条件下将化石燃料经过气化变成合成气 H₂ 和 CO，再将合成气输送至水煤气转化器中，CO 与水在高温条件下生产 CO₂ 和 H₂，通过变换后产生高压气体和较高浓度的 CO₂，然后实现 CO₂ 捕集，分离出的 H₂ 可作为燃料使用。该技术的气化和水煤气转化过程能耗高、成本高且过程复杂，仅适用于某些特定领域。

富氧燃烧技术是指通过从空气中分离出氧气，与燃料混合，提高燃烧过程中氧气的含量，使燃烧更加充分，减少 CO 产生，且燃烧过程中产生的烟气经 CO₂ 捕集之后又可以进入燃烧炉与氧气、燃料一起燃烧。该方法可提高燃烧效率，减少燃料消耗，但需要额外建设氧气分离系统，投入成本较高。

燃烧后捕集技术是指将化石燃料燃烧后产生废气中的 CO₂ 分离和捕集的过程，分离捕集的方法主要包括溶液吸收法、吸附法和膜分离法等。燃烧后捕集技术操作简单，可直接在原有烟气处理系统改造，是目前技术最成熟、应用范围最广的碳捕集技术，但仍存在脱碳能耗较高、物料易损耗、设备容易腐蚀等一系列问题。同时，碳捕集成本受气源 CO₂ 浓度影响，浓度越高，成本越低。

2.碳运输

碳运输是指将捕集的 CO₂ 运送至利用场所或封存地点的过程，一般通过管道、船舶或罐车（公路或铁路）运输，各个运输方式的经济性、安全性、灵活性各有利弊，目前常用的是管道运输及车载公路运输。

3.碳利用

碳利用是指通过工程技术手段对捕集的 CO₂ 资源化利用的过程，包括地质利用、生物利用、化学利用等。碳利用技术在 CCUS 项目中具有独特地位，它能利用废碳产出具有高附加值化学品、高端材料等，能在短期内为高碳排放企业提供显著降碳效益。因此，各企业、科研机构都在积极研发投入低、效益高碳利用技术，碳利用技术得以快速发展，新技术不断涌现，包括重整制备合成气、制备液体燃料、合成含氧有机化合物单体（如醇类、醚类、有机酸、高分子聚合物等）、与富含钙、镁的大宗固体废弃物矿化利用、道路养护、微藻生物利用等。目前，各项利用技术大多属于中试阶段或工业示范阶段，还需进一步降本增效，以便进行商业化应用。

4.碳封存

碳封存是指将捕集的 CO₂ 注入于特定地质构造中，从而进行封存，实现与大气长期隔绝的技术过程，包括陆上或海上咸水层封存、枯竭油气田封存等技术。碳封存技术不具备附带经济价值且成本较高，主要依赖碳减排政策激励。

方案二十一：碳捕集、利用与封存 二氧化碳转化干冰

1.技术原理

二氧化碳气体转化干冰的原理较为简单，是通过改变压力和温度将捕集的二氧化碳气体固化成干冰。其过程是将捕集的二氧化碳气体输送至压缩提纯系统，通过压缩冷却的方式，将二氧化碳液化。液化

压缩后的二氧化碳属危化品，存在安全隐患。因此，可将液化压缩的二氧化碳再输送至干冰颗粒制造机中，转化成干冰，即能降低安全风险，又能提高产品收益。在干冰颗粒制造机中，当液化压缩的二氧化碳从高压环境移至大气压时，一部分液体会高速膨胀和蒸发，导致另一部分液体冷却至-109F（-78.3℃）的凝固点，从而制造出干冰颗粒，再将干冰颗粒通过挤压机挤压成块，之后装入干冰保温箱运输至下游企业。

2.适用范围

适用于二氧化碳减排。

3.应用案例

某火力发电企业，主要生产工艺包括：输煤、燃烧、热力、发电、除灰渣。企业在生产过程中会排放大量二氧化碳。

（1）实施情况

企业碳捕集测试平台配套建设的压缩提纯系统只能生产液态的压缩二氧化碳，液态的压缩二氧化碳属于危化品，存在安全隐患，且相关的危化品安全生产许可证、危化品经营许可证办理难度大，但干冰不属于危化品，且干冰价格约 2000 元/吨，销售干冰利润更可观。此外，生产干冰过程中可利用电厂内的压缩空气和廉价的厂用电等。因此，企业决定将液态二氧化碳转化成干冰进行销售。结合碳捕集测试平台，配套建设一套 1t/h 的二氧化碳转化干冰系统，建设内容主要包括：购置一台干冰造粒机(设计出力 1t/h)，购置块状压制机及柱状压制机各一台，空压机一台，同步建设一个 50-100m² 的干冰转化车间等。

（2）实施效果

①环境效益

以测试平台运行 5500h/年计算，预计年产液态二氧化碳 3850 吨，

干冰转化率取 2.75:1，即可年产干冰 1400 吨。

②经济效益

该方案投资 210 万元。厂房建设预计投资 100 万元，折旧年限 18 年，设备购买预计 110 万元，折旧年限 10 年；生产一吨干冰的生产成本约为 300 元，则：销售干冰的利润=干冰的销售额-折旧-生产成本=2000×1400-(1000000/18+1100000/10)-300×1400≈222 万元；直接销售液态二氧化碳的利润=400×3850=154 万元；销售干冰比销售液态二氧化碳多盈利约 68 万/年，投资回报期约 3 年。

方案二十二：碳捕集、利用与封存 微藻固碳项目

1.技术原理

微藻固碳技术是利用微生物将二氧化碳转化为生物质的过程，即海藻细胞通过利用 CO₂ 和光能进行光合作用合成有机物并释放氧气实现光合固碳。微藻由真核微藻（如硅藻、绿藻等）和原核微藻（如蓝藻等）组成，可以利用太阳能，通过光合作用将 CO₂ 转化为蛋白质、淀粉、脂类等生物质。

微藻固碳技术主要步骤包含藻种筛选、光生物反应、微藻采集、微藻利用等。在藻种筛选过程中，由于微藻种类繁多，各类微藻生长环境要求、固碳生长效率均有差异，需要对微藻进行筛选驯化，得到环境耐受性强、固碳生长效率高的微藻。筛选出的藻种将在光生物反应器中进行培育，需要为藻种提供光照、二氧化碳、营养物质等。同时，微藻对生长环境要求较高，需要严格控制影响微藻生长的环境因素，包括光照、温度、盐度、pH、营养成分、溶氧以及金属元素等，尤其是处理含有大量酸性物质的燃煤烟气时，还需要对烟气进行预处理。

根据形态不同，光生物反应器可分为开放式和封闭式，不同形态的反应器都存在一定的优点和缺陷。光生物反应器与微藻细胞光能利用率和固碳效率有着紧密联系，需要合理设计光生物反应器形态，同

时要控制光照条件、营养物质投加、二氧化碳输送等条件。

微藻培育过程为连续培育，由于微藻细胞较小、生物量较低，导致微藻采集成本占比较高，如何快速、高效地采集也是微藻固碳技术的难题之一。目前常见的采集方式有离心、絮凝、过滤、泡沫分离和浮集法等。在微藻利用方面，目前主要研究方向是用于生产生物能源产品，如生产生物柴油、提取油脂、厌氧消化制沼气等。其他研究方向包括：直接制成食品级干藻粉、藻片或胶囊等营养保健食品；提取营养成分（氨基酸、藻多糖、超氧化物歧化酶等）用于化妆及护肤品；提取多不饱和脂肪酸、生长因子等用于医药领域；直接制成营养价值高的优质饵料、饲料。

与传统的碳捕获方法相比，微藻固碳主要有以下优势：

- （1）能直接利用太阳能，相比于物理和化学法，节省大量能源。
- （2）微藻固碳过程环境友好，代谢物中无二次污染物。
- （3）微藻的光合作用效率是目前地球生物中最高的，是陆生植物的 10 到 50 倍。
- （4）微藻是水生生物，环境适应性强，可在沿海泥滩、盐碱地和沙漠中栽培，不与陆生植物争夺土壤。
- （5）微藻生物质中 50%左右都是碳，其生长可消耗大量 CO_2 ，实现固定和转化发电厂或其他工业废气中 CO_2 的目的。
- （6）微藻生物质含有丰富的脂类和碳水化合物等成分，可生产高附加值生物质产品。

2.适用范围

适用于二氧化碳减排。

3.应用案例

某火力发电企业，主要生产工艺包括：输煤、燃烧、热力、发电、

除灰渣，企业生产过程中会排放大量二氧化碳。

(1) 实施情况

为降低烟气二氧化碳浓度，企业建设了一套 200-300m³ 的微养殖封闭式玻璃温室，采用开放式跑道池为主、立柱封闭式管道反应器为辅的混合养殖方式。与传统跑道池微藻反应器相比，立柱式微藻光合反应器使每亩微藻产量和固定二氧化碳量提高了 5 倍，且立柱式反应器结构紧凑，光照条件优越，大大减少了微藻固碳设备的占地面积。

(2) 实施效果

①环境效益

方案实施后，根据企业的统计，每年可捕集 2 万吨二氧化碳，有利于减缓温室效应。

②经济效益

方案总投资为 300 万元，可通过对微藻养殖、产品开发技术研究，扩大养殖规模，开发“养殖-产品-销售”产业链，带来可观的经济效益。根据相关测算，从燃煤电厂烟气中对 15%浓度二氧化碳提纯捕集压缩成本约为 250 元/吨，但是通过微藻固碳则能实现碳利用，创造经济价值。目前市场上，1 吨食品级的藻粉可以卖到 4 万元，饲料级的价格为 1 吨 1-2 万元。

附录 I



电子版扫码查看

深圳市重点行业清洁生产技术汇编（2021年）

序号	方案类型	方案名称
金属表面处理及热处理加工业		
1	原辅材料替代	方案一：前处理工序 活化酸替代硫酸
2		方案二：磷化工序 无氮磷化液替代含氮磷化液
3	技术工艺改进	方案三：退镀工序 电解退镀替代化学退镀
4	设备升级改造	方案四：危废减量 污泥压滤机改造
5	废弃物的处置	方案五：前处理工序 废清洗液蒸馏回收与循环利用
6		方案六：前处理工序 膜分离法回收利用除蜡液
7		方案七：废水治理 高浓度废水分类收集处理
8		方案八：废水治理 废水深度处理零排放处理系统
9		方案九：危废减量 高浓度废液低温蒸馏浓缩减量
电子电路制造业		
10	过程控制	方案十：磨板、清洗工序 生产设备加装感应装置
11	设备升级改造	方案十一：曝光工序 全自动 LDI 曝光机替代人工曝光
12		方案十二：显影、蚀刻、去膜工序 新型 DES 生产线代替传统的显影、蚀刻、去膜工序
13		方案十三：黑孔工序 黑孔线升级改造
14		方案十四：电镀工序 VCP 垂直连续电镀线代替传统电镀线
15		方案十五：字符印刷工序 自动字符打印机替代丝网印刷



电子版扫码查看

附录 II

深圳市重点行业清洁生产技术汇编（2022 年）

序号	方案类型		方案名称
1	原辅材料和能源替代	低挥发性有机物原辅材料替代高挥发性有机物原辅材料	方案一：涂层整理工序 水性聚丙烯酸类整理剂替代聚氨酯树脂类整理剂
2			方案二：喷涂工序 水性漆替代油性漆
3			方案三：涂布工序 环保压敏胶替代高 VOCs 压敏胶
4			方案四：印刷工序 环保油墨替代油性油墨
5			方案五：洗网工序 环保锡膏清洗溶剂替代有机锡膏清洗剂
6			方案六：过油工序 水性吸塑油替代油性吸塑油
7		低毒低害原辅材料替代有毒有害原辅材料	方案七：钝化工序 有机保护膜代替铬保护膜
8			方案八：中和工序 环保除灰剂替代硝酸
9			方案九：封孔工序 无镍封孔剂替代含镍高温封孔剂
10			方案十：贯孔工序 铜光剂更换提升镀孔铜贯率
11		可降解材料替代难降解材料	方案十一：塑料制品业 全生物降解塑料替代聚乙烯原料
12		清洁能源	方案十二：清洁能源 光伏发电
13	技术工艺改进		方案十三：涂布工序 改变涂布方式降低稀释剂用量
14			方案十四：喷涂工序 减少涂装层数减少 VOCs 产生
15			方案十五：制版工序 免冲洗版替代传统热敏版
16	设备升级改造	设备自动化升级改造	方案十六：喷涂工序 喷漆自动化改造
17			方案十七：印花打样工序 引进自动滴定打样机
18			方案十八：进料工序 自动配料系统替代人工配料
19			方案十九：印刷设备清洗工序 橡皮布自动清洗装置替代人工清洗
20			方案二十：电镀生产线 自动化升级改造
21	设备节能升级改造	设备节能升级改造	方案二十一：废水处理曝气工序 磁悬浮离心鼓风机替代空气悬浮离心鼓风机
22			方案二十二：空压机节能改造 永磁变频双极压缩螺

序号	方案类型		方案名称	
			杆式空压机替代传统空压机	
23			方案二十三：无功补偿 新增有源电力滤波器提高用电设备功率因数	
24			方案二十四：余热回收 空压机余热回收	
25			方案二十五：余热回收 高温冷凝水余热回收	
26			方案二十六：电机节能改造 电机增加变频器	
27			方案二十七：工件保温 增设保温炉车避免热量损失	
28			方案二十八：制冷机节能改造 添加极性制冷剂油提高制冷效率	
29			方案二十九：冷冻机节能改造 高效磁悬浮冷冻机替代螺杆冷冻机	
30		其他	方案三十：锅炉改造 锅炉低氮改造	
31			方案三十一：印染工序 染色工艺低浴比改造	
32			方案三十二：印花工序 数码喷墨印花代替圆网印花	
33	过程控制		方案三十三：废水处理设施 精确曝气系统替代传统曝气方式	
34			方案三十四：真空镀工序 真空镀膜低温工艺	
35	废弃物的回收与利用		方案三十五：冷凝水回用 洗水车间冷凝水回用	
36			方案三十六：铜粉回收 磨板清洗工序加装铜粉回收机	
37			方案三十七：印刷工序 润版液过滤循环回用	
38	废弃物的处置	废气的收集与治理	方案三十八：有机废气收集 提高废气收集效率	
39				方案三十九：有机废气治理 冷凝法处理有机废气
40				方案四十：有机废气治理 沸石转轮+蓄热式燃烧法（RTO）/蓄热式催化燃烧法（RCO）装置处理有机废气
41				方案四十一：污水站废气治理 污水处理系统废气收集与治理
42		废水治理	方案四十二：含重金属废水治理 电絮凝处理重金属废水	
43	危废减重		方案四十三：渗滤液浓缩液处理	
44			方案四十四：增设膜渣减重机	
45			方案四十五：蒸汽机械再压缩技术（MVR）	

序号	方案类型		方案名称	
46			蒸馏浓缩分离 技术处理工业 废液	扩容蒸发/闪蒸技术
47				真空蒸馏技术